



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πλασμονικές (DLSPP) Διατάξεις Ολοκληρωμένες
σε Πυρίτιο (Si) για Οπτικά Δίκτυα Διασύνδεσης
Υπολογιστικών Συστημάτων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Κ. Γιαννούλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Πλασμονικές (DLSPP) Διατάξεις Ολοκληρωμένες
σε Πυρίτιο (Si) για Οπτικά Δίκτυα Διασύνδεσης
Υπολογιστικών Συστημάτων**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ιωάννης Κ. Γιαννούλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Συμβουλευτική Επιτροπή : Ηρακλής Αβραμόπουλος

Νικόλαος Ουζούνογλου

Κωνσταντίνος Δέρβος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 20^η Ιουλίου 2017.

.....
Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Δέρβος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Νίκος Πλέρος
Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

.....
Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθανάσιος Παναγόπουλος
Αναπληρωτής Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βυρσωκινός
Λέκτορας Α.Π.Θ.

.....

Ιωάννης Κ. Γιαννούλης

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ιωάννης Κ. Γιαννούλης, 2017.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ.....	9
ABSTRACT	11
KEYWORDS	13
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	21
1.1 Η ανάπτυξη των εφαρμογών Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλής Επίδοσης (High Performance Computing-HPC)	21
1.1.1 Η ανεκπλήρωτη πρόκληση της 3 ^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης.....	21
1.1.2 Η αλληλεπίδραση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και των Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλών Επιδόσεων (HPC).....	22
1.2 Η εξέλιξη των Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλής Απόδοσης	24
1.2.1 Η εξέλιξη των επιδόσεων Υπερυπολογιστών	24
1.2.2 Οι διαστάσεις του νόμου του Moore	28
1.2.3 Μονάδες επεξεργασίας σε επίπεδο τσιπ	30
1.3 Η συμφόρηση στις διασυνδέσεις σε κλίμακα τσιπ των μονάδων επεξεργασίας (Interconnect bottleneck).....	32
1.3.1 Ο περιορισμός της φυσικής στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις	32
1.3.2 Η ανάδειξη της οπτικής τεχνολογίας για μικρής κάλυψης διασυνδέσεις	34
1.4 Η ανάδειξη των Φωτονικών Κόμβων (PNoCs) για τη βελτίωση της λειτουργίας των Multi-Core Processors	38
1.4.1 Ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ φωτονικής τεχνολογίας και ηλεκτρονικών για την αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων	38
1.5 Η πλασμονική τεχνολογία για διασυνδέσεις σε κλίμακα του τσιπ (Plasmonic Interconnects).....	43
1.5.1 Η φυσική της πλασμονικής τεχνολογίας	46
1.6 Η ετερο-ολοκλήρωση πλασμονικών και δομών Si τεχνολογίας για την ανάπτυξη δομών δικτύου σε τσιπ.....	53
1.7 Συμβολή και δομή της διδακτορικής διατριβής	56
Αναφορές Εισαγωγής.....	62
2. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (SI).....	75

2.1 Σταθμός Εργασίας (Probe Station) για το χαρακτηρισμό φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PICs)	78
2.2 Κυματοδηγοί SOI (Silicon-On-Insulator) τεχνολογίας	81
2.2.1 Η επιλογή της τεχνολογίας SOI κυματοδηγών	82
2.2.2 Η σχεδίαση και η ανάπτυξη των SOI κυματοδηγών Rib-τύπου	83
2.2.3 Απώλειες διάδοσης των SOI κυματοδηγών Rib τύπου	85
2.3 Η σύζευξη φωτός μεταξύ της ίνας και της παθητικής πλατφόρμας των SOI κυματοδηγών τύπου-Rib	87
2.3.1 Το πρόβλημα της σύζευξης φωτός από/προς το οπτικό τσιπ.....	87
2.3.2 Το θεωρητικό πλαίσιο που διέπει το πρόβλημα της σύζευξης με χρήση συζευκτών περίθλασης.....	90
2.3.3 Σχεδιαστικές παράμετροι συζευκτών περίθλασης και κατασκευή δομών συζευκτών περίθλασης.....	93
2.4 Χαρακτηρισμός SOI δομών συζευκτών περίθλασης (TM Grating Couplers) χωρίς τη χρήση SOG στην κορυφή της δομής	95
2.4.1 Μετρήσεις φασματικού χαρακτηρισμού και παραμέτρων δομής.....	95
2.4.2 Μετρήσεις απωλειών μέσω της μεθόδου μέτρησης σε δείγματα μεταβλητού μήκους (cutback method)	99
2.5 Χαρακτηρισμός SOI δομών συζευκτών περίθλασης (TM Grating Couplers) εφοδιασμένοι με SOG	102
2.5.1 Σχεδιασμός και κατασκευή TM Συζευκτών Περίθλασης με χρήση SOG στο πάνω μέρος	102
2.5.2 Πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού	104
2.6 Σύνοψη Κεφαλαίου	109
Αναφορές 2^{ου} Κεφαλαίου	111
3. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΜΩΝ DLSPP ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΩΝ ΕΤΕΡΟ-ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ Si ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ	119
3.1 Ο πλευρικός περιορισμός των SPP ρυθμών μέσω της χρήσης διηλεκτρικών λωρίδων	121
3.1.1 Η ανάγκη του πλευρικού περιορισμού του SPP ρυθμού για την υπόσχεση λειτουργικών ολοκληρωμένων δομών.....	121
3.1.2 Οι αρχές της διηλεκτρικής κυματοδότησης στον περιορισμό των SPP ρυθμών μέσω των DLSPP δομών	123
3.2 DLSPP Κυματοδηγοί διηλεκτρικής λωρίδας PMMA ετερο-ολοκληρωμένοι στην SOI πλατφόρμα	127
3.2.1 Σχεδιασμός DLSPP κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση πολυμερούς	127
3.2.2 DLSPP κυματοδηγός διηλεκτρικής φόρτισης PMMA ετερο-ολοκληρωμένος σε SOI παθητική πλατφόρμα.....	129
3.2.2 Σχεδίαση, Μοντελοποίηση και Ανάπτυξη της Si-to-DLSPP δομής διασύνδεσης	131
3.2.4 Ατέλειες ευθυγράμμισης και σφάλματα κατά την κατασκευή των δομών Si-to-DLSPP διασύνδεσης.....	135
3.2.5 Πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού απωλειών DLSPP κυματοδηγών με διηλεκτρική φόρτιση PMMA	136

3.3 Πειραματική αξιολόγηση διάδοσης πληροφορίας στα 10Gb/s από τον DLSPP κυματοδηγό	140
3.3.1 Το θεωρητικό όριο υποστήριξης μετάδοσης πληροφορίας μέσω DLSPP κυματοδηγού.....	140
3.3.2 Μετάδοση 10Gb/s NRZ-OOK σήματος πληροφορίας.....	141
3.3.3 Πειραματική Διάταξη για την υλοποίηση της διάταξης στα 10 Gb/s.....	142
3.3.4 Αποτελέσματα πειραματικής αξιολόγησης.....	143
3.4 Διάδοση 160Gb/s OTDM οπτικών σημάτων με οπτικούς παλμούς διάρκειας fs	145
3.4.1 Πειραματική Διάταξη για την υλοποίηση της διάταξης στα 160 Gbit/s.....	146
3.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα.....	148
3.5 Σύνοψη Κεφαλαίου	153
Αναφορές 3^{ου} Κεφαλαίου	154
4. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΟΜΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΟ-ΟΠΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ	161
4.1 Ανάπτυξη WRR δομών βασισμένων στην DLSPP τεχνολογία	164
4.1.1 Αρχή λειτουργίας πλασμονικών WRR δομών	164
4.1.2 Συνάρτηση μεταφοράς και φασματικά χαρακτηριστικά πλασμονικών WRRs.....	166
4.1.3 DLSPP WRRs για εφαρμογές μεταγωγής πληροφορίας.....	169
4.2 Θερμο-οπτικός έλεγχος WRR δομής που βασίζεται σε DLSPP κυματοδηγούς από PMMA	173
4.2.1 Σχεδιασμός και διάταξη πλασμονικής δομής WRR	173
4.2.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός WRR σε σταθμό εργασίας του Ε.Φ.Ε.	176
4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού WRR βασισμένη σε DLSPP δακτυλίου PMMA	177
4.2.4 Θερμική συμπεριφορά της δομής του DLSPP δακτυλίου διέλευσης με PMMA σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του διακόπτη.....	183
4.3 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού δομών δακτυλίων από Cyclomer που ελέγχονται θερμο-οπτικά	186
4.3.1 Δομή μεταγωγής βασισμένη σε DLSPP φίλτρα.....	188
4.4 Σύνοψη Κεφαλαίου	193
Αναφορές 4^{ου} Κεφαλαίου	195
5. ΥΒΡΙΔΙΚΑ DLSPP ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ ΜΕΤΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΚΟΠΤΩΝ ΑΣΥΜΜΕΤΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΩΝ MACH-ZEHNDER (A-MZIS) CYCLOMER	201
5.1 Ο θερμο-οπτικός έλεγχος συμβολομετρικών δομών MZI εφοδιασμένο με DLSPP κυματοδηγούς	202
5.1.1 Ενεργός ηλεκτρικός έλεγχος πλασμονικών διατάξεων MZI	202
5.1.2 Ενεργός έλεγχος DLSPP διατάξεων MZI μέσω θερμο-οπτικού μηχανισμού .	204

5.2 Πρώτη γενιά ετερο-ολοκλήρωσης DLSP διακοπών MZI με υλικό Cyclomer σε παθητική SOI πλατφόρμα	211
5.2.1 Παθητική Si πλατφόρμα για τη φιλοξενία της ετερο-ολοκληρωμένης δομής..	212
5.2.2 Ετερο-ολοκλήρωση DLSP δομών MZI με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer στην παθητική SOI πλατφόρμα.....	216
5.3 Δεύτερη γενιά ετερο-ολοκληρωμένων DLSP διακόπτες MZI για θερμο-οπτικό έλεγχο σε παθητική SOI πλατφόρμα	221
5.3.1 Παρουσίαση ετερο-ολοκληρωμένων διακοπών και βασικές σχεδιαστικές παράμετροι της μάσκας.....	222
5.3.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός της επίδοσης του Si τμήματος του τσιπ	223
5.3.3 Πειραματικός χαρακτηρισμός της επίδοσης των πλασμονικών A-MZI διακοπών του τσιπ	225
5.3.4 Στατικός θερμο-οπτικός χαρακτηρισμός της επίδοσης των πλασμονικών διακοπών εφοδιασμένων με Cyclomer	229
5.3.5 Πειραματικές μετρήσεις σταθερότητας για κύκλους θέρμανσης του πλασμονικού διακόπτη	235
5.4 Πειραματική επίδειξη λειτουργίας DLSP διακόπτη βασισμένου σε συμβολόμετρο MZI από Cyclomer στα 10Gb/s	237
5.4.1 Στατικός και δυναμικός πειραματικός χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού ελέγχου του διακόπτη MZI.....	239
5.4.2 Πειραματική επίδειξη λειτουργίας διακόπτη σε περιβάλλον κίνησης πληροφορίας στα 10Gb/s.....	247
5.4.3 Συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης του πλασμονικού διακόπτη A-MZI εφοδιασμένου με Cyclomer	251
5.5 Σύνοψη Κεφαλαίου	254
Αναφορές 5^{ου} Κεφαλαίου	255
6. ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	261
6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων της διατριβής	261
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	267
Αναφορές Κεφαλαίου 6	274
Παράρτημα Α. Λίστα εργασιών Υποψήφιου Διδάκτορα κατά την έρευνα του στην πορεία της διατριβής του	277
Παράρτημα Β. Συντομεύσεις	283

Περίληψη

Στα πλαίσια των νέων αναγκών των διασυνδέσεων των υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων για τεράστια χωρητικότητα διαύλων, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης, η αντικατάσταση των ηλεκτρικών διασυνδέσεων με οπτικές αποτελεί ήδη πρακτική λύση υιοθετώντας φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Ενώ η συμφόρηση της χωρητικότητας και η ενεργειακή κατανάλωση στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις έχει προσεγγίσει τα όρια της τεχνολογίας για την επικοινωνία σε κλίμακα τσιπ, οι οπτικές τεχνολογίες περιορίζονται από τον φυσικό φραγμό του ορίου περίθλασης μην επιτρέποντας στις φωτονικές δομές να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματά τους σε μικρό μέγεθος. Οι πλασμονικές διασυνδέσεις καλύπτουν αυτό το κενό καθώς στέκονται ανάμεσα στις δύο τεχνολογίες και επιτρέπουν τη γεφύρωση των πλεονεκτημάτων της οπτικής τεχνολογίας σε διαστάσεις nm-κλίμακας που επιτρέπει η τεχνολογία των ηλεκτρονικών την ίδια στιγμή που υπόσχονται χαμηλές καταναλώσεις ισχύος για τις ενεργές λειτουργίες που απαιτεί το δίκτυο σε τσιπ.

Το βασικό αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μελέτη, ο χαρακτηρισμός και η πειραματική επίδειξη της πλασμονικής τεχνολογίας (DLSP) για την ανάπτυξη δομών μεταγωγής που θα εφοδιάσουν τα δίκτυα σε τσιπ, ικανά να προσφέρουν τεράστια χωρητικότητα, μικρό μέγεθος και χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, παρουσιάζεται ένα υβριδικό σχήμα ολοκληρωμένων δομών όπου ενεργές δομές DLSP κυματοδηγών ετερο-ολοκληρώνονται σε παθητικές πλατφόρμες πυριτίου (SOI). Η αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων των δύο τεχνολογιών υπαγορεύει τη χρήση της Si φωτονικής τεχνολογίας για τις παθητικές λειτουργίες της πλατφόρμας με χαμηλές απώλειες διάδοσης, χαμηλές απώλειες διασύνδεσης στο τσιπ και τη χρήση της DLSP τεχνολογίας για τις ενεργές λειτουργίες της δομής όπου το μικρό μέγεθος και η ενεργειακή κατανάλωση παίζουν καθοριστικό ρόλο. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται η επιτυχής λειτουργία του 2x2 πλασμονικού διακόπτη αξιοποιώντας τον θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου.

Η επιλογή της παθητικής πλατφόρμας που θα φιλοξενήσει τις ενεργές πλασμονικές δομές βασίζεται στην ανάπτυξη SOI κυματοδηγών Rib-τύπου που χαρακτηρίζονται από χαμηλές απώλειες διάδοσης και προσφέρουν τη δυνατότητα για υλοποίηση δομών σύζευξης που διασφαλίζουν την επικοινωνία από/προς την ίνα και το τσιπ. Κατά την πορεία της μελέτης, σχεδιάστηκαν και αξιολογήθηκαν δύο διαφορετικές δομές κυματοδηγών οι οποίες επιτρέπουν τη σύζευξη και την κυματοδηγηση του TM πολωτικού ρυθμού πάνω στο τσιπ. Πραγματοποιήθηκαν εκτενείς μετρήσεις χαρακτηρισμού σε κατακόρυφο σταθμό εργασίας για δείγματα συζευκτών με διαφορετικές τιμές περιόδου με σκοπό τον προσδιορισμό των απωλειών σύζευξης των δομών και της απώλειας διάδοσης με χρήση πειραματικών τεχνικών (cutback method) και της φασματικής απόκρισης.

Η ανάπτυξη DLSPP κυματοδηγών διερευνάται διεξοδικά καθώς παρουσιάζονται δομές πλασμονικών κυματοδηγών με διηλεκτρική λωρίδα από PMMA ετερο-ολοκληρωμένες σε SOI παθητική πλατφόρμα που έχει επιλεγεί στην πρώτη φάση της διατριβής. Ο σχεδιασμός και η πειραματική αξιολόγηση της Si-to-DLSPP διεπαφής παρουσιάζεται επιδεικνύοντας ικανοποιητικές τιμές απωλειών σύζευξης στο σημείο διεπαφής για τον TM πολωτικό ρυθμό από τους SOI κυματοδηγούς Rib-τύπου στον DLSPP κυματοδηγό. Οι απώλειες διάδοσης του πλασμονικού ρυθμού και οι επιδόσεις των κυματοδηγών μελετήθηκαν για τα δείγματα κυματοδηγών μεταβλητού μήκους στη μάσκα που αξιολογήθηκε πειραματικά στο σταθμό εργασίας. Η διάδοση σήματος πληροφορίας μέσα από τον DLSPP κυματοδηγό αξιολογήθηκε για σήματα πληροφορίας 10Gb/s με χρήση κωδικοποίησης τύπου NRZ με σκοπό τον προσδιορισμό της παραμόρφωσης στην ποιότητα του σήματος. Πείραμα μετάδοσης fs-κλίμακας παλμών στα 160Gb/s αξιοποιώντας την οπτική πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου (OTDM) παρουσιάζεται στη συνέχεια με χρήση παλμών με RZ κωδικοποίηση.

Η εισαγωγή του σχήματος μεταγωγής με χρήση πλασμονικού απλού δακτυλίου (WRR) βασισμένο σε DLSPP κυματοδηγό μελετάται στη συνέχεια. Ο σχεδιασμός, η κατασκευή και ο στατικός πειραματικός χαρακτηρισμός της λειτουργίας του μικρο-δακτυλίου παρουσιάζεται μέσω μεγάλου αριθμού πειραματικών μετρήσεων. Ο ενεργός έλεγχος του διακόπτη από PMMA αξιοποιώντας τον θερμο-οπτικό μηχανισμό μελετάται διεξοδικά εστιάζοντας στις θερμικές παραμέτρους και την κατανάλωση ισχύος. Η αξιοποίηση πολυμερικών υλικών που εμφανίζουν υψηλότερες τιμές θερμο-οπτικού συντελεστή (TOC) για την επίτευξη χαμηλότερης κατανάλωσης ισχύος είναι το κίνητρο για τη χρήση του πολυμερούς Cyclomer για την επίδειξη διπλών δακτυλίων που ελέγχονται θερμο-οπτικά με σκοπό την υλοποίηση κυκλώματος μεταγωγής.

Η μελέτη του ασύμμετρου συμβολομετρικού διακόπτη Mach-Zehnder (A-MZI) εισάγεται στη συνέχεια με σκοπό την αξιοποίηση του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου για την επίτευξη της λειτουργίας μεταγωγής που υποστηρίζει τη λειτουργία WDM πολυπλεξία για αύξηση χωρητικότητας. Μεγάλος αριθμός πειραματικών μετρήσεων εστιάζει στον προσδιορισμό της στατικής και δυναμικής λειτουργίας του A-MZI διακόπτη εφοδιασμένου με το πολυμερές Cyclomer ενώ ταυτόχρονα μελετήθηκε η επίδραση της ετερο-ολοκλήρωσης πλασμονικών δομών στην ποιότητα της SOI πλατφόρμας. Η επίδοση του A-MZI διακόπτη σε περιβάλλον πραγματικής κίνησης δεδομένων μελετήθηκε μέσα από την επίδειξη μεταγωγής συνεχούς κίνησης δεδομένων στα 10Gb/s NRZ κωδικοποίησης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτέλεσαν την πρώτη πειραματική επιβεβαίωση ωφέλειας ως προς το αποτύπωμα μιας ενεργής πλασμονικής δομής που αποτελείται από υλικό με μεγάλο θερμο-οπτικό συντελεστή, έχοντας κατά συνέπεια θετικό αντίκτυπο στον παράγοντα αξιολόγησης που βασίζεται στην κατανάλωση ισχύος, το χρόνο απόκρισης και το ενεργό μήκος του διακόπτη.

Λέξεις κλειδιά

Υπολογιστικά Συστήματα υψηλών επιδόσεων, Οπτικές Διασυνδέσεις, Πολαριτόνια Επιφανειακών Πλασμονίων, Οπτική διάδοση κάτω από το όριο περίθλασης, Φωτονική τεχνολογία Πυριτίου, Τεχνολογία Πυριτίου σε Μονωτή, Πλασμονικός Κυματοδηγός Διηλεκτρικής Φόρτισης, Ενεργές Πλασμονικές Διατάξεις, Θερμο-οπτικός μηχανισμός, Συντονιστής Δακτυλίου κυματοδηγού, Ασύμμετρο Συμβολόμετρο Mach-Zehnder, Δίκτυο σε Τσιπ, Στοιχείο Μεταγωγής, Υβριδικός Δρομολογητής, Οπτική πολυπλεξία στο Πεδίο του Χρόνου

Abstract

Over the last years, the emerging demands in the field of HPC (High Performance Computing-HPC) interconnects for ultra-high capacity, low energy consumption, high integration density has pushed towards practical solutions based on optical interconnects instead of the electrical approaches. This paradigm shift has been implemented employing the portfolio of Photonic Integrated Circuits (PICs). Since the electrical bottleneck sets the capacity and power consumption limits for the on-chip and chip-to-chip communication, the diffraction-limit introduces the physical limitations in the world of integrated optics. Plasmonic interconnects overcome the above barriers by combining the nm-scale size of electrical interconnects with the unlimited bandwidth and low power consumption of optical interconnects into the same technology approach.

The main objective of this PhD thesis is the design, characterization and experimental demonstration of active plasmonic elements based on DLSP waveguides for on-chip switching configurations. The great promise of the proposed DLSP switching concept is the ultra-high throughput, small footprint and low power consumption. The implementation path is based on the development of a hybrid router consisting of active circuitries based on DLSP waveguides and passive circuitries based on SOI photonic waveguides. This hybrid integration topology is based on the comparative benefits of both integration technologies: The low-loss propagation and low-coupling loss of SOI platform for passive functionalities and the sub-wavelength size and inherently low-energy consumption of DLSP platform for active functionalities. In this line, the 2x2 switching functionality is presented employing the thermo-optic effect as the on-chip switching mechanism.

The passive platform that hosts the active plasmonic element is based on the development of Rib-type SOI waveguides which offer low-loss on-chip communication and low fiber-to-chip coupling loss. Two different types of SOI waveguides were designed, fabricated and tested to ensure the optimum performance for guiding the TM polarization mode on the Silicon platform. A large number of experimental studies were carried out to evaluate the performance of passive SOI circuitries on the probe station. Experimental results focusing on the coupling loss of grating couplers, propagation loss of Rib-type waveguides were also included following the cutback method for a large set of grating structures of different design parameters.

The development of DLSP waveguides was pursued by presenting PMMA-loaded DLSP waveguide structures hetero-integrated on SOI passive platform. The design and experimental evaluation of Si-to-DLSP interfacing point is successively discussed showing low coupling loss between the silicon waveguides and the plasmonic part for the TM polarization mode. The propagation loss of plasmonic waveguides as well the quality

performance of PMMA-loaded structures was also performed through experimental measurements on probe station of PCRL premises. The experimental evidence of data capture was demonstrated showing 10Gb/s NRZ-OOK transmission through a 60- μm long dielectric loaded SPP waveguide. High-rate OTDM transmission of fs-scale RZ optical data pulses at 160Gb/s through the Si-DLSPP straight waveguide was also experimentally investigated.

The WRR-based (Waveguide Ring Resonator WRR) switching concept using active DLSP components is thoroughly discussed in the next chapter. The design, fabrication and static optical characterization are reported using a large number of experimental results. The PMMA-loaded plasmonic microrings which are controlled via thermo-optic mechanism were experimentally evaluated focusing mainly on the energy consumption and other thermal-related metrics. Taking a step forward, using polymers for dielectric loadings that exhibit higher TOC (Thermo-Optic Coefficient-TOC) values are desirable to drastically reduce the switching power. In this line, the polymer Cyclomer has been adopted to experimentally demonstrate thermo-optically controlled dual-ring switching configurations.

At the end, the switching concept based on Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer (A-MZI) is introduced. The presented switching element relies on the use of thermo-optic control on A-MZI branches to achieve high quality 2x2 switching operation on WDM architectures. Experimental measurements are presented to address the static and dynamic features of the Cyclomer-loading DLSP switch while the impact of hetero-integration of active plasmonics on the silicon chip was also under test. The performance evaluation was carried out under real traffic conditions by experimentally demonstrating the successful switching operation of 10 Gb/s NRZ-encoded continuous data traffic. The obtained results are reported as the first experimental evidence of the proper switching credentials of active plasmonics based on Cyclomer loading SPP waveguides. To quantify the above benefits owing to the footprint reduction enabled by using Cyclomer as the polymer loading instead of PMMA, we introduced a performance factor (figure of merit) that associates the power consumption, the response time and the active length of a switching element.

Keywords

High Performance Computing (HPC), Optical Interconnects, Surface Plasmon Polaritons (SPPs), Sub-diffraction Optics, Si Photonics, Silicon On Insulator (SOI), Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton (DLSPP), Active Plasmonics, Thermo-optic mechanism, Waveguide Ring Resonator (WRR), Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer (A-MZI), Network on Chip (NoC), Switching Element, Hybrid Router, Optical Time Domain Multiplexer (OTDM).

Ευχαριστίες – Αντί Προλόγου

Η στιγμή που θα έφτανα να γράψω τις ευχαριστίες τη θεωρούσα ως μια πρόκληση καθώς θα έπρεπε να παρέμβει και το συναίσθημα στο κάδρο της διατριβής, που θέτει ένα πλαίσιο που διέπεται ολοκληρωτικά από τη λογική. Στο βαθμό λοιπόν που είναι αποδεκτή αυτή η μίξη του ψυχρού με το θερμό, της λογικής με το συναίσθημα, καλούμαι να διατυπώσω τις ευχαριστίες μου στους πολλούς και τα πολλά που με βοήθησαν στην πορεία μου προς την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Η αναφορά μου στον Καθηγητή Ηρακλή Αβραμόπουλο για να είναι ζωντανή θα πρέπει να ξεκινά από ένα ευχαριστώ που με επέβλεψε ένας Άνθρωπος που τοποθετείται στην Καλή πλευρά της ζωής με το βάρος και την αναγνώριση που συγκεντρώνει για μένα ο όρος αυτός. Για να είναι πραγματική, θα αναγνωρίσει σε έναν επιστήμονα το χάρισμα και την ικανότητα να μεταφέρει με επιτυχία τις Αρχές της Φυσικής σε ένα εργαστήριο τεχνολογίας, όπως είναι το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Για να είναι επίκαιρη στους προβληματισμούς της εποχής, θα αναγνωρίσει τη συνεισφορά ενός διευθυντή εργαστηρίου που κατάφερε να δημιουργήσει μια ερευνητική ομάδα στο Δημόσιο Πανεπιστήμιο και να την κρατά ανταγωνιστική στην ερευνητική περιοχή της Φωτονικής κόντρα στις δυσκολίες των καιρών. Αποτέλεσμα να έχει δημιουργήσει τις συνθήκες ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία και η εξέλιξη νέων ανθρώπων στον τόπο τους μέσα από τη δυνατότητα για ερευνητική αναζήτηση, εμβάθυνση στο αντικείμενο των οπτικών.

Το αρχικό πλαίσιο που διέπει τις ευχαριστίες έτσι και αλλιώς 'άνοιγε την πόρτα' σε μια ειδική αναφορά στον Επίκουρο Καθηγητή του ΑΠΘ Νίκο Πλέρο ο οποίος καταφέρνει να συμβιβάσει μια πραγματικά απαιτητική συνύπαρξη που σπάνια τη συναντάς: μεταξύ ενός ανθρώπου που είναι πραγματική κληρονομιά για την επιστημονική και ερευνητική κοινότητα της χώρας μας και ταυτόχρονα ένας απείθαρχος χαρακτήρας γεμάτος αυθορμητισμό που ακόμα και όταν κυνηγάει τους ανέμους βγαίνει νικητής... Νοιώθω πραγματικά τυχερός που συνεργάστηκα μαζί του, έκανα τα πρώτα μου βήματα στη Φωτονική μέσα από τη στενή συνεργασία μαζί του στα πλαίσια της έρευνας της παρούσας διατριβής.

Για τους συναδέλφους μου ερευνητές στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών, ένα μεγάλο ευχαριστώ στο βαθμό που αποτέλεσαν το σημαντικότερο στήριγμα στην καθημερινότητα των πειραμάτων, της μελέτης, έρευνας και της ερευνητικής αναζήτησης. Αισθάνομαι τυχερός που συνεργάστηκα με εξαιρετους ερευνητές δίνοντας μου τη δυνατότητα να εξελίξω τα εργαλεία της σκέψης μου και να μάθουμε μαζί στο πλαίσιο μιας ερευνητικής δομής που ευνόησε την έρευνα και τη δημιουργία. Καθώς όμως η ζωή εξελίσσεται σε ένα πλαίσιο δομών, συνθηκών, τυχαιοτήτων αλλά πάντα με πρωταγωνιστές

τους ίδιους τους ανθρώπους, θα ξεκινήσω μια ξεχωριστή αναφορά για τον καθένα που περάσαμε μαζί 7.5+ χρόνια. Ξεκινώ από το Δημήτρη Καλαβρουζιώτη που ανήκουμε στην ίδια γενιά και ξεκινήσαμε χρονικά μαζί τη διαδρομή στο ΕΦΕ. Αποτελεί ένα χαρισματικό ερευνητή με μεγάλες δυνατότητες και μεράκι για το αντικείμενο που καταπιάνεται όπως το αναγνωρίζουμε όλοι! Μαζί δώσαμε μάχες αναζητώντας σταθερά 50-60dB οπτικής ισχύος καθώς η υπόσχεση των μεγάλων ιδεών (δες plasmonics...!) πραγματώνεται πάντα σε ηρωικό κάδρο!χαχα! Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα καθώς συνέβαλλε στον εμπλουτισμό της μεθοδολογίας της έρευνας και αναζήτησης σε μεγάλο εύρος ζητημάτων καθώς έχει τη δυνατότητα να προσεγγίσει τεχνικά από..τη μετάδοση τριφασικής τάσης στα δίκτυα HE μέχρι τη διάδοση του φωτός κάτω από το όριο της περίθλασης!

Πηγαίνοντας στους παλιότερους του εργαστηρίου, θέλω να ευχαριστήσω αρχικά τον μεταδιδακτορικό ερευνητή του ΕΦΕ Δημήτρη Αποστολόπουλο που με καθοδήγησε σε ένα μεγάλο μέρος των ερευνητικών εργασιών που περιλαμβάνονται στη διατριβή μου ενώ ταυτόχρονα υπήρξε και ο ερευνητής που συνεργαστήκαμε σε μια σειρά ερευνητικών περιοχών και προγραμμάτων και με βοήθησε να διαχειριστώ πλήθος ζητημάτων με τις δεξιότητες που τον χαρακτηρίζουν στο πεδίο της οργάνωσης του εργαστηρίου και της λήψης αποφάσεων. Ένα ευχαριστώ στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Παρασκευά Μπακόπουλο που αποτέλεσε μια απέραντη πηγή τεχνικών δεξιοτήτων, βαθιάς γνώσης της περιοχής της Φωτονικής και μια δύναμη εγγύησης στο τεχνικό κάδρο για όποια περιοχή καταπιάστηκε στα πλαίσια αναγκών του εργαστηρίου και έτυχε να συνεργαστώ μαζί του. Το μόνο που μπορώ να του προσάψω είναι ο τεράστιος group index (n_g) που χαρακτηρίζει τα μεσημέρια μας στη λέσχη!!☺. Ένα ευχαριστώ στη μεταδιδακτορική ερευνήτρια Μαριλί Σπυροπούλου που συνεργαστήκαμε στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του RAMPLAS και με βοήθησε με την ηρεμία και τη μεθοδολογία της να προχωρήσω στα ερευνητικά μου βήματα. Αναγνωρίζοντας τη διπλωματική μου εργασία σαν προπτυχιακός φοιτητής της ΣΗΜΜΥ - με τη θεωρητική μελέτη του αναγεννητή SOA-MZI - σαν το σημείο αφετηρίας της διαδρομής μου στο ΕΦΕ, ένα ευχαριστώ στο μεταδιδακτορικό ερευνητή Χρήστο Κουλουμέντα με τον οποίο επιπλέον συνεργάστηκα σε πειράματα στα πρώτα χρόνια της πορείας της διατριβής μου.

Μια ειδική αναφορά και ένα μεγάλο ευχαριστώ στον ερευνητή Στέφανο Δρη ο οποίος βρίσκεται πλέον στο Βερολίνο. Πέρα από το βάθος της τεχνικής του συγκρότησης και του επιστημονικού του κριτηρίου του στην περιοχή του DSP, ένοιωσα τυχερός που -αν και δεν συνεργάστηκα σε έκταση στο τεχνικό πεδίο- συνέπεσα με έναν ερευνητή που είναι φορέας ενός υποδειγματικού μεθοδολογικού πλαισίου για την οργάνωση της ερευνητικής εργασίας και της αντίστοιχης κουλτούρας. Επιπλέον, βαθιά ριζοσπαστικός και στην κοινωνική του θεώρηση, τον αναφέρω για τους προβληματισμούς που μου γέννησαν οι - διαμορφωμένες από τις πλούσιες παραστάσεις του.. - τοποθετήσεις πάντα υπό το πρίσμα ενός πραγματικά Left Liberal! Ένα ευχαριστώ στην Catherine Baskiotis, μεταδιδακτορική ερευνήτρια στην περιοχή της Οπτικής με την οποία συνεργάστηκα το τελευταίο διάστημα πριν την

ολοκλήρωση της διατριβής μου εξετάζοντας ερευνητικά θέματα στην περιοχή της Κβαντικής Οπτικής δίνοντας μου τη δυνατότητα να ασχοληθώ με μια τόσο ... εξωτική ερευνητική περιοχή. Ευχαριστώ επίσης το μεταδιδακτορικό ερευνητή Γιάννη Λαζάρου καθώς συμπέσαμε στα πρώτα χρόνια μας στο ΕΦΕ και αναπτύξαμε πέρα από τη συνεργασία μας στα πλαίσια της έρευνας μας και μια όμορφη κοινωνική σχέση που την επαναφέρω συχνά στη σκέψη μου όταν επαναφέρω στη μνήμη μου τα πρώτα χρόνια στο διδακτορικό (Thanks και για τη βοήθεια στο review του PTL το 2011 στο γραφείο στον 3^ο όροφο με τη βοήθεια εκείνη τη μέρα μαζί με τον Πλέρο...!!!). Ένα ευχαριστώ επίσης και στον μεταδιδακτορικό ερευνητή Κωστή Χριστογιάννη, πραγματικό καύσιμο θετικής ενέργειας και διάθεσης που τα μεταφέρει αυτούσια και στις οργανωτικές του δεξιότητες!

Περνώντας στους νεότερους, ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου Υποψ. Διδάκτορες καθώς μαζί αφιερώσαμε αρκετό χρόνο για την οργάνωση των πειραμάτων αλλά και τις συζητήσεις που μας βάθυναν και βαθαιίνουν την αντίληψη μας γύρω από αρκετά τεχνικά ζητήματα. Από τα πειράματα σε με τους GaAs SOAs του RAMPLAS με τον Νίκο Ηλιάδη που καταθέσαμε αποθέματα... υπομονής, ρέντας (☺) για τη θερμική τους συμπεριφορά και επαναλαμβανόμενης προσπάθειας μέχρι τις συζητήσεις για το multipath fading στις ασύρματες ζεύξεις με τον Νίκο – το «κομπιουτεράκι» του εργαστηρίου που επεκτείνει με αξιέπαινο τρόπο το DSP οπλοστάσιο του PCRL και νοιώθω τυχερός που συνεργάστηκα μαζί του! Ένα ευχαριστώ στο Γιάννη Κανάκη που τον εκτιμώ ιδιαίτερα για τις αρχές, αντιλήψεις και τις αξίες του (αποφεύγω να αναφερθώ στα παιχνίδια του με τα λεξικά patterns τα οποία θέλουν off-line filtering για να αναδείξουν τον πραγματικό πλούτο τους!!) ενώ νοιώθω ταυτόχρονα πως έχει μεγάλο capacity δημιουργίας στην ερευνητική του διαδρομή! Ένα ευχαριστώ στο Χρήστο Σπαθαράκη που με τον έντονο δυναμισμό του και τη ροπή πρωτοβουλίας που τον χαρακτηρίζει τροφοδοτεί με τη φαντασία του εξωτικά concepts καλύπτοντας από modulation formats μέχρι ακτοπλοϊκούς αλγορίθμους και ωραίες ιστορίες στις μύτερες των εξόδων και 'φάσεις' στα νησιά του Αιγαίου! Η αναφορά μου στο Γιάννη Πουλόπουλο θα ξεκινήσει από τις διαστάσεις των ενδιαφερόντων του στις οποίες συναντώ κοινές αναφορές και ανησυχίες και θα κλείσει με το υπόβαθρο στα ολοκληρωμένα οπτικά και τη φαντασία του γύρω από την περιοχή! Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Πάνο Γκρούμα και το Βασίλη Κατωπόδη που η εργατικότητα και η δημιουργία τους με μεταφέρουν πάντα σε εικόνες πειραματικών διατάξεων και ηρωικών πειραμάτων με άπειρες διατάξεις στο setup που έζησα τα πρώτα χρόνια της διαδρομής μου! Το ευχαριστώ στο Λευτέρη θα πρέπει να συνοδεύεται από την αναφορά σε έναν άνθρωπο με θετική διάθεση και προβληματισμούς που χαίρεσαι να μοιράζεσαι (θα του ταίριαζε να υποστηρίζει το κόκκινο και στα αθλητικά☺)! Ένα ευχαριστώ στον Κώστα Τόκα, νεότερο μέλος του ΕΦΕ που βρεθήκαμε πρόσφατα στο SPIE Photonics West και τον εκτίμησα ακόμα παραπάνω! Στον Χρήστο τον Τσόκο εύχομαι να συνεχίσει με τον ίδιο δυναμισμό και αυτός τη διαδρομή του στο ΕΦΕ!

Ένα ευχαριστώ στη Βάσια για τη βοήθεια σε ότι χρειάστηκα και την πραγματικά αποτελεσματική και ειλικρινή σχέση που οικοδομήσαμε! Ευχαριστώ επίσης την Πόλυ για τη συνεισφορά της σε αρκετές πτυχές της καθημερινότητας μου στο ΕΦΕ. Επίσης ένα ευχαριστώ στην Αυγούστα και τη Μαρία που συνέβαλλαν και αυτές με τη συμβολή τους για τη διεκπεραίωση οργανωτικών ζητημάτων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μεταδιδακτορικούς ερευνητές από το PhosNET Σωτήρη Παπαϊωάννου, Θεόνη Αλεξούδη και το Δημήτρη Φίτσιο που τελείωσε το διδακτορικό στην ομάδα της Θεσσαλονίκης και είχαμε μια πολύ δημιουργική συνεργασία στα πλαίσια των ερευνητικών συνεργασιών του PLATON και του RAMPLAS. Πραγματικά χαρισματικοί ερευνητές που ωρίμασαν σε μια ομάδα με χαρισματικό καπετάνιο και εξελίσσονται ανάλογα! Στην ομάδα της Θεσσαλονίκης θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης τον Λέκτορα του ΑΠΘ Κωνσταντίνο Βυρσωκινό που τον γνώρισα μέσα από την έρευνα του στα plasmonics και τον ευχαριστώ για τη μετάδοση ερευνητικών εργαλείων μέσα από την εμπειρία και την βαθιά τεχνική του κατάρτιση. Επιστρέφοντας στην..πρωτεύουσα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη..wireless συνιστώσα της ΣΗΜΜΥ στα πλαίσια της συνεργασίας του WisePON και ήταν το κίνητρο να καταπιαστώ με καινούργιες έννοιες και να ασχοληθώ με χρήσιμα προβλήματα έξω από τον κόσμο των οπτικών. Στα πλαίσια αυτά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Νεκτάριο Μωραΐτη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή Θανάση Παναγόπουλο. Ο χαρισματικός μεταδιδακτορικός ερευνητής Χάρης Κουρούγιωργας κερδίζει τη θέση του και εδώ και στους φίλους!! Στο μεγάλο αριθμό ερευνητικών συνεργασιών μέσα από το PCRL θα ήθελα να αναφέρω τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Ville Markus Korhjarvi από το TUT της Φινλανδίας που συνεργαστήκαμε στα πλαίσια του RAMPLAS. Ιδιαίτερη αναφορά θα ήθελα να κάνω στον Housseem Brahmi από το ParisTech που έφυγε νωρίς. Είχα την τύχη να συνεργαστώ μαζί του στα πειράματα μεταγωγής πακέτων αξιοποιώντας τεχνικές του OCDMA στο ΕΦΕ και να εισπράξω από έναν άνθρωπο με βαθιά διαφορετικές αναφορές, τόσο πραγματικές εικόνες αξιοπρέπειας, μαχητικότητας.

Ένα ευχαριστώ στην κ. Λούλη, στην κ. Μαριάννα (με ευχές για πλήρη ανάρρωση από την περιπέτεια της), στην κ. Νίκη που μοιραζόμασταν συχνά το πρώτο χαμόγελο της ημέρας στο διάδρομο είτε του γραφείου ή του εργαστηρίου. Ευχαριστώ την Ιωάννα και την Ειρήνη από το κυλικείο του ΣΕΜΦΕ για το μόνιμο χαμόγελο και τη θετική τους διάθεση!

‘Ανοίγοντας’ τους ομόκεντρους κύκλους έξω από το οικοσύστημα του ΕΦΕ, θα ήθελα να αναφέρω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ σε όλους/όλες που πάλεψαν και παλεύουν για το φορτίο και την κληρονομιά που κουβαλά το Πολυτεχνείο στην πορεία του. Από την αποστολή του για την ανάδειξη της γνώσης, της επιστήμης και της τεχνολογίας σαν εργαλεία προόδου της κοινωνίας αλλά και τη διάχυση των καρπών τους σε όλη την κοινωνία σε ένα πλαίσιο αξιοπρέπειας, αλληλεγγύης και δικαιοσύνης. Νοιώθω τυχερός που στα χρόνια της διατριβής γνώρισα αρκετούς τέτοιους ανθρώπους που προχωρούν και

εξελίссουν το παραπάνω πλαίσιο και συνέβαλλαν στη διαμόρφωση της οπτικής και του κριτηρίου μου. Μια ιδιαίτερη αναφορά στους συναδέλφους μου που μέσα από τη δράση του Συλλόγου Μεταπτυχιακών Σπουδαστών (ΥΔ) του ΕΜΠ υπερασπίζονται το δικαίωμα της έρευνας με αξιοπρέπεια για όλους/όλες σε ένα αξιακό πλαίσιο που υπερασπίζεται το δημόσιο πανεπιστήμιο και υπηρετεί τη συλλογική δράση κόντρα στον ατομικό δρόμο.

Η διευκόλυνση της αναφοράς στους φίλους/φίλες μου προϋποθέτει τη χρήση τεχνικών επικάλυψης μέσα από μια αλληλουχία από keywords που όλες για μένα συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με ανθρώπους που εκτιμώ πάρα πολύ και περιλαμβάνουν: groups (Τσέλσι), κωμοπόλεις (Loughborough), πανεπιστήμια (ΕΤΗ), γειτονίες (Εξάρχεια), ερευνητικά εργαστήρια (cslab) και ερευνητικά κέντρα (ΕΚΕΦΕ), μαγαζιά (κυρ-Λάζαρος), πόλεις (Γιάννενα), events (ιστιοπλοϊκό 3-μερο...), σημασίες (1 ή..και πιο πολλές), ιδεολογικά ρεύματα (δύσκολο τώρα...!), σχήματα (ΑΑΣΜΕ), ποτάμια (Αώος), ταξίδια (Μάλτα), εκδρομές (Βελιγράδι), περιοχές Πειραιά (Κερατσίνι), ημερομηνίες (05/07/2015)...

Σε εξίσου όμορφο κάδρο όπως το προηγούμενο, θέλω να αναφερθώ και στην Κλαίρη, που ήμαστε μαζί για χρονικό διάστημα που συνέπεσε σε μεγάλο ποσοστό με την εξέλιξη της διατριβής. Μέσα από μια κοινή και αδιάκοπη αναμέτρηση της τάξης με την αταξία, της λογικής με το συναίσθημα, γεννήθηκαν συναρπαστικές δυναμικές και ακόμα πιο έντονες εικόνες, από το Waterloo μέχρι τη Βάλια Κάλντα...

Φθάνοντας προς το τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου καθώς όλο αυτό το διάστημα το πηγαίνουμε μαζί με αλληλεπίδραση, στήριξη και αλληλεγγύη. Πολλά ευχαριστώ στον πατέρα μου Κώστα καθώς γυρνώντας αρκετά χρόνια πίσω στις ασκήσεις του LC-κυκλώματος και του στάσιμου κύματος στο φροντιστήριο ίσως να συναντά κανείς την αρχή του νήματος που καταλήγει σε αυτό το κείμενο, στη μητέρα μου Σοφία που μου έμαθε να χαμογελώ και να σηκώνομαι στα δύσκολα που τελικά αυτά τα βασικά σημεία μετράνε στη ζωή και τέλος στην αδερφή μου Μαρίνα που τα τελευταία χρόνια περνάμε με αλληλοκατανόηση, γέλια και κουβέντα αρκετές ώρες καθημερινά και εξελισσόμαστε και οι δύο!

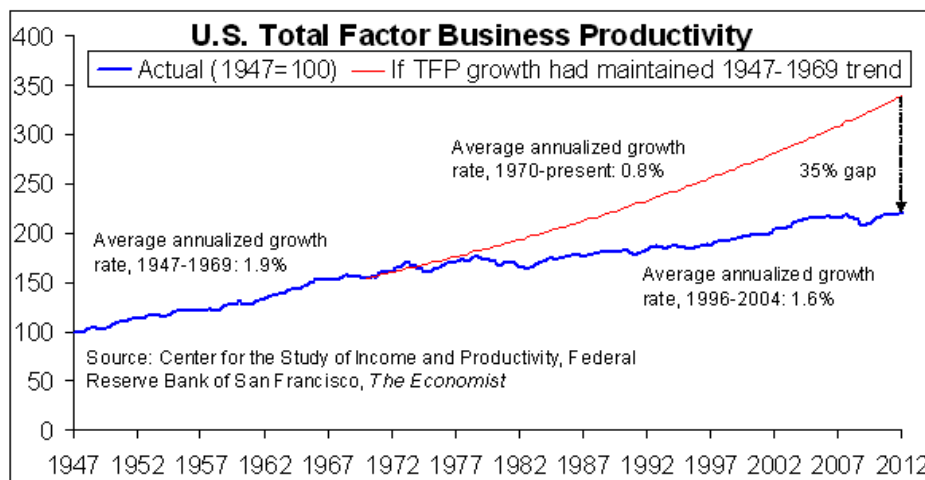
Με τιμή,
Γιάννης Γιαννούλης

1. Εισαγωγή και σκοπός της διατριβής

1.1 Η ανάπτυξη των εφαρμογών Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλής Επίδοσης (High Performance Computing-HPC)

1.1.1 Η ανεκπλήρωτη πρόκληση της 3^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης

Πρόσφατα, ένα άρθρο του οικονομολόγου R.J. Gordon [1.1], προκάλεσε μια ζωνρή συζήτηση σε ένα ευρύ φάσμα του δημόσιου διαλόγου καθώς αναρωτήθηκε εάν και σε ποιο βαθμό η επίδραση της καινοτομίας (innovation) που εισάγεται με την εξέλιξη της Τρίτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Third Industrial Revolution – IR3) συμμετέχει στην αύξηση της παραγωγικότητας της εργασίας (labour productivity) [1.2]. Πιο συγκεκριμένα συγκρίνεται η συνεισφορά που εισάγει η σύγχρονη συλλογή καινοτομίας στην παραγωγικότητα της εργασίας με τις επιδόσεις που καταγράφηκαν κατά την περίοδο της εισαγωγής των μηχανών Ατμού, των Σιδηροδρόμων (1750-1830) και τις αλλαγές που έφερε ο ηλεκτρισμός και η μηχανή εσωτερικής καύσης της περιόδου της Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης (1870-1900) [1.3-1.5]. Η Εικόνα 1 παρουσιάζει την κάμψη του ρυθμού αύξησης του συνολικού συντελεστή της παραγωγικότητας (Total Factor Productivity-TFP) [1.6], που ενσωματώνει τη συνεισφορά της τεχνολογικής ωρίμανσης στο συνολικό παραγόμενο προϊόν μιας οικονομίας. Συγκεκριμένα, καταγράφεται μια σημαντική πτώση του ετήσιου ρυθμού αύξησης από το 1.9% της μεταπολεμικής περιόδου στο 0.8% της περιόδου μετά το 1970.



Εικόνα 1: Εξέλιξη του συντελεστή της παραγωγικότητας της εργασίας στην οικονομία των ΗΠΑ. Η μπλε καμπύλη αποτυπώνει την πραγματική εξέλιξη του συντελεστή της παραγωγικότητας ενώ η κόκκινη γραμμή προβάλλει την εξέλιξη της αύξησης της παραγωγικότητας εφόσον διατηρούνταν σταθερός ο ρυθμός αύξησης της μεταπολεμικής περιόδου (1.9% για την περίοδο 1947-1969).

Στο Παράδοξο της Παραγωγικότητας (Productivity Paradox) της Τρίτης Βιομηχανικής Επανάστασης σύμφωνα με το οποίο “τα αποτελέσματα της βρίσκονται σε

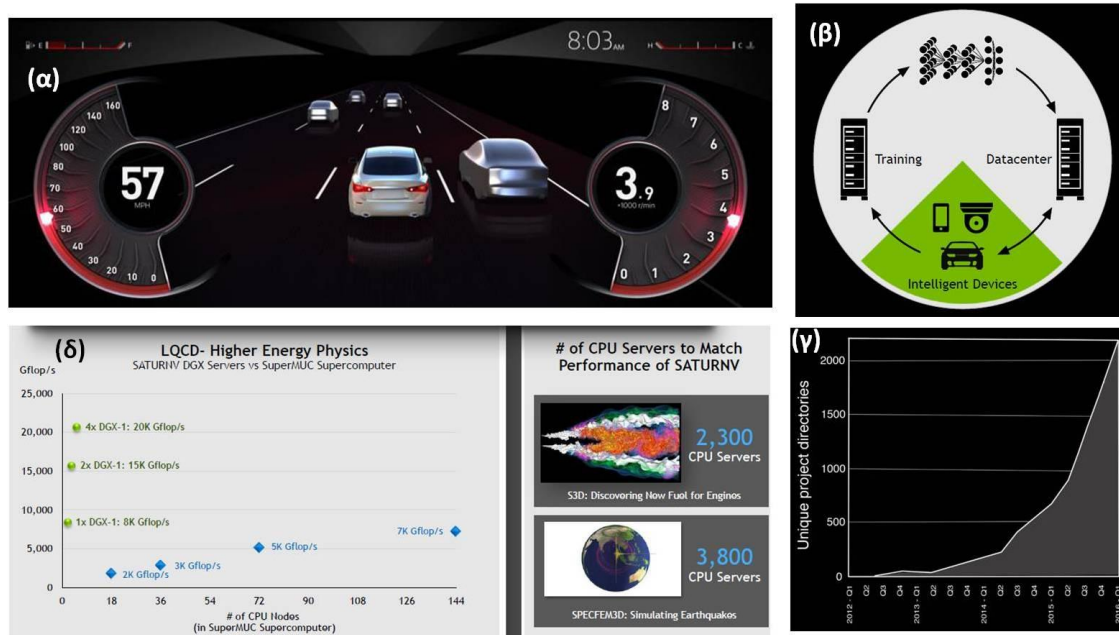
διάφορες σφαίρες της πραγματικής ζωής αλλά απουσιάζουν από τις στατιστικές της παραγωγικότητας” αναφέρονται ήδη από τη δεκαετία του ‘90 [1.7] με καθησυχαστικό τρόπο καθώς επισημαίνεται πως η αντίστοιχη συμπεριφορά είχε παρατηρηθεί κατά τη δυναμική επέκταση της περιόδου του εξηλεκτρισμού. Ακολουθώντας την αισιόδοξη αυτή προσέγγιση, οι οικονομολόγοι του MIT (Massachusetts Institute of Technology-MIT) πρόσφατα μέσα από το βιβλίο τους υποστήριξαν πως η μελλοντική ανάκτηση των υψηλών ρυθμών αύξησης της παραγωγικότητας της εργασίας [1.8] είναι εφικτή μέσα από την αξιοποίηση τριών διαστάσεων της ψηφιακής εποχής που περιλαμβάνουν: την εκθετική αύξηση στην υπολογιστική ισχύ του νόμου του Moore, τη δυνατότητα για ψηφιοποίηση μεγάλου όγκου δεδομένων και την αξιοποίηση τους μέσω της χρήσης αισθητήρων (sensors) με προσιτό τρόπο και τέλος τη δυνατότητα του συνδυασμού (recombination) που προσφέρεται από την πληθώρα των δεδομένων που προσφέρονται.

Στην υπόσχεση αυτή της νέας εποχής, η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence), η Εκμάθηση της Μηχανής (Machine Learning), φαίνεται να αναδεικνύονται ως οι πιθανές κινητήριες δυνάμεις για την επίτευξη του στόχου. Για την επιτυχή αποστολή τους η παρουσία μιας νέας γενιάς δικτύων για τη διαρκή και αξιόπιστη συλλογή των δεδομένων αλλά και η παρουσία πανίσχυρων επεξεργαστικών μονάδων είναι στο επίκεντρο των προκλήσεων σε μια σειρά από επιστημονικές περιοχές και τεχνολογίες. Στις δυνατότητες που ανοίγονται κατά την επεξεργασία των ‘ψηφιακών πρώτων υλών’ που προσφέρει η εποχή των Μεγάλων Δεδομένων (Big Data), τα δίκτυα νέας γενιάς (5G) για τη διαρκή και αδιάλειπτη επικοινωνία σε υψηλούς ρυθμούς [1.9], η παρουσία στατιστικών αλγορίθμων (statistical Algorithms) επεξεργασίας [1.10], συμπληρώνονται από την αντίστοιχη ανάπτυξη πανίσχυρων υπολογιστικών μονάδων υψηλής επίδοσης (High Performance Computing - HPC) [1.11].

1.1.2 Η αλληλεπίδραση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και των Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλών Επιδόσεων (HPC)

Οι εφαρμογές που έχουν ήδη αναδειχθεί και βρίσκονται στο πρώιμο στάδιο της αξιοποίησης τους προς την αύξηση της παραγωγικότητας στο σύγχρονο πλαίσιο προσπαθούν να αξιοποιήσουν με μια νέα μηχανική τις δυνατότητες των νέων περιοχών της επιστήμης των δεδομένων με τα υπολογιστικά συστήματα που καλούνται να αναλάβουν το φορτίο της υλοποίησης/εκτέλεσης των αλγορίθμων. Η Εικόνα 2 παρουσιάζει ενδεικτικές πραγματικές εφαρμογές που απαιτούν τις συνέργειες της νέας γενιάς Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλών Επιδόσεων (Performance Computing - HPC) και των αλγορίθμων της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence-AI). Η ανάπτυξη των αυτόνομων οχημάτων (driveless cars) που θα ενσωματώνουν AI αλγορίθμους για την εξασφάλιση ασφαλούς οδήγησης απαιτούν μιας μακρά διαδικασία εκμάθησης αυτών που θα υποστηριχθούν γρήγορα και με υψηλή αποτελεσματικότητα από τα σύγχρονα HPC [1.12]. Αντίστοιχη λογική εκπαίδευσης (training) θα απαιτηθεί για την ωρίμανση των αλγορίθμων που αναδεικνύονται μέσα από τις εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of

Things - IoT), οι συσκευές των οποίων θα επικοινωνούν με τα Κέντρα Δεδομένων (Data Centers) που επιφορτίζονται με την επεξεργασία και την εκτέλεση των αλγορίθμων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων (inference) [1.13]. Σε μια σειρά επιστημονικών πειραμάτων και περιοχών, αναδεικνύεται επίσης η εκτέλεση πρωτότυπων στατιστικών αλγορίθμων για τη μελέτη και την πρόβλεψη φυσικών φαινομένων και σύνθετων διεργασιών φυσικών συστημάτων [1.14]. Σε πρακτικές εφαρμογές που χρησιμοποιούνται καθολικά μπορούν να συμπεριληφθούν πολλά παραδείγματα αλγορίθμων εκμάθησης της Google που καλύπτουν από εφαρμογές Android (Android Apps), μεταφραστικές μηχανές (Google Translate), κατανόηση φυσικής γλώσσας (Natural Language understanding) που έχουν οδηγήσει σε έκρηξη των ερευνητικών προγραμμάτων που τρέχουν από την Google το τελευταίο διάστημα [1.15].



Εικόνα 2: Ενδεικτικές εφαρμογές του πεδίου συνέργειας μεταξύ των υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων (High Performance Computing - HPC) και της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence - AI): (α) Αυτοκίνηση με δυνατότητα αυτόματης πλοήγησης (driverless cars), (β) Διαδικασία ωρίμασης αλγορίθμων εκμάθησης μηχανής (Machine Learning) σε Υπολογιστικά Κέντρα (Data Centers) αξιοποιώντας δεδομένα (data) από έξυπνες συσκευές και μέσω αισθητήρων. (γ) Χρονική εξέλιξη του αριθμού των συνεργατικών προγραμμάτων που χρηματοδοτήθηκαν στις ερευνητικές υποδομές της Google με σκοπό την επέκταση εφαρμογών βαθιάς εκμάθησης (Deep Learning), (δ) Υπολογιστική ισχύς (GFLOPS) που απαιτείται κατά την επεξεργασία προβλημάτων προσομοίωσης φυσικών διεργασιών (Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, Μοντελοποίηση διάδοσης σεισμικών κυμάτων) και ο η εκτίμηση του αριθμού επεξεργαστικών μονάδων που απαιτούνται για την εκτέλεση τους.

Η συνύπαρξη της τεχνητής νοημοσύνης (AI) και των HPC συστημάτων αναδεικνύει τη δυνατότητα για την αξιοποίηση σε μια σειρά εφαρμογών του πραγματικού κόσμου. Ο συνδυασμός της τεχνητής νοημοσύνης και των αλγορίθμων Βαθιάς Γνώσης (Deep Learning) με τις αριθμητικές μεθόδους υψηλής έντασης που προσφέρει το HPC

μέσω των στατιστικών αλγορίθμων και των τεχνικών της βελτιστοποίησης αναδεικνύει τις δυνατότητες για μια σειρά από κλάδους. Πρόσφατα, διερευνήθηκε η δυνατότητα των HPC συστημάτων να παρέχουν ουσιαστικές βελτιώσεις σε μια σειρά ερευνητικών και πρακτικών προβλημάτων στην περιοχή των AI και DL εφαρμογών [1.16]. Ενδεικτική καταγραφή των περιοχών που προσδιορίζεται η σύζευξη της AI και του HPC έχει προσφερθεί σε πρόσφατη δημοσιευμένη αναφορά [1.17]: Η επιστήμη υπολογιστών (Computer Science) και η επιστήμη των δεδομένων (Data Science) είναι κρίσιμες για την ανάπτυξη των μελλοντικών HPC συστημάτων καθώς τεχνικές που βασίζονται σε AI αλγορίθμους αξιοποιούνται για την αύξηση της επίδοσης των συστημάτων προς την Exascale περιοχή (Exascale Computing) όπου απαιτείται υπολογιστική ισχύ τουλάχιστον 1exaFLOP [1.18]. Στο ίδιο πλαίσιο, και οι τεχνικές του DL έχουν αναδειχθεί τόσο σαν δυνατότητα όσο και σαν ευκαιρία για την περιοχή του HPC. Στη φάση ανάπτυξης αποτελεσματικών DL αλγορίθμων απαιτούνται υπολογιστικές επιδόσεις που μπορούν να ικανοποιήσουν υπολογιστικά σύνθετους αλγορίθμους με μεγάλες απαιτήσεις μνήμης και ροής πληροφορίας [1.19]. Συμμετρικά, οι μελλοντικές αρχιτεκτονικές υπολογιστικών συστημάτων (HPC) θα βασιστούν στην υιοθέτηση των DL αλγορίθμων για την μεγιστοποίηση των επιδόσεών τους [1.20,1.21].

1.2 Η εξέλιξη των Υπολογιστικών Συστημάτων Υψηλής Απόδοσης

Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων (HPC) με σκοπό να καταγραφεί η εξέλιξη και οι απαιτήσεις που προκύπτουν από την ολοένα υψηλότερη επίδοση αυτών. Η σύντομη καταγραφή περιλαμβάνει τις υπολογιστικές επιδόσεις των HPC συστημάτων στην πορεία του χρόνου και την οργάνωση των μονάδων επεξεργασίας τους.

1.2.1 Η εξέλιξη των επιδόσεων Υπερυπολογιστών

Οι υπερυπολογιστές που εμφανίστηκαν μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 χρησιμοποιούσαν μικρό αριθμό επεξεργαστών. Η συντριπτική πλειοψηφία των υπερυπολογιστών αυτών βασιζόταν σε αρχιτεκτονικές με παράλληλους διανυσματικούς επεξεργαστές που απαιτούσαν ταχεία πρόσβαση σε μία κοινή μνήμη [1.22]. Μία τέτοια προσέγγιση μπορεί να ήταν αρκετή για λίγους επεξεργαστές, ωστόσο ένας υπερυπολογιστής με πολυάριθμους επεξεργαστές δεν θα μπορούσε να λειτουργήσει αποδοτικά λόγω της περιορισμένης ταχύτητας πρόσβασης στη μνήμη, ως αποτέλεσμα του έντονου ανταγωνισμού κατά την επικοινωνία των επεξεργαστών με αυτή (memory contention).

Η τάση αυτή αντιστράφηκε στη δεκαετία του '90 όταν άρχισαν να εμφανίζονται τόσο στις Η.Π.Α. όσο και στην Ιαπωνία επεξεργαστικά συστήματα με εκατοντάδες και χιλιάδες επεξεργαστές, θέτοντας νέα ρεκόρ υπολογιστικής απόδοσης. Αυτή η εξέλιξη

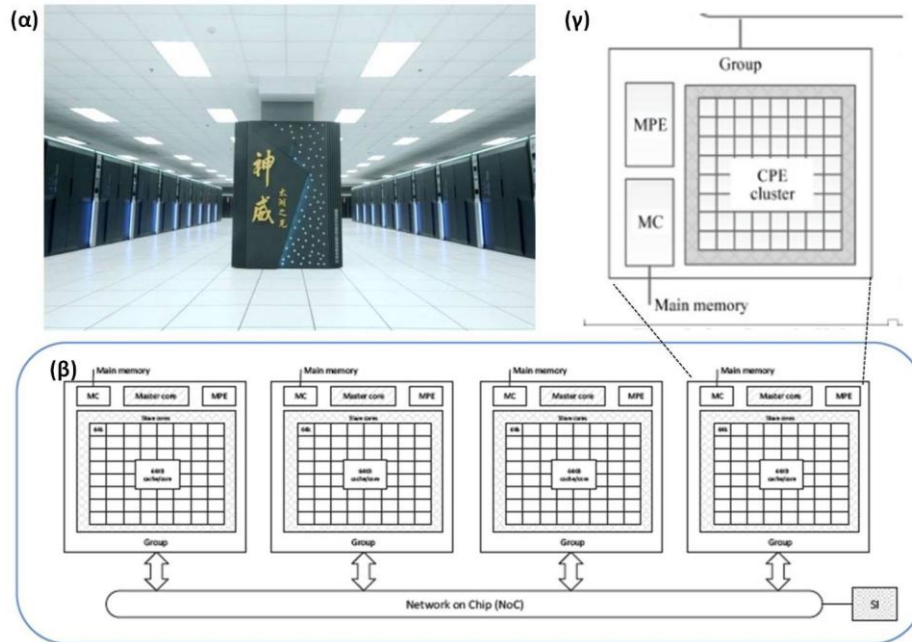
προέκυψε από τη χρήση κατανεμημένης μνήμης (distributed memory), δηλαδή αποκλειστικής μνήμης για κάθε επεξεργαστή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της εποχής αυτής αποτελεί ο υπερυπολογιστής Numerical Wind Tunnel (NWT) της Fujitsu που αναπτύχθηκε το 1993 και ξεπέρασε τον πρώτο μέχρι τότε υπερυπολογιστή (CM-5/1024 της Thinking Machines με απόδοση 59.7 GFLOPS [1.23]) του προγράμματος «top500» που είχε ξεκινήσει εκείνη τη χρονιά, κατακτώντας την κορυφή της λίστας των 500 ισχυρότερων συστημάτων του πλανήτη με μέγιστη συνολική απόδοση στα 235.8 GFLOPS [1.24]. Για την επίτευξη αυτής της απόδοσης, ο NWT αξιοποίησε μία αρχιτεκτονική παράλληλης διανυσματικής επεξεργασίας με κατανεμημένη μνήμη για τη διασύνδεση 166 επεξεργαστικών μονάδων σε ραβδεπαφικό δίκτυο (crossbar network), ενώ ο δεύτερος πλέον CM-5/1024 αποτέλεσε αντιπροσωπευτικό δείγμα υπερυπολογιστή μαζικού παραλληλισμού (massively parallel supercomputer), χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική πολλαπλών εντολών – πολλαπλών δεδομένων (Multiple Instructor Multiple Data, MIMD) σε τοπολογία δέντρου (fat tree network) για τη διασύνδεση 1024 επεξεργαστών. Στην αρχιτεκτονική MIMD βασίστηκε και η Intel για να σπάσει για πρώτη φορά στα χρονικά το φράγμα του 1 TFLOPS το 1997, παρουσιάζοντας τον υπερυπολογιστή ASCI Red [1.25], ο οποίος σχεδιάστηκε έτσι ώστε να κάνει χρήση εμπορικά διαθέσιμων μονάδων και να υποστηρίζει πολύ μεγάλη κλιμάκωση. Ο ASCI Red αποτελούταν αρχικά από 7264 επεξεργαστές (1.068 TFLOPS) που τελικά έφτασαν τους 9632 (3.1 TFLOPS), καταναλώνοντας 850 kW ισχύος και χρησιμοποιούσε πάνω από 100 ντουλάπες (cabinets) ως υποδομή, καταλαμβάνοντας ένα χώρο 230 m².

Με τη νέα χιλιετία σηματοδοτήθηκε η στροφή προς υπερυπολογιστές που βασίζονταν σε συστοιχίες (clusters), συνδυάζοντας με αυτό τον τρόπο τόσο την κοινή μνήμη που μοιράζονται κόμβοι επεξεργαστών όσο και την κατανεμημένη μνήμη που γίνεται προσβάσιμη από άλλους κόμβους μέσω κατάλληλων και γρήγορων διασυνδέσεων. Με βάση αυτή την αρχιτεκτονική υλοποιήθηκε το 2000 ο ASCI White της IBM [1.26], ο οποίος αποτελούταν από 512 εμπορικά διαθέσιμους υπολογιστές της ίδιας εταιρείας σε ένα χώρο 1100 m², φτάνοντας τους 8192 επεξεργαστές και τα 4.938 TFLOPS με καταναλισκόμενη ισχύ λειτουργίας (3 MW) και ψύξης (3 MW) που άγγιζε τα 6 MW. Την ίδια λογική ακολούθησε και ο υπερυπολογιστής Earth Simulator της NEC [1.27] που λειτούργησε το 2002 και ξεπέρασε σε απόδοση με χαρακτηριστική άνεση τον ASCI White, επιτυγχάνοντας 35.86 TFLOPS, καταναλώνοντας 6.4 MW και καταλαμβάνοντας 6500 m². Με την έλευση, όμως, των πολυπύρηνων (ομοιογενών και ετερογενών) επεξεργαστών και την ανάπτυξη μονάδων επεξεργασίας γραφικών γενικού σκοπού (General Purpose computing on Graphics Processing Unit, GPGPU) καθώς και υλικού επιτάχυνσης παρόμοιας χρήσης εντός της πρώτης δεκαετίας του 21^{ου} αιώνα, ξεκίνησε η εποχή των υβριδικών υπερυπολογιστών και κατά επέκταση των υπολογιστικών συστημάτων που βασίζονταν σε υβριδικές συστοιχίες. Αυτή η προσέγγιση πραγματοποιήθηκε για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας, χώρου και κόστους αλλά και βελτίωσης της συνολικής απόδοσης των συστημάτων αυτών. Το πρώτο δείγμα υβριδικού υπερυπολογιστή ήταν ο Roadrunner της IBM [1.28], ο οποίος ήταν και αυτός που πρώτος έσπασε το φράγμα του 1

PFLOPS το 2008 με συνολική απόδοση στα 1.026 PFLOPS. Ο Roadrunner περιλάμβανε συστοιχίες από διπύρηνους επεξεργαστές AMD Opteron (συνολικά 6480) με ένα ειδικό επεξεργαστή IBM PowerXCell 8i (12960 στο σύνολο) συνδεδεμένο σε κάθε πυρήνα ενός επεξεργαστή Opteron. Ως αποτέλεσμα της υβριδικής του σχεδίασης, ο Roadrunner καταλάμβανε ένα χώρο ίσο με 560 m² και καταναλώνει 2.35 MW ισχύος.

Την τελευταία πενταετία αναπτύχθηκαν ακόμα πιο ισχυροί υπερυπολογιστές (Jaguar, Tianhe-1, K Computer, Sequoia και Titan [1.29]), καθώς ο αριθμός των επεξεργαστικών στοιχείων που αξιοποιήθηκαν σε κατάλληλες τοπολογίες και ταχύτερες διασυνδέσεις εκτοξεύθηκε απότομα σε εκατοντάδες χιλιάδες αλλά εις βάρος της απαιτούμενης κατανάλωσης ισχύος. Αυτή τη στιγμή, ο ισχυρότερος υπερυπολογιστής στον κόσμο είναι ο Tianhe-2 με απόδοση στα 33.86 PFLOPS, η οποία πηγάζει από τη χρήση διαφορετικών τύπων επεξεργαστών (Intel Xeon IvyBridge και Xeon Phi) με περισσότερους από 3000000 συνολικά πυρήνες. Ωστόσο, η ισχύς που καταναλώνεται αποκλειστικά για τη λειτουργία του είναι εξαιρετικά μεγάλη και φτάνει τα 17.8 MW, ενώ αγγίζει τα 24 MW μαζί με το σύστημα ψύξης [1.30].

Η ανάπτυξη που αναμένεται να συμβεί μέσα στην επόμενη πενταετία με βάση την εξέλιξη που έχει σημειωθεί τα τελευταία 20 χρόνια φαίνεται στο Σχ. 1-2(β) σύμφωνα με τα δεδομένα που αντλούνται από την κατάταξη των 500 ισχυρότερων υπερυπολογιστών για το έτος 2016 [1.31,1.32]. Στην κορυφή της λίστας βρίσκεται ο υπερυπολογιστής Sunway TaihuLight από την Κίνα ο οποίος προσφέρει πραγματική ταχύτητα επεξεργασίας 93 Petaflops [1.33]. Η Εικόνα 3(α) παρουσιάζει μια άποψη από το δωμάτιο του υπερυπολογιστή που αναπτύχθηκε εξ' ολοκλήρου στην Κίνα και περιέχει έναν αριθμό από 10.649.600 πυρήνες (cores) με κύρια μνήμη (primary memory) στα 1.31PB [1.34]. Βασίζεται σε έναν επεξεργαστή (processor), τον SW26010 ο οποίος οργανώνεται σε τέσσερις ομαδοποιήσεις πυρήνων (Core Groups - CGs) οι οποίες είναι συνδεδεμένες μέσω ενός δικτύου στο τσιπ (Network on Chip - NoC) για την εξυπηρέτηση της μεταξύ τους επικοινωνίας [1.35]. Κάθε CG αποτελείται από 64 στοιχεία υπολογιστικής επεξεργασίας (Computer Processing Elements - CPEs) και ένα στοιχείο διαχείρισης της επικοινωνίας (Management Processing Element - MPE) του με το NoC όπως αποτυπώνεται και στις Εικόνες 3(β),(γ).



Εικόνα 3: (α) Άποψη του δωματίου υπολογιστή του κινέζικου υπερ-υπολογιστή TaihuLight στις εγκαταστάσεις του Εθνικού Κέντρου Υπερυπολογιστών στην πόλη Wuxi της επαρχίας Jiangsu της Κίνας. (β) Οργάνωση της παράλληλης επεξεργασίας του Υπερυπολογιστή που περιλαμβάνει τέσσερις βασικές ομαδοποιήσεις πυρήνων (Core Groups - CGs) που επικοινωνούν μεταξύ τους με τη χρήση μιας τοπολογίας Δικτύου σε Τσιπ (Network-on-Chip) επεξεργαστική μονάδα. Η τοπολογία NoC επιφορτίζεται για την κλιμάκωση της επικοινωνίας της μονάδας επεξεργασίας με τις υπόλοιπες μονάδες παράλληλης επεξεργασίας. (γ) Λεπτομερής αναπαράσταση της βασικής ομαδοποίησης πυρήνων που περιλαμβάνει 64 Στοιχεία Υπολογιστικής Επεξεργαστικής (Computer Processing Elements - CPEs), τη βασική μονάδα μνήμης (Main Memory) και το στοιχείο διαχείρισης της επικοινωνίας (Management Processing Element - MPE).

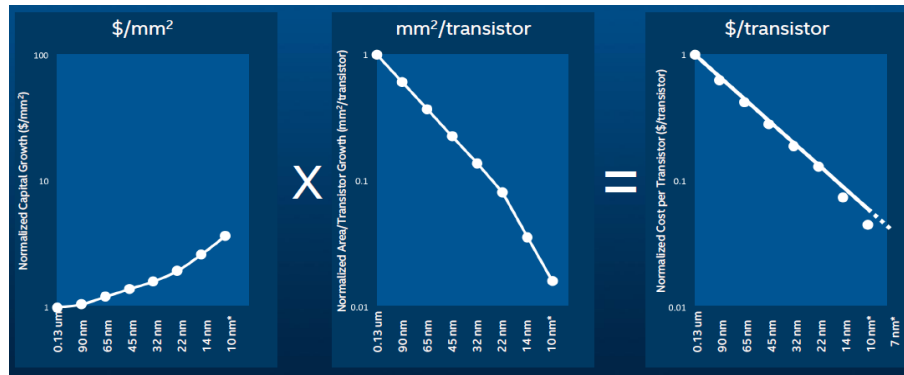
Προεκτείνοντας τα υπάρχοντα δεδομένα, προκύπτει ότι η υπολογιστική ικανότητα ενός μελλοντικού υπερυπολογιστή θα φτάσει την τάξη των Exaflops (EFLOPS) γύρω στο 2020, με την Κίνα να ενδέχεται να παρουσιάσει ένα τέτοιο σύστημα ακόμη νωρίτερα και τις υπόλοιπες μεγάλες δυνάμεις του χώρου αυτού να ακολουθούν (Η.Π.Α., Ιαπωνία, Ευρώπη) [1.36]. Στα πλαίσια αυτά το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ σκοπεύοντας στην ανάπτυξη ενός υπολογιστικού οικοσυστήματος Exascale το 2023 [1.37]. Είναι εμφανές πως οι τελευταίες εξελίξεις στις επιδόσεις των υπερυπολογιστών συνεχώς μετατοπίζουν την εμφάνιση του Exascale υπολογιστικού συστήματος στο διάστημα μεταξύ του 2023-2025 [1.38]. Η κατανάλωση ισχύος αποτελεί το θεμελιώδη περιορισμό στην προσπάθεια αυτή καθώς η κατανάλωση ισχύος τόσο στις υπολογιστικές μονάδες όσο και στις τοπολογίες διασύνδεσης μεταξύ των διαφορετικών μονάδων αποτελεί βασικό περιοριστικό παράγοντα και θέτει φυσικούς περιορισμούς όπως θα παρουσιαστεί και στη συνέχεια. Η κατανάλωση ισχύος του Sunway TaihuLight μετρήθηκε κοντά στα 15 MW υπό πλήρες υπολογιστικό φορτίο με την αντίστοιχη ενεργειακή υπολογιστική επίδοση να υπολογίζεται 6 Gflops/W [1.39]. Λαμβάνοντας υπόψη πως για την επίτευξη της Exascale απόδοσης, τα μελλοντικά HPC συστήματα θα αποτελούνται από δεκάδες εκατομμύρια επεξεργαστικά στοιχεία και

να καταναλώνουν ακόμη μεγαλύτερη ισχύ αν ληφθούν υπόψη τα δεδομένα που ισχύουν σήμερα. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εξέλιξη των υπολογιστικών μονάδων σε επίπεδο τσιπ που βασίζεται στο νόμο του Moore και στις τοπολογίες δικτύων πάνω στο τσιπ (NoC) που υιοθετούνται στην ανάπτυξη συστημάτων υψηλής απόδοσης (HPC).

1.2.2 Οι διαστάσεις του νόμου του Moore

Ο νόμος του Moore λειτουργεί ως η αρχή που διέπει τη βιομηχανία των ημιαγωγών για περισσότερα από πενήντα χρόνια [1.40]. Το αποτύπωμα του εντοπίζεται στην εξέλιξη της καινοτομίας και προέρχεται μέσα από τη συνεχή αύξηση των επιδόσεων, της διαρκούς διαθεσιμότητας και της υποφερτής τιμής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος, η βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης και η μείωση του μεγέθους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Integrated Circuits - ICs) αποτελούν τα καύσιμα της διαρκούς επιβεβαίωσης του νόμου του Moore. Ενώ οι αμφιβολίες για το μέλλον του ήταν διαρκείς από την πρώτη στιγμή της διατύπωσης του, το αδύναμο σημείο στο οποίο συγκεντρώνονται μεταβάλλεται με το χρόνο, με την πιο πρόσφατη αμφισβήτηση του να πηγάζει από τη δυνατότητα του να συνεχίζει να συμβιβάζει την απαίτηση για χαμηλό κόστος και μέγεθος των ολοκληρωμένων τρανζίστορ [1.41].

Σε αυτή ακριβώς την πρόκληση τοποθετήθηκε πρόσφατα (2015) ο ίδιος ο Gordon Moore αναφέροντας για τη δημοσιευμένη εργασία του 1965: "Το μήνυμα που προσπάθησα να διαδώσω το 1965 ήταν πως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) ήταν το ασφαλές μονοπάτι για φθηνά ηλεκτρονικά. Ωστόσο εξελίχθηκε από ένα μήνυμα που κινητοποιεί τη βιομηχανία των ηλεκτρονικών προς την κατεύθυνση της ολοκλήρωσης, σε ένα νόμο που διέπει και οδηγεί τη βιομηχανία" [1.42]. Οι καθοριστικοί παράγοντες σε αυτήν τη διατύπωση του Moore αποτέλεσαν το κόστος και οι επιδόσεις όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Η κινητήρια δύναμη για την ικανότητα επίτευξης υψηλών επιδόσεων (capability) μεταβάλλεται στη ροή του χρόνου καθώς οι στόχοι τους μετατοπίστηκαν από την τοπολογία DRAM (Dynamic Random Access Memory – DRAM), στις υψηλές επιδόσεις επεξεργασίας (High Performance Processing) και στη συνέχεια στη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων σε ένα τσιπ (Systems on Chip - SOC) [1.43].



Εικόνα 4: Μια απόπειρα γραφικής αποτύπωσης της παρουσίας του νόμου του Moore στις διαφορετικές γενιές επεξεργασίας τρανζίστορ nm-κλίμακας συνδυάζοντας το ανηγμένο κόστος της επεξεργασίας του τσιπ ($\$/\text{mm}^2$) και τον αριθμό των τρανζίστορ που φιλοξενούνται σε συγκεκριμένη επιφάνεια του τσιπ. Το γινόμενο επιβεβαιώνει την παρουσία του νόμου του Moore με την αντίστοιχη πτώση του κόστους/τρανζίστορ.

Από πλευράς κόστους, εισάγοντας την παράμετρο του κόστους/τρανζίστορ ($\$/\text{τρανζίστορ}$) είναι εφικτό να αξιολογήσουμε τη μείωση του κόστους πολλαπλασιάζοντας το κόστος της επιφάνειας προς επεξεργασία ($\$/\text{mm}^2$) με την επιφάνεια ($\text{mm}^2/\text{τρανζίστορ}$) που καλύπτει ένα τρανζίστορ (Εικόνα 4). Είναι εμφανές πως αν και αυξάνεται το κόστος της επεξεργασίας καθώς οδηγούμαστε σε τεχνολογίες νεότερης γενιάς (κάτω από τα 14-nm) το τελικό κόστος ανά τρανζίστορ μειώνεται. Η αύξηση του κόστους επεξεργασίας ($\$/\text{mm}^2$) οδηγείται από τις σύνθετες μεθόδους επεξεργασίας και τον επαυξημένο αριθμό βημάτων επεξεργασίας που απαιτούνται για να επιτευχθούν οι χαμηλοί ενεργειακοί στόχοι. Για να συγκρατηθούν οι τελικοί στόχοι του κόστους/τρανζίστορ με τις νέες τεχνικές και υλικά έχουν υιοθετηθεί αρχιτεκτονικές καινοτομίες (3D τρανζίστορ) όπως και πρωτότυπα βήματα επεξεργασίας όπως η λιθογραφία πολλαπλών εγγραφών (multi-patterning lithography) [1.44].

Από πλευράς επίδοσης της τεχνολογίας τρανζίστορ πυριτίου (Si), υπάρχουν αρκετά μετρικά που χαρακτηρίζουν τη βελτίωση της ικανότητας τους συσχετίζοντας την ενεργειακή επίδοση (energy efficiency) και τους χρόνους καθυστέρησης (delay times). Η Εικόνα 3 αναπαριστά γραφικά το γινόμενο της ενεργειακής κατανάλωσης με τους χρόνους καθυστέρησης ($CV^2 \cdot CV/I = C^2 \cdot V^3/I$). Είναι εμφανής η βελτίωση της επίδοσης του μετρικού επίδοσης κατά $\sim 10\text{dB}$ καθώς η ισχυρή ενεργειακή βελτίωση συνδυάζεται από μια βελτίωση της καθυστέρησης της λειτουργίας της πύλης. Η βελτίωση αυτή αποτυπώνεται και στις επιδόσεις των εμπορικά διαθέσιμων επεξεργαστών της Intel: Η 5^η γενιά επεξεργαστών CoreTM που βασίζονται στην τεχνολογία επεξεργασίας 14nm συγκρινόμενοι με τους αντίστοιχους επεξεργαστές της 4ης γενιάς (CoreTM M) υπερಿಸχύει με καλύτερες επιδόσεις γραφικών κατά 60%-80%, πάνω από δύο φορές μείωση στη συνολική ενέργεια που διαχέεται από τον επεξεργαστή και 60% μείωση στην κατανάλωση ενέργειας στο ολοκληρωμένο σύστημα στο τσιπ (System on Chip - SoC) [1.45].

1.2.3 Μονάδες επεξεργασίας σε επίπεδο τσιπ

Μέχρι τις αρχές του 2000, η εξέλιξη των επεξεργαστών (Central Processing Units, CPUs) βασιζόταν στην αύξηση της συχνότητας λειτουργίας τους (clock frequency). Έτσι, η αύξηση της ταχύτητας επεξεργασίας από τη μία γενιά επεξεργαστών στην άλλη σηματοδοτούσε ταυτόχρονα και την αύξηση της απόδοσης [1.46]. Αυτή η τάση, ωστόσο, δεν μπορούσε να συνεχιστεί επ' αόριστον, καθώς από ένα σημείο και μετά η περαιτέρω αύξηση της συχνότητας λειτουργίας του επεξεργαστή (π.χ. πάνω από 4 GHz) οδηγούσε σε εξαιρετικά μεγάλη κατανάλωση ισχύος και σε αυξημένη διάχυση θερμότητας, αποτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη φυσιολογική του λειτουργία σε κανονικές (ατμοσφαιρικές) συνθήκες.

Έχοντας, λοιπόν, προσεγγίσει το όριο στη συχνότητα λειτουργίας (π.χ. Intel Pentium 4 670 στα 3.8 GHz [1.47]), οι εμπορικοί κατασκευαστές επεξεργαστών υψηλής απόδοσης (π.χ. IBM, Intel, AMD) στράφηκαν στη λύση της αύξησης των αριθμών των πυρήνων που περιέχονται σε μία επεξεργαστική μονάδα, με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης σε συνδυασμό με τη μείωση της κατανάλωσης ισχύος [1.48]. Η αρχή στη νέα εποχή των πολυεπεξεργαστών σε ολοκληρωμένο κύκλωμα (Chip-Multiprocessors, CMP) έγινε το 2001 από την εταιρεία IBM, η οποία παρουσίασε τον πρώτο εμπορικό διπύρηνο (dual-core) επεξεργαστή «Power 4» που αξιοποίησε στους διακομιστές (servers) της [1.48]. Ωστόσο, η στροφή στην πολυπύρηνη (multi-core) τεχνολογία παγιώθηκε λίγα χρόνια αργότερα, με τις δύο μεγαλύτερες εταιρείες κατασκευής επεξεργαστών Intel και AMD να ανακοινώνουν το 2005 τις δικές τους διπύρηνες εκδόσεις επεξεργαστών (Intel Pentium D, Intel Pentium Extreme Edition 840, AMD Athlon 64 X2, AMD Dual-core Opteron) για οικιακή χρήση [1.49]. Έτσι, άρχισαν να αναπτύσσονται ολοκληρωμένα κυκλώματα (chip) πολλαπλών πυρήνων επεξεργασίας που, ενώ χαρακτηρίζονται από μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερες θερμοκρασίες λόγω των χαμηλότερων συχνοτήτων λειτουργίας σε σχέση με ένα πανίσχυρο μονοπύρηνο επεξεργαστή, εντούτοις προσφέρουν καλύτερη συνολική απόδοση καθώς διαχειρίζονται περισσότερες διεργασίες παράλληλα.

Παρά την ώθηση στην απόδοση επεξεργαστικής ισχύος που δόθηκε με την τεχνολογία αυτή, νέα ζητήματα προέκυψαν στην πορεία, όπως η επιλογή ανάμεσα σε ομοιογενείς ή ετερογενείς πυρήνες σε ένα τσιπ για την καλύτερη δυνατή απόδοση καθώς και η ανάπτυξη εφαρμογών πολλαπλών νημάτων με παράλληλο προγραμματισμό για την πλήρη αξιοποίηση των πολλαπλών πυρήνων επεξεργασίας [1.47]. Εκτός των παραπάνω, όμως, εξαιρετικά σημαντική πτυχή στον τομέα της απόδοσης αποτελεί και η επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών πυρήνων σε ένα CMP σύστημα, καθώς περιορισμοί στην ανταλλαγή δεδομένων θέτουν όρια στις επιδόσεις του συνολικού συστήματος. Έτσι, η βελτίωση των επιδόσεων που αποκτάται από τη χρήση ενός πολυπύρηνου επεξεργαστή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το πόσο αποτελεσματικά οι πυρήνες επικοινωνούν και συνεργάζονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τις τοπικές και απομακρυσμένες μονάδες μνήμης. Παραδοσιακά, η επικοινωνία μεταξύ των ανεξάρτητων πυρήνων πραγματοποιούνταν μέσω ενός κοινού διαύλου (shared bus) που μοιράζονταν όλες οι

μονάδες επεξεργασίας. Μία τέτοια προσέγγιση, όμως, είναι περιοριστική ως προς το εύρος ζώνης, τη χρονική καθυστέρηση (latency), την κλιμάκωση και την κατανάλωση ισχύος σε αρχιτεκτονικές που περιλαμβάνουν δεκάδες ή εκατοντάδες επεξεργαστικούς πυρήνες στο ίδιο τσιπ [1.50].

Για το λόγο αυτό, στο χώρο των CMP συστημάτων το ενδιαφέρον γρήγορα στράφηκε από τις κλασικές διασυνδέσεις διαύλου προς τα πιο εξελιγμένα και πολλά υποσχόμενα «δίκτυα σε επίπεδο τσιπ» (Network-on-Chip, NoC), τα οποία υλοποιούνται ως δίκτυα μεταγωγής αποτελούμενα από ένα σύνολο διασυνδεδεμένων δρομολογητών σε κατάλληλες τοπολογίες (π.χ. Mesh, Torus, Fat tree) [1.51]. Ως αποδοτικές και επεκτάσιμες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας εντός του τσιπ, τα NoC αποτελούν την τεχνολογία-κλειδί για τη διευθέτηση των προκλήσεων που προκύπτουν από την επιθυμία αλλά και από τη δυνατότητα διασύνδεσης όλο και περισσότερων πυρήνων σε επικείμενα πολυ-επεξεργαστικά συστήματα λόγω των αυξανόμενων αναγκών και της συνεχούς σμίκρυνσης των τρανζίστορ (transistors). Κατά συνέπεια, χάρη στα NoC προσφέρεται η δυνατότητα υποστήριξης μεγαλύτερου εύρους ζώνης και μικρότερης χρονικής καθυστέρησης κατά την επικοινωνία των πολυάριθμων επεξεργαστικών πυρήνων με έναν ενεργειακά αποδοτικότερο τρόπο σε σχέση με μία προσέγγιση διασύνδεσης που βασίζεται σε κοινούς διαύλους [1.52].

Ωστόσο, οι μεταλλικές διασυνδέσεις που απαρτίζουν τα ηλεκτρονικά NoC χαρακτηρίζονται εκ φύσεως από περιορισμούς που αφορούν τη διαφωνία, τη χρονική καθυστέρηση, τη ρυθμαπόδοση, τη συνδεσιμότητα και την κατανάλωση ισχύος. Από όλους αυτούς τους παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση ενός ηλεκτρονικού NoC, η κατανάλωση ισχύος είναι ιδιαίτερα σημαντική και απαιτείται προσεκτική ανάλυση και βελτιστοποίηση του παράγοντα αυτού καθώς αυξάνεται ο αριθμός των πυρήνων επεξεργασίας σε ένα τσιπ [1.53]. Χρησιμοποιώντας γνωστές τεχνικές κυκλωμάτων για την υλοποίηση ηλεκτρονικών NoC, η εκτιμώμενη ισχύς τους βρέθηκε ότι είναι υπερβολικά υψηλή (κατά ένα παράγοντα ίσο με 10) για να ικανοποιήσει τις ανάγκες μελλοντικών CMP συστημάτων [1.54]. Στην πράξη, ενδεικτικό παράδειγμα της σημαντικής συμμετοχής που εμφανίζουν τα ηλεκτρονικά NoC σε πολυπύρηννα συστήματα ως προς την καταναλισκόμενη ισχύ αποτελεί ο 80-πύρηνος επεξεργαστής που προέκυψε από την ερευνητική δραστηριότητα της Intel στο χώρο αυτό [1.55]. Σε αυτό το πρωτότυπο τσιπ της Intel («Teraflops Research Chip»), η ισχύς που καταναλώνεται από το ηλεκτρονικό NoC αντιπροσωπεύει περισσότερο από 25% της συνολικής ισχύος, ποσοστό το οποίο είναι ιδιαίτερα υψηλό αν ληφθούν υπόψη οι αναμενόμενες απαιτήσεις μελλοντικών πολυ-επεξεργαστικών συστημάτων.

Έτσι, δεδομένης της συνεχούς κλιμάκωσης στην απόδοση και στο μέγεθος που επιβάλλουν οι αυξανόμενες ανάγκες, τα ηλεκτρονικά NoC αναμένεται σταδιακά στο μέλλον να σταθούν εμπόδιο στη συνολική απόδοση του συστήματος ως προς την κατανάλωση ισχύος, το εύρος ζώνης και τη χρονική καθυστέρηση [1.52], [1.56]. Μία τέτοια εξέλιξη καθιστά επιτακτική την αναζήτηση και υιοθέτηση άλλων τεχνολογικών προσεγγίσεων που να μπορούν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις εύρους ζώνης και χρονικής

καθυστέρησης των μελλοντικών επικοινωνιών εντός των επιτρεπτών κάθε φορά ορίων κατανάλωσης ισχύος του εκάστοτε συστήματος. Τη λύση σε αυτά τα ζητήματα μπορεί να προσφέρει η οπτική τεχνολογία, η οποία, έχοντας διεισδύσει σε διασυνδέσεις πολύ μικρών αποστάσεων, καλείται να χρησιμοποιηθεί αντί της υπάρχουσας τεχνολογίας μέχρι και την κλίμακα του τσιπ. Εκτενής ανάλυση της ανάπτυξης της οπτικής τεχνολογίας σε αυτό το επίπεδο γίνεται στην ενότητα 1.3.

1.3 Η συμφόρηση στις διασυνδέσεις σε κλίμακα τσιπ των μονάδων επεξεργασίας (Interconnect bottleneck)

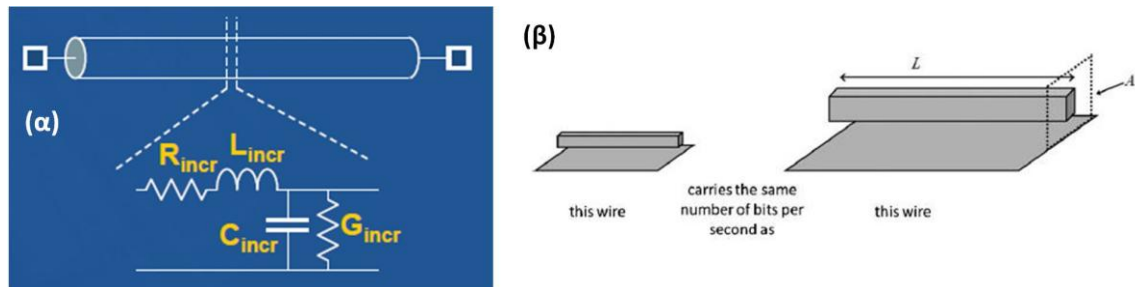
1.3.1 Ο περιορισμός της φυσικής στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις

Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις (electrical interconnections) κυριαρχούσαν ως αποκλειστική λύση στο πεδίο της επικοινωνίας στο εσωτερικό των ισχυρών ψηφιακών μηχανών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα προσφέροντας αξιοπιστία και χαμηλό κόστος. Τα προβλήματα και τα φυσικά όρια των ηλεκτρικών διασυνδέσεων εισάγουν περιορισμούς στα υπολογιστικά συστήματα καθώς αυτά εξελίσσονται [1.57-1.59]. Ο πιο χαρακτηριστικός περιορισμός που έχει αναδειχθεί στη βιβλιογραφία είναι η αδυναμία των ηλεκτρικών διασυνδέσεων να συμβιβάσουν την αύξηση της ικανότητας των επεξεργαστών για λογικές λειτουργίες (πχ Floating point operations ή FLOPs) και των αντίστοιχων λειτουργιών ανάγνωσης/ εγγραφής (Read/Write Operations) που απαιτούν την επικοινωνία με τη μνήμη [1.60]. Ένας ιδανικός κανόνας για την παραπάνω απαίτηση όπως έχει αναδειχθεί στις αρχιτεκτονικές των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων θα ήταν η διατήρηση ενός λόγου 1 byte/FLOP [1.61]. Οι σύγχρονες υπολογιστικές μονάδες δεν μπορούν να προσφέρουν ηλεκτρικές διασυνδέσεις που μπορούν να διατηρούν αυτόν τον κανόνα και οι προβλέψεις για το μέλλον τους εντοπίζονται στον περιορισμό του λόγου τόσο για την επικοινωνία εντός του τσιπ (on-chip) όσο και μεταξύ διαφορετικών τσιπ (chip-to-chip).

Προσεγγίζοντας τους φυσικούς περιορισμούς των ηλεκτρικών διασυνδέσεων μέσω μεταλλικών καλωδίων, ένα πρώτο πρόβλημα εντοπίζεται στην απώλεια του αγωγού που οφείλεται κυρίως στην ωμική του συνιστώσα του μέσου. Καθώς σε αυτές τις απώλειες εμφανίζεται και μια εξάρτηση από τη συχνότητα ($\partial/\partial\omega$), η εισαγωγή υποβάθμισης της ποιότητας του σήματος (distortion) εμφανίζεται για σήματα με ευρύ φασματικό περιεχόμενο καθώς οι ψηλότερες φασματικές συνιστώσες εμφανίζουν μεγαλύτερες απώλειες συγκριτικά με τις χαμηλότερες. Αν και έχει προταθεί η χρήση διατάξεων εξισορρόπησης (equalizers) του καναλιού για την αντιστάθμιση της παραμόρφωσης και η χρήση ενισχυτικών βαθμίδων για την αντιστάθμιση των απωλειών του καναλιού, τα κόστη, η ενεργειακή κατανάλωση και η πολυπλοκότητα καθιστούν τις λύσεις αυτές μη ελκυστικές [1.62]. Η απλούστερη προσέγγιση για την επίτευξη μεγαλύτερης χωρητικότητας μετάδοσης από ένα καλώδιο συγκεκριμένου μήκους είναι επιδίωξη για μεγαλύτερη εγκάρσια διατομή (cross section) του καλωδίου που έχει ως αποτέλεσμα να μειώσει την ωμική αντίσταση

($R=\rho \cdot L/A$). Για μεγάλες αποστάσεις καλωδίων το κόστος αυξάνεται ενώ το πιο βασικό πρόβλημα της προσέγγισης αυτής είναι ο περιορισμός της δυνατότητας για πυκνές διασυνδέσεις ακολουθώντας την τάση σμίκρυνσης που ακολουθείται στα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (ICs).

Η τελευταία συνθήκη αναδεικνύει το θεμελιώδη περιορισμό που εισάγεται με τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις καθώς καθιστά ανέφικτο το συμβιβασμό μεταξύ της απαίτησης για υψηλές τιμές διαθέσιμου εύρους ζώνης και υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για την ηλεκτρική διασύνδεση πάνω στο τσιπ (on-chip) αλλά και μεταξύ διαφορετικών τσιπ (chip-to-chip communication). Αυτός ο περιορισμός μπορεί να γίνει πιο κατανοητός κοιτώντας τη φυσική που διέπει τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Στη μεγάλη εικόνα των εφαρμογών κλίμακας τσιπ, υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη για τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις που περιλαμβάνουν τις RC-γραμμές (Resistive-Capacitive RC) και τις LC-γραμμές (Inductive-Capacitive LC) με το κριτήριο κατάταξης να παραμένει εάν για μια συγκεκριμένη κατηγορία συχνοτήτων η εμπέδηση (impedance) να κυριαρχείται από την ωμική ή επαγωγική συμπεριφορά. Ο παράγοντας που καθορίζει τη συμπεριφορά αυτή είναι το μέγεθος της διατομής (cross section) των ηλεκτρικών καλωδιώσεων καθώς η αντίσταση ανά μήκος εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της διατομής ενώ η χωρητικότητα/αυτεπαγωγή εξαρτάται από τη γεωμετρία της διατομής και όχι το μέγεθος. Είναι γνωστό άλλωστε πως η επαγωγή και η χωρητικότητα εξαρτώνται αποκλειστικά Στην περιοχή των GHz συχνοτήτων για τα σύγχρονα συστήματα επεξεργασίας, οι γραμμές διασύνδεσης είναι RC-γραμμές για την περίπτωση καλωδίων πάνω στο τσιπ (on-chip lines) και LC-γραμμές για την περίπτωση επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τσιπ (chip-to-chip). Η Εικόνα 5(α) αναπαριστά τις δύο κατηγορίες των γραμμών μεταφοράς (RC- και LC-) με τα ενδεικτικά συγκεντρωμένα παρασιτικά, ωμικά και επαγωγικά στοιχεία.



Εικόνα 5: (α) Αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς που αξιοποιούνται για την υλοποίηση γραμμών διασύνδεσης πάνω στο τσιπ (RC-τύπου) και των γραμμών της επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τσιπ (RLC-τύπου), (β) Σχηματική αναπαράσταση του παραδόξου της σμίκρυνσης που ερμηνεύει τον περιορισμό της χωρητικότητας μετάδοσης από ένα ηλεκτρικό καλώδιο. Το γινόμενο αντίστασηςχωρητικότητα ($\tau \sim R \cdot C$) που καθορίζει τη σταθερά του χρόνου σε μια γραμμή μεταφοράς παραμένει αναλλοίωτο στην περίπτωση που επιλεγεί να διατηρηθεί η μεγέθυνση/σμίκρυνση της γραμμής μεταφοράς. Συνεπώς, ο ρυθμός μετάδοσης (bitrate) που μπορεί να υποστηρίξει αυτή η γραμμή παραμένει αναλλοίωτος από την κλίμακα μεγέθους της.

Στην περίπτωση της RC-γραμμής μεταφοράς που αξιοποιείται για την περίπτωση διασύνδεσης πάνω στο τσιπ, για τον υπολογισμό της χωρητικότητας της μετάδοσης αρκεί να προσδιοριστεί η RC-ποσότητα που δίνει τον υπολογισμό της σταθεράς χρόνου και άρα το επιτρεπτό εύρος ζώνης λειτουργίας. Ο τύπος υπολογισμού για το όριο χωρητικότητας μετάδοσης του παραπάνω τύπου γραμμής δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$B \leq B_0 \cdot \frac{A}{L^2} \quad (1.1)$$

Για την περίπτωση απλών σχημάτων διαμόρφωσης (On-Off Signaling), θεωρώντας το χαρακτηριστικό γινόμενο RC ως τον ελάχιστο δυνατό χρόνο για τη χρονο-θυρίδα του bit, παρατηρούμε πως ακόμα και εάν σμικρύνουμε στο χώρο (3D) τη γραμμή μεταφοράς, η διαθέσιμη χωρητικότητα της γραμμής από σκοπιάς αναλογικού εύρους ζώνης θα παραμείνει η ίδια [1.60]. Το παράδοξο της σμίκρυνσης αποτυπώνεται στην Εικόνα 5(β) δίνοντας μια σχηματική επίδειξη του παραπάνω ισχυρισμού. Η ίδια συμπεριφορά ακολουθείται και για την περίπτωση της LC-γραμμής κατά την οποία η τιμή για τη σταθερά περιορισμού του ρυθμού μετάδοσης είναι μάλιστα ελαφρώς μικρότερη από $B_0=10^{16}$ bits/sec που ισχύει για τις RC-γραμμές ενώ αυξάνεται σε $B_0=10^{15}$ bits/sec για την περίπτωση RLC-γραμμών που επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τσιπ και προσφέρουν τη δυνατότητα για εξισορρόπηση (equalization).

Η προηγούμενη σχέση ισχύει και στην περίπτωση που θεωρήσουμε ένα σύστημα που αποτελείται από αλληλουχία γραμμών μεταφοράς με συνολικό μέγεθος ίσο με A. Συνεπώς, ο αδιάστατος χαρακτήρας του γινομένου είναι ένας θεμελιώδης περιορισμός για τη δυνατότητα των ηλεκτρικών διασυνδέσεων να αυξήσουν την ικανότητα μετάδοσης εύρους ζώνης καθώς είναι φραγμένη από την RC-σταθερά του χρόνου που δεν επιτρέπει υψηλότερα όρια μετάδοσης εάν μεταβάλλουμε το μέγεθος των διασυνδέσεων. Αγνοώντας την επιπλέον επιβάρυνση που εισάγεται από άλλους μηχανισμούς είναι εμφανές πως η δυνατότητα για μετάβαση σε μικρής κλίμακας νανο-δομές δε συνοδεύεται από απελευθέρωση του εύρους ζώνης στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Το πρόβλημα αυτό της φραγής των διασυνδέσεων (Interconnect Bottleneck) τελικά περιορίζει την επικοινωνία πάνω στο τσιπ στις RC-γραμμές λόγω της αντίστοιχης σταθεράς χρόνου ενώ η επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τσιπ με LC-γραμμές εμφανίζει αντίστοιχο περιορισμό εύρους ζώνης και υποφέρει επιπλέον από το επιδερμικό φαινόμενο (skin effect) [1.63,1.64].

1.3.2 Η ανάδειξη της οπτικής τεχνολογίας για μικρής κάλυψης διασυνδέσεις

Η οπτική ίνα έχει ήδη καταφέρει να αποκτήσει πρωταγωνιστικό ρόλο στην υπόθεση της μεταφοράς δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις και ήδη εμφανίζεται σαν αποτελεσματικό μέσο μετάδοσης για να συνδέσει τμήματα μεγάλων ηλεκτρονικών συστημάτων. Σε συστήματα οπτικής μετάδοσης σε ζεύξη μεγάλου μήκους, οι πολύ μικρές απώλειες και η διασπορά της οπτικής ίνας επιτρέπει την παρουσία από τμήματα ίνας μήκους ~100Km μεταξύ σταθμών που περιλαμβάνονται ενισχυτές και αναγεννητές του σήματος. Η ιδέα που

κρύβεται πίσω από τη χρήση της οπτικής ίνας για αυτές τις αποστάσεις μετάδοσης είναι η ελαχιστοποίηση των σταθμών που μεταφράζεται σε αντίστοιχη ελαχιστοποίηση του κόστους του δικτύου. Η τεχνική βελτιστοποίηση της ζεύξης εντοπίζεται κυρίως στο σχεδιασμό ενός συστήματος ίνας που λειτουργεί στη μέγιστη δυνατή απόσταση με ικανότητα μεταφοράς του μέγιστου εύρους ζώνης. Το μέγεθος, η ενεργειακή κατανάλωση και το κόστος των πομποδεκτών είναι δευτερευούσης σημασίας για την εφαρμογή αυτή.

Καθώς κινούμαστε σε μικρότερες ζεύξεις, οι λόγοι που καθιστούν ελκυστική τη χρήση της οπτικής διασύνδεσης καθώς και τα εμπόδια που προκύπτουν από την εφαρμογή τους αλλάζουν δομικά [1.65-1.68]. Η οπτική τεχνολογία μπορεί να φανεί χρήσιμη στην αύξηση της πυκνότητας διασύνδεσης, στη μείωση της διάχυσης θερμότητας κατά τη μεταφορά των δεδομένων και στη βελτίωση της διατήρησης της ακεραιότητας του μεταδιδόμενου σήματος πληροφορίας και τις τεχνικές χρονοσυσχετισμού [1.68-1.72] και –όπως στην περίπτωση της παρούσας διατριβής – υιοθετώντας τεχνικές μεταγωγής/δρομολόγησης (switching/routing) με οπτικό τρόπο [1.73-1.75]. Ο Πίνακας 1 επιχειρεί να αναδείξει τις απαιτήσεις της εφαρμογής της οπτικής τεχνολογίας για τη μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (long reach) όπως και σε ζεύξεις μικρής κλίμακας (short reach).

Μεγάλη Απόσταση	Μικρή Απόσταση
Απαιτήση για μέγιστη δυνατή χωρητικότητα (bit/s) για το μεγαλύτερο δυνατό μήκος ζεύξης. Κέρδος το μεγάλο μήκος (~100km) ζεύξης	Απαιτήση για μέγιστη πυκνότητα διασύνδεσης. Επίτευξη της ελάχιστης δυνατής διατομής οπτικής καλωδίωσης για συγκεκριμένο μήκος διασύνδεσης και εύρος ζώνης
Χαλαρή απαίτηση για συνολική κατανάλωση ισχύος. Σχεδιασμός για την ελάχιστη λαμβανόμενη οπτική ισχύ	Ελαχιστοποίηση της διάχυσης ισχύος με απαίτηση για σχεδίαση της μικρότερης ενέργειας/bit
Δυνατότητα για χρήση πολυπλεξίας πολλαπλών μηκών κύματος (WDM). Επαναχρησιμοποίηση της ίδιας ίνας για πολλά κανάλια. Δυνατότητα για μεταγωγή/δρομολόγηση μηκών κύματος	Δυνατότητα για χρήση της WDM πολυπλεξίας για να αυξηθεί η πυκνότητα πληροφορίας ($\text{Gb}\cdot\text{s}^{-1}/\text{mm}^2$) των συνδέσεων. Δυνατότητα για μεταγωγή/δρομολόγηση μηκών κύματος
	Απαιτήση για διατήρηση της ακεραιότητας του σήματος. Αυξημένη ακρίβεια χρονικού συγχρονισμού. Μειωμένες ανακλάσεις και παρεμβολή. Απομόνωση από σήματα τάσης.

Πίνακας 1.1: Ανάδειξη απαιτήσεων και πλεονεκτημάτων από τη χρήση οπτικών σε επικοινωνία μικρής και μεγάλης κλίμακας ζεύξης.

Στην περίπτωση της ζεύξης μεγάλου μήκους αναδεικνύεται η απαίτηση του μέγιστου γινομένου του ρυθμού μετάδοσης με μήκος ζεύξης ($\text{Gb}\cdot\text{s}\cdot\text{Km}$) όπως παρουσιάστηκε. Στην περίπτωση των διασυνδέσεων για εφαρμογές μικρών αποστάσεων η οπτική τεχνολογία καλείται να υπερβεί τον περιορισμό των ηλεκτρικών διασυνδέσεων επιδιώκοντας τη διατήρηση του δομικά πελώριου εύρους ζώνης σε πολύ μικρό μέγεθος για να διασφαλιστεί η μεγάλη πυκνότητα διασύνδεσης που απαιτείται για την επικοινωνία πάνω στο τσιπ (on-chip interconnects), μεταξύ των τσιπ (chip-to-chip), και μεταξύ

πλακετών (board-to-board). Για το σκοπό αυτό, η χρησιμοποίηση φωτονικών ολοκληρωμένων κυματοδηγών (Photonic Integrated Circuits - PICs) μπορεί να μειώσει δραστικά την κλίμακα του μεγέθους (συγκριτικά με την ίνα) προσφέροντας πρακτικά ένα οπτικό δίαυλο άπειρου εύρους ζώνης. Από σκοπιά διάχυσης ισχύος, ενδιαφέρον παρουσιάζει πως ενώ στην περίπτωση των ζεύξεων μεγάλου μήκους η μόνη απαίτηση που μπαίνει από σκοπιά ισχύος είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη ευαισθησία του δέκτη με αντίστοιχη τιμή λαμβανόμενης οπτικής ισχύος (για να αυξηθεί το μήκος ζεύξης), στις οπτικές διασυνδέσεις μικρού μήκους η διάχυση ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα και πρέπει να κρατηθεί όσο το δυνατόν πιο χαμηλά. Είναι εμφανές πως αν και στην περίπτωση των ζεύξεων μεγάλου μήκους το μέγεθος των δομών αλλά και η ενεργειακή κατανάλωση δεν παίζουν σημαντικό ρόλο, στις οπτικές διασυνδέσεις μικρού μήκους η αυξημένη πυκνότητα διασύνδεσης (interconnection density) και η μειωμένη ενεργειακή κατανάλωση είναι απόλυτης προτεραιότητας. Η δυνατότητα υποστήριξης της WDM αρχιτεκτονικής για αύξηση της χωρητικότητας και των πλεονεκτημάτων που παρέχει στην υλοποίηση κυκλωμάτων μεταγωγής/δρομολόγησης με δομές ευαίσθητες στην επιλογή μηκών κύματος. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια παραβολική προσέγγιση των πλεονεκτημάτων της μεθόδου των οπτικών διασυνδέσεων έναντι των ηλεκτρικών διασυνδέσεων εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά της πυκνότητας διασύνδεσης (Interconnect Density), της διάχυσης ενέργειας της διασύνδεσης (Interconnect Energy) και των διαστάσεων χρονισμού του σήματος πληροφορίας και ρολογιού (Clock and Signal Timing). Οι οπτικές διασυνδέσεις αποφεύγουν έναν βασικό περιοριστικό παράγοντα που περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα καθώς απουσιάζει το στοιχείο της ωμικής απώλειας. Όπως αναδείχθηκε, ο θεμελιώδης περιορισμός στη χωρητικότητα το διαύλου που θέτει ο συγκεκριμένος μηχανισμός απωλειών (που οδηγεί σε κλείσιμο του ανοίγματος ματιού σε αντίθεση με το θεώρημα του Shannon που εισάγει τον περιορισμό λόγω θορύβου) οδηγεί στον περιορισμό της χωρητικότητας σύμφωνα με τη σχέση $B \leq B_0 \cdot A/L^2$ όπως συζητήθηκε αναλυτικά. Το γεγονός πως ο όρος A^2/L είναι αδιάστατος ερμηνεύει το θεμελιώδη 'περιορισμό της σμίκρυνσης' καθώς θεωρώντας ένα 3D χώρο ο οποίος έχει καλυφθεί από ηλεκτρικές διασυνδέσεις, δεν μπορεί να υπάρξει βελτίωση της χωρητικότητας του διαύλου με οποιαδήποτε παρέμβαση στο μέγεθος. Απεναντίας, οι οπτικές διασυνδέσεις μπορούν να προσφέρουν κυματοδηγούς διατομών σε κλίμακα μηκών κύματος που μπορούν να υποστηρίξουν Tb/s εύρος ζώνης με χρήση της WDM πολυπλεξίας [1.76].

Οπτικές Διασυνδέσεις	Ηλεκτρικές Διασυνδέσεις
<p>Η απουσία της απώλειας αντίστασης (resistive loss) στις οπτικές διασυνδέσεις προσφέρει πρακτικά χωρίς περιορισμό εύρος ζώνης στον οπτικό δίαυλο αξιοποιώντας την κλιμάκωση χωρητικότητας μέσω WDM.</p>	<p>$B \leq B_0 \cdot A^2/L$ ο θεμελιώδης περιορισμός για τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις με $B_0 \sim 10^{16}$ bit/s για επικοινωνία πάνω στο τσιπ (on-chip) & $B_0 \sim 10^{15}$ για την επικοινωνία μεταξύ των τσιπς (chip-to-chip)</p>
<p>Η ενέργεια διάχυσης σχετίζεται με την εκφόρτιση της χωρητικότητας του φωτοδέκτη (E_p) και την απαιτούμενη τάση του σήματος με τη σχέση: $E_p \geq C_d \cdot V_r \cdot hf/e$</p>	<p>Η ενέργεια φόρτισης (E_s) στη γραμμή μεταφοράς χωρητικότητας C_l με σήματα με πλάτος τάσης V_s είναι η παρακάτω: $E_s \geq C_l \cdot V_s^2$</p>
<p>Δυνατότητα για χρήση πολυπλεξίας πολλαπλών μηκών κύματος (WDM). Επαναχρησιμοποίηση της ίδιας ίνας για πολλά κανάλια. Δυνατότητα για μεταγωγή/δρομολόγηση μηκών κύματος</p>	
<p>Η τεχνολογία των οπτικών προσφέρει μηδενική διασπορά για μικρά τμήματα διασύνδεσης με τη δυνατότητα λειτουργιών χρονισμού</p>	<p>Χαμηλή ομαδική ταχύτητα διάδοσης αυξάνοντας το κόστος καθυστέρησης (delay times) με τεχνικές μείωσης του μήκους της ηλεκτρικής γραμμής για αύξηση χωρητικότητας [1.66].</p>

Πίνακας 1.2: Μια απευθείας σύγκριση των οπτικών διασυνδέσεων και των ηλεκτρικών διασυνδέσεων κατά την εφαρμογή τους σε διασυνδέσεις μικρού μήκους κάλυψης (short reach interconnects). Αναδεικνύονται οι παράμετροι του ορίου ρυθμού μετάδοσης των οπτικών/ηλεκτρικών διασυνδέσεων, η κατανάλωση ισχύος της διασύνδεσης, παράγοντες επιβάρυνσης της ακεραιότητας του σήματος.

Η διάχυση της ενέργειας στις διασυνδέσεις αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στις CMOS δομές των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων και σύμφωνα με την ατζέντα στρατηγικής της περιοχής των ημιαγωγών ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductors) εμφανίζεται κορεσμός στη δυνατότητα απομάκρυνσης των θερμικών φορτίων ισχύος (200W) από τα CMOS τσιπς με αποδεκτό τρόπο από πλευράς κόστους με συνέπεια να επηρεάζεται μια σειρά εφαρμογών [1.77,1.78]. Η συμβολή των ηλεκτρικών διασυνδέσεων σε αυτήν την κατανάλωση ισχύος αναδύεται ως η κυρίαρχη συνιστώσα καθώς συμμετείχε ήδη από την τεχνολογία των 130nm στο 50% και προβλέπεται να ευθύνεται για το ~80% της κατανάλωσης ισχύος των μικροεπεξεργαστών στις τρέχουσες CMOS τεχνολογίες [1.79]. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις καταναλώνουν ηλεκτρική ισχύ μέσα από τη φόρτιση της γραμμής μεταφοράς κατά την παρουσία του σήματος τάσης. Ακόμα και εάν μειώνεται το πλάτος της τάσης του ηλεκτρικού σήματος με σκοπό να μειωθεί η κατανάλωση ισχύος ($E_s=C \cdot V^2$) στα μοντέρνα υπολογιστικά συστήματα [1.80-1.82], η κατανάλωση στις γραμμές παραμένει αξιοσημείωτη στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Από πλευράς οπτικών διεπαφών (optical interconnects), η κατανάλωση ισχύος δεν οφείλεται στην παρουσία ωμικού στοιχείου αλλά στη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό σήμα στη φωτοδίοδο και στην απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης/εκφόρτισης σε αυτό το στοιχείο. Συνεπώς, τα πιθανά κέρδη στη διάχυση ενέργειας από τη χρήση των οπτικών διασυνδέσεων σχετίζονται με τη δυνατότητα για την αποδοτική σχεδίαση της οπτικής-ηλεκτρικής-οπτικής μετατροπής του σήματος και την

αναισθησία που εμφανίζουν (σε αντίθεση με τις ηλεκτρικές που εξαρτώνται από το μήκος καλωδίωσης) στο μήκος διασύνδεσης [1.83,1.84]. Η δυνατότητα των οπτικών κυματογωγών να διατηρούν την ακεραιότητα του σήματος (signal integrity) για μεγάλο εύρος ζώνης, προσφέροντας επιπλέον τη δυνατότητα που προσφέρουν για λειτουργίες διαμοιρασμού και ανάκτησης του ρολογιού [1.85-1.87]. Τέλος, ένα πλεονέκτημα της οπτικής τεχνολογίας που συνοδεύεται από το πλεονέκτημα της χαμηλής διασποράς των οπτικών κυματοδηγών και της χαμηλής εξάρτησης της ομαδικής ταχύτητας (group velocity) από τη θερμοκρασία ($\partial\beta_1/\partial T$) σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά καλώδια που εμφανίζουν ισχυρή εξάρτηση [1.87].

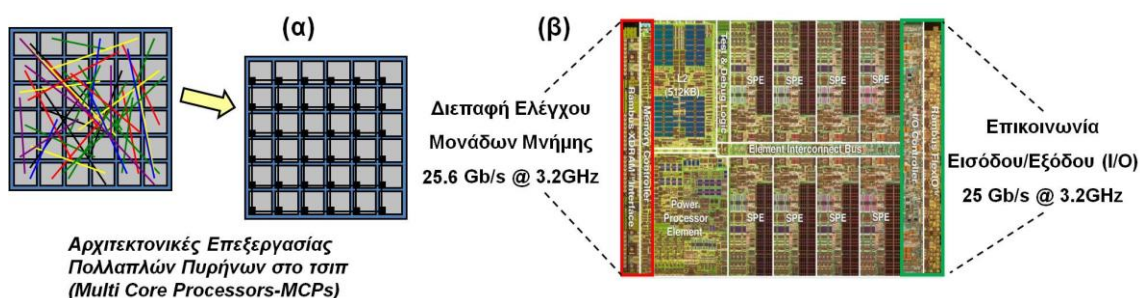
1.4 Η ανάδειξη των Φωτονικών Κόμβων (PNoCs) για τη βελτίωση της λειτουργίας των Multi-Core Processors

Το επίπεδο της βελτίωσης στην απόδοση των υπολογιστικών συστημάτων από τη χρήση πολλαπλών πυρήνων (Multi-Core Processors) εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα της επικοινωνίας μεταξύ των πυρήνων αλλά και της επικοινωνίας τους με τις τοπικές (local) και απομακρυσμένες (remote) μνήμες. Συνεπώς, η τάση που αναδείχθηκε κατά την πρώτη φάση για ανάγκη διασφάλισης γρήγορων, πυκνά ολοκληρωμένων, χαμηλής κατανάλωσης οπτικών διασυνδέσεων πρέπει να εμπλουτιστεί πλέον από πιο σύνθετες τοπολογίες δικτύων πάνω στο τσιπ (Networks-on-Chip-NoC) [1.88]. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ήδη στην περιγραφή του προβλήματος της συμφόρησης των διασυνδέσεων (Interconnect Bottleneck), οι εφαρμογές επεξεργαστών πολλαπλών πυρήνων (MCPs) έχουν την ανάγκη από την υψηλής χωρητικότητας επικοινωνία πάνω στο τσιπ και μεταξύ των τσιπ ώστε να συμβαδίζουν με το διαρκώς μειούμενο μέγεθος των τρανζίστορ. Σε αυτήν την απαίτηση, οι μεταλλικές διασυνδέσεις υποφέρουν από τον περιορισμό του εύρους ζώνης, της κατανάλωσης ισχύος και τους αργούς χρόνους καθυστέρησης [1.87,1.89]. Μελέτες έχουν προτείνει τη συνέργεια μεταξύ φωτονικής τεχνολογίας και ηλεκτρονικών για την υπέρβαση των ορίων που θέτουν οι παραδοσιακές NoC δομές που βασίζονται σε μεταλλικές διασυνδέσεις [1.90,1.91]. Για την υλοποίηση της υπόσχεσης των Φωτονικών δικτύων στο τσιπ (NOC) απαιτούνται οπτικές διατάξεις πάνω στο τσιπ που θα είναι ολοκληρωμένες με μικρο-ηλεκτρονικά κυκλώματα (microelectronic circuits). Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά η προσέγγιση αυτή με τις στρατηγικές που εκπονούνται για την κάλυψη των αναγκών της επικοινωνίας των νέων αρχιτεκτονικών των υπολογιστικών συστημάτων μέσα από τη συνέργεια οπτικών και ηλεκτρικών διασυνδέσεων.

1.4.1 Ο βέλτιστος συνδυασμός μεταξύ φωτονικής τεχνολογίας και ηλεκτρονικών για την αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων

Στην ανάπτυξη περισσότερων πυρήνων που ολοκληρώνονται σε κοινό τσιπ, το πρώτο βήμα είναι η διασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ τους αλλά και της επικοινωνίας τους με τις μονάδες μνήμης προσφέροντας διαύλους επικοινωνίας τεράστιου εύρους ζώνης. Η

Εικόνα 6(α) αναπαριστά τη συγκεκριμένη μετάβαση που υπόσχεται να υλοποιήσει η ανάπτυξη ενός φωτονικού δικτύου διασυνδέσεων πάνω στο τσιπ. Το υψηλό εύρος ζώνης και η χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις είναι η βασική προτεραιότητα. Η δυνατότητα για αύξηση της επικοινωνίας εντός τσιπ οδηγεί αυτόματα στην αύξηση της χωρητικότητας δεδομένων που επικοινωνεί μεταξύ διαφορετικών τσιπς. Παράλληλα κλιμακώνει και τη ροή πληροφορίας η οποία κατευθύνεται προς τις μονάδες μνήμης όπως είναι αναμενόμενο. Η Εικόνα 6(β) αναδεικνύει τους περιορισμούς που αναδεικνύεται στην επικοινωνία του τσιπ τόσο από τη σκοπιά της διεπαφής ελέγχου μονάδων μνήμης όσο και στην επικοινωνία εισόδου/εξόδου (Input/Output-I/O) για κάθε τσιπ. Η κλιμάκωση της επικοινωνίας δεδομένων στην είσοδο/έξοδο (I/O) του τσιπ είναι εφικτή με τη χρήση αυξημένου αριθμού των επαφών επικοινωνίας (pin) και της ταχύτητας μετάδοσης στην κάθε γραμμή. Δυστυχώς η αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης σε κάθε γραμμή (pin) συνοδεύεται από ανάλογη αύξηση της διάχυσης ισχύος. Επιπλέον, αθροίζοντας μεγάλο αριθμό αντίστοιχες διεπαφές επικοινωνίας αναδεικνύονται ζητήματα συσκευασίας (packaging), διαχείρισης διαθέσιμου μεγέθους και επικάλυψης (crosstalk) μεταξύ γειτονικών διαύλων. Το πρόβλημα της επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών τσιπ (chip-to-chip communication) είχε διαπιστωθεί αρκετά νωρίς καθώς το κενό μεταξύ της χωρητικότητας του διαύλου που εξυπηρετεί τον κεντρικό δίαυλο πάνω στο τσιπ (Element Interconnect Bus) και των διεπαφών επικοινωνίας (I/O connectivity) σε ένα τσιπ επεξεργαστή μπορεί να προσεγγίσει και τη μία τάξη μεγέθους [1.92].



Εικόνα 6: (α) Οι αρχιτεκτονικές Επεξεργασίας Πολλαπλών Πυρήνων (Multi Core Processors - MCPs) απαιτούν τοπολογίες διασύνδεσης μεταξύ διαφορετικών πυρήνων. (β) Στην ολοκληρωμένη δομή του Επεξεργαστή αναδεικνύονται τα τμήματα της Διεπαφής Ελέγχου Μονάδων Μνήμης καθώς και της Επικοινωνίας Εισόδου/Εξόδου που περιορίζονται σε ταχύτητες επικοινωνίας της τάξης των 25Gb/s. Στο κεντρικό σημείο του τσιπ υπάρχει ο κεντρικός δίαυλος επικοινωνίας (bus) που αναλαμβάνει την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών πυρήνων αλλά και από/προς τη μονάδα του MCP.

Σε αυτό το πλαίσιο, η επικοινωνία με φωτονικούς διαύλους πάνω στο τσιπ έχει προταθεί με πειστικό τρόπο για την υπέρβαση των παραπάνω περιορισμών που θέτουν οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις στα μοντέρνα υπολογιστικά συστήματα. Οπτικοί δίαυλοι στο τσιπ σε επίπεδο δικτύων πάνω στο τσιπ (NoC) για διαχείριση δεδομένων με απεριόριστο εύρος ζώνης και χαμηλή διάχυση ισχύος έχουν ήδη προταθεί και η αξιοποίησή τους βασίζεται σε δύο βασικά δομικά πλεονεκτήματα της φωτονικής τεχνολογίας πάνω στο τσιπ [1.93]:

Αρχικά το διαθέσιμο εύρος ζώνης των φωτονικών διαύλων σε έναν απλό κυματοδηγό (waveguide) μπορεί να προσεγγίσει ταχύτητες Tb/s με μία περιορισμένη διάχυση ισχύος για τη χωρητικότητα αυτή. Επίσης η διάχυση ισχύος δεν εξαρτάται από την απόσταση που πρέπει να καλυφθεί πάνω στο τσιπ από τον οπτικό κυματοαγωγό αλλά κλιμακώνει μόνο ανάλογα με τις διατάξεις που χρησιμοποιούνται την οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή και περιέχουν οδηγούς διαμορφωτών (optical modulator drivers), δεκτών (receivers).

Εστιάζοντας στα πλεονεκτήματα της οπτικής τεχνολογίας για την ανάπτυξη των φωτονικών δικτύων πάνω στο τσιπ (NoC) επεκτείνουμε τα δύο βασικά πλεονεκτήματα που αναφέρονται παραπάνω. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης των φωτονικών διαύλων επικοινωνίας βασίζεται στην ιδιότητα της διαφάνειας στο ρυθμό μετάδοσης (bit-rate transparency) του φωτονικού μέσου [1.94]: σε αντίθεση με τους ηλεκτρονικούς δρομολογητές που βασίζονται στη CMOS τεχνολογία και κλιμακώνουν τη διάχυση ισχύος ανάλογα με το ρυθμό μετάδοσης [1.95], οι φωτονικοί διακόπτες (photonic switches) μεταγουν μηνύματα δεδομένων με τη διάχυση ενέργειας να είναι ανεξάρτητη από το ρυθμό μετάδοσης. Η ιδιότητα αυτή διευκολύνει τη μετάδοση μηνυμάτων πολύ υψηλών ρυθμών μετάδοσης με οπτικούς κυματοαγωγούς χωρίς να εμφανίζεται το κόστος διάχυσης ισχύος που εμφανίζεται σε παραδοσιακά ηλεκτρικά δίκτυα πάνω στο τσιπ.

Το επιπλέον χαρακτηριστικό της οπτικής επικοινωνίας πηγάζει από τη χαμηλή απώλεια των οπτικών κυματοαγωγών (low loss in optical waveguides), καθώς πρακτικά στην κλίμακα του τσιπ η ισχύς που διαχέεται σε ένα φωτονικό δίαυλο είναι πλήρως ανεξάρτητη από την απόσταση διάδοσης πάνω στο τσιπ. Η διάχυση ενέργειας παραμένει σταθερή για τη διάδοση ενός μηνύματος πληροφορίας πάνω στο τσιπ ανεξαρτήτως απόστασης διάδοσης (είτε 2mm είτε 2cm) ενώ αντίθετα στην ηλεκτρική διασύνδεση υπάρχει εξάρτηση από το μήκος (λόγω της τιμής της χωρητικότητας ανά μονάδα μήκους της γραμμής). Τα κέρδη της μειωμένης διάχυσης ισχύος από την ιδιότητα αυτή αποκτούν επιπλέον σημασία για την επικοινωνία μεταξύ των τσιπς. Τα κέρδη από τη μειωμένη διάχυση ισχύος μεταφράζονται σε βελτιώσεις στη διαδικασία συσκευασίας (packaging) των ολοκληρωμένων συστημάτων επεξεργαστών καθώς η αυξημένη διάχυση ισχύος μεταφράζεται σε αυξημένα θερμικά φορτία πάνω στο τσιπ. Τα κέρδη της μειωμένης διάχυσης ενέργειας από την επίδοση του NoC λόγω των βελτιώσεων μπορούν να διοχετευτούν για τη φιλοξενία μεγαλύτερου αριθμού πυρήνων κρατώντας σταθερή τα διάχυση θερμότητας πάνω στο τσιπ με σκοπό να αυξηθεί η υπολογιστική επίδοση/Watt του συστήματος [1.96].

Φωτονική Τεχνολογία	Ηλεκτρονική Τεχνολογία
✓ Χαμηλές απώλειες μετάδοσης και ελκυστικά χαμηλές καταναλώσεις (Watts/εύρος ζώνης) διάφανες στη χωρητικότητα του διαύλου	✓ Υψηλές πυκνότητες ολοκλήρωσης που επιτρέπουν απεριόριστη υπολογιστική ισχύ και δυνατότητα προσωρινής αποθήκευσης (buffering)
* Περιορισμένη δυνατότητα για επεξεργασία και μονάδες προσωρινής αποθήκευσης (buffering)	* Διάχυση ενέργειας που εξαρτάται από το ρυθμό μετάδοσης (bit/s) και τη διανυόμενη απόσταση

Η πρόταση για το υβριδικό δίκτυο Δικτύου πάνω στο τσιπ (Network on Chip) αξιοποιώντας τη συνέργεια φωτονικής και ηλεκτρονικής τεχνολογίας:

- Μετάδοση πληροφορίας (Data Transmission) σε παθητικούς φωτονικούς διαύλους
- Έλεγχος (Control) του δικτύου μέσω ηλεκτρονικών ICs
- Μέθοδοι μεταγωγής κυκλώματος (Circuit-Switched) για τη δρομολόγηση πακέτων πληροφορίας πάνω στο τσιπ

Πίνακας 1.3: Ανάδειξη συγκριτικών πλεονεκτημάτων της φωτονικής τεχνολογίας και της ηλεκτρονικής τεχνολογίας που αξιοποιούνται για την υλοποίηση δομών Δικτύων στο Τσιπ (Network on Chip-NoC) σε προηγμένες τοπολογίες διασύνδεσης. Η αξιοποίηση των τεχνολογιών μπορεί να προσφέρει μια υβριδική προσέγγιση συνδυάζοντας τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των δύο τεχνολογιών.

Για την υλοποίηση του φωτονικού μέρους του δικτύου πάνω στο τσιπ η φωτονική ολοκλήρωση αξιοποιείται αξιόπιστες λύσεις συμβαδίζοντας με τις κλίμακες μεγεθών σε επίπεδο τσιπ. Η επιλογή της φωτονικής πλατφόρμας που επιλέγεται για αν εφοδιάσει το οπτικό μέρος των υβριδικών δικτύων στο τσιπ προέρχεται από τη βιομηχανία του πυριτίου (Silicon Industry) [1.97,1.98]. Η φωτονική τεχνολογία πυριτίου (Silicon Photonics) θεωρείται η κυρίαρχη επιλογή πλατφόρμας ολοκλήρωσης για οπτικά κυκλώματα προσφέροντας βασικά πλεονεκτήματα όπως χαμηλές οπτικές απώλειες, υψηλές πυκνότητες ολοκλήρωσης και τεχνικές κατασκευής συμβατές με τη CMOS-μέθοδο κατασκευή [1.99,1.100]. Η Si πλατφόρμα προσφέρει πληθώρα από δομικά στοιχεία τα οποία υλοποιούν τις τοπολογίες δικτύων σε τσιπ που έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίξουν τα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται με λεπτομέρεια Πιο συγκεκριμένα:

Κυματοδηγοί (Waveguides) και Παθητικά στοιχεία (Passive Circuitries): Οι κυματοδηγοί αποτελούν τις οπτικές δομές που συνθέτουν και συνδέουν μεταξύ τους όλες τις φωτονικές μονάδες. Οι δομές των κυματοδηγών κατατάσσονται ανάλογα με το υλικό κατασκευής (πολυμερές, ημιαγωγός, κ.ά.), τον αριθμό των οπτικών ρυθμών που υποστηρίζουν (single-/multi-mode) και τη γεωμετρία (strip, rib, slot, photonic crystals). Χάρη στις σύγχρονες τεχνικές κατασκευής, οι κυματοδηγοί εμφανίζουν πλέον πολύ χαμηλές απώλειες διάδοσης (propagation losses) (π.χ. 0.3 dB/cm για κυματοδηγούς πυριτίου [1.100], <1 dB/m για κυματοδηγούς Νιτριδίου του Πυριτίου (SiN) [1.101], κ.ά.). Προσφέρουν τη δυνατότητα για υψηλής ποιότητας μεταφορά δεδομένων σε Tb/s ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων [1.102]. Σχετικά με τη βιβλιοθήκη παθητικών στοιχείων SOI τεχνολογίας για την επίτευξη λειτουργιών πάνω στο τσιπ, έχουν επιδειχθεί μια σειρά από παθητικές δομές που περιλαμβάνουν απότομες κάμψεις (sharp bends), συζεύκτες (couplers) και διαχωριστές (splitters) ισχύος [1.103]. Χρησιμοποιώντας κατάλληλες

τεχνικές κατασκευής μπορούν να επιτευχθούν πειραματικά πολύ μικρές τιμές απωλειών κάμψης (π.χ. 0.005 dB ανά στροφή 90° σε κυματοδηγό πυριτίου με ακτίνα κάμψης 6.5 μm [1.104]). Διασταυρώσεις κυματοδηγών (Waveguide crossings) που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν την πυκνότητα ολοκλήρωσης στην πλατφόρμα ολοκλήρωσης. Με υιοθέτηση ειδικών σχεδιαστικών πρακτικών (διαπλάτυνση περιοχής διασταύρωσης) μπορούν να επιτευχθούν πολύ μικρές τιμές απωλειών εισαγωγής (<0.03dB) και διαφωνίας (<-35dB, [1.105]).

Φίλτρα (Filters) και WDM διατάξεις: Όπως έχει ήδη σημειωθεί η πολυπλεξία WDM χρησιμοποιείται για να κλιμακωθεί η επικοινωνία της πληροφορίας κάνοντας χρήση πολλαπλών μηκών κύματος. Επιπλέον, η χρήση κυκλωμάτων φασματικής επιλογής χρησιμοποιούνται για να επιλεγούν μήκη κύματος σε τοπολογίες μεταγωγής/δρομολόγησης (switching/routing). Οι απώλειες εισαγωγής (insertion losses), το μέγεθος των δομών (footprint) ενώ στις περιπτώσεις που απαιτείται ενεργός θερμο-οπτικός έλεγχος για την φασματική μετατόπιση των συναρτήσεων μεταφοράς απαιτείται αυξημένη ανοχή σε θερμοκρασιακές μεταβολές και προσεκτικές τεχνικές κατασκευής [1.106]. Έχει προταθεί η χρήση Si δομών δακτυλίων ανώτερης τάξης που προφέρουν απότομες (sharp) φασματικές κατανομές με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του φασματικού παραθύρου για μετάδοση/μεταγωγή πληροφορίας επιλέγοντας μήκη κύματος σε πυκνή φασματική κατανομή με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και σταθερότητα σε ικανό θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας [1.107]. Εξαιρετικά χαμηλές απώλειες εισαγωγής, αρκετά μικρό μέγεθος ολοκλήρωσης και χαμηλή φασματική παρεμβολή (crosstalk) έχουν επίσης καταγραφεί σε διάφορα συστήματα πολυπλεξίας (multiplexers) που βασίζονται σε δακτυλίους ανώτερης τάξης [1.108,1.109]. Η Si τεχνολογία φωτονικής ολοκλήρωσης έχει επίσης επιδείξει δομές φίλτρων που βασίζονται σε συστοιχίες φραγμάτων περίθλασης (Array Waveguide Gratings -AWGs) είτε σε δομές Echelle φραγμάτων και επιδεικνύονται για λειτουργίες από/πολυπλεκτών (multiplexers/demultiplexers) [1.110].

Οπτικές πηγές λέιζερ και διαμορφωτές Si τεχνολογίας: Μια εγγενής αδυναμία της οπτικής τεχνολογίας Si είναι η μη δυνατότητα ανάπτυξης πηγών λέιζερ λόγω του έμμεσου χάσματος του ημιαγωγού που καθιστά το μηχανισμό της εξαναγκασμένης εκπομπής ανίσχυρο. Το οπτικό κέρδος παρέχεται από τη χρήση III-V ημιαγωγών τα οποία διασυνδέονται αποτελεσματικά στις παθητικές SOI (Silicon-on-Insulator - SOI) δομές [1.111]. Για datacom εφαρμογές που απαιτείται η ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες έχει δημοσιευθεί η χρήση μιας πηγής πολλαπλών μηκών κύματος που προσφέρει λειτουργία χωρίς την απαίτηση για ψύξη (coolerless), μειώνοντας δραστικά την ενεργειακή κατανάλωση [1.112]. Σε κάθε περίπτωση, η δυνατότητα της ετερογενούς ολοκλήρωσης στη μητρική SOI πλατφόρμα πληθώρα από ενεργές φωτονικές πλατφόρμες που επιτρέπουν την ανάπτυξη ενεργών στοιχείων καθιστά την Si πλατφόρμα αρκετά αποτελεσματική [1.113,1.114]. Για την εγγραφή των ρευμάτων πληροφορίας στο οπτικό φέρον, η τεχνολογία διαμορφωτών Si τεχνολογίας αξιοποιώντας τους μηχανισμούς διαμόρφωσης του φωτός στην Si πλατφόρμα υλικών [1.115], έχει ωριμάσει προσφέροντας υψηλές τιμές ηλεκτρο-οπτικού εύρους ζώνης (Electro-optic Bandwidth – EO Bandwidth) με χαμηλές

ενεργειακές καταναλώσεις. Έχουν επιδειχθεί ολοκληρωμένες δομές διαμορφωτών που βασίζονται κυρίως σε δομές συντονιστών δακτυλίων [1.116-1.118] και συμβολομετρικές διατάξεις MZI (Mach Zehnder Interferometer -MZI) [1.116,1.119]. Η υλοποίηση ολοκληρωμένων διαμορφωτών ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro Absorption Modulator – EAM) έχει επίσης επιδειχθεί [1.120].

Φωτοανιχνευτές (Photodetectors): Οι φωτο-ανιχνευτές αποτελούν τις δομές που μετατρέπουν ένα εισερχόμενο οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό και επομένως χρησιμοποιούνται σε σημεία του κυκλώματος όπου απαιτείται οπτο-ηλεκτρονική μετατροπή (ενδιάμεσα για την οδήγηση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ελέγχου φωτονικών μονάδων ή στο τέλος για αξιολόγηση στο δέκτη). Οι φωτο-ανιχνευτές συνήθως κατασκευάζονται γερμάνιο (Ge) [1.121], Ίνδιο (In) (π.χ. InP/InGaAs photo-detectors [1.122]) αλλά και απευθείας στο πυρίτιο χωρίς υβριδική ολοκλήρωση ημιαγωγίων στοιχείων με χρήση εμφύτευσης ιόντων για τη δημιουργία κρυσταλλικών ελαττωμάτων (π.χ. Si⁺ ion implanted photo-detectors [1.123]).

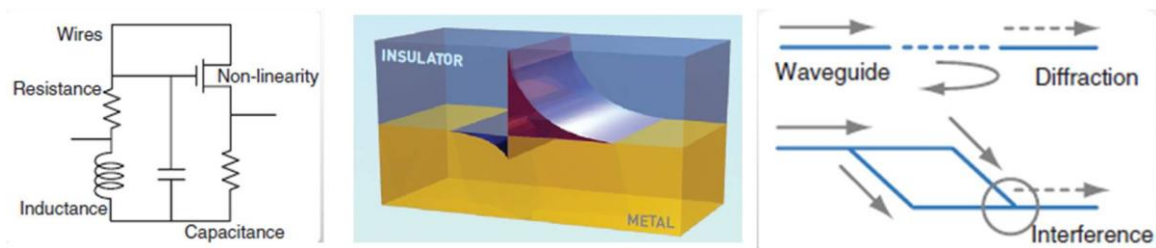
Μεταγωγείς (Switches): Στις τοπολογίες δικτύων (NoCs) πάνω στο τσιπ για την εξυπηρέτηση της επικοινωνίας μεταξύ των πυρήνων του επεξεργαστή (on-chip connectivity) αλλά και στην επικοινωνία που απαιτείται μεταξύ διαφορετικών υποσυστημάτων (chip-to-chip connectivity) η ανάγκη για μεταγωγή/δρομολόγηση της πληροφορίας που οργανώνεται σε πακέτα (packet-switched networks). Οι βασικές σχεδιαστικές απαιτήσεις για τις δομές μεταγωγής (switching fabrics) οδηγούνται από την εξυπηρέτηση κίνησης (Throughput) σε Tb/s χωρητικότητες, γρήγορους χρόνους μεταγωγής κατάστασης μεταγωγής, μικρό μέγεθος, χαμηλή παρεμβολή μεταξύ των δύο καταστάσεων (ON&OFF) και υψηλούς λόγους σβέσης. Στη φωτονική πλατφόρμα πυριτίου (Si) έχει αναδειχθεί ένα ευρύ φάσμα από δομές διακοπών που αξιοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς ενεργού ελέγχου για τη μεταγωγή της κατάστασης τους και διακρίνονται σε ηλεκτρο-οπτικούς (electro-optic), θερμο-οπτικούς (thermo-optic) και αμιγώς οπτικούς (all-optical). Σε δομές διακοπών που αξιοποιούν τις συμβολομετρικές αρχές του φωτός, οι ενεργοί μηχανισμοί χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί η κατάλληλη ολίσθηση φάσης μέσω του αντίστοιχου μηχανισμού μεταβολής του ενεργού δείκτη διάθλασης του κυματοδηγούμενου πεδίου. Οι τυπικές υλοποιήσεις οπτικών μεταγωγέων βασίζονται σε κοιλότητες (π.χ. συντονιστές δακτυλίου [1.124,1.125] και σε συμβολομετρικές διατάξεις (π.χ. Mach-Zehnder Interferometer, MZI [1.126, 1.127]).

1.5 Η πλασμονική τεχνολογία για διασυνδέσεις σε κλίμακα του τσιπ (Plasmonic Interconnects)

Η προσέγγιση του Φωτονικού Δικτύου σε επίπεδο τσιπ (NoC) το οποίο θα εξυπηρετεί την επικοινωνία μεταξύ λειτουργικών μονάδων πάνω στο τσιπ (on-chip communication) αλλά και θα διασφαλίζει την επικοινωνία υψηλής χωρητικότητας μεταξύ των τσιπς (chip-to-chip communication) αποτελεί ένα ασφαλές μονοπάτι για το μέλλον των υπολογιστικών

συστημάτων υψηλής απόδοσης (HPC). Η επιλογή της κατάλληλης φωτονικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης οδηγείται από την ανάγκη για την επίτευξη μεγαλύτερης πυκνότητας ολοκλήρωσης με όσο το δυνατόν μικρότερα μεγέθη δομών αλλά και σημαντική μείωση της κατανάλωσης ισχύος στις ενεργές δομές. Μέχρι σήμερα, η φωτονική τεχνολογία του πυριτίου (Si) έχει επιλεγεί με βάση τα ανταγωνιστικά χαρακτηριστικά της καθώς προσφέρει πληθώρα από παθητικές και ενεργές δομές που απαιτούνται για την υλοποίηση των σύνθετων λειτουργιών σε επίπεδο ολοκληρωμένου δικτύου σε τσιπ (NoC) [1.128]. Ωστόσο, με το μέγεθος και την κατανάλωση ισχύος να είναι οι κινητήριες δυνάμεις στην επόμενη γενιά των ευρυζωνικών διασυνδέσεων πάνω στο τσιπ (on-chip interconnects) και μεταξύ των τσιπς (chip-to-chip communication), η αναζήτηση της φωτονικής πλατφόρμας που είναι ικανή να προσφέρει πιο ελκυστικές επιδόσεις συγκριτικά με την Si φωτονική τεχνολογία παραμένει προτεραιότητα για την ερευνητική κοινότητα. Η πλασμονική τεχνολογία (plasmonics) έχει αναδειχθεί ως η ελκυστική επιλογή δίνοντας τη δυνατότητα να ταξιδεύουν κύματα φωτός σε μεταλλικά καλώδια (wires).

Ο Πίνακας 3 συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας της ηλεκτρονικής, της φωτονικής και της πλασμονικής για να αναδείξει τα βασικά χαρακτηριστικά της κάθε κατηγορίας που καθιστούν εφικτή και την αντίστοιχη χρήση τους σε περιβάλλον datacom και computercom εφαρμογών. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι που καθιστούν τα ηλεκτρονικά την κατάλληλη τεχνολογία για τις υπολογιστικές λειτουργίες ενώ τις οπτικές τεχνολογίες κατάλληλες τεχνολογίες για μετάδοση πληροφορίας [1.129]. Τα ηλεκτρονικά κυκλώματα βασίζονται στην κίνηση των ηλεκτρονίων και τα σήματα πληροφορίας κωδικοποιούνται χρησιμοποιώντας την ένταση και την τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Η συχνότητα λειτουργίας των ηλεκτρικών κυκλωμάτων περιορίζεται από το ρυθμό της κίνησης των ηλεκτρικών φορέων που οδηγείται από την παρουσία χωρητικών (capacitive) και επαγωγικών (inductive) φαινομένων ενώ οι απώλειες αντίστασης (resistive losses) εμφανίζονται με τη διάδοση των ηλεκτρικών σημάτων στα μέταλλα. Τα ηλεκτρονικά συστήματα είναι ικανά για μη-γραμμικές λειτουργίες όπως η μεταγωγή κατάστασης λόγω της ισχυρής αλληλεπίδρασης μεταξύ των ηλεκτρικών πεδίων και των φορέων. Οι φορείς των ηλεκτρονίων έχουν μάζα και για το λόγο αυτό μπορούν να αποθηκευτούν, μια χρήσιμη ιδιότητα στην περίπτωση που απαιτείται η υλοποίηση κυκλωμάτων μνήμης.



Ηλεκτρονική Τεχνολογία (Electronics)	Πλασμονική Τεχνολογία (Plasmonics)	Φωτονική Τεχνολογία (Photonics)
<ul style="list-style-type: none"> • Διάδοση ηλεκτρικών φορέων • Σήματα ηλεκτρικής τάσης και έντασης • Περιορισμός στη λειτουργία συχνότητας • Ισχυρή αλληλεπίδραση ηλεκτρικών φορέων 	<ul style="list-style-type: none"> • Ταλαντώσεις ηλεκτρικών φορέων στην επιφάνεια μετάλλων • Ταλαντώσεις σε οπτικές συχνότητες • Διάδοση σε καλώδια ως κύματα – διατηρούν τη συμφωνία φάσης • Αλληλεπίδραση μεταξύ πλασμονίων ισχυρές αλλά γραμμικές • Συντονίζονται σε σωματίδια όπως στα ηλεκτρικά κυκλώματα 	<ul style="list-style-type: none"> • Διάδοση φωτός • Πληροφορία στο πλάτος, φάση, πόλωση κύματος φωτός • Απεριόριστο εύρος ζώνης • Ασθενής αλληλεπίδραση μεταξύ φωτονίων

Πίνακας 1.4: Καταγραφή των βασικών χαρακτηριστικών για τεχνολογίες μετάδοσης πληροφορίας σε επίπεδο τσιπ (chip-level). Η ανάδειξη των βασικών φυσικών αρχών της ηλεκτρονικής (Electronics) και φωτονικής (Photonics) τεχνολογίας έχει σκοπό να παρουσιάσει την πλασμονική (Plasmonics) ως μια τεχνολογία που τοποθετείται μεταξύ των δύο.

Η φωτονική τεχνολογία βασίζεται στη διάδοση του φωτός. Σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια, τα οπτικά σήματα (optical signals) μπορούν απευθείας να κωδικοποιηθούν στα χαρακτηριστικά του φωτονίου διαμορφώνοντας το πλάτος, τη φάση, την πόλωση του οπτικού φέροντος. Καθώς η συχνότητα των οπτικών φορέων είναι ιδιαίτερα υψηλή (~190THz), απεριόριστο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο για τη μετάδοση των ρυθμών πληροφορίας. Ωστόσο, η ασθενής αλληλεπίδραση μεταξύ των φωτονίων καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την αμιγώς οπτική διαμόρφωση και μεταγωγή οπτικής πληροφορίας [1.130], περιορίζοντας τις δυνατότητα για αμιγώς οπτική επεξεργασία πληροφορίας.

Συζευγνύοντας το φως σε φορτισείς φορέων των μεταλλικών επιφανειών, η πλασμονική τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα να επεξεργαστεί η πληροφορία που φέρουν τα φωτόνια μέσω των χαρακτηριστικών που αποκτούν οι ηλεκτρικοί φορείς στη διεπιφάνεια του μετάλλου. Για την κατανόηση του φυσικού μηχανισμού που επιτρέπει την παραπάνω λειτουργία, κάποιος μπορεί να θεωρήσει την ακτινοβόληση ενός φωτονίου που ταλαντώνει σε οπτικές συχνότητες (~190THz) σε μια διεπιφάνεια διηλεκτρικού-μετάλλου ως μια μεταβίβαση ενέργειας σε ένα σύστημα ηλεκτρονίων του μετάλλου που ταλαντώνει στην ίδια συχνότητα [1.131]. Οι ταλαντώσεις αυτές διατηρούν τις σχέσεις φάσης με το προσπίπτον φως και συνεπώς η συμφωνία φάσης επιτρέπει να θεωρηθούν σύμφωνες διεγέρσεις.

Η πλασμονική τεχνολογία (plasmonics) θα μπορούσε να είναι το κλειδί για την υπέρβαση μιας από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στα ολοκληρωμένα οπτικά που είναι φραγμένα από την παρουσία του ορίου περίθλασης (diffraction limit). Σύμφωνα με το όριο της περίθλασης, το φως δεν μπορεί να εγκλωβιστεί (confined) σε ένα χώρο με διαστάσεις μικρότερες από την ποσότητα $\lambda/2 \cdot n$ όπου λ είναι το μήκος κύματος (wavelength) και n είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού που διαδίδεται το φως [1.132]. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το μέγεθος των φωτονικών κυματοδηγών και των ενεργών/παθητικών ολοκληρωμένων στοιχείων πάνω στο τσιπ είναι στην κλίμακα-μm για λειτουργία την περιοχή της ζώνης μηκών κύματος γύρω από τα 1550nm (C-band) που χρησιμοποιείται για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Αυτή η διαφορά μεγέθους μεταξύ των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε μm-κλίμακα και των ηλεκτρονικών nm-κλίμακας καθιστά την αναζήτηση εναλλακτικών υλικών φωτονικής ολοκλήρωσης αναγκαία.

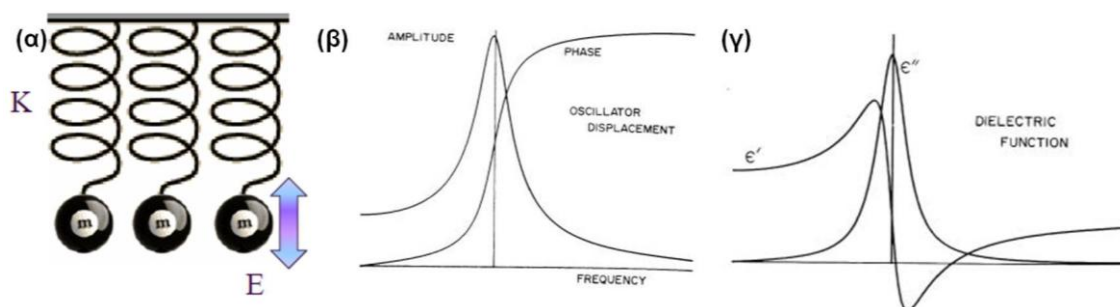
Στους πλασμονικούς κυματοδηγούς, οι διαδιδόμενοι ρυθμοί έχουν εγκάρσιες διαστάσεις που μπορεί να προσεγγίσουν τιμές μικρότερες από τα 100nm. Συνεπώς, η πλασμονική τεχνολογία βοηθά να γεφυρωθεί το κενό στην κλίμακα φυσικού μεγέθους της τεχνολογίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν την φυσική των πλασμονίων και πιο συγκεκριμένα τις φυσικές αρχές που εξηγούν τη διέγερση και μετάδοση Πολαριτονίων Επιφανειακών Πλασμονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPPs).

1.5.1 Η φυσική της πλασμονικής τεχνολογίας

Μια δομική διαφοροποίηση των πλασμονικών διασυνδέσεων συγκριτικά με τις φωτονικές δομές προκύπτει από την παρουσία ενός μεταλλικού υλικού το οποίο χρησιμοποιείται σαν το μέσο που παρέχει τις συγκεντρώσεις των φορέων που καθιστούν εφικτή τη διαπίστωση της ταλάντωσης του νέφους ηλεκτρονίων. Εστιάζοντας στην ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά των μετάλλων είναι γνωστό πως εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά, που εξαρτάται από τη φασματική περιοχή στην οποία εξετάζεται η λειτουργία τους. Σε μικρο-κυματικές (microwave) συχνότητες και χιλιοστο-μετρικές (mmwave), δεν επιτρέπουν τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα από αυτά, λειτουργώντας ως τέλεια ανακλαστικές επιφάνειες. Στις συχνότητες της κοντινής υπέρυθρης περιοχής (near Infrared-near IR) και στις οπτικές υπάρχει διείσδυσή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε αυτά, με αποτέλεσμα την παρουσία ισχυρών ωμικών απωλειών. Σε ακόμη υψηλότερες συχνότητες, μεγαλύτερες από μια συχνότητα που ονομάζεται συχνότητα πλάσματος (plasma frequency), τα μέταλλα αποκτούν διηλεκτρικό χαρακτήρα επιτρέποντας τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Καθώς η λειτουργία αυτή ορίζεται φασματικά στο παράθυρο της υπεριώδους περιοχής (Ultraviolet-UV) προσδίδεται στα μέταλλα η ιδιότητα της υπεριώδους διαφάνειας (Ultraviolet Transparency).

Οι παραπάνω ιδιότητες των μετάλλων προκύπτουν μέσα από την υιοθέτηση ενός μοντέλου εξαναγκασμένου ταλαντωτή για τους ελεύθερους φορείς του μετάλλου που αποκρίνονται στην παρουσία ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Σε ένα μεγάλο μέρος των οπτικών συχνοτήτων οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες των μετάλλων μπορούν να

περιγραφούν από το μοντέλο πλάσματος (Plasma Model) ή μοντέλο ελεύθερων ηλεκτρονίων (Free-electron Model). Το μοντέλο πλάσματος περιγράφει την κίνηση ενός νέφους ελεύθερων ηλεκτρονίων, τα οποία ταλαντώνονται υπό την επίδραση κάποιου ηλεκτρο-μαγνητικού πεδίου. Η κίνησή τους αποσβένεται μέσω συγκρούσεων με πυρήνες των θετικών ιόντων [1.133]. Το μοντέλο του Lorentz για τη μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων των μετάλλων βασίζεται στο μοντέλο ενός φορτισμένου σωματιδίου που ταλαντώνει με απόσβεση (damping) υπό τη δύναμη επαναφοράς (hooke spring) ενώ ταυτόχρονα εμφανίζεται και ένα εξωτερικό ημιτονικό ηλεκτρικό πεδίο που δρα ως διεγέρτης. Η απόσβεση σχετίζεται άμεσα με τις συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τους πυρήνες των θετικών ιόντων. Η Εικόνα 7(α) αναπαριστά το μηχανικό αυτό ανάλογο του εξαναγκασμένου ταλαντωτή υπό την παρουσία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου $E(t)$. Η λύση της διαφορικής εξίσωσης του ταλαντωτή της Εικόνας 7(β) υποδεικνύει πως η λύση $x(t)$ είναι συμφασική με το εφαρμοζόμενο πεδίο για χαμηλές συχνότητες ενώ έχει αντίθετη φάση για πολύ υψηλές συχνότητες. Τέλος, για συχνότητα ίση με τη συχνότητα του εφαρμοζόμενου πεδίου (ω_0), μεγιστοποιείται το πλάτος της ταλάντωσης.



Εικόνα 7:(α) Μηχανικό ανάλογο του εξαναγκασμένου ταλαντωτή που αξιοποιείται για τον προσδιορισμό της διηλεκτρικής συμπεριφοράς του μετάλλου υπό την παρουσία οπτικής συχνότητας (διέγερση). (β) Η λύση της διαφορικής εξίσωσης $x(t)$ του εξαναγκασμένου ταλαντωτή εστιάζοντας στην εξάρτηση του πλάτους $|x(t)|$ όσο και της φάσης $\text{Arg}\{x(t)\}$ από τη συχνότητα του διεγέρτη. (γ) Ο υπολογισμός της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας του μετάλλου για διαφορετικές συχνότητες. Στόχος είναι ο προσδιορισμός της μιγαδικής επιτρεπτότητας ($\epsilon=\epsilon'+j\cdot\epsilon''$) που αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τον υπολογισμό της σταθεράς διάδοσης του πλασμονικού ρυθμού.

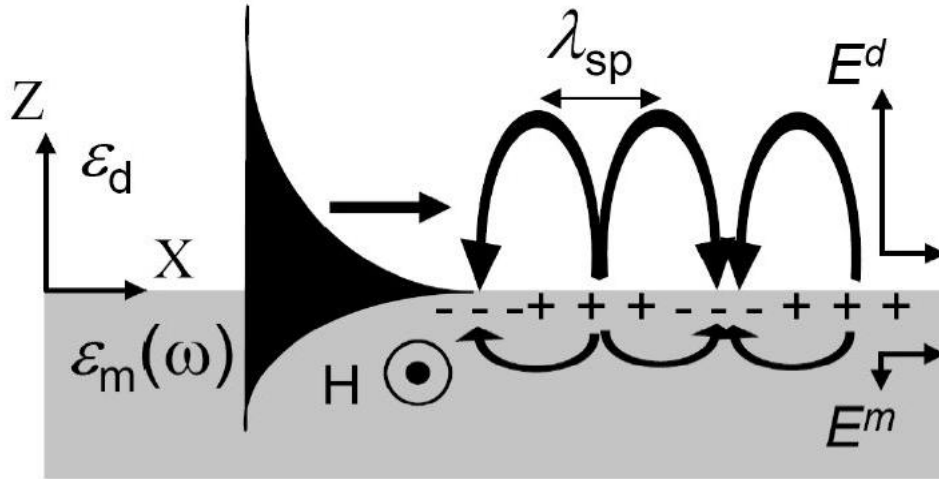
Λαμβάνοντας υπόψη τη θεμελιώδη σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής πόλωσης (P) του πεδίου και της ηλεκτρικής έντασης (E), μπορούν να εξαχθούν τα χαρακτηριστικά της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας του μετάλλου όπως φαίνονται στην Εικόνα 7(γ). Στο συγκεκριμένο σημείο, για λόγους απλοποίησης που είναι επιπλέον σύμφωνη και με την παρουσίαση των πλασμονικών δομών στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα ασχοληθούμε με τα μέταλλα που υπακούουν στο μοντέλο του Drude [1.134]. Το μοντέλο του Drude αποτελεί μια παραλλαγή του μοντέλου του Lorentz και ισχύει για την περίπτωση που θεωρήσουμε την ελεύθερη κίνηση των ηλεκτρονίων χωρίς διέγερση

εξωτερικού πεδίου. Οι οπτικές σταθερές των μετάλλων υιοθετώντας το μοντέλο του Drude περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{\varepsilon\} &= 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} \approx 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \\ \operatorname{Im}\{\varepsilon\} &= \frac{\omega_p^2 \cdot \gamma}{\omega \cdot (\omega^2 + \gamma^2)} \approx \frac{\omega_p^2 \cdot \gamma}{\omega^3}\end{aligned}\quad (1.2)$$

Ο όρος ω_p ονομάζεται συχνότητα πλάσματος (plasma frequency) και ορίζεται ως η κανονικοποιημένη συχνότητα της κίνησης των ηλεκτρονίων [1.135]. Τα μέταλλα του Drude εμφανίζουν αδιαφάνεια για χαμηλές συχνότητες ενώ η περιοχή διαφάνειας μετατοπίζεται στις συχνότητες στην περιοχή της συχνότητας πλάσματος (ω_p).

Τα Πολαριτόνια Επιφανειακών Πλασμονίων (SPPs) είναι ηλεκτρομαγνητικές διεγέρσεις, οι οποίες όταν συζευχθούν με ταλαντώσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων σε κάποιο μέταλλο, οδηγούνται και διαδίδονται στη διεπιφάνεια του μετάλλου και του διηλεκτρικού [1.136]. Η Εικόνα 8 αναπαριστά τα βασικά χαρακτηριστικά του οδεύοντος SPP ρυθμού στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του διηλεκτρικού περιλαμβάνοντας την ταλάντωση των φορέων που υπάρχουν στο μέταλλο και η λειτουργία τους αναδείχθηκε σύντομα στις προηγούμενες παραγράφους. Στην αναπαράσταση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου αναδεικνύεται ο κεντρικός ρόλος της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας του μετάλλου (ε_m) και οι συνθήκες που πρέπει να υπακούει για την υποστήριξη των SPP δομών στη διεπιφάνεια μετάλλου και διηλεκτρικού. Οι SPP ρυθμοί προϋποθέτουν την αλλαγή του πρόσημου της εγκάρσιας συνιστώσας (E_z) του πεδίου στα δύο υλικά και η συνθήκη αυτή οδηγεί για την επιτρεπτότητα των μετάλλων πως πρέπει να είναι πραγματική και αρνητική ($\varepsilon_m < 0$). Για παράδειγμα, ο χρυσός (Au) που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές SPP δομών στη φασματική περιοχή γύρω από το $\lambda = 830\text{nm}$ έχει διηλεκτρική επιτρεπτότητα $\varepsilon_m \approx -29 + 2.1 \cdot i$. Αντίστοιχες μετρήσεις διηλεκτρικής επιτρεπτότητας των μετάλλων που οδηγούν στην επιλογή των αντίστοιχων υλικών για την υποστήριξη των SPP ρυθμών υπάρχουν στη βιβλιογραφία [1.137].



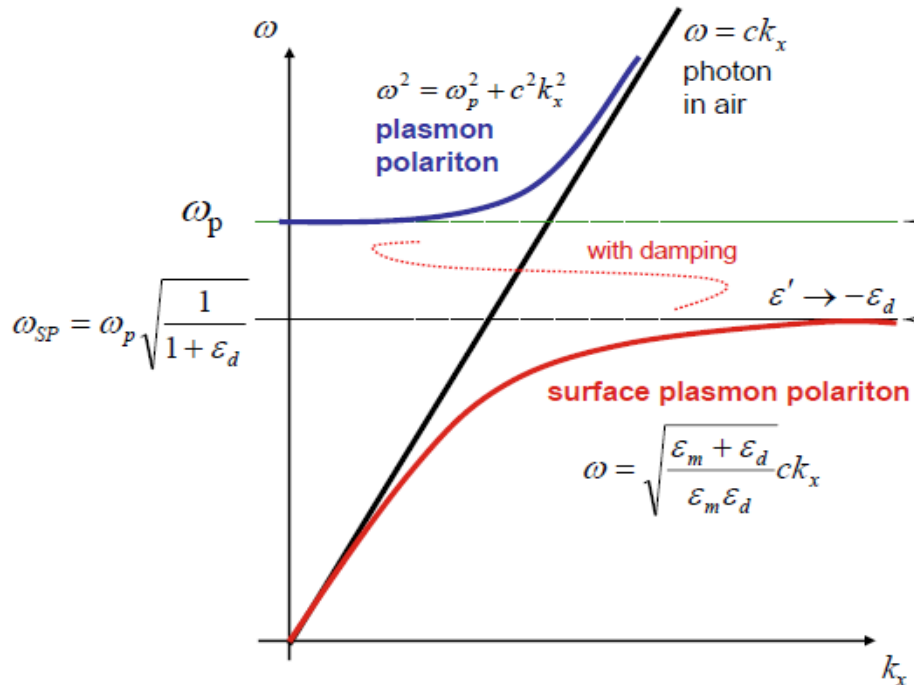
Εικόνα8: Οι συνιστώσες του H/M πεδίου και η κατανομή της έντασης ενός SPP κύματος στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός μετάλλου και ενός διηλεκτρικού. Στην σχηματική αναπαράσταση εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά του οδεύοντος ρυθμού εστιάζοντας: στο μήκος κύματος (λ_{sp}), στις κατακόρυφες συνιστώσες (E_z) και παράλληλες (E_x) συνιστώσες του SPP ρυθμού και την ποιοτική περιγραφή της διείσδυσης του πεδίου τόσο στο μέταλλο όσο και στο διηλεκτρικό.

Η κατανόηση των ιδιοτήτων των SPPs μπορεί να εμπλουτιστεί διερευνώντας τη σχέση διασποράς (dispersion relation) τους, τη σχέση μεταξύ της κυκλικής συχνότητας και του κυματαριθμού του SPP ρυθμού. Μέσα από την οικογένεια των επιφανειακών λύσεων των εξισώσεων Maxwell και την εφαρμογή των οριακών συνθηκών για τις δύο περιοχές του προβλήματος (μέταλλο και διηλεκτρικό), εξάγεται η σχέση διασποράς των επιφανειακών ρυθμών:

$$k_{SPP} = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_m(\omega) \cdot \epsilon_d}{\epsilon_m(\omega) + \epsilon_d}} \quad (1.3)$$

Λαμβάνοντας υπόψη πως η διηλεκτρική επιτρεπτότητα των μετάλλων είναι εν γένει μιγαδική [$\epsilon_m = \text{Re}(\epsilon_m) + j \cdot \text{Im}(\epsilon_m)$], ο κυματαριθμός των SPP ρυθμών είναι επίσης μιγαδικός [$k_{SPP} = \text{Re}(k_{SPP}) + j \cdot \text{Im}(k_{SPP})$]. Το φανταστικό μέρος του κυματαριθμού προκύπτει λόγω του μηχανισμού απορρόφησης που εγγενώς εμφανίζεται στο μέταλλο και ως συνέπεια οι SPP ρυθμοί εξασθενούν καθώς διαδίδονται στη διεπιφάνεια με πεπερασμένο χρόνο ζωής [1.138]. Η σημασία του θα αναδειχθεί στη συνέχεια της ενότητας με τον σχολιασμό του μήκους διάδοσης του ρυθμού που ποσοτικοποιεί την επίδραση του μηχανισμού εξασθένισης. Το πραγματικό μέρος του κυματαριθμού [$\text{Re}(k_{SPP})$] είναι υπεύθυνο για το σχολιασμό της καμπύλης διασποράς των SPP ρυθμών και το σχολιασμό του μήκους κύματος (λ_{SPP}) του επιφανειακού πλασματικού ρυθμού. Αξίζει να σημειωθεί πως η καμπύλη διασποράς είναι αποτέλεσμα της ισχυρής εξάρτησης του δείκτη διάθλασης του μετάλλου από τη συχνότητα ($\partial/\partial\omega$) ενώ για το διηλεκτρικό μέσο αγνοείται η διασπορά του

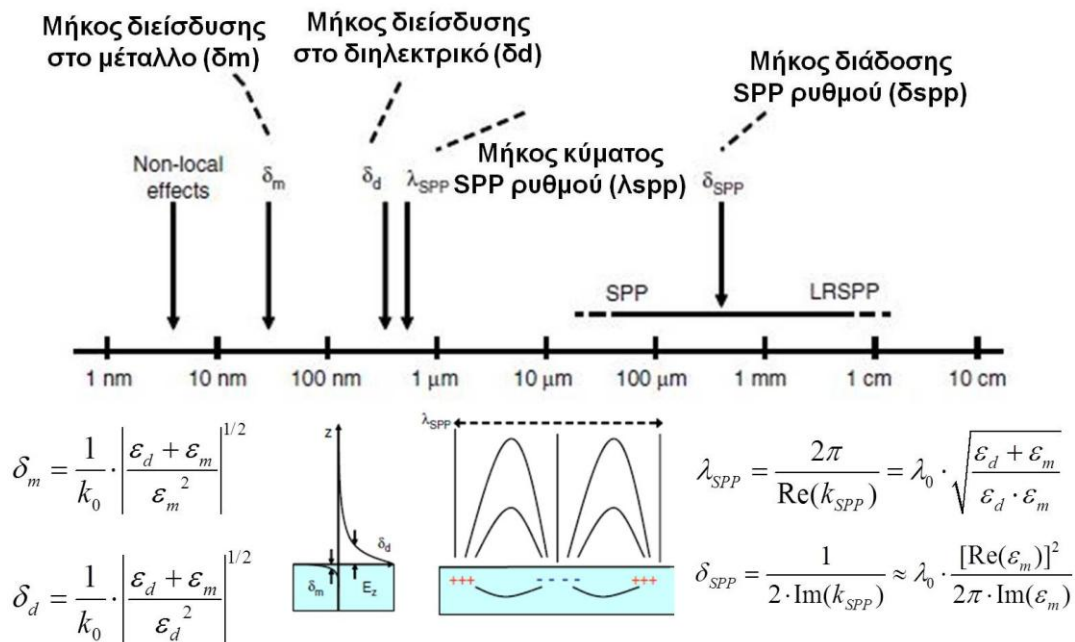
μέσου. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει μια χαρακτηριστική καμπύλη διασποράς ενός SPP ρυθμού για τη διεπιφάνεια μετάλλου και αέρα ως διηλεκτρικό μέσο. Εστιάζοντας στην περιοχή που υποστηρίζονται οι SPP ρυθμοί που μας απασχολούν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, για τις συχνότητες $0 < \omega < \omega_{SP}$, παρατηρείται πως για μικρές συχνότητες η συμπεριφορά των SPP ρυθμών συγκλίνει με τη συμπεριφορά που έχει η διάδοση του φωτός στον αέρα. Στη βιβλιογραφία οι ρυθμοί αυτοί αναφέρονται ως πολαριτόνια (polaritons). Καθώς αυξάνεται η συχνότητα, οι SPP ρυθμοί απομακρύνονται από την (ευθεία) καμπύλη της διασποράς που χαρακτηρίζει τη διάδοση του φωτός στο κενό και προσεγγίζει ασυμπτωτικά το όριο της συχνότητας επιφανειακού πλασμονίου (ω_{SP}) η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα πλάσματος και το δείκτη διάθλασης του διηλεκτρικού. Καθώς πλησιάζουμε την τιμή της συχνότητας ω_{SP} , υπάρχει πιο έντονη συγκέντρωση του πεδίου στη διεπιφάνεια μετάλλου/διηλεκτρικού. Στο ένθετο της Εικόνας 9 παρέχεται και ο τύπος για τον υπολογισμό του μήκους κύματος (λ_{SPP}) του SPP ρυθμού που είναι πάντα μικρότερος από την τιμή του μήκους κύματος του φωτός κατά τη διάδοση στο διηλεκτρικό μέσο ($\lambda_{SPP} < \lambda_0$) καθώς εξαρτάται από τα πραγματικά μέρη των σταθερών του διηλεκτρικού μέσου και του μετάλλου. Αξίζει τέλος να σχολιάσουμε και την καμπύλη διασποράς για τις συχνότητες που κυμαίνονται μεταξύ των τιμών ω_P και ω_{SP} ($\omega_{SP} < \omega < \omega_P$) κατά την οποία ο κυματαριθμός έχει φανταστική τιμή και δεν επιτρέπει την κυματοδήγηση ενώ τέλος για συχνότητες $\omega > \omega_P$ εμφανίζεται η ιδιότητα της υπεριώδους διαφάνειας (UV transparency) των μετάλλων που συμπεριφέρονται ως διηλεκτρικά και προσεγγίζουν την καμπύλη διασποράς του διηλεκτρικού για μεγάλες συχνότητες ($\omega \gg \omega_P$) [1.139].



Εικόνα 9: Διάγραμμα διασποράς για διαφορετικές τιμές συχνοτήτων που αποτυπώνει τις περιοχές λειτουργίας των ρυθμών που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του διηλεκτρικού. Σκοπός είναι η ανάδειξη των διαφορετικών πεδιακών ρυθμών που αντιστοιχούν στις περιοχές λειτουργίες: (i) για τις συχνότητες $0 < \omega < \omega_{SP}$ η υποστήριξη των επιφανειακών πλασμονίων (SPP ρυθμών), (ii) για τις συχνότητες $\omega_{SP} < \omega < \omega_p$ η μη δυνατότητα κυματοδήγησης λόγω φανταστικού χαρακτήρα της σταθεράς διάδοσης που οδηγεί σε δραστική απόσβεση της ισχύος και (iii) για συχνότητες $\omega > \omega_p$ με την επικύρωση της υπεριώδους διαφάνειας των μετάλλων που οδηγεί στα μέταλλα να συμπεριφέρονται ως διηλεκτρικά.

Στη συνέχεια, συνοψίζονται τα βασικά μεγέθη που αφορούν τη διάδοση των SPP ρυθμών στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός μετάλλου και του διηλεκτρικού. Η Εικόνα 10 παρουσιάζει τα βασικά μεγέθη της πλασμονικής διάδοσης επιδιώκοντας την κατηγοριοποίηση με τη διάσταση του μήκους. Βασικά μεγέθη που αφορούν τον κυματοδηγούμενο SPP ρυθμό σχετίζονται με το βάθος διείσδυσης στον κατακόρυφο άξονα τόσο στο διηλεκτρικό όσο και στο μέταλλο. Ο μηχανισμός απωλειών του μετάλλου οδηγεί σε μεγαλύτερη εξασθένιση του πεδίου στο μέταλλο συγκριτικά με το διηλεκτρικό και συνεπώς σε μικρότερο βάθος διείσδυσης (penetration depth). Αξίζει να σημειωθεί πως ο διαδιδόμενος SPP ρυθμός διεισδύει σε πολύ μικρό βάθος στο εσωτερικό του μετάλλου (~50nm) ενώ η αντίστοιχη τιμή στο διηλεκτρικό είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερο (~500nm). Το μήκος κύματος του SPP ρυθμού (λ_{SPP}) υπολογίζεται από το πραγματικό μέρος του κυματαριθμού $[\text{Re}(k_{SPP})]$ και όπως έχει αποτυπωθεί και στην καμπύλη διασποράς έχει μικρότερη τιμή από αυτήν που αντιστοιχεί στην περίπτωση διάδοσης του φωτός στο διηλεκτρικό μέσο. Η τιμή του πραγματικού μέρους του κυματοδηγού $[\text{Re}(k_{SPP})]$ είναι πάντα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για τη διάδοση στο διηλεκτρικό μέσο $\text{Re}(k_{SPP}) > k_0 \cdot \epsilon_d^{1/2}$ και η ιδιότητα αυτή ερμηνεύει τον εντοπισμό του

πεδίου στη διεπιφάνεια μετάλλου/διηλεκτρικού χωρίς την παρουσία ακτινοβόλησης [1.140] Ωστόσο η λειτουργία αυτή έρχεται με το κόστος της αυξημένης πολυπλοκότητας που απαιτείται για τη σύζευξη φωτός με την αντίστοιχη αύξηση του κυματαριθμού διάδοσης στο διηλεκτρικό μέσω ενός μηχανισμού αύξησης ορμής (momentum enhancement) για να συναντήσει την τιμή του SPP ρυθμού. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετές τεχνικές σύζευξης που περιλαμβάνουν πρίσματα σύζευξης [1.141], συζεύκτες περιθλασης [1.142] και μηχανισμούς σύζευξης που βασίζονται σε τεχνικές κοντινού πεδίου [1.143]. Άρα τιμές στην περιοχή του 1μm είναι συνήθειες για το μήκος κύματος του SPP ρυθμού που διεγείρεται από οπτικό σήμα της τηλεπικοινωνιακής ζώνης (telecom band). Στην περίπτωση της μελέτης της διεπιφάνειας μεταξύ του μετάλλου και του αέρα προκύπτει ένα μήκος κύματος $\lambda_{SPP} < \lambda_0$.



Εικόνα 10: Η αποτύπωση των βασικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν την ανάπτυξη των πλασμονικών ρυθμών στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός μετάλλου και διηλεκτρικού. Στα μεγέθη αυτά περιλαμβάνονται τα μήκη διείσδυσης στο μέταλλο και το διηλεκτρικό (κατακόρυφος άξονας), το μήκος κύματος του πλασμονικού ρυθμού (λ_{SPP}) και το μήκος διάδοσης του ρυθμού (οριζόντιος άξονας) που περιλαμβάνει την πληροφορία για το μήκος διάδοσης. Η αναπαράσταση των Η κατηγοριοποίηση επιχειρείται ως προς τη διάσταση του μήκους και συνοδεύεται από τις σχέσεις υπολογισμού των μεγεθών με βάση τα χαρακτηριστικά της διηλεκτρικής επιτρεπτότητας των δύο υλικών. Οι τιμές που προσδιορίστηκαν βασίστηκαν σε τιμές επιτρεπτότητας που περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία [1.140].

Τέλος, σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τον SPP ρυθμό αποτελεί το μήκος διάδοσης (propagation length) του ρυθμού και υπολογίζεται στο φυσικό μήκος διάδοσης στο οποίο η κυματοδηγούμενη ισχύς έχει μειωθεί στο 1/e της αρχικής ποσότητας λόγω των ωμικών απωλειών που οδηγούν σε εξασθένιση την ταλάντωση του ηλεκτρονιακού νέφους στο μέταλλο. Όπως θα παρουσιαστεί και σε επόμενο κεφάλαιο της διατριβής, η επιδίωξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου μήκους διάδοσης (συνεπώς μικρότερες απώλειες διάδοσης)

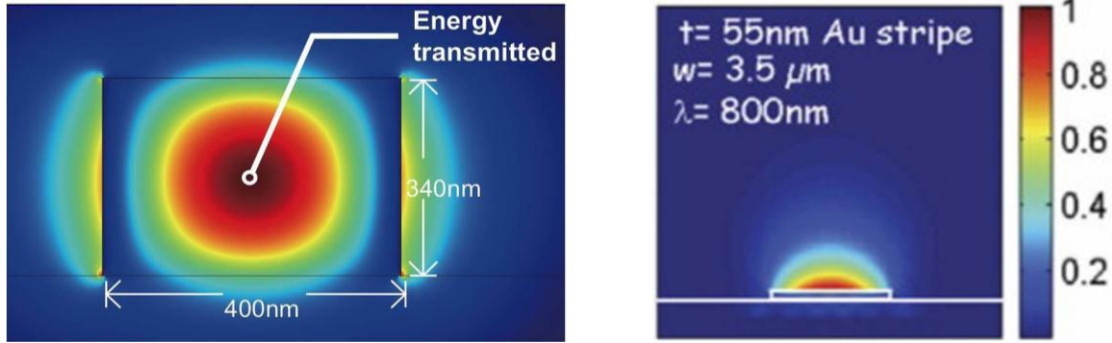
είναι θεμελιώδης απαίτηση για την υλοποίηση πρακτικών πλασμονικών κυκλωμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την ολοκλήρωση ενεργών (active) και παθητικών (passive) λειτουργιών πάνω στο τσιπ (on-chip functionalities). Τυπικές τιμές δεκάδων μm συναντώνται για δομές SPPs που βασίζονται σε οδήγηση ρυθμών στη διεπαφή μετάλλου και διηλεκτρικού [1.144-1.146]. Έχουν προταθεί διάφορες δομές για να αυξηθεί το μήκος διάδοσης αξιοποιώντας δομές LRSP (Long Range Surface Plasmon Polaritons – LRSPs) οι οποίες αξιοποιούν πιο σύνθετες δομές για την επίτευξη μηκών διάδοσης σε κλίμακα cm [1.147-1.150].

1.6 Η ετερο-ολοκλήρωση πλασμονικών και δομών Si τεχνολογίας για την ανάπτυξη δομών δικτύου σε τσιπ

Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της πλασμονικής τεχνολογίας που βασίζονται στην υλοποίηση μικρού μεγέθους ολοκληρωμένων δομών έχει πυροδοτήσει τα τελευταία έτη ένα ζωνφό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων διατάξεων που βασίζονται στην SPP τεχνολογία. Πειραματικές επιδείξεις SPP δομών καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος παθητικών διατάξεων (passive circuitries) αξιοποιώντας διαφορετικές τεχνολογίες SPP κυματοδηγών (waveguide structures) [1.151-1.154], με σκοπό να επιδείξουν μια σειρά από λειτουργίες πάνω στο τσιπ [1.155,1.156]. Επιπλέον, η ανάδειξη των ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων (active plasmonics) έχει ήδη κάνει τα πρώτα της βήματα επιτρέποντας τον έλεγχο της πλασμονικής διάδοσης μέσω μιας ενεργών μηχανισμών [1.157]. Η δυνατότητα να ελέγχεται η διάδοση των SPP ρυθμών μέσω φυσικών μηχανισμών έχει ανοίξει το δρόμο για την υλοποίηση μιας σειράς επιδείξεων ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων αξιοποιώντας ποικίλους μηχανισμούς ηλεκτρικής φύσης για να μεταβληθούν τα χαρακτηριστικά διάδοσης του κυματοδηγούμενου SPP ρυθμού [1.158-1.162]. Η δυνατότητα ελέγχου των ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων μέσω μηχανισμών που βασίζονται σε ηλεκτρικές μεθόδους καθιστά τα ενεργά πλασμονικά κυκλώματα ιδιαίτερα ανταγωνιστικά [1.159,1.162].

Ωστόσο, ο βασικός περιοριστικός παράγοντας που δεν επιτρέπει στις πλασμονικές διατάξεις να αποκτήσουν ευρεία εφαρμογή και να εξελιχθούν σε πιο προηγμένες διατάξεις συστημάτων πηγάζει από την ισχυρή εξασθένηση των SPP ρυθμών λόγω των ωμικών απωλειών των μετάλλων που οδηγεί σε μήκη διάδοσης της τάξης των δεκάδων μm όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η στρατηγική για την αντιμετώπιση του περιορισμού της εξασθένησης των SPP ρυθμών βασίστηκε στη συνύπαρξη των ενεργών πλασμονικών δομών με παθητικές φωτονικές πλατφόρμες ολοκλήρωσης που επιτρέπουν διάδοση του φωτός με χαμηλές απώλειες κυματοδότησης (low-loss photonic waveguides). Η συνύπαρξη αυτή επιτρέπει τη μεταγωγή του διαδιδόμενου φωτός σε φωτονικό (photonic mode) και πλασμονικό ρυθμό (plasmonic mode) ανάλογα με τη λειτουργία που επιτελεί το συγκεκριμένο τμήμα της ολοκληρωμένης δομής. Αρκετές διατάξεις έχουν επιβεβαιώσει τη συγκεκριμένη στρατηγική επιδεικνύοντας πειραματικά δομές SPP κυματοδηγών διαφόρων

τύπων ετερο-ολοκληρωμένες με παθητικές SOI (Silicon-on-Insulator) πλατφόρμες με τις πολύ μικρές απώλειες ισχύος (<1dB) [1.163,1.164].



Φωτονικοί Ρυθμοί (Photonic Modes)	Πλασμονικοί Ρυθμοί (Plasmonic Modes)
<ul style="list-style-type: none"> • Φραγμένοι από το όριο περίθλασης ($>\lambda/2 \cdot n$) – Diffraction limited • Μεγάλο μέγεθος δομών (footprint) ($\mu\text{m}^2 \sim \text{mm}^2$) • Χαμηλή αλληλεπίδραση φωτός/ύλης (Light Matter Interaction - LMI) που οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ισχύος (pJ κλίμακα) των ενεργών δομών • Χαμηλές απώλειες διάδοσης (dB/cm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Διάδοση οπτικών σημάτων σε κλίμακα κάτω από το όριο περίθλασης (Sub-diffraction limit guidance) • Δραστική μείωση μεγέθους ($\text{nm}^2 \sim \mu\text{m}^2$) • Εμπλουτισμένη αλληλεπίδραση φωτός με ύλη (LMI) για δραστική περικοπή κατανάλωσης • Υψηλές απώλειες διάδοσης (dB/μm)

Πίνακας 1.5: Πίνακας που παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτονικών (photonic modes) και των πλασμονικών ρυθμών (plasmonic modes). Οι ιδιότητες αυτές οδηγούν στην επιλογή των φωτονικών ρυθμών για τις παθητικές λειτουργίες της ολοκληρωμένης δομής και τους πλασμονικούς ρυθμούς για τις ενεργές λειτουργίες των κυκλωμάτων.

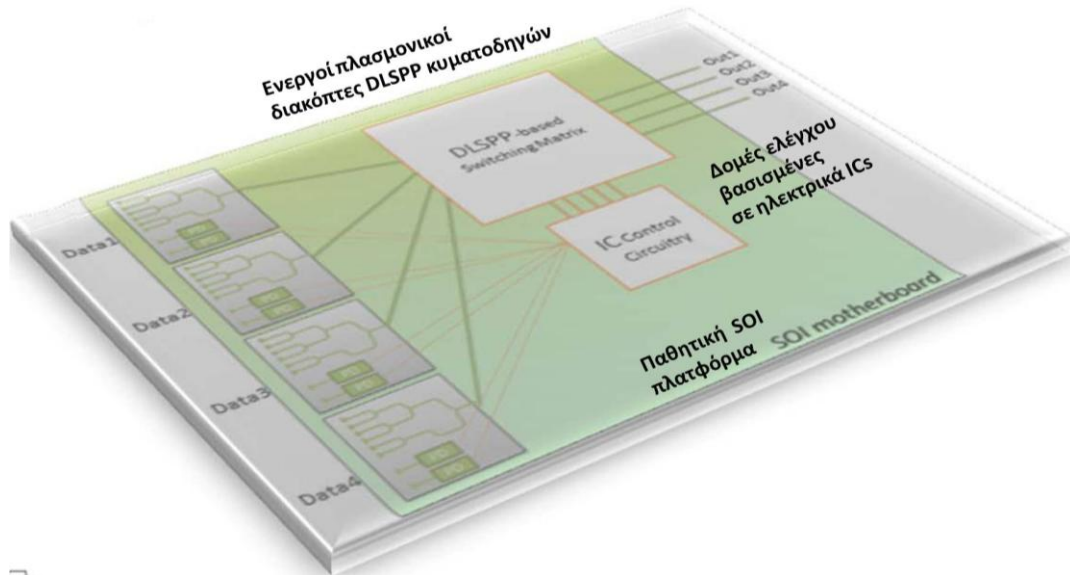
Η συνύπαρξη των πλασμονικών ρυθμών (plasmonic modes) για τα ενεργά κυκλώματα των ολοκληρωμένων δομών με τους φωτονικούς ρυθμούς (photonic modes) των παθητικών κυκλωμάτων βασίζονται στην υιοθέτηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων της κάθε κατηγορίας. Ο Πίνακας 1.5 παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των φωτονικών/πλασμονικών ρυθμών συνοψίζοντας τις βασικές τους ιδιότητες. Οι φωτονικοί ρυθμοί περιορίζονται από το όριο περίθλασης και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να περιορισθούν οι κυματοδηγούμενοι ρυθμοί σε πολύ μικρές διαστάσεις κυματοδηγών με αποτέλεσμα να βασίζονται σε δομές κυματοδηγών μεγέθους της τάξης των $\mu\text{m}^2/\text{mm}^2$. Απεναντίας, οι δομές των πλασμονικών ρυθμών επιτρέπουν τη διάδοση του φωτός κάτω από το όριο της περίθλασης ($<\lambda/2$) και για το λόγο αυτό μπορεί να επιτευχθεί δραστική μείωση στο μέγεθος των δομών που αναπτύσσονται (κλίμακας $\text{nm}^2/\mu\text{m}^2$). Βασικό τους μειονέκτημα αποτελεί η ισχυρή εξασθένιση των ρυθμών με απώλειες διάδοσης στην κλίμακα των dB/ μm ενώ την ίδια στιγμή οι φωτονικοί ρυθμοί επιτρέπουν τη διάδοση με πολύ μικρότερες απώλειες στην κλίμακα των dB/cm. Σχετικά με την αλληλεπίδραση του κυματοδηγούμενου ρυθμού με τη δομή του κυματοδηγού, η τεχνολογία SPP κυματοδήγησης επιτρέπει βελτιωμένη αλληλεπίδραση του SPP με τμήμα της ύλης του

κυματοδηγού καθώς το μεταλλικό στρώμα (metallic layer) αποτελεί δομικό κομμάτι του πλασμονικού κυματοδηγού. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τον ενεργό έλεγχο των πλασμονικών δομών ιδιαίτερα αποτελεσματικό συγκριτικά με τον έλεγχο των φωτονικών ρυθμών.

Οι παραπάνω ιδιότητες των δύο ρυθμών έχουν δημιουργήσει προσδοκίες για τη συνέργεια της πλασμονικής πλατφόρμας με φωτονικές πλατφόρμες ώστε να αναπτυχθούν ετερο-ολοκληρωμένες δομές με τις ενεργές λειτουργίες να τις αναλαμβάνουν οι πλασμονικές διατάξεις και τις παθητικές λειτουργίες οι φωτονικές δομές. Στην κατεύθυνση αυτή, η Si φωτονική πλατφόρμα που επιτρέπει την ανάπτυξη παθητικών δομών χαμηλών απωλειών (low-loss passive circuitries) έχει προταθεί ως μία επιλογή μητρικής παθητικής πλατφόρμας ολοκλήρωσης [1.165]. Η ετερο-ολοκλήρωση των ενεργών πλασμονικών δομών που προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μικρό μέγεθος ολοκλήρωσης έχει αναδειχθεί μέσα από ερευνητικές συνεργασίες, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα FP7 PLATON που διερεύνησε επιτυχώς την ανάπτυξη διακοπών πλασμονικών κυματοδηγών ετερο-ολοκληρωμένους σε παθητικές SOI (Silicon-on-Insulator - SOI) [1.166].

Στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του PLATON, επιδιώχθηκε η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης δομής μεταγωγέα (photonic router) που θα εξυπηρετεί κίνηση σε ρυθμούς Tb/s και θα υλοποιείται μέσα από την εναπόθεση ενεργών πλασμονικών δομών διακοπών σε παθητικές πλατφόρμες που βασίζονται σε SOI (Silicon-on-Insulator) κυματοδηγούς. Στρατηγική στόχευση της ερευνητικής προσπάθειας του PLATON αποτέλεσε η επιδίωξη για δραστική περικοπή της ενεργειακής κατανάλωσης και την αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης (integration density) που συνεπάγεται μείωση μεγέθους των μελλοντικών τοπολογιών μεταγωγής πάνω στο τσιπ (on-chip switching concept) αλλά και την κάλυψη των αναγκών για την επικοινωνία μεταξύ των τσιπς (chip-to-chip communication). Η Εικόνα 11 παρουσιάζει την πλατφόρμα του PLATON με τις ενεργές δομές πλασμονικών 4x4 διακοπών (4x4 switching matrix) που βασίζονται σε κυματοδηγούς DLSPP (Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polaritons - DLSPP) τεχνολογίας που είναι ετερο-ολοκληρωμένοι σε παθητική πλατφόρμα SOI κυματοδηγών η οποία φιλοξενεί την απαραίτητη υποδομή πάνω στο τσιπ (on-chip) των δομών κυματοδηγών (waveguides), πολυπλεξίας (multiplexing), φιλτραρίσματος (filtering) και δεκτών σήματος (signal detection elements) [1.128,1.166]. Τον έλεγχο και τη δυναμική υλοποίηση του πίνακα μεταγωγής (routing table) αναλαμβάνουν ηλεκτρονικές δομές ελέγχου που βασίζονται σε δομές ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών (IC). Αντίστοιχη δομή για την υλοποίηση της αρχιτεκτονικής ενός 2x2 μεταγωγέα με πλασμονικούς διακόπτες έχει μελετηθεί στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας επιδεικνύοντας επιτυχή διακίνηση πληροφορίας (throughput) στα 320Gb/s. Στα πλαίσια αυτής της ερευνητικής συνεργασίας - αποτελέσματα της οποίας περιλαμβάνονται και αναπτύσσονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή – μελετήθηκε θεωρητικά [1.167,1.168] και επιδείχθηκε πειραματικά [1.169,1.170] ο έλεγχος των DLSPP διακοπών αξιοποιώντας τον θερμο-οπτικό μηχανισμό μεταγωγής (thermo-optic switching mechanism) με αξιοσημείωτη επιτυχία. Τα αποτελέσματα αυτά καθιστούν την προσέγγιση της παθητικής Si πλατφόρμας

με τις ενεργές διατάξεις SPP δομών μια επιτυχή απόπειρα συνέργειας τεχνολογιών φωτονικής ολοκλήρωσης διεκδικώντας να παίξουν σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές υλοποιήσεις δομών φωτονικών δικτύων στο τσιπ (Photonic Network-on-Chip, PNoC) [1.128].



Εικόνα 11: Ολοκληρωμένη δομή του κυκλώματος δρομολόγησης που αναζητήθηκε στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON. ενεργές δομές πλασμονικών 4x4 διακοπτών (4x4 switching matrix) που βασίζονται σε κυματοδηγούς DLSPP (Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polaritons - DLSPP) τεχνολογίας που είναι ετερο-ολοκληρωμένοι σε παθητική πλατφόρμα SOI κυματοδηγών. Η SOI παθητική πλατφόρμα περιλαμβάνει δομές κυματοδηγών (Rib-τύπου), δομές συζευκτών επικοινωνίας από/προς το τσιπ (Grating Couplers) και δομές πολυπλεξίας/αποπολυπλεξίας (multiplexing/demultiplexing). Ο ηλεκτρικός έλεγχος της δομής δρομολόγησης υλοποιεί έναν πίνακα μεταγωγής (switching matrix) μέσω της χρήσης κυκλώματος ελέγχου βασισμένο σε ηλεκτρικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs).

1.7 Συμβολή και δομή της διδακτορικής διατριβής

Η παρούσα διδακτορική διατριβή διατρέχει την αναζήτηση ολοκληρωμένων δομών που θα εφοδιάσουν τα μελλοντικά υπολογιστικά συστήματα υψηλής απόδοσης. Η κύρια αποστολή της διατριβής εντοπίζεται στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης δομής οπτικής δρομολόγησης που θα εξυπηρετεί την επικοινωνία πάνω στο τσιπ (on-chip) και μεταξύ των τσιπ (chip-to-chip) όπως συναντώνται στις κατευθύνσεις της ατζέντας για την ανάπτυξη των μελλοντικών αρχιτεκτονικών του Exascale υπολογιστικού περιβάλλοντος [1.171,1.172]. Η συμβολή της διατριβής συνίσταται στην υπέρβαση των περιορισμών της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μεταγωγής μέσα από την υιοθέτηση της πλασμονικής τεχνολογίας η οποία υπόσχεται τη διατήρηση των ελκυστικών διαστάσεων στις δομές των δικτύων στο τσιπ (Network on Chip – NoC) που προσφέρουν οι nm-κλίμακες της CMOS τεχνολογίας [1.173], παράλληλα με τη δυνατότητα της χαμηλής

ενεργειακής κατανάλωσης [1.174], και την ικανότητα εξυπηρέτησης μεγάλου όγκου πληροφορίας (throughput) [1.175,1.176] που προέρχονται από τη φωτονική τεχνολογία.

Η υβριδική τεχνολογία που απαντά στην παραπάνω αποστολή βασίζεται στην ετερο-ολοκλήρωση SPP δομών σε SOI παθητικές πλατφόρμες με στόχο τη βέλτιστη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών της κάθε επιμέρους πλατφόρμας ολοκλήρωσης. Η στρατηγική της αξιοποίησης του συγκριτικού πλεονεκτήματος οδήγησε στην αξιοποίηση της Si τεχνολογίας για την ανάπτυξη παθητικών δομών κυματοδηγών που εξασφαλίζουν την επικοινωνία Tb/s ρευμάτων πληροφορίας με χαμηλές απώλειες μεταξύ ενεργών δομών που βασίζονται σε κυματοδηγούς SPP τεχνολογίας προσφέροντας ισχυρή τοπική συγκέντρωση (localization) του κυματοδηγούμενου πεδίου με παράλληλες δυνατότητες για εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση μεταγωγής κατά τον ενεργό έλεγχο των δομών. Οι ετερο-ολοκληρωμένες δομές μεταγωγής που επιδεικνύονται στην παρούσα διατριβή βασίζονται τόσο σε συνέργειες μεταξύ της πλασμονικής και της φωτονικής ολοκλήρωσης όσο και μεταξύ της ηλεκτρονικής και οπτικής τεχνολογίας καθώς προτείνεται ο θερμο-οπτικός μηχανισμός για τη διαπίστωση απευθείας ενεργού ελέγχου των πλασμονικών ρυθμών που συνιστά και το βασικό πλεονέκτημα που διασφαλίζει η φυσική της πλασμονικής τεχνολογίας (μεταλλικά οπτικά – metallic optics) [1.177-1.181].

Στην πρώτη φάση ανάπτυξης των ετερο-ολοκληρωμένων πλασμονικών δομών, διερευνήθηκε η κατάλληλη παθητική Si πλατφόρμα που να κατοχυρώνει χαμηλές απώλειες διάδοσης (waveguide loss) για την επικοινωνία εντός του τσιπ και να υποστηρίζει με επιτυχία σύνθετες δομές που προορίζονται για λειτουργίες πολυπλεξίας, φίλτρων που κλιμακώνουν την παρουσία της ροής πληροφορίας στο εσωτερικό των κυκλωμάτων [1.182,1.183]. Μια πρόκληση της συγκεκριμένης δράσης, αποτελεί ο σχεδιασμός Si κυματοδηγών που να είναι ικανοί να διασυνδέονται αποτελεσματικά (με χαμηλές απώλειες) με τις ενεργές SPP δομές και για το λόγο αυτό διερευνώνται γεωμετρικές SOI κυματοδηγών που υποστηρίζουν τον TM (Transverse Magnetic-TM) πολωτικό ρυθμό (polarization mode), όπως επιβάλλει η πλασμονική διάδοση των ρυθμών [1.184]. Η επικοινωνία του τσιπ που φιλοξενεί τη δομή δρομολόγησης με το οικοσύστημα των οπτικών ινών επιβάλλει την αναζήτηση προσεγγίσεων κατακόρυφης διασύνδεσης (vertical coupling) μεταξύ ίνας και τσιπ με χαμηλές απώλειες και για το λόγο αυτό στα πλαίσια της διατριβής μελετήθηκε η δυνατότητα για χρήση συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers - GCs) με χαμηλές απώλειες σύζευξης (coupling loss) για να καθιστά πρακτική τη συνδεσιμότητα της υβριδικής ολοκληρωμένης δομής μεταγωγής. Σκοπός της συνδεσιμότητας αποτελεί η αξιολόγηση των δομών με την υπάρχουσα εγκατεστημένη υποδομή που βασίζεται στις οπτικές ίνες όπως επίσης και την επικοινωνία της με άλλα οπτικά κυκλώματα σε επίπεδο επικοινωνίας πλατφόρμας (Board-Level Interconnects) [1.185,1.186].

Στη δεύτερη φάση της διατριβής, εξετάζεται η δυνατότητα των SPP κυματοδηγών που φιλοξενούνται στην κατάλληλη SOI παθητική πλατφόρμα να λειτουργήσουν με υψηλή απόδοση σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας. Η δυνατότητα κυματοδηγησης πλασμονικών ρυθμών με υποφερτές απώλειες διάδοσης (propagation loss) καθώς και η

πρακτική διασύνδεση τους με την τεχνολογία Si κυματοδηγών αποτέλεσε το κίνητρο της μελέτης στη φάση αυτή. Επιπλέον, η αξιοποίηση της πλασμονικής τεχνολογίας σε εφαρμογές επικοινωνίας σε κλίμακα τσιπ (on-chip, chip-to-chip communication) προϋποθέτει υψηλής ποιότητας μετάδοση δεδομένων σε ρυθμούς μετάδοσης που προσφέρει η φωτονική τεχνολογία. Η συμβολή της διατριβής στην περιοχή αυτή αποκτά ιδιαίτερο και πρωτότυπο χαρακτήρα καθώς αξιολογείται η μετάδοση δεδομένων μέσα από υβριδικές δομές DLSPP κυματοδηγών σε SOI πλατφόρμα σε υψηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας μέσα από τις κατάλληλες πειραματικές διατάξεις για τη γέννηση OTDM σήματος πληροφορίας μέχρι τα 160Gb/s.

Ο ενεργός έλεγχος (active control) των πλασμονικών δομών μεταγωγής (plasmonic switches) αποτελεί τον πυρήνα της ερευνητικής προσπάθειας στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για την ανάπτυξη και επίδειξη πλασμονικών διακοπών με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στη γραμμή αυτή υιοθετήθηκε η αξιοποίηση του θερμο-οπτικού μηχανισμού (Thermo-optic effect) για τον έλεγχο των κυματοδηγούμενων πλασμονικών ρυθμών σε δομές DLSPP (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton - DLSPP) κυματοδηγών. Η συμβολή της παρούσας διατριβής στην περιοχή των DLSPP διακοπών τέμνεται σε δύο διαφορετικούς άξονες: (i) ως προς τη μελέτη διαφορετικών τοπολογιών διακοπών (switching concepts) που βασίζονται σε δομές κοιλότητας συντονισμού κυματοδηγών (Waveguide Ring Resonator – WRR) και δομές Mach-Zehnder συμβολομέτρων (Mach-Zehnder Interferometers - MZIs) και (ii) ως προς την επιλογή του κατάλληλου πολυμερικού υλικού που θα εφοδιάσει τη λωρίδα του DLSPP κυματοδηγού εξασφαλίζοντας χαμηλές απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης του διακόπτη. Η προστιθέμενη αξία της διατριβής έγκειται στον προσδιορισμό των κατάλληλων παραμέτρων λειτουργίας για τις δομές πλασμονικών διακοπών που προσφέρουν μεταγωγή πληροφορίας με εξαιρετικά χαμηλές απαιτήσεις ηλεκτρικής ισχύος, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις για δραστική περικοπή της απαιτούμενης ενέργειας/bit που απαιτείται για την εξυπηρέτηση της μεταγωγής δεδομένων [1.187,1.188]. Ο διακηρυγμένος στόχος είναι η βελτίωση του ενεργειακού αποτυπώματος των υπηρεσιών που απαιτούν την κίνηση δεδομένων σε τεράστιες ποσότητες, όπως για παράδειγμα τα Κέντρα Δεδομένων (Data Centers) και οι υπολογιστικές φάρμες (server farms) [1.189].

Συνοπτικά, οι εργασίες που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής είναι οι παρακάτω:

- Πειραματική αξιολόγηση της παθητικής πλατφόρμας Si τεχνολογίας που είναι υπεύθυνη για την επικοινωνία πάνω στο τσιπ αλλά και μεταξύ του τσιπ και των ινών εισόδου/εξόδου (Input/Output-I/O). Σχεδιασμός και εγκατάσταση του σταθμού εργασίας στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για τη χρήση κατακόρυφης σύζευξης του φωτός στις παθητικές δομές SOI κυματοδηγών Rib-τύπου. Η πειραματική αξιολόγηση αποτέλεσε τμήμα μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης των σχεδιαστικών παραμέτρων των SOI παθητικών δομών που βασίστηκε στη συνεργασία με την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου του Βερολίνου (Technical University of Berlin-TUB) και της κατασκευής των

ολοκληρωμένων δομών από την AMO GmbH που προσφέρει την υψηλής ποιότητας κατασκευή νανο-δομών κυματοδηγών τεχνολογίας SOI.

- Πειραματική αξιολόγηση στο σταθμό εργασίας του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) με σκοπό τον οπτικό χαρακτηρισμό των δομών DLSP κυματοδηγών που φιλοξενούνται στην SOI παθητική πλατφόρμα, εφοδιασμένη με κυματοδηγούς Rib-τύπου καθώς και της ποιότητας διασύνδεσης με της φωτονικής και πλασμονικής πλατφόρμας.
- Εγκατάσταση εργαστηριακής διάταξης για τη δημιουργία ρεύματος πληροφορίας με ρυθμοδότηση στα 10Gb/s και στα 160Gb/s και στη συνέχεια πειραματική αξιολόγηση της ικανότητας μετάδοσης πληροφορίας μέσα από DLSP κυματοδηγούς με έμφαση στην υποβάθμιση της ποιότητας των σημάτων πληροφορίας λόγω της παρουσίας του πλασμονικού μέρους.
- Συμμετοχή στο σχεδιασμό των κυκλωματικών μοντέλων των πλασμονικών διακοπών (plasmonic switches) στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON. Η ανάπτυξη των πλασμονικών διακοπών από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Bourgogne - UB) ενσωμάτωσε σχεδιαστικές παραμέτρους (κύρια συνεισφορά αποτέλεσε η υιοθέτηση του σχήματος μεταγωγής που βασίζεται στο Ασύμμετρο MZI (AMZI) με σκοπό την μείωση της απαίτησης της ολίσθησης φάσης για τη μεταγωγή κατά $\pi/2$.
- Πειραματικός θερμο-οπτικός στατικός (με DC-ρεύμα) των δομών δακτυλίων DLSP κυματοδηγών (WRRs) για την εξαγωγή των οπτικών ιδιοτήτων του και της ικανότητας του να ελέγχεται ενεργά της έγχυσης ρεύματος ελέγχου. Οι πειραματικές μετρήσεις εστίασαν τόσο στη φασματική συμπεριφορά της δομής απουσία οποιουδήποτε σήματος ελέγχου όσο και στη μεταγωγή κατάστασης που προκαλείται μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου των δομών που είναι εφοδιασμένες με πολυμερική λωρίδα από PMMA.
- Πειραματικός χαρακτηρισμός των ετερο-ολοκληρωμένων πλασμονικών διακοπών MZI στην SOI παθητική πλατφόρμα εφοδιασμένων με διηλεκτρική φόρτιση από το πολυμερές Cyclomer. Οι μετρήσεις χαρακτηρισμού περιλαμβάνουν τον στατικό οπτικό χαρακτηρισμό των δομών εστιάζοντας στις οπτικές ιδιότητες καθώς και τη διερεύνηση της στατικής λειτουργίας ελέγχου με χρήση του DC-ρεύματος ελέγχου για την αξιοποίηση του θερμο-οπτικού μηχανισμού στο πολυμερές που υπόσχεται υψηλές τιμές θερμο-οπτικού συντελεστή (Thermo-optic Coefficient - TOC). Δυναμικός χαρακτηρισμός του διακόπτη για τη διερεύνηση των χρόνων μεταγωγής (switching times) του διακόπτη καθώς πειραματική αξιολόγηση της λειτουργίας σε εφαρμογή μεταγωγής με πραγματικά δεδομένα στα 10Gb/s.

Η διατριβή διαρθρώνεται στα παρακάτω κεφάλαια:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η παθητική SOI πλατφόρμα που φιλοξενεί τον ετερο-ολοκληρωμένο πλασμονικό διακόπτη. Παρουσιάζεται το σχεδιαστικό πλαίσιο που υιοθετήθηκε για την επίδειξη δομών Si κυματοδηγών που υποστηρίζουν τον TM πολωτικό ρυθμό ώστε να είναι εφικτή η διασύνδεση τους με τους DLSP κυματοδηγούς του πλασμονικού μέρους. Δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή του Rib-τύπου για τους SOI

κυματοδηγούς που ικανοποιεί τις απαιτήσεις της υψηλής ποιότητας επικοινωνίας πάνω στο τσιπ αλλά και απλότητα στη χρήση τους για τον ενεργό έλεγχο παθητικών δομών με μεταλλικές μικροδομές θέρμανσης (micro-heaters) όπου απαιτείται. Στη συνέχεια, εισάγεται το πρόβλημα της επικοινωνίας του τσιπ με τις υποδομές των οπτικών ινών και αναπτύσσεται το σχεδιαστικό πλαίσιο που υιοθετήθηκε για την κατασκευή κατακόρυφων δομών σύζευξης του φωτός (vertical couplers) μέσω της χρήσης συζευκτών που βασίζονται σε Φράγματα Περίθλασης Κυματοδηγών (Waveguide Grating Couplers). Αναπτύσσονται δύο διαφορετικά σχεδιαστικά μοντέλα δομών σύζευξης που περιλαμβάνουν τη χρήση ενός επιπλέον στρώματος στην κορυφή των δομών για τη βελτιστοποίηση της ικανότητας σύζευξης (coupling efficiency). Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός πειραματικών αποτελεσμάτων οπτικού χαρακτηρισμού. Οι εισαγωγικές μετρήσεις εστιάζουν στον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών λειτουργίας των SOI παθητικών δομών (φασματική απόκριση, ευαισθησία στην πόλωση) όπως επίσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά σύζευξης που διέπουν τους GCs (Grating Couplers - GCs). Μετρήσεις απωλειών που βασίζονται στη μέθοδο προσδιορισμού με δείγματα μεταβλητού μήκους (cutback method) πραγματοποιήθηκαν για την εξαγωγή της ικανότητας σύζευξης των συζευκτών (coupling loss) όσο και τις απώλειες διάδοσης των κυματοδηγών (propagation loss).

Στο **Κεφάλαιο 3** εισάγεται η τεχνολογία των DLSPP κυματοδηγών που υιοθετήθηκε στην στα πλαίσια της διατριβής για την ανάπτυξη διατάξεων ενεργών πλασμονικών διακοπών. Παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες της τεχνολογίας και στη συνέχεια παρατίθενται οι κύριες σχεδιαστικές παράμετροι που υιοθετήθηκαν για την υλοποίησή τους με τη χρήση της διηλεκτρικής φόρτισης από το πολυμερές PMMA. Η αποτελεσματική διασύνδεση του πλασμονικού τμήματος του τσιπ με την παθητική Si πλατφόρμα διερευνάται διεξοδικά παρουσιάζοντας το σχεδιαστικό πλαίσιο που ακολουθήθηκε για την επίτευξη της Si-to-DLSPP διασύνδεσης (Si-to-DLSPP) με επιδίωξη τις χαμηλές απώλειες. Για τον προσδιορισμό των απωλειών διάδοσης (DLSPP propagation loss) και διασύνδεσης (Si-to-DLSPP interfacing loss) παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν αξιοποιώντας δείγματα πλασμονικών κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback method). Η ικανότητα των πλασμονικών κυματοδηγών να μεταφέρουν πληροφορία σε υψηλές ταχύτητες διερευνήθηκε πειραματικά εγκαθιστώντας διατάξεις αξιολόγησης με OOK (On-Off Keying - OOK) σήμα πληροφορίας στα 10Gb/s. Αξιοποιώντας την τεχνική της οπτικής πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου (Optical Time Domain Multiplexing - OTDM) επιδεικνύεται ένα πείραμα διάδοσης μέσω του DLSPP κυματοδηγού στα 160Gb/s. Η αξιολόγηση της ικανότητας μεταφοράς πληροφορίας μέσω της χρήσης DLSPP κυματοδηγών πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ενός συνόλου από μετρικά επίδοσης της ποιότητας περιλαμβάνοντας και μετρήσεις προσδιορισμού ρυθμού σφαλμάτων BER (Bit Error Ratio-BER) με σκοπό τη διερεύνηση της παρουσίας μηχανισμών παραμόρφωσης κατά τη διάδοση του σήματος πληροφορίας στη διεπιφάνεια μετάλλου/διηλεκτρικού.

Στο **Κεφάλαιο 4** εισάγεται η πρώτη τοπολογία πλασμονικού διακόπτη που βασίζεται σε κοιλότητες συντονισμού από DLSPP κυματοδηγούς (Waveguide Ring Resonators-WRRs) που ελέγχονται ενεργά μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού. Συζητείται το προτεινόμενο σχήμα μεταγωγής και αναδεικνύονται οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι και η αρχή λειτουργίας των διακοπών αυτού του τύπου (ακτίνα δακτυλίου, συντελεστές σύζευξης ισχύος στην κοιλότητα). Παρουσιάζεται το σχήμα μεταγωγής που βασίζεται σε απλό δακτύλιο κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση από PMMA. Η παρουσίαση της δομής της κοιλότητας συντονισμού που κατασκευάστηκε για την επίδειξη της λειτουργίας διακόπτη στην παρούσα διατριβή συνοδεύτηκε από πειραματικά οπτικού χαρακτηρισμού που προσδιορίζουν τα φασματικά χαρακτηριστικά της κοιλότητας (FSR, Q-factor). Ο ενεργός έλεγχος του απλού συντονιστή επιδεικνύεται πειραματικά μέσω της χρήσης ενός DC ρεύματος ελέγχου που μετατοπίζει φασματικά τη συνάρτηση μεταφοράς του δακτυλίου. Η αξιολόγηση της λειτουργίας του διακόπτη δακτυλίου από PMMA περιλαμβάνει τη χρήση των βασικών μετρικών επίδοσης του διακόπτη (κατανάλωση ισχύος, λόγους σβέσης μεταξύ καταστάσεων μεταγωγής) και την αξιολόγηση του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου για το πολυμερές (θερμική ικανότητα, όρια θερμικής αντοχής δομής). Στο τέλος του κεφαλαίου περιλαμβάνονται αποτελέσματα από δομές διακοπών διπλών δακτυλίων (Dual-Ring Resonators) που είναι εφοδιασμένα με διηλεκτρική φόρτιση από το πολυμερές Cyclomer που υπόσχεται υψηλότερη τιμή θερμο-οπτικού συντελεστή (TOC). Οι δομές αυτές αναπτύχθηκαν και αξιολογήθηκαν στα πλαίσια της συνεργασίας με το Πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας (University of Bourgogne - UB) και τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται για λόγους σύγκρισης των πολυμερικών υλικών ως προς τη χρήση τους σε πλασμονικούς διακόπτες κοιλότητων συντονισμού.

Στο **Κεφάλαιο 5** εισάγεται το σχήμα του ολοκληρωμένου κυκλώματος δρομολόγησης που βασίζεται σε ένα ασύμμετρο συμβολομετρικό διακόπτη Mach-Zehnder (A-MZI) που σχηματίζεται από DLSPP κυματοδηγούς με διηλεκτρική φόρτιση από το πολυμερές Cyclomer, πολυμερικό υλικό το οποίο παρουσιάζει ελκυστική θερμο-οπτική συμπεριφορά με υψηλές τιμές TOC. Αρχικά παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας του συμβολομετρικού διακόπτη MZI και τα πλεονεκτήματα του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου για την περίπτωση των πλασμονικών δομών. Οι δομές που κατασκευάστηκαν για την υλοποίηση της λειτουργίας μεταγωγής παρουσιάζονται περιεκτικά και περιλαμβάνουν την ετερο-ολοκλήρωση πλασμονικών δομών στην παθητική SOI πλατφόρμα. Συνοδεύονται από μεγάλο αριθμό πειραματικών μετρήσεων που σκοπό έχουν να συνεισφέρουν στον οπτικό χαρακτηρισμό των υβριδικών δομών, τη θερμο-οπτική συμπεριφορά του πολυμερούς, την επίδραση της εναπόθεσης των DLSPP δομών στην SOI παθητική πλατφόρμα και στη διασύνδεση των επιμέρους κυκλωμάτων. Η αξιολόγηση της λειτουργίας του θερμο-οπτικού διακόπτη περιλαμβάνει τον πειραματικό θερμο-οπτικό στατικό χαρακτηρισμό με τη χρήση DC σήματος ελέγχου όσο και το δυναμικό θερμο-οπτικό χαρακτηρισμό με τη χρήση μιας ακολουθίας ηλεκτρικών παλμών σε συχνότητες KHz-κλίμακας. Η επιτυχής ολοκλήρωση

του χαρακτηρισμού της δομής του πλασμονικού διακόπτη επέτρεψε την αξιολόγηση της λειτουργίας μεταγωγής σε περιβάλλον πραγματικής κίνησης πληροφορίας χρησιμοποιώντας τη διάταξη για την παραγωγή δεδομένων στα 10Gb/s με NRZ (Non Return to Zero - NRZ) παλμούς. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου επιχειρείται η σύγκριση της επίδοσης του θερμο-οπτικού πλασμονικού διακόπτη MZI από Cyclomer με αντίστοιχες επιδείξεις από διακόπτες από PMMA συσχετίζοντας το μέγεθος, την ενεργειακή κατανάλωση και τους χρόνους μεταγωγής τους.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται αποτίμηση των αποτελεσμάτων της διατριβής και παρατίθεται οι προσεγγίσεις για περιοχές γύρω από το αντικείμενο της διατριβής με ερευνητικό ενδιαφέρον.

Το **Παράρτημα Α** περιλαμβάνει τη λίστα με όλες τις δημοσιεύσεις που προέκυψαν μέσα στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Το **Παράρτημα Β** περιέχει τη λίστα των συντομεύσεων που υπάρχουν μέσα στο κείμενο της διατριβής.

Αναφορές Εισαγωγής

[1.1] "Is U.S. Economic Growth Over? Faltering Innovation Confronts the Six Headwinds" by Robert J. Gordon, NBER Working Paper 18315, August 2012.

[1.2] "Productivity and growth, Was that it?", by M.C.K., The Economist, Sep 8th 2012, <http://www.economist.com/blogs/freeexchange/2012/09/productivity-and-growth>

[1.3] Andy Atkeson & Pat Kehoe, 2002. "[The transition to a new economy after the Second Industrial Revolution](#)," Proceedings, Federal Reserve Bank of San Francisco, issue November 2002, NBER Working Paper No.8676

[1.4] P. Antras and H.-J.Voth, "Factor prices and productivity growth during the British industrial revolution", Elsevier Explorations in Economic History, Vol.40, pp.52-77 (2003).

[1.5] A. Atkeson and P.J. Kehoe, "Modeling the Transition to a New Economy: Lessons from Two Technological Revolutions", Federal Reserve Bank of Minneapolis, Research Department, Staff Report 296 (2006).

[1.6] Charles R. Hulten, "[Total Factor Productivity: A Short Biography](#)", in [New Developments in Productivity Analysis](#), Hulten, Dean, and Harper, NBER Working Paper No.7471 (2001).

[1.7] Erik Brynjofsson, "The Productivity Paradox of Information Technology", Communications of the ACM 36, no.12, pp.66-77 (1993).

[1.8] Erik Brynjofsson and Andrew McAfee, "The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies", W.W. Norton, 2016 Edition.

- [1.9] "5G Radio Access, Capabilities and Technologies", Ericsson White Paper, April 2016.
- [1.10] M. Hermans et al, "Photonic Delay Systems as Machine Learning Implementations", Journal of Machine Learning Research, Vol.16, pp.2081-2097 (2015).
- [1.11] S.J. Ezell and R.B. Atkinson, "The Vital Importance of High-Performance Computing to U.S. Competitiveness", Information Technology and Innovation Foundation, April 2016.
- [1.12] L. Kong et al, "Millimeter-Wave Wireless Communications for IoT-Cloud Supported Autonomous Vehicles: Overview, Design, and Challenges", IEEE Communications Magazine, Vol.55, Issue 1, pp.62-68 (2017).
- [1.13] A. Sankaranarayanan, "Accelerating Machine Learning Software on IA", Director of Engineering, Analytics&AI Solutions Group, Intel, November 2016.
- [1.14] Quda Version 0.9beta, using double-half mixed precision DDalphaAMG using double-single
- [1.15] Jeffrey Dean, "Keynote: Machine Learning – The Future is Now", Talk at TiECon, May 7, 2016
- [1.16] Bright Computing, "The Convergence of HPC and Big Data for Enterprise", Spotlight-ON, Technical Report from Enterprise Tech
- [1.17] Bill Dally, "Deep Learning and HPC", Talk at HPC Advisory Council Stanford Conference, January 17, 2017.
- [1.18] Daniel D. Gutierrez, "Guide to Deep Learning and Artificial Intelligence", Inside BIGDATA, Nvidia, 2017
- [1.19] Janis Keuper, "Deep Learning goes HPC", presentation of Competence Center High Performance Computing Fraunhofer ITWM, Kaiserslautern, Germany, 2016.
- [1.20] Xu Meihua, Fei Yu, Bi Zhuo, "A novel multi-cores MCU architecture based on data flow computing", in Proc. of 2010 International Conference on Computer Design and Applications (ICCD), No. 11524127, 25-27 June 2010, Qinhuangdao, China.
- [1.21] S. Pillement, "DART: A Functional-Level Reconfigurable Architecture for High Energy Efficiency", EURASIP Journal on Embedded Systems, vol. 2008, no. 2008, pp. 13.
- [1.22] D.A. Patterson and J.L. Hennessy, "Οργάνωση και Σχεδίαση Υπολογιστών – Η Διασύνδεση Υλικού και Λογισμικού", Τόμος Α, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Τρίτη Αμερικάνικη Έκδοση, ISBN 960-209-907-0.
- [1.23] <http://www.top500.org/system/166997> [online].
- [1.24] <http://www.top500.org/system/173279> [online].
- [1.25] <http://www.top500.org/featured/top-systems/asci-red-sandia-national-laboratory> [online].
- [1.26] http://en.wikipedia.org/wiki/ASCI_White [online].

- [1.27] <http://www.top500.org/featured/top-systems/the-earth-simulator-earth-simulator-center> [online].
- [1.28] http://en.wikipedia.org/wiki/IBM_Roadrunner [online].
- [1.29] <http://www.top500.org/featured/top-systems> [online].
- [1.30] <http://www.top500.org/system/177999> [online].
- [1.31] <http://www.top500.org/statistics/perfdevel> [online].
- [1.32] N.Hemsoth, "A Closer Look at 2016 Top 500 SuperComputer Rankings", appeared in The Next Platform, November 14, 2016, <https://www.nextplatform.com/2016/11/14/closer-look-2016-top-500-supercomputer-rankings/>
- [1.33] <https://www.nextbigfuture.com/2017/01/china-will-have-200-petaflop.html>
- [1.34] Jack Dongarra, "Report on the Sunway TaihuLight System", Technical Report UT-EECS-16-742, University of Tennessee, Department of Electrical Engineering and Computer Science, June 24, 2016.
- [1.35] "The Sunway TaihuLight Supercomputer: System and Applications", by Fu H. H., Liao J. F., Yang J. Z., et al., in Sci. China Inf. Sci., 2016, 59(7): 072001.
- [1.36] <http://nextbigfuture.com/2014/11/united-states-china-europe-and-japan.html> [online].
- [1.37] <https://exascaleproject.org/exascale-computing-project/>
- [1.38] N. Hemsoth, "Exascale Timeline pushed to 2023: What's missing in Supercomputing", appeared in The Next Platform, April 27, 2016, <https://www.nextplatform.com/2016/04/27/exascale-timeline-pushed-2023-whats-missing-supercomputing/>
- [1.39] <https://en.wikipedia.org/wiki/SunwayTaihuLight>
- [1.40] Gordon E. Moore, "Cramming More Components onto. Integrated Circuits," Electronics, Vol.32, No.8, pp. 114–117, April 19, 1965.
- [1.41] Rodney Brooks, "The End of Moore's Law", Post February 4, 2017, rodneybrooks.com/the-end-of-moores-law/
- [1.42] Gordon Moore, "50 Years of Moore's Law", Intel.com video, April, 2015 <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/50-years-of-mooreslaw-video.html>.
- [1.43] W.M. Holt, "1.1 Moore's Law: A Path Going Forward", in Proc. of IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) 2016, February 2016, San Francisco, CA, USA.
- [1.44] W. Holt, Intel Investor Meeting, November 20, 2014 <http://intelstudios.edgesuite.net/im/2014/index.html>

- [1.45] A. Nalamalpu et al, "Broadwell: A family of IA 14nm processors", 2015 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, pp. C314-C315, 2015.
- [1.46] B. Schauer, "Multi-core Processors – A Necessity", ProQuest, Sep. 2008, {<http://cse.unl.edu/~seth/990/Pubs/multicore-review.pdf>}[online].
- [1.47] <http://www.pcauthority.com.au/News/163122,the-greatest-tech-u-turns-of-all-time-intel-and-netburst.aspx> [online].
- [1.48] A. Vajda, "Multi-core and Many-core Processor Architectures", Programming Many-Core Chips, pp. 9-43, Springer US, Jun. 2011.
- [1.49] S. Mueller, "Microprocessor Types and Specifications", Upgrading and Repairing PCs, 17th ed., Que Corp., Mar. 2006.
- [1.50] N. Choudhary, "Network-on-Chip: A New SoC Communication Infrastructure Paradigm", International Journal of Soft Computing and Engineering, vol. 1, no. 6, pp. 332-335, Jan. 2012.
- [1.51] T. Bjerregaard and S. Mahadevan, "A survey of research and practices of network-on-chip", ACM Computing Surveys, vol. 38, no. 1, pp. 1-51, Mar. 2006.
- [1.52] P.T. Wolkotte, G.J.M. Smit, N. Kavaldjiev, J.E. Becker, and J. Becker, "Energy Model of Networks-on-Chip and a Bus", in proc. of International Symposium on System-on-Chip (SoC'05), pp. 82-85, Tampere, Finland, Nov. 2005.
- [1.53] N. Eisley and L.-S. Peh, "High-level power analysis for on-chip networks", in proc. of International Conference on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems (CASES'04), pp. 104-115, New York, NY, USA, Sep. 2005.
- [1.54] J. D. Owens, W. J. Dally, R. Ho, D.N. Jayasimha, S.W. Keckler, and L.-S. Peh, "Research challenges for on-chip interconnection networks", IEEE Micro, vol. 27, no. 5, pp. 96-108, Sep./Oct. 2007.
- [1.55] Y. Hoskote, S. Vangal, A. Singh, N. Borkar, and S. Borkar, "A 5-GHz Mesh Interconnect for A Teraflops Processor", IEEE Micro, vol. 27, no. 5, pp. 51-61, Oct. 2007.
- [1.56] R.G. Beausoleil, P.J. Kuekes, G.S. Snider, S.-Y. Wang, and R.S. Williams, "Nanoelectronic and nanophotonic interconnect", Proc. of the IEEE, vol. 96, no. 2, pp. 230-247, Feb. 2008.
- [1.57] K. C. Saraswat and F. Mohammadi, "Effect of scaling of interconnections on the time delay of VLSI circuits," IEEE Trans. Electron Devices 29, 645–650 (1982).
- [1.58] R. Ho, K. W. Mai, and M. A. Horowitz, "The future of wires," Proc. IEEE 89, 490–504 (2001).
- [1.59] "International technology roadmap for semiconductors," <http://www.itrs.net/>.
- [1.60] D. A. B. Miller and H. M. Ozaktas, "Limit to the bit-rate capacity of electrical interconnects from the aspect ratio of the system architecture," J. Parallel Distrib. Comput. Vol. 41, pp. 42–52 (1997).

- [1.61] D. E. Atkins, K. K. Droegemeier, S. I. Feldman, H. Garcia- Molina, M. L. Klein, D. G. Messerschmitt, P. Messina, J. P. Ostriker, and M. H. Wright, Final Report of the NSF Blue Ribbon Advisory Panel on Cyberinfrastructure: Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure (NSF, January 2003), <http://www.nsf.gov/cise/sci/reports/atkins.pdf>.
- [1.62] John Poulton, "Low-Power Chip-to-Chip I/O", Presentation 4/18/13, School of Electrical and Computer Engineering.
- [1.63] H.B. Dwight, "Skin effect in tubular and flat conductors", Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, Vol.37, Issue 8, pp. 977-998 (1918).
- [1.64] Hwang, L., and Turlik, I., A review of the skin effect as applied to thin film interconnections. IEEE Trans. Components Hybrids Manufacturing Tech. 15, pp. 43–55, (1992).
- [1.65] D. A. B. Miller, "Physical reasons for optical interconnection," International Journal of Optoelectronics, Vol. 11, No.3, pp. 155–168 (1997).
- [1.66] D. A. B. Miller, "Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips," Proc. IEEE 88, 728–749 (2000).
- [1.67] D. A. B. Miller, "Optical interconnects to silicon," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics Vol. 6, pp. 1312–1317 (2000).
- [1.68] D. A. B. Miller, "Device requirements for optical interconnects to silicon chips," Proc. IEEE 97, 1166–1185 (2009).
- [1.69] K.-N. Chen, M. J. Koblinsky, B. C. Barnett, and R. Reif, "Comparisons of conventional, 3-D, optical, and RF interconnects for on-chip clock distribution," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 51, 233–239 (2004).
- [1.70] G. A. Keeler, B. E. Nelson, D. Agarwal, C. Debaes, N. C. Helman, A. Bhatnagar, and D. A. B. Miller, "The benefits of ultrashort optical pulses in optically-interconnected systems," IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics, Vol. 9, pp. 477–485 (2003).
- [1.71] C. Debaes, A. Bhatnagar, D. Agarwal, R. Chen, G. A. Keeler, N. C. Helman, H. Thienpont, and D. A. B. Miller, "Receiver-less optical clock injection for clock distribution networks," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 9, 400–409 (2003).
- [1.72] D. A. B. Miller, A. Bhatnagar, S. Palermo, A. Emami-Neyestanak, and M. A. Horowitz, "Opportunities for optics in integrated circuits applications," International Solid State Circuits Conference, 2005 (IEEE, 2005), paper 4.6, pp. 86–87.
- [1.73] A. Shacham, K. Bergman, and L. P. Carloni, "Photonic networks-on-chip for future generations of chip multiprocessors," IEEE Trans. Comput. 57, 1246–1260 (2008).
- [1.74] R. G. Beausoleil, P. J. Kuekes, G. S. Snider, S.-Y. Wang, and R. S. Williams, "Nanoelectronic and nanophotonic interconnect," Proc. IEEE 96, 230–247 (2008).
- [1.75] A. V. Krishnamoorthy, R. Ho, X. Zheng, H. Schwetman, J. Lexau, P. Koka, G. L. Li, I. Shubin, and J. E. Cunningham, "Computer systems based on silicon photonic interconnects," Proc. IEEE 97, 1337–1361 (2009).

[1.76] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vysokinos, and N. Pleros, "0.48Tb/s (12x40Gb/s) WDM transmission and high-quality thermo-optic switching in dielectric loaded plasmonics", *Optics Express*, Vol. 20, No. 7, pp. 7655-7662 (2012).

[1.77] <http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/Home2007.htm>

[1.78] <http://www.itrs.net/Links/2007ITRS/ExecSum2007.pdf>.

[1.79] N. Magen, A. Kolodny, U. Weiser, and N. Shamir, "Interconnect-power dissipation in a microprocessor," in *Proc. 2004 Int. Workshop System Level Interconnect Prediction (ACM, 2004) Session Interconnect Anal. SoCs Microprocess.*, pp. 7–13.

[1.80] W. J. Dally and J. Poulton, "Transmitter equalization for 4-Gbps signaling," *IEEE Micro*, vol. 17, pp. 48–56, Jan./Feb. 1997.

[1.81] J. Poulton, R. Palmer, A. M. Fuller, T. Greer, J. Eyles, W. J. Dally, and M. Horowitz, "A 14-mW 6.25-Gb/s transceiver in 90-nm CMOS", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 42 pp. 2745–2757, 2007.

[1.82] G. Balamurugan, J. Kennedy, G. Banerjee, J. E. Jaussi, M. Mansuri, F. O'Mahony, B. Casper, and R. Mooney, "A scalable 5–15 Gbps, 14–75 mW low-power I/O transceiver in 65 nm CMOS", *IEEE J. Solid State Circuits*, vol. 43, pp. 1010–1019, 2008.

[1.83] H. Cho, P. Kapur, and K. C. Saraswat, "Power comparison between high-speed electrical and optical interconnects for interchip communication," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, no. 9, pp. 2021–2033 (2004).

[1.84] H. Cho, K.-H. Koo, P. Kapur, and D. C. Saraswat, "Performance comparisons between Cu/low-, carbon-nanotube, and optics for future on-chip interconnects," *IEEE Electronic Device Letters*, vol. 29, pp. 122–124, 2008.

[1.85] J. H. Collet, F. Caignet, F. Sellaye, and D. Litaize, "Performance constraints for on-chip optical interconnects," *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, Vol. 9, pp. 425–432 (2003).

[1.86] C. Debaes, A. Bhatnagar, D. Agarwal, R. Chen, G. A. Keeler, N. C. Helman, H. Thienpont, and D. A. B. Miller, "Receiver-less optical clock injection for clock distribution networks," *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, Vol. 9, pp. 400–409 (2003).

[1.87] D.A. Miller, "Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips", *Invited Paper, Proceedings of the IEEE*, Vol.97, No.7, pp. 1166-1185 (2009).

[1.88] Ruiqiang Ji et al., "Five-port optical router for photonic networks-on-chip", *Optics Express*, Vol.19, No.21, pp. 20258-20268 (2011).

[1.89] R. G. Beausoleil, P. J. Kuekes, G. S. Snider, S.-Y. Wang, and R. S. Williams, "Nanoelectronic and nanophotonic interconnect," *Proc. IEEE* 96(2), 230–247 (2008).

- [1.90] T. Barwicz, H. Byun, F. Gan, C. W. Holzwarth, M. A. Popovic, P. T. Rakich, M. R. Watts, E. P. Ippen, F. X. Kartner, H. I. Smith, J. S. Orcutt, R. J. Ram, V. Stojanovic, O. O. Olubuyide, J. L. Hoyt, S. Spector, M. Geis, M. Grein, T. Lyszczarz, and J. U. Yoon, "Silicon photonics for compact, energy-efficient interconnects," *Journal of Optical Networking* Vol. 6(1), pp. 63–73 (2007).
- [1.91] H. X. Gu, K. H. Mo, J. Xu, and W. Zhang, "A low-power low-cost optical router for optical networks-on-chip in multiprocessor systems-on-chip," 2009 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, 19–24 (2009).
- [1.92] M. Kistler, M. Perrone, F. Petrini, "Cell Multiprocessor Communication Network: Built for Speed", *IEEE Micro*, Vol.26, Issue 3, pp. 10-23 (2006).
- [1.93] M. Petracca, K. Bergman, L.P. Carloni, "Photonic Networks-on-Chip: Opportunities and Challenges", Invited Paper, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, IEEE ISCAS 2008, May 2008, Seattle, WA, USA.
- [1.94] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, "Optical Networks: A Practical Perspective". Morgan Kaufmann, 2002.
- [1.95] T. Mudge, "Power: A first-class architectural design constraint," *IEEE Computer*, vol. 34, no. 4, pp. 52–58, 2001.
- [1.96] N. Easley and L.-S. Peh, "High-level power analysis for on-chip networks," in *Intl Conf. on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems*, Sept. 2004.
- [1.97] G.T. Reed, "The optical age of silicon," *Nature*, vol. 427, no. 6975, pp. 595–596, Feb. 2004.
- [1.98] C. Batten, A. Joshi, J. Orcutt, A. Khilo, B. Moss, C. W. Holzwarth, M. A. Popovic, H. Li, H. I. Smith, J. L. Hoyt, F. X. Kartner, R. J. Ram, V. Stojanovic, and K. Asanovic, "Building many-core processor-to-DRAM networks with monolithic CMOS silicon photonics," *IEEE Micro*, vol. 29, no. 4, pp. 8–21, Jul./Aug. 2009.
- [1.99] B. Jalali, "Teaching silicon new tricks," *Nature Photonics*, Vol. 1, No. 4, pp. 193–195, Apr. 2007
- [1.100] C. Gunn, "CMOS photonics for high-speed interconnects," *IEEE Micro*, Vol. 26, No. 2, pp. 58–66, Mar./Apr. 2006.
- [1.101] J.F. Bauters, et al., "Planar waveguides with less than 0.1 dB/m propagation loss fabricated with wafer bonding", *Optics Express*, vol. 19, no. 24, pp. 24090-24101, Oct. 2011
- [1.102] B. Lee et al, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 20, pp. 398-400 (2008).
- [1.103] "Heterogeneous integration of Silicon Photonics for next generation of communication and computing systems", VTT Presentation appeared in Summer School Lectures, Yorktown Heights, NY, 2008.
- [1.104] F. Xia, L. Sekaric, and Y.A. Vlasov, "Ultracompact optical buffers on a silicon chip", *Nature Photonics*, vol. 1, no. 1, pp. 65-71, Jan. 2007

- [1.105] Y. Ma, et al., "Ultralow loss single layer submicron silicon waveguide crossing for SOI optical interconnect", *Optics Express*, vol. 21, no. 24, pp. 29374-29382, Nov. 2013.
- [1.106] H. F. Hamann et al, "Hotspot-Limited Microprocessors: Direct Temperature and Power Distribution Measurements", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 42, Issue 1, pp.56-65 (2007).
- [1.107] Y. Vlasov, W. M. J. Green, and F. Xia, "High-throughput silicon nanophotonic wavelength insensitive switch for on-chip optical networks", *Nature Photonics*, Vol.2, pp.242-246 (2008).
- [1.108] F.Xia et al., "Ultra-Compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects", *Vol.15, Issue 19*, pp.11934-11941 (2007).
- [1.109] S. Park, K.-J. Kim, I.-G. Kim, and G. Kim, "Si micro-ring MUX/DeMUX WDM filters", *Optics Express*, vol. 19, no. 14, pp. 13531-13539, Jul. 2011.
- [1.110] W. Bogaerts, et al., "Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology", *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 33-44, Jan./Feb. 2010
- [1.111] A.W. Fang, et al., "A Continuous Wave Hybrid AlGaInAs-Silicon Evanescent Laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, 18 (10), 1143-1145, May 15, 2006
- [1.112] Brian Koch et al., *OFC Postdeadline 2013*
- [1.113] Heck et al. *JSTQE 2013*
- [1.114] Chang et al., *Optics Express* 15(18), 11466, August (2007).
- [1.115] G.T. Reed and C.E. Jason Png, "Silicon Optical Modulators", *Elsevier Materials Today*.
- [1.116] X. Xiao, et al., "60 Gbit/s silicon modulators with enhanced electro-optical efficiency", in *proc. of Optical Fiber Communication Conference (OFC'13)*, OW4J.3, Anaheim, CA, USA, Mar. 2013.
- [1.117] G. Li, et al., "40 Gb/s thermally tunable CMOS ring modulator", in *proc. of IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics (GFP)*, pp. 1-3 PDP, San Diego, CA, USA, Aug. 2012.
- [1.118] S. Manipatrani, L. Chen, and M. Lipson, "Ultra high bandwidth WDM using silicon microring modulators", *Optics Express*, vol. 18, no. 16, pp. 16858-16867, Jul. 2010.
- [1.119] L. Yang and J. Ding, "High-Speed Silicon Mach-Zehnder Optical Modulator With Large Optical Bandwidth", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 966-970, Dec. 2013.
- [1.120] Y. Tang, et al., "50 Gb/s hybrid silicon traveling-wave electroabsorption modulator", *Optics Express*, vol. 19, no. 7, pp. 5811-5816, Mar. 2011
- [1.121] L. Virost, et al., "High-performance waveguide-integrated germanium PIN photodiodes for optical communication applications", *Photonics Research*, vol. 1, no. 3, pp. 140-147, Aug. 2013.

- [1.122] P.R.A. Binetti, et al., "InP/InGaAs Photodetector on SOI Photonic Circuitry", *Photonics Journal*, vol. 2, no. 3, pp. 299-305, Mar. 2010.
- [1.123] R.R. Grote, et al., "10 Gb/s Error-Free Operation of All-Silicon Ion-Implanted-Waveguide Photodiodes at 1.55 μm ", *Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 67-70, Oct. 2012
- [1.124] M.R. Watts, et al., "Adiabatic resonant microrings (ARMs) with directly integrated thermal microphotonics", in *proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), CPDB10*, Baltimore, MD, USA, May/June. 2009
- [1.125] Y. Goebuchi, T. Ka, and Y. Kokubun, "Fast and Stable Wavelength-Selective Switch Using Double-Series Coupled Dielectric Microring Resonator", *Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 3, pp. 538-540, Feb. 2006.
- [1.126] J.V. Campenhout, W.M.J. Green, S. Assefa, and Y.A. Vlasov, "Low-power, 2x2 silicon electro-optic switch with 110-nm bandwidth for broadband reconfigurable optical networks", *Optics Express*, vol. 17, no. 26, pp. 24020-24029, Dec. 2009
- [1.127] M.W. Geis, S.J. Spector, R.C. Williamson, and T.M. Lyszczarz, "Submicrosecond submilliwatt silicon-on-insulator thermo-optic switch", *Photonics Technology Letters*, vol. 16, no. 11, pp. 2514-2516, Nov. 2004.
- [1.128] N.Pleros, E.E. Kriezis, K.Vyrsokinos, "Optical Interconnects Using Plasmonics and Silicon Photonics", *Vol.3, No.2*, pp.296-301 (2011).
- [1.129] Davis TJ. "Plasmonics: the convergence between optics and electronics," in *Proc. of SPIE 8923, Micro/Nano Materials, Devices, and Systems, 89232R*, December 7, 2013.
- [1.130] Tucker R.S. "The role of optics in computing", *Nature Photonics*, Vol.4, pp.405-414 (2010).
- [1.131] Leuthold, J., Hoessbacher, C., Muehlbrandt, S., Melikyan, A., Kohl, M., Koos, C., Tomkos, I. (2013). "Plasmonic communications: light on a wire", *Optics and Photonics News*, 24(5), 28-35. DOI: 10.1364/OPN.24.5.000028.
- [1.132] A.M.H. Wong, G.V. Eleftheriadis, "Advances in Imaging Beyond the Diffraction Limit", *IEEE Photonics Journal*, Vol.4, Issue 2, pp.586-589 (2012).
- [1.133] S.A.Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. Springer, 2007.
- [1.134] R.Letizia, D. Pinto, S.S.A.Obayya, "Accurate Analysis of Plasmonic Devices with a New Drude Two Critical Points MRTD Method", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, Issue 18, pp.1587-1590 (2012).
- [1.135] Ed. Ki Young Kim. *Plasmonics—Principles and Application*. InTech, 2012
- [1.136] Ed. S.I.Bozhevolnyi. *Plasmonic Nanoguides and Circuits*. Pan Stanford Publishing, 2009.
- [1.137] Lynch D W and Huttner W R 1985 *Handbook of Optical Constants of Solids*, ed Palik (New York: Academic).

- [1.138] Van Exter M and Lagendijk, "Ultrashort surface-plasmon and phonon dynamics", *Physical Review Letters*, Vol.60, pp.49-52 (1988).
- [1.139] Heinz Raether, *Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings* Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 111, Springer Berlin 1988.
- [1.140] W.L. Barnes, "Surface plasmon-polariton length scales: a route to subwavelength optics", *IOP Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, Vol.8, pp. 87-93 (2006).
- [1.141] E. Kretschmann and H. Raether, "Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light", *Z. Naturf.* Vol.23, pp.2135-2136 (1968).
- [1.142] R.H. Ritchie, E.T. Arakawa, J.J. Cowan and R.N. Hamm, "Surface-Plasmon Resonance Effect in Grating Diffraction", *Physical Review Letters*, Vol.21, Issue 22, pp.1530-1533 (1968).
- [1.143] W.L. Barnes, "Fluorescence near interfaces: The role of photonic mode density", *Journal of Modern Optics*, Vol.45, Issue 4, pp.661-699 (1998).
- [1.144] P. Berini, "Figures of merit for surface plasmon waveguides", *Optics Express*, Vol.14, No.26, pp.13030-13042 (2006).
- [1.145] R. Zia, M.D. Selker, P.B. Catrysse and M. L. Brongersma, "Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes," *J. Opt. Soc. Am. A* 21, 2442-2446 (2006).
- [1.146] C. Athanasopoulos, M. Mattheakis and G.P. Tsironis, "Enhanced Surface Plasmon Polariton Propagation Induced by Active Dielectrics", in *Proc. of COMSOL Conference 2014*, 17-19 September 2014, Cambridge, UK.
- [1.147] P. Berini, "Long-range surface plasmon polaritons", *Advances in Optics and Photonics*, Vol.1, Issue 3, pp.484-588 (2009).
- [1.148] N. M. Lyndin, I. F. Salakhutdinov, V. A. Sychugov, B. A. Usievich, F. A. Pudonin, O. Parriaux, "Long-range surface plasmons in asymmetric layered metal-dielectric structures," *Sens. Actuators B* 54, 37-42 (1999).
- [1.149] C.-C. Huang, "Analysis of long-range surface plasmon polaritons in nonlinear plasmonic waveguides using pseudospectral method", *Optics Express*, Vol.20, No.17, pp.18665-18678 (2012).
- [1.150] A. Liu et al, "Wavelength Division Multiplexing Based Photonic Integrated Circuits on Silicon-on-Insulator Platform", *JSTQE* 16 (1) pp. 23- 32 (2010).
- [1.151] J. C. Weeber, A. Dereux, C. Girard, J. R. Krenn, and J. P. Goudonnet, "Plasmon polaritons of metallic nanowires for controlling submicron propagation of light," *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 60, no. 12, pp. 9061-9068, Sep. 1999.
- [1.152] B. Steinberger, A. Hohenau, H. Ditlbacher, A. L. Stepanov, A. Drezet, F. R. Aussenegg, A. Leitner, and J. R. Krenn, "Dielectric stripes on gold as surface plasmon waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 9, pp. 094104-1-094104-3, Feb. 2006.

- [1.153] E. Moreno, S. G. Rodrigo, S. I. Bozhevolnyi, L. Martín-Moreno, and F. J. Garcia-Vidal, "Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 2, pp. 023901-1–023901-4, Jan. 2008.
- [1.154] T. Holmgaard and S. I. Bozhevolnyi, "Theoretical analysis of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides," *Phys. Rev. B.*, vol. 75, no. 24, pp. 245 405-1–245 405-12, Jun. 2007.
- [1.155] E. Devaux, T. W. Ebbesen, J. C. Weeber, and A. Dereux, "Launching and decoupling surface plasmons via microgratings," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 83, no. 24, pp. 4936–4938, Dec. 2003
- [1.156] A. Boltasseva and S. I. Bozhevolnyi, "Directional couplers using long-range surface plasmon polariton waveguides," *J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 12, no. 6, pp. 1233–1241, Nov./Dec. 2006
- [1.157] K. F. MacDonald, Z. L. Samson, M. I. Stockman, and N. I. Zheludev, "Ultrafast active plasmonics," *Nat. Photon.*, vol. 3, no. 1, pp. 55–58, Jan. 2009
- [1.158] S. Randhawa, S. Lacheze, J. Renger, et al. "Performance of electro-optical plasmonic ring resonators at telecom wavelengths", *Optics Express*, Vol.20, pp.2354–2362 (2012).
- [1.159] C. Haffner, W. Heni, Y. Fedoryshyn, et al. "All-plasmonic Mach–Zehnder modulator enabling optical high-speed communication at the microscale", *Nature Photonics*, Vol.9, pp. 525–528 (2015).
- [1.160] A. Emboras, I. Goykhman, B. Desiatov, et al. "Nanoscale plasmonic memristor with optical readout functionality", *Nano Letters*, Vol.13, pp.6151–6155 (2013).
- [1.161] K. Anglin, T. Ribaudou, D. Adams, et al. "Voltage-controlled active mid-infrared plasmonic devices", *Journal of Applied Physics* Vol.103, pp. 109-123 (2011).
- [1.162] T.J. Davis, D.E. Gomez, and A. Roberts, "Plasmonic circuits for manipulating optical information", *Nanophotonics* 2016, DOI: 10.1515/nanoph-2016-0131
- [1.163] M. Wu, Z. Han, and V. Van, "Conductor-gap-silicon plasmonic waveguides and passive components at subwavelength scale," *Optics Express*, vol. 18, no. 11, pp. 11728–11736, May 2010.
- [1.164] R. M. Briggs, J. Grandidier, S. P. Burgos, E. Feigenbaum, and H. A. Atwater, "Efficient coupling between dielectric loaded plasmonic and silicon photonic waveguides," *Nano Lett.*, vol. 10, no. 12, pp. 4851–4857, Oct. 2010
- [1.165] A. Liu et al, "Wavelength Division Multiplexing Based Photonic Integrated Circuits on Silicon-on-Insulator Platform", *JSTQE* 16 (1) pp. 23- 32 (2010).
- [1.166] N. Pleros, K. Vysokinos, S. Papaioannou, D. Fitsios, O. Tsilipakos, A. Pitolakis, E. Kriezis, A. Million, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, D. Kalavrouziotis, Giannis Giannoulis, H. Avramopoulos, N. Djellali, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, J. Gosciniac and S. Bozhevolnyi, "Tb/s Switching Fabrics for Optical Interconnects Using Heterointegration of Plasmonics and Silicon Photonics: The FP7 PLATON Approach", 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, TuH2, Denver, Colorado, USA, November 2010 (invited).

- [1.167] O. Tsilipakos, T. V. Yioultsis, and E. E. Kriezis, "Theoretical analysis of thermally tunable microring resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides," *Journal of Applied Physics*, Vol. 106, No. 9, pp. 109-1–109-8, Nov. 2009
- [1.168] O. Tsilipakos and E. E. Kriezis, "Microdisk resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides," *Elsevier Optics Communication*, Vol. 283, No. 15, pp. 3095–3098, Aug. 2010.
- [1.169] J. Gosciniak, S. I. Bozhevolnyi, T. B. Andersen, V. S. Volkov, J. Kjelstrup-Hansen, L. Markey, and A. Dereux, "Thermooptic control of dielectric-loaded plasmonic waveguide components," *Opt. Express*, vol. 18, no. 2, pp. 1207–1216, Jan. 2010.
- [1.170] A. Dereux, K. Hassan, J.-C. Weeber, N. Djellali, S. I. Bozhevolnyi, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. Kriezis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, N. Pleros, T. Tekin, M. Baus, D. Kalavrouziotis, G. Giannoulis, and H. Avramopoulos, "Parametric study of dielectric loaded surface plasmon polariton add-drop filters for hybrid silicon/plasmonic optical circuitry," presented at SPIE Photonics West, San Francisco, CA, Jan. 2011, Paper 7945-40
- [1.171] J.A. Kash et al, "Optical Interconnects in Exascale Supercomputers", *Proceedings of IEEE Photonics Society 2010*, 483-484, 7-11 November 2010, Denver, CO.
- [1.172] F. E. Doany, C. L. Schow, C. W. Baks, D. M. Kuchta, P. Pepeljugoski, L. Schares, R. Budd, F. Libsch, R. Dangel, F. Horst, B. J. Offrein, and J. A. Kash, "160 Gb/s Bidirectional Polymer Waveguide Board-Level Optical Interconnects using CMOS-Based Transceivers," *IEEE Trans. Adv. Pkg.*, vol. 32, pp. 345-359, 2009.
- [1.173] Ekmel Ozbay, "Plasmonics: Merging Plasmonics and Electronics at Nanoscale Dimensions", *Science*, Vol.311, pp.189-193 (2006).
- [1.174] L. Schow, F. E. Doany, C. Chen, A. V. Rylyakov, C. W. Baks, D. M. Kuchta, R. A. John, and J. A. Kash, "Low-power 16 x 10 Gb/s Bi-Directional Single Chip CMOS Optical Transceivers operating at < 5 mW/Gb/s/link " *IEEE J. of Solid State Circuits*, vol. 44, pp. 301-313, 2009
- [1.175] H.M.G. Wassel et al., "Towards Chip-Scale Plasmonic Interconnects", in *Proc. of WINDS 2010: Workshop on the Interaction between Nanophotonic Devices and Systems, Co-Located with the 43rd International Symposium on Microarchitecture Sunday, December 5th, 2010, Atlanta, Georgia.*
- [1.176] C. Batten, et al. "Building many-core processor-to-dram networks with monolithic CMOS silicon photonics", *IEEE Micro*, 29(4):8–21, 2009.
- [1.177] V.J. Sorger et al, "Toward integrated plasmonic circuits", *Materials Research Society 2012*, Vol.37, August 2012.
- [1.178] S.A. Maier, P.G. Kik, H.A. Atwater, S. Meltzer, E. Harel, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides", *Nature Materials*, Vol.(2), Issue 4, pp. 229-232 (2002).
- [1.180] E. Verhagen, M. Spasenovic, A. Polman, L. Kuipers, "Nanowire Plasmon Excitation by Adiabatic Mode Transmission", *Physical Review Letters*, PRL 102, 203904 (2009).

- [1.181] D.F.P. Pile, T. Ogawa, D.K. Gramotnev, T. Okamoto, M. Haraguchi, M. Fukui, S. Matsuo, "Theoretical and experimental investigation of strongly localized plasmons on triangular metal wedges for subwavelength waveguiding", *Applied Physics Letters*, APL 87, 061106 (2005).
- [1.182] F. Boeuf, et al., "Silicon photonics research for CMOS compatible optical interconnects at 40Gb/s and beyond," in *Proc. Inter. Semic. Conf. Dresden-Gren.*, Grenoble, France, Sept. 2012, pp. 87-91.
- [1.183] Y. A. Vlasov, "Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. S67-S72, Feb. 2012.
- [1.184] J. Gosciniaik, V. S. Volkov, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, S. Massenet, and A. Dereux, "Fiber-coupled dielectric-loaded plasmonic waveguides," *Opt. Express*, vol. 18, no. 5, pp. 5314–5319, Mar. 2010
- [1.185] L. Schares et al., "Terabus: Terabit/Second-Class Card-Level Optical Interconnect Technologies", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.12, No.5, pp.1032-1044 (2006).
- [1.186] F.E. Doany et al., "Terabit/s-Class 24-Channel Bidirectional Optical Transceiver Module Based on TSV Si Carrier for Board-Level Interconnects", in *Proc. of 60th Electronics and Components and Technology Conference (CETC)*, June 2010, Las Vegas, NV, USA.
- [1.187] Cisco Visual Networking Index, Forecast and Methodology, 2010–2015.
- [1.188] J. Markoff, "Data Centers' Power Use Less Than Was Expected," *New York Times* (July 31, 2011).
- [1.189] Shehabi A, Ganguly S, Traber K, Price H, Horvath A, Nazaroff W. W, Gadgil A. J, "Energy Implications of Economizer Us in California Data Centers", *ACEEE Conference Proceedings*, Monterey, CA, 2008.

2. Ανάπτυξη παθητικής πλατφόρμας πυριτίου (Si)

Το παραδοσιακό επιχείρημα υπέρ της χρήσης Φωτονικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Photonic Integrated Circuits – PICs) τεχνολογίας έγκειται στη συμβατότητα της ανάπτυξης φωτονικής τεχνολογίας με αυτήν που έχει ήδη κατακτηθεί από την ώριμη ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στην ηλεκτρονική [2.1]. Τα δισκία (wafers) Si έχουν το χαμηλότερο κόστος (ανηγμένο ανά μονάδα επιφάνειας) και τη μεγαλύτερη κρυσταλλική ποιότητα συγκριτικά με οποιοδήποτε άλλο ημιαγώγιμο υλικό. Η βιομηχανία είναι ικανή σήμερα να παράγει εκατομμύρια από διατάξεις ολοκληρωμένες σε μία κοινή πλατφόρμα που καταλήγει σε δραστική συμπίεση του κόστους των ηλεκτρονικών διατάξεων αξιοποιώντας τη CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor – CMOS) τεχνική και αναδεικνύει την τεχνολογία Si σαν το πιο εντυπωσιακό παράδειγμα σύγκλισης της τεχνολογικής ωρίμανσης και της οικονομίας κλίμακας [2.2].

Οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις (electrical interconnects) που βασίζονται στο χαλκό (copper) κυριάρχησαν στις εφαρμογές που καλύπτουν ανάγκες επικοινωνίας σε μικρές αποστάσεις (short-reach communications) για περισσότερες από τέσσερις δεκαετίες. Ωστόσο, όπως αναδείχθηκε και στην εισαγωγή της διατριβής, ήταν δύσκολο για τις παραδοσιακές ζεύξεις που βασίζονται σε χαλκό να καλύψουν τις σημερινές απαιτήσεις για μεταφορά δεδομένων σε πολύ υψηλές ταχύτητες. Οι οπτικές διασυνδέσεις (optical interconnects) έχουν αναδειχθεί ως μια αξιόπιστη εναλλακτική για να καλύψουν το τεχνολογικό κενό. Στην προσπάθεια αυτή, διασυνδέσεις που βασίζονται σε οπτικές τεχνολογίες Si έχουν λάβει ιδιαίτερη προσοχή [2.3,2.4]. Πρωτοποριακές εργασίες που διερεύνησαν την επιλογή του Si ως υλικό για την κατασκευή οπτικών κυματοαγωγών είχαν ήδη αναδειχθεί από τη δεκαετία του '80 [2.5-2.7]. Η ανάπτυξη της SOI (Silicon-On-Insulator) πλατφόρμας (αποτελούμενη από κάποιες εκατοντάδες nm απλού κρυσταλλικού Si που τοποθετείται πάνω από ένα πάχος μερικών μm SiO₂) έχει τροφοδοτήσει τις δραστηριότητες και το ερευνητικό ενδιαφέρον μεγάλου αριθμού ομάδων στην ακαδημία αλλά και στη βιομηχανία ανά τον κόσμο [2.8]. Τα βασικά πλεονεκτήματα της SOI τεχνολογίας που τη καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστική για την είσοδο της στην Φωτονική Ολοκλήρωση (Photonic Integration) είναι τα εξής: η συμβατότητα της ανάπτυξης της Si φωτονικής τεχνολογίας με τις CMOS τεχνολογίες κατασκευής, η δυνατότητα για πυκνή ολοκλήρωση των κυκλωμάτων (dense integration) λόγω υψηλού δείκτη αντίθεσης δεικτών διάθλασης (high index contrast), η δυνατότητα για κοινή ολοκλήρωση φωτονικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και η δυνατότητα για επίτευξη χαμηλού κόστους τεχνικών συσκευασίας (packaging).

Το σχετικά μικρό κόστος και η υψηλή ποιότητα των Si δισκίων βάσης (wafers) καθιστά τη Si φωτονική τεχνολογία (Si Photonics) μια ιδανική πλατφόρμα για τη δημιουργία κυκλωμάτων συμβατών με τις CMOS τεχνικές αποτελούμενα από επίπεδους κυματοαγωγούς (planar waveguide circuits). Συνδυάζοντας το παραπάνω με τη δυνατότητα που παρέχουν οι CMOS τεχνικές για επεξεργασία των ολοκληρωμένων δομών που

βασίζονται σε Si δομές, με χαμηλά κόστη επεξεργασίας ανά μονάδα επιφάνειας (\$/mm²), καθιστά τη Si τεχνολογία φωτονική ολοκλήρωσης ιδιαίτερα ανταγωνιστική συγκριτικά με άλλες τεχνολογίες ημιαγωγικών υλικών. Στην κατεύθυνση οι φωτονικές τεχνολογίες Si έχουν τη δυνατότητα να συναντήσουν όλες τις εκδοχές της εξέλιξης της CMOS τεχνολογίας (Bi-CMOS, RF-CMOS) εισάγοντας τελικά την οπτική-CMOS (Opto-CMOS) διάσταση που θα απελευθερώσει τις δυνατότητες της φωτονικής ολοκλήρωσης [2.9].

Η δυνατότητα για ολοκλήρωση των SOI δομών χρησιμοποιώντας τις υποδομές που παρέχουν τα εργαστήρια της μικρο-ηλεκτρονικής (micro-electronics fab) άνοιξαν το δρόμο για τεχνολογική σύγκλιση φωτονικών και μικρο-ηλεκτρονικών κυκλωμάτων στο ίδιο τσιπ που προσφέρει την από κοινού ολοκλήρωση και τη συναρμολόγηση υιοθετώντας 3D τεχνικές [2.10]. Η ολοκλήρωση των Si φωτονικών κυκλωμάτων (Silicon Photonics) εντός μικρο-ηλεκτρονικών τσιπ καθιστά την Si φωτονική τεχνολογία έναν παράγοντα ουσιαστικής βελτίωσης καθώς προσφέρει την ενίσχυση της επίδοσης μικροεπεξεργαστών βασισμένων σε ηλεκτρονικά τρανζίστορ μπορεί να συμβεί από τεχνολογίες που δεν απαιτούν την ετερογενή ολοκλήρωση και συναρμολόγηση και άρα αυξάνουν τις πολυπλοκότητες και τα κόστη [2.11].

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, η ελκυστική αυτή πλατφόρμα πυριτίου (Si) αποκτά ιδιαίτερο νόημα στο βαθμό που μπορεί να προσφέρει υψηλής ποιότητας δισκία (wafers) Silicon-on-Insulator (SOI), μια ιδανική πλατφόρμα ολοκλήρωσης επίπεδων κυματοδηγών [2.12]. Ο ισχυρός οπτικός περιορισμός (optical confinement) που προσφέρει αυτή η πλατφόρμα ολοκλήρωσης λόγω της μεγάλης διαφοράς των δεικτών διάθλασης (refractive index contrast) μεταξύ του Si ($n_{Si}=3.45$) και του SiO₂ ($n_{SiO_2}=1.45$) ανοίγει το παράθυρο για επίτευξη κλίμακας ανάπτυξης ολοκληρωμένων δομών στην κλίμακα εκατοντάδων nm [2.13]. Η μεγάλη αντίθεση των δεικτών διάθλασης μεταξύ πυρήνα (core) και περιβλήματος (cladding) των κυματοαγωγών, προσφέρει τη δυνατότητα για ισχυρό εγκλωβισμό του κυματοδηγούμενου πεδίου στον πυρήνα και συνεπώς τη δυνατότητα να επιτύχουμε δομές με πολύ μικρές διαστάσεις (nm-κλίμακας). Η ιδιότητα αυτή αποκτά επιπλέον νόημα για δομές στις οποίες η ολοκλήρωση προϋποθέτει καμπυλώσεις, όπως για παράδειγμα οι κάμψεις (bends), δακτύλιοι (Rings) κτλ. Η κυματοδότηση σε SOI δομές παρέχει για παράδειγμα κυκλώματα δακτυλίου (Ring Resonators) με ακτίνα της τάξης των ελάχιστων μm, κάτι το οποίο είναι αδύνατο για τις άλλες προαναφερθείσες τεχνολογίες [2.14]. Επιπλέον, το πυρίτιο (Si) χαρακτηρίζεται από υψηλή θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) και υψηλό κατώφλι οπτικής καταστροφής (optical damage threshold), ιδιότητες που το καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικό υλικό για εφαρμογές φωτονικής ολοκλήρωσης (integration) και συσκευασίας (packaging).

Η δυνατότητα για μεγάλη αντίθεση στους δείκτες διάθλασης μπορεί να αυξήσει την πυκνότητα ολοκλήρωσης (integration density) και να παρέχει δυνατότητα για σμίκρυνση των διαστάσεων των διατάξεων, αλλά έρχεται με το κόστος της δυσκολίας της σύζευξης φωτός με τον «έξω κόσμο», και συγκεκριμένα με τις μονότροπες ίνες των υποδομών τηλεπικοινωνιών (telecom fiber optics) που κυματοδηγούν ρυθμούς με μεγαλύτερες διαστάσεις κατανομής πεδίου. Ωστόσο ο συμβιβασμός αυτός στη Si τεχνολογία έχει

επιτευχθεί καθώς είναι εφικτή πλέον η υιοθέτηση τεχνικών συσκευασίας (packaging) με χαμηλή πολυπλοκότητα και κόστος. Δύο βασικές προσεγγίσεις ακολουθούνται για τη σύζευξη φωτός σε ένα τσιπ υψηλού περιορισμού πεδίου (high confinement) το οποίο χρησιμοποιεί κυματοδηγούς κλίμακας μικρότερης από μm : συζεύκτες που βασίζονται σε ολοκληρωμένες δομές φραγμάτων περίθλασης (Grating Couplers) και κωνικές δομές σύζευξης (tapers). Οι κωνικοί συζεύκτες (tapers) απαιτούν ειδικής φροντίδας επεξεργασία των επιφανειών σύζευξης (one-die-at-time processing) για να επιτευχθεί υψηλής ποιότητα σύζευξη φωτός αυξάνοντας δραστικά την πολυπλοκότητα επεξεργασίας [2.15-2.18]. Οι συζεύκτες φραγμάτων περίθλασης (grating couplers) απαιτούν υψηλής πολυπλοκότητας (high complexity) επεξεργασία και εξειδικευμένο σχεδιασμό για αποδεκτά χαμηλές τιμές απωλειών σύζευξης ενώ περιορίζονται εγγενώς από το φασματικό εύρος τους [2.19-2.22]. Μια εκτενής και σε βάθος προσέγγιση του ζητήματος της σύζευξης των SOI ολοκληρωμένων δομών με τον «έξω κόσμο» ο αναγνώστης μπορεί να βρει στην παρακάτω εργασία [2.23].

Απεναντίας, υπάρχουν δομικά μειονεκτήματα που αναζητούν λύση ώστε να εδραιώσουν την SOI πλατφόρμα σαν την κυρίαρχη επιλογή πλατφόρμας φωτονικής ολοκλήρωσης. Οι εγγενείς αδυναμίες της τεχνολογίας είναι η υστέρηση του ηλεκτροοπτικού φαινομένου που χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ηλεκτρικών σημάτων σε οπτικά φέροντα και η αδυναμία υλοποίησης φωτοδιόδων στη φασματική περιοχή των $1.3\mu\text{m} - 1.6\mu\text{m}$ που έχει επιλεγεί για εφαρμογές σε telecom&datacom περιβάλλον. Στην ίδια γραμμή, δομική αδυναμία αποτελεί και η απουσία πηγής λέιζερ Si. Στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων πλατφόρμων που περιέχουν και πηγές αλλά και φωτοδιόδους, διάφορες λύσεις έχουν αναπτυχθεί όπως η ετερο-ολοκλήρωση (heterointegration) III-V ενεργών στοιχείων για πηγές με διάφορες τεχνικές αλλά και η ανάπτυξη φωτοδιόδων τεχνολογίας Si/Ge που είναι αρκετά διαδεδομένες λύσεις [2.24-2.26]. Υπάρχουν επιπλέον ανοιχτές τεχνολογικές προκλήσεις στην ανάπτυξη των φωτονικών κυκλωμάτων που βασίζονται σε SOI νανο-δομές. Αρχικά, η δυνατότητα των κυκλωμάτων να εμφανίζουν αναισθησία στην πολωτική κατάσταση του σήματος απαιτεί την ανάπτυξη διεπαφών ίνας-κυματοδηγού που δεν επηρεάζεται από την πόλωση του φωτός [2.27]. Από σκοπιά κατασκευής, η σταθεροποίηση των παραμέτρων που διέπουν τις τεχνικές οπτικής λιθογραφίας είναι αναγκαία καθώς οδηγεί στην ακρίβεια που απαιτεί η κατασκευή δομών με επιδόσεις συγκρίσιμες με αυτές που έχουν σχεδιαστεί [2.28].

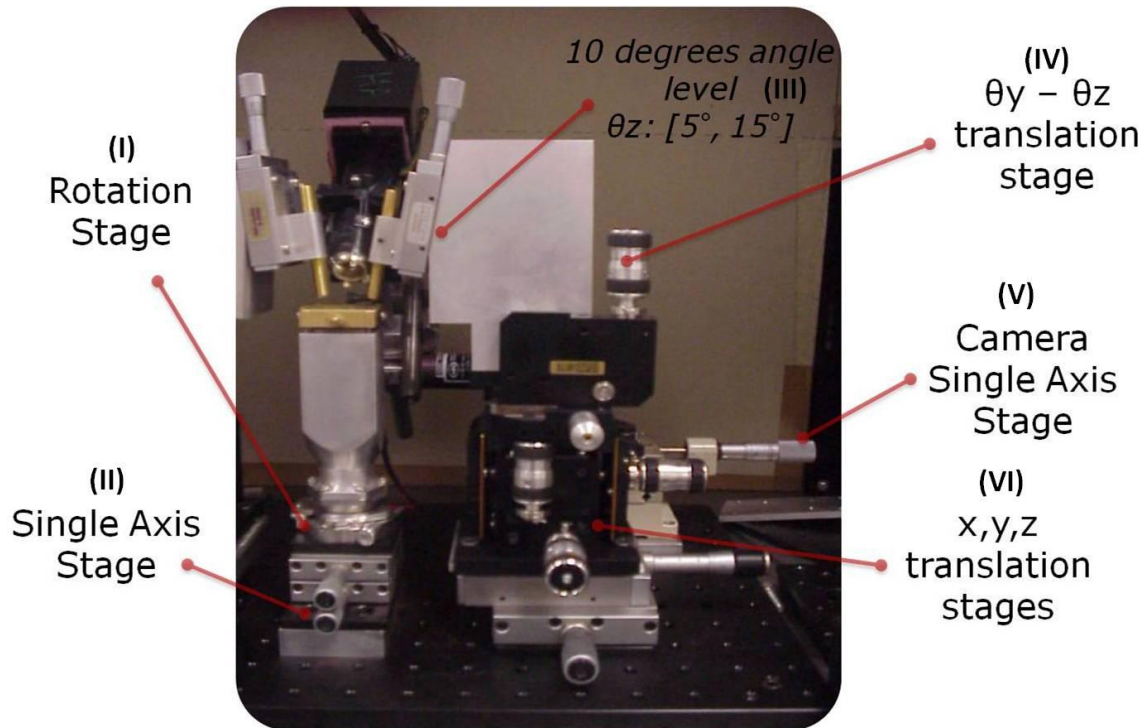
Το παρόν κεφάλαιο της διατριβής οργανώνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Στο πρώτο μέρος περιλαμβάνεται η λεπτομερής περιγραφή του σταθμού εργασίας (probe station) που εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) του ΕΜΠ και χρησιμοποιήθηκε στις για τις μετρήσεις πειραματικού χαρακτηρισμού. Με τη χρήση του σταθμού εργασίας για την κατακόρυφη διασύνδεση του τσιπ με τις υποδομές των οπτικών ινών ήταν εφικτή η διεξαγωγή μετρήσεων αξιολόγησης SOI νανο-κυματοδηγών (nanowaveguides), των Si συζευκτών περίθλασης (grating couplers) καθώς και των DLSPP κυκλωμάτων που εμφανίζονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Στην επόμενη ενότητα επιχειρείται η εισαγωγή στην περιοχή των SOI νανο-κυματοδηγών Rib-τύπου που

αναπτύχθηκε για την υλοποίηση των παθητικών δομών μεταφοράς δεδομένων πάνω στο τσιπ. Το βασικό πλαίσιο αρχών που διέπει τη λειτουργία των κυματοδηγών αλλά και μετρήσεις πειραματικού χαρακτήρισμού περιέχονται στην ενότητα αυτή. Το πρόβλημα της σύζευξης φωτός (coupling) της SOI πλατφόρμας διερευνάται στην επόμενη ενότητα και περιγράφεται η προσέγγιση που ακολουθήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής με τη χρήση συζευκτών φραγμάτων περίθλασης (Grating Couplers-GCs). Η συνοπτική θεωρία πίσω από το πρόβλημα της σύζευξης μέσω των φραγμάτων περίθλασης παρουσιάζεται και συνοδεύεται από την παρουσίαση του πλαισίου των σχεδιαστικών παραμέτρων και της κατασκευής για την τελική υλοποίηση ενός συζεύκτη περίθλασης. Στα πλαίσια της διατριβής αναπτύχθηκαν δύο φάσεις από συζεύκτες περίθλασης (GCs) που υποστηρίζουν τον TM (Transverse Magnetic- TM) πολωτικό ρυθμό με σκοπό να εφοδιάσουν την παθητική SOI πλατφόρμα. Η διαφορά τους εντοπίζεται στη χρήση ενός στρώματος SOG (Spin On Glass-SOG) στην κορυφή της δομής το οποίο μεταβάλλει αισθητά τις επιδόσεις τους. Για τις δύο διαφορετικές γενιές συζευκτών περίθλασης παρουσιάζονται οι μετρήσεις οπτικού χαρακτήρισμού που διεξήχθησαν εστιάζοντας στη γεωμετρία σύζευξης, στη φασματική συνάρτηση μεταφοράς τους, την επιλεκτικότητα ως προς την πολωτική κατάσταση των υπό σύζευξη σημάτων. Για τον προσδιορισμό των απωλειών σύζευξης (coupling loss) και απωλειών διάδοσης (propagation loss) υιοθετήθηκε η μέθοδος προσδιορισμού απωλειών μέσω τμημάτων κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback method). Τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν μέσω της συγκεκριμένης μεθόδου αξιοποιήθηκαν για να επιχειρηθεί μια λεπτομερής σύγκριση της απόδοσης των παθητικών δομών σύζευξης με άλλες πρωτότυπες δομές συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers) με χαμηλές απώλειες που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία.

2.1 Σταθμός Εργασίας (Probe Station) για το χαρακτηρισμό φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (PICs)

Η Εικόνα 1 παρουσιάζει το σταθμό εργασίας που έχει συναρμολογηθεί στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για τη διεξαγωγή μετρήσεων οπτικού χαρακτήρισμού ολοκληρωμένων δομών που απαιτούν την κατακόρυφη σύζευξη φωτός από και προς το υπό εξέταση τσιπ. Το υπό εξέταση τσιπ τοποθετείται σε μια κεντρική μεταλλική βάση υποδοχής η οποία έχει τη δυνατότητα μετατόπισης/στρέψης ως προς την αζιμουθιακή γωνία μέσω ενός μηχανισμού περιστροφής (τμήμα I). Επιπλέον, χρησιμοποιούνται δρομείς μειωμένης ακρίβειας (coarse tuning) οι οποίοι προσφέρουν τον κατάλληλο βαθμό ελευθερίας για τη μετατόπιση της μεταλλικής βάσης κατά τον y-άξονα (τμήμα II). Η επιλογή της κατακόρυφης γωνίας (θ_z) είναι εφικτή χρησιμοποιώντας μία κεκλιμένη μεταλλική επιφάνεια η οποία είναι τοποθετημένη στις $\theta_z=10^\circ$, τιμή αναφοράς για την κατακόρυφη γωνία (τμήμα III). Στην κεκλιμένη αυτή μεταλλική επιφάνεια τοποθετείται η οπτική ίνα συγκρατημένη σε μία μπρούτζινη θήκη (fiber holder) για να διασφαλιστεί η μέγιστη σταθερότητα. Ένα εύρος μεταβολής της τιμής $\Delta\theta_z=10^\circ$ δίνεται μέσω του

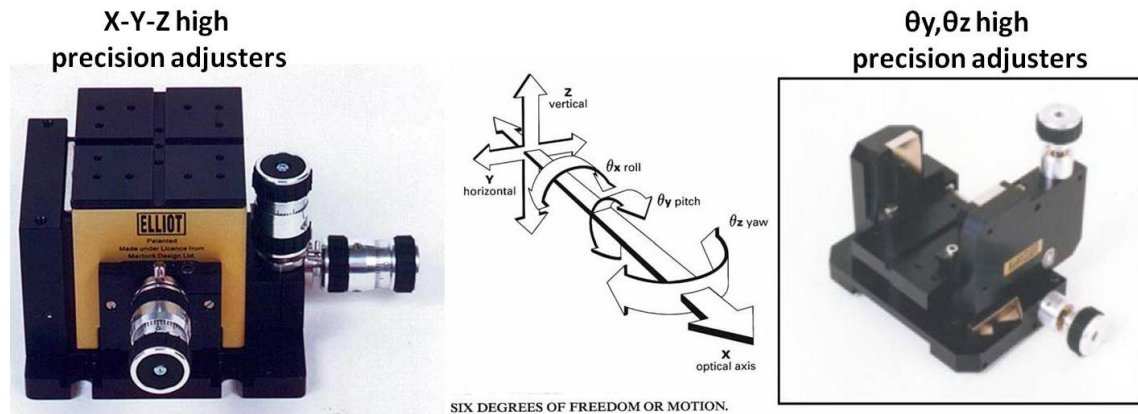
μηχανισμού μετατόπισης υψηλής ακρίβειας (τμήμα IV) ο οποίος περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα μαζί με τους άξονες που προσφέρουν κίνηση στους καρτεσιανούς άξονες XYZ (τμήμα VI).



Εικόνα 1: Άποψη του σταθμού εργασίας (probe station) που εγκαταστάθηκε στις υποδομές του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για τον οπτικό χαρακτηρισμό ολοκληρωμένων δομών για την περίπτωση της κατακόρυφης σύζευξης φωτός στο τσιπ. Η σχηματική περιγραφή εστιάζει στους μηχανισμούς αξιμουθιακής στρέψης (I), στον άξονα μετάδοσης κίνησης (II), στο διαθέσιμο εύρος για την επίτευξη κατακόρυφης γωνίας σύζευξης της δέσμης από 5° έως 15° (III), στον μικρο-μηχανισμό στρέψης που ορίζεται στους άξονες θ_y/θ_z (IV), στον άξονα μετάδοσης κίνησης για τη συσκευή της κάμερας (V) και οι μηχανισμοί μεταφοράς κίνησης υψηλής ευαισθησίας (micro-positioners) στους καρτεσιανούς (x,y,z) άξονες (VI).

Η Εικόνα 2 περιλαμβάνει μια εκτενή παρουσίαση των διατάξεων που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη της υψηλής ακρίβειας μετατόπισης σε σύστημα 6 βαθμών ελευθερίας (x,y,z, $\theta_x,\theta_y,\theta_z$) όπως αποτυπώνεται και στο σχήμα. Οι καρτεσιανές συντεταγμένες (x-y-z) διατρέχονται χρησιμοποιώντας έναν εμπορικά διαθέσιμο ρυθμιστή θέσης (positioner) ο οποίος προσφέρει ένα εύρος μετατόπισης 2mm σε κάθε άξονα ($\Delta x=\Delta y=\Delta z=2\text{mm}$). Η ανάλυση (resolution) της κίνησης σε κάθε άξονα μέσω της επιλογής υψηλής ακρίβειας (fine tuning) είναι 20nm ($d_x=d_y=d_z=20\text{nm}$) προσφέροντας υψηλής ακρίβειας προσαρμογή για την κατάλληλη θέση της ίνας στους άξονες ενδιαφέροντος. Περαιτέρω τεχνικές λεπτομέρειες μπορούν να αναζητηθούν για το συγκεκριμένο, εμπορικά διαθέσιμο ρυθμιστή κίνησης [2.29]. Ο σταθμός εργασίας που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο για το χαρακτηρισμό των ολοκληρωμένων δομών προσφέρει επίσης τη δυνατότητα γωνιακής μετατόπισης στην κατακόρυφη γωνία (θ_z) και στη γωνία θ_y . Το διαθέσιμο εύρος

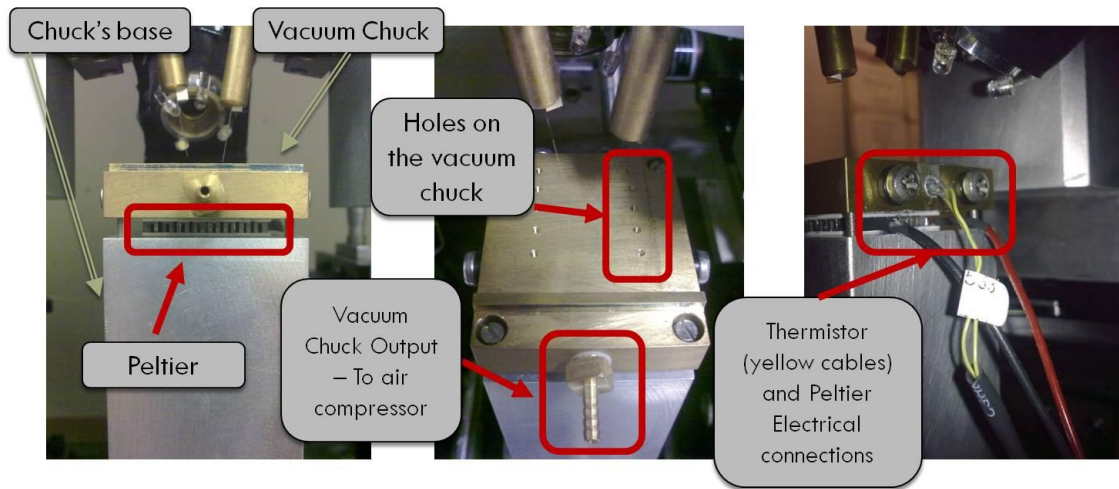
γωνιακής μετατόπισης είναι $\Delta\theta_z=10^\circ$ για τον κατακόρυφο άξονα και $\Delta\theta_y=6^\circ$ για την αζιμουθιακή γωνία μετατόπισης. Το στοιχειώδες διαθέσιμο βήμα αλλαγής ($d\theta$) στην επιλογή υψηλής ακρίβειας (fine tuning) και για τις δύο γωνιακές μετατοπίσεις είναι $d\theta < 0.1$ arc secs το οποίο με τη σειρά του διασφαλίζει την υψηλής ακρίβειας προσαρμογή της ίνας κατά τη διάρκεια σύζευξης φωτός μεταξύ ίνας και τσιπ. Περαιτέρω τεχνικές λεπτομέρειες για τους συγκεκριμένους ρυθμιστές γωνιακής μετατόπισης μπορούν να βρεθούν στις διαθέσιμες πληροφορίες από τον κατασκευαστή [2.30].



Εικόνα 2: Κοντινή εστίαση στους μικρο-ελεγκτές κίνησης (micro-positioners) που επιτρέπουν τον έλεγχο της κίνησης στους 6 διαθέσιμους άξονες της κίνησης. Ο πρώτος μηχανισμός εστιάζει στην υψηλής ακρίβειας μεταφορά κίνησης στους καρτεσιανούς άξονες (x,y,z) με βήμα $dx=dy=dz=20\text{nm}$ ενώ ο δεύτερος μηχανισμός διασφαλίζει τη μεταφορά κίνησης στις γωνιακές διευθύνσεις θ_y, θ_z με στοιχειώδες βήμα μετατόπισης $d\theta < 0.1$ arc secs.

Στην περίπτωση χαρακτηρισμού παθητικών ολοκληρωμένων στοιχείων, προτεραιότητα για την επιτυχή αξιολόγηση αποτελεί η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε μία τιμή αναφοράς ώστε να απομακρύνουμε την επίδραση της παραμέτρου της θερμοκρασίας στη διαδικασία της πειραματικής αξιολόγησης. Για το σκοπό αυτό, η μεταλλική βάση υποδοχής είναι εφοδιασμένη με ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier το οποίο χρησιμοποιείται για να ελέγχεται και να σταθεροποιείται η θερμοκρασία του ολοκληρωμένου κυκλώματος [2.31,2.32]. Τοποθετείται στο κάτω μέρος της βάσης υποδοχής (Εικόνα 3) και διασυνδέεται με θερμο-αγώγιμα υλικά ώστε να έχει γρήγορη απόκριση στη διόρθωση της θερμοκρασίας του τσιπ αλλά και να μπορεί να αυξήσει το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας (ΔT) σε περίπτωση του χαρακτηρισμού ενεργών στοιχείων που εκλύουν αξιοσημείωτα θερμικά φορτία [2.33]. Μια αντίσταση που η τιμή της μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία (Thermistor), χρησιμοποιείται για να απεικονιστεί η θερμοκρασία της επιφάνειας της βάσης υποδοχής και ως εκ τούτου το θερμοηλεκτρικό κύκλωμα να κάνει χρήση της απαραίτητης συνθήκης για τις θερμικές ροές (θέρμανση, ψύξη) που απαιτούνται [2.34]. Για τη σταθεροποίηση της υπό εξέταση δομής πάνω στη βάση υποδοχής χρησιμοποιείται μια διάταξη που δημιουργεί συνθήκες κενού αέρος μέσω της χρήσης ενός συμπιεστή αέρα. Ας σημειωθεί πως η πρόβλεψη αυτή είναι απαραίτητη επίσης για δομές που εφαρμόζονται ηλεκτρικά σήματα ελέγχου με κατάλληλες βελόνες

επαφής (probe tips) και οι δονήσεις που εμφανίζονται μπορεί να καταστρέψουν την επιφάνεια των ολοκληρωμένων δομών.



Εικόνα 3: Λεπτομερής καταγραφή βασικών χαρακτηριστικών του σταθμού εργασίας: (α) Θερμοηλεκτρικό στοιχείο, (β) Κενό αέρος μέσω της χρήσης συμπιεστή αέρα, (γ) Θερμίστορ για την καταγραφή της θερμοκρασίας της βάσης υποδοχής του chip.

2.2 Κυματοδηγοί SOI (Silicon-On-Insulator) τεχνολογίας

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά των κυματοδηγών SOI τεχνολογίας που θα εφοδιάσουν τις παθητικές λειτουργίες σε σύνθετες δομές Φωτονικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Photonic Integrated Circuits - PICs). Στον κόσμο των ηλεκτρονικών της Si τεχνολογίας, τα βασικά δομικά στοιχεία αποτελούν τα τρανζίστορ (transistor) και οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις (interconnects): Τα τρανζίστορ επιτελούν τις λογικές λειτουργίες (logic operations) ενώ οι παθητικές διασυνδέσεις είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των υπολογιστικών μονάδων που εκτελούν ακολουθίες λογικών πράξεων διασφαλίζοντας παράλληλα και την επικοινωνία με άλλες μονάδες επεξεργασίας και στοιχεία μνήμης. Όπως έχει παρουσιαστεί εκτενώς στο κεφάλαιο της εισαγωγής της διατριβής, ενώ οι επιδόσεις των τρανζίστορ αυξάνουν με σταθερό τρόπο προσφέροντας δομές με όλο και μικρότερο μέγεθος που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες, οι αντίστοιχες επιδόσεις των ηλεκτρικών διασυνδέσεων είναι φραγμένες από φυσικούς περιορισμούς χωρίς να μπορούν να βελτιωθούν ουσιαστικά με νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις [2.35]. Η υιοθέτηση της οπτικής τεχνολογίας μπορεί να αποτελέσει μια αξιόπιστη εναλλακτική στους περιορισμούς των ηλεκτρικών διασυνδέσεων καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν οπτικές διασυνδέσεις (optical interconnects) για να καλυφθεί η ανάγκη για διασυνδέσεις πάνω στο τσιπ (on-chip connections) και μεταξύ των τσιπ (chip-to-chip communication) [2.36].

2.2.1 Η επιλογή της τεχνολογίας SOI κυματοδηγών

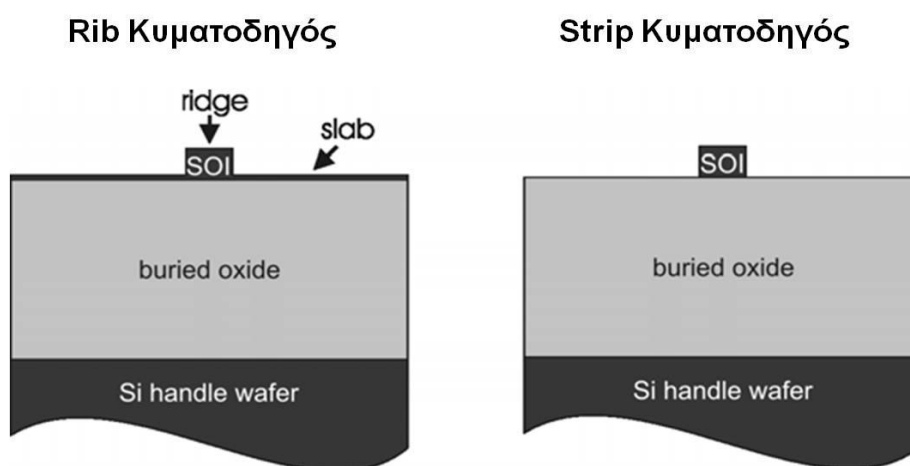
Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής υιοθετήθηκαν SOI (Silicon on Insulator-SOI) νανο-κυματοδηγοί για να φιλοξενήσουν παθητικές λειτουργίες που συνυπάρχουν μαζί με τις ενεργές λειτουργίες μεταγωγής που καλύπτονται από τις πλασμονικές διατάξεις που βασίζονται σε DLSPP κυματοδηγούς [2.37]. Καθώς συνυπάρχουν οι δύο διαφορετικές τεχνολογίες (ετερο-ολοκληρωμένες) στην ίδια πλατφόρμα ολοκλήρωσης οι παθητικοί SOI κυματοδηγοί πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες συμβατότητας μεταξύ των διαφορετικών δομών και υποσυστημάτων ώστε να επιτρέπεται η αδιάλειπτη διεπαφή μεταξύ των δύο τμημάτων και λειτουργικότητα υψηλής ποιότητας. Στο πλαίσιο αυτό οι απαιτήσεις για τους SOI κυματοδηγούς που θα συνυπάρχουν με τους πλασμονικούς DLSPP κυματοδηγούς προκύπτουν από τις παρακάτω συνθήκες:

α. Μονορυθμική λειτουργία (single-mode operation) για να διασφαλιστούν οι ελάχιστες δυνατές απώλειες ισχύος. Στην περίπτωση της πολυρυθμικής διάδοσης, η οπτική ισχύς που συζευγνύεται σε ρυθμούς ανώτερης τάξης χάνεται ουσιαστικά καθώς οι DLSPP κυματοδηγοί είναι ικανοί να υποστηρίξουν μόνο το θεμελιώδη TM_{00} ρυθμό.

β. Μονορυθμική λειτουργία για την υποστήριξη του TM-ρυθμού πόλωσης ώστε να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή μεταφορά ισχύος από την Si παθητική πλατφόρμα στους ενεργούς πλασμονικούς κυματοδηγούς.

γ. Διαστάσεις σε κλίμακα-nm ώστε να υπάρχει γεωμετρική προσαρμογή με τις διαστάσεις των DLSPP κυματοδηγών που όπως θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα έχουν διαστάσεις διηλεκτρικής φόρτισης $600 \times 500 \text{ nm}^2$ τοποθετημένο πάνω σε μεταλλικό φύλλο πάχους 65nm.

δ. Απαίτηση για τη συμβατότητα με την εναπόθεση ηλεκτρικών επαφών (electrical contact pads) που μπορεί να απαιτούνται για τη δυνατότητα ενεργής μετατόπισης λειτουργιών της Si πλατφόρμας όπως ο SOI πολυπλέκτης (SOI-MUX).



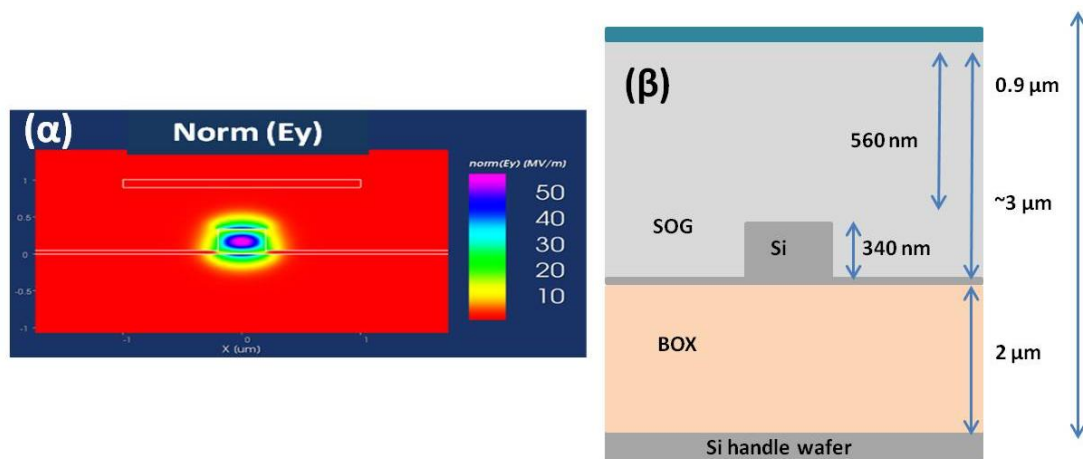
Εικόνα 4: Σχηματική αναπαράσταση των διαθέσιμων τύπων SOI νανο-κυματοδηγών που εστιάζει στις σχεδιαστικές απαιτήσεις και την επιλογή της γεωμετρίας για τους Rib-τύπου και Strip-τύπου κυματοδηγούς.

Η Εικόνα 4 παρουσιάζει τους δύο διαφορετικούς τύπους κυματοδηγών που διερευνήθηκαν σαν πιθανές γεωμετρίες SOI κυματοδηγών στα πλαίσια των αναγκών της παθητικής πλατφόρμας: τον κυματοδηγό Rib-τύπου και τον κυματοδηγό Strip-τύπου. Ενώ στην περίπτωση του strip κυματοδηγού, η λωρίδα του Si πυρήνα χαράσσεται έως την επιφάνεια του SiO₂ (BOX-buried oxide), οι Rib κυματοδηγοί χαρακτηρίζονται από ένα υπολειπόμενο στρώμα Si (slab) πάχους 50nm. Η γεωμετρία αυτή υιοθετήθηκε και μελετήθηκε πειραματικά στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Με βάση τα κριτήρια που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, οι SOI νανο-κυματοδηγοί Rib-τύπου είναι η προτιμητέα επιλογή για την ανάπτυξη της ετερο-ολοκληρωμένης πλατφόρμας μεταγωγής καθώς προσφέρουν ένα συγκριτικό πλεονέκτημα από σκοπιά τεχνολογίας ετερο-ολοκλήρωσης το οποίο δεν μπορεί να ικανοποιηθεί με τη χρήση των strip SOI κυματοδηγών. Η ολοκλήρωση των δομών πολυπλεξίας (SOI MUX) απαιτεί τη χρήση κάποιων θερμο-οπτικών δομών ελέγχου που υλοποιούνται μέσα από τη χρήση μεταλλικών ηλεκτρικών επαφών (electrical contact pads) και μεταλλικών καλωδίων για την έγχυση ρεύματος [2.38,2.39]. Από σκοπιά κατασκευής, η απαίτηση αυτή μεταφράζεται στην παρουσία ενός στρώματος διηλεκτρικού το οποίο θα απομακρύνει το μεταλλικό καλώδιο από τον πυρήνα του SOI κυματοδηγού σε απόσταση τέτοια που να μην εισάγονται ανεπιθύμητες απώλειες από το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης του μετάλλου [2.40]. Κατά την ετερο-ολοκλήρωση των παθητικών SOI δομών με τις ενεργές DLSPP δομές, απαιτείται η εγχάραξη μιας κοιλότητας αυτού του στρώματος διηλεκτρικού που είναι ικανή να διασφαλίσει την κατάλληλη ευθυγράμμιση (alignment) των DLSPP κυματοδηγών στο σημείο Si-to-DLSPP διεπαφής. Καθώς απαιτείται λοιπόν η ελεγχόμενη εγχάραξη σε συγκεκριμένο βάθος της δομής, η παρουσία ενός στρώματος Si (slab layer) διασφαλίζει τον ελεγχόμενο τρόπο της διαδικασίας απλοποιώντας σημαντικά την απαιτούμενη διαδικασία εναπόθεσης με τη χάραξη του διηλεκτρικού. Η εναλλακτική λύση με τη χρήση SOI κυματοδηγών strip-τύπου θα απαιτούσε τη χρήση ενός στρώματος που θα όριζε το τέλος της εγχάραξης βάθους (etch stop) της δομής αυξάνοντας δραματικά την πολυπλοκότητα και συνεπώς το κόστος της κατασκευής.

2.2.2 Η σχεδίαση και η ανάπτυξη των SOI κυματοδηγών Rib-τύπου

Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τη δομή του SOI κυματοδηγού Rib-τύπου που σχεδιάστηκε για να καλύψει τις ανάγκες της SOI παθητικής πλατφόρμας. Το μέγεθος του Si πυρήνα κυματοδηγού επιλέχθηκε να είναι 400x340nm² ενώ το πάχος της υπολειπόμενης λωρίδας του Si (slab) πάνω από το στρώμα του SiO₂ επιλέχθηκε να είναι 50nm. Το πάχος του στρώματος BOX (buried oxide) επιλέχθηκε να είναι 2μm. Ο εγκλωβισμός του ρυθμού στον πυρήνα του κυματοδηγού φαίνεται να είναι αρκετά ισχυρός όπως φανερώνεται και στην περίπτωση του πεδιακού ρυθμού (E_y) στην Εικόνα 5(α) με το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος να κυματοδηγείται στο εσωτερικό του Si πυρήνα με πολύ μικρές τιμές της οπτικής ισχύος να διαρρέουν στο υπόβαθρο (BOX). Οι μετρήσεις απωλειών διάδοσης που ακολουθούν θα προσφέρουν μια λεπτομερή καταγραφή του βαθμού εγκλωβισμού κατά τη διάδοση των

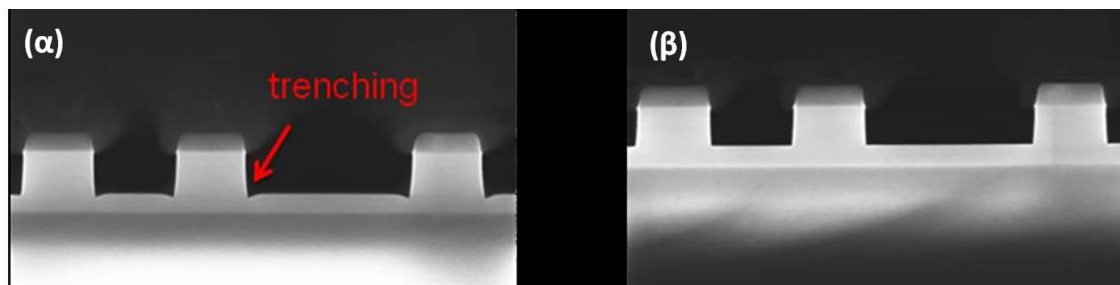
ρυθμών. Αξίζει να σημειωθεί πως κρίσιμη παράμετρος θεωρείται η απόσταση (d) που χωρίζει το άνω τμήμα του Si κυματοδηγού με το μεταλλικό στρώμα που προορίζεται να παίζει το ρόλο του θερμο-οπτικού μηχανισμού μικρο-προσαρμογής στις διατάξεις που απαιτείται αυτός ο έλεγχος (SOI MUX). Για την αποφυγή των απωλειών από το μεταλλικό στρώμα στην περίπτωση χρήσης διατάξεων θέρμανσης (heaters) επιλέγεται ικανή απόσταση (d) ίση με 560nm ανάμεσα στην κορυφή του Si κυματοδηγού και στο μεταλλικό φύλλο TiN/Ti που διασφαλίζει την κυματοδηγήση χωρίς απώλειες από το φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης του μετάλλου.



Εικόνα 5:(α) Αποτέλεσμα προσομοίωσης του μέτρου της πεδιακής έντασης του ηλεκτρικού πεδίου $abs(E_y)$ για την επιλογή των παραμέτρων του SOI νανο-κυματοδηγού Rib-τύπου που επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής. (β) Σχηματική αναπαράσταση για την επιλογή της δομής του SOI Rib-τύπου κυματοδηγού όπως σχεδιάστηκε από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Βερολίνου (Technical University of Berlin-TUB) στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας για την ανάπτυξη παθητικής SOI πλατφόρμας υψηλής επίδοσης.

Οι SOI κυματοδηγοί τύπου- Rib αποτελούνται από μια γεωμετρία κυματοδηγού με Si πυρήνα πάνω από ένα λεπτό στρώμα Si (slab) το οποίο καλύπτει το στρώμα του SiO₂ (buried oxide). Οι δομές των SOI Rib-τύπου κυματοδηγών κατασκευάστηκαν στις εγκαταστάσεις της AMO που βρίσκεται στο Άαχεν της Γερμανίας (AMO GmbH) και εξειδικεύεται στη νανο-κατασκευή SOI κυματοδηγών χρησιμοποιώντας τεχνικές που προσφέρουν υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό των κρίσιμων γεωμετρικών παραμέτρων των νανο-δομών. Η μέθοδος της λιθογραφίας με ηλεκτρονική δέσμη (Electron Beam Lithography - EBL) ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη των παθητικών SOI Rib κυματοδηγών. Η EBL μέθοδος προσφέρει υψηλές τιμές ακρίβειας στις κρίσιμες διαστάσεις (Critical Dimensions-CDs), χαμηλή τραχύτητα στα τοιχώματα (low sidewall roughness) του κυματοδηγού και ελκυστική συμπεριφορά ως προς την αναπαραγωγή της μεθόδου από τσιπ σε τσιπ [2.41,2.42] για την ομοιογένεια της κατασκευής. Τα ελκυστικά αυτά χαρακτηριστικά της μεθόδου ήταν εφικτά κατά την ανάπτυξη των κυματοδηγών Rib-τύπου παρά τις εγγενείς προκλήσεις στη διαδικασία κατασκευής που θέτει η απαίτηση για τον ορισμό ενός Si λεπτού φύλλου (slab) στη δομή του κυματοδηγού [2.43]. Για να συμβεί

αυτό, υιοθετήθηκαν τεχνικές βελτίωσης που έχουν επιδειχθεί στη βιβλιογραφία [2.44], προσφέρουν βελτίωση στα μετρικά επίδοσης της κατασκευής των νανο-κυματοδηγών (nano-waveguides).



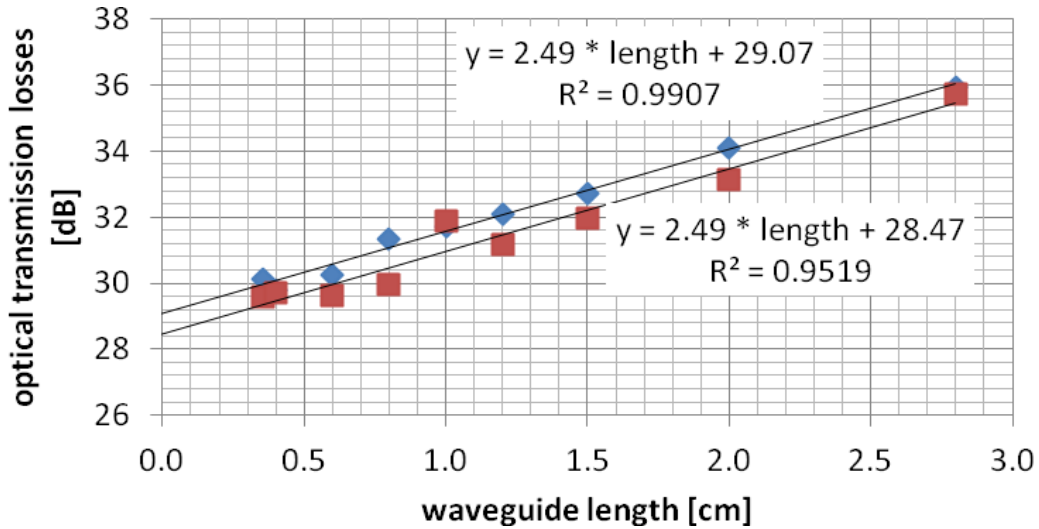
Εικόνα 6: Η κατασκευή των SOI νανο-κυματοδηγών ακολουθώντας δύο διαφορετικές τεχνικές στις εγκαταστάσεις της AMO (AMO GmbH) με σκοπό να καταπιεστεί το φαινόμενο της εκσκαφής (trenching effect) που εμφανίζεται στις ακμές του κυματοδηγού. Η τεχνική βελτίωσης που υιοθετήθηκε βελτίωσε την επίδοση ως προς το φαινόμενο του trenching όπως φανερώνουν οι εικόνες του SEM μικροσκοπίου.

Ως ένα παράδειγμα της βελτίωσης τεχνικών για την κατασκευή των SOI Rib-τύπου κυματοδηγών, εισάγεται η Εικόνα 6 με σκοπό να αναδείξει τη βελτίωση της διαδικασίας κατασκευής μετά την τροποποίηση της RIE (Reactive Ion Etching) μεθόδου εγχάραξης. Πιο συγκεκριμένα, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της πίεσης του αερίου (gas pressure) και της ισχύος του πλάσματος (plasma power) ήταν εφικτό να βελτιωθεί η κατασκευή των SOI Rib κυματοδηγών καταπιέζοντας κατάλληλα το φαινόμενο εκσκαφής (trenching effect) το οποίο εμφανίζεται κυρίως στις άκρες των δομών των κυματοδηγών [2.45].

2.2.3 Απώλειες διάδοσης των SOI κυματοδηγών Rib τύπου

Το πρώτο βήμα αξιολόγησης των SOI νανο-κυματοδηγών Rib-τύπου περιλαμβάνει τη μέτρηση των απωλειών διάδοσης αξιοποιώντας τη μέθοδο της χρήσης δειγμάτων κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback method) [2.46]. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις της AMO και περιλαμβάνουν τις μετρήσεις οπτικής απώλειας για SOI κυματοδηγούς Rib-τύπου με εγκάρσια τομή διαστάσεων $400 \times 340 \text{ nm}^2$ με πάχος του Si υπολοίπου στρώματος ίσο με 50nm. Τα μήκη των κυματοδηγών που αξιολογήθηκαν εκτείνονται από $L_1=0.3\text{cm}$ έως $L_2=2.8\text{cm}$ οι οποίοι και εφοδιάστηκαν με συζεύκτες περίθλασης (Grating Couplers-GCs) για να είναι εφικτή η σύζευξη φωτός από τις ίνες εισόδου/εξόδου της μετρητικής διάταξης. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συζεύκτες περίθλασης που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν για τη συγκεκριμένη φάση των μετρήσεων δεν βελτιστοποιήθηκαν ως προς την επίδοση τους (coupling loss) καθώς σκοπός παρέμενε μόνο να μετρηθεί η κλίση της οπτικής απώλειας που αντιστοιχεί στις απώλειες διάδοσης (propagation loss) και όχι ο σταθερός όρος της καμπύλης που αντιστοιχεί στις απώλειες σύζευξης. Διατηρώντας σταθερή τη διάταξη της σύζευξης φωτός

από/προς το τσιπ, είναι εφικτή η διατήρηση σταθερού όρου στη γραμμική συσχέτιση με σκοπό να εξαχθεί ο γραμμικός όρος των απωλειών διάδοσης.



Εικόνα 7: Μετρήσεις απωλειών στους $400 \times 340 \text{ nm}^2$ SOI νανο-κυματοδηγούς Rib-τύπου που κατασκευάστηκαν και αξιολογήθηκαν στις εγκαταστάσεις της AMO στη Γερμανία. Χρησιμοποιήθηκαν δομές συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers) οι οποίοι δεν βελτιστοποιήθηκαν ως προς την απόδοση τους (coupling loss) καθώς ο σκοπός της μέτρησης ήταν η αξιολόγηση της επίδοσης των SOI κυματοδηγών που μετρήθηκαν να έχουν απώλειες διάδοσης στα 2.49 dB/cm .

Σχετικά με το υπόβαθρο των απωλειών διάδοσης στον κυματοδηγό, ένα απλό αναλυτικό μοντέλο που έχει προταθεί στη βιβλιογραφία δίνει τις απώλειες από τον παρακάτω τύπο [2.47]:

$$a = \frac{4\sigma^2 \cdot h^2}{\beta \cdot (r + \frac{2}{p})} = \frac{\sigma^2 \cdot k_o^2 \cdot h}{\beta} \cdot \frac{E_s^2}{\int E^2 dx} \cdot \Delta n^2 \quad (2.1)$$

όπου σ είναι η τραχύτητα των τοιχωμάτων (interface roughness), t είναι το πάχος του κυματοδηγού (waveguide thickness), k_o είναι ο κυματαριθμός στον ελεύθερο χώρο, β είναι η σταθερά διάδοσης του ρυθμού, Δn είναι η διαφορά των δεικτών διάθλασης του πυρήνα και του περιβλήματος (core και περίβλημα) ενώ h και p είναι οι εγκάρσιες σταθερές διάδοσης στον πυρήνα και περίβλημα αντίστοιχα. Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές πως οι απώλειες διάδοσης κατηγοριοποιούνται σε δύο κατηγορίες: αυτές που σχετίζονται με την τραχύτητα των παθητικών δομών κυματοδηγών και περιγράφεται αναλυτικά από το τετράγωνο της τιμής σ^2 και από τον εγκλωβισμό της πεδιακής κατανομής στον πυρήνα του κυματοδηγού και εξαρτάται από τον τύπο $E_s^2 / \int E^2 dx$. Η τυπική απόκλιση (σ) της τραχύτητας του κυματοδηγού ορίζεται από τις μεταβολές της γεωμετρίας των τοιχωμάτων του κυματοδηγού (λόγω ατελειών κατασκευής, οξειδώσεων κατά την επεξεργασία) και μετριέται μέσω συγκεκριμένων μετρικών που λαμβάνονται μέσω της χρήσης του

ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) και συμπεριλαμβάνει τη μεθοδολογία από μοντέλα που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία [2.48,2.49]. Είναι εμφανές από τα παραπάνω πως η ποιότητα κατασκευής μέσω της μεθόδου που ακολουθείται από την ΑΜΟ επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή απωλειών διάδοσης του κυματοδηγού και για το λόγο αυτό δίδεται ιδιαίτερη φροντίδα στον εμπλουτισμό της τεχνικής.

Η γραμμική προσαρμογή των απωλειών διάδοσης που μετρήθηκαν στις ολοκληρωμένες δομές των κυματοδηγών υποδεικνύουν απώλειες διάδοσης γύρω από την τιμή των 2.5dB/cm. Η σύγκριση της μέτρησης αυτής με άλλες βιβλιογραφικές αναφορές δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη καθώς η υποστήριξη του TM πολωτικού ρυθμού διάδοσης από κυματοδηγό Rib-τύπου δεν εμφανίζεται με μεγάλη συχνότητα στη βιβλιογραφία λόγω των εγγενών υψηλότερων απωλειών που αναμένονται για αυτόν τον τύπο των κυματοδηγών. Ωστόσο, μια δίκαιη σύγκριση θα μπορούσε να λάβει χώρα με δημοσιευμένα αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη πως το αρκετά λεπτό στρώμα Si κυματοδηγού (thin slab) στη βάση του Rib κυματοδηγού καθιστά την παθητική δομή του κυματοδηγού να προσεγγίζει τον τύπο των strip SOI κυματοδηγών. Τέτοιοι κυματοδηγοί (τύπου-strip) με γεωμετρία εγκάρσια τομής διαστάσεων $445 \times 220 \text{ nm}^2$ επιδεικνύουν απώλειες διάδοσης της τάξης των 3.6dB/cm [2.50], υστερώντας συγκριτικά με την επίδοση των δομών που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή.

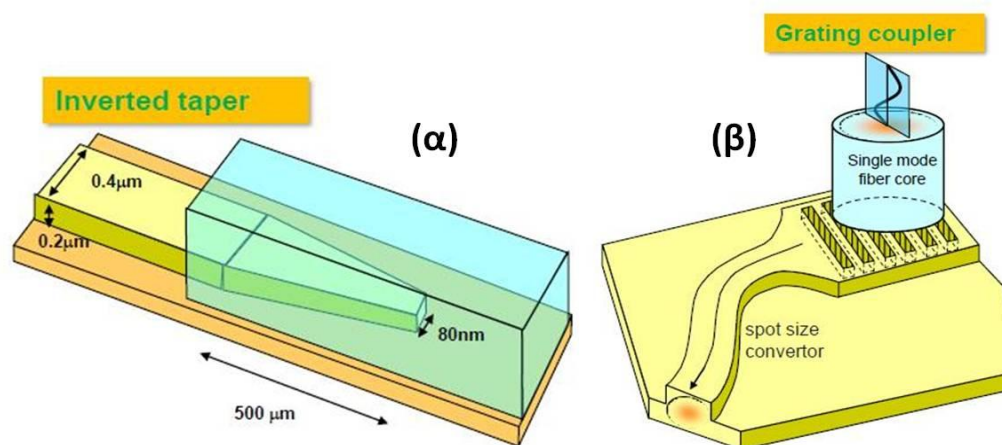
2.3 Η σύζευξη φωτός μεταξύ της ίνας και της παθητικής πλατφόρμας των SOI κυματοδηγών τύπου-Rib

Στην ενότητα αυτή εισάγεται το πρόβλημα της σύζευξης φωτός μεταξύ της ίνας και της παθητικής SOI πλατφόρμας Rib-τύπου κυματοδηγών. Η επικοινωνία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με τον «έξω κόσμο» είναι αναγκαία προϋπόθεση τόσο για την πειραματική αξιολόγηση των πρωτότυπων δομών όσο και κατά τη διαδικασία (packaging) στην οποία δημιουργείται η διεπαφή του ολοκληρωμένου κυκλώματος με σκοπό να συνδεθεί με τις υπάρχουσες υποδομές ινών [2.51]. Στο πρώτο μέρος καταγράφεται συνοπτικά η προσέγγιση που ακολουθείται για την επίτευξη του παραπάνω στόχου εστιάζοντας στις δύο βασικές τεχνικές: της δομής του αντίστροφου κώνου σύζευξης (Inverted taper) και της δομής των συζευκτών περίθλασης (Grating Coupler). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το βασικό θεωρητικό πλαίσιο αρχών που διέπουν το πρόβλημα της σύζευξης φωτός μέσω της χρήσης συζευκτών περίθλασης με σκοπό να αναδειχθούν οι σχεδιαστικές παράμετροι και η κατασκευή των δομών περίθλασης στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

2.3.1 Το πρόβλημα της σύζευξης φωτός από/προς το οπτικό τσιπ

Η Εικόνα 8 παρουσιάζει τις δύο βασικές δομές για τη σύζευξη του φωτός σε παθητικές νανο-δομές SOI κυματοδηγών: (α) τη δομή του αντίστροφου κώνου σύζευξης (Inverted taper) για την οριζόντια διασύνδεση και (β) τις δομές συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers) για την περίπτωση της κατακόρυφης διασύνδεσης. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται

για τις σύζευξη οπτικής ισχύος από ίνα σε κυματοδηγό μετασχηματίζοντας βαθμιαία έναν ισχυρά περιορισμένο ρυθμό που βρίσκεται σε ένα nm-κλίμακας SOI κυματοδηγό σε έναν απλωμένο ρυθμό που υποστηρίζεται από έναν χαμηλής αντίθεσης κυματοαγωγό, όπως η περίπτωση της μονότροπης οπτικής ίνας [2.17,2.18]. Οι δομές των συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers) χρησιμοποιούν δομές αποτελούμενες από φράγματα περίθλασης Bragg για να επιτευχθεί η σύζευξη φωτός από ίνα που βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση. Η αναλυτική παρουσίαση των αρχών που διέπουν τη λειτουργία αυτών των δομών σύζευξης παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Στη συνέχεια, περιλαμβάνονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο προσεγγίσεων εστιάζοντας στις βασικές τους επιδόσεις για χρήση ως συζεύκτες ισχύος.



Εικόνα 8: Σχηματική αναπαράσταση των δύο βασικών δομών που επιτρέπουν τη σύζευξη φωτός μεταξύ της οπτικής ίνας και των SOI νανο-κυματοδηγών: (α) Οι αντίστροφες κωνικές δομές σύζευξης (inverted taper) υιοθετούνται στην περίπτωση της οριζόντιας σύζευξης φωτός (horizontal coupling) και (β) οι δομές των συζευκτών περίθλασης (grating couplers) που ακολουθούνται από ένα μετατροπέα μεγέθους ρυθμού υιοθετούνται στην περίπτωση της κατακόρυφης σύζευξης φωτός (vertical coupling).

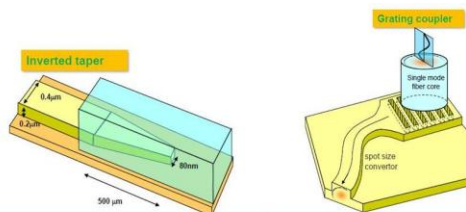
Ο Πίνακας 1 περιέχει τα βασικά μετρικά επίδοσης των δύο προσεγγίσεων για τη σύζευξη του φωτός σε SOI νανο-κυματοδηγούς. Συγκρίνοντας τη βέλτιστη απόδοση σύζευξης (ελάχιστες απώλειες σύζευξης), οι οριζόντιες τεχνικές προσφέρουν συγκρίσιμες επιδόσεις μαζί με τις κάθετες. Απώλειες μικρότερες του 1-dB έχουν επιδειχθεί από πρωτότυπες (novel) δομές και των δύο κατηγοριών οι οποίες υποστηρίζουν και τις δύο πολωτικές καταστάσεις (TE,TM) [2.52,2.53]. Ωστόσο, σε δομές σύζευξης (grating couplers) που εφοδιάζουν δομές για πρακτικές εφαρμογές εμφανίζονται απώλειες που εκτείνονται από 3dB έως 7dB.

Συγκρίνοντας την απόδοση των προτεινόμενων τεχνικών ως προς το προσφερόμενο εύρος ζώνης λειτουργίας (bandwidth), οι οριζόντιες δομές υπερτερούν των κατακόρυφων δομών καθώς προσφέρουν εύρος ζώνης μεγαλύτερο από $\Delta\lambda_{3dB}=100$ nm, ενώ αντίθετα οι συζεύκτες περίθλασης έχουν τυπικές τιμές της ίδιας παραμέτρου κοντά στα $\Delta\lambda_{1dB}=35$ nm για το αντίστοιχο φασματικό εύρος στο 1-dB παράθυρο.

Στην περίπτωση των οριζόντιων δομών σύζευξης (Inverted tapers), η επιλογή της χαμηλής ανακλαστικότητας των επιπέδων σύζευξης (facets), αποτελεί κρίσιμη παράμετρο καθώς περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση των πιθανών ανακλάσεων που μπορεί να εισάγουν. Για το λόγο αυτό, η επίστρωση της επιφάνειας του κυματοδηγού με ένα στρώμα αντι-ανακλαστικής επιφάνειας (Anti-Reflection Coating, AR coating) είναι υψηλής προτεραιότητας για το συγκεκριμένο τύπο συζεύκτη. Οι αντίστοιχες ανακλάσεις στην περίπτωση των συζευκτών περίθλασης (grating couplers) εμφανίζονται 20dB κάτω από την ισχύ του εισερχόμενου σήματος λόγω του φυσικού μηχανισμού που διέπει το φράγμα περίθλασης Bragg (Bragg Gratings). Η κρίσιμη παράμετρος κατά το σχεδιασμό των δομών περίθλασης αποτελεί η επιλογή του κατάλληλου βάθος χάραξης (etching depth) όπως θα παρουσιαστεί αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Ως προς τη διαδικασία του χαρακτηρισμού της απόδοσης των συγκεκριμένων δομών σε μορφή δομών που φιλοξενούνται σε δισκία (wafers), οι δομές συζευκτών περίθλασης υπερτερούν των οριζόντιων δομών προσφέροντας γρήγορη αξιολόγηση, υψηλής αξιοπιστίας που συνήθως απαιτείται κατά τη διαδικασία ανάπτυξης των δομών. Απεναντίας, η αξιολόγηση των οριζόντιων δομών απαιτεί πολύπλοκες διαδικασίες προετοιμασίας των δομών καθώς απαιτείται ο καθαρισμός της επιφάνειας (Polishing), τη διαδικασία της κοπής σε κατάλληλα δείγματα (Dicing) που συνεπάγονται επιπλέον κόστη αυξάνοντας συγχρόνως και τον απαιτούμενο χρόνο χαρακτηρισμού [2.54].

Τέλος, οι συζεύκτες περίθλασης επίσης μειονεκτούν στη μη δυνατότητα τους να λειτουργούν με την ίδια απόδοση σύζευξης και για τις δύο πολωτικές καταστάσεις, εμφανίζοντας έτσι όπως παρουσιάσαμε και στη θεωρία επιλεκτικότητα στην πόλωση του εισερχόμενου σήματος. Λύσεις που έχουν προταθεί για να βελτιώσουν το χαρακτηριστικό αυτό προβλέπουν την υιοθέτηση 2-D δομών συζευκτών περίθλασης που παρέχουν την ιδιότητα για διαχωρισμό των τρόπων πόλωσης [2.55] και συνολικά μια διάφανη δομή στην πόλωση των οπτικών σημάτων. Στον αντίποδα, η ευαισθησία της οριζόντιας τεχνικής στην πόλωση φωτός είναι αρκετά μικρή.



Ιδιότητα	Ανεστραμμένη Κωνική Δομή (Inverted Taper)	Συζεύκτες Περίθλασης (Grating Couplers)
Απώλειες (βέλτιστες) (dB)	<1dB	<1dB
Απώλειες πραγματικού κόσμου (dB)	3dB-7dB	3dB-7dB
Εύρος ζώνης λειτουργίας	> 100nm	35nm (1dB)
Ανεκτό όριο απώλειας ευθυγράμμισης	1μm (1dB)	2.5μm (1dB)
Ανακλάσεις των επιπέδων	Χαμηλές	-20dB
Αξιολόγηση σε κλίμακα wafer	Όχι	Ναι
Κρίσιμη παράμετρος κατασκευής	AR επίστρωση στο επίπεδο της δομής	Έλεγχος του βάθους χάραξης
Πόλωση	Αναίσθητοι	Επιλεκτικότητα στην πόλωση φωτός

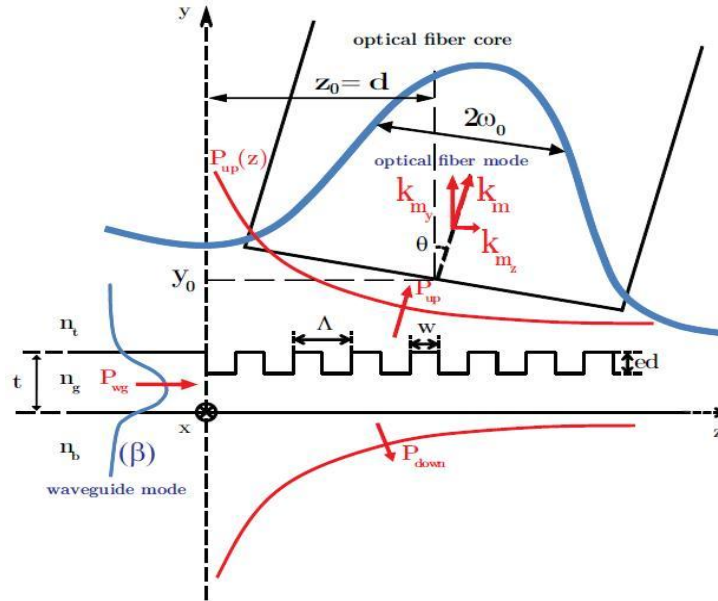
Πίνακας 1: Αναλυτική παρουσίαση των βασικών μετρικών επίδοσης και σύγκριση των δομών οριζόντιας και κατακόρυφης σύζευξης φωτός σε SOI νανο-κυματοδηγούς.

2.3.2 Το θεωρητικό πλαίσιο που διέπει το πρόβλημα της σύζευξης με χρήση συζευκτών περίθλασης

Η ενότητα αυτή επιχειρεί να προσφέρει μια αναλυτική περιγραφή στη θεωρία που διέπει το πρόβλημα της σύζευξης φωτός με χρήση φραγμάτων περίθλασης επιτρέποντας την υλοποίηση κάθετων δομών σύζευξης του οπτικού σήματος από την ίνα στο τσιπ. Στην εισαγωγή της ενότητας αυτής θα παρουσιαστούν οι βασικές αρχές που διέπουν τη σύζευξη οπτικής ισχύος μέσω της χρήσης ενός περιοδικού φράγματος περίθλασης. Αναφορές που προσφέρουν περαιτέρω εμβάθυνση στο θεωρητικό υπόβαθρο των φραγμάτων περίθλασης μπορούν να αναζητηθούν από τον αναγνώστη στη βιβλιογραφία [2.56-2.60]. Από τις αρχές του '80 τα φράγματα κυματοδηγών έπαιζαν ένα σπουδαίο ρόλο σε δομές ολοκληρωμένης οπτικής καλύπτοντας μεγάλο εύρος εφαρμογών [2.61-2.63]. Ενδεικτικές περιοχές εφαρμογών αποτελούν τα φίλτρα ίνας με τυπωμένα φράγματα περίθλασης (Fiber Bragg Grating – FBG Filters), δομές laser DFB [2.64] και DBR [2.65], ενώ οι συζεύκτες περίθλασης που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία ολοκληρωμένων κυματοδηγών με ίνες εντάσσονται στα πλαίσια της εφαρμογής της παρούσας διατριβής.

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε το πρόβλημα της σύζευξης φωτός από μια δομή 1D φράγματος περίθλασης σε μία ίνα σε σχεδόν κάθετη γωνία (θ) λόγω της 1^{ης} τάξης περίθλασης. Η δομή αποτελείται από τετραγωνικής μορφής αυλακώσεις (corrugations) οι οποίες χαρακτηρίζονται από περίοδο (Λ) και βάθος αυλακώσεων (etching depth) ed και είναι κατασκευασμένες στο πάνω μέρος του κυματοδηγού. Η δομή αναφέρεται ως δομή

μίας διάστασης (1D) καθώς οι αυλακώσεις έχουν υλοποιηθεί κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κυματοδηγού (άξονας z σύμφωνα με την Εικόνα 9). Εστιάζουμε στην παρούσα εργασία μόνο στις 1D δομές οι οποίες αναφέρονται στη βιβλιογραφία και ως αυλακωτοί κυματοδηγοί (corrugated waveguides). Ο κυματοδηγός έχει έναν πυρήνα (n_g) πάχους t και περικλείεται από πάνω (n_t) και κάτω (n_b) περίβλημα. Γενικά μπορούμε να έχουμε επιπλέον επιφάνειες διηλεκτρικών υλικών στην περίπτωση που επιλέξουμε εναλλακτικές τεχνολογίες κυματοδηγών.



Εικόνα 9: Γραφική αναπαράσταση του προβλήματος σύζευξης φωτός μεταξύ δομής 1D grating coupler με μία επιτρεπόμενη τάξη περίθλασης από/προς μονορυθμική οπτική ίνα.

Θεωρώντας τη δομή του φράγματος περίθλασης ως συζεύκτη εξόδου (εικόνα 7), όταν αυτή διεγείρεται από τον οπτικό ρυθμό του κυματοδηγού (ισχύος P_{wg}), ένα τμήμα φωτός περιθλάται προς το πάνω μέρος (P_{up}) και μια άλλη ποσότητα περιθλάται προς τα κάτω (P_{down}) σε μια γωνία περίθλασης θ . Οι κατευθύνσεις των δεσμών αυτών προκύπτουν από την πρώτη τάξη περίθλασης με $m = +1$ και $m = -1$ αντίστοιχα. Καθώς θεωρούμε πως δεν υπάρχει ανατροφοδότηση των δεσμών περίθλασης πίσω στη δομή του συζεύκτη, το τμήμα της κυματοδηγούμενης ισχύος που επανεκπέμπεται από κάθε αυλάκωση απομακρύνεται από τη δομή και ο ρυθμός φθάνει στην επόμενη αυλάκωση με μειωμένο πλάτος. Θεωρώντας μια μικρή μεταβολή του πλάτους του ρυθμού κατά μήκος της αυλάκωσης, το πλάτος του περιθλώμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (E, H) με κατεύθυνση την οπτική ίνα ($a(z)$) μπορεί να περιγραφεί από τη γνωστή διαφορική εξίσωση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\frac{da(z)}{a(z)} = -\alpha \cdot a(z) \quad (2.2)$$

όπου a είναι ο παράγοντας απωλειών της δομής, και εξαρτάται κυρίως από τις φυσικές παραμέτρους της δομής. Η επίλυση της πιο πάνω διαφορικής εξίσωσης μας οδηγεί στην εκθετική λύση:

$$a(z) = a(z=0) \cdot e^{-\alpha \cdot z} \quad (2.3)$$

Η εκθετικά εξασθενούμενη πεδιακή έκφραση οδηγεί στον υπολογισμό της συνολικής ισχύος που περιθλάται στην επιθυμητή κατεύθυνση. Θεωρώντας πως δεν υπάρχει σύζευξη μεταξύ του προωθούμενου και του ανακλώμενου ρυθμού, η συνολική ισχύς υπολογίζεται:

$$P_{up}(z) = P_{wg}(z=0) \cdot e^{-2\alpha \cdot z} \quad (2.4)$$

όπου ο παράγοντας 2α καλείται ως ικανότητα σύζευξης ή εναλλακτικά παράγοντας διαρροής από τη δομή του συζεύκτη. Ο τύπος υπολογισμού ισχύος (2.3) είναι ενεργός μόνο για δομές με μικρές τιμές παράγοντα απωλειών. Το μήκος σύζευξης υπολογίζεται ως $L_c = 1/2\alpha$ και σχετίζεται με την πεδιακή κατανομή της ίνας με τη σχέση: $\omega_0 = 1.37 \cdot L_c \cdot \cos\theta$. Η τελευταία σχέση είναι χρήσιμη καθώς επιτρέπει τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του ανοίγματος της ίνας που πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα για συγκεκριμένο τύπο συζεύκτη φράγματος περίθλασης. Η ιδανική απόσταση d μεταξύ του κέντρου της δέσμης της οπτικής ίνας και το άκρο του συζεύκτη περίθλασης ισούται με το μήκος σύζευξης ($d=L_c$).

Στην περίπτωση μας που μελετώνται μονορυθμικές ίνες, η απόδοση της σύζευξης γ (coupling efficiency) από την ίνα στον κυματοδηγό είναι η ίδια με την απόδοση του προβλήματος σύζευξης από τον κυματοδηγό στην ίνα όπως υπαγορεύει το θεώρημα της αμοιβαιότητας (reciprocity theorem). Για τον υπολογισμό της μπορούμε να κάνουμε χρήση της παρακάτω σχέσης ολοκληρωμάτων:

$$\gamma = \frac{\left| \iint E \times H_{fib}^2 \right|^2}{\text{Re} \iint E \times H^* \cdot \iint E_{fib} \times H_{fib}^*} \quad (2.5)$$

όπου (E,H) είναι οι πεδιακές εκφράσεις για το κυματικό πεδίο που περιθλάται από τη δομή του φράγματος και (E_{fib},H_{fib}) το κυματικό πεδίο του θεμελιώδους ρυθμού (HE_{11}) στην οπτική ίνα. Η παραπάνω εξίσωση είναι ακριβής για την περίπτωση ομογενών μέσων. Ωστόσο, δε λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση στη διεπιφάνεια λόγω διαφορών των δεικτών διάθλασης. Παραμένει από την άλλη μια αξιόπιστη προσέγγιση ακόμα και στην περίπτωση που η δομή καλύπτεται από αέρα ή από γυαλί (silica).

2.3.3 Σχεδιαστικές παράμετροι συζευκτών περίθλασης και κατασκευή δομών συζευκτών περίθλασης

Η Εικόνα 10 παρουσιάζει τη σχηματική αναπαράσταση μιας ολοκληρωμένης δομής ενός συζεύκτη περίθλασης. Παρατηρούμε πως το μέγεθος της δομής του συζεύκτη είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος της επιφάνειας του πυρήνα μιας μονορυθμικής ίνας με διάμετρο $R=9\mu\text{m}$. Στο σχήμα επίσης φαίνεται και η δομή ενός κωνικού συζεύκτη (taper) το οποίο επιφορτίζεται με τη σταδιακή προσαρμογή του μεγέθους του ρυθμού που συζευγνύεται στο τσιπ στις διαστάσεις του SOI νανο-κυματοδηγού. Ουσιαστικά η δομή του κωνικού συζεύκτη χρησιμοποιείται ώστε να προσαρμόσει τα χαρακτηριστικά του ρυθμού που συζευγνύεται μέσω του συζεύκτη περίθλασης στον Si κυματοδηγό που περιλαμβάνει το παθητικό Si ολοκληρωμένο κύκλωμα. Το μήκος της δομής των συγκεκριμένων κωνικών δομών σύζευξης (tapers) είναι αρκετά μικρό συγκριτικά με τις δομές των κωνικών δομών σύζευξης από τον αέρα στον κυματοδηγό, καθώς η αποστολή του είναι να προσαρμόσει το μέγεθος δύο κυματοδηγούμενων ρυθμών οι οποίες δε διαφέρουν αρκετά.

Οι συζεύκτες περίθλασης (Grating Couplers) είναι η καλύτερη λύση για την αξιολόγηση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων προσφέροντας αναβαθμισμένη ευκολία κατά τη διαδικασία της αξιολόγησης του τσιπ. Το βασικό πλεονέκτημα της χρήσης συζευκτών περίθλασης (grating couplers) είναι η δυνατότητα που παρέχεται στις οπτικές ίνες να τοποθετούνται σε οποιοδήποτε σημείο πάνω στο chip χωρίς να απαιτείται η κοπή (dicing) του chip σε κατάλληλα τμήματα και η φροντίδα για λείανση (polishing) των επιφανειών του chip σε περίπτωση χρήσης κωνικών δομών (tapers). Εξαρτώμενη από την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, η απόδοση των συζευκτών μπορεί να αναβαθμιστεί μέσω της εγχάραξης πολλών σταδίων (multi-level etching) που μπορεί να προσφέρει χαμηλές απώλειες σύζευξης (coupling losses). Στην περίπτωση της παρούσας διατριβής, σκοπός είναι η ανάπτυξη ετερο-ολοκληρωμένων δομών DLSP κυματοδηγών που φιλοξενούνται σε παθητική πλατφόρμα Si. Συνεπώς, η ανάπτυξη συζευκτών περίθλασης που υποστηρίζουν τη διάδοση του TM (Transverse Magnetic – TM) πολωτικού ρυθμού. Η Εικόνα 10(α) απεικονίζει τη βασική αρχιτεκτονική για την υλοποίηση του συζεύκτη περίθλασης που περιγράφει την κυματοειδή εγχάραξη του Si στο πάνω μέρος ενός στρώματος SiO_2 . Η πεδιακή κατανομή του σήματος της ίνας περιγράφεται από ένα σήμα το οποίο χαρακτηρίζεται από διάμετρο του πεδιακού ρυθμού (Mode Field Diameter – MFD) σε τιμές κοντά στα $10\mu\text{m}$. Η Εικόνα 10(β) παρέχει μια πιο αναλυτική περιγραφή που περιλαμβάνει το σύνολο των σχεδιαστικών παραμέτρων που υιοθετήθηκαν για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη των συζευκτών περίθλασης που προσφέρουν τις ελάχιστες δυνατές απώλειες σύζευξης από/προς την οπτική ίνα. Ένας πιο αναλυτικός σχολιασμός των παραμέτρων δίνεται παρακάτω:

Etching Depth (ed): Είναι το βάθος χάραξης του στρώματος του Si, που είναι ουσιαστικά το βάθος των αυλακώσεων του φράγματος.

Height (H): Το ύψος των δοντιών της περιοδικής δομής του φράγματος.

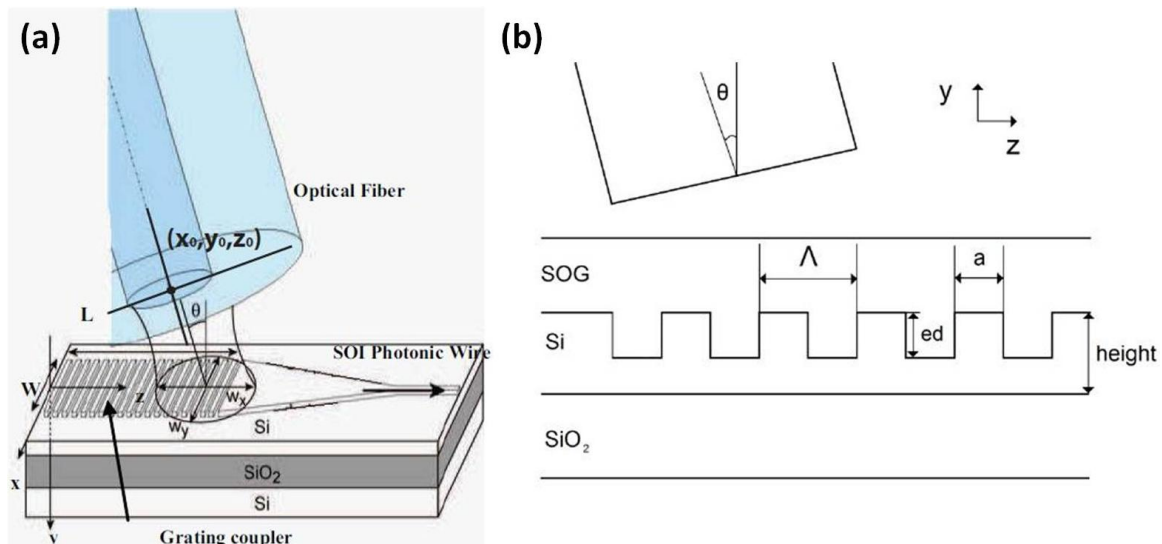
Grating Period (A):, που είναι το μέγεθος που αναφέραμε στις ενότητες της θεωρίας

Groove width (a): ένας κρίσιμος παράγοντας που ορίζει τον κύκλο επαναληψιμότητας (duty cycle) της περιοδικής δομής και καθορίζει το κρίσιμο μέγεθος του παράγοντα συμπλήρωσης.

Filling factor (FF): παράγοντας συμπλήρωσης που ορίζεται από τη σχέση: $FF = a/\Lambda$.

Incident Angle (θ): γωνία εισόδου που αναφέρεται στο εισερχόμενο οπτικό σήμα στη δομή του συζεύκτη.

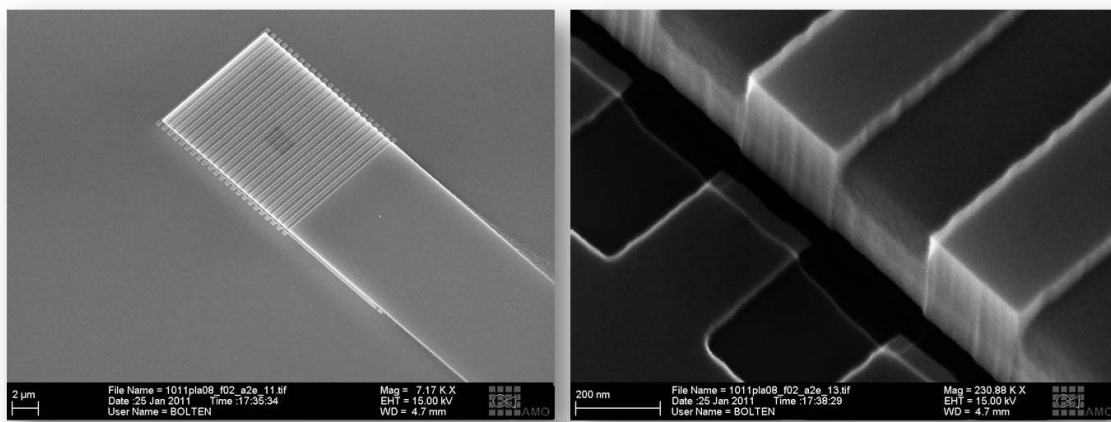
Αξίζει επίσης να σημειωθεί η παρουσία ενός στρώματος Spin On Glass (SOG) το οποίο τοποθετήθηκε πάνω από το στρώμα του Si και το περικλείει με στόχο την αύξηση της απόδοσης σύζευξης των δομών. Η τεχνική αυτή είναι διαδεδομένη για την αύξηση της απόδοσης σύζευξης των SOI συζευκτών φράγματος περίθλασης και έχει προταθεί η χρήση αρκετών πολυμερών υλικών – και πολυστρωματικών δομών με δείκτη διάθλασης κοντά σε αυτόν της ίνας για να επιτευχθεί ο στόχος της προσαρμογής [2.66].



Εικόνα 10: (α) Δομή συζεύκτη περίθλασης (Grating Coupler) που χρησιμοποιείται για τη σύζευξη ισχύος από οπτική ίνα με ενεργό διατομή ρυθμού κοντά στα 10μm, (β) Βασικές παράμετροι του συζεύκτη περίθλασης που υιοθετήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Η ανάπτυξη της κυμάτωσης των συζευκτών περίθλασης πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση τεχνικής που περιλαμβάνει δύο στάδια εγχάραξης. Το πρώτο στάδιο της διαδικασίας περιλαμβάνει αρχικά τον ορισμό της δομής του κυματοδηγού του συζεύκτη κάνοντας χρήση μιας μάσκας HSQ (Hydrogen SilsesQuioxane) η οποία επιτρέπει την εγχάραξη του Si σε ένα βάθος 50μm [2.67]. Στη συνέχεια, υλοποιείται ο ορισμός της δομής κάνοντας χρήση μιας τεχνικής εγχάραξης θετικού τόνου (positive tone resist). Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η δομή που αναπτύχθηκε μέσω μιας εικόνας που προέρχεται από ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Scanning Electron Microscope – SEM). Η αναπαράσταση των δομών δίνεται μέσω μιας πανοραμικής λήψης για δύο διαφορετικές επιλογές μεγέθυνσης. Σημειώνεται επίσης πως η συγκριμένη δομή έχει σχεδιαστεί χωρίς την παρουσία του

υλικού Spin-on-Glass (SOG) [2.68,2.69] στο πάνω μέρος των δομών, γεγονός που μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά της απόδοσης της.



Εικόνα 11: SEM εικόνες που απεικονίζουν τις πανοραμικές λήψεις μέσω ενός SEM μικροσκοπίου τη δομή του TM συζευκτη περίθλασης (Grating Coupler). Δύο διαφορετικές μεγεθύνσεις του μικροσκοπίου έχουν επιλεγεί.

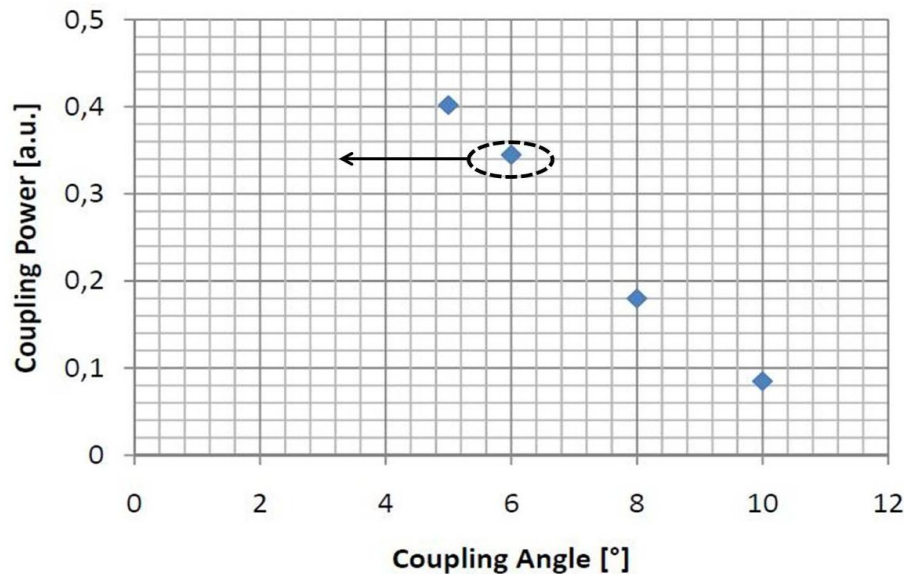
2.4 Χαρακτηρισμός SOI δομών συζευκτών περίθλασης (TM Grating Couplers) χωρίς τη χρήση SOG στην κορυφή της δομής

2.4.1 Μετρήσεις φασματικού χαρακτηρισμού και παραμέτρων δομής

Κατά την πρώτη φάση της ανάπτυξης συζευκτών επιλέχθηκαν δομές φραγμάτων περίθλασης χωρίς να είναι εφοδιασμένες με SOG στην κορυφή των αυλακώσεων. Οι γεωμετρικές παράμετροι των δομών που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1. Η πρώτη μέτρηση χαρακτηρισμού της συγκεκριμένης δομής εστίασε στον προσδιορισμό της βέλτιστης γωνίας πρόσπτωσης της δέσμης (θ_z) η οποία θα διασφαλίσει τις λιγότερες απώλειες σύζευξης μεταξύ οπτικής ίνας και της δομής σύζευξης. Για τις συγκεκριμένες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε μονότροπη οπτική ίνα (τύπου Standard SMF28) η οποία έχει κοπεί κατάλληλα (cleaved SMF). Η επιλογή αυτή έχει λάβει υπόψη της τη συμβατότητα μεταξύ της ενεργού επιφάνειας της ίνας που καθορίζεται κυρίως μέσω των διαστάσεων του πυρήνα της (~9μm) και της ενεργού επιφάνειας της δομής σύζευξης η οποία 'φωτίζεται' και είναι της τάξης των $10 \times 10 \mu\text{m}^2$. Για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιήθηκαν άλλοι τύποι οπτικών ινών που είναι εφοδιασμένες με φακούς εστίασης (lensed fibers) και διασφαλίζουν τη βέλτιστη σύζευξη ισχύος σε περιπτώσεις κωνικών δομών σύζευξης (tapers) [2.70].

Η Εικόνα 12 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της πρώτης φάσης των μετρήσεων στο οποίο χρησιμοποιήθηκε ο σταθμός εργασίας προσφέροντας ένα εύρος τιμών για τις κατακόρυφες γωνίες εισόδου/εξόδου της δέσμης (θ_z) μεταξύ τιμών 5° και 15° . Είναι ξεκάθαρο πως η ικανότητα σύζευξης των δομών (coupling efficiency) αυξάνεται με τη μείωση της γωνίας πρόσπτωσης της οπτικής δέσμης. Στο εύρος των γωνιών που

διατίθενται από το σταθμό εργασίας, η βέλτιστη γωνία υπολογίστηκε στις 5° με απώλειες ισχύος μεταξύ 14-15 dB. Είναι εμφανές πως η περαιτέρω μείωση της κατακόρυφης γωνίας της οπτικής ίνας, τοποθετώντας κατακόρυφα τις γωνίες εισόδου και εξόδου της ίνας μπορεί να ανοίξει το δρόμο για επίτευξη ακόμα καλύτερης απόδοσης με μικρότερες απώλειες. Για το σκοπό αυτό, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, τροποποιήθηκε ο σταθμός εργασίας με σκοπό να επιτευχθούν γωνίες εισόδου/εξόδου στις $\theta_z=1.8^\circ$, τιμή που διασφαλίζει τις μικρότερες απώλειες σύζευξης μεταξύ της ίνας και της δομής του συζεύκτη περίθλασης.



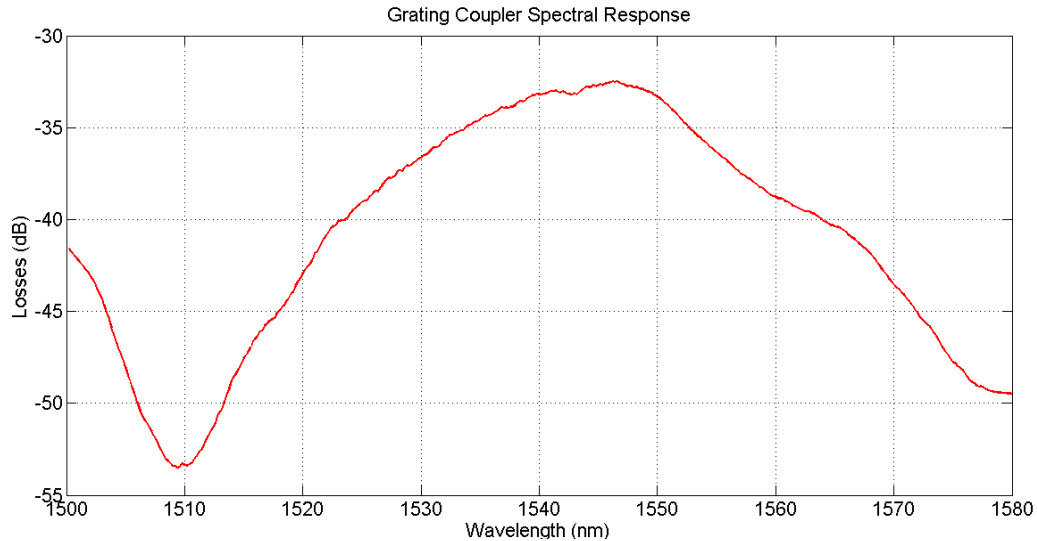
Εικόνα 12: Οπτική ισχύς που συζευγνύεται στη δομή του Si για διάφορες τιμές της κατακόρυφης γωνίας της οπτικής ίνας στο σταθμό εργασίας.

Ο παρακάτω πίνακας (Πίνακας 2) συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά της δομής του συζεύκτη περίθλασης που χαρακτηρίστηκε στο σταθμό εργασίας του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ). Η περίοδος του φράγματος περίθλασης επιλέχθηκε να είναι $\Lambda=630\text{nm}$ και το πλάτος στα 315nm οδηγώντας ως εκ τούτου σε ένα παράγοντα συμπλήρωσης (Filling Factor) στο 50%. Οι απώλειες γύρω στα 14-15 dB υπολογίστηκαν για κατακόρυφες γωνίες $\theta_z=5^\circ$. Τα όρια αντοχής (tolerance) της απόδοσης σύζευξης μετρήθηκε κοντά στα $2\mu\text{m}$ στο καρτεσιανό επίπεδο (xy) ορίζοντας εύρος ανεκτικότητας το 1dB επιπλέον απώλεια.

Παράμετρος/Μέτρηση της δομής	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες μέτρησης
Περίοδος Φράγματος (Grating Period)	Λ	0.63	μm
Πλάτος Φράγματος (Grating width)	α	0.315	μm
Παράγοντας Συμπλήρωσης (Filling Factor)	FF	0.5	
Κενό χάραξης (Pitch)		0.315	μm
Γωνία οπτικής δέσμης (Incidence Angle)	θ_z	5	deg
Απώλειες (insertion Loss)	α_L	14-15	dB
Ανεκτικότητα 1-dB διακύμανσης ισχύος (1dB loss alignment tolerance)		± 2	μm

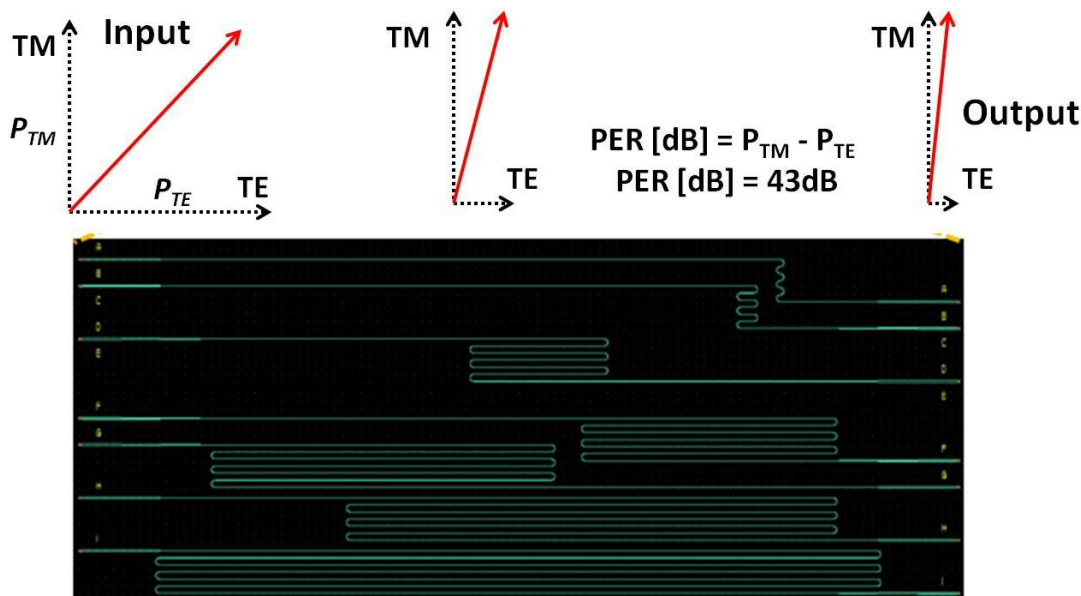
Πίνακας 2: Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών παθητικών δομών συζευκτών περίθλασης (Grating couplers).

Η φασματική απόκριση του συζεύκτη περίθλασης διερευνήθηκε χρησιμοποιώντας μια πηγή λέιζερ συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) η οποία εκπέμπει οπτική ισχύ 0dBm με δυνατότητα μεταβολής του μήκους κύματος εκπομπής (λ). Το φασματικό παράθυρο σάρωσης επιλέχθηκε να είναι 1500-1580nm που περιορίζεται από το διαθέσιμο εύρος της πηγής μεταβλητού μήκους κύματος [2.71]. Η επιθυμητή πολωτική κατάσταση στο σήμα εισόδου που εξασφαλίζει τον TM πολωτικό ρυθμό (TM polarization mode) είναι δυνατή κάνοντας χρήση ενός ελεγκτή πόλωσης (Polarization Controller – PC). Η Εικόνα 13 παρουσιάζει την φασματική απόκριση του συζεύκτη απομακρύνοντας οποιαδήποτε άλλη επίδραση που υπεισέρχεται στο κύκλωμα αξιολόγησης. Η μέγιστη απόδοση της σύζευξης ισχύος διαπιστώθηκε για μήκος κύματος κοντά στα 1546.5nm με συνολικές απώλειες για το μήκος αυτό κοντά στα 32dB. Στις απώλειες αυτές περιλαμβάνονται οι απώλειες σύζευξης εισόδου/εξόδου (coupling losses) αλλά και οι απώλειες διάδοσης (propagation losses) οι οποίες οφείλονται στο ευθύγραμμο τμήμα του Si Rib κυματοδηγό και έχουν εξαχθεί στις παρακάτω μετρήσεις μέσω της μεθόδου αποκοπής (cutback method). Η αμελητέα διακύμανση που εμφανίζει η φασματική καμπύλη απωλειών υποδηλώνει την άρτια ποιότητα κατασκευής της συγκεκριμένης δομής καθώς τυχόν ατέλειες κατασκευαστικές, αμορφίες υλικών, αστοχίες παραμέτρων θα οδηγούσε σε εμφάνιση διακύμανσης ισχύος. Η ελεύθερη φασματική περιοχή (Free Spectra Range – FSR) που σχετίζεται με τις παραμέτρους του φράγματος περίθλασης για τη συγκεκριμένη δομή υπολογίζεται σε τιμή μεγαλύτερη από 60nm. Το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος (3-dB bandwidth) υπολογίζεται κοντά στα 19nm. Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς εκφράζει τη δυνατότητα της συγκεκριμένης δομής να υποστηρίξει ευρυζωνικά εισερχόμενα σήματα χωρίς να εισάγει παραμόρφωση σε επιμέρους φασματικές συνιστώσες λόγω της φασματικής επιλεκτικότητας του συζεύκτη.



Εικόνα 13: Φασματική απόκριση του συζεύκτη περίθλασης που υποστηρίζει τη σύζευξη TM πολωτικού ρυθμού.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συζεύκτη ως προς την ικανότητα του να επιλέγει μόνο τον ένα πολωτικό ρυθμό του εισερχόμενου σήματος [2.72] διερευνήθηκε στη συνέχεια. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιώντας τον ελεγκτή πόλωσης ώστε να στρέψουμε την πολωτική κατάσταση (State of Polarization–SoP) του εισερχόμενου σήματος, υπολογίσαμε τη διαφορά μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της ισχύος εξόδου. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η επιλεκτικότητα του συζεύκτη στην επιθυμητή πολωτική κατάσταση (Polarization Extinction Ratio–PER). Στη μέτρηση μας, η τιμή αυτή υπολογίστηκε να είναι περίπου ίση με 43dB, γεγονός που υποδεικνύει πως διαμοιράζεται ισόποσα σε κάθε συζεύκτη που χαρακτηρίζεται από μια τιμή PER κοντά στα 21.5dB. Η Εικόνα 14 απεικονίζεται η λειτουργία της επιλεκτικότητας ως προς την πολωτική κατάσταση του φωτός από τη διάταξη θεωρώντας πως ένα σήμα γραμμικά πολωμένο (Linear Polarized-LP) με γωνία πόλωσης στις $\theta=45^\circ$ εισέρχεται στο τσιπ. Μετά τον πρώτο συζεύκτη στην είσοδο, η πολωτική συνιστώσα TE (Transverse Electric – TE) θα καταπιεστεί κατά 21.5dB. Στην έξοδο του chip ο πολωτικός ρυθμός TM (Transverse Magnetic – TM) θα έχει επιβιώσει σε αντίθεση με τον πολωτικό ρυθμό TE ο οποίος θα έχει καταπιεστεί κατά 43dB συγκριτικά με τον TM. Σημειώνεται τέλος πως η σχηματική αναπαράσταση δε λαμβάνει υπόψη τις απώλειες ισχύος που εμφανίζονται στους συζεύκτες περίθλασης και στους Si κυματοδηγούς, οι οποίοι εμφανίζουν στην περίπτωση μας αναισθησία ως προς την πολωτική κατάσταση των ρυθμών κυματοδηγώντας και τους δύο πολωτικούς ρυθμούς (TM, TE) με ίδιες παρουσιάζοντας διάφανη λειτουργία ως προς τη διάδοση πολωτικών ρυθμών.

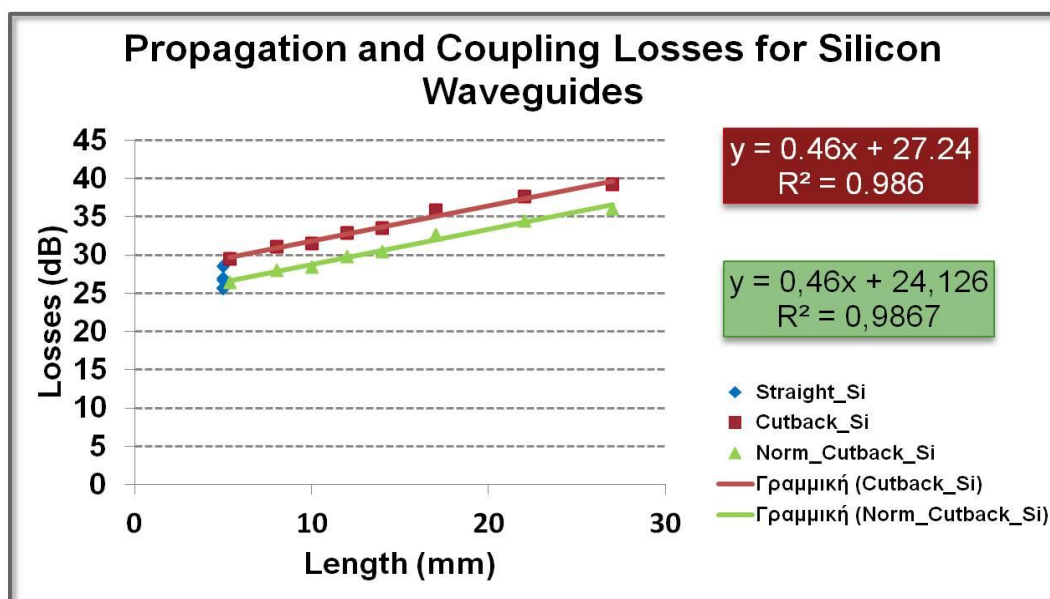


Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση της επιλεκτικότητας των δομών των συζευκτών περίθλασης ως προς την πολωτική κατάσταση του εισερχόμενου σήματος.

2.4.2 Μετρήσεις απωλειών μέσω της μεθόδου μέτρησης σε δείγματα μεταβλητού μήκους (cutback method)

Η απώλεια σύζευξης (coupling loss) και η απώλεια διάδοσης των κυματοδηγών (propagation loss) προσδιορίστηκαν κάνοντας χρήση της μεθόδου που αξιοποιεί δείγματα κυματοδηγών μεταβλητού μήκους. Η μέθοδος προσδιορισμού απωλειών με χρήση της παραπάνω μεθόδου αποτελεί διαδεδομένη τεχνική για την αξιόπιστη εξαγωγή των απωλειών διάδοσης όσο και σύζευξης ίνας κυματοδηγών [2.73-2.76]. Για την εξαγωγή των μεγεθών αυτών απαιτείται ένα τσιπ το οποίο έχει ολοκληρωμένους πανομοιότυπους κυματοδηγούς μεταβλητού μήκους. Σημαντική παράμετρος για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη βεβαιότητα στα εξαγόμενα αποτελέσματα αποτελεί η επεξεργασία του τσιπ σε όλες τις περιοχές που αντιστοιχούν στα δείγματα με πανομοιότυπο τρόπο ώστε να διασφαλίζεται πως δεν υπάρχει καμία επιπλέον απώλεια σε κάποιο δείγμα λόγω μη ιδανικής επεξεργασίας του τσιπ (ατέλειες κυματοδηγών, αμορφίες υλικών, μόλυνση με διάφορα υλικά των σταδίων επεξεργασίας). Για την περίπτωση της οριζόντιας σύζευξης φωτός στο ολοκληρωμένο κύκλωμα, η συνθήκη της ιδανικής λείανσης (polishing) του τσιπ στα σημεία που υπάρχουν τοποθετημένες οι κωνικές δομές σύζευξης (tapers) πρέπει να ικανοποιείται για να μην εμφανιστούν επιπλέον απώλειες τυχαία σε κάποια δείγματα. Στην περίπτωση κατακόρυφης σύζευξης φωτός με δομές φραγμάτων περίθλασης, η επεξεργασία αυτή δεν απαιτείται, απλοποιώντας τη διαδικασία της πειραματικής αξιολόγησης. Τέλος, η χρήση των κάμψεων (bends) για να επιτευχθεί η αύξηση του μήκους στα δείγματα πρέπει να είναι η ίδια (ως προς την ακτίνα, αριθμό) για όλα τα διαθέσιμα μήκη κυματοδηγών. Αυτό πρέπει να συμβεί καθώς όπως αναφέρθηκε στην ενότητα της περιγραφής των

απωλειών κυματοδηγών οι κάμπυεις (bends) εισάγουν επιπλέον απώλειες οι οποίες θα προσμετρηθούν σε απώλειες διάδοσης στην επεξεργασία των μετρήσεων της μεθόδου [2.50]. Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων με την παραπάνω μέθοδο μεταβλητού μήκους κυματοδηγών (cutback method), χρησιμοποιείται μία πηγή λέιζερ που εκπέμπει σήμα συνεχούς κύματος (Continuous Wave-CW) με επίπεδο ισχύος στα 0dBm για να αποφευχθεί οποιαδήποτε διέγερση μη-γραμμικών φαινομένων στους Si κυματοδηγούς που μπορεί να συνεισφέρουν σε επιπλέον απώλειες. Το φαινόμενο της Απορρόφησης Δύο Φωτονίων (Two Photon Absorption-TPA) αποτελεί ένα βασικό μηχανισμό εισαγωγής μη-γραμμικών απωλειών (non-linear loss) στους Si κυματοδηγούς και για το λόγο αυτό συγκρατείται η ισχύς εισόδου κατά τη μέτρηση [2.77].



Εικόνα 15: Πειραματικές μετρήσεις προσδιορισμού απωλειών Rib κυματοδηγών Si με τη χρήση της cutback μεθόδου. Η επεξεργασία των μετρήσεων περιλαμβάνει και την κανονικοποιημένη προσαρμογή για τους ευθείς κυματοδηγούς.

Στην Εικόνα 15 παρουσιάζεται στη μάσκα που περιλαμβάνεται για την κατασκευή του chip, το σύνολο των δειγμάτων των Si Rib κυματοδηγών μεταβλητού μήκους. Ο αριθμός των κυματοδηγών του cutback συνόλου είναι 9 και το μήκος τους μεταβάλλεται από 0.3cm έως 2.5cm. Η αύξηση του μήκους των κυματοδηγών όπως έχει ήδη σημειωθεί αναπτύχθηκε κάνοντας χρήση των δομών κάμψης (bends) εισάγοντας επιπλέον μήκος κυματοδηγού αξιοποιώντας ταυτόχρονα με το βέλτιστο τρόπο και τη διαθέσιμη επιφάνεια του Si chip. Οι κυματοδηγοί είναι εφοδιασμένοι με δομές TM συζευκτών περίθλασης για τη σύζευξη φωτός από/προς την ίνα, οι οποίες ακολουθούνται από χρήση ενός κωνικού τμήματος κυματοδηγού (taper) μήκους 1mm.

Οι μετρήσεις των απωλειών των κυματοδηγών εμφανίζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 15 και οι οποίες αποτυπώνονται με κόκκινο χρώμα. Να σημειωθεί πως από το

σύνολο των μετρήσεων απουσιάζει η τιμή των απωλειών ισχύος του κυματοδηγού με μήκος 0.4cm καθώς η εμφάνιση πολύ μεγάλων απωλειών - της τάξης των 49dB - σχετίζεται με σφάλμα κατά την επεξεργασία του συγκεκριμένου δείγματος κυματοδηγού (πιθανή εγκάρσια εγχάραξη της δομής όπως αποτυπώθηκε και σε απεικόνιση μέσω χρήσης οπτικού μικροσκοπίου). Η γραμμική προσαρμογή των μετρήσεων οδήγησε στην εξαγωγή των απωλειών διάδοσης στα 4.6dB/cm ενώ οι απώλειες σύζευξης που οφείλονται και στις δύο πλευρές του chip υπολογίστηκαν στα 27.24dB.

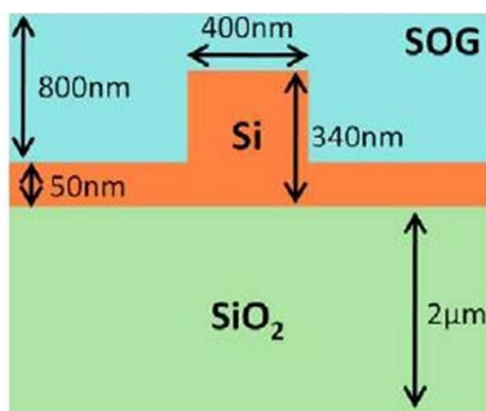
Επιπλέον διενεργήθηκαν μετρήσεις απωλειών σε ευθείς κυματοδηγούς (straight waveguides) μήκους 0.3cm οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα στα δείγματα των δειγμάτων του συνόλου των κυματοδηγών (cutback set). Οι μετρήσεις αυτές που αποτυπώνονται με μπλε χρώμα στην καμπύλη του σχήματος της Εικόνας 15 οδήγησαν σε μέτρηση απωλειών 25.50dB για το συγκεκριμένο Si κυματοδηγό. Η μέτρηση αυτή είναι χρήσιμη καθώς παρέχει τη δυνατότητα να προχωρήσουμε σε προσαρμογή των απωλειών προσδιορίζοντας τις επιπλέον απώλειες που οφείλονται στις κάμψεις (bends) που εισάγονται για να διαπιστωθεί το σύνολο των δειγμάτων. Συνεπώς, κρατώντας σταθερές τις απώλειες διάδοσης (4.6dB/cm) και συγκρίνοντας τις απώλειες μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού και του κυματοδηγού που περιλαμβάνει τις κάμψεις με το ίδιο μήκος ($L=0.3\text{cm}$) εξάγουμε το επιπλέον τμήμα της απώλειες που οφείλεται στις κάμψεις των κυματοδηγών και είναι 3.12dB. Απομακρύνοντας τις απώλειες των κάμψεων (bends) και προσαρμόζοντας τη γραμμική προσαρμογή των δειγμάτων των κυματοδηγών, προσδιορίζουμε την κανονικοποιημένη γραμμική προσαρμογή (με πράσινο χρώμα) που οδηγεί σε απώλειες διάδοσης στα 4.6dB/cm και συνολικές απώλειες σύζευξης στα 24.12dB.

Η γραμμική προσαρμογή των αποτελεσμάτων και στις δύο περιπτώσεις που περιγράφονται παραπάνω χαρακτηρίζονται από υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού (Coefficient of Determination) $R^2=98.6\%$. Κάνοντας χρήση της μεθόδου για τον προσδιορισμό των απωλειών ισχύος κυματοδηγών, η συγκεκριμένη παράμετρος παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ποιότητα της μεθόδου κατασκευής των παθητικών στοιχείων που αποτυπώνεται στην ομοιογένεια των μετρήσεων των δειγμάτων. Υψηλές τιμές της παραμέτρου R^2 της γραμμικής προσαρμογής (κοντά στο 100%) υποδηλώνουν υψηλής ποιότητας κατασκευή κυματοδηγών η οποία διασφαλίζει την αξιοπιστία της μεθόδου κατασκευής. Απεναντίας, χαμηλές τιμές της παραμέτρου R^2 , υποδηλώνει αβεβαιότητα στην κατασκευή των κυματοδηγών καθώς οι απώλειες δεν οφείλονται μόνο στη γραμμική φύση των απωλειών ως συνάρτηση του μήκους των κυματοδηγών αλλά επίσης στις ατέλειες κατασκευής των δειγμάτων. Η συμπεριφορά αυτή οδηγεί σε χαμηλής αξιοπιστίας κατασκευή/επεξεργασία παθητικών στοιχείων και απαιτεί τον επαναπροσδιορισμό των βημάτων/μεθόδων επεξεργασίας.

2.5 Χαρακτηρισμός SOI δομών συζευκτών περίθλασης (TM Grating Couplers) εφοδιασμένοι με SOG

2.5.1 Σχεδιασμός και κατασκευή TM Συζευκτών Περίθλασης με χρήση SOG στο πάνω μέρος

Η μείωση των απωλειών σύζευξης αποτελεί ζωτικής σημασίας παράμετρο στην υλοποίηση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς αυξάνει το διαθέσιμο ισχύος για τις παθητικές/ενεργές λειτουργίες που περιλαμβάνει το τσιπ. Στην κατεύθυνση αυτή, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια νέα γενιά TM συζευκτών περίθλασης η οποία χαρακτηρίζεται από δραστικά μειωμένες απώλειες σύζευξης όσο και απωλειών διάδοσης στους Rib Si κυματοδηγούς. Η Εικόνα 16 παρουσιάζει τη σχηματική αναπαράσταση της δομής των Rib κυματοδηγών που αναπτύχθηκαν στη κάνοντας χρήση του περιβλήματος Spin-On-Glass (SOG). Ο Πίνακας 3 που συνοδεύει τη δομή του κυματοδηγού της Εικόνας 16 συνοψίζει τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής του κυματοδηγού και δίνει πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες και απώλειες κυματοδότησης. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία του πίνακα, η συγκεκριμένη γεωμετρία διασφαλίζει τη μονορυθμική λειτουργία που χαρακτηρίζεται από ίδια απώλεια για τις δύο πολώσεις του θεμελιώδους ρυθμού (TE και TM) σε ένα εύρος μεταξύ 2.5dB/cm και 4.5dB/cm. Οι μετρήσεις χαρακτηρισμού που ακολουθούν θα προσδιορίσουν το μέγεθος των απωλειών σύζευξης και διάδοσης αντίστοιχα μέσω της cutback μεθόδου προσδιορισμού των απωλειών.



Εικόνα 16.: Δομή Si Rib κυματοδηγού ο οποίος περικλείεται από Spin-on-Glass (SOG).

Παράμετρος της δομής	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες μέτρησης
Ύψος SiO ₂ υποβάθρου (SiO ₂ BOX Height)	H _{SiO₂}	2	μm
Πλάτος Si κυματοδηγού (Si waveguide width)	W	400	nm
Ύψος Si κυματοδηγού (Si waveguide height)	H	340	nm
Υπόλοιπο στρώματος Si κυματοδηγού (Si slab height)	h	50	nm
Πάχος στρώματος SOG (SOG coat thickness)	T	800	nm
Απώλειες διάδοσης του TE ρυθμού (TE propagation losses@1550nm)	α _{TE}	2.5-4.5	dB/cm
Απώλειες διάδοσης του TM ρυθμού (TM propagation losses@1550nm)	α _{TM}	2.5-4.5	dB/cm

Πίνακας 3. Ο συνοδευτικός πίνακας περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής και τα βασικά χαρακτηριστικά απώλειας.

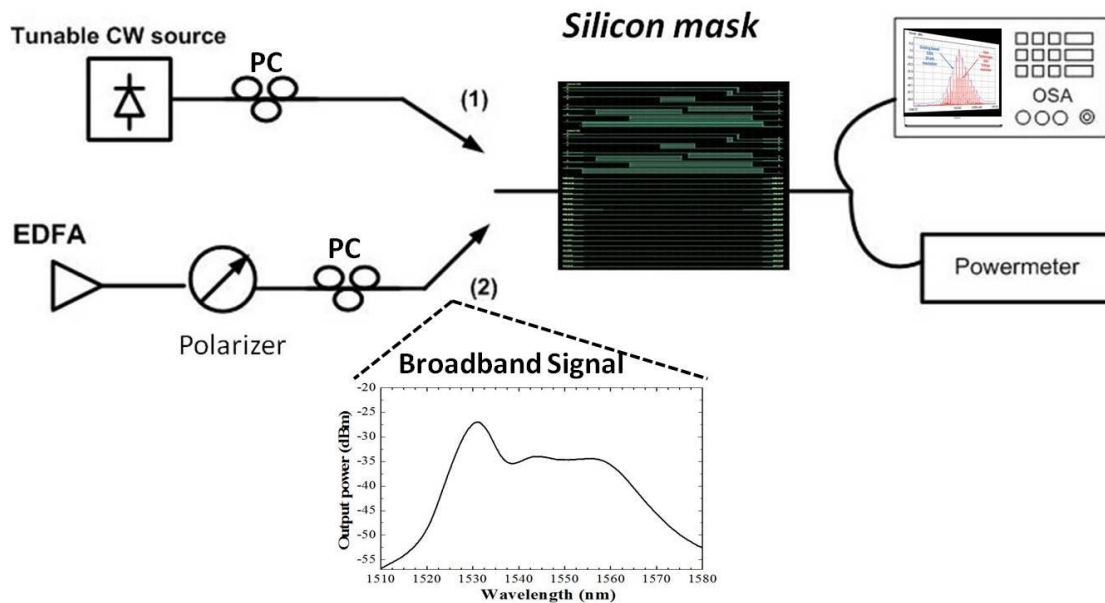
Οι συγκεκριμένες δομές TM συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers) κατασκευάστηκαν υιοθετώντας τεχνικές ελαχιστοποίησης των σφαλμάτων κατά την εγχάραξη των κρίσιμων παραμέτρων των δομών (Critical Dimensions – CD). Αυτό συνέβη ώστε να βελτιωθεί η απόδοση των δομών η οποία είναι αρκετά ευαίσθητη στην αναπαραγωγή κατά την κατασκευή των παραμέτρων της δομής που έχουν υιοθετηθεί κατά το σχεδιασμό. Κατά τη διάρκεια ορισμού των δομών περίθλασης κάνοντας χρήση της ηλεκτρονικής λιθογραφίας (Electron Beam Lithography – EBL) το φαινόμενο της εγγύτητας στον προσδιορισμό των παραμέτρων (proximity effect) μπορεί να προκαλέσει μια διακύμανση στις επιλεγόμενες τιμές των κρίσιμων παραμέτρων και συνεπώς να προκληθούν μεταβολές στην απόδοση σύζευξης (διακύμανση απωλειών σύζευξης – coupling losses). Οι τυχαίες μεταβολές των παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν λόγω αστοχίας μπορούν να μελετηθούν μέσω αυτοματοποιημένων εργαλείων που χρησιμοποιούν εικόνες από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM). Αρκετές μελέτες έχουν γίνει και έχουν προσδιορίσει την επίδραση που έχουν οι συγκεκριμένες διακυμάνσεις στην απόδοση των απωλειών και όπως αποτυπώνεται στη μέθοδο του προσδιορισμού απωλειών μέσω της cutback μεθόδου [2.78]. Για να περιορίσουμε την παρουσία και την ένταση των συγκεκριμένων διακυμάνσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος της διόρθωσης του σφάλματος εγγύτητας (Proximity Error Correction – PEC) [2.36]. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δείχνουν πως μπορεί να περιοριστεί αισθητά η διακύμανση στον ορισμό των παραμέτρων της δομής των συζευκτών περίθλασης με αποτέλεσμα τον σημαντικό περιορισμό της διακύμανσης των απωλειών διάδοσης και σύζευξης για δομές κυματοδηγών και συζευκτών περίθλασης αντίστοιχα. Ως κατακλείδα, οι δομές που κατασκευάζονται υιοθετώντας τη

συγκεκριμένη τεχνική PEC εμφανίζουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά ως προς την απόδοση της σύζευξης που προσφέρουν.

Οι μετρήσεις χαρακτηρισμού στοχεύουν στην ανάδειξη της βελτίωσης της επίδοσης των συζευκτών περιθλασης (Grating Couplers) μετά την εισαγωγή του στρώματος του SOG πάνω από τους SOI κυματοδηγούς και τις δομές των συζευκτών περιθλασης. Οι παράμετροι που υιοθετήθηκαν για το σχεδιασμό της δομής του συζευκτή σκοπεύουν να μετατοπίσουν την κατακόρυφη γωνία βέλτιστης σύζευξης οπτικής ισχύος με αρκετά μειωμένες απώλειες σύζευξης συγκριτικά με την πρώτη γενιά των συζευκτών περιθλασης που δεν περιλαμβάνουν το στρώμα του SOG στην κορυφή των δομών. Επιπλέον, είναι επιθυμητό η επίδοση των SOI κυματοδηγών Rib-τύπου να είναι πανομοιότυπη με τις επιδόσεις που μετρήθηκαν στην περίπτωση των κυματοδηγών χωρίς το στρώμα του SOG να είναι 2.49 dB/cm στην πρώτη φάση ανάπτυξης των κυματοδηγών.

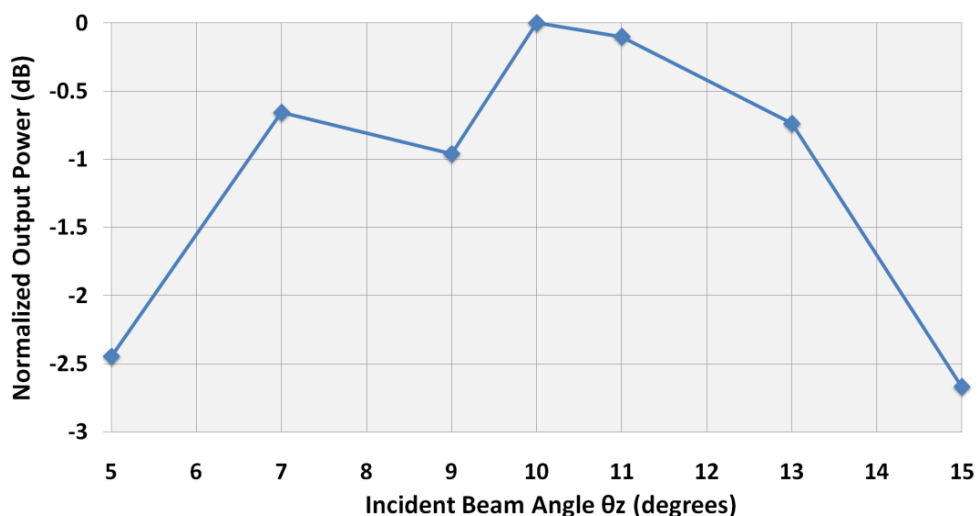
2.5.2 Πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε στο εργαστήριο φωτονικών επικοινωνιών ώστε να προσδιορίσουμε την απόδοση των συγκεκριμένων δομών οι οποίες αξιολογήθηκαν στο σταθμό εργασίας. Η διάταξη χρησιμοποιεί δύο διαφορετικές πηγές σημάτων εισόδου: (i) μία πηγή συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) η οποία εκπέμπει σε μεταβλητό μήκος κύματος, (ii) ένα φασματικά διευρυμένο σήμα που προέρχεται από το Θόρυβο Αυθόρμητης Εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission – ASE) ενός ενισχυτή ίνας ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA).



Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης των Si TM συζευκτών περιθλασης 2^{ης} γενιάς.

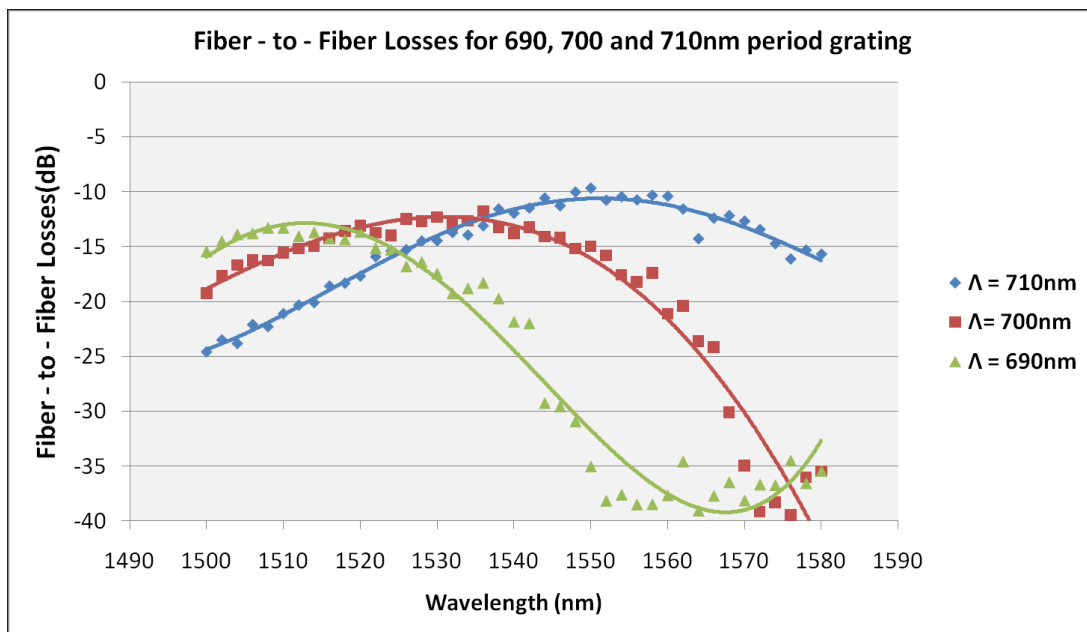
Κάνοντας χρήση της πηγής ASE θορύβου με το σήμα εισόδου που περιλαμβάνεται και στην Εικόνα 17, μετρήσεις για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατακόρυφης γωνίας σύζευξης (θ_z) πραγματοποιήθηκαν. Η επιλογή αυτή υιοθετήθηκε για να απομακρύνουμε την ευαισθησία της συγκεκριμένης μέτρησης από το μήκος κύματος του σήματος εισόδου (όπως υπαγορεύεται από τη συνθήκη του Bragg). Στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή χρησιμοποιήθηκε ένας πολωτής (Polarizer) ο οποίος στην έξοδο του παρέχει ένα γραμμικά πολωμένο σήμα ευρέος φάσματος. Ο από-πολωμένος (unpolarized light) ASE θόρυβος θα αποκτήσει μια γραμμική πόλωση στην έξοδο του πολωτή και η ισχύς του θα μειωθεί κατά 3dB διατηρώντας τα φασματικά χαρακτηριστικά του [2.79]. Η Εικόνα 18 παρουσιάζει τη μέτρηση οπτικού χαρακτηρισμού της κατακόρυφης γωνίας εισόδου της δομής του συζεύκτη περίθλασης με περίοδο $\Lambda=700\text{nm}$. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο διαθέσιμο εύρος τιμών 5° με 15° λαμβάνοντας βήμα μεταβολής στην κατακόρυφη γωνία ίσο με 2° , αξιοποιώντας τις δυνατότητες του σταθμού εργασίας. Η καμπύλη της μέτρησης αναπαριστά την κανονικοποιημένη τιμή της ισχύος εξόδου ως συνάρτηση της τιμής της κατακόρυφης γωνίας (θ_z). Η καμπύλη φανερώνει ένα σημείο βέλτιστης σύζευξης ισχύος για κατακόρυφη γωνία $\theta_z=10^\circ$ ενώ η συνολική διακύμανση ισχύος στο διαθέσιμο εύρος κατακόρυφων γωνιών μετρήθηκε να είναι μικρότερη από $\Delta P \sim 2.7\text{dB}$. Η μέτρηση αυτή επαναλήφθηκε και για τις δομές με περίοδο (Λ) του φράγματος περίθλασης 690nm και 710nm αντίστοιχα, καταδεικνύοντας πως η βέλτιστη κατακόρυφη γωνία για όλες τις δομές είναι για τιμή γωνίας στις $\theta_z=10^\circ$. Συνεπώς, κρατώντας την τιμή της κατακόρυφης γωνίας θ_z σταθερή στις 10° , οι μετρήσεις χαρακτηρισμού για τις δομές σύζευξης ακολουθούν.



Εικόνα 18: Κανονικοποιημένη ισχύς στην έξοδο δομής συζεύκτη περίθλασης με περίοδο $\Lambda=700\text{nm}$ για διάφορες τιμές κατακόρυφης γωνίας σύζευξης στο εύρος $[5^\circ-15^\circ]$.

Η εικόνα 19 περιλαμβάνει τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της φασματικής συνάρτησης μεταφοράς των δομών περίθλασης για τις τρεις διαφορετικές διαθέσιμες επιλογές της περιόδου των φραγμάτων ($\Lambda_1=690\text{nm}$, $\Lambda_2=700\text{nm}$, $\Lambda_3=710\text{nm}$). Οι δομές περιλαμβάνουν ευθύγραμμους Si κυματοδηγούς Rib-τύπου με

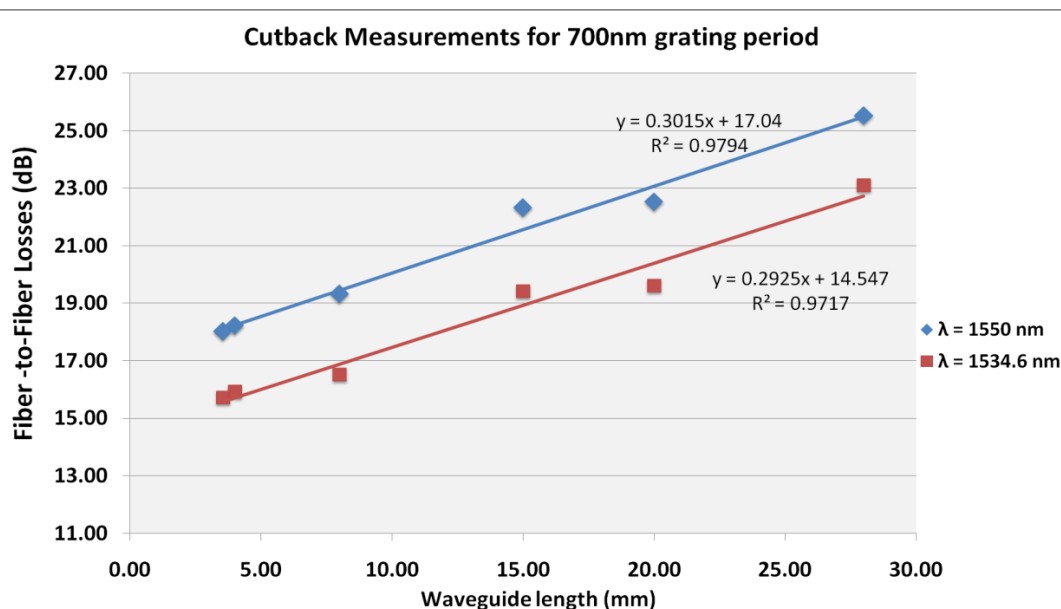
μήκος 0.33cm οι οποίοι χρησιμοποιούν συζεύκτες φραγμάτων περίθλασης αντίστοιχης γεωμετρίας [2.80]. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση της πηγής συνεχούς κύματος (CW) που προσφέρει εκπομπή μεταβλητού μήκους κύματος στο διαθέσιμο εύρος από 1500nm έως 1580nm. Μεταβάλλοντας το μήκος εκπομπής της πηγής με βήμα $d\lambda=2\text{nm}$ και μετρώντας την λαμβανόμενη ισχύ εξόδου για τις τρεις δομές διαπιστώνουμε τις καμπύλες μέτρησης της Εικόνας 19. Είναι εμφανές πως αυξάνοντας την τιμή της παραμέτρου Λ , η συνάρτηση μεταφοράς των δομών μετακινείται προς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Σχετικά με την απόδοση σύζευξης, είναι φανερό πως η δομή με περίοδο φράγματος $\Lambda=710\text{nm}$ προσφέρει την καλύτερη απόδοση με απώλειες σύζευξης με τιμές κοντά στα 5dB ανά δομή. Οι υπόλοιπες δομές προσφέρουν μια ελαφρώς μικρότερη απόδοση με απώλειες σύζευξης κοντά στα 5.5dB και 6 dB αντίστοιχα για το βέλτιστο μήκος κύματος. Αναλυτική καταγραφή της απόδοσης των δειγμάτων δίνεται στο τέλος της παραγράφου.



Εικόνα 19: Φασματική απόκριση των απωλειών από ίνα-σε-ίνα για ευθείς Si κυματοδηγούς εφοδιασμένοι με δομές συζευκτών περίθλασης με περίοδο φράγματος στα $\Lambda=690\text{nm}$, $\Lambda=700\text{nm}$ και $\Lambda=710\text{nm}$ αντίστοιχα.

Ο ακριβής προσδιορισμός των απωλειών διάδοσης (propagation loss) και σύζευξης (coupling loss) ήταν εφικτός κάνοντας χρήση της μεθόδου απωλειών σε δείγματα μεταβλητού μήκους αξιοποιώντας ένα σύνολο επτά κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (που εκτείνονται από 0.4cm έως 3cm) για τη δομή του συζεύκτη περίθλασης με περίοδο $\Lambda=700\text{nm}$. Καθώς οι διαθέσιμοι κυματοδηγοί είναι εφοδιασμένοι με συζεύκτες περίθλασης με περίοδο φράγματος $\Lambda=700\text{nm}$, το μήκος κύματος της CW πηγής λέιζερ ρυθμίστηκε να είναι 1534.6nm, μήκος κύματος που εμφανίζει τις ελάχιστες απώλειες σύμφωνα με τα αποτελέσματα των φασματικών αποκρίσεων των δομών που παρουσιάστηκαν. Ωστόσο, οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν και στην περιοχή των 1550nm ώστε να διερευνήσουμε τις

απώλειες σε ένα φασματικό παράθυρο το οποίο προορίζεται για εφαρμογές μεταγωγής πληροφορίας υλοποιώντας θερμο-οπτικούς διακόπτες πλασμονικής τεχνολογίας [2.37]. Η Εικόνα 20 περιλαμβάνει τις καμπύλες απωλειών από ένα εισόδο σε ένα εξόδο των κυματοδηγών μεταβλητού μήκους για τα δύο προαναφερθέντα μήκη κύματος. Η γραμμική προσαρμογή (linear fitting) που αναζητήθηκε στις περιπτώσεις των δύο μετρήσεων της μεθόδου οδηγεί σε απώλειες σύζευξης (coupling loss) στα 17.04dB στην περιοχή των 1550nm και 14.5dB στο μήκος κύματος 1534.6nm. Οι απώλειες διάδοσης προσδιορίζονται στα 3dB/cm και για τις δύο περιπτώσεις των μηκών κύματος. Ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2) και στις δύο περιπτώσεις μελέτης υπολογίστηκε ως εξής: $R^2=97.17\%$ για $\lambda=1534.6\text{nm}$ και $R^2=97.94\%$ για $\lambda=1550\text{nm}$ όπως αναμένεται. Οι υψηλές τιμές των συντελεστών (R^2) υποδηλώνουν την υψηλή ποιότητα κατασκευής των Si Rib κυματοδηγών και των Si δομών σύζευξης και παρέχουν τα διαπιστευτήρια ακρίβειας στην πειραματική διαδικασία για την πραγματοποίηση των μετρήσεων.



Εικόνα 20: Μετρήσεις προσδιορισμού απωλειών μέσω της cutback μεθόδου για δομές Rib Si κυματοδηγών εφοδιασμένους με συζεύκτες περίθλασης με περίοδο φράγματος $\Lambda=700\text{nm}$. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για $\lambda=1534.6\text{nm}$ και $\lambda=1550\text{nm}$.

Οι απώλειες σύζευξης (14.5dB για $\lambda=1534.6\text{nm}$) που εξάγονται από τη μέθοδο αυτή βρίσκονται σε αναντιστοιχία με τις μετρήσεις απωλειών που πραγματοποιήθηκαν για την εξαγωγή των συναρτήσεων μεταφοράς (~10dB για $\lambda=1534.6\text{nm}$). Η παρατήρηση αυτή υποδηλώνει πως οι επιπλέον απώλειες που εισάγονται στις μετρήσεις λόγω των ημικυκλικών τμημάτων (semicircular bends) - που χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθούν τα μεταβλητά μήκη στην οικογένεια των δειγμάτων κυματοδηγών [2.81] – πρέπει να ληφθούν υπόψη στη διόρθωση του σταθερού όρου στην εξίσωση απωλειών (απωλειών σύζευξης). Συνεπώς, για να απομακρύνουμε την παρουσία της επιπλέον απώλειας λόγω

των ημικυκλικών τμημάτων (bending losses), στον ευθύγραμμο Si κυματοδηγό μήκους 0.33cm αφαιρούμε τις απώλειες διάδοσης (3dB/cm όπως έχουν υπολογιστεί από τη μέθοδο) από το συνολικό φορτίο απωλειών από ίνα σε ίνα και προσδιορίζουμε εντέλει τις απώλειες σύζευξης (coupling loss). Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα αποτελέσματα που εξάγονται με την εφαρμογή της προσέγγισης για όλες τις διαθέσιμες δομές συζευκτών περίθλασης που αξιολογήθηκαν πειραματικά. Για τις δομές που εμφανίζουν βέλτιστη λειτουργία σε περιοχές σε μεγάλη φασματική απόσταση από την περιοχή των 1550nm, η επιπλέον πληροφορία για το φασματικό αυτό παράθυρο περιλαμβάνεται. Η δομή του συζεύκτη περίθλασης με περίοδο φράγματος $\Lambda=710\text{nm}$ εμφανίζει ελκυστική συμπεριφορά καθώς οι απώλειες σύζευξης υπολογίστηκαν να είναι της τάξης του 4.42dB. Το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος μετρήθηκε στα 38nm, τιμή η οποία αντιστοιχεί και στις περιοδικές δομές περίθλασης με περιόδους φραγμάτων $\Lambda=690\text{nm}$ και $\Lambda=700\text{nm}$ αντίστοιχα.

Ταυτότητα Δομής (Structure ID)	Περίοδος Si φράγματος (Grating Period) [nm]	Μήκος Si κυματοδηγού Rib-τύπου [cm]	Απώλειες από ίνα-σε-ίνα (Fiber-to-Fiber loss) [dB]	Απώλειες Σύζευξης (Coupling loss) [dB]	Μήκος Κύματος (Wavelength) [nm]
070_014	700	0.336	13.82	6.36	1550.043
070_014	700	0.336	11.44	5.18	1534.601
071_013	710	0.336	9.91	4.42	1550.025
069_014	690	0.336	25.92	12.41	1549.237
069_014	690	0.336	12.92	5.43	1510.198

Πίνακας 4: Σύνοψη των απωλειών σύζευξης για τους τρεις διαφορετικούς τύπους συζευκτών περίθλασης μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στους ευθύγραμμους κυματοδηγούς μήκους 0.336cm.

Ο Πίνακας 5 περιλαμβάνει τη σύνοψη των (state-of-the-art) διατάξεων που προσφέρουν την πιο ελκυστική απόδοση με βάση τις δομές που έχουν διαχυθεί στη βιβλιογραφία. Η σύνοψη περιλαμβάνει την αξιολόγηση της απόδοσης των συγκεκριμένων διατάξεων με κριτήριο τις χαμηλές απώλειες, την ευρυζωνική τους συμπεριφορά, το μικρό μέγεθος ολοκλήρωσης και την επιλεκτικότητα τους ως προς την πολωτική κατάσταση των οπτικών σημάτων. Η απόδοση των συγκεκριμένων δομών σύζευξης SOI (Silicon-on-Insulator – SOI) τεχνολογίας, καθιστούν τις συγκεκριμένες δομές ικανές να χρησιμοποιηθούν με αποδοτικό τρόπο για την επίτευξη διεπαφής του τσιπ με την οπτική ίνα και εν συνεχεία για την αποτελεσματική συσκευασία (packaging) της μητρικής πλατφόρμας [2.82,2.83]. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες δομές έχουν βελτιστοποιηθεί να λειτουργούν για τον TM (Transverse Magnetic – TM) πολωτικό ρυθμό καθώς προορίζονται να εφοδιάσουν παθητικές Si πλατφόρμες που θα φιλοξενήσουν ενεργούς πλασμονικούς κυματοδηγούς τεχνολογίας DLSPP [2.84] με σκοπό να αναπτυχθούν διατάξεις διακοπών με θερμο-οπτικό έλεγχο. Δομές συζευκτών περίθλασης με πανομοιότυπες απώλειες στους δύο πολωτικούς άξονες (TE, TM) έχουν επίσης πρόσφατα παρουσιαστεί [2.85]. Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τις δομές συζευκτών που αναφέρονται στη βιβλιογραφία προσφέροντας χαμηλές απώλειες σύζευξης από/προς

την ίνα. Οι χαμηλότερες απώλειες καταγράφονται για δομές συζευκτών περίθλασης που υποστηρίζουν τον πολωτικό ρυθμό TE (Transverse Electric – TE) και οι οποίες πειραματικά έχουν δειχθεί να είναι 1.6dB ανά δομή. Η συγκεκριμένη δομή επιπλέον παρέχει ένα πελώριο φασματικό εύρος λειτουργίας καθώς χαρακτηρίζεται από εύρος ημείσειας ισχύος 80nm. Δύο δομές έχουν σχεδιαστεί και αναπτυχθεί με σκοπό να μπορούν να υποστηρίξουν σύζευξη οπτικών σημάτων και στις δύο πολωτικές καταστάσεις (TE, TM).

Διάταξη	Αναφορά	Προδιαγραφές			
Διατάξεις SOI συζευκτών		Απώλειες Σύζευξης [dB]	Μέγεθος [πλάτος x μήκος]	Πολωτικός Ρυθμός	3-dB Φασματικό Εύρος Ζώνης [nm]
	[2.86]	-3.75	12μm πλάτος	TE	37.6
	[2.87]	-1.2	10.4μm πλάτος	TE	45
	[2.88]	-2.6	NA	TE	70
	[2.89]	-1.6	NA	TE	80
	[2.90]	-3.8	10x15μm ²	TE	68
	[2.91]	-2.8	12μm πλάτος	TE, TM	65
	[2.92]	-3.6 (TE) -4.1 (TM)	10x10μm ²	TE, TM	50
	[2.93]	-4.6	12x14.3μm ²	TE	83
	[2.94]	-1.6	10μm πλάτος	TE	40
	Παρούσα Διατριβή	-4.42	12μm πλάτος	TM	38

Πίνακας 5: Σύνοψη των δομών συζευκτών περίθλασης τεχνολογίας Silicon-on-Insulator (SOI) οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί προσφέροντας χαμηλές απώλειες.

2.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε η ανάπτυξη SOI νανο-κυματοδηγών που προορίζονται για να εφοδιάσουν την παθητική πλατφόρμα που θα φιλοξενήσει το πλασμονικό διακόπτη που βασίζεται σε ενεργούς DLSPP βραχίονες. Για το σκοπό αυτό, σχεδιάστηκαν SOI κυματοδηγοί Rib-τύπου που υποστηρίζουν τον TM ρυθμό πόλωσης. Επιλέχθηκε να υιοθετηθούν δομές Rib-τύπου για να διευκολυνθεί η εναπόθεση των μεταλλικών δομών που απαιτούνται στον έλεγχο των παθητικών δομών πολυπλεξίας (MUX) στα πλαίσια των αναγκών του ενεργού διακόπτη [2.37]. Οι δομές των κυματοδηγών έχουν διαστάσεις 400x340nm² με ένα λεπτό στρώμα Si (slab) πάχους 50nm και κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης (EBL). Οι απώλειες διάδοσης των κυματοδηγών μετρήθηκαν να είναι 2.49dB/cm.

Στη συνέχεια διερευνάται το πρόβλημα της σύζευξης ισχύος μεταξύ του παθητικού SOI κυκλώματος με την οπτική ίνα. Επιλέχθηκε η προσέγγιση της ανάπτυξης συζευκτών που βασίζονται σε φράγματα περίθλασης (Grating Couplers) οι οποίοι αναπτύχθηκαν σε πρώτη φάση υιοθετώντας ένα σύνολο παραμέτρων χωρίς την παρουσία κάποιου διηλεκτρικού (SOG) στην κορυφή της δομής. Οι μετρήσεις χαρακτηρισμού σε κατακόρυφη γωνία ίνας στις $\theta_z=1.8^\circ$ των δομών φάνέρωσαν υψηλή επιλεκτικότητα στον επιθυμητό πολωτικό ρυθμό (TM) με λόγο σύζευξης για το τσιπ μεταξύ των δύο κάθετων πολώσεων (PER) να μετρήθηκε στα 43dB. Οι φασματικές μετρήσεις έδειξαν μια τιμή για την ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) στα $\sim 60\text{nm}$ με ένα φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος στα $\sim 19\text{nm}$ επικυρώνοντας τα ευρυζωνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της δομής. Ωστόσο η επίδοση των απωλειών σύζευξης που μετρηθήκαν να είναι $>12\text{dB/συζεύκτη}$ καθιστούν μη πρακτική τη χρήση των δομών αυτών και απαιτείται βελτίωση στην επιλογή των παραμέτρων σχεδίασης και τη χρήση ενός διηλεκτρικού υλικού στην κορυφή της δομής.

Στην κατεύθυνση αυτή, παρουσιάστηκαν στην επόμενη ενότητα προτεινόμενες δομές TM συζευκτών περίθλασης εφοδιασμένες με διηλεκτρικό στρώμα SOG στην κορυφή του φράγματος περίθλασης. Για να αναζητηθεί η βέλτιστη δομή σύζευξης αλλά και να μελετηθεί η επίδραση σχεδιαστικών παραμέτρων των δομών αξιολογήθηκαν πειραματικά δομές με διαφορετικές περιόδους φράγματος ($\Lambda_1=690\text{nm}$, $\Lambda_2=700\text{nm}$ και $\Lambda_3=710\text{nm}$ αντίστοιχα) [2.80]. Για την επιλογή δομής συζεύκτη περίθλασης με περίοδο φράγματος ίση με $\Lambda=710\text{nm}$ η οποία έχει χαραχθεί στο σύνολο του κυματοδηγού (μέχρι την εμφάνιση του Si στρώματος των 50nm) μετρήθηκαν ιδιαίτερα χαμηλές απώλειες σύζευξης (4.42dB/συζεύκτη) ενώ οι μετρήσεις των απωλειών διάδοσης των κυματοδηγών του συνόλου των δειγμάτων (cutback section) μετρήθηκαν να είναι 2.9dB/cm για το συγκεκριμένο τύπο. Οι δομές αυτές εμφάνισαν ένα ευρύ παράθυρο λειτουργίας με 3-dB φασματικό εύρος ίσο με 38nm . Η επίδοση των δομών σύζευξης συγκρίνονται στη συνέχεια ως προς τις επιδόσεις τους σε μια σειρά από μετρικά επίδοσης με αντίστοιχες δομές της βιβλιογραφίας που εμφανίζουν επιθυμητά χαρακτηριστικά.

Οι συγκεκριμένες επιδόσεις καθιστούν τη συγκεκριμένη δομή κατάλληλη για την ανάπτυξη της SOI παθητικής πλατφόρμας καθώς διασφαλίζει τις χαμηλές απώλειες της Si πλατφόρμας που είναι επιθυμητό καθώς οι ενεργές DLSP δομές θα επιβαρύνουν το ισοζύγιο ισχύος λόγω των υψηλών απωλειών διάδοσης στους πλασμονικούς ρυθμούς [2.95]. Αν και εμφανίζεται με μικρότερη συχνότητα στη βιβλιογραφία, η ανάπτυξη συζευκτών περίθλασης που λειτουργούν για την TM πόλωση και SOI νανο-κυματοδηγών με χαμηλές απώλειες του επιτρέπουν την ετερο-ολοκλήρωση πλασμονικών δομών όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο για την υπόσχεση της ανάπτυξης πολύ μικρού μεγέθους, χαμηλής κατανάλωσης διακόπτες για μεταγωγή δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας.

Αναφορές 2^ο Κεφαλαίου

- [2.1] B. Jalali, M. Paniccia, and G. Reed, "Silicon photonics, " IEEE Microwave Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 58-68, June 2006.
- [2.2] S.-W. Hwang et al, "A Physically Transient Form of Silicon Electronics", Science Magazine, Vol. 337, No. 6102, pp. 1640-1644, September 2012.
- [2.3] B. Jalali and S. Fathpour, "Silicon photonics," J. Lightwave Technol. 24(12), 4600–4615 (2006).
- [2.4] M. Lipson, "Guiding, Modulating, and Emitting Light on Silicon—Challenges and Opportunities," IEEE Journal Lightwave Technology 23(12), 4222–4238 (2005).
- [2.5] R. A. Soref and J. P. Lorenzo, "Single-crystal silicon—A new material for 1.3 and 1.6 μm integrated-optical components," Electronics Letters 21(21), 953–955 (1985).
- [2.6] R. A. Soref and B. R. Bennett, "Electrooptical Effects in Silicon," IEEE Journal of Quantum Electronics 23(1), 123–129. (1987)
- [2.7] R. A. Soref and B. R. Bennett, "Kramers–Kronig analysis of electro-optical switching in silicon," Proc. SPIE Integrated Optical Circuit Engineering IV704, 32–37 (1987).
- [2.8] H. Subbaraman, X. Xu, A. Hosseini, X. Zhang, Y. Zhang, D. Kwong, and R.T. Chen, "Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects", OSA Optics Express, Vol.23, No.3, pp.2487-2510 (2015).
- [2.9] L. Tsybeskov, D.J. Lockwood, M. Ichikawa, "Silicon Photonics: CMOS Going Practical", Proceedings of the IEEE (Scanning the Issue), Vol.97, No.7, pp.1161-1165 (2009).
- [2.10] C. Kopp, "Silicon photonic technology development towards higher 2D and 3D integration level with microelectronics", presentation in Semicon Europa 2015, Dresden, Germany, 6-8 October 2015.
- [2.11] J. Orcutt, R.J. Ram, V. Stojanovic, "Integration of Silicon Photonics into Electronic Processes", in Proc. of SPIE Photonics West (Silicon Photonics VIII), Vol.8629, San Francisco, CA, USA (2013).
- [2.12] R. Soref, "The past, present, and future of silicon photonics, " IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electron., vol. 12, no. 6, pp. 1678-1687, Nov./Dec. 2006.
- [2.13] Y. A. Vlasov, "Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100G," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 2, pp. S67-S72, February 2012.
- [2.14] P. Dong, W. Qian, H. Liang, R. Shafiqi, X. Wang, D. Feng, G. Li, J. E. Cunningham, A. V. Krishnamoorthy, and M. Asghari, "1x4 reconfigurable demultiplexing filter based on free-standing silicon racetrack resonators, " Optics Express, vol. 18, no. 24, pp. 24504-24509, Nov. 2010.

- [2.15] Anita Sure, Thomas Dillon, Janusz Murakowski, Chunchen Lin, David Pustai, and Dennis Prather, "Fabrication and characterization of three dimensional silicon tapers, " *Optics Express*, Vol.11, pp. 3555-3561 (2003).
- [2.16] G. Roelkens, P. Dumon, W. Bogaerts, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Efficient silicon-on-insulator fiber coupler fabricated using 248-nm deep UV lithography, " *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.17, Issue 12, pp. 2613-2615 (2005).
- [2.17] K. P. Yap, B. Lamontagne, A. Delage, S. Janz, A. Bogdanov, M. Picard, et al., "Fabrication of lithographically defined optical coupling facets for silicon-on-insulator waveguides by inductively coupled plasma etching, " *Journal of Vacuum Science Technology A*, Vol. 24, No. 3, pp. 812 – 816, May 2006.
- [2.18] W. S. Zaoui, A. Kinze, W. Vogel, M. Berroth, J. Butschke, F. Letzkus, and J. Burghartz, "Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits, " *Optics Express* vol. 22, no. 2, pp. 1277 – 1286, Jan. 2014.
- [2.19] L. Vivien, D. Pascal, S. Lardenois, D. Marris-Morini, E. Cassan, F. Grillot, et al., "Light injection in SOI micro waveguides using high efficiency grating couplers, " *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 10, pp. 3810 – 3815, Oct. 2006.
- [2.20] F. Van Laere, T. Claes, J. Schrauwen, S. Scheerlinck, W. Bogaerts, D. Taillaert, "Compact focusing grating couplers for silicon-on-insulator integrated circuits, " *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 23, pp. 1919-1921 (2007).
- [2.21] A. E. Lim, J. Song, Q. Fang, C. Li, X. Tu, N. Duan, K. K. Chen, R. P. Tern, and T.-Y. Liow, "Review of silicon photonics foundry efforts", *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, Vol. 20, no. 4, July 2014.
- [2.22] P. Cheben, P. J. Bock, J. H. Schmid, J. Lapointe, S. Janz, D. Xu, et al., "Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers, " *Optics Letters*, vol. 35, no. 15, pp. 2526 - 2528, Aug. 2010.
- [2.23] L. Zimmermann, T. Tekin, H. Schroeder, P. Dumon, and W. Bogaerts, "How to bring Nanophotonics to application - silicon photonics packaging," *IEEE LEOS Newsletter* December 2008, pp. 4–14, 2008.
- [2.24] Timo Aalto et al, "Integration of InP-based optoelectronics with silicon waveguides", Invited Paper, *Proc. of SPIE Photonics West*, 2009 Vol.7218, paper 721800-1, 24-29 January 2009, San Jose, CA, USA.
- [2.25] G.-H. Duan et al, "Hybrid Integration of III-V on Silicon Lasers for Photonic Integrated Circuits on Silicon", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.20, Issue 4, pp. 1077-1093 (2014).
- [2.26] D. Liang and J.E. Bowers, "Photonic integration: Si or InP substrates?", *IET Electronic Letters*, Vol.45, No.12, pp.578-581 (2009).
- [2.27] L. Carroll, D. Gerace, I. Cristiani, S. Menezo, and L.C. Andreani, "Broad parameter optimization of polarization-diversity 2D grating couplers for silicon photonics", *Optics Express*, Vol.21, No.18, pp.21556-21568 (2013).

- [2.28] R. Baets, "Silicon passive and active nanophotonic devices and circuits", CFN summer school Bad Herrenalb, August 22-25 2008.
- [2.29] Εμπορικά διαθέσιμος ρυθμιστής X-Y-Z, MDE122, διαθέσιμος on-line: <http://www.elliotscientific.com/pdf/EMCatalogue.pdf>
- [2.30] Εμπορικά διαθέσιμος ρυθμιστής θy-θz, MDE185, διαθέσιμος on-line: <http://www.elliotscientific.com/pdf/EMCatalogue.pdf>
- [2.31] H. Najafi and K.A. Woodbury, "Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells," Elsevier Solar Energy, Vol. 91, pp.152-160 (2013).
- [2.32] Taylor, R.A., Solbrekken, G., "Comprehensive system-level optimization of thermoelectric devices for electronic cooling applications", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 31, Issue: 1, pp. 23-31 (2008).
- [2.33] P. Kozodoy et al, "Thermal effects in Monolithically Integrated Tunable Laser Transmitters", Proc. of 20th IEEE STMMS Ann. Symposium, San Jose, (2004).
- [2.34] McGee Thomas, "Chapter 9", "Principles and Methods of Temperature Measurement", John Wiley & Sons, pp.203 (1988).
- [2.35] B. Dhoedt et al., "Optically interconnected integrated circuits to solve the CMOS interconnect problem", 48th IEEE Electronic Components&Amplifiers Technology Conference, 6102953, 25-28 May 1998, Seattle, WA, USA
- [2.36] Jens Bolten, Thorsten Wahlbrink, Namil Koo, Heinrich Kurz, Stefan Stammberger, Uli Hofmann , Nezih Ünal, "Improved CD control and line edge roughness in E-beam lithography through combining proximity effect correction with gray scale techniques", Microelectronic Engineering 87, pp. 1041–1043 (2010).
- [2.37] N. Pleros, K. Vysokinos, S. Papaioannou, D. Fitsios, O. Tsilipakos, A. Pitolakis, E. Kriezis, A. Milliou, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, D. Kalavrouziotis, G. Giannoulis, H. Avramopoulos, N. Djellali, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, J. Gosciniaç and S. Bozhevolnyi, "Tb/s Switching Fabrics for Optical Interconnects Using Heterointegration of Plasmonics and Silicon Photonics: The FP7 PLATON Approach", 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, TuH2, Denver, Colorado, USA, November 2010.
- [2.38] S. Papaioannou, G. Dabos, K. Vysokinos, G. Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Eight-Channel Second-Order Ring Resonator based SOI Multiplexers/Demultiplexers for Optical Interconnects", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2014), paper P2.7, 21-25 September 2014. Cannes, France.
- [2.39] S. Papaioannou, D.Fitsios, G. Dabos, K. Vysokinos, G. Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros "On-Chip Dual-Stream DWDM Eight-Channel-Capable SOI Based MUXs/DeMUXs with 40-GHz Channel Bandwidth", IEEE Photonics Journal, Vol.7, Issue 1, 7900210 (2015).

- [2.40] A. Masood et al, "Comparison of heater architectures for thermal control of silicon photonic circuits", IEEE 10th International Conference on Group IV Photonics, paper ThC2, Seoul, South Korea, 28-30 August 2013.
- [2.41] A.Prinzen, M. Waldow, and H. Kurz, "Fabrication tolerances of SOI based directional couplers and ring resonators", Optics Express, Vol.21, No.14, pp. 17212-17220 (2013).
- [2.42] A.Prinzen, J.Bolten, M.Waldow, and H.Kurz, "Study on fabrication tolerances on SOI based directional couplers and ring resonators", Vol.121, pp. 51-54 (2014).
- [2.43] Y. Urino, Y. Noguchi, M. Noguchi, M. Imai, M. Yamagishi, S. Saitou, N. Hirayama, M. Takahashi, H. Takahashi, E. Saito, M. Okano, T. Shimizu, N. Hatori, M. Ishizaka, T. Yamamoto, T. Baba, T. Akagawa, S. Akiyama, T. Usuki, D. Okamoto, M. Miura, J. Fujikata, D. Shimura, H. Okayama, H. Yaegashi, T. Tsuchizawa, K. Yamada, M. Mori, T. Horikawa, T. Nakamura, and Y. Arakawa, "First Demonstration of high density optical interconnects integrated with lasers, optical splitters, optical modulators and photodetectors on a single silicon substrate, " Optics Express 19(26), B159–B165 (2012).
- [2.44] Y. Urino, Y. Noguchi, M. Noguchi, M. Imai, M. Yamagishi, S. Saitou, N. Hirayama, M. Takahashi, H. Takahashi, E. Saito, M. Okano, T. Shimizu, N. Hatori, M. Ishizaka, T. Yamamoto, T. Baba, T. Akagawa, S. Akiyama, T. Usuki, D. Okamoto, M. Miura, J. Fujikata, D. Shimura, H. Okayama, H. Yaegashi, T. Tsuchizawa, K. Yamada, M. Mori, T. Horikawa, T. Nakamura, and Y. Arakawa, "Demonstration of 12.5-Gb/s optical interconnects integrated with lasers, optical splitters, optical modulators and photodetectors on a single silicon substrate, " Optics Express 20(26), B256–B263 (2012).
- [2.45] I. Flader, Y.Chen, "Variable Trench Optimization for DRIE of SOI in PT-DSE", EE412 Final Report, Stanford Fab Project Courses, Spring 2015.
- [2.46] T. Tsuchizawa, T. Watanabe, E. Tamechika, T. Shoji, K. Yamada, J. Takahashi, S. Uchiyama, S. Itabashi and H. Morita, "Fabrication and evaluation of submicron-square Si wire waveguides with spot-size converters", Paper TuU2 presented at LEOS Annual Meeting, p.287, Glasgow, UK (2002).
- [2.47] P. K. Tien, "Light waves in thin films and integrated optics," Appl. Opt., 10, 2395 (1971).
- [2.48] D. Marcuse, "Mode conversion caused by surface imperfections of a dielectric slab waveguide," Bell Syst. Tech. J. 48, 3187 (1969).
- [2.49] F. P. Payne and J. P. R. Lacey, "A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides," Opt. Quantum Electron. 26,977(1994).
- [2.50] Y.A. Vlasov and S.J.McNab, "Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends", Optics Express, Vol.12, No.8, pp.1622-1631 (2004).
- [2.51] D. Thomson et al., "Roadmap on silicon photonics", Chapter 7-Packaging of silicon photonic devices, Journal of Optics 18 (2016) 073003 (20pp).
- [2.52] B. B. Bakir, A. Vazquez de Gyves, R. Orobtcouk, P. Lyan, C. Porzier, A. Roman, and J.-M. Fedeli, "Low-Loss (<1dB) and Polarization- Insensitive Edge Fiber Couplers Fabricated on 200-mm Silicon-on-Insulator Wafers," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 22, pp.739-741 (2010).

- [2.53] D. Vermeulen, S. Selvaraja, P. Verheyen, G. Lepage, W. Bogaerts, P. Absil, D. Van Thourhout, and G. Roelkens, "High-efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform," *Opt. Express*, vol. 18, pp. 18278–18283 (2010).
- [2.54] Shaimaa Mahdi et al, "Facet Preparation of Silicon Nano-Waveguides by Cleaving the SOI Chip", *J. Nonlinear Optic. Phys. Mat.* 20,509(2011).
- [2.55] L. Vivien, S. Laval, E. Cassan, L. Roux, and D. Pascal, "2-D taper for low-loss coupling between polarization-insensitive micro-waveguides and single-mode optical fibers," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 21, pp. 2429–2433, 2003
- [2.56] K. Ogawa et al, "A theoretical analysis of etched grating couplers for integrated optics", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 9, Issue 1, pp. 29-42 (1973).
- [2.57] C.C. Ghizoni, B.-U. Chen, C. Tang, "Theory and experiments on grating couplers for thin-film waveguides," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.12, Issue 2, pp. 69-73 (1976).
- [2.58] J. H. Harris, R. K. Winn and D. G. Dalgoutte, "Theory and design of periodic couplers", *Journal of Applied Optics*, Vol. 11, pp.2234 -2241(1972).
- [2.59] A. Jacques and D. B. Ostrowsky, "The grating coupler: Comparison of theoretical and experimental results", *Elsevier Optics Communications*, vol. 13, pp.74 -77 (1975).
- [2.60] S. T. Peng, T. Tamir and H. L. Bertoni, "Theory of periodic dielectric waveguides", *IEEE Transactions of Microwave Theory Technology*, vol. MTT-23, pp.123 -133 (1975).
- [2.61] E. G. Loewen and E. Popov, "Diffraction gratings and applications", *Marcel Dekker Inc.*, 1997.
- [2.62] T. A. Berkoff and A. D. Kersey, "Fiber Bragg grating array sensor system using a bandpass wavelength division multiplexer and interferometric detection", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp.1522 -1524 (1996).
- [2.63] X. Wei et al, "Grating couplers on porous silicon planar waveguides for sensing applications", *Journal of Applied Physics*, 104, 123113 (2008).
- [2.64] J. Zheng et al, "A novel sampling Bragg Grating for DFB laser", in *Proc. of 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2013)*, 26-28 July 2013, Chengdu, China.
- [2.65] W.H. Chung et al, "Frequency stabilization of DBR fiber grating laser using interferometric technique", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.13, Issue 9, pp. 951-953 (2002).
- [2.66] Roman Bruck, Rainer Hainberger, "Efficiency enhancement of grating couplers for single-mode polymer waveguides through high index coatings", *European Conference on Integrated Optics (ECIO) 2008*, ThP07, Eindhoven, Netherlands, June 11-13, 2008.
- [2.67] D. Lauvernier et al, "Realization of sub-micron patterns on GaAs using a HSQ etching mask", *Elsevier Microelectronic Engineering*, Vol. 77, Issues 3-4, pp. 210-216 (2005).

- [2.68] H. Hashiguchi et al, "Temporary spin-on-glass bonding technologies for via-last/backside-via 3D integration using multichip self-assembly", in Proc. of 6th IEEE Electronic Components and Technology Conference (IEEE ECTC'14), pp. 856-861, 27-30 May 2014, Orlando, FL, USA.
- [2.69] R. Liu, M. Vasile and D. Beebe, "The Fabrication on Non-planar Spin-on Glass Microstructures", Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 8, no. 2, pp.146 -151 (1999).
- [2.70] J. Cardenas et al, "High Coupling Efficiency Etched Facet Tapers in Silicon Waveguides", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.26, No.23, pp. 2380-2382 (2014).
- [2.71] <http://www.santec.com/en/products/instruments/tunablelaser/tsl-510>
- [2.72] D. Taillaert et al, "A Compact Two-Dimensional Grating Coupler Used as a Polarization Splitter", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.15, No.9, pp. 1249-1251 (2003).
- [2.73] A. Ghatak and K. Thyagarajan. Introduction to Fiber Optics, pages 413– 416. Cambridge University Press, New York, 1998.
- [2.74] D. B. Keck and R. Tynes, "Spectral response of low-loss optical waveguides, " Journal of Applied Optics 11(7), 1502–1506 (1972).
- [2.75] A. Rickman, G.T. Reed, B.L. Weiss, F. Namavar, "Low-loss planar optical waveguides fabricated in SIMOX material", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 4, Issue 6, pp. 633-635 (1992).
- [2.76] M. Moresco et al, "Method for characterization of Si waveguide propagation loss", Optics Express, Vol. 21, Issue 5, pp. 5391-5400 (2013).
- [2.77] Q.Lin, O.J. Painter, and G.P. Agrawal, "Nonlinear optical phenomena in silicon waveguides: Modeling and applications", Optics Express, Vol. 15, No.25, pp. 16604-16644 (2007).
- [2.78] Jens Bolten, Thorsten Wahlbrink, Mathias Schmidt, Heinrich D.B. Gottlob, Heinrich Kurz, "Implementation of electron beam grey scale lithography and proximity effect correction for silicon nanowire device fabrication", Microelectronic Engineering 88 (2011) 1910–1912.
- [2.79] J.H. Lee, O.K Jung, C.H. Kim, Y.C. Chung, "OSNR monitoring technique using polarization-nulling method", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.13, Issue 1, pp.88-90 (2001).
- [2.80] O. Gili de Villasante, P. Tcheg, B. Wang, A. Suna, G. Giannoulis, I. Lazarou, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, N. Pleros, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, "Design, fabrication, and characterisation of fully etched TM grating coupler for photonic integrated system-in-package", in Proceedings of SPIE Photonics Europe 2012, 8431-15, Brussels, Belgium, 15-19 April 2012.
- [2.81] J. Cardenas et al, "Low loss etchless silicon photonic waveguides", Optics Express, Vol. 17, No.6, pp. 4752-4757 (2009).
- [2.82] T. Tekin "Review of Packaging of Optoelectronic, Photonic, and MEMS Components," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol.17, no.3, pp.704-719 (2011).

- [2.83] T. Tekin, M.Töpper, H. Reichl., "PICSiP: New System-in-Package Technology Using A High Bandwidth Photonic Interconnection Layer For Converged Microsystems", Proc. SPIE, 2009, Vol.7366, 736618.
- [2.84] J. Grandidier et al, "Surface Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides: Figures of merit and mode characterization by image and Fourier plane leakage microscopy", Physical Review B 78, 245419 (2008).
- [2.85] X. Chen and H. K. Tsang, "Polarization-independent grating couplers for silicon-on-insulator nanophotonic waveguides," Optics Letters Vol. 36, pp.796-798 (2011).
- [2.86] Z. Liang et al, "A novel highly efficient grating coupler with large filling factor used for optoelectronic integration", Chinese Physics B, Vol.19, No.12, pp. 4214-4218 (2010).
- [2.87] X. Chen et al, "Apodized Waveguide Grating Couplers for Efficient Coupling to Optical Fibers", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, Issue 15, pp. 1156-1158 (2010).
- [2.88] Y. Tang et al, "High Efficiency Nonuniform Grating Coupler by Utilizing the Lag Effect in the Dry Etching Process", in Proc. of Optical Fiber Communication Conference (OFC 2010), paper OWJ6, San Diego, CA, USA, 2010.
- [2.89] D. Vermeulen et al, "High efficiency fiber-to-chip grating couplers realized using an advanced CMOS-compatible Silicon-On-Insulator platform", Optics Express, Vol. 18, Issue 17, pp. 18278-18283 (2010).
- [2.90] L. Liu et al, "High-efficiency, large-bandwidth silicon-on-insulator grating coupler based on a fully-etched photonic crystal structure", Applied Physics Letters 96, 051126 (2010).
- [2.91] Z. Wang et al, "Experimental Demonstration of a High Efficiency Polarization Splitter Based on a One-Dimensional Grating With a Bragg Reflector Underneath", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.22, Issue 21, pp.1568-1570 (2010).
- [2.92] J. Bolten et al, "CMOS compatible cost-efficient fabrication of SOI grating couplers", Elsevier Microelectronic Engineering, Vol. 86, Issues 4-6, pp. 1114-1116 (2009).
- [2.93] M. Antelius et al, "An apodized SOI waveguide-to-fiber surface grating coupler for single lithography silicon photonics", Optics Express, Vol. 19, Issue 4, pp. 3592-3598 (2011).
- [2.94] F. V. Laere et al, "Compact and Highly Efficient Grating Couplers Between Optical Fiber and Nanophotonic Waveguides", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 25, Issue 1, pp. 151-156 (2007).
- [2.95] Grandidier, G.C. de Francs, S. Massenot, A.Bouhelier, L. Markey, J.-C. Weeber, C. Finot, and A. Dereux, "Gain-Assisted Propagation in a Plasmonic Waveguide at Telecom Wavelength", Nano Letters, 9(8), pp.2935-2939 (2009).

3. Ανάπτυξη δομών DLSPP κυματοδηγών ετερο-ολοκληρωμένων στην Si πλατφόρμα

Η τεχνολογία των DLSPP (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polaritons – DLSPP) κυματοδηγών αποσπά τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερη προσοχή προερχόμενη από τη σκοπιά πρακτικής υλοποίησης συγκεκριμένων διατάξεων μέσω ευρέως διαδεδομένων βιομηχανικών τεχνικών λιθογραφίας [3.1]. Οι διατάξεις βασισμένες σε DLSPP κυματοδηγούς προσφέρουν μια ελκυστική ισορροπία μεταξύ περιορισμού διάδοσης σε κλίμακα διαστάσεων μικρότερη από το μήκος κύματος (subwavelength confinement) [3.2,3.3] και απωλειών διάδοσης που οφείλονται στις ωμικές απώλειες λόγω της παρουσίας της μεταλλικής επιφάνειας [3.4]. Επιπλέον, αυτός ο τύπος κυματοδηγού επιτρέπει τον έλεγχο πλασμονικών σημάτων που κυματοδηγούνται μέσω της μεταβολής των χαρακτηριστικών του διηλεκτρικού (πχ μέσω θερμο-οπτικού φαινομένου) [3.5,3.6]. Η δυνατότητα αυτή έχει ανοίξει διάπλατα το δρόμο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας των DLSPP κυματοδηγών η οποία έχει αναπτυχθεί τόσο σε επίπεδο σχεδιασμού και κατασκευής της δομής DLSPP κυματοδηγών [3.7,3.8] όσο και της ανάπτυξης σύνθετων παθητικών δομών [3.9]. Η ανάπτυξη πλασμονικών διατάξεων συμβατών με τη CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) διαδικασία που έχει ωριμάσει και έχει παγιωθεί στον κόσμο των ηλεκτρονικών μπορεί να ανοίξει περαιτέρω δυνατότητες για τη μελλοντική ανάπτυξη DLSPP κυματοδηγών [3.10,3.11].

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τις μετρήσεις χαρακτηρισμού για τον πλασμονικό κυματοδηγό ο οποίος είναι ετερο-ολοκληρωμένος στην παθητική πλατφόρμα Si. Οι λόγοι που επιλέγεται να φιλοξενηθούν οι DLSPP κυματοδηγοί σε παθητική πλατφόρμα Si είναι οι ακόλουθοι: (α) Οι Rib κυματοδηγοί τεχνολογίας Si επιλέγονται ως γραμμές μετάδοσης πληροφορίας (transmission line) καθώς χαρακτηρίζονται από μικρές απώλειες (~3dB/cm) συγκριτικά με τους DLSPP κυματοδηγούς. (β) Η διεπαφή του φωτονικού ολοκληρωμένου κυκλώματος (Photonic Integrated Circuit – PIC) είναι δυνατή μέσω της ανάπτυξης silicon TM (Transverse Magnetic – TM) συζευκτών φραγμάτων περίθλασης (Grating Couplers) διευκολύνοντας την αξιολόγηση των δομών καθώς και την τελική διαδικασία της συσκευασίας της δομής (packaging), που αποτελεί ιδιαίτερα κρίσιμη διαδικασία [3.12-3.14]. (γ) Ο συνολικός σχεδιασμός της υβριδικής πλατφόρμας μεταγωγής προορίζει την ανάπτυξη παθητικών στοιχείων σε Si τεχνολογία και την ανάπτυξη ενεργών στοιχείων μέσω DLSPP κυματοδηγών για να μειωθεί δραστικά η ενεργειακή κατανάλωση αξιοποιώντας τα συγκριτικά πλεονεκτήματα κάθε τεχνολογίας ολοκλήρωσης.

Η παραπάνω προσέγγιση έχει αναδειχθεί σε δημοσιευμένες εργασίες [3.15,3.16] όπου το πλεονέκτημα της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης των ενεργών DLSPP διατάξεων αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην ετερο-ολοκλήρωση με μια υψηλής λειτουργικότητας παθητική Si για την επίτευξη λειτουργιών στην περιοχή των οπτικών διεπαφών (Optical Interconnects). Η ελκυστική ενεργειακή απόδοση χαμηλής κατανάλωσης των DLSPP διατάξεων προέρχεται από την ιδιότητα των DLSPP διατάξεων

να κυματοδηγούν με ισχυρό παράγοντα περιορισμού (strong confinement factor), και να εμφανίζουν το μεγαλύτερο μέτρο της ηλεκτρικής έντασης στη διαχωριστική επιφάνεια με το μεταλλικό στρώμα [3.17]. Το χαρακτηριστικό κυματοδήγησης αυτό μας παρέχει τη δυνατότητα να ελέγξουμε τη διάδοση των σημάτων με χαμηλής ισχύος σήματα ελέγχου (control signals) που οδηγούν σε χαμηλής θερμική διάχυση στην περιοχή των κυματοδηγών [3.18,3.19]. Η εφαρμογή της παραπάνω προσέγγισης για τον θερμο-οπτικό έλεγχο DLSPP κυματοδηγών έχει ήδη προταθεί και μελετηθεί θεωρητικά στην περίπτωση θερμο-οπτικά ελεγχόμενων ολοκληρωμένων μικρο-δακτυλίων (thermally tuned microring resonators) που βασίζονται σε χρήση DLSPP κυματοδηγών [3.20]. Στη συγκεκριμένη μελέτη, χαμηλές τιμές ηλεκτρικού ρεύματος υπολογίστηκαν να απαιτούνται για την αποτελεσματική θερμο-οπτική μετατόπιση των DLSPP μικρο-δακτυλίων αναδεικνύοντας το συγκεκριμένο πλεονέκτημα των DLSPP δομών. Συνοψίζοντας, η διεϊσδυση των DLSPP ενεργών δομών αξιοποιώντας τα έμφυτα πλεονεκτήματα του μικρού μεγέθους (μικρό κλίμακας) και της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης ανοίγουν τον δρόμο στη συγκεκριμένη τεχνολογία να απαντήσει στις προκλήσεις που αναπτύσσονται στο πεδίο των ταχέως αναπτυσσόμενων οπτικών διεπαφών (optical interconnects) [3.21-3.23].

Ενώ τα διαπιστευτήρια του μικρού μεγέθους των δομών έχουν αποδοθεί μέσα από πειραματικές επιδείξεις DLSPP δομών [3.24,3.25] και η ικανότητα τους να λειτουργούν σαν ενεργά στοιχεία μεταγωγής προσφέροντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας [3.26] έχει εκτενώς διερευνηθεί θεωρητικά, η πειραματική διερεύνηση της ικανότητας της πλατφόρμας των DLSPP κυματοδηγών να μεταφέρουν δεδομένα πληροφορίας διατηρώντας την ποιότητα τους έχει παρουσιαστεί πιο συγκρατημένα στη βιβλιογραφία. Μεταξύ των λιγοστών εργασιών που έχουν αναφερθεί στη συγκεκριμένη περιοχή, για διάφορους τύπους πλασμονικών κυματοδηγών: μετάδοση πληροφορίας στα 40 Gb/s μέσω LRSPP κυματοδηγών (Long Range Surface Plasmon Polariton – LRSPP) [3.27].

Στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου της διατριβής παρουσιάζεται η επισκόπηση της θεωρίας και των αρχών που διέπουν τη λειτουργία των DLSPP κυματοδηγών. Η προσέγγιση του πλευρικού περιορισμού (lateral confinement) του SPP ρυθμού μέσω της χρήσης διηλεκτρικής λωρίδας φόρτισης (dielectric loading) στην κορυφή του μεταλλικού φύλλου του πλασμονικού κυματοδηγού παρουσιάζεται αναλυτικά. Η περίπτωση της μελέτης των DLSPP κυματοδηγών με διηλεκτρική φόρτιση PMMA και της ετερο-ολοκλήρωσης τους σε SOI παθητική πλατφόρμα περιγράφεται στη συνέχεια εστιάζοντας στη δυνατότητα για τη διασύνδεση τους με την Si παθητική πλατφόρμα επιτυγχάνοντας τις ελάχιστες δυνατές απώλειες. Η παρουσίαση των αριθμητικών αποτελεσμάτων (numerical results) από την ερευνητική ομάδα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) που στοχεύει στην επίτευξη της ελάχιστης δυνατής απώλειας Si-to-DLSPP διασύνδεσης συνοδεύεται από σύνολο πειραματικών μετρήσεων των απωλειών. Η ενότητα που περιλαμβάνει την αξιολόγηση της μετάδοσης ρευμάτων πληροφορίας ακολουθεί με την αρχική διερεύνηση της ικανότητας των DLSPP κυματοδηγών να διαδίδουν αξιόπιστα μεγάλο εύρος ζώνης πληροφορίας. Η αξιολόγηση της ικανότητας

μεταφοράς πληροφορίας μέσω DLSPP κυματοδηγών διενεργείται στις παρακάτω παραγράφους μέσω πειραμάτων μετάδοσης πληροφορίας ταχύτητας 10 Gb/s και στη συνέχεια στα 160 Gb/s κάνοντας χρήση της τεχνικής της οπτικής πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου OTDM (Optical Time Domain Multiplexing – OTDM).

3.1 Ο πλευρικός περιορισμός των SPP ρυθμών μέσω της χρήσης διηλεκτρικών λωρίδων

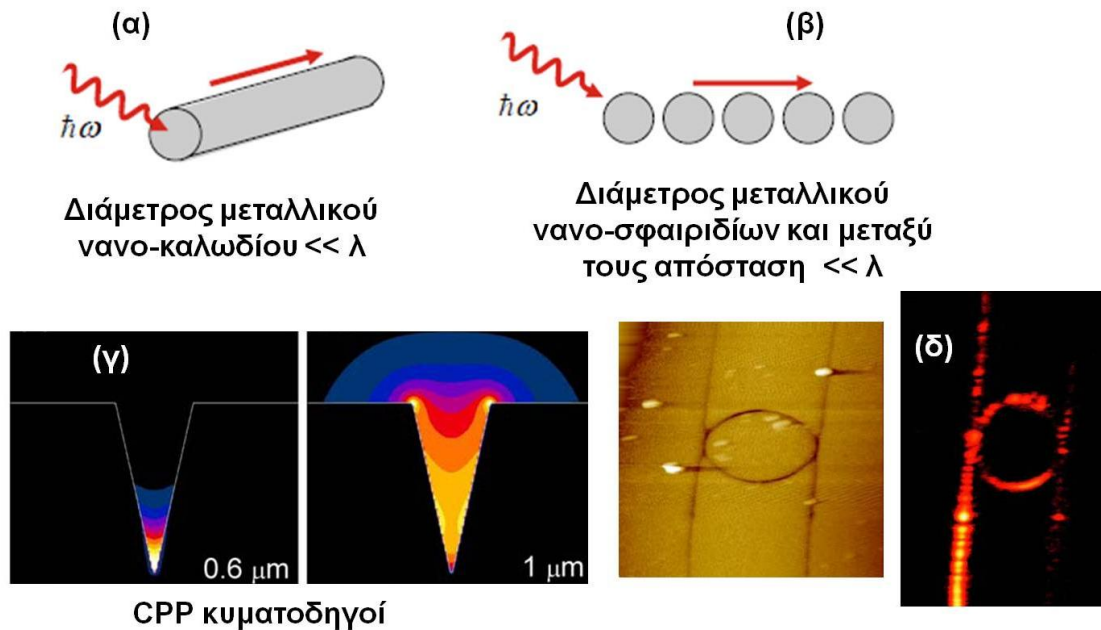
Στην παρούσα ενότητα θα αναπτυχθεί το βασικό πλαίσιο αρχών που διέπει την αρχή κυματοδήγησης αλλά και χαρακτηρίζει τους πλασμονικούς κυματοδηγούς διηλεκτρικής λωρίδας (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polaritons Waveguides – DLSPP WGs). Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου περιγράφεται η πρόκληση του πλευρικού περιορισμού του SPP ρυθμού για την επίτευξη λειτουργικών πλασμονικών κυματοδηγών που θα εφοδιάσουν σύνθετες παθητικές ολοκληρωμένες δομές και παρουσιάζονται οι βασικές προσεγγίσεις που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Στη δεύτερη ενότητα εισάγεται το σχήμα του πλασμονικού κυματοδηγού με διηλεκτρική λωρίδα (DLSPP WG) με τις αρχές λειτουργίας του.

3.1.1 Η ανάγκη του πλευρικού περιορισμού του SPP ρυθμού για την υπόσχεση λειτουργικών ολοκληρωμένων δομών

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στην εισαγωγή της διατριβής, οι πλασμονικοί ρυθμοί επιτρέπουν τη σύζευξη του φωτός ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τις συγκεντρωμένες ταλαντώσεις φορέων του μετάλλου και να διαδίδονται κατά μήκος της διεπιφάνειας του μετάλλου και του διηλεκτρικού μέσου [3.28]. Το τελευταίο χαρακτηριστικό των SPP (Surface Plasmon Polariton – SPP) ρυθμών κατατάσσει τις ιδιότητες τους σε μία υβριδική κατηγορία που περιλαμβάνει χαρακτηριστικά της διάδοσης σε διηλεκτρικό μέσο αλλά και σε μέταλλο. Τυπικά, οι SPP ρυθμοί είναι περιορισμένοι στη διεπαφή μετάλλου και διηλεκτρικού καθώς διεισδύουν ~100nm στο διηλεκτρικό και ~10nm στο μέταλλο, ιδιότητα η οποία καθιστά τους SPP ρυθμούς ελκυστικό σχήμα μεταφοράς δεδομένων για την υλοποίηση οπτικών διεπαφών και φωτονικών κυκλωμάτων [3.29]. Η πρόκληση σε αυτήν την αποστολή των SPP ρυθμών παραμένει είναι ο περιορισμός του διαδιδόμενου πλασμονικού πεδιακού ρυθμού σε μία τομή επιπέδου (cross section) κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης. Τα πλεονεκτήματα της επίτευξης του πλευρικού αυτού περιορισμού είναι προφανή καθώς είναι εφικτή η αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης (integration density) των πλασμονικών δομών και είναι εφικτή η διαπίστωση κάμψεων με υποφερτές απώλειες. Οι τελευταίες δομές είναι απαραίτητες για να διαπιστωθούν παθητικές δομές (passive circuitries) οι οποίες προορίζονται για την υλοποίηση κρίσιμων δομικών στοιχείων στην ανάπτυξη πιο σύνθετων κυκλωμάτων όπως είναι οι S-κάμψεις (S-bends), συζεύκτες ισχύος (splitters) και συμβολόμετρα Mach-Zehnder (MZIs) [3.30].

Στην αναζήτηση λύσεων που μπορούν να εγγυηθούν τον πλευρικό περιορισμό (lateral confinement) των SPP ρυθμών η πρώτη προσέγγιση θα μπορούσε να ήταν η επιδίωξη της απευθείας μείωσης του πλάτους της μεταλλικής λωρίδας που υποστηρίζει τον SPP ρυθμό (Εικόνα 1(α)). Ωστόσο, η συνθήκη αυτή του περιορισμού του πλάτους της μεταλλικής λωρίδας οδηγεί σε δραστική αύξηση των απωλειών που εμφανίζονται λόγω των σκεδάσεων στα όρια των μεταλλικών φύλλων των κυματοδηγών. Έχει επιδειχθεί στη βιβλιογραφία μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, η υποστήριξη ισχυρά εντοπισμένων SPP ρυθμών σε μεταλλικές ράβδους (metal rods) διαστάσεων σε nm-κλίμακα που υποστηρίζουν τη διάδοσή τους σε μερικές εκατοντάδες nm [3.31]. Συνεπώς, ο περιορισμός του SPP ρυθμού εμφανίζεται με το κόστος των ισχυρότατων απωλειών διάδοσης καθιστώντας μη πρακτικές τις συγκεκριμένες δομές. Το ίδιο κόστος των ισχυρών απωλειών εμφανίζεται και στην περίπτωση των SPP κυματοδηγών που αξιοποιούν αλυσίδες μεταλλικών νανοσφαιριδίων με πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1(β) [3.32].

Επιπλέον έχει προταθεί στη βιβλιογραφία μεγάλος αριθμός προσεγγίσεων που επιχειρούν να φυλακίσουν πλευρικά τους SPP ρυθμούς με πιο διαδεδομένη την τεχνική των CPPs (Channel Plasmon Polaritons - CPPs) στην οποία η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι συγκεντρωμένη στο βάθος κοιλοτήτων V-σχήματος (V-shaped grooves) όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 1(γ). [3.33]. Οι πειραματικές επιδείξεις της συγκεκριμένης δομής SPP κυματοδηγών επέδειξαν περιορισμό σε κλίμακα μικρότερη του μήκους κύματος (subwavelength confinement) και μέτριες απώλειες διάδοσης [3.34], καθιστώντας εφικτή τη δυνατότητα ολοκλήρωσης σύνθετων παθητικών δομών [3.35]. Η Εικόνα 1(δ) δείχνει τη δομή ενός πολυπλέκτη (Add-Drop Multiplexer) που βασίζεται σε πλασμονικούς CPP κυματοδηγούς και την επιτυχή του λειτουργία όπως αποδεικνύει η εικόνα του SNOM (Scanning Near-Field Microscopy) με τον ισχυρό εντοπισμό του πεδίου του πλασμονικού ρυθμού. Πρέπει να σημειωθεί πως οι παραπάνω τεχνικές επιχειρούν να δώσουν απάντηση στον πλευρικό περιορισμό του SPP ρυθμού περιορίζοντας τη χωρική παρουσία του SPP ρυθμού στο διηλεκτρικό μέσο αυξάνοντας ως εκ τούτου την ποσότητα της ισχύος που απορροφάται από το μέταλλο. Συνεπώς εμφανίζεται ένας συμβιβασμός του πλευρικού περιορισμού του SPP ρυθμού που επιτυγχάνεται με το κόστος των υψηλών απωλειών διάδοσης.

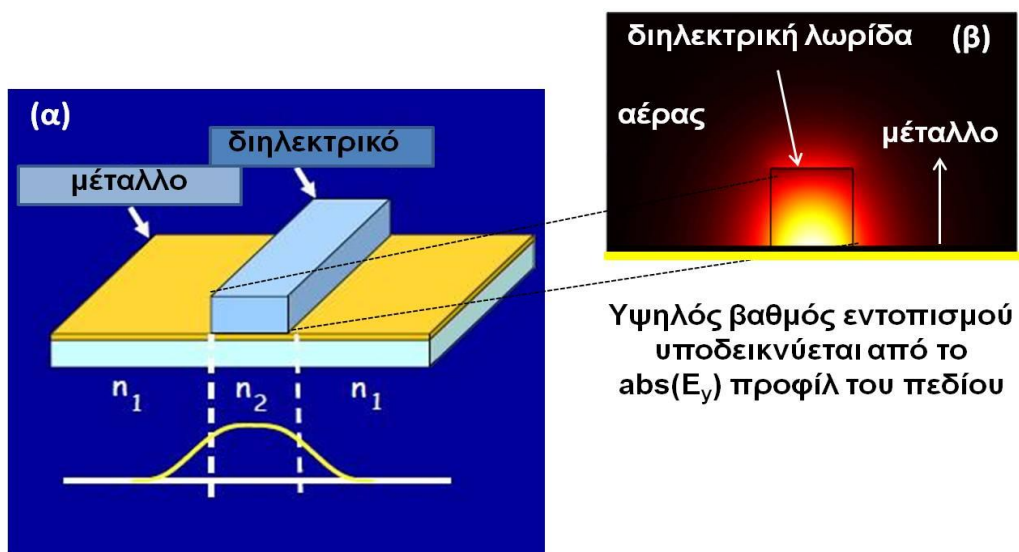


Εικόνα 1:(α) Δομή μεταλλικού νανο-καλωδίου για τη διάδοση του SPP ρυθμού σε κλίμα nm [3.31], (β) Διάδοση του SPP ρυθμού μέσα από τη χρήση διάταξης νανο-σφαιριδίων για επίτευξη διάδοσης πλασμονικού ρυθμού σε nm-κλίμακες [3.32], (γ) CPP πλασμονικοί κυματοδηγοί που επιτρέπουν τη διάδοση SPP ρυθμών σε nm-κλίμακα σχηματιζόμενοι από μεταλλικές κοιλοότητες [3.33], (δ) Πειραματική επίδειξη παθητικών δομών κοιλοτήτων συντονισμού βασισμένες σε CPP πλασμονικούς κυματοδηγούς [3.35].

3.1.2 Οι αρχές της διηλεκτρικής κυματοδότησης στον περιορισμό των SPP ρυθμών μέσω των DLSPP δομών

Για την αναζήτηση μιας εναλλακτικής λύσης που θα προσφέρει τον ισχυρό εντοπισμό (strong confinement) του SPP ρυθμού σε έναν κυματοδηγό με πλευρικό περιορισμό επιχειρήθηκε η μετανάστευση βασικών αρχών που διέπουν την κυματοδότηση σε οπτικές ίνες όσο και σε ολοκληρωμένους οπτικούς κυματοδηγούς. Πιο συγκεκριμένα, στα συμβατικά ολοκληρωμένα οπτικά είναι γνωστό πως μπορεί να επιτευχθεί η δραστηκή μείωση του κυματοδηγούμενου ρυθμού κατά την πλευρική διατομή (lateral cross section) εφόσον υιοθετηθούν δομές κυματοδηγοί με ισχυρή διαφορά στους δείκτες διάθλασης: κυματοδηγοί με δείκτη διάθλασης στον πυρήνα πολύ μεγαλύτερο από το δείκτη διάθλασης του περιβλήματος [3.36]. Η Εικόνα 2(α) εισάγει την κατεύθυνση αυτή του πεδιακού περιορισμού του ρυθμού κάνοντας χρήση της συνθήκης της ισχυρής διαφοράς των δεικτών διάθλασης των κυματοδηγών (high-index contrast waveguides, Δn) για την περίπτωση ενός πυρήνα με δείκτη διάθλασης n_2 αρκετά μεγαλύτερο από το n_1 του περιβλήματος. Στην περίπτωση του DLSPP κυματοδηγού το ρόλο του πυρήνα με το δείκτη διάθλασης n_2 αναλαμβάνει να τον προσφέρει η παρουσία μιας διηλεκτρικής λωρίδας που τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό φύλλο του κυματοδηγού. Το αποτέλεσμα είναι ο SPP ρυθμός να συγκεντρώνεται στο εσωτερικό του διηλεκτρικού και να είναι εφικτός ο πλευρικός

περιορισμός του στα γεωμετρικά όρια της δομής που θέτει η παρουσία του διηλεκτρικού μέσου. Η Εικόνα 2(β) αποδεικνύει τον ισχυρό εντοπισμό του πεδίου στο εσωτερικό της διηλεκτρικής λωρίδας η οποία αναλαμβάνει να εξασφαλίσει για τον διαδιδόμενο SPP ρυθμό στη διεπιφάνεια μετάλλου-διηλεκτρικού (metal-dielectric) έναν ενεργό δείκτη διάθλασης (effective refractive index- n_{eff}) που είναι αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ενεργό δείκτη που χαρακτηρίζει το διαδιδόμενο SPP ρυθμό στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του αέρα (metal-air interface). Συνεπώς, είναι εφικτός ο χειρισμός των SPP διαδιδόμενων ρυθμών δανειζόμενοι τις αρχές που διέπουν τους κλασικούς συμβατικούς οπτικούς κυματοαγωγούς και βασίζονται στην αρχή της ισχυρής διαφοράς των δεικτών διάθλασης για την ισχυρή κυματοδότηση του πεδίου στο μέσο με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. Δανειζόμενοι λοιπόν έναν ανάλογο μηχανικής σχεδίασης κυματοδηγών από τον κόσμο των ολοκληρωμένων οπτικών, οι πλασμονικοί κυματοδηγοί αυτού του είδους ονομάστηκαν SPP κυματοδηγοί διηλεκτρικής λωρίδας και έχουν επιδειχθεί επιτυχώς σε αρκετές εργασίες τόσο σε επίπεδο προσομοίωσης όσο και κατασκευής δομών DLSP κυματοδηγών [3.37-3.39].



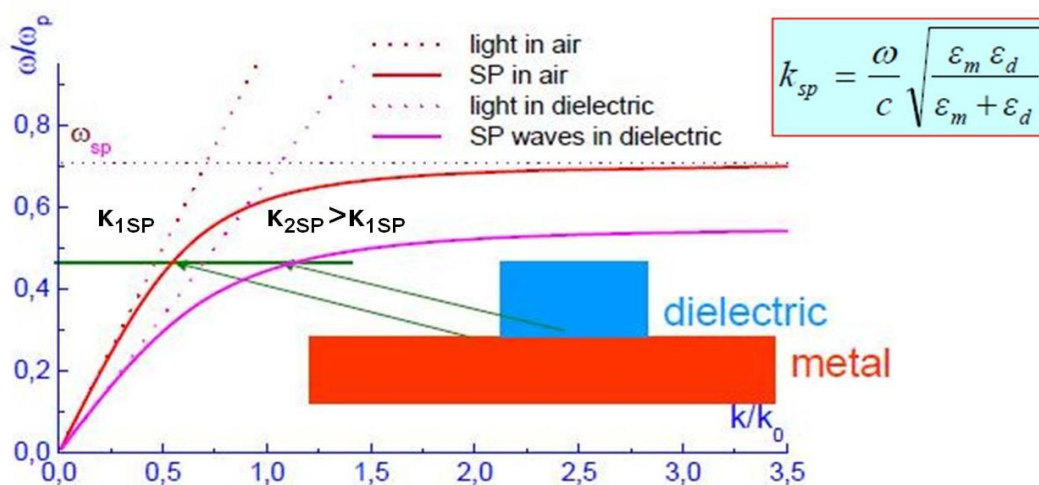
Εικόνα 2:(α) Αναπαράσταση της γεωμετρίας της δομής πλασμονικού κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση για τον εγκλωβισμό του SPP ρυθμού στη διηλεκτρική λωρίδα. (β) Πεδιακή κατανομή του SPP ρυθμού [$abs(E_y)$] στο εσωτερικό της διηλεκτρικής φόρτισης που επιδεικνύει τον ισχυρό εγκλωβισμό του πεδίου στο εσωτερικό της διηλεκτρικής φόρτισης.

Η διάδοση των SPP ρυθμών σε κυματοδηγούς διηλεκτρικής λωρίδας έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία διερευνώντας με λεπτομέρεια τις σχεδιαστικές παραμέτρους των DLSP κυματοδηγών [3.40], και τις βέλτιστες συνθήκες για την επίτευξη ισχυρού εντοπισμού του πεδίου στον κυματοδηγό παράλληλα με αποδεκτά μήκη διάδοσης των πλασμονικών ρυθμών [3.41]. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα εστιάσουμε στο υπόβαθρο των αρχών που επιτρέπει το μηχανισμό του πλευρικού περιορισμού του SPP ρυθμού που παρουσιάστηκε παραπάνω χωρίς να επεκταθούμε στην παρουσίαση αναλυτικών αποτελεσμάτων από τον επαρκή αριθμό μελετών που έχουν δημοσιευτεί στη

βιβλιογραφία. Για την κατανόηση της αρχής που διέπει την κυματοδότηση των SPP ρυθμών κάνοντας χρήση διηλεκτρικών λωρίδων θα χρησιμοποιηθεί η καμπύλη διασποράς των πλασμονικών ρυθμών που παρουσιάστηκε στην εισαγωγή της διατριβής. Είναι γνωστό πως η διεπιφάνεια μεταξύ ενός μετάλλου και ενός διηλεκτρικού μέσου υποστηρίζει ένα SPP ρυθμό ο οποίος χαρακτηρίζεται από μια σταθερά διάδοσης (propagation constant) που εξαρτάται τις αντίστοιχες τιμές των διηλεκτρικών σταθερών των υλικών μέσων και το μήκος κύματος του φωτός. Η σταθερά διάδοσης και ο τύπος υπολογισμού του ενεργού δείκτη διάθλασης του πλασμονικού ρυθμού (effective refractive index - N_{eff}) που δίνεται από το πραγματικό μέρος, $Re(\beta)$, της σταθεράς διάδοσης δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \left[\frac{\epsilon_d \cdot \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right]^{0.5} \quad (3.1)$$
$$N_{eff} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot Re(\beta)$$

Είναι εμφανές πως η παρουσία ενός διηλεκτρικού μέσου που τοποθετείται πάνω από το μεταλλικό φύλλο οδηγεί σε ένα ενεργό δείκτη διάθλασης του SPP ρυθμού (N_{eff}) μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο ενεργό δείκτη του SPP ρυθμού στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του αέρα (metal-air interface). Η Εικόνα 3 παρουσιάζει τις καμπύλες διασποράς των πλασμονικών ρυθμών για τις δύο περιοχές που ορίζονται στη δομή του σχήματος. Η διαφορά των κυματικών αριθμών (wavenumbers) των SPP ρυθμών (Δk) που σημειώνεται στο διάγραμμα για την επιλεγμένη συχνότητα ($\omega=0.47 \cdot \omega_p$) είναι υπεύθυνη για την επίτευξη της απαραίτητης διαφοράς στους ενεργούς δείκτες διάθλασης ώστε να διασφαλίζεται η συνθήκη της κυματοδότησης ($n_{2sp} > n_{1sp}$) που παρουσιάστηκε στην αρχή της ενότητας. Η επιλογή του διηλεκτρικού υλικού καθώς και η γεωμετρία του είναι οι βασικές σχεδιαστικές παράμετροι του DLSP κυματοδηγού καθώς επιτρέπουν τη διαπίστωση ισχυρής αντίθεσης δεικτών διάθλασης των SPP ρυθμών που είναι ικανή να επιφέρει ισχυρό εντοπισμό του πεδίου στον πυρήνα του κυματοδηγού. Ωστόσο, ο περιορισμός για τη συγκεκριμένη επιλογή των παραμέτρων παραμένει η απαίτηση για μονορυθμική λειτουργία. Συνεπώς, μπορούμε να επιλέξουμε το κατάλληλο πάχος της διηλεκτρικής λωρίδας που να διασφαλίζει ταυτόχρονα τη μονορυθμική λειτουργία του κυματοδηγού, τον ισχυρό εντοπισμό του ρυθμού στον πυρήνα της διηλεκτρικής λωρίδας και το μέγιστο πλευρικό περιορισμό με το μικρότερο δυνατό πλάτος (width) του πεδριακού προφίλ του ρυθμού. Στην εργασία των T. Holmgaard και S.I. Bozhevolnyi, παρουσιάζεται μια σε βάθος μελέτη των σχεδιαστικών παραμέτρων που σκοπεύει να προσφέρει τη βέλτιστη επιλογή της γεωμετρίας της διηλεκτρικής λωρίδας (thickness) που σκοπεύει να διασφαλίσει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά εγκλωβισμού του πεδίου στη διηλεκτρική λωρίδα με τις βέλτιστες δυνατές απώλειες διάδοσης στη διεπιφάνεια των υλικών [3.42].



Εικόνα 3: Καμπύλες διασποράς για την περίπτωση των SPP ρυθμών στη διεπιφάνεια μεταξύ του μετάλλου και του αέρα (metal-air interface) και στην περίπτωση της υποστήριξης των SPP ρυθμών στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού (metal-dielectric interface) που ερμηνεύουν τη διαπίστωση μιας ισχυρής διαφοράς ενεργών δεικτών διάθλασης των ρυθμών που επιτρέπουν τον εγκλωβισμό του SPP ρυθμού στη διηλεκτρική φόρτιση. Στο ένθετο σχήμα περιλαμβάνεται ο τύπος για τον υπολογισμό του κυματαριθμού συσχετίζοντας τις διηλεκτρικές σταθερές του μετάλλου (ϵ_m) και του διηλεκτρικού μέσου (ϵ_d).

Οι DLSPP κυματοδηγοί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το πάχος (thickness) της διηλεκτρικής λωρίδας που χρησιμοποιείται πάνω στη μεταλλική επιφάνεια. Στην πρώτη περίπτωση, των λεπτών διηλεκτρικών λωρίδων με πάχος αρκετά μικρότερο συγκριτικά με το μήκος κύματος (πάχος $\ll \lambda/2$), και οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ως κυματοδηγοί απλής σύνδεσης [3.41]. Η δεύτερη κατηγορία DLSPP κυματοδηγών χρησιμοποιεί διηλεκτρικές λωρίδες με πάχος συγκρίσιμο με το μήκος κύματος ($\sim \lambda/2$) και προορίζονται για την υλοποίηση παθητικών και ενεργών πλασμονικών δομών. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιούνται DLSPP κυματοδηγοί που προορίζονται για την υλοποίηση ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων μεταγωγής αξιοποιώντας τον θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτής της κατηγορίας των πλασμονικών κυματοδηγών (DLSPP WGs) εκτείνονται σε αρκετές διαστάσεις της δομής. Αρχικά, συγκρίνοντας τους DLSPP κυματοδηγούς με αντίστοιχες δομές SPP κυματοδότησης που χρησιμοποιούν το ίδιο πλάτος μεταλλικού φύλλου παρατηρούνται μικρότερες απώλειες διάδοσης των SPP ρυθμών. Ο ισχυρός εντοπισμός του πεδιακού προφίλ του SPP ρυθμού στο εσωτερικό της διηλεκτρικής λωρίδας μειώνει σημαντικά την παρουσία των απωλειών σκέδασης (scattering loss) που εμφανίζεται στις άκρες της μεταλλικής επιφάνειας (metal edges) του πλασμονικού αγωγού και είναι υπεύθυνες για μεγάλο τμήμα της συνολικής απώλειας διάδοσης των ρυθμών [3.17]. Η διηλεκτρική λωρίδα (Dielectric Loading) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον ενεργό έλεγχο των χαρακτηριστικών διάδοσης του πλασμονικού ρυθμού αξιοποιώντας μια σειρά από ενεργούς μηχανισμούς που βασίζονται είτε στο

ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο [3.43], είτε στο θερμο-οπτικό φαινόμενο [3.18]. Η τελευταία κατηγορία υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ώστε να υλοποιηθούν διατάξεις θερμο-οπτικών διακοπών που βασίζονται σε συμβολομετρικές δομές και περιγράφονται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια. Επιπλέον, η παρουσία του ισχυρά εντοπισμένου πεδίου στη διηλεκτρική λωρίδα του DLSP κυματοδηγού μπορεί να αξιοποιηθεί για την αντιστάθμιση των απωλειών διάδοσης της κυματοδότησης εκμεταλλευόμενοι το μηχανισμό εξαναγκασμένης εκπομπής από νοθευμένες διηλεκτρικές λωρίδες [3.44]. Από σκοπιά ανάπτυξης και κατασκευής της τεχνολογίας, επίσης το πλεονέκτημα των DLSP κυματοδηγών πηγάζει από την απλότητα της κατασκευής καθώς και τα πλεονεκτήματα που παρέχει η μέθοδος κατασκευής της UV-λιθογραφίας (UV-Lithography) που αξιοποιείται για αυτόν τον τύπο των κυματοδηγών. Έχει επιδειχθεί στη βιβλιογραφία η δυνατότητα για μεγάλης κλίμακας εκτύπωση (printing) DLSP κυματοδηγών μέσω της μεθόδου της UV λιθογραφίας [3.45] που υπερτερεί εμφανώς έναντι της εγγραφής σημείο-προς-σημείο (writing point-by-point) της μεθόδου electron-beam [3.37,3.46] είτε έναντι της μεθόδου λιθογραφίας πολυμερισμού δύο-φωτονίων (two-photon polymerization lithography) [3.38].

3.2 DLSP Κυματοδηγοί διηλεκτρικής λωρίδας PMMA ετερο-ολοκληρωμένοι στην SOI πλατφόρμα

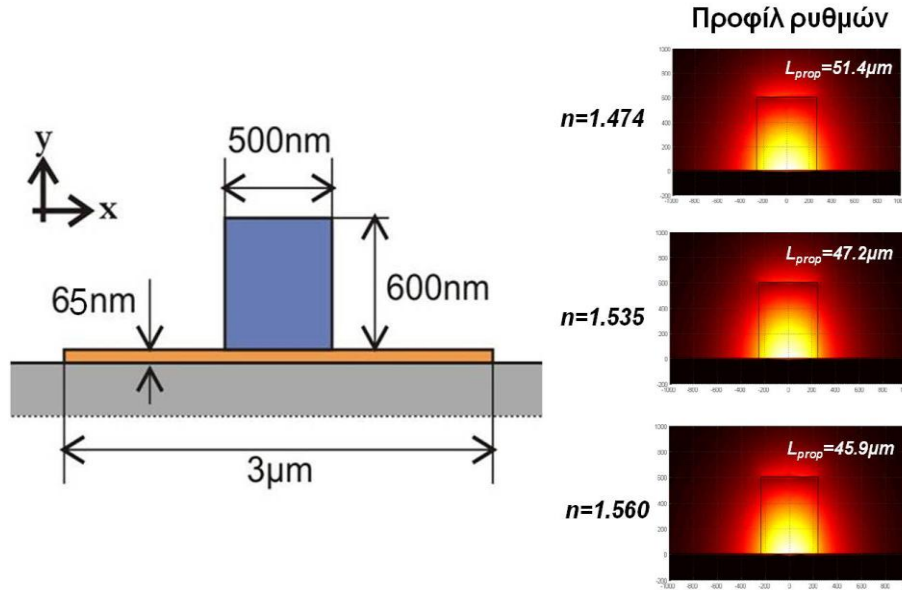
Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται με λεπτομέρεια η δομή των DLSP κυματοδηγών που ετερο-ολοκληρώθηκαν στην Si παθητική πλατφόρμα καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα για το στατικό χαρακτηρισμό των δομών αυτών. Στο πρώτο τμήμα περιγράφεται η δομή που αξιολογήθηκε πειραματικά εστιάζοντας στα χαρακτηριστικά της διεπαφής μεταξύ της Si πλατφόρμας και της πλασμονικής δομής του κυματοδηγού. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων για τον υπολογισμό των απωλειών διάδοσης (propagation losses) αλλά και των απωλειών σύζευξης (coupling loss) μεταξύ της Si πλατφόρμας και του πλασμονικού κυματοδηγού (Si-to-DLSP coupling loss). Η μέτρηση των απωλειών διάδοσης στους DLSP κυματοδηγούς έχει μεγάλη σημασία καθώς το ζήτημα των υψηλών απωλειών εγγενώς περιορίζει την πλασμονική κυματοδότηση και ο περιορισμός τους απαιτεί υψηλής πολυπλοκότητας προσεγγίσεις [3.44]. Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ληφθεί κάνοντας χρήση της μεθόδου υπολογισμού απωλειών για δομές κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback method) που έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο που περιλαμβάνει τη Si παθητική πλατφόρμα που φιλοξενεί την πλασμονική διάταξη.

3.2.1 Σχεδιασμός DLSP κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση πολυμερούς

Το πρώτο μέρος της ενότητας επιχειρεί να παρουσιάσει συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά του DLSP κυματοδηγού που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στα πλαίσια των αναγκών του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON (FP7 ICT-STREP no. 249135). Η επιλογή του υλικού και των γεωμετρικών παραμέτρων της διηλεκτρικής

φόρτισης αποτελούν βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους που σκοπό έχουν να συμπεριλάβουν ιδανικές τιμές για τα βασικά χαρακτηριστικά των πλασμονικών ρυθμών που υποστηρίζονται από τις δομές των DLSPP κυματοδηγών: ισχυρό πλευρικό περιορισμό (lateral confinement) του ρυθμού και υποφερτές απώλειες διάδοσης με αποδεκτά μήκη διάδοσης (propagation lengths). Για το σκοπό αυτό πραγματοποιηθήκαν αριθμητικές προσομοιώσεις από το Εργαστήριο της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του ΑΠΘ με σκοπό να επιλεγούν οι κατάλληλες παράμετροι. Η αριθμητική ανάλυση του προβλήματος προσδιορισμού των γεωμετρικών παραμέτρων του DLSPP κυματοδηγού βασίστηκε στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method - FEM) και οι υποστηριζόμενοι ρυθμοί προσδιορίστηκαν μέσω της διανυσματικής μεθόδου επίλυσης ιδιορυθμών στο φασματικό πεδίο (Full-Vector Spectral Eigenmode Solver).

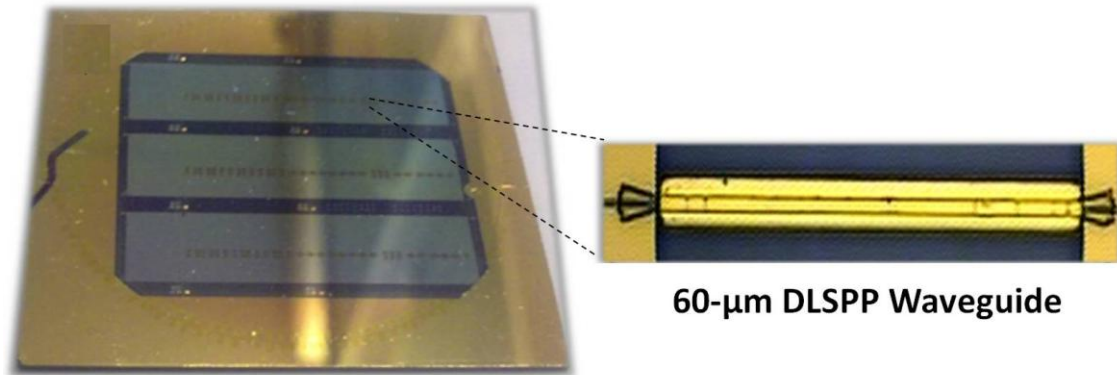
Η Εικόνα 4 αναπαριστά τη γεωμετρία του προβλήματος του DLSPP κυματοδηγού που μοντελοποιήθηκε και μελετήθηκε αναλυτικά για τον βέλτιστο προσδιορισμό των παραμέτρων του. Για την αριθμητική επίλυση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πολυμερικά υλικά (PMMA, Cyclomer, Ormocer, IPG) με διαφορετικές τιμές δεικτών διάθλασης που εκτείνονται στην περιοχή τιμών από $n=1.47$ έως $n=1.56$. Η βέλτιστη γεωμετρία για τη διηλεκτρική φόρτιση επιλέχθηκε να είναι $W \times H$ στα $500 \times 600 \text{ nm}^2$ για τις αντίστοιχες τιμές πλάτους και ύψους. Σχετικά με το φύλλο του χρυσού (Au), επιλέχθηκε να έχει πάχος 65 nm και πλάτος $3 \mu\text{m}$ όπως φαίνεται στην αναπαράσταση της δομής. Τα αποτελέσματα των πεδιακών προφίλ για τους διαδιδόμενους SPP ρυθμούς για όλες τις περιπτώσεις των πολυμερικών υλικών που διερευνήθηκαν φανερώνουν ισχυρό εντοπισμό (confinement) του πεδίου στη διηλεκτρική λωρίδα. Επιπλέον, το εκτιμώμενο μέγεθος για το εύρος του διαδιδόμενου ρυθμού (mode width) φαίνεται να είναι πανομοιότυπο για όλες τις περιπτώσεις πολυμερικής φόρτισης (polymer loading) και αποδεικνύει τον ισχυρό πλευρικό περιορισμό του θεμελιώδους SPP ρυθμού (TM_{00}) στη δομή του DLSPP κυματοδηγού.



Εικόνα 4: Γεωμετρική αναπαράσταση της δομής του DLSPP κυματοδηγού που περιλαμβάνει την τοποθέτηση ενός διηλεκτρικού υλικού (μπλε χρώμα) διαστάσεων $600 \times 500 \text{ nm}^2$ πάνω από ένα φύλλο χρυσού (κίτρινο χρώμα) πάχους 65 nm και πλάτους 3 μm. Το μεταλλικό φύλλο έχει τοποθετηθεί πάνω από ένα υπόβαθρο SiO_2 (γκρι χρώμα). Οι θεμελιώδεις TM_{00} ρυθμοί που υποστηρίζονται για επιλογή διαφορετικών πολυμερικών υλικών για τη διηλεκτρική φόρτιση με τους αντίστοιχους δείκτες διάθλασης που εκτείνονται από $n=1.474$ έως $n=1.560$.

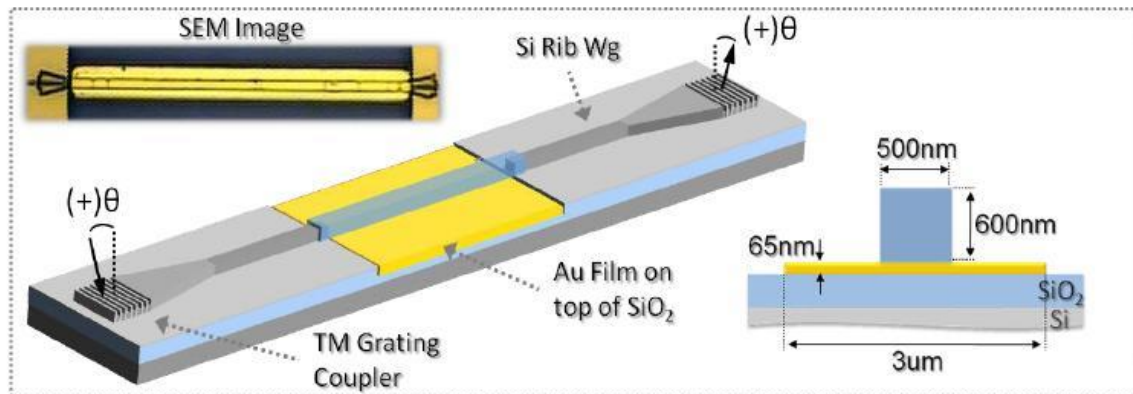
3.2.2 DLSPP κυματοδηγός διηλεκτρικής φόρτισης PMMA ετερο-ολοκληρωμένος σε SOI παθητική πλατφόρμα

Η Εικόνα 5 απεικονίζει το υβριδικό Silicon-DLSPP chip το οποίο περιέχει 3 μητρικές (motherboards) πλατφόρμες τεχνολογίας Silicon-On-Insulator (SOI) οι οποίες είναι ειδικά διαμορφωμένες ώστε να φιλοξενήσουν τις υβριδικά ολοκληρωμένες πλασμονικές δομές [3.47]. Οι παραπάνω περιοχές έχουν χαραχθεί (etched) σχηματίζοντας μια κοιλότητα βάθους 200-nm στο υπόστρωμα του SiO_2 . Οι κοιλότητες αυτές καλύφθηκαν με ένα στρώμα χρυσού (Au) το οποίο έχει πάχος $d=65 \text{ nm}$ και πλάτος $w=3 \mu\text{m}$. Στο μεταλλικό αυτό στρώμα αναπτύχθηκε μια λωρίδα του διηλεκτρικού υλικού PMMA σχηματίζοντας μια δομή με γεωμετρικά χαρακτηριστικά κάθετης διατομής ($W \times H$) $500 \times 600 \text{ nm}^2$. Με τη διαδικασία αυτή, ήταν εφικτό να σχηματοποιηθούν οι δομές των DLSPP κυματοδηγών πάνω στο υπόστρωμα του SiO_2 . Στο εσωτερικό της Εικόνας 5 απεικονίζεται μέσω της χρήσης ενός οπτικού μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης, ο DLSPP κυματοδηγός μήκος 60 μm ο οποίος χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τα πειράματα αξιολόγησης μετάδοσης πληροφορίας μέσω των DLSPP κυματοδηγών.



Εικόνα 5: Υπό εξέταση τσιπ το οποίο περιλαμβάνει πλήθος ετερο-ολοκληρωμένων DLSP παθητικών δομών σε μητρική πλατφόρμα υποδοχής Si. Ο 60-μm DLSP κυματοδηγός που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση στα πείραμα διάδοσης πληροφορίας όπως αποτυπώνεται μέσω οπτικού μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης.

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει τη γεωμετρική αναπαράσταση της δομής του DLSP κυματοδηγού που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική αξιολόγηση στη συνέχεια του κεφαλαίου της διατριβής. Η δομή του πλασμονικού κυματοδηγού έχει ετερο-ολοκληρωθεί σε μία παθητική πλατφόρμα πυριτίου τεχνολογίας rib κυματοδηγών. Οι λεπτομέρειες της πλατφόρμας πυριτίου καθώς και η απόδοση της διεπαφής μεταξύ των πλασμονικών και δομών πυριτίου έχει συζητηθεί σε προηγούμενη ενότητα. Καθώς η διέγερση πλασμονικής διάδοσης είναι εφικτή μόνο στον εγκάρσιο μαγνητικό τρόπο πόλωσης (Transverse Magnetic – TM), η μητρική παθητική πλατφόρμα φιλοξενίας τεχνολογίας πυριτίου είναι εφοδιασμένη με τους συζεύκτες περίθλασης (Grating Couplers) υποστηρίζουν την πολωτική αυτή κατάσταση. Η γεωμετρία των κυματοδηγών πυριτίου επιλέχθηκε να είναι $400 \times 340 \text{ nm}^2$ εξασφαλίζοντας την υποστήριξη του TM πολωτικού ρυθμού.



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του ευθύ DLSP κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση PMMA μήκους 60μm ετερο-ολοκληρωμένου σε SOI πλατφόρμα. Η δομή αξιοποιήθηκε για τον πειραματικό έλεγχο με σκοπό τον οπτικό χαρακτηρισμό του.

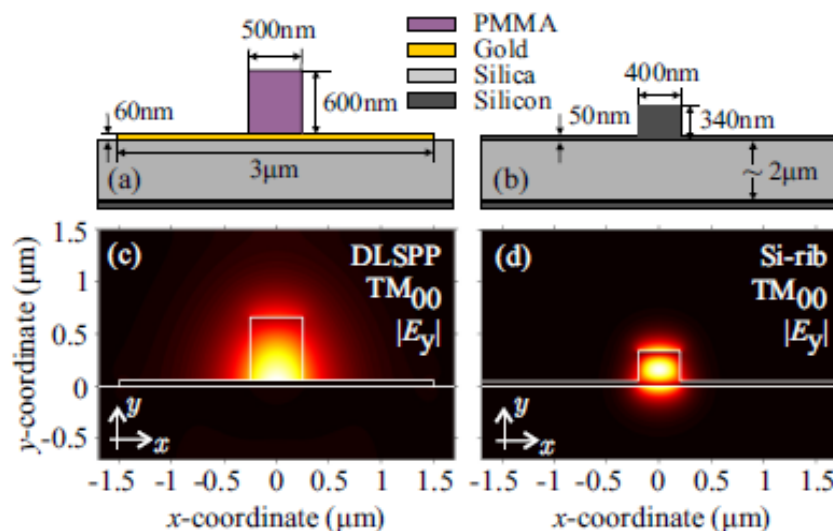
Σχετικά με τη διαδικασία κατασκευής του DLSPP κυματοδηγού, η επεξεργασία του πολυμερούς που τοποθετείται στη μεταλλική επιφάνεια μπορεί να επιτευχθεί είτε με χρήση φωτο-ευαίσθητης (photo-sensitive) μεθόδου ηλεκτρο-ευαίσθητης (electro-sensitive) μεθόδου [3.48]. Φωτοευαίσθητα πολυμερή υλικά όπως το PMMA [3.49,3.50] αναπτύσσονται μέσω της UV-λιθογραφίας (UV-lithography), μια μέθοδος η οποία προτιμάται σε επίπεδο βιομηχανικής κλίμακας καθώς ένα συγκεκριμένο σχέδιο μπορεί να επαναληφθεί με την ίδια διαδικασία φωτισμού. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η απαίτηση για φυσικές μάσκες όπου η μορφή (pattern) είναι δεδομένη. Η μέθοδος της ηλεκτρονικής λιθογραφίας (Electron Beam Lithography – EBL) από την άλλη, είναι μια πολύ ακριβής μέθοδος και πολύ ευέλικτη στην προσαρμογή της στην υπό σχεδίαση μορφή (pattern). Το βασικό της μειονέκτημα είναι ο χρόνος που απαιτείται που την καθιστά ουσιαστικά μη εφαρμόσιμη σε περιβάλλον βιομηχανικών εφαρμογών. Να σημειωθεί τέλος πως ορισμένα πολυμερή μπορούν να επεξεργαστούν και με τις δύο τεχνικές, όπως το Cyclomer [3.51,3.52]. Ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία κατασκευής αλλά και σύγχρονες λιθογραφικές τεχνικές που αναπτύσσονται [3.53].

Όπως έχει ήδη σχολιασθεί σε παραπάνω χωρία, καθώς οι κυματοδηγοί DLSPP υποστηρίζουν μόνο τους ρυθμούς εγκάρσιας μαγνητικής (Transverse Magnetic – TM) πεδιακής διάδοσης, η SOI πλατφόρμα είναι εφοδιασμένη με κυματοδηγούς rib τεχνολογίας και διαστάσεων $400 \times 340 \text{ nm}^2$ οι οποίοι επιτρέπουν διάδοση των TM πολωτικών ρυθμών με χαμηλές απώλειες. Για τη σύζευξη φωτός (light coupling) από και προς την ίνα χρησιμοποιήθηκαν οι TM συζεύκτες περίθλασης (Grating Couplers) οι οποίοι έχουν συζητηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα του περιλαμβάνει μόνο το Si τμήμα του chip, οι απώλειες διάδοσης (propagation losses) μετρήθηκαν να είναι 4.42dB/cm και οι απώλειες σύζευξης (coupling loss) στα 12.58dB ανά συζεύκτη περίθλασης.

3.2.2 Σχεδίαση, Μοντελοποίηση και Ανάπτυξη της Si-to-DLSPP δομής διασύνδεσης

Η διεπαφή μεταξύ των DLSPP και Silicon κυματοδηγών υλοποιήθηκε βασιζόμενη σε μία προσέγγιση οριζόντιας σύζευξης (butt-coupling approach) [3.47]. Το θεωρητικό πλαίσιο για την επιτυχή σύζευξη της συγκεκριμένης τεχνικής διεπαφής αναπτύσσεται και περιγράφεται λεπτομερώς σε εργασία η οποία περιέχει θεωρητικά αποτελέσματα που επικυρώνονται μέσω ενός συνόλου πειραματικών μετρήσεων [3.54]. Στην εργασία αυτή, προσομοιώνονται διαφορετικές γεωμετρίες σύζευξης τόσο για το silicon μέρος της δομής σύζευξης όσο και για το πλασμονικό. Σκοπός της μοντελοποίησης παραμένει η εύρεση των ελάχιστων δυνατών απωλειών σύζευξης και να παραμετροποιηθεί η λύση αυτή λαμβάνοντας υπόψη και τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις μεθόδους κατασκευής. Σημαντική παράμετρος μελέτης παραμένει και το κενό στο φύλλο χρυσού μεταξύ των δύο δομών και η επίδραση που έχει στις συνολικές απώλειες σύζευξης. Η επίτευξη

ικανοποιητικής σύζευξης διερευνήθηκε τόσο για την περίπτωση της παρουσίας του μεταλλικού κενού όσο και για την περίπτωση της απουσίας του. Όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια, για την ανάπτυξη των ετερο-ολοκληρωμένων DLSP κυματοδηγών στην SOI παθητική πλατφόρμα, επιλέχθηκε τελικά η περίπτωση της παρουσίας του μεταλλικού κενού στο σημείο διεπαφής των δομών. Στις Εικόνες 7(α),(β) παρουσιάζονται οι εγκάρσιες τομές από τις δύο δομές που προορίζονται προς σύζευξη: τον DLSP κυματοδηγό εφοδιασμένο με διηλεκτρική φόρτιση από PMMA και το Si-Rib κυματοδηγό. Πιο συγκεκριμένα, ο DLSP κυματοδηγός παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα και στην περιοχή της C-band τηλεπικοινωνιακής ζώνης εμφανίζει μονορυθμική λειτουργία (single mode operation). Από την πλευρά των Si κυματοδηγών, το στρώμα πυριτίου του κυματοδηγού ράβδωσης (Rib-τύπου) που βρίσκεται στην SOI πλευρά της διεπαφής έχει 340 nm πάχος στην περιοχή κυματοδότησης. Ο σχηματισμός του κυματοδηγού αυτού δεν γίνεται με πλήρη χάραξη (full etching) μέχρι το υπόστρωμα διοξειδίου του πυριτίου (Buried Oxide, BOX) αλλά με μερική (partial etching), αφήνοντας από κάτω μία πλάκα (slab) από πυρίτιο πάχους 50 nm. Επίσης, το πάνω μέρος του SOI κυματοδηγού επικαλύπτεται με γυαλί (Spin-On-Glass, SOG), καθώς ένα τέτοιο στρώμα επικάλυψης είναι απαραίτητο στις περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση σταδίων θέρμανσης σε διαφορετικά τμήματα της SOI πλατφόρμας, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των πολυπλεκτών [3.55]. Η δομή και οι διαστάσεις του DLSP κυματοδηγού υπαγορεύουν τη χάραξη της SOI μητρικής, έτσι ώστε η εσοχή που σχηματίζεται στο BOX υπόστρωμα να λειτουργεί ως περιοχή στέγασης του πλασμονικού κυματοδηγού.



Εικόνα7: (α) Εγκάρσια τομή (cross section) της δομής του DLSP κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση από PMMA, (β) η αντίστοιχη εγκάρσια τομή του SOI Rib κυματοδηγού. (γ) Πεδιακή κατανομή (E_y) του θεμελιώδους κυματοδηγούμενου ρυθμού (TM_{00}) και (δ) του αντίστοιχου υποστηριζόμενου ρυθμού (TM_{00}) στον SOI Rib κυματοδηγό.

Το βάθος χάραξης της μητρικής πλατφόρμας καθορίζει τη σχετική θέση των διατομών των δύο κυματοδηγών, γεγονός που επηρεάζει την προσαρμογή (matching) των

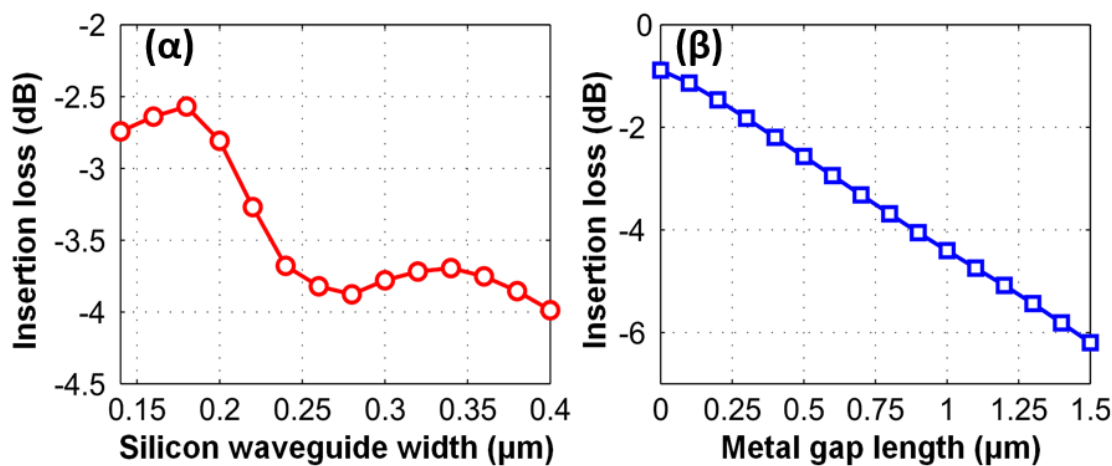
χωρικών προφίλ των επιμέρους ρυθμών και, κατά συνέπεια, την αποδοτικότητα σύζευξης. Οι Εικόνες 7(γ),(δ) που περιγράφουν τη χωρική πεδιακή κατανομή της ισχυρής πεδιακής συνιστώσας (E_y) στους δύο θεμελιώδεις quasi-TM ρυθμούς που οδηγούνται από τους δύο κυματοδηγούς. Είναι εμφανές πως η χωρική ταύτιση των ρυθμών στους δύο κυματοδηγούς δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική. Πιο συγκεκριμένα, το άνοιγμα της πεδιακής ισχύος κατά τον x-άξονα είναι διπλάσιο στον DLSP κυματοδηγό συγκριτικά με τον Si-Rib κυματοδηγό ενώ ταυτόχρονα οι πεδιακοί ρυθμοί δεν εμφανίζονται κεντραρισμένοι και στον y-άξονα με αποτέλεσμα το κάτω μέρος της ισχύος που οδηγείται στον Si-Rib κυματοδηγό να μη συνεισφέρει στο μηχανισμό μεταφοράς ισχύος καθώς (γεωμετρικά) ταυτίζεται με το μεταλλικό φύλλο. Η λύση στην περίπτωση αυτή είναι η επίτευξη της αναγκαίας ευθυγράμμισης στον κατακόρυφο (y-άξονα) ταυτόχρονα με την επιδίωξη της διεύρυνσης του πλάτους (x-άξονα) του πεδιακού προφίλ στον Si-Rib κυματοδηγό.

Η σχεδίαση της διεπαφής DLSP και Si κυματοδηγών (Si-to-DLSP interface) βασίστηκε σε αριθμητική μοντελοποίηση που διεξήχθη με τη βοήθεια 3D-FEM προσομοιώσεων από την ερευνητική ομάδα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) [3.54]. Για την εύρεση των επιθυμητών προδιαγραφών σχεδίασης, διάφορες παράμετροι εξετάστηκαν με στόχο τη βελτιστοποίηση της μετάβασης φωτός από τον ένα κυματοδηγό στον άλλο, όπως το πλάτος του κυματοδηγού πυριτίου (W_{Si}), η κατακόρυφη μετατόπιση (vertical offset) που ισοδυναμεί με τη σχετική θέση των δύο κυματοδηγών, καθώς και το μήκος του μεταλλικού διακένου (metal gap).

Αρχικά, η τιμή του μεταλλικού διακένου ρυθμίστηκε στα 0.5 μm . Τόσο η κατακόρυφη μετατόπιση όσο και το πλάτος του κυματοδηγού από πυρίτιο μεταβάλλονταν για τη βελτιστοποίηση της σύζευξης. Οι ελάχιστες απώλειες εισαγωγής παρατηρήθηκαν για μια τιμή πλάτους στα 180 nm μαζί με μια μετατόπιση ίση με 200 nm. Ορίζοντας την κατακόρυφη μετατόπιση στη βέλτιστη τιμή της (200 nm), μελετήθηκε η μεταβολή των απωλειών εισαγωγής σε σχέση με το πλάτος του κυματοδηγού πυριτίου, η οποία αποτυπώνεται στην Εικόνα 8.

Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται σε αυτό σχήμα, οι απώλειες εισαγωγής στο σημείο βέλτιστων τιμών πλάτους-μετατόπισης ήταν περίπου 2.6 dB. Επίσης, τιμές πλάτους μικρότερες από 140 nm δεν εξετάστηκαν, αφού για τέτοιες τιμές ο βασικός TM ρυθμός του κυματοδηγού ράβδωσης από πυρίτιο στερείται συγκέντρωσης σε μεγάλο βαθμό και εν τέλει καταλήγει να είναι διαρρέων (leaky). Η ποινή ισχύος λόγω μη αδιαβατικής μετάβασης, δηλαδή η ποινή στις απώλειες σε περίπτωση που ο κυματοδηγός πυριτίου αφήνεται στην ονομαστική του τιμή πλάτους (400 nm), ήταν περίπου 1.4 dB. Από την άλλη πλευρά, η ποινή λόγω μη μετατόπισης, δηλαδή η ποινή στις απώλειες σε περίπτωση όπου δεν υιοθετείται κατακόρυφη μετατόπιση, ήταν περίπου ίση με 1 dB. Τέλος, η επίδραση του μήκους του μεταλλικού διακένου στις απώλειες εισαγωγής αποτέλεσε περαιτέρω αντικείμενο μελέτης για τη βέλτιστη περίπτωση σύζευξης. Το μήκος του διακένου έλαβε τιμές από 0 έως 1500 nm, καταλήγοντας στα αποτελέσματα της Εικόνας 8. Οι απώλειες εισαγωγής παρέμειναν μικρότερες από 4 dB για διάκενα μήκους μέχρι 900

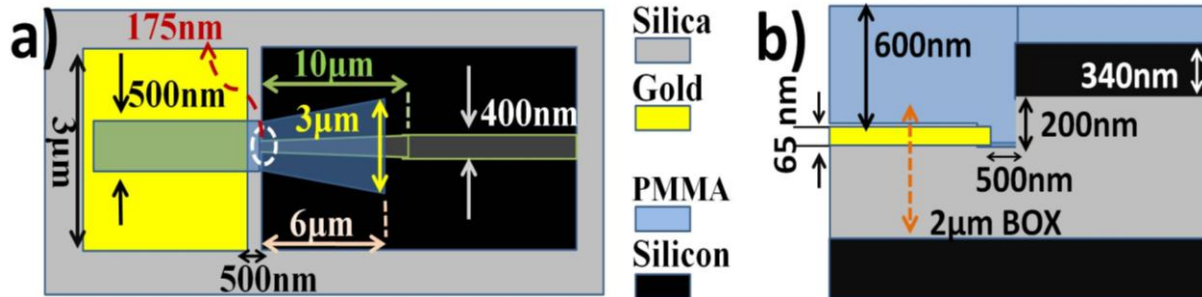
nm. Από την άλλη μεριά, η ιδανική περίπτωση του μηδενικού διακένου οδήγησε σε απώλειες εισαγωγής ίσες με 1 dB. Παρόμοια αποτελέσματα προέκυψαν, επίσης, και για τη μετάβαση από Si σε DLSP κυματοδηγό (Si-to-DLSP transition).



Εικόνα 8: Μελέτη παραμέτρων προσομοίωσης της μετάβασης από DLSP πλασμονικούς κυματοδηγούς σε κυματοδηγούς ράβδωσης από πυρίτιο. (α) Απώλειες εισαγωγής σε συνάρτηση με το πλάτος του κυματοδηγού πυρίτιου. Η κατακόρυφη μετατόπιση είναι ρυθμισμένη στη βέλτιστη τιμή της (200 nm) και το μήκος του μεταλλικού διακένου είναι 0.5 μm. (β) Απώλειες εισαγωγής σε συνάρτηση με το μήκος του μεταλλικού διακένου. Εδώ, τόσο το πλάτος του κυματοδηγού πυρίτιου όσο και η κατακόρυφη μετατόπιση είναι ρυθμισμένες στις βέλτιστες τιμές τους, που είναι 180 nm και 200 nm, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αυτών ελήφθησαν από την ερευνητική ομάδα του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Τα παραπάνω αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ετερο-ολοκληρωμένων δομών DLSP κυματοδηγών στην SOI παθητική πλατφόρμα. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που υπολογίστηκαν αριθμητικά για τις βέλτιστες (ελάχιστες) απώλειες σύζευξης της δομής, κατασκευάστηκε η παρακάτω δομή διεπαφής που αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 9. Η σχηματική αναπαράσταση της διεπαφής περιλαμβάνει την πληροφορία για τη γεωμετρία της χρησιμοποιώντας μια κάτοψη (εικόνα 9(a)) και μια πλάγια όψη της συγκεκριμένης δομής (Εικόνα 9(β)). Από την εικόνα 9(a) είναι εμφανές πως το πλάτος των Si κυματοδηγών μειώνεται καθώς από την ονομαστική τιμή των 400μm στα 175μm μόλις πριν συναντήσει τον DLSP κυματοδηγό. Στην εικόνα 9(β) αποτυπώνεται καθαρά η το διαμήκες άνοιγμα μήκους 0.5μm μεταξύ του Si κυματοδηγού και του μεταλλικού φύλλου που περιλαμβάνει ο DLSP κυματοδηγός. Η πρόβλεψη για την παρουσία του συγκεκριμένου ανοίγματος έχει συμπεριληφθεί για να προστεθεί ένα όριο ασφαλείας που καθιστά την κατασκευή της δομής αναισθητη απέναντι στο σφάλμα ευθυγράμμισης που εμφανίζει η διαδικασία της κατασκευής και η οποία είναι 0.5μm. Η απουσία του συγκεκριμένου διακένου θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια πιθανή επικάλυψη μεταξύ του επιστρώματος χρυσού (Au) του DLSP κυματοδηγού και του υλικού του Si στον SOI κυματοδηγό οδηγώντας σε αστοχία τη δομή. Ωστόσο, η συγκεκριμένη φροντίδα για την αποφυγή δυσμενών σφαλμάτων ευθυγράμμισης έρχεται με

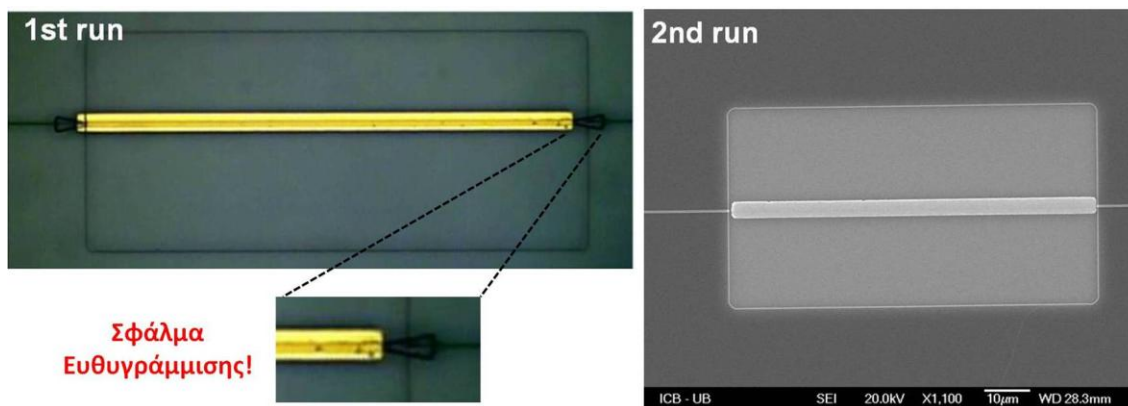
το κόστος των αυξημένων απωλειών σύζευξης (coupling loss) λόγω της παρουσίας του διάκενου. Οι απώλειες αυτές μετριάζονται με την παρουσία ενός κωνικού περιβλήματος PMMA (taper) το οποίο έχει μήκος $L=10\mu\text{m}$ και σκοπό έχει να μειώσει όσο το δυνατόν περισσότερο τις απώλειες αυτές εξασφαλίζοντας ισχυρό εντοπισμό του ρυθμού (strong confinement).



Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση του σημείου διεπαφής μεταξύ του DLSPP κυματοδηγού και του Silicon κυματοδηγού. Περιλαμβάνεται η κάτοψη της δομής (α) και η πλάγια όψη αυτής (β).

3.2.4 Ατέλειες ευθυγράμμισης και σφάλματα κατά την κατασκευή των δομών Si-to-DLSPP διασύνδεσης

Η παρουσία μιας έλλειψης ευθυγράμμισης μεταξύ των δύο τμημάτων μπορεί να προκαλέσει την εμφάνιση απωλειών ισχύος και ανακλάσεων στο σημείο διεπαφής λόγω των διαφορετικών ενεργών δεικτών διάθλασης (effective refractive index) που χαρακτηρίζουν την κυματοδηγήση στους δύο διαφορετικούς τύπους κυματοδηγών. Στο σταθμό εργασίας αξιολογήθηκαν DLSPP κυματοδηγοί οι οποίοι δεν ήταν σε θέση να υποστηρίξουν την κυματοδηγήση οπτικής ισχύος. Η διαπίστωση αυτή οφείλεται στη διαδικασία κατασκευής η οποία δεν προσέφερε ικανή ακρίβεια ώστε να επιτευχθεί η απαραίτητη ευθυγράμμιση των δύο κυματοδηγών. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα της απώλειας ευθυγράμμισης η οποία οδηγεί στην εμφάνιση τεράστιων απωλειών στην έξοδο του κυματοδηγού που καθιστούν αδύνατη την κυματοδηγήση και μη πρακτική τη χρήση του κυματοδηγού. Στην εικόνα 10(α) παρουσιάζεται μέσω ενός οπτικού μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης η αστοχία ευθυγράμμισης. Αντιθέτως, η Εικόνα 10(β) κάνοντας χρήση ενός μικροσκοπίου ηλεκτρονικής σάρωσης (SEM) αποτυπώνει τις ιδανικά ευθυγραμμισμένες δομές, τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού των οποίων εμφανίζονται στη συνέχεια. Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως καθώς το PMMA είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στις δέσμες ηλεκτρονίων, οι SEM εικόνες που αποτυπώνουν τις καλής ποιότητας διεπαφές πραγματοποιήθηκαν με ειδική φροντίδα για μετρήσεις περιορισμένου χρόνου (~2-3sec).



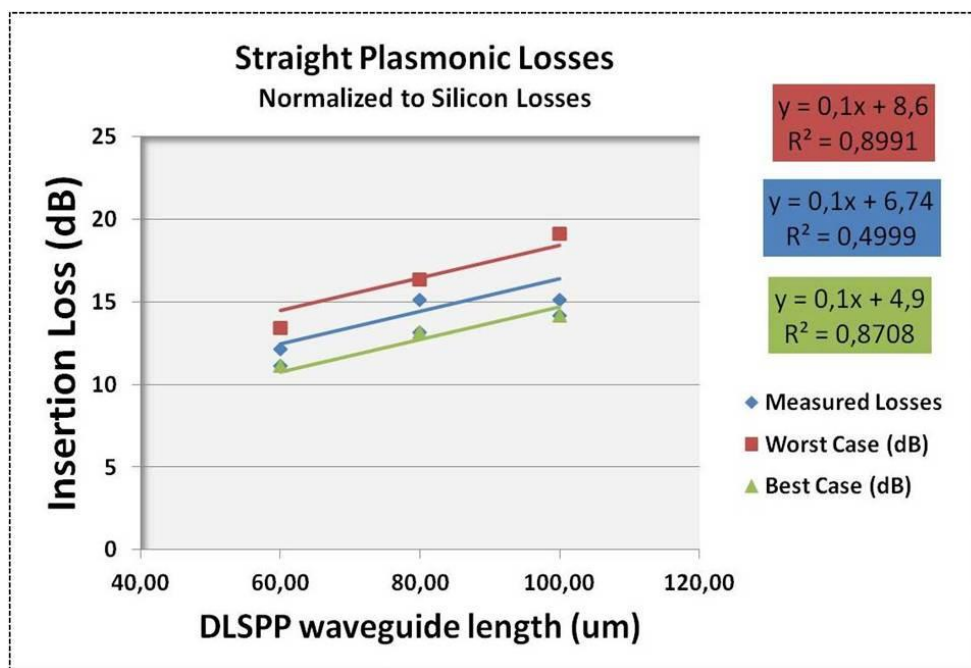
Εικόνα 10: (α) Απεικόνιση μέσω οπτικού μικροσκοπίου υψηλής ανάλυσης του σφάλματος ευθυγράμμισης στο Si-to-DLSP σημείο διεπαφής. (β) Ιδανική προσαρμογή ευθυγράμμισης που οδηγεί σε επιτυχή κυματοδότηση ισχύος στον DLSP κυματοδηγό.

3.2.5 Πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού απωλειών DLSP κυματοδηγών με διηλεκτρική φόρτιση PMMA

Μετρήσεις χαρακτηρισμού οπτικών απωλειών πραγματοποιήθηκαν για να αξιολογήσουμε την απόδοση της δομής Si-to-DLSP διεπαφής. Οι απώλειες διάδοσης των DLSP κυματοδηγών μπορούν να εξαχθούν αξιοποιώντας τους κυματοδηγούς μεταβλητού μήκους και εφαρμόζοντας τη μέθοδο δειγμάτων μεταβλητού μήκους (cutback method) που έχει ήδη εφαρμοστεί για τη μέτρηση των απωλειών των Si κυματοδηγών. Για το σκοπό αυτό, αξιοποιήθηκε τρία διαφορετικά σύνολα DLSP κυματοδηγών, καθένα από τα οποία αποτελείται από DLSP κυματοδηγούς με μήκος 60µm, 80µm και 100µm αντίστοιχα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μία πηγή συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) λέιζερ η οποία εκπέμπει μονοχρωματικά και παρέχοντας τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε το μήκος κύματος εκπομπής. Η ευελιξία ως προς το μήκος κύματος εκπομπής είναι αρκετά χρήσιμη καθώς μας δίνει τη δυνατότητα επιτύχουμε το βέλτιστο μήκος κύματος το οποίο απομακρύνει τη φασματική απόκριση θορύβου του συζεύκτη περίθλασης που χρησιμοποιείται για την έγχυση οπτικής ισχύος στο chip. Η επιθυμητή πολωτική κατάσταση για το εισερχόμενο οπτικό σήμα (TM πολωτικός ρυθμός) διασφαλίστηκε κάνοντας χρήση ενός ελεγκτή πόλωσης (Polarization Controller – PC).

Η Εικόνα 11 παρουσιάζει τις εκτιμώμενες συνολικές απώλειες που σχετίζονται με το DLSP τμήμα του κυκλώματος και έχουν εξαχθεί κάνοντας χρήση της μετρητικής μεθόδου περικοπής (cutback method) για διαφορετικά μήκη κυματοδηγών που περιλαμβάνονται στα τρία διαθέσιμα σύνολα δειγμάτων κυματοδηγών. Η συγκεκριμένη μέθοδος βρίσκει ευρεία εφαρμογή και στη μέτρηση των απωλειών πλασμονικών κυματοδηγών [3.56-3.58]. Οι καμπύλες του σχήματος παρουσιάζουν τις μετρημένες απώλειες ως συνάρτηση των μηκών των κυματοδηγών. Αξίζει να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες τιμές απωλειών έχουν εξαχθεί αφαιρώντας το μερίδιο των απωλειών ισχύος που σχετίζονται με τις απώλειες στο Si τμήμα (απώλειες σύζευξης και διάδοσης στους Si

συζεύκτες περίθλασης και Si κυματοδηγούς αντίστοιχα), αγνοώντας επί της ουσίας την παρουσία της μητρικής Si παθητικής πλατφόρμας. Προσαρμόζοντας ιδανικά τη γραμμική προσέγγιση στις διαπιστωμένες μετρήσεις ισχύος, απώλειες διάδοσης στα 0.10dB/μm εξάγονται τη στιγμή που η απώλεια σύζευξης (coupling loss) υπολογίζεται στα 3.37dB για κάθε δομή σύζευξης. Ο συντελεστής προσδιορισμού (Coefficient of Determination) στην περίπτωση της γραμμικής αυτής προσαρμογής υπολογίστηκε να είναι $R^2=49.99\%$, υποδηλώνοντας μια υψηλή διασπορά των μετρήσεων απωλειών. Η ερμηνεία πίσω από τη μεταβλητότητα των μετρήσεων αυτών βρίσκεται πιθανότατα στη διαφορά που διαπιστώθηκε στο μέγεθος του διάκενου στο Si-to-DLSPP σημείο διεπαφής, μια παράμετρος που σχετίζεται με την ακρίβεια της κατασκευαστικής μεθόδου που υιοθετήθηκε και συζητήθηκε σε παραπάνω χωρίο. Επίσης, η ατελής ευθυγράμμιση των δύο δομών (Si Rib κυματοδηγός και DLSPP κυματοδηγός) μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον απώλειες.



Εικόνα 11: Μετρήσεις απωλειών DLSPP κυματοδηγών μήκους 60μm, 80μm και 100μm. Γραμμική προσαρμογή για την εξαγωγή των απωλειών διάδοσης και Si-to-DLSPP σύζευξης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μετρήσεων.

Επιπλέον, δεδομένου της σύγκλισης μεταξύ θεωρητικών αποτελεσμάτων [3.20] και πειραματικών μετρήσεων [3.47,3.59] σχετικά με τις απώλειες διάδοσης (0.10dB/μm) για το συγκεκριμένο τύπο πλασμονικών κυματοδηγών, επιλέξαμε να διερευνήσουμε την επίδραση της μεταβλητότητας που εισάγει η κατασκευαστική αστοχία στο διάκενο μεταξύ DLSPP και Si κυματοδηγού. Υιοθετώντας την προσέγγιση αυτή, τρεις διαφορετικές περιοχές γραμμικής προσέγγισης υιοθετήθηκαν ώστε να εντοπίσουμε το μετρητικό εύρος των απωλειών του σημείου διεπαφής. Κρατώντας λοιπόν σταθερές τις απώλειες διάδοσης στα 0.10dB/μm, γραμμική προσαρμογή αναζητήθηκε για τις τρεις τιμές μετρήσεων για κάθε

μήκος κυματοδηγού με τις μικρότερες (best case) και τις υψηλότερες απώλειες (worst case) αντίστοιχα. Εφαρμόζοντας την προσέγγιση αυτή, οι απώλειες σύζευξης για τη διεπαφή Si-to-DLSPP μετρήθηκαν μεταξύ 2.45dB και 4.3dB για την περίπτωση χαμηλότερων (best case) και υψηλότερων απωλειών (worst case) αντίστοιχα. Είναι εμφανές και από τα αποτελέσματα της γραμμικής προσέγγισης που εμφανίζονται στην Εικόνα 11, η δραστική ελάττωση του μέτρου μεταβλητότητας των μετρήσεων στις γραμμικές αυτές προσαρμογές καθώς προκύπτουν συντελεστές προσδιορισμού $R^2=87.08\%$ και $R^2=89.91\%$, εμφανώς βελτιωμένοι συγκριτικά με την γραμμική προσαρμογή των μέσων όρων. Η διακύμανση στις εξαγόμενες αυτές τιμές των απωλειών διεπαφής οφείλονται όπως αναφέρθηκε στο κυμαινόμενο εύρος της απόστασης του διάκενου μεταξύ του Si Rib κυματοδηγού και του μεταλλικού φύλλου (Au) του DLSPP κυματοδηγού αλλά και την ατελή ευθυγράμμιση των δύο τμημάτων που μπορεί να οδηγήσει σε επιπλέον αύξηση της απώλειας.

Η αξιολόγηση της απόδοσης της παραπάνω δομής διεπαφής περνά επίσης μέσα από τη σύγκριση της με την καταγεγραμμένη δομή στη βιβλιογραφία που προσφέρει τις μικρότερες απώλειες Si-to-DLSPP σύζευξης υιοθετώντας εναλλακτικές τεχνικές και γεωμετρίες κυματοδηγών [3.59]. Ο παρακάτω πίνακας (πίνακας 1) συνοψίζει τα βασικά χαρακτηριστικά των διατάξεων διεπαφής μεταξύ Si κυματοδηγών και DLSPP κυματοδηγών περιλαμβάνοντας την παρούσα διάταξη και τη διάταξη που έχει προταθεί από το Caltech και εμφανίζει τις μικρότερες απώλειες διασύνδεσης μεταξύ Si και DLSPP κυματοδηγών. Στη διάταξη αυτή, υιοθετείται τεχνολογία ridge κυματοδηγού σε αντίθεση με τη διάταξη της διατριβής που χρησιμοποιεί Si Rib κυματοδηγούς. Και στις δύο προσεγγίσεις, οι απώλειες διάδοσης στον πλασμονικό κυματοδηγό είναι περίπου 0.10dB/μm ενώ το ξεκάθαρο πλεονέκτημα της διάταξης που παρουσίασε το Caltech είναι οι χαμηλές απώλειες Si-to-DLSPP διασύνδεσης, της τάξης του 1.1dB. Ο βασικός λόγος για τις αισθητά μειωμένες απώλειες είναι ο ειδικός σχεδιασμός της γεωμετρίας του Si κυματοδηγού ($30 \times 740 \text{nm}^2$) με σκοπό να επιτευχθούν οι ελάχιστες δυνατές απώλειες διασύνδεσης με τον πλασμονικό κυματοδηγό. Ωστόσο, η ελαχιστοποίηση των απωλειών υιοθετώντας τη συγκεκριμένη γεωμετρία, θυσιάζει - λόγω μη συμβατότητας - τη δυνατότητα ανάπτυξης σύνθετων παθητικών δομών στην Si πλατφόρμα οι οποίες προσφέρονται σε Si πλατφόρμες όπου το ύψος (H) επιλέγεται να είναι είτε 220nm ή 340nm με πλάτη κυματοδηγών (W) μικρότερα από 500-600nm τόσο για rib όσο και για strip τεχνολογίες κυματοδηγών Si.

	<i>Διάταξη που προτάθηκε από το Caltech</i>	<i>Διάταξη που συζητείται στην παρούσα διατριβή</i>
Υπόστρωμα	SOI 220nm/2000nm	SOI 340nm/2000nm
Τύπος SOI κυματοδηγού	Ridge κυματοδηγός 30nmx740nm	Rib κυματοδηγός 400nmx340nm
Πάχος φύλλου Au	80nm	65nm
Γεωμετρία PMMA	500nmx560nm	500nmx600nm
Si-to-DLSP απώλεια σύζευξης	1.1dB	3.37dB
Διάκενο μεταξύ SOI και Au	0μm	0.5μm
Απώλειες Διάδοσης στον DLSP κυματοδηγό	0.093dB/μm	0.10dB/μm

Πίνακας 1: Σύνοψη βασικών χαρακτηριστικών Si-to-DLSP διεπαφής μεταξύ της δομής που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή και της δομής που εμφανίζει τις χαμηλότερες απώλειες στη βιβλιογραφία.

Στον αντίποδα, η προσέγγιση στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής έχει λάβει σοβαρά υπόψη τη δυνατότητα για ανάπτυξη τέτοιων παθητικών δομών τεχνολογίας Si οι οποίες θα πλαισιώσουν δομές ενεργών θερμο-οπτικών διακοπών πλασμονικής τεχνολογίας. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η τεχνολογία των Rib κυματοδηγών 400x340nm² η οποία επιτρέπει την ανάπτυξη σύνθετων παθητικών δομών όπως οπτικά φίλτρα, πολυπλέκτες, συζεύκτες ισχύος κτλ. Συνεπώς, ακόμα και εάν εμφανίζεται ένα αυξημένο επίπεδο απωλειών διασύνδεσης στο σημείο της Si-to-DLSP διεπαφής, η επιλογή της συγκεκριμένης προσέγγισης έχει βασιστεί στην ανάπτυξη ενός αποδοτικού συστήματος που θα περιλαμβάνει πλήθος σύνθετων παθητικών δομών στην Si πλατφόρμα. Η υβριδική πλατφόρμα ολοκλήρωσης που περιλαμβάνει DLSP κυματοδηγούς ετερο-ολοκληρωμένους σε Si πλατφόρμα, αποσκοπεί στην ανάπτυξη υβριδικών δομών που θα προσφέρουν μεταγωγή δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, αξιοποιώντας τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση και το μικρό μέγεθος ολοκλήρωσης που προσφέρει η πλασμονική τεχνολογία [3.47]. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη τη διακύμανση των μετρήσεων λόγω κατασκευαστικών ατελειών περαιτέρω βελτίωση των τεχνικών κατασκευής στοχεύοντας στη μεγαλύτερη ακρίβεια και σταθερότητα στη διαδικασία, μπορεί να ανοίξει το δρόμο για την επιτυχία απωλειών διασύνδεσης μικρότερες από 2.45dB που καταγράφηκαν στη γραμμική προσέγγιση των μετρήσεων με τις χαμηλότερες απώλειες.

3.3 Πειραματική αξιολόγηση διάδοσης πληροφορίας στα 10Gb/s από τον DLSPP κυματοδηγό

3.3.1 Το θεωρητικό όριο υποστήριξης μετάδοσης πληροφορίας μέσω DLSPP κυματοδηγού

Η ικανότητα των DLSPP κυματοδηγών να μεταφέρουν κίνηση δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς είναι μια σημαντική ιδιότητα των πλασμονικών κυματοδηγών στην αποστολή τους να υποστηρίξουν παθητικές και ενεργές λειτουργίες σε περιβάλλον οπτικών διεπαφών. Συνεπώς, μια κρίσιμη παράμετρος για την κατηγορία των κυματοδηγών είναι ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας που μπορεί να υποστηρίξει. Για έναν DLSPP κυματοδηγό ο οποίος υποστηρίζει το θεμελιώδη πλασμονικό ρυθμό ο περιορισμός στην ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων που μπορεί να μεταφέρει εισάγεται από την παρουσία της διασποράς εφόσον αγνοηθούν τα μη-γραμμικά φαινόμενα. Το φαινόμενο της διασποράς στον κυματοδηγό έχει ως αποτέλεσμα διαφορετικές φασματικές συνιστώσες του σήματος πληροφορίας να ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα με συνέπεια την εμφάνιση της διαπλάτυνσης στους παλμούς [3.60]. Συνεπώς, ο μέγιστος ρυθμός της μετάδοσης πληροφορίας σε ένα ρεύμα για τον DLSPP κυματοδηγό μήκους (L), περιορίζεται από τη συνθήκη της διακριτής ανίχνευσης διαδοχικών παλμών στην έξοδο του. Στην περίπτωση των DLSPP κυματοδηγών με απώλειες, η χρονική διαπλάτυνση των παλμών πληροφορίας στην έξοδο εξαρτάται από την παράμετρο β_2 της διασποράς που υπολογίζεται από τη δεύτερη παράγωγο της σταθεράς διάδοσης του ρυθμού στον κυματοδηγό, όπως ακριβώς υπολογίζεται και στην περίπτωση της οπτικής ίνας [3.61]. Λαμβάνοντας υπόψη τη μιγαδική φύση της σταθεράς διάδοσης του κυματοδηγούμενου SPP ρυθμού, θα συμπεριληφθεί στην περιγραφή τόσο το πραγματικό όσο και το φανταστικό μέρος της σταθεράς διάδοσης με το μέγιστο εύρος ζώνης που μπορεί να υποστηριχθεί χωρίς να υπάρχει περιορισμός από την παρουσία της διασποράς να δίνεται από την παρακάτω σχέση [3.60]:

$$B \sim L^{-1/2} \cdot [(\frac{\partial^2 \text{Re}\{\beta\}}{\partial \omega^2})^2 + (\frac{\partial^2 \text{Im}\{\beta\}}{\partial \omega^2})^{-1/4}] \quad (3.2)$$

Για την περίπτωση των DLSPP κυματοδηγών αλλά και για άλλους τύπους πλασμονικών κυματοδηγών [3.62], η προηγούμενη σχέση απλοποιείται λαμβάνοντας πως $\frac{\partial^2 \text{Im}\{\beta\}}{\partial \omega^2} \ll \frac{\partial^2 \text{Re}\{\beta\}}{\partial \omega^2}$ και συνεπώς το μέγιστο εύρος ζώνης πληροφορίας που μπορεί να υποστηρίξει ο DLSPP κυματοδηγός μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση [3.63]:

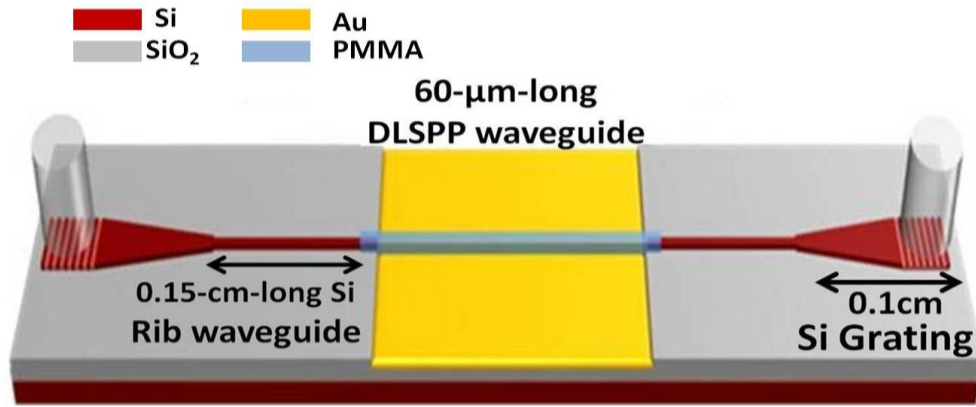
$$B = \sqrt{\frac{1}{8\pi} \cdot \frac{1}{L \cdot \frac{\partial^2 \text{Re}\{\beta\}}{\partial \omega^2}}} = \sqrt{\frac{1}{8\pi} \cdot \frac{v_g^2}{L \cdot \frac{\partial v_g}{\partial \omega}}} \quad (3.3)$$

Στην παραπάνω σχέση, v_g είναι η ομαδική ταχύτητα του διαδιδόμενου ρυθμού, β είναι η σταθερά διάδοσης και L είναι το μήκος του DLSPP κυματοδηγού. Είναι εμφανές πως το μέγιστο εύρος ζώνης πληροφορίας εξαρτάται από τις παραμέτρους του κυματοδηγού, τη γεωμετρία του και τα υλικά που έχουν επιλεγεί για το σχηματισμό της δομής. Από σκοπιά γραμμής μεταφοράς, η παραπάνω σχέση υποδηλώνει πως το φαινόμενο της διασποράς που προκύπτει από την εξάρτηση της ομαδικής ταχύτητας ως προς τη συχνότητα είναι ο βασικός περιορισμός του προβλήματος της διάδοσης. Ωστόσο, η εμφάνιση ιδιαίτερα μικρών μηκών διάδοσης (λόγω του ισχυρού παράγοντα απώλειας) δεν επιτρέπει την εμφάνιση ισχυρής επίδρασης του φαινομένου της διασποράς. Στη βιβλιογραφία, θέτοντας το μήκος του κυματοδηγού ίσο με το μήκος της διάδοσης ($L=L_{\text{prop}}$) έχουν εκτιμηθεί τιμές του μέγιστου εύρους ζώνης που μπορεί να υποστηριχθεί από DLSPP κυματοδηγούς εφοδιασμένους με διηλεκτρική λωρίδα από PMMA σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές επιτρεπόμενου εύρους ζώνης, γύρω από τα 20Tb/s [3.62]. Περιοριζόμενοι στην περιοχή της μονορυθμικής λειτουργίας με διαστάσεις γύρω από τις τιμές της βέλτιστης γεωμετρίας που προκύπτει για τη δομή διηλεκτρική λωρίδα PMMA διαστάσεων $600 \times 600 \text{ nm}^2$ που υποστηρίζει θεωρητικά τη μετάδοση 39 Tb/s. Οι τιμές αυτές πρακτικά εισάγουν περιορισμούς στη μετάδοση από πιθανές μη-γραμμικές συμπεριφορές του μετάλλου και του διηλεκτρικού στον DLSPP κυματοδηγό και για το λόγο αυτό στα πλαίσια της διατριβής πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις αξιολόγησης της δυνατότητας μετάδοσης δεδομένων πληροφορίας με δεδομένα στα 10Gb/s ενώ εξετάστηκε στη συνέχεια η ικανότητα μετάδοσης για ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας στα 160Gb/s.

3.3.2 Μετάδοση 10Gb/s NRZ-OOK σήματος πληροφορίας

Η αξιολόγηση της ποιότητας μετάδοσης πληροφορίας μέσα από DLSPP κυματοδηγό πραγματοποιήθηκε αρχικά χρησιμοποιώντας ένα 10 Gb/s σήμα πληροφορίας χρησιμοποιώντας το σχήμα διαμόρφωσης πλάτους On-Off-Keying (OOK) χρησιμοποιώντας Non-Return-to-Zero (NRZ) παλμούς. Η μελέτη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς δίνει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε τη δομή του DLSPP κυματοδηγού σε συνθήκες διάδοσης σήματος πληροφορίας. Τα χαρακτηριστικά του ισχυρού εγκλωβισμού (strong optical confinement) καθώς και η επίδραση τυχόν φαινομένων διάδοσης κατά μήκος της διεπιφάνειας μετάλλου-διηλεκτρικού έχουν ωθήσει σε αντίστοιχες πειραματικές αξιολογήσεις πλασμονικών διατάξεων [3.64,3.65]. Πρόσφατα, η διερεύνηση της συμπεριφοράς των κυματοδηγών σε μετάδοση σημάτων πληροφορίας διαμορφωμένων στη φάση (Differential Phase Shift Keying – DPSK) τους έχει επίσης καταγραφεί [3.66]. Ο σχολιασμός της απόδοσης της παθητικής πλατφόρμας στοιχείων Si

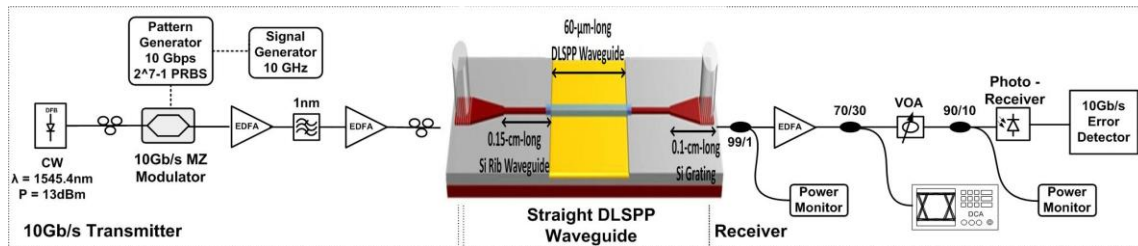
καθώς και της απόδοσης των DLSPP διατάξεων έχει ήδη συζητηθεί στην προηγούμενη ενότητα. Η Εικόνα 12 περιλαμβάνει το υβριδικό Si-DLSPP τσιπ το οποίο περιέχει τη δομή του DLSPP κυματοδηγού ο οποίος έχει μήκος 60 μm .



Εικόνα 12: Αναπαράσταση δομής DLSPP κυματοδηγού μήκους 60 μm ετερο-ολοκληρωμένου σε παθητική μητρική πλατφόρμα Si. Διαφορετικά υλικά αναπαριστώνται με τις χρωματικές επιλογές που παρατίθενται.

3.3.3 Πειραματική Διάταξη για την υλοποίηση της διάταξης στα 10 Gb/s

Η Εικόνα 13 περιγράφει την υλοποίηση της διάταξης για την αξιολόγηση της ικανότητας των DLSPP κυματοδηγών να μεταφέρουν με υψηλή απόδοση δεδομένα πληροφορίας. Η πειραματική διάταξη χωρίζεται σε τρία μέρη: (i) 10 Gb/s πομπός, (ii) υπό εξέταση δομή DLSPP κυματοδηγού ετερο-ολοκληρωμένου σε παθητική Si πλατφόρμα και (iii) ο δέκτης του συστήματος που περιλαμβάνει όλες τις διατάξεις για την επιτυχή ανάκτηση και αξιολόγηση του λαμβανόμενου σήματος.



Εικόνα 13: Πειραματική Διάταξη που εγκαταστάθηκε για την πραγματοποίηση πειράματος αξιολόγησης μετάδοσης πληροφορίας μέσω του DLSPP κυματοδηγού στα 10 Gb/s.

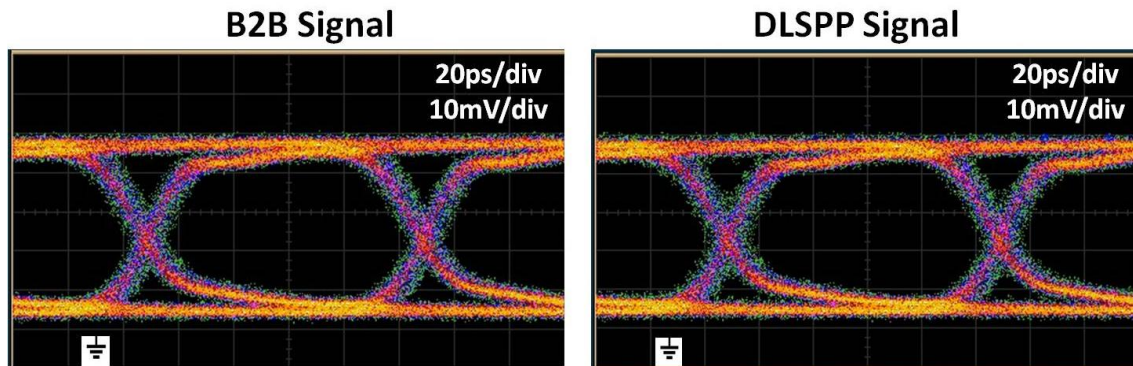
Ένα CW (Continuous Wave – CW) λέιζερ εκπέμποντας στα 1545.4 nm με στάθμη ισχύος στα +13 dBm εισέρχεται σε έναν ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή τύπου Mach-Zehnder ώστε να εγγράψουμε στο οπτικό φέρον την πληροφορία στα 10Gb/s. Η βασικής ζώνης (baseband) ακολουθία πληροφορίας προέρχεται από γεννήτρια παραγωγής δεδομένων

(Pulse Pattern Generator) η οποία είναι κλειδωμένη με ηλεκτρικό ρολόι στα 10 GHz προερχόμενο από γεννήτρια σήματος (Signal Generator). Το 10 Gb/s σήμα το οποίο μεταφέρει μια 2^7-1 PRBS ακολουθία στη συνέχεια ενισχύεται κάνοντας χρήση ενός πρώτου ενισχυτή EDFA για να αντισταθμίσουμε τις απώλειες διαμόρφωσης που έχουν προκύψει. Στην έξοδο του ενισχυτή τοποθετούμε ένα ζωνοπερατό φίλτρο (Optical Bandpass Filter – OBPF) κεντρικού μήκους κύματος στα 1545.4nm με εύρος 1nm ώστε να περιορίσουμε την παρουσία του θορύβου και να βελτιώσουμε τον οπτικό σηματοθορυβικό λόγο (Optical Signal-to-Noise Ratio - OSNR). Ένας δεύτερος ενισχυτής που εκπέμπει υψηλή ισχύ έξοδο (+24 dBm η στάθμη της ισχύος εξόδου του EDFA) χρησιμοποιείται ώστε να επιτύχουμε το κατάλληλο πλεόνασμα ισχύος το οποίο είναι ικανό να αντισταθμίσει τις απώλειες ισχύος που εμφανίζονται προς και από το chip και έχουν συζητηθεί σε προηγούμενη ενότητα.

Το σήμα στην έξοδο του chip ενισχύεται από έναν ενισχυτή EDFA 2 ενισχυτικών σταδίων που χαρακτηρίζεται από χαμηλή ευαισθησία στην εισερχόμενη ισχύ του και δίνει τη δυνατότητα στην ανάκτηση του επιπέδου ισχύος με την όσο το δυνατόν χαμηλότερη υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (OSNR). Το οπτικό σήμα στη συνέχεια οδηγήθηκε σε ένα φωτο-δέκτη υψηλής ευαισθησίας (High-Sensitivity Photoreceiver) ο οποίος επιτρέπει την οπτικο-ηλεκτρονική μετατροπή του σήματος πληροφορίας και την αξιολόγηση του στα διαγνωστικά όργανα της διάταξης. Πιο συγκεκριμένα, μετρήσεις διαγραμμάτων οφθαλμού (eye diagrams) στον παλμογράφο αλλά και μετρήσεις ρυθμού σφαλμάτων ψηφίων (Bit-Error-Rate – BER) [3.67] κάνοντας χρήση ενός δέκτη σφαλμάτων που λειτουργεί στα 10 Gb/s.

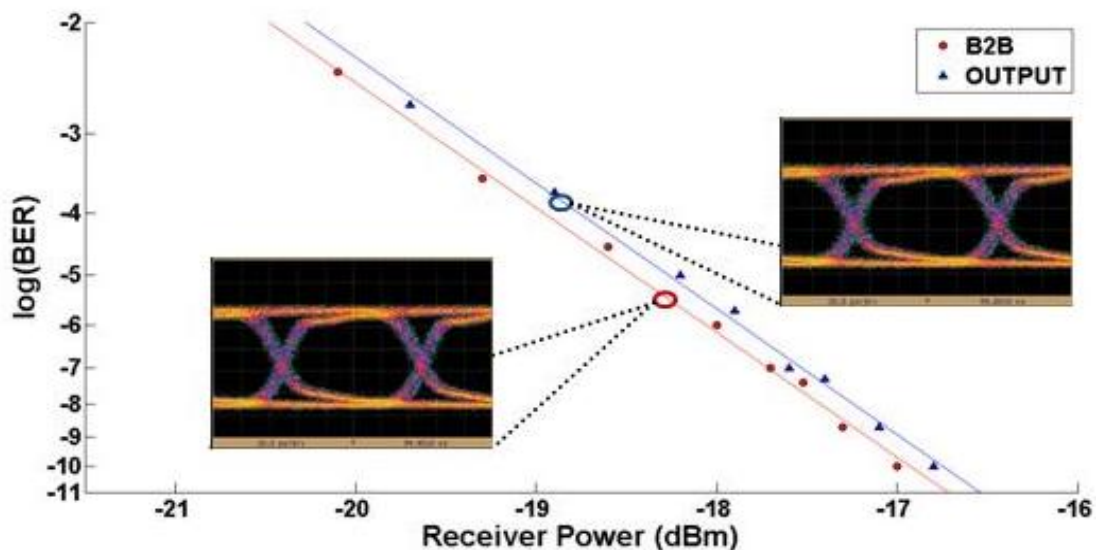
3.3.4 Αποτελέσματα πειραματικής αξιολόγησης

Η Εικόνα 14 παρουσιάζει τα διαγράμματα οφθαλμού (Eye Diagrams) που διαπιστώσαμε στον παλμογράφο για το B2B (Back-to-Back) σήμα και το σήμα μετά τη διάδοση στον 60- μm DLSPP κυματοδηγό που είναι υβριδικά ολοκληρωμένος στην SOI πλατφόρμα. Είναι εμφανές πως η διάδοση στον πλασμονικό κυματοδηγό δεν εισάγει παραμόρφωση στο σήμα. Το άνοιγμα του ματιού (eye opening) παραμένει σταθερό ($\sim 55\text{mVpp}$) και στις δύο περιπτώσεις. Η επίδοση των δύο σημάτων με αναφορά το jitter που εμφανίζεται στην περιοχή μετάβασης των δύο σταθμών είναι επίσης πανομοιότυπη. Αξίζει τέλος να σημειωθεί πως η παρουσία μιας DC συνιστώσας στο λαμβανόμενο σήμα μετά τον φωτο-δέκτη ($V_{dc} \sim 20\text{mV}$) παραμένει σταθερή ως αποτέλεσμα της δημιουργίας μιας συνθήκης τεχνητών απωλειών (ίσων με τις απώλειες που εισάγει το υβριδικό Si-DLSPP τσιπ) κατά τη μελέτη της περίπτωσης B2B.



Εικόνα 14: Διαγράμματα οφθαλμού (Eye Diagrams) για το B2B σήμα στα 10 Gb/s και το σήμα μετά τη διάδοση από τον DLSP κυματοδηγό.

Η αξιολόγηση μέσω BER μετρήσεων επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που εξάγονται μέσω των διαγραμμάτων οφθαλμού. Η Εικόνα 15 παρουσιάζει τις δύο καμπύλες BER που μετρήθηκαν για τα υπό εξέταση 10 Gb/s σήματα στην περίπτωση της B2B μέτρησης αλλά και της διάδοσης μέσω του DLSP κυματοδηγού. Επιτυχής λειτουργία χωρίς σφάλματα, με τιμές του BER μικρότερες από 10^{-9} διαπιστώθηκαν και στις δύο περιπτώσεις σημάτων με την ευαισθησία ισχύος στο δέκτη γύρω από τα -17dBm . Μεταξύ των δύο μετρήσεων, μετρήθηκε (σχεδόν αμελητέα) ποινή ισχύος (power penalty) 0.2dB για τη μέτρηση του διαδιδόμενου σήματος από τον DLSP κυματοδηγό σε σύγκριση με την περίπτωση του B2B. Η μέτρηση αυτή υποδηλώνει πως η επίδραση της παρουσίας του DLSP κυματοδηγού στη μετάδοση του 10 Gb/s σήματος είναι σχεδόν αμελητέα.



Εικόνα 15: Μετρήσεις BER για την B2B περίπτωση και τη διάδοση του σήματος μέσα από τον 60- μm DLSP κυματοδηγό. Διαγράμματα οφθαλμού παρατίθενται επίσης για τις δύο καμπύλες στην περίπτωση του $\text{BER} < 10^{-9}$.

3.4 Διάδοση 160Gb/s OTDM οπτικών σημάτων με οπτικούς παλμούς διάρκειας fs.

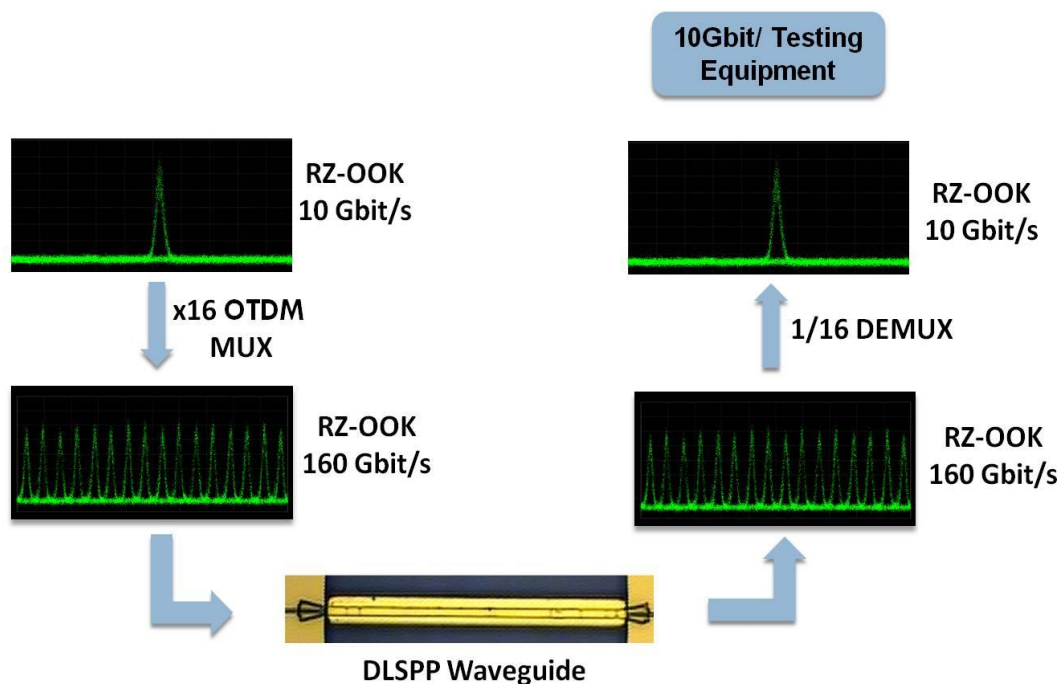
Το επόμενο στάδιο πειραματικής αξιολόγησης των πλασμονικών κυματοδηγών περιλαμβάνει τη διάδοση οπτικών σημάτων υψηλότερου ρυθμού μετάδοσης χρησιμοποιώντας τεχνικές πολυπλεξίας. Στην κατεύθυνση αυτή, η μελέτη της διάδοσης ενός σήματος με χρήση τεχνικής οπτικής πολυπλεξίας στο χρόνο (Optical Time Division Multiplexing – OTDM) θα μας δώσει τη δυνατότητα να αξιολογήσουμε την ικανότητα του DLSPP κυματοδηγού να μεταφέρει σήματα που παράγονται από στενούς οπτικούς παλμούς fs-κλίμακας. Η τεχνική της πολυπλεξίας στο χρόνο (OTDM) αποτελεί μια διαδεδομένη τεχνική η οποία αναπτύχθηκε στα οπτικά συστήματα πολυπλέκοντας σε ένα οπτικό φέρον (optical carrier/wavelength) αρκετά κανάλια στο πεδίο του χρόνου [3.68-3.70]. Βασικό συστατικό στην υλοποίηση του OTDM συστήματος αποτελεί η χρήση ενός παλμικού λέιζερ το οποίο θα παράγει στενούς οπτικούς παλμούς, ικανούς να τοποθετηθούν σε μικρά χρονικά παράθυρα ψηφίων ώστε να αυξηθεί η δυνατότητα ρυθμοδότησης στο σύστημα [3.71].

Η πειραματική αξιολόγηση της διάδοσης OTDM σημάτων ρυθμού 160 Gb/s στην περίπτωση του DLSPP κυματοδηγού, θα μας δώσει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση που μπορεί να έχουν πιθανά φαινόμενα διάδοσης στο σήμα. Πιο συγκεκριμένα, η πιθανή διασπορά [3.72] λόγω των χαρακτηριστικών (dispersive properties) του κυματοδηγού μπορεί να οδηγήσει σε επιβάρυνση της ποιότητας πληροφορίας στην περίπτωση που η κυματοδότηση χαρακτηρίζεται από έναν ενεργό δείκτη διάθλασης (effective refractive index) ο οποίος έχει έντονα χαρακτηριστικά διασποράς σε συνδυασμό με το διευρυμένο φάσμα του εισερχόμενου σήματος. Αρκετές μελέτες έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία που προσφέρουν εργαλεία για τον υπολογισμό της διασποράς σε διάφορες τεχνολογίες ολοκληρωμένων δομών [3.73-3.75].

Η διέγερση μη γραμμικών φαινομένων σε ολοκληρωμένους κυματοδηγούς αναφέρεται στη βιβλιογραφία σαν τεχνική ανάπτυξης δομών που προσφέρουν μη γραμμικές λειτουργίες σε επίπεδο επεξεργασίας σήματος [3.76,3.77]. Ωστόσο στην περίπτωση διερεύνησης της χρήσης του DLSPP κυματοδηγού σαν αξιόπιστος φορέας πληροφορίας, οι μη-γραμμικότητες μπορούν να αλλοιώσουν τη φασματική κατανομή του σήματος πληροφορίας με αποτέλεσμα την περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητας του. Αξίζει να σημειωθεί πως η χρήση συμπιεσμένων οπτικών παλμών μέσω της μη-γραμμικής διάταξης συμπίεσης (εύρους ~900 fs) για να επιτευχθεί η πολυπλεξία σε υψηλότερο ρυθμό, συνεπάγεται την εμφάνιση υψηλών επιπέδων ισχύων κορυφής (peak power) οι οποίες με τη σειρά τους παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διέγερση των μη-γραμμικών φαινομένων. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η διερεύνηση της επίδρασης του φαινομένου τόσο στο τμήμα της παθητικής Si πλατφόρμας όσο και στον DLSPP κυματοδηγό [3.78,3.79].

3.4.1 Πειραματική Διάταξη για την υλοποίηση της διάταξης στα 160 Gbit/s

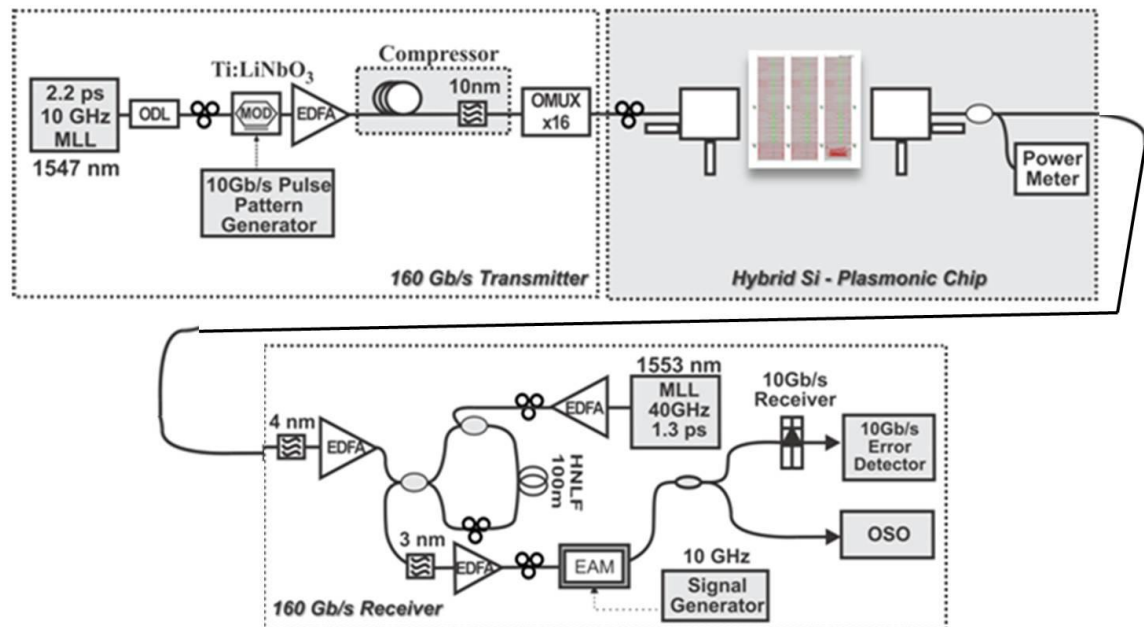
Η Εικόνα 16 παρουσιάζει το δομικό διάγραμμα της διάταξης που υλοποιήθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για την αξιολόγηση της μετάδοσης OTDM πληροφορίας. Η διαμόρφωση ενός σήματος στα 10 Gb/s αποτέλεσε την είσοδο σε έναν οπτικό πολυπλέκτη (x16) ο οποίος προσφέρει ένα σήμα στην έξοδο ρυθμού 160 Gb/s μέσω της πολυπλεξίας στο χρόνο. Μετά από τη διάδοση στον πλασμονικό κυματοδηγό, η πληροφορία στα 160 Gb/s εισέρχεται σε έναν από-πολυπλέκτη ο οποίος θα προσφέρει τις ακολουθίες στα 10 Gb/s οι οποίες μπορούν να αξιολογηθούν από τα διαγνωστικά όργανα του εργαστηρίου. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένας δέκτης σφαλμάτων για την εξαγωγή των BER μετρήσεων και ένας οπτικός παλμογράφος (Optical Sampling Oscilloscope – OSO) ικανός να προσφέρει την αναπαράσταση οπτικών OTDM σημάτων μέχρι τα 500Gb/s [3.80]. Ο παλμογράφος αυτός απαιτεί ένα οπτικό ρολόι συγχρονισμού στα 10GHz το οποίο παρέχεται από το σήμα που εκπέμπει το λέιζερ εγκλειδωσης ρυθμού.



Εικόνα 16: Παρουσίαση του πειράματος αξιολόγησης της μετάδοσης πληροφορίας μέσω του DLSP κυματοδηγού σε ταχύτητα 160Gbit/s κάνοντας χρήση πολυπλεξίας OTDM.

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε το OTDM σύστημα στα 160Gb/s που αποτελείται από τρία διαφορετικά μέρη: (α) τον πομπό στα 160 Gb/s (160Gb/s Transmitter), (β) το υβριδικό Si-DLSP τσιπ που φιλοξενείται στο σταθμό εργασίας (probe station) και (γ) το δέκτη που λειτουργεί στα 160Gb/s (160Gb/s Receiver). Ένα λέιζερ εγκλειδωσης ρυθμού (Mode Locked Laser -MLL) που λειτουργεί με ρυθμό

επαναληψιμότητας (repetition rate) στα 10GHz εκπέμπει παλμούς διάρκειας 2.2 ps. Το μήκος κύματος εκπομπής είναι στα 1547 nm. Η παλμοσειρά αυτή στη συνέχεια οδηγήθηκε σε ένα ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulator – MZM) ο οποίος βασίζεται σε τεχνολογία Ti:LiNbO₃ με σκοπό να εγγραφεί στο οπτικό φέρον ένα ρεύμα πληροφορίας με ρυθμό 10 Gb/s που προέρχεται από μια ηλεκτρική γεννήτρια παραγωγής δεδομένων. Το αποτέλεσμα στην έξοδο του διαμορφωτή είναι η διαπίστωση μιας Return-to-Zero (RZ) ψευδοτυχαίας δυαδικής ακολουθίας 7^{ης} τάξης (2⁷-1PRBS) στα 10 Gb/s. Η διαμορφωμένη πληροφορία στη συνέχεια εισέρχεται σε ένα μη γραμμικό συμπίεστη με σκοπό να μειωθεί το χρονικό εύρος των παλμών πληροφορίας κοντά στα 900 fs. Η λειτουργία του μη-γραμμικού συμπίεστη (nonlinear compressor) βασίζεται στη χρήση μιας ισχυρά μη-γραμμικής ίνας (HNLF) η οποία διεγείρει το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης φάσης (Self Phase Modulation – SPM) παράλληλα με τη χρήση ίνας αρνητικής διασποράς [3.81]. Η ακολουθία των συμπίεσμένων πλέον παλμών (<1ps) εισέρχεται στον οπτικό πολυπλέκτη τεσσάρων σταδίων που βασίζεται στην τεχνική του διαχωρισμού/ένωσης (split and combine). Χρησιμοποιεί συμβολομετρικές δομές Mach-Zehnder με συγκεκριμένες γραμμικές χρονικής καθυστέρησης ανά στάδιο ώστε να επιτύχει την πολυπλεξία του ρεύματος πληροφορίας. Η εμπορικά διαθέσιμη διάταξη του οπτικού πολλαπλασιαστή ρολογιού (Optical Clock Multiplier - OCM) απαιτεί την ρύθμιση της πόλωσης των σημάτων σε κάθε στάδιο και εισάγει απώλειες μεγαλύτερες από 14dB [3.82]. Το σήμα στην έξοδο του πολυπλέκτη είναι πλέον έτοιμο να εισέλθει στον DLSPP κυματοδηγό μήκους 60μm που φιλοξενείται στο υβριδικό Si-DLSPP τσιπ.



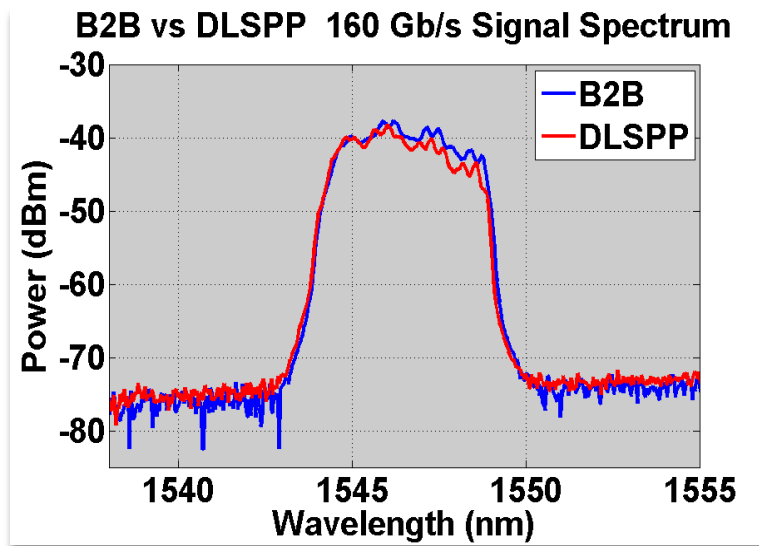
Εικόνα 17: Πειραματική διάταξη για την υλοποίηση της μετάδοσης πληροφορίας στα 160 Gb/s από DLSPP κυματοδηγό.

Ελεγκτές πόλωσης (Polarization Controller - PC) χρησιμοποιήθηκαν για να επιτύχουμε την επιθυμητή πόλωση του εισερχόμενου σήματος (TM πόλωση) που εξασφαλίζει τις ελάχιστες απώλειες ισχύος. Οι συνολικές απώλειες του DLSPP κυματοδηγού μετρήθηκαν να είναι 11 dB οι οποίες καταμερίζονται σε 6 dB απώλειες κυματοδότησης και 5 dB απώλειες λόγω της διασύνδεσης με τους κυματοδηγούς πυριτίου (2.5 dB απώλειες για κάθε Si-to-DLSPP σημείο διεπαφής). Κατά τη διάρκεια του πειράματος διασφαλίσαμε τη διατήρηση της σύζευξης ισχύος από τις ίνες στο τσιπ ώστε να μην υποβαθμίζεται περαιτέρω το συνολικό διαθέσιμο απόθεμα ισχύος του σήματος στην έξοδο. Στην έξοδο του τσιπ, το σήμα διέρχεται από ζωνοπερατό φίλτρο (Optical Bandpass Filter-OBF) και στη συνέχεια ενισχύεται με σκοπό να εισέλθει στη διάταξη του αποπολυπλέκτη.

Η διάταξη του αποπολυπλέκτη υλοποιήθηκε σε δύο στάδια: (α) στο πρώτο στάδιο επιτεύχθηκε η αποπολυπλεξία του σήματος από τα 160 Gb/s στα 40 Gb/s με τη χρήση ενός οπτικού συμβολομέτρου Sagnac και τη δημιουργία κατάλληλων χρονικών παραθύρων μεταγωγής με τη χρήση ενός παλμικού λέιζερ που παράγει παλμούς λειτουργώντας με ρυθμό επαναληψιμότητας στα 40 GHz [3.83]. Στο δεύτερο στάδιο του αποπολυπλέκτη, με τη χρήση ενός Ηλεκτρο-απορροφητικού διαμορφωτή (Electroabsorption Modulator – EAM) ο οποίος οδηγείται με ένα σήμα ρολογιού στα 10 GHz ήταν δυνατή η εξαγωγή των 16 ακολουθιών πληροφορίας με ταχύτητα 10 Gb/s [3.84].

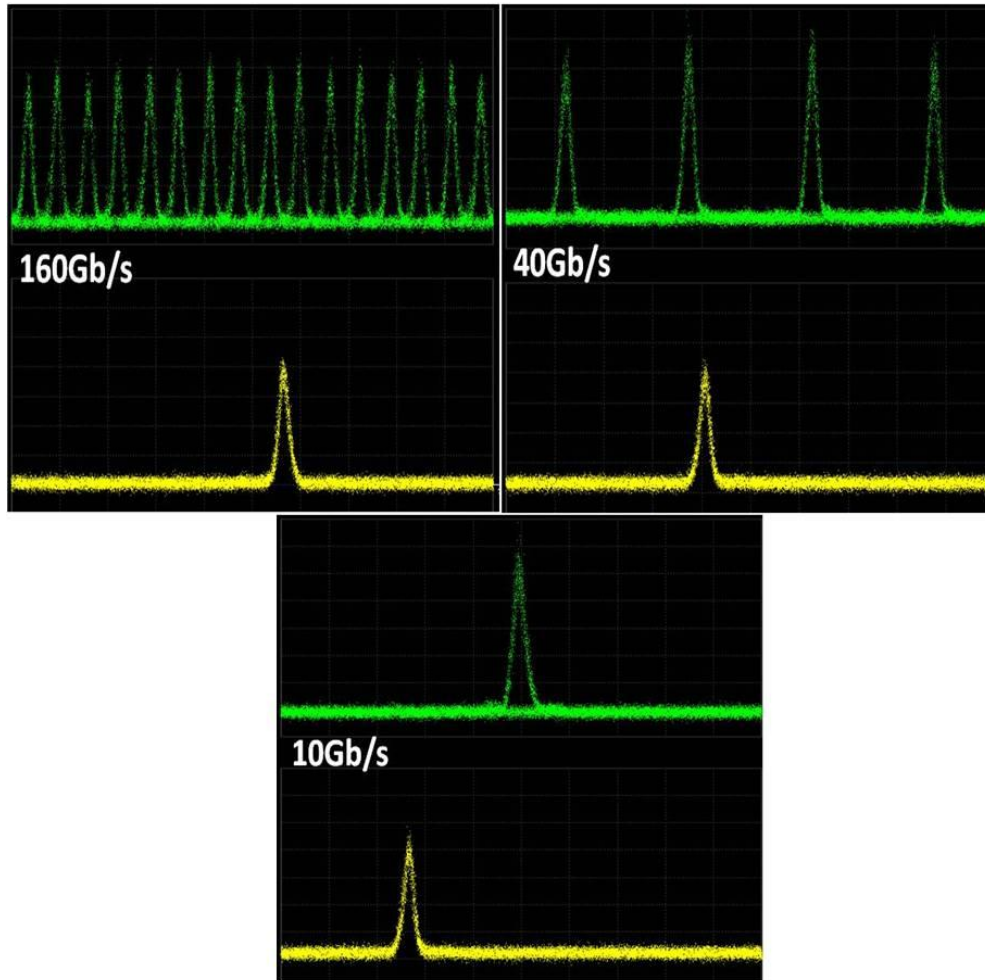
3.4.2 Πειραματικά αποτελέσματα

Η Εικόνα 18 παρουσιάζει το φάσμα των σημάτων εισόδου (B2B) και εξόδου (DLSPP) αποδεικνύοντας πως η επίδραση της διάδοσης στον πλασμονικό κυματοδηγό είναι σχεδόν αμελητέα. Η περιορισμένη επίδραση σε φασματικές συνιστώσες προέρχεται από τη φασματική απόκριση που εμφανίζει ο συζεύκτης περίθλασης (Grating Coupler) και η οποία επιδρά σε κάποιες (red shifted) συχνότητες. Ωστόσο, όπως θα αποτυπωθεί και στο πεδίο του χρόνου, μέσα από τα αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα κάνοντας χρήση του οπτικού παλμογράφου, η ποιότητα των σημάτων (signal quality) πληροφορίας παραμένει υψηλή.



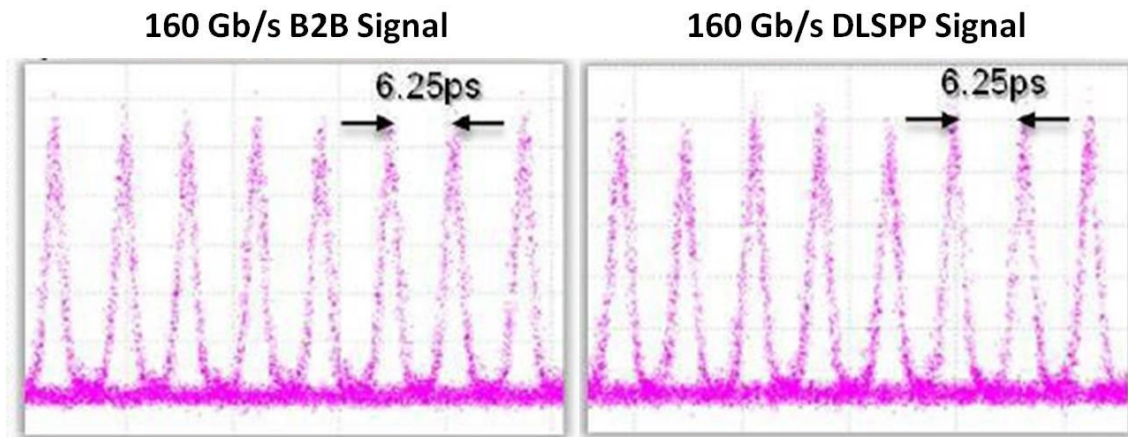
Εικόνα 18: Φασματική κατανομή σήματος εισόδου στον DLSP κυματοδηγό και στην έξοδο μετά από τη διάδοση του.

Στην Εικόνα 19 απεικονίζονται αποτελέσματα σε κάθε στάδιο αποπολυπλεξίας για το διαδιδόμενο σήμα στην έξοδο του DLSP κυματοδηγού. Οι μετρήσεις αυτές παρατίθεται με σκοπό να αξιολογήσουμε την ποιότητα της πολυπλεξίας στον πομπό και της αποπολυπλεξίας στο δέκτη. Για το συγχρονισμό του οπτικού παλμογράφου χρησιμοποιήθηκε ένα αντίγραφο του οπτικού παλμού που παράγεται από το παλμικό λέιζερ στον πομπό και χρησιμοποιείται για τον απαραίτητο συγχρονισμό του παλμογράφου. Η υψηλή απόδοση των δύο διαδοχικών σταδίων της αποπολυπλεξίας είναι εμφανής καθώς η μετάβαση από το αρχικό σήμα στα 160 Gb/s έως το τελικό σήμα στα 10 Gb/s επιτεύχθηκε χωρίς να αλλοιώνεται η μορφή των διαγραμμάτων οφθαλμού (eye diagrams). Η παρατήρηση αυτή εξασφαλίζει την υψηλής ποιότητας μετάδοσης πληροφορίας όπως θα αποδειχθεί και μέσω των BER μετρήσεων στη συνέχεια.



Εικόνα 13: Διαγράμματα οφθαλμού (Eye diagrams) στην έξοδο του DLSPS κυματοδηγού για το σήμα στα 160 Gb/s και στην έξοδο του πρώτου (160 to 40 Gb/s) και δεύτερου (40 to 10 Gb/s) σταδίου αποπολυπλεξίας. Ο παλμός που προέρχεται από το παλμικό λέιζερ του πομπού (10GHz) και χρησιμοποιείται για το οπτικό κλείδωμα του παλμογράφου (κίτρινο).

Στη συνέχεια παρατίθεται τα διαγράμματα οφθαλμού των σημάτων εισόδου στον κυματοδηγό (B2B signal) και στην έξοδο του κυματοδηγού (DLSPS signal) με σκοπό να διερευνηθεί η παρουσία φαινομένων διασποράς που τυχόν επηρεάζουν τα χρονικά χαρακτηριστικά των σημάτων πληροφορίας. Είναι εμφανής η διατήρηση των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών που αποδεικνύεται από την σχεδόν αμελητέα διαφορά (<5 fs) που μετρήθηκε μέσω του παλμογράφου για το χρονικό εύρος ημίσειας ισχύος (Full Width at Half Maximum – FWHM). Η Εικόνα 20 περιλαμβάνει τα διαγράμματα οφθαλμού (eye diagrams) για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις.

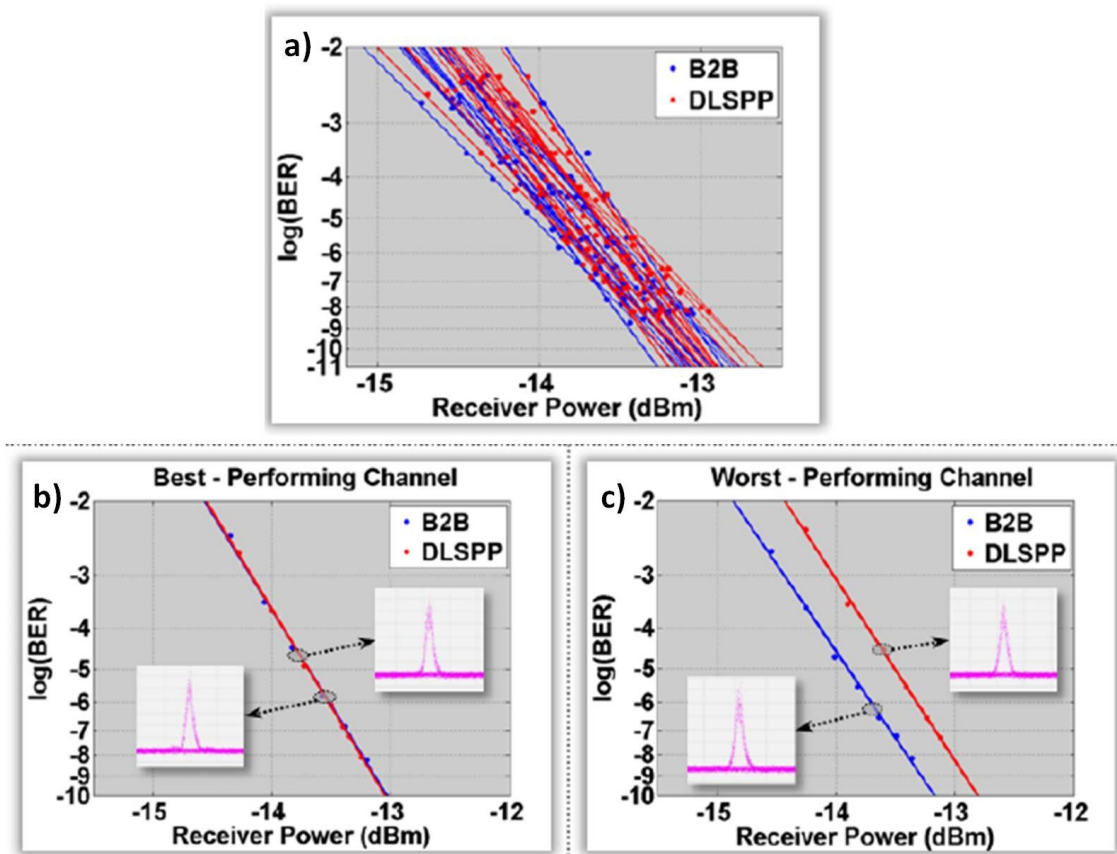


Εικόνα 20: Διαγράμματα οφθαλμού 160 Gb/s σήματος εισόδου (B2B) και σήματος στην έξοδο του DLSPP κυματοδηγού.

Η διάδοση υψηλής ταχύτητας OTDM σήματος αξιολογήθηκε μέσω μετρήσεων BER για κάθε μία από τις 16 ακολουθίες των 10 Gb/s που συνθέτουν το πολυπλεγμένο ρεύμα πληροφορίας στα 160Gb/s. Διαθέτοντας έναν μετρητή ρυθμού σφαλμάτων (Error Detector) ο οποίος λειτουργεί στα 10 Gb/s αξιολογούμε την ποιότητα του σήματος που παρέχει ο πομπός αλλά και αυτού που διαδίδεται μέσω του DLSPP κυματοδηγού. Για να εστιάσουμε στην επιβάρυνση που εισάγει μόνο ο DLSPP κυματοδηγός, η B2B (Back-to-Back) μέτρηση υλοποιήθηκε εισάγοντας μια τεχνητή απώλεια ίση με αυτή που εισάγει το ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιέχει τον κυματοδηγό και διατηρώντας τα ενεργά στοιχεία (EDFAs) αλλά και φίλτρα της διάταξης τα ίδια για τις δύο περιπτώσεις των μετρήσεων. Η διαπίστωση των 16 διαφορετικών 10 Gb/s καναλιών που συνθέτουν το OTDM σήμα στα 160 Gb/s επιτεύχθηκε κάνοντας χρήση: (α) οπτικής γραμμής καθυστέρησης (Optical Delay Line - ODL) η οποία εισάγει διαφορετική καθυστέρηση στο 40 GHz οπτικό ρολόι από το παλμικό λέιζερ στο πρώτο στάδιο της αποπολυπλεξίας για να διαπιστώσουμε τα τέσσερα διαφορετικά ρεύματα 40 Gb/s πληροφορίας (4x40G) (β) ενός RF στροφέα φάσης (RF Phase Shifter) ο οποίος καθυστερεί το ηλεκτρικό ρολόι που οδηγεί τον EAM διαπιστώνοντας τις τέσσερις διαφορετικές 10 Gb/s ακολουθίες (4x10G) που συνθέτουν το κάθε 40 Gb/s κανάλι στο δεύτερο στάδιο της αποπολυπλεξίας.

Η Εικόνα 21(α) περιέχει τις καμπύλες μέτρησης ρυθμού σφαλμάτων (BER) ως συνάρτηση της λαμβανόμενης οπτικής ισχύος (Received Optical Power - ROP) για τις 16 διαφορετικές ακολουθίες που προκύπτουν στην περίπτωση της B2B και της διάδοσης στον DLSPP κυματοδηγό που είναι ολοκληρωμένος στην SOI πλατφόρμα. Η μέτρηση του BER για τιμές μικρότερες του 10^{-9} ($BER < 10^{-9}$) που περιγράφει λειτουργία μηδενικού σφάλματος (Error Free Operation) ήταν εφικτή και για τις 16 ακολουθίες που αξιολογήθηκαν στα 10 Gb/s τόσο στο B2B σήμα όσο και στο διαδιδόμενο από τον ετερο-ολοκληρωμένο DLSPP κυματοδηγό. Η μέτρηση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα υψηλής καθαρότητας διαγράμματα οφθαλμού που διαπιστώθηκαν στον οπτικό παλμογράφο. Για

την επίτευξη λειτουργίας μηδενικού σφάλματος, παρατηρήθηκε διακύμανση 1 dB στη μέτρηση της λαμβανόμενης οπτική ισχύος, γεγονός που υποδηλώνει την ιδιαίτερα ελκυστική απόδοση του υπο αξιολόγηση συστήματος μετάδοσης πληροφορίας και για την ικανοποιητική απόδοση και των 16 καναλιών στα 10 Gb/s που συνθέτουν το OTDM σήμα. Οι Εικόνες 21(β) και 21(γ) παρέχουν μια πιο λεπτομερή προσέγγιση για τα ανεξάρτητα 10 Gb/s κανάλια που μετρήθηκαν με τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις του καναλιού με την καλύτερη (β) και χειρότερη (γ) αντίστοιχα απόδοση με κριτήριο την ποινή ισχύος (power penalty) μεταξύ της B2B μέτρησης και της μέτρησης μετά από τη διάδοση στην υπό εξέταση δομή. Το κανάλι #15 παρουσίασε την καλύτερη απόδοση με μηδενική ποινή ισχύος μεταξύ των δύο διαφορετικών μετρήσεων για τη λαμβανόμενη ισχύ ενώ το κανάλι #13 που εμφάνισε τη χειρότερη απόδοση χαρακτηρίζεται από ποινή λαμβανόμενης ισχύος κοντά στα 0.5dB μεταξύ των δύο μετρήσεων. Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν πως η επιβάρυνση που εισάγει η δομή του DLSPP κυματοδηγού ετερο-ολοκληρωμένου στην παθητική SOI πλατφόρμα στην ποιότητα του OTDM σήματος είναι σχεδόν αμελητέα. Η πειραματικά επιβεβαιωμένη ικανότητα των DLSPP κυματοδηγών τους επιτρέπει να ενσωματωθούν σαν ενεργά στοιχεία σε ολοκληρωμένες δομές θερμο-οπτικών διακοπών που λειτουργούν σε υπερυψηλές ταχύτητες.



Εικόνα 21: (α) Καμπύλες μετρήσεων BER για όλα τα κανάλια (16 x 10 Gb/s) που μελετήθηκαν στην περίπτωση B2B και διάδοσης από DLSPP κυματοδηγό. Καμπύλες μετρήσεων BER και διαγράμματα οφθαλμού για το κανάλι που εμφανίζει την καλύτερη (β) και χειρότερη (γ) επίδοση ποινή ισχύος.

3.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε η θεωρία των DLSP κυματοδηγών που αξιοποιούνται για να είναι εφικτός ο πλευρικός περιορισμός των SPP ρυθμών ώστε να είναι δυνατή η αύξηση του βαθμού ολοκλήρωσης των πλασμονικών κυκλωμάτων αλλά και να επιτευχθεί η ανάπτυξη πλασμονικών δομών που επιτρέπουν τη διοχέτευση της κυματοδηγούμενης ισχύος σε παθητικά «κανάλια» κάμψης όπως S-bends, Directional Couplers και άλλες παθητικές δομές [3.85]. Οι αρχές που επιτρέπουν τον εγκλωβισμό του SPP ρυθμού στη διηλεκτρική λωρίδα εισάγονται στη συνέχεια για την περίπτωση των DLSP κυματοδηγών και αναδεικνύονται τα συγκριτικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης κατηγορίας πλασμονικών κυματοδηγών: απλότητα στην τεχνολογία της κατασκευής τους με την προσθήκη διηλεκτρικής φόρτισης στη μεταλλική επιφάνεια, ισχυρός εντοπισμός του SPP ρυθμού με ανεκτά επίπεδα απωλειών διάδοσης, συμβατότητα με τη μέθοδο της 'βαθιάς' UV-λιθογραφίας (deep UV-lithography) που υπερτερεί έναντι των εναλλακτικών τεχνικών κατασκευής DLSP κυματοδηγών [3.45].

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχεδίαση DLSP κυματοδηγών με λωρίδα διηλεκτρικής φόρτισης από PMMA που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON [3.47]. Η δομή του DLSP κυματοδηγού συζητείται στη συνέχεια με έμφαση στις σχεδιαστικές παραμέτρους που καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων υλικών και της αντίστοιχης γεωμετρίας. Οι DLSP κυματοδηγοί σχεδιάστηκαν με σκοπό να εφοδιάσουν τις ενεργές λειτουργίες (active functionalities) των κυκλωμάτων διακοπών και για το λόγο αυτό υιοθετήθηκαν σχεδιαστικές παράμετροι των δομών που είναι συμβατοί με τον θερμο-οπτικό μηχανισμό του ελέγχου καθώς και της αποδεκτής ετερο-ολοκλήρωσης στην SOI παθητική πλατφόρμα των Rib κυματοδηγών που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Μετρήσεις προσομοίωσης που αφορούν το βέλτιστο προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της δομής διασύνδεσης (κενό μεταλλικού φύλλου και ευθυγράμμιση κυματοδηγών) περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο ενώ οι βασικές κατασκευαστικές παράμετροι που οδήγησαν σε αστοχίες κατασκευής παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης για τη δομή Si-to-DLSP διασύνδεσης (Si-to-DLSP interface) επικυρώθηκαν με πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από δείγματα μεταβλητού μήκους (cutback samples). Η υψηλής ποιότητας κατασκευή των DLSP κυματοδηγών με διηλεκτρική λωρίδα PMMA επικυρώνεται από τις μετρήσεις των απωλειών διάδοσης στα 0.1dB/μm ενώ οι απώλειες σύζευξης για τη διεπαφή Si-to-DLSP που μετρήθηκαν μεταξύ 2.45dB και 4.3dB για την περίπτωση χαμηλότερων (best case) και υψηλότερων (worst case) τιμών απωλειών.

Η δυνατότητα των DLSP κυματοδηγών να μεταφέρουν ρεύματα πληροφορίας σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης εξετάζεται στη συνέχεια. Οι θεωρητικοί υπολογισμοί για την ικανότητα μετάδοσης πληροφορίας που παρουσιάζονται στην αρχή της ενότητας συνοδεύονται από τις μετρήσεις των πειραμάτων μετάδοσης στα 10Gb/s με χρήση

σχήματος διαμόρφωσης πλάτους NRZ-OOK από μήκους-60μm DLSPP κυματοδηγό. Οι μετρήσεις της BER επίδοσης κατέδειξαν αμελητέα επιδείνωση στην ποιότητα σήματος (degradation of signal quality) με αμελητέες ποινές ισχύος (<0.2dB). Στη συνέχεια, διερευνήθηκε πειραματικά η ικανότητα της μεταφοράς δεδομένων στα 160Gb/s υιοθετώντας την τεχνική πολυπλεξίας στο χρόνο (OTDM). Οι πειραματικές μετρήσεις επιβεβαίωσαν τη δυνατότητα των DLSPP κυματοδηγών να μεταφέρουν χωρίς υποβάθμιση υψίσυχνα σήματα με τιμές ποινής ισχύος που κυμαίνονται από 0dB έως 0.5dB μεταξύ των μετρήσεων διάδοσης και των B2B μετρήσεων.

Αναφορές 3^ο Κεφαλαίου

- [3.1] Z. Chen, T. Holmgaard, S. I. Bozhevolnyi, A. V. Krasavin, A. V. Zayats, L. Markey, and A. Dereux, "Wavelength-selective directional coupling with dielectric-loaded plasmonic waveguides," *Optics Letters* 34(3), 310–312(2009).
- [3.2] D. K. Gramotnev, and S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," *Nature Photonics*, vol. 4, pp. 83-91, 2010.
- [3.3] R.F. Oulton, G. Bartal, D.F.P. Pille, and X. Zhang, "Confinement and propagation characteristics of subwavelength plasmonic modes", *New Journal of Physics* 10, 105018 (2008).
- [3.4] H.A. Atwater, "The promise of Plasmonics", *Scientific American*, 296, 56-62 (2007).
- [3.5] D. O'Connor, M. McCurry, B. Lafferty, and A. V. Zayats, "Plasmonic waveguide as an efficient transducer for high-density data storage," *Appl. Phys. Lett.* 95(17), 171112 (2009).
- [3.6] A. V. Krasavin, and A. V. Zayats, "All-optical active components for dielectric-loaded plasmonic waveguides," *Elsevier Optics Communications*, Vol. 28, Issue 3, pp. 1581–1584 (2010).
- [3.7] A. V. Krasavin, and A. V. Zayats, "Three-dimensional numerical modeling of photonic integration with dielectric-loaded SPP waveguides," *Phys. Rev. B* 78(4), 045425 (2008).
- [3.8] A. Ptilakis, O. Tsilipakos, A. Tasolamprou, and E.E. Kriezis, "Guided Wave Plasmonics: An emerging technology for nanophotonic integrated circuits with high level of functionality", in *Proc. of 2nd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications (PACET'12)*, March 16-18, 2012, Thessaloniki, Greece.
- [3.9] T. Holmgaard, Z. Chen, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, A. Dereux, A. V. Krasavin, and A. V. Zayats, "Wavelength selection by dielectric-loaded plasmonic components," *Appl. Phys. Lett.* 94(5), 051111(2009).
- [3.10] Alexey V. Krasavin and Anatoly V. Zayats, "Silicon-based plasmonic waveguides", *Optics Express*, Vol.18, No.11, pp. 11791-11799 (2010).
- [3.11] S. Zhang, B. Lin, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, "High-Performance TO Switches on Compact Cu-Dielectric-Si Hybrid Plasmonic WRRs", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.26, No.24, pp.2495-2498 (2014).

- [3.12] J.V. Galan et al, "Packaging of silicon photonic devices: Grating structures for high efficiency coupling and a solution for standard integration", in Proc. of European Microelectronics and Packaging Conference (EMPC 2009), pp. 1-6, 15-18 June 2009, Rimini, Italy.
- [3.13] L. Zimmermann, H. Schröder, T. Tekin, W. Bogaerts, P. Dumon, "g-Pack – a generic testbed package for Silicon photonics devices", in Proc. of 5th IEEE International Conference Group IV Photonics, p. 371, Sorrento, Italy (2008).
- [3.14] A. La Porta et al, "Silicon photonics packaging for highly scalable optical interconnects", in Proc. of 65th IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2015), pp. 1299-1304, 26-29 May 2015, San Diego, CA, USA.
- [3.15] O. Tsilipakos, T.V. Yioultsis and E.E.Kriezis, "Theoretical analysis of thermally tunable microring resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides," Journal of Applied Physics, Vol. 106, No. 9, 093109, Nov. 2009.
- [3.16] S. Papaioannou et al, "A 320Gb/s-throughput capable 2x2 Silicon-Plasmonic Router Architecture for Optical Interconnects", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol.29, Issue 21, pp.3185-3195 (2011).
- [3.17] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Passive photonic elements based on dielectric-loaded surface polariton waveguides", Applied Physics Letters, 90(211101), 2007.
- [3.18] Jacek Gosciniaik et al, "Thermo-optic control of dielectric-loaded plasmonic waveguide components", Optics Express, Vol. 18, Issue 2, pp. 1207-1216, Jan. 2010.
- [3.19] K. Hassan, J.-C. Weeber, L. Markey, and A. Dereux, "Thermo-optical control of dielectric loaded plasmonic racetrack resonators", Journal of Applied Physics, Vol. 110, No. 2, 023106, July 2011.
- [3.20] O. Tsilipakos, T.V. Yioultsis and Em.E. Kriezis, "Theoretical analysis of thermally tunable microring resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides," Journal of Applied Physics, Vol. 106, No. 9, 093109, Nov. 2009.
- [3.21] N. Pleros, E.E. Kriezis and K. Vysokinos, "Optical Interconnects Using Plasmonics and Si-Photonics", IEEE Photonics Journal, Vol. 3, No.2, pp. 296-301, April 2011.
- [3.22] M.A. Taubenblatt, "Optical Interconnects for High-Performance Computing", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, Issue 4, pp. 448-457 (2012).
- [3.23] S. Rakheja and V. Kumar, "Comparison of electrical, optical and plasmonic on-chip interconnects based on delay and energy considerations", in Proc. of 13th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED 2012), pp. 732-739, 19-21 March 2012, Santa Clara, CA, USA.
- [3.24] V. A. Zenin, V. S. Volkov, Z. Han, S. I. Bozhevolnyi, E. Devaux, and T. W. Ebbesen, "Directional coupling in channel plasmon-polariton waveguides, " Optics Express, Vol.20, pp. 6124–6134 (2012).
- [3.25] A. Melikyan, C. Gaertner, K. Kohnle, A. Muslija, M. Sommer, M. Kohl, C. Koos, W. Freude, and J. Leuthold, "Integrated wire grid polarizer and plasmonic polarization beam splitter, "

in Proc. of "Optical Fiber Communication Conference," (Optical Society of America, 2012), paper OW1E.3., Los Angeles, CA, USA.

[3.26] K. Hassan, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, A. Ptilakis, O. Tsilipakos, and E. E. Kriezis, "Characterization of thermo-optical 2×2 switch configurations made of Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguides for telecom routing architecture, " Proc. of OFC/NFOEC 2012, OW3E.5, Los Angeles, CA, USA, March 2012

[3.27] J. J. Ju et al, "40 Gbit/s light signal transmission in long-range surface plasmon waveguides," Applied Physics Letters, vol. 91, p. 171117, 2007.

[3.28] H. Raether, "Surface Plasmons on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings", 1st ed. (Springer-Verlag, Berlin,1988).

[3.29] E. Ozbay, "Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions", Science 311, pp.189-193 (2006).

[3.30] T. Holmgaard et al, "Bend- and splitting loss of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides", Optics Express, Vol.16, No.18, pp. 13585-13592 (2008).

[3.31] J. Takahara, S. Yamagishi, H. Taki, A. Morimoto, and T. Kobayashi, "Guiding of a one-dimensional optical beam with nanometer diameter," Optics Letters, Vol.22, Issue 7, pp. 475-477 (1997).

[3.32] M. Quinten, A. Leitner, J.R. Krenn, and F.R. Aussenegg, "Electromagnetic energy transport via linear chains of silver nanoparticles", Optics Letters, Vol.23, Issue 17, pp. 1331-1333 (1998).

[3.33] I.V. Novikov and A.A. Maradudin, "Channel Polaritons", Physical Review B, Vol.66, Issue 3, 15 July 2002.

[3.34] D.K. Gramotnev and D.F.P. Pile, "Single-mode subwavelength waveguide with channel plasmon-polaritons in triangular grooves on a metal surface", Applied Physics Letters, Vol.85, Issue 26, 6323 (2005).

[3.35] S.I. Bozhevolnyi, V.S. Volkov, E. Devaux, J.-Y. Laluet, and T.W. Ebbesen, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators", Nature Letters, Vol.440, 23 March 2006.

[3.36] C. Manolatou, S. G. Johnson, S. Fan, P. R. Villeneuve, H. A.Haus, and J. D. Joannopoulos, "High-Density Integrated Optics", Journal of Lightwave Technology, Vol.17, No.9, pp. 1682-1692 (1999).

[3.37] B. Steinberger, A. Hohenau, D. Ditlbacher, A. Drezet, F. R. Aussenegg, A. Leitner, and J. R. Krenn, "Dielectric strips on gold as surface plasmon waveguides: Bends and directional couplers", Applied Physics Letters, Vol.91, Issue 8, 081111(2006).

[3.38] C. Reinhardt, S. Passinger, B. N. Chichkov, C. Marquart, I. P. Radko, and S. I. Bozhevolnyi, "Laser-fabricated dielectric optical components for surface plasmon polaritons", Optics Letters, Vol.31, Issue 9, pp.1307-1309 (2006).

- [3.39] A. Hohenau, J. R. Krenn, A. L. Stepanov, A. Drezet, H. Ditlbacher, B. Steinberger, A. Leitner, and F. R. Aussenegg, "Dielectric optical elements for surface plasmons", *Optics Letters*, Vol.30, Issue 8, pp.893-895 (2005).
- [3.40] Tobias Holmgaard, "Dielectric-loaded guiding of surface plasmon polaritons", PhD Thesis, Aalborg University, Staer T.H. (2009).
- [3.41] J. Grandidier, S. Massenot, G.Colas des Francs, A. Bouhelier, J.-C. Weeber, L. Markey, and A. Dereux, "Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides: Figures of merit and mode characterization by image and Fourier plane leakage microscopy", *Physical Review B* 78, 245419 (2008).
- [3.42] T. Holmgaard and S.I. Bozhevolnyi, "Theoretical analysis of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides", *Physical Review B* 75, 245405 (2007).
- [3.43] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Electro-optic switching element for dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides", *Applied Physics Letters* 97, 041107 (2010).
- [3.44] Grandidier, G.C. de Francs, S. Massenot, A.Bouhelier, L. Markey, J.-C. Weeber, C. Finot, and A. Dereux, "Gain-Assisted Propagation in a Plasmonic Waveguide at Telecom Wavelength", *Nano Letters*, 9(8), pp.2935-2939 (2009).
- [3.45] T. Holmgaard and S.I. Bozhevolnyi, "Dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides at telecommunication wavelengths: Excitation and characterization", *Applied Physics Letters* 92, 011124 (2008).
- [3.46] B. Steinberger, A. Hohenau, D. Ditlbacher, A. L. Stepanov, A. Drezet, F. R. Aussenegg, A. Leitner, and J. R. Krenn, "Dielectric strips on gold as surface plasmon waveguides", *Applied Physics Letters*, 88 094104(2006).
- [3.47] G. Giannoulis, D. Kalavrouziotis, D. Apostolopoulos, S. Papaioannou, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, K. Hassan, J.-C. Weeber, A. Dereux, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, K. Vyrsoinos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, No. 5, pp. 374-376 (2012), "Data Transmission and Thermo-optic Tuning Performance of Dielectric-loaded Plasmonic Structures Hetero-Integrated on a Silicon Chip".
- [3.48] D. Kalavrouziotis, G.Giannoulis, D. Apostolopoulos, S. Papaioannou, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, K. Hassan, J.-C. Weeber, A. Dereux, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vyrsoinos and N. Pleros, "10 Gb/s Transmission and Thermo-Optic Resonance Tuning in Silicon-Plasmonic Waveguide Platform", in *Proceedings of 37th European Conference on Optical Communication (ECOC 2011)*, We.10.P1.27, Article No. 6066097, Geneva, Switzerland, 18-22 September 2011.
- [3.49] Karim Hassan. "Fabrication and characterization of thermo-plasmonic routers for telecom applications", PhD Thesis, Universite de Bourgogne, 2013, English.
- [3.50] J. Gosciniak, L. Markey, A. Dereux, S.I. Bozhevolnyi, "Efficient thermo-optically controlled Mach-Zehnder interferometers using dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Vol.20, No.15*, pp. 16300-16309 (2013).

- [3.51] J. Gosciniak, S. I. Bozhevolnyi, "Performance of thermo-optic components based on dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides," *Sci. Rep.*, vol. 3, no. 1803, pp. 1-8, May 2013.
- [3.52] S. Papaioannou, G. Giannoulis, K. Vysokinos, F. Leroy, F. Zacharatos, L. Markey, J.-C. Webber, A. Dereux, S.I. Bozhevolnyi, A. Prinzen, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N. Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.27, Issue 9, pp. 963-966 (2015), "Ultra-compact and Low-Power Plasmonic MZI Switch Using Cyclomer Loading".
- [3.53] L. Markey et al, "Recess Photomask Contact Lithography and the fabrication of coupled silicon photonic and plasmonic waveguide switches", *Elsevier Microelectronic Engineering*, Vol. 141, pp. 129-134 (2015).
- [3.54] O. Tsilipakos, A. Pitilakis, T. V. Yioultsis, S. Papaioannou, K. Vysokinos, D. Kalavrouziotis, G. Giannoulis, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, K. Hassan, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, N. Pleros and E. E. Kriezis *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 48, No. 5, pp. 678-687 (2012), "Interfacing Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides: Theoretical Analysis and Experimental Demonstration".
- [3.55] S. Papaioannou, G. Dabos, K. Vysokinos, Giannis Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Eight-Channel Second-Order Ring Resonator based SOI Multiplexers/Demultiplexers for Optical Interconnects", in *Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2014)*, paper P2.7, 21-25 September 2014. Cannes, France.
- [3.56] S. Park et al, "Sub-dB/cm propagation loss in silver stripe waveguides", *Optics Express*, Vol. 17, No.2, pp. 697-702 (2009).
- [3.57] H.-R. Park, J.-M. Park, M.S. Kim, M.-H. Lee, "A waveguide-typed plasmonic mode converter", *Optics Express*, Vol. 20, No.17, pp. 18636-18645 (2012).
- [3.58] N. Kinsey, M. Ferrera, G.V. Naik, V.E. Babicheva, V.M. Shalaev and A. Boltasseva, "Experimental demonstration of titanium nitride plasmonic interconnects", *Optics Express*, Vol.22, No.10, pp. 12238-12247 (2014).
- [3.59] R. M. Briggs, J. Grandidier, S.P. Burgos, E. Feigenbaum and H. Atwater, "Efficient Coupling between Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides", *Nano Lett.*, 10 (12), pp 4851-4857 (2010).
- [3.60] S.J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, ECE Department, Rutgers University, USA 2008.
- [3.61] Διαλέξεις Φωτονικής Τεχνολογίας για Τηλεπικοινωνίες, Ενότητα 3: Διασπορά I, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Χειμερινό Εξάμηνο, 2016-2017.
- [3.62] A.V. Krasavin, A.V. Zayats, "Active Nanophotonic Circuitry Based on Dielectric-loaded Plasmonic Waveguides", *Advanced Optical Materials* 2015, Vol.3, 1662-1690.

- [3.63] D. Yu. Fedyanin , A. V. Krasavin , A. V. Arsenin , A. V. Zayats, "Surface Plasmon Polariton Amplification upon Electrical Injection in Highly Integrated Plasmonic Circuits", *Nano Lett.*, Vol. 12, pp. 2459-2463 (2012).
- [3.64] J.J. Ju et al, "Polymer-Based Long-Range Surface Plasmon Polariton Waveguides for 10-Gbps Optical signal Transmission Applications", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 26, Issue 11, pp. 1510-1518 (2008).
- [3.65] S. Kharitonov, R. Kiselev, A.Kumar, I. Fernandez, X. Shi, K. Leosson, T. Pertsch, S. Nolte, S. Bozhevolnyi, and A. Chipouline, "Data Transmission in long-range dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides", *Optics Express*, Vol.22, No.22, pp. 26742-26751 (2014).
- [3.66] B. Banan, M.S. Hai, E. Lisicka-Skrzek, P. Berini, and O. Liboiron-Ladouceur, "Multichannel Transmission Through a Gold Strip Plasmonic Waveguide Embedded in Cytosol", *IEEE Photonics Journal*, Vol. 5, No.3, June 2013.
- [3.67] Mark Summerfield, "Minding your BER's and Q's – Bit-Error-Rate and Q Factor Measurement: Theory and Practice", November 4, 1999.
- [3.68] D.M. Spirit, A.D. Ellis, and P.E. Barnsley, "Optical time division multiplexing: systems and networks", *IEEE Communications Magazine*, Vol.32, Issue 12, pp. 56-62 (1994).
- [3.69] H. Yamazaki, A. Sano, M. Nagatani, and Y. Miyamoto, "Single-carrier 1-Tb/s PDM-16QAM transmission using high-speed InP MUX-DACs and an integrated OTDM modulator", *Optics Express*, Vol.23, No.10, pp. 12866-12873 (2015).
- [3.70] Y.Liu et al, "Error-Free All-Optical Wavelength Conversion at 160Gb/s Using a Semiconductor Optical Amplifier and an Optical Bandpass Filter", *IEEE Journal of Lightwave Technol.*, Vol.24, No.1, pp.230-236 (2006).
- [3.71] Marcel Kroh, "Semiconductor Mode-Locked Laser for High-Speed OTDM Transmission", PhD Dissertation, January 2006, Berlin, Germany.
- [3.72] L. Yin, Q. Lin, and G.P. Agrawal, "Dispersion tailoring and soliton propagation in silicon waveguides", *Optics Letters*, Vol.31, No.9, pp.1295-1297 (2006).
- [3.73] Wei-ping Huang, H. Huang, "A simple variational approach to optical rib waveguides", *IEEE J. Lightwave Technol.* 9 (1991) 56–61.
- [3.74] X. Zhang et al, "Polymer-Based Hybrid-Integrated Photonic Devices for Silicon-On-Chip Modulation and Board-Level Optical Interconnects", *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, Vol.19, Issue 6, pp.2254-2266 (2013).
- [3.75] J. Liao et al, "Polarization dispersion characteristics analysis of optical rib waveguides in organic/polymer photonic devices", *Elsevier Optics Communications*, Vol.350, pp. 241-247 (2015).
- [3.76] T. Vallaitis et al, "All-Optical Wavelength Conversion of 56Gbit/s NRZ-DQPSK Signals in Silicon-Organic Hybrid Strip Waveguides", in *Proc. of Optical Fiber Communications Conference (OFC'2010)*, paper OTuN1, 21-25 March, San Diego, CA, USA (2010).

- [3.77] H. K. Tsang and Y. Liu, "Nonlinear optical properties of silicon waveguides," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 23, p. 064007 (2008).
- [3.78] D.T.H. Han, K. Ikeda, P.C. Sun, and Y. Fainman, "Group Velocity dispersion and self phase modulation in silicon nitride waveguides", *Applied Physics Letters* 96, 061101 (2010).
- [3.79] A.V. Krasavin, P. Segovia, P. Ginzburg, and A.V. Zayats, "Surface Nonlinearities in Plasmonics", in *Proc. of CLEO: QELS_Fundamental Science*, paper FTh4K.7, 8-13 June 2014, San Jose, Ca, USA.
- [3.80] Optical Sampling Oscilloscope (OSO), EYE-1100C, commercially available from Alnair Labs, online available: <http://www.alnair-labs.com/product-lineup.php>.
- [3.81] Hans Christian Hansen Mulvad, "Approaching Terabit/s Switching", 1st EUROFOS Workshop on Photonic Systems (WORPS), June 28th 2009, Sao Miguel, Azores, Portugal.
- [3.82] Optical Multiplexer OMUX-4-160-1550, commercially available from u2t Photonics, online available: http://www.av-iq.com/avcat/images/documents/dataSheet/OMUX4_Series_Datasheet.pdf.
- [3.83] P. Bakopoulos et al, "160Gb/s All-Optical Contention Resolution with Prioritization using Integrated Photonic Circuits", in *Proc. of European Conference on Optical Communications (ECOC 2009)*, paper 6.3.5, 20-24 September 2009, Vienna, Austria.
- [3.84] H.-F. Chou, J.E. Bowers, and D.J. Blumenthal, "Compact 160-Gb/s Add-Drop Multiplexing with a 40-Gb/s Base-Rate", in *Proc. of Optical Fiber Conference (OFC'04)*, Postdeadline Session, paper PD28, 22 February 2004, Los Angeles, CA, USA.
- [3.85] T. Holmgaard, Z.Chen, S.I. Bozhevolnyi, L. Markey, and A. Dereux, "Design and Characterization of Dielectric-Loaded Plasmonic Directional Couplers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol.27, No.24, December 15, 2009.

4. Μελέτη και πειραματικός χαρακτηρισμός πλασμονικών κυκλωμάτων μεταγωγής με χρήση δομών δακτυλίων με θερμο-οπτικό έλεγχο

Οι τεχνολογίες φωτονικής ολοκλήρωσης έχουν προσελκύσει σημαντικό ενδιαφέρον στον τομέα της έρευνας και ανάπτυξης διεθνώς συμβάλλοντας καταλυτικά στην ανάπτυξη πράσινων τεχνολογιών επικοινωνιών, επεξεργασίας πληροφορίας και υπολογιστικών συστημάτων υψηλής απόδοσης (High-Performance Computing – HPC). Η συμβολή αυτή βασίζεται στα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα Φωτονικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (Photonic Integrated Circuits-PICs) όπως το τεράστιο εύρος ζώνης, οι χαμηλοί χρόνοι καθυστέρησης και οι ελκυστικές ενεργειακές επιδόσεις.

Στο τοπίο της φωτονικής ολοκλήρωσης, οι δομές μικρο-δακτυλίων συντονισμού (Micro-Ring Resonators – MRRs) καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από λειτουργίες σε ολοκληρωμένες δομές που υπηρετούν σύνθετες λειτουργίες πάνω στο πλινθίο (on-chip). Υπάρχει ευρύ φάσμα από αναφορές στις οποίες έχουν επιδειχθεί πειραματικά προσφέροντας αρκετές λειτουργίες όπως διαμορφωτές [4.1,4.2], φίλτρα, πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες (multiplexers/demultiplexers), δομές δρομολόγησης (routers), μετατροπείς μήκους κύματος και ενεργές κοιλότητες για δομές λέιζερ [4.3-4.7]. Οι παραπάνω δομές που βασίζονται σε δομές μικρο-δακτυλίων καλύπτουν τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνται στο υπόστρωμα των οπτικών διεπαφών (Optical Interconnects) που αναπτύσσονται για αν δώσουν απαντήσεις στο περιβάλλον υψηλών απαιτήσεων μεταφοράς πληροφορίας. Το βασικό τους χαρακτηριστικό που τα καθιστά ελκυστικά στις παραπάνω λειτουργίες είναι το μικρό τους μέγεθος, που καθιστά εφικτή την ολοκλήρωσή τους σε σύνθετες δομές που φιλοξενούνται σε ένα κοινό τσιπ (chip).

Η βασική πρόκληση από σκοπιά συστήματος που αντιμετωπίζουν οι δομές των δομών μικρο-δακτυλίων (MRRs) είναι η δυνατότητα να προσαρμοστούν σε ένα περιβάλλον λειτουργίας που θα λειτουργεί βασιζόμενο σε τεχνικές πολυπλεξίας πολλαπλών μηκών κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM). Οι τεχνικές μεταφοράς πληροφορίας αξιοποιώντας δομές φωτονικής ολοκλήρωσης βασίζονται συχνά σε αρχιτεκτονικές που απαιτούν έναν οπτικό φορέα για τη μεταφορά των δεδομένων (Single Carrier-SC) [4.5,4.8-4.9]. Ωστόσο, είναι γεγονός πως η επέκταση σε τεχνικές υιοθέτησης σχημάτων πολλαπλών φορέων (Multi Carrier - MC) αποτελεί ένα μονοπάτι για να ικανοποιηθούν οι ολοένα και μεγαλύτερες απαιτήσεις για τον όγκο μετάδοσης πληροφορίας. Στην απάντηση αυτή, οι περιοδικές συναρτήσεις μεταφοράς των μικρο-δακτυλίων είναι η προσέγγιση που συναντά την ανάγκη για πολλά μήκη κύματος επιδεικνύοντας τη δυνατότητα μεταγωγής ενός μεγάλου αριθμού WDM καναλιών [4.10,4.11].

Η δυνατότητα για εξυπηρέτηση λειτουργιών σε περιβάλλον πολλαπλών οπτικών φορέων (MC-approach) συναντά τις δυνατότητες που ανοίγονται στο ανώτερο ιεραρχικό

επίπεδο οργάνωσης του δικτύου και της μεταφοράς δεδομένων για αξιοποίηση των δομών μικρο-δακτυλίων σε ευέλικτες (flexible) τοπολογίες οπτικών διεπαφών για την εξυπηρέτηση της κίνησης μεταξύ τμημάτων που οργανώνουν λειτουργίες των υπολογιστικών συστημάτων (board-to-board optical interconnects) [4.12-4.14]. Αυτές οι αρχιτεκτονικές αποτελούνται από πηγές μεταβλητού μήκους κύματος που είναι δυνατόν να μεταφέρουν δεδομένα σε δέκτες με ευρύ φάσμα μέσα από μια διαδικασία δρομολόγησης που αναλαμβάνουν να επιτελέσουν ολοκληρωμένες φωτονικές δομές. Οι δομές μικρο-δακτυλίων καλούνται σε αυτές τις τοπολογίες να εξυπηρετήσουν το φυσικό στρώμα των δομών δρομολόγησης (switching fabrics) έχοντας τη δυνατότητα να προσαρμοστούν σε ένα περιβάλλον ευέλικτης λειτουργίας στο χώρο των μηκών κύματος. Για το σκοπό αυτό, αναπτύσσεται η ανάγκη για ικανοποιητική λειτουργία δομών μικρο-δακτυλίων που να επιτρέπουν τον ενεργό έλεγχο των φασματικών χαρακτηριστικών τους τόσο για τη λειτουργία της μεταγωγής όσο και της μεταβολής της φασματικής απόκρισης για να ικανοποιηθεί η απαίτηση της ευελιξίας σε ανώτερο ιεραρχικά επίπεδο.

Η επιλογή της πλατφόρμας του πυριτίου (Si) αποτελεί το βασικό σενάριο για την ανάπτυξη τεχνολογίας μικροδακτυλίων βασισμένους σε τεχνολογίες κυματοδηγού (Waveguide Ring Resonators – WRRs). Το μικρό μέγεθος ολοκλήρωσης των δομών προσφέρει τη δυνατότητα στις WRR δομές να χρησιμοποιούνται σε πολλές διαφορετικές τοπολογίες για τη σύνθεση περίπλοκων αρχιτεκτονικών μεταγωγής. Ο ενεργός έλεγχος αυτών καθιστά υψηλής αξιοπιστίας τη μεταγωγή πακέτων πληροφορίας προσφέροντας υψηλούς λόγους σβέσης (Extinction Ratio - ER) και δυνατότητα για φασματική ευελιξία μέσω του ενεργού μηχανισμού ελέγχου που οδηγεί στη μετατόπιση των φασματικών χαρακτηριστικών λειτουργίας τους. Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για περαιτέρω εξοικονόμηση μεγέθους και ενέργειας για την ανάπτυξη οπτικών διασυνδέσεων νέας γενιάς, αναζητήθηκαν τεχνολογίες ολοκλήρωσης οι οποίες υπόσχονται υψηλότερες επιδόσεις στην πυκνότητα ολοκλήρωσης και ακόμα χαμηλότερες ενεργειακές καταναλώσεις. Στην κατεύθυνση αυτή, η ερευνητική κοινότητα στράφηκε στην αναδυόμενη και πολλά υποσχόμενη πλασμονική τεχνολογία [4.15-4.18], η οποία βασίζεται στη διάδοση επιφανειακών πλασμονικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (SPPs) κατά μήκος μιας διεπιφάνειας μετάλλου-διηλεκτρικού. Χάρη σε αυτή την τεχνολογία υπερβαίνεται το όριο περίθλασης από το οποίο περιορίζονται οι συμβατικές οπτικές διατάξεις [4.19], με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η ανάπτυξη φωτονικών κυκλωμάτων με διαστάσεις πολύ μικρότερες του μήκους κύματος. Εκτός αυτού, η ίδια η υποδομή υποστήριξης (μέταλλο-διηλεκτρικό) της πλασμονικής τεχνολογίας επιτρέπει την απρόσκοπτη συνύπαρξη ηλεκτρικών και οπτικών σημάτων, παρέχοντας έτσι μία φυσική ενεργειακά αποδοτική πλατφόρμα για τη συγχώνευση ευρυζωνικών οπτικών γραμμών με προηγμένη ηλεκτρονική επεξεργασία.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εξετάζεται η ανάπτυξη κυκλωμάτων μεταγωγής βασισμένα στην τεχνολογία κυματοδηγών διηλεκτρικής φόρτισης (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton – DLSP) ως μια πειστική προσέγγιση στο πρόβλημα της ανάπτυξης κυκλωμάτων μεταγωγής πακέτων πληροφορίας για οπτικές διασυνδέσεις

[4.20,4.21]. Η ανάπτυξη ενεργών πλασμονικών δομών απαιτεί την ταυτόχρονη παρουσία ενός κατάλληλου σχεδιασμού για κυματοδηγούς που να προσφέρουν υψηλής ποιότητας οδήγηση (guiding) του φωτός ταυτόχρονα με τη δυνατότητα για τον ενεργό έλεγχο της κυματοδηγησης αυτής ώστε να επιτευχθεί η λειτουργία της μεταγωγής. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούμε τους DLSP κυματοδηγούς οι οποίοι ανήκουν στην κατηγορία κυματοδηγών που βασίζονται στη διέγερση πλασμονικών ρυθμών στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού. Αποτελούν την πιο απλή προσέγγιση κυματοδηγησης και προσφέρει ισχυρό εντοπισμό του πεδίου στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού ενώ εξασθενεί εκθετικά το πεδίο κατά τη διείσδυση στο μέταλλο. Οι απώλειες του κυματοδηγού οφείλονται κυρίως από το ποσοστό της πεδιακής κατανομής που θα διεισδύσει στο μέταλλο. Τυπικές τιμές μηκών διάδοσης για τη συγκεκριμένη τεχνολογία είναι κάποιες δεκάδες μm , όπως αποδείχθηκε και στις πειραματικές μετρήσεις του προηγούμενου κεφαλαίου. Για να αντιμετωπιστεί ο περιορισμός των ισχυρών απωλειών στους DLSP κυματοδηγούς, έχει προταθεί η συνέργεια μεταξύ των διαφορετικών τεχνολογιών ολοκλήρωσης: της τεχνολογίας πυριτίου (Si) που προσφέρει αξιόπιστη, χαμηλού κόστους και χαμηλών απωλειών λύση για τις παθητικές λειτουργίες που απαιτούνται στις ολοκληρωμένες δομές των δρομολογητών και της τεχνολογίας DLSP που προσφέρουν εξαιρετικά μικρό μέγεθος στους δακτυλίους μεταγωγής αλλά και δυνατότητα για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση στο μηχανισμό μεταγωγής όπως εξηγείται παρακάτω.

Η ενεργή λειτουργία στις δομές των δακτυλίων μεταγωγής που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη διατριβή βασίζονται στην αξιοποίηση του μηχανισμού του θερμο-οπτικού φαινομένου. Ο θερμο-οπτικός μηχανισμός επιτρέπει τη λειτουργία ενός διακόπτη πολύ μικρού μεγέθους καθώς το καλώδιο που χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του κυματοδηγού είναι ταυτόχρονα και μέρος της δομής του κυματοδηγού. Συνεπώς, το μεταλλικό στρώμα εξυπηρετεί ταυτόχρονα δύο λειτουργίες καθώς θερμαίνει μέσω του φαινομένου Joule (Joule effect) μεταβάλλοντας ταυτόχρονα το δείκτη διάθλασης του πολυμερικού περιβλήματος που περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της κυματοδηγούμενης ισχύος [4.22]. Αξίζει να σημειωθεί συνεπώς ο μεγάλος χωρικός βαθμός επικάλυψης μεταξύ του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και της ενεργειακής ροής από τη θερμική πηγή. Αποτέλεσμα είναι η αξιοποίηση του ενεργού αυτού μηχανισμού για επίδειξη DLSP δομών μεταγωγής που προσφέρουν υψηλές τιμές λόγων σβέσεως (ER) μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής (ON&OFF) καθώς ιδιαίτερα χαμηλές ενεργειακές καταναλώσεις (~λίγα mWs) [4.23,4.24]. Το βασικό μειονέκτημα του θερμο-οπτικού μηχανισμού μεταγωγής αποτελούν οι αργοί χρόνοι του καθώς η δυναμική του θερμικού προβλήματος οδηγεί σε χρόνους μεταγωγής στην κλίμακα των μs [4.25,4.26].

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής, μελετάται η ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συντονιστών δακτυλίου (Ring Resonators) βασισμένους σε τεχνολογία DLSP κυματοδηγών με σκοπό την υιοθέτησή τους σε σύνθετες κυκλωματικές δομές μεταγωγής πληροφορίας. Στο εισαγωγικό τμήμα του κεφαλαίου, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της πλασμονικής προσέγγισης για ευρυζωνική μεταφορά δεδομένων σε υψηλής πυκνότητας ολοκληρωμένες δομές αξιοποιώντας δομές WRRs που προσφέρουν τη

δυνατότητα φασματικής επιλογής καθώς και ο ενεργός έλεγχος τους που διασφαλίζει τη μεταγωγή πληροφορίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα εκτενές θεωρητικό πλαίσιο που εξηγεί τις αρχές λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά των δακτυλίων μεταγωγής που βασίζονται σε τεχνολογίες κυματοδηγών. Αναδεικνύονται τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς τους ώστε να είναι σαφής στον αναγνώστη η αρχή λειτουργίας για τη μεταγωγή πακέτων σε περιβάλλον οπτικής διασύνδεσης. Ο μηχανισμός του ενεργού ελέγχου που κρύβεται πίσω από το σχηματισμό της συνθήκης μεταγωγής περιγράφεται στη συνέχεια εστιάζοντας παράλληλα στις συνθήκες που πρέπει να πληρούνται από την πλασμονική δομή μεταγωγής ώστε να επιδεικνύονται υψηλές επιδόσεις στη λειτουργία αυτή του διακόπτη. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δομές διακοπών που χρησιμοποιούν το υλικό PMMA για σχηματισμό της πολυμερικής λωρίδας στον πλασμονικό κυματοδηγό. Οι δομές αυτές είναι ετερο-ολοκληρωμένες στην παθητική πλατφόρμα Si που έχει περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Ο πειραματικός χαρακτηρισμός της δομής αυτής περιλαμβάνεται στο κεφάλαιο αυτό ενώ τα βασικά σημεία των αποτελεσμάτων σχολιάζονται εκτενώς ώστε να αναδειχθούν οι κρίσιμες σχεδιαστικές παράμετροι αλλά και οι προκλήσεις που περιορίζουν τις επιδόσεις των δομών μεταγωγής που βασίζονται σε DLSPP δακτυλίου. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται πειραματικές μετρήσεις που περιλαμβάνουν εναλλακτικές δομές μεταγωγής που βασίζονται σε τοπολογίες διπλών δακτυλίων και χρησιμοποιούν το πολυμερές Cyclomer για το σχηματισμό της πολυμερικής λωρίδας του κυματοδηγού. Οι δομές αυτές σχεδιάστηκαν από ερευνητές του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για να καλύψουν τις ανάγκες των διακοπών στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του προγράμματος ICT-PLATON. Συμπεριλαμβάνονται συνοπτικά στην παρούσα διατριβή με σκοπό να υπάρξει μια σύγκριση και σχολιασμός των δομών μεταγωγής που βασίζονται σε διαφορετικά πολυμερή. :οπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, για να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα πλεονεκτήματα της πλασμονικής προσέγγισης για ευρυζωνική μεταφορά δεδομένων σε υψηλής πυκνότητας ολοκληρωμένες δομές, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη δομών που προσφέρουν τη δυνατότητα φασματικής επιλογής καθώς και ο ενεργός έλεγχος του που διασφαλίζει τη μεταγωγή πληροφορίας.

4.1 Ανάπτυξη WRR δομών βασισμένων στην DLSPP τεχνολογία

4.1.1 Αρχή λειτουργίας πλασμονικών WRR δομών

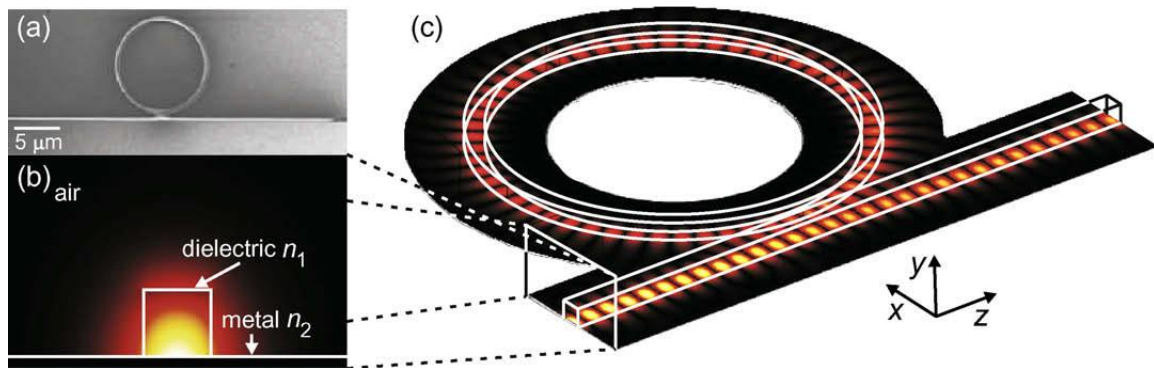
Οι δομές των κοιλοτήτων συντονισμού παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην επιτυχία των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων καθώς προσφέρουν δομές με φασματική επιλεκτικότητα που είναι δυνατόν να ολοκληρωθούν σε πολύ μικρό μέγεθος. Η γενική περίπτωση ενός συντονιστή δακτυλίου αποτελείται έναν οπτικό κυματοδηγό ο οποίος βραχυκυκλώνει την είσοδο με την έξοδο του και προσφέρει τη δυνατότητα συντονισμού για τα μήκη κύματος στα οποία ο οπτικός δρόμος είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των μηκών

κύματος. Στην κατηγορία των DLSP (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton-DLSP) δομών, έχουν επιδειχθεί θεωρητικά και πειραματικά δομές συντονιστών δακτυλίου με υψηλές επιδόσεις που τις καθιστούν αποτελεσματικές επιλογές για την υλοποίηση δομών [4.27].

Η αρχή λειτουργίας που διέπει τις δομές κοιλοτήτων συντονισμού κυματοδηγού (Waveguide Ring Resonator – WRR) περιγράφεται με αρκετά αναλυτικό τρόπο στην εργασία των Krasavin και Zayats [4.28]. Στην εικόνα 1(α) παρουσιάζεται η δομή του WRR που κατασκευάστηκε μέσα από τη χρήση ενός SEM (Scanning Electron Microscope – SEM) μικροσκοπίου. Βασίζεται σε έναν DLSP κυματοδηγό ο οποίος αποτελείται από μια λωρίδα διηλεκτρικού με δείκτη διάθλασης n_1 και ένα στρώμα μετάλλου με (μιγαδικό) δείκτη διάθλασης n_2 . Ο κυματοδηγός έχει κατασκευαστεί κάνοντας χρήση της τεχνικής βαθιάς UV λιθογραφίας (deep UV-lithography). Κατά τη διενέργεια της μελέτης προσομοίωσης των συγγραφέων, μέσω της μεθόδου FEM (Finite Element Method - FEM) σε τρεις διαστάσεις, χρησιμοποιήθηκε ένας DLSP κυματοδηγός που βασίζεται σε ένα διηλεκτρικό υλικό με δείκτη διάθλασης $n_1=1.493$ (κοντά στην τιμή του δείκτη διάθλασης του πολυμερούς PMMA) με διαστάσεις εγκάρσιας τομής $600 \times 600 \text{ nm}^2$. Η λωρίδα πολυμερούς τοποθετείται πάνω σε μία επιφάνεια ενός μετάλλου χρυσού (Au) με δείκτη διάθλασης $n_2=0.55-j \cdot 11.5$ σύμφωνα με τις παραμέτρους που έχουν δοθεί για το υλικό αυτό [4.29]. Επιλύοντας το πρόβλημα ιδιορυθμών αποδεικνύεται πως η συγκεκριμένη δομή κυματοδηγού υποστηρίζει μονορυθμική λειτουργία με υποστηριζόμενο ρυθμό τον θεμελιώδη πλασμονικό ρυθμό TM_{00} . Όπως έχει αποδειχθεί και στη βιβλιογραφία, η μονορυθμική λειτουργία η οποία συγκλίνει σε μια βέλτιστη πλευρική κατανομή του ρυθμού στα μήκη κύματος της τηλεπικοινωνιακής μπάντας [4.21], απαραίτητη συνθήκη για να διασφαλιστούν χαμηλές απώλειες σε δομές κάμψης που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση δομών WRRs με μικρό μέγεθος. Στην εικόνα 1(b) αναπαρίσταται το προφίλ του συγκεκριμένου ρυθμού και τα ικανοποιητικά επίπεδα συγκέντρωσης του ρυθμού στον πυρήνα του κυματοδηγού.

Η σύζευξη τμήματος της πεδιακής έντασης στον δακτύλιο κυματοδηγού αποτυπώνεται στην εικόνα 1(γ) όπου ο χάρτης πεδίου αναπαριστά τα χαρακτηριστικά διάδοσης του ρυθμού στην κοιλότητα συντονισμού. Εξαιτίας της σύζευξης ισχύος μεταξύ δύο κυματοδηγών που τοποθετούνται πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, ένα τμήμα της ισχύος S_0 που κυματοδηγείται στον ευθύ κυματοδηγό (bus waveguide) θα συνεχίσει να διαδίδεται στον κυματοδηγό ενώ ένα άλλο τμήμα L_0 θα μεταφερθεί στην κοιλότητα συντονισμού. Καθώς ολοκληρώνει μια διαδρομή στο δακτύλιο η πεδιακή ένταση L_0 συμβαίνει η ανάστροφη διαδικασία. Ένα τμήμα ισχύος S_1 επιστρέφει στον ευθύ κυματοδηγό και συμβάλλει με το αρχικό τμήμα S_0 και το υπόλοιπο L_1 συνεχίζει να διαδίδεται στην κοιλότητα συντονισμού με τον αρχικό ρυθμό της κοιλότητας. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται συνεχώς με την ίδια διαδικασία ανακατανομής ισχύος σε κάθε κύκλο: το τμήμα της πεδιακής ισχύος L_1 οδηγεί σε S_2 και L_2 αντίστοιχα. Αν και η μελέτη της συμβολής στη θύρα εξόδου του συμβολομέτρου είναι μια σύνθετη διαδικασία περιλαμβάνοντας πεδιακές συνιστώσες με διαφορετικό πλάτος και σχέσεις διαφοράς φάσης

[4.30], μπορούμε να περιορίσουμε την περιγραφή μας σε δύο οριακές περιπτώσεις που περιέχουν όλη την πληροφορία που χρειάζεται ο αναγνώστης για να αντιληφθεί την αρχή λειτουργίας της διάταξης. Η πρώτη περίπτωση μελέτης αφορά την περίπτωση υπέρθεσης του αρχικά διαδιδόμενου κύματος S_0 με τις πεδιακές συνιστώσες που εξέρχονται από την κοιλότητα $\Sigma = S_1 + S_2$ και βρίσκονται σε συνθήκη αναίρεσης φάσης (Διαφορά φάσης ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο του π). Στην περίπτωση αυτή, η συνάρτηση μεταφοράς στη θύρα εξόδου παίρνει την ελάχιστη τιμή της. Η αντίθετη οριακή περίπτωση στη μελέτη της κοιλότητας συντονισμού συμβαίνει όταν η αρχική συνιστώσα S_0 που θεωρήθηκε στην αρχή της παραγράφου βρίσκεται σε συμφωνία φάσης με τις πεδιακές συνιστώσες που εξέρχονται από την κοιλότητα. Η συνθήκη αυτή διασφαλίζεται στην περίπτωση που ο οπτικός δρόμος (optical path) εντός της κοιλότητας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μισού του εισερχόμενου μήκους κύματος ($\lambda/2$). Στην επόμενη ενότητα θα αναφερθούμε με λεπτομέρεια στην ποσοτική περιγραφή της διάταξης σχολιάζοντας τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς τους και τις παραμέτρους που την επηρεάζουν καθώς και τα φασματικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς.



Εικόνα1: (α) Εικόνα μιας δομής WRR όπως έχει καταγραφεί με τη χρήση ενός SEM μικροσκοπίου (β) Αναπαράσταση εγκάρσιας τομής και τιμή της παραμέτρου $abs(E_y)$ της εγκάρσιας συνιστώσας του προφίλ του πεδίου για τον θεμελιώδη SPP ρυθμό TM_{00} (γ) Αποτέλεσμα της ολοκληρωμένης 3-D προσομοίωσης βασισμένη στη FEM τεχνική και η αντίστοιχη αναπαράσταση του πεδιακού χάρτη για την εγκάρσια συνιστώσα (E_y) στη μεταλλική επιφάνεια. Η συγκεκριμένη σχηματική αναπαράσταση έχει υιοθετηθεί από την εργασία των Krasavin&Zayats [4.28].

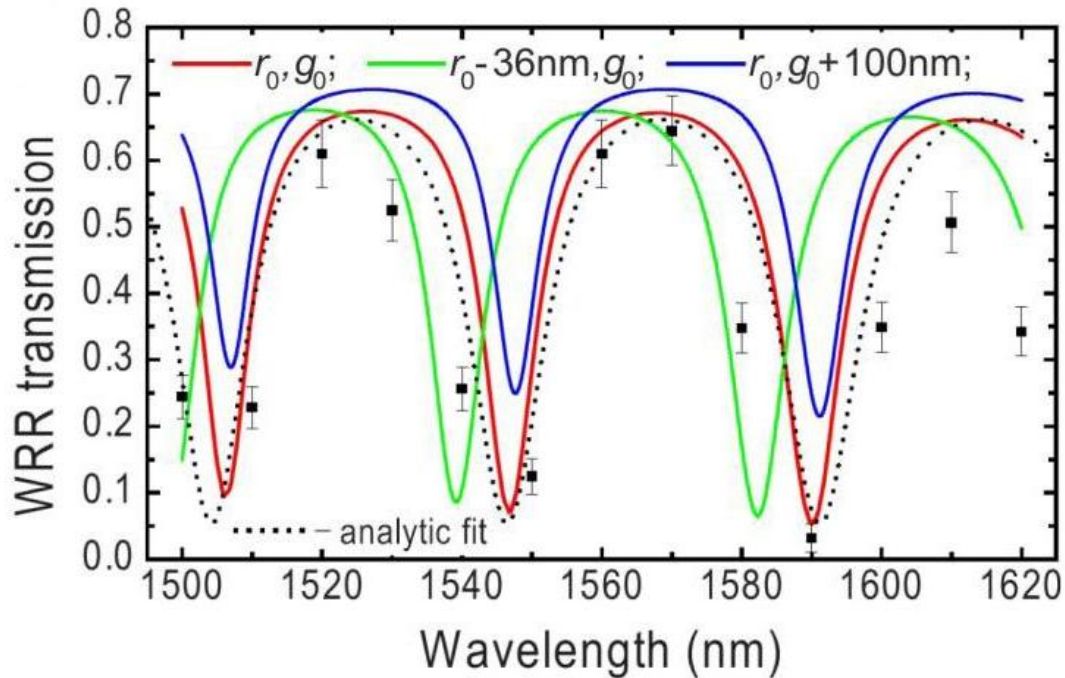
4.1.2 Συνάρτηση μεταφοράς και φασματικά χαρακτηριστικά πλασμονικών WRRs

Η ποσοτική ανάλυση των ιδιοτήτων των πλασμονικών WRRs μπορεί να αναδειχθεί υιοθετώντας το μοντέλο της διάδοσης κατά μήκος ενός ευθύ κυματοδηγού (bus waveguide) με απώλειες ο οποίος συζευγνύεται σε έναν συντονιστή (resonator) ο οποίος χαρακτηρίζεται επίσης από απώλειες. Η θεωρία αυτή του μοντέλου του συντονιστή με απώλειες (Lossy Resonator Model) έχει θεμελιωθεί εκτενώς στην περίπτωση διηλεκτρικών

συντονιστών [4.31,4.32]. Στις περιπτώσεις αυτές, υπάρχει η δυνατότητα για απλοποίηση των εξισώσεων για τους συντονιστές εξαιτίας των σχετικά χαμηλών απωλειών οι οποίες με τη σειρά τους οδηγούν σε πολύ υψηλές τιμές παραγόντων ποιότητας (Quality Factors) [4.33]. Η μαθηματική περιγραφή της συνάρτησης μεταφοράς της δομής του WRR στο χώρο των συχνοτήτων είναι δυνατή κάνοντας χρήση δύο βασικών παραμέτρων οι οποίες συμβολίζονται με a και t αντίστοιχα. Από τη σκοπιά της φυσικής του προβλήματος, η σημασία της παραμέτρου a πηγάζει από τις απώλειες που θα υποστεί μια κανονικοποιημένη πεδιακή έκφραση που εισέρχεται στην κοιλότητα και ταξιδεύει έναν κύκλο σε αυτήν. Μετά από αυτήν την διαδρομή η πεδιακή ισχύς στην έξοδο θα είναι ίση με a^2 και οι απώλειες αυτές περιλαμβάνουν τις κατηγορίες των απωλειών διάδοσης, τις απώλειες κάμψης (bending loss) και τις απώλειες σκέδασης. Είναι προφανές πως η περίπτωση μιας κοιλότητας με μηδενικές απώλειες χαρακτηρίζεται από $a=1$. Αξίζει να σημειωθεί πως μια πρώτη ουσιαστική διαφορά που εντοπίζεται στην περίπτωση των πλασμονικών WRRs έγκειται στην περιγραφή του συντελεστή a ως ένα γινόμενο που περιλαμβάνει τις ποσότητες των εγγενών απωλειών της κοιλότητας και των απωλειών διάδοσης λόγω της πλασμονικής κυματοδήγησης, $a = a_{\text{bend}} \times a_{\text{SPP}}$. Η επιλογή αυτή που συναντάται στη βιβλιογραφία σχετίζεται με τις ιδιαίτερα υψηλές απώλειες διάδοσης που χαρακτηρίζουν τους DLSPP κυματοδηγούς [4.34,4.35]. Στην επόμενη ενότητα των πειραματικών μετρήσεων θα δούμε πως αυτές οι απώλειες λόγω της πλασμονικής διάδοσης οδηγούν σε δομές WRRs με χαμηλές τιμές παραγόντων-Q. Υπό την υπόθεση της απουσίας οποιασδήποτε απώλειας στην περιοχή σύζευξης μεταξύ του κυματοδηγού και της κοιλότητας συντονισμού, η παράμετρος t καθορίζει το πεδίο που παραμένει στον ευθύ κυματοδηγό στην έξοδο της περιοχής σύζευξης (coupling region) που ουσιαστικά απορρέει από την αφαίρεση της ισχύος που εισέρχεται στην κοιλότητα συντονισμού. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους η συνάρτηση μεταφοράς στη θύρα εξόδου της δομής του WRR μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω σχέση:

$$T = \frac{a^2 + t^2 - 2at \cos \vartheta}{1 + a^2 t^2 - 2at \cos \vartheta} \quad (4.1)$$

$$\vartheta = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) n_{\text{eff}}(\lambda) \cdot 2\pi r + \varphi \quad (4.2)$$



Εικόνα2: Συνάρτηση μεταφοράς της θύρας διάδοσης (transmission port) για την περίπτωση του WRR θεωρώντας διαφορετικές παραμέτρους για την ακτίνα του δακτυλίου αλλά και του κενού που ορίζει την απόσταση μεταξύ του κυματοδηγού και του δακτυλίου. Λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των μετρήσεων μπορούν να βρεθούν στην [3.28].

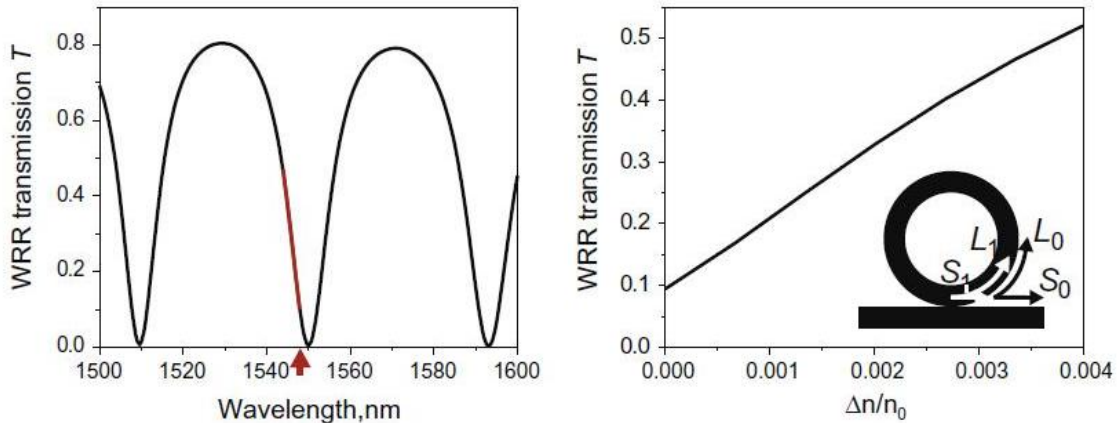
Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς για μια δομή DLSPP WRR η οποία έχει σχεδιαστεί για ακτίνα $R=5\mu\text{m}$ κάνοντας χρήση των DLSPP κυματοδηγών που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Είναι εμφανής η εξάρτηση της τιμής της συνάρτησης μεταφοράς από το μήκος κύματος όπως προβλέπει και η έκφραση για τη συνάρτηση μεταφοράς. Η περιοδικότητα της συνάρτησης μεταφοράς καθορίζεται από την ακτίνα του δακτυλίου ενώ το κενό μεταξύ του δακτυλίου και του ευθύ τμήματος του κυματοδηγού ορίζει το βαθμό σύζευξης ισχύος στην κοιλότητα. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της μεταβολής μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων της συνάρτησης μεταφοράς σχετίζονται άμεσα από την παράμετρο σύζευξης ισχύος στην κοιλότητα η οποία εντοπίζεται στην παράμετρο t . Στην καμπύλη της φασματικής κατανομής που περιγράφει τη συνάρτηση μεταφοράς είναι εμφανής η παρουσία της εξάρτησης από το μήκος κύματος του ενεργού δείκτη διάθλασης (n_{eff}) καθώς παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά βυθίσματος για διαφορετικά μήκη κύματος. Είναι εμφανές πως κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρος που καθορίζει τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς αποτελεί η παράμετρος του κενού μεταξύ του ευθύ DLSPP κυματοδηγού και του δακτυλίου. Καθορίζει την ισχύ που συζευγνύεται στο δακτύλιο και επηρεάζει τα φασματικά χαρακτηριστικά της καμπύλης καθώς υποκρύπτει την υπέρθεση πεδιακών συνιστωσών με διαφορετικά πλάτη.

Η εξάρτηση των χαρακτηριστικών της συνάρτησης μεταφοράς του WRR από το ποσοστό ισχύος που συζευγνύεται στην κοιλότητα όπως αποτυπώνεται και στη συνάρτηση

μεταφοράς του WRR αναδεικνύει τη σημαντική επίδραση που έχει κατά το σχεδιασμό των DLSP WRR δομών η παράμετρος του κενού (gap, g). Ως συνέπεια, τα φασματικά χαρακτηριστικά του WRR εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία στην ακρίβεια κατασκευής του κενού που προβλέπεται στην υπό-σχεδίαση δομή. Για να υπερβούμε την αβεβαιότητα της παραμέτρου κατασκευής προτείνεται ο εναλλακτικός σχεδιασμός της κοιλότητας του συντονιστή υιοθετώντας μια δομή racetrack που αποτελείται από δύο ημι-κυκλικές δομές που συνδέονται από ευθύ τμήματα κυματοδηγών που τοποθετούνται παράλληλα στον αγωγό εισόδου της δομής (bus waveguide). Σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε περιοχή σύζευξης (coupling region) με αρκετά μεγαλύτερο μήκος και συνεπώς πιο ανελαστική στις όποιες αβεβαιότητες κατασκευής συγκριτικά με τις δομές δακτυλίου [4.36]. Στη βιβλιογραφία έχουν επίσης προταθεί εναλλακτικές προσεγγίσεις που αυξάνουν την ανοχή των κοιλοτήτων συντονισμού στις αβεβαιότητες κατασκευής και βασίζονται στις δομές κοιλότητας δίσκου (Disk Resonator) οι οποίες απομακρύνουν την απαίτηση για κατασκευή υψηλής ακρίβειας στο πλάτος του δακτυλίου [4.37,4.38].

4.1.3 DLSP WRRs για εφαρμογές μεταγωγής πληροφορίας

Οι δομές WRR που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παθητικές δομές που επιτρέπουν λειτουργίες φασματικής επιλογής. Ωστόσο, παρατηρώντας τις δομές των πλασμονικών WRRs από άλλη οπτική γωνία, είναι προφανές πως μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για σχήματα που περιλαμβάνουν ενεργές λειτουργίες. Σε αυτό το πλαίσιο, ο μηχανισμός που επιτρέπει τον ενεργό έλεγχο είναι η μεταβολή φάσης που εισάγεται κατά τη διαδρομή του κυματοδηγούμενου πεδίου στον δακτύλιο. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας δομές που περιλαμβάνουν σταθερές συνθήκες στη γεωμετρία της δομής (ακτίνα δακτυλίου και απόσταση που χωρίζει τον ευθύ κυματοδηγό από τον δακτύλιο), η μεταβολή του ενεργού δείκτη διάθλασης (Effective Refractive Index) n_{eff} προσφέρει ένα μηχανισμό ελέγχου των φασματικών χαρακτηριστικών της συνάρτησης μεταφοράς. Ενεργοποιώντας έναν εξωτερικό μηχανισμό ελέγχου, είναι δυνατό να μεταβάλλουμε το δείκτη διάθλασης και συνεπώς να διαμορφώσουμε τη φάση του κυματοδηγούμενου SPP (Surface Plasmon Polariton – SPP) πεδίου. Η εργασία των Krasavin&Zayats [4.28] προσφέρει μια πολύ ενδιαφέρουσα απόπειρα ποσοτικής προσέγγισης του συγκεκριμένου μηχανισμού ενεργού ελέγχου της δομής του WRR. Στην εικόνα 3(α) παρουσιάζεται η συνάρτηση μεταφοράς μιας δομής δακτυλίου WRR η οποία αντιστοιχεί σε μια δομή DLSP με ακτίνα $R=5.508\mu m$ και απόσταση μεταξύ δακτυλίου και ευθύ κυματοδηγού $d=159nm$.



Εικόνα3: (α) Συνάρτηση μεταφοράς της θύρας διάδοσης (transmission port) για την περίπτωση του WRR εστιάζοντας με στο μήκος κύματος για την περιοχή της φασματικής κατανομής με τη μεγαλύτερη κλίση. **(β)** Η απόκλιση της συνάρτησης μεταφοράς για διαφορετικές τιμές μεταβολής του δείκτη διάθλασης της κοιλότητας. Αξιοποιήθηκαν μετρήσεις προσομοίωσης από την εργασία των Krasavin και Zayats [3.28].

Το πρώτο βήμα για τη διερεύνηση της λειτουργίας μετατόπισης (tuning) των φασματικών χαρακτηριστικών της συνάρτησης μεταφοράς του WRR προϋποθέτει την επιλογή ενός μήκους κύματος (λ_0) το οποίο αντιστοιχεί στην περιοχή της συνάρτησης μεταφοράς που έχει τη μέγιστη κλίση. Η επιλογή αυτή συμβαδίζει με την επιδίωξη να «μεταφράζει» η δομή του πλασμονικού WRR για τη συγκεκριμένη φασματική περιοχή του συγκεκριμένου μήκους κύματος τις στοιχειώσεις μεταβολές του δείκτη διάθλασης σε μεγάλες μεταβολές του πλάτους της συνάρτησης μεταφοράς. Μια μαθηματική προσέγγιση προκύπτει από το ανάπτυγμα πρώτης τάξης στην περιοχή του λ_0 όπου μικρές μεταβολές του ενεργού δείκτη διάθλασης του πεδίου μεταφράζονται σε μεγάλες μεταβολές της συνάρτησης μεταφοράς όπως αποτυπώνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 3(β). Καθώς μετατοπίζεται η συνάρτηση μεταφοράς της δομής κατά μία ποσότητα $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$, η μεταβολή των χαρακτηριστικών της συνάρτησης μεταφοράς γύρω από το λ_0 θα είναι η μέγιστη δυνατή.

$$\Delta T(\lambda) = \left. \frac{\partial T}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_0} \cdot \Delta \lambda \quad (4.3)$$

Είναι εμφανές πως αρκεί μια μεταβολή του ενεργού δείκτη διάθλασης της τάξης του 10^{-3} ώστε να διαπιστωθεί μια (έστω και μικρή) μεταβολή στην έξοδο της δομής για τη συγκεκριμένη φασματική περιοχή του λ_0 . Η ιδιότητα αυτή είναι χρήσιμη καθώς βοηθά στην επιλογή μιας συγκεκριμένης περιοχής λειτουργίας για την υλοποίηση εφαρμογών μεταγωγής πληροφορίας στο μήκος κύματος γύρω από το λ_0 .

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράφηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά των δομών που βασίζονται σε DLSPP κυματοδηγούς και εμφανίζουν φασματική επιλογή στη λειτουργία τους. Μεταξύ των δομών αυτών [4.39] που έχουν δημοσιευτεί στη βιβλιογραφία, εστίασαμε την περιγραφή μας σε δομές δακτυλίων κοιλότητας συντονισμού.

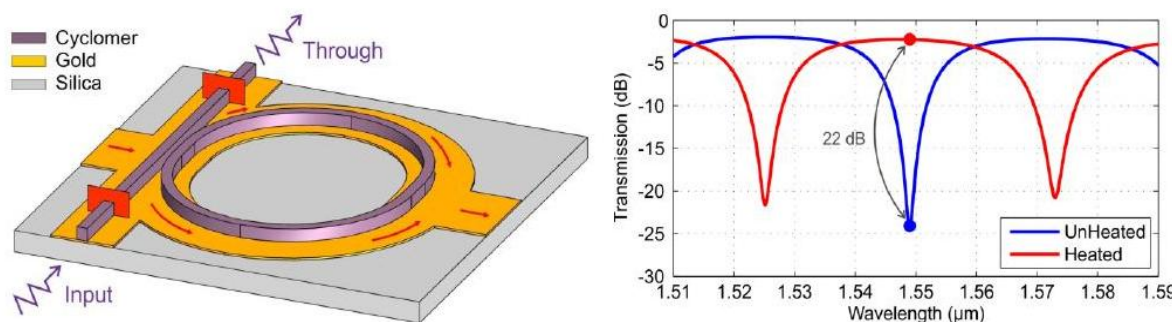
Δίνοντας τη δυνατότητα σε αυτές τις δομές να μετατοπίσουν τα φασματικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς τους μέσω ενεργών μηχανισμών, όπως ο θερμο-οπτικός μηχανισμός, μπορούν να μετασχηματιστούν από παθητικές δομές φίλτρων σε ενεργά στοιχεία μεταγωγής υλοποιώντας τις αντίστοιχες λειτουργίες σε πλασμονικές δομές. Οι δομές που βασίζονται σε DLSPP κυματοδηγούς και αξιοποιούν τον θερμο-οπτικό μηχανισμό για να μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς τους έχουν ήδη αναδειχθεί σε πλήθος εργασιών. Βασικές λειτουργικές δομές στην κατηγορία αυτή αποτελούν οι δομές κοιλοτήτων συντονισμού αλλά και τα συμβολόμετρα Mach-Zehnder για τις οποίες η λειτουργία τους σε εφαρμογές μεταγωγής έχουν ήδη παρουσιαστεί [4.40-4.41]. Το συγκριτικό πλεονέκτημα των DLSPP διατάξεων πηγάζει από την εγγενή δυνατότητα των διατάξεων αυτών να αξιοποιούν βέλτιστα τον θερμο-οπτικό έλεγχο λόγω των χαρακτηριστικών των κυματοδηγών τους. Το μεταλλικό στρώμα που διασφαλίζει την υποστήριξη του πλασμονικού ρυθμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο για τη διαρροή του ηλεκτρικού ρεύματος που θα δημιουργήσει το θερμικό φορτίο (μέσω του μηχανισμού Joule) που είναι απαραίτητο για την αύξηση θερμοκρασίας της πολυμερικής λωρίδας.

Τα κέρδη από τον προηγούμενο μηχανισμό είναι προφανή αναλογιζόμενοι πως αποφεύγεται η χρήση επιπλέον μεταλλικών διατάξεων που προορίζονται για τη θέρμανση των δομών και αυξάνουν τα κόστη, την πολυπλοκότητα και το χρόνο κατασκευής των ενεργών δομών. Παράλληλα θα μπορούσαν να θέτουν και περιορισμούς στην αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης των πλασμονικών κυκλωμάτων καθώς απαιτούν περίπλοκες διατάξεις που μπορεί να εμποδίζουν τη λειτουργικότητα του κυκλώματος και να απαιτούν σύνθετες τεχνικές συσκευασίας (packaging) [4.42]. Επιπλέον, καθώς ο ρυθμός εμφανίζει το μέγιστο της κατανομής του στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού, η αξιοποίηση του θερμικού φορτίου για να μεταβάλλω τα χαρακτηριστικά του κυματοδηγούμενου ρυθμού μεγιστοποιείται καθώς η επίτευξη της μέγιστης μεταβολής της θερμοκρασίας (ΔT_{heat}) εντοπίζεται στο σημείο μέγιστης συγκέντρωσης πεδιακής έντασης του πλασμονικού ρυθμού. Από σκοπιά συστήματος, το πλεονέκτημα αυτό διασφαλίζει την επίτευξη βέλτιστης ενεργειακής επίδοσης της διάταξης του διακόπτη καθώς μειώνει τις απαιτούμενες καταναλώσεις ισχύος.

Κατά την αξιολόγηση της λειτουργίας του πλασμονικού διακόπτη, σημαντικό μερίδιο στο σχεδιασμό της δομής καταλαμβάνει και η προσέγγιση της δυναμικής του θερμικού προβλήματος καθώς σε πρακτικές εφαρμογές, οι χρόνοι μεταγωγής πρέπει να βρίσκονται στην κλίμακα των μs , χρόνοι που εμφανίζονται σε εφαρμογές διακοπών που αξιοποιούν τον θερμο-οπτικό μηχανισμό [4.43,4.44]. Για να διασφαλιστεί η απαίτηση αυτή, η επιλογή των θερμικών χαρακτηριστικών των διηλεκτρικών υλικών αλλά και του μετάλλου είναι κρίσιμη όπως θα σχολιαστεί και στο επόμενο κεφάλαιο.

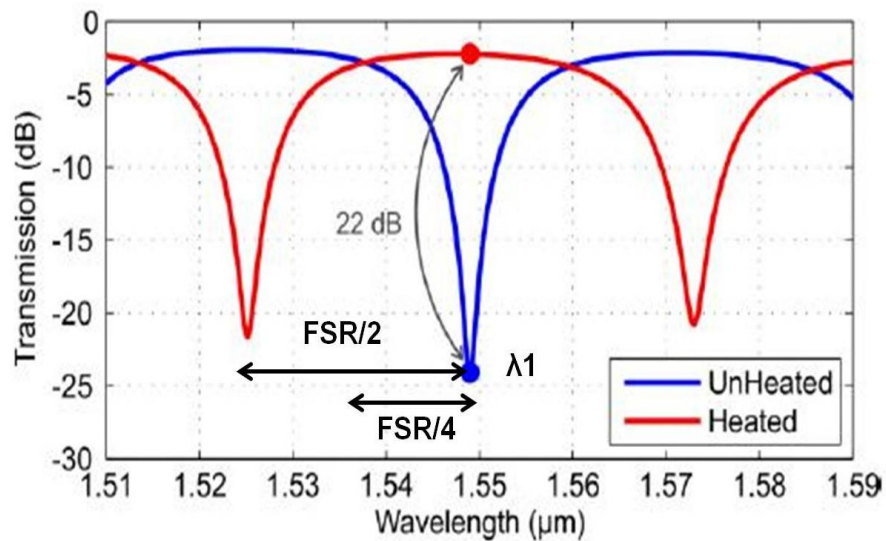
Στην εικόνα 4(α) παρουσιάζεται η υλοποίηση του σχήματος για τη μεταγωγή πληροφορίας κάνοντας χρήση μιας δομής ενός φίλτρου που βασίζεται σε δομή πλήρους διέλευσης συντονιστή (All-Pass Racetrack) και η αντίστοιχη συνθήκη για την επιλογή της περιοχής μεταγωγής πληροφορίας. Επιλέγουμε ένα μήκος κύματος (λ_1) το οποίο αντιστοιχεί στην κοιλοότητα συντονισμού (resonance) και εμφανίζει την ελάχιστη τιμή της

η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου. Η επίτευξη του μέγιστου λόγου μεταξύ δύο καταστάσεων μεταγωγής (ER) θα είναι δυνατή για αυτό το μήκος κύματος (λ_1) εφόσον μετατοπιστεί η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου κατά $\Delta\lambda = \text{FSR}/2$ ώστε να αντιστοιχεί στη νέα μέγιστη τιμή της για το λ_1 . Η απαίτηση για τον ενεργό έλεγχο που θα οδηγήσει στη μεταγωγή μεταξύ των δύο καταστάσεων οδηγεί στη χρήση του θερμο-οπτικού μηχανισμού ο οποίος διασφαλίζει τη μετατόπιση αυτή. Στη συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου που επιδεικνύεται είναι εφικτή η διαπίστωση ενός λόγου μεταγωγής $\text{ER} = 22\text{dB}$ μεταξύ των δύο καταστάσεων του διακόπτη. Από μια σκοπιά συστήματος, είναι εμφανές πως θυσιάζοντας την επίτευξη του μέγιστου λόγου σβέσης (ER) μπορούμε να ορίσουμε τις καταστάσεις μεταγωγής μεταξύ του ελάχιστου της συνάρτησης μεταφοράς (minimum transmission point) και μιας μέγιστης τιμής σε μια φασματική απόσταση από το μέγιστο της (πχ. $\Delta\lambda \sim \text{FSR}/4$ για τη συγκεκριμένη περίπτωση). Το κέρδος από τη συγκεκριμένη επιλογή είναι η ανάγκη για μικρότερη ολίσθηση φάσης μέσω του ενεργού μηχανισμού, ικανή να επιφέρει αυτήν τη μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς. Η εναλλακτική λειτουργία αυτής της συνάρτησης μεταφοράς αποτυπώνεται στο σχήμα της εικόνας 5 επιδιώκοντας μικρότερη φασματική μετατόπιση ($\Delta\lambda = \text{FSR}/4$) για να διαπιστωθεί μια τιμή για το $\text{ER} \sim 21.5\text{dB}$.



Εικόνα4: (α) Γραφική αναπαράσταση δομής απλού δακτυλίου συντονισμού (Waveguide Racetrack Resonator) η οποία σχεδιάστηκε για να λειτουργήσει ως διακόπτης στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON (FP7 ICT- STREP no. 249135) αξιοποιώντας διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer. (β) Η φασματική συνάρτηση μεταφοράς στη θύρα εξόδου ("Through") για τις δύο καταστάσεις μεταγωγής του διακόπτη (Heated, Unheated) με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να υποδηλώνουν λόγο σβέσης (ER) στα 22dB. Η 3D-FEM ανάλυση του πλασμονικού μεταγωγέα πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Η δομή της κοιλότητας συντονισμού σχεδιάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος ICT-PLATON (FP7 ICT- STREP no. 249135) από την ερευνητική ομάδα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ) και κατασκευάστηκε από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Burgundy, UB) στη Γαλλία. Στην ενότητα 3.3 του παρόντος κεφαλαίου θα παρουσιαστούν πειραματικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού WRR δομών Διπλών Δακτυλίων (Dual Rings) βασισμένες στο πολυμερικό υλικό Cyclomer.

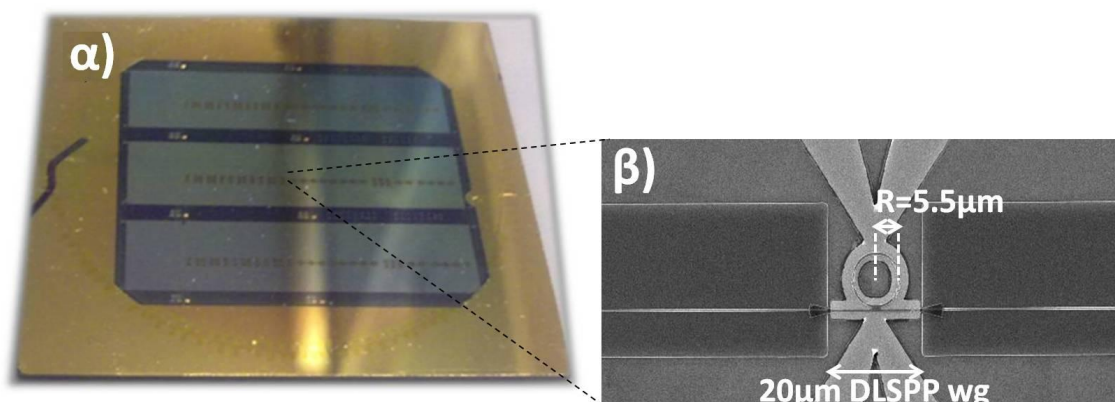


Εικόνα5: Γραφική αναπαράσταση λειτουργίας διακόπτη για δύο διαφορετικές επιλογές φασματικής διολίσθησης ($\Delta\lambda=FSR/2$ και $\Delta\lambda=FSR/4$) με σκοπό να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες για τη λειτουργία του διακόπτη.

4.2 Θερμο-οπτικός έλεγχος WRR δομής που βασίζεται σε DLSPP κυματοδηγούς από PMMA

4.2.1 Σχεδιασμός και διάταξη πλασμονικής δομής WRR

Η δομή ενός πλασμονικού κυκλώματος WRR φιλοξενείται σε μια παθητική πλατφόρμα πυριτίου (Si) η οποία χρησιμοποιείται για να υλοποιήσει τις παθητικές λειτουργίες που απαιτούνται χωρίς να εμφανίζει τις υψηλές απώλειες της πλασμονικής τεχνολογίας όπως έχει διεξοδικά περιγραφεί και σε προηγούμενα κεφάλαια. Η Εικόνα 6(α) απεικονίζει τη δομή του τσιπ που περιέχει πλήθος πλασμονικών δομών ετερο-ολοκληρωμένων στην παθητική πλατφόρμα Si. Η εικόνα 6(β) απεικονίζει τη δομή του πλασμονικού δακτυλίου με τα αντίστοιχα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της δομής. Η ακτίνα της δομής του DLSPP δακτυλίου είναι $R=5.5\mu\text{m}$ ενώ ειδική φροντίδα δόθηκε για τον προσδιορισμό της περιοχής σύζευξης μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού (bus waveguide) και της κοιλότητας συντονισμού (ring resonator). Για την περιοχή σύζευξης επιλέχθηκε ένα κενό μεγέθους $g=0.35\mu\text{m}$ ενώ το μήκος του τμήματος αλληλεπίδρασης (interaction length) μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού και του δακτυλίου επιλέχθηκε να είναι $L_{\text{coupling}}=0.8\mu\text{m}$. Τέλος το συνολικό μήκος του DLSPP κυματοδηγού (bus waveguide) είναι $L=20\mu\text{m}$ [4.45].



Εικόνα6:(α) Πραγματική όψη του chip που περιλαμβάνει τις πλασμονικές WRR δομές ετερο-ολοκληρωμένες στην Si πλατφόρμα. (β) Εικόνα από μικροσκόπιο SEM που δείχνει την υπό εξέταση δομή WRR με τις βασικές σχεδιαστικές παραμέτρους του δακτυλίου.

Στο σημείο αυτό, πριν την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τον θερμο-οπτικό έλεγχο της δομής του WRR αξίζει να σχολιαστεί η επιλογή των τριών βασικών σχεδιαστικών παραμέτρων: της ακτίνας του δακτυλίου (R), του μήκους αλληλεπίδρασης (L_{coupling}) και του κενού μεταξύ του δακτυλίου και του ευθύ τμήματος του DLSPP κυματοδηγού (g). Σχετικά με την παράμετρο του κενού (g) είναι γνωστό πως κατά τη διάρκεια που τρέχει η διαδικασία κατασκευής των πλασμονικών δομών με την τεχνική της UV λιθογραφίας, είναι αρκετά δύσκολη η μεταβολή υψηλής ακρίβειας της παραμέτρου αυτής ενώ επίσης περιορίζεται από το όριο το οποίο επιτρέπει η τεχνική της βαθιάς UV λιθογραφίας (Deep UV lithography). Το όριο της μεθόδου αυτή που εφαρμόζεται σε πολλές τεχνικές πολυμερών (PMMA, Cyclomer, Ormocer) βρίσκεται στα 250nm. Αναλυτικές λεπτομέρειες σχετικά με τις τεχνικές κατασκευής των DLSPP κυματοδηγών αλλά και τους περιορισμούς που μπαίνουν από τις μεθόδους τους ο αναγνώστης μπορεί να εντοπίσει στη διατριβή του Δρ. Karim Hassan από το πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας το οποίο ανέλαβε και την κατασκευή αυτών των πλασμονικών δομών [4.46].

Η επιλογή της ακτίνας του δακτυλίου αποτελεί επίσης μια σημαντική παράμετρος για το σχεδιασμό των δομών των WRRs. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 4.1.2, η παράμετρος της ακτίνας (R) επηρεάζει απευθείας τα φασματικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς και πιο συγκεκριμένα την παράμετρο του FSR. Από τη θεωρία γνωρίζουμε πως η παράμετρος του FSR εξαρτάται από την ακτίνα και τον ενεργό δείκτη διάθλασης στην κοιλότητα συντονισμού. Η φυσική ερμηνεία της εξάρτησης από την ακτίνα του δακτυλίου εντοπίζεται στη συσχέτιση του οπτικού δρόμου και της φάσης που αποκτά το πεδίο καθώς ταξιδεύει στο δακτύλιο. Η ερευνητική ομάδα του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου έχει δημοσιεύσει ενδιαφέρουσες εργασίες για δομές πλασμονικών WRRs παρουσιάζοντας τα χαρακτηριστικά των συναρτήσεων μεταφοράς τους για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της ακτίνας [4.40]. Μια διάσταση που ανέδειξαν οι μελέτες της

ερευνητικής ομάδας αποτελεί η προσπάθεια βελτιστοποίησης της τιμής της ακτίνας του δακτυλίου όταν αυτή υπεισέρχεται στην παράμετρο των απωλειών της κοιλότητας. Είναι προφανής η συσχέτιση μεταξύ των απωλειών διάδοσης (propagation loss) στην κοιλότητα του WRR καθώς είναι άμεσα εξαρτώμενες από την τιμή της ακτίνας που ορίζει τελικά το μήκος της κοιλότητας ($L = 2 \cdot \pi \cdot R$) που κυματοδηγείται ο DLSPP ρυθμός. Το φυσικό υπόστρωμα για τις απώλειες διάδοσης εντοπίζεται στις ωμικές απώλειες (ohmic losses) λόγω της παρουσίας του μετάλλου αλλά και στις διαρροές ισχύος λόγω ακτινοβολήσεως στο διηλεκτρικό στοιχείο (radiation leakages) [4.47,4.48]. Η προφανής προσέγγιση για να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες της δομής θα ήταν η επιλογή όσο το δυνατόν μικρότερης ακτίνας. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή το ισοζύγιο απωλειών της δομής υποφέρει από τις απώλειες κάμψης (bending losses) που αυξάνοντας δραστικά για μειούμενες τιμές της ακτίνας δακτυλίου, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο λόγω της παρουσίας ισχυρού διαφυγόντος πεδίου για μικρές ακτίνες κάμψης [4.49]. Η εργασία της ερευνητικής ομάδας του Αριστοτελείου που είχε και ενεργό ρόλο στο σχεδιασμό των πλασμονικών δομών για ενεργές λειτουργίες ανέπτυξε ένα δίκαιο συμβιβασμό λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους αυτές και επιλέχθηκε μια τιμή της ακτίνας γύρω στα $R=5.5\mu\text{m}$.

Η επιλογή της παραμέτρου του μήκους αλληλεπίδρασης (L) βασίζεται αποκλειστικά στη στόχευση για τα επιθυμητά φασματικά χαρακτηριστικά των WRR δομών τα οποία μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικές συνθήκες για εφαρμογές μεταγωγής όπως περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Η παράμετρος του μήκους αλληλεπίδρασης καθορίζει το ποσοστό της ισχύος το οποίο συζευγνύεται στην κοιλότητα συντονισμού καθώς είναι η παράμετρος που καθορίζει την τιμή της παραμέτρου t στο μοντέλο του συντονιστή με απώλειες που περιγράφηκε αναλυτικά στην ενότητα 4.1.2. Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της παραμέτρου του ER για την περίπτωση του δακτυλίου που μελετάται στην παρούσα διατριβή, διαπιστώνουμε πως η επίτευξη της μέγιστης τιμής για το ER απαιτεί την συνθήκη για ισότητα των παραμέτρων a και t [4.50]. Η φυσική ερμηνεία της συνθήκης αυτής κρύβεται στην απαίτηση για τη διασφάλιση πεδιακών συνιστωσών ίσου πλάτους στην έξοδο της κοιλότητας, ικανές να προσφέρουν συμβολομετρικές εικόνες (interferometric patterns) με απότομα χαρακτηριστικά στη συνάρτηση μεταφοράς τους.

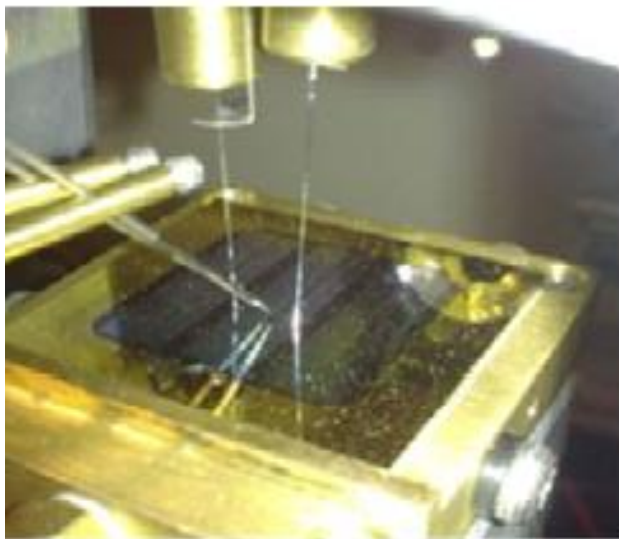
$$ER = \left[\frac{\alpha + t}{a - t} \cdot \frac{(1 - at)}{(1 + at)} \right]^2 \quad (4.4)$$

Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη την άμεση εξάρτηση της παραμέτρου t της δομής του δακτυλίου και της τιμής του λόγου σβέσεως (Extinction Ratio – ER) που εμφανίζει η συνάρτηση μεταφοράς του DLSPP WRR, βελτιστοποιήθηκε η επιλογή της παραμέτρου σύζευξης και περιλαμβάνονται τα πειραματικά αποτελέσματα για τον DLSPP δακτύλιο με PMMA θα σχολιαστεί και η επίδραση στον παράγοντα ποιότητας του δακτυλίου. Στα πλαίσια αυτά, επιλέχθηκε η τιμή της παραμέτρου για το μήκος αλληλεπίδρασης στην παρακάτω τιμή $L_{\text{coupling}}=0.8\mu\text{m}$.

4.2.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός WRR σε σταθμό εργασίας του Ε.Φ.Ε.

Η αξιολόγηση της λειτουργίας της πλασμονικής δομής του WRR καθώς και του μηχανισμού του θερμο-οπτικού ελέγχου πραγματοποιήθηκε σε σταθμό εργασίας (probe station) που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Ε.Φ.Ε. Η Εικόνα 7 παρουσιάζει το σταθμό εργασίας που προσαρμόστηκε στις απαιτήσεις των μετρήσεων για τον χαρακτηρισμό του WRR και του θερμο-οπτικού ελέγχου του. Παρατηρούμε τη χρήση δύο κοινών μονότροπων ινών SMFs (Standard Single Mode Fibers – SMFs) οι οποίες χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί η σύζευξη φωτός στην είσοδο και την έξοδο αντίστοιχα του τσιπ. Οι μονότροπες ίνες έχουν κοπεί κατάλληλα όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ανακλάσεις στο σημείο διεπαφής αλλά και να επιβεβαιωθούν οι συνθήκες βέλτιστης μεταφοράς οπτικής ισχύος από την ίνα στους συζεύκτες περίθλασης (Grating Couplers – GCs) της ολοκληρωμένης δομής. Παρατηρούμε επίσης την παρουσία δύο μεταλλικών δομών (probe tips) που επιτρέπουν την ηλεκτρική επαφή με τις επιφάνειες επαφής του πλασμονικού κυματοδηγού, ικανές να επιβάλλουν το ρεύμα έγχυσης που με τη σειρά του θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας στη λωρίδα του διηλεκτρικού του DLSPP κυματοδηγού μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά του ενεργού δείκτη διάθλασης του. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στην ψυχρή κατάσταση (COOL state) η θερμοκρασία του τσιπ (chip) κρατήθηκε σταθερή αξιοποιώντας ένα θερμο-ηλεκτρικό στοιχείο Peltier σε θερμοκρασία $T=20^{\circ}\text{C}$.

Ο οπτικός χαρακτηρισμός για την εξαγωγή της συνάρτησης μεταφοράς της δομής του WRR πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας μια πηγή συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) η οποία δίνει τη δυνατότητα για εκπομπή στο φασματικό παράθυρο από 1500nm έως 1580nm με βήμα μεταβολής τα 10nm, ικανό να προσφέρει ακρίβεια στις μετρήσεις της συνάρτησης μεταφοράς. Για να εκμεταλλευτούμε ολόκληρο το φασματικό παράθυρο για τη σάρωση με την CW πηγή, δεν χρησιμοποιήθηκε οπτικός ενισχυτής (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) ενώ χρησιμοποιήσαμε έναν μετρητή οπτικής ισχύος για να καταγράψουμε τις αντίστοιχες τιμές ισχύος.

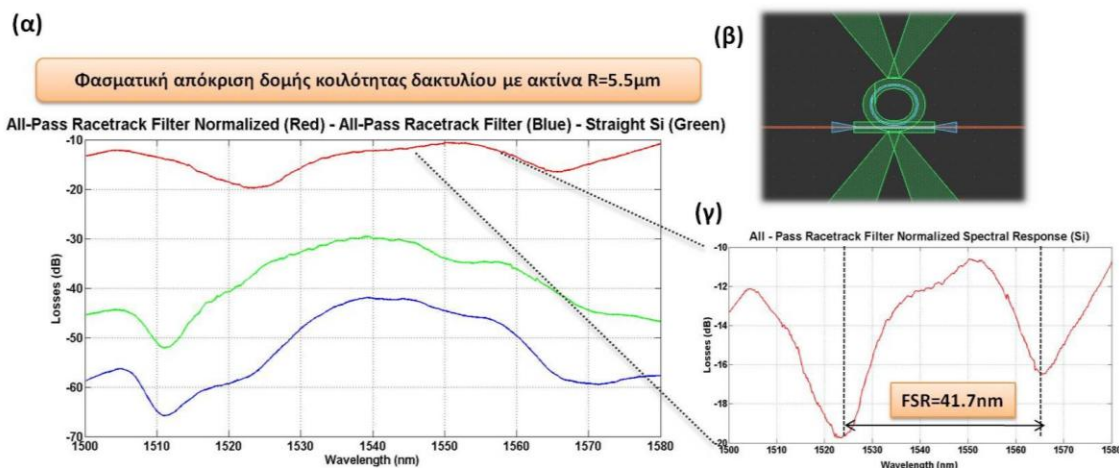


Εικόνα7: Προετοιμασία στον σταθμό εργασίας για τη διεξαγωγή των μετρήσεων χαρακτηρισμού της συνάρτησης μεταφοράς του DLSP WRR και της δυνατότητας θερμο-οπτικού ελέγχου του κάνοντας χρήση ενός ρεύματος έγχυσης.

4.2.3 Πειραματικά αποτελέσματα χαρακτηρισμού WRR βασισμένη σε DLSP δακτυλίου PMMA

Το πρώτο βήμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της φασματικής απόκρισης της δομής DLSP κυματοδηγού της κοιλότητας συντονισμού (Waveguide Racetrack Resonator-WRR) η οποία προορίζεται για να επιδείξει τη λειτουργία του διακόπτη. Για το σκοπό αυτό, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η φασματική απόκριση των Si συζευκτών περίθλασης οι οποίοι εμφανίζουν μια συγκεκριμένη φασματική επιλογή όπως χαρακτηρίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η μέθοδος αναπαράστασης της φασματικής απόκρισης του DLSP φίλτρου περιλαμβάνει την αφαίρεση της απόκρισης των Si συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers – GCs) από τη συνάρτηση μεταφοράς της δομής που μετρήθηκε πειραματικά και περιλαμβάνει το Si μέρος αλλά και το πλασμονικό φίλτρο μεταγωγής που είναι και το αντικείμενο της μελέτης. Η Εικόνα 8(α) αναπαριστά στο ίδιο διάγραμμα τις φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς της ετερο-ολοκληρωμένης δομής (μπλε χρώμα), της φασματικής απόκρισης των Si συζευκτών περίθλασης (πράσινο χρώμα) και το αποτέλεσμα της φασματικής αφαίρεσης για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς του DLSP φίλτρου (κόκκινο χρώμα) που αποτυπώνεται από τη δομή της μάσκας (layout) στην Εικόνα 8(β). Οι φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς περιλαμβάνουν την πληροφορία και για τις απώλειες καθώς οι μετρημένες απώλειες για την ετερο-ολοκληρωμένη δομή βρέθηκαν να είναι 40.4dB στο μήκος κύματος που αντιστοιχεί το μέγιστο ενώ λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες του παθητικού Si μέρους μπορεί να εξαχθεί το κομμάτι των απωλειών που αντιστοιχεί στο DLSP μέρος του κυκλώματος (~10.6dB στο μέγιστο της συνάρτησης μεταφοράς του WRR). Η Εικόνα 8(γ) απομονώνει την αναπαράσταση της φασματικής

συνάρτησης μεταφοράς του DLSPP φίλτρου διέλευσης (All-Pass Filter) με σκοπό να προσδιοριστούν οι φασματικές της ιδιότητες. Είναι εμφανής η παρουσία δύο ελαχίστων (resonances) στο παράθυρο που εκτείνεται από 1500nm έως 1580nm με τη φασματική τους απόσταση που μετρήθηκε στα 41.7nm να ορίζει το Ελεύθερο Φασματικό Εύρος (FSR) (Free Spectra Range – FSR).



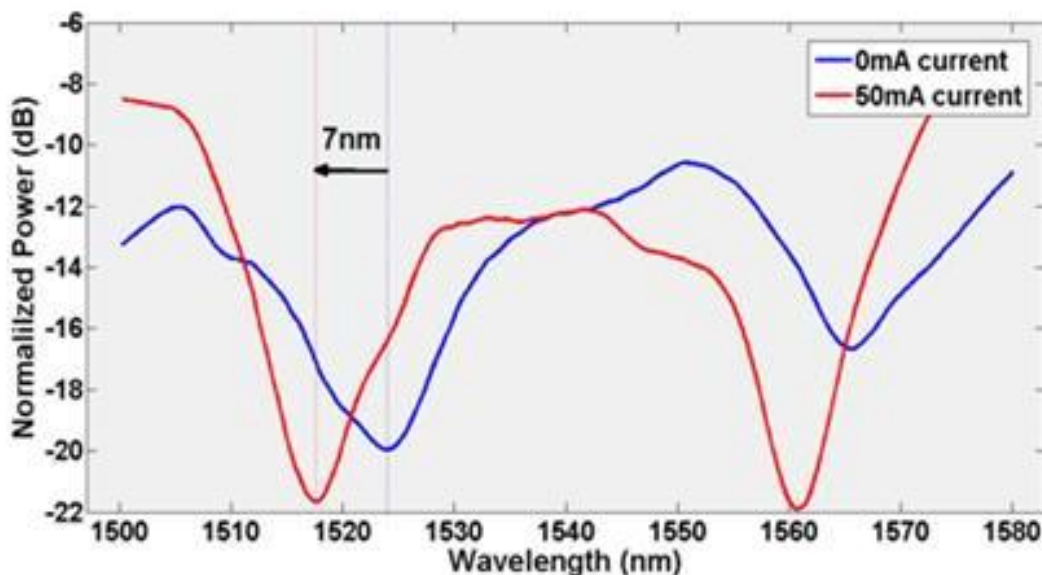
Εικόνα8: (α) Μετρήσεις φασματική απόκριση για την ετερο-ολοκληρωμένη δομή φίλτρων διέλευσης (μπλε γραμμή), τον Si ευθύ κυματοδηγό (πράσινη γραμμή) και η αφαίρεση των φασματικών κατανομών για τον προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς του DLSPP φίλτρου μεταγωγής (κόκκινη γραμμή), (β) η δομή της πλασμονικής κοιλότητας συντονισμού (WRR) όπως προκύπτει από τη μάσκα (layout) των δομών. (γ) Λεπτομερής συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου DLSPP με την αντίστοιχη τιμή της Ελεύθερης Φασματικής Κατανομής (FSR).

Το επόμενο βήμα χαρακτηρισμού περιλαμβάνει την αξιολόγηση του ενεργού ελέγχου της φασματικής συνάρτησης της DLSPP δομής μέσα από τον θερμο-οπτικό μηχανισμό. Για το σκοπό αυτό, μελετήθηκε η φασματική απόκριση του DLSPP φίλτρου σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: απουσία ρεύματος ($I=0\text{mA}$) και παρουσία ρεύματος ελέγχου ($I=50\text{mA}$) που προκαλεί την ολίσθηση της φασματικής απόκρισης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής λωρίδας του PMMA. Η Εικόνα 9 παρουσιάζει την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων με σκοπό τον χαρακτηρισμό της πλασμονικής δομής της κοιλότητας συντονισμού στο φασματικό παράθυρο από 1500 έως 1580nm για δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Η μπλε αναπαράσταση αντιστοιχεί στη φασματική απόκριση της διάταξης για την περίπτωση που δεν εφαρμόζεται κάποια επιπλέον τάση στις ηλεκτρικές επαφές της διάταξης ($I=0\text{mA}$) ενώ η κόκκινη καμπύλη αναπαριστά τη φασματική συμπεριφορά της διάταξης εφόσον συμπεριληφθεί ρεύμα έγχυσης $I=50\text{mA}$ μέσω εφαρμοζόμενης τάσης. Η συγκεκριμένη καμπύλη περιλαμβάνει σειρά συμπερασμάτων τα οποία σχολιάζονται λεπτομερώς παρακάτω:

I. Η δομή της πλασμονικής κοιλότητας συντονισμού εμφανίζει απώλεια ίση με 12dB μετρημένη σε μήκος κύματος 1545nm. Αξίζει να σημειωθεί πως η φασματική απόκριση της δομής WRR είναι κανονικοποιημένη στο διάγραμμα όπως αποτυπώνεται και στον κάθετο άξονα ως προς τη φασματική κατανομή και τις απώλειες του ευθύ πλασμονικού

κυματοδηγού μήκους 60- μm , ο οποίος μελετήθηκε διεξοδικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Παράλληλα παρατηρούμε πως η απόκριση του WRR εμφανίζει διαφορετικές τιμές για τα μέγιστα που εμφανίζει σε διαφορετικές φασματικές περιοχές. Αυτό συμβαίνει καθώς υπάρχει μια εξάρτηση της παραμέτρου απόσβεσης του κυματαριθμού (φανταστικό μέρος του κυματαριθμού) από το μήκος κύματος που οδηγεί σε διαφορετικές απώλειες για κάθε φασματική περιοχή. Λεπτομέρειες για τις σχέσεις διασποράς του πραγματικού και φανταστικού μέρους του πλασμονικού κυματαριθμού ο αναγνώστης μπορεί να βρει στις παρακάτω αναφορές [4.40,4.51].

II. Η μετατόπιση του φάσματος της δομής του DLSPP WRR είναι εμφανής στη φασματική καμπύλη των συναρτήσεων μεταφοράς για τις δύο διαφορετικές τιμές του ρεύματος ($I=0\text{mA}$ και $I=50\text{mA}$) που αντιστοιχούν στην ψυχρή (COOL) και θερμή (HOT) κατάσταση του διακόπτη αντίστοιχα. Η ταυτόχρονη μετατόπιση των κοιλοτήτων συντονισμού αποτελεί απόδειξη της δράσης του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου η οποία μετατοπίζει για τις δύο περιπτώσεις των ρευμάτων έγχυσης τη συνάρτηση μεταφοράς κατά $\Delta\lambda=7\text{nm}$ προς τις περιοχές μικρότερων μηκών κύματος (blue shift) [4.35]. Η φυσική ερμηνεία πίσω από την κατεύθυνση της μετατόπισης αυτής εντοπίζεται στο αρνητικό πρόσημο που έχει ο θερμο-οπτικός συντελεστής του πολυμερούς PMMA. Πιο συγκεκριμένα το πολυμερές PMMA έχει στην περιοχή των μηκών κύματος γύρω από τα 1550nm θερμο-οπτικό συντελεστή περίπου ίσο με $\frac{\partial n}{\partial T} = -1.05 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$. Συνεπώς, εφόσον αυξηθεί η θερμοκρασία του πολυμερούς (μέσω του φαινομένου Joule όπως στην περίπτωση της πειραματικής μελέτης μας), ο ενεργός δείκτης διάθλασης μειώνεται με συνέπεια να οδηγεί την κοιλότητα συντονισμού (resonance) σε μικρότερα μήκη κύματος όπως επιβεβαιώνεται και από τις πειραματικές μας μετρήσεις που περιλαμβάνονται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9: Φασματική μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς του απλού δακτυλίου που βασίζεται σε DLSPP κυματοδηγούς που αξιοποιούν διηλεκτρικές λωρίδες PMMA. Η μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς κατά $\Delta\lambda=7\text{nm}$ είναι εμφανής κατά την έγχυση ρεύματος $I=50\text{mA}$ που θερμαίνει το πολυμερικό υλικό.

III. Για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις της συνάρτησης μεταφοράς του WRR μετρήθηκαν τα φασματικά χαρακτηριστικά τους και πιο συγκεκριμένα η τιμή του FSR (Free Spectra Range – FSR) καθώς και ο παράγοντας ποιότητας (Q-factor) της κοιλότητας. Οι πειραματικές μετρήσεις των συναρτήσεων μεταφοράς οδηγούν στον υπολογισμό της τιμής του FSR στα 41.7nm . Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη παράμετρος παραμένει σχεδόν αμετάβλητη για τις δύο καταστάσεις (HOT, COOL) καθώς εξαρτάται από την ακτίνα του δακτυλίου που παραμένει σταθερή ενώ η μεταβολή που εισάγει η αλλαγή του δείκτη διάθλασης λόγω δράσης του θερμο-οπτικού μηχανισμού αφήνει πρακτικά ανεπηρέαστη την τιμή του FSR. Αντιθέτως, στην περίπτωση του παράγοντα ποιότητας παρατηρείται μια αξιοσημείωτη μεταβολή ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις στην πειραματική μελέτη μας. Υπολογίσαμε τον συντελεστή ποιότητας Q για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις του ρεύματος ($I_1=0\text{mA}$ και $I_2=50\text{mA}$) κάνοντας χρήση του παρακάτω τύπου για τις δύο περιπτώσεις:

$$Q = \frac{\lambda_{res}}{\Delta\lambda_{3dB}} \quad (4.5)$$

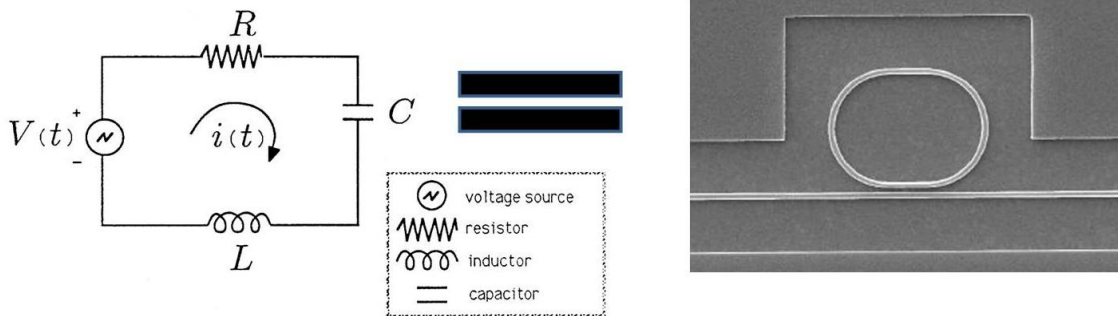
Υπολογίστηκε πως ο παράγοντας ποιότητας είναι $Q_{cool}=98$ για την περίπτωση της ψυχρής (COOL) κατάστασης και ίσο με $Q_{hot}=142$ για την περίπτωση της θερμής (HOT κατάστασης). Η ερμηνεία της συγκεκριμένης μεταβολής (αύξησης) του παράγοντα ποιότητας είναι ευκρινής παρατηρώντας εύκολα πως η φασματική κατανομή για την περίπτωση που θερμαίνεται η κοιλότητα συντονισμού ($I=50\text{mA}$) εμφανίζει πιο ‘απότομες’ κοιλότητες και κοιλότητες συντονισμού (resonances) που προσφέρουν μεγαλύτερες τιμές της τιμής ER μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της φασματικής κατανομής.

Μελετώντας πέρα από τη φασματική ερμηνεία του παράγοντα ποιότητας, αξίζει ίσως να δοθεί μια ερμηνεία στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα ανακαλώντας στοιχεία από τη θεωρία του συντονιστή που εμφανίζει απώλειες. Εισάγοντας μια αναλογία στο πρόβλημα του συντονιστή ενός κυκλώματος RLC σε σειρά, ίσως βοηθηθεί ο αναγνώστης να αντιληφθεί την αύξηση του παράγοντα ποιότητας (Q-factor) μέσα από έναν εναλλακτικό ορισμό που συσχετίζει την ενέργεια που αποθηκεύεται σε κάθε κύκλο στον συντονιστή και τη συνεισφορά του στοιχείου απωλειών στην κοιλότητα [4.52]:

$$Q(\omega) = \omega \cdot \frac{E_{stored}}{E_{loss}} \quad (4.6)$$

Η Εικόνα 10 προσπαθεί να αποτυπώσει το κυκλωματικό ανάλογο του DLSPP WRR που μελετήθηκε πειραματικά στο Ε.Φ.Ε. με το RLC κύκλωμα σε σειρά για να σχολιαστεί η

αύξηση του Q-factor στις δύο περιπτώσεις. Η αναλογία μεταξύ των δύο κυκλωμάτων μπορεί να επιτευχθεί θεωρώντας τις απώλειες του πλασμονικού τμήματος της δομής σαν το ανάλογο του ωμικού στοιχείου (R) στην περίπτωση του κυκλώματος [4.53]. Αποτελούν και στις δύο περιπτώσεις των κυκλωμάτων συντονιστών τα στοιχεία απώλειας. Τα στοιχεία LC αποτελούν τα στοιχεία αποθήκευσης στο ηλεκτρικό κύκλωμα και είναι το ανάλογο του λόγου σύζευξης ισχύος στο εσωτερικό της οπτικής κοιλότητας στο οπτικό ανάλογο. Συνεπώς, θερμαίνοντας τη δομή του WRR επιτυγχάνεται αύξηση της τιμής του Q καθώς επιτυγχάνεται αύξηση της ενέργειας που αποθηκεύεται στην κοιλότητα. Το κυκλωματικό ανάλογο της αύξησης της τιμής της αυτεπαγωγής L επιτυγχάνεται στην περίπτωση του πλασμονικού συντονιστή μέσω της αύξησης της ποσότητας ισχύος που συζευγνύεται από τον ευθύ κυματοδηγό στην κοιλότητα συντονισμού και αποθηκεύεται. Ο φυσικός μηχανισμός που κρύβεται πίσω από αυτήν την αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας βρίσκεται στη μεταβολή του λόγου σύζευξης από τον ευθύ DLSP κυματοδηγό στην πλασμονική κοιλότητα συντονισμού.



Εικόνα10: Σχηματική αναπαράσταση του αναλόγου της λειτουργίας φωτονικού συντονιστή δακτυλίου με ένα κύκλωμα RLC σε σειρά που λειτουργεί με πηγές εναλλασσόμενης τάσης. Σκοπός της ανάδειξης του συγκεκριμένου φυσικού αναλόγου είναι η ανάδειξη των όψεων του μοντέλου του συντονιστή με απώλειες (Lossy resonator model).

IV. Το επόμενο βήμα κατά τη μελέτη του πλασμονικού διακόπτη WRR αποτέλεσε ο προσδιορισμός της αύξησης της θερμοκρασίας της πολυμερικής λωρίδας (polymer strip) του PMMA με την έγχυση του ρεύματος $I=50\text{mA}$. Για τον προσδιορισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας αξιοποιήσαμε την πειραματική μέτρηση για τη μετατόπιση της κοιλότητας συντονισμού (resonance) της φασματικής κατανομής ($\Delta\lambda_m$) του πλασμονικού δακτυλίου. Χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται εκτενώς για την επίλυση αντίστοιχου προβλήματος σε τεχνολογία SOI (Silicon-On-Insulator) χρησιμοποιήσαμε τον παρακάτω τύπο [4.54] για να υπολογίσουμε την αύξηση θερμοκρασίας του PMMA:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \left(\frac{1}{L} \cdot \frac{dS}{dT}\right) \cdot \frac{\lambda_m}{n_{eff}} = (n_{eff} \cdot a_{sub} + \frac{dn_{eff}}{dT}) \cdot \frac{\lambda_m}{n_{eff}}$$

$$\xrightarrow{\int dT} \Delta T \approx \Delta \lambda_m \cdot \frac{n_{eff}}{\lambda_m \cdot \left| \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right|} \quad (4.7)$$

Η χρήση της παραπάνω μεθόδου οδήγησε στον υπολογισμό της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της πολυμερικής λωρίδας του PMMA από τη θερμοκρασία αναφοράς που διατηρείται στο σταθμό εργασίας κατά $\Delta T=61.3^\circ\text{K}$. Αυτό πρακτικά σημαίνει λαμβάνοντας υπόψη πως η θερμοκρασία αναφοράς για τη λειτουργία στην ψυχρή κατάσταση (COOL state) επιλέχθηκε (μέσω της χρήσης ενός στοιχείου Peltier) να είναι $T_{cool}=20^\circ\text{C}$, η θερμή κατάσταση (HOT state) αναφέρεται σε θερμοκρασία πολυμερούς $T_{hot}=81.3^\circ\text{C}$. Στην επόμενη ενότητα η θερμική απόκριση του προβλήματος του WRR δακτυλίου σχολιάζεται διεξοδικά με μετρήσεις μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας που διεξήχθησαν για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του πολυμερούς PMMA.

V. Σχετικά με την ωμική αντίσταση της δομής του βοηθητικού μηχανισμού θέρμανσης της πλασμονικής κοιλότητας (heaters) υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές παραμέτρους του φύλλου χρυσού (Au) που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό του DLSPP κυματοδηγού. Συνεπώς, η ηλεκτρική αντίσταση της δομής θέρμανσης του δακτυλίου υπολογίστηκε κάνοντας χρήση του τύπου της ωμικής αντίστασης:

$$R = \rho_{Au} \cdot \frac{l}{s} \quad (4.8)$$

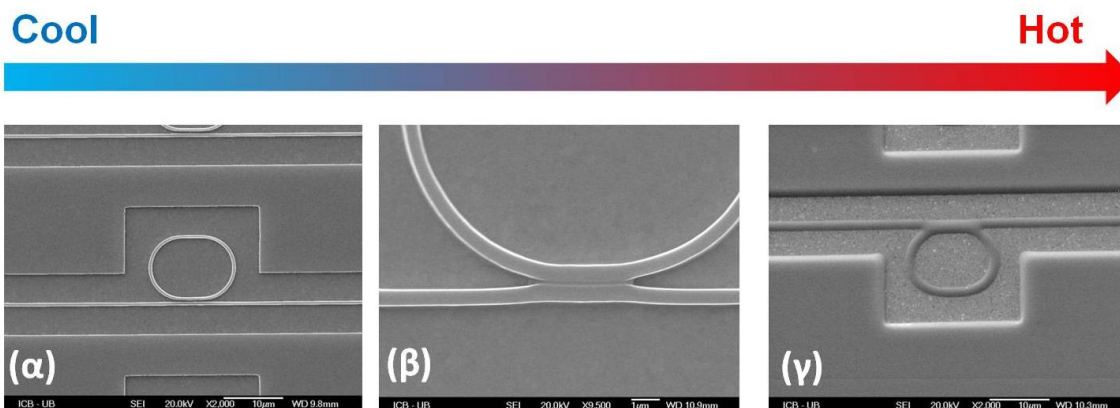
Στον παραπάνω τύπο χρησιμοποιήσαμε την ειδική αντίσταση του χρυσού όπως δίνεται στη βιβλιογραφία (ρ_{Au}) ενώ για το μήκος l θεωρήσαμε το μήκος της μισής περιφέρειας κύκλου λαμβάνοντας υπόψη το σχεδιασμό των δομών θέρμανσης (heaters) της κοιλότητας [4.55]. Τέλος, με δεδομένες τις γεωμετρικές παραμέτρους υπολογίσαμε την εγκάρσια τομή του μεταλλικού φύλλου $s=W \times H$ λαμβάνοντας υπόψη το πάχος του φύλλου του χρυσού αλλά και το πλάτος του στη δομή των πλασμονικών κυματοδηγών. Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω στοιχεία υπολογίσαμε την αντίσταση της μεταλλικής δομής του χρυσού που χρησιμοποιήθηκε για την θέρμανση του πολυμερούς μέσω του φαινομένου του Joule στα $R=1.28\Omega$. Αξίζει να σημειωθεί πως η τιμή αυτή υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την θερμοκρασία του μετάλλου σε $T_{Au}=80^\circ\text{C}$ ώστε να συμπεριληφθεί και η μη-μηδενική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του μετάλλου από τη θερμοκρασία. Τέλος, επιβεβαιώσαμε την ισχύ της παραπάνω μεθοδολογίας λαμβάνοντας επαναληπτικές μετρήσεις για τμήματα κυματοδηγών μεταβλητού μήκους σε ευθείς DLSPP κυματοδηγούς μεταβλητού μήκους που υπήρχαν στη μάσκα ώστε να αποκλείσουμε οποιαδήποτε επίδραση μπορεί να είχε στη μέτρηση μας η ατελής ηλεκτρική επαφή μεταξύ της

ηλεκτρικής βελόνας που εφάρμοξε την τάση στα ηλεκτρικά σημεία επαφής της πλασμονικής δομής. Η μέθοδος αυτή οδήγησε στον υπολογισμό μιας τιμής για την ποσότητα της ειδικής αντίστασης κοντά στα $0.1\Omega/\mu\text{m}$ η οποία είναι αρκετά κοντά στην εκτίμηση για την αντίσταση του δακτυλίου.

VI. Η κατανάλωση ισχύος για τη συγκεκριμένη λειτουργία θερμο-οπτικού ελέγχου της δομής του πλασμονικού δακτυλίου υπολογίζεται εύκολα έχοντας τα δεδομένα για την αντίσταση μέσα από τον τύπο του Joule, $P=I^2 \cdot R$. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς για να διαπιστωθεί η συγκεκριμένη φασματική μετατόπιση μετρήθηκε να είναι 3.31mWs, μια ιδιαίτερα χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Συνδέοντας τη συγκεκριμένη κατανάλωση με μια εφαρμογή διακόπτη, μπορούμε να υποστηρίξουμε πως για την περιοχή μήκους κύματος στα 1561nm η ισχύς αυτή είναι ικανή να οδηγήσει μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου της συνάρτησης μεταφοράς σε ένα ER ~8dB για τον υπό εξέταση πλασμονικό διακόπτη μεταξύ των δύο καταστάσεων του (COOL/HOT).

4.2.4 Θερμική συμπεριφορά της δομής του DLSPP δακτυλίου διέλευσης με PMMA σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας του διακόπτη

Το τελευταίο στάδιο των μετρήσεων χαρακτηρισμού της πλασμονικής δομής δακτυλίου με PMMA εστιάζει στα όρια θερμικής αντοχής του πολυμερούς που υιοθετείται για να εφοδιάσει τη διηλεκτρική λωρίδα του DLSPP κυματοδηγού. Όπως έχει σημειωθεί ήδη στην εισαγωγή του κεφαλαίου, ο ενεργός έλεγχος πλασμονικών δομών τεχνολογίας DLSPP κυματοδηγών στοχεύει στην αναζήτηση πολυμερικών λωρίδων ανθεκτικών στη λειτουργία σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών που εμφανίζουν επίσης υψηλές τιμές για το θερμο-οπτικό συντελεστή (TOC). Για τη διερεύνηση του πρώτου κριτηρίου, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στις δομές δακτυλίων εφοδιασμένες με πολυμερικές λωρίδες από PMMA στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Bourgogne -UB) για τον προσδιορισμό της θερμικής συμπεριφοράς του πολυμερούς κατά τη θέρμανση του. Σκοπός των μετρήσεων αυτών είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού κάνοντας χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) για τη διαπίστωση της ποιότητας των δομών δακτυλίων.

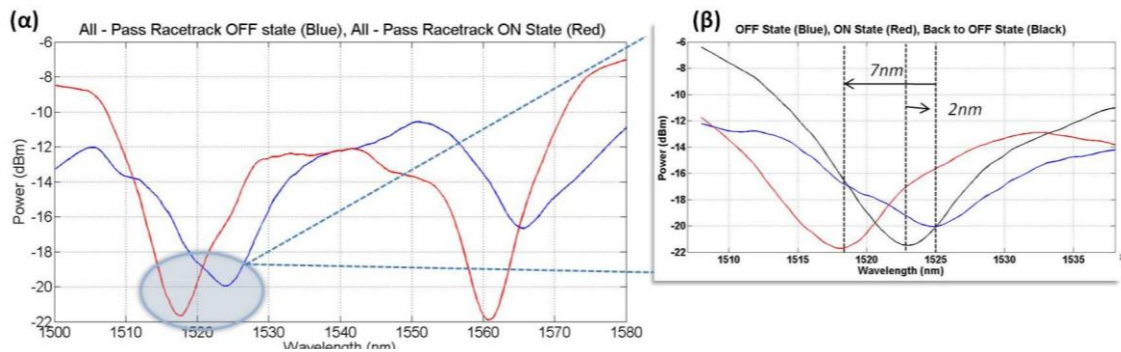


Εικόνα11: Εικόνες SEM μικροσκοπίου για τη δομή του δακτυλίου στη (α) θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T=20^{\circ}\text{C}$). (β) Αλλοίωση γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κενού στη δομή δακτυλίου κατά τη θέρμανση της δομής κατά $\Delta T=62^{\circ}\text{K}$. (γ) Καταστροφή του πολυμερούς PMMA κατά τη θέρμανση του κατά $\Delta T=75^{\circ}\text{K}$ που έχει ως αποτέλεσμα τη μη διαπίστωση δομής σύζευξης (κενού) μεταξύ ευθύ κυματοδηγού και κοιλότητας συντονισμού.

Η Εικόνα 11 παρουσιάζει ένα σύνολο από εικόνες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM) οι οποίες έχουν ληφθεί καθώς θερμαίνεται η δομή του πλασμονικού WRR δακτυλίου από PMMA. Η Εικόνα 11(α) αποδεικνύει τα ιδανικά χαρακτηριστικά της κατασκευασμένης δομής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($T=20^{\circ}\text{C}$) αποτυπώνοντας την υψηλή ποιότητα κατά μήκος της κοιλότητας όσο και στην περιοχή σύζευξης μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού και του δακτυλίου. Θερμαίνοντας στιγμιαία ($\sim\text{ms}$) την πλασμονική δομή με τέτοιο τρόπο που να αυξάνεται η θερμοκρασία του πολυμερούς κατά $\Delta T=62^{\circ}\text{K}$, παρατηρείται εστιάζοντας στην περιοχή σύζευξης η μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κενού (gap) καθώς η εικόνα του SEM μικροσκοπίου υποδηλώνει αλλοίωση της γεωμετρίας της σύζευξης (Εικόνα 11(β)). Επιδιώκοντας θερμαντικούς κύκλους περιόδου $\Delta t=10\text{sec}$ που θερμαίνουν τη δομή του πολυμερούς με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του κατά $\Delta T=75^{\circ}\text{K}$ (Εικόνα 11(γ)), παρατηρείται η καταστροφή της γεωμετρίας του κενού που έχει προβλεφθεί για τη σύζευξη της οπτικής ισχύος από τον ευθύ κυματοδηγό στην κοιλότητα συντονισμού. Η καταστροφή της γεωμετρίας της δομής σύζευξης ουσιαστικά καθιστά τη δομή μη λειτουργική χωρίς να μετριέται οπτική ισχύς στην έξοδο της δομής του δακτυλίου. Συνεπώς, σε πρώτη φάση διαπιστώνεται πως το πολυμερές PMMA για εφαρμογές σε δακτυλίους WRR περιορίζεται στην περιοχή μόνιμης λειτουργίας για θερμοκρασίες που προσεγγίζουν τιμές μεγαλύτερες από $T=95^{\circ}\text{C}$.

Τα αποτελέσματα αυτά διερευνήθηκαν και στο πλαίσιο μετρήσεων που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) με σκοπό να προσδιοριστεί η επίδοση της συνάρτησης μεταφοράς κάτω από διαφορετικές τιμές ρεύματος έγχυσης στον DLSP κυματοδηγό. Για την πειραματική μέτρηση εφαρμόστηκε επαναληπτικά το ρεύμα ελέγχου $I=50\text{mA}$ με διαφορετικούς κύκλους θέρμανσης ώστε να διερευνηθεί η επαναφορά της αρχικής φασματικής κατανομής κατά την ψύξη της δομής στην αρχική θερμοκρασία. Η τελευταία μέτρηση διήρκεσε αρκετά μεγάλο χρονικό

διάστημα (~5min) ώστε να είναι εφικτή η πραγματοποίηση της μέτρησης φασματικής καταγραφής που περιλαμβάνεται στην προηγούμενη ενότητα. Η Εικόνα 12(α) παρουσιάζει τις μετρήσεις αυτές μετά την εφαρμογή του ρεύματος $I=50\text{mA}$ που επιφέρει τη θέρμανση της διηλεκτρικής λωρίδας του κυματοδηγού κατά $\Delta T=61.3^\circ\text{C}$ όπως υπολογίστηκε σε προηγούμενο παράγραφο της διατριβής. Η φασματική μετατόπιση $\Delta\lambda=7\text{nm}$ υπολογίστηκε μεταξύ της αρχικής κατάστασης (OFF state, μπλε γραμμή) απουσία ρεύματος ελέγχου ($I=0\text{mA}$) και της κατάστασης μεταγωγής του διακόπτη (ON state, κόκκινη γραμμή) η οποία προέκυψε μετά την εφαρμογή του ρεύματος ελέγχου ($I=50\text{mA}$) ικανό να θερμάνει τον DLSPP κυματοδηγό της δομής κατά $\Delta T=61.3^\circ\text{C}$.



Εικόνα12: (α) Φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς της DLSPP δομής του δακτυλίου συντονισμού για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη: OFF state για $I=0\text{mA}$ στη μπλε φασματική καμπύλη και ON state για $I=50\text{mA}$ στην κόκκινη φασματική καμπύλη. (β) Ατελής επαναφορά της συνάρτησης μεταφοράς μετά από τον κύκλο θέρμανσης που επέβαλλε η παρουσία του ρεύματος ελέγχου ($I=50\text{mA}$) με την απώλεια επαναφοράς στο αρχικό σημείο της φασματικής κατανομής της πλασμονικής κοιλότητας συντονισμού καθώς εμφανίζεται φασματική μετατόπιση $\Delta\lambda=2\text{nm}$.

Η Εικόνα 12(β) εστιάζει στην επαναφορά της συνάρτησης μεταφοράς της δομής του πλασμονικού φίλτρου διέλευσης (All-Pass Filter) μετά την εφαρμογή του θερμαντικού κύκλου που θερμαίνει τη διηλεκτρική λωρίδα του PMMA κατά $\Delta T=61.3^\circ\text{C}$. Η επαναφορά της συνάρτησης μεταφοράς μετά την ψύξη που ενεργοποιείται από την τιμή του ρεύματος στα 50mA φανερώνει την απώλεια της επαναφοράς της συνάρτησης μεταφοράς (μαύρη γραμμή) στα αρχικά χαρακτηριστικά της. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται μια φασματική αλλοίωση που είναι υπεύθυνη για μια μετατόπιση σε μικρότερα μήκη κύματος (spectral blueshift) κατά $\Delta\lambda\sim 2\text{nm}$ όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα. Η μέτρηση αυτή είναι σύμφωνη με το αποτέλεσμα που καταγράφηκε στο SEM μικροσκόπιο στην προηγούμενη φάση μετρήσεων που κατέδειξε τη μόνιμη αλλοίωση των χαρακτηριστικών του κενού (gap) μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού και του κυματοδηγού δακτυλίου. Το αποτέλεσμα της μείωσης του παράγοντα ποιότητας (Q-factor) κατά την επαναφορά της συνάρτησης μεταφοράς του δακτυλίου στο αρχικό σημείο επιβεβαιώνει τη μεταβολή του συντελεστή σύζευξης μεταξύ των δύο κυματοδηγών από τη μόνιμη αλλοίωση που επιφέρει η θέρμανση του πολυμερούς [4.38]. Το τελευταίο βήμα αξιολόγησης περιελάμβανε την έγχυση ρεύματος ελέγχου στα $I_2=90\text{mA}$ που είχε ως αποτέλεσμα την καταγραφή μηδενικής ισχύος

στην έξοδο του δακτυλίου. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται να είναι σύμφωνο με την καταστροφή του κενού που μετρήθηκε για θέρμανση του πολυμερούς κατά $\Delta T=75^{\circ}\text{C}$ (Εικόνα 11(γ)).

4.3 Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηρισμού δομών δακτυλίων από Cyclomer που ελέγχονται θερμο-οπτικά

Η συμπεριφορά του πολυμερούς PMMA καθιστά αναγκαία την αναζήτηση εναλλακτικών επιλογών για την επιλογή πολυμερικών υλικών τα οποία ικανοποιούν δύο βασικές απαιτήσεις. Πρώτον, είναι ανθεκτικά σε μεγάλες μεταβολές της θερμοκρασίας τους ώστε να υπάρχει η δυνατότητα για επιβολή ακόμα μεγαλύτερων θερμικών φορτίων ικανά να επιτύχουν τις αναγκαίες ολισθήσεις φάσης σε ακόμα μικρότερες δομές λαμβάνοντας υπόψη το θερμο-οπτικό μηχανισμό. Μια επιπλέον απαίτηση για τα εναλλακτικά πολυμερικά υλικά που θα εφοδιάσουν τους διακόπτες που βασίζονται στην DLSPP τεχνολογία και ελέγχονται ενεργά από τον θερμο-οπτικό μηχανισμό είναι η όσο το δυνατό μεγαλύτερη τιμή για τον θερμο-οπτικό συντελεστή τους ώστε να 'μεταφράζουν' με πιο αποτελεσματικό τρόπο τις ίδιες μεταβολές θερμοκρασίας σε ακόμα μεγαλύτερες στροφές φάσης που είναι αναγκαίες για τη λειτουργία των διακοπών. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά τα αποτελέσματα του πειραματικού χαρακτηρισμού από δομές πλασμονικών δακτυλίων που χρησιμοποιούν το πολυμερικό υλικό Cyclomer που υπόσχεται καλύτερες επιδόσεις στο θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου καθώς εμφανίζει μεγαλύτερο θερμο-οπτικό συντελεστή (Thermo-Optic Coefficient – TOC).

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, ακόμα και μια μικρή μεταβολή στον ενεργό δείκτη διάθλασης (effective refractive index - n_{eff}) είναι αρκετή για να διαπιστωθεί μια μικρή φασματική μετατόπιση των κοιλοτήτων συντονισμού (resonances) που είναι αρκετή για να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στην απόκριση της φασματικής συνάρτησης [4.28]. Αν και η γενικές αρχές που διέπουν την ενεργή λειτουργία των WRRs είναι ευκολονόητες, η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της δομής του δακτυλίου λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο της ακτίνας αποτελεί μια σημαντική διαδικασία. Είναι γεγονός πως η αύξηση της ακτίνας του δακτυλίου οδηγεί αυτόματα στη δυνατότητα να διαπιστώσουμε μεγαλύτερες τιμές ολίσθησης φάσης μέσω της εφαρμογής ενός ενεργού μηχανισμού (θερμο-οπτικός μηχανισμός) καθώς είναι ανάλογη του μεγέθους της οπτικής κοιλότητας ($\Delta\phi \sim 2\pi \cdot \Delta n_{\text{eff}}$). Η επιδίωξη της συνθήκης για μεγαλύτερο μήκος κοιλότητας εμφανίζεται με κόστος των υψηλότερων απωλειών διάδοσης που με τη σειρά τους οδηγούν σε δραστική μείωση του λόγου σβέσης (ER) και του παράγοντα ποιότητας (Q-factor) και συνεπώς σε φασματικές κατανομές λιγότερο απότομες και με μειωμένο βάθος διαμόρφωσης. Ένα επιπλέον μειονέκτημα της προσέγγισης αυτής αποτελεί η ανάπτυξη δομών διακοπών με μεγαλύτερο μέγεθος θυσιάζοντας το δομικό πλεονέκτημα της πλασμονικής τεχνολογίας. Συνυπολογίζοντας τις παραμέτρους που σχολιάζονται παραπάνω εισάγεται στη βιβλιογραφία από τους Krasavin&Zayats [4.56] ένα μετρικό αξιολόγησης (Figure of Merit

– FOM) για τους θερμο-οπτικούς διακόπτες δακτυλίου που συσχετίζει τα παραπάνω μεγέθη της ευαισθησίας του μηχανισμού ενεργού ελέγχου αλλά και του μεγέθους της δομής δακτυλίου:

$$FOM = \left(\frac{\partial T}{\partial n}\right) \cdot (R/\lambda)$$
$$\frac{\partial T}{\partial n} = \left(\frac{\partial T}{\partial \theta}\right) \times \left(\frac{\partial \theta}{\partial n_{eff}}\right) \cdot \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial n}\right) \quad (4.9)$$
$$FOM = 4\pi^2 \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial n_{eff}}{\partial n}$$

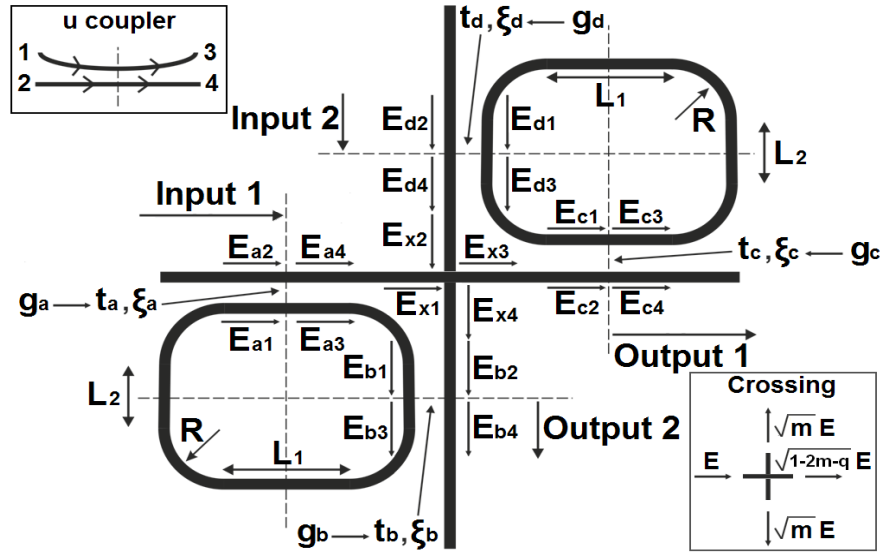
Στις παραπάνω σχέσεις που χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν την περιγραφή του FoM που εισάγουν οι συγγραφείς, παρατηρούμε την εξάρτηση από τη γεωμετρία του δακτυλίου ($\partial T/\partial \theta$) αλλά και τον ενεργό μηχανισμό που αξιοποιείται για τον έλεγχο της φασματικής κατανομής της δομής ($\partial n_{eff}/\partial n$). Υψηλές τιμές του FoM αντιστοιχούν σε δομές δακτυλίων με κατανομές διάδοσης που αποκρίνονται πιο απότομα στην ίδια μεταβολή του δείκτη διάθλασης (Δn) για συγκεκριμένη ακτίνα δακτυλίου και για το λόγο αυτό είναι επιθυμητές. Η λειτουργία αυτή της απότομης απόκρισης είναι συνδεδεμένη άμεσα με τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση του διακόπτη καθώς συνεπάγεται μικρότερη ένταση εφαρμογής του ενεργού μηχανισμού για να διαπιστωθεί η κατάλληλη ολίσθηση φάσης που θα οδηγήσει στην αξιόπιστη μεταγωγή της κατάστασης του διακόπτη. Αν και η εργασία βασίζει την περιγραφή της σε ενεργές δομές δακτυλίων DLSPP κυματοδηγών που αξιοποιούν τον ηλεκτρο-οπτικό μηχανισμό [4.57], η παραπάνω ανάλυση μπορεί να συμπεριλάβει και τον θερμο-οπτικό μηχανισμό που υιοθετείται στα πλαίσια της παρούσας διατριβής για τον ενεργό έλεγχο των διακοπών. Στην περίπτωση μας λοιπόν, ο όρος του θερμο-οπτικού συντελεστή (Thermo-optic Coefficient – TOC) αποτελεί κρίσιμη σχεδιαστική παράμετρο που μπορεί να οδηγήσει σε δραστική βελτίωση τις επιδόσεις του διακόπτη εάν επιλεγεί ένα διηλεκτρικό με υψηλές (απόλυτες) τιμές του TOC όπως το Cyclomer. Στη γραμμή αυτή αναζητήθηκε η επίδειξη ενεργών δομών δακτυλίων που αξιοποιούν το θερμο-οπτικό μηχανισμό για τον ενεργό έλεγχο και χρησιμοποιούν διηλεκτρικές λωρίδες από Cyclomer για να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους οι διακόπτες.

Τα αποτελέσματα αυτά περιλαμβάνονται στη δημοσιευμένη εργασία του συναδέλφου Δ. Καλαβρουζιώτη μαζί με τις μετρήσεις μεταφοράς δεδομένων 0.48 Tbps από πλασμονικό κυματοδηγό υιοθετώντας την πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (Wavelength Division Multiplexing – WDM) [4.23]. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Burgundy, UB) στη Γαλλία. Η παράθεση στην συγκεκριμένη ενότητα εξυπηρετεί τη σύγκριση των δομών μεταγωγής βασισμένες σε δακτυλίου για τα δύο διαφορετικά υλικά στις πολυμερικές λωρίδες (polymer strips) των DLSPP κυματοδηγών.

4.3.1 Δομή μεταγωγής βασισμένη σε DLSPP φίλτρα

Τα τυπικά φίλτρα προσθήκης/απόρριψης καναλιού (channel add/drop ring filters) αποτελούνται από δύο παράλληλους κυματοδηγούς συζευγμένους εκατέρωθεν ενός συντονιστή δακτυλίου. Σε αυτή τη διάταξη υπάρχουν δύο θύρες εισόδου (Input & Add) και δύο θύρες εξόδου (Through & Drop). Κατά τη λειτουργία αυτής της δομής ως θερμο-οπτικό διακοπτικό στοιχείο, ο λόγος σβέσης (Extinction Ratio, ER) μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας OFF και ON που λαμβάνεται στις δύο θύρες εξόδου διαφέρει σε μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία μεταγωγής αυτού του τύπου αποδίδουν υψηλό λόγο σβέσης (ER) μόνο στη θύρα εξόδου Through, ενώ αντίστοιχα η απόδοση που παρατηρείται στη θύρα Drop είναι ιδιαίτερα φτωχή [4.58]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μετάδοση στη θύρα Drop δεν αποτελεί προϊόν συμβολής, όπως χαρακτηριστικά συμβαίνει στη θύρα Through.

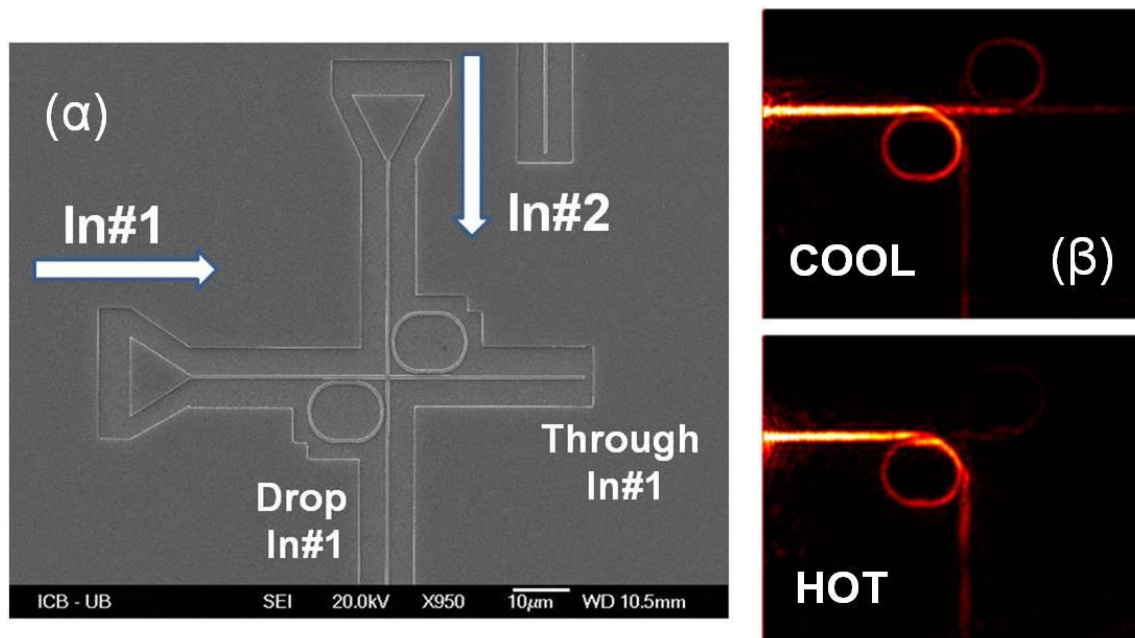
Για το λόγο αυτό, εδώ εξετάζεται μία άλλη διάταξη, η οποία μπορεί να προσφέρει μεγάλες τιμές ER και στις δύο θύρες εξόδου Through και Drop. Στην εικόνα xx απεικονίζεται η εν λόγω διάταξη στη γενικευμένη της μορφή, η οποία αφορά ένα DLSPP πλασμονικό φίλτρο διπλού συντονιστή με δυνατότητα προσθήκης/απόρριψης καναλιού [4.56]. Η μονάδα αυτή αποτελείται από δύο κάθετα τεμνόμενους DLSPP κυματοδηγούς σε συνδυασμό με δύο DLSPP συντονιστές επιμηκυσμένων δακτυλίων τοποθετημένους σε διαγώνια θέση, παρέχοντας έτσι δύο θύρες εισόδου (Inputs 1&2) και δύο θύρες εξόδου (Outputs 1 & 2). Εξάλλου, παρόμοιος αρχιτεκτονικός σχεδιασμός έχει αξιοποιηθεί σε υλοποιήσεις δρομολογητών για οπτικά NoC (Network on Chip-NoC) που βασίζονται σε κυματοδηγούς τεχνολογίας SOI και πραγματοποιούν μεταγωγή της εισερχόμενης πολυκυματικής ροής δεδομένων [4.59]. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση συντονιστών δακτυλίου με σχετικά μεγάλες ακτίνες που είναι της τάξης δεκάδων μικρομέτρων έτσι ώστε να αντιστοιχεί αποκλειστικά μία κορυφή συντονισμού ανά εισερχόμενο μήκος κύματος. Μία τέτοια προσέγγιση, όμως, δεν μπορεί να υιοθετηθεί για την υλοποίηση εφάμιλλης μονάδας φίλτρου με DLSPP πλασμονική τεχνολογία λόγω των μεγάλων απωλειών διάδοσης που εμφανίζουν οι DLSPP δομές.



Εικόνα13: Σχηματική διάταξη ενός DLSP πλασμονικού φίλτρου προσθήκης/απόρριψης καναλιού βασισμένου σε δύο συντονιστές επιμηκυμένου δακτυλίου με κάθετα διασταυρωμένους κυματοδηγούς. Η αναπαραγωγή της δομής του διπλού δακτυλίου πραγματοποιείται μετά από άδεια του Δρ. Σωτήρη Παπαϊωάννου που περιλαμβάνει την ανάλυση της συγκεκριμένης δομής στη διατριβή του [4.60].

Η Εικόνα 13 παρουσιάζει τη δομή ολοκληρωμένου διπλού δακτυλίου όπως κατασκευάστηκε στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Bourgogne - UB) στη Γαλλία. Η Εικόνα 14(α) δείχνει μια εικόνα από ένα μικροσκόπιο SEM της κατασκευασμένης δομής του DLSP διακόπτη αποτυπώνοντας τη δομή του διπλού δακτυλίου η οποία περιλαμβάνει δύο κάθετους DLSP κυματοδηγούς οι οποίοι τέμνονται και τοποθετούν διαγώνια τις δομές των δύο συντονιστών τους. Σχετικά με την επιλογή των γεωμετρικών παραμέτρων της δομής, οι δομές των συντονιστών δακτυλίου έχουν ακτίνα $R=5\mu\text{m}$ ενώ τα μήκη που ορίζουν τις σταθερές σύζευξης μεταξύ των συντονιστών και των DLSP κυματοδηγών επιλέχθηκαν να είναι $L_1=2\mu\text{m}$ και $L_2=0\mu\text{m}$ αντίστοιχα. Οι DLSP κυματοδηγοί με χρήση της πολυμερικής λωρίδας του Cyclomer, σχεδιάστηκαν με μία σχεδόν τετραγωνική εγκάρσια διατομή η οποία έχει διαστάσεις $500 \times 600 \text{nm}^2$. Η καλή ποιότητα των κατασκευασμένων κυματοδηγών βοήθησε να επιτευχθεί υψηλή ακρίβεια στον προσδιορισμό και τη γεωμετρία του σημείου διεπαφής μεταξύ του συντονιστή και του ευθύ κυματοδηγού επιτρέποντας όριο ανάλυσης τα 300nm στην απόσταση του κενού.

Ο μηχανισμός ενεργού ελέγχου της δομής βασίστηκε επίσης στον θερμο-οπτικό μηχανισμό. Ο μηχανισμός αύξησης της θερμοκρασίας του πολυμερούς έγινε εφικτός συνδέοντας το μεταλλικό υπόστρωμα του χρυσού με μια πηγή συνεχούς ρεύματος, ικανή να παρέχει ρεύμα έως $I=400\text{mA}$. Το αποτέλεσμα του θερμικού φορτίου Joule ήταν η αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς, οι μεταβολές της οποίας καταγράφηκαν με δομές θερμο-ζευγών οι οποίες ήταν εμφωλευμένες στη δομή.

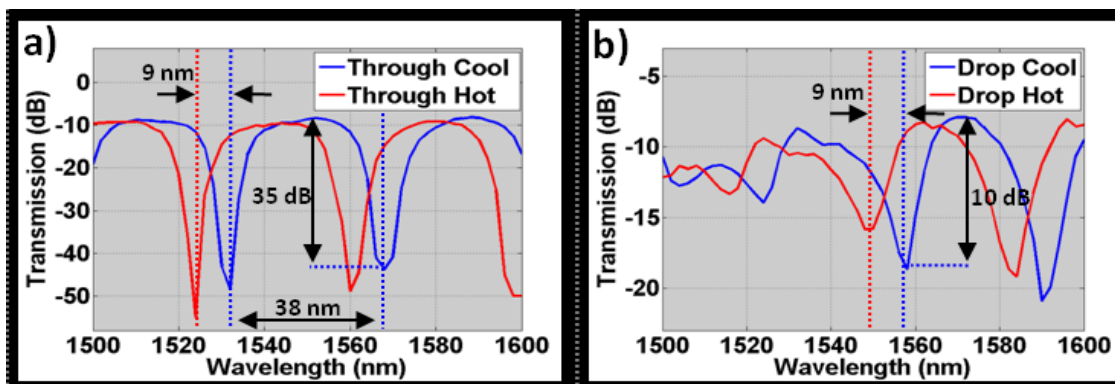


Εικόνα14: (α) Εικόνα από μικροσκόπιο (SEM) του DLSPP πλασμονικού φίλτρου διπλού συντονιστή τύπου προσθήκης/απόρριψης καναλιού που κατασκευάστηκε. (β), Εικόνες που αποτυπώθηκαν με τη μέθοδο RLM κατά την οδήγηση του φωτός στη θύρα Drop και Through, αντίστοιχα. Η κατασκευή και ο οπτικός χαρακτηρισμός της πλασμονικής διάταξης, καθώς και η λήψη των εικόνων μικροσκοπίου πραγματοποιήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Burgundy στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος ICT-PLATON (FP7 ICT- STREP no. 249135) .

Οι μετρήσεις για τη φασματική απόκριση της διάταξης βασίστηκαν στην τεχνική LRM (Leakage Radiation Microscopy – LRM) καθώς η πλασμονική δομή δεν ήταν ετερο-ολοκληρωμένη σε πλατφόρμα πυριτίου ώστε να καθίσταται εύκολη η πρόσβαση σε μια πειραματική διάταξη μέσω της χρήσης μιας ίνας χαρακτηρισμού. Η μέθοδος του LRM είναι μια διαδεδομένη τεχνική χαρακτηρισμού η οποία χρησιμοποιείται για τη συλλογή ακτινοβολίας διαρροής (μηχανισμός απωλειών) από DLSPP ρυθμούς που διαδίδονται κατά μήκος της δομής. Ο αναγνώστης μπορεί να αναζητήσει περαιτέρω λεπτομέρειες σχετικά με την τεχνική αυτή σε πλήθος πηγών στη βιβλιογραφία [4.61,4.62]. Τα αποτελέσματα της τεχνικής αυτής αποτυπώνονται στην εικόνα 14(β) όπου παρατίθενται οι αντίστοιχες LRM εικόνες που διαπιστώθηκαν στην περιοχή μήκους κύματος στα 1558nm και αναφέρονται στις περιπτώσεις ψυχρής (COOL state) και θερμής κατάστασης (HOT state) αντίστοιχα. Αξιοποιώντας τη δυνατότητα μέτρησης της θερμοκρασίας στο Cyclomer για τις δύο περιπτώσεις, μετρήθηκε μεταβολή θερμοκρασίας $\Delta T=60\pm 5$ °K κατά την έγχυση ποσότητας ρεύματος ίση με 400mA. Είναι εμφανής η επιτυχής επίδειξη της λειτουργίας της μεταγωγής καθώς το οπτικό σήμα εξέρχεται από τη δομή μέσα από τη θύρα “Through” στην ψυχρή κατάσταση (COOL) ενώ η έξοδος πραγματοποιείται από τη θύρα “Drop” όταν η κατάσταση μετατρέπεται σε θερμή (HOT).

Οι φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς για τις δύο θύρες εξόδου (Through&Drop) στη δομή διπλού δακτυλίου αναπαρίστανται στις εικόνες 12(α) και 12(β) αντίστοιχα όταν ο

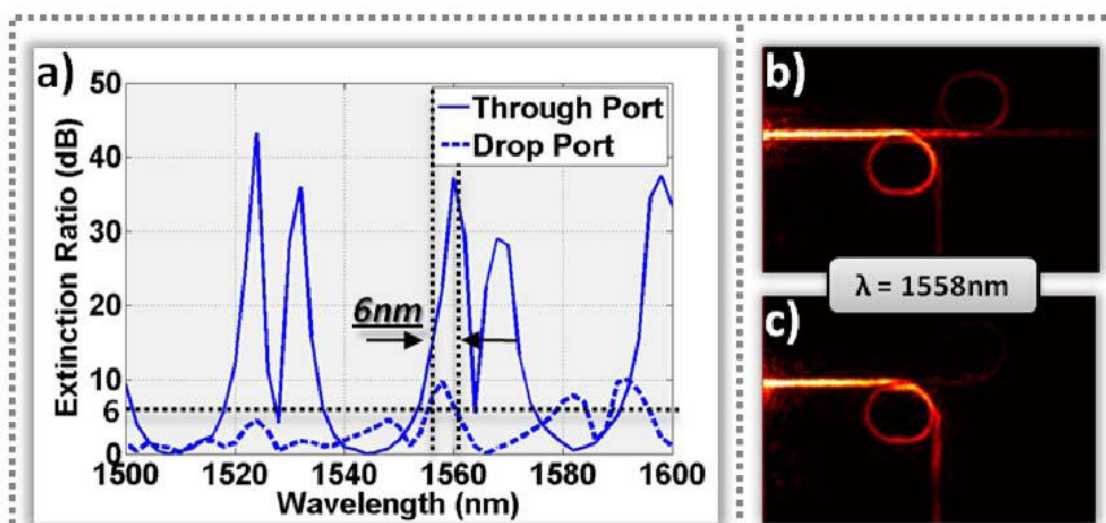
DLSPP ρυθμός διεγείρεται στη θύρα εισόδου#1 (In#1) για τις δύο διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί ο διακόπτης (COOL&HOT). Είναι εμφανής η παρουσία μιας κοιλότητας συντονισμού η οποία επαναλαμβάνεται με μια φασματική περίοδο ίση με το FSR, η οποία είναι κοντά στα 38nm. Στην ψυχρή κατάσταση, χωρίς κανένα σήμα ελέγχου, η κοιλότητα για τη θύρα "Through" εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλή τιμή για το λόγο σβέσης (ER), ίσο με 35dB ενώ η αντίστοιχη τιμή για τη θύρα "Drop" χαρακτηρίζεται από λόγο σβέσης περίπου ίσο με 10dB στο φασματικό παράθυρο μεταξύ 1560 και 1580nm. Οι απώλειες της δομής (Insertion Loss) μετρημένες στο μήκος κύματος στο οποίο εμφανίζει μέγιστο η φασματική συνάρτηση μεταφοράς μετρήθηκαν να είναι 10dB για τη θύρα "Through" και 8dB για τη θύρα "Drop" αντίστοιχα. Ο παράγοντας ποιότητας υπολογίστηκε για τις δύο παραπάνω θύρες $Q \sim 80$ ("Through") και $Q \sim 82$ ("Drop") αντίστοιχα για μήκη κύματος τα οποία αντιστοιχούν στις αντίστοιχες κοιλότητες (1568nm και 1572nm αντίστοιχα). Οι απώλειες διάδοσης (propagation loss) υπολογίστηκαν να είναι 0.1dB/μm λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομών. Οι τιμές των απωλειών για τους DLSPP κυματοδηγούς εφοδιασμένους με πολυμερικές λωρίδες Cyclomer είναι συγκρίσιμες με τις τιμές που παρουσίασαν οι κυματοδηγοί με το πολυμερές του PMMA. Τέλος, αξιολογώντας την επίδοση για τον ενεργό μηχανισμό ελέγχου των φασματικών χαρακτηριστικών των δομών διπλών δακτυλίων, παρατηρούμε και στις δύο πόρτες εξόδου που μελετήθηκαν πως μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του Cyclomer στους $\sim 90^\circ\text{C}$, παρατηρήθηκε μια φασματική μετατόπιση της τάξης των $\sim 9\text{nm}$ στη συνάρτηση μεταφοράς των θυρών εξόδου για τη δομή του διπλού δακτυλίου και αυτό επικυρώνει πειραματικά την επιβολή μιας πρόσθετης ολίσθησης φάσης λόγω του θερμο-οπτικού φαινομένου.



Εικόνα 15(α) Φασματική συνάρτηση μεταφοράς της θύρας "Through" για τις δύο δυνατές καταστάσεις του διακόπτη (HOT&COOL) στο παράθυρο 1500-1600nm. (β) Φασματική συνάρτηση μεταφοράς για τη θύρα εξόδου "Drop" στο διακόπτη διπλού δακτυλίου για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη (HOT&COOL). Φασματική μετατόπιση $\Delta\lambda=9\text{nm}$ της συνάρτησης μεταφοράς είναι εμφανής και για τις δύο περιπτώσεις.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την αξιολόγηση της ικανότητας μεταγωγής της συγκεκριμένης DLSPP δομής σε ένα ευρύ φασματικό παράθυρο, ικανό να επιτρέψει τη μεταγωγή ενός WDM συστήματος που μεταφέρει υψηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας. Η Εικόνα 16 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του λόγου σβέσης (ER) που

διαπιστώνεται μεταξύ των δύο καταστάσεων του διακόπτη (COOL&HOT) στο φασματικό παράθυρο μεταξύ 1500 και 1600nm. Οι πειραματικές μετρήσεις εμφανίζουν υψηλής ποιότητας 1x2 μεταγωγή βασισμένη σε θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου με 23dB και 10dB ER για τις περιπτώσεις των θυρών εξόδου "Through" και "Drop" αντίστοιχα. Διαπιστώνεται πως είναι εφικτή η μεταγωγή από τη συγκεκριμένη δομή σε ένα φασματικό παράθυρο κοντά στα 6nm με μια αποδεκτή τιμή για το ER μεγαλύτερη από 6dB. Η επίδοση αυτή είναι συγκρίσιμη με τις απαιτήσεις που εμφανίζονται σε δομές μεταγωγής βασισμένες σε Si τεχνολογία [4.63] με τη διαφορά πως ο πλασμονικός διακόπτης προσφέρει τη δυνατότητα για σμίκρυνση του μεγέθους της δομής εκμεταλλευόμενο τα εγγενή πλεονεκτήματα της πλασμονικής κυματοδότησης.



Εικόνα16: (α) Ο λόγος σβέσης (ER) που διαπιστώνεται στις δύο διαθέσιμες θύρες του διπλού δακτυλίου ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Εικόνες από το μικροσκόπιο RLM για τις δύο θύρες του διακόπτη στο μήκος κύματος $\lambda=1558\text{nm}$ για (β) την ψυχρή (COOL state) και (γ) θερμή (HOT state) κατάσταση του διακόπτη διπλού δακτυλίου.

Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη δομή υιοθετώντας τη συνδεσμολογία με τους κάθετα τοποθετημένους κυματοδηγούς αλλά και τις δύο κοιλότητες συντονισμού, παρέχει υψηλές τιμές του λόγου σβέσης (Extinction Ratio - ER) ταυτόχρονα και στις δύο πόρτες εξόδου της. Η σύγκριση με άλλες δομές που βασίζονται στη τεχνολογία DLSPP, αποδεικνύει την υψηλή ποιότητα της δομής αυτής. Τα πλεονεκτήματα της υψηλής επίδοσης της συγκεκριμένης δομής μεταγωγής προέρχονται αφενός από το πρωτότυπο σχεδιασμό της όπως επίσης και από τη χρήση του Cyclomer ως υλικό στην πολυμερική λωρίδα του DLSPP κυματοδηγού αντί για το PMMA. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της φασματικής μετατόπισης μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού για το Cyclomer συγκριτικά με το PMMA, προκύπτει πως η καλύτερη επίδοση του πρώτου υλικού σχετίζεται με την υψηλότερη τιμή του θερμο-οπτικού συντελεστή του (Thermo Optic Coefficient - TOC). Πιο συγκεκριμένα, για την ίδια αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς ($\Delta T \sim 60^\circ\text{K}$) διαπιστώνουμε μια φασματική μετατόπιση της δομής του WRR

που βασίζεται στο PMMA μικρότερη από 7nm, την ίδια στιγμή που στο Cyclomer η απόκριση στην ίδια αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς οδηγεί σε φασματική μετατόπιση περίπου ίση με 9nm [4.45,4.61]. Στο επόμενο κεφάλαιο που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις πλασμονικές δομές μεταγωγής που βασίζονται στη χρήση του Cyclomer σε συμβολομετρικές διατάξεις Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometers–MZIs) , θα υπάρξει εκτενής αναφορά στις ελκυστικές θερμο-οπτικές ιδιότητες του υλικού αυτού συγκριτικά με το PMMA.

Τέλος, σχολιάζοντας τις υψηλές τιμές του απαιτούμενου ρεύματος οδήγησης (I~400mA) για να αναπτυχθεί το συγκεκριμένο θερμικό φορτίο για την αύξηση της θερμοκρασίας της πολυμερικής λωρίδας, αξίζει να αναφερθεί πως οφείλεται στη γεωμετρία του φύλλου χρυσού που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό του DLSPP κυματοδηγού. Αυξάνοντας τις διαστάσεις της εγκάρσια τομής για το μεταλλικό φύλλο του χρυσού (Au) στο σχεδιασμό του κυματοδηγού μειώνεται δραστικά η αντίσταση του, όπως προβλέπεται και από το νόμο του Pouillet [4.64]. Αυτή η μείωση της αντίστασης μεταφράζεται σε υψηλή απαίτηση ρεύματος για να επιτευχθεί το ίδιο θερμικό φορτίο λόγω φαινομένου Joule που είναι ικανό να αυξήσει τη θερμοκρασία του πολυμερούς στην επιφάνεια του μετάλλου. Συνεπώς, υιοθετώντας δομές ετερο-ολοκλήρωσης σε SOI (Silicon-on-Insulator) πλατφόρμα, όπως παρουσιάστηκαν στις κοιλότητες συντονισμού βασισμένες σε PMMA της προηγούμενης ενότητας, είναι εφικτή η δραστική περικοπή της ενεργειακής κατανάλωσης καθώς θα απαιτούνται μικρότερες ποσότητες ρεύματος για την ανάπτυξη των απαιτούμενων θερμικών φορτίων.

4.4 Σύνοψη Κεφαλαίου

Ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη και η επιτυχής πειραματική επίδειξη των διακοπών που βασίζονται σε δομές DLSPP δακτυλίων περιλαμβάνεται στο κεφάλαιο αυτό της διατριβής. Παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα των πλασμονικών διακοπών που βασίζονται στον ενεργό έλεγχο μέσω θερμο-οπτικού μηχανισμού των διακοπών που βασίζονται σε τεχνολογία κυματοδηγού DLSPP για δύο διαφορετικά πολυμερή: το PMMA και το Cyclomer. Τα βασικά αποτελέσματα και η συνεισφορά των πειραματικών επιδείξεων των διακοπών που βασίζονται σε δομές δακτυλίων συνοψίζονται στη συνέχεια:

- **Δομή απλού WRR βασισμένο σε δομές κυματοδηγών DLSPP που χρησιμοποιούν από διηλεκτρικές λωρίδες PMMA**

Η επιτυχής επίδειξη της ενεργής λειτουργίας του πλασμονικού δακτυλίου που χρησιμοποιεί το πολυμερές PMMA στη διηλεκτρική λωρίδα του αποτελεί ισχυρή απόδειξη πως ετερο-ολοκληρωμένες DLSPP δομές σε παθητικές SOI (Silicon-on-Insulator) πλατφόρμες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ολοκληρωμένες δομές οπτικών κυκλωμάτων μεταγωγής σε περιβάλλον οπτικής διασύνδεσης (Optical Interconnect) [4.65]. Η προτεινόμενη δομή που αξιοποιεί έναν μονό δακτύλιο ακτίνας $R=5.5\mu\text{m}$ εκμεταλλεύομενοι τη δυνατότητα για

μετάδοση σε κλίμακα μικρότερη του μήκους κύματος της τεχνολογίας SPP (Surface Plasmon Polariton) [4.66] για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μικρότερο μέγεθος του διακόπτη. Τα διαπιστευτήρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης της δομής επιβεβαιώθηκαν καθώς ο θερμο-οπτικός μηχανισμός που αξιοποιήθηκε για τη φασματική μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς του δακτυλίου με σκοπό να δημιουργηθεί συνθήκη του διακόπτη απαιτεί την κατανάλωση μόλις 3.31 mWs ηλεκτρικής ισχύος. Οι ενεργειακές επιδόσεις αυτές αποτελούν σημαντικό πειραματικό αποτέλεσμα καθώς επιβεβαιώνουν το διακηρυγμένο πλεονέκτημα της πλασμονικής τεχνολογίας για την ανάπτυξη διακοπών χαμηλών απαιτήσεων ισχύος. Προηγούμενες επιδείξεις θερμο-οπτικών διακοπών, είχαν επιδείξει λειτουργία μεταγωγής απαιτώντας επίπεδα ισχύος αρκετών εκατοντάδων mWs, ενώ το βάθος διαμόρφωσης (Modulation Depth) ήταν αρκετά φτωχό, κοντά στο 10% [4.41]. Η δομή πλασμονικού μικρο-δακτυλίου (Microring Resonator) η οποία χρησιμοποιεί διηλεκτρικές λωρίδες PMMA παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής επιδεικνύοντας λειτουργία διακόπτη με λόγο σβέσης (ER) της συνάρτησης μεταφοράς του ίσο με 6dB στο φασματικό παράθυρο μεταξύ 1550 και 1570nm όταν ο δακτύλιος είναι στην ψυχρή κατάσταση (COOL state) ενώ παρουσιάζει λόγο σβέσης ~10dB όταν βρίσκεται στη θερμή κατάσταση (HOT state). Αξίζει επίσης να τονιστεί πως οι φτωχές επιδόσεις του διακόπτη ως προς τους χρόνους μεταγωγής (~μs) μπορούν να βελτιωθούν δραστικά αξιοποιώντας τεχνικές που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και προσφέρουν θερμο-οπτικές δυναμικές στην κλίμακα των ns [4.67]. Λαμβάνοντας υπόψη επίσης τις χαμηλές απαιτήσεις ισχύος των 3.31 mWs για τη φασματική διολίσθηση της συνάρτησης μεταφοράς κατά $\Delta\lambda=7\text{nm}$, η προτεινόμενη δομή αποτελεί μια ελκυστική προσέγγιση για την ανάπτυξη διακοπών που βασίζονται στην τεχνολογία DLSPP.

- **Δομές διπλών WRRs που βασίζονται σε δομές DLSPS κυματοδηγών που διηλεκτρικών λωρίδων από Cyclomer**

Το παρόν κεφάλαιο περιλαμβάνει τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε διακόπτες που βασίζονται σε διπλούς πλασμονικούς δακτυλίους που φέρουν διηλεκτρική λωρίδα από το πολυμερές Cyclomer, που υπόσχεται υψηλότερο θερμο-οπτικό συντελεστή συναντώντας τις απαιτήσεις των ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων μεταγωγής για χαμηλής κατανάλωσης πλασμονικούς διακόπτες δακτυλίων [4.68]. Περιγράφεται η στρατηγική της επιλογής ενός διηλεκτρικού υλικού για την επίτευξη υψηλότερων επιδόσεων στους πλασμονικούς διακόπτες δακτυλίου μέσα από την παρουσίαση ενός συγκεκριμένου μετρικού επίδοσης (FoM) που έχει προταθεί στην βιβλιογραφία. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και τα βασικά χαρακτηριστικά της δομής διπλού δακτυλίου που σχεδιάστηκε από συναδέλφους ερευνητές για τις ανάγκες υλοποίησης των δομών μεταγωγής δακτυλίου στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του ICT-PLATON. Η πειραματική αξιολόγηση της δομής φανερώνει τις ελκυστικές επιδόσεις που εμφανίζει η δομή καθώς για τις ίδιες θερμοκρασιακές μεταβολές ($\Delta T \sim 60^\circ\text{K}$) που υφίσταται το Cyclomer, είναι δυνατή η μετατόπιση των κοιλοτήτων συντονισμού σε μεγαλύτερες

φασματικές αποστάσεις ($\Delta\lambda \sim 9\text{nm}$), γεγονός που επιβεβαιώνει τη διακηρυγμένη υπεροχή του Cyclomer ως προς τον θερμο-οπτικό συντελεστή του έναντι του PMMA. Τέλος, σχολιάζονται οι επιμέρους επιδόσεις της δομής του πλασμονικού διακόπτη διπλού δακτυλίου ο οποίος δεν χαρακτηρίστηκε ετερο-ολοκληρωμένος σε παθητική πλατφόρμα Si με αποτέλεσμα να εμφανίζει ιδιαίτερα χαμηλές επιδόσεις στη διάσταση της ενεργειακής κατανάλωσης με ρεύματα οδήγησης $\sim 400\text{mA}$. Ωστόσο, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο, οι πλασμονικοί διακόπτες που βασίζονται σε DLSP κυματοδηγούς με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer εμφανίζουν επιδόσεις που τους καθιστούν υποψήφιους για την ανάπτυξη μελλοντικών πλασμονικών κυκλωμάτων με αποστολή την επεξεργασία της οπτικής πληροφορίας [4.69].

Αναφορές 4^ο Κεφαλαίου

[4.1] Q. Xu, B. Schmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, pp. 325–327, May 2005.

[4.2] G. Li, A. Krishnamoorthy, I. Shubin, J. Yao, Y. Luo, H. Thacker, X. Zheng, K. Raj, and J. Cunningham, "Ring resonator modulators in silicon for interchip photonic links," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 19, no. 6, p. 3401819, 2013.

[4.3] F. Gan, T. Barwicz, M. A. Popovic, M. S. Dahlem, C. W. Holzwarth, P. T. Rakich, H. I. Smith, E. P. Ippen, and F. X. Kartner, "Maximizing the Thermo-optic tuning range of silicon photonic structures," *Photonics in Switching*, pp.67–68, 2007.

[4.4] V. Van, T. Ibrahim, K. Ritter, P. Absil, F. Johnson, R. Grover, J. Goldhar, and P. T. Ho, "All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonators," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 1, pp. 74–76, Jan. 2002.

[4.5] A. Biberman, H. Lira, K. Padmaraju, N. Ophir, J. Chan, M. Lipson, and K. Bergman, "Broadband silicon photonic electrooptic switch for photonic interconnection networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 8, pp. 504–506, 2011.

[4.6] J. Yang, N. K. Fontaine, Z. Pan, A. O. Karalar, S. S. Djordjevic, C. Yang, W. Chen, S. Chu, B. E. Little, and S. J. B. Yoo, "Continuously tunable, wavelength-selective buffering in optical packet switching networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 1030–1032, Jun. 2008.

[4.7] C. Stamatidis, K. Vysokinos, L. Stampoulidis, I. Lazarou, A. Maziotis, J. Bolten, M. Karl, T. Wahlbrink, P. D. Heyn, Z. Sheng, D. V. Thourhout, and H. Avramopoulos, "Silicon-on-insulator nanowire resonators for compact and ultra-high speed all-optical wavelength converters," *Journal of Lightwave and Technology*, vol. 29, no. 20, pp. 3054–3060, 2011.

[4.8] M. Petracca, B. Lee, K. Bergman, and L. Carloni, "Photonic NoCs: System level design exploration," *IEEE Micro*, vol. 29, no. 4, pp. 74–85, Jul. 2009.

[4.9] A. Bianco, D. Cuda, M. Garrich, R. Gaudino, G. Gavilanes, and P. Giaccone, "Optical interconnection networks based on microring resonators," *IEEE Micro*, vol. 4, no. 7, pp. 546–556, 2012.

- [4.10] P. Dong, S. Preble, and M. Lipson, "All-optical compact silicon comb switch," *Optics Express*, vol. 15, pp. 9600–9605, 2007.
- [4.11] M. H. Xiao, Shijun; Khan, H. Shen, and M. Qi, "Multiple-channel silicon micro-resonator based filters for WDM applications," *Optics Express*, vol. 15, no. 12, pp. 7489–7498, Jun. 2007.
- [4.12] C. Stamatidis, F. Gomez-Agis, L. Stampoulidis, K. Vysokinos, I. Lazarou, H. Dorren, L. Zimmermann, K. Voigt, D. Thourhout, P. Heyn, and H. Avramopoulos, "The BOOM project: towards 160 Gb/s packet switching using SOI photonic integrated circuits and hybrid integrated optical flip-flops," *Journal of Lightwave and Technology*, vol. 30, no. 1, pp. 22–30, Jan. 2012.
- [4.13] A. Bianco, D. Cuda, M. Garrich, G. Gavilanes, V. Martina, and F. Neri, "Crosstalk minimization in microring-based wavelength routing matrices," *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [4.14] D. Siracusa, V. Linzalata, G. Maier, A. Pattavina, Y. Yabin, and C. Ming, "Hybrid architecture for optical interconnection based on micro ring resonators," *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*, pp. 1–5, Dec. 2011.
- [4.15] W.L. Barnes, A. Dereux, and T.W. Ebbesen, "Surface plasmon subwavelength optics," *Nature*, vol. 424, no. 9, pp. 824-830, Aug. 2003.
- [4.16] H.A. Atwater, "The promise of plasmonics," *Scientific American*, vol. 296, no. 4, pp. 56-63, Apr. 2007.
- [4.17] M.L. Brongersma, and V.M. Shalaev, "The case for plasmonics," *Science*, vol. 328, no. 5977, pp. 440-441, Apr. 2010.
- [4.18] R. Zia, J.A. Schuller, A. Chandran, and M.L. Brongersma, "Plasmonics: the next chip-scale technology," *Materials Today*, vol. 9, no. 7-8, pp. 20-27, Jul./Aug. 2006.
- [4.19] D.K. Gramotnev and S.I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," *Nature Photonics*, vol. 4, no. 2, pp. 83-91, Jan. 2010.
- [4.20] B. Steinberger, et al., "Dielectric stripes on gold as surface plasmon waveguides," *Applied Physics Letters*, vol. 88, no. 9, art. no. 094104, Feb. 2006.
- [4.21] T. Holmgaard and S.I. Bozhevolnyi, "Theoretical analysis of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides," *Physical Review B*, vol. 75, no. 24, art. no. 245405, Jun. 2007.
- [4.22] G. Gagnon, N. Lahoud, G. A. Mattiussi, and P. Berini, "Thermally activated variable attenuation of long-range surface plasmon polariton waves," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 11, pp. 4391–4402, Nov. 2006.
- [4.23] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vysokinos, and N. Pleros, "0.48Tb/s (12x40Gb/s) WDM transmission and high-quality thermo-optic switching in dielectric loaded plasmonics," *Optics Express*, Vol. 20, No. 7, pp. 7655-7662 (2012).

- [4.24] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Active plasmonics in true data traffic applications: Thermo-optic ON/OFF gating using a silicon-plasmonic asymmetric MZI", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24 (12), pp. 1036-1038, (2012).
- [4.25] Alexandros Emboras, Claudia Hoessbacher, Christian Haffner, Wolfgang Heni, Ueli Koch, Ping Ma, Yuriy Fedoryshyn, Jens Niegemann, Christian Hafner, and Jurg Leuthold, "Electrically Controlled Plasmonic Plasmonic Switches and Modulators", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 21, No.4, July/August 2015.
- [4.26] M. G. Nielsen et al., "Silicon-loaded surface plasmon polariton waveguides for nanosecond thermo-optical switching," *Opt. Lett.*, vol. 39, pp. 2282–2285, Apr. 2014.
- [4.27] T. Holmgaard, Z. Chen, S.I. Bozhevolnyi, L. Markey, A. Dereux, A.V. Krasavin, A.V. Zayats, *Appl. Phys. Lett.* 94 (2009) 051111.
- [4.28] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "All-optical active components for dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Elsevier Optics Communications* 283 (2010) 1581–1584
- [4.29] E.D. Palik (Ed.), *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press, New York, 1984
- [4.30] A. Yariv and P. Yeh, "Photronics: Optical Electronics in Modern Communications", Oxford University, Edition 6, Year Published 2007, pp.198
- [4.31] A. Yariv. "Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides". *Electronics Letters* (2000) 36(4), pp.1-2.
- [4.32] J. M. Choi, R. K. Lee, and A. Yariv. "Control of critical coupling in a ring resonator-fiber configuration: application to wavelength-selective switching, modulation, amplification, and oscillation." *Optics letters* (Aug. 2001) 26(16), pp. 1236–8.
- [4.33] T. Baehr-Jones, M. Hochberg, C. Walker, and A. Scherer. "High-Q ring resonators in thin silicon-on-insulator". *Applied Physics Letters* (2004) 85(16), p.3346.
- [4.34] T. Holmgaard, Z. Chen, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, and A. Dereux. "Dielectric-loaded plasmonic waveguide-ring resonators". *Optics Express* (2009) 17(4), pp.2968–2975.
- [4.35] R. M. Briggs, J. Grandidier, S. P. Burgos, E. Feigenbaum, and H. A. Atwater. "Efficient Coupling between Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides." *Nano letters* (Oct. 2010).
- [4.36] C. Garcia, V. Coello, Z. Han, I. P. Radko, and S. I. Bozhevolnyi, "Experimental characterization of dielectricloaded plasmonic waveguide-racetrack resonators at near-infrared wavelengths," *Appl. Phys. B* 107(2), 401–407 (2012).
- [4.37] S. Randhawa, A. V. Krasavin, T. Holmgaard, J. Renger, S. I. Bozhevolnyi, A. V. Zayats, R. Quidant, "Experimental demonstration of dielectric-loaded plasmonic waveguide disc resonators at telecom wavelengths", *Appl. Phys. Lett.* 2011,98, 161102.

- [4.38] O. Tsilipakos, E. E. Kriezis, "Microdisc Resonator Filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides", Elsevier Opt. Comm., Vol.283, Issue 15, pp.3095-3098 (2010).
- [4.39] O. Tsilipakos, E. E. Kriezis and S. I. Bozhevolnyi, "Thermo-optic microring resonator switching elements made of dielectric-loaded plasmonic waveguides", Journal of Applied Physics, 109, 073111 (2011).
- [4.40] O. Tsilipakos, T. V. Yioultsis, and E. E. Kriezis, "Theoretical analysis of thermally tunable microring resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides", Journal of Applied Physics 106,093109 (2009).
- [4.41] J. Gosciniaik, S. I. Bozhevolnyi, T. B. Andersen, V. S. Volkov, J. Kjelstrup-Hansen, L. Markey, and A. Dereux, "Thermo-optic control of dielectric-loaded plasmonic waveguide components", Opt. Express. 18, 1207 (2010).
- [4.42] T. Tekin , "System-in-package technologies for photonics", SPIE Proceedings Vol. 7605, Optoelectronic Integrated Circuits XII, Louay A. Eldada; El-Hang Lee, Editors, 2010.
- [4.43] Adam Densmore, Siegfried Janz, Rubin Ma, Jens H. Schmid, Dan-Xia Xu, André Delâge, Jean Lapointe, Martin Vachon and Pavel Cheben, "Compact and low power thermo-optic switch using folded silicon waveguides", Optics Express, Vol.17, No.13, pp.10457-10465(2009).
- [4.44] T. Chu, H. Yamada, S. Ishida, and Y. Arakawa, "Compact $1 \times N$ thermo-optic switches based on silicon photonic wire waveguides," Opt. Express 13(25), 10109–10114 (2005).
- [4.45] Giannis Giannoulis, D. Kalavrouziotis, D. Apostolopoulos, S. Papaioannou, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, K. Hassan, J.-C. Weeber, A. Dereux, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, K. Vysokinos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Data Transmission and Thermo-optic Tuning Performance of Dielectric-loaded Plasmonic Structures Hetero-Integrated on a Silicon Chip", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24, No. 5, pp. 374-376 (2012).
- [4.46] Karim Hassan. Fabrication and characterization of thermo-plasmonic routers for telecom applications. Other [cond-mat.other]. Universit_e de Bourgogne, 2013. English. <NNT : 2013DI-JOS029>. <tel-00944210>
- [4.47] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Three-dimensional numerical modeling of photonic integration with dielectric-loaded SPP waveguides", Phys. Rev. B 78, 045425 (2008).
- [4.48] S. Yue, Z. Li, J.-J. Chen, Q.-H. Gong, "Bending Loss Calculation of a Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguide Structure", Chin. Phys. Lett. 2010, 27, 027303.
- [4.49] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Passive photonic elements based on dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides", Applied Physics Letters, Vol.90, No.21, 211101, 2007.
- [4.50] Wim Bogaerts, Peter De Heyn, Thomas Van Vaerenbergh, Katrien DeVos, Shankar Kumar, Selvaraja, Tom Claes, Pieter Dumon, Peter Bienstman, Dries Van Thourhout, and Roel Baets, "Silicon Microring Resonators", Laser Photonics Rev. 6, No. 1, 47–73 (2012).
- [4.51] T. Holmgaard and S. I. Bozhevolnyi. "Theoretical analysis of dielectric loaded surface plasmon-polariton waveguides", Physical Review B (June 2007) 75(24), pp. 1-12.

- [4.52] A.G. Radwan, "Resonance and Quality Factor of the RLaCa Fractional Circuit", IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, Volume: 3, Issue: 3, pp. 377-385 (2013).
- [4.53] C. Zhu and Dr. Todd Hubing, "Q-Factor and Resonance in the Time and Frequency Domain", Technical Report: CVEL-11-028, Clemson University, October 2011.
- [4.54] Jie Teng et al, "Athermal Silicon-on-Insulator ring resonators by overlaying a polymer cladding on narrowed waveguides.", Optics Express Vo. 16, August 2009.
- [4.55] Lloyd, David H. Physics Laboratory Manual 2nd Edition, Florida: Saunders college Publishing, 1998, p.562.
- [4.56] A. V. Krasavin, A. V. Zayats, "Electro-optic switching element for dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguide" Appl. Phys. Lett. 2010, 97, 041107.
- [4.57] A. Arya and R.Manivasakan, "Analysis of an electro-optic plasmonic racetrack ring resonator based switch made of DLSPP waveguides", in Proc. of International Conference on Optics and Photonics, Kolkata, India, February 2015.
- [4.58] Ο. Τσιλιπάκος, "Φωτονικές Διατάξεις Επιφανειακών Πλασμονικών Κυμάτων σε Κλίμακα Μικρότερη του Μήκους Κύματος", Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Οκτ. 2013.
- [4.59] A. Biberman, B.G. Lee, N. Sherwood-Droz, M. Lipson, and K. Bergman, "Broadband operation of nanophotonic router for silicon photonic networks-on-chip", Photonics Technology Letters, vol. 22, no. 12, pp. 926-928, Jun. 2010.
- [4.60] Σ. Δ. Παπαϊωάννου, "Ολοκληρωμένοι Οπτικοί Δρομολογητές για Οπτικά Δίκτυα Διασύνδεσης Υπολογιστικών Συστημάτων", Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Ιούλιος. 2013.
- [4.61] K. Hassan et al., "Thermo-optical control of dielectric loaded plasmonic racetrack resonators", J. Appl. Phys, 110, 023106 (2011).
- [4.62] S. Massenot,, J. Grandidier, A. Bouhelier, G. Colas des Francs, J-C Weeber, L. Markey, and A. Dereux, "Polymer-metal waveguides characterization by Fourier plane leakage radiation microscopy", Appl.Phys. Lett. , Vol. 91, pp. 243101 (2007).
- [4.63] B.G. Lee, A. Biberman, J. Chan, and K. Bergman, "High-Performance Modulators and Switches for Silicon Photonic Networks-on-Chip", IEEE J. of Sel. Topics in Quantum Electron., Vol. 16, No. 1, pp. 6-22 (2010)
- [4.64] https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity
- [4.65] Pepeljugoski et al, "Data Center and High Performance Computing Interconnects for 100 Gb/s and Beyond", Proc.OFC'07, Anaheim, OMR4.
- [4.66] E. Ozbay, "Plasmonics: Merging photonics and electronics at Nanoscale dimensions," Science, vol. 311, pp. 189–193, Jan. 2006

[4.67] J. C. Weeber et al., "Nanosecond thermo-optical dynamics of polymer loaded plasmonic waveguides," *Opt. Exp.*, vol. 21, pp. 27291–27305, Nov. 4, 2013

[4.68] S. Papaioannou, K. Vyrsokinos, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, K. Hassan, K.; Weeber, J.-C.; L. Markey, L. Dereux, S. I. Bozhevolnyi, A. Miliou, E. E. Kriezis, N. Pleros, "A 320 Gb/s-Throughput Capable 2x2 Silicon-Plasmonic Router Architecture for Optical Interconnects", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol.29, no.21, pp.3185-3195, Nov.1, 2011

[4.69] Timothy J. Davis, Daniel E. Gomez and Ann Roberts, "Plasmonic Circuits for manipulating optical information", *Review Article, De Gruyter Nanophotonics*, DOI: 10.1515/nanoph-2016-0131 (2016).

5. Υβριδικά DLSP κυκλώματα μεταγωγής με χρήση διακοπών ασύμμετρων συμβολομέτρων Mach-Zehnder (A-MZIs) Cyclomer

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείχθηκε η δυνατότητα για την ανάπτυξη της περιοχής της φωτονικής ολοκλήρωσης για τη συνάντηση των προκλήσεων που ανοίγονται με την υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων σε επίπεδο πλακέτας (board) και τσιπ (chip) καλύπτοντας τόσο τις ενεργές όσο και τις παθητικές λειτουργίες που απαιτούνται [5.1]. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, η αξιοποίηση της πλασμονικής τεχνολογίας υπόσχεται να προσφέρει μια αξιόπιστη απάντηση στην ανάγκη για κυκλώματα οπτικής δρομολόγησης στο νέο περιβάλλον της οπτικής διασύνδεσης (Optical Interconnects) [5.2,5.3]. Στα πλαίσια διαρκούς αναζήτησης του βέλτιστου καταμερισμού του ρόλου των τεχνολογιών μετάδοσης και επεξεργασίας πληροφορίας, η οπτική διασύνδεση καλείται να αναλάβει το ρόλο της μεταφοράς/μεταγωγής πακέτων υψηλής ταχύτητας με χαμηλή κατανάλωση ισχύος μεταξύ υπολογιστικών μονάδων/κέντρων οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιούν ηλεκτρονικές τεχνολογίες για προηγμένες λειτουργίες ελέγχου και επεξεργασίας των δεδομένων. Η δυνατότητα αυτή θα απελευθερώσει τις επιδόσεις των ηλεκτρονικών υπολογιστικών μονάδων από τον φραγμό που υπάρχει στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων μεταξύ τους καθώς απουσιάζει η δυνατότητα για αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας με ηλεκτρικούς αγωγούς στην nm-κλίμακα. Παράλληλα, θα εκμεταλλευτεί και τις διαπιστευμένες δυνατότητες της οπτικής τεχνολογίας να προσφέρει υπερ-υψηλής ταχύτητας κυκλώματα μεταγωγής και δρομολόγησης [5.4].

Αυτές οι ιδέες της ανάπτυξης ενεργών οπτικών κυκλωμάτων μεταγωγής βρήκαν πρόσφορο έδαφος στην πλασμονική τεχνολογία καθώς κατέστη εφικτό να αναπτυχθούν ολοκληρωμένες φωτονικές δομές οι οποίες θα είναι σε μέγεθος συγκρίσιμες με το μέγεθος των ηλεκτρικών δομών για το περιβάλλον διασυνδέσεων [5.5]. Η δυνατότητα αυτή των πλασμονικών κυκλωμάτων προκύπτει από την ικανότητα να εγκλωβίζουν το οπτικό πεδίο μέσω της σύζευξης του στις κινήσεις ελεύθερων ηλεκτρονίων ενός μεταλλικού στρώματος, που είναι τμήμα του πλασμονικού κυματοδηγού. Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν λεπτομερώς τα πλεονεκτήματα της ανάπτυξης ενεργών πλασμονικών διακοπών που βασίζονται στην τεχνολογία κυματοδηγού DLSP (Dielectric Loaded Surface Plasmon Polaritons – DLSP) προσφέροντας μικρό μέγεθος των διακοπών, χαμηλές ενεργειακές καταναλώσεις και υψηλές επιδόσεις λειτουργίας του διακόπτη. Η επίδειξη δομών DLSP κυματοδότησης μεταξύ άλλων πλασμονικών προσεγγίσεων (SPP-based) αποτελεί μια ελκυστική επιλογή, συμβατή με ένα ευρύ φάσμα χρήσης διηλεκτρικών υλικών αλλά και αντίστοιχων τεχνικών κλίμακας βιομηχανικής επεξεργασίας μέσα από την UV-λιθογραφία (Ultra Violet-UV lithography). Η κατηγορία των DLSP κυματοδηγών ικανοποιεί σημαντικές συνθήκες όπως ο ισχυρός εγκλωβισμός πεδίου και η δυνατότητα για απευθείας ολοκλήρωση με δομές ηλεκτροδίων για τον θερμο-οπτικό έλεγχο της δομής. Το

Βασικό πλεονέκτημα λοιπόν της τεχνολογίας αυτής είναι πως οι μεταλλικές λωρίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα τόσο για τη διασφάλιση της κυματοδότησης του πεδίου όσο και τη χρήση τους ως ηλεκτρόδια θέρμανσης (heaters), επιτρέποντας ως εκ τούτου τον θερμο-οπτικό έλεγχο των χαρακτηριστικών διάδοσης του κυματοδηγούμενου ρυθμού που εντοπίζεται χωρικά στη διεπιφάνεια μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού [5.6-5.8]. Την ίδια στιγμή, το βασικό μειονέκτημα των DLSPP δομών που σχετίζεται με τις υψηλές τιμές των απωλειών διάδοσης που οφείλονται στην εξασθένιση της πεδριακής κατανομής στο μεταλλικό στρώμα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε ολοκληρώνοντας DLSPP κυματοδηγούς μικρού μήκους με δομές διηλεκτρικών κυματοδηγών μεγαλύτερου μήκους [5.9], είτε φιλοξενώντας τις DLSPP δομές σε παθητικές Si πλατφόρμες που χαρακτηρίζονται από χαμηλές απώλειες διάδοσης [5.10,5.11].

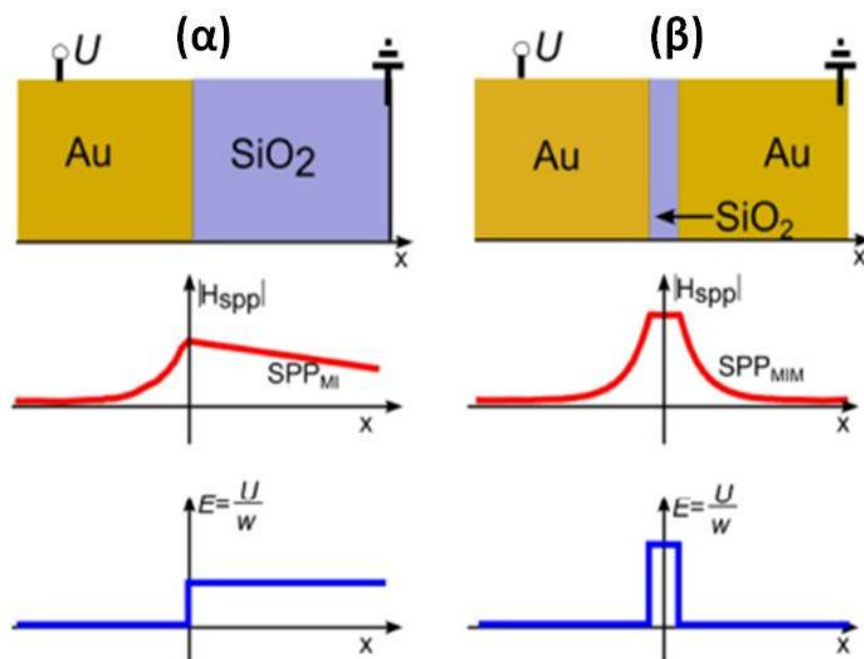
Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η χρήση πλασμονικών δακτυλίων για την ανάπτυξη χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης, μm^2 -μεγέθους δομές διακοπών αξιοποιώντας τον θερμο-οπτικό μηχανισμό για τον έλεγχο των δομών αυτών. Οι κοιλότητες συντονισμού χρησιμοποιούνται ως ενεργά στοιχεία διακοπών στις περιπτώσεις που ενδιαφέρει η επεξεργασία καναλιών σε ένα μήκος κύματος όπως είναι αναμενόμενο καθώς τα στενά φασματικά χαρακτηριστικά συνοδεύουν τις κοιλότητες συντονισμού ενώ η συνάρτησης μεταφοράς τους έχει περιοδικά χαρακτηριστικά [5.12]. Αντιθέτως, τα κυκλώματα διακοπών που προσφέρουν με ευρύ φάσμα λειτουργίας χρησιμοποιούνται είτε για τη μεταγωγή καναλιών πληροφορίας Tb/s χωρητικότητας ή για τις περιπτώσεις που δεν είναι γνωστή το μήκος κύματος του οπτικού φέροντος. Στην κατηγορία αυτών των διακοπών ανήκουν οι δομές που βασίζονται στα Mach-Zehnder συμβολόμετρα (Mach-Zehnder Interferometers – MZIs) που αξιοποιούν τη διαφορά φάσης ($\Delta\phi=\pi$) μεταξύ δύο οπτικών δρόμων για να επιτευχθεί η λειτουργία της μεταγωγής στις δύο θύρες εξόδου της διάταξης [5.13]. Ο ενεργός έλεγχος οδηγεί στη διαφορά φάσης μεταξύ των οπτικών δρόμων των βραχιόνων του συμβολόμετρου και ισούται με $\Delta\phi=2\pi/\lambda \cdot \Delta n \cdot L$ ενώ παρατηρούμε πως στην απάιτηση ικανοποίησης της συνθήκης μεταγωγής για $\Delta\phi=\pi$, υπάρχει ασθενής εξάρτηση από το μήκος κύματος, επιβεβαιώνοντας συνεπώς το διευρυμένο φασματικό παράθυρο λειτουργίας του διακόπτη. Το φασματικά ευρύ παράθυρο λειτουργίας του διακόπτη συγκριτικά με τους διακόπτες δακτυλίου έρχεται με το κόστος του μεγαλύτερου μεγέθους του που εξαρτάται από το μήκος του ενεργού βραχίονα (L) του συμβολόμετρου που απαιτείται για να διαπιστώσουμε τη στροφή φάσης $\Delta\phi=\pi$ για την επιτυχή μεταγωγή [5.14].

5.1 Ο θερμο-οπτικός έλεγχος συμβολομετρικών δομών MZI εφοδιασμένο με DLSPP κυματοδηγούς

5.1.1 Ενεργός ηλεκτρικός έλεγχος πλασμονικών διατάξεων MZI

Ο ενεργός έλεγχος πλασμονικών διακοπών MZI βασίζεται σε ένα ευρύ φάσμα φυσικών μηχανισμών οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να ελεγχθεί ενεργά το πλασμονικό στοιχείο

μεταγωγής. Σε μια πρόσφατη εργασία, παρουσιάστηκε μία σύνοψη από διαφορετικές επιδείξεις πλασμονικών διακοπών που ελέγχονται ηλεκτρικά μέσω διαφορετικών ενεργών μηχανισμών [5.15]. Είναι γνωστό πως οι ενεργοί πλασμονικοί διακόπτες απαιτούν την παρουσία μιας κατάλληλης τεχνολογίας κυματοδηγού που να επιτρέπει αξιόπιστες συνθήκες κυματοδήγησης και ταυτόχρονα τη δυνατότητα ελέγχου με ενεργό τρόπο των χαρακτηριστικών διάδοσης του πλασμονικού ρυθμού. Όπως παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, δύο είναι οι βασικοί τύποι πλασμονικών κυματοδηγών που συναντώνται στη βιβλιογραφία. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής εστιάζουμε στην πιο απλή περίπτωση του κυματοδηγού που περιέχει μια διεπαφή μεταξύ ενός διηλεκτρικού και ενός μετάλλου (Metal-Insulator – MI). Στην περίπτωση αυτή (MI), ο πλασμονικός ρυθμός εντοπίζεται κυρίως στη διεπαφή μεταξύ μετάλλου και διηλεκτρικού και εξασθενεί καθώς διεισδύει στο μέταλλο όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 1(α). Οι κυματοδηγοί αυτοί υποφέρουν από σχετικά υψηλές απώλειες και χαρακτηρίζονται από μήκη διάδοσης της τάξης των ~δεκάδων μm. Η πιο σύνθετη δομή πλασμονικών κυματοδηγών βασίζεται στη χρήση ενός στρώματος δομής μετάλλου-διηλεκτρικού-μέταλλου (Metal Insulator Metal-MIM) η οποία προσφέρει ισχυρό εντοπισμό του πεδίου στο διηλεκτρικό υλικό και παρέχει μια δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν οι δύο μεταλλικές στρώσεις σαν ηλεκτρόδια επιτρέποντας τη διέγερση ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ τους. Με αυτόν τον τρόπο ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο έντασης $E=V/w$ επικαλύπτει τα σημεία που εμφανίζεται η μέγιστη πεδιακή κατανομή του πλασμονικού ρυθμού προσφέροντας την ανάπτυξη για την εκμετάλλευση του ηλεκτρο-οπτικού φαινομένου για διακόπτες που λειτουργούν κάτω από το όριο περίθλασης σε υπερυψηλές ταχύτητες. Στη βιβλιογραφία έχουν δημοσιευτεί αρκετές πλασμονικές δομές μεταγωγής που βασίζονται στο φαινόμενο Pockels [5.16] προσφέροντας υπερυψηλές ταχύτητες διαμόρφωσης σε συμβολομετρικές δομές MZI [5.17] και προορίζονται για ενεργά στοιχεία διαμόρφωσης με εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Στην κατηγορία των MIM κυματοδηγών έχουν επίσης επιδειχθεί διακόπτες που χρησιμοποιούν τον μηχανισμό της διασποράς ελεύθερων φορέων (Free Carrier Dispersion Effect) που επιτρέπει την εμφάνιση πολύ υψηλών ταχυτήτων μεταγωγής [5.18]. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της Si τεχνολογίας [5.19], οι συμβολομετρικοί διακόπτες MZI που βασίζονται σε αυτόν τον μηχανισμό απαιτούν μεγάλα μήκη στους βραχίονες που τους καθιστά εξαιρετικά ανασφαλείς για την πλασμονική κατηγορία λόγω των υψηλών απωλειών που εμφανίζει. Οι κατηγορίες των διακοπών που βασίζονται σε MIM πλασμονικούς κυματοδηγούς και υλοποιούν συμβολομετρικές διατάξεις MZI υποφέρουν από πολυπλοκότητα στην κατασκευή τους και στη δυνατότητα να είναι συμβατές με άλλες παθητικές πλατφόρμες. Για το λόγο αυτό, προορίζονται για να την ανάπτυξη διαμορφωτών υπερυψηλών ταχυτήτων που θα καλύψουν τις ανάγκες για τις οπτικές πηγές χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης [5.20,5.21].



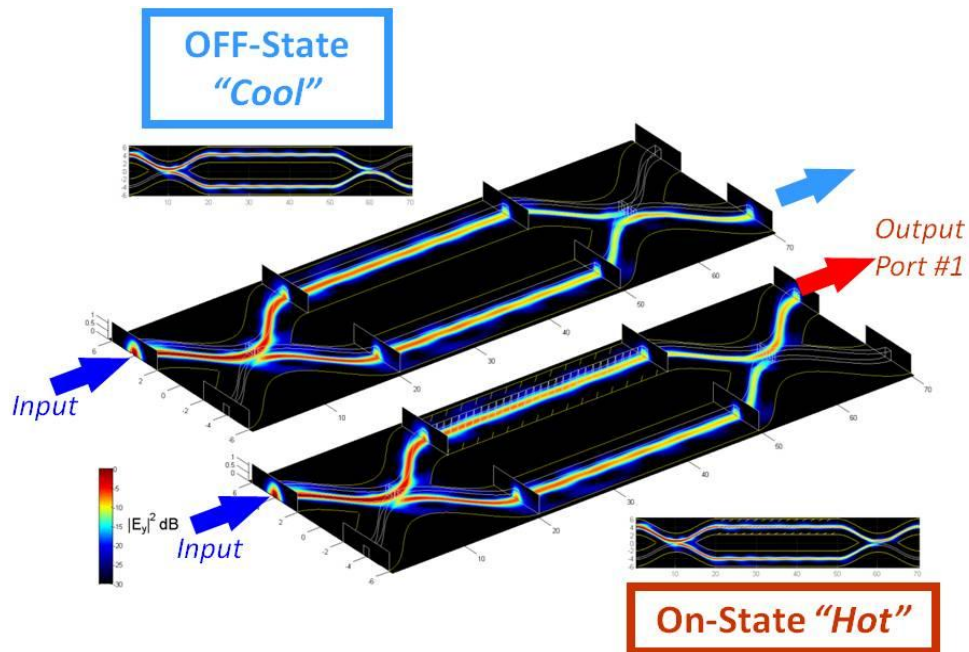
Εικόνα1: Τυπικές διατάξεις πλασμονικών δομών που προορίζονται για οπτική διαμόρφωση: (α) δομή μετάλλου-μονωτή (Metal Insulator - MI) με την αντίστοιχη κατανομή της μαγνητικής πεδιακής συνιστώσας στον άξονα x μαζί με την εφαρμογή ηλεκτροστατικού πεδίου στον ίδιο άξονα (β) Μέταλλο-μονωτής-μέταλλο (Metal Insulator Metal - MIM) συνοδευόμενο από τη χωρική κατανομή του πεδιακού προφίλ της μαγνητικής επαγωγής του θεμελιώδους SPP ρυθμού και η αντίστοιχη πεδιακή συνιστώσα του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου.

Σε αντίθεση με τις δομές MIM, οι δομές κυματοδηγών που βασίζονται σε κυματοδηγούς MI παρέχουν τη δυνατότητα για θερμο-οπτικό έλεγχο σε διακόπτες οι οποίοι έχουν ιδιαίτερα μικρό χαρακτηριστικό μέγεθος. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το καλώδιο θέρμανσης (heating wire) μπορεί ταυτόχρονα να αποτελέσει και το μεταλλικό υπόστρωμα στη δομή του κυματοδηγού. Η αύξηση της θερμοκρασίας του καλωδίου θέρμανσης μέσω του μηχανισμού Joule, θα οδηγήσει σε μεταβολή της σταθεράς διάδοσης (propagation constant) του πλασμονικού ρυθμού. Το αποτέλεσμα της χωρικής επικάλυψης στη διεπιφάνεια μετάλλου-διηλεκτρικού μεταξύ της ροής θερμικής ενέργειας και του κυματοδηγούμενου ρυθμού προσφέρει το υπόβαθρο για τη βέλτιστη αξιοποίηση του θερμο-οπτικού μηχανισμού από σκοπιά κατανάλωσης ισχύος [5.22].

5.1.2 Ενεργός έλεγχος DLSP διατάξεων MZI μέσω θερμο-οπτικού μηχανισμού

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder είναι ίσως η πιο διαδεδομένη διάταξη διακόπτη η οποία έχει μελετηθεί για τη λειτουργία της σαν ενεργό στοιχείο που αξιοποιεί τον θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου. Η απλότητα του σχεδιασμού της δομής όπως επίσης και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η κατασκευή των διηλεκτρικών πλασμονικών κυματοδηγών DLSP είναι βασικοί λόγοι που την καθιστούν δημοφιλή. Παράλληλα, ένα πλεονέκτημα

αποτελεί η δυνατότητα που προσφέρει η παρουσία του βραχίονα αναφοράς (reference arm) καθώς είναι χρήσιμος για την αντιστάθμιση του φαινομένου κοινού ρυθμού (common-mode effect) [5.23].



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής λειτουργίας του συμβολομετρικού διακόπτη Mach-Zehnder (MZI) που παρουσιάζει τις δύο δυνατές καταστάσεις: στην ψυχρή (Cool) συνθήκη για την OFF κατάσταση και η θερμή (Hot) συνθήκη για την ON κατάσταση.

Η λειτουργία του διακόπτη του συμβολομέτρου MZI βασίζεται στην αλλαγή των χαρακτηριστικών διάδοσης του κυματοδηγούμενου ρυθμού στο βραχίονα που θερμαίνεται προκαλώντας μια διαφορά φάσης των δύο ρυθμών που συμβάλλουν στη δομή του Y-τύπου (Y-junction) συζεύκτη ισχύος στην έξοδο του συμβολομέτρου. Η Εικόνα 2 αναπαριστά τις δύο καταστάσεις μεταγωγής του διακόπτη (ON&OFF states) που οδηγούν στην έξοδο της κυματοδηγούμενης ισχύος σε διαφορετική θύρα εξόδου του συμβολομέτρου ως αποτέλεσμα της συμβολής στο δεύτερο συζεύκτη. Στην περίπτωση μας, το συμβολομετρικό αποτέλεσμα θα προκύψει μέσα από τον ενεργό έλεγχο των χαρακτηριστικών της διάδοσης του ρυθμού μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού που είναι υπεύθυνος να εισάγει μια ολίσθηση φάσης $\Delta\varphi$ στον κυματοδηγό που εφαρμόζεται. Η συνθήκη του μήκους του θερμαινόμενου βραχίονα για τη διασφάλιση της πλήρους καταπίεσης της ισχύος στον βραχίονα εξόδου που δεν μεταγεται πληροφορία σχετίζεται άμεσα με τη συνθήκη για τη διαφορά φάσης ίση με:

$$\Delta\varphi = \pi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n \cdot L \quad (5.1)$$

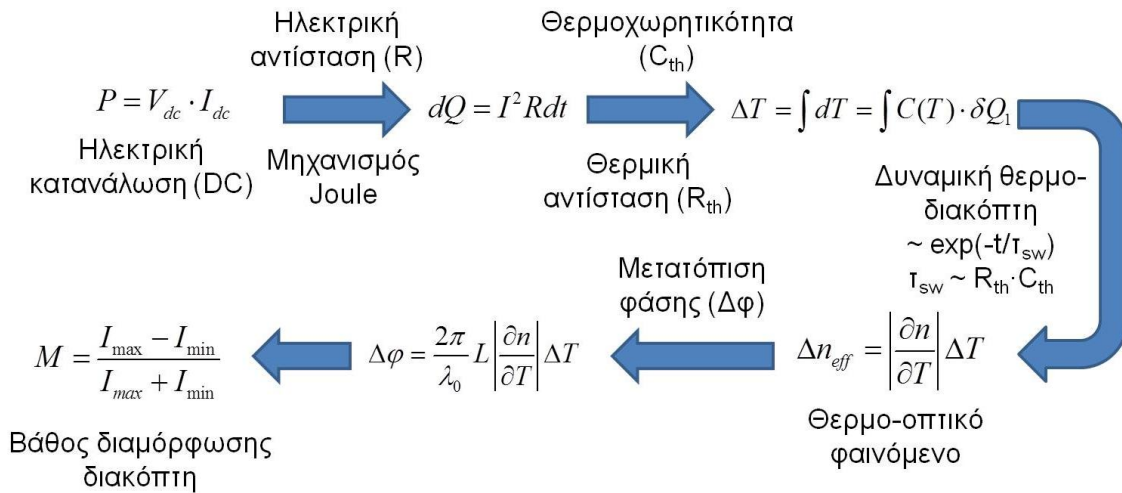
Λαμβάνοντας υπόψη το μηχανισμό του θερμο-οπτικού φαινομένου, και θεωρώντας πως ο οπτικός δρόμος μεταξύ των δύο βραχιόνων του συμβολόμετρου είναι ο ίδιος (υπονοώντας ίδια μήκη στους πλασμονικούς βραχίονες), το απαιτούμενο μήκος του θερμαινόμενου βραχίονα στο διακόπτη MZI εξαρτάται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του διηλεκτρικού που θα επιτευχθεί αλλά και τον θερμο-οπτικό συντελεστή (Thermo-Optic Coefficient – TOC) του διηλεκτρικού υλικού του κυματοδηγού. Με βάση τα παραπάνω, το μήκος του ενεργού βραχίονα που διασφαλίζει την επιθυμητή στροφή φάσης ($\Delta\varphi=\pi$) για τον διακόπτη προκύπτει από τον παρακάτω σχέση:

$$\Delta\varphi = \pi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot L \Rightarrow L = \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta T} \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)^{-1} \quad (5.2)$$

Ο θερμο-οπτικός μηχανισμός ευθύνεται για την αλλαγή του δείκτη διάθλασης του υλικού λόγω της μεταβολής της θερμοκρασίας του [5.24]. Περιγράφεται από τον θερμο-οπτικό συντελεστή (TOC) dn/dT που συσχετίζει το δείκτη διάθλασης n ενός υλικού σε μια θερμοκρασία T . Χρησιμοποιώντας μικρο-δομές θέρμανσης μπορούμε να μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία του υλικού του κυματοδηγού εισάγοντας θερμικά φορτία που αυξάνουν τη θερμοκρασία των υλικών. Η μεταβολή του ενεργού δείκτη διάθλασης (effective index) που προκαλείται από την αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά με τη σειρά του στη διαφορετική συσσώρευση φάσης του κυματοδηγούμενου πεδίου με σκοπό να την εκμεταλλευτώ σε συμβολομετρικές διατάξεις όπως παρουσιάστηκε στην αρχή της ενότητας με το διακόπτη MZI. Η απόδοση του θερμο-οπτικού διακόπτη αυτού μπορεί να αξιολογηθεί μέσω διαφορετικών μεγεθών που εστιάζουν σε διαφορετικά χαρακτηριστικά της επίδοσης του όπως οι χρόνοι μεταγωγής (switching times), το βάθος διαμόρφωσης (modulation depth), η κατανάλωση ισχύος (power consumption), οι ενδογενείς απώλειες (insertion loss) και το συνολικό του μέγεθος (footprint). Η Εικόνα 3 απεικονίζει την αναπαράσταση της αλυσίδας του θερμο-οπτικού μηχανισμού που προσπαθεί να εξηγήσει την επίδοση του διακόπτη με βάση τα παραπάνω μετρικά επίδοσης του συσχετίζοντας τους βασικούς μηχανισμούς που εξηγούν τη λειτουργία του.

Ο ενεργός έλεγχος του διακόπτη επιτυγχάνεται μέσω της επιβολής ενός ηλεκτρικού σήματος τάσης στο μεταλλικό τμήμα των DLSPP κυματοδηγών η οποία με τη σειρά της προκαλεί μια κατανομή ρεύματος στο μέταλλο. Η παρουσία του ρεύματος (I) είναι υπεύθυνη για την έκλυση θερμότητας μέσω του μηχανισμού του φαινομένου Joule στα μέταλλα. Στο σημείο αυτό, βλέπουμε τη γραμμική εξάρτηση που εμφανίζεται στην ποσότητα της θερμότητας που εκλύεται μέσω του μηχανισμού Joule και της αντίστασης της μεταλλικής δομής που χρησιμοποιείται (στην περίπτωση μας φύλλα χρυσού). Η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης από το πλάτος των ηλεκτροδίων χρυσού (Au) που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη θερμαντικών μηχανισμών (heaters) οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές αντίστασης καθώς μειώνεται το πλάτος των ηλεκτροδίων (χρησιμοποιώντας και τον τύπο της αντίστασης $R=\rho \cdot L/s$ για αμετάβλητο μήκος). Η επίπτωση αυτή της μείωσης του πλάτους (width) των ηλεκτροδίων χρυσού θα έχει

ευεργετικό αποτέλεσμα και στη βελτίωση της ενεργειακής ικανότητας (energy efficiency) του συστήματος καθώς επιπλέον μικρότερο πλάτος ηλεκτροδίου σημαίνει βέλτιστη μεταβίβαση ενέργειας από τη θερμική πηγή (μεταλλικό καλώδιο χρυσού) στη διηλεκτρική λωρίδα (πολυμερές PMMA, Cyclomer) του κυματοδηγού. Αυτό συμβαίνει καθώς για μικρά πλάτη στα μεταλλικά φύλλα του κυματοδηγού αυξάνεται η χωρική επικάλυψη μεταξύ της θερμικής πηγής και του διηλεκτρικού μεγιστοποιώντας τη διάχυση θερμότητας στο διηλεκτρικό [5.25]. Είναι επίσης προφανές πως ο περιορισμός στην επιλογή του πλάτους της μεταλλικής λωρίδας τίθεται από τη δυνατότητα να κυματοδηγούνται με αποδεκτές απώλειες οι DLSPP ρυθμοί στις δομές των διακοπών καθώς στενά στρώματα χρυσού οδηγούν σε δραστικό περιορισμό του μήκους διάδοσης λόγω διαρροής πεδιακής ισχύος στο υπόστρωμα του κυματοδηγού με συνέπεια να εμφανίζεται ένας συμβιβασμός στην απαίτηση αυτή [5.26].



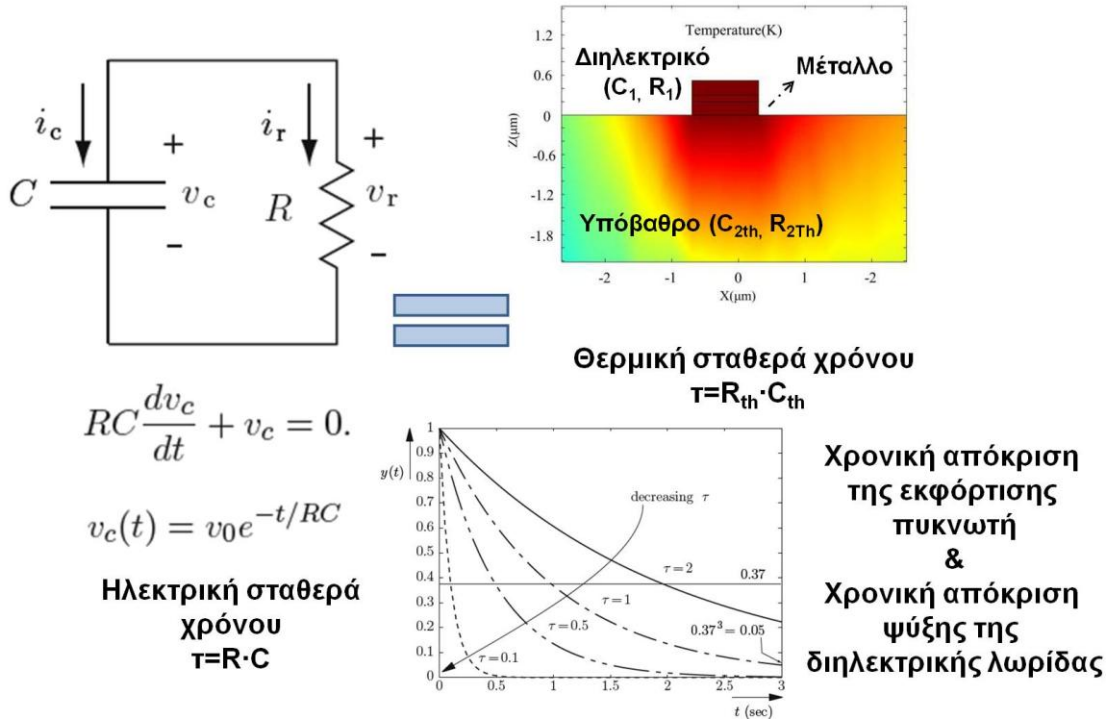
Εικόνα3: Αλυσίδα θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου κατά την εφαρμογή του στην περίπτωση του πλασμονικού διακόπτη MZI. Η αλυσίδα του θερμο-οπτικού ελέγχου εστιάζει στον προσδιορισμό της ολίσθησης φάσης ($\Delta\phi$) που προκύπτει από τη θέρμανση της διηλεκτρικής λωρίδας του DLSPP κυματοδηγού στους ενεργούς βραχίονες του MZI.

Κρίσιμος παράγοντας στη διαμόρφωση των επιδόσεων του θερμο-οπτικού διακόπτη τόσο για την ενεργειακή του ικανότητα όσο και για τη δυναμική του λειτουργία (χρόνοι μεταγωγής) αποτελούν οι θερμικές ιδιότητες των υλικών που σχηματίζουν τον διακόπτη. Από σκοπιά ενεργειακής επίδοσης, οι θερμικές ιδιότητες των υλικών επηρεάζουν το πρόβλημα της ροής θερμότητας που σκοπό έχει να αυξήσει τη θερμοκρασία της διηλεκτρικής λωρίδας του διακόπτη. Πιο συγκεκριμένα, η θερμική αγωγιμότητα (thermal conductivity) του στρώματος που χρησιμοποιείται στο υπόβαθρο (buffer) του DLSPP κυματοδηγού επικαθορίζει την ενεργειακή επίδοση του διακόπτη καθώς επικαθορίζει το διαθέσιμο ποσό θερμότητας (δQ_1) που θα χρησιμοποιηθεί για την αύξηση της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής λωρίδας του πολυμερούς. Υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας του υποβάθρου οδηγούν στη διαρροή του θερμικού φορτίου προς το

υπόστρωμα (substrate) της δομής του διακόπτη με συνέπεια η διαθέσιμη ποσότητα θερμότητας για την αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς να μειώνεται δραστικά οδηγώντας σε φτωχές επιδόσεις ενεργειακής επίδοσης. Η πειραματική επίδειξη του διακόπτη MZI κάνοντας χρήση υποβάθρου βασισμένο σε υλικό MgF_2 που χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας ($k_1=11.6W/mK$) και είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή για το SiO_2 ($k_2=1.4W/mK$) οδήγησε σε εξαιρετικά χαμηλές ενεργειακές επιδόσεις του πλασμονικού διακόπτη MZI [5.27]. Τέλος, η θερμοχωρητικότητα του πολυμερούς είναι αυτή που μεταφράζει την ποσότητα θέρμανσης (δQ_1) σε αύξηση της θερμοκρασίας και για το λόγο αυτό συμπεριλαμβάνεται σαν διάσταση στον υπολογισμό τόσο της ενεργειακής επίδοσης όσο και στις δυναμικές του θερμο-οπτικού διακόπτη όπως θα δούμε στη συνέχεια.

Οι δυναμικές του θερμικού προβλήματος παίζουν καθοριστικό ρόλο καθώς ορίζουν του χρόνους μεταγωγής του διακόπτη και εξαρτώνται ισχυρά από τις θερμικές ιδιότητες τμημάτων του υπο σχεδίαση του διακόπτη. Στη δυναμική του συμπεριφορά το σύστημα του θερμο-οπτικού διακόπτη αντιμετωπίζεται ως ένα γραμμικό και χρονικά αναλλοίωτο σύστημα 1^{ns} τάξης που διέπεται από την αντίστοιχη διαφορική εξίσωση 1^{ns} τάξης. Αναζητώντας μια αντιστοίχιση του θερμικού προβλήματος του διακόπτη MZI με σκοπό να αναδειχθεί η δυναμική του συμπεριφορά, χρησιμοποιούμε το ανάλογο της φόρτισης/εκφόρτισης ενός χωρητικού στοιχείο σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα RC (Εικόνα 4). Η χρονική σταθερά της θερμικής απόκρισης του διακόπτη κατά τη θέρμανση/ψύξη της διηλεκτρικής λωρίδας ισούται με $\tau = H/G$ όπου H είναι η θερμοχωρητικότητα του συστήματος του κυκλώματος θερμο-οπτικού διακόπτη και G είναι η αντίστοιχη θερμική αγωγιμότητα [5.28]. Οι αναλογίες του θερμικού προβλήματος με την απόκριση του RC κυκλώματος είναι προφανείς ανακαλώντας τη σταθερά χρόνου του συστήματος του ηλεκτρικού κυκλώματος $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$ και υπολογίζοντας τις αντίστοιχες τιμές για το θερμικό πρόβλημα. Πιο συγκεκριμένα η θερμική αντίσταση υπολογίζεται $R_{th} = L/(k \cdot A)$ και η αντίστοιχη παράμετρος της θερμοχωρητικότητας υπολογίζεται για κάθε υλικό $C_{th} = c_p \cdot \rho \cdot V$. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζεται η αναλογία μεταξύ της εκφόρτισης του πυκνωτή σε ένα RC κύκλωμα και της ψύξης της δομής του DLSPP κυματοδηγού μετά την παρουσία του παλμού ελέγχου που έχει αυξήσει κατάλληλα τη θερμοκρασία του διηλεκτρικού. Από τις παραπάνω σχέσεις εμφανίζεται μια πρώτη ανταγωνιστική παρουσία της απαίτησης για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωσης και χαμηλές τιμές χρόνων μεταγωγής με σκοπό να επιτευχθεί ένας γρήγορος θερμο-οπτικός διακόπτης. Η επιλογή ενός υλικού με ιδιαίτερα αυξημένη θερμική αγωγιμότητα (G) οδηγεί αυτόματα σε γρήγορες δυναμικές (μικρές σταθερές χρόνου τ) του θερμο-οπτικού διακόπτη με το κόστος της απαίτησης για υψηλές καταναλώσεις ισχύος καθώς το μεγαλύτερο μέρος αυτών θα κατευθύνονται στο υπόβαθρο της δομής όπως σημειώθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ο περιορισμός αυτής της ανταγωνιστικής σχέσης που δημιουργεί η θερμική αγωγιμότητα του υποβάθρου (buffer) στη σχέση χρόνου μεταγωγής-κατανάλωσης ισχύος εμφανίζεται και στους συμβατικούς θερμο-οπτικούς διακόπτες τεχνολογίας πυριτίου (Si) θέτοντας όρια στην επίδοσή τους [5.29]. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα παρουσιαστεί μια δομή πλασμονικού

διακόπτη MZI η οποία συμπεριλαμβάνει δομές DLSPP κυματοδηγών με υπόβαθρο (buffer) από SiO₂ με κατάλληλες διαστάσεις (πάχος) και τη θερμική αγωγιμότητα (k=1.4 W/mK) ώστε να συμβιβάζεται η απαίτηση μεταξύ των μικρών χρόνων μεταγωγής και της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης.



Εικόνα4: Ηλεκτρικό ανάλογο του προβλήματος της δυναμικής απόκρισης του θερμο-οπτικού διακόπτη στον DLSPP κυματοδηγό με την απόκριση του κυκλώματος RC σε σειρά. Η παρουσίαση του αναλόγου εστιάζει στην αναλογία της σταθεράς χρόνου εκφόρτισης του πυκνωτή με τη σταθερά ψύξης του ενεργού κυματοδηγού μετά την εφαρμογή του θερμικού φορτίου μέσω του μηχανισμού Joule.

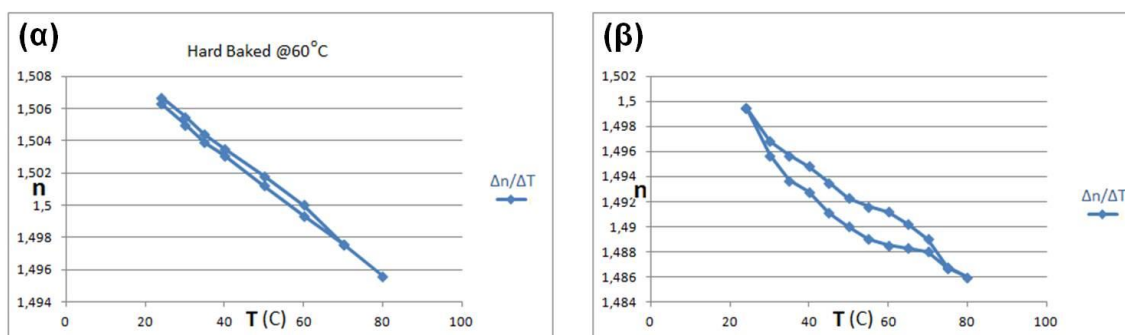
Η επιλογή του πολυμερούς της διηλεκτρικής λωρίδας (dielectric ridge) του πολυμερικού υλικού αποτελεί σημαντική σχεδιαστική παράμετρος του θερμο-οπτικού διακόπτη καθώς ο θερμο-οπτικός συντελεστής (Thermo Optic Coefficient – TOC) του πολυμερούς επικαθορίζει το πως μετατρέπεται η θερμοκρασιακή μεταβολή του υλικού σε μετατόπιση φάσης του κυματοδηγούμενου πλασμονικού ρυθμού. Είναι προφανές πως η χρήση ενός διηλεκτρικού υλικού με μεγάλο θερμο-οπτικό συντελεστή είναι επιθυμητή για τις περιπτώσεις των DLSPP κυματοδηγών καθώς θα μειώσει το απαιτούμενο μήκος του ενεργού βραχίονα του συμβολομέτρου ώστε να επιβληθεί ενεργά μια ολίσθηση φάσης κατάλληλη για τη μεταγωγή και ίση με $\Delta\phi = \pi$. Το κέρδος του μικρότερου μήκους του ενεργού βραχίονα του MZI είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς οι DLSPP βραχίονες του MZI χαρακτηρίζονται από υψηλές απώλειες διάδοσης ($\sim 0.10\text{dB}/\mu\text{m}$) και συνεπώς μικρότερα μήκη βραχίωνων στο MZI διασφαλίζουν μικρότερες απώλειες του διακόπτη. Το όφελος από μικρότερους ενεργούς βραχίονες του MZI προκύπτει επίσης από τη δυνατότητα για επίτευξη ακόμα μικρότερου μεγέθους του διακόπτη (footprint). Τέλος, η χρήση

διηλεκτρικών με υψηλές τιμές TOC μπορεί να οδηγήσουν σε μικρότερες απαιτήσεις σε θερμοκρασιακές μεταβολές του υλικού και επομένως σε δραστική μείωση των θερμικών φορτίων βελτιώνοντας ουσιαστικά την ενεργειακή επίδοση της δομής.

Προς αυτή την κατεύθυνση, αναζητήθηκαν διηλεκτρικά υλικά τα οποία προσφέρουν υψηλές τιμές TOC και είναι ανταγωνιστικά στην προσπάθεια για την αντικατάσταση του PMMA από πολυμερές φόρτισης το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί με σχετική ευκολία στην κατασκευή διακοπών που βασίζονται σε DLSPP [5.30]. Μεταξύ των βασικών υποψήφιων υλικών φόρτισης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη θέση του PMMA εμφανίζεται το πολυμερές Cyclomer [5.27], το οποίο έχει ήδη αξιοποιηθεί σε εφαρμογές παρακολούθησης ισχύος [5.31]. Το Cyclomer είναι ένα ακρυλικό συμπολυμερές (acryl acrylate copolymer) με κυκλοαλειφατικές ομάδες (cycloaliphatic groups), το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως για αντικολλητικές (solder resist) εφαρμογές λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και της ανθεκτικότητας στο φως που παρέχεται από τη χημική του σύσταση [5.32]. Βασικό πλεονέκτημα στην επεξεργασία του υλικού αποτελεί η δυνατότητα επεξεργασίας του μέσω της τεχνικής UV (Ultra Violet – UV) καθώς η μέθοδος αυτή απαιτεί λιγότερα βήματα συγκριτικά με τις τεχνικές ξηρής χάραξης (Dry Etching). Ο συνδυασμός των τεχνικών της UV επεξεργασίας παράλληλα με τη χρήση τεχνικών θερμικής σκλήρυνσης (thermal curing) οδηγεί σε υλικά υψηλής σταθερότητας στις περιβαλλοντικές συνθήκες [5.33]. Η ιδιότητα αυτή του υλικού καθιστά το πολυμερές αυτό ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές θερμο-οπτικού διακόπτη όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας των διηλεκτρικών λωρίδων. Στην παρούσα υλοποίηση, το Cyclomer χρησιμοποιήθηκε ως ένα αρνητικά λιθογραφικό ανθεκτικό υλικό (negative lithography resist) υπό την έκθεση υπεριώδους (Ultraviolet, UV) ακτινοβολίας στα 250 nm. Το πολυμερές Cyclomer χρησιμοποιήθηκε στις διηλεκτρικές λωρίδες των DLSPP δομών του κεφαλαίου από το Πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας (University of Bourgogne-UB) και η προμήθεια του ήταν δυνατή από την Ιαπωνική εταιρεία DAICEL-CYTEC COMPANY Ltd με εμπορική ονομασία του υλικού 'Cyclomer P Series ACA Z-251'. Σε επιπλέον πειραματικές επιδείξεις, αξιοποιήθηκε παράλληλα στην ανάπτυξη δομών διπλών δακτυλίων με πειραματικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο [5.34].

Ο προσδιορισμός του θερμο-οπτικού συντελεστή (TOC) του πολυμερούς υπολογίστηκε μέσω της μεθόδου της ελλειψομετρίας στο Πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας (University of Bourgogne-UB). Η μέθοδος της ελλειψομετρίας (Ellipsometry) αποτελεί μια αξιόπιστη τεχνική για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης και του πάχους διηλεκτρικών φύλλων [5.35]. Στην περίπτωση της μελέτης μας, το πολυμερές Cyclomer αξιολογήθηκε για διαφορετικές θερμοκρασίες με σκοπό να εξαχθεί η ζητούμενη παράμετρος του TOC. Για να βελτιωθεί δραστικά η σταθερότητα του διηλεκτρικού αξιοποιήθηκε μια τεχνική ψησίματος (Hard Baking-HB) οποία σκοπεύει στη σκλήρυνση της δομής ώστε να αποκτήσει ανθεκτικά μηχανικά χαρακτηριστικά για εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας. Παράλληλα, μέσω της τεχνικής αυτής, επιδιώχθηκε η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας (volatility) του δείκτη διάθλασης του υλικού κατά

τους κύκλους ψύξης και θέρμανσης του υλικού. Η Εικόνα 5 παρουσιάζει τις μετρήσεις του δείκτη διάθλασης του Cyclomer για το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από 20°C έως 80°C για τις δύο περιπτώσεις επεξεργασίας του πολυμερούς μέσω της τεχνικής του ψησίματος (HB). Είναι εμφανές πως στην περίπτωση του διηλεκτρικού που έχει υποστεί τη διαδικασία του HB (Εικόνα5(α)) η συμπεριφορά του δείκτη διάθλασης δεν εμφανίζει υστέρηση όπως στην περίπτωση του υλικού χωρίς προετοιμασία ψησίματος Εικόνα5(β). Στην περίπτωση του πολυμερούς χωρίς τη διαδικασία του HB υπάρχει εξάρτηση της τιμής του δείκτη διάθλασης από τον κύκλο θέρμανσης/ψύξης του υλικού. Η σταθερότητα του υλικού στην περίπτωση που υποστεί HB στους $T_{HB}=60^{\circ}\text{C}$ εμφανίζεται με το κόστος της μικρότερης κλίσης (dn/dT) του δείκτη διάθλασης με τιμές του TOC κοντά στην περιοχή του $-2.10 \cdot 10^{-4}$. Αντιθέτως, εμφανώς αυξημένες απόλυτες τιμές εμφανίζει το πολυμερές στη δεύτερη περίπτωση με τιμή TOC γύρω από την τιμή $-2.41 \cdot 10^{-4}$. Η παρουσία του βρόχου υστέρησης στον κύκλο θέρμανσης και ψύξης του πολυμερούς αποδεικνύει την επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά του υλικού εάν δεν προηγηθεί η διαδικασία του σκληρού ψησίματος (HB).



Sample	TOC up	TOC down
HB (α)	-0,0002110	-0,0002091
Not HB (β)	-0,0002411	-0,0002411

Εικόνα5: Καμπύλες του δείκτη διάθλασης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας στο εύρος μεταξύ 20°C και 80°C του πολυμερούς Cyclomer όπως προέκυψαν από τις μετρήσεις της μεθόδου ελλειψομετρίας στις εγκαταστάσεις του Πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Bourgogne – UB) κάτω από διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας του πολυμερούς για το θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 20°C και 80°C: (α) Ψήσιμο του πολυμερούς Cyclomer στους 60°C για χρονικό διάστημα $\Delta t=10\text{min}$. (β) Μελέτη θερμαντικού κύκλου στο πολυμερές Cyclomer.

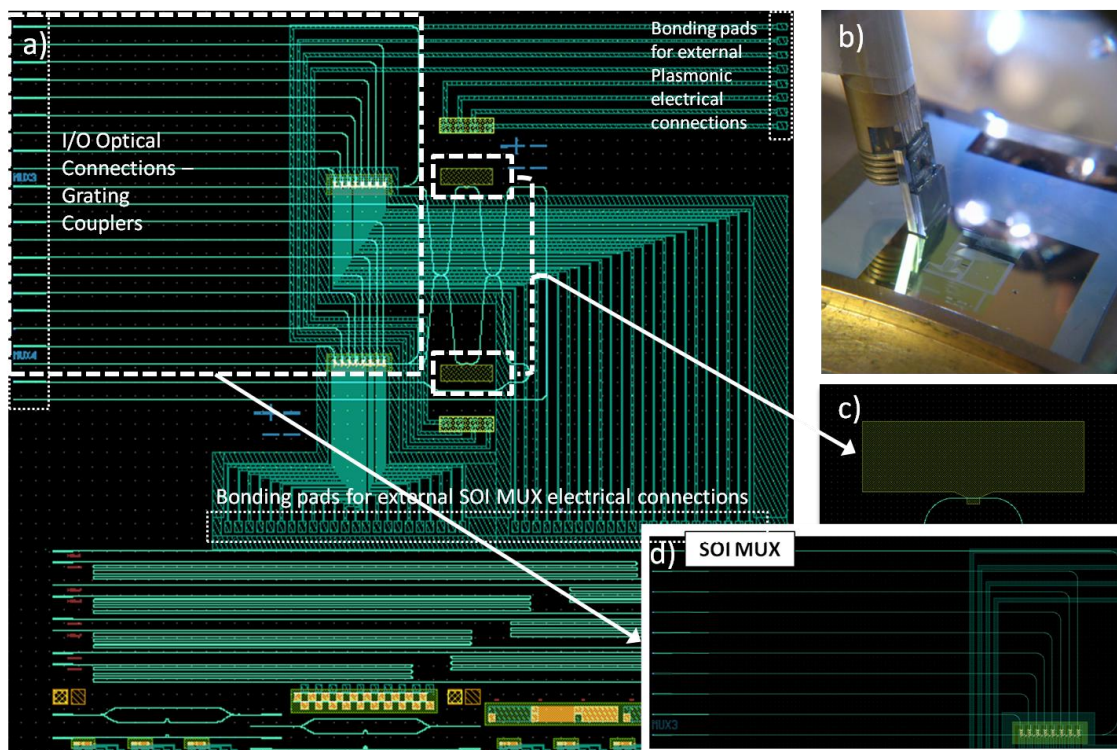
5.2 Πρώτη γενιά ετερο-ολοκλήρωσης DLSPP διακοπών MZI με υλικό Cyclomer σε παθητική SOI πλατφόρμα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η πρώτη γενιά που περιλαμβάνει δομές πλασμονικών διακοπών MZI εφοδιασμένες με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer και έχουν ετερο-ολοκληρωθεί σε Si πλατφόρμα. Στην ενότητα αυτή περιλαμβάνονται πληροφορίες για την κατασκευή των ετερο-ολοκληρωμένων δομών και την πειραματική τους αξιολόγηση. Σκοπός των μετρήσεων είναι να χαρακτηριστεί η επίδοση των Si παθητικών δομών και να

διερευνηθεί η επίδραση της ετερο-ολοκλήρωσης των πλασμονικών δομών στην επίδοση τους. Στη συνέχεια διερευνείται η επίδοση των θερμο-οπτικών δομών μεταγωγής MZI με διηλεκτρικές λωρίδες Cyclomer και εξετάζεται η επίδοση τους ως προς τις απώλειες, τη φασματική συμπεριφορά τους και τη στατική λειτουργία του θερμο-οπτικού μηχανισμού του διακόπτη.

5.2.1 Παθητική Si πλατφόρμα για τη φιλοξενία της ετερο-ολοκληρωμένης δομής

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει τη δομή της μάσκας (mask layout) για την παθητική πλατφόρμα Si κυματοδηγών Rib-τύπου που χρησιμοποιήθηκε για να φιλοξενήσει την ετερο-ολοκληρωμένη δομή του πλασμονικού διακόπτη MZI που βασίζεται σε κυματοδηγούς διηλεκτρικής λωρίδας με χρήση του πολυμερούς Cyclomer. Η δομή αυτή έχει σχεδιαστεί στα πλαίσια του ερευνητικού έργου PLATON και αποστολή της είναι η υλοποίηση ενός κυκλώματος δρομολόγησης 2x2 το οποίο θα εξυπηρετεί WDM συστήματα για μεταγωγή Tb/s πακέτων πληροφορίας. Η αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης δομής δρομολόγησης έχει συμπεριληφθεί στην εισαγωγική ενότητα της παρούσας διατριβής παρουσιάζοντας συνοπτικά τα βασικά δομικά στοιχεία του κυκλώματος. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής θα εστιάσουμε στην επίδοση του 2x2 πλασμονικού διακόπτη MZI ο οποίος φιλοξενείται στην Si παθητική πλατφόρμα. Η περιγραφή της εικόνας εστιάζει σε δομικές μονάδες για την παθητική πλατφόρμα πυριτίου: στη συστοιχία από δομές σύζευξης εισόδου/εξόδου κάνοντας χρήση κυματοδηγών φραγμάτων περίθλασης (α), την περιοχή που θα φιλοξενηθούν οι ενεργοί βραχίονες του διακόπτη MZI (γ), η δομή του ολοκληρωμένου πολυπλέκτη 8x1 (8x1 SOI MUX) η οποία χρησιμοποιείται για να προσφέρει την πολυπλεξία των WDM καναλιών πριν από την είσοδο στον DLSPP διακόπτη (δ). Η εικόνα 6(β) περιλαμβάνει μια όψη από την εγκατάσταση του σταθμού εργασίας (probe station) στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για την πραγματοποίηση των μετρήσεων χαρακτηρισμού της παθητικής δομής.

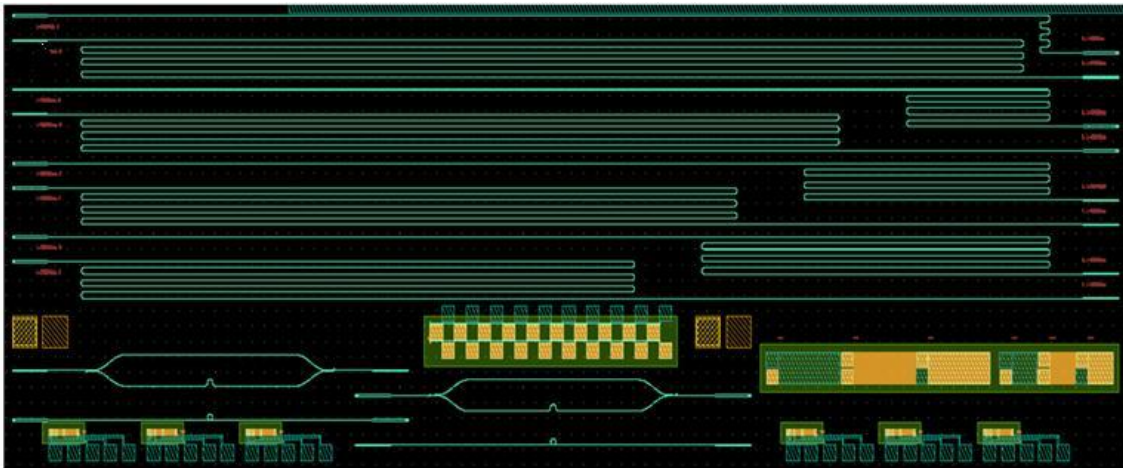


Εικόνα6:(α) Μάσκα που περιλαμβάνει τις παθητικές δομές κυματοδηγών Si με τις αντίστοιχες θέσεις που θα φιλοξενηθούν τα ενεργά κυκλώματα πλασμονικών διακοπών. (β) Όψη του σταθμού εργασίας που εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για τον χαρακτηρισμό της υβριδικής δομής κάνοντας χρήση μιας συστοιχίας ινών (fiber array). (γ) Θήκες που θα φιλοξενήσουν τους ετερο-ολοκληρωμένους DLSP βραχίονες του διακόπτη MZI. (δ) Παθητική διάταξη 8x1 SOI πολυπλέκτη (Multiplexer-MUX) που έχει σχεδιαστεί για τις ανάγκες της πλατφόρμας του υβριδικού πολυπλέκτη του μεταγωγέα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ICT-PLATON (FP7 ICT- STREP no. 249135).

Κατά την προετοιμασία της Si παθητικής δομής χρησιμοποιήθηκε ένα στρώμα από το υλικό Spin-on-Glass (SOG) για να καλύψει το κενό μεταξύ των φωτονικών/πλασμονικών κυματοδηγών και του μεταλλικού στρώματος [5.36,5.37]. Το πάχος του υλικού αυτού επιλέχθηκε να είναι $d=850\text{nm}$ κατά την προετοιμασία της συγκεκριμένης δομής με σκοπό να αποφευχθούν οι απώλειες που μπορεί να προκύψουν εάν τοποθετηθεί σε μικρό βάθος κάτω από το μέταλλο η δομή των κυματοδηγών. Η μάσκα (mask layout) της δομής περιλαμβάνει τη συστοιχία των δομών που σκοπό έχουν να χρησιμοποιηθούν για την οπτική διασύνδεση στις περιοχές με τις δομές του τσιπ (chip). Επίσης, περιλαμβάνει ένα σύνολο κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback section) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να εξαχθούν οι τιμές των απωλειών σύζευξης και διάδοσης για τους συγκεκριμένους SOI (Silicon On Insulator – SOI) κυματοδηγούς Rib-τύπου. Σκοπός της μέτρησης αυτής είναι η αξιολόγηση της ποιότητας κατασκευής της παθητικής πλατφόρμας Si ώστε να αξιολογηθεί σε δεύτερη φάση μετά την εναπόθεση (deposition) των πλασμονικών ενεργών τμημάτων της δομής.

Οι πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού του συνόλου των κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback section) καθώς και άλλων δομών ελέγχου ποιότητας

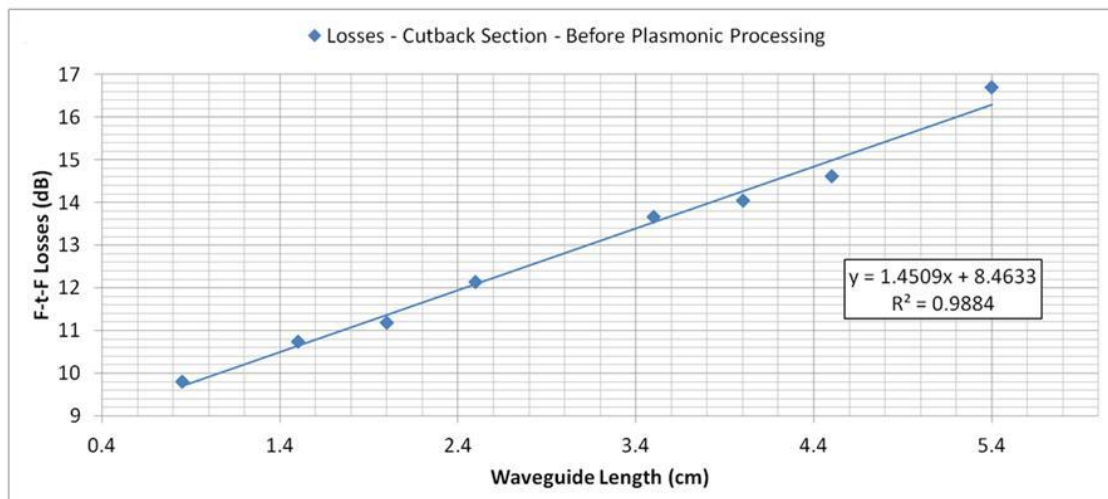
κατασκευής (test structures) πραγματοποιήθηκαν στην πρώτη φάση της αξιολόγησης των δομών. Η Εικόνα 7 εστιάζει στις παραπάνω δομές με το σύνολο των 8 κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback section) αλλά και τις δομές των Si συμβολομέτρων Mach-Zehnder συμβολομέτρων (Mach-Zehnder Interferometer-MZI) καθώς και δομών συντονιστών δακτυλίου (Si Waveguide Ring Resonators – WRRs) που περιλαμβάνονται στην ενότητα αυτή του τσιπ. Τα δείγματα του συνόλου αξιολόγησης (cutback section) έχουν μήκος το οποίο μεταβάλλεται από 8500μm μέχρι 54000μm για το μακρύτερο δείγμα κυματοδηγού και έχουν τους συζεύκτες εισόδου/εξόδου στις δύο πλευρές του τσιπ με αποτέλεσμα να ευνοείται η χρήση του συμβατικού σταθμού εργασίας με χρήση δύο ξεχωριστών ινών οι οποίες τοποθετήθηκαν σε γωνία $\theta_z=10^\circ$ ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Ως σήμα εισόδου χρησιμοποιήθηκε μια πηγή εκπομπής συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) το οποίο συνδέθηκε με ένα ελεγκτή πόλωσης (Polarization Controller – PC) ώστε να διασφαλιστεί η TM (Transverse Magnetic – TM) πολωτική κατάσταση του εισερχόμενου σήματος στην πλατφόρμα.



Εικόνα7: Σύνολο δειγμάτων παθητικών Si δομών που περιλαμβάνονται στη μάσκα της δομής για την αξιολόγηση της ποιότητας κατασκευής του Si μέρους του κυκλώματος. Στο σύνολο των δομών αξιολόγησης περιλαμβάνονται δείγματα κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback samples) για τον προσδιορισμό των απωλειών διάδοσης (propagation losses) και σύζευξης (coupling loss).

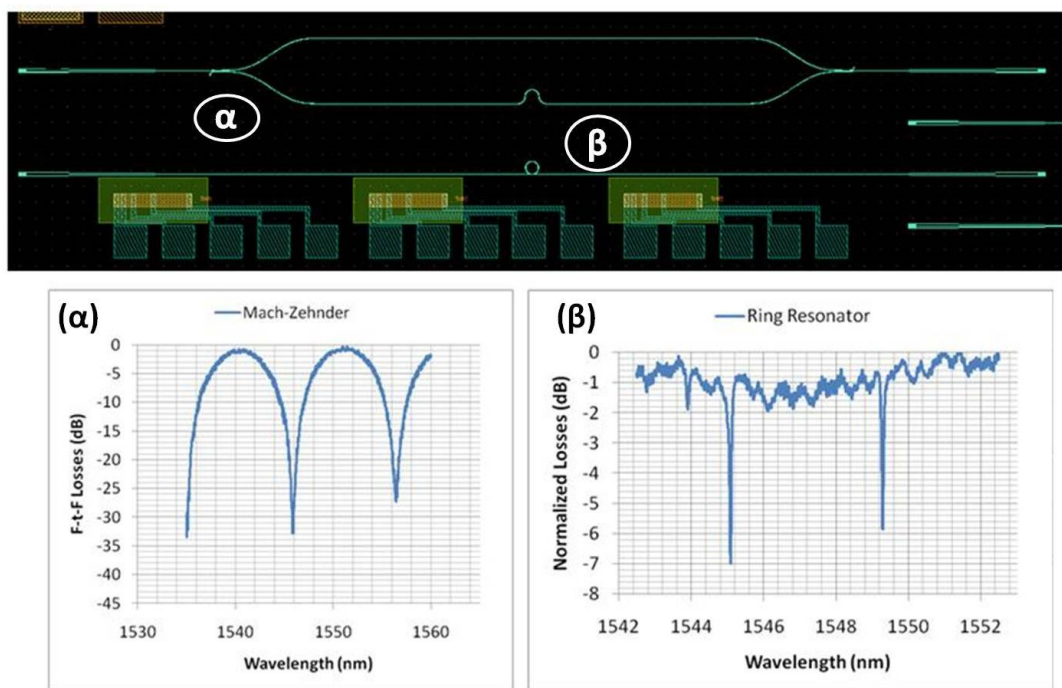
Η Εικόνα 8 περιέχει τις μετρήσεις απωλειών από ίνα-σε-ίνα (Fiber-to-Fiber loss) που διαπιστώθηκαν από τις μετρήσεις στα δείγματα κυματοδηγών διαφόρων μηκών. Η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) των αποτελεσμάτων φανέρωσε αρκετές χαμηλές τιμές τόσο για τις απώλειες διάδοσης (propagation loss) που εκτιμώνται γύρω στα 1.45dB/cm όσο και στις απώλειες σύζευξης που τοποθετούνται γύρω από τα 4.23dB αντίστοιχα για κάθε συζεύκτη. Η ιδιαίτερα υψηλή τιμή του συντελεστή προσδιορισμού (Coefficient of Determination – R^2) κοντά στο $R^2 \sim 100\%$ παρέχει τα πειστήρια υψηλής ποιότητας των κυματοδηγών που κατασκευάστηκαν. Αυτό πρακτικά μεταφράζεται σε υψηλό βαθμό ομοιογένειας για τα δείγματα των κυματοδηγών και επίσης οι τιμές

απωλειών που μετρήθηκαν προσφέρουν μιας Si παθητική πλατφόρμα που συναντά την απαίτηση για τις χαμηλές απώλειες [5.38].



Εικόνα8: Αποτελέσματα των απωλειών μεταξύ της ίνας εισόδου/εξόδου που καταγράφηκαν πειραματικά στις μετρήσεις αξιολόγησης του συνόλου κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback samples) για τα διαφορετικά μήκη των κυματοδηγών. Η γραμμική προσαρμογή των αποτελεσμάτων των απωλειών υποδεικνύει απώλειες διάδοσης (propagation losses) 1.45dB/cm και απώλειες σύζευξης (coupling loss) στα 4.23dB. Οι μετρήσεις των απωλειών έχουν ληφθεί πριν την πλασμονική εναπόθεση των DLSPP δομών.

Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν παθητικές δομές με σκοπό να διερευνηθεί η ικανότητα επίτευξης του επιθυμητού λόγου διαχωρισμού ισχύος σε συζεύκτες ισχύος Si δομών. Για το σκοπό αυτό διερευνήθηκε η φασματική συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου Mach-Zehnder (Mach Zehnder Interferometer – MZI) με σκοπό να αξιολογηθεί ο λόγος διαχωρισμού της δομής σύζευξης που σχεδιάστηκε να είναι 50/50 (Εικόνα 9(α)). Είναι γνωστό πως η συνάρτηση μεταφοράς του MZI εξαρτάται ισχυρά από το λόγο διαχωρισμού ($\alpha/1-\alpha$) [5.39]. Η συμπεριφορά της φασματικής απόκρισης και η διαπίστωση ενός υψηλού λόγου σβέσης (Extinction Ratio – ER) μεταξύ της μέγιστης και ελάχιστης τιμής της συνάρτησης μεταφοράς στην περιοχή των 1540nm (ER~33dB) υποδηλώνει πως οι κατασκευασμένοι συζεύκτες έχουν λόγο διαχωρισμού κοντά στην τιμή που σχεδιάστηκαν 50/50. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η ικανότητα σύζευξης οπτικής ισχύος από ευθύ κυματοδηγό (straight waveguide) σε κοιλότητα δακτυλίου (ring resonator) όπως αποτυπώνονται στην Εικόνα 9(β). Η μέτρηση αυτή αποσκοπεί επιπλέον στην πειραματική μελέτη της λειτουργίας της κοιλότητας καθώς δίνει τη δυνατότητα να αξιολογηθούν η διάδοση πεδίου σε δομές κυματοδηγών κάμψης με υποφερτές απώλειες. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την επιτυχή λειτουργία των κοιλοτήτων συντονισμού που αξιοποιήθηκαν σε επόμενα πειράματα για επιτυχή επίδειξη λειτουργίας πολυπλεξίας μηκών κύματος [5.40].

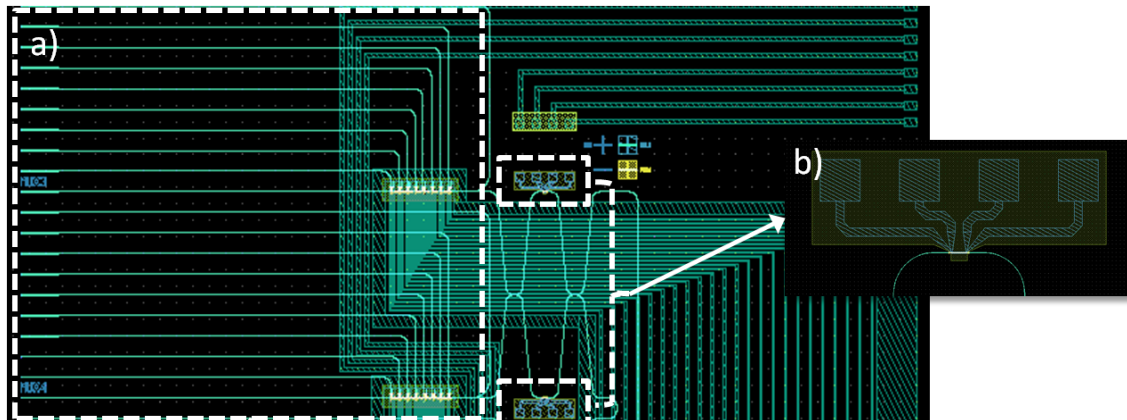


Εικόνα9: Παθητικές δομές αξιολόγησης Si πλατφόρμας που περιλαμβάνουν: (α) συμβολομετρικές δομές Mach-Zehnder (MZI) για την αξιολόγηση του λόγου διαχωρισμού ισχύος ($\alpha/1-\alpha$) των Si συζευκτών και (β) των παθητικών δομών δακτυλίων κυματοδηγού (Waveguide Ring Resonator –WRR) για την αξιολόγηση της δομής σύζευξης (gap) μεταξύ του ευθύ κυματοδηγού και της κοιλότητας του δακτυλίου. Τα πειραματικά αποτελέσματα που ακολουθούν περιλαμβάνουν τις φασματικές κατανομές των αντίστοιχων δομών.

5.2.2 Ετερο-ολοκλήρωση DLSPP δομών MZI με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer στην παθητική SOI πλατφόρμα

Μετά την επιτυχή αξιολόγηση της SOI παθητικής πλατφόρμας πριν την πλασμονική εναπόθεση των δομών πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) μετρήσεις αξιολόγησης για τις ετερο-ολοκληρωμένες δομές των πλασμονικών διακοπών MZI. Ο πειραματικός χαρακτηρισμός έλαβε χώρα σε δύο φάσεις: (i) αξιολόγηση της επίδοσης της Si παθητικής πλατφόρμας για να αξιολογηθούν τυχόν επιπτώσεις της επεξεργασίας DLSPP κυματοδηγών στην ποιότητα της δομής και (ii) αξιολόγηση της επίδοσης των συμβολομετρικών δομών MZI με ενεργούς πλασμονικούς βραχίονες με σκοπό να αξιολογηθεί η ετερο-ολοκλήρωση των DLSPP κυματοδηγών με διηλεκτρικές λωρίδες Cyclomer στην παθητική πλατφόρμα που είναι εφοδιασμένη με SOI κυματοδηγούς. Η Εικόνα 10(α) προέρχεται από τη μάσκα (mask layout) της δομής και δείχνει την Si παθητική δομή που χαρακτηρίστηκε στο προηγούμενο στάδιο και τους ενεργούς πλασμονικούς βραχίονες (Εικόνα10(β)) που βασίζονται σε DLSPP κυματοδηγούς με υλικό Cyclomer. Είναι εμφανής και η παρουσία των ζευγών δομών ηλεκτρικής επαφής

(electrical contact pads) από φύλλα χρυσού που θα χρησιμοποιηθούν για τον ενεργό έλεγχο της πλασμονικής δομής.



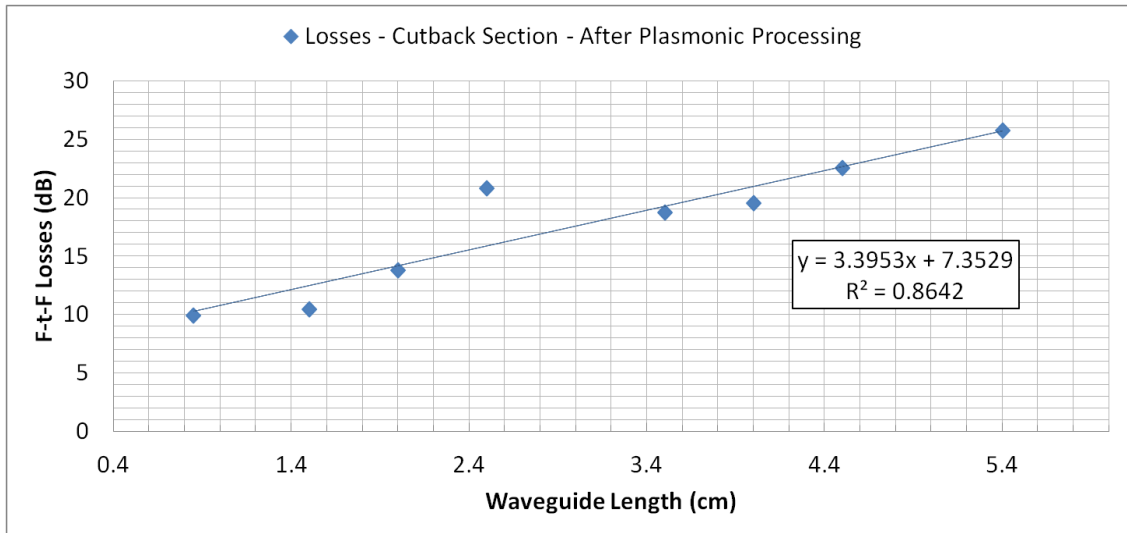
Εικόνα10:(α) Μάσκα που περιλαμβάνει τις ετερο-ολοκληρωμένες ενεργές DLSPP δομές στην Si παθητική πλατφόρμα (β) Εστίαση στους ενεργούς DLSPP βραχίονες του συμβολόμετρου MZI που φανερώνουν την εναπόθεση των πλασμονικών κυματοδηγών με Cyclomer μήκους $L=40\mu\text{m}$ στην Si πλατφόρμα με τις αντίστοιχες δομές ηλεκτρικών επαφών (electrical contact pads) για τον ενεργό έλεγχο των διαδιδόμενων πλασμονικών ρυθμών. Οι δομές αξιολογήθηκαν για τον προσδιορισμό της επιβάρυνσης που έχει υποστεί η πλατφόρμα Si μετά την εναπόθεση των πλασμονικών δομών.

Το πρώτο στάδιο της αξιολόγησης περιλαμβάνει μετρήσεις χαρακτηρισμού για τα δείγματα SOI κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback section) με σκοπό να εξαχθούν οι εκτιμώμενες απώλειες της παθητικής πλατφόρμας. Η Εικόνα 11 περιέχει τις μετρήσεις απωλειών για τους κυματοδηγούς που χαρακτηρίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Χρησιμοποιώντας την τεχνική της γραμμικής παλινδρόμησης αξιοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων εκτιμήθηκαν εκ νέου οι απώλειες διάδοσης (propagation losses) αλλά και οι απώλειες σύζευξης μεταξύ των DLSPP κυματοδηγών και των SOI Rib κυματοδηγών (Si-to-DLSPP coupling loss). Οι απώλειες διάδοσης υπολογίστηκαν να είναι 3.39dB/cm ενώ αντίστοιχα οι απώλειες σύζευξης από την ίνα στους συζεύκτες περίθλασης (TM Grating Couplers) υπολογίστηκαν να είναι περίπου ίσες με 3.68dB για κάθε δομή σύζευξης. Συγκρίνοντας τις τιμές που προέκυψαν με αυτές που διαπιστώθηκαν κατά τον χαρακτηρισμό της δομής χωρίς την πλασμονική εναπόθεση της προηγούμενης ενότητας (1.45dB/cm και 4.23dB για κάθε συζεύκτη), παρατηρούμε μια αξιοπερίεργη συμπεριφορά. Οι απώλειες διάδοσης έχουν αυξηθεί σημαντικά την ίδια στιγμή που οι απώλειες σύζευξης εμφανίζονται να είναι μικρότερες με αυτές που μετρήθηκαν στην πλατφόρμα πριν την πλασμονική ετερο-ολοκλήρωση των δομών με Cyclomer. Ενώ η επιβάρυνση των απωλειών διάδοσης της πλατφόρμας του Si μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενη λόγω της επιβάρυνσης από την ετερο-ολοκλήρωση του πλασμονικού μέρους, η βελτίωση της απόδοσης σύζευξης των δομών φραγμάτων περίθλασης δεν ερμηνεύεται με κάποιο μηχανισμό καθώς αναμένεται μόνο υποβάθμιση από την επεξεργασία των DLSPP κυματοδηγών. Η (φαινομενικά) αντιφατική αυτή συμπεριφορά ερμηνεύεται εάν σχολιαστεί

η σημαντική μείωση του συντελεστή προσδιορισμού (R^2) που υπολογίστηκε κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Είναι εμφανής η αύξηση του συντελεστή καθώς αυξάνεται η ποσότητα των τετραγωνικών σφαλμάτων (Sum of Squared Errors – SSE) καθώς οι τιμές των μετρήσεων αποκλίνουν αρκετά από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων [5.41]:

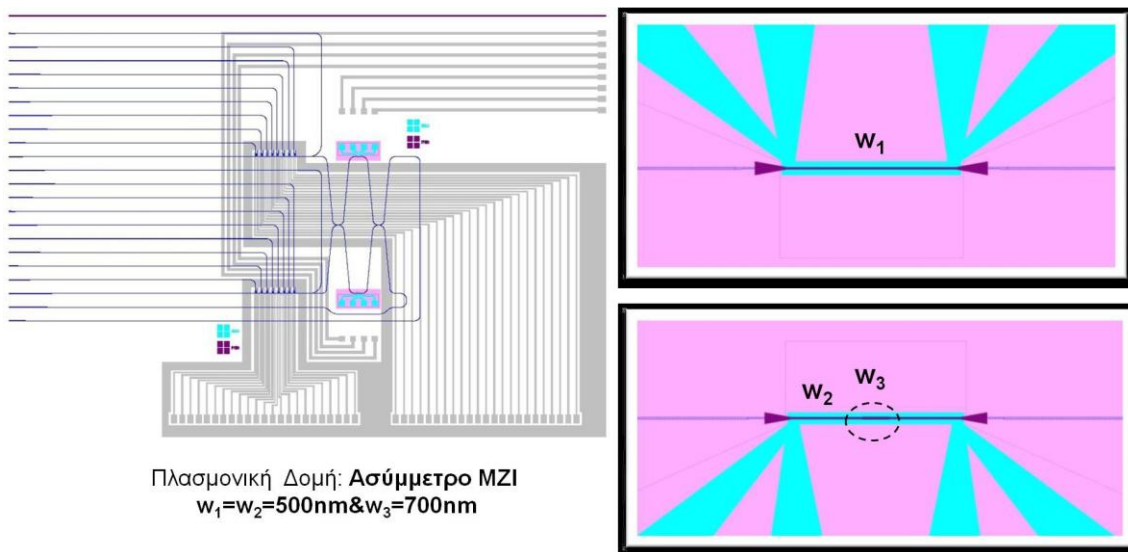
$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n=8} (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n=8} (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5.3)$$

Η φυσική ερμηνεία της συγκεκριμένης παραμέτρου υποδηλώνει πως είναι ανασφαλής η εκτίμηση των απωλειών διάδοσης και σύζευξης με την παραπάνω μέθοδο μετά από το στάδιο της πλασμονικής εναπόθεσης. Η ερμηνεία από τη σκοπιά κατασκευής είναι πιθανόν να βρίσκεται στις επιπτώσεις της επεξεργασίας που απαιτείται για την κατασκευή των DLSPP κυματοδηγών καθώς εμφανίζεται στοχαστικά στο δείγμα των κυματοδηγών. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται η ετερο-ολοκλήρωση των πλασμονικών δομών επηρέασε σε διαφορετικό βαθμό δομές κυματοδηγών που τοποθετούνται σε διαφορετικό σημείο πάνω στο τσιπ. Ωστόσο, η συνολική επιβάρυνση των απωλειών που οφείλεται στο τμήμα των Si παθητικών δομών μετά την πλασμονική εναπόθεση επιτρέπει από μόνο της την αξιολόγηση των πλασμονικών καθώς συνεισφέρει απώλειες σε διαχειρίσιμα επίπεδα στη συνολική δομή.



Εικόνα11: Αποτελέσματα των απωλειών μεταξύ της ίνας εισόδου/εξόδου που καταγράφηκαν πειραματικά στις μετρήσεις αξιολόγησης του συνόλου κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback samples) για τα διαφορετικά μήκη των κυματοδηγών μετά την πλασμονική εναπόθεση των ενεργών βραχιόνων. Η γραμμική προσαρμογή των αποτελεσμάτων των απωλειών υποδεικνύει απώλειες διάδοσης (propagation losses) 3.39dB/cm και απώλειες σύζευξης (coupling loss) στα 3.68dB. Οι μετρήσεις των απωλειών έχουν ληφθεί μετά την πλασμονική εναπόθεση των DLSPP δομών με σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση της πλασμονικής επεξεργασίας στην παθητική Si πλατφόρμα.

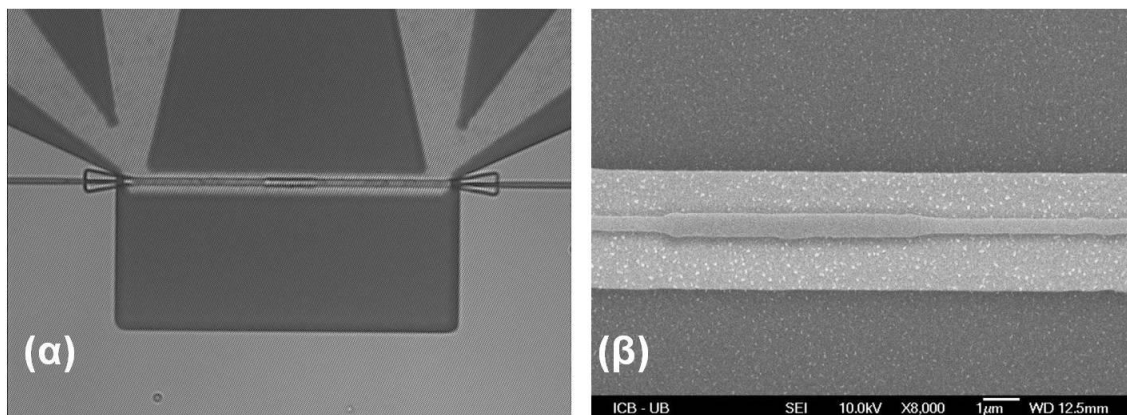
Στη συνέχεια, αξιολογήθηκε η επίδοση των πλασμονικών διακοπών που βασίζονται σε συμβολόμετρο MZI τεχνολογίας DLSPP. Η παθητική SOI πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκε για την ετερο-ολοκλήρωση μιας πλασμονικής δομής μεταγωγής που βασίζεται σε DLSPP ενεργούς βραχίονες. Η διάταξη του πλασμονικού διακόπτη υλοποιήθηκε κάνοντας χρήση δύο DLSPP κυματοδηγών στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου όπως φαίνεται στην Εικόνα 12 από τη μάσκα που έχει προετοιμάσει το πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας για να προχωρήσει στην κατασκευή του διακόπτη. Οι δύο ενεργοί βραχίονες είναι εφοδιασμένοι με δομές ηλεκτρικής επαφής (μεταλλικό φύλλο του DLSPP κυματοδηγού) ώστε να είναι δυνατός ο θερμο-οπτικός έλεγχος από ηλεκτρικά σήματα. Αξίζει να σημειωθεί πως για την είσοδο στο συμβολομετρικό διακόπτη χρησιμοποιείται ο κυματοδηγός της δομής του πολυπλέκτη.



Εικόνα12: Μάσκα (layout) που περιλαμβάνει τον ενεργό διακόπτη MZI που αποτελείται από Si παθητικές δομές και τους ενεργούς DLSPP βραχίονες με διηλεκτρική λωρίδα από Cyclomer μήκους $L=40\mu\text{m}$. Στις ένθετες σχηματικές αναπαραστάσεις παρουσιάζεται η γεωμετρία των ενεργών βραχιόνων με πλάτη w_1 και w_2 και w_3 αντίστοιχα. Ο βραχίονας με μεταβλητό πλάτος του κυματοδηγού περιλαμβάνει δύο διαφορετικά πλάτη (w_2 και w_3) με σκοπό να εισαχθεί διαφορά φάσης $\Delta\phi=\pi/2$ μεταξύ των δύο βραχιόνων του συμβολόμετρου σύμφωνα με το σχεδιασμό της δομής του διακόπτη [4.42].

Η κατασκευαστική διαφοροποίηση έγκειται στην παρουσία ενός τμήματος του κυματοδηγού στον κάτω βραχίονα με διαφορετικό πλάτος ($w_3=700\text{nm}$ αντί για $w_2=500\text{nm}$). Σκοπός της σχεδιαστικής αυτής διαφοροποίησης είναι η εμφάνιση μιας σταθερής διαφοράς φάσης ($\Delta\phi^{\text{bias}}=\pi/2$) που μειώνει την απαίτηση για τη διαφορική φάση μεταγωγής στο μισό ($\Delta\phi^{\text{new}}=\pi-\Delta\phi^{\text{bias}}=\pi-\pi/2=\pi/2$) καθιστώντας πιο εύκολη την επίτευξη του μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου. Η διαπίστωση αυτής της διαφοράς φάσης $\Delta\phi^{\text{bias}}$ έχει προκύψει από προσομοιώσεις που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της ερευνητικής συνεργασίας του ICT-PLATON καθιστώντας τον πλασμονικό διακόπτη Ασύμμετρου MZI (A-MZI) ιδιαίτερα ελκυστικό για τη λειτουργία μεταγωγής καθώς μειώνει στο μισό την απαίτηση για την ολίσθηση φάση μεταγωγής [5.42]. Η πειραματική επίδειξη των

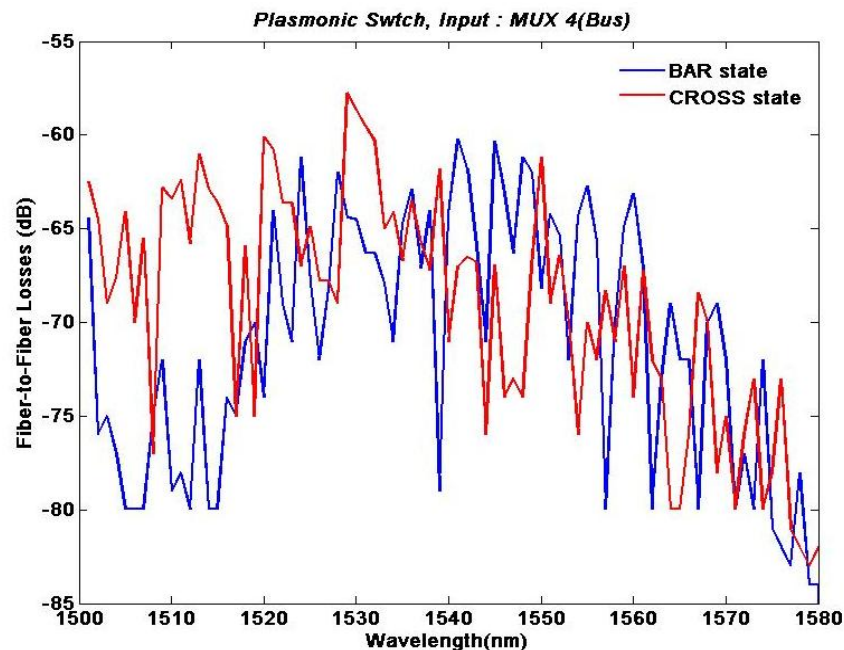
διακοπών που βασίζονται σε πλασμονικούς διακόπτες ασύμμετρων MZI (A-MZI) παρουσιάστηκε και με τη χρήση DLSPP MZI-διακοπών που είναι εφοδιασμένα με διηλεκτρική λωρίδα από PMMA [5.43]. Η Εικόνα 13 περιλαμβάνει εικόνες από το οπτικό μικροσκόπιο (α) καθώς και από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο SEM (β), εστιάζοντας στη σχεδιαστική αυτή παράμετρο της σταθερής διαφορικής φάσης μεταξύ των βραχιόνων του MZI. Αξίζει να σημειωθεί πως οι εικόνες από το μικροσκόπιο SEM ήταν δυνατές για μικρό χρονικό διάστημα βομβαρδισμού με ηλεκτρόνια καθώς το πολυμερές Cyclomer εμφανίζει – όπως και το PMMA – ευαισθησία στη χρήση αυτού του μικροσκοπίου [5.44].



Εικόνα13: Εικόνες του ενεργού DLSPP βραχίονα του συμβολόμετρου MZI που έχουν συμπεριληφθεί μέσω της χρήσης SEM μικροσκοπίου: (α) Ενεργός βραχίονας μήκους $L=40\mu\text{m}$ που περιλαμβάνει την παράμετρο σχεδιασμού για να εισάγεται μια διαφορά φάσης $\Delta\phi=\pi/2$ μεταξύ των δύο βραχιόνων. Στην εικόνα του SEM μικροσκοπίου είναι εμφανής η παρουσία των δομών σύζευξης (tapers) μεταξύ του Si-Rib κυματοδηγού και του DLSPP-βραχίονα. (β) Εστίαση μέσω του SEM μικροσκοπίου στη δομή του ενεργού βραχίονα μεταβλητού πλάτους για την εισαγωγή της διαφοράς φάσης $\Delta\phi=\pi/2$. Είναι εμφανής η παρουσία ενός τμήματος κυματοδηγού μήκους $L_2=7\mu\text{m}$ με πλάτος κυματοδηγού $w_3=700\mu\text{m}$ έναντι πλάτους $w_2=500\mu\text{m}$ στο υπόλοιπο τμήμα του DLSPP κυματοδηγού.

Έχοντας διερευνήσει τη λειτουργία της Si παθητικής πλατφόρμας, το επόμενο βήμα προϋποθέτει τη στατική αξιολόγηση του πλασμονικού διακόπτη A-MZI. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε μια πηγή CW λέιζερ που εκπέμπει σε μεταβλητό μήκος κύματος με την κατάλληλη πολωτική κατάσταση (TM) στην είσοδο του τσιπ. Χρησιμοποιώντας σαν θύρα εισόδου τη θύρα του κοινού κυματοδηγού (bus waveguide) του SOI πολυπλέκτη, αξιολογήθηκε η ισχύς εξόδου στις δύο θύρες του διακόπτη όσο για την κατάσταση BAR όσο και την κατάσταση CROSS του διακόπτη. Η Εικόνα 14 περιέχει το αποτέλεσμα των μετρήσεων ισχύος στην έξοδο του διακόπτη για τις δύο καταστάσεις (BAR και CROSS). Είναι εμφανές το υψηλό επίπεδο απωλειών για τις δύο διαδρομές μεταγωγής καθώς εμφανίζονται απώλειες μεγαλύτερες από 58dB, καθιστώντας μη πρακτική τη χρήση του διακόπτη για την πειραματική επίδειξη της λειτουργίας της μεταγωγής. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που αναμένουμε λαμβάνοντας υπόψη τη συνάρτηση μεταφοράς της δομής του SOI πολυπλέκτη, είναι εμφανές πως η φασματική κατανομή που αναπαριστάται εμποδίζει την αναπαράσταση μιας συνάρτησης μεταφοράς πολυπλέκτη που βασίζεται σε

διαδοχικές κοιλότητες συντονισμού [5.45]. Αντιθέτως, εμφανίζεται μια μεταβλητότητα του επιπέδου ισχύος με λόγο σβέσης (ER) κοντά στα 15dB που εμποδίζει τη διαπίστωση κάποιας γνώριμης φασματικής κατανομής και καθιστά τη διάταξη μη πρακτική για εφαρμογές διακόπτη. Αξίζει να σχολιαστεί η πιθανή παρουσία κάποιου ισχυρού σημείου ανάκλασης που βρίσκεται εντός της υπό εξέταση δομής και προκαλεί την παρουσία της περιοδικής συνάρτησης μεταφοράς που εμποδίζει τη διαπίστωση οποιασδήποτε γνώριμης απόκρισης. Πιθανά σημεία ανάκλασης μπορούν να αναζητηθούν στα σημεία διεπαφής μεταξύ των Si κυματοδηγών και του DLSPP κυματοδηγού. Λαμβάνοντας υπόψη την υποβάθμιση που εμφανίζει η Si παθητική πλατφόρμα μετά την εναπόθεση των πλασμονικών δομών, η εκδοχή του ισχυρού σημείου ανάκλασης στο Si-to-DLSPP σημείο διεπαφής ίσως να βρίσκεται και πίσω από το επιπλέον κομμάτι των απωλειών που εμφανίζει η δομή. Μια πιθανή γεωμετρική παρέκκλιση (misalignment) στο σημείο διεπαφής μπορεί να οδηγήσει σε δραματική αύξηση των απωλειών με αποτέλεσμα τις πολύ υψηλές απώλειες που μετρήθηκαν στον ετερο-ολοκληρωμένο διακόπτη.



Εικόνα14: Φασματική κατανομή της εξόδου του DLSPP συμβολομετρικού διακόπτη MZI για τις δύο δυνατές καταστάσεις μεταγωγής (BAR&CROSS). Στις μετρημένες φασματικές αποκρίσεις είναι εμφανής η παρουσία ισχυρών μεταβολών στα επίπεδα ισχύος που οφείλονται σε σημεία ανάκλασης εντός του σιπ.

5.3 Δεύτερη γενιά ετερο-ολοκληρωμένων DLSPP διακόπτες MZI για θερμο-οπτικό έλεγχο σε παθητική SOI πλατφόρμα

Η δεύτερη φάση της αξιολόγησης των πλασμονικών διακοπών A-MZI εφοδιασμένοι με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer περιλαμβάνει την ετερο-ολοκλήρωση τους σε απλές

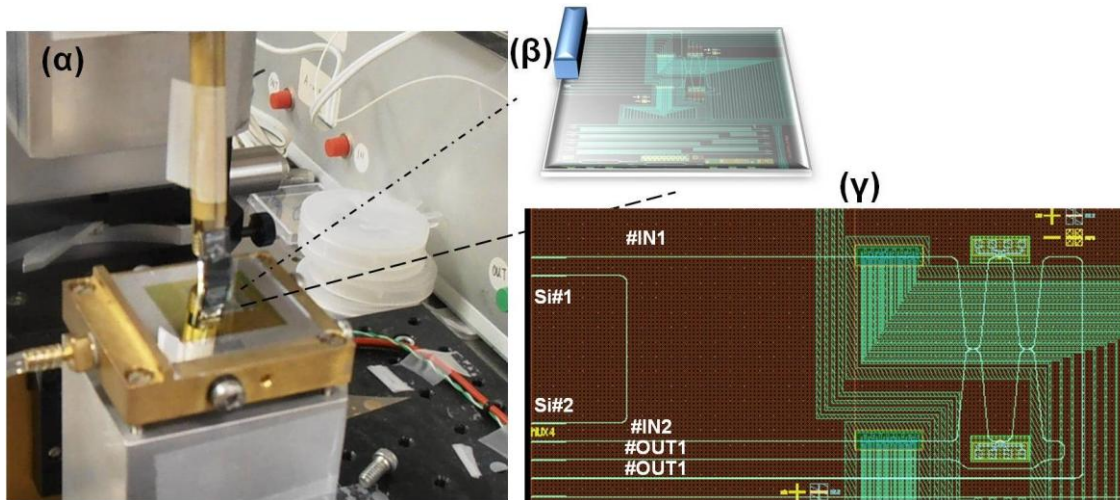
παθητικές SOI δομές. Το SOI τμήμα του τσιπ περιλαμβάνει δομές σύζευξης (I/O συζεύκτες) με ολοκληρωμένες δομές περίθλασης και τους 3-dB συζεύκτες που σχηματίζουν τη δομή του συμβολόμετρου MZI με τους ενεργούς DLSPP βραχίονες. Η στρατηγική που ακολουθήθηκε για την ανάπτυξη αυτής της γενιάς των δομών περιλαμβάνει την ετερο-ολοκλήρωση απλών DLSPP δομών σε παθητική πλατφόρμα SOI χωρίς να περιλαμβάνεται η σύνθετη δομή του πολυπλέκτη (Multiplexer-MUX) η οποία αυξάνει την πολυπλοκότητα και το ρίσκο της εμφάνισης κατασκευαστικών ατυχημάτων στη δομή. Αξιοποιώντας την επιτυχή λειτουργία της συστοιχίας των συζευκτών εισόδου/εξόδου (I/O Grating Couplers) και την ικανοποιητική επίδοση των Si 50/50 κατευθυντικών συζευκτών (50/50 Directional Couplers) είναι εφικτή η επιτυχής ετερο-ολοκλήρωση των υβριδικών δομών με μοναδική σχεδιαστική/κατασκευαστική πρόκληση την επίτευξη υψηλής ποιότητας Si-to-DLSPP σημείου διασύνδεσης.

Στο πρώτο μέρος της ενότητας παρουσιάζεται η δομή και οι σχεδιαστικές παράμετροι που ακολουθήθηκαν για την υλοποίηση τους ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού των δομών που αξιολογήθηκαν στις εγκαταστάσεις του ΕΦΕ. Οι μετρήσεις χαρακτηρισμού περιλαμβάνουν μετρήσεις οπτικών απωλειών, φασματικών συναρτήσεων μεταφοράς ενώ τέλος περιλαμβάνονται μετρήσεις που στοχεύουν στις επιδόσεις του θερμο-οπτικού ελέγχου των διηλεκτρικών δομών με Cyclomer και τη σταθερότητα των δομών σε μετρήσεις επαναληπτικού χαρακτήρα και μεγάλου χρονικού διαστήματος.

5.3.1 Παρουσίαση ετερο-ολοκληρωμένων διακοπών και βασικές σχεδιαστικές παράμετροι της μάσκας

Η Εικόνα 15(α) παρουσιάζει τη διάταξη του σταθμού εργασίας που εγκαταστάθηκε για τη διενέργεια των μετρήσεων χαρακτηρισμού στη δομή του ετερο-ολοκληρωμένου πλασμονικού διακόπτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια δομή συστοιχίας ινών οι οποίες έχουν αποκοπεί σε κατακόρυφη γωνία (θ_z) ίση με 10° ώστε να συναντήσουν τις παραμέτρους λειτουργίας των Si TM συζευκτών περίθλασης. Οι συστοιχίες ινών για τη σύζευξη από/προς το τσιπ (V-groove assembly) περιλαμβάνουν 16 κανάλια ινών οι οποίες χωρίζονται από μία οριζόντια απόσταση (channel spacing) $s=250\mu\text{m}$ η οποία ταιριάζει απόλυτα με την απόσταση διαδοχικών δομών σύζευξης (GCs) πάνω στο τσιπ [5.46]. Για την επιτυχή σύζευξη του φωτός από/προς το Si τσιπ, περιλαμβάνονται επιπλέον στην ετερο-ολοκληρωμένη δομή διακόπτη ζεύγη βραχυκυκλωμένων Si κυματοδηγών οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως κυματοδηγοί ευθυγράμμισης (Εικόνα 15(β)). Επιπλέον, ο πειραματικός τους χαρακτηρισμός κάνοντας χρήση των δύο θυρών (Si#1 και Si#2) επιτρέπει την αξιολόγηση της ποιότητας του Si μέρους της ως προς τις απώλειες των Rib κυματοδηγών αλλά και της επίδοσης των Si συζευκτών περίθλασης. Η δομή του DLSPP διακόπτη περιλαμβάνει δύο θύρες εισόδου (#IN1 και #IN2) και εξόδου αντίστοιχα (#OUT1 και #OUT2) που συνδέονται μέσω παθητικών Si κυματοδηγών με τα οπτικά σήματα που χρησιμοποιούνται στη δομή της συστοιχίας ινών. Η Εικόνα 15(γ) περιέχει τη μάσκα της

δομής του διακόπτη (mask layout) που ετερο-ολοκληρώθηκε πριν από τον πειραματικό χαρακτηρισμό του στις εγκαταστάσεις του ΕΦΕ. Είναι εμφανής η παρουσία των δύο ενεργών DLSP βραχιόνων που περιλαμβάνονται στο συμβολόμετρο MZI και είναι εφοδιασμένοι με τις ηλεκτρικά σημεία επαφής (electrical contact pads) με σκοπό τον θερμο-οπτικό έλεγχο της φάσης των οπτικών σημάτων πριν τον συζεύκτη εξόδου της δομής του διακόπτη.



Εικόνα15: (α) Όψη του σταθμού εργασίας που εγκαταστάθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών (ΕΦΕ) για τη διεξαγωγή των μετρήσεων οπτικού χαρακτηρισμού των πλασμονικών διακοπών MZI. (β) Σχηματική αναπαράσταση της παρουσίας της συστοιχίας ινών (fiber array) αποτελούμενο από 16 ίνες με γεωμετρικά χαρακτηριστικά [4.46], που συναντούν τις σχεδιαστικές παραμέτρους της δομής του MZI διακόπτη. (γ) Η μάσκα (layout) της δομής των πλασμονικών διακοπών MZI με τις δύο εισόδους Si για την επίτευξη της ευθυγράμμισης (alignment) στα πλαίσια της μετρητικής διαδικασίας.

5.3.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός της επίδοσης του Si τμήματος του τσιπ

Το πρώτο στάδιο χαρακτηρισμού της απόδοσης των υπό εξέταση δομών περιλαμβάνει τις πειραματικές μετρήσεις για τις απώλειες των συζευκτών Si καθώς και τη φασματική κατανομή που εμφανίζουν οι δομές αυτές. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων χαρακτηρισμού υπήρξαν διαθέσιμα τρία διαφορετικά ετερο-ολοκληρωμένα τσιπ A-MZI διακοπών που περιέχουν τους DLSP βραχιόνες (WC212, WC213, WC312). Οι τιμές των οπτικών απωλειών από ίνα-σε-ίνα (fiber-to-fiber loss) που περιλαμβάνονται σε κάθε περίπτωση είναι ικανοποιητικές καθώς εκτείνονται από 14.9dB έως 15.5dB. Οι τιμές των απωλειών που μετρήθηκαν περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1 μαζί με το αντίστοιχο μήκος κύματος (λ) για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς λήψης. Οι μετρήσεις αποδεικνύουν την ομοιογένεια των υπό μέτρηση δομών καθώς οι απώλειες μέτρησης κυμαίνονται σε ένα εύρος μόλις 0.6dB. Το σημείο αυτό υποδεικνύει πως κατά την κατασκευή των συγκεκριμένων δομών η ποιότητα του Si τμήματος ήταν ιδιαίτερα υψηλή ενώ και η εναπόθεση των DLSP δομών φαίνεται πως δεν επηρέασε την ποιότητα των δομών καθώς οι συνολικές απώλειες κινούνται σε ανεκτά επίπεδα για το ζεύγος των συζευκτών. Τα

αποτελέσματα αυτά είναι ιδιαίτερα αισιόδοξα για τη συνολική επίδοση του πλασμονικού διακόπτη καθώς διασφαλίζουν υψηλής ποιότητας Si παθητικές χαμηλών απωλειών.

Τσιπ	Απώλειες [dB]	Μήκος κύματος [nm]
WC212	15.5	1543.211
WC213	15.1	1542.776
WC312	14.9	1552.115

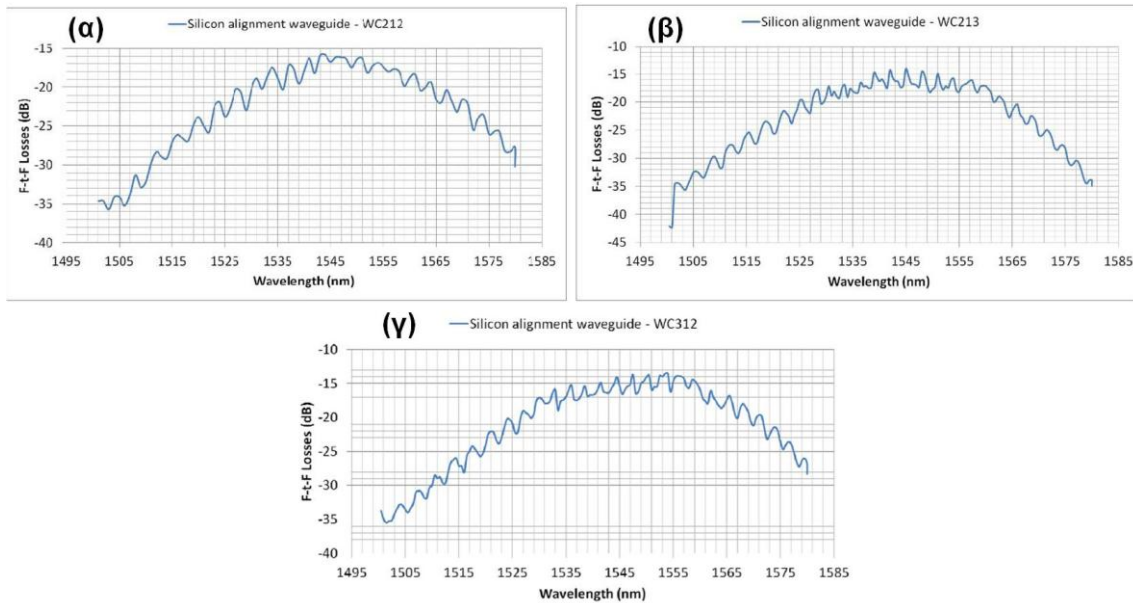
Πίνακας1: Επιδόσεις οπτικών απωλειών στις βραχυκυκλωμένες Si παθητικές δομές που περιλαμβάνονται στη μάσκα των πλασμονικών διακοπών MZI των τριών διαφορετικών τσιπ που αξιολογήθηκαν. Περιλαμβάνεται επίσης η πληροφορία για το μήκος κύματος που έχει επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών της δομής.

Ο Πίνακας 1 περιέχει τις μετρήσεις φασματικής κατανομής για τις Si παθητικές δομές των παραπάνω δομών. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κάνοντας χρήση μιας πηγής λέιζερ συνεχούς κύματος (CW) μεταβλητού μήκους κύματος που εκπέμπει στο εύρος από 1500nm έως 1580nm. Το επίπεδο ισχύος για το οπτικό σήμα ελέγχου καθορίστηκε στα 0dBm. Οι μετρήσεις της φασματικής κατανομής επιβεβαιώνουν την υψηλή ποιότητα των υπό εξέταση Si δομών καθώς η συνάρτηση μεταφοράς τους ταιριάζει αρκετά με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα αρχικά στάδια αξιολόγησης των δομών των SOI συζευκτών περίθλασης (Grating Couplers – GCs) όταν και επιλέχθηκαν και οι σχεδιαστικές παράμετροι για τη δομή των GCs όπως περιγράφηκε εκτενώς σε προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής. Είναι εμφανής η ομοιογένεια που παρουσιάζουν οι φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς για τις τρεις δομές καθώς το μήκος κύματος που μεγιστοποιείται η συνάρτηση μεταφοράς τους βρίσκεται σε πανομοιότυπα μήκη κύματος για τις δύο δομές (WC212&213) ενώ μετατοπίζεται ελαφρά για την τρίτη δομή (WC312) μαζί με τη φασματική συνάρτηση μεταφοράς. Η φασματική μετατόπιση (spectral shift) της συνάρτησης μεταφοράς του συζεύκτη $G_{GC}(\lambda)$ για αποστάσεις κάποιων nm ερμηνεύεται συνήθως από ατέλειες κατά την κατασκευή της δομής [5.47]. Είναι αξιοσημείωτη επίσης η παρουσία μιας (φασματικά) περιοδικής συνάρτησης η οποία εμφανίζεται στο οπτικό φάσμα κατανομή με ένα λόγο σβέσης (Extinction Ratio – ER) κοντά στα 3dB για όλες τις δομές. Η παρουσία της περιοδικής συνάρτησης μεταφοράς στο οπτικό φάσμα μπορεί να προσεγγιστεί με τον ακόλουθο τρόπο στη φασματική κατανομή $P(\lambda)$ που μετρήθηκε για τη δομή [5.48]:

$$P(\lambda) = G_{GC}(\lambda) \cdot H_{FP}(\lambda)$$

$$H_{FP}(\lambda) = \frac{(1 - R_m) \cdot e^{j\pi}}{1 - R_m \cdot \exp(j \frac{2\pi c_0}{\lambda} \cdot \tau_r)} \quad (5.4)$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές πως υπάρχει η παρουσία μιας κοιλότητας συντονισμού στο εσωτερικό της δομής με φασματική κατανομή $H_{FP}(\lambda)$ η οποία εμφανίζεται στην κατανομή του Si τμήματος. Η περιοδικότητα σχετίζεται με την κοιλότητα που δημιουργείται στο σημείο ανάκλασης (R_m) και από τη μέτρηση της φασματικής της περιόδου κοντά στα 3.5nm μπορούμε να την αποδώσουμε στην περιοχή του GC. Ωστόσο, οι μικρές τιμές του πλάτους ταλάντωσης που εμφανίζει στη φασματική κατανομή επιβεβαιώνει πως οι τιμές της ανακλαστικότητα που προκαλούν την παρουσία της κοιλότητας είναι σχετικά μικρές και μπορούν να διορθωθούν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με μικρές μεταβολές του μήκους κύματος της οπτικής πηγής προς τα μέγιστα της φασματικής κατανομής για να επιτευχθούν οι μικρότερες δυνατές απώλειες.



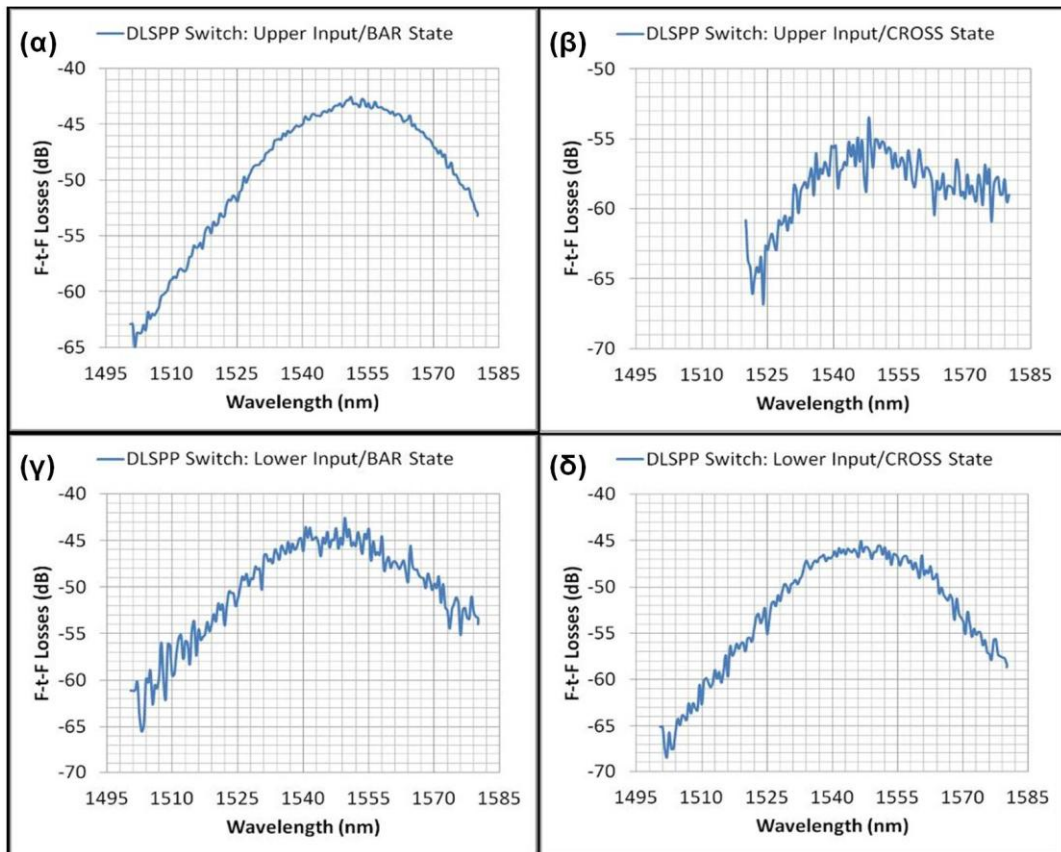
Εικόνα 16: Φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς των Si κυματοδηγών που περιλαμβάνονται στις δομές των πλασμονικών διακοπών MZI για τα τρία διαφορετικά τσιπ που αξιολογήθηκαν στο σταθμό εργασίας. Επιδόσεις οπτικών απωλειών στις βραχυκυκλωμένες Si παθητικές δομές που περιλαμβάνονται στη μάσκα των πλασμονικών διακοπών MZI των τριών διαφορετικών τσιπ που αξιολογήθηκαν: WC212 (α), WC213 (β) και WC312 (γ) αντίστοιχα.

5.3.3 Πειραματικός χαρακτηρισμός της επίδοσης των πλασμονικών A-MZI διακοπών του τσιπ

Το επόμενο στάδιο της αξιολόγησης περιλαμβάνει τον πειραματικό χαρακτηρισμό των ετερο-ολοκληρωμένων δομών A-MZI διακοπών για να προσδιοριστούν οι απώλειες του

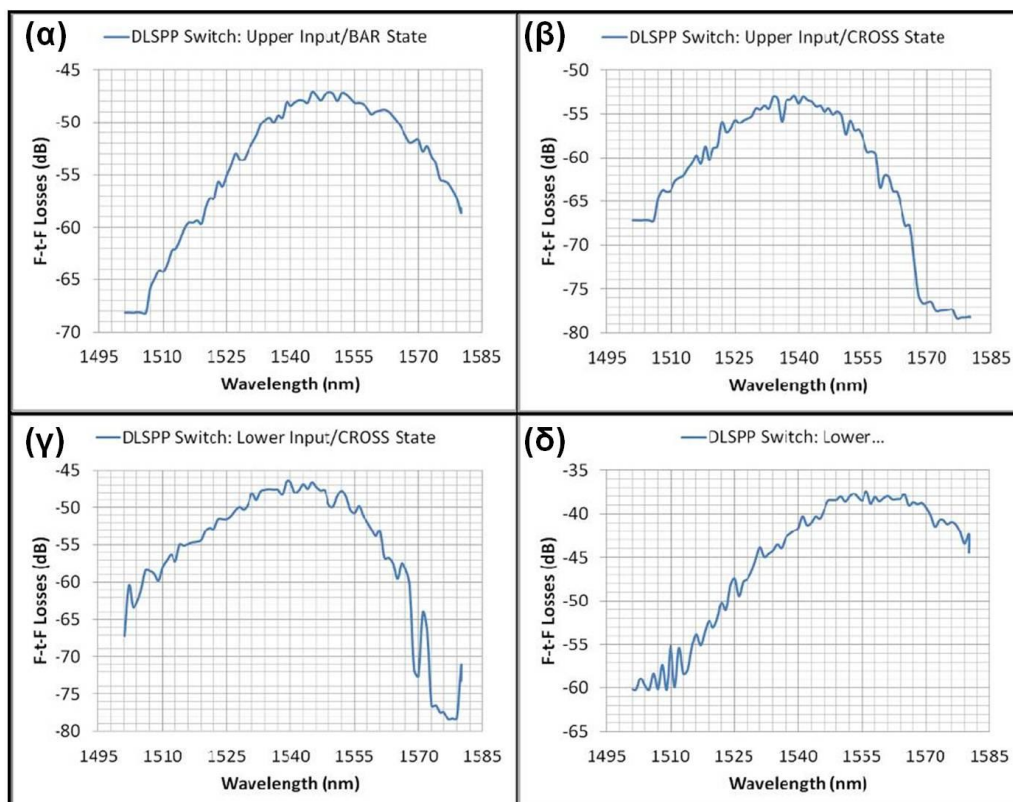
πλασμονικού τμήματος των δομών αλλά και να διερευνηθεί η ποιότητα του σημείου διασύνδεσης (Si-to-DLSPP interfacing point) που στην προηγούμενη γενιά των δομών δημιούργησε ανακλάσεις στο εσωτερικό της δομής καθιστώντας ουσιαστικά μη λειτουργικούς τους DLSPP διακόπτες. Κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στατικού οπτικού χαρακτηρισμού χρησιμοποιήσαμε την πηγή λέιζερ CW ώστε να καταγράψουμε τη φασματική κατανομή για όλες τις υπό εξέταση δομές που ήταν διαθέσιμες. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δομές που εξετάστηκαν.

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των οπτικών φασμάτων που διαπιστώθηκαν πειραματικά μέσω μετρήσεων για τη δομή WC-312. Διερευνήθηκε η φασματική κατανομή για κάθε έξοδο του διακόπτη χρησιμοποιώντας και τις δύο θύρες εισόδου του. Οι δομές σχεδιάστηκαν ώστε να εμφανίζουν συνάρτηση μεταφοράς η οποία είναι αρχικοποιημένη (biased) στο σημείο το οποίο βρίσκεται στην περιοχή του $\Delta\phi=\pi/2$ (quadrature point). Ωστόσο, καθώς υπάρχουν εμπόδια στον ακριβή προσδιορισμό του συγκεκριμένου σημείου της συνάρτησης μεταφοράς του διακόπτη λόγω κατασκευαστικών περιορισμών στην ακρίβεια της γεωμετρίας που απαιτείται, αποδείχθηκε και πειραματικά πως η συνάρτηση κατανομής βρέθηκε σε άλλο σημείο από αυτό που είχε σχεδιαστεί. Χρησιμοποιώντας την CW (Continuous Wave - CW) πηγή λέιζερ ήταν δυνατή η μέτρηση της φασματικής κατανομής στο παράθυρο από 1500 έως 1580nm.

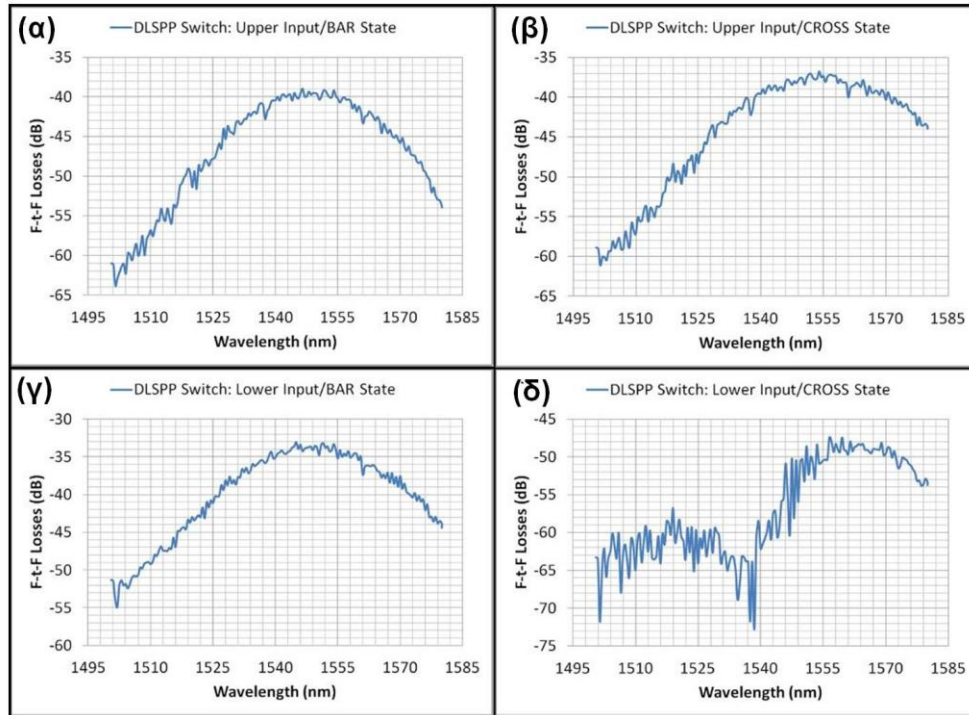


Εικόνα 17: Φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς της δομής του πλασμονικού διακόπτη MZI WC-312 για τις δυνατές καταστάσεις του διακόπτη (BAR&CROSS) εφόσον συμπεριληφθούν και οι δύο θύρες εισόδου (Input&Output). Οι δυνατοί συνδυασμοί περιλαμβάνονται στις φασματικές καμπύλες των σχημάτων (α) έως και (δ).

Οι Εικόνες 18 και 19 παρουσιάζουν τις αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις δομές WC-212 και WC-213 αντίστοιχα. Η υψηλή ποιότητα των φασματικών κατανομών που μετρήθηκαν υποδεικνύουν την απουσία ισχυρού σημείου ανάκλασης σε κάποιο σημείο εντός της δομής. Η παρουσία της μεταβλητότητας της ισχύος στην έξοδο εμφανίζει ένα λόγο σβέσης (ER) της τάξης των 3dB που είναι συγκρίσιμο με αυτό που μετρήθηκε σε προηγούμενη ενότητα για το τμήμα του Si κυκλώματος. Επίσης, ακολουθείται η φασματική κατανομή των συζευκτών περίθλασης (GCs) που αξιολογήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα και εμφανίζουν μέγιστη τιμή ισχύος στο φασματικό παράθυρο γύρω από τα 1545nm. Εμφανίζονται ωστόσο και στις τρεις δομές DLSPP διακοπών μια ασυμμετρία στο μετρημένο επίπεδο ισχύος για κάθε διακόπτη που εξαρτάται από τη χρησιμοποιούμενη θύρα εισόδου σε κάθε περίπτωση για τη δομή μεταγωγής. Η διαφορετική επίδοση ισχύος στην έξοδο για χρήση διαφορετικής θύρας εισόδου (Input port) ερμηνεύεται με μια σειρά από πιθανούς παράγοντες: διαφορετική απόδοση απωλειών για τα Si-to-DLSPP σημεία διασύνδεσης στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου MZI, διαφορετικός λόγος διαχωρισμού ισχύος (coupling ratio) συγκριτικά με το ιδανικό 50:50 που εμφανίζουν οι Si συζεύκτες στην είσοδο και στην έξοδο, τις διαφορετικές απώλειες που εμφανίζουν οι δύο πλασμονικοί κυματοδηγοί στους βραχίονες του MZI, διαφορετική επίδοση της σύζευξης ισχύος από την ίνα στο τσιπ (fiber-to-chip coupling loss) για κάθε περίπτωση μελέτης.



Εικόνα 18: Φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς της δομής του πλασμονικού διακόπτη MZI WC-212 για τις δυνατές καταστάσεις του διακόπτη (BAR&CROSS) εφόσον συμπεριληφθούν και οι δύο θύρες εισόδου (Input&Output). Οι δυνατοί συνδυασμοί περιλαμβάνονται στις φασματικές καμπύλες των σχημάτων (α) έως και (δ).



Εικόνα 19: Φασματικές συναρτήσεις μεταφοράς της δομής του πλασμονικού διακόπτη MZI WC-213 για τις δυνατές καταστάσεις του διακόπτη (BAR&CROSS) εφόσον συμπεριληφθούν και οι δύο θύρες εισόδου (Input&Output). Οι δυνατοί συνδυασμοί περιλαμβάνονται στις φασματικές καμπύλες των σχημάτων (α) έως και (δ).

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων που μετρήθηκαν κατά τον στατικό οπτικό χαρακτηρισμό των πλασμονικών διακοπών της δεύτερης γενιάς (PLA-22). Είναι εμφανής η βελτίωση της επίδοσης των απωλειών των υπο-εξέταση δομών καθώς επιτυγχάνονται εξαιρετικά χαμηλές συνολικές απώλειες για τις ετερο-ολοκληρωμένες δομές με απώλειες. Η ελάχιστη τιμή απωλειών από ένα-σε-ένα μετρήθηκε για τη δομή WC213 με τιμή στα 34.6dB που επιτρέπει τη λειτουργία του διακόπτη εφόσον ο ενεργός του έλεγχος είναι ικανοποιητικός. Αξίζει να σημειωθεί πως από τη σκοπιά απωλειών στις δομές των διακοπών, είναι εφικτή η πειραματική διαχείριση μιας συνολικής επιβάρυνσης κοντά στα 60dB για τη διεξαγωγή ενός συστήματος με χρήση πραγματικής κίνησης πακέτων πληροφορίας με τη χρήση των κατάλληλων οπτικών ενισχυτών χαμηλού θορύβου (Low-noise Amplifiers). Οι μετρήσεις όλων των πλασμονικών δομών είναι ενθαρρυντικές καθώς εμφανίζουν (ελάχιστες) απώλειες από ένα εισόδου στην ένα εξόδου μέχρι 42.8dB (για την περίπτωση της δομής WC312) καθιστώντας πρακτικά εφικτή την πειραματική επίδειξη της λειτουργίας του διακόπτη

εφόσον ο θερμο-οπτικός έλεγχος του πολυμερούς Cyclomer το επιτρέπει. Στην επόμενη ενότητα της παραγράφου περιλαμβάνονται οι μετρήσεις πειραματικού χαρακτηρισμού του ενεργού μηχανισμού ελέγχου των δομών που εξετάστηκαν.

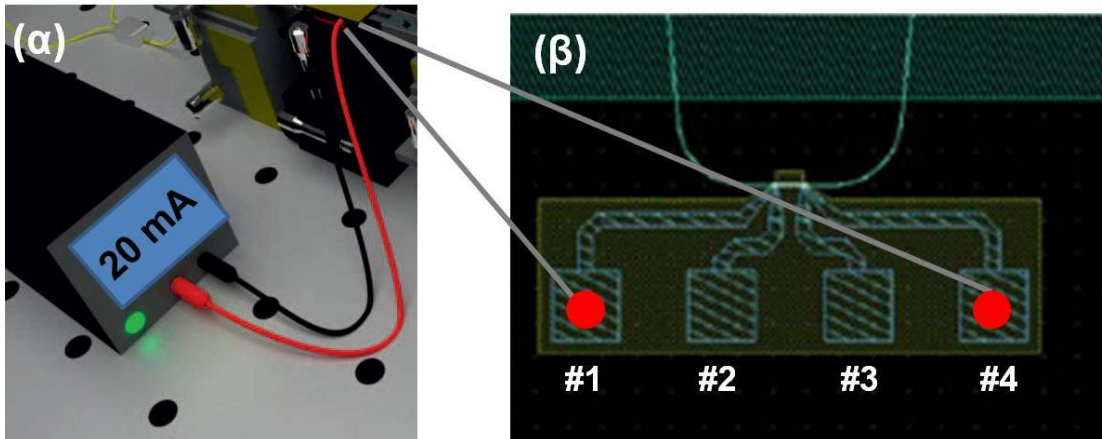
Δομή	Είσοδος	Κατάσταση μεταγωγής	Απώλειες [dB]	Μήκος κύματος [nm]
WC212	Άνω	BAR	47.2	1543.689
	Άνω	CROSS	53.1	1542.882
	Κάτω	BAR	38.6	1552.761
	Κάτω	CROSS	46.9	1539.161
WC213	Άνω	BAR	39.9	1544.365
	Άνω	CROSS	37	1553.023
	Κάτω	BAR	34.6	1542.926
	Κάτω	CROSS	48	1555.563
WC312	Άνω	BAR	42.8	1549.981
	Άνω	CROSS	55.1	1551.882
	Κάτω	BAR	44.1	1549.131
	Κάτω	CROSS	45.4	1545.764

Πίνακας 2: Επιδόσεις οπτικών απωλειών στις ετερο-ολοκληρωμένες δομές πλασμονικών διακοπών MZI για τις δυνατές συνθήκες μεταγωγής που προκύπτουν από το συνδυασμό των θυρών εισόδου (Άνω&Κάτω) και καταστάσεων διακόπτη (BAR&CROSS). Περιλαμβάνεται επίσης η πληροφορία για το μήκος κύματος που έχει επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση των απωλειών της δομής.

5.3.4 Στατικός θερμο-οπτικός χαρακτηρισμός της επίδοσης των πλασμονικών διακοπών εφοδιασμένων με Cyclomer

Το επόμενο βήμα του χαρακτηρισμού των δομών περιλαμβάνει το στατικό θερμο-οπτικό χαρακτηρισμό των πλασμονικών διακοπών που περιλαμβάνουν διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer με σκοπό να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του θερμο-οπτικού μηχανισμού στη διάταξη του DLSPP διακόπτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε μια πηγή DC (Direct Current - DC) ρεύματος που παρέχει τη δυνατότητα για έγχυση ρεύματος από 0mA έως 30mA με στοιχειώδες βήμα $dI=100\mu A$. Η χρήση των κατάλληλων μηχανισμών έγχυσης (probe tips) καθιστά εφικτό τον χαρακτηρισμό των δομών κάνοντας χρήση των ζευγών ηλεκτρικών επαφών και στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου όπως αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 20. Το ρεύμα το οποίο διατρέχει τα μεταλλικά στρώματα χρυσού (Au) του DLSPP κυματοδηγού είναι ικανό να επιβάλλει μια αύξηση της θερμοκρασίας του πολυμερούς που με τη σειρά του θα το μεταφράσει σε ολίσθηση φάσης στο κυματοδηγούμενο πεδίο όπως έχει ήδη περιγραφεί σε προηγούμενη ενότητα. Είναι προφανές πως η διαπίστωση ολίσθησης φάσης ($\Delta\phi$) μεταξύ των βραχιόνων του συμβολόμετρου MZI που μπορεί να επιτευχθεί με όσο το δυνατόν μικρότερο ρεύμα

καθιστά τη λειτουργία του διακόπτη ενεργειακά αποτελεσματική καθώς απαιτούνται μικρότερα επίπεδα δαπανούμενης ηλεκτρικής ισχύος. Στις μετρήσεις στατικού χαρακτηρισμού που ακολουθούν, οι επιδόσεις των θερμο-οπτικών διακοπών για την ολίσθηση της συνάρτησης μεταφοράς των δομών διερευνώνται και από τη σκοπιά της σταθερότητας ως προς το χρονικό διάστημα που εφαρμόζεται το ηλεκτρικό σήμα για τον ενεργό έλεγχο τους ώστε να διερευνηθεί η αξιοπιστία τους.



Εικόνα 20: (α) Σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης του DC τροφοδοτικού για τον ενεργό έλεγχο των πλασμονικών διακοπών MZI μέσω της έγχυσης ρεύματος ελέγχου που προορίζεται για την αύξηση της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής λωρίδας του DLSPP κυματοδηγού. (β) Εστίαση στη δομή των ηλεκτρικών επαφών (electrical contact pads) για την εφαρμογή του ρεύματος ελέγχου στους βραχίονες του A-MZI με διηλεκτρικές λωρίδες από Cyclomer.

Στη συνέχεια περιλαμβάνονται οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις δομές που εξετάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Οι μετρήσεις των συναρτήσεων μεταφοράς στις δύο θύρες εξόδου του συμβολόμετρου μετρήθηκαν για διαφορετικές τιμές του ρεύματος που ελέγχει ενεργά τη δομή. Οι μετρήσεις της ευαισθησίας (sensitivity) της συνάρτησης μεταφοράς για διαφορετικές τιμές του ρεύματος στους βραχίονες ($\Delta P_{out}/\Delta I_{dc}$) ουσιαστικά υποδηλώνει την εξάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς από τον θερμο-οπτικό μηχανισμό της δομής ($\Delta P_{out}/\Delta T$) καθώς η έγχυση ρεύματος μεταφράζεται σε θέρμανση της διηλεκτρικής λωρίδας και συνεπώς της θερμοκρασίας της. Για να γίνει πιο κατανοητός ο μηχανισμός της παραπάνω αλληλουχίας μηχανισμών που διέπουν τη συμπεριφορά του A-MZI διακόπτη, χρησιμοποιούμε την ανάπτυξη μέσω του κανόνα του Leibniz στον παρακάτω τύπο:

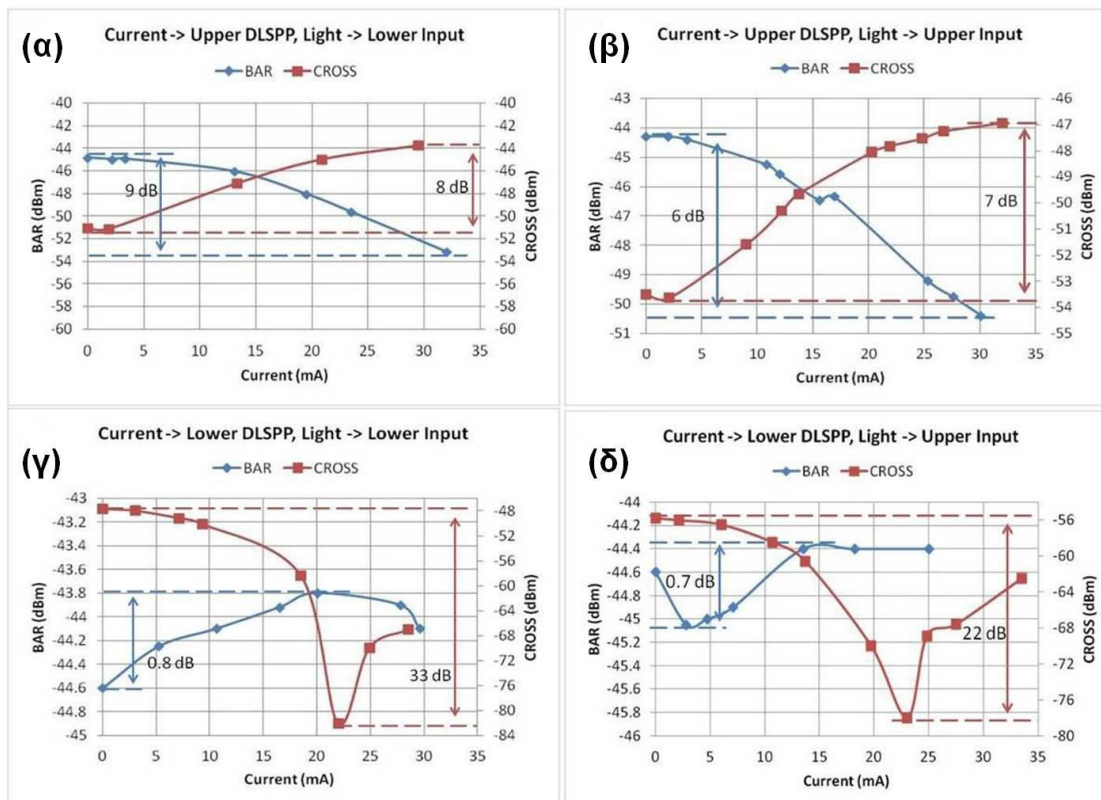
$$\frac{\Delta P_{out}}{\Delta I_{dc}} = \frac{\Delta P_{out}}{\Delta \varphi} \times \frac{\Delta \varphi}{\Delta T} \times \frac{\Delta T}{\Delta I_{dc}} \quad (5.5)$$

Η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος από το ρεύμα έγχυσης εξαρτάται από τους επιμέρους όρους της ανάπτυξης του γινομένου. Ο πρώτος όρος ($\Delta P_{out}/\Delta \varphi$) περιλαμβάνει την εξάρτηση της ισχύος εξόδου για κάθε θύρα του MZI από την διαφορική ολίσθηση

φάσης ($\Delta\phi$). Ο φυσικός μηχανισμός που κρύβεται πίσω από το ρυθμό μεταβολής αυτόν είναι η εξάρτηση της συνάρτησης μεταφοράς του MZI από τους λόγους σύζευξης (coupling ratios) των Si συζευκτών καθώς και τις διαφορικές απώλειες (differential loss) μεταξύ των δύο DLSPP βραχιόνων [5.49]. Οι μηχανισμοί αυτοί εξηγούν μερικώς τις διαφορετικές μεταβολές των λόγων σβέσης που διαπιστώθηκαν για τις δύο θύρες της δομής όπως περιλαμβάνονται και στα πειραματικά αποτελέσματα. Επιπλέον, η αρχικοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς του συμβολόμετρου (biasing point) παίζει καθοριστικό ρόλο καθώς η συνάρτηση μεταφοράς του MZI εμφανίζει διαφορετική κλίση. Πιο συγκεκριμένα, στην περιοχή μέγιστης διέλευσης (maximum transmission point) εμφανίζεται μικρή κλίση στην συνάρτηση μεταφοράς ενώ στην περιοχή της ελάχιστης διέλευσης (minimum transmission point) είναι πιο απότομη [5.50].

Ο δεύτερος όρος ($\Delta\phi/\Delta T$) της αλυσίδας σχετίζεται άμεσα με τον θερμο-οπτικό συντελεστή (Thermo-optic Coefficient, TOC) του διηλεκτρικού υλικού καθώς το πολυμερές Cyclomer υπόσχεται μεγαλύτερες τιμές του TOC συντελεστή συγκριτικά με το PMMA [5.25]. Υψηλότερες τιμές του TOC μεταφράζονται σε υψηλότερες τιμές της μεταβολής του ενεργού δείκτη διάθλασης του πλασμονικού ρυθμού και συνεπώς στη δυνατότητα για τη συσσώρευση διαφορικής φάσης ($\Delta\phi$) μεταξύ των βραχιόνων. Ο όρος αυτός παρουσιάζει το συγκριτικό πλεονέκτημα της δομής του πλασμονικού διακόπτη με βραχίονες από DLSPP κυματοδηγούς με Cyclomer συγκριτικά με άλλα πολυμερικά υλικά όπως το PMMA που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο τρίτος όρος της αλυσίδας ($\Delta T/\Delta I_{dc}$) που υπολογίζει το ρυθμό μεταβολής στην ισχύ του θερμο-οπτικού διακόπτη σχετίζεται άμεσα με τις επιδόσεις του θερμικού προβλήματος του διακόπτη. Υποκρύπτει το μηχανισμό ο οποίος μεταφράζει μια ποσότητα ρεύματος σε αύξηση της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής λωρίδας του DLSPP κυματοδηγού και περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα που αναλύθηκε η δυναμική του θερμο-οπτικού διακόπτη MZI. Η εξάρτηση από τα θερμικά χαρακτηριστικά του υποβάθρου (buffer) αποκτά καθοριστικό ρόλο στην περίπτωση του όρου αυτού [5.51].

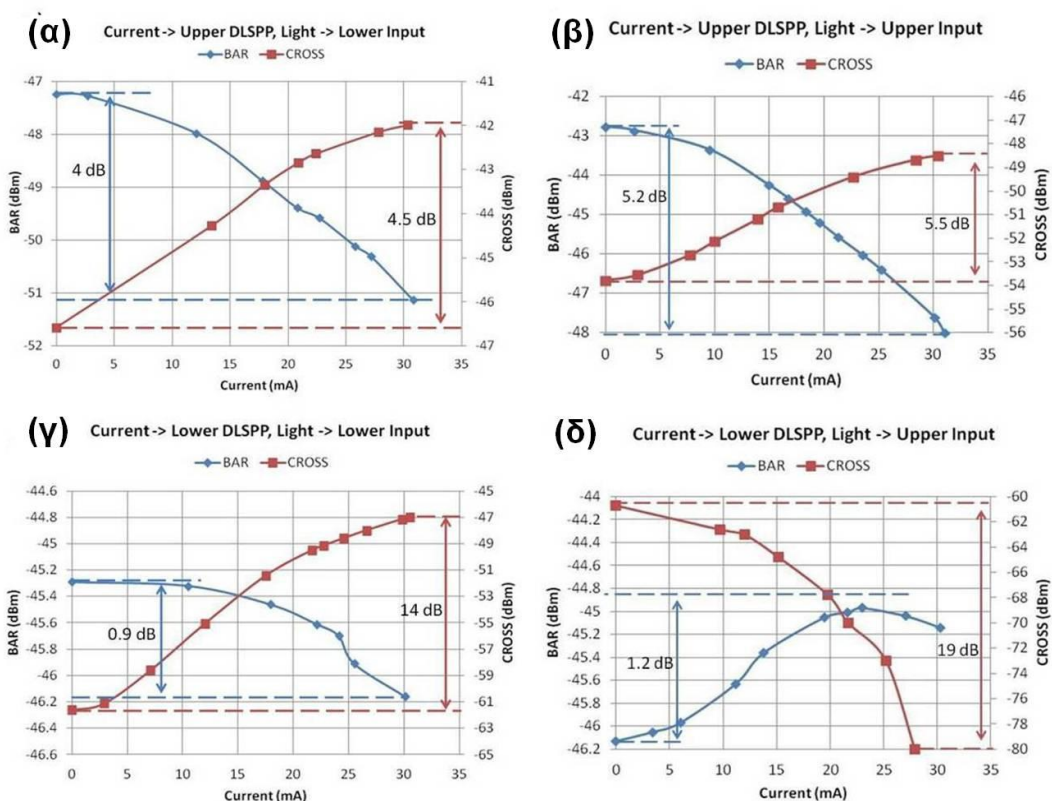


Εικόνα 21: Αποτελέσματα του στατικού θερμο-οπτικού χαρακτηρισμού για την αξιολόγηση της λειτουργίας του ελέγχου διακόπτη MZI για το συνδυασμό καταστάσεων διακόπτη και θυρών εισόδου της δομής WC212, (α)-(δ). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το λόγο σβέσης (ER) σε κάθε κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη (BAR&CROSS) για τιμές ρεύματος στο εύρος από 0mA έως 30mA.

Η συμπληρωματικότητα των συναρτήσεων μεταφοράς ως προς την ολίσθηση φάσης είναι εμφανής και στην περίπτωση αυτή καθώς η μεταβολή της τιμής της ισχύος για κάθε θύρα εξόδου έχει διαφορετικό πρόσημο καθώς θερμαίνεται ο DLSPP βραχίονας της δομής που έχει επιλεγεί. Η διαπίστωση αυτή είναι σύμφωνη με την αρχή λειτουργίας του συμβολομέτρου που υπακούει στην αρχή διατήρησης ενέργειας [5.52]. Από τη σκοπιά της επίδοσης του διακόπτη, η διαπίστωση υψηλής τιμής λόγου σβέσης (ER) και για τις δύο θύρες επιδιώκεται στην ιδανική περίπτωση του διακόπτη και για το λόγο αυτό υπολογίζεται στις στατικές μετρήσεις θερμο-οπτικού χαρακτηρισμού που ακολουθούν. Η Εικόνα 22 συνοψίζει τα αποτελέσματα στατικού χαρακτηρισμού του θερμο-οπτικού ελέγχου από τη δομή του πλασμονικού διακόπτη WC212. Οι πειραματικές μετρήσεις της ισχύος για κάθε κατάσταση του διακόπτη (BAR και CROSS) αναπαρίσταται για διαφορετικές τιμές του εγχεόμενου ρεύματος στον DLSPP βραχίονα της δομής. Για κάθε περίπτωση, έχουν υπολογιστεί στο διάγραμμα και οι τιμές του λόγου σβέσης (ER) που αντιστοιχούν για την περίπτωση του ρεύματος $I=30\text{mA}$. Αξίζει να σημειωθεί πως επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή του ρεύματος $I=30\text{mA}$ για να προστατευθεί η τυχόν επιβάρυνση του υλικού πριν αξιολογηθεί η δομή σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας που ακολουθεί. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αναμενόμενη

συμπληρωματική συμπεριφορά για τις δύο καταστάσεις (BAR&CROSS) ανεξαρτήτως της επιλεγόμενης θύρας εισόδου του διακόπτη (upper και lower input). Επιπλέον, μεταβάλλοντας τον βραχίονα του MZI που επιβάλλεται η θέρμανση της διηλεκτρικής λωρίδας του κυματοδηγού είναι εμφανής η αντιστροφή της μεταβολής (αύξηση και μείωση) του ποσού ισχύος που μετράται στην έξοδο. Η λειτουργία αυτή είναι σύμφωνη με την εφαρμογή της ίδιας μεταβολής φάσης ($\Delta\phi$) στους βραχίονες του συμβολομέτρου που στρέφει τη συνάρτηση μεταφοράς του συμβολόμετρου προς αντίθετη κατεύθυνση. Η διαπίστωση πανομοιότυπων επιπέδων ισχύος για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν στις θύρες εξόδου υποδεικνύει την παρουσία Si συζευκτών ισχύος κοντά στον ιδανικό λόγο που σχεδιάστηκε κοντά στο 50/50. Είναι εμφανής η αύξηση της τιμής του διαπιστούμενου λόγου σβέσης (ER) στις περιπτώσεις των (γ) και (δ) καθώς η συμβολομετρική διάταξη βρίσκεται στο σημείο ελάχιστης διαδιδόμενης ισχύος (minimum transmission point). Το συγκεκριμένο πειραματικό αποτέλεσμα προκύπτει από την απότομη μεταβολή της συνάρτησης μεταφοράς του MZI στην περιοχή αυτή που οδηγεί σε υψηλούς διαφορικούς λόγους όταν οι συζευκτές ισχύος είναι κοντά στο 50/50. Τέλος, παρατηρούμε πως η αρχική διαφορική φάση μεταξύ των βραχιόνων του συμβολόμετρου είναι αρκετά διαφορετικό από $\Delta\phi_{\text{bias}}=\pi/2$ καθώς για το ίδιο επιβαλλόμενο $\Delta\phi$ παρατηρούμε πως οι μεταβολές των επιπέδων ισχύος είναι αρκετά διαφορετικές για τις δύο καταστάσεις μεταγωγής (BAR&CROSS). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως το συμβολόμετρο είναι αρχικοποιημένο (biased) ως προς τη διαφορά φάσης των βραχιόνων σε τέτοιο σημείο ώστε οι καταστάσεις μεταγωγής να αντιστοιχούν στην περιοχή του σημείου μέγιστης και ελάχιστης διέλευσης αντίστοιχα (maximum and minimum transmission point).

Η Εικόνα 22 παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα που στατικού θερμο-οπτικού χαρακτηρισμού για τη δομή WC312 στο εύρος τιμών ρεύματος μέχρι 30mA. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν την έγχυση του ρεύματος στους δύο βραχίονες του συμβολόμετρου για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη (BAR&CROSS). Χρησιμοποιώντας τον άνω βραχίονα του MZI (upper DLSPP) για την έγχυση ρεύματος στα 30mA, την αναμενόμενη συμμετρική συμπεριφορά για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη καθώς ενώ αυξάνεται η ισχύς στην κατάσταση BAR μειώνεται στην κατάσταση CROSS. Επιπλέον, αλλάζοντας τη θύρα εισόδου του διακόπτη παρατηρούμε την αναμενόμενη αντιστροφή της συμπεριφοράς για αυξανόμενες τιμές ρεύματος καθώς ουσιαστικά αλλάζει το πρόσημο της ολίσθησης φάσης ($\Delta\phi$) που μετατοπίζει το σημείο στη συνάρτηση μεταφοράς του MZI. Αξιοσημείωτη επίσης είναι η περίπου ίδια τιμή του λόγου σβέσης (ER) για τις καταστάσεις του διακόπτη γύρω από τιμές στα 5dB και ερμηνεύεται με βάση την πιθανή αρχικοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς γύρω από το επιθυμητό σημείο με $\Delta\phi_{\text{bias}}=\pi/2$ (quadrature point).



Εικόνα 22: Αποτελέσματα του στατικού θερμο-οπτικού χαρακτηρισμού για την αξιολόγηση της λειτουργίας του ελέγχου διακόπτη MZI για το συνδυασμό καταστάσεων διακόπτη και θυρών εισόδου της δομής WC312, (α)-(δ). Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το λόγο σβέσης (ER) σε κάθε κατάσταση μεταγωγής του διακόπτη (BAR&CROSS) για τιμές ρεύματος στο εύρος από 0mA έως 30mA.

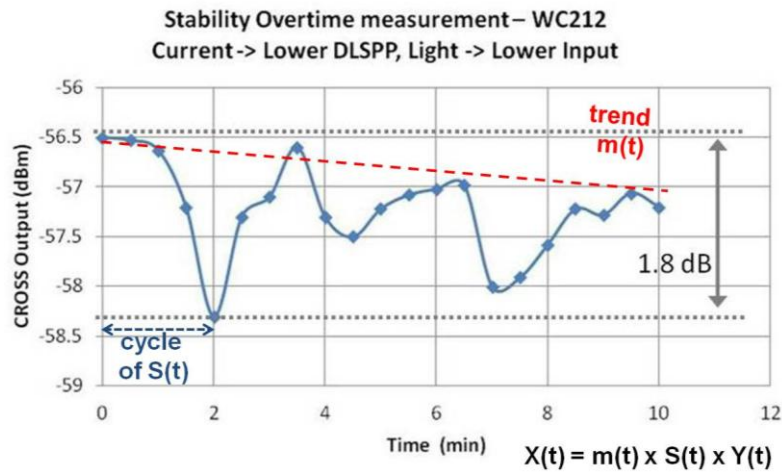
Οι Εικόνες 22(γ),(δ) αποτυπώνουν τις μετρήσεις στην έξοδο του διακόπτη για την περίπτωση που εφαρμοστεί ο θερμο-οπτικός έλεγχος στον κάτω βραχίονα (lower DLSP) του διακόπτη. Η συμπληρωματική λειτουργία των καταστάσεων BAR και CROSS επιβεβαιώνει τη μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς του συμβολόμετρου λόγω της εφαρμογής της ολίσθησης φάσης. Όπως και στην περίπτωση της εναλλαγής του κυματοδηγού εισόδου, παρατηρείται μια αντιστροφή της ισχύος στις εξόδους του διακόπτη για τις δύο καταστάσεις. Ωστόσο, παρατηρείται η μετατόπιση της αρχικοποίησης της συνάρτησης μεταφοράς του διακόπτη καθώς ο διακόπτης εμφανίζει συμπεριφορά σαν να είναι αρχικοποιημένος σε μικρές τιμές φάσης ($\Delta\phi_{\text{bias}} \ll$). Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις των λόγων σβέσης (ER) του διακόπτη που αντιστοιχούν συμμετρικά είτε στα σημεία ελάχιστης διέλευσης (minimum transmission point) για τις μεγάλες τιμές μέχρι τα 19dB είτε στο σημείο μέγιστης διέλευσης (maximum transmission point) με μικρές μεταβολές στην ισχύ εξόδου (~1dB).

Η ερμηνεία της συγκεκριμένης μετατόπισης μπορεί να βρίσκεται στην αλλοίωση των χαρακτηριστικών του πολυμερούς μετά από την επαναληπτική εφαρμογή θερμικού φορτίου που εισάγει μια επιπρόσθετη ολίσθηση φάσης μετά από τους κύκλους θέρμανσης των κυματοδηγών. Η συγκεκριμένη μελέτη που προσπαθεί να δώσει απάντηση για την

επίδραση του κύκλου θέρμανσης στο σημείο αρχικοποίησης (biasing point) παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα για τις δύο δομές A-MZI που μελετήθηκαν. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τον προσδιορισμό της στατικής θερμο-οπτικής συμπεριφοράς του πλασμονικού διακόπτη WC213 καθώς δεν ήταν δυνατή η εφαρμογή του ηλεκτρικού σήματος ελέγχου στα σημεία ηλεκτρικής επαφής.

5.3.5 Πειραματικές μετρήσεις σταθερότητας για κύκλους θέρμανσης του πλασμονικού διακόπτη

Το τελευταίο στάδιο πειραματικού χαρακτηρισμού των δομών περιλαμβάνει την αξιολόγηση της σταθερότητας των κυκλωμάτων διακοπών κάτω από διαφορετικούς κύκλους θέρμανσης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις της ισχύος εξόδου του διακόπτη για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα με τιμές ρεύματος στα $I=30\text{mA}$. Μελετήθηκε η συμπεριφορά της ισχύος εξόδου του διακόπτη και αξιολογήθηκαν τα ποιοτικά στοιχεία της χρονο-σειράς (time-series) των μετρήσεων.



Εικόνα 23: Αποτελέσματα της μέτρησης της σταθερότητας του θερμο-οπτικού μηχανισμού για μεγάλο χρονικό διάστημα ($\Delta t=10\text{min}$) κατά την αξιολόγηση της λειτουργίας του διακόπτη MZI της δομής WC212 στην κατάσταση CROSS με χρήση της κάτω θύρας εισόδου. Η χρονο-σειρά του γραφήματος $X(t)$ προσεγγίζεται ως ένα γινόμενο συνιστωσών τάσης $m(t)$, περιοδικότητας κύκλου $S(t)$ και σφάλματος $Y(t)$.

Η Εικόνα 23 παρουσιάζει τις πειραματικές μετρήσεις στην έξοδο του διακόπτη WC212 κατά την έγχυση ρεύματος $I=30\text{mA}$ για χρονικό παράθυρο $\Delta t=10\text{min}$. Για να εξηγηθεί η συμπεριφορά του διακόπτη, η χρονο-σειρά που παρουσιάζεται επιχειρείται να περιγραφεί χρησιμοποιώντας κλασικές τεχνικές αποσύνδεσης (decomposition) χρονο-σειρών [5.53]. Υιοθετώντας τα εργαλεία αυτά, είναι δυνατή η ανασύνθεση της ακολουθίας λαμβάνοντας υπόψη τους όρους της τάσης (trend) $m(t)$ και της περιοδικότητας του κύκλου $S(t)$. Το φυσικό υπόβαθρο της τάσης $m(t)$ εντοπίζεται στην ολίσθηση της αρχικοποίησης της συνάρτησης μεταφοράς (biasing point) του συμβολομέτρου MZI με ένα σταθερό τρόπο ώστε να αλλάζει η συνάρτηση μεταφοράς. Το αποτέλεσμα αυτής της ολίσθησης είναι η

μεταβολή της ισχύος εξόδου του διακόπτη που μειώνεται καθώς περνά ο χρόνος της μέτρησης. Παρατηρείται επίσης μια περιοδικότητα στα αποτελέσματα της μετρημένης ισχύος εξόδου $S(t)$ που σχετίζεται με τις δυναμικές του θερμικού προβλήματος καθώς αυξομειώνεται η ισχύς στην έξοδο. Η περίοδος του συγκεκριμένου κύκλου υπολογίζεται γύρω στα 110 sec και μεταβάλλεται καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο της θέρμανσης. Το φυσικό υπόβαθρο της μεταβολής αυτής του κύκλου πιθανό να εντοπίζεται και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη μέτρηση. Η αθροιστική επίδραση των δύο όρων που συνθέτουν τη χρονο-σειρά καταλήγει να εισάγει μια (μέγιστη) μεταβολή της μετρούμενης ισχύος κοντά στα 1.8dB. Η τιμή αυτή μας ενδιαφέρει από σκοπιά λειτουργίας διακόπτη καθώς βάζει περιορισμούς στη λειτουργία του κυκλώματος. Η επίδραση των όρων αυτών που εμφανίζονται ως θόρυβος $Y(t)$ σχετίζονται με την αβεβαιότητα των πειραματικών μετρήσεων.

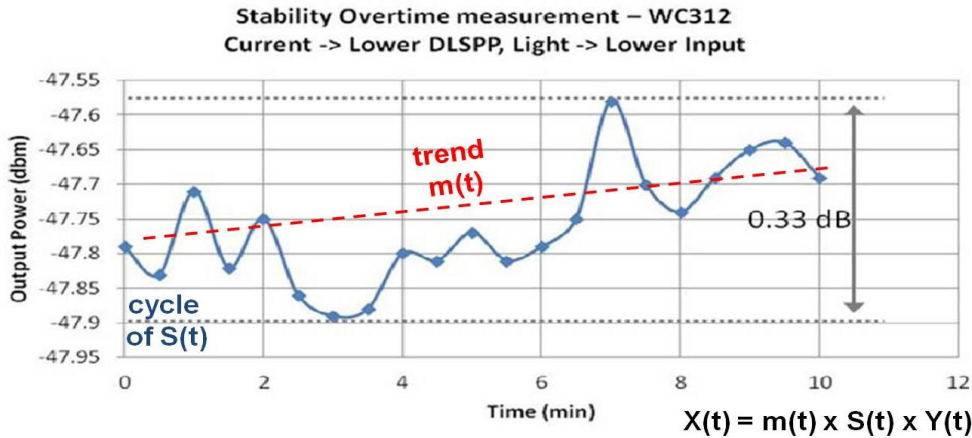
Η Εικόνα 24 παρουσιάζει την αντίστοιχη χρονική ακολουθία μετρήσεων για τη δομή του πλασμονικού διακόπτη WC312. Ο σχολιασμός της συμπεριφοράς του διακόπτη προσεγγίζεται μέσω της τεχνικής αποσύνδεσης (decomposition) όπως ακολουθήθηκε στην προηγούμενη δομή. Παρατηρείται μια αντίστοιχη τάση (trend) $m(t)$ η οποία για μεγάλες τιμές τείνει να αυξήσει την ισχύ στην έξοδο του διακόπτη. Παράλληλα, παρατηρείται η εμφάνιση ενός κύκλου (cycle) $S(t)$ που σχετίζεται με τις περιοδικές εναλλαγές της τιμής της ισχύος εξόδου. Η συνολική μεταβολή που εισάγουν αθροιστικά οι δύο μηχανισμοί που προαναφέρθηκαν προκαλούν μια (μέγιστη) μεταβολή στην ισχύ εξόδου κοντά στα 0.33dB στο χρονικό διάστημα πειραματικής μελέτης ($\Delta t=10\text{min}$). Τέλος, η παρουσία του όρου $Y(t)$ που περιλαμβάνει την επίδραση των όρων αβεβαιότητας της μέτρησης αλλά και θορύβου από το περιβάλλον μέτρησης υπάρχει στις μετρήσεις χαρακτηρισμού.

Κατά τη διενέργεια των μετρήσεων, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η σύγκριση της μεταβλητότητας των τιμών της ισχύος στην έξοδο του διακόπτη για το χρονικό διάστημα μετρήσεων. Στην πρώτη περίπτωση μετρήθηκε μια μεταβολή του επιπέδου ισχύος κοντά στα 1.8dB ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι 0.33dB. Ωστόσο, μια δίκαιη σύγκριση για τις τιμές μεταβολής πρέπει να συμπεριλάβει και το σημείο αρχικοποίησης της συνάρτησης μεταφοράς (biasing point) καθώς αυτό που έχει σημασία σχετικά με τη σταθερότητα του υλικού είναι η ολίσθηση της φάσης που προκαλείται από τον θερμαντικό κύκλο ($\Delta\phi_{\text{heat}}$) της διηλεκτρικής λωρίδας του Cyclomer. Συνεπώς, η σύγκριση πρέπει να περιλαμβάνει τη μεταβολή της φάσης του συμβολόμετρου και όχι τη μεταβολή των επιπέδων ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς του MZI, η εξάρτηση της ολίσθησης φάσης από το σημείο αρχικοποίησης της συνάρτησης μεταφοράς (ϕ_0 -biasing point) είναι εμφανής κάνοντας χρήση των παρακάτω τύπων που προκύπτουν από τη συνάρτηση μεταφοράς του A-MZI [5.54]:

$$\Delta P = \left. \frac{dP}{d\varphi} \right|_{\varphi_0} \times \Delta\varphi_{heat} \Rightarrow \Delta\varphi_{heat} = \Delta P \times \left[\left. \frac{dP}{d\varphi} \right|_{\varphi_0} \right]^{-1}$$

$$P = \cos^2(\varphi) \Rightarrow \frac{dP}{d\varphi} = -2 \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) = -\sin(2 \cdot \varphi) \quad (5.6)$$

$$\Delta\varphi_{heat} = -\Delta P \cdot \sin(2 \cdot \varphi_0)$$

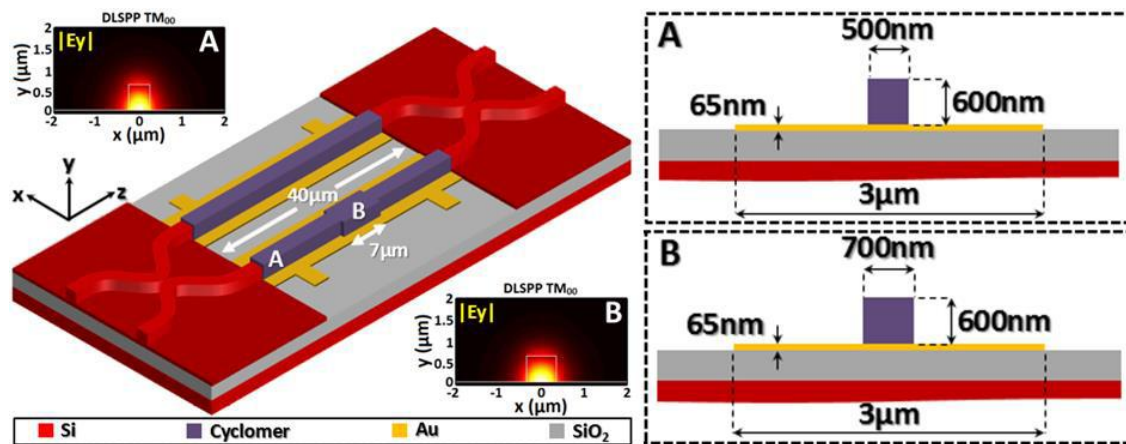


Εικόνα 24: Αποτελέσματα της μέτρησης της σταθερότητας του θερμο-οπτικού μηχανισμού για μεγάλο χρονικό διάστημα ($\Delta t=10\text{min}$) κατά την αξιολόγηση της λειτουργίας του διακόπτη MZI της δομής WC312 στην κατάσταση CROSS με χρήση της κάτω θύρας εισόδου. Η χρονο-σειρά του γραφήματος $X(t)$ προσεγγίζεται ως ένα γινόμενο συνιστωσών τάσης $m(t)$, περιοδικότητας κύκλου $S(t)$ και σφάλματος $Y(t)$.

Συμπεραίνουμε λοιπόν πως από την εφαρμογή ρεύματος $I=30\text{mA}$ για διάρκεια $\Delta t=10\text{min}$ στους πλασμονικούς βραχίονες του συμβολόμετρου παρατηρείται μια ολίσθηση φάσης ($\Delta\varphi_{heat}$) συγκρίσιμη και για τους δύο διακόπτες. Το αποτέλεσμα της ολίσθησης φάσης στα επίπεδα ισχύος στην έξοδο του κυκλώματος είναι διαφορετικό για κάθε περίπτωση καθώς διαπιστώνονται μετατοπίσεις σε συναρτήσεις μεταφοράς που είναι αρχικοποιημένες σε διαφορετικά σημεία. Για την εξάλειψη της συγκεκριμένης συμπεριφοράς της μετατόπισης και ταλάντωσης του θερμικού κύκλου του διακόπτη, επαναλάβουμε μια τεχνική ψησίματος των DLSPP δομών με επαναληπτικές εγχύσεις ρεύματος στα 30mA που σκοπεύουν να εμπλουτίσουν τη σταθερότητα του πολυμερούς στη διηλεκτρική λωρίδα των κυματοδηγών. Το κίνητρο για τη βελτίωση της σταθερότητας του πολυμερούς υλικού είναι η λειτουργία του διακόπτη για την επίδειξη της λειτουργίας του σε περιβάλλον πραγματικών δεδομένων όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενη ενότητα.

5.4 Πειραματική επίδειξη λειτουργίας DLSPP διακόπτη βασισμένου σε συμβολόμετρο MZI από Cyclomer στα 10Gb/s

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα για τη λειτουργία του πλασμονικού διακόπτη MZI που χρησιμοποιεί διηλεκτρικές λωρίδες από Cyclomer. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η δομή WC212 καθώς συνδυάζει χαμηλές οπτικές απώλειες, ικανοποιητική διαφορική λειτουργία διακόπτη και εμπλουτισμένη σταθερότητα καθώς ακολουθήθηκε η διαδικασία ψησίματος (Hard Baking-HB) για να σταθεροποιηθεί το πολυμερές της διηλεκτρικής λωρίδας. Η δομή του ετερο-ολοκληρωμένου πλασμονικού συμβολομετρικού διακόπτη MZI παρουσιάζεται στην Εικόνα 25 περιλαμβάνοντας το Si παθητικό τμήμα (κόκκινο χρώμα) με τους συζεύκτες ισχύος, τους κυματοδηγούς και τους ενεργούς DLSPP βραχίονες που είναι εφοδιασμένοι με το πολυμερές Cyclomer (μωβ χρώμα) το οποίο τοποθετείται πάνω από ένα λεπτό μεταλλικό στρώμα χρυσού (κίτρινο χρώμα).



Εικόνα 25: Δομή υβριδικού (Si-DLSPP) ασύμμετρου συμβολόμετρου MZI υπό πλάγια όψη (αριστερά). Στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται ως ένθετες εικόνες οι κατανομές πεδίου των υποστηριζόμενων πλασμονικών ρυθμών στον άνω (κανονικό) και κάτω (διαπλατυσμένο) πλασμονικό βραχίονα με βάση το πολυμερές Cyclomer. Δεξιά διακρίνονται οι διατομές του πλασμονικού κυματοδηγού στον κάτω βραχίονα του A-MZI που έχει διαφορετικό πλάτος στα σημεία A (500 nm) και B (700 nm). Η προσομοίωση των κατανομών πεδίου των πλασμονικών ρυθμών πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Βουργουνδίας (University of Burgundy, UB). Η κατασκευή της SOI πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε από το επιστημονικό προσωπικό της εταιρείας AMO GmbH. Η κατασκευή των πλασμονικών δομών στη SOI πλατφόρμα πραγματοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα του πανεπιστημίου της Νότιας Δανίας (University of Southern Denmark, SDU).

Η διάταξη του 2×2 διακόπτη A-MZI υβριδικής τεχνολογίας SOI παθητικών νανο-κυματοδηγών και ενεργών DLSPP διατάξεων αναπαρίσταται σχηματικά στην Εικόνα 25. Το υβριδικό αυτό A-MZI συμβολόμετρο περιλαμβάνει δύο 50/50 κατευθυντικούς συζεύκτες από πυρίτιο (Si) καθώς και δύο DLSPP πλασμονικούς κυματοδηγούς από Cyclomer μήκους $L=40 \mu\text{m}$ οι οποίοι λειτουργούν ως οι ενεργοί (ηλεκτρικά ελεγχόμενοι) βραχίονες (branches). Εστιάζοντας στη γεωμετρία των DLSPP κυματοδηγών του υβριδικού A-MZI, σχηματίστηκαν ύστερα από την τοποθέτηση ράβδων από Cyclomer πλάτους

$w=500$ nm και πάχους $h=600$ nm πάνω σε ταινίες χρυσού (Au) με διαστάσεις $3 \mu\text{m} \times 65$ nm. Ακολούθησε η ετερο-ολοκλήρωση των πλασμονικών αυτών κυματοδηγών στην πλατφόρμα τεχνολογίας SOI (Silicon On Insulator-SOI), η οποία περιλάμβανε κυματοδηγούς ράβδωσης (rib) με διατομή $400\text{nm} \times 340\text{nm}$ καθώς και περιθλαστικούς συζεύκτες φράγματος πόλωσης TM για τη σύζευξη φωτός μέσα και έξω από το κατασκευασμένο τσιπ [5.55].

Όπως φαίνεται και σε αυτό το σχήμα, η ασυμμετρία της υβριδικής συμβολομετρικής δομής επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας ένα τμήμα DLSPP κυματοδηγού μήκους $7 \mu\text{m}$ στον κάτω κλάδο το οποίο διαπλατύνθηκε από $w_1=500$ nm (A) σε $w_2=700$ nm (B). Στο ίδιο σχήμα περιλαμβάνονται, επίσης, ως ένθετες εικόνες, οι κατανομές πεδίου των πλασμονικών ρυθμών στις δύο διατομές (A και B) του DLSPP κυματοδηγού του κάτω βραχίονα. Σκοπός είναι να αναδειχθεί η υποστήριξη μόνο του θεμελιώδους πλασμονικού ρυθμού TM και για τις δύο γεωμετρίες των κυματοδηγών αποφεύγοντας οποιαδήποτε συνθήκη διέγερσης ρυθμών ανώτερης τάξης. Η παραπάνω προσέγγιση επιλέχθηκε για να συμπεριληφθεί μία προκαθορισμένη διαφορά φάσης ίσης με $\Delta\varphi_{\text{bias}}=\pi/2$ μεταξύ των δύο οπτικών δρόμων και, κατά συνέπεια, να πολωθεί το MZI στο σημείο τετραγωνισμού του (quadrature point), ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταγωγή υψηλής απόδοσης με μειωμένη κατανάλωση ισχύος όπως έχει περιγραφεί ήδη στην αρχή του κεφαλαίου [5.55]. Υιοθετώντας τις σχεδιαστικές παραμέτρους του πλασμονικού διακόπτη επιλέχθηκε η συνθήκη της επίτευξης της αρχικοποίησης της συνάρτησης μεταφοράς με βάση την παρακάτω συνθήκη:

$$\Delta\varphi_{\text{bias}} = \int_{z=0}^{z=L} \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_{A-B}(z) dz = \frac{\pi}{2} \quad (5.7)$$

Όσον αφορά τη λειτουργία του διακόπτη, αυτή επιτυγχάνεται, κατά τα γνωστά, μέσω της στροφής φάσης η οποία υφίσταται από την τοπική αλλαγή θερμοκρασίας σε ένα κλάδο του MZI που προκαλείται από το ρεύμα οδήγησης της δομής. Κατά συνέπεια, ο ενεργός δείκτης του ρυθμού που διαδίδεται στον ηλεκτρικά ελεγχόμενο κλάδο τροποποιείται από τη θέρμανση σε σχέση με το δείκτη του ρυθμού στο μη-θερμαινόμενο βραχίονα, επιφέροντας με αυτό τον τρόπο μία διαφορά φάσης στην έξοδο του MZI που οδηγεί σε πλήρη λειτουργία μεταγωγής όταν η διαφορά αυτή είναι ίση με $\Delta\varphi=\pi$.

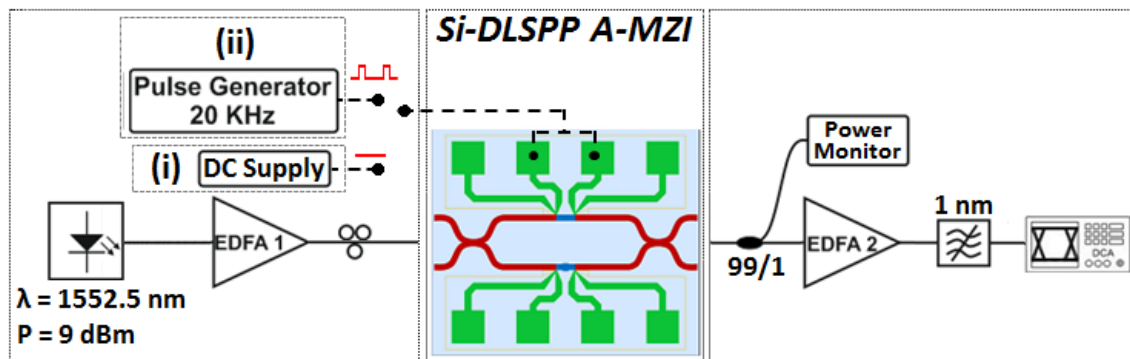
5.4.1 Στατικός και δυναμικός πειραματικός χαρακτηρισμός θερμο-οπτικού ελέγχου του διακόπτη MZI

Το πρώτο βήμα χαρακτηρισμού της δομής του πλασμονικού διακόπτη περιλαμβάνει την αξιολόγηση της στατικής λειτουργίας της δομής μετά από τον χαρακτηρισμό του θερμο-οπτικού ελέγχου αλλά και τη διαδικασία της σκλήρυνσης (hard baking) που ακολούθησε για να βελτιωθεί η σταθερότητα της πολυμερικής λωρίδας του Cyclomer. Οι πειραματικές μετρήσεις για τη δομή του DLSPP MZI εστιάζουν στον ακριβή προσδιορισμό

των απωλειών, στον θερμο-οπτικό έλεγχο με DC (Direct Current-DC) ηλεκτρικό έλεγχο και τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς του διακόπτη.

Η Εικόνα 26 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη που υλοποιήθηκε για το στατικό και δυναμικό θερμο-οπτικό χαρακτηρισμό του βασισμένου σε Cyclomer υβριδικού ασύμμετρου MZI (Asymmetric MZI, A-MZI). Το οπτικό σήμα εισόδου εκπέμπεται από μία πηγή συνεχούς κύματος (Continuous Wave - CW) με στάθμη ισχύος στα +9 dBm σε μήκος κύματος $\lambda=1552.5$ nm. Το μονοχρωματικό φως ενισχύθηκε κάνοντας χρήση ενός οπτικού ενισχυτή EDFA ώστε να αυξηθεί η παρεχόμενη ισχύς στην είσοδο του τσιπ. Η ισχύς κορεσμού στην έξοδο του οπτικού ενισχυτή (EDFA 1) μετρήθηκε να είναι +20 dBm. Σκοπός της χρήσης του ενισχυτή είναι η επίτευξη ενός ικανού εύρους αναφοράς ισχύος που επιτρέπει στην έξοδο του τσιπ να μετρηθεί ένα επίπεδο ισχύος μεγαλύτερο από τον ενισχυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην πλευρά της μέτρησης (EDFA 2). Ένας ελεγκτής πόλωσης (Polarization Controller - PC) χρησιμοποιήθηκε για να διασφαλιστεί η επιθυμητή TM πόλωση που υποστηρίζεται από τους DLSPP κυματοδηγούς του συμβολόμετρου MZI. Ο έλεγχος του υβριδικού A-MZI που βασίστηκε στο θερμο-οπτικό φαινόμενο πραγματοποιήθηκε μέσω του άνω βραχίονα τόσο για τον στατικό προσδιορισμό της συνάρτησης μεταφοράς του διακόπτη κάνοντας χρήση ενός DC τροφοδοτικού όσο και για τον πειραματικό προσδιορισμό της δυναμικής του διακόπτη κάνοντας χρήση μιας γεννήτριας σημάτων χαμηλού ρυθμού επαναληψιμότητας. Ο στατικός θερμο-οπτικός χαρακτηρισμός της κατασκευασμένης συμβολομετρικής δομής πραγματοποιήθηκε επιβάλλοντας μια DC τάση οδήγησης στις ηλεκτρικές μεταλλικές επαφές (electrical contact pads) της δομής που αποτυπώνονται στο σχήμα με διακεκομμένες γραμμές. Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το στρώμα του χρυσού του DLSPP κυματοδηγού περιορίζεται στα 60mA (I_{lim}) για να προστατευτεί η διηλεκτρική λωρίδα του Cyclomer από την υπερθέρμανση αλλά και το λεπτό μεταλλικό στρώμα. Ο δυναμικός έλεγχος του διακόπτη για να εξακριβωθούν οι χρόνοι της δυναμικής λειτουργίας κατέστη δυνατός μέσω της χρήσης γεννήτριας παλμών που παράγει παλμοσειρές ηλεκτρικών ορθογώνιων παλμών με ρυθμό επαναληψιμότητας $f=20$ KHz. Η ακολουθία αυτή χαρακτηρίζεται από ένα κύκλο λειτουργίας (Duty Cycle) ίσο με 30%, ικανό να προσφέρει τη χρονοθυρίδα για την πλήρη καταγραφή των χρόνων ανόδου/καθόδου (rise/fall times) του θερμο-οπτικού διακόπτη. Αξίζει να σχολιαστεί πως το αναλογικό εύρος ζώνης (analog bandwidth) του συγκεκριμένου σήματος ελέγχου υποστηρίζεται τόσο από το μεταλλικό στρώμα του κυματοδηγού όσο και από τα μετρητικά όργανα της πειραματικής διάταξης. Στην έξοδο της δομής του A-MZI τοποθετήθηκε ένας οπτικός συζεύκτης 99/1 πριν οδηγηθεί η ισχύς εξόδου σε έναν οπτικό ενισχυτή χαμηλού θορύβου (low noise amplifier) για την καταγραφή. Σημειώνεται πως η θύρα του συζεύκτη ίνας στο 1% της οπτικής ισχύος χρησιμοποιήθηκε για να είναι εφικτή η διαρκής καταγραφή της ισχύος εξόδου ώστε να διαπιστώνεται τυχόν απώλεια ευθυγράμμισης (alignment) που μπορεί να οδηγήσει σε απότομη μείωση της οπτικής ισχύος χωρίς να οφείλεται στον ενεργό έλεγχο της δομής. Ο στατικός χαρακτηρισμός του θερμο-οπτικού ελέγχου περιλαμβάνει τη χρήση μόνο της μετρημένης ισχύος στην έξοδο του συζεύκτη που αρκεί για την αναπαράσταση της

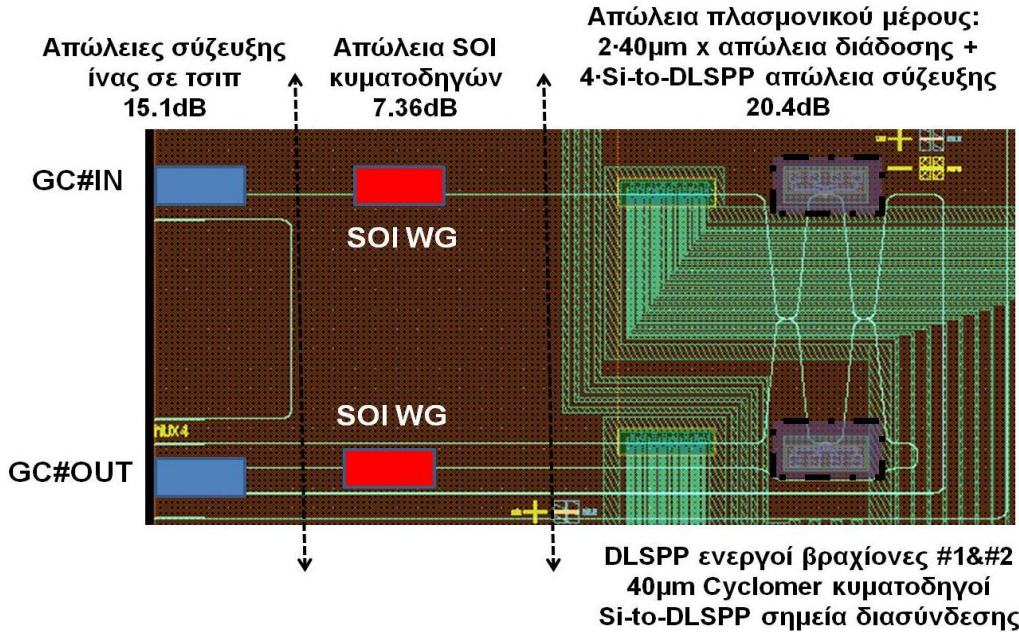
συνάρτησης μεταφοράς του διακόπτη όπως φαίνεται και στη συνέχεια. Στη θύρα εξόδου του συζεύκτη που αντιστοιχεί το υπόλοιπο 99% τοποθετήθηκε ένας δεύτερος οπτικός ενισχυτής (EDFA 2) ο οποίος εκπέμπει στην έξοδο του ικανή ισχύ ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή σε έναν παλμογράφο της ακολουθίας στην έξοδο του διακόπτη που περιέχει την πληροφορία για τους δυναμικούς χρόνους του. Όπως ήδη σημειώθηκε, το οπτικό σήμα ανιχνεύτηκε από έναν παλμογράφο δειγματοληψίας (Sampling Oscilloscope) με ηλεκτρικό εύρος ζώνης στα 40 GHz, έχοντας πρώτα υποστεί φιλτράρισμα από ένα ζωνοπερατό οπτικό φίλτρο (Optical Bandpass Filter - OBPF) με εύρος διέλευσης $\Delta\lambda=1\text{nm}$. Το οπτικό φίλτρο χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη για την απομάκρυνση του θορύβου που εισέρχεται στο σήμα λόγω της παρουσίας του EDFA και δυσκολεύει την αξιόπιστη καταγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς του διακόπτη στον παλμογράφο.



Εικόνα 26: Πειραματική διάταξη αξιολόγησης της στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς του Si-DLSP A-MZI διακόπτη με Cyclomer.

Η Εικόνα 27 έχει συμπεριλάβει τις απώλειες της δομής του πλασμονικού διακόπτη (plasmonic switch) χωρίζοντας τη δομή σε διαφορετικά τμήματα. Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας μια πηγή λέιζερ συνεχούς κύματος (Continuous Wave –CW) η οποία μεταβάλλει το μήκος κύματος της ώστε να προσδιοριστούν οι ελάχιστες απώλειες της δομής του διακόπτη. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει τις απώλειες σύζευξης από την ίνα της συστοιχίας (fiber array) προς/από το τσιπ στο σταθμό εργασίας. Οι απώλειες αυτές αθροίζονται στα 15.1dB και περιλαμβάνουν τις δομές εισόδου/εξόδου. Το παθητικό τμήμα των SOI κυματοδηγών είναι υπεύθυνο για επιπλέον απώλειες 7.36dB λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες διάδοσης που μετρήθηκαν σε προηγούμενη ενότητα για τη δομή μετά την πλασμονική εναπόθεση αλλά και το μήκος των κυματοδηγών στη μάσκα (mask layout). Αφαιρώντας τις απώλειες του Si τμήματος της δομής (Si part) από τη συνολική απώλεια που μετρήθηκε στον διακόπτη (42.86dB), υπολογίστηκε η απώλεια που αναφέρεται στο πλασμονικό μέρος της δομής και περιλαμβάνει τις διηλεκτρικές λωρίδες του Cyclomer στους ενεργούς βραχίονες του MZI που επικοινωνούν με τις διεπαφές Si-to-DLSP με την Si παθητική πλατφόρμα. Οι απώλειες αυτές υπολογίζονται στα 20.4dB και καταμερίζονται σε απώλειες διάδοσης για μήκος πλασμονικών κυματοδηγών $L_{DLSP}=2\cdot 40\text{ }\mu\text{m}=80\text{ }\mu\text{m}$ στους δύο βραχίονες και τα τέσσερα σημεία διεπαφής (Si-to-DLSP) της δομής.

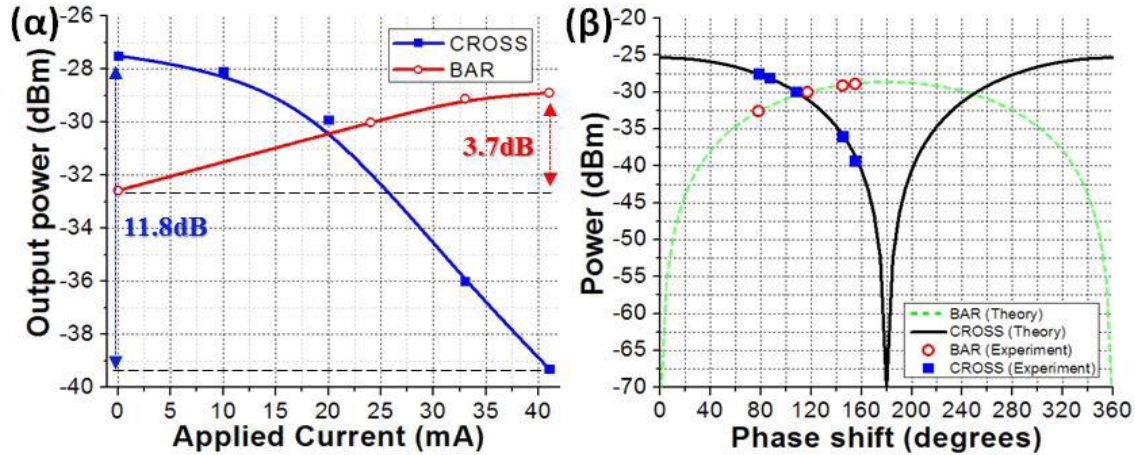
Υποθέτοντας απώλειες διάδοσης στον DLSPP κυματοδηγό από Cyclomer πανομοιότυπες με τους κυματοδηγούς του PMMA (0.1dB/μm), υπολογίζεται μια ικανοποιητική επίδοση για τα σημεία διεπαφής της Si παθητικής πλατφόρμας με την ενεργή DLSPP πλατφόρμα που χαρακτηρίζονται από απώλειες κοντά στα 3dB για κάθε σημείο διεπαφής.



Εικόνα 27: Παρουσίαση της δομής του ετερο-ολοκληρωμένου πλασμονικού διακόπτη MZI στην SOI παθητική πλατφόρμα. Η κατηγοριοποίηση των απωλειών ισχύος σε επιμέρους τμήματα υποδεικνύει τις διαφορετικές απώλειες που επιμερίζονται στους Si συζεύκτες περίθλασης (Si GCs), στους SOI κυματοδηγούς (SOI WGs) και στους ενεργούς DLSPP βραχίονες με την αντίστοιχη δομή σύζευξης (Si-to-DLSPP coupling).

Η Εικόνα 28(α) παρουσιάζει την καμπύλη στατικού προσδιορισμού της δομής του διακόπτη MZI κατά την έγχυση DC ρεύματος σε ένα εύρος τιμών που εκτείνεται από $I=0\text{mA}$ έως $I=41\text{mA}$. Οι πειραματικές τιμές που προσδιορίστηκαν κατά τις μετρήσεις στατικού χαρακτηρισμού αναπαριστούν τη συνάρτηση μεταφοράς για τις θύρες εξόδου CROSS και BAR του A-MZI όπου παριστάνεται η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος εξόδου για διαφορετικές τιμές του ρεύματος οδήγησης της δομής. Εφαρμόζοντας, λοιπόν, στον άνω κλάδο του A-MZI ένα ηλεκτρικό ρεύμα με τιμή που αυξάνει μέχρι τα 41 mA, το επίπεδο οπτικής ισχύος στην κατάσταση CROSS του υβριδικού διακόπτη μειώνεται, καταλήγοντας σε μία τιμή λόγου σβέσης (ER) που φτάνει τα 11.8 dB για το διάστημα τιμών ρεύματος που μελετήθηκε [0-41mA]. Η συμμετρία στις θύρες εξόδου του διακόπτη αποτυπώνεται στην κατάσταση BAR καθώς η τιμή της ισχύος μειώνεται για αυξημένες τιμές του ρεύματος έγχυσης όπως αναμένεται [5.56]. Υπακούοντας στη διατήρηση της οπτικής ισχύος στις θύρες εξόδου του διακόπτη, μετρήθηκε ένας διαφορικός λόγος στο εύρος τιμών που μελετήθηκε ίσο με 3.7dB για την κατάσταση BAR του διακόπτη. Σημειώνεται πως κατά τη διάρκεια της μέτρησης αυτής, χρησιμοποιήθηκε ένα οπτικό σήμα

από μία CW πηγή λέιζερ με ισχύ εισόδου κοντά στα +16dBm αφού ενισχύθηκε από έναν EDFA πριν από την είσοδο του στο τσιπ.



Εικόνα 28: (α) Πειραματικές συναρτήσεις μεταφοράς του βασισμένου σε Cyclomer A-MZI στις θύρες εξόδου του CROSS και BAR κατά το στατικό θερμο-οπτικό χαρακτηρισμό του. (β) Θεωρητικές συναρτήσεις μεταφοράς ενός συμμετρικού MZI στις θύρες εξόδου του CROSS και BAR σε σύγκριση με τις πειραματικές που δείχνουν την περιοχή λειτουργίας της κατασκευασμένης δομής κατά τη διεξαγωγή του πειράματος.

Η εικόνα 28(β) χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η ολίσθηση φάσης ($\Delta\phi$) που επιβάλλεται μέσω του θερμο-οπτικού ελέγχου του DLSPP βραχίονα. Για το σκοπό αυτό, επιχειρήθηκε η προβολή των τιμών οπτικής ισχύος που διαπιστώθηκαν στην έξοδο του διακόπτη για τις δύο καταστάσεις (BAR&CROSS) πάνω στην τροποποιημένη συνάρτηση μεταφοράς ενός συμβολόμετρου MZI στην περίπτωση που είναι εφοδιασμένο με συζεύκτες ισχύος ~50/50 ενώ οι βραχίονες του εισάγουν οπτικές απώλειες στα πεδία των κυματοδηγούμενων DLSPP ρυθμών με μικρές διαφορές μεταξύ των δύο βραχιόνων $\Delta P \sim 0$. Για την επίτευξη αυτού του υπολογισμού των τιμών της φάσης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις που εκφράζουν τις (κανονικοποιημένες στη μονάδα) τιμές ισχύος στις καταστάσεις ενός διακόπτη MZI που είναι εφοδιασμένος με θερμο-οπτικά ελεγχόμενο βραχίονα [5.57]. Σημειώνεται πως κατά την εφαρμογή των συναρτήσεων μεταφοράς για τον υπολογισμό των τιμών της φάσης έχουν συμπεριληφθεί οι διορθώσεις των λόγων σύζευξης και των διαφορικών απωλειών με συντελεστές C_1 και C_2 με τιμές ~0.92 και ~0.97. Οι τιμές αυτές έχουν συμπεριληφθεί ώστε να ταιριάζουν με τις πειραματικές τιμές των τιμών ισχύος ελαχιστοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές των διαφορών:

$$P_{CROSS} = \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot C_1 \cdot \cos(\phi_0 - \Delta\phi_{TO}) \right] \quad (5.8)$$

$$P_{BAR} = \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot C_2 \cdot \cos(\phi_0 - \Delta\phi_{TO}) \right]$$

Αρχικά υπολογίσαμε την αρχικοποίηση της φάσης (πόλωσης) της συνάρτησης μεταφοράς του ασύμμετρου συμβολόμετρου MZI που σχεδιάστηκε να έχει αρχική φάση $\varphi_0 = \pi/2$ όπως έχει επεξηγηθεί σε προηγούμενες ενότητες. Λαμβάνοντας υπόψη τις αρχικές τιμές των καταστάσεων του διακόπτη (BAR&CROSS) χωρίς την παρουσία ηλεκτρικού ελέγχου εκτιμήθηκε η αρχική φάση της συνάρτησης μεταφοράς να είναι $\varphi_0 = 77^\circ$, κοντά στην τιμή που σχεδιάστηκε για τον συμβολομετρικό διακόπτη. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση φάσης που εισάγει ο θερμο-οπτικός μηχανισμός στη συνάρτηση μεταφοράς των συμπληρωματικών καταστάσεων προβάλλαμε τις μετρημένες τιμές ισχύος ώστε να εκτιμηθεί η ολίσθηση φάσης $\Delta\varphi_{TO}$ λόγω της έγχυσης ρεύματος στον πάνω βραχίονα του διακόπτη. Η εκτίμηση για την ολίσθηση φάσης λόγω της θέρμανσης της διηλεκτρικής λωρίδας του Cyclomer υπολογίζεται να είναι $\Delta\varphi \sim 78^\circ$ που προστιθέμενη στην αρχική πόλωση της συνάρτησης μεταφοράς καταλήγει σε μια διαφορετική έκφραση της φάσης μεταξύ των δύο βραχιόνων $\Delta\varphi_{tot} \sim 155^\circ$. Υπολογίστηκε με καλή ακρίβεια η συνολική ολίσθηση φάσης ($\Delta\varphi$) που επιβλήθηκε μέσα από τον ενεργό έλεγχο της δομής μέσω της έγχυσης ρεύματος $I = 41\text{mA}$.

Σχετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας που αντιστοιχούσε στην εν λόγω στροφή φάσης ($\Delta\varphi \sim 77^\circ$), αυτή εκτιμήθηκε να είναι $\Delta T \sim 41.5^\circ\text{K}$. Η συγκεκριμένη τιμή υπολογίστηκε με βάση τον τύπο για την ολίσθηση φάσης $\Delta\varphi = 2\pi/\lambda \cdot L \cdot \Delta T \cdot \partial n/\partial T$, ο οποίος συσχετίζει το μήκος κύματος λ , το μήκος $L = 40\mu\text{m}$ του θερμαινόμενου DLSPP κυματοδηγού, τη μεταβολή θερμοκρασίας ΔT και το θερμο-οπτικό συντελεστή (TOC) $\partial n/\partial T = -2 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ του Cyclomer με τη θερμο-οπτικά προκληθείσα στροφή φάσης $\Delta\varphi < 0$. Το ρεύμα $I = 41\text{mA}$ που χρησιμοποιήθηκε για τη θέρμανση της διηλεκτρικής λωρίδας του πλασμονικού κυματοδηγού, ήταν υπεύθυνο για την αύξηση της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής φόρτισης του πολυμερούς κατά $\Delta T \sim 41.5^\circ\text{K}$.

Για να υπολογίσουμε την απαιτούμενη κατανάλωση ισχύος για τη συγκεκριμένη επίδειξη του διακόπτη απαιτείται ο υπολογισμός της αντίστασης του μεταλλικού στρώματος (Au) το οποίο αποτελεί τη θερμική πηγή μέσω του μηχανισμού Joule. Για τον υπολογισμό της τιμής της αντίστασης του στρώματος του μεταλλικού στρώματος χρησιμοποιήσαμε τον τύπο της ηλεκτρικής αντίστασης που συνδέει την ειδική αντίσταση του μετάλλου (ρ_0) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της μεταλλικής δομής σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο $R = \rho_0 \cdot L/A$. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των μετρήσεων έπρεπε να λάβουμε υπόψη τη μεταβολή της τιμής της αντίστασης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του μετάλλου καθώς για θερμοκρασίες υψηλότερες από τη θερμοκρασία αναφοράς ($T = 20^\circ\text{C}$) αυξάνεται η αντίσταση των μετάλλων με γραμμικό τρόπο [5.58]. Για να συμπεριλάβουμε την εξάρτηση αυτή και να υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης μετά από την εφαρμογή του ρεύματος $I = 41\text{mA}$ εφαρμόσαμε τους παρακάτω τύπους:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha \cdot T) \Rightarrow \Delta\rho = \rho_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

$$R_{hot} = (\rho_0 + \Delta\rho) \cdot \frac{L}{A} \quad (5.9)$$

Στις παραπάνω σχέσεις χρησιμοποιήσαμε την ειδική αντίσταση του χρυσού σε θερμοκρασία $T=20^{\circ}\text{C}$ και το συντελεστή της θερμοκρασιακής μεταβολής της ειδικής αντίστασης του μετάλλου [5.59]. Χρησιμοποιώντας την τιμή για την αύξηση της θερμοκρασίας που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα $\Delta T=41.5^{\circ}\text{K}$, η αντίσταση του μεταλλικού στρώματος υπολογίστηκε να είναι $\sim 4.8\Omega$ ($T=293^{\circ}\text{K}$) και $\sim 5.2\Omega$ ($T=334.5^{\circ}\text{K}$) στη θερμοκρασία αναφοράς και μετά τη θέρμανση αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές παρέχουν την πληροφορία για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ισχύος που απαιτεί ο διακόπτης και δίνεται από τον τύπο: $P=I^2 \cdot R$. Η τιμή που υπολογίζεται για την τιμή του ρεύματος ελέγχου στα $I=41\text{mA}$ υπολογίζεται να είναι $P=8.7\text{mWs}$.

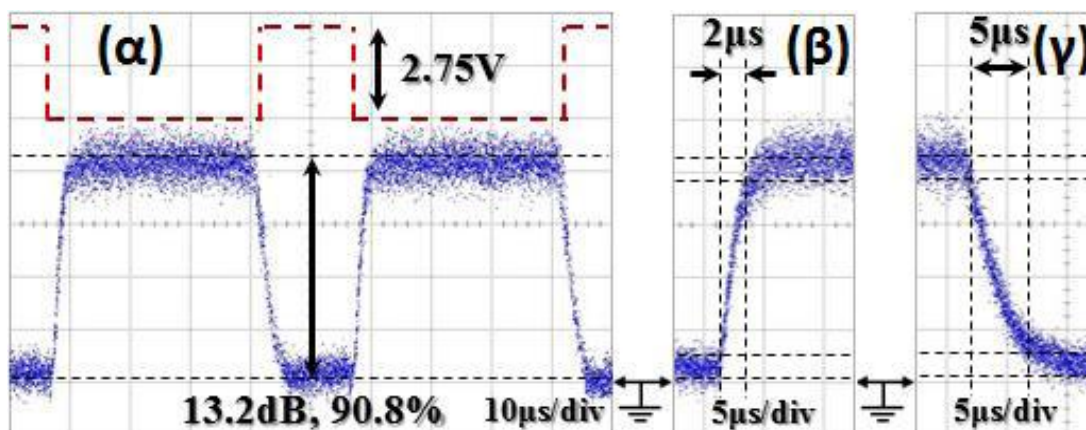
Εάν επιδιωχθεί ο υπολογισμός της απαιτούμενης κατανάλωσης για τη θεωρητική συνθήκη που απαιτείται στον ασύμμετρο MZI διακόπτη για λειτουργία μεταγωγής με $\Delta\varphi=\pi/2$ αρκεί να υπολογιστούν κατά σειρά η απαιτούμενη αύξηση της θερμοκρασίας της διηλεκτρικής λωρίδας και η αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύς. Κάνοντας την παραδοχή για την τιμή του ρεύματος ελέγχου που είναι ικανό να προκαλέσει αυτήν την αύξηση της θερμοκρασίας με βάση τη γεωμετρία της δομής του διακόπτη σύμφωνα με τους τύπους που δίνονται παρακάτω υπολογίζεται η τιμή της κατανάλωσης ισχύος στα 12mWs [5.60,5.61]. Η τιμή αυτή είναι ικανή να οδηγήσει στη ιδανική λειτουργία ενός ασύμμετρου συμβολομετρικού διακόπτη ο οποίος είναι πολωμένος στη συνάρτηση μεταφοράς του στην τιμή της φάσης $\varphi_0=\pi/2$ (quadrature point) [5.43]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right| \cdot \Delta T = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \Delta T_{\pi/2} = \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{1}{L \cdot \left| \frac{\partial n}{\partial T} \right|} = 48.5^{\circ}\text{K} \quad (5.10)$$

$$P = I^2 \cdot R = I^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta T) \cdot \frac{L}{A} \sim 12\text{mWs}$$

Το τελευταίο βήμα χαρακτηρισμού του συμβολομετρικού διακόπτη MZI με Cyclomer περιλαμβάνει τη δυναμική του λειτουργία κάνοντας χρήση της ακολουθίας ηλεκτρικών ορθογώνιων ηλεκτρικών παλμών που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα. Χρησιμοποιήθηκε μια ηλεκτρική ακολουθία παλμών συχνότητας 20KHz με κύκλο λειτουργίας (Duty Cycle) 30% και πλάτος από κορυφή σε κορυφή ίσο με $V_{p-p}=2.75\text{V}$. Το πλάτος της ακολουθίας είναι ικανό να προκαλέσει τη διαρροή ρεύματος ίσο με $I \sim 41\text{mA}$ που απαιτείται για να διαπιστωθεί η λειτουργία του διακόπτη όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Η Εικόνα 29(α) παρουσιάζει με διακεκομμένη γραμμή την ακολουθία ελέγχου ενώ απεικονίζεται και το αποτέλεσμα της εξόδου του πλασμονικού διακόπτη MZI όπως καταγράφηκε στον παλμογράφο. Η καταγραφή περιλαμβάνει τη δυναμική απόκριση του διακόπτη για την κατάσταση CROSS του διακόπτη όπως περιγράφηκε αναλυτικά στις καμπύλες στατικού προσδιορισμού. Ως σήμα εισόδου χρησιμοποιήθηκε μια πηγή CW λέιζερ σε μήκος κύματος $\lambda=1552.456\text{nm}$. Η πειραματική μέτρηση της εξόδου του διακόπτη επέδειξε μια καταπίεση της στάθμης ισχύος παρουσία

του παλμού ελέγχου κατά 13.2dB όπως αποτυπώνεται στο σχήμα. Λαμβάνοντας υπόψη και τις στάθμες ισχύος του διακόπτη υπολογίζεται ένα βάθος διαμόρφωσης (Modulation Depth –MD) του διακόπτη κοντά στο $MD(\%) = 90.8\%$. Η υψηλή τιμή του βάθους διαμόρφωσης που υπολογίζεται από τον τύπο $MD(\%) = (V_{max} - V_{min} / V_{max} + V_{min}) \cdot 100\%$ είναι αποτέλεσμα της καταπίεσης της στάθμης χαμηλής τάσης (V_{min}) κοντά στο σημείο της γείωσης ($V_{GD}=0$).



Εικόνα 29: (α) Έξοδος στη θύρα CROSS του Si-DLSPP (Cyclomer) A-MZI για την περίπτωση δυναμικής θερμο-οπτικής λειτουργίας με ηλεκτρικούς παλμούς διάρκειας 15 µs και ρυθμού επανάληψης στα 20 KHz, καθώς και οι αντίστοιχοι χρόνοι (β) ανόδου και (γ) καθόδου (10%-90%).

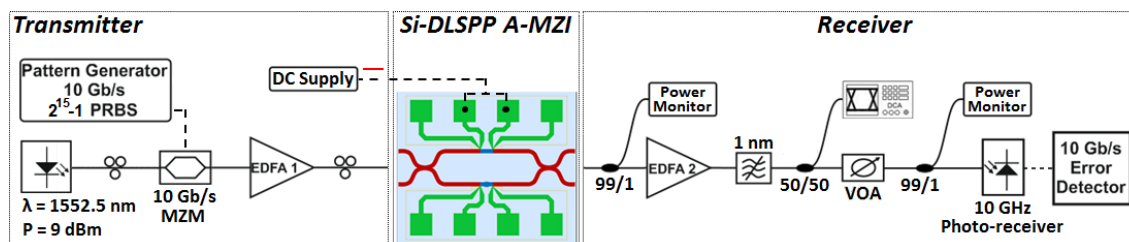
Στις Εικόνες 29(β) και 29(γ) εστιάζοντας στην κυματομορφή προσδιορίζονται χρόνοι ανόδου/καθόδου (rise/fall times) του διακόπτη στην κατάσταση CROSS του διακόπτη. Οι χρόνοι αυτοί προσδιορίζονται από τον υπολογισμό του διαστήματος της μετάβασης από το 10% στο 90% μεταξύ των δύο σταθμών (ελάχιστη και μέγιστη καταγραφή αντίστοιχα) του διακόπτη. Αξίζει να σημειωθεί πως οι χρόνοι ανόδου/καθόδου που σημειώθηκαν είναι παρόμοιοι με τους χρόνους απόκρισης συμβολομετρικών δομών τεχνολογίας πυριτίου και πλασμονικής τεχνολογίας που βασίζονται σε πολυμερές PMMA [5.43], [5.55]. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει το ρόλο που έχει η επιλογή του υποβάθρου (buffer) που επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του συστήματος.

Σχολιάζοντας τη δυναμική συμπεριφορά του διακόπτη MZI με Cyclomer, θα μπορούσαμε να προσθέσουμε τις εναλλακτικές επιλογές για τη βελτίωση της ταχύτητας λειτουργίας του διακόπτη με μικρότερους χρόνους ανόδου/καθόδου. Όπως έχει ήδη σημειωθεί σε προηγούμενη ενότητα, η επίτευξη γρήγορης απόκρισης του διακόπτη βασίζεται κυρίως στα χαρακτηριστικά του υποβάθρου (buffer) που βρίσκεται κάτω από τη δομή του DLSPP κυματοδηγού. Πιο συγκεκριμένα, αναλυτικές μελέτες έχουν αναδείξει την εξάρτηση των χρόνων μεταγωγής του θερμο-οπτικού διακόπτη A-MZI από τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού του υποβάθρου (buffer) καθώς και το πάχος του [5.25]. Μικρές τιμές θερμικής αγωγιμότητας οδηγούν σε αργές αποκρίσεις του διακόπτη με μεγάλους χρόνους απόκρισης, ενώ αντίστροφα υψηλές τιμές θερμικής αγωγιμότητας διασφαλίζουν χαμηλούς χρόνους ανόδου/καθόδου στο διακόπτη. Μειώνοντας επίσης το πάχος του υποβάθρου (thickness of buffer), οδηγούμαστε σε γρήγορες δυναμικές του διακόπτη με το κόστος της μεγαλύτερης κατανάλωσης για την ισχύ οδήγησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, είναι ευκρινές πως οι χρόνοι ανόδου και καθόδου (rise/fall times) μετρήθηκαν να είναι 2/5μs αντίστοιχα και περιορίζονται από το υλικό του στρώματος του υποβάθρου (SiO₂) και το πάχος του όπως σχεδιάστηκε (~1.8μm). Σε αυτό το πλαίσιο, οι χρόνοι του διακόπτη μπορούν να βελτιωθούν (μειωθούν) εφόσον επιλεγεί ένα εναλλακτικό υλικό με υψηλή θερμική αγωγιμότητα και να μειωθεί το πάχος κατά τη σχεδίαση του. Ωστόσο, ένας συμβιβασμός μεταξύ των δυναμικών του διακόπτη και της ενεργειακής του κατανάλωσης πρέπει να προβλεφθεί κατά την εναλλακτική προσέγγιση καθώς η επιλογή αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μια απαίτηση υψηλότατης κατανάλωσης ισχύος που απαιτείται για να θερμανθεί στα επιθυμητά επίπεδα η διηλεκτρική λωρίδα του κυματοδηγού. Χαρακτηριστική επιλογή υλικού του υποβάθρου για δραστηκή μείωση των χρόνων του διακόπτη μπορεί να αποτελέσει το πολυμερές Cytop που χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή θερμικής αγωγιμότητας (318W/mK) και είναι ~225 φορές μεγαλύτερη από την τιμή για το SiO₂ που υπάρχει στη δομή που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή. Το πολυμερές Cytop το οποίο ανήκει στην κατηγορία των άμορφων φθοροπολυμερών (amorphous fluoropolymer) έχει επιδειχθεί στη βιβλιογραφία για την ανάπτυξη πλασμονικών δομών και χρησιμοποιείται ως υλικό διηλεκτρικής λωρίδας [5.58,5.62,5.63] αλλά και ως υπόβαθρο σε θερμο-οπτικούς διακόπτες MZI [5.64].

5.4.2 Πειραματική επίδειξη λειτουργίας διακόπτη σε περιβάλλον κίνησης πληροφορίας στα 10Gb/s

Το τελευταίο στάδιο της πειραματικής αξιολόγησης του πλασμονικού διακόπτη MZI περιλαμβάνει τη λειτουργία του διακόπτη με οπτικό σήμα πληροφορίας που μεταφέρει δεδομένα συνεχούς κίνησης (continuous traffic) στα 10Gb/s. Σκοπός του πειράματος είναι η διερεύνηση της δυνατότητας των DLSP κυματοδηγών να μεταφέρουν σήματα πληροφορίας χωρίς να εισάγεται ισχυρή παραμόρφωση σε αυτά αλλά και να επιδειχθεί η λειτουργία του διακόπτη για ρεύματα πληροφορίας στα 10Gb/s στις δύο καταστάσεις του διακόπτη (ON&OFF). Η Εικόνα 30 απεικονίζει την πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε για την επίδειξη του πειράματος στα 10Gb/s και αποτελείται από τρία μέρη: την πηγή στα 10Gb/s, τη δομή του πλασμονικού A-MZI διακόπτη (Si-DLSP A-MZI) και το δέκτη της διάταξης για την αξιολόγηση της λειτουργίας του διακόπτη.



Εικόνα 30: Πειραματική διάταξη που εγκαταστάθηκε για τη διεξαγωγή του πειράματος μεταγωγής δεδομένων πληροφορίας σε ρυθμό 10Gb/s κάνοντας χρήση του DLSP διακόπτη A-MZI για τις δυνατές καταστάσεις του διακόπτη.

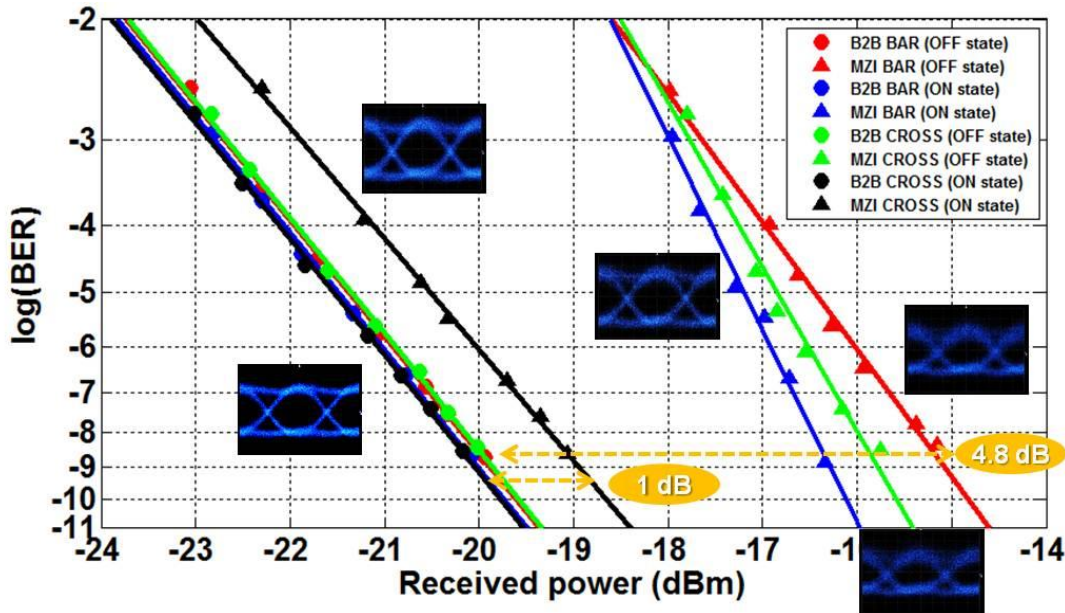
Ο πομπός της διάταξης αποτελείται από μια πηγή συνεχούς κύματος (Continuous Wave – CW) η οποία εκπέμπει σε ένα μήκος κύματος $\lambda=1552.487\text{nm}$ ένα οπτικό σήμα ισχύος +9dBm. Το μήκος κύματος επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ταυτίζεται με το μέγιστο της φασματικής απόκρισης του συζεύκτη περιθλασης (Grating Coupler-GC). Στη συνέχεια, το σήμα εισέρχεται σε ένα ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή πλάτους (Ti:LiNbO₃) ο οποίος οδηγείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα πληροφορίας στα 10Gb/s. Τα δεδομένα στα 10Gb/s εμφανίζονται με τη μορφή ακολουθίας 15^{ης} τάξης PRBS (Pseudo Random Bit Sequence 15 – PRBS 15) για να συμπεριληφθεί στην επίδοση του συστήματος η εμφάνιση φαινομένων εξάρτησης από το προφίλ της κίνησης (patterning effects) [5.65]. Η ακολουθία στην έξοδο του διαμορφωτή αποτελεί ένα σήμα πληροφορίας NRZ (Non Return to Zero – NRZ) με ρυθμό μετάδοσης 10Gb/s το οποίο ενισχύεται από EDFA1 (Erbium Doped Fiber Amplifier – EDFA) με ισχύ εξόδου στα +20dBm. Η παρουσία του ενισχυτή επεκτείνει το διαθέσιμο εύρος ισχύος στη συγκεκριμένη πειραματική διάταξη που υποφέρει από τις απώλειες του ετερο-ολοκληρωμένου πλασμονικού διακόπτη στην Si πλατφόρμα. Μετά τον EDFA1 το σήμα αφού αποκτήσει την επιθυμητή TM (Transverse Magnetic - TM) πολωτική κατάσταση που υποστηρίζεται από την πλασμονική δομή εισέρχεται στο διακόπτη με τη χρήση μιας συστοιχίας μονότροπων ινών (fiber array) στο σταθμό εργασίας (probe station). Το ισοζύγιο ισχύος στη συγκεκριμένη δομή έχει ήδη περιγραφεί στην παραπάνω ενότητα για τα δύο μέρη της ετερο-ολοκληρωμένης πλατφόρμας.

Ο ενεργός έλεγχος του διακόπτη ήταν εφικτός κάνοντας χρήση μιας πηγής συνεχούς ρεύματος (Direct Current-DC) που παρείχε ένα σήμα ελέγχου που εφαρμόζεται στον πάνω βραχίονα του διακόπτη A-MZI. Σημειώνεται πως η λειτουργία του ενεργού ελέγχου κατέστη εφικτή στα πλαίσια της DC λειτουργίας της δομής για να διαπιστωθεί η επίδοση των δύο καταστάσεων (ON&OFF) στις δύο λειτουργίες του πλασμονικού διακόπτη (BAR&CROSS).

Στην πλευρά του δέκτη, χρησιμοποιήθηκε ένας οπτικός ενισχυτής (EDFA2) για να αντισταθμίσει τις οπτικές απώλειες της διάταξης μετά την έξοδο του τσιπ. Χρησιμοποιήθηκε και στην περίπτωση αυτή ένας συζεύκτης ισχύος 99/1 για να παρακολουθείται η ευθυγράμμιση (alignment) της σύζευξης της δομής στο σταθμό εργασίας. Στην έξοδο του EDFA2 χρησιμοποιείται ένα ζωνοπερατό οπτικό φίλτρο (Optical Bandpass Filter -OBPF) με εύρος ζώνης διέλευσης $\Delta\lambda=1\text{nm}$ το οποίο χρησιμοποιείται για να απομακρυνθεί ο θόρυβος εκτός ζώνης (outband noise) του ASE (Amplified Spontaneous Emission – ASE) του ενισχυτή πριν την αξιολόγηση. Στην έξοδο του φίλτρου εγκαταστάθηκε η διάταξη για τη διεξαγωγή των μετρήσεων BER (Bit Error Rate – BER) που περιλαμβάνει οπτική διάταξη μεταβλητής εξασθένισης (Variable Optical Attenuator – VOA), τη φωτοδίοδο PIN με εύρος ζώνης στα 10GHz και στο τέλος έναν ανιχνευτή σφαλμάτων για τη διεξαγωγή BER μετρήσεων στα 10Gb/s.

Στη συνέχεια, αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα των BER μετρήσεων για την περίπτωση λειτουργίας του πλασμονικού διακόπτη A-MZI εφοδιασμένο με Cyclomer για τις δυνατές καταστάσεις του διακόπτη. Στην Εικόνα 31 παριστάνονται οι καμπύλες BER που αποκτήθηκαν για μία PRBS ακολουθία δεδομένων 15ης τάξης στα 10 Gb/s στις θύρες

BAR και CROSS του A-MZI κατά τις καταστάσεις λειτουργίας ON και OFF σε σύγκριση με τις μετρήσεις Back-to-Back (B2B) που πραγματοποιήθηκαν για κάθε περίπτωση μελέτης. Στο ίδιο σχήμα περιλαμβάνονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα ματιού (eye diagrams) ως ένθετες εικόνες για να διαπιστωθεί η υψηλή ποιότητα της πληροφορίας στο δέκτη.



Εικόνα 31: Καμπύλες BER και διαγράμματα ματιού (ένθετα) για ακολουθίες δεδομένων 15ης τάξης στα 10 Gb/σε διάταξη BtB καθώς και στις καταστάσεις λειτουργίας ON και OFF και για τις δύο θύρες εξόδου του Si-DLSPP (Cyclomer) MZI.

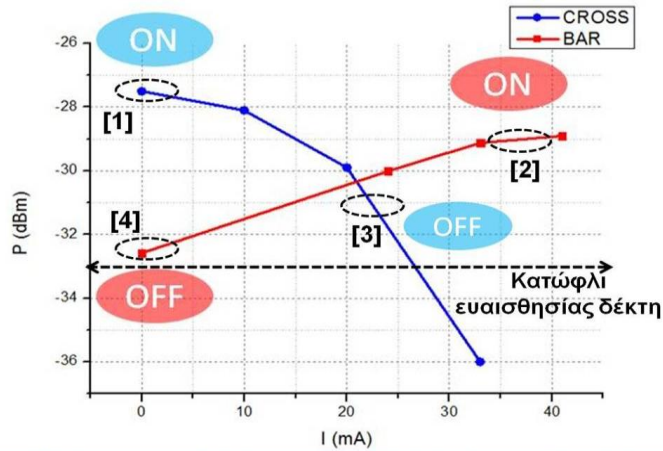
Στη συνέχεια θα δοθούν οι περιγραφές των καταστάσεων του διακόπτη όπως περιγράφονται στην καμπύλη των BER μετρήσεων. Στο πεδίο του ενεργού θερμο-οπτικού ελέγχου, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές λειτουργίες για να ελέγξουν την κατάσταση του διακόπτη και αντιστοιχούν στην “ψυχρή” (“COOL”) απουσία του ρεύματος ελέγχου ($I=0$) και στη “θερμή” (“HOT”) κατάσταση του διακόπτη όταν εφαρμοστεί ένα ρεύμα ελέγχου και προκαλέσει τη θέρμανση του DLSPP κυματοδηγού. Οι δύο συνθήκες θερμο-οπτικού ελέγχου (COOL&HOT) επιτρέπουν τον ορισμό των δύο καταστάσεων του διακόπτη που περιγράφονται ON και OFF στις BER καμπύλες. Η κατάσταση ON μίας θύρας αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ισχύ εξόδου μεταξύ της “COOL” (δηλαδή όταν δεν εφαρμόζεται DC ρεύμα) και της «θερμής» (παρουσία DC ρεύματος) λειτουργίας του A-MZI που λαμβάνεται σε αυτή τη θύρα. Αντίστροφα, η μικρότερη ισχύς εξόδου μεταξύ των δύο λειτουργιών του A-MZI που παρατηρείται σε μία θύρα σχετίζεται με την κατάσταση OFF της θύρας αυτής. Στην περίπτωση του πλασμονικού διακόπτη A-MZI που μελετάται, η κατάσταση ON για τη θύρα CROSS αναφέρεται στην απουσία ηλεκτρικού ρεύματος (A-MZI CROSS ON για $I=0$ mA), καθώς οποιαδήποτε έγχυση DC ρεύματος κατέληξε σε χαμηλότερες τιμές της οπτικής ισχύος που ελήφθη σε αυτή τη θύρα (MZI CROSS OFF, $I=22$ mA). Κατά τον ίδιο τρόπο, δεδομένου ότι μεγαλύτερες τιμές ισχύος αποκτήθηκαν για

τη θύρα BAR όταν εφαρμοζόταν ηλεκτρικό ρεύμα (MZI BAR ON, $I=35$ mA), η απουσία ρεύματος οδήγησης σχετίζεται με την κατάσταση OFF της θύρας BAR (MZI BAR OFF, $I=0$ mA). Είναι εμφανής η συμπληρωματικότητα που εμφανίζεται στις μεταβάσεις των καταστάσεων ON και OFF για τη λειτουργία του διακόπτη στις συνθήκες CROSS και BAR. Πιο συγκεκριμένα, καθώς αυξάνεται το ρεύμα έγχυσης σε μια κατάσταση, η αύξηση της ισχύος θα διαπιστώνεται σε μία κατάσταση του διακόπτη ενώ την ίδια στιγμή θα μειώνεται στην άλλη κατάσταση.

Με βάση την παραπάνω συνθήκη για τις καταστάσεις του διακόπτη, αξιολογούνται τα αποτελέσματα από τις BER καμπύλες που περιλαμβάνονται στην Εικόνα 31. Είναι εμφανές πως για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν κατά τη λειτουργία του διακόπτη (ON&OFF για την CROSS, ON&OFF για την BAR) διαπιστώθηκε επιτυχής μετάδοση δεδομένων στα 10Gb/s χωρίς σφάλματα (καθώς ήταν δυνατή η μέτρηση λαθών με ρυθμούς σφαλμάτων μικρότερους από 10^{-9} ($BER < 10^{-9}$). Για τη συγκεκριμένη τιμή του ρυθμού σφαλμάτων ($BER = 10^{-9}$), μετρήθηκαν ποινές ισχύος (power penalty) μεταξύ των σημάτων πληροφορίας στην έξοδο του διακόπτη και της αντίστοιχης τιμής της B2B μέτρησης που κυμαίνονται από 1dB έως 4.8dB για τις δύο δυνατές καταστάσεις του διακόπτη (ON&OFF) όπως περιγράφονται για τις BAR&CROSS επιλογές του A-MZI διακόπτη. Οι BER μετρήσεις για τις τέσσερις καμπύλες B2B αντιστοιχούν σε διαδοχικές μετρήσεις της καμπύλης λαθών και ουσιαστικά αντιστοιχούν σε μία κοινή καμπύλη καθώς οι αμελητέες διαφορές στις καμπύλες αντιστοιχούν ουσιαστικά σε μετρητικά σφάλματα της πειραματικής αξιολόγησης. Σχετικά με τα αποτελέσματα των BER μετρήσεων, η ελάχιστη ποινή ισχύος του 1dB ελήφθη για την κατάσταση CROSS ON ($I_1=0$ mA) του A-MZI, ενώ ποινές ισχύος ίσες με 3.6dB, 4.1dB και 4.8dB μετρήθηκαν για τις καταστάσεις BAR ON ($I_2=35$ mA), CROSS OFF ($I_3=22$ mA) και BAR OFF ($I_4=0$ mA), αντίστοιχα. Ο μηχανισμός που κρύβεται πίσω από τις αυξανόμενες τιμές της ποινής ισχύος (power penalty) είναι η δραστική μείωση του οπτικού σηματοθορυβικού λόγου (Optical Signal-to-Noise Ratio-OSNR) που διαπιστώνεται καθώς μειώνεται η τιμή της οπτικής ισχύος στην έξοδο του A-MZI πλασμονικού διακόπτη.

Η Εικόνα 32 παρουσιάζει σε ένα διάγραμμα τις BER μετρήσεις που διαπιστώθηκαν για τον πλασμονικό διακόπτη για διαφορετικές τιμές ρεύματος ελέγχου για τις καταστάσεις BAR και CROSS. Είναι εμφανής η αύξηση της τιμής της ποινής ισχύος (power penalty) για μειωμένες τιμές της ισχύος όπως συγκεντρώνονται στον πίνακα που συνοδεύει την καμπύλη των μετρήσεων. Οι μεγαλύτερες ποινές ισχύος (power penalty) σε αυτές τις τελευταίες περιπτώσεις οφείλονται στα χαμηλότερα επίπεδα ισχύος που εξέρχονταν από το διακόπτη και εισέρχονταν στον οπτικό ενισχυτή EDFA 2, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο το επίπεδο θορύβου, το οποίο με τη σειρά του επηρέασε την απόδοση της τιμής του BER στο δέκτη. Αξίζει να σημειωθεί πως ο προσδιορισμός των τιμών του BER πραγματοποιήθηκε για διαφορετικά ρεύματα οδήγησης στις καταστάσεις BAR ON (35 mA) και CROSS OFF (22 mA), δεδομένου ότι τιμές ρεύματος μεγαλύτερες από 22 mA κατά την εξέταση της θύρας CROSS κατέληξαν σε επίπεδα ισχύος εξόδου που ήταν κάτω από την απαιτούμενη ισχύ εισόδου του ενισχυτή στο δέκτη. Η ερμηνεία της ευαισθησίας

του δέκτη στη συγκεκριμένη διάταξη αποτυπώνεται και στη χρήση του κατώφλιου αναφοράς για την ευαισθησία που τοποθετείται σε τιμή λαμβανόμενης ισχύος κοντά στα 500nWs (-33dBm), κάτω από την οποία δεν είναι εφικτή η μέτρηση τιμής $BER < 10^{-9}$.



Μέτρηση	Ρεύμα ελέγχου [I]	Κατάσταση A-MZI Διακόπτη	Ποινή Ισχύος @BER<10 ⁻⁹
[1]	I=0mA	CROSS ON	1 dB
[2]	I=35mA	BAR ON	3.6dB
[3]	I=22mA	CROSS OFF	4.1dB
[4]	I=0mA	BAR OFF	4.8dB

Εικόνα 32: Καμπύλη ισχύος εξόδου του διακόπτη για τις δύο καταστάσεις του διακόπτη (ON&OFF) για διαφορετικές τιμές ρεύματος ελέγχου της δομής. Το κατώφλι ευαισθησίας στα 500nWs (-33dBm) σημειώνεται με σκοπό να ερμηνευτεί το περιθώριο λήψης στο δέκτη χωρίς σφάλματα ($BER < 10^{-9}$) στις BER καμπύλες της επίδοσης του συστήματος (Εικόνα 31). Η αντιστοίχιση των καταστάσεων του διακόπτη, των ρευμάτων ελέγχου και της BER επίδοσης εμφανίζονται στο συνοδευτικό πίνακα με τις τιμές των ποινών ισχύος (power penalties) να αντιστοιχούν στις μετρημένες BER καμπύλες.

5.4.3 Συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης του πλασμονικού διακόπτη A-MZI εφοδιασμένου με Cyclomer

Βασιζόμενοι στα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η πλασμονική τεχνολογία και πηγάζουν από τον ισχυρό χωρικό εντοπισμό του πεδίου (field localization) και τον αποτελεσματικό ενεργό έλεγχο (active control) του κυματοδηγούμενου ρυθμού, έχουν προταθεί αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις κυματοδηγών για την ολοκλήρωση λειτουργικών δομών. Τα δύο πλεονεκτήματα των πλασμονικών κυματοδηγών ορίζουν και το πλαίσιο αναφοράς για τη σύγκριση των επιδόσεων δομών που έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Στο πλαίσιο αυτό, έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός από μετρικά επίδοσης (Figure of Merits – FOMs) που σκοπό έχουν να προσφέρουν μια αξιολόγηση των δομών που επιδεικνύονται στη βιβλιογραφία [5.66,5.67]. Μια τομή που σκοπεύει στην κατηγοριοποίηση των συγκεκριμένων μετρικών επίδοσης σχετίζεται με το εάν αυτά αναφέρονται σε παθητικές δομές κυματοδηγών είτε εναλλακτικά σε ενεργές δομές, όπως η

περίπτωση του θερμο-οπτικού διακόπτη MZI που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής.

Σχετικά με το χαρακτηρισμό του ισχυρού εντοπισμού του πεδίου, είναι γνωστό από τη θεωρία της πλασμονικής κυματοδότησης πως εμφανίζεται ένας συμβιβασμός μεταξύ της επίτευξης υψηλής συγκέντρωσης του ρυθμού με μικρότερα μεγέθη του διαδομένου ρυθμού και των απωλειών κυματοδότησης. Ισχυρότερος εντοπισμός πεδίου και συνεπώς μικρότερη ενεργό επιφάνεια του πλασμονικού ρυθμού (effective mode area, S) εμφανίζεται με το κόστος των μεγαλύτερων ωμικών απωλειών καθώς μεγαλύτερο τμήμα του πεδίου θα κυματοδηγείται στο μέταλλο. Για την ποσοτικοποίηση της επίδοσης παθητικών πλασμονικών κυκλωμάτων που βασίζονται σε δομές κυματοδηγών ως προς αυτό το θεμελιώδη συμβιβασμό (trade-off) έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πλήθος μετρικών επιδόσεων με χαρακτηριστικότερο το FoM που συσχετίζει τα παραπάνω μεγέθη [5.68]:

$$M_1^A = 2\sqrt{\pi} \cdot \frac{L_{prop}}{\sqrt{S}} \quad (5.11)$$

Το παραπάνω μετρικό επίδοσης (Figure of Merit - FoM) αναπαριστά ένα ευθύ τρόπο ποσοτικής προσέγγισης του παραπάνω συμβιβασμού καθώς συσχετίζει το μήκος διάδοσης του πλασμονικού ρυθμού (propagation length) που ορίζεται απευθείας από τις απώλειες του ρυθμού και το μέγεθος της ενεργής επιφάνειας του πλασμονικού ρυθμού (S) που αντανακλά το εύρος περιορισμού της συγκέντρωσης του πεδίου (confinement) στον κυματοδηγό.

Στην περίπτωση των ενεργών πλασμονικών στοιχείων (κυματοδηγών), έχει προταθεί από τον Krasavin και Zayats [5.69], ένα μετρικό επίδοσης (FoM) το οποίο συσχετίζει τις απώλειες απορρόφησης (A), το λειτουργικό εύρος ζώνης (Δf) και την απαιτούμενη κατανάλωση ισχύος για τη λειτουργία του διακόπτη στο ήμισυ του επιπέδου ισχύος αναφοράς (Δf):

$$M_{act} = A \cdot \frac{\Delta f}{P} \quad (5.12)$$

Παρατηρούμε πως στην περίπτωση των ενεργών πλασμονικών στοιχείων περιλαμβάνονται - πέρα από τις απώλειες διάδοσης- τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας του διακόπτη και της ενεργειακής κατανάλωσης. Όπως και στην περίπτωση των παθητικών πλασμονικών δομών, ο συμβιβασμός της λειτουργίας του θερμο-οπτικού διακόπτη περιλαμβάνεται στο λόγο ($\Delta f/P$) του μετρικού επίδοσης καθώς όπως έχει αναφερθεί σε αρκετά σημεία του κεφαλαίου η κατανάλωση ισχύος και οι δυναμικές του θερμο-οπτικού διακόπτη επηρεάζονται κυρίως από το υλικό και τη γεωμετρία του υποβάθρου (buffer) και εμφανίζονται σε ανταγωνιστική σχέση. Στα πλαίσια της ερευνητικής μας εργασίας που αναπτύσσει το θερμο-οπτικό διακόπτη με διηλεκτρική λωρίδα από Cyclomer [5.70], τροποποιήσαμε το παραπάνω μετρικό επίδοσης (FoM) για ενεργά στοιχεία προτείνοντας ένα νέο μετρικό επίδοσης για πλασμονικούς διακόπτες MZI που συσχετίζει την ενεργειακή

κατανάλωση (P), τους χρόνους μεταγωγής του διακόπτη (τ) και το μήκος των ενεργών βραχιόνων του διακόπτη (L) του συμβολόμετρου σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$FoM = P \cdot \tau \cdot L \quad (5.13)$$

Το παραπάνω μετρικό επίδοσης έχει υιοθετηθεί με σκοπό να συγκρίνουμε απευθείας τις επιδόσεις του θερμο-οπτικού διακόπτη MZI εφοδιασμένο με το πολυμερές Cyclomer με αντίστοιχες εργασίες που επιδεικνύουν πειραματικά τη λειτουργία του διακόπτη με ετερο-ολοκληρωμένους DLSPP κυματοδηγούς σε Si πλατφόρμα που χρησιμοποιούν διηλεκτρική λωρίδα από PMMA [5.43,5.55]. Το γινόμενο αυτό έχει υπολογιστεί για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις των θερμο-οπτικών διακοπών πλασμονικών MZI και τα αποτελέσματα δείχνουν ένα ξεκάθαρο αποτέλεσμα για τη δομή που παρουσιάζεται στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής ($FoM \sim 2400 \text{ mW} \cdot \mu\text{s} \cdot \mu\text{m}$) συγκριτικά με τους αντίστοιχους πλασμονικούς διακόπτες που χρησιμοποιούν το πολυμερές PMMA σαν υλικό στη διηλεκτρική λωρίδα με αντίστοιχες τιμές $4471.2 \text{ mW} \cdot \mu\text{s} \cdot \mu\text{m}$ [5.43] και $2986.8 \text{ mW} \cdot \mu\text{s} \cdot \mu\text{m}$ [5.55] αντίστοιχα για τις τιμές του γινομένου (FoM).

Οι συγκριτικά καλύτερες επιδόσεις του θερμο-οπτικού διακόπτη MZI με διηλεκτρική λωρίδα από Cyclomer προέρχονται κυρίως από τη δυνατότητα της χρησιμοποίησης μικρότερου μήκους ενεργού βραχίονα (L) συγκριτικά με το PMMA. Ο (περίπου) διπλάσιος θερμο-οπτικός συντελεστής του πολυμερούς Cyclomer ($-2 \cdot 10^{-4} \text{ K}$) συγκριτικά με το PMMA ($-1.05 \cdot 10^{-4} \text{ K}$) προσφέρει τη δυνατότητα για τη μείωση του μήκους του ενεργού DLSPP βραχίονα του MZI καθώς η απαιτούμενη ολίσθηση φάσης εξαρτάται γραμμικά από τον TOC συντελεστή του πολυμερούς. Τα κέρδη από τη μείωση του μήκους ενεργού βραχίονα απλώνονται εκτός από την επίτευξη μικρότερων διαστάσεων για το διακόπτη απλώνεται και στη δυνατότητα για χαμηλές απώλειες ισχύος του διακόπτη καθώς μειώνεται το απαιτούμενο μήκος του DLSPP κυματοδηγού που χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές τιμές απωλειών ($0.1 \text{ dB}/\mu\text{m}$). Επιπλέον, προφανής είναι και η απαίτηση για μικρότερες καταναλώσεις ισχύος καθώς μειώνεται δραστικά η ανάγκη για επίτευξη θερμοκρασιακών μεταβολών (ΔT) στη διηλεκτρική λωρίδα.

Σχολιάζοντας τέλος το γινόμενο της κατανάλωσης ισχύος και του χρόνου ανόδου ($P \cdot \tau$) παρατηρούμε πως το Cyclomer υπολείπεται συγκριτικά με το PMMA και αυτή η (οριακή) υστέρηση οφείλεται στον αργό χρόνο καθόδου (fall time) συγκριτικά με το PMMA ($5 \mu\text{s}$ έναντι $3.6 \mu\text{s}$ αντίστοιχα). Στο σημείο αυτό, παρόλο που δεν είναι καθοριστική η παράμετρος της αργής δυναμικής συμπεριφοράς του διακόπτη με το Cyclomer συγκριτικά με το PMMA, θερμικές προσομοιώσεις σε αντίστοιχα πακέτα λογισμικού που βασίζονται σε μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Method – FEM) θα μπορούσαν να προσφέρουν ικανό χώρο βελτίωσης.

5.5 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο της διατριβής παρουσιάστηκε το σχήμα του ενεργού πλασμονικού διακόπτη που βασίζεται σε συμβολομετρική δομή Mach-Zehnder (MZI) και υιοθετεί τον θερμο-οπτικό μηχανισμό για τον ενεργό έλεγχο της. Η αρχή λειτουργίας των συμβολομετρικών διακοπών πλασμονικής τεχνολογίας που περιλαμβάνεται στην αρχική ενότητα του κεφαλαίου συνοδεύεται από τις πειραματικές επιδείξεις διακοπών ασύμμετρων MZI (A-MZIs) οι οποίοι αναπτύσσονται στην ετερο-ολοκλήρωση DLSPP δομών κυματοδηγών σε παθητικές πλατφόρμες Si.

Η πρώτη ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζει μια εκτενή επισκόπηση της θεωρίας των συμβολομετρικών διακοπών πλασμονικής τεχνολογίας που βασίζονται σε δομές Mach-Zehnder και τους ενεργούς μηχανισμούς που υιοθετούνται για τον έλεγχο της λειτουργίας των συμβολομετρικών διακοπών ανάλογα με τον τύπο του πλασμονικού κυματοδηγού. Η ενότητα εστιάζει στον θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου των ενεργών DLSPP βραχιόνων του συμβολομέτρου και παρουσιάζεται το υπόβαθρο και τα πλεονεκτήματα του θερμο-οπτικού φαινομένου στην περίπτωση αυτή. Στο πλαίσιο αυτό, διερευνώνται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των ενεργών πλασμονικών δομών εστιάζοντας στις επιδόσεις λειτουργίας των DLSPP διακοπών αξιοποιώντας τα βασικά μετρικά επίδοσης για διακόπτες που προορίζονται για χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης μεταγωγή δεδομένων σε υπερυψηλές ταχύτητες μετάδοσης [5.71]. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην αναζήτηση ενός πολυμερικού υλικού (Cyclomer) το οποίο είναι ικανό να προσφέρει υψηλές τιμές θερμο-οπτικού συντελεστή (TOC) και έχει εφοδιάσει τις ενεργές δομές διακοπών που μελετήθηκαν πειραματικά στη συνέχεια του κεφαλαίου.

Η πρώτη φάση της ανάπτυξης υβριδικών δομών διακοπών περιλαμβάνει την ετερο-ολοκλήρωση DLSPP βραχιόνων στην παθητική Si πλατφόρμα που έχει σχεδιαστεί, αναπτυχθεί και χαρακτηριστεί επιτυχώς με τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο της διατριβής. Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων χαρακτηρισμού ανέδειξαν πως είναι εφικτή η ετερο-ολοκλήρωση ενεργών DLSPP βραχιόνων με διηλεκτρική λωρίδα Cyclomer στην πλατφόρμα χαμηλών απωλειών από SOI κυματοδηγούς Rib-τύπου χωρίς να επηρεάζεται η επίδοση της Si παθητικής πλατφόρμας. Ωστόσο, κατά την ανάπτυξη της πρώτης φάσης των ετερο-ολοκληρωμένων DLSPP διακοπών η λειτουργία του διακόπτη κατέστη μη εφικτή καθώς υψηλές απώλειες (~62dB) καταγράφηκαν για όλες τις καταστάσεις μεταγωγής στο διακόπτη. Οι φασματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν φανερώνουν την ισχυρή παρουσία ανακλάσεων εντός του κυκλώματος και ερμηνεύονται στην πιθανή αστοχία της Si-σε-DLSPP διεπαφής με συνέπεια την παρουσία ισχυρού σημείου ανάκλασης.

Η επιτυχής επίδειξη ενεργών DLSPP διακοπών με ικανοποιητικά αποτελέσματα οπτικών απωλειών όσο και επίδοσης του θερμο-οπτικού μηχανισμού παρατίθενται στη συνέχεια με σκοπό να αναζητηθούν οι κατάλληλοι διακόπτες που θα αξιολογηθούν σε πραγματικό περιβάλλον κίνησης πληροφορίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα

επιδεικνύουν ικανοποιητικές συνολικές απώλειες $\sim 42\text{dB}$ συμπεριλαμβάνοντας τόσο το Si μέρος όσο και το πλασμονικό (DLSPP) μέρος ενώ η παρουσία των ανακλάσεων στη συνάρτηση μεταφοράς εμφανίστηκε αμελητέα ($\sim 3\text{dB}$) και οφείλεται στους Si συζεύκτες περίθλασης. Ο στατικός θερμο-οπτικός χαρακτηρισμός υποδεικνύει επιτυχή λειτουργία διακόπτη με τιμές ρεύματος μόλις στα 30mA για όλες τις καταστάσεις του διακόπτη με τιμές για τους λόγους σβέσης (ER) που υπερβαίνει τα 25dB σε λειτουργία με χρήση CW σημάτων.

Το τελευταίο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζει την πειραματική αξιολόγηση του DLSPP συμβολομετρικού διακόπτη A-MZI σε περιβάλλον μετάδοσης πληροφορίας στα για τη μεταγωγή δεδομένων στα 10Gb/s . Ο ενεργός έλεγχος του A-MZI διακόπτη μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του Cyclomer κατά $\Delta T \sim 41.5^\circ\text{K}$ επέδειξε την επιτυχή στροφή φάσης ($\Delta\phi \sim 77^\circ$) ενώ η εξαιρετικά χαμηλή ενεργειακή απαίτηση κοντά στα 12mWs επικυρώνει την απαίτηση για αναζήτηση πολυμερικών υλικών με υψηλό θερμο-οπτικό συντελεστή (Thermo-optic Coefficient – TOC). Ο δυναμικός χαρακτηρισμός του θερμο-οπτικού μηχανισμού υποδηλώνει επιτυχή δυνατότητα μεταγωγής με χρόνους ανόδου/καθόδου του διακόπτη να μετρώνται στα $2/5\mu\text{s}$ για την επιτυχή καταπίεση της κατάστασης μεταγωγής κατά 13.2dB . Τα διαπιστευτήρια της ικανοποιητικής λειτουργίας του DLSPP διακόπτη με χρήση πραγματικής κίνησης πληροφορίας επικυρώθηκαν μέσω της αξιολόγησης των BER μετρήσεων που έδειξαν λειτουργία χωρίς σφάλματα ($\text{BER} < 10^{-9}$) με τις ποινές ισχύος μεταξύ των μετρήσεων αναφοράς (B2B) να καταγράφηκαν στο εύρος τιμών από 1dB έως 4.8dB . Τα ικανοποιητικά αυτά αποτελέσματα παρέχουν τις επιδόσεις ώστε να συγκριθεί η λειτουργία του DLSPP διακόπτη A-MZI με Cyclomer με αντίστοιχες επιδείξεις θερμο-οπτικών διακοπών που χρησιμοποιούν το πολυμερές PMMA. Η συγκριτικά καλύτερη επίδοση του A-MZI διακόπτη εφοδιασμένο με Cyclomer εμφανίζεται λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή κατανάλωση, τους χρόνους απόκρισης στη δυναμική λειτουργία και το μέγεθος των βραχιόνων και εισάγοντας ένα μετρικό επίδοσης (FoM) που συσχετίζει αυτά τα χαρακτηριστικά ($\text{FoM} \sim P \cdot \tau \cdot L$) [5.70].

Αναφορές 5^ο Κεφαλαίου

[5.1] R. Ji, et al., “Five-port optical router for photonic networks-on-chip”, Optics Express, vol. 19, no. 21, pp. 20258-20268, Sep. 2011.

[5.2] K. Hasharoni, et al., “A high end routing platform for core and edge applications based on chip to chip optical interconnect”, in proc. of Optical Fiber Communication Conference (OFC’14), OTu3H, Anaheim, CA, USA, Mar. 2013.

[5.3] R. Yu, et al., “A scalable silicon photonic chip-scale optical switch for high performance computing systems”, Optics Express, vol. 21, no. 26, pp. 32655-32667, Dec. 2013.

[5.4] T. Volz, A. Reinhard, M. Winger, A. Badolato, K.J. Hennessy, E.L. Hu and A. Imamoglu, “Ultrafast all-optical switching by single photons”, Nature Photonics Letters 6, pp. 605–609(2012).

- [5.5] Sergey I. Bozhevolnyi, "Plasmonic Nanoguides and Circuits", Pan Stanford Publishing, Singapore 2009.
- [5.6] Krasavin, A. V. & Zayats, A. V. "Passive photonic elements based on dielectric loaded surface plasmon polariton waveguides", *Appl. Phys. Lett.* 90 (21), 211101 (2007).
- [5.7] Nikolajsen, T., Leosson, K. & Bozhevolnyi, S. I. "Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths", *Appl. Phys. Lett.* 85 (24), 5833–5835 (2005).
- [5.8] Gagnon, G., Lahoud, N., Mattiussi, G. A. & Berini, P. "Thermally activated variable attenuation of long-range surface plasmon-polariton waves", *J. Lightwave Technol.* 24 (11), 4391–4402 (2006).
- [5.9] Gosciniaik, J. et al. "Fiber-coupled dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Opt. Express* 18 (5), 5314–5319 (2010).
- [5.10] W. Bogaerts, S. K. Selvaraja, P. Dumon, J. Brouckaert, K. De Vos, D. Van Thourhout, and R. Baets, "Silicon-on-insulator spectral filters fabricated with CMOS technology," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 16, no. 1, pp. 33-44, Jan./Feb. 2010.
- [5.11] R. M. Briggs, J. Grandidier, S. P. Burgos, E. Feigenbaum, and H. A. Atwater. "Efficient Coupling between Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides." *Nano letters* (Oct. 2010).
- [5.12] M. R. Watts, W. A. Zortman, D. C. Trotter, R. W. Young, and A. L. Lentine, "Vertical junction silicon microdisc modulators and switches", *Opt. Express* 19, 21989 (2011).
- [5.13] Govind P. Agrawal, "Applications of Nonlinear Fiber Optics", Second Edition, ISBN: 978-0-12-374302-2, Chapter 3, page 123.
- [5.14] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Active Nanophotonic Circuitry Based on Dielectric-loaded Plasmonic Waveguides", *Advanced Optical Materials*, Vol. 3, 1662-1690 (2015).
- [5.15] Alexandros Emboras, Claudia Hoessbacher, Christian Haffner, Wolfgang Heni, Ueli Koch, Ping Ma, Yuriy Fedoryshyn, Jens Niegemann, Christian Hafner, and Jurg Leuthold, "Electrically Controlled Plasmonic Switches and Modulators", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 21, No.4, July/August 2015.
- [5.16] J.-M. Brosi et al., "High-speed low-voltage electro-optic modulator with a polymer-infiltrated silicon photonic crystal waveguide," *Opt. Exp.*, vol. 16, pp. 4177–4191, Mar. 2008.
- [5.17] C. Haffner et al., "High-speed plasmonic Mach-Zehnder modulator in a waveguide," in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, Cannes, France, 2014, pp. 1–3.
- [5.18] V. J. Sorger, D. Lanzillotti-Kimura Norberto, R.-M. Ma, and X. Zhang, "Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response," *J. Nanophotonics*, vol. 1, pp. 17–22, Jul. 2012.
- [5.19] M. R. Watts, W. A. Zortman, D. C. Trotter, R. W. Young, and A. L. Lentine, "Vertical junction silicon microdisc modulators and switches", *Opt. Express* 19, 21989 (2011).

- [5.20] A. Melikyan et al, "High-speed plasmonic phase modulators", *Nature Photonics* 8, pp.229-233 (2014).
- [5.21] W. Heni et al, "High speed plasmonic modulator array enabling dense optical interconnect solutions", *Optics Express*, Vol.23, No.23, pp.29746-29757 (2015).
- [5.22] H. Fan, R. Charbonneau, and P. Berini, "Long-range surface plasmon triple-output Mach-Zehnder interferometers," *Opt. Exp.*, vol. 22, pp. 4006–4020, Feb. 2014.
- [5.23] A.B. Buckman, "Analysis of a novel optical fiber interferometer with common mode compensation", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, Issue 1, pp. 151-157(1989).
- [5.24] Y.Wang, Q.-L. Wang, S. Zhou, J.-F Wu and Y.-H. Wu, "Analysis of thermo-optic effect-based refractive index dynamic modulation in microspherical resonator", *OSA Applied Optics*, Vol.54, No.28, pp. 8363-8368, October 1 2015.
- [5.25] J. Gosciniak and S.I. Bozhevolnyi, "Performance of thermo-optic components based on dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides", *Scientific Reports* 3, Article number: 1803 (2013).
- [5.26] Berini, P. Plasmon-polariton modes guided by a metal film of finite width bounded by different dielectrics. *Opt. Express* 7 (10), 329–335 (2000).
- [5.27] Gosciniak, J., Markey, L., Dereux, A. & Bozhevolnyi, S. I. Thermo-optic control of dielectric-loaded plasmonic Mach-Zehnder interferometers and Directional Coupler switches. *Nanotechnology special issue invited paper* 23 (44), 444008(9) (2012).
- [5.28] M.R. Watts et al, "Adiabatic thermo-optic Mach-Zehnder switch", *Optics Letters*, Vol.38, No.5, pp. 733-735, March 1 2013.
- [5.29] P. Sun and R. M. Reano, "Submilliwatt thermo-optic switches using free-standing silicon-on-insulator strip waveguides", *Optics Express* 18, 8406 (2010).
- [5.30] A. Ptilakis and E. Kriezis, "Longitudinal 2×2 switching configurations based on thermo-optically addressed dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 17, pp. 2636-2646, Sep. 2011.
- [5.31] J. Gosciniak, M.G. Nielsen, L. Markey, A. Dereux, and S.I. Bozhevolnyi, "Power monitoring in dielectric-loaded plasmonic waveguides with internal Wheatstone bridges", *Optics Express*, vol. 21, no. 5, pp. 5300-5308, Mar. 2013.
- [5.32] R. Mohamed, N. Razali, A.-A. Ehsan, S. Shaari, "Characterization and process optimisation of photosensitive acrylates for photonics applications", *Elsevier Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 6, pp. 375-382 (2005).
- [5.33] O.S. Rosch, W. Bernhard, R. Muller-Fiedler, P. Dannberg, A. Brauer, R. Buestrich, M. Popall, *SPIE* 3799 (1999) 214–224.
- [5.34] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O.

Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vyrsoinos, and N. Pleros, "0.48Tb/s (12x40Gb/s) WDM transmission and high-quality thermo-optic switching in dielectric loaded plasmonics", *Optics Express*, Vol. 20, No. 7, pp. 7655-7662 (2012).

[5.35] S. Guo, G. Gustafsson, O.-J. Hagel and H. Arwin, "Determination of refractive index and thickness of thick transparent films by variable-angle spectroscopic ellipsometry: application to benzocyclobutene films", *Applied Optics*, Vol.35, Issue 10, pp.1693-1699 (1996).

[5.36] A.C. Madayag and Z. Zhou, "Optimization of spin-on-glass process for multilevel metal interconnects", in Proc. of the 14th Biennial University/Government/Industry Microelectronics Symposium, 20 June 2001, Richmond, VA, USA.

[5.37] G. Kim et al, "Single-chip photonic transceiver based on bulk-silicon, as a chip-level photonic I/O platform for optical interconnects", *Scientific Reports* 5, Article Number: 11329 (2015).

[5.38] Y.A. Vlasov and S.J. McNab, "Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends", *Optics Express*, Vol.12, No.8, pp.1622-1631 (2004).

[5.39] Z.-C. Luo, W.-J. Cao, A.-P. Luo and W.-C. Xu, "Polarization-Independent, Multifunctional All-Fiber Comb Filter Using Variable Ratio Coupler-Based Mach-Zehnder Interferometer", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol.30, No.12, June 15, pp. 1857-1862 (2012).

[5.40] S. Papaioannou, G. Dabos, K. Vyrsoinos, Giannis Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Eight-Channel Second-Order Ring Resonator based SOI Multiplexers/Demultiplexers for Optical Interconnects", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2014), paper P2.7, 21-25 September 2014. Cannes, France.

[5.41] J. L. Rodgers and W.A. Nicewander, "Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient", *The American Statistician*, Vol.42, No.1, pp.59-66 (Feb. 1988).

[5.42] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "First demonstration of active plasmonic device in true data traffic conditions: ON/OFF thermo-optic modulation using a hybrid silicon-plasmonic asymmetric MZI", in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NFOEC'2012), OW3E.3, Los Angeles, CA, USA, 4-8 March 2012.

[5.43] D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Active plasmonics in true data traffic applications: Thermo-optic ON/OFF gating using a silicon-plasmonic asymmetric MZI", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24 (12), pp. 1036-1038, (2012).

[5.44] R.F. Egerton, P. Li and M. Malac, "Radiation damage in the TEM and SEM", *Elsevier Micron*, Vol.35, Issue 6, pp.399-409 (2004).

[5.45] S. Papaioannou, D. Fitsios, G. Dabos, K. Vyrsoinos, Giannis Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N. Pleros, *IEEE Photonics*

Journal, Vol. 7. Issue 1, pp. 1-10 (2015), "On-Chip Dual-Stream DWDM Eight-Channel-Capable SOI-Based MUXs/DEMUXs with 40-GHz Channel Bandwidth".

[5.46] OZoptics, 16ch Fiber, Array V-GROOVE ASSEMBLIES USA Patent: 7058275.

[5.47] D. Benedikovic et al, "Single-etch subwavelength engineered fiber-chip grating couplers for 1.3 μm datacom wavelength band", Optics Express, Vol.24, No.12, pp.12893-12904 (2016).

[5.48] S.S. El Nasr-Storey et al, "Effect of Radiation on a Mach-Zehnder Interferometer Silicon Modulator for HL-LHC Data Transmission Applications", IEEE Transactions of Nuclear Science, Vol.62, No.1, pp.329-335 (2015).

[5.49] S. Agnolini and P. Gallion, "Implementation of BB84 protocol by QPSK modulation using dual-electrode Mach-Zehnder modulator", IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT '04), Hammamet, Tunisia, 8-10 December 2004.

[5.50] "Coherent Optical Systems", Διάλεξη στα πλαίσια του μαθήματος Οπτικά Δίκτυα Επικοινωνιών, Εαρινό Εξάμηνο Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών.

[5.51] J. Gosciniaik, L. Markey, A.Dereux and S.I. Bozhevolnyi, "Efficient thermo-optically controlled Mach-Zehnder interferometers using dielectric-loaded plasmonic waveguides", Optics Express, Vol.20, No.15, pp.16300-16309 (2012).

[5.52] Y. Fu, X. Zhang, B. Hraimel, T. Liu, D. Shen, "Mach-Zehnder: A Review of Bias Control Techniques for Mach-Zehnder Modulators in Photonic Analog Links", IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, Issue 7, pp.102-107 (2013).

[5.53] P. Damrongkulkarnjorn, and P. Churueang, "Monthly Energy Forecasting Using Decomposition Method with Application of Seasonal ARIMA", 7th International Power Engineering Conference 2005, IPEC 2005, Singapore, Singapore, 29 November -02 December 2005.

[5.54] Matthias Seimetz, "High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission", Springer Series in Optical Sciences, ISBN 978-3-540-93770-8 (2009), pages 18-21.

[5.55] S. Papaioannou, et al., "Active plasmonics in WDM traffic switching applications", Scientific Reports, vol. 2, no. 652, pp. 1-9, Sep. 2012.

[5.56] M. Pu, N. Yao, C. Hu, X. Xin, Z. Zhao, C. Wang and X. Luo, "Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide", Optics Express, Vol.18, No.20, pp.21030-21037 (2010).

[5.57] Ιωάννης Κ. Γιαννούλης, "Αναγέννηση DPSK Οπτικών σημάτων με χρήση ημιαγωγικών οπτικών ενισχυτών (SOAs)", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Οκτώβριος 2009.

[5.58] Hui Fan and Pierre Berini, "Thermo-optic characterization of long-range surface plasmon devices in Cytop", Applied Optics, Vol. 52, No.2, 10 January 2013.

[5.59] J. Bronzino, D. Peterson, "Medical Devices and Human Engineering", CRC Press, December 2014.

- [5.60] O. Tsilipakos, T.V. Yioultsis, and E.E. Kriezis, "Theoretical analysis of thermally tunable microring resonator filters made of dielectric-loaded plasmonic waveguides", *Journal of Applied Physics* 106, 093109 (2009).
- [5.61] O. Tsilipakos, A. Pitilakis, A.C. Tasolamprou, T.V. Yioultsis, and E.E. Kriezis, "Computational Techniques for the Analysis and Design of Dielectric-Loaded Plasmonic Circuitry", XVIIIth International Workshop on OWTNM, April 9-10, 2010, Cambridge, UK.
- [5.62] C. Chiu, E. Lisicka-Shrzek, R. Niall Tait, and P. Berini, "Fabrication of surface plasmon waveguides and devices in Cytop with integrated microfluidic channels", *J. Vac. Sci. Technol. B* 28, 729-735 (2010).
- [5.63] Hamoudi Asiri, Asad Khan, Ewa Likisca-Skzerk, R. Niall Tait and Pierre Berini, "Fabrication of surface plasmon waveguides in CYTOP", in *Proc. SPIE 8412, Photonics North 2012*, 84120X, October 23, 2012.
- [5.64] J. Gosciniaik et al, "Thermo-optic control of dielectric-loaded plasmonic waveguide components", *Optics Express*, Vol. 18, No.2, pp. 1207-1216 (2010).
- [5.65] J.Xu, X.Zhang and J. Moerk, "Investigation of Patterning Effects in Ultrafast SOA-based Optical Switches", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.46, Issue 1, pp.87-94 (2010).
- [5.66] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Guiding Light at the nanoscale: numerical optimization of ultrasubwavelength metallic wire plasmonic waveguides", *Optics Letters*, Vol.36, Issue 16, pp. 3127-3129 (2011).
- [5.67] A.V. Krasavin and A.V. Zayats, "Silicon-based plasmonic waveguides", *Optics Express*, Vol. 18, Issue 11, pp. 11791-11799 (2010).
- [5.68] R. Buckley and P. Berini, "Figures of merit for 2D surface plasmon waveguides application to metal stripes", *Optics Express*, Vol.15, Issue 19, pp. 12174-12182 (2007).
- [5.69] A. V. Krasavin, A. V. Zayats, <http://arxiv.org/abs/1510.05931>.
- [5.70] S. Papaioannou, Giannis Giannoulis, K. Vyrsoinos, F. Leroy, F. Zacharatos, L. Markey, J.-C. Webber, A. Dereux, S.I. Bozhevolnyi, A. Prinzen, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N.Pleros, "Ultracompact and Low-Power Plasmonic MZI Switch Using Cyclomer Loading", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.27, Issue 9, pp. 963-966 (2015).
- [5.71] N. Pleros, K. Vyrsoinos, S. Papaioannou, D. Fitsios, O. Tsilipakos, A. Pitilakis, E. Kriezis, A. Million, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, D. Kalavrouziotis, Giannis Giannoulis, H. Avramopoulos, N. Djellali, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, J. Gosciniaik and S. Bozhevolnyi, "Tb/s Switching Fabrics for Optical Interconnects Using Heterointegration of Plasmonics and Silicon Photonics: The FP7 PLATON Approach", 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, TuH2, Denver, Colorado, USA, November 2010 (invited).

6. Σύνοψη των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα διδακτορική διατριβή μελετά την ανάπτυξη οπτικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεταγωγής που λειτουργούν σε επίπεδο τσιπ με χαμηλή κατανάλωση ισχύος και προορίζονται για υψίρρυθμα οπτικά δίκτυα διασύνδεσης υπολογιστικών συστημάτων. Αξιοποιώντας την τεχνολογία πλασμονικών διακοπών (plasmonic switches) ετερο-ολοκληρωμένους σε παθητικές SOI πλατφόρμες επιδιώκεται η υλοποίηση μονάδων μεταγωγής μικρού μεγέθους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που μπορεί να εξυπηρετήσουν υψηλές ταχύτητες μετάδοσης πληροφορίας. Η αρχική συνεισφορά της διατριβής εντοπίζεται στην επιτυχή επιλογή, χαρακτηρισμό και επίδειξη της λειτουργίας παθητικής SOI πλατφόρμας που διασφαλίζει την επικοινωνία του υβριδικού δρομολογητή με τις υποδομές της ίνας μέσω της χρήσης κατακόρυφης διασύνδεσης (vertical coupling) και την επικοινωνία της πληροφορίας πάνω στο τσιπ μέσω κυματοδηγών Rib-τύπου (Rib-type SOI Waveguides) [6.1], την υποστήριξη παθητικών λειτουργιών πολυπλεξίας (SOI Multiplexers) για την αύξηση του όγκου της πληροφορίας που εξυπηρετείται [6.2]. Η ανάπτυξη SPP ενεργών στοιχείων που βασίζονται σε δομές πλασμονικών κυματοδηγών διηλεκτρικής φόρτισης (Dielectric-Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguides - DLSPWs) ετερο-ολοκληρώνονται στην SOI παθητική πλατφόρμα αξιοποιώντας πρωτότυπες τεχνικές που διασφαλίζουν τη Si-to-DLSPP διασύνδεση με χαμηλές απώλειες [6.3]. Η πειραματική τους επίδειξη συνοδεύεται από τον οπτικό χαρακτηρισμό τους και την επιτυχή πειραματική επίδειξη της ικανότητας μεταφοράς υψίρρυθμης πληροφορίας μέχρι τα 10Gb/s και στη συνέχεια στα 160Gb/s [6.4]. Η δυνατότητα των ετερο-ολοκληρωμένων DLSPP δομών να επιδείξουν ενεργές λειτουργίες πάνω στο τσιπ επιδεικνύεται πειραματικά με την ανάπτυξη στοιχείων διακοπών (switching elements) τα οποία ελέγχονται μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού ελέγχου (thermo-optic effect) [6.5]. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε ο επιτυχής ενεργός έλεγχος διακοπών που βασίζονται σε δομές κοιλοτήτων συντονισμού κυματοδηγού (Waveguide Ring Resonators - WRRs) που είναι εφοδιασμένοι με διηλεκτρική φόρτιση από το πολυμερές PMMA [6.6]. Η δεύτερη κατηγορία θερμο-οπτικών διακοπών που μελετήθηκε βασίστηκε σε συμβολομετρικούς διακόπτες Mach-Zehnder (MZIs) που είναι εφοδιασμένοι με το Cyclomer και επιδεικνύουν επιτυχή μεταγωγή πληροφορίας στα 10Gb/s με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω του υψηλού θερμο-οπτικού συντελεστή (Thermooptic Coefficient - TOC) του πολυμερούς [6.7].

6.1 Σύνοψη αποτελεσμάτων της διατριβής

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα από τις αντίστοιχες ενότητες της διατριβής.

- **Παθητική πλατφόρμα που βασίζεται σε SOI κυματοδηγούς Rib-τύπου που υποστηρίζουν τον TM πολωτικό ρυθμό και μελέτη των παθητικών λειτουργιών του δρομολογητή πάνω στο τσιπ.**

Στα πλαίσια αυτής της ενότητας αναπτύχθηκαν SOI παθητικές δομές που βασίζονται σε Rib-τύπου κυματοδηγούς Si που διασφαλίζουν την υποστήριξη του πολωτικού ρυθμού TM (Transverse Magnetic-TM) με χαμηλές απώλειες. Το μέγεθος του Si πυρήνα κυματοδηγού επιλέχθηκε να είναι $400 \times 340 \text{ nm}^2$ ενώ η τιμή της υπολειπόμενης λωρίδας του Si (slab) πάνω από το στρώμα του SiO_2 πάχους $2 \mu\text{m}$ επιλέχθηκε να είναι 50 nm . Οι δομές νανοκυματοδηγών κατασκευάστηκαν με χρήση της μεθόδου λιθογραφίας ηλεκτρονικής δέσμης (Electron Beam Lithography - EBL). Για τη διασύνδεση με την υποδομή οπτικών ινών επιλέχθηκε η κατακόρυφη διασύνδεση με χρήση συζευκτών περιθλασης (Grating Couplers) ικανούς να συζευγνύουν την TM συνιστώσα του φωτός στο τσιπ με χαμηλές απώλειες (coupling loss). Κατά την πρώτη φάση υιοθετήθηκε μια δομή φράγματος περιθλασης χωρίς τη χρήση κάποιου διηλεκτρικού στην κορυφή της δομής και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται βέλτιστη σύζευξη σε κατακόρυφη γωνία $\theta_z = 1.8^\circ$ με απώλειες $> 12 \text{ dB}$ /συζεύκτη που καθιστούν μη πρακτικές τις δομές αυτές. Οι δομές αυτές εμφάνισαν ένα φασματικό ελεύθερο εύρος (Free Spectra Range - FSR) περίπου ίσο με $\text{FSR} = 60 \text{ nm}$ ενώ το φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος μετρήθηκε στα $\text{FWHM} = 19 \text{ nm}$. Η προσθήκη ενός στρώματος SOG (Spin on Glass - SOG) στο πάνω τμήμα της δομής είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της σύζευξης φωτός στις νανο-δομές κυματοδηγών με μικρότερες απώλειες σε κατακόρυφες γωνίες σύζευξης γύρω από τις $\theta_z = 10^\circ$. Οι δομές συζευκτών που επιλέχθηκαν –με κριτήριο τη σύζευξη μέγιστης ισχύος- για να εφοδιάσουν την παθητική SOI δομή χαρακτηρίζονται από περίοδο φράγματος περιθλασης ίση με $\Lambda = 710 \text{ nm}$ με παράγοντα βάθους χάραξης (etching depth) ίσο με 100%. Οι μετρήσεις απωλειών που βασίζονται σε δείγματα κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (cutback method) επέδειξαν ελκυστικές απώλειες σύζευξης ίσες με 4.42 dB /συζεύκτη ενώ οι Si νανοκυματοδηγοί μετρήθηκαν να έχουν απώλειες διάδοσης ίσες με 2.9 dB/cm . Η ευρυζωνική λειτουργία (πχ. για μεταγωγή WDM πληροφορίας) διασφαλίζεται καθώς μετρήθηκε φασματικό εύρος ημίσειας ισχύος ίσο με $\text{FWHM} = 38 \text{ nm}$ ενώ η υποστήριξη του επιθυμητού TM πολωτικού ρυθμού για τη διασύνδεση με τους πλασμονικούς διακόπτες διασφαλίζεται με μετρημένους λόγους σβέσης πόλωσης (Polarization Extinction Ratio-PER) μεγαλύτερους από 45 dB . Οι χαμηλές απώλειες της Si πλατφόρμας που επιτρέπει τη σύζευξη και τη διάδοση TM πολωτικών ρυθμών δημιουργούν επιπλέον αξία καθώς στην κατηγορία των Si-Φωτονικών (Si-Photonics) υπάρχει περιορισμένος αριθμός επιδείξεων ολοκληρωμένων δομών για την TM-πόλωση. Επιπλέον, οι χαμηλές απώλειες της Si πλατφόρμας δεν επιβαρύνουν το συνολικό ισοζύγιο απωλειών (loss budget) της υβριδικής δομής, επιτρέποντας ως εκ τούτου την ετερο-ολοκλήρωση των DLSPP κυματοδηγών που προορίζονται για τις ενεργές λειτουργίες του διακόπτη με σκοπό την ανάπτυξη ενός πρακτικού ολοκληρωμένου κυκλώματος δρομολόγησης.

- **Μελέτη ετερο-ολοκληρωμένων DLSP κυματοδηγών στην παθητική SOI πλατφόρμα και πειραματική διερεύνηση της ικανότητας μεταφοράς δεδομένων ταχύτητας 10Gb/s και 160Gb/s.**

Στη δεύτερη φάση της παρούσας διατριβής διερευνήθηκε πειραματικά η δυνατότητα της ετερο-ολοκλήρωσης πλασμονικών κυματοδηγών DLSP τεχνολογίας στην παθητική πλατφόρμα. Η επιτυχής διασύνδεση των Si κυματοδηγών με τους DLSP κυματοδηγούς εφοδιασμένους με PMMA βασίστηκε στην ανάπτυξη μιας οριζόντιας κωνικής δομής (tapered version) διεπαφής διασύνδεσης που μοντελοποιήθηκε από την ερευνητική ομάδα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ με τις απώλειες προσομοίωσης να κυμαίνονται στα 2.6dB. Οι πειραματικές μετρήσεις χαρακτηρισμού της Si-to-DLSP διεπαφής κάνοντας χρήση δειγμάτων DLSP κυματοδηγών μεταβλητού μήκους (60μm,90μm,120μm) έδειξαν απώλειες διασύνδεσης (coupling loss) που κυμαίνονται μεταξύ των 2.45dB (best case) και 4.3dB (worst case) μέσω της επεξεργασίας των μετρήσεων της μεθόδου (cutback method). Οι απώλειες διάδοσης (propagation loss) των πλασμονικών κυματοδηγών με PMMA μετρήθηκαν να είναι 0.10dB/μm, ενώ η φασματική απόκριση (spectral response) των δειγμάτων δεν επέδειξε κάποια ευαισθησία σε μήκη κύματος στο παράθυρο 1500nm-1580nm. Ο οπτικός χαρακτηρισμός προσφέρει πρωτότυπες επιδόσεις συγκριτικά με αυτές που καταγράφονται στη βιβλιογραφία επιτρέποντας τη μελέτη της ικανότητας των DLSP κυματοδηγών να μεταφέρουν δεδομένα σε υπερυψηλές ταχύτητες. Η ικανότητα μεταφοράς δεδομένων αξιολογήθηκε πειραματικά με σήμα πληροφορίας με κωδικοποίηση NRZ-OOK στα 10Gb/s και οι μετρήσεις διαγράμματος οφθαλμού (eye diagrams) έδειξαν αμελητέα επιβάρυνση λόγω της παρουσίας των ετερο-ολοκληρωμένων SPP δομών στην SOI πλατφόρμα. Οι BER (Bit Error Ratio-BER) μετρήσεις έδειξαν αμελητέα επιδείνωση στην ποιότητα σήματος (degradation of signal quality) με αμελητέες ποινές ισχύος (power penalties), καταγράφοντας ποινές <0.2dB μεταξύ του διαδιδόμενου σήματος μέσω του DLSP κυματοδηγού μήκους 60μm και της b2b (back-to-back) μέτρησης στη διάταξη. Ακολουθεί το πείραμα της διάδοσης σήματος OTDM (Optical Time Domain Multiplexing-OTDM) πολυπλεξίας αξιοποιώντας παλμούς εύρους 900-fs για την επίτευξη μεταφοράς δεδομένων 160Gb/s μέσω του SPP κυματοδηγού με διηλεκτρική φόρτιση από PMMA. Η επίτευξη λειτουργίας χωρίς σφάλματα (Error-free operation) επιτεύχθηκε και για τις 16x10Gb/s ακολουθίες (tributaries) που συνθέτουν το OTDM κανάλι στα 160Gb/s με ποινές ισχύος που κυμαίνονται μεταξύ των 0dB (best case) και 0.5dB (worst case) στα κανάλια με την καλύτερη και χειρότερη επίδοση αντίστοιχα. Οι μετρήσεις του φάσματος επιβεβαιώνουν την απουσία οποιασδήποτε φασματικής παραμόρφωσης λόγω μη-γραμμικοτήτων ενώ το χρονικό εύρος παραμένει αναλλοίωτο υποδεικνύοντας μηδενική επίδραση της διασποράς (dispersion) του κυματοδηγού.

- **Μελέτη της απόδοσης θερμο-οπτικών πλασμονικών διακοπών που βασίζονται σε κοιλότητες συντονισμού κυματοδηγών (WRR) εφοδιασμένων με διηλεκτρική φόρτιση PMMA και παρουσίαση αποτελεσμάτων από δομές διπλών δακτυλίων με Cyclomer.**

Η ανάπτυξη πλασμονικών διακοπών (plasmonic switches) που βασίζονται σε δομές δακτυλίων συντονισμού κυματοδηγού (WRRs) μελετήθηκε αξιοποιώντας δομές απλών δακτυλίων με το πολυμερές PMMA. Ο πλασμονικός διακόπτης αξιοποιεί έναν μονό δακτύλιο ακτίνας $R=5.5\mu\text{m}$ ο οποίος ελέγχεται μέσω του θερμο-οπτικού για τη φασματική μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς του με σκοπό την επίτευξη της συνθήκης μεταγωγής. Ο στατικός χαρακτηρισμός της κοιλότητας συντονισμού αποκάλυψε απώλειες από ίνα-σε-ίνα (fiber-to-fiber loss) ίσες με 40.4dB με τις απώλειες του πλασμονικού κυκλώματος να μετρώνται στα 10.6dB στο μήκος κύματος μέγιστης διάδοσης. Η συνάρτηση μεταφοράς εμφάνισε τιμή $\text{FSR}=41.7\text{nm}$ ενώ ο παράγοντας ποιότητας μετρήθηκε να είναι $Q=98$ που μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για λειτουργία διακόπτη με χαμηλές απαιτήσεις κατανάλωσης ισχύος. Ο ενεργός έλεγχος της δομής του διακόπτη επιτεύχθηκε πειραματικά με τη χρήση DC ρεύματος $I=50\text{mA}$ που μετατόπισε τη συνάρτηση μεταφοράς του δακτυλίου κατά $\Delta\lambda=7\text{nm}$. Η κατανάλωση ισχύος για τη συγκεκριμένη λειτουργία υπολογίστηκε να είναι 3.31mWs λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της ωμικής αντίστασης $R=1.28\Omega$ της θερμαντικής λωρίδας (heater) της δομής. Το θερμικό φορτίο κατά τον έλεγχο της δομής προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του δακτυλίου κατά $\Delta T\sim 61.3^\circ\text{K}$ μεταξύ των δύο καταστάσεων (COOL&HOT), ικανή να επιφέρει τη μεταβολή του ενεργού δείκτη διάθλασης του διαδιδόμενου ρυθμού. Κατά τον ενεργό έλεγχο του διακόπτη ο λόγος σβέσης (ER) της συνάρτησης μεταφοράς του μετρήθηκε να είναι ίσος με 6dB στο φασματικό παράθυρο μεταξύ 1550 και 1570nm για την ψυχρή κατάσταση (COOL state) του δακτυλίου και $\text{ER}\sim 10\text{dB}$ για την θερμή κατάσταση (HOT state). Από σκοπιά λειτουργίας ως διακόπτη, ο ενεργός έλεγχος σε μήκος κύματος κοντά στα 1561nm διασφαλίζει μια τιμή διαφορικού λόγου μεταγωγής $\text{ER}\sim 8\text{dB}$ μεταξύ των δύο καταστάσεων του (COOL/HOT) καταναλώνοντας μόλις 3.31mWs. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει τα διαπιστευτήρια χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που προσφέρουν οι DLSPP διακόπτες. Επιπλέον, συνδυάζοντας την υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης λόγω του μικρού μεγέθους του πλασμονικού δακτυλίου ($R=5.5\mu\text{m}$) οι συγκεκριμένες δομές αναγνωρίζονται ως ελκυστικές λύσεις για την υλοποίηση των ενεργών λειτουργιών στα μελλοντικά δίκτυα πάνω στο τσιπ (Networks on Chip-NoC).

Οι θερμικές επιδόσεις του πολυμερούς (PMMA) διερευνώνται πειραματικά μέσα από την έγχυση υψηλότερων τιμών ρεύματος ελέγχου και αποδεικνύουν πως για μεταβολές θερμοκρασίας $\Delta T>75^\circ\text{K}$ η δομή του δακτυλίου καταστρέφεται καθιστώντας μη πρακτική τη χρήση του. Η ενότητα της διατριβής περιλαμβάνει αποτελέσματα από δομές διπλών-δακτυλίων με χρήση του Cyclomer με σκοπό να επιδειχθεί η λειτουργία πλασμονικού διακόπτη με θερμο-οπτικό έλεγχο που είναι ανθεκτικές σε υψηλότερες θερμοκρασίες και εμφανίζουν υψηλότερο θερμο-οπτικό συντελεστή (TOC). Η πειραματική αξιολόγηση της δομής αποδεικνύει πως για αύξηση της θερμοκρασίας του Cyclomer κατά $\Delta T\sim 60^\circ\text{K}$ διαπιστώνεται η φασματική μετατόπιση των κοιλοτήτων συντονισμού κατά $\Delta\lambda\sim 9\text{nm}$, γεγονός που επιβεβαιώνει την υπεροχή του Cyclomer ως προς τον θερμο-οπτικό συντελεστή του έναντι του PMMA με συγκρίσιμες επιδόσεις λόγω μεταγωγής μεταξύ των

καταστάσεων ($ER \sim 10\text{dB}$). Οι επιδόσεις των λόγων σβέσης μεταξύ καταστάσεων μεταγωγής, η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση λόγω του υψηλού TOC του Cyclomer και οι δυναμικοί χρόνοι μs -κλίμακας που προσφέρει ο θερμο-οπτικός έλεγχος καθιστά τους πλασμονικούς διακόπτες από Cyclomer ανταγωνιστική λύση για την υλοποίηση των ενεργών κυκλωμάτων που υπόσχεται η τεχνολογία των SPPs.

- **Μελέτη της απόδοσης θερμο-οπτικών πλασμονικών διακοπών που βασίζονται σε ασύμμετρα συμβολόμετρα Mach-Zehnder (A-MZI) εφοδιασμένων με διηλεκτρική φόρτιση Cyclomer.**

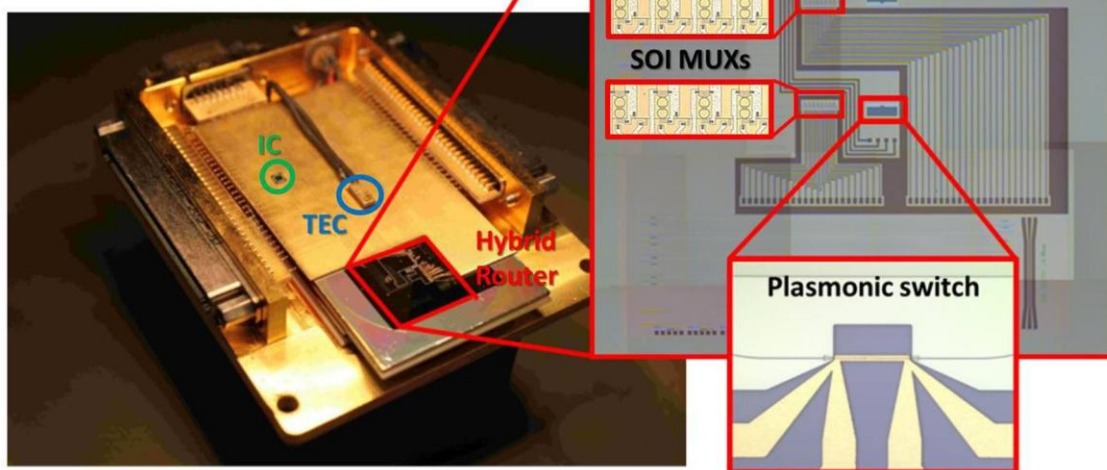
Η μελέτη του ασύμμετρου συμβολομετρικού διακόπτη Mach-Zehnder (A-MZI) που βασίζεται σε DLSPP βραχίονες (branches) με διηλεκτρική λωρίδα από Cyclomer αποτελεί το αντικείμενο της τελευταίας ενότητας εργασίας. Η υβριδική υλοποίηση της δομής αξιοποιεί τον θερμο-οπτικό μηχανισμό ελέγχου στους πλασμονικούς βραχίονες για την επίτευξη μικρού αποτυπώματος (footprint) και χαμηλή κατανάλωση ισχύος ενώ οι συζεύκτες εισόδου/εξόδου (directional couplers) του διακόπτη βασίζονται στην Si τεχνολογία για τη διασφάλιση χαμηλών οπτικών απωλειών. Η σχεδιαστική καινοτομία του συμβολομετρικού διακόπτη εντοπίζεται στην εισαγωγή μιας στατικής πόλωσης στη συνάρτηση μεταφοράς του διακόπτη γύρω από το σημείο τετραγωνισμού (quadrature point) της ($\Delta\phi_{\text{bias}} = \pi/2$). Η υλοποίηση της ασυμμετρίας βασίζεται σε σχεδιαστικές τροποποιήσεις της γεωμετρίας του κυματοδηγού ενός βραχίονα με σκοπό να εισάγει την απαιτούμενη ολίσθηση φάσης. Τα κέρδη από την εισαγωγή ασυμμετρίας στη συνάρτηση μεταφοράς του διακόπτη προέρχονται από την απαίτηση για μεταγωγή υψηλής ποιότητας μιας ολίσθησης φάσης ίσης με $\Delta\phi = \pi/2$ και όχι $\Delta\phi = \pi$ και μεταφράζονται σε μικρότερα απαιτούμενα μήκη βραχιόνων και ακόμα χαμηλότερη ισχύ μεταγωγής (switching power). Η Si-DLSPP δομή του A-MZI διακόπτη υλοποιήθηκε ετερο-ολοκληρώνοντας βραχίονες DLSPP κυματοδηγών από Cyclomer μήκους $L = 40\mu\text{m}$ στην SOI παθητική πλατφόρμα.

Ο οπτικός χαρακτηρισμός των υβριδικών δομών διακοπών της πρώτης γενιάς έδειξε ισχυρές απώλειες ισχύος ($\sim 62\text{dB}$) λόγω της παρουσίας σημείων ανάκλασης μέσα στο τσιπ, πιθανό στο σημείο Si-to-DLSPP διεπαφής. Η βελτιωμένη δεύτερη γενιά κατασκευής ετερο-ολοκληρωμένων DLSPP κυματοδηγών από Cyclomer στην Si πλατφόρμα χαρακτηρίστηκε από οπτικές απώλειες $\sim 42\text{dB}$ επιτρέποντας τον θερμο-οπτικό έλεγχο με DC ρεύμα. Η επίδειξη ενός λόγου μεταγωγής σε θύρα του A-MZI διακόπτη κοντά στα ($ER \sim 25\text{dB}$) για χρήση ρεύματος $I = 30\text{mA}$ επικύρωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης ετερο-ολοκληρωμένων δομών από Cyclomer σε παθητικές SOI πλατφόρμα για την υλοποίηση χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης θερμο-οπτικούς διακόπτες.

Η πειραματική μελέτη του θερμο-οπτικού διακόπτη σε περιβάλλον πραγματικής κίνησης πληροφορίας πραγματοποιήθηκε για τη μεταγωγή πληροφορίας στα 10Gb/s για την υβριδική δομή που εμφάνισε την ελκυστικότερη επίδοση. Κατά τον στατικό θερμο-οπτικό έλεγχο της του A-MZI διακόπτη μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας του Cyclomer κατά $\Delta T \sim 41.5^\circ\text{K}$ επιτεύχθηκε την επιτυχή στροφή φάσης ($\Delta\phi \sim 77^\circ$).

Λαμβάνοντας υπόψη το μικρό μήκος του κυματοδηγού ($L=40\mu\text{m}$), αποδεικνύεται πως η υψηλή τιμή του θερμο-οπτικού συντελεστή (TOC) του πολυμερούς Cyclomer που εξασφαλίζει χαμηλή κατανάλωση ισχύος στο διακόπτη ($\sim 12\text{mWs}$) λόγω χαμηλότερων θερμικών απαιτήσεων για τη στροφή φάσης στη μεταγωγή. Ο δυναμικός θερμο-οπτικός χαρακτηρισμός του A-MZI διακόπτη ανέδειξε χρόνους ανόδου/καθόδου του διακόπτη (rise/fall times) να μετρώνται στα $2/5\mu\text{s}$ για την επιτυχή καταπίεση της κατάστασης μεταγωγής κατά 13.2dB και ένα μετρημένο βάθος διαμόρφωσης (Modulation Depth-MD) ίσο με 90.8% . Η ικανότητα μεταγωγής κίνησης πληροφορίας στα 10Gb/s αξιολογήθηκε μέσω BER μετρήσεων που έδειξαν λειτουργία χωρίς σφάλματα ($\text{BER} < 10^{-9}$) με τις ποινές ισχύος μεταξύ των μετρήσεων αναφοράς (B2B) να καταγράφονταν στο εύρος τιμών από 1dB έως 4.8dB για τις δύο καταστάσεις μεταγωγής ON&OFF σε κάθε διαδρομή μεταγωγής του διακόπτη (BAR&CROSS). Οι επιδόσεις μεταγωγής του διακόπτη με χρήση του πολυμερούς Cyclomer υπερτερούν συγκριτικά με τις επιδόσεις αντίστοιχων θερμο-οπτικών διακοπών που χρησιμοποιούν το PMMA συσχετίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του διακόπτη (χρόνοι μεταγωγής, μέγεθος και κατανάλωση ισχύος) σε ένα μετρικό επίδοσης $\text{FoM} \sim P \cdot \tau \cdot L$ ($\text{mWs} \cdot \mu\text{sec} \cdot \mu\text{m}$).

Υβριδικός Δρομολογητής με δομές DLSPP A-MZI διακοπών με Cyclomer ετερο-ολοκληρωμένων σε παθητική πλατφόρμα με δομή SOI 8x1 πολυπλέκτη διπλών δακτυλίων



Εικόνα 6.1: Το τελικό τσιπ του υβριδικού δρομολογητή όπως παρουσιάστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ICT-PLATON. Αξιοποιούνται στην ίδια SOI πλατφόρμα η πλασμονική τεχνολογία που επιδεικνύει τον ασύμμετρο συμβολομετρικό διακόπτη Mach-Zehnder (A-MZI) από Cyclomer και η τεχνολογία πυριτίου που περιλαμβάνει τον 8x1 πολυπλέκτη (SOI MUX), πλαισιωμένο από την κατάλληλη συσκευασία (packaging) για να διασφαλιστεί η οπτική και ηλεκτρική επικοινωνία της υβριδικής δομής με τα σήματα ελέγχου.

Η Εικόνα 6.1 παρουσιάζει τη δομή του 2x2 DLSPP A-MZI διακόπτη με Cyclomer που παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή σε επόμενο βήμα ετερο-ολοκληρώθηκε στην SOI παθητική πλατφόρμα που περιλαμβάνει δομές πολυπλεξίας διπλών δακτυλίων (SOI Multiplexers – SOI MUX). Η υβριδική δομή του μεταγωγέα τοποθετήθηκε με τη δομή του

ηλεκτρονικού κυκλώματος (IC) που ελέγχει τον πίνακα μεταγωγής (switching matrix) και στοιχεία ελέγχου της θερμοκρασίας του τσιπ (Temperature Controller-TEC) σε κατάλληλη συσκευασία για να προστεθούν οι ηλεκτρικές και οπτικές διασυνδέσεις του. Η διαδικασία συσκευασίας (packaging) θα προσφέρει στη στο υβριδικό κύκλωμα τη δυνατότητα να αξιολογηθεί με ευκολία σε περιβάλλον WDM (Wavelength Division Multiplexing-WDM) πολυπλεξίας για αύξηση της εξυπηρετούμενης κίνησης (throughput) αξιοποιώντας τις μονορυθμικές ίνες εισόδου/εξόδου (fiber pigtailed) καθώς και τη συστοιχία με τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις (electrical connectors) που παρέχουν την επικοινωνία με τα DC ηλεκτρικά σήματα αλλά και τα δυναμικά σήματα ελέγχου KHz-συχνοτήτων. Παράλληλα, επιτρέπει τη διασύνδεση του μεταγωγέα σε περιβάλλον κίνησης ενός Κέντρου Δεδομένων (Data Center) για να εξυπηρετήσει κίνηση πραγματικών δεδομένων.

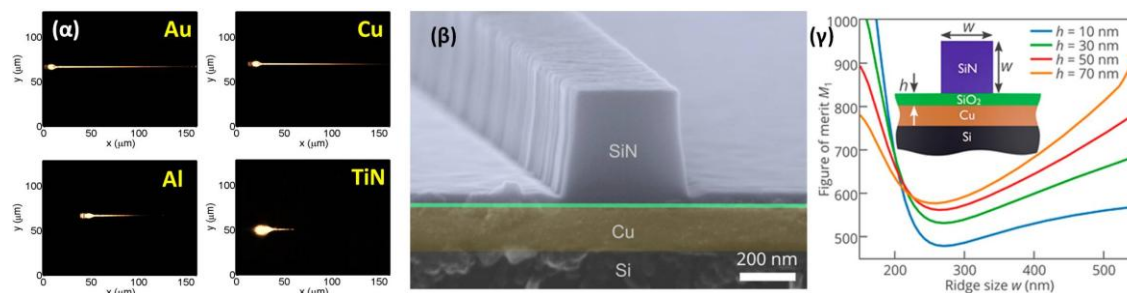
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η υβριδική υλοποίηση μιας λειτουργίας μεταγωγής πάνω στο τσιπ (on-chip functionality) βασίστηκε στην ετερο-ολοκλήρωση DLSPP κυματοδηγών σε SOI παθητική πλατφόρμα. Η επιτυχής πειραματική επίδειξη της λειτουργίας μεταγωγής με χρήση ενεργών πλασμονικών δομών με μικρό αποτύπωμα (~δεκάδων μm^2), μικρές καταναλώσεις ισχύος (~mWs), επιβεβαιώνει πως η πλασμονική προσέγγιση παραμένει ανταγωνιστική τεχνολογία για την υλοποίηση των λειτουργιών δικτύου στο τσιπ (Network on Chip-NoC) που απαιτούν οι διασυνδέσεις στο περιβάλλον των εφαρμογών που αναδεικνύονται στα σύγχρονα υπολογιστικά συστήματα και συστήματα επικοινωνίας πληροφορίας (computer and datacom applications). Στα πλαίσια των μελλοντικών βημάτων για την ανάδειξη νέων κατευθύνσεων στην ερευνητική περιοχή της διατριβής θα παρουσιαστούν συνοπτικά τρεις κατευθύνσεις που στοχεύουν: στη βελτίωση των επιδόσεων της πλασμονικής τεχνολογίας με νέες δυνατότητες και πλατφόρμες υλικών (CMOS Plasmonics), στην επέκταση των υλοποιήσεων για την επίδειξη προηγμένων τοπολογιών και αρχιτεκτονικών (on-board και communication), στην αναζήτηση του πιθανού ρόλου DLSPP κυκλωμάτων σε νέες περιοχές που ανοίγονται από τη συνέργεια της Κβαντικής Οπτικής και της Πλασμονικής (Quantum Plasmonics). Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι προτεινόμενες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα με τις προσδοκίες που συνοδεύονται.

Πλασμονικοί κυματοδηγοί με στρώμα χαλκού για συμβατότητα με τις CMOS μεθόδους κατασκευής.

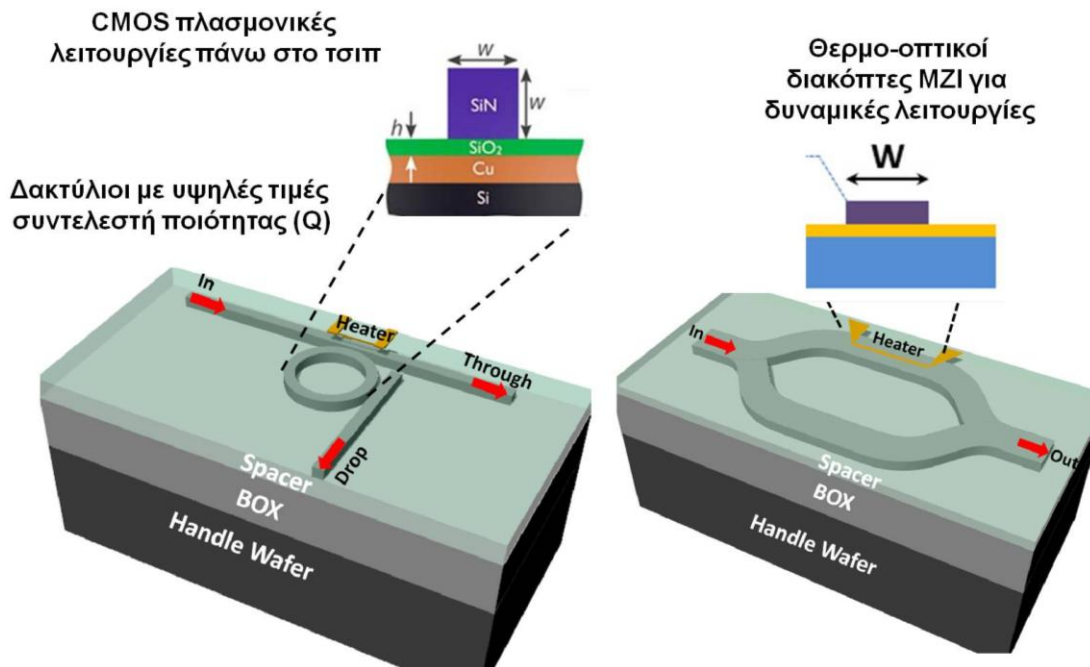
Η διάδοση επιφανειακών πλασμονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPPs) προσφέρει μια μοναδική δυνατότητα για τροποποίηση των χαρακτηριστικών του φωτός σε κλίμακα αρκετά κάτω από το όριο περίθλασης (diffraction limit) με αποτέλεσμα τη μείωση του μεγέθους των οπτικών διατάξεων σε κλίμακα αντίστοιχη με τις νανο-δομές των ηλεκτρονικών αξιοποιώντας παράλληλα τη δυνατότητα για ενεργό έλεγχο με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Την ίδια στιγμή, οι SPP κυματοδηγοί βασίζονται κυρίως σε ευγενή μέταλλα (noble metals) τα οποία δεν είναι συμβατά με μεθόδους επεξεργασίας που

υπαγορεύουν οι (Complementary Metal-Oxide Semiconductor - CMOS) CMOS τεχνικές της τεχνολογίας της μικρο-ηλεκτρονικής. Η απαίτηση για χρήση μετάλλων με αρνητικό πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς ($\text{Re}\{\epsilon\}$) και μικρή τιμή του φανταστικού μέρους της ($\text{Im}\{\epsilon\}$) για χαμηλές ωμικές απώλειες, καθιστά η χρήση του χρυσού (Au) και του αργύρου (Ag) διαδεδομένη επιλογή για ανάπτυξη πλασμονικών κυκλωμάτων. Τα δύο αυτά μέταλλα ωστόσο δεν είναι συμβατά με τις CMOS μεθόδους με αποτέλεσμα να απαιτούν πολύπλοκες υψηλού κόστους, περίπλοκες τεχνικές κατασκευής. Επιπλέον, η χρήση αυτής της κατηγορίας των ευγενών μετάλλων αποτρέπει την ολοκλήρωση πλασμονικών διατάξεων μαζί με Si φωτονικά στοιχεία και ηλεκτρονικά Si τεχνολογίας. Στην οικογένεια των CMOS-συμβατών μετάλλων έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία η χρήση του Αλουμινίου (Al), του χαλκού (Cu) και του titanium nitride (TiN) για το μεταλλικό στρώμα του SPP κυματοδηγού [6.8]. Η επίδειξη δομών βασισμένων σε τεχνολογία διηλεκτρικής φόρτισης (DLSPP Waveguide-DLSPPW) με τη χρήση αυτών των μετάλλων πρόσφατα διερευνήθηκε πειραματικά με τον προσδιορισμό οπτικών απωλειών (μήκους διάδοσης- L_{prop}). Η συνεισφορά του ωμικού ρυθμού απωλειών (Ohmic Loss Rate-OLR) για κάθε μέταλλο συγκριτικά με τον χρυσό (Au) έδειξε την επιπλέον συνεισφορά στις απώλειες με τον χαλκό (Cu) να αναδεικνύεται η λύση με τις μικρότερες απώλειες, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 6.2(α) με τα μήκη διάδοσης των πλασμονικών ρυθμών για κάθε μέταλλο. Η χρήση του χαλκού (Cu) έχει επιδειχθεί σε σύνθετες δομές SPP κυματοδηγών επιδεικνύοντας ταυτόχρονα ελκυστικές επιδόσεις απωλειών και εντοπισμό του πλασμονικού ρυθμού σε διαστάσεις αρκετά κάτω από το μήκος κύματος ($\sim\lambda^2/50$) [6.9]. Η Εικόνα 6.2(β) δίνει την άποψη της δομής του κυματοδηγού από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (Scanning Electron Microscope-SEM) με την αναπαράσταση της δομής που αναπτύχθηκε και τις επιδόσεις ενός μετρικού (Figure of Merit - FoM) το οποίο συσχετίζει το μήκος διάδοσης (L_{prop}) και τη βαθμό συγκέντρωσης του πεδίου στον κυματοδηγό (A_{eff}) σύμφωνα με την παρακάτω σχέση: $M_1=2\cdot\sqrt{\pi}\cdot L_{\text{SPP}}/\sqrt{A_{\text{eff}}}$ [6.10].



Εικόνα 6.2: (α) Εικόνες από LRM (Leakage Radiation Microscopy) μικροσκόπιο που πραγματοποιήθηκαν στο Πανεπιστήμιο της Βουργουνδίας (University of Bourgogne-UB) για τον προσδιορισμό της συνεισφοράς της ωμικής απώλειας κυματοδηγού (Ohmic Rate Loss-ORL) [6.8]. Μετρήσεις μήκους διάδοσης (propagation length) που πραγματοποιήθηκαν για δομές πλασμονικών κυματοδηγών με χρήση διαφορετικών μετάλλων (Au,Cu,Al,TiN) στη DLSPP δομή με διηλεκτρική λωρίδα πλάτους $w=300\text{nm}$. (β) Εικόνα SEM (Scanning Electron Microscope-SEM) μικροσκοπίου που δείχνουν τη δομή του CMOS πλασμονικού κυματοδηγού βασισμένου στο χαλκό (Cu) [6.9]. (γ) Σχηματική αναπαράσταση της δομής κυματοδηγού με τον προσδιορισμό της βέλτιστης γεωμετρίας που διασφαλίζει το μέγιστο μετρικό επίδοσης που εισάγουν οι συγγραφείς [6.9].

Στα πλαίσια αυτά, μπορεί να προταθεί μια πλασμονική πλατφόρμα που να περιλαμβάνει ένα συνδυασμό από σύνθετες παθητικές και ενεργές δομές. Η στρατηγική της προσέγγισης των CMOS πλασμονικών κυκλωμάτων προσφέρει δραστική περικοπή του κόστους και πολυπλοκότητας κατασκευής των ολοκληρωμένων δομών καθιστώντας πρακτικές τις δομές μεταγωγής (plasmonic switches). Βασίζεται στην αξιοποίηση των συγκριτικών πλεονεκτημάτων της κάθε κατηγορίας των δομών συμβατών στην CMOS τεχνική ώστε να αντιστοιχίζονται σε λειτουργίες που ταυτίζουν τα πλεονεκτήματα με τις προτεραιότητες. Επιπλέον, επιλέγοντας το χαλκό (Cu) που επέδειξε τις ελκυστικότερες επιδόσεις ως προς τις απώλειες διάδοσης, είναι εφικτό να κατασκευασθεί η υβριδική πλατφόρμα CMOS πλασμονικών ετερο-ολοκληρωμένη σε παθητικά Si παθητικά φωτονικά στοιχεία μέσα από την ενιαία CMOS γραμμή κατασκευής. Η Εικόνα 6.3 παρουσιάζει τις προτεινόμενες δομές που μπορεί να αναπτυχθούν στη Si πλατφόρμα και να συμπεριλάβουν τις συμβατές με CMOS δομές πλασμονικών κυματοδηγών.



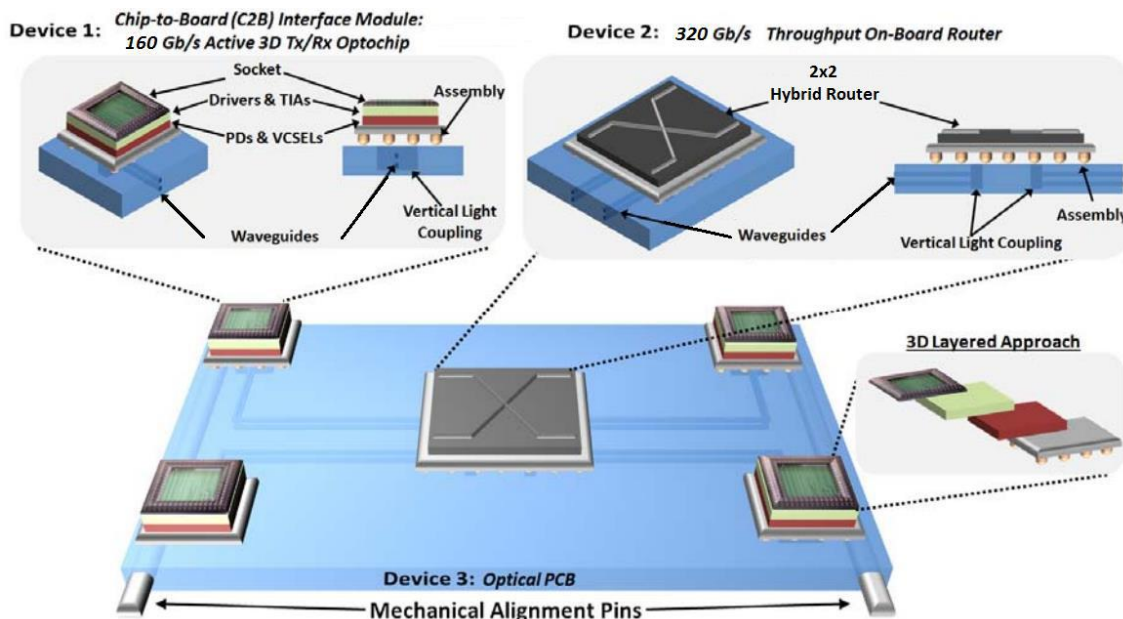
Εικόνα 6.3: Προτεινόμενες δομές CMOS πλασμονικών διατάξεων για την υλοποίηση δακτυλίων με υψηλές τιμές συντελεστή ποιότητας (Q-factor) και συμβολομετρικών διακοπών Mach-Zehnder (MZI) που ελέγχονται θερμο-οπτικά. Σκοπός της CMOS πλασμονικής τεχνολογίας είναι η ολοκλήρωση των δομών με παθητικές SOI δομές νανο-κυματοδηγών.

Πιο συγκεκριμένα, οι δομές με SiN που προσφέρουν χαμηλές απώλειες και ισχυρό εντοπισμό πεδίου (strong confinement) μπορούν να αξιοποιηθούν για την υλοποίηση μικρο-δομών δακτυλίων με τα επιθυμητά φασματικά χαρακτηριστικά που προορίζονται για σύνθετες τοπολογίες μεταγωγής πάνω στο τσιπ που βασική απαίτηση είναι η επιδίωξη μικρού μεγέθους της δομής με μικρές απώλειες. Οι DLSPP δομές αξιοποιώντας το μεταλλικό στρώμα του Cu μπορούν να συνδυαστούν με διηλεκτρικές λωρίδες πολυμερών

με υψηλό θερμο-οπτικό συντελεστή (TOC) ώστε να υλοποιούνται ενεργές δομές πλασμονικών συμβολομετρικών διακοπών που ελέγχονται μέσω του θερμο-οπτικού μηχανισμού. Η μικρότερη τιμή της αντίστασης του χαλκού μπορεί να αναχαιτιστεί από αποτελεσματική διαχείριση των παραμέτρων του θερμικού προβλήματος του διακόπτη με σκοπό τη βέλτιστη ενεργειακή του επίδοση.

Ενσωμάτωση υβριδικών 2x2 δρομολογητών Si-DLSPP τεχνολογίας πάνω σε πλακέτα που περιέχει τσιπ πομποδεκτών σε υπερυψηλές ταχύτητες.

Η συνέργεια των υβριδικών πλασμονικών διακοπών με επιδείξεις στην ερευνητική περιοχή των Οπτικών Διασυνδέσεων (Optical Interconnects) αποτελεί προτεραιότητα ώστε να αξιολογηθεί η συμβατότητα τους με τις προηγμένες κυκλωματικές διατάξεις που έχουν προταθεί. Στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζεται η ενσωμάτωση και η χρήση των 2x2 δρομολογητών σε πλακέτες που περιέχουν τσιπ πομποδεκτών (160Gb/s 3D Tx/Rx optochips) με σκοπό την επίδειξη μιας πλήρως λειτουργικής πλατφόρμας διασύνδεσης σε επίπεδο πλακέτας (on-board). Η πρώτη μονάδα είναι το τσιπ πομποδεκτών (Device 1: Tx/Rx optochip), το οποίο υλοποιείται με 3D τεχνική ολοκλήρωσης και περιλαμβάνει 4 ζεύγη από κατάλληλα λέιζερ (VCSELs) και φωτοδιόδους (PDs) στα 40 Gb/s, προσφέροντας έτσι ένα συνολικό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 160 Gb/s. Η λύση με τις συγκολλητικές δομές VCSEL υιοθετείται ευρέως σε περιβάλλον εφαρμογών οπτικών διασυνδέσεων καθώς χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και προσφέρουν απλές δομές διασύνδεσης με τις πολυμερικές πλατφόρμες κυματοδηγών (Printed Circuit Board - PCB) που εξυπηρετούν την κίνηση πάνω στην πλακέτα (on-board) [6.11]. Η δεύτερη μονάδα αφορά το 2x2 υβριδικό δρομολογητή πλασμονικής τεχνολογίας και τεχνολογίας πυριτίου (Device 2: 2x2 hybrid router) με δυνατότητα δρομολόγησης >160 Gb/s όπως παρουσιάστηκε στην παρούσα διατριβή και είναι υπεύθυνη για τη δρομολόγηση (routing) των εισερχόμενων οπτικών ροών στους επιθυμητούς προορισμούς. Τέλος, την τρίτη μονάδα αποτελεί η ίδια η οπτική πλακέτα (Device 3: Optical PCB) που στεγάζει τα παραπάνω στοιχεία καθώς και το απαραίτητο φωτονικό κύκλωμα διασύνδεσής τους. Η πλατφόρμα της οπτικής πλακέτας (Optical PCB) επιτρέπει την υλοποίηση διαύλων με χωρητικότητα κλίμακας-Tb/s, πολύ υψηλές τιμές πυκνότητας ολοκλήρωσης (Tbps/mm²) και ελκυστικές απαιτήσεις συσκευασίας (packaging density) [6.12]. Αξίζει να σημειωθεί ότι εδώ ο υβριδικός δρομολογητής θα πρέπει να περιλαμβάνει ειδικά οπτικά στοιχεία εισόδου/εξόδου σήματος που να επιτρέπουν την κάθετη, πλέον, σύζευξη φωτός, καθώς σε αυτή την υλοποίηση προβλέπεται κατάλληλη εναπόθεση του δρομολογητή πάνω στη φωτονική πλακέτα. Με αυτό τον τρόπο, λοιπόν, μπορεί να επιτευχθεί σε μία οπτική πλακέτα υψίρρυθμη και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία μεταξύ τσιπ (chip-to-chip) συμπεριλαμβανομένης της λειτουργίας δρομολόγησης.



Εικόνα 6.4(α): Πλατφόρμα οπτικής διασύνδεσης σε επίπεδο πλακέτας (on-board) που αποτελείται από τσιπ πομποδεκτών στα 160 Gb/s (Device 1: Tx/Rx optochip) και ένα 2x2 υβριδικό δρομολογητή (Device 2: 2x2 hybrid router) χωρητικότητας στα 320 Gb/s ύστερα από κατάλληλη τοποθέτηση πάνω σε μία οπτική πλακέτα (Device 3: Optical PCB).

Τα άμεσα κέρδη από την εισαγωγή του 2x2 υβριδικού Si-DLSPP διακόπτη (Si-DLSPP switching element) στη χρήση της συγκεκριμένης λειτουργίας δικτύου σε επίπεδο πλακέτας (Network on Board-NoB) εντοπίζονται στη βελτίωση της ενεργειακής επίδοσης (energy efficiency) της δομής, στην επίτευξη μικρού μεγέθους δομής για την υλοποίηση του κυκλώματος μεταγωγής που συναντάν τις τάσεις των τεχνολογιών διασύνδεσης στις αρχιτεκτονικές των Κέντρων Δεδομένων [6.13]. Τα έμμεσα κέρδη που συνεπάγονται οι παραπάνω βελτιώσεις οδηγούν σε περικοπή του κόστους λόγω των μειωμένων λειτουργικών ενεργειακών απαιτήσεων, της διαχείρισης των θερμικών φορτίων στην πλακέτα. Η βασική πρόκληση για την υιοθέτηση των ενεργών πλασμονικών κυκλωμάτων δρομολόγησης σε αρχιτεκτονικές πλακέτας (on-board communication) απαιτούν τη διαχείριση του ισοζυγίου απωλειών ισχύος (optical loss budget) πάνω στην πλακέτα καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα ενίσχυσης του οπτικού σήματος [6.14, 6.15].

Ολοκληρωμένα κυκλώματα Πλασμονικών κυματοδηγών για εφαρμογές Κβαντικής Πλασμονικής (Quantum Plasmonics).

Τα επιφανειακά πλασμόνια (SPPs) αν και βασίζονται στην κίνηση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων μπορούν να περιγραφούν μέσω της κβαντικής θεωρίας ως σωματίδια τα οποία περιγράφονται από πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Όπως τα φωτόνια στον ελεύθερο χώρο, επιδεικνύουν φαινόμενα που διέπουν την κβαντική φύση τους εμφανίζοντας κβαντική συσχέτιση (quantum entanglement) [6.16], κβαντική υπέρθεση

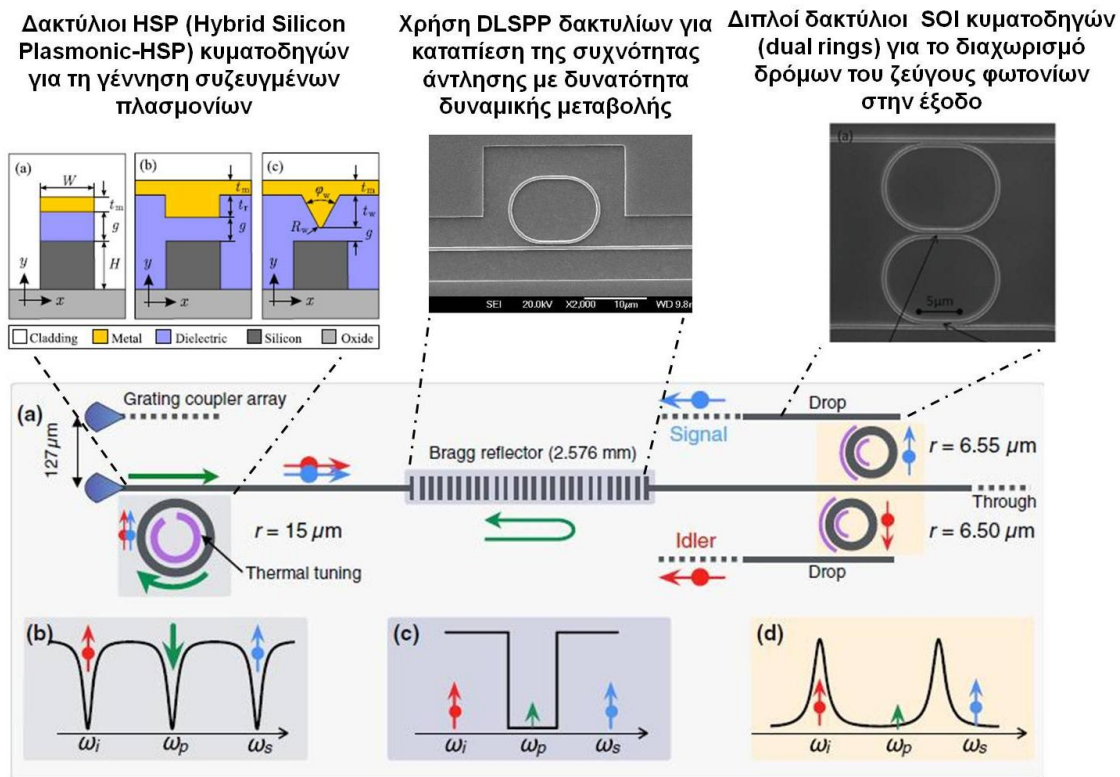
(quantum interference) [6.17]. Πειραματικές επιδείξεις έχουν αξιολογήσει την αναλογία μεταξύ φωτονίων και επιφανειακών πλασμονίων καθώς αυτά εμφανίζουν στατιστικές απλών σωματιδίων (single-particle statistics) όταν διεγείρονται από μοναδικά φωτόνια και κατά συνέπεια μπορούν να αποκτήσουν, διατηρήσουν, μεταφέρουν ιδιότητες κβαντικής συσχέτισης. Το κίνητρο για την έρευνα στην περιοχή της κβαντικής πλασμονικής εντοπίζεται στη δυνατότητα της μετανάστευσης της κβαντικής φύσης από τα απλά φωτόνια (single photons) στα πλασμονικά κβάντα με σκοπό να υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς και επεξεργασίας της κβαντικής πληροφορίας σε nm-κλίμακα, κάτω από το όριο περίθλασης.

Σε αυτό το πλαίσιο, η ερευνητική ομάδα του καθ. Atwater στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια (California Institute of Technology-Caltech) πρόσφατα συνέβαλλαν με την επιτυχή πειραματική επίδειξη της πλασμονικής κβαντικής υπέρθεσης με τιμές ορατότητας (visibility) $V=93\pm 1\%$ και της κβαντικής συσχέτισης του μονοπατιού με τιμές $V=95\pm 2\%$ [6.18]. Τα αποτελέσματα πιστοποιούν τη διατήρηση των κβαντικών ιδιοτήτων των σωματιδίων καθώς τα αρχικά συζευγμένα (correlated) ζεύγη φωτονίων παραμένουν πλήρως συσχετιζόμενα (indistinguishable) χωρίς να υποφέρουν από επιπλέον απώλεια της σχέσης φάσης (dephasing) κατά τη μετατροπή τους από φωτόνια σε πλασμόνια και χωρίς να επιβαρύνονται από την παρουσία του μετάλλου στον DLSP κυματοδηγό. Στην ίδια γραμμή, η συνεισφορά της DLSP τεχνολογίας μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για την γέννηση κβαντικά συζευγμένων ζευγών πλασμονίων αλλά και την επεξεργασία της κβαντικής πληροφορίας που φέρουν τα ζεύγη φωτονίων που συζευγνύονται σε SPP ρυθμούς.

Η διαπιστευμένη ποιότητα της συνέργειας μεταξύ της DLSP τεχνολογίας και της τεχνολογίας των Si φωτονικών μπορεί να αξιοποιηθεί εμπλουτίζοντας την οικογένεια των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που βασίζονται στην Si τεχνολογία στην περιοχή της Κβαντικής Οπτικής (Quantum Optics). Η χρήση της τεχνολογίας DLSP αποκτά σημασία για δύο βασικούς λόγους: μπορεί να εμπλουτίσει τις επιδόσεις στις υπάρχουσες ολοκληρωμένες δομές φωτονικών κυκλωμάτων για τη γέννηση και την επεξεργασία της κβαντικής φύσης των φωτονίων και σε πιο μακροπρόθεσμο πλαίσιο μπορεί να προσδώσει στις ολοκληρωμένες δομές την απαραίτητη σμίκρυνση μεγέθους και ενεργειακής κατανάλωσης που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των μελλοντικών κβαντικών υπολογιστικών συστημάτων (Quantum Computing). Βασικός περιοριστικός παράγοντας της χρήσης των ολοκληρωμένων δομών στην κατηγορία αυτή των εφαρμογών της Κβαντικής Οπτικής αποτελεί η ισχυρή απώλεια της SPP διάδοσης και για το λόγο αυτό πρέπει να υπάρχει περαιτέρω βελτίωση των απωλειών των πλασμονικών κυματοδηγών και φροντίδα για αποτελεσματική διαχείριση του ισοζυγίου οπτικής ισχύος πάνω στο τσιπ [6.19]. Στα πλαίσια των δύο παραπάνω ελκυστικών διαστάσεων της συνεισφοράς της SPP τεχνολογίας προτείνεται η αξιοποίηση της πλασμονικής τεχνολογίας για τη δημιουργία συσχετισμένων ζευγών φωτονίων πάνω στο τσιπ (entangled plasmons) με χρήση μικροδακτυλίων που βασίζονται σε DLSP κυματοδηγούς. Κίνητρο για τη διερεύνηση της συγκεκριμένης ερευνητικής κατεύθυνσης αποτελεί η δυνατότητα που προσφέρει η

πλασμονική τεχνολογία να προσφέρει ανταγωνιστικές λύσεις σε επιμέρους κυκλώματα που χρησιμοποιούνται για τις διατάξεις παραγωγής συσχετισμένων φωτονίων στο τσιπ (Integrated Source of Correlated Photons).

Η Εικόνα 6.4 παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη δομή που βασίζεται σε Si φωτονικά για τη δημιουργία συσχετισμένων ζευγών φωτονίων και αποτελείται από τις παρακάτω δομικές μονάδες [6.20]: Δακτύλιοι συντονισμού οι οποίοι προσφέρουν την παραγωγή του ζεύγους φωτονίων (ω_s, ω_i) μέσα από την αξιοποίηση του μη-γραμμικού μηχανισμού στην κοιλότητα συντονισμού, μια δομή φιλτραρίσματος με σκοπό την καταπίεση της συχνότητα άντλησης (ω_p), το φίλτρο διαχωρισμού των παραγόμενων φωτονίων στην έξοδο, τις Si παθητικές δομές σύζευξης στο τσιπ (Grating Couplers) και τους Si παθητικούς κυματοδηγούς επικοινωνίας πάνω στο τσιπ. Η δυνατότητα για συνέργεια της φωτονικής και πλασμονικής τεχνολογίας διατηρώντας τις κβαντικές ιδιότητες κατά τη διαδοχική μετατροπή φωτονίων σε πλασμόνια και αντίστροφα επιτρέπει το σχεδιασμό μια ολοκληρωμένης πλατφόρμας που θα αξιοποιεί και τις δύο τεχνολογίες.



Εικόνα 6.5: Αξιοποίηση DLSPP τεχνολογίας κυματοδηγών για την υλοποίηση υβριδικών κυκλωμάτων που προορίζονται για την πηγή ζεύγους συσχετισμένων σωματιδίων (entangled photons&plasmons) πάνω στο τσιπ: (α) Κοιλότητα υβριδικών πλασμονικών κυματοδηγών τεχνολογίας HSP (Hybrid Silicon Plasmonics-HSP) για την υλοποίηση μη-γραμμικής κοιλότητας με δυνατότητα φασματικής μετατόπισης (tuning mechanism), (β) DLSPP κυματοδηγοί για την υλοποίηση φίλτρου καταπίεσης (suppression) της κεντρικής συχνότητας (ω_p), (γ) Διπλοί μικρο-δακτύλιοι SOI νανο-κυματοδηγών για το φασματικό διαχωρισμό των συχνοτήτων των συσχετισμένων φωτονίων (entangled photons).

Στη συνέχεια αναδεικνύονται τα βασικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε τεχνολογίας που μπορεί να αξιοποιηθούν για τα επιμέρους κυκλώματα της δομής με τα αντίστοιχα κέρδη που συνεπάγονται. Η αξιοποίηση δακτυλίων υβριδικής τεχνολογίας Si-πλασμονίων (Hybrid Silicon Plasmonic-HSP) πηγάζει από τη δυνατότητα για μη-γραμμική συμπεριφορά των υβριδικών πλασμονικών κυματοδηγών (HSP) σε ανεκτά επίπεδα απωλειών [6.21]. Οι δομές HSP εξασφαλίζουν υψηλές τιμές του γινομένου Q^3/R^2 που καθορίζει τη συχνότητα γέννησης συζευγμένων φωτονίων [6.22], προσφέρουν τη δυνατότητα να επιλεγθούν κατάλληλα διηλεκτρικά υλικά ώστε να περιοριστεί δραστικά η παρουσία θορύβου (πχ. λόγω εξαναγκασμένης σκέδασης Raman) ενώ επιτυγχάνεται και η δυναμική λειτουργία με χαμηλή κατανάλωση ισχύος αξιοποιώντας το δομικό πλεονέκτημα της πλασμονικής τεχνολογίας. Η τεχνολογία DLSPP κυματοδηγών μπορεί να αξιοποιηθεί για να επιτευχθεί δραστική περικοπή στο μέγεθος της δομής του φίλτρου που επιλέγεται για να καταπιέσει τη συχνότητα άντλησης πριν τον διαχωρισμό των συζευγμένων φωτονίων. Η Si τεχνολογία έχοντας επιδείξει υψηλής ποιότητας δομές δακτυλίων ανώτερης τάξης, αξιοποιείται για το τελικό στάδιο του διαχωρισμού των συχνοτήτων [6.23]. Η Si παθητική πλατφόρμα άλλωστε αποτελεί και τη μητρική πλατφόρμα ολοκλήρωσης του υβριδικού κβαντικού τσιπ φιλοξενώντας με μικρές απώλειες διασύνδεσης τις πλασμονικές δομές που απαιτούνται για την γεννήτρια κβαντικά συσχετισμένων φωτονίων πάνω στο τσιπ.

Αναφορές Κεφαλαίου 6

- [6.1] O. Gili de Villasante, P. Tcheg, B. Wang, A. Suna, G. Giannoulis, I. Lazarou, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, N. Pleros, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, "Design, fabrication, and characterisation of fully etched TM grating coupler for photonic integrated system-in-package", in Proceedings of SPIE Photonics Europe 2012, 8431-15, Brussels, Belgium, 15-19 April 2012.
- [6.2] S. Papaioannou, G. Dabos, K. Vyrsokinos, Giannis Giannoulis, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Eight-Channel Second-Order Ring Resonator based SOI Multiplexers/Demultiplexers for Optical Interconnects", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2014), paper P2.7, 21-25 September 2014. Cannes, France.
- [6.3] O. Tsilipakos et al., "Interfacing Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides: Theoretical Analysis and Experimental Demonstration", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 48, No. 5, pp. 678-687 (2012).
- [6.4] G. Giannoulis et al., "Data Transmission and Thermo-optic Tuning Performance of Dielectric-loaded Plasmonic Structures Hetero-Integrated on a Silicon Chip", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 24, No. 5, pp. 374-376 (2012).
- [6.5] D. Kalavrouziotis et al., "First demonstration of active plasmonic device in true data traffic conditions: ON/OFF thermo-optic modulation using a hybrid silicon-plasmonic asymmetric MZI", in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National

Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NFOEC'2012), OW3E.3, Los Angeles, CA, USA, 4-8 March 2012.

[6.6] D. Kalavrouziotis et al., "10 Gb/s Transmission and Thermo-Optic Resonance Tuning in Silicon-Plasmonic Waveguide Platform", in Proceedings of 37th European Conference on Optical Communication (ECOC2011), We.10.P1.27, Article No. 6066097, Geneva, Switzerland, 18-22 September 2011.

[6.7] S. Papaioannou et al., "Ultracompact and Low-Power Plasmonic MZI Switch Using Cyclomer Loading", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.27, Issue 9, pp. 963-966 (2015).

[6.8] J.-C. Weeber et al., "Characterization of CMOS metal based dielectric loaded surface plasmon waveguides at telecom wavelengths", Optics Express, Vol.25, No.1, pp.394-408 (2017).

[6.9] D.Y. Fedyanin, D.I.Yakubovsky, R.M. Kirtaev, and V.S. Volkov, "Ultralow-Loss CMOS Copper Plasmonic Waveguides", Nano Letters, Vol.16, pp.362-366 (2016).

[6.10] A.V. Krasavin, A. V. Zayats, "Silicon-based plasmonic waveguides", Optics Express Vol. 18, Issue 11, pp. 11791-11799 (2010).

[6.11] Hideyuki Nasu, "VCSEL-based solderable optical modules", Presentation at the 4th Symposium on Optical Interconnect for Data Centers, Session 2, European Conference of Optical Communications (ECOC 2016), Dusseldorf, Germany, September 19, 2016.

[6.12] M. Immonen et al., "End-to-end Optical 25Gb/s Link Demonstrator with Embedded Waveguides, 90° Out-of-Plane Connector and On-board Optical Transceivers", in Proc. of 42th European Conference and Exhibition on Optical Communications (ECOC 2016), paper Th.2.P2.SC4.13, September 22 2016, Dusseldorf, Germany.

[6.13] Bert Jan Offrein, "System and Device-level Integration Trends of Optical Interconnects in Data Centers", Presentation at the 4th Symposium on Optical Interconnect for Data Centers, Session 2, European Conference of Optical Communications (ECOC 2016), Dusseldorf, Germany, September 19, 2016.

[6.14] <http://www.phoxtrot.eu/>

[6.15] Steffen Uhlig and Mats Robertsson, "Limitations to and Solutions for Optical Loss in Optical Backplanes," IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 24, pp.1710-1719 (2006).

[6.16] E. Altewischer, M.P. van Exter and J.P. Woerdman, "Plasmon-assisted transmission of entangled photons", Nature Letters, Vol.418, pp.304-306, 18 July 2002.

[6.17] C. K. Hong, Z.Y. Ou and L. Mandel, "Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference", Phys. Rev. Lett. 59, pp.2044–2046 (1987).

[6.18] J.S. Fakonias, H. Lee, Y.A. Kelaita, and H.A. Atwater, "Two-plasmon quantum interference", Nature Photonics Letters, Vol.8, pp.317-320, April 2014.

[6.19] S.I. Bozhevolnyi and N.A. Mortensen, "Plasmonics for emerging quantum technologies", De Gruyter Nanophotonics, DOI: 10.1515/nanoph-2016-0179

[6.20] N.C. Harris et al, "Integrated Source of Spectrally Filtered Correlated Photons for Large Scale Quantum Photonic Systems", *Physical Review X* 4, 041047 (2014).

[6.21] A. Ptilakis, and E.E. Kriezis, "Highly nonlinear hybrid silicon-plasmonic waveguides: analysis and optimization", *Journal of Optical Society of America B*, Vol.30, No.7, pp.1954-1965 (2013).

[6.22] S. Azzini et al, "Ultra-low power generation of twin photons in a compact silicon ring resonator", *Optics Express*, Vol.20, No.21, pp. 23100-23107 (2012).

[6.23] W. Bogaerts et al., "Silicon microring resonators", *Special Issue of Laser and Photonic Reviews*, Vol.6, Issue 1, pp.47-73 (2012).

Παράρτημα Α. Λίστα εργασιών Υποψήφιου Διδάκτορα κατά την έρευνα του στην πορεία της διατριβής του

Α. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά με κριτές

J1. M. Bougioukos, Ch. Kouloumentas, M. Spyropoulou, **Giannis Giannoulis**, D.Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A.Poustie, G. Maxwell, H. Avramopoulos, *Optics Express*, Vol. 19, Issue. 12, pp. 11479-11489 (2011), "Multi-format all-optical processing based on a large-scale, hybridly integrated photonic circuit".

J2. **Giannis Giannoulis**, D. Kalavrouziotis, D. Apostolopoulos, S. Papaioannou, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, K. Hassan, J.-C. Weeber, A. Dereux, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, K. Vyrsoinos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, No. 5, pp. 374-376 (2012), "Data Transmission and Thermo-optic Tuning Performance of Dielectric-loaded Plasmonic Structures Hetero-Integrated on a Silicon Chip".

J3. D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vyrsoinos, and N. Pleros, *Optics Express*, Vol. 20, No. 7, pp. 7655-7662 (2012), "0.48Tb/s (12x40Gb/s) WDM transmission and high-quality thermo-optic switching in dielectric loaded plasmonics".

J4. O. Tsilipakos, A. Ptilakis, T. V. Yioultsis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, K. Hassan, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, N.Pleros and E. E. Kriezis *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 48, No. 5, pp. 678-687 (2012), "Interfacing Dielectric-Loaded Plasmonic and Silicon Photonic Waveguides: Theoretical Analysis and Experimental Demonstration".

J5. D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24 (12), pp. 1036-1038, (2012), "Active plasmonics in true data traffic applications: Thermo-optic ON/OFF gating using a silicon-plasmonic asymmetric MZI".

J6. H. Brahmī, **Giannis Giannoulis**, M. Menif, V. Katopodis, D. Kalavrouziotis, C. Stamatiadis, C. Kouloumentas, H. Avramopoulos and D. Erasme, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24 (9), pp. 721-723 (2012), "Experimental Demonstration of an Elastic Packet Routing Node Based On OCDMA Label Coding".

J7. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, L. Markey, A. Dereux, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N. Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, Issue 20, pp. 1819-1822 (2012), "Demonstration of a Plasmonic MMI Switch in 10 Gb/s True Data Traffic Conditions".

J8. H. Brahmī, **Giannis Giannoulis**, M. Menif, V. Katopodis, D. Kalavrouziotis, C. Stamatiadis, C. Kouloumentas, H. Avramopoulos and D. Erasme, *Elsevier Optics Communications*, Vol. 312, pp. 175-184 (2014), "On the fly all-optical packet switching based on hybrid WDM/OCDMA labeling scheme".

J9. C. Reis, G. Parca, M. Bougioukos, A. Maziotis, S. Pinna, **Giannis Giannoulis**, H. Brahmi, P. Andre, N. Calabretta, V. Vercesi, G. Berrettini, C. Kouloumentas, A. Bogoni, T. Chattopadhyay, D. Erasme, H. Avramopoulos and A. Teixeira, *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol.6, Issue 7, pp.629-634 (2014), "Experimental Analysis of an All-Optical Packet Router".

J10. S. Papaioannou, D. Fitsios, G. Dabos, K. Vyrsoinos, **Giannis Giannoulis**, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N. Pleros, *IEEE Photonics Journal*, Vol. 7. Issue 1, pp. 1-10 (2015), "On-Chip Dual-Stream DWDM Eight-Channel-Capable SOI-Based MUXs/DEMUXs with 40-GHz Channel Bandwidth".

J11. D. Fitsios, **Giannis Giannoulis**, V.M. Korpjærvi, J. Viheriälä, A. Laakso, N. Iliadis, S. Dris, M. Spyropoulou, H. Avramopoulos, G.T. Kanellos, N. Pleros and M.Guina, *OSA Applied Optics*, Vol.54, Issue 1, pp.46-52 (2015), "High-gain 1.3 μm GaInNAs semiconductor optical amplifier with enhanced temperature stability for all-optical signal processing at 10Gb/s".

J12. S. Papaioannou, **Giannis Giannoulis**, K. Vyrsoinos, F. Leroy, F. Zacharatos, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, S.I. Bozhevolnyi, A. Prinzen, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos and N.Pleros, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.27, Issue 9, pp. 963-966 (2015), "Ultracompact and Low-Power Plasmonic MZI Switch Using Cyclomer Loading".

J13. **Giannis Giannoulis**, V.M. Korpjærvi, N. Iliadis, J. Mäkelä, J. Viheriälä, D. Apostolopoulos, M. Guina and H. Avramopoulos, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.27, Issue 16, pp.1691-1694 (2015), "Bringing High-Performance GaInNAsSb/GaAs SOAs to True Data Applications".

B. Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια με κριτές

C1. N. Pleros, K. Vyrsoinos, S. Papaioannou, D. Fitsios, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. Kriezis, A. Million, T. Tekin, M. Baus, M. Karl, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, H. Avramopoulos, N. Djellali, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, J. Gosciniaç and S. Bozhevolnyi, "Tb/s Switching Fabrics for Optical Interconnects Using Heterointegration of Plasmonics and Silicon Photonics: The FP7 PLATON Approach", 23rd Annual Meeting of the IEEE Photonics Society, TuH2, Denver, Colorado, USA, November 2010 (invited).

C2. A. Dereux, K. Hassan, J.-C. Weeber, N. Djellali, S. I. Bozhevolnyi, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, N. Pleros, T. Tekin, M. Baus, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, and H. Avramopoulos, "Parametric study of dielectric loaded surface plasmon polariton add-drop filters for hybrid silicon/plasmonic optical circuitry," in *Proceedings of SPIE Photonics West*, Vol. 7945, 794513-1 - 794513-9, San Francisco, CA, USA, 24 January 2011 (invited).

C3. M. Spyropoulou, M. Bougioukos, **Giannis Giannoulis**, C. Kouloumentas, D. Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Bakopoulos, R. Harmon, D. Rogers, J. Harrison, A. Poustie, G. Maxwell, and H. Avramopoulos, in *Proceedings of Optical Fiber Communication (OFC) Conference 2011*, paper OThY2, Los Angeles, CA, USA, 6-10 March 2011.

C4. Ch. Kouloumentas, M. Bougioukos, M. Spyropoulou, D. Klonidis, **Giannis Giannoulis**, D. Kalavrouziotis, A. Maziotis, P. Gkroumas, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, A. Poustie, G. Maxwell, K.O. Velthaus, R. Kaiser, L. Moerl, I. Tomkos, and H. Avramopoulos, "Agile photonic integrated systems-on-chip enabling WDM terabit networks", in *Proceedings of 13th International*

Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2011), paper Tu.D6.3, Stockholm, Sweden, 26-30 June 2011 (invited).

C5. D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, S. Papaioannou, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, K. Hassan, J.-C. Weeber, A. Dereux, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, H. Avramopoulos, K. Vysokinos and N. Pleros, "10 Gb/s Transmission and Thermo-Optic Resonance Tuning in Silicon-Plasmonic Waveguide Platform", in Proceedings of 37th European Conference on Optical Communication (ECOC2011), We.10.P1.27, Article No. 6066097, Geneva, Switzerland, 18-22 September 2011.

C6. A. Dereux, K. Hassan, L. Markey, J.-C. Weeber, S. I. Bozhevolnyi, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E. E. Kriezis, S. Papaioannou, K. Vysokinos, N. Pleros, T. Tekin, M. Baus, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, and H. Avramopoulos, "Silicon-plasmonic router for optical interconnects : PLATON approach", in Proceedings of SPIE Photonics West 2012, San Francisco, CA, USA, 21-26 January 2012 (invited).

C7. D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vysokinos, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "First demonstration of active plasmonic device in true data traffic conditions: ON/OFF thermo-optic modulation using a hybrid silicon-plasmonic asymmetric MZI", in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NFOEC'2012), OW3E.3, Los Angeles, CA, USA, 4-8 March 2012.

C8. S. Papaioannou, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, K. Vysokinos, and N. Pleros, "480 Gb/s WDM (12x40 Gb/s) data transmission over a dielectric-loaded plasmonic waveguide", in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NFOEC'2012), OW3E.2, Los Angeles, CA, USA, 4-8 March 2012.

C9. O. Gili de Villasante, P. Tcheg, B. Wang, A. Suna, **Giannis Giannoulis**, I. Lazarou, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, N. Pleros, M. Baus, M. Karl, T. Tekin, "Design, fabrication, and characterisation of fully etched TM grating coupler for photonic integrated system-in-package", in Proceedings of SPIE Photonics Europe 2012, 8431-15, Brussels, Belgium, 15-19 April 2012.

C10. K. Vysokinos, S. Papaioannou, D. Kalavrouziotis, J.-C. Weeber, K. Hassan, L. Markey, A. Dereux, A. Kumar, S.I. Bozhevolnyi, M. Baus, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Low energy routing platforms for optical interconnects using active plasmonics integrated with silicon photonics", in Proceedings of 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON'2012), Coventry, England, July 2-5, 2012 (invited) (DOI: 10.1109/ICTON.2012.6254468).

C11. S. Papaioannou, **Giannis Giannoulis**, D. Kalavrouziotis, K. Vysokinos, J.-C. Weeber, K. Hassan, L. Markey, A. Dereux, A. Kumar, S.I. Bozhevolnyi, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "WDM switching Employing a Hybrid Silicon-Plasmonic A-MZI", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2012), Amsterdam, the Netherlands, 16-20 September, 2012.

C12. D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, L. Markey, A. Dereux, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "First Experimental Demonstration of a Plasmonic MMI Switch in 10 Gb/s True Data Traffic Conditions", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2012), Amsterdam, the Netherlands, 16-20 September, 2012.

C13. K. Vyrsoinos, S. Papaioannou, D. Kalavrouziotis, F. Zacharatos, L. Markey, J.-C. Weeber, A. Dereux, A. Kumar, S.I. Bozhevolnyi, M. Waldow, **Giannis Giannoulis**, D. Apostolopoulos, T. Tekin, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Low energy routing platforms for optical interconnects using active plasmonics integrated with silicon photonics", in Proceedings of 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON'2013), Cartagena, Spain June 23-27, 2013 (invited).

C14. D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, G. Kanakis, N. Iliadis, C. Spatharakis, J. Bauwelinck, and H. Avramopoulos, "Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects", in Proceedings of SPIE Photonics West 2014, Proc. SPIE 8991, Optical Interconnects XIV, 89910D, 1 - 6 February 2014, San Francisco, CA, USA.

C15. D. Fitsios, **Giannis Giannoulis**, N. Iliadis, V.-M. Korpjärvi, J. Viheriälä, A. Laakso, S. Dris, M. Spyropoulou, H. Avramopoulos, G. T. Kanellos, N. Pleros, M. D. Guina, "High Gain 1.3- μm GaInNAs SOA with Fast Gain Dynamics and Enhanced Temperature Stability", in Proceedings of SPIE Photonics West 2014, Proc. SPIE 8991, Optical Components and Materials XI, 898208, 1 - 6 February 2014, San Francisco, CA, USA.

C16. P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, D. Kalavrouziotis, **Giannis Giannoulis**, G. Kanakis, N. Iliadis, C. Spatharakis, J. Bauwelinck, and H. Avramopoulos, "Enabling new multiplexing concepts in optical interconnects through photonic integration workshop", in Proceedings of Workshop Optical Interconnect in Data Centers (EPIC 2014), pp.1-1, 18-19 March 2014, Berlin, Germany.

C17. V.M. Korpjärvi, **Giannis Giannoulis**, J. Mäkelä, J. Viheriälä, N. Iliadis, A. Laakso, H. Avramopoulos, and M. Guina "1.55 μm GaInNAsSb/GaAs Ridge Waveguide Lasers and Semiconductor Optical Amplifiers for Photonic Integrated Circuits", in Proceedings of IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC 2014), 7-10 September 2014, Mallorca, Spain.

C18. S. Papaioannou, G. Dabos, K. Vyrsoinos, **Giannis Giannoulis**, A. Prinzen, C. Porschatis, M. Waldow, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Eight-Channel Second-Order Ring Resonator based SOI Multiplexers/Demultiplexers for Optical Interconnects", in Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC'2014), paper P2.7, 21-25 September 2014. Cannes, France.

C19. **Giannis Giannoulis**, V.-M. Korpjärvi, N. Iliadis, J. Mäkelä, J. Viheriälä, D. Apostolopoulos, M. Guina and H. Avramopoulos, "Dilute Nitride SOAs for High-Speed Data Processing in Variable Temperature Conditions", in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (OFC/NFOEC'2015), paper W2A.20, 22-26 March 2015, Los Angeles, CA, USA.

C20. Giannis Giannoulis, V.-M. Korpiljärvi, N. Iliadis, J. Mäkelä, J. Viheriälä, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, Mircea Guina, and H. Avramopoulos, "1.55 μm Dilute Nitride SOAs with Low Temperature Sensitivity for Coolerless on-Chip Operation", in Proc. of 2015 IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS 2015), 06-09 December 2015, Cairo, Egypt.

C21. Giannis Giannoulis, N. Moraitis, N. Argyris, S. Dris, C. Lessi, S. Perdikouris, L. Kostikidou, D. Apostolopoulos, C. Spatharakis, I. Papafili, G. Agapiou, A.D. Panagopoulos, and H. Avramopoulos, "Field-Trial Demonstration of an Extended Reach GPON Supporting 60-GHz Indoor Wireless Access", in Proc. of SPIE Photonics West 2017, Paper No. 10103-20, 31.01.2017, San Francisco, CA, USA.

Γ. Αναρτήσεις (posters) σε συνέδρια/επιστημονικές ημερίδες

LC1. V.M Korpiljärvi, D. Fitsios, **Giannis Giannoulis**, J. Viheriälä, J. Mäkelä, A. Laakso, N. Iliadis, M. Spyropoulou, G.T. Kanellos, N. Pleros, and M. Guina, "GaInNAsSb/GaAs semiconductor optical amplifier and laser diodes", in Proceedings of 25th Nordic Semiconductor Meeting, 9-12 June, 2013, Espoo, Finland.

LC2. K. Vyrsoinos, D. Apostolopoulos, D. Kalavrouziotis, S. Papaioannou, **Giannis Giannoulis**, F. Zacharatos, L. Markey, J.-C. Weeber, K. Hassan, A. Dereux, A. Kumar, S. I. Bozhevolnyi, M. Waldow, H. Avramopoulos, and N. Pleros, "Active Plasmonics Integrated with Si-photonics for Tb/s Low-energy On-chip Switching Platforms", in Proceedings of 7th International Conference on Materials for Advanced Technologies (ICMAT'2013), Suntec, Singapore, 30 June - 5 July, 2013 (invited).

LC3. V.-M. Korpiljärvi, D. Fitsios, **Giannis Giannoulis**, J. Viheriälä, J. Mäkelä, A. Laakso, N. Iliadis, M. Spyropoulou, G.T. Kanellos, N. Pleros, and M. Guina, "GaInNAsSb/GaAs semiconductor optical amplifiers and laser diodes for optical interconnects", in Proceedings of COSTMP0805 final meeting Novel Gain Materials and Devices Based on III-V-N/Bi Compounds, 24 - 26 Sept 2013, Istanbul, Turkey.

LC4. J. Mäkelä, V.-M. Korpiljärvi, J. Viheriälä, **Giannis Giannoulis**, N. Iliadis, H. Avramopoulos, M. Guina, "1.55 μm GaInNAsSb/GaAs ridge waveguide lasers and semiconductor optical amplifiers", in Proceedings of OPD2014, Optics & Photonics Days, May 20 - 22, 2014, Turku, Finland.

Δ. Δημοσιεύσεις σε κεφάλαια βιβλίων

B.1 S. Papaioannou, K. Vyrsoinos, D. Kalavrouziotis, Giannis Giannoulis, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, F. Zacharatos, K. Hassan, J.-C. Weeber, L. Markey, A. Dereux, A. Kumar, S.I. Bozhevolnyi, A. Suna, O.G. de Villasante, T. Tekin, M. Waldow, O. Tsilipakos, A. Ptilakis, E.E. Kriezis, and N. Pleros, "Merging Plasmonics and Silicon Photonics Towards Greener and Faster Network on-Chip Solutions for Data Centers and High-Performance Computing Systems". Plasmonics-Principles and Applications, Ki Young Kim (Ed.), ISBN: 978-953-51-0797-2, InTech, 24 October 2012 (DOI: 10.5772/51853).

Παράρτημα Β. Συντομεύσεις

AI	Artificial Intelligence
AMZI	Asymmetric MZI
ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWG	Array Waveguide Grating
B2B	Back-to-Back
BER	Bit Error Rate
CD	Critical Dimensions
CG	Core Group
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMP	Chip Multi Processor
CPE	Computer Processing Element
CPP	Channel Plasmon Polaritons
CPU	Central Processing Unit
CW	Continuous Wave
DBR	Distributed Bragg Reflector
DC	Direct Current
DFB	Distributed Feedback
DL	Deep Learning
DLSP	Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DRAM	Dynamic Random Access Memory
EAM	Electro-absorption Modulator
ER	Extinction Ratio
EBL	Electron Beam Lithography
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EO	Electro Optic
FBG	Fiber Bragg Grating
FEM	Finite Element Method
FLOP	Floating Point Operations per Second
FOM	Figure of Merit
FSR	Free Spectral Range
FWHM	Full Width Half Maximum

GC	Grating Coupler
GPGPU	General Purpose computing on Graphics Processing Unit
GPU	Graphics Processing Unit
HB	Hard Baking
HNLF	Highly Non Linear Fiber
HPC	High Performance Computing
HSP	Hybrid Silicon Plasmonic
HSQ	Hydrogen SilsesQuioxane
I/O	Input/Output
IC	Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
IPG	Intertape Polymer Group
IR3	Industrial Revolution 3
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors
LC	Inductive Capacitive
LP	Linear Polarized
LRM	Leakage Radiation Microscopy
LRSPP	Long Range Surface Plasmon Polariton
MC	Multi Carrier
MCP	Multi Core Processor
MFD	Mode Field Diameter
MI	Metal Insulator
MIM	Metal Insulator Metal
MIMD	Multiple Instructor Multiple Data
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLL	Mode Locked Laser
MPE	Management Processing Element
MRR	Micro Ring Resonator
MUX	Multiplexer
MZI	Mach Zehnder Interferometer
MZM	Mach Zehnder Modulator
IR	InfraRed
NoB	Network on Board
NoC	Network on Chip

NRZ	Non-Return to Zero
OBPF	Optical Bandpass Filter
OCM	Optical Clock Multiplier
ODL	Optical Delay Line
OLR	Ohmic Loss Rate
OOK	On-Off Keying
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OSO	Optical Sampling Oscilloscope
OTDM	Optical Time Division Multiplexing
PC	Polarization Controller
PCB	Printed Circuit Board
PD	Photodiode
PEC	Proximity Error Correction
PER	Polarization Extinction Ratio
PIC	Photonic Integrated Circuit
PMMA	Poly Methyl Meth Acrylate
PNoC	Photonic Network on Chip
PRBS	Pseudorandom Bit Sequence
RC	Resistive Capacitive
RF	Radio Frequency
ROP	Received Optical Power
RZ	Return to Zero
SC	Single Carrier
SEM	Scanning Electron Microscope
SiN	Silicon Nitride
SMF	Single Mode Fiber
SNOM	Scanning Near-field Optical Microscopy
SOC	System on Chip
SOG	Spin On Glass
SOI	Silicon On Insulator
SoP	State of Polarization
SPM	Self Phase Modulation
SPPs	Surface Plasmon Polaritons
SSE	Sum of Squared Errors

TE	Transverse Electric
TFP	Total Factor Productivity
TM	Transverse Magnetic
TOC	Thermo-Optic Coefficient
TPA	Two Photon Absorption
TUB	Technical University of Berlin
UB	University of Bourgogne
UV	Ultraviolet
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
VOA	Ultraviolet
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WRR	Waveguide Ring Resonator