



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

**Πλασμονικές Διατάξεις για Ταχύρρυθμες Επικοινωνίες
Μικρών Αποστάσεων σε Υπολογιστικά Κέντρα**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ε. Παναγιώτου

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022



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

Πλασμονικές Διατάξεις για Ταχύρρυθμες Επικοινωνίες Μικρών Αποστάσεων σε Υπολογιστικά Κέντρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Ε. Παναγιώτου

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 20ή Ιουλίου 2022

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Αθ. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2022

.....

Ιωάννης Ε. Παναγιώτου

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

Copyright © Ιωάννης Ε. Παναγιώτου, 2022.

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.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	11
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	15
«ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ»	15
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.2 ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΑ	16
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	21
«ΠΛΑΣΜΟΝΙΑ»	21
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	21
2.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΠΛΑΣΜΟΝΙΑ	23
2.3 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΠΛΑΣΜΟΝΙΩΝ	25
2.3.1 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΠΛΑΣΜΟΝΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ	25
2.3.2 ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΠΛΑΣΜΟΝΙΩΝ ΜΕ ΠΡΟΣΠΤΩΣΗ ΦΩΤΟΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΜΕΤΑΛΛΟΥ / ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ	26
2.4 ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΥΣΚΕΥΩΝ	29
3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	33
«ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΈΧΟΥΝ ΩΣ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ»	33
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	33
3.2 ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΟΙ ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΙ	34
3.2.1 ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΙ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ / ΜΕΤΑΛΛΟΥ / ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ	35
3.2.2 ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΙ ΜΕΤΑΛΛΟΥ / ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ / ΜΕΤΑΛΛΟΥ	39
3.2.3 DLSPPW ΚΥΜΑΤΟΔΗΓΟΙ	42
3.3 ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΟΙ ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ (PLASMONIC COUPLERS)	45
3.4 ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΟΙ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΕΣ (PLASMONIC SPLITTERS)	48

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	53
«ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ»	53
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
4.2 ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΟ MACH-ZEHNDER	54
4.3 ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗΣ (ROUTER) ΠΥΡΙΤΙΟΥ-ΠΛΑΣΜΟΝΙΟΥ	56
4.3.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ (ROUTER) 2x2	57
4.3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ (ROUTER) 2x2	60
4.3.3 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΤΗ (ROUTER) 4x4	65
4.4 ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΑ LASER	67
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ	72
«ΤΟ ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΜΟΝΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΕΝΤΡΑ (DATA CENTERS)»	72
ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	77

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη ορισμένες από τις πιο σημαντικές πλασμονικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται σε ταχύρρυθμες επικοινωνίες μικρών αποστάσεων σε υπολογιστικά κέντρα.

Το πρώτο κεφάλαιο έχει εισαγωγικό χαρακτήρα και αναφέρεται στις ιδιότητες των μετάλλων και στη συμπεριφορά τους όταν προσπίπτει φως σε αυτά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των επιφανειακών πλασμονίων και εν συνεχεία αναλύονται δύο μέθοδοι διέγερσής τους. Πρόκειται για τη διέγερση με πρόσπτωση ηλεκτρονίων στο μέταλλο και την διέγερση με πρόσπτωση φωτός στη διεπιφάνεια μετάλλου / διηλεκτρικού. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση ορισμένων χαρακτηριστικών της πλασμονικής τεχνολογίας και δίνοντας παραδείγματα για το πώς αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά αυτά στη δημιουργία συσκευών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα εξαρτήματα που έχουν ως βάση την πλασμονική τεχνολογία. Αρχικά παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας των πλασμονικών κυματοδηγών διηλεκτρικού / μετάλλου / διηλεκτρικού, μετάλλου / διηλεκτρικού / μετάλλου και των DLSPPW κυματοδηγών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των πλασμονικών συζευκτών (plasmonic couplers) και των πλασμονικών διαχωριστών (plasmonic splitters).

Στο τέταρτο κεφάλαιο της μελέτης παρουσιάζονται ορισμένες χαρακτηριστικές πλασμονικές διατάξεις. Η αρχή γίνεται με το συμβολόμετρο Mach-Zehnder, του οποίου παρουσιάζεται η δομή και ο τρόπος λειτουργίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά οι πλατφόρμες δύο δρομολογητών (router) πυριτίου-πλασμονίου. Ο ένας δρομολογητής είναι 2x2 και ο άλλος 4x4. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την αναλυτική παρουσίαση της δομής και του τρόπου λειτουργίας των πλασμονικών laser.

Η μελέτη ολοκληρώνεται με μία σύνοψη και την παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν κατά την πραγματοποίησή της.

Λέξεις κλειδιά: Επιφανειακά Πλασμονικά Πολαριτόνια, Πλασμονικοί Κυματοδηγοί, Πλασμονικοί Συζεύκτες, Πλασμονικοί Διαχωριστές, Δρομολογητής Πυριτίου-Πλασμονίου.

ABSTRACT

The purpose of this study is to present some of the most important plasmonic devices used in short distance high speed communications in data centers.

The first chapter is introductory and refers to the properties of metals and their behaviour during light incidence.

The second chapter examines the characteristics of surface plasmons. Subsequently, two methods of excitation of surface plasmons are described. The first method is by using electron incidence on the metal, while the second one uses light incidence on the metal / dielectric interface. The chapter concludes with the presentation of certain characteristics of plasmonic technology and some examples of how these plasmonic features are utilized in device manufacturing.

The third chapter presents various components whose function is based on plasmonic technology. This section begins by examining the characteristics and mode of operation of the dielectric / metal / dielectric plasmonic waveguides, the metal / dielectric / metal plasmonic waveguides and the DLSPPW waveguides. The above are followed by a presentation of the structure and functional characteristics of plasmonic couplers and plasmonic splitters.

The fourth chapter of the study describes some typical plasmonic devices. Mach-Zehnder interferometer is the first to be presented, with focus given on its structure and mode of operation. Then, two silicon-plasmon router platforms are presented in detail, the first router being 2x2 and the second 4x4. The chapter concludes with a detailed presentation of the structure and mode of operation of plasmonic lasers.

The study concludes with a summary and an exposition of conclusions.

Keywords: Surface Plasmon Polaritons, Plasmonic Waveguides, Plasmonic Splitters, Plasmonic Couplers, Silicon-Plasmon Router.

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 – Τα επιφανειακά πλασμόνια (<i>surface plasmons</i>) που δημιουργούνται στη διεπαφή μετάλλου – διηλεκτρικού [8].	23
Σχήμα 2 – Λεπτό ασημένιο φύλλο με δεκάδες μικρές οπές (με διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος) στο οποίο προσπίπτει φως και κατά την έξοδο του παρουσιάζεται ενισχυμένο [8].	24
Σχήμα 3 – Γραφική παράσταση της καμπύλης διασκεδασμού των επιφανειακών πλασμονίων και της καμπύλης διασκεδασμού του φωτός [9].	26
Σχήμα 4 – Οι πειραματικές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των επιφανειακών πλασμονίων. Αριστερά: Γεωμετρία Otto. Δεξιά: Γεωμετρία Kretschmann – Raether [9].	28
Σχήμα 5 – Οι σχέσεις διασκεδασμού που διέπουν τη γεωμετρία Kretschmann – Raether [9].	28
Σχήμα 6 – Η διάδοση ενός SPP κατά μήκος της διεπιφάνειας μετάλλου / διηλεκτρικού [11].	29
Σχήμα 7 – Διαστάσεις και αντίστοιχες ταχύτητες διάδοσης του σήματος στην πλασμονική, στη φωτονική και στην ηλεκτρονική [8], [11].	31
Σχήμα 8 – Μερικές αρχιτεκτονικές πλασμονικών κυματοδηγών και η κατανομή πεδίου σε κάθε μία από αυτές [8].	32
Σχήμα 9 – Συμμετρική διαμόρφωση διηλεκτρικού / μετάλλου / διηλεκτρικού σε πλασμονικό κυματοδηγό. ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού. ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά του μετάλλου [14].	36
Σχήμα 10 – Αριστερά: Η συνιστώσα E_x του τρόπου LR-SPP αλλάζει πρόσημο στο μέσο του μετάλλου και διαχέεται στο διηλεκτρικό. Δεξιά: Η συμμετρική συνιστώσα E_z του τρόπου LR-SPP [14].	37

Σχήμα 11 – Αριστερά: Η σχεδόν σταθερή συνιστώσα E_x του τρόπου SR-SPP. Δεξιά: Η αντισυμμετρική συνιστώσα E_z του τρόπου SR-SPP [14].	38
Σχήμα 12 – Ενεργός δείκτης και μήκος διάδοσης του LR-SPP τρόπου και του SR-SPP τρόπου σε ένα φύλλο χρυσού που περιβάλλεται από αέρα και μήκος κύματος διέγερσης 775 nm [14].	39
Σχήμα 13 – Συμμετρική διαμόρφωση μετάλλου / διηλεκτρικού / μετάλλου σε πλασμονικό κυματοδηγό. ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά μετάλλου. ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά διηλεκτρικού [14].	40
Σχήμα 14 – Αριστερά: Η συνιστώσα E_x του τρόπου G-SPP που αλλάζει πρόσημο κατά μήκος του διηλεκτρικού κενού. Δεξιά: Η συνιστώσα E_z του τρόπου G-SPP που διατηρεί σταθερό πρόσημο [14].	41
Σχήμα 15 – Η δομή ενός Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguide (DLSPPW) [10].	42
Σχήμα 16 – Το προφίλ της μονορυθμικής διάδοσης του πλασμονίου σε DLSPPW κυματοδηγό [10].	44
Σχήμα 17 – Οι ρυθμοί και οι τιμές του ενεργού δείκτη διάθλασης για δεδομένη τιμή του ύψους και διαρκώς αυξανόμενη τιμή του πλάτους του πολυμερούς [10].	45
Σχήμα 18 – Το μήκος σύζευξης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των δύο κυματοδηγών [10].	46
Σχήμα 19 – Η σύζευξη σε συνάρτηση με την απόσβεση που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της διάδοσης [10], [16].	47
Σχήμα 20 – Η δομή ενός πλασμονικού διαχωριστή που βασίζεται στις S καμπές (S bends) [10], [16].	48
Σχήμα 21 – Μη συμμετρικός διαχωριστής (splitter) και παρουσίαση της εξάρτησης της απόδοσης σύζευξης (coupling efficiency) (a) από την μετατόπιση του βραχίονα εισόδου (input arm shift) και (b) από το μήκος του διαχωριστή (splitter length) [10], [16].	50

Σχήμα 22 – Οι απώλειες που παρατηρούνται κατά το διαχωρισμό του διαδιδόμενου πεδίου από τον ένα κυματοδηγό εισόδου στους δύο κυματοδηγούς εξόδου και η επιρροή της τιμής και του σχήματος της γωνίας που υπάρχει στο σημείο διαχωρισμού [10].	51
Σχήμα 23 - Δύο από τις πολλές πιθανές διαφορετικές δομές ενός διαχωριστή (splitter) τύπου Υ με συζευγμένους πλασματικούς κυματοδηγούς [10], [16].	52
Σχήμα 24 – Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder interferometer). Απεικόνιση της εξάρτησης του σήματος εξόδου στο τμήμα σύζευξης (3) από τη διαφορά φάσης στους δύο βραχίονες. Η περίπτωση της ενισχυτικής και της καταστρεπτικής παρεμβολής [16]......	55
Σχήμα 25 – Η αρχιτεκτονική του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [20]	58
Σχήμα 26 – Η διάταξη του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [20]	60
Σχήμα 27 – Ο 2x2 DLSPP διακόπτης διπλού δακτυλίου [20].....	61
Σχήμα 28 – Η απόδοση στο πεδίο του χρόνου του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου όταν εισέρχονται στο router τα κανάλια 1 και 5 [20].	63
Σχήμα 29 – (a) Το διάγραμμα οφθαλμού των καναλιών 2,3,6 και 7 στη θύρα εξόδου 1. (b) Το διάγραμμα οφθαλμού των καναλιών 2,3,6 και 7 στη θύρα εξόδου 2. (c) Το φάσμα του σήματος πολλαπλού μήκους κύματος που λαμβάνεται στη θύρα εξόδου 1. (d) Το φάσμα του σήματος πολλαπλού μήκους κύματος που λαμβάνεται στη θύρα εξόδου 2. (e) Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (Extinction Ratio – ER) κάθε καναλιού που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 1. (f) Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (Extinction Ratio - ER) κάθε καναλιού που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 2 [20].	64
Σχήμα 30 – Η αρχιτεκτονική του 4x4 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [18].	65
Σχήμα 31 – Πλασματικά nanolaser με διαφορετικά επίπεδα οπτικού περιορισμού πέρα από το όριο διάθλασης του φωτός. (a-c): μονοδιάστατος πλασματικός οπτικός	

περιορισμός. (b): Πλασμονικό *nanolaser* που διαθέτει μία κοιλότητα εντός του επιπέδου και πλήρη εσωτερική ανάκλαση του τρόπου αντήχησης. (c): Πλασμονικό *nanolaser* τύπου *Fabry-Perot*. (d-f): πλασμονικός οπτικός περιορισμός δύο διαστάσεων. (e): Ένα αντηχείο τύπου *Fabry-Perot*. (f): Ένα αντηχείο ομοαξονικού τύπου. (g): Οι δύο πιθανές διαμορφώσεις ενός αντηχείου που χρησιμοποιεί τρισδιάστατο πλασμονικό οπτικό περιορισμό. (h): Ο τρόπος λειτουργίας ενός πλασμονικού *laser* [21]. 68

1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

«ΟΙ ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ»

1.1 Εισαγωγή

Τα μέταλλα παρουσιάζουν μία ξεχωριστή απόκριση όταν προσπίπτει πάνω τους φως, η οποία αξιοποιείται σε πληθώρα τεχνολογικών εφαρμογών. Η απόκριση αυτή παρουσιάζει ηλεκτροδυναμική φύση και χαρακτηρίζεται από την κίνηση ηλεκτρονίων αγωγιμότητας υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται έπειτα από την πρόσπτωση φωτός. Η κίνηση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας οδηγεί στο σχηματισμό δέσμιων καταστάσεων μεταξύ φωτονίων και ηλεκτρονίων (πλάσμα) και ονομάζεται πλασμόνιο [1].

Η επίδραση των ελεύθερων φορέων (ηλεκτρόνια) στις οπτικές ιδιότητες των μετάλλων βασίζεται στο μοντέλο του Drude που περιγράφει την ηλεκτρική αγωγιμότητα των μετάλλων. Το μοντέλο αυτό εισήχθη για πρώτη φορά από τον Γερμανό φυσικό Paul Drude το 1900 με στόχο να περιγράψει τη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων στα μέταλλα. Στο μοντέλο αυτό το σύνολο των φορέων (ελεύθερα ηλεκτρόνια) θεωρείται ότι συμπεριφέρεται όπως συμπεριφέρεται ένα αέριο. Πιο συγκεκριμένα ο Drude συνδύασε τα χαρακτηριστικά της ζώνης αγωγιμότητας των μετάλλων με τα χαρακτηριστικά της κινητικής θεωρίας των αερίων. Το μοντέλο του Drude υποθέτει ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται ως ελεύθερα σωματίδια τα οποία συγκρούονται με τις ατέλειες του πλέγματος, τις προσμίξεις, τα φωνόνια ή άλλα ηλεκτρόνια με περίπου σταθερό ρυθμό σκέδασης $\frac{1}{\tau}$ (όπου τ : ο χρόνος μεταξύ δύο σκεδάσεων). Μάλιστα η σκέδαση μεταξύ ηλεκτρονίων και φωνονίων είναι αυτή που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες των ευγενών μετάλλων σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος [2], [3].

1.2 Πρόσπτωση Φωτός σε Μέταλλα

Η πυκνότητα (n) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ενός μετάλλου που ορίζεται ως ο αριθμός των ηλεκτρονίων του μετάλλου (N) ανά μονάδα όγκου (V), δίνεται από τη σχέση:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{Z \rho N_A}{A} \quad (1)$$

Z : το σθένος του μετάλλου

ρ : η πυκνότητα της μάζας του μετάλλου

A : το ατομικό βάρος του μετάλλου

N_A : ο αριθμός του Avogadro

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια σκεδάζονται με τις ατέλειες του πλέγματος, τις προσμίξεις, τα φωνόνια ή με άλλα ηλεκτρόνια. Τα ακριβή χαρακτηριστικά και οι συνθήκες σκέδασης δεν είναι πλήρως γνωστά. Ο χρόνος μεταξύ δύο σκεδάσεων συμβολίζεται με (τ) και ονομάζεται «μέσος ελεύθερος χρόνος» ή «χρόνος χαλάρωσης». Έτσι η πιθανότητα σκέδασης σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα dt ισούται με $\frac{dt}{\tau}$. Ο μέσος ελεύθερος χρόνος (τ) δεν εξαρτάται ούτε από την ταχύτητα ούτε από τη θέση των ηλεκτρονίων. Η ταχύτητα των ηλεκτρονίων εξαρτάται από τη θερμοδυναμική ισορροπία, η οποία επιτυγχάνεται έπειτα από πάρα πολλές διαδοχικές σκεδάσεις [1].

Σε περίπτωση εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια αποκτούν επιτάχυνση (a) που δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{a} = -\frac{e \vec{E}}{m_e} \quad (2)$$

E : η ένταση του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

m_e : η μάζα του ηλεκτρονίου

Σε περίπτωση που δεν σκεδαστούν τα ηλεκτρόνια για χρονικό διάστημα (t), η ταχύτητα τους θα δίνεται από τη σχέση [1]:

$$\vec{U}(t) = \vec{a} t = -\frac{e \vec{E}}{m_e} t \quad (3)$$

Βέβαια επειδή η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων οφείλεται στη σκέδαση, γίνεται αντιληπτό ότι τα ηλεκτρόνια θα επιταχύνονται για χρονικό διάστημα (τ). Αν υποθεθεί ότι έπειτα από κάθε σκέδαση η ταχύτητα των ηλεκτρονίων είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα που είχαν πριν τη σκέδαση, τότε η μέση ταχύτητα των ηλεκτρονίων θα δίνεται από τη σχέση:

$$\langle \vec{U} \rangle = -\frac{e \vec{E}}{m_e} \tau \quad (4)$$

Η κίνηση των ηλεκτρονίων συμβάλλει στη δημιουργία πυκνότητας ρεύματος σύμφωνα με τη σχέση:

$$\vec{j} = -n e \langle \vec{U} \rangle = \left(\frac{n e^2 t}{m_e} \right) \vec{E} \quad (5)$$

n : το πλήθος των ηλεκτρονίων [1].

Η αγωγιμότητα (σ) είναι το μέγεθος που συνδέει το ρεύμα και το ηλεκτρικό πεδίο και ισούται με το αντίστροφο της ειδικής αντίστασης ρ ($\sigma = \frac{1}{\rho}$). Για την αγωγιμότητα ισχύει:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

Συγκρίνοντας τις εξισώσεις (4) και (5) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για την αγωγιμότητα (σ):

$$\sigma = \frac{n e^2 t}{m_e} \quad (7)$$

Η τελευταία εξίσωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέσου ελεύθερου χρόνου (τ) εφόσον είναι γνωστή (ή είναι εφικτό να υπολογιστεί) η αγωγιμότητα (σ) του μετάλλου και εφαρμόζεται όταν το ηλεκτρικό πεδίο δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου (χρονικά αμετάβλητο πεδίο) [1].

Στην περίπτωση που προσπίπτει φωτεινή ακτινοβολία (χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο), θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η μέση ορμή των κινούμενων ηλεκτρονίων:

$$\langle \vec{p} \rangle = m_e \langle \vec{U} \rangle \quad (8)$$

Συνεπώς αν σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή (t) η ορμή είναι $\vec{p}(t)$, τότε μετά από χρονικό διάστημα (dt) τα ηλεκτρόνια θα επιταχυνθούν υπό την επίδραση της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου. Βέβαια τα ηλεκτρόνια που σκεδάζονται $\left(\frac{dt}{\tau}\right)$ θα ακινητοποιηθούν με αποτέλεσμα να μην έχουν ορμή αφού η σκέδαση δρα ως μία μορφή τριβής κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων υπό την επίδραση της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου. Στην περίπτωση αυτή η ορμή των ηλεκτρονίων τη χρονική στιγμή ($t + dt$) θα δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{p}(t + dt) = \vec{p}(t) - \frac{dt}{\tau} \vec{p}(t) - e \vec{E} dt \quad (9)$$

Η κίνηση των ηλεκτρονίων λόγω της δράσης του ηλεκτρικού πεδίου προκύπτει από την τελευταία εξίσωση αφαιρώντας το $\vec{p}(t)$ κατά μέλη και στη συνέχεια διαιρώντας με (dt) κατά μέλη [1], [3]:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = -\frac{\vec{p}}{\tau} - e \vec{E} \quad (10)$$

Αν το ηλεκτρικό πεδίο είναι της μορφής $\vec{E}(t) = \vec{E}(\omega)e^{-i\omega t}$ και η ορμή είναι της μορφής $\vec{p}(t) = \vec{p}(\omega)e^{-i\omega t}$, τότε η τελευταία εξίσωση δίνει:

$$-i \omega \vec{p}(\omega) = -\frac{\vec{p}(\omega)}{\tau} - e \vec{E}(\omega) \quad (11)$$

Για την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος ισχύει:

$$\vec{j}(\omega) = -\frac{n e \vec{p}(\omega)}{m_e} = \frac{\frac{n e^2}{m_e}}{\frac{1}{\tau} - i \omega} E(\omega) \quad (12)$$

Έτσι η αγωγιμότητα θα περιγράφεται ως συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας (ω) με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσης [1], [3]:

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i \omega \tau} \quad (13)$$

$$\text{Με} \quad \sigma_0 = \frac{n e^2 \tau}{m_e} \quad (14)$$

Στην περίπτωση που η κυκλική συχνότητα είναι μηδέν ($\omega=0$) τότε $\sigma(\omega) = \sigma_0$, δηλαδή λαμβάνεται η εξίσωση (7) που παρουσιάστηκε παραπάνω. Επίσης αξίζει να τονιστεί ότι οι εξισώσεις (13) και (14) δε λαμβάνουν υπόψη την επίδραση του μαγνητικού πεδίου αφού είναι αρκετά ασθενές. Επιπρόσθετα η εξαγωγή των εξισώσεων αυτών βασίζεται στην υπόθεση ότι το ηλεκτρικό πεδίο μεταβάλλεται στο χρόνο και όχι στο χώρο. Η παραδοχή αυτή αντιστοιχεί στο γεγονός ότι το μήκος κύματος (λ) της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από την μέση ελεύθερη διαδρομή των κινούμενων ηλεκτρονίων. Αυτό συμβαίνει γενικότερα κατά την πρόσπτωση ορατής ακτινοβολίας σε ένα μέταλλο [1].

Η εξίσωση του κύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\nabla^2 \vec{E} + \frac{\omega^2 \varepsilon(\omega)}{c^2} \vec{E} = 0 \quad (15)$$

Επίσης η διηλεκτρική σταθερά του μετάλλου ως συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας, η οποία συσχετίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την οπτική απόκριση, δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + i \frac{4 \pi \sigma(\omega)}{\omega} \quad (16)$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων (13) και (14) που δίνουν την αγωγιμότητα, λαμβάνεται η παρακάτω σχέση για τη διηλεκτρική σταθερά του μετάλλου:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i \frac{\omega}{\tau}} \quad (17)$$

Όπου ω_p η συχνότητα πλάσματος η οποία δίνεται από τη σχέση [1], [2]:

$$\omega_p^2 = \frac{4 \pi n e^2}{m_e} \quad (18)$$

- **Για $\omega < \omega_p$:** Η διηλεκτρική σταθερά παίρνει αρνητική τιμή οπότε το διαδιδόμενο κύμα υφίσταται εκθετική απόσβεση. Αυτό σημαίνει ότι το κύμα ανακλάται έντονα καθώς διαδίδεται (σε ποσοστό 90% έως 95%) και υφίσταται μικρή απορρόφηση η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη του μέσου ελεύθερου χρόνου τ .

- **Για $\omega > \omega_p$:** Η διηλεκτρική σταθερά παίρνει αρνητική τιμή οπότε το μέταλλο συμπεριφέρεται ως ένα διαφανές υλικό. Ειδικότερα τα αλκαλικά μέταλλα συμπεριφέρονται ως διαφανή υλικά κατά την πρόσπτωση υπεριώδους ακτινοβολίας.
- **Για $\omega = \omega_p$:** Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια ταλαντώνονται και η ταλάντωση αυτή ονομάζεται ταλάντωση πλάσματος. Το στοιχειώδες σωματίδιο της ταλάντωσης αυτής ονομάζεται πλάσμονιο και έχει ενέργεια [1]:

$$E_{\text{πλάσμονιου}} = \hbar \omega_p \quad (19)$$

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

«Πλασμόνια»

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν οι τεχνολογικές εφαρμογές που έχουν ως βάση την αλληλεπίδραση των μετάλλων με το φως. Η αλληλεπίδραση αυτή έχει ηλεκτροδυναμικά χαρακτηριστικά και έχει ως βάση την ταλάντωση των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας έπειτα από την πρόσπτωση φωτός. Έτσι σχηματίζονται δέσμιες καταστάσεις μεταξύ φωτονίων και ηλεκτρονίων. Το πλασμόνιο είναι το κβαντικό σωματίδιο της ταλάντωσης του πλάσματος, δηλαδή του ηλεκτρονίου και πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μία συλλογική ταλάντωση της πυκνότητας του ηλεκτρονιακού νέφους σε οπτικές συχνότητες. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι τα πλασμόνια είναι εφικτό να συνδεθούν με φωτόνια και να δημιουργηθεί ένα νέο σωματίδιο που καλείται πολαριτόνιο του πλάσματος [7].

Εδώ και χρόνια τα πλασμόνια αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την δημιουργία συσκευών που βασίζεται στην αξιοποίηση των οπτικών ιδιοτήτων των μεταλλικών νανοδομών με στόχο την αποτελεσματική δρομολόγηση του φωτός. Τα μικροσκοπικά μεταλλικά σωματίδια παρουσιάζουν ένα σύνολο από σημαντικές οπτικές ιδιότητες που οφείλονται στην ικανότητα τους να υποστηρίζουν τη συλλογή φωτός που προκαλείται από ηλεκτρονικές διεγέρσεις που καλούνται επιφανειακά πλασμόνια [4].

Η τεχνολογία των πλασμονίων αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό όταν αποδείχθηκε ότι:

- Τα μεταλλικά νανοσύρματα είναι εφικτό να δομήσουν πολύ μικρότερα οπτικά κυκλώματα σε σύγκριση με τους διηλεκτρικούς κυματοδηγούς (πχ γυαλί).
- Οι μεταλλικές μεμβράνες με οπές της τάξεως της νανοκλίμακας παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή οπτική μετάδοση.

- Μία απλή λεπτή μεταλλική μεμβράνη μπορεί να λειτουργήσει σαν ένας οπτικός φακός.

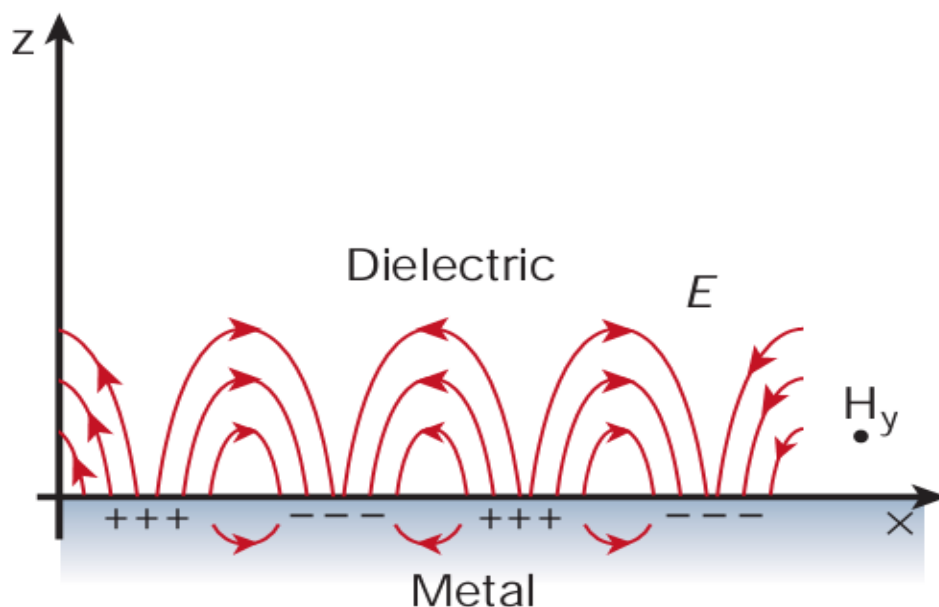
Οι πλασμονικές συσκευές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες ως εξαρτήματα των μεταλλικών τα οποία είναι τεχνητά οπτικά υλικά με ορθολογικά σχεδιασμένη γεωμετρία που χρησιμοποιούνται σε διατάξεις δομικών στοιχείων της τάξεως της νανοκλίμακας. Ακόμα και ένα μικρό σφαιρικό μεταλλικό νανοσωματίδιο είναι εφικτό να λειτουργήσει ως μία πολύ μικρή κεραία με δυνατότητα συλλογής και συγκέντρωσης φωτεινών κυμάτων [4].

Τα προηγούμενα χρόνια έχουν παρουσιαστεί πολλές διαφορετικές χρήσεις των πλασμονίων σε πληθώρα διαφορετικών τομέων. Οι κυριότεροι τομείς και οι κυριότερες χρήσεις είναι οι εξής:

- Νανομεταλλικές δομές που προσφέρουν ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και δυνατότητα ταυτόχρονης ηλεκτρονικής και οπτικής λειτουργίας
- Τσιπ υπολογιστών και συσκευές αποθήκευσης δεδομένων
- Επιφανειακά ενισχυμένη σκέδαση Raman (Surface Enhanced Raman Scattering)
- Επιφανειακό πλασμονικό αντηχείο (Surface Plasmon Resonance)
- Ενεργές πλασμονικές συσκευές που επιτρέπουν στα οπτικά σήματα που έχουν την μορφή επιφανειακών πλασμονικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPP) να ενεργοποιηθούν έπειτα από μία ηλεκτρική ή οπτική διέγερση
- Εφαρμογές σε γενικευμένους τομείς όπως η οπτική ανίχνευση, η παραγωγή φωτός και η βιοϊατρική [4], [5], [6], [7]

2.2 Επιφανειακά Πλασμόνια

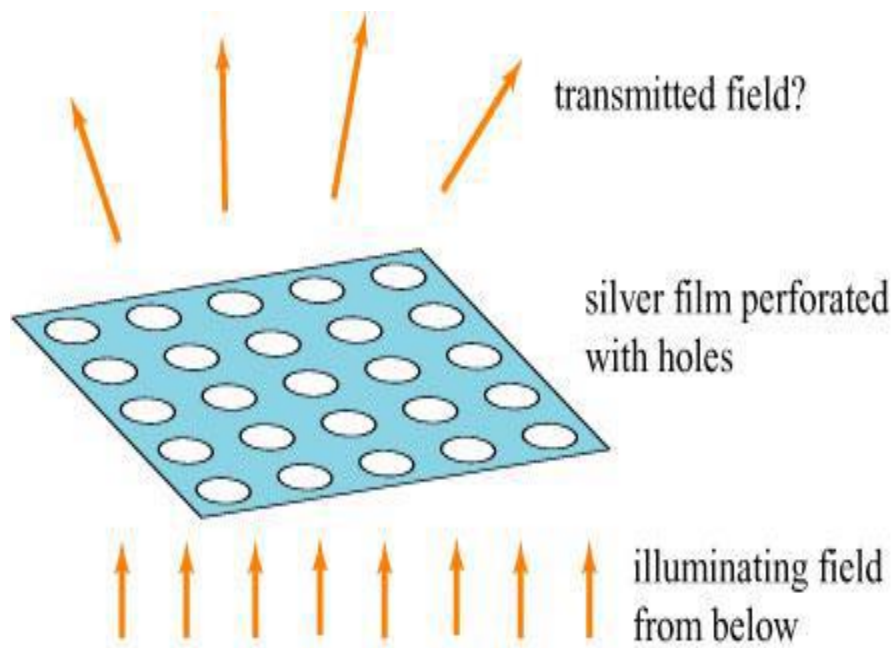
Το πλασμόνιο είναι ένα ψευδοσωματίδιο (quasiparticle) που εισήχθη αρχικά από τον Ritchie το 1957 προκειμένου να ερμηνευθούν οι απώλειες που παρατηρούνται κατά την ταχύτατη διέλευση των ηλεκτρονίων μέσα από λεπτές μεταλλικές μεμβράνες. Όταν ο αγωγός (πχ μέταλλο) έρθει σε επαφή με κάποιο διηλεκτρικό (πχ αέρας), τότε σχηματίζονται επιφανειακά πλασμόνια (surface plasmons) στην διεπαφή μεταξύ διηλεκτρικού και αγωγού. Τα επιφανειακά πλασμόνια είναι μία μορφή κυμάτων που οφείλονται σε ηλεκτρονιακές διεγέρσεις (μαζικές διεγέρσεις ηλεκτρονίων) που συσσωρεύονται στην διεπαφή και αποσβένουν εκθετικά μεταξύ δύο διαφορετικών γειτονικών υλικών. Επί της ουσίας τα ηλεκτρόνια λειτουργούν ως ένα κύμα που απλώνεται στην επιφάνεια του μετάλλου [8].



Σχήμα 1 – Τα επιφανειακά πλασμόνια (surface plasmons) που δημιουργούνται στη διεπαφή μετάλλου – διηλεκτρικού [8]

Μερικές δεκαετίες αργότερα (το 1998) ο Ebbesen χρησιμοποίησε ένα λεπτό ασημένιο φύλλο με πάχος γύρω στα 200 nm που στην επιφάνεια του είχε δεκάδες μικρές οπές με διάμετρο γύρω στα 150 nm (πιο μικρή και από το μήκος κύματος του ορατού φωτός) και παρατήρησε ότι κατά την πρόσπτωση φωτός στο φύλλο, όχι μόνο δεν παρατηρείται ολική περίθλαση του φωτός, αλλά αντίθετα το φως ενισχύεται κατά

την έξοδό του από τις οπές. Το φαινόμενο αυτό θεωρήθηκε παράδοξο εκείνη την εποχή [8].



Σχήμα 2 – Λεπτό ασημένιο φύλλο με δεκάδες μικρές οπές (με διάμετρο μικρότερη από το μήκος κύματος) στο οποίο προσπίπτει φως και κατά την έξοδο του παρουσιάζεται ενισχυμένο [8]

Μερικά χρόνια αργότερα το φαινόμενο αυτό ερμηνεύθηκε από τον Wolff, ο οποίος αποφάνθηκε ότι η ενίσχυση του φωτός οφείλεται στην ύπαρξη των επιφανειακών πλασμονίων (surface plasmons). Η επιφάνεια των νανοσωματιδίων είναι κοίλη με αποτέλεσμα να ασκεί μία δύναμη επαναφοράς στα διερχόμενα ηλεκτρόνια. Εν συνεχεία παρατηρείται το φαινόμενο του συντονισμού, οπότε λαμβάνει χώρα η ενίσχυση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου (φωτεινή ακτινοβολία). Ο συντονισμός αυτός ονομάζεται «τοπικό επιφανειακό πλασμόνιο» (Local Surface Plasmon - LSPR). Έτσι, η αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και ηλεκτρονίων αγωγιμότητας οδηγεί στη δημιουργία ταλαντώσεων των πλασμονίων με ορισμένη συχνότητα συντονισμού, η οποία καθορίζεται από τη σύνθεση, τη γεωμετρία, το μέγεθος, το διηλεκτρικό και τις αποστάσεις μεταξύ των νανοσωματιδίων του μετάλλου [7], [8].

Όταν το φωτεινό κύμα προσπίπτει στην μεταλλική επιφάνεια προκαλεί τη διέγερση των πλασμονίων (ηλεκτρονίων αγωγιμότητας) που υπάρχουν στις οπές της μεταλλικής επιφάνειας, γεγονός που οδηγεί στην δημιουργία επιφανειακών

πλασμονικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons). Τα επιφανειακά πλασμονικά πολαριτόνια οδεύουν προς άλλες οπές και αλληλεπιδρούν με άλλα πολαριτόνια ή με το φωτεινό πεδίο που διέρχεται μέσα από τις οπές με αποτέλεσμα να παρατηρείται το φαινόμενο της ενισχυτικής συμβολής. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ισχυροποίηση του φωτεινού πεδίου που δημιουργείται σε κάθε οπή και την μετατροπή του σε φωτεινό κύμα κατά την έξοδο του από την οπή. Αυτό ακριβώς το φαινόμενο της ισχυροποίησης το φωτεινού κύματος κατά την έξοδο του από την οπή ονομάζεται έκτακτη οπτική μετάδοση (extraordinary optical transmission) [8].

Αξίζει να τονιστεί ότι το φαινόμενο της έκτακτης οπτικής μετάδοσης είναι ιδιαίτερα ξεχωριστό διότι παρατηρείται μία διαδικασία που αντιτίθεται στην κλασική οπτική και καθιστά εφικτή τη διέλευση φωτός μέσα από ένα μέσο (οπές) που έχει μικρότερες διαστάσεις από το μήκος κύματος [8].

2.3 Διέγερση Επιφανειακών Πλασμονίων

Η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων καθίσταται εφικτή είτε με πρόσπτωση ηλεκτρονίων στο μέταλλο, είτε με πρόσπτωση φωτός (φωτόνια) στην διεπιφάνεια μετάλλου / διηλεκτρικού.

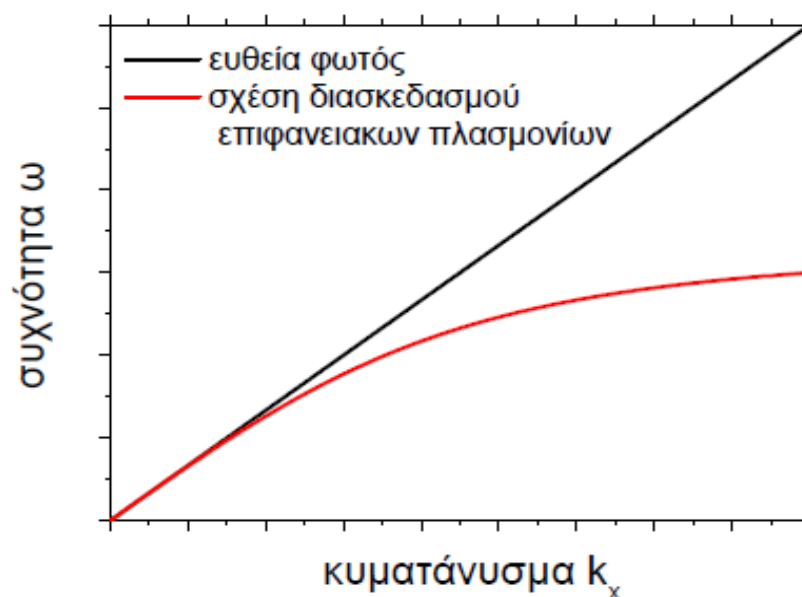
2.3.1 Διέγερση Επιφανειακών Πλασμονίων με Πρόσπτωση Ηλεκτρονίων στο Μέταλλο

Η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων με πρόσπτωση ηλεκτρονίων στο μέταλλο πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Ritchie. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην επιφάνεια του μετάλλου και σκεδάζονται με αποτέλεσμα να εισέρχεται εντός του μετάλλου ένα μεγάλο ποσοστό της σκεδαζόμενης ενέργειας και ένα μικρό ποσοστό αυτής να διεγείρει τα επιφανειακά

πλασμόνια. Το ποσοστό της ενέργειας που διεγείρει τα επιφανειακά πλασμόνια είναι η ενέργεια που αντιστοιχεί στο διάνυσμα σκέδασης το οποίο είναι παράλληλο στην επιφάνεια του μετάλλου [10].

2.3.2 Διέγερση Επιφανειακών Πλασμονίων με Πρόσπτωση Φωτός στη Διεπιφάνεια Μετάλλου / Διηλεκτρικού

Η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων από την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι μία σύνθετη διαδικασία που παρουσιάζει διάφορες δυσκολίες και περιγράφεται με την βοήθεια του παρακάτω σχήματος [9].



Σχήμα 3 – Γραφική παράσταση της καμπύλης διασκεδασμού των επιφανειακών πλασμονίων και της καμπύλης διασκεδασμού του φωτός [9]

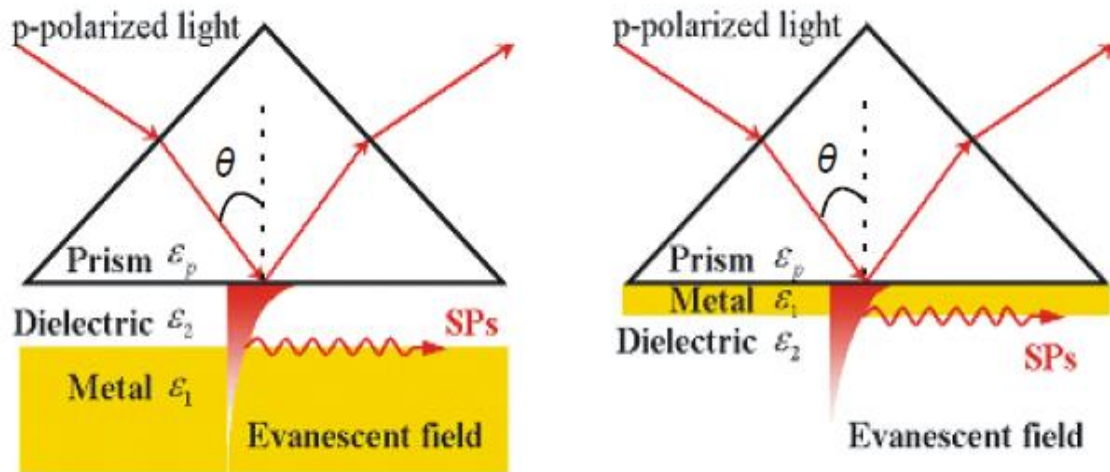
Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η γραφική παράσταση της σχέσης διασκεδασμού των επιφανειακών πλασμονίων δεν παρουσιάζει κανένα κοινό σημείο με την καμπύλη διασκεδασμού του φωτός. Το στοιχείο αυτό καταδεικνύει ότι δεν είναι εύκολη η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων από την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική (φωτεινή) ακτινοβολία διότι οι συχνότητες των φωτονίων δεν ταυτίζονται με την συχνότητα πλάσματος (ω_p) [9].

Για την αποτελεσματική διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων από την προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα πρέπει να μειωθεί η κλίση της καμπύλης διασκεδασμού του φωτός ώστε να είναι εφικτό να τέμνει κάποιο κυματόνισμα την καμπύλη διασκεδασμού των επιφανειακών πλασμονίων. Η εκτροπή της καμπύλης διασκεδασμού του φωτός πραγματοποιείται με αξιοποίηση του φαινομένου της ολικής εσωτερικής ανάκλασης ή με κατάλληλη χρήση ενός φράγματος (grating) [9].

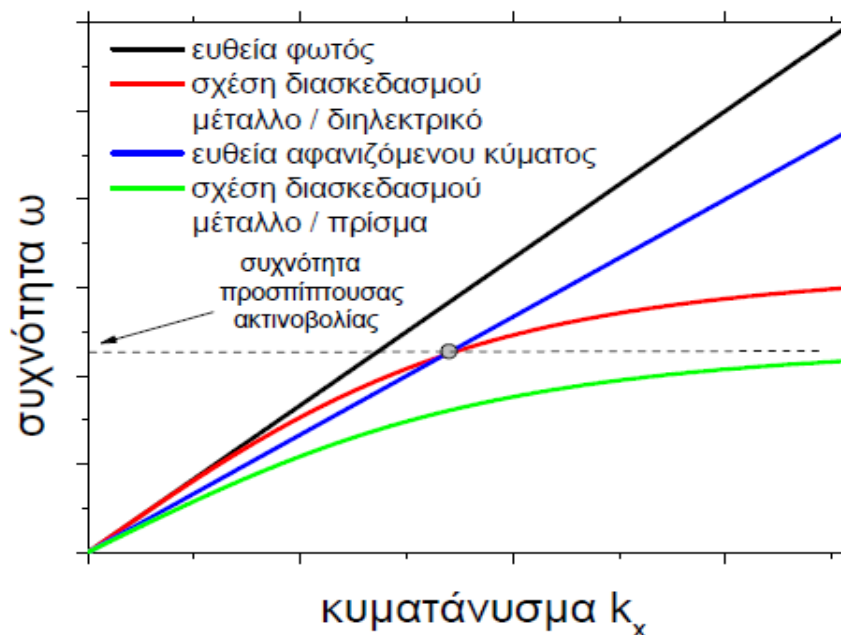
Ως γνωστόν, όταν διαδίδεται μία μονοχρωματική οπτική δέσμη από ένα μέσο με μεγάλη διηλεκτρική σταθερά προς ένα μέσο με μικρότερη διηλεκτρική σταθερά και οι γωνίες πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερες από την οριακή γωνία πρόσπτωσης, τότε η διαδιδόμενη οπτική δέσμη υφίσταται ολική ανάκλαση και δημιουργείται κύμα στο μέσο με την μικρότερη διηλεκτρική σταθερά. Το κύμα αυτό ονομάζεται αποσβενόμενο (αφανιζόμενο) κύμα (evanescent wave) και διαδίδεται κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας μεταξύ των δύο μέσων έχοντας μικρότερη ομαδική ταχύτητα σε σύγκριση με το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που διαδίδεται στο μέσο με την μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά [9].

Ο συντονισμός επιτυγχάνεται όταν το κυματόνισμα του αποσβενόμενου (αφανιζόμενου) κύματος, δηλαδή του κύματος που διαδίδεται στο μέσο με την μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά, γίνεται ίσο με το κυματόνισμα των επιφανειακών πλασμονίων. Τα επιφανειακά πλασμόνια μελετώνται πειραματικά στο αποσβενόμενο πεδίο (evanescent field) με βάση δύο διαφορετικές πειραματικές γεωμετρίες που απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα. Πρόκειται για τη γεωμετρία Otto και τη γεωμετρία Kretschmann - Raether [9].

Στη γεωμετρία Otto η μεταλλική μεμβράνη βρίσκεται σε πάρα πολύ κοντινή απόσταση με την επιφάνεια του πρίσματος, η οποία είναι της τάξεως των 100 nm. Μεταξύ του πρίσματος και του μεταλλικού υμενίου υπάρχει διηλεκτρικό (πχ αέρας). Αντίστοιχα στη γεωμετρία Kretschmann – Raether το μεταλλικό υμένιο εφάπτεται με το πρίσμα [9].



Σχήμα 4 – Οι πειραματικές γεωμετρίες που χρησιμοποιούνται για την μελέτη των επιφανειακών πλασμονίων. Αριστερά: Γεωμετρία Otto. Δεξιά: Γεωμετρία Kretschmann – Raether [9]



Σχήμα 5 – Οι σχέσεις διασκεδασμού που διέπουν τη γεωμετρία Kretschmann – Raether [9]

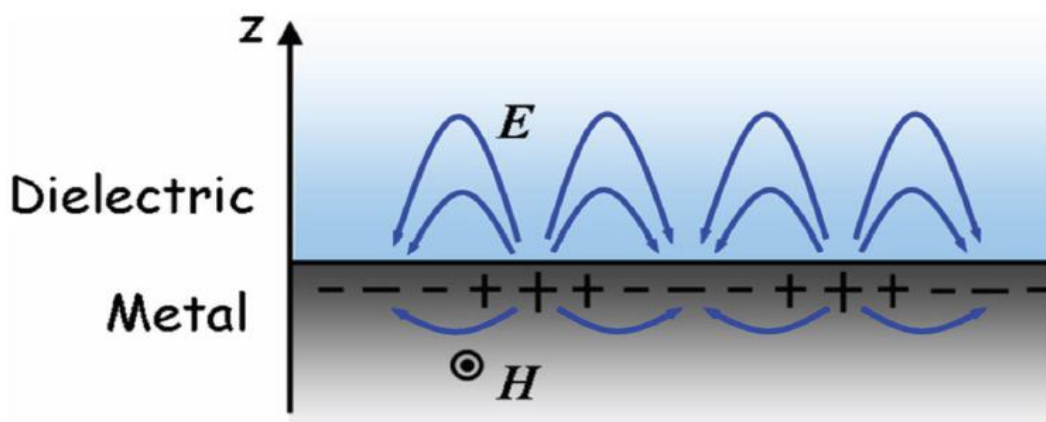
Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται οι σχέσεις διασκεδασμού που διέπουν τη γεωμετρία Kretschmann – Raether, καθώς επίσης και οι διεπιφάνειες στις οποίες παρατηρείται διέγερση επιφανειακών πλασμονίων. Παρατηρώντας το σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι η διέγερση επιφανειακών πλασμονίων καθίσταται εφικτή στην διεπιφάνεια μετάλλου / διηλεκτρικού, αφού η σχέση διασκεδασμού της διεπιφάνειας

αυτής (κόκκινη γραμμή) τέμνεται με την γραφική παράσταση του αποσβενόμενου (αφανιζόμενου) κύματος (μπλε γραμμή) [9].

Πέρα από αυτό, η διέγερση των επιφανειακών πλασμονίων στη γεωμετρία Kretschmann – Raether είναι εφικτό να παρατηρηθεί μετρώντας την ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με τη γωνία με την οποία προσπίπτει το φως πάνω στην μεταλλική μεμβράνη. Όταν επιτυγχάνεται η συνθήκη συντονισμού, τότε παρατηρείται ακαριαία ελάττωση της ανακλαστικότητας αφού τα επιφανειακά πλασμόνια διεγείρονται και απορροφούν ενέργεια [9].

2.4 Πλασμονική Τεχνολογία, Αρχιτεκτονικές, Χαρακτηριστικά και Δημιουργία Συσκευών

Οι μεταλλικές νανοδομές διαθέτουν τον κατάλληλο συνδυασμό ηλεκτρονικών και οπτικών ιδιοτήτων για την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων επεξεργασίας του φωτός. Συνήθως για την αποτελεσματική ηλεκτρική διασύνδεση χρησιμοποιούνται μέταλλα όπως ο Χαλκός (Cu) και το Αργίλιο (Al) που καθιστούν εφικτή τη διέγερση των επιφανειακών πλασμονικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPP) που διαδίδονται ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα κατά μήκος της διεπιφάνειας μετάλλου / διηλεκτρικού και είναι συζευγμένα με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου [11].



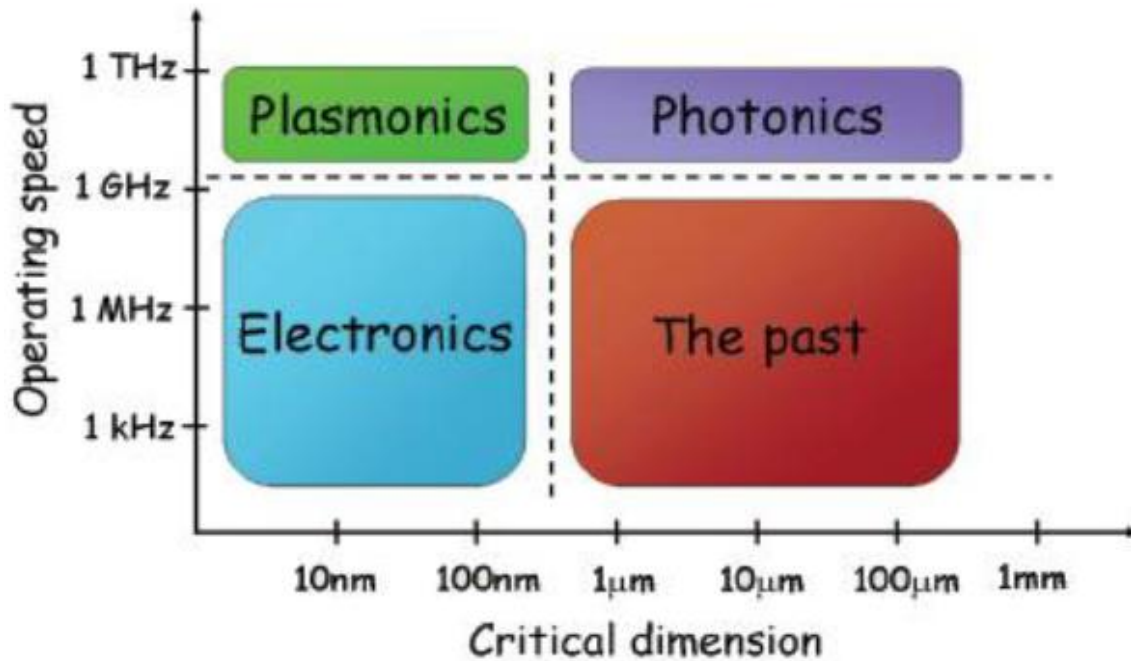
Σχήμα 6 – Η διάδοση ενός SPP κατά μήκος της διεπιφάνειας μετάλλου / διηλεκτρικού [11]

Τα SPP είναι εγκάρσια μαγνητικά κύματα που η ένταση του ηλεκτρομαγνητικού τους πεδίου είναι μεγαλύτερη στην διεπιφάνεια και εξασθενεί εκθετικά όσο μεγαλώνει η απόσταση από την διεπιφάνεια. Επί της ουσίας τα SPP είναι μία ιδιαίτερη μορφή φωτεινού κύματος που διαδίδεται κατά μήκος της μεταλλικής επιφάνειας. Συνεπώς οι μεταλλικές διασυνδέσεις που επιτρέπουν την διάδοση τέτοιων κυμάτων μπορούν να λειτουργήσουν ως πολύ μικροί οπτικοί κυματοδηγοί που ονομάζονται πλασμονικοί κυματοδηγοί [11].

Βέβαια αξίζει να τονιστεί ότι τα SPP παρουσιάζουν και μερικά σημαντικά μειονεκτήματα για τα οποία πρέπει να βρεθεί λύση. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι οι απώλειες διάδοσης (propagation losses) που οφείλονται στη διάχυση ποσοστού της ενέργειας του SPP στα γύρω υλικά και οι απώλειες καμπυλότητας (bend losses) που οφείλονται σε διαρροές του σήματος που μεταφέρουν οι οπτικές ίνες στα γύρω υλικά. Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι και ο αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης (effective refractive index) που είναι ο δείκτης διάθλασης που συναντά ένα πλασμόνιο κατά την διάδοσή του στο εσωτερικό του κυματοδηγού [8].

Γενικότερα, το σκεπτικό ότι η διάμετρος οπτικής λειτουργίας που είναι κάθετη στην μεταλλική διεπιφάνεια μπορεί να είναι αρκετά μικρότερη από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας προσφέρει την δυνατότητα διασύνδεσης νανοηλεκτρονικών διατάξεων με οπτικές πλασμονικές συσκευές παραπλήσιου μεγέθους. Δεν είναι τυχαίο ότι πολλά ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν ως βάση το Πυρίτιο (Si) χρησιμοποιούν μεταλλικές νανοδομές (από Χαλκό (Cu) ή από Αργίλιο (Al)) ως μέσο διασύνδεσης για την δρομολόγηση ηλεκτρονικών σημάτων μεταξύ των τρανζίστορ σε ένα τσιπ [11].

Η πλασμονική τεχνολογία βασίζεται στον κατάλληλο συνδυασμό των πλεονεκτημάτων της ηλεκτρονικής πυριτίου (πχ μικρές διαστάσεις) και της φωτονικής (πχ υψηλές ταχύτητες και χαμηλές απώλειες) που συγκεντρώνονται στην φωτονική πυριτίου. Οι διαστάσεις και οι αντίστοιχες ταχύτητες διάδοσης του σήματος στους τρεις αυτούς τομείς παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί [8], [11]:

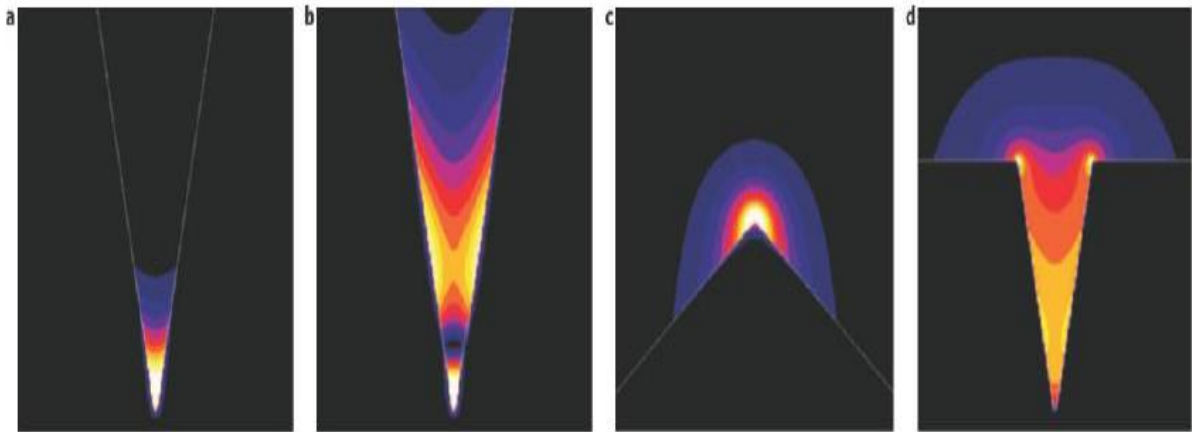


Σχήμα 7 – Διαστάσεις και αντίστοιχες ταχύτητες διάδοσης του σήματος στην πλασμονική, στη φωτονική και στην ηλεκτρονική [8], [11]

Οι πιο συνηθισμένες αρχιτεκτονικές πλασμονικών κυματοδηγών είναι οι εξής:

- Υβριδικοί κυματοδηγοί από σύρμα διηλεκτρικού υλικού σε μεταλλική επιφάνεια
- Αλυσίδες μεταλλικών νανοσωματιδίων
- Μεταλλικές βέργες σε σχήμα κυλίνδρου
- Μυτερές σφήνες μετάλλου
- Χαραγμένα αυλάκια πάνω σε μεταλλικό υπόστρωμα
- Μεταλλικές λωρίδες σε υπόστρωμα από διηλεκτρικό υλικό
- Μεταλλικά φύλλα πολύ μικρού πάχους
- Κενό μεταξύ δύο μεταλλικών μέσων διάδοσης
- Κυματοδηγοί σχισμής πάνω σε φύλλα μετάλλου

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται μερικές αρχιτεκτονικές πλασμονικών κυματοδηγών και η αντίστοιχη κατανομή πεδίου σε κάθε μία από αυτές [8].



Σχήμα 8 – Μερικές αρχιτεκτονικές πλασμονικών κυματοδηγών και η κατανομή πεδίου σε κάθε μία από αυτές [8]

Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι είναι εφικτό να μειωθούν πάρα πολύ οι διαστάσεις ενός κυματοδηγού όταν ο κυματοδηγός κατασκευαστεί με τρόπο που η τιμή του δείκτη διάθλασης του να είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή του δείκτη διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου [8].

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

«Εξαρτήματα που Έχουν ως Βάση την Πλασμονική Τεχνολογία»

3.1 Εισαγωγή

Οι οπτικές ίνες παρέχουν την δυνατότητα διάδοσης φωτεινών σημάτων που μεταφέρουν πολύ μεγάλες ποσότητες πληροφοριών και δεδομένων. Αυτή τους η ικανότητα οδήγησε πολλούς ερευνητές στο να προβλέψουν ότι οι φωτονικές διατάξεις θα μπορούσαν κάποια στιγμή να αντικαταστήσουν τα ηλεκτρονικά κυκλώματα των μικροεπεξεργαστών, καθώς και διάφορα chip των υπολογιστών. Βέβαια το μέγεθος και η απόδοση των φωτονικών συσκευών περιορίζεται από το όριο περίθλασης (diffraction limit). Επομένως, από τη στιγμή που παρατηρείται το φαινόμενο των παρεμβολών μεταξύ γειτονικών φωτεινών κυμάτων, θα πρέπει το εύρος της οπτικής ίνας να ισούται τουλάχιστον με το μισό του μήκους κύματος της διαδιδόμενης φωτεινής δέσμης [12].

Η κατευθυνόμενη διάδοση φωτεινών κυμάτων στην διεπιφάνεια μετάλλου / διηλεκτρικού (πχ αέρας, γυαλί), είναι πιθανό να προκαλέσει ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ των διαδιδόμενων κυμάτων και των κινούμενων ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου. Με λίγα λόγια οι ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου ταιριάζουν με τις ταλαντώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου εκτός του μετάλλου. Έτσι δημιουργούνται τα επιφανειακά πλασμόνια (surface plasmons) που διαδίδονται κατά μήκος της διεπιφάνειας μετάλλου / διηλεκτρικού [12].

Με κατάλληλο σχεδιασμό της διεπιφάνειας μετάλλου / διηλεκτρικού, είναι εφικτή η δημιουργία επιφανειακών πλασμονίων που έχουν ίδια συχνότητα με τα εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα και πολύ πιο μικρό μήκος κύματος. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει την δυνατότητα στα πλασμόνια να διαδίδονται σε μικροσκοπικά καλώδια της τάξεως της νανοκλίμακας, που καλούνται διασυνδέσεις (interconnects) και να μεταφέρουν πληροφορίες από ένα μικροεπεξεργαστή σε έναν άλλο [12].

Χάρη στις πλασμονικές διασυνδέσεις (plasmonic interconnects) καθίσταται εφικτή η σχεδίαση ακόμα μικρότερων και γρηγορότερων τρανζίστορ. Γενικότερα είναι εφικτή η χρήση πλασμονικών εξαρτημάτων σε πληθώρα διατάξεων (πχ για τη βελτίωση της απόδοσης των LED). Επιπροσθέτως, τα πλασμονικά υλικά είναι εφικτό να τροποποιήσουν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που περιβάλλει ένα υλικό με τρόπο που αυτό να γίνει αόρατο [12].

3.2 Πλασμονικοί Κυματοδηγοί

Ένας κυματοδηγός πλασμονικής θυρίδας (plasmon slot waveguide) αποτελείται από δύο μεταλλικά φύλλα που χωρίζονται από ένα λεπτό διηλεκτρικό πυρήνα. Το μήκος κύματος του φωτεινού σήματος που είναι εφικτό να διαδοθεί στο εσωτερικό του κυματοδηγού καθορίζεται από το πάχος του διηλεκτρικού και από το βάθος της αυλάκωσης στην επιφάνεια του μετάλλου. Για να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός εγκλεισμός της διαδιδόμενης οπτικής δέσμης το βάθος του μετάλλου θα πρέπει να είναι οπτικά αδιαφανές και να έχει πάχος γύρω στα 20 nm [13].

Όταν το πάχος του μετάλλου είναι λίγο μεγαλύτερο από το διπλάσιο του βάθους της αυλάκωσης, διασφαλίζεται ότι τα πεδία των τρόπων περιορίζονται στο εσωτερικό του πυρήνα και εντός της μεταλλικής επένδυσης. Όμως στην περίπτωση αυτή η διαδιδόμενη φωτεινή ένταση είναι της τάξεως μερικών εκατοντάδων nm ενώ στους κυματοδηγούς πυριτίου είναι γύρω στα 5.5 μm . Το πάχος του διηλεκτρικού κυμαίνεται από μερικά nm μέχρι μερικές εκατοντάδες nm. Όταν το πάχος του πυρήνα είναι μικρότερο από 50 nm τότε διαδίδονται μόνο οι πλασμονικοί τρόποι (plasmonic modes). Όταν το πάχος του πυρήνα αυξάνεται ο κυματοδηγός επιτρέπει τη διάδοση εγκάρσιων ηλεκτρονικών και μαγνητικών φωτονικών τρόπων όπως και οι μικροκυματικοί κυματοδηγοί [13].

Όσον αφορά στις αποστάσεις διάδοσης, το καλύτερο διηλεκτρικό είναι ο αέρας και ακολουθεί το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και το πυρίτιο (Si). Αντίστοιχα, ο καλύτερος συνδυασμός μετάλλου / διηλεκτρικού είναι αργίλιο (Al) / αέρας. Για $\lambda=1550$ τα φωτεινά σήματα διαδίδονται ως τα 80 μm σε ένα κυματοδηγό αργύρου (Ag) /

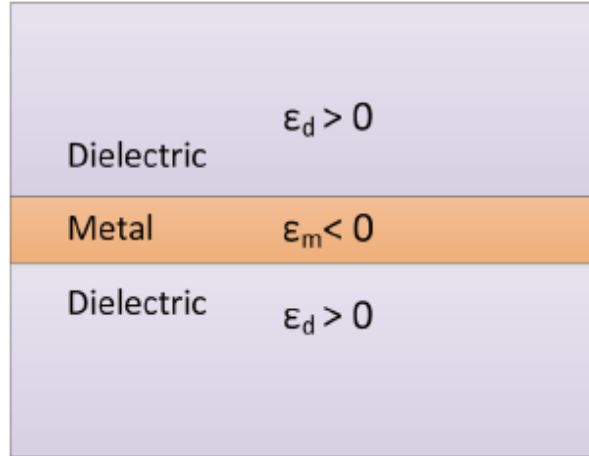
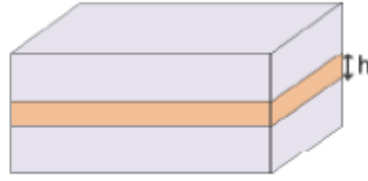
διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2) / αργύρου (Ag) με πυρήνα 250 nm. Λαμβάνοντας υπόψη την απολαβή του υλικού (gain material) στο διηλεκτρικό πυρήνα του κυματοδηγού, είναι εφικτό να αυξηθεί η απόσταση διάδοσης σε ποσοστό έως και 27% [13].

Οι πλασμονικοί κυματοδηγοί δεν είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι από τις ηλεκτρικές συσκευές σηματοδοσίας επειδή τα RC ηλεκτρικά καλώδια καταναλώνουν πολύ μικρά ποσά ενέργειας ανά bit στην κλίμακα των 100 μm . Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη μεγαλύτερων αποστάσεων στη θέση των ηλεκτρικών καλωδίων, με κατάλληλη μετατροπή του σήματος στο ηλεκτρικό πεδίο και με διαμόρφωση ενός laser κάθε 100 μm , το πρόβλημα της πολύ υψηλής στατικής ισχύος του laser που απαιτείται ώστε να αντισταθμιστούν οι υψηλές απώλειες των πλασμονικών κυματοδηγών υπερσχύει οποιοδήποτε άλλο πλεονεκτήματος [13].

3.2.1 Κυματοδηγοί Διηλεκτρικού / Μετάλλου / Διηλεκτρικού

Έστω η συμμετρική διαμόρφωση διηλεκτρικού / μετάλλου / διηλεκτρικού που φαίνεται στο σχήμα της επόμενης σελίδας [14].

Μία λεπτή μεταλλική μεμβράνη πάχους h ενσωματώνεται στο διηλεκτρικό το οποίο καλύπτει και τις δύο πλευρές του μετάλλου. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι της μορφής $e^{i(\omega t - \beta x)}$ και η διάδοση λαμβάνει χώρα κατά τον άξονα των x . Σε περίπτωση που το πάχος είναι αρκετά μικρό, οι δύο παρόμοιοι SPP τρόποι στις δύο επαφές θα αλληλεπικαλύπτονται. Η σταθερά διάδοσης δεν θα έχει την ίδια τιμή για τον συμμετρικό και τον αντισυμμετρικό τρόπο όταν το μεταλλικό φιλμ έχει μικρό πάχος. Όταν οι εγκάρσιες και οι διαμήκεις συνιστώσες συμπληρώνουν η μία την άλλη, η συμμετρική συνιστώσα της μίας διαμόρφωσης θα είναι αντισυμμετρική στην άλλη διαμόρφωση [14].



Σχήμα 9 – Συμμετρική διαμόρφωση διηλεκτρικού / μετάλλου / διηλεκτρικού σε πλάσμαονικό κυματοδηγό. ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού, ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά του μετάλλου [14]

Η E_z συμμετρική διαμόρφωση ονομάζεται συμμετρικός SPP τρόπος και παρουσιάζει περιττή συμμετρία με την E_x . Στην περίπτωση αυτή, η E_x αλλάζει πρόσημο στο μεσαίο επίπεδο του μεταλλικού φιλμ και παρουσιάζει πολύ μικρότερη εξασθένιση σε σύγκριση με τον αντισυμμετρικό SPP τρόπο. Ο συμμετρικός τρόπος στο μεταλλικό φιλμ που έχει μεγάλο μήκος διάδοσης ακόμα σε μέταλλα με υψηλό ποσοστό απωλειών, ονομάζεται long-range SPP (LR-SPP) ενώ ο αντισυμμετρικός τρόπος που έχει μικρό μήκος διάδοσης ονομάζεται short-range SPP (SR-SPP).

Η σχέση διασποράς του LR-SPP δίνεται από την εξίσωση:

$$\tanh\left(k_z^{(m)} \frac{h}{2}\right) = -\frac{\epsilon_m k_z^{(d)}}{\epsilon_d k_z^{(m)}} \quad (20)$$

ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά μετάλλου

ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά διηλεκτρικού

$k_z^{(m)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο μέταλλο

$k_z^{(d)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο διηλεκτρικό

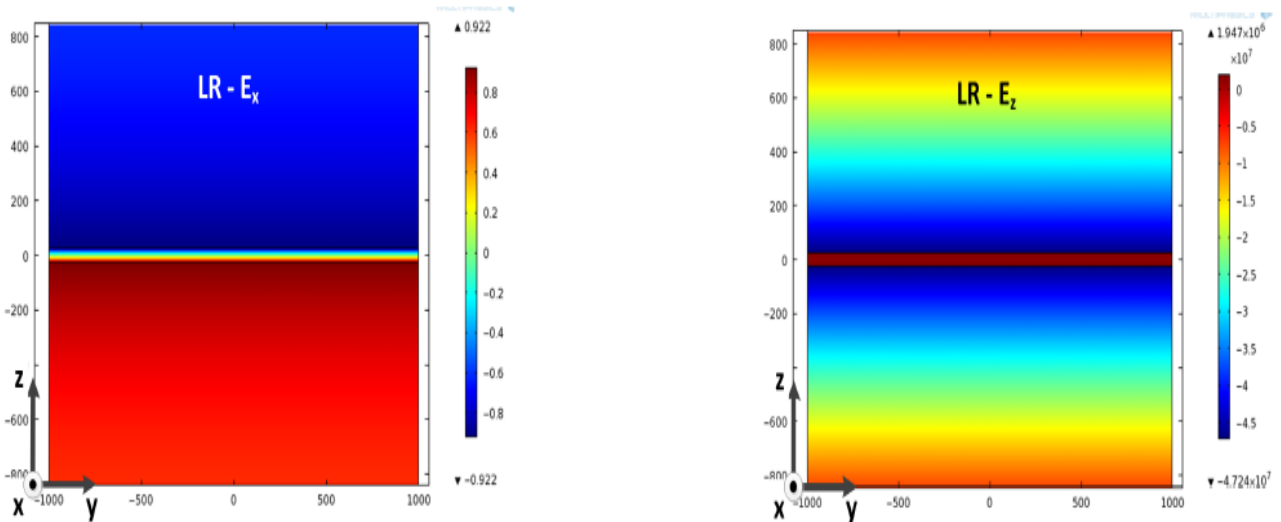
με
$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{LR-SP}^2 - \varepsilon_{m,d} k_0^2} \quad (21)$$

k_0 : ο κυματαριθμός στο κενό

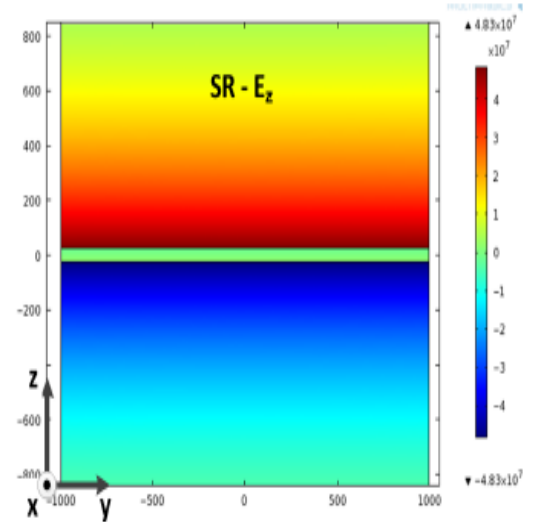
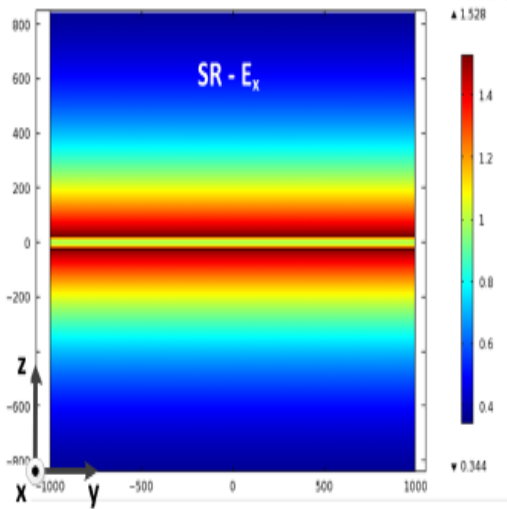
Όταν το πάχος (h) του μεταλλικού φιλμ τείνει στο μηδέν, ισχύει $\tanh x \approx x$,
 όποτε η σταθερά διάδοσης του τρόπου LR-SPP θα δίνεται κατά προσέγγιση από την
 παρακάτω σχέση [14]:

$$k_{LR-SP} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + \left(\frac{h k_0 \varepsilon_d}{2}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_m}\right)\right]^2} \quad (22)$$

Όταν το μεταλλικό φιλμ είναι πολύ λεπτό, η σταθερά διάδοσης του LR-SPP
 προσεγγίζει τη γραμμή φωτός στο διηλεκτρικό. Η κύρια συνιστώσα E_x
 διασταυρώνεται με το μηδέν στο μέσο του μετάλλου και διαχέεται στο διηλεκτρικό,
 ενώ η συνιστώσα E_z είναι συμμετρική όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το
 χαρακτηριστικό αυτό της κύριας συνιστώσας E_x περιορίζει σημαντικά τις απώλειες
 διάδοσης και καθιστά τον τρόπο LR-SPP κατάλληλο για τη δημιουργία εξαρτημάτων
 της ολοκληρωμένης φωτονικής.



Σχήμα 10 – Αριστερά: Η συνιστώσα E_x του τρόπου LR-SPP αλλάζει πρόσημο στο μέσο του μετάλλου και διαχέεται στο διηλεκτρικό. Δεξιά: Η συμμετρική συνιστώσα E_z του τρόπου LR-SPP [14]



Σχήμα 11 – Αριστερά: Η σχεδόν σταθερή συνιστώσα E_x του τρόπου SR-SPP. Δεξιά: Η αντισυμμετρική συνιστώσα E_z του τρόπου SR-SPP [14]

Για τον τρόπο SR-SPP η κύρια συνιστώσα E_x είναι περίπου σταθερή και η συνιστώσα E_z είναι αντισυμμετρική όπως φαίνεται στο σχήμα 11 της προηγούμενης σελίδας [14].

Η σχέση διασποράς του SR-SPP δίνεται από την εξίσωση:

$$\tanh\left(k_z^{(m)} \frac{h}{2}\right) = -\frac{\varepsilon_d k_z^{(m)}}{\varepsilon_m k_z^{(d)}} \quad (23)$$

ε_m : διηλεκτρική σταθερά μετάλλου

ε_d : διηλεκτρική σταθερά διηλεκτρικού

$k_z^{(m)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο μέταλλο

$k_z^{(d)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο διηλεκτρικό

με
$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{SR-SP}^2 - \varepsilon_{m,d} k_0^2} \quad (24)$$

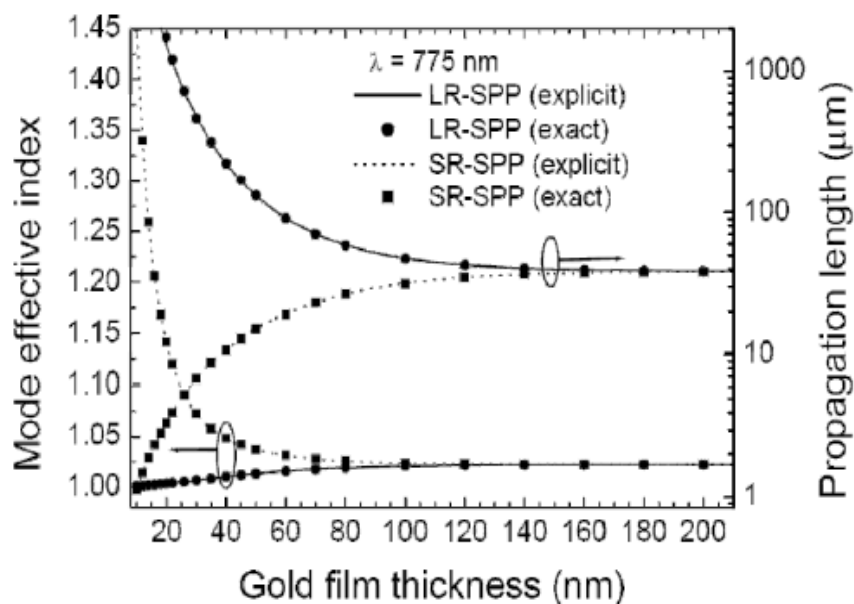
k_0 : ο κυματαριθμός στο κενό

Όταν το πάχος (h) του μεταλλικού φιλμ τείνει στο μηδέν, ισχύει $\tanh x \approx x$, όποτε η σταθερά διάδοσης του τρόπου SR-SPP θα δίνεται κατά προσέγγιση από την παρακάτω σχέση [14]:

$$k_{SR-SP} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + \left[\frac{2 \varepsilon_d}{h k_0 \varepsilon_m}\right]^2} \quad (25)$$

Όπως φαίνεται από την τελευταία σχέση, όταν το πάχος του μεταλλικού φιλμ τείνει στο μηδέν, η σταθερά διάδοσης αυξάνεται και τείνει στο άπειρο με αποτέλεσμα τόσο το μήκος κύματος όσο και η απόσταση διάδοσης του τρόπου SR-SPP να τείνουν στο μηδέν. Ο SR-SPP τρόπος χαρακτηρίζεται από υψηλή ανακλαστικότητα στα άκρα του μεταλλικού φιλμ με αποτέλεσμα να είναι ιδιαίτερα χρήσιμος κατά τη σχεδίαση πλασματικών αντηχείων.

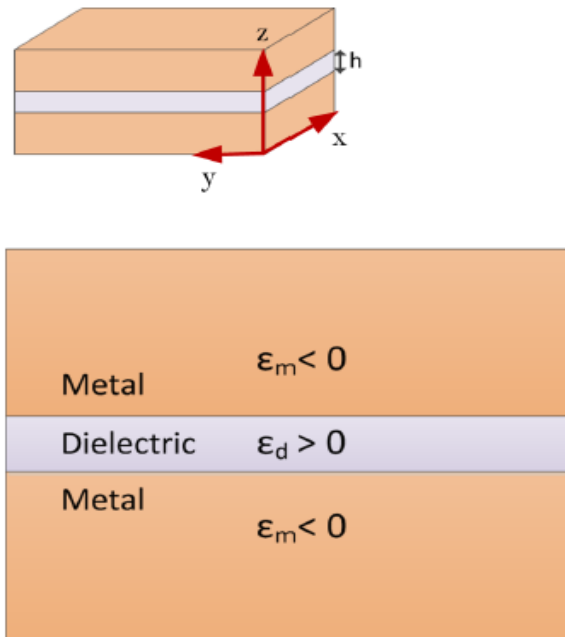
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το γράφημα του ενεργού δείκτη και του μήκους κύματος διάδοσης των LR-SPP και SR-SPP τρόπων σε ένα φύλλο χρυσού [14].



Σχήμα 12 – Ενεργός δείκτης και μήκος διάδοσης του LR-SPP τρόπου και του SR-SPP τρόπου σε ένα φύλλο χρυσού που περιβάλλεται από αέρα και μήκος κύματος διέγερσης 775 nm [14]

3.2.2 Κυματοδηγοί Μετάλλου / Διηλεκτρικού / Μετάλλου

Έστω η συμμετρική διαμόρφωση μετάλλου / διηλεκτρικού / μέταλλου που φαίνεται στο διπλανό σχήμα [14].



Σχήμα 13 – Συμμετρική διαμόρφωση μετάλλου / διηλεκτρικού / μετάλλου σε πλάσμαονικό κυματοδηγό. ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά μετάλλου. ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά διηλεκτρικού [14]

Ο τρόπος διάδοσης στο μεταλλικό κενό χωρίζεται σε δύο κλάδους όσο το κενό μειώνεται. Ο τρόπος που παρουσιάζει περιττή συμμετρία ως προς τη συνιστώσα E_x (διαμήκη συνιστώσα) διαδίδεται για όλες τις τιμές του πάχους (h) του διηλεκτρικού και ονομάζεται Gap SPP (G-SPP) [14].

Η σχέση διασποράς του G-SPP δίνεται από την εξίσωση:

$$\tanh\left(k_z^{(d)} \frac{h}{2}\right) = -\frac{\epsilon_d k_z^{(m)}}{\epsilon_m k_z^{(d)}} \quad (26)$$

ϵ_m : διηλεκτρική σταθερά μετάλλου

ϵ_d : διηλεκτρική σταθερά διηλεκτρικού

$k_z^{(m)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο μέταλλο

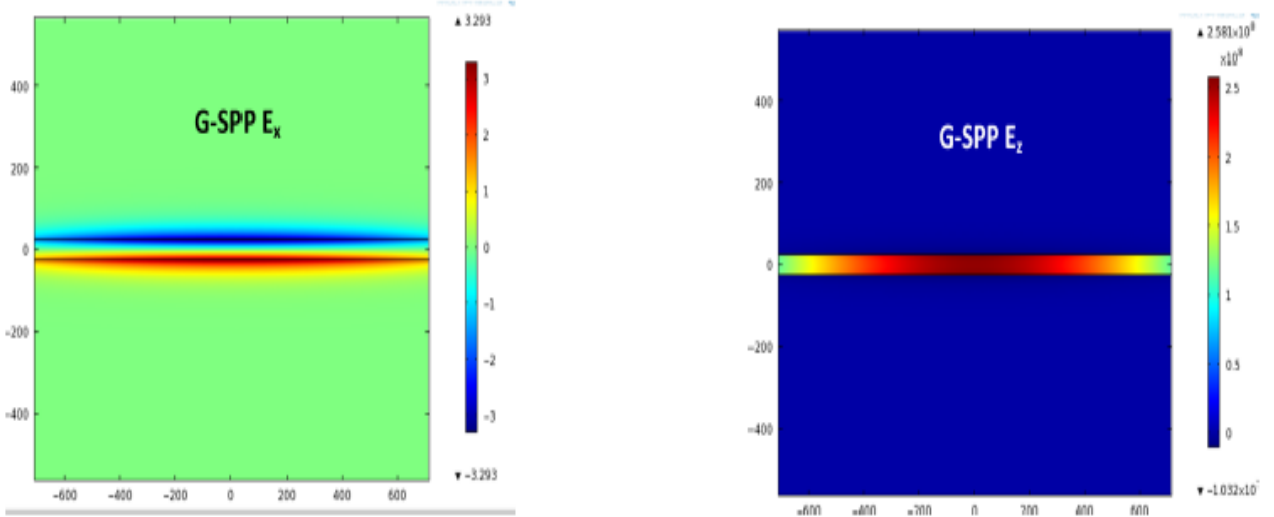
$k_z^{(d)}$: η k_z συνιστώσα του κυματανύσματος στο διηλεκτρικό

με

$$k_z^{(m,d)} = \sqrt{k_{G-SP}^2 - \epsilon_{m,d} k_0^2} \quad (27)$$

k_0 : ο κυματαριθμός στο κενό

Η k_{G-SP} είναι η σταθερά διάδοσης του τρόπου G-SPP. Η συνιστώσα E_z διατηρεί σταθερό πρόσημο κατά μήκος του κενού (διηλεκτρικό) ενώ η συνιστώσα E_x αλλάζει πρόσημο [14].



Σχήμα 14 – Αριστερά: Η συνιστώσα E_x του τρόπου G-SPP που αλλάζει πρόσημο κατά μήκος του διηλεκτρικού κενού. Δεξιά: Η συνιστώσα E_z του τρόπου G-SPP που διατηρεί σταθερό πρόσημο [14]

Στην περίπτωση που το πάχος (h) του διηλεκτρικού τείνει στο μηδέν, η σταθερά διάδοσης του τρόπου G-SPP θα δίνεται από τη σχέση:

$$k_{G-SP} \approx k_0 \sqrt{\varepsilon_d + 0.5 \left(\frac{k_{G-SP}^0}{k_0}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{k_{G-SP}^0}{k_0}\right)^2 \left(\varepsilon_d - \varepsilon_m + 0.25 \left(\frac{k_{G-SP}^0}{k_0}\right)^2\right)}} \quad (28)$$

Όταν το πάχος του διηλεκτρικού βρίσκεται οριακά κοντά στο μηδέν τότε η σταθερά διάδοσης του τρόπου G-SPP δίνεται από τη σχέση [14]:

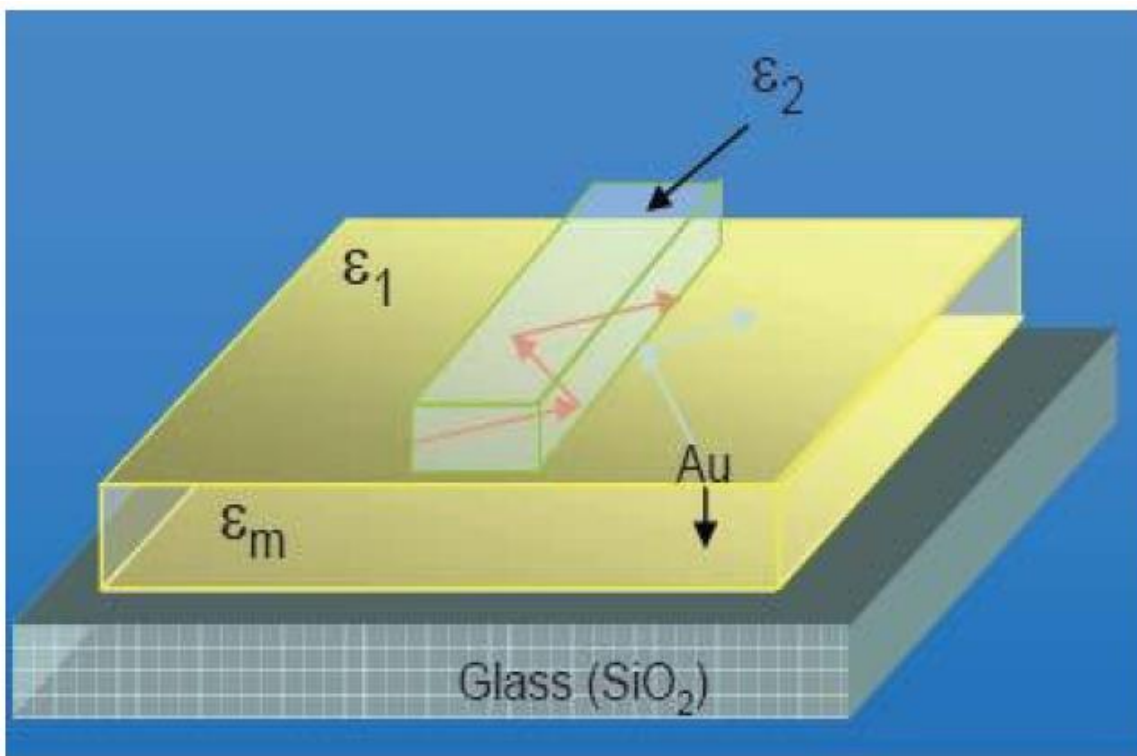
$$k_{G-SP}^0 = -\frac{2 \varepsilon_d}{h \varepsilon_m} \quad (29)$$

Η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου που συγκεντρώνεται στην περιοχή του κενού αυξάνεται (μειώνεται η απόσβεση) όσο μειώνεται το εύρος του κενού, όταν το πάχος του κενού είναι μεγαλύτερο. Όταν η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου πάρει την μέγιστη τιμή της αρχίζει ξανά να μειώνεται με αποτέλεσμα τη συρρίκνωση του πεδίου στο εσωτερικό του μετάλλου αφού αυξάνεται η απόσβεση. Συνεπώς το μήκος

διάδοσης αυξάνεται όταν μειώνεται το πάχος του διηλεκτρικού από τις ανώτερες τιμές του, δηλαδή όταν υπάρχουν μη συζευγμένα επιφανειακά πλασματικά πολαριτόνια (Surface Plasmon Polaritons - SPP). Αυτό το χαρακτηριστικό του τρόπου G-SPP παρέχει τη δυνατότητα ύπαρξης τρόπων με καλύτερο εγκλεισμό της διαδιδόμενης φωτεινής δέσμης και μεγαλύτερο μήκος διάδοσης [14].

3.2.3 DLSPPW Κυματοδηγοί

Ένας ακόμα χαρακτηριστικός τύπος πλασματικού κυματοδηγού είναι ο Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguide (DLSPPW) με δομή που απεικονίζεται στο επόμενο σχήμα, απλοποιημένη σχεδίαση και δυνατότητα αποτελεσματικής αξιοποίησης πληθώρας θερμοοπτικών και ηλεκτροοπτικών φαινομένων με αποτέλεσμα να είναι εφικτό να συνδυάζεται με πολλά άλλα πλασματικά εξαρτήματα [10].



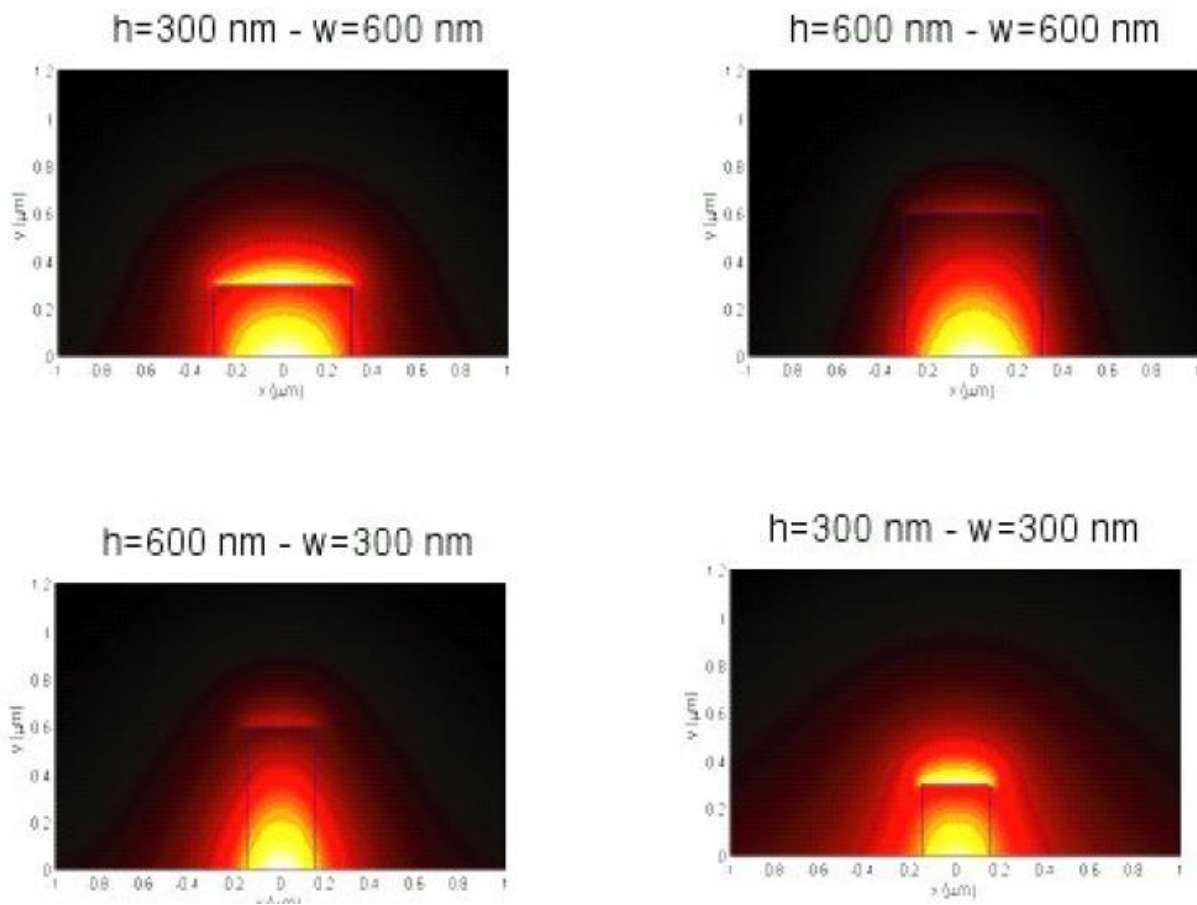
Σχήμα 15 – Η δομή ενός Dielectric Loaded Surface Plasmon Polariton Waveguide (DLSPPW) [10]

Ο DLSPPW κυματοδηγός έχει ως βάση ένα λεπτό μονωτικό στρώμα από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), ένα επίσης λεπτό στρώμα από χρυσό (Au) και το ανώτερο του στρώμα είναι μακρόστενο και αποτελείται από διηλεκτρικό. Η κυματοδότηση του ηλεκτρικού πεδίου εξαρτάται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τις διαστάσεις του διηλεκτρικού. Για τα επιμέρους στρώματα του κυματοδηγού ισχύουν τα εξής:

- Η βάση του κυματοδηγού συνήθως είναι διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) με δείκτη διάθλασης $n=1.46$. Επίσης ως βάση είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί το φθοριούχο μαγνήσιο (MgF_2) με δείκτη διάθλασης $n=1.37$ και το Cytor με δείκτη διάθλασης $n=1.34$ αφού παρουσιάζουν πολλές δυνατότητες επεξεργασίας.
- Το μεσαίο στρώμα του κυματοδηγού που αποτελείται από χρυσό παρουσιάζει δείκτη διάθλασης $n = 0.5 + 11.5j$ [10].
- Το ανώτερο διηλεκτρικό στρώμα του κυματοδηγού αποτελείται από PolyMethylMethAcrylate (PMMA) που είναι διαφανές θερμοπλαστικό πολυμερές και παράγεται έπειτα από πολυμερισμό του μονομερούς μεθακρυλικού μεθυλίου. Το PMMA έχει δείκτη διάθλασης $n=1.48$ και προτιμάται διότι έχει αρκετά καλές θερμοοπτικές ιδιότητες. Πέρα όμως από το PMMA είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί το IPG (Inorganic Polymer Glass) ή το Cyclomer το οποίο δύναται να παρουσιάσει έως και 10 φορές καλύτερα θερμοοπτικά χαρακτηριστικά από το PMMA. Βέβαια δεν είναι σίγουρο ότι το Cyclomer θα ταιριάζει με το μεσαίο στρώμα που αποτελείται από χρυσό [10], [15].

Στον DLSPPW κυματοδηγό το πλασμόνιο κυματοδηγείται στη διεπιφάνεια και εισέρχεται πολύ περισσότερο στο εσωτερικό του διηλεκτρικού από ότι εισέρχεται στο εσωτερικό του χρυσού. Όσο πιο μικρές είναι οι διαστάσεις του κυματοδηγού τόσο πιο μεγάλο είναι το κλάσμα της ισχύος που κυματοδηγείται στον αέρα, έξω από το διηλεκτρικό. Στην περίπτωση αυτή μεγαλώνει η απόσταση διάδοσης των επιφανειακών πλασμονίων διότι το διαδιδόμενο κύμα συναντά δείκτη διάθλασης με μικρότερη τιμή με αποτέλεσμα μικρότερο ποσοστό απωλειών. Αξίζει να αναφερθεί, όμως, ότι οι DLSPPW κυματοδηγοί δεν είναι προτιμητέο να χρησιμοποιούνται σε ενεργές διατάξεις διότι η επίδραση της αλλαγής των ιδιοτήτων του πολυμερούς λόγω

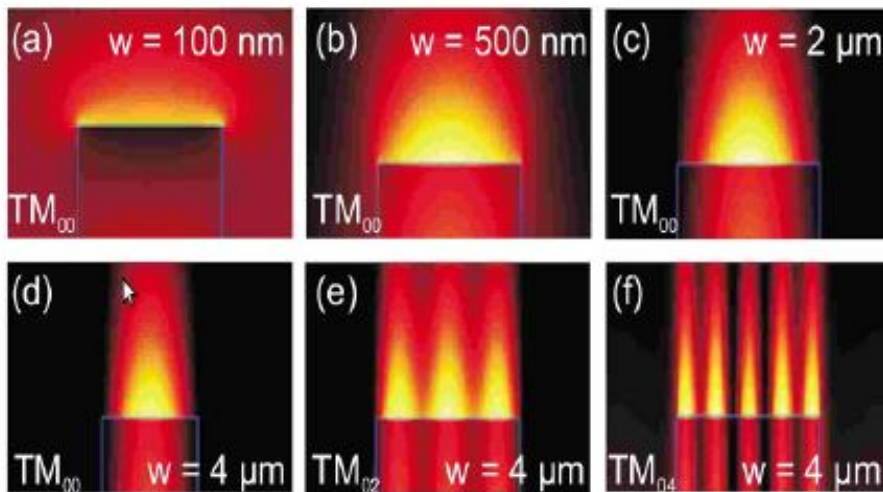
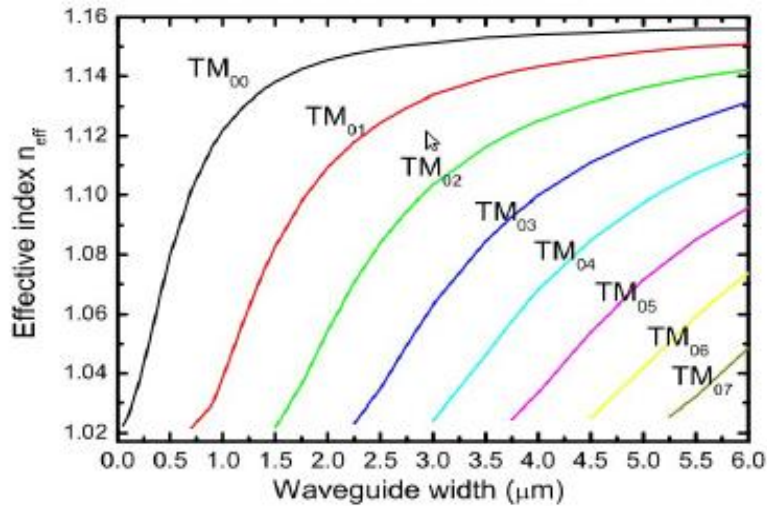
του θερμοοπτικού φαινομένου είναι αμελητέα αφού ένα μέρος του ρυθμού διαδίδεται έξω από το πολυμερές (PMMA).



Σχήμα 16 – Το προφίλ της μονορυθμικής διάδοσης του πλασμονίου σε DLSPPW κυματοδηγό [10]

Σε περίπτωση που αυξηθεί το πλάτος του πολυμερούς, θα είναι εφικτή η διάδοση περισσότερων του ενός ρυθμών από μία συγκεκριμένη τιμή πλάτους και πάνω και για δεδομένη τιμή του ύψους του πολυμερούς. Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και στις οπτικές ίνες [10].

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται οι ρυθμοί και οι τιμές του ενεργού δείκτη διάθλασης για δεδομένη τιμή του ύψους και διαρκώς αυξανόμενη τιμή του πλάτους του πολυμερούς. Το σχήμα αυτό αναφέρεται σε έναν DLSPPW κυματοδηγό που το ανώτερο στρώμα του αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) με ύψος γύρω στα 70 nm. Παρατηρώντας προσεκτικά το παρακάτω σχήμα γίνεται κατανοητό ότι για το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) θα παρατηρείται η διάδοση δύο ή περισσότερων ρυθμών όταν το πάχος του πολυμερούς ξεπερνάει τα 700 nm [10].



Σχήμα 17 – Οι ρυθμοί και οι τιμές του ενεργού δείκτη διάθλασης για δεδομένη τιμή του ύψους και διαρκώς αυξανόμενη τιμή του πλάτους του πολυμερούς [10]

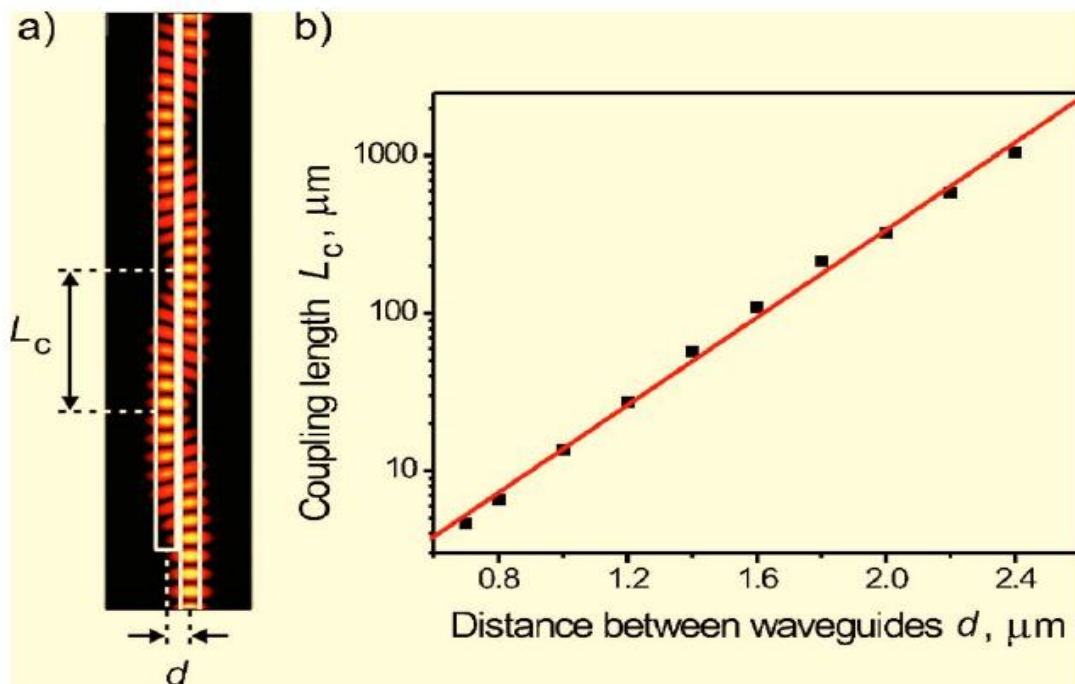
3.3 Πλασμονικοί Συζεύκτες (Plasmonic Couplers)

Οι πλασμονικοί συζεύκτες (σε πλήρη αντιστοιχία με τους οπτικούς συζεύκτες) αποτελούνται από S καμπές (S bends) που συνδέονται με δύο παράλληλους κυματοδηγούς. Οι παράλληλοι κυματοδηγοί βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους προκειμένου να καθίσταται εφικτή η σύζευξη της κυματοδηγούμενης ισχύος από τον

ένα κυματοδηγό στον άλλο και το αντίθετο. Οι σημαντικότερες σχεδιαστικές παράμετροι είναι [10]:

- Η απόδοση του μηχανισμού συζευγμένων ρυθμών.
- Τα χαρακτηριστικά του διάκενου που υπάρχει ανάμεσα στους κυματοδηγούς, αφού είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί πολύ μικρό διάκενο σε πλασματικούς κυματοδηγούς διότι ανεβαίνει κατακόρυφα το κόστος κατασκευής.
- Το μήκος των κυματοδηγών είναι μία από τις σημαντικότερες σχεδιαστικές παραμέτρους διότι η εξασθένιση των επιφανειακών πλασματικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPP) φτάνει το 0.1 dB/μm με αποτέλεσμα ολόκληρη η πλασματική διάταξη να έχει μέγεθος που δεν υπερβαίνει τα 200 μm.

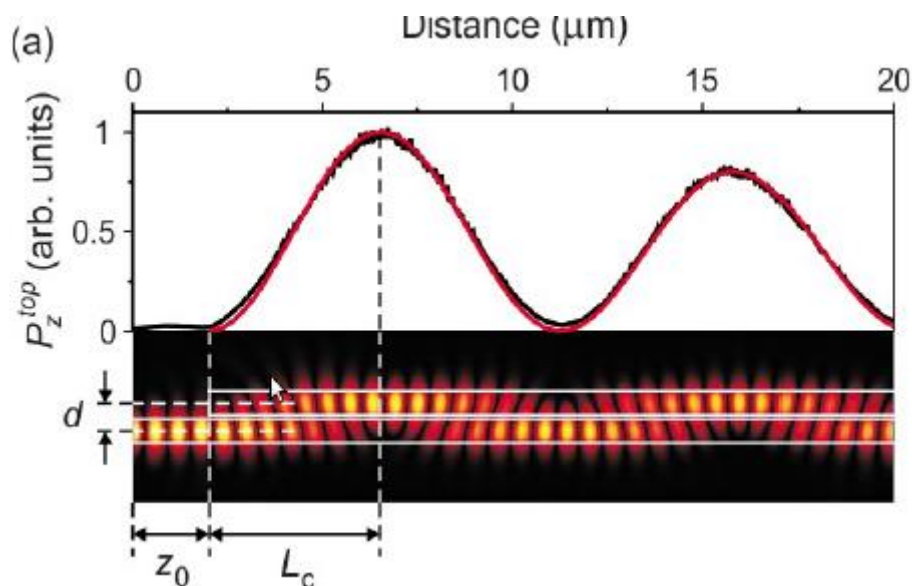
Είναι άξιο αναφοράς ότι το μήκος σύζευξης είναι το απαιτούμενο εκείνο μήκος ώστε για συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ των κυματοδηγών να καθίσταται εφικτή η μεταφορά ολόκληρης της ισχύος από τον ένα κυματοδηγό στον άλλο. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το γράφημα μεταξύ της απόστασης των δύο κυματοδηγών και του μήκους σύζευξης [10].



Σχήμα 18 – Το μήκος σύζευξης σε συνάρτηση με την απόσταση μεταξύ των δύο κυματοδηγών [10]

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, όταν οι κυματοδηγοί βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, το μήκος σύζευξης παίρνει πολύ μικρή τιμή. Όταν τα κέντρα των κυματοδηγών απέχουν γύρω στα 700 nm, τότε το μήκος σύζευξης είναι γύρω στα $L_c=4.6 \mu\text{m}$, μέγεθος αρκετά καλό αν αναλογιστεί κανείς ότι ο συζεύκτης αποτελεί τμήμα ενός πιο μεγάλου πλασμονικού κυκλώματος. Αντίστοιχα, όταν η απόσταση μεταξύ των δύο κυματοδηγών είναι γύρω στα 2.6 μm , δηλαδή ελαφρώς μεγαλύτερη από 700 nm, τότε το μήκος αυξάνεται ακαριαία και φτάνει τα 2.3 mm γεγονός που δείχνει ότι οι δύο κυματοδηγοί δεν είναι συζευγμένοι.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται το γράφημα του περιοδικού φαινομένου της σύζευξης σε συνάρτηση με την απόσβεση που υπάρχει κατά την διάδοση και φαίνεται πιο καθαρά ο λόγος που οι δύο κυματοδηγοί δεν είναι συζευγμένοι [10].



Σχήμα 19 – Η σύζευξη σε συνάρτηση με την απόσβεση που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της διάδοσης [10], [16].

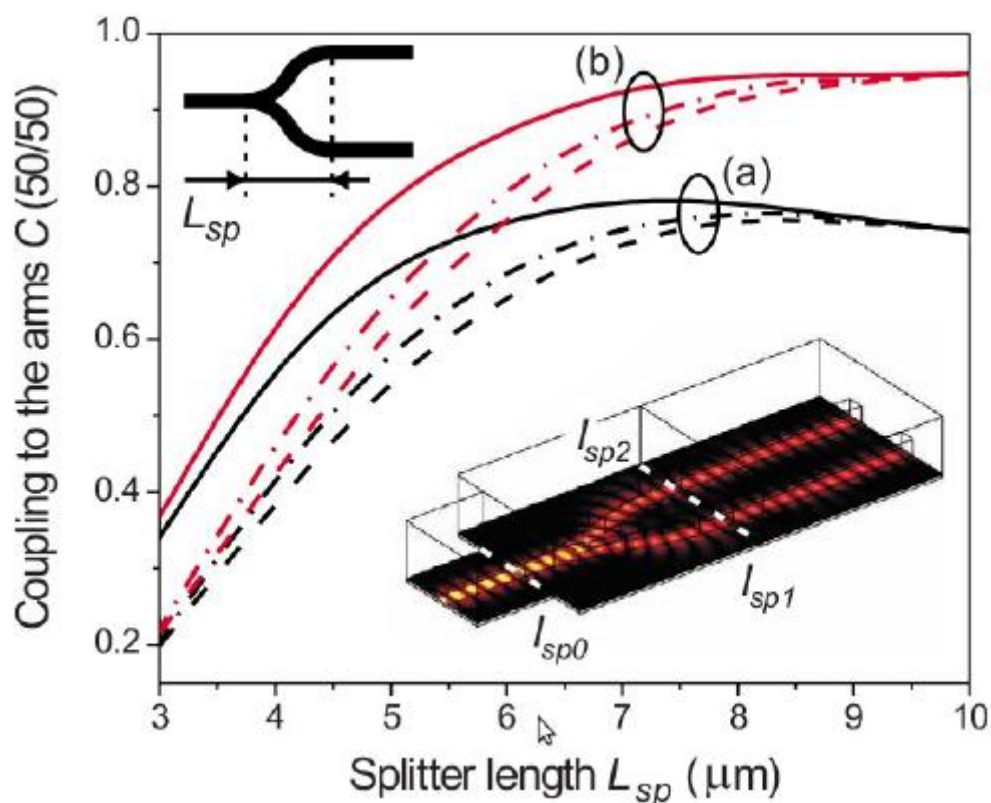
Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, παρατηρείται σύζευξη σε μήκος $L_c=4.6 \mu\text{m}$ και σε μήκος $L_c=13.8 \mu\text{m}$. Βέβαια η συζευγμένη ισχύς που αντιστοιχεί στο δεύτερο μήκος είναι σαφώς μικρότερη από τη συζευγμένη ισχύ που αντιστοιχεί στο πρώτο μήκος και αυτό οφείλεται στις απώλειες που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της διάδοσης. Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι όταν το μήκος σύζευξης φτάνει τα 2.3 mm η κυματοδηγούμενη ισχύς θα τείνει στο μηδέν. Αξιοποιώντας αυτό το χαρακτηριστικό

καθίσταται εφικτή η επίτευξη πολύ μεγάλου βαθμού ολοκλήρωσης για τις πλασμαονικές διατάξεις πάνω στο ίδιο chip [10].

Αν συνδυαστούν οι δύο παράλληλοι κυματοδηγοί με δύο S καμπές (S bends) στον κάθε έναν από αυτούς θα προκύψει ένας συζεύκτης 2x2 και εφόσον επιλεγεί καταλλήλως το μήκος κάθε κυματοδηγού μπορεί να προκύψει και μία επιθυμητή τιμή για το λόγο σύζευξης [10].

3.4 Πλασμαονικοί Διαχωριστές (Plasmonic Splitters)

Η δομή ενός πλασμαονικού διαχωριστή βασίζεται στις S καμπές (S bends) και παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



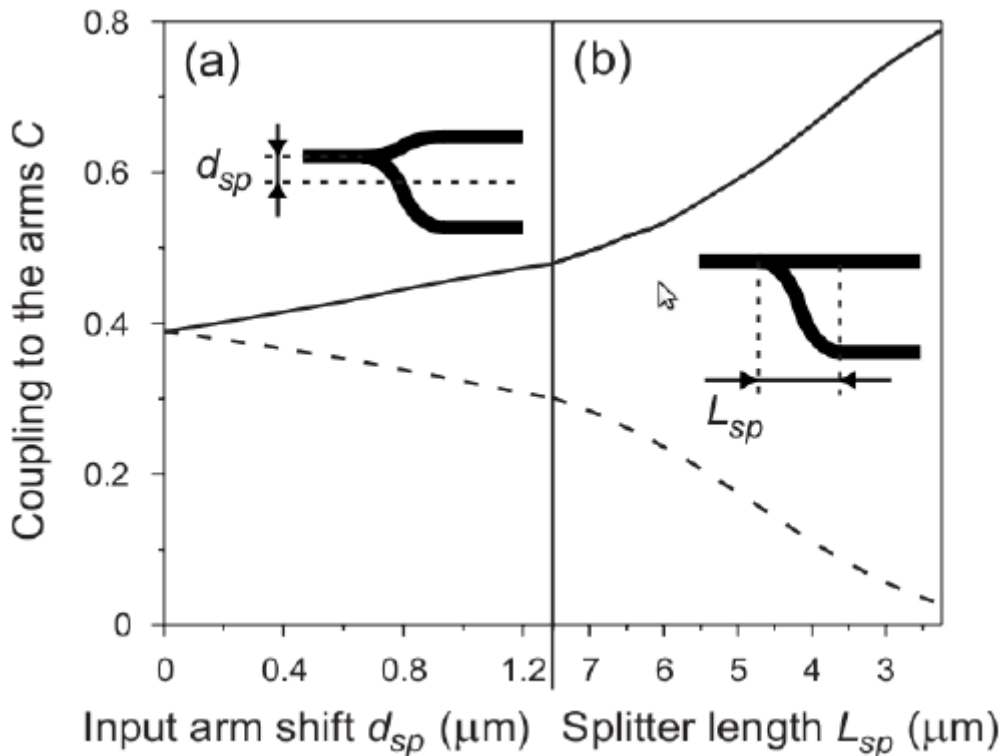
Σχήμα 20 – Η δομή ενός πλασμαονικού διαχωριστή που βασίζεται στις S καμπές (S bends) [10], [16]

Πιο συγκεκριμένα, οι πλασμονικοί διαχωριστές (plasmonic splitters) είναι στοιχεία με μία είσοδο και δύο εξόδους (1x2) και αποτελούνται από δύο S καμπές (S bends). Στην είσοδο τους λαμβάνουν ένα σήμα και το διαχωρίζουν σε δύο όμοια μεταξύ τους σήματα εξόδου το κάθε ένα εκ των οποίων έχει μικρότερη ισχύ από το αρχικό σήμα. Οι πλασμονικοί διαχωριστές (plasmonic splitters) αποτελούν αναπόσπαστο εξάρτημα ενός οπτικού κυκλώματος και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συμβολόμετρων Mach-Zehnder [10], [16].

Η απόσταση μεταξύ των δύο κυματοδηγών εξόδου είναι γύρω στα 2.6 μm (ώστε να διασφαλιστεί η οπτική απομόνωση των δύο εξόδων) με αποτέλεσμα να παρατηρείται μία παράλληλη μετατόπιση κατά 1.3 μm για την κάθε S καμπή. Έτσι οι απώλειες διάδοσης θα είναι περιορισμένες. Η απόδοση της διάταξης είναι το πηλίκο με αριθμητή την τιμή της ισχύος εξόδου και παρονομαστή την τιμή της ισχύος εισόδου. Αξίζει να τονιστεί ότι η ισχύς εξόδου είναι το άθροισμα της τιμής της ισχύος των δύο κυματοδηγών εξόδου. Οι δύο κυματοδηγοί εξόδου έχουν την ίδια τιμή ισχύος. Η απόδοση του διαχωριστή βελτιώνεται μεταβάλλοντας το μήκος L_{sp} της περιοχής διαχωρισμού [10], [16].

Με κατάλληλες αλλαγές στη γεωμετρία της διάταξης είναι εφικτό να κατασκευαστεί ένας διαχωριστής με διαφορετική τιμή ισχύος στις δύο εξόδους του. Αυτό επιτυγχάνεται με κατάλληλη μετατόπιση του κυματοδηγού εισόδου ως προς τον άξονα συμμετρίας της διάταξης. Το μέγεθος αυτό συμβολίζεται ως d_{sp} και παίρνει τιμές από $d_{sp} = 0$ (συμμετρική λειτουργία) έως $d_{sp} = \frac{D}{2}$ (μη συμμετρική λειτουργία) όπου D η απόσταση μεταξύ των κυματοδηγών εξόδου. Μάλιστα αν $d_{sp} = \frac{D}{2}$ και μειωθεί το μήκος του κυματοδηγού τότε είναι πιθανό ο διαχωριστής να μην παρουσιάζει καμία συμμετρία στην έξοδο του αφού αν η μία S καμπή γίνει πολύ απότομη δεν θα διαδίδεται το πεδίο μέσα από αυτήν [10], [16].

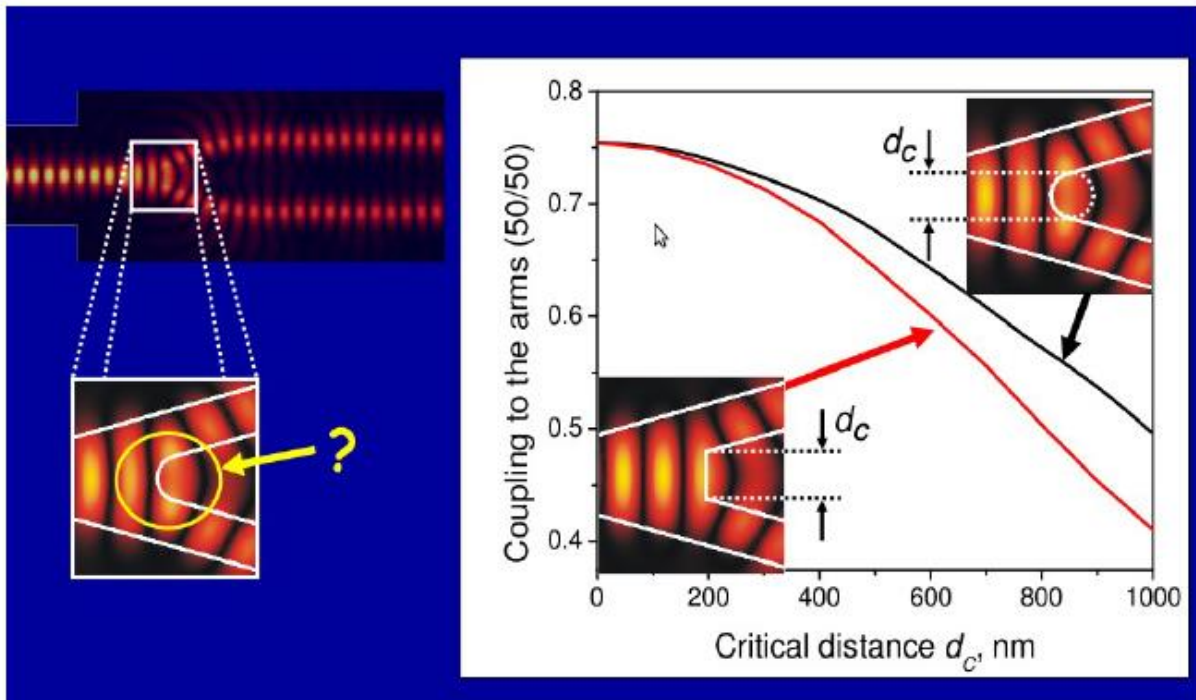
Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης ενός μη συμμετρικού διαχωριστή (splitter) σε συνάρτηση με την μετατόπιση του βραχίονα εισόδου και σε συνάρτηση με το μήκος του διαχωριστή.



Σχήμα 21 – Μη συμμετρικός διαχωριστής (splitter) και παρουσίαση της εξάρτησης της απόδοσης σύζευξης (coupling efficiency) (a) από την μετατόπιση του βραχίονα εισόδου (input arm shift) και (b) από το μήκος του διαχωριστή (splitter length) [10], [16]

Στο αριστερό τμήμα του παραπάνω διαγράμματος παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος στις δύο εξόδους του διαχωριστή σε συνάρτηση με τη θέση του κυματοδηγού εισόδου. Αντίστοιχα στο δεξιό τμήμα του παραπάνω διαγράμματος παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος στις δύο εξόδους του διαχωριστή σε συνάρτηση με την μεταβολή του μήκους του κυματοδηγού όταν $d_{sp} = \frac{D}{2}$. Με μία δομή σαν αυτή είναι εφικτό να επιτευχθεί λόγος διαχωρισμού με τιμή έως και 30. Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι το άθροισμα της συνολικής ισχύος στις δύο εξόδους του διαχωριστή έχει περίπου την ίδια τιμή ανεξάρτητα από τη μετατόπιση του κυματοδηγού εισόδου και το μήκος των S καμπών (S bends) [10], [16].

Κατά τον διαχωρισμό του διαδιδόμενου πεδίου από τον ένα κυματοδηγό εισόδου στους δύο κυματοδηγούς στην έξοδο του διαχωριστή παρατηρούνται απώλειες οι οποίες εξαρτώνται από το σχήμα και την τιμή της γωνίας στο σημείο διαχωρισμού.

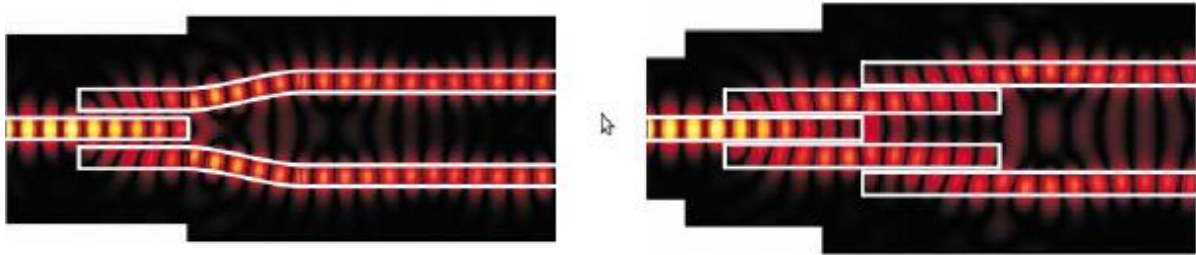


Σχήμα 22 – Οι απώλειες που παρατηρούνται κατά τον διαχωρισμό του διαδιδόμενου πεδίου από τον ένα κυματοδηγό εισόδου στους δύο κυματοδηγούς εξόδου και η επιρροή της τιμής και του σχήματος της γωνίας που υπάρχει στο σημείο διαχωρισμού [10]

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι όσο μεγαλώνει η τιμή της γωνίας στο σημείο διαχωρισμού τόσο μεγαλώνουν και οι απώλειες κατά το διαχωρισμό του διαδιδόμενου σήματος και μάλιστα από μία ορισμένη τιμή της γωνίας και μετά οι απώλειες αυξάνονται ραγδαία. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι το σχήμα της γωνίας δεν επηρεάζει τόσο την τιμή των απωλειών διάδοσης όσο η τιμή της. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η ισχύς που λαμβάνεται στην είσοδο του διαχωριστή θα είναι μικρότερη από την συνολική ισχύ που λαμβάνεται στις δύο εξόδους του [10].

Είναι άξιο αναφοράς, επίσης, ότι οι συζευγμένοι κυματοδηγοί είναι εφικτό να αποτελέσουν τη βάση για την δημιουργία ενός διαχωριστή (splitter) τύπου Y με πληθώρα διαφορετικών δομών [10].

Coupling splitters



Σχήμα 23 - Δύο από τις πολλές πιθανές διαφορετικές δομές ενός διαχωριστή (splitter) τύπου Y με συζευγμένους πλασμαονικούς κυματοδηγούς [10], [16]

Το μέγεθος των διαχωριστών (splitters) τύπου Y είναι παραπλήσιο με το μέγεθος ενός διαχωριστή με S καμπές (S bends). Η απόδοση των διαχωριστών (splitters) τύπου Y είναι λίγο μεγαλύτερη, αφού αξιοποιούν τους συζευγμένους ρυθμούς με αποτέλεσμα να μην υφίστανται απώλειες εξαιτίας της διάδοσης του πεδίου από έναν σε δύο κυματοδηγούς [10].

4° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

«Πλασμονικές Διατάξεις»

4.1 Εισαγωγή

Τα ολοκληρωμένα οπτικά κυκλώματα έχουν αναπτυχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια με στόχο τη μείωση του πλήθους των ηλεκτροοπτικών διασυνδέσεων και την πραγματοποίηση πληθώρας λειτουργιών όπως είναι η οπτική δρομολόγηση, ο διαχωρισμός, ο συνδυασμός και το φιλτράρισμα των οπτικών σημάτων. Για την πραγματοποίηση των λειτουργιών αυτών χρησιμοποιούνται διάφορες ολοκληρωμένες οπτικές τεχνολογίες που μπορούν να αναπτυχθούν σε μεγάλο πλήθος διαφορετικών τεχνολογικών πλατφορμών και υλικών (silica, ημιαγωγοί, πυρίτιο, πολυμερή κλπ). Όλες οι υπάρχουσες τεχνολογίες παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι βασικότεροι όμως λόγοι για τους οποίους επιλέγεται η χρήση μίας τεχνολογίας είναι το χαμηλό κόστος, το μικρό μέγεθος και η χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Ειδικότερα η κατανάλωση ισχύος και το μέγεθος αποτελούν τα κυριότερα τεχνολογικά εμπόδια στην υλοποίηση κέντρων δεδομένων (data centers) και στην υλοποίηση υπολογιστών υψηλής απόδοσης (high performance computing) [17], [18].

Η χρήση επιφανειακών πλασμονικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPPs) για την διάδοση του φωτός κατά μήκος λεπτών μεταλλικών λωρίδων που ενσωματώνονται σε κάποιο διηλεκτρικό (πχ πολυμερές) ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις για μικρό μέγεθος, χαμηλό κόστος και χαμηλή κατανάλωση ισχύος και επιπλέον συνδυάζει απλότητα κατασκευής, ευελιξία και ικανοποιητικές επιδόσεις [17].

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται μερικές διατάξεις, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην πλασμονική τεχνολογία και αποτελούνται από διάφορα πλασμονικά εξαρτήματα όπως πλασμονικοί κυματοδηγοί (plasmonic

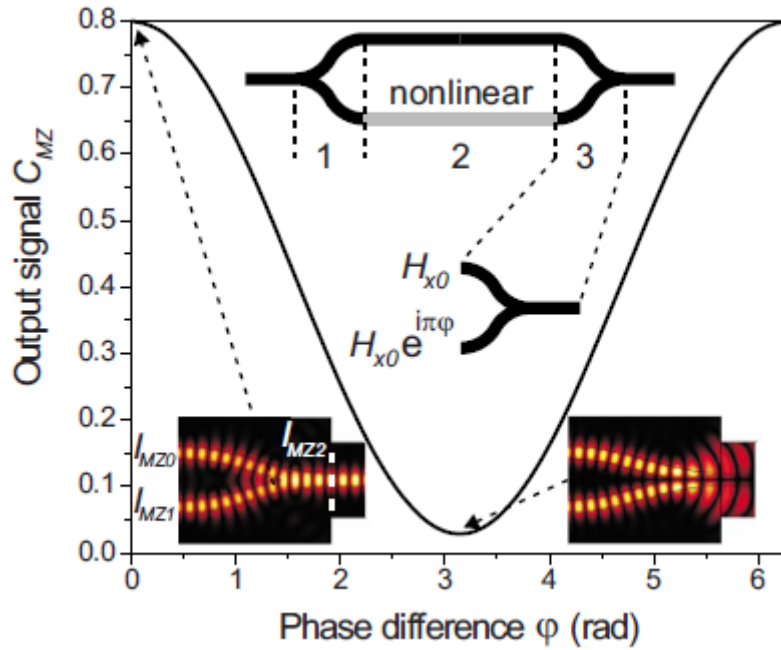
waveguides), πλασμονικοί συζεύκτες (plasmonic couplers) και πλασμονικοί διαχωριστές (plasmonic splitters) [19].

4.2 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder

Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder interferometer) κατασκευάζεται με κατάλληλο συνδυασμό των DLSPP κυματοδηγών, των S καμπών (S bends) και των 2x2 πλασμονικών συζευκτών. Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως διαμορφωτής όσο και ως οπτικός δρομολογητής με 2 εισόδους και 2 εξόδους και αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα ενεργής συσκευής που έχει ως βάση τους DLSPP κυματοδηγούς. Ο ένας βραχίονας του συμβολομέτρου είναι κατασκευασμένος από μη γραμμικό υλικό, του οποίου ο δείκτης διάθλασης μπορεί να αλλάξει τιμή έπειτα από την πρόσπτωση φωτός. Έτσι είναι εφικτό να παρουσιαστεί διαφορά φάσης ανάμεσα στους δύο βραχίονες και να καταστεί εφικτή η διαμόρφωση του σήματος εξόδου ανάλογα με το αν είναι ενισχυτική ή καταστρεπτική η παρεμβολή (interference) στον κυματοδηγό εξόδου του συμβολομέτρου Mach-Zehnder [10], [16].

Η λειτουργία ενός συμβολομέτρου Mach-Zehnder παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ισχύος που υπεισέρχονται, έχει υπολογιστεί ότι η απόδοση του τμήματος διαχωρισμού 1 μπορεί να φτάσει το 78%. Στο τμήμα 1 λαμβάνει χώρα η διάδοση του τρόπου κατά μήκος των ευθύγραμμων DLSPP κυματοδηγών. Βέβαια αξίζει να αναφερθεί ότι όταν υπάρχει μία διεπιφάνεια με δύο υλικά που έχουν έως και 10% διαφορετική τιμή δείκτη διάθλασης, το ποσοστό ανάκλασης ή σκέδασης του διαδιδόμενου σήματος είναι μικρότερο από 2% [16].

Όσον αφορά στην παρεμβολή των διαδιδόμενων σημάτων στην περιοχή σύζευξης 3, αυτή διερευνάται από το γράφημα του σήματος εξόδου ως συνάρτηση της διαφοράς φάσης ϕ που προκαλείται από τους δύο βραχίονες ενώ διατηρείται σταθερή η απόλυτη ροή ισχύος στους δύο βραχίονες ($I_{MZO}=I_{MZ1}$) (Σχήμα 24).



Σχήμα 24 – Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (Mach-Zehnder interferometer). Απεικόνιση της εξάρτησης του σήματος εξόδου στο τμήμα σύζευξης (3) από τη διαφορά φάσης στους δύο βραχίονες. Η περίπτωση της ενισχυτικής και της καταστρεπτικής παρεμβολής [16].

Σε περίπτωση που δεν υπάρχει διαφορά φάσης και η παρεμβολή των δύο σημάτων είναι ενισχυτική, η κανονικοποιημένη ροή της ισχύος εξόδου θα φτάνει το 0.8 και θα δίνεται από τη σχέση:

$$C_{MZ} = \frac{I_{MZ2}}{I_{MZ0} + I_{MZ1}} \quad (30)$$

όπου I_{MZ0} , I_{MZ1} η ένταση του διαδιδόμενου σήματος στον κάθε βραχίονα και I_{MZ2} η ένταση του διαδιδόμενου σήματος στην περιοχή σύζευξης. Όλες οι εντάσεις απεικονίζονται στο σχήμα [16].

Αντίστοιχα, όταν η διαφορά φάσης είναι π και η παρεμβολή των δύο σημάτων είναι καταστρεπτική, η κανονικοποιημένη ροή της ισχύος εξόδου δίνεται από την σχέση 30, είναι αμελητέα και φτάνει το 0.024.

Έτσι παρατηρείται μία αντίθεση διαμόρφωσης (modulation contrast) στη λειτουργία της συσκευής (όταν η διαφορά φάσης είναι 0 και όταν η διαφορά φάσης είναι π) η οποία περιγράφεται από την παρακάτω σχέση και έχει τιμή 0.93 [16]:

$$\frac{C_{MZ}^0 - C_{MZ}^\pi}{C_{MZ}^0 + C_{MZ}^\pi} = 0.93 \quad (31)$$

C_{MZ}^0 : η κανονικοποιημένη ροή της ισχύος εξόδου για διαφορά φάσης 0.

C_{MZ}^π : η κανονικοποιημένη ροή της ισχύος εξόδου για διαφορά φάσης π .

Από τα ένθετα του παραπάνω σχήματος φαίνεται ότι όταν η παρεμβολή είναι καταστρεπτική για τους SPP τρόπους στον κυματοδηγό εξόδου, τότε η παρεμβολή θα είναι ενισχυτική για τα πεδία που σκεδάζονται έξω από τον κυματοδηγό. Σε αυτές τις περιοχές, η διαφορά της οπτικής διαδρομής για τα σήματα στους βραχίονες εισόδου έχει ενισχυτική τιμή. Όπως γίνεται αντιληπτό, δεν παρατηρείται σημαντικό ποσοστό ανάκλασης προς τους βραχίονες του συμβολόμετρου καθώς μεταβάλλεται η τιμή της διαφοράς φάσης ϕ μεταξύ των βραχιόνων [16].

4.3 Δρομολογητής (Router) Πυριτίου-Πλασμονίου

Η πληροφορική υψηλής απόδοσης (High Performance Computing - HPC) μπορεί να εξελιχθεί όταν υπάρχει η δυνατότητα παράλληλης επεξεργασίας των δεδομένων. Η ύπαρξη πυρήνων πολλαπλής επεξεργασίας είναι απαραίτητη για την ανταλλαγή μεγάλου όγκου πληροφοριών η διακίνηση των οποίων παρουσιάζει δυσχέρεια λόγω περιορισμών στο εύρος ζώνης των ηλεκτρικών διασυνδέσεων. Γενικότερα, οι ηλεκτρονικές διασυνδέσεις εισάγουν περιορισμούς στο εύρος ζώνης και υψηλή κατανάλωση ενέργειας με αποτέλεσμα να κρίνεται επιβεβλημένη η στροφή προς τις οπτικές διασυνδέσεις. Με βάση το σκεπτικό αυτό, η φωτονική πυριτίου μοιάζει ως η κυρίαρχη τεχνολογική πλατφόρμα για την υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων χαμηλού κόστους με CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) συμβατότητα [20].

Η τεχνολογία πυριτίου σε μονωτή (Silicon on Insulator - SOI) καλύπτει τις περισσότερες προϋποθέσεις που απαιτούν οι εφαρμογές οπτικών διασυνδέσεων και οδηγεί σε αξιοσημείωτα επιτεύγματα τόσο σε εφαρμογές chip-level πομποδεκτών, όσο και σε εφαρμογές κυκλωμάτων δρομολόγησης (routing circuitry). Για το λόγο

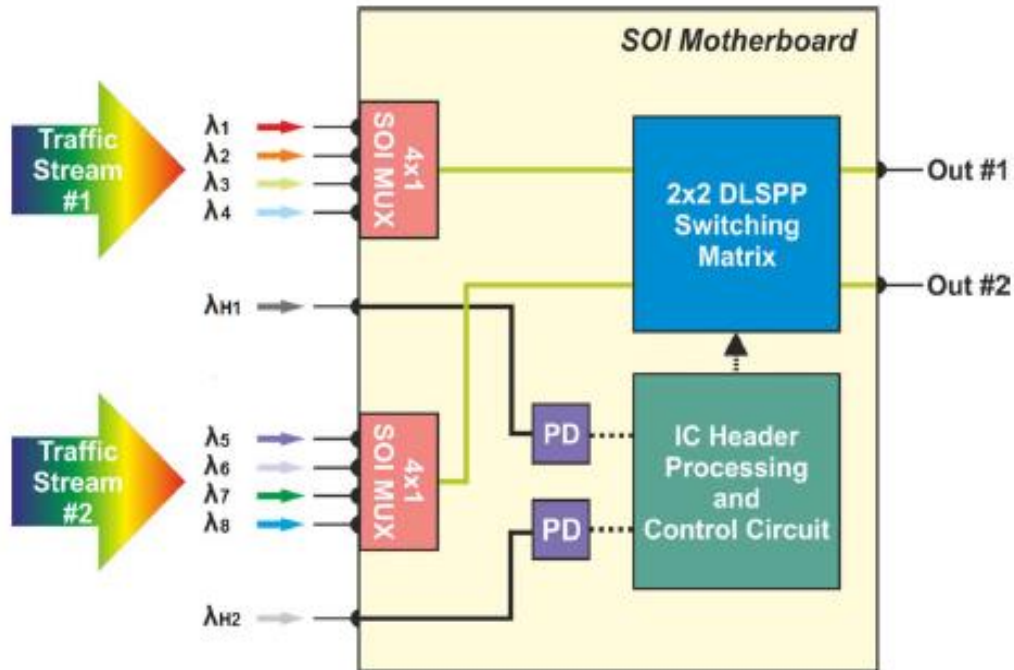
αυτό προωθήθηκαν έντονα οι Chip Multi-Processor (CMP) αρχιτεκτονικές που έχουν ως βάση οπτικές διασυνδέσεις με στόχο την εξοικονόμηση ενέργειας και χώρου. Ως άμεσο επακόλουθο, προσαρμόστηκε κατάλληλα η CMP αρχιτεκτονική στις λειτουργικές απαιτήσεις της φωτονικής [20].

Τα επιφανειακά πλασματικά πολαριτόνια (Surface Plasmon Polaritons - SPP) καθιστούν εφικτή τη δημιουργία φωτονικών κυκλωμάτων με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος, σπάζοντας τους περιορισμούς μεγέθους της παραδοσιακής οπτικής. Επιπρόσθετα η ύπαρξη διεπιφανειών μετάλλου-διηλεκτρικού μέσα στα SPP κυκλώματα καθιστά εφικτή την αποτελεσματική διασύνδεση των ηλεκτρικών και των οπτικών σημάτων παρέχοντας μία ενεργειακά αποδοτική πλατφόρμα στην οποία ενσωματώνονται οι ευρυζωνικές οπτικές ζεύξεις (broadband optical links) και η έξυπνη ηλεκτρονική επεξεργασία [20].

Βέβαια οι DLSPP κυματοδηγοί περιορίζουν τη διάδοση του σήματος σε διάστημα μερικών δεκάδων μικρομέτρων λόγω της ύπαρξης ωμικών απωλειών. Για τον περιορισμό των απωλειών είναι προτιμότερη η χρήση LR-SPP (Long Range - SPP) κυματοδηγών που μπορούν να λειτουργήσουν ως πλατφόρμα μετάδοσης σε διασυνδέσεις 4x2.5 Gbps. Όμως οι LR-SPP κυματοδηγοί απαιτούν ακτίνες καμπυλότητας της τάξεως του mm γεγονός που αναιρεί το πλεονέκτημα του μικρού μεγέθους που εισάγει γενικότερα η πλασματική τεχνολογία [20].

4.3.1 Αρχιτεκτονική Δρομολογητή (Router) 2x2

Το μπλόκ διάγραμμα της πλατφόρμας του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Στον συγκεκριμένο δρομολογητή (router) εισέρχονται δύο οπτικές ροές, κάθε μία εκ των οποίων αποτελείται από 4 χρονικά επικαλυπτόμενα μήκη κύματος δεδομένων που διαμορφώνονται με 40 GBps NRZ (Non Return to Zero) κίνηση πακέτων έτσι ώστε κάθε θύρα εισόδου να υποστηρίζει συνολική κίνηση της τάξεως των 160 Gbps [20].



Σχήμα 25 – Η αρχιτεκτονική του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [20]

Ένα διακριτό μήκος κύματος μεταφέρει την επικεφαλίδα της πληροφορίας για κάθε εισερχόμενη ροή πληροφορίας και προσδιορίζει την απαιτούμενη θύρα εξόδου του δρομολογητή (router). Αυτή η μορφή μετάδοσης πολλαπλού μήκους κύματος μπορεί να επιτύχει υψηλή απόδοση σε διασυνδέσεις SOI (Silicon on Insulator) δρομολόγησης επιτρέποντας την εύκολη επεξεργασία των κεφαλίδων των πακέτων από χαμηλής ταχύτητας ηλεκτρονικά κυκλώματα ελέγχου [20].

Η αρχιτεκτονική του δρομολογητή (router) βασίζεται σε μία SOI (Silicon on Insulator) μητρική (motherboard) προκειμένου να διασφαλιστεί η ύπαρξη χαμηλών απωλειών κατά την οπτική διασύνδεση των υποσυστημάτων του δρομολογητή (router). Ταυτόχρονα ο δρομολογητής (router) λειτουργεί ως βάση συνένωσης των λειτουργιών των 4x1 SOI πολυπλεκτών (multiplexers), του 2x2 DLSPS πίνακα μεταγωγής (switching matrix), των φωτοδιόδων (photodiodes - PDs) και του ολοκληρωμένου κυκλώματος (integrated circuit - IC) των ηλεκτρονικών ελέγχου [20].

Τα 4 κανάλια δεδομένων παρέχουν την ροή δεδομένων, εισάγονται μέσω των αντίστοιχων θυρών εισόδου του δρομολογητή (router) και πολυπλέκονται στον 4x1 SOI (Silicon on Insulator) πολυπλέκτη (multiplexer). Αυτή η πολυπλεγμένη

(πολλαπλού μήκους κύματος) ακολουθία δεδομένων θα ακολουθεί την ίδια διαδρομή μέσα στην πλατφόρμα. Το τμήμα της επικεφαλίδας που μεταφέρει την πληροφορία για την θύρα εξόδου του δρομολογητή (router) διαμορφώνεται σε ένα ξεχωριστό κανάλι μήκους κύματος (wavelength channel) που εισάγεται στο δρομολογητή (router) μέσα από μία ξεχωριστή θύρα εισόδου. Στη συνέχεια το κανάλι της επικεφαλίδας υφίσταται οπτικοηλεκτρονική μετατροπή σε μία χαμηλής ταχύτητας PD (φωτοδίοδο) μονάδα μετατροπής που παρέχει τους αντίστοιχους ηλεκτρικούς παλμούς της επικεφαλίδας στην έξοδο της. Αυτό ακριβώς το ηλεκτρικό σήμα χρησιμοποιείται ως είσοδος στο IC κύκλωμα ηλεκτρονικού ελέγχου, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας της επικεφαλίδας και παράγει το σήμα ελέγχου. Το IC κύκλωμα διαθέτει δύο θύρες εισόδου για τη λήψη των διευθύνσεων των εισερχόμενων οπτικών ροών και παράγει το κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα ελέγχου για την οδήγηση της 2x2 DLSPP μονάδας μεταγωγής [20].

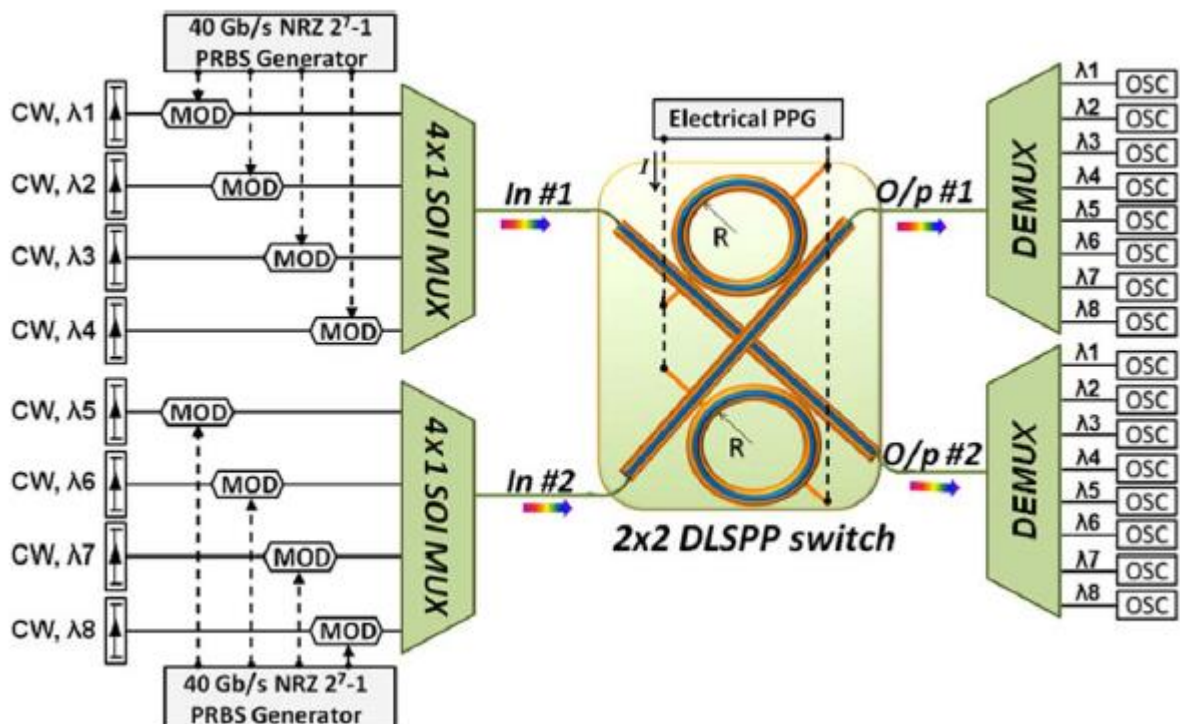
Ο DLSPP πίνακας μεταγωγής (switching matrix) αποτελεί το βασικότερο εξάρτημα του δρομολογητή (router) αφού συνδέει τις εισερχόμενες οπτικές ροές με τις καθορισμένες θύρες εξόδου. Έτσι οι ροές 1 και 2 (streams #1 και 2#) εξέρχονται του δρομολογητή (router) μέσω των θυρών εξόδου 1 και 2 (output ports #1 και 2#) αντίστοιχα στην περίπτωση που ο DLSPP πίνακας μεταγωγής λειτουργεί στην κατάσταση BAR. Αντίστοιχα παρατηρείται ανταλλαγή των θυρών εξόδου στην περίπτωση που ο DLSPP πίνακας μεταγωγής λειτουργεί στην κατάσταση CROSS. Η CROSS ή η BAR κατάσταση λειτουργίας του DLSPP πίνακα μεταγωγής καθορίζεται από το ηλεκτρικό σήμα ελέγχου που παρέχει το ολοκληρωμένο κύκλωμα IC (integrated circuit) [20].

Η τεχνολογία του SOI (Silicon on Insulator) κυματοδηγού βασίζεται σε μία πλευρική σχεδίαση με εύρος 400 nm, ύψος 340 nm και μία πλάκα πυριτίου με πάχος 50 nm προκειμένου να καθίσταται εφικτή η διάδοση του εγκάρσιου μαγνητικού οπτικού τρόπου (Transverse Magnetic (TM) Optical Mode) που υποστηρίζουν οι DLSPP δομές. Από τη στιγμή που η πλατφόρμα του δρομολογητή (router) δεν διαθέτει μονάδες buffer, η απόδοση προτεραιότητας στις εισερχόμενες ροές βασίζεται σε στρατηγικές εκτροπής (deflection strategies) που συνθέτουν ένα σύστημα ιεράρχησης για τις εισερχόμενες οπτικές ροές. Πιο συγκεκριμένα το πακέτο με τη μεγαλύτερη προτεραιότητα θα εξέλθει από το δρομολογητή (router) μέσω της επιθυμητής θύρας εξόδου ενώ το πακέτο με χαμηλότερη προτεραιότητα θα εξέλθει

από τον δρομολογητή (router) μέσω της δεύτερης θύρας εξόδου ακολουθώντας μία εναλλακτική διαδρομή μέχρι τον τελικό προορισμό του [20].

4.3.2 Μοντελοποίηση και Απόδοση Δρομολογητή (Router) 2x2

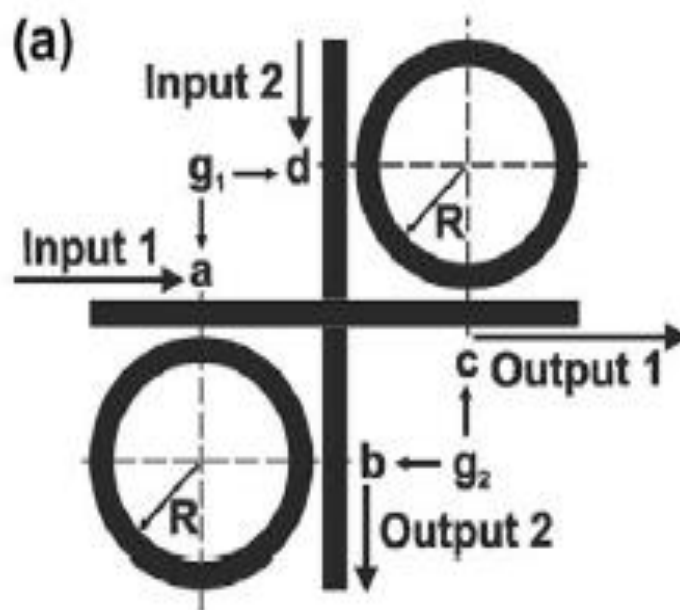
Τα πιο σημαντικά οφέλη της λειτουργίας του δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου είναι η εξοικονόμηση χρόνου και ο περιορισμός της δαπανώμενης υπολογιστικής ισχύος. Η απόδοση του δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου αξιολογείται ενσωματώνοντας μερικά circuit-level μοντέλα σε εξελεγμένα εργαλεία προσομοίωσης οπτικών δικτύων. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η διάταξη του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου στην οποία έχουν ενσωματωθεί κατάλληλα τα circuit-level μοντέλα του 2x2 DLSPS διακόπτη διπλού δακτυλίου και του SOI-MUX (Silicon on Insulator-Multiplexer) κυκλώματος [20].



Σχήμα 26 – Η διάταξη του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [20]

Η διάταξη περιέχει οκτώ κανάλια μήκους κύματος, τα οποία απέχουν μεταξύ τους κατά 100 GHz και ομαδοποιούνται σε δύο συστάδες (clusters) με τέσσερα μήκη κύματος η κάθε μία. Το κάθε κανάλι έχει ρυθμό διάδοσης 40 Gbps και στο εσωτερικό του λαμβάνει χώρα η διαμόρφωση των πακέτων δεδομένων. Κάθε συστάδα καταλήγει σε έναν 4x1 SOI-MUX. Τα κυκλώματα των SOI-MUX διαθέτουν από έναν δακτύλιο με ακτίνα 5 μm και 5.4 μm αντίστοιχα προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα λειτουργίας σε δύο διαφορετικές φασματικές περιοχές και να καθίσταται εφικτή η πολυπλεξία των σημάτων που εξέρχονται από τις δύο συστάδες. Η έξοδος κάθε MUX αποδίδει μία ροή δεδομένων τεσσάρων μηκών κύματος μεταφέροντας συνολική κίνηση της τάξεως των 160 Gbps [20].

Τα δύο σήματα εξόδου των SOI-MUX εισέρχονται σε ένα 2x2 PMMA SPP διακόπτη διπλού δακτυλίου. Η πρώτη ροή εμπεριέχει τα κανάλια 1 έως 4 και η δεύτερη ροή τα κανάλια 5 έως 8. Ο DLSP διακόπτης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα. Οι διεπιφάνειες σύζευξης Si-DLSP λειτουργούν ως συντελεστές απωλειών με 2.6 dB απώλειες ανά όψη [20].



Σχήμα 27 – Ο 2x2 DLSP διακόπτης διπλού δακτυλίου [20]

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης του 2x2 DLSP δρομολογητή (router) ύστερα από προσομοίωση που πραγματοποιείται στο πεδίο του χρόνου. Το σχήμα απεικονίζει την κυκλοφορία των πακέτων στα κανάλια 1 και 5 όταν τα πακέτα εισέρχονται στο διακόπτη μέσω των

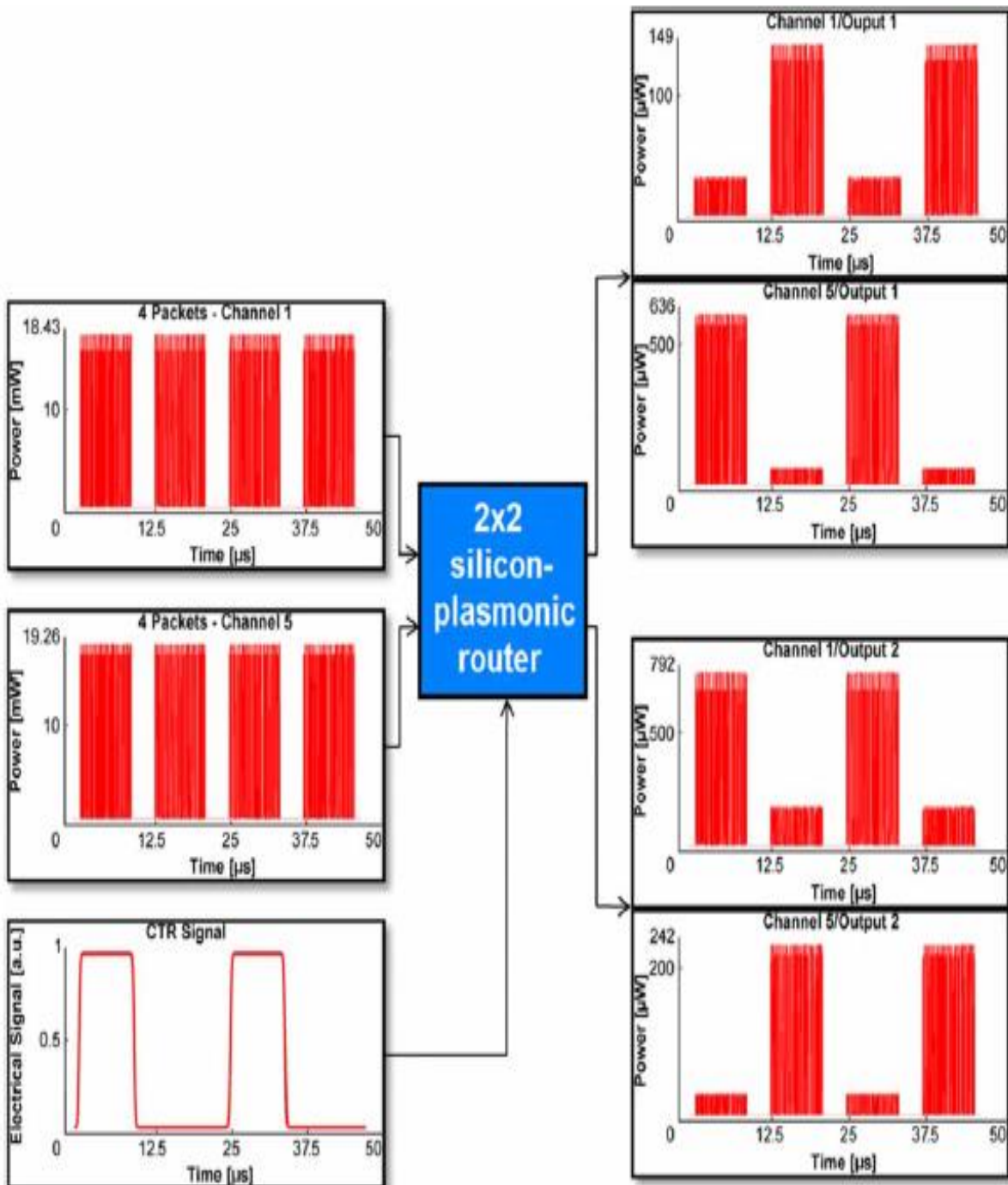
θυρών 1 και 2 αντίστοιχα. Τα πακέτα δεδομένων έχουν χρονική διάρκεια 8.75 μsec και ζώνες προστασίας (guardbands) μεταξύ πακέτων 3.5 μsec . Οι απαιτήσεις του χρονικού παραθύρου της ζώνης προστασίας επιβάλλονται από τον on-off χρόνο μεταγωγής (switching time) της θερμοοπτικής (switching time) DLSPS δομής. Οι τιμές για το χρόνο ανόδου και το χρόνο καθόδου της χρονικής απόκρισης του διακόπτη όταν υφίσταται θερμική διέγερση από ένα ορθογώνιο ηλεκτρικό παλμό είναι 1.62 μsec και 1.82 μsec αντίστοιχα. Αυτά τα χρονικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται υπόψη κατά την αξιολόγηση του δρομολογητή (router) μέσω της ηλεκτρικής ακολουθίας παλμών ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση του DLSPS διακόπτη η οποία απαιτεί ηλεκτρικούς παλμούς με χρονική διάρκεια 10.5 μsec και χρόνους ανόδου και καθόδου ίσους με τις αντίστοιχες τιμές των χρονικά επαγόμενων χαρακτηριστικών της on-off μεταγωγής [20].

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 28 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας παλμός με περίοδο 24.5 μsec ώστε ο DLSPS διακόπτης να λειτουργεί σε κατάσταση CROSS όταν εισέρχονται τα πακέτα 1 και 3 στη δομή διπλού δακτυλίου. Αντίστοιχα όταν εισέρχονται τα πακέτα 2 και 4 θα λειτουργεί σε κατάσταση BAR [20].

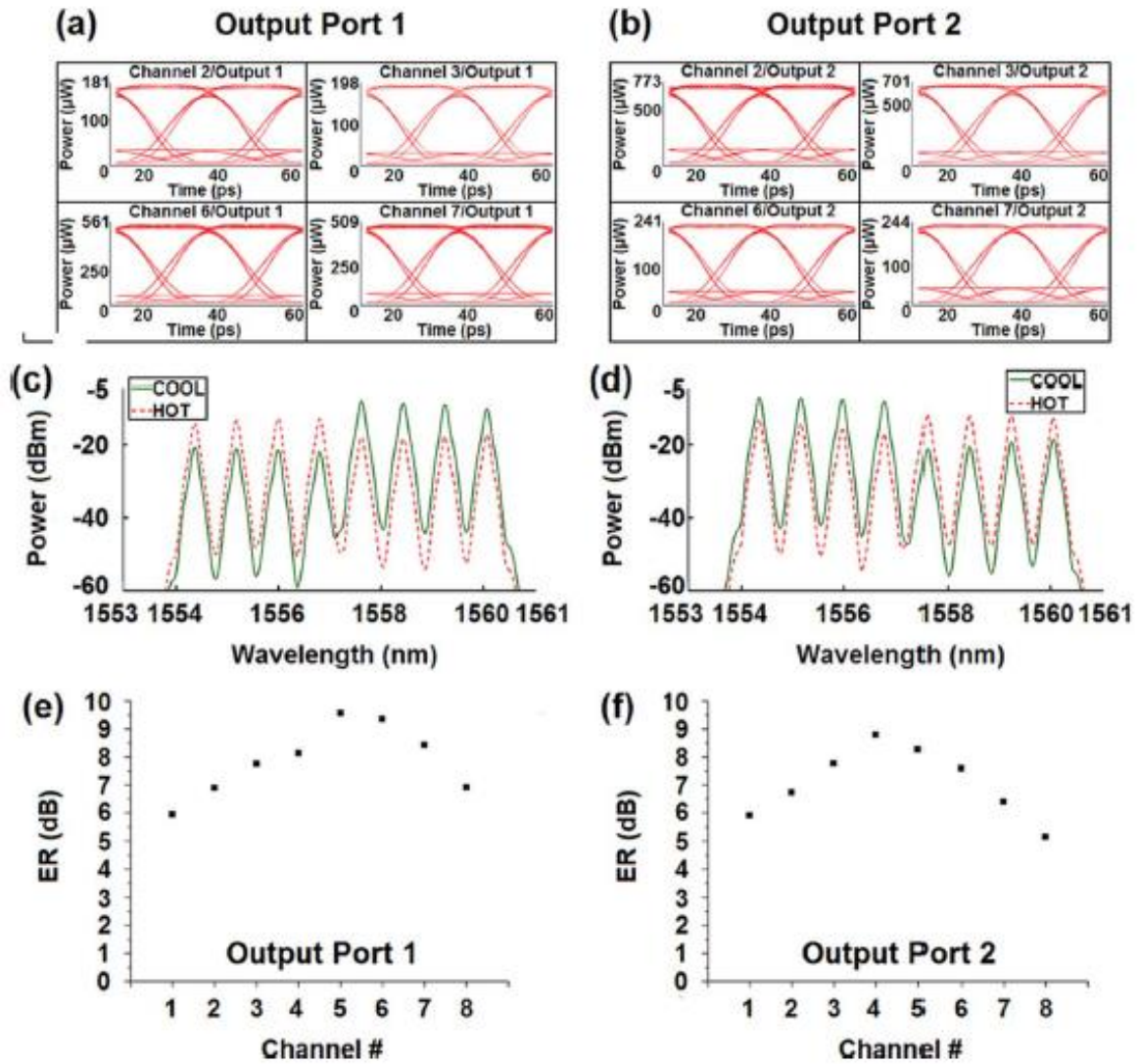
Στο Σχήμα 29(a) παρουσιάζονται τα διαγράμματα οφθαλμού των καναλιών 2, 3, 6 και 7 της εξόδου 1 του DLSPS διακόπτη. Τα αντίστοιχα διαγράμματα οφθαλμού για τα κανάλια 2, 3, 6 και 7 της εξόδου 2 του DLSPS διακόπτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 29(b). Αντίστοιχα διαγράμματα μπορούν να ληφθούν και για τα κανάλια 1, 4, 5 και 8. Στο Σχήμα 29(c) παρουσιάζεται το σήμα που λαμβάνεται στην έξοδο 1 του διακόπτη όταν αυτός λειτουργεί σε κατάσταση off (BAR) και οι δακτύλιοι του έχουν θερμοκρασία γύρω στους 20°C. Στο Σχήμα 29(d) παρουσιάζεται το σήμα που λαμβάνεται στην έξοδο 2 του διακόπτη όταν αυτός λειτουργεί σε κατάσταση on (CROSS) και οι δακτύλιοι του έχουν θερμοκρασία γύρω στους 120°C [20].

Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (Extinction Ratio - ER) που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 1 για τα 8 κανάλια κυμαίνονται από 5.9 dB για το κανάλι 1 έως και 9.5 dB για το κανάλι 5. Αντίστοιχα οι τιμές του λόγου απόσβεσης (Extinction Ratio - ER) που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 2 κυμαίνονται από 5.1 dB για το κανάλι 8 έως 8.8 dB για το κανάλι 4. Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (Extinction Ratio - ER) που μετριοούνται με τη βοήθεια του διαγράμματος οφθαλμού μεταξύ του λογικού

«0» και του λογικού «1» για όλα τα κανάλια και στις δύο θύρες εξόδου, κυμαίνονται από 5 έως 10 dB και παρουσιάζονται στο Σχήμα 29(e) και στο Σχήμα 29(f). Οι συνολικές απώλειες της διάταξης του δρομολογητή (router) υπολογίζεται ότι είναι γύρω στα 15 dB [20].



Σχήμα 28 – Η απόδοση στο πεδίο του χρόνου του 2x2 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου όταν εισέρχονται στο router τα κανάλια 1 και 5 [20].



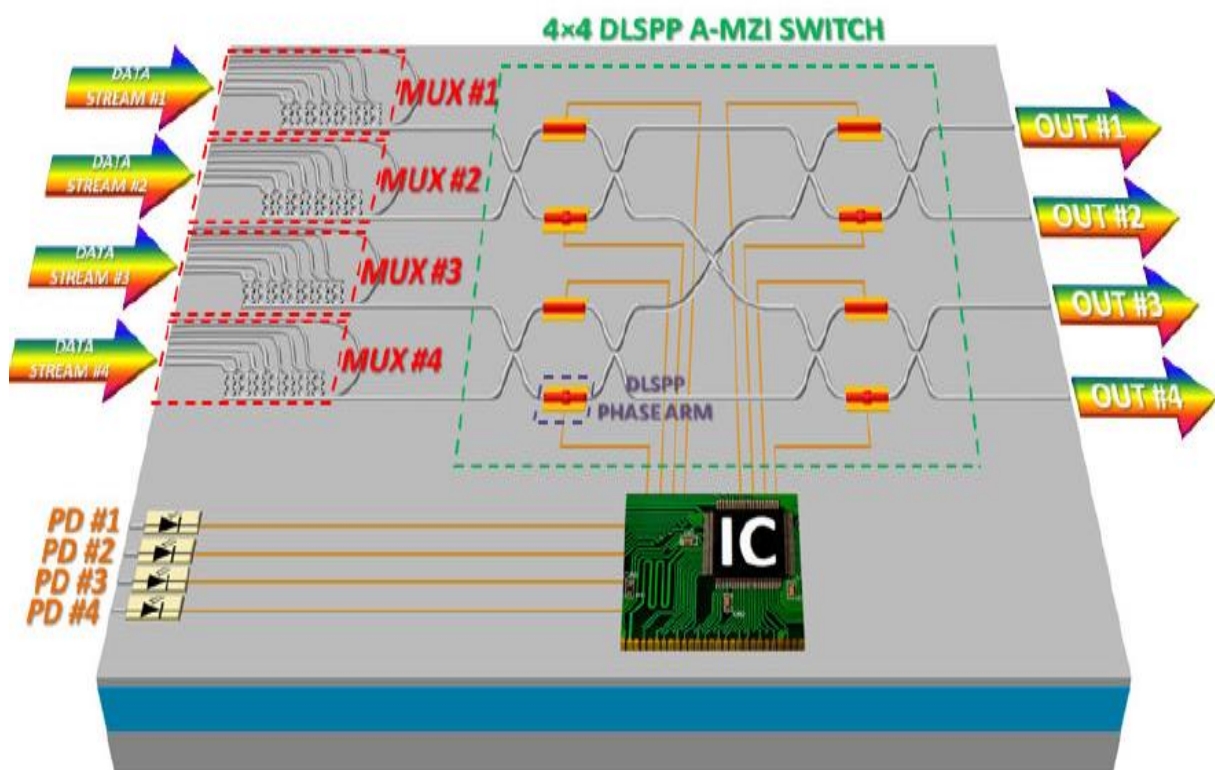
Σχήμα 29 – (a) Το διάγραμμα οφθαλμού των καναλιών 2, 3, 6 και 7 στη θύρα εξόδου 1. (b) Το διάγραμμα οφθαλμού των καναλιών 2, 3, 6 και 7 στη θύρα εξόδου 2. (c) Το φάσμα του σήματος πολλαπλού μήκους κύματος που λαμβάνεται στην θύρα εξόδου 1. (d) Το φάσμα του σήματος πολλαπλού μήκους κύματος που λαμβάνεται στην θύρα εξόδου 2. (e) Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (*Extinction Ratio* – *ER*) κάθε καναλιού που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 1. (f) Οι τιμές του λόγου απόσβεσης (*Extinction Ratio* - *ER*) κάθε καναλιού που λαμβάνονται μεταξύ των καταστάσεων μεταγωγής on και off στη θύρα εξόδου 2 [20].

Οι προαναφερθείσες επιδόσεις του δρομολογητή (router) βασίστηκαν στην υπόθεση ότι η PMMA SPP δομή διπλού δακτυλίου μπορεί να θερμανθεί μέχρι και τους 120°C επιτρέποντας μία θερμοκρασιακή μεταβολή της τάξεως των 100°K προκειμένου να καθίσταται εφικτή η ολίσθηση του μήκους κύματος κατά 9 nm.

Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι η απόδοση θα κυμαίνεται σε ανάλογα επίπεδα αν χρησιμοποιηθεί ένα διαφορετικό πολυμερές με υψηλότερο θερμοοπτικό συντελεστή από το PMMA. Πιο συγκεκριμένα η χρήση ενός πολυμερούς με υψηλότερο θερμοοπτικό συντελεστή δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς της πλατφόρμας του δρομολογητή (router) τόσο σε λειτουργία CROSS όσο και σε λειτουργία BAR. Μπορεί όμως να προσδώσει χαμηλότερες θερμικές απαιτήσεις προκειμένου να επιτευχθεί παρόμοια ή μεγαλύτερη ολίσθηση μήκους κύματος [20].

4.3.3 Αρχιτεκτονική Δρομολογητή (Router) 4x4

Το μπλοκ διάγραμμα της πλατφόρμας του 4x4 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 30 – Η αρχιτεκτονική του 4x4 δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου [18].

Η σχεδίαση του δρομολογητή (router) βασίζεται στην ταυτόχρονη αξιοποίηση των χαρακτηριστικών της φωτονικής πυριτίου και της πλασμονικής τεχνολογίας με στόχο τη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας και την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η μητρική πλακέτα (motherboard) του δρομολογητή (router) έχει ως υλικό κατασκευής το πυρίτιο και συνεισφέρει:

- Στην διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων παρέχοντας χαμηλά ποσοστά απωλειών.
- Στην πολυπλεξία του σήματος.
- Στην επεξεργασία της επικεφαλίδας [18].

Έτσι τα DLSPP στοιχεία που χαρακτηρίζονται από υψηλές απώλειες, μικρό αποτύπωμα (footprint) και χαμηλή κατανάλωση ισχύος χρησιμοποιούνται μόνο όπου απαιτείται μεταγωγική λειτουργικότητα. Η έξυπνη διαδικασία λήψης αποφάσεων διεξάγεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά χαμηλής ταχύτητας τα οποία έχουν τον ίδιο ρυθμό λειτουργίας με τα πακέτα δεδομένων [18].

Η διεπιφάνεια του δρομολογητή (router) αποτελείται από 32 θύρες εισόδου, οι 28 εκ των οποίων χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή των πακέτων δεδομένων σχηματίζοντας 4 ροές δεδομένων με 7 μήκη κύματος η κάθε μία. Οι υπόλοιπες 4 θύρες χρησιμοποιούνται για την έγχυση των δεσμών διακριτού μήκους κύματος (discrete wavelength beams) που είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά της επικεφαλίδας της πληροφορίας των τεσσάρων εισερχόμενων ροών δεδομένων. Η επικεφαλίδα κάθε ροής δεδομένων είναι ένας συνδυασμός 2 παλμών σε χρονικό διάστημα 1 μsec και καθορίζει την επιθυμητή θύρα εξόδου. Επίσης πρέπει να τονιστεί ότι η διάρκεια του ωφέλιμου φορτίου των δεδομένων ποικίλλει [18].

Τα 28 σήματα περιέχουν χρονικά επικαλυπτόμενα μήκη κύματος δεδομένων που διαμορφώνονται με 40 Gbps NRZ (Non Return to Zero) κίνηση πακέτων και απέχουν κατά 100 GHz. Τα σήματα αυτά συγκεντρώνονται σε 4 οπτικές ροές μέσω του 7x1 πολυπλέκτη (multiplexer - MUX) που αποτελείται από SOI (Silicon on Insulator) αντηχεία σε μορφή δακτυλίου (Ring Resonators - RRs). Οι ακολουθίες δεδομένων πολλαπλού μήκους κύματος θα ακολουθούν την ίδια διαδρομή μέσα στην πλατφόρμα. Οι θύρες των τεσσάρων επικεφαλίδων συνδέονται με τις χαμηλού ρυθμού φωτοδιόδους (photodiodes - PDs) πυριτίου που χρησιμοποιούνται για την οπτικοηλεκτρονική μετατροπή του παλμού πληροφορίας της επικεφαλίδας των

πακέτων. Τα ηλεκτρικά αυτά σήματα λειτουργούν ως τα σήματα εισόδου του IC (Integrated Circuit) μικροελεγκτή που είναι υπεύθυνος για την επεξεργασία των επικεφαλίδων και τη δημιουργία του σήματος ελέγχου. Το IC (Integrated Circuit) έχει 4 θύρες εισόδου για τη λήψη των αντίστοιχων επικεφαλίδων και παράγει 4 ηλεκτρονικά σήματα διαφορικού ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την οδήγηση του 4x4 πίνακα μεταγωγής (switching matrix). Ο πίνακας μεταγωγής (switching matrix) αποτελείται από 4 πανομοιότυπα συμβολόμετρα Mach-Zehnder (MZI) που σχηματίζονται από κυματοδηγούς Si-DLSPP [18].

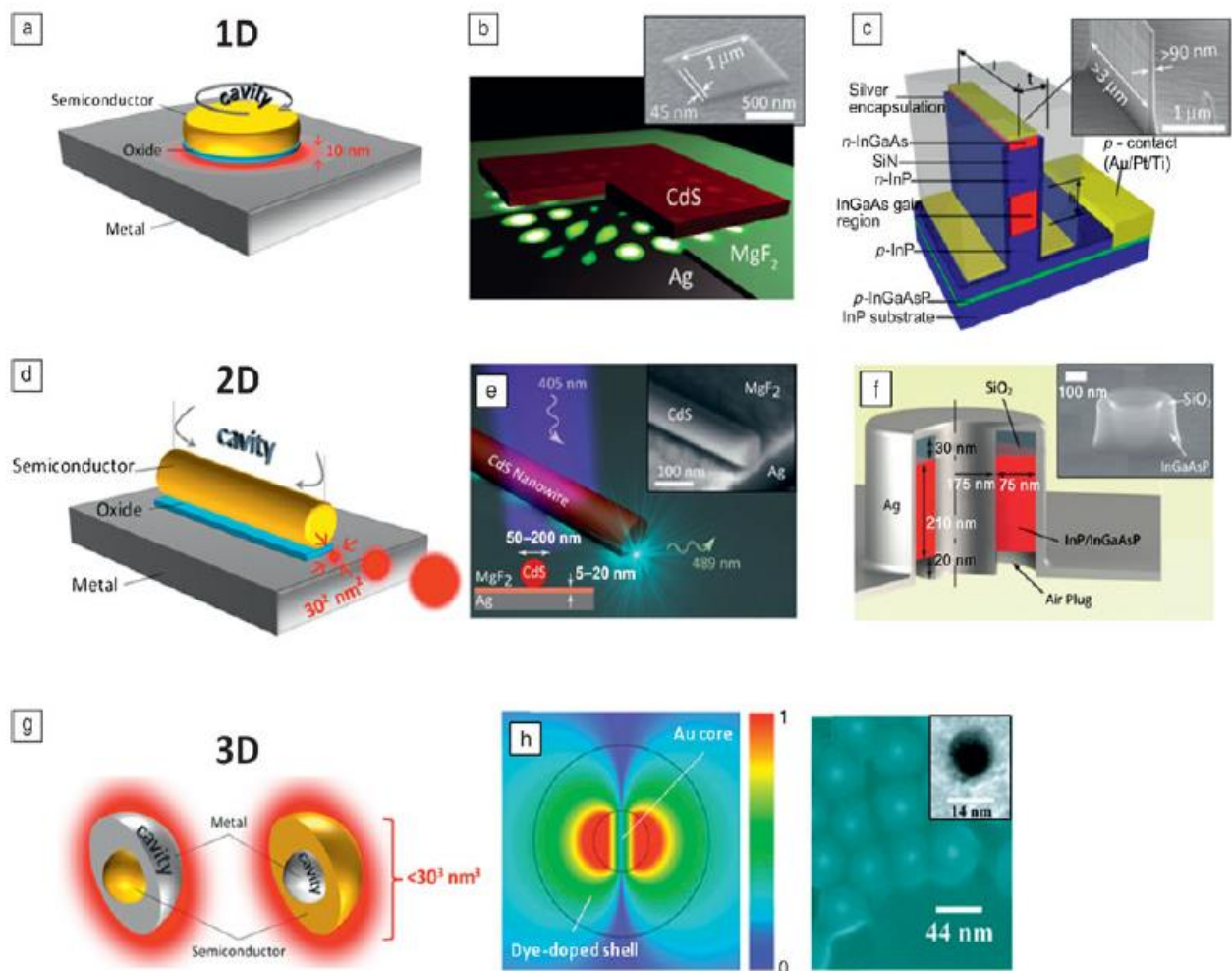
4.4 Πλασμονικά Laser

Τα πλασμονικά laser νανομετρικών διαστάσεων αποτελούν πιθανή λύση στην πρόκληση εύρεσης κατάλληλων πηγών επιφανειακών πλασμονίων για πλασμονικά κυκλώματα εξαιρετικά μικρών διαστάσεων. Τα laser επιφανειακών πλασμονίων βασίζουν τη λειτουργία τους στην ενίσχυση των επιφανειακών πλασμονίων (αντί στην ενίσχυση του φωτός) και αυτός είναι ο λόγος που εμφανίζουν διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά σε σύγκριση με τα συμβατικά laser. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία περιορίζονται ισχυρά στην κοιλότητα ενός πλασμονικού laser με αποτέλεσμα να καθιστούν εφικτή τη δημιουργία εξαιρετικά συμπαγών συσκευών οι οποίες είναι ικανές να ενισχύσουν σημαντικά το ποσοστό των αυθόρμητων εκπομπών που οφείλονται στο φαινόμενο Purcell. Επιπρόσθετα το φαινόμενο Purcell ενδέχεται να ασκεί τεράστια επίδραση σε πλασμονικές νανοδομές πολύ μικρών διαστάσεων εξαιτίας της μη ομαλής κλιμάκωσης με τη συχνότητα [21].

Η ικανότητα που παρουσιάζουν τα πλασμονικά laser να ενισχύουν όλες τις φωτεινές αλληλεπιδράσεις στο εσωτερικό τους μπορεί να προσδώσει εξαιρετικά γρήγορους χρόνους απόκρισης ακόμα και στα μεγάλα μήκη κύματος, μακριά από το συντονισμό των επιφανειακών πλασμονίων. Πέρα από αυτό, η ενίσχυση που οφείλεται στο φαινόμενο Purcell είναι πιθανό να τροποποιήσει δραστικά την αναστροφή πληθυσμών και την εξαναγκασμένη εκπομπή αφού μεγαλώνει η τιμή του συντελεστή αυθόρμητης εκπομπής (β). Επί της ουσίας όταν αυξάνεται η τιμή του

συντελεστή αυθόρμητης εκπομπής (β), περιορίζεται η εμφάνιση της αυθόρμητης εκπομπής του laser η οποία επιτρέπει χαμηλές τιμές κατωφλίου παρά το γεγονός ότι οι νανοδομές μετάλλου-διηλεκτρικού παρουσιάζουν υψηλές απώλειες. Έτσι τα πλασμαονικά laser παρουσιάζουν υψηλές τιμές κατωφλίου εξαιτίας του μεγάλου ποσοστού των ωμικών απωλειών που εμφανίζουν τα μέταλλα [21].

Για την κατασκευή ενός laser πρέπει οπωσδήποτε να υπάρχει ένας μηχανισμός ανάδρασης (feedback) ο οποίος υλοποιείται με μία κοιλότητα. Τα πλασμαονικά laser είναι εφικτό να περιορίσουν τα πλασμόνια χρησιμοποιώντας κοιλότητες διαφόρων διαστάσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [21].



Σχήμα 31 – Πλασμαονικά nanolaser με διαφορετικά επίπεδα οπτικού περιορισμού πέρα από το όριο διάθλασης του φωτός. (a-c): μονοδιάστατος πλασμαονικός οπτικός περιορισμός. (b): Πλασμαονικό nanolaser που διαθέτει μία κοιλότητα εντός του επιπέδου και πλήρη εσωτερική ανάκλαση του τρόπου αντήχησης. (c): Πλασμαονικό nanolaser τύπου Fabry-Perot. (d-f): πλασμαονικός οπτικός περιορισμός δύο

διαστάσεων. (e): Ένα αντηχείο τύπου Fabry-Perot. (f): Ένα αντηχείο ομοαξονικού τύπου. (g): Οι δύο πιθανές διαμορφώσεις ενός αντηχείου που χρησιμοποιεί τρισδιάστατο πλασματικό οπτικό περιορισμό. (h): Ο τρόπος λειτουργίας ενός πλασματικού laser [21].

Τα laser με μονοδιάστατο πλασματικό περιορισμό (Σχήμα 31a) διαθέτουν μία κοιλότητα με τετραγωνικό ή με κυκλικό σχήμα που στηρίζεται σε ένα αντηχείο. Το αντηχείο αυτό είναι δυνατό να έχει σφαιρικό ή ημισφαιρικό περίβλημα και να παρέχει ολική εσωτερική ανάκλαση (Σχήμα 31b) ή να είναι ένα αντηχείο τύπου Fabry-Perot (Σχήμα 31e). Οι πλασματικοί κυματοδηγοί (πχ πλασματικό νανοσύρμα) παρέχουν ενίσχυση του laser σε μία γεωμετρία κυματοδηγού, η οποία προσφέρει ισχυρό οπτικό περιορισμό δύο διαστάσεων (Σχήμα 31d), καθιστά εφικτή τη λειτουργία του laser σε μία διαμόρφωση τύπου Fabry-Perot (Σχήμα 31e) ή καθιστά εφικτή τη λειτουργία του laser σε μία κοιλότητα ομοαξονικού τύπου (Σχήμα 31f) [21].

Μπορεί οι παραπάνω διαμορφώσεις της κοιλότητας να παρέχουν την απαιτούμενη ανάδραση για την ομαλή λειτουργία του laser, αλλά δεν μπορούν να περιορίσουν τις διαστάσεις πέρα από το όριο διάθλασης. Για να μειωθούν οι διαστάσεις του laser κάτω από το όριο διάθλασης πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα λειτουργίας του ως την τιμή της συχνότητας των επιφανειακών πλασμονίων. Ένα nanolaser με τρισδιάστατο πλασματικό περιορισμό, με διαστάσεις αρκετά μικρότερες από το μήκος κύματος, θα έχει σφαιρικό σχήμα (Σχήμα 31g). Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο διαφορετικές σχεδιαστικές επιλογές:

- Το υλικό απολαβής (gain material) να βρίσκεται στο κέντρο και να περιβάλλεται από ένα μεταλλικό κέλυφος το οποίο ορίζει την κοιλότητα (Σχήμα 31h).
- Το μεταλλικό κέλυφος να περιβάλλεται από το υλικό απολαβής [21].

Η κοινή πρόκληση που αντιμετωπίζουν όλοι οι τύποι των πλασματικών laser είναι η επίτευξη της αποδοτικής σύζευξης του σήματος σε έναν on-chip κυματοδηγό διότι τα δύο μεταλλικά περιβλήματα σχετίζονται άμεσα με τον πλασματικό περιορισμό και επειδή δεν υπάρχει αντιστοιχία στις ταχύτητες των κυμάτων εντός και εκτός της κοιλότητας του laser. Αν η ανάδραση από την πλευρά της κοιλότητας είναι πολύ έντονη, θα διαφύγει από την κοιλότητα μόνο μία πολύ μικρή ποσότητα φωτός πριν απορροφηθεί από τα μέταλλα. Αν όμως η ανάδραση από την πλευρά της

κοιλότητας είναι αμελητέα τότε δεν θα είναι εφικτός ο έλεγχος του κατωφλίου του laser. Πέρα από την ισχυρή σύζευξη του σήματος στον on-chip κυματοδηγό, πρέπει να ελαχιστοποιείται η σύζευξη με την εξωτερική ακτινοβολία και επίσης να ελαχιστοποιούνται οι μη ακτινοβολούμενες απώλειες που οφείλονται στο μέταλλο. Ένας κατάλληλος τρόπος σχεδίασης που παρέχει ισορροπία μεταξύ των διαφόρων καναλιών απωλειών επιτυγχάνεται διασταυρώνοντας μία μεταλλική λωρίδα με μία λεπτή ημιαγωγίμη νανοταινία. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μία κοιλότητα με ενσωματωμένο κυματοδηγό στο σημείο της διασταύρωσης η οποία καθιστά εφικτή τη σύζευξη της εκπομπής του laser στο εσωτερικό του ημιαγωγικού κυματοδηγού σε ποσοστό που υπερβαίνει το 70% [21].

Μία ακόμα πρόκληση για τα πλασματικά laser είναι η ηλεκτρική έγχυση σε συνθήκες περιβάλλοντος, η οποία κρίνεται απαραίτητη για on-chip ολοκλήρωση με ταυτόχρονη εισαγωγή ηλεκτρικών δεδομένων. Επιπλέον αρκετές προκλήσεις σχετίζονται με την ελαχιστοποίηση των οπτικών και ηλεκτρικών περιορισμών. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πλασματικών laser είναι ικανά να μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα οδήγησης περιορίζοντας τον οπτικό τρόπο και να λειτουργήσουν ως αποθήκη θερμότητας [21].

Οι μικρές διαστάσεις της κοιλότητας του laser που οδηγούν σε υψηλό οπτικό καθρέπτη και υψηλές ωμικές απώλειες στο μέταλλο, εισάγουν σχεδιαστικές προκλήσεις όσον αφορά στη λειτουργία των πλασματικών laser σε θερμοκρασία δωματίου. Η τετραγωνική κοιλότητα ενός πλασματικού nanolaser που μπορεί να καταστήσει εφικτή τη λειτουργία σε θερμοκρασία δωματίου φαίνεται στο Σχήμα 31b. Αυτός ο τρόπος σχεδίασης προσφέρει ισχυρό περιορισμό με ταυτόχρονες χαμηλές απώλειες μετάλλου χρησιμοποιώντας έναν υβριδικό πλασματικό κυματοδηγό. Επίσης παρουσιάζει χαμηλές απώλειες ακτινοβολίας, αφού τα HPP (Hybrid Plasmonic Polaritons) υφίστανται ολική εσωτερική ανάκλαση [21].

Μερικές ακόμα σχεδιαστικές προκλήσεις για τα πλασματικά laser προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί υψηλής απολαβής με άμεσο ενεργειακό χάσμα με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται μία προσέγγιση υβριδικού πλασμονίου που περιορίζει σημαντικά τις επιλογές που σχετίζονται με την κοιλότητα. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι οι μονωτές τοποθετούνται εκεί που το φως αλληλεπιδρά εντονότερα με το μέταλλο για να διασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξει ηλεκτρικό

βραχυκύκλωμα το οποίο με τη σειρά του καθιστά ανέφικτη την ηλεκτρική έγχυση. Για το λόγο αυτό τα laser μετάλλου που βασίζονται στην ηλεκτρική έγχυση δεν χρησιμοποιούν πλασματικούς τρόπους και διαθέτουν μεταλλικές περιοχές με υψηλές απώλειες. Αντιθέτως, οι φωτονικοί τρόποι διαδίδονται σε περιοχές με χαμηλές διηλεκτρικές απώλειες και δεν παρέχουν συρρίκνωση του μεγέθους της οπτικής λειτουργίας πέρα από το όριο διάθλασης [21].

Η κοιλότητα ενός πλασματικού laser απαιτεί τις λιγότερες δυνατές απώλειες από την πλευρά του μετάλλου, με αποτέλεσμα να απαιτείται η ελαχιστοποίηση του φανταστικού μέρους της διηλεκτρικής συνάρτησης. Στην περίπτωση αυτή το πιο κατάλληλο υλικό για την επίτευξη της ζητούμενης απολαβής είναι οι ημιαγωγοί άμεσου ενεργειακού χάσματος. Όσον αφορά στην επιλογή του μετάλλου, ο άργυρος και ο χρυσός παρουσιάζουν τις μικρότερες ενεργειακές απώλειες, αν και γενικότερα το ποσοστό απωλειών που παρουσιάζουν θεωρείται υψηλό [21].

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η αποτελεσματική ηλεκτρική άντληση των πλασματικών laser που ελέγχει τη στάθμη των προσμίξεων των ημιαγωγικών νανοδομών χρήζει περαιτέρω έρευνας. Βέβαια έχουν πραγματοποιηθεί κάποιες πρώιμες μελέτες σε υλικά μονοστρωματικών προσμίξεων τα οποία υφίστανται ταχύτατη θερμική ανόπτηση [21].

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

«Το Παρόν και το Μέλλον της Πλασμονικής Τεχνολογίας στα Υπολογιστικά Κέντρα (Data Centers)»

Η πρόσφατη πανδημική κρίση λόγω του ιού Covid-19 έφερε στο προσκήνιο νέες προκλήσεις για τον κόσμο, καθώς ανάγκασε εταιρίες και εκπαιδευτικά ιδρύματα να προσαρμοστούν τάχιστα σε μία νέα πραγματικότητα όπου κυριαρχούν η τηλεργασία και η εξ αποστάσεως μάθηση. Κατά συνέπεια, προέκυψαν ιδιαίτερα αυξημένες ανάγκες για υπολογιστική ισχύ και ταχύτητα στα υπολογιστικά κέντρα, τα οποία ήδη λειτουργούσαν καταναλώνοντας ενέργεια της τάξεως των megawatts. Είναι εύκολα κατανοητό ότι στο εγγύς μέλλον οι ανάγκες για ενέργεια από τα υπολογιστικά κέντρα θα αυξηθούν κατακόρυφα, καθώς αυτά θα κληθούν να διαχειρίζονται ροές πληροφορίας που θα υπερβαίνουν το 1Tb/s [22].

Οι συμβατικές διασυνδέσεις των υπολογιστικών κέντρων (DCI) που βασίζονται σε CMOS δεν αναμένεται να συμβαδίσουν με τις μελλοντικές απαιτήσεις, λόγω των περιορισμών στην πυκνότητα του εύρους ζώνης (bandwidth-density) και στην κατανάλωση ενέργειας. Οι DCI περιέχουν κόμβους CMOS που προσφέρουν συχνότητες διέλευσης της τάξης των 300GHz. Παράλληλα, η τεχνολογία SiGe bipolar CMOS (BiCMOS), παρέχει δυνατότητα για συχνότητες διέλευσης της τάξης των 500GHz. Αυτές οι ηλεκτρονικές τεχνολογίες συνδυάζονται με φωτονικά κυκλώματα (διαμορφωτές) που επιτρέπουν την αποτελεσματική κωδικοποίηση των ηλεκτρικών σημάτων στο οπτικό πεδίο, καθώς και τη λήψη των οπτικών σημάτων με φωτοανιχνευτές. Τα κυκλώματα αυτά παρουσιάζουν χαμηλή κατανάλωση και υψηλή ταχύτητα, αλλά σε μεγαλύτερες από το επιθυμητό διαστάσεις και με σημαντικό κόστος. Σε αυτά τα προβλήματα έρχεται να δώσει λύσεις η πλασμονική τεχνολογία. Η αντικατάσταση φωτονικών κυκλωμάτων με πλασμονικά προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα: μικρό αποτύπωμα (footprint), υψηλότερο αριθμό θυρών, μεγαλύτερη λειτουργική ταχύτητα (πάνω από 1 Tb/s), χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, εύκολη ενσωμάτωση χωρίς την ανάγκη υποστήριξης από πολύπλοκα κυκλώματα οδήγησης. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν κάλλιστα να καταστήσουν την πλασμονική ως

τον κρίκο που συνδέει τις τεχνολογίες της ηλεκτρονικής και της φωτονικής στις DCI [22] [23].

Από διάφορες σχετικές μελέτες των τελευταίων ετών προκύπτει ότι η πλασμονική τεχνολογία έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, είτε παθητικές όπως συζεύκτες (couplers), είτε ενεργητικές όπως λέιζερ, διαμορφωτές (modulators), μεταγωγείς (switches) και αισθητήρες (detectors). Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω μπορεί να συμβάλει στην κατασκευή ενεργειακά αποδοτικών διασυνδέσεων. [23]

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί πλήθος πλασμονικών διαμορφωτών, με την έμφαση να δίνεται στην επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων. Πιο συγκεκριμένα, έχουν κατασκευαστεί πλασμονικοί διαμορφωτές που επιτυγχάνουν αποκρίσεις συχνότητας έως και 500GHz, αποτύπωμα (footprint) της τάξης των $10\mu\text{m}^2$ για διαμορφωτές Mach-Zehnder και δακτυλίου και χαμηλές τάσεις οδήγησης που επιτρέπουν λειτουργία της τάξης attojoule/bit. Σε σύγκριση με τους φωτονικούς διαμορφωτές, οι πλασμονικοί εμφανίζουν πολύ υψηλή απόδοση και ταυτόχρονα χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επί παραδείγματι, σε πλασμονικούς διαμορφωτές έχουν μετρηθεί καταναλώσεις ισχύος της τάξης των $2,84\text{fJ/bit}$ για ταχύτητες έως 100Gbps, τη στιγμή που αυτοί χωρικά καταλαμβάνουν εμβαδόν μόλις λίγων μm^2 (σε σύγκριση με τα χιλιάδες μm^2 που καταλαμβάνουν οι αντίστοιχοι οπτικοί διαμορφωτές). Επιπλέον, το γεγονός ότι οι πλασμονικοί διαμορφωτές δεν απαιτούν απαραίτητα κυματοδηγούς πυριτίου τους καθιστά συμβατούς με οποιαδήποτε πλατφόρμα [24].

Πέραν από τους διαμορφωτές όμως, η επιστημονική κοινότητα έχει προσφάτως αναπτύξει και παρουσιάσει μεγάλη ποικιλία πλασμονικών φωτοανιχνευτών. Οι πιο πρόσφατοι από αυτούς έχει αποδειχθεί ότι επιτυγχάνουν αποκρίσεις συχνότητας πέραν των 300GHz και αποκρίσεις της τάξης των $0,5\text{A/W}$. Στα πλεονεκτήματά τους συμπεριλαμβάνεται η συμβατότητά τους με διάφορες τεχνολογίες, ανεξαρτήτως από την υποκείμενη διαδικασία ανίχνευσης [24].

Η πλασμονική τεχνολογία χρησιμοποιείται στους οπτικούς πομπούς καθώς επιτρέπει την πιο συμπαγή και παράλληλη ευθυγράμμισή τους. Οι πλασμονικοί πομποί έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές μικρών αποστάσεων (όπως υπολογιστικά κέντρα) με βελτιωμένες επιδόσεις μετάδοσης σε σύγκριση με τους

παραδοσιακούς πομπούς. Η δυνατότητα των πλασμονικών διαμορφωτών να λειτουργούν με χαμηλές τάσεις εισόδου ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες, αποδίδει στους πλασμονικούς πομπούς ένα πλεονέκτημα απόδοσης. Παράλληλα, η επίπεδη απόκριση συχνότητας των πλασμονικών διαμορφωτών επιτρέπει τη μετάδοση σήματος σε δέκτη με μειωμένη πολυπλοκότητα. Έχει αποδειχθεί ότι είναι δυνατή η μετάδοση 100Gbit/s NRZ-OOK και 112Gbit/s PAM4 σε αποστάσεις 1χλμ και 2χλμ χωρίς εξισορρόπηση του δέκτη (receiver equalization) [24] [25].

Όλα τα παραπάνω αποτελούν ένα μόνο δείγμα της βαρύτητας που έχει αρχίσει να προσλαμβάνει η πλασμονική τεχνολογία τα τελευταία χρόνια, ειδικά σε σχέση με τις προκλήσεις που αφορούν στα υπολογιστικά κέντρα (data centers). Οι λύσεις που προσφέρει η πλασμονική σε συνδυασμό με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες προδιαγράφουν μία εντυπωσιακή πορεία, η οποία πιθανότατα θα καταστήσει τα data centers ικανά να διαχειριστούν πολύ μεγαλύτερους όγκους πληροφορίας στο προσεχές μέλλον.

Σύνοψη – Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάστηκαν οι ιδιότητες των επιφανειακών πλασμονικών πολαριτονίων (Surface Plasmon Polaritons - SPPs) καθώς και οι πτυχές και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά πλασμονικών εξαρτημάτων και διατάξεων που χρησιμοποιούνται για ταχύρρυθμες επικοινωνίες μικρών αποστάσεων σε υπολογιστικά κέντρα.

Από την εκπόνηση της μελέτης διαπιστώθηκε ότι η κατασκευή πλασμονικών εξαρτημάτων και διατάξεων δεν είναι και τόσο απλή υπόθεση, αφού παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες που οφείλονται στο μεγάλο ποσοστό απωλειών που εμφανίζονται στις επιμέρους βαθμίδες. Πιθανότατα μία καλή λύση θα ήταν η αξιοποίηση διάφορων εργαλείων προσομοίωσης, ώστε να χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα υλικά με σωστό συνδυασμό και να περιοριστούν οι απώλειες που εμφανίζονται.

Η χρήση φύλλων χρυσού σε πλασμονικούς κυματοδηγούς περιορίζει μεν τις απώλειες, αλλά και πάλι το ποσοστό των απωλειών θεωρείται αρκετά σημαντικό με αποτέλεσμα να κρίνεται απαραίτητη η αναζήτηση ενός άλλου υλικού που να εισάγει ακόμα μικρότερες απώλειες. Όταν το πάχος του πυρήνα είναι μικρότερο από 50 nm, τότε καθίσταται εφικτή η διάδοση μόνο των πλασμονικών τρόπων (plasmonic modes). Όταν το πάχος του πυρήνα είναι μεγαλύτερο, τότε καθίσταται εφικτή η διάδοση εγκάρσιων ηλεκτρονικών και μαγνητικών φωτονικών τρόπων.

Οι DLSPPW κυματοδηγοί δεν χρησιμοποιούνται σε ενεργές διατάξεις επειδή η επίδραση της αλλαγής των ιδιοτήτων του πολυμερούς (λόγω του θερμοοπτικού φαινομένου) είναι αμελητέα, καθώς ένα μέρος του ρυθμού διαδίδεται έξω από το πολυμερές. Όταν αυξηθεί το πλάτος του πολυμερούς καθίσταται εφικτή η διάδοση περισσότερων του ενός ρυθμών από μία συγκεκριμένη τιμή πλάτους και πάνω και για δεδομένη τιμή του ύψους του πολυμερούς.

Τα πιο σημαντικά οφέλη της λειτουργίας ενός δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου είναι η εξοικονόμηση χρόνου και ο περιορισμός της δαπανώμενης υπολογιστικής ισχύος. Οι επιδόσεις ενός δρομολογητή (router) πυριτίου-πλασμονίου βασίστηκαν στην υπόθεση ότι η PMMA SPP δομή διπλού δακτυλίου θερμαίνεται ως

τους 120°C. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί άλλο πολυμερές με υψηλότερο θερμοοπτικό συντελεστή από το PMMA η απόδοση θα είναι παρόμοια. Έτσι η χρήση ενός πολυμερούς με υψηλότερο θερμοοπτικό συντελεστή δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της συνάρτησης μεταφοράς της πλατφόρμας του δρομολογητή. Απλά είναι εφικτό να εγείρει πιο χαμηλές θερμικές απαιτήσεις προκειμένου να επιτευχθεί παρόμοια ή μεγαλύτερη τιμή ολίσθησης μήκους κύματος.

Όταν αυξάνεται η τιμή του συντελεστή αυθόρμητης εκπομπής (β), περιορίζεται η αυθόρμητη εκπομπή του laser, η οποία μπορεί να προσδώσει χαμηλές τιμές κατωφλίου, αν και οι νανοδομές μετάλλου-διηλεκτρικού παρουσιάζουν υψηλές απώλειες. Τα πλασματικά laser παρουσιάζουν υψηλές τιμές κατωφλίου και αυτό οφείλεται στο μεγάλο ποσοστό ωμικών απωλειών που εμφανίζουν τα μέταλλα. Η κοιλότητα ενός πλασματικού laser απαιτεί το μέταλλο να παρουσιάζει τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Για να μειωθούν οι διαστάσεις ενός πλασματικού laser κάτω από το όριο διάθλασης πρέπει να αυξηθεί η συχνότητα λειτουργίας του ως την τιμή της συχνότητας των επιφανειακών πλασμονίων.

Παρά τις παραπάνω προκλήσεις ωστόσο, η πλασματική, με κυριότερα προτερήματα το μικρό αποτύπωμα (footprint), τις υψηλές ταχύτητες και την σχετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, φαίνεται πως εντέλει θα εδραιώσει την θέση της στις διασυνδέσεις των υπολογιστικών κέντρων (DCI) πλάι στην ηλεκτρονική και τη φωτονική. Με τη συμβολή της πλασματικής τεχνολογίας, τα υπολογιστικά κέντρα αναμένεται στο προσεχές μέλλον να καταστούν ικανά να διαχειρίζονται υψηλότερες ροές πληροφορίας που θα υπερβαίνουν το 1Tb/s.

Αναφορές – Βιβλιογραφία

1. Λοιδωρίκης Ε., (2011). *Φωτονικά Υλικά*. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
2. Benedikt A., Stein H., (2012). *Plasmonic Devices for Surface Optics and Refractive Index Sensing*. University of Strasbourg.
3. Λιαροκάπης Ε.. *Διηλεκτρικές, Οπτικές, Μαγνητικές Ιδιότητες Υλικών*. Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
4. Brongersma M. L., Shalaeen V. M., (2010). *The Case of Plasmonics*. Applied Physics. Vol. 328. Science. Published by AAAS.
5. Brongersma M. L., Cao L., (2009). *Active Plasmonics. Ultrafast Developments*. Nature Photonics Volume 3. Macmillan Publishers Limited.
6. *Plasmonics. A Vision for the Future*. Springer Science and Business Media 2006.
7. Λουφάκης Δ., (2015). *Αύξηση των Φωτοκαταλυτικών Ιδιοτήτων της Τιτανίας με Χρήση Εντοπισμένου Επιφανειακού Πλασμονικού Συντονισμού (LSPR)*. Τμήμα Φυσικής. Σχολή Θετικών Επιστημών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
8. Λύρας Φ. Δ., (2012). *Μεταγωγείς Πλασμονικής Τεχνολογίας για Ευρυζωνικές Διασυνδέσεις Υπολογιστικών Συστημάτων*. Τμήμα Πληροφορικής. Σχολή Θετικών Επιστημών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
9. Κουτσιούμπας Α., (2009). *Μελέτη Διεπιφανειακών Φαινομένων με την Μέθοδο Διέγερσης Επιφανειακών Πλασμονίων*. Τομέας Συμπυκνωμένης Ύλης. Τμήμα Φυσικής. Σχολή Θετικών Επιστημών. Πανεπιστήμιο Πατρών.
10. Καλαβρουζιώτης Δ.. *Πλασμονικές Διατάξεις με Εφαρμογή στις Σύγχρονες Τηλεπικοινωνίες*. Εξαμηνιαία Εργασία στην Ολοκληρωμένη Οπτική.
11. Zia R., Schuller J. A., Chandran A., Brongersma M. L.. *Plasmonics: The Next Chip-Scale Technology*. Geballe Laboratory of Advanced Materials. Stanford University. United States of America.
12. Atwater H. A., (2007). *The Promise of Plasmonics*. Scientific American INC.
13. Wassel H. M. G., Dai D., Tiwari M., Valamehr J. K., Theogarajan L., Dionne J., Chong F. T., Sherwood T., (2012). *Opportunities and Challenges of Using Plasmonic Components in Nanophotonic Architectures*. IEEE.

14. Chowdhury Y., (2011). *Plasmonic Waveguides: Design and Comparative Study*. Royal Institute of Technology. KTH. Stockholm. Sweden.
15. Resinex. *Distribution of Plastics and Elastomers*.
Web Link: <http://www.resinex.gr/typon-polymeroy/pmma.html>
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούνιος 2016.
16. Krasavin A. V., Zayats A. V., (2008). *Three-Dimensional Numerical Modeling of Photonic Integration with Dielectric-Loaded SPP Waveguides*. Physical Review B 78.
17. Boltasseva A., Nikolajsen T., Leosson K., Kjaer K., Larsen M. S., Bozhevolnyi S. I., (2005). *Integrated Optical Components Utilizing Long-Range Surface Plasmon Polaritons*. Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, No. 1.
18. Vyrsoinos K., Papaioannou S., Kalavrouziotis D., Giannoulis G., Apostolopoulos D., Avramopoulos H., Zacharatos F., Hassan K., Weeber J. C., Markey L., Dereux A., Kumar A., Bozhevolnyi S. I., Suna A., De Villasante O. G., Tekin T., Waldow M., Tsilipakos O., Ptilakis A., Kriezis E. E., Pleros N., (2012). *Active Plasmonics Integrated on SOI for High-Throughput, Low Energy and Low Footprint On-Chip Routing Fabrics*. EC FP7-ICT Project Platon. Contract Number 249135.
19. Ozbay E., (2006). *Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions*. Science AAAS.
20. Papaioannou S., Vyrsoinos K., Tsilipakos O., Ptilakis A., Hassan K., Weeber J. C., Markey L., Dereux A., Bozhevolnyi S. I., Miliou A., Kriezis E. E., Pleros N., (2011). *A 320 Gb/s – Throughput Capable 2x2 Silicon-Plasmonic Router Architecture for Optical Interconnects*. Journal of Lightwave Technology. Vol. 29. No.21.
21. Sorger V J., Oulton R. F., Ma R. M., Zhang X., (2012). *Toward Integrated Plasmonic Circuits*. MRS Bulletin. Vol. 37.
22. https://www.also.com/ec/cms5/en_6000/6000/blog/channel-insights/the-future-of-data-centres-trends-and-an-industry-overview.jsp, accessed 10/5/22.
23. Christos A. Thraskias, Eythimios N. Lallas, Niels Neumann, Laurent Schares, Bert J. Offrein, Ronny Henker, Dirk Plettemeier, Frank Ellinger, Juerg Leuthold, Ioannis Tomkos, Survey of Photonic and Plasmonic Interconnect Technologies for Intra- Datacenter and High-Performance Computing Communications, IEEE Communications Surveys & Tutorials (Volume: 20, Issue: 4, May 2018).

24. Juerg Leuthold, Benedikt Baeuerle, Wolfgang Heni, Claudia Hoessbacher, Loïc Chérix, David Moor, Marco Eppenberger, Yuriy Fedoryshyn, Ueli Koch, Jasmin Smajic, "Plasmonic Data Center Interconnects (DCIs)", OFC 2021 © OSA 2021.
25. B. Baeuerle, W. Heni, C. Hoessbacher, Y. Fedoryshyn, A. Josten, C. Haffner, T. Watanabe, C. Uhl, H. Hettrich, D. L. Elder, L. R. Dalton, M. Möller, and J. Leuthold, "Reduced Equalization Needs of 100 GHz Bandwidth Plasmonic Modulators," *Journal of Lightwave Technology* 37, 2050-2057 (2019).