



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

**Ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για οπτική  
διασύνδεση σε κέντρα δεδομένων και σε υπολογιστικά  
συστήματα υψηλών επιδόσεων**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ιωάννης Κ. Κανάκης

Αθήνα, Μάιος 2021





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

**Ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων για οπτική  
διασύνδεση σε κέντρα δεδομένων και σε υπολογιστικά  
συστήματα υψηλών επιδόσεων**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

Ιωάννης Κ. Κανάκης

**Συμβουλευτική  
Επιτροπή:**

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Νικόλαος Ουζούνογλου

Νικόλαος Πλέρος

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

.....  
Ν. Πλέρος  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Α.Π.Θ.

.....  
Α. Παναγόπουλος  
Αναπληρωτής Καθηγητής  
Ε.Μ.Π.

.....  
Γ. Ματσόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Χ. Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ν. Κοζύρης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Κ. Βυρσωκινός  
Επίκουρος Καθηγητής Α.Π.Θ.

Αθήνα, Μάιος 2021

.....  
Ιωάννης Κ. Κανάκης

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

Copyright © Ιωάννης Κ. Κανάκης, 2021.

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.

# Περίληψη

Μέχρι τα τέλη του 2023, σχεδόν τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού θα έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο, ενώ ο αριθμός των συσκευών που θα είναι συνδεδεμένες σε δίκτυα έχοντας μια διεύθυνση IP θα είναι περίπου τριπλάσιος από τον παγκόσμιο πληθυσμό. Παράλληλα, με δεδομένη την εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων, της Τεχνητής Νοημοσύνης και των εφαρμογών νέφους, αναμένεται περαιτέρω έκρηξη στη διακίνηση των δεδομένων ετησίως. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση στα κέντρα δεδομένων για το 2021 αναμένεται να αγγίξει τα 19.5 ZB, όταν το 2016 ήταν μόλις 6 ZB, με την πλειοψηφία αυτής της κίνησης να πραγματοποιείται εντός των κέντρων δεδομένων (71.5%). Γίνεται λοιπόν άμεσα αντιληπτό ότι τα κέντρα δεδομένο κατέχουν βαρύνοντα ρόλο στη διακίνηση της πληροφορίας ενώ η διασύνδεσή τους με όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστο, γρήγορο και αποδοτικό -από μεριάς κόστους και κατανάλωσης- τρόπο είναι ζωτική σημασίας. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί να συμβάλλει ακριβώς στο κομμάτι αυτό. Εκκινώντας από τη μελέτη, το σχεδιασμό και την πειραματική αξιολόγηση ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων και καταλήγοντας στην πειραματική επίδειξη ενός ταχύρρυθμου και μεγάλου εύρους ζώνης Ενεργού Οπτικού Καλωδίου, προτείνει μια οπτική διασύνδεση εντός των κέντρων δεδομένων που απαντά στις σύγχρονες προκλήσεις.

Ο πρώτος βασικός άξονας της διατριβής αφορά στο σχεδιασμό ενός πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη με αναισθησία στην πόλωση, ολοκληρωμένου σε πλατφόρμα τεχνολογίας SOI. Σκοπός της ανάπτυξης αυτή της δομής είναι η χρήση της για πολυπλεξία/αποπολυπλεξία κατά μήκος κύματος σε ένα Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε και μελετήθηκε σε προσομοιωτικό περιβάλλον μια δομή βασισμένη στην τοπολογία ενός συμβολομέτρου Mach-Zehnder εξοπλισμένου με συζεύκτες MMI. Ο δεύτερος άξονας της διατριβής αφορά στη μελέτη μονορυθμικών VCSELs με μήκος κύματος λειτουργίας στο παράθυρο των 1550 nm. Οι δομές αυτές, οι οποίες αποτελούν τα πιο σημαντικά στοιχεία της υπό ανάπτυξη οπτικής διασύνδεσης, αξιολογήθηκαν τόσο ως προς τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους όσο και ως προς τη συμπεριφορά τους σε δυο συστημικά πειράματα. Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια καινοτόμος μέθοδος δημιουργίας ενός PAM-4 παλμού μέσα από την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση ενώ στο δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε μετάδοση δεδομένων με ρυθμό 80 Gb/s και τρόπο διαμόρφωση PAM-4. Ο τελευταίος άξονας της διατριβής, αφορά στην πειραματική επίδειξη ολοκληρωμένων συσκευών πομπού, δέκτη και πολυπύρηνης ίνας με διεπαφή απεμπλοκής. Οι δομές αυτές, επέδειξαν άριστα χαρακτηριστικά λειτουργίας και κρίθηκαν κατάλληλες για την υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων κέντρων δεδομένων και υπολογιστικών συστημάτων υψηλών επιδόσεων.

**Λέξεις κλειδιά:** Ενεργό Οπτικό Καλώδιο, Οπτικές διασυνδέσεις, Διασυνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων, Οπτικοί πομποδέκτες, Φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, Φωτονικά Πυριτίου, Laser κάθετης κοιλάτητας - VCSEL, Συμβολόμετρο Mach-Zehnder – MZI, Κέντρα δεδομένων, Υπολογιστικά συστήματα υψηλών επιδόσεων.

# Abstract

By the end of 2023, almost 2/3 of the world's population will have access to the Internet, and the number of devices that will be connected to a network with an IP address will be about three times the global population. At the same time, the Internet of Things, Artificial Intelligence and cloud applications are thriving, pushing data traffic over the edge. In more detail, traffic in data centers is expected to reach 19.5 ZB by the end of 2021, when in 2016 was only 6 ZB, with the majority of this traffic staying within the data center (71.5%). It is therefore clear, that data centers play a key role in the transmission of information, while their interconnection in the most fast, high-bandwidth and efficient way- in terms of cost and power consumption- is vital. This dissertation attempts to contribute to this path. Through the study, design and experimental evaluation of photonic integrated circuits up to the experimental demonstration of a high-speed and high-bandwidth Active Optical Cable, proposes an optical intra-datacenter interconnection that tackles the modern challenges.

The first basic contribution of the current dissertation concerns the design of an integrated SOI multiplexer/demultiplexer with polarization insensitivity. The purpose of developing such a structure is to use it as a WDM multiplexer/demultiplexer in an Active Optical Cable. For this reason, a structure based on a Mach-Zehnder Interferometer equipped with MMI couplers, was designed through extensive simulation studies. The second contribution of the dissertation involves the study of single-mode VCSELs operating in the C-band window. These structures, that constitute the most important elements of the optical interconnect under development, were evaluated both in terms of their operating characteristics and of their behaviour in two system-level experiments. The first experiment exploited a novel method of generating a PAM-4 optical signal through polarization multiplexing while the second one achieved data transmission at 80 Gb/s with PAM-4 modulation format. The last main contribution of the dissertation involves the evaluation under laboratory conditions of different developed prototypes: a transmitter, a receiver and a multicore fiber with a breakout interface. These devices exhibited excellent performance and thus were considered as suitable for the implementation of optical interconnects of data centers and high-performance computing systems.

**Keywords:** Active Optical Cable-AOC, Optical interconnects, Intra-datacenter interconnects, Optical transceivers, Photonic Integrated Circuits, Silicon Photonics, Vertical Cavity Surface-Emitting Laser-VCSEL, Mach-Zehnder Interferometer-MZI, Data centers, High-performance computing-HPC.

# Πίνακας Συντμήσεων

<b>ADC</b>	Analog-to-Digital Converter
<b>AI</b>	Artificial Intelligence
<b>AOC</b>	Active Optical Cable
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BTJ</b>	Buried Tunnel Junction
<b>CMOS</b>	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
<b>CXP</b>	Common Transceiver (X) Pluggable
<b>DAC</b>	Digital-to-Analog Converter
<b>DBR</b>	Distributed Bragg Reflector
<b>DC</b>	Data center
<b>DCI</b>	Data Center Interconnects
<b>DCN</b>	Data Center Network
<b>DEMUX</b>	De-Multiplexer
<b>DI</b>	Delay Interferometer
<b>EDFA</b>	Erbium Doped Fiber Amplifier
<b>ER</b>	Extinction Ration
<b>FDTD</b>	Finite Difference Time Domain
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FEM</b>	Finite Element Method
<b>FMM</b>	Field Mode Matching
<b>FPGA</b>	Field Programable Gate Array
<b>FSR</b>	Free Spectral Range
<b>IM/DD</b>	Intensity Modulation/Direct Detection
<b>InP</b>	Indium Phosphide
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>MBE</b>	Molecular Beam Epitaxy

<b>MMI</b>	Multimode Interference
<b>MRR</b>	Micro-Ring Resonator
<b>MUX</b>	Multiplexer
<b>MZI</b>	Mach-Zehnder Interferometer
<b>MZM</b>	Mach-Zehnder Modulator
<b>NRZ</b>	Non-Return to Zero
<b>OOK</b>	On-Off Keying
<b>PAM-4</b>	Pulse Amplitude Modulation 4-level
<b>PBC</b>	Polarization Beam Combiner
<b>PBS</b>	Polarization Beam Splitter
<b>PD</b>	Photodiode
<b>PMD</b>	Polarization Mode Dispersion
<b>QSFP</b>	Quad Small Form-factor Pluggable
<b>SDM</b>	Space Division Multiplexing
<b>SFP</b>	Small Form-factor Pluggable
<b>Si</b>	Silicon
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silicon Dioxide
<b>SMF</b>	Single Mode Fiber
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>SOI</b>	Silicon on Insulator
<b>TE</b>	Transverse Electric
<b>TEC</b>	Temperature Controller
<b>TIA</b>	Transimpedance Amplifier
<b>TM</b>	Transverse Magnetic
<b>TSV</b>	Through-Silicon Vias
<b>VCSEL</b>	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
<b>VNA</b>	Vector Network Analyzer
<b>WDM</b>	Wavelength Division Multiplexing



# Ευχαριστίες- Αντί Προλόγου

Μπορεί να φαίνεται κάπως παράδοξο αλλά το συγκεκριμένο κεφάλαιο ίσως να είναι αυτό που με δυσκόλεψε περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο. Αναβολή στην αναβολή, εν τέλει γράφτηκε ελάχιστες μέρες πριν την παρουσίαση του διδακτορικού. Πως αλήθεια να χωρέσει σε λίγες σελίδες η ευγνωμοσύνη σε ανθρώπους που σημάδεψαν αυτή την πορεία στο χρόνο και που χωρίς αυτούς πιθανώς οι επόμενες σελίδες να μην ήταν εφικτό να γραφτούν; Αν λοιπόν όλες οι υπόλοιπες ενότητες χρησιμοποιούν έναν πιο «άχρωμο» λόγο για να αναδείξουν τη δουλειά της διατριβής, η συγκεκριμένη κρατάει λίγο τις ισορροπίες και χρωματίζεται με περισσότερο συναίσθημα.

Η πρώτη μου επαφή με το Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών ήταν περίπου το Νοέμβριο του 2010, προπτυχιακός φοιτητής ακόμα, ψάχνοντας θέμα για τη διπλωματική. Δυο πράγματα θυμάμαι μου έκαναν πολύ έντονη εντύπωση· η επιμελής αταξία του πάγκου σκεπτόμενος «ποιος τα κάνει όλα αυτά να δουλεύουν;» και η πρώτη συνάντηση-συζήτηση με τον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο. Η κουβέντα ξεκίνησε από τη ιστορία του Εργαστηρίου και τις προκλήσεις της Φωτονικής, πέρασε από εξωτικούς ερευνητικούς προορισμούς και έκανε και μια στάση στη γενικότερη κοινωνικοπολιτική κατάσταση (2010 γαρ). Σε ένα πράγμα κατέληξε όμως «Εννοείται ότι είσαι ευπρόσδεκτος αλλά χρειάζεται κόπο και μεράκι». Η συζήτηση αυτή ήταν που μου κίνησε το ενδιαφέρον να εκπονήσω τη διπλωματική μου στο ΕΦΕ και μετά λίγο πολύ τα πράγματα πήραν το δρόμο τους.

Ξεκινώντας λοιπόν τις ευχαριστίες μου, θα ήθελα να σταθώ πρώτα στον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, όχι γιατί έτσι το επιβάλλει η εθιμοτυπία αλλά γιατί είναι ένας άνθρωπος που συνέβαλε ουσιαστικά σε αυτή μου την πορεία. Αρχικά γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να γίνω μέλος της ομάδας του Εργαστηρίου και μου άνοιξε νέους ορίζοντες επιστημονικού ενδιαφέροντος. Η ζέση του για το αντικείμενο και οι συνεχείς ερευνητικές του ανησυχίες πάντα με παρότρυναν κι εμένα να βρίσκομαι σε τροχιά αναζήτησης. Εξάλλου, ο κ. Αβραμόπουλος σε εποχές που η έρευνα -και ιδιαίτερα σε τομείς της Τεχνολογίας αιχμής- δεν ήταν της μόδας, ήταν εκείνος που επέλεξε να δημιουργήσει ένα Εργαστήριο πρότυπο για το Δημόσιο Πανεπιστήμιο που αντέχει μέσα στο χρόνο, δίνοντας την ευκαιρία σε νέους ανθρώπους να χαράσσουν το δικό τους μονοπάτι. Πέρα και πάνω από όλα αυτά όμως, ο κ. Αβραμόπουλος είναι ένας άνθρωπος με ήθος και καλοσύνη. Μου προσέφερε συνεχή στήριξη όλα αυτά τα χρόνια, πάντα με ειλικρινές ενδιαφέρον και γι' αυτό τον ευχαριστώ θερμά.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να αναφερθώ στους συναδέλφους μου ερευνητές του Εργαστηρίου -πολλοί από τους οποίους μπορεί να μη βρίσκονται πλέον στο ΕΦΕ- που μας συνδέει ένα κοινό νήμα βιωμάτων και όμορφων αναμνήσεων. Θα ήθελα να ξεκινήσω από δυο ανθρώπους που είχαν σημαντικό ρόλο τόσο στην πορεία μου μέσα στο Εργαστήριο όσο και στην ολοκλήρωση αυτής της διατριβής: την Μαριλή Σπυροπούλου και τον Δημήτρη Καλαβρουζιώτη.

Την Μαριλή είχα την ευκαιρία να τη γνωρίσω καλύτερα τα τελευταία χρόνια που συνεργαζόμαστε στενά. Είναι μια πραγματικά πολύ ικανή Ερευνήτρια, με άφθονο μεράκι γι' αυτό που κάνει. Με την υπομονή και τη μεθοδικότητά της με βοήθησε με πολύ ουσιαστικό τρόπο να εξελίξω το ερευνητικό μου ενδιαφέρον, ενώ η ηρεμία με την οποία

προσεγγίζει τις διάφορες προκλήσεις και δυσκολίες είναι πραγματικά αξιοθαύμαστη (δεν φημίζομαι εξάλλου για κάτι τέτοιο). Θα έλεγα ότι είναι η «ήρεμη δύναμη» του ΕΦΕ αλλά κυρίως ένας πολύ καλός άνθρωπος. Για όλα αυτά λοιπόν θέλω να την ευχαριστήσω από καρδιάς, αλλά και γιατί χωρίς την καθοριστική της συμβολή και τη συνεχή της παραίνεση, η διατριβή αυτή θα ήταν πολύ δύσκολο να ολοκληρωθεί.

Ο Δημήτρης είναι ο άνθρωπος που με καθοδήγησε από την πρώτη μέρα της παρουσίας μου στο Εργαστήριο. Εξαιρετικός Ερευνητής, ακούραστος και διορατικός, αποτέλεσε για εμένα μια ανεξάντλητη πηγή γνώσης. Πάντα πρόθυμος να βοηθήσει στο οτιδήποτε, πολύ συχνά καλύπτοντας και δικές μου ανεπάρκειες. Το διδακτορικό αυτό είναι αποτέλεσμα και δικιάς του δουλειάς. Πέραν αυτών όμως, ο Δημήτρης είναι για εμένα και ένας καλός φίλος με τον οποίο έχουμε μοιραστεί πολλούς προβληματισμούς και αναζητήσεις, ταξίδια στο εξωτερικό, καλοκαιρινές Ιθάκες αρκετά ανατολικότερα του Ιονίου, ξενύχτια στο Εργαστήριο και έξω από αυτό. Ένα μεγάλο ευχαριστώ είναι το λιγότερο που μπορώ να του πω.

Στη συνέχεια θα ήθελα να αναφερθώ στον Γιάννη Γιαννούλη που ήταν και εκείνος που με προέτρεψε να έρθω στο Εργαστήριο όντας ακόμα φοιτητής. Επιβλέπων στη διπλωματική μου εργασία αλλά και τα επόμενα χρόνια πάντα δίπλα μου και με διάθεση να βοηθήσει οποιαδήποτε στιγμή. Ένας άνθρωπος ακέραιος, με απaráμιλλο ήθος και ενθουσιασμό για ό,τι καταπιάνεται. Οι συζητήσεις μαζί του, επιστημονικές και μη, πάντα αποτελούν μια πηγή έμπνευσης και ένα ερέθισμα προβληματισμού γι' αυτό και τον ευχαριστώ πολύ. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Παρασκευά Μπακόπουλο που από την πρώτη μέρα μου στο Εργαστήριο με βοήθησε ουσιαστικά με τις γνώσεις του και μου προσέφερε πολύτιμη καθοδήγηση. Πάντα έτοιμος να ακούσει οποιαδήποτε απορία και να δώσει τη λύση όταν τα πράγματα στον πάγκο σκούραιναι και οι ιδέες τελείωναν. Καθοριστική ήταν και η συμβολή του στην δουλειά που παρουσιάζεται στη διατριβή αυτή. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω πολύ τον Δημήτρη Αποστολόπουλο, από τους πρώτους ανθρώπους που με προσέγγισαν μέσα στο ΕΦΕ, και προσπάθησε από την αρχή να με κατευθύνει αλλά και να με «ξεψαρώσει». Όσες φορές συνεργαστήκαμε οι γνώσεις, η εμπειρία και οι συμβουλές του ήταν πάντοτε πολύ χρήσιμες.

Συνεχίζοντας θα ήθελα να αναφερθώ στον Στέφανο Δρή, έναν φοβερά ικανό Ερευνητή που η πορεία του μιλάει από μόνη της, αλλά και έναν πολύ ενδιαφέρον άνθρωπο που είναι πάντα χαρά μου να συζητάω μαζί του. Ακόμα και μετά το πέρασμά του από το ΕΦΕ, με βοήθησε σημαντικά όποτε το χρειάστηκα και τον ευχαριστώ πολύ. Με τον Στέφανο επίσης νιώθω ότι μας ενώνουν πολύ συχνά κοινές ανησυχίες και πολιτιστικές αναφορές. Θέλω να ευχαριστήσω πολύ τον Χάρη Ζερβό ο οποίος με τις γνώσεις του και την οξυδέρκειά του πρόσθεσε και μια νέα ματιά στο εργαστήριο. Ψύχραιμος και προσηνής, αντιμετωπίζει θετικά και με χιούμορ όλες τις καταστάσεις ενώ είναι πάντοτε εκεί για να δώσει συμβουλές και να λύσει απορίες όταν χρειάζεται. Ένα ευχαριστώ χρωστάω και στο Γιάννη Λαζάρου που για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα συνεργαστήκαμε στενά και μου προσέφερε απλόχερα γνώσεις, συμβουλές και βοήθεια σε τεχνικά και μη ζητήματα. Ευχαριστώ πολύ τον Κωστή Χριστογιάννη που μόνιμα με το χαμόγελο και τον καλό του λόγο είναι εκεί για να βοηθήσει και μάλιστα σε πράγματα τα οποία μου φαίνονται βουνό. Ευχαριστώ πολύ για τη συνεργασία μας τον Χρήστο Κουλουμέντα, έναν έμπειρο και ικανό Ερευνητή με πολύ

διδυμική ματιά στα πράγματα. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον Παναγιώτη Γκρούμα και τον Βασίλη Κατωπόδη -ένα δυνατό εργαστηριακό δίδυμο- που ήταν πάντα πρόθυμοι να βοηθήσουν με τις γνώσεις τους όποτε το χρειάστηκα. Ευχαριστώ επίσης τους Νίκο Λύρα και Μαρία Μασσαούτη, έμπειρους ερευνητές αλλά νεότερα μέλη στο Εργαστήριο.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να πω δυο λόγια για τους ανθρώπους με τους οποίους μπήκαμε στο Εργαστήριο πάνω κάτω την ίδια χρονική περίοδο, τα παιδιά της δικής μου «φουρνιάς» που μοιραστήκαμε την καθημερινότητά μας και αναπτύξαμε δυνατούς δεσμούς. Θα ξεκινήσω λέγοντας ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Χρήστο Σπαθαράκη έναν πολύ ικανό άνθρωπο και καλό φίλο που η πορεία του τόσο μέσα όσο και εκτός του ΕΦΕ είναι αξιοθαύμαστη. Με τη ζωντάνια και τον αυθορμητισμό που τον διακρίνει, καταφέρνει πάντα να δίνει μια άλλη οπτική στα πράγματα πειραματικά και μη. Με το Χρήστο μοιραστήκαμε πολλά εντός και εκτός του ΕΦΕ, προβληματισμούς, ξενύχτια, διακοπές και άγχη γι' αυτό και κάθε φορά είναι ιδιαίτερη ευχαρίστηση να βρίσκομαι και να συζητάω μαζί του. Από τα highlight ο δεκαήμερος «εγκλωβισμός» στη Γάνδη (εξαιρετική εμπειρία κατά τα άλλα) με το δημοψήφισμα να έχει ανακοινωθεί και να είμαστε με το μυαλό και το ενάμιση πόδι πίσω στην Αθήνα. Στη συνέχεια θα ήθελα να αναφερθώ στον lab partner μου Νίκο Ηλιάδη έναν εξαιρετικό άνθρωπο και συνεργάτη, που έχει πάντοτε τις καλύτερες των προθέσεων. Με το Νίκο ρίξαμε πολλά ξενύχτια στο Εργαστήριο και το γραφείο, προσπαθώντας να κρατήσει ο ένας το ηθικό του άλλου ψηλά, συζητήσαμε πολλές ώρες στην «καβάτζα» ενώ το ταξίδι στην Αμερική θα μας μείνει όντως αξέχαστο. Ήταν πάντα δίπλα μου σε ό,τι χρειάστηκα γι' αυτό τον ευχαριστώ πολύ και του εύχομαι κάθε επιτυχία στα επόμενα κεφάλαια της ζωής του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στο Γιάννη Πουλόπουλο που μοιραστήκαμε εξίσου πολλές στιγμές μέσα από όλα αυτά τα χρόνια της κοινής μας πορείας στο ΕΦΕ. Πολύ οξυδερκής και ικανός Ερευνητής, αλλά και μια πολύ ενδιαφέρουσα προσωπικότητα με την οποία χαίρομαι να συνομιλώ. Ο Γιάννης είναι άνθρωπος της αυτοθυσίας και της αλληλεγγύης γι' αυτό και πολύ συχνά ιεραρχεί τις ανάγκες των γύρω του πιο ψηλά από τις δικές του. Η βοήθειά του σε όλα τα στάδια της πορείας μου ήταν πολύ σημαντική. Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα να πω και στον Νίκο Αργύρη, έναν εξαιρετικό Ερευνητή και ένα πραγματικά καλό παιδί. Με το Νίκο μοιραστήκαμε πολλές ώρες στο Εργαστήριο, πάντα έτοιμος να βοηθήσει, να εξηγήσει και να αποδιαμορφώσει, αλλά και πολύ ωραίες στιγμές αυτά τα χρόνια. Έχουμε κάνει ένα μίνι πανευρωπαϊκό τουρ με 40 kg εργαστηριακού εξοπλισμού στην πλάτη, το οποίο εκτός από την επιτυχή πειραματική έκβαση μας γέμισε και με πολύ ωραίες εμπειρίες εν γένει. Με το Λευτέρη Γουναρίδη επίσης είμαστε στην ίδια γενιά του εργαστηρίου, μπορεί να μην έτυχε να συνεργαστούμε άμεσα, παρόλα αυτά όποτε χρειάστηκα τη βοήθειά του ήταν πάντα πρόθυμος και με το χαμόγελο και τον ευχαριστώ πολύ γι' αυτό.

Προχωρώντας στις λίγο νεότερες γενιές, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον «γείτονα» μου στο γραφείο, Κώστα Τόκα. Ένα πολύ ικανό Ερευνητή με έμφυτη δημιουργικότητα και σταθερά θετική στάση στη ζωή. Με τον Κώστα έχουμε μοιραστεί ωραίες στιγμές εντός και εκτός του ΕΦΕ. Πάντα με το χαμόγελο και έτοιμος να βοηθήσει όπου χρειάζεται, είναι ένα παιδί «μάλαμα» (την πιάσαμε την έμμεση αναφορά έτσι;) με τον

οποίο χαίρομαι πάντα να συζητώ και να είμαι κοντά του. Με τον Χρήστο Τσώκο μπορεί να μην τα έφερε η τύχη να συνεργαστούμε πολύ, αλλά θεωρώ ότι είναι ένας εξαιρετικός Ερευνητής και πολύ καλό παιδί γι' αυτό τον ευχαριστώ και του εύχομαι τα καλύτερα. Ευχαριστώ πολύ επίσης την Κωνσταντίνα Καντά, μια εξαιρετικά ικανή Ερευνήτρια με πολύ μεράκι γι' αυτό που κάνει. Η Κωνσταντίνα είναι ένας πολύ δυναμικός και ώριμος άνθρωπος που φέρνει πάντα ένα θετικό αέρα στο Εργαστήριο. Τον Παναγιώτη Τουμάση τον γνωρίζω αρκετά χρόνια πριν το ΕΦΕ. Είναι ένας άνθρωπος που εκτιμώ πολύ για τη στάση του στη ζωή αλλά παράλληλα και ένας Ερευνητής με πολύ ζήλο. Αντιμετωπίζει πάντα με χαμόγελο και χιούμορ όλες τις δυσκολίες δίνοντας παράλληλα θάρρος και δύναμη στους γύρω του γι' αυτό τον ευχαριστώ πολύ.

Ο Δημήτρης Ζαβιτσάνος είναι ο μοναδικός με διπλή καταγραφή στο συγκεκριμένο κείμενο μιας και πέρα από μέλος του ΕΦΕ είναι και φίλος καρδιακός εδώ και πολλά χρόνια. Οξυδερκής και μεθοδικός, με έμφυτη ροπή στη Φυσική και τον εξωτικό κόσμο των Κβαντικών, είναι ένας πολύ ικανός Ερευνητής που διαγράφει την δική του ξεχωριστή πορεία μέσα στο Εργαστήριο. Πάνω από όλα αυτά όμως, είναι ένας άνθρωπος με τον οποίο μοιράζομαι όλους μου τους προβληματισμούς και τις σκέψεις και τον ευχαριστώ πολύ γι' αυτό. Ευχαριστώ επίσης τον Αδάμ Ραπτάκη, που παρότι δεν είχα την τύχη να συνεργαστώ μαζί του, καταλαβαίνω ότι είναι ένας πολύ καλός και εργατικός Ερευνητής. Στα νεότερα μέλη του Εργαστηρίου, την Ευρυδίκη, τον Αργύρη και τον Στάθη εύχομαι κάθε επιτυχία στο ταξίδι τους που έχει ξεκινήσει εδώ και λίγο καιρό, με τη συμβουλή να το απολαύσουν όσο γίνεται περισσότερο. Ευχαριστώ πολύ επίσης τη Βάσια Λαμπροπούλου, την Πόλυ Βλάσση και τη Μαρία Αναγνωστοπούλου γιατί ήταν πάντα κοντά μας σε ό,τι χρειαζόμασταν. Χωρίς την πολύτιμη συμβολή τους η καθημερινότητά μας θα ήταν πολύ πιο δύσκολη.

Προτού προχωρήσω παρακάτω, θα ήθελα να αναφερθώ σε κάτι λίγο πιο «αφηρημένο» που έχει όμως μεγάλη σημασία. Με την ολοκλήρωση της διατριβής κλείνει για εμένα ένας κύκλος πολλών ετών οργανικής σχέσης μου με το ΕΜΠ, είτε ως προπτυχιακός φοιτητής είτε ως υποψήφιος διδάκτορας. Μέσα σε αυτά τα χρόνια είχα την ευκαιρία να εξελιχθώ τόσο ως άνθρωπος όσο και ως επιστήμονας και αυτό πιστώνεται και στο χαρακτήρα του Ιδρύματος. Εδώ λοιπόν το ευχαριστώ μου θα πάει σε όλους αυτούς που συνεισφέρουν, ο καθένας από το δικό του μετερίζι, στο να παραμείνει το Πανεπιστήμιο Δημόσιο, ζωντανό κύτταρο επιστημονικού διαλόγου αλλά και κοινωνικής ευαισθησίας. Θα αθροίζονται πάντα στον «κόσμο των μελισσών» που κοιτάει στα μάτια τον «κόσμο των λύκων» και ενίοτε τον κερδίζει.

Φθάνοντας στο κλείσιμο του κειμένου θα ήθελα να αναφερθώ στον πιο κοντινούς μου ανθρώπους. Θέλω να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στους κολλητούς μου φίλους Δημήτρη, Θάνο, Κωνσταντίνο, Μάνο, Νικόλα και Χριστόφορο. Άνθρωποι πολύτιμοι και ξεχωριστοί, που βρίσκονται πάντα ο ένας δίπλα στον άλλο στα όμορφα και στα λιγότερο καλά. Η στήριξή τους πολύπλευρη και ουσιαστική. Αποτελούν για εμένα ένα σημείο αναφοράς και σιγουριάς. Μια παρέα με όλη τη σημασία του όρου με την οποία πορευόμαστε μαζί στο χρόνο. Θέλω επίσης να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον παιδικό μου φίλο Νικόλα που ήταν πάντα δίπλα μου και που σε δυο από τις πιο σημαντικές στιγμές της ζωής του επέλεξε να είμαι κι εγώ εκεί.

Στους γονείς μου Κώστα και Μίρκα, και στην αδελφή μου Βιργινία χρωστάω ένα απέραντο ευχαριστώ. Για την καθημερινή στήριξη, ηθική και υλική, τις θυσίες, την εμπιστοσύνη, την αγάπη και την κατανόησή τους. Ήταν πάντοτε εκεί για εμένα και γι' αυτό θα τους είμαι πάντα ευγνώμων. Με τη στάση τους στη ζωή με έμαθαν να είμαι ένας άνθρωπος με τα πόδια στη γη αλλά να κρατάω το κεφάλι μου πάντα ψηλά.

Το τέλος το φύλαξα για τον άνθρωπό μου, την κοπέλα μου τη Μαριάννα που με ειλικρινή αγάπη, υπομονή και αδιάλειπτη στήριξη ήταν δίπλα μου σε κάθε στιγμή αυτού του ταξιδιού. Πάντα πιστεύοντας σε εμένα προσπαθώντας να με κάνει να πιστέψω κι εγώ περισσότερο στον εαυτό μου. Ένα ευχαριστώ είναι πολύ λίγο. Συνοδοιπόρος στη ζωή, μοιραζόμαστε στιγμές, όνειρα και ανησυχίες. Εξάλλου όπως λέει και ο Λειβαδίτης, ο κόσμος μόνο όταν τον μοιράζεσαι υπάρχει.

Σεπτέμβριος 2021  
Γιάννης Κανάκης



# Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	5
Abstract.....	6
Πίνακας Συντμήσεων .....	7
Ευχαριστίες- Αντί Προλόγου.....	9
Πίνακας Περιεχομένων .....	15
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	19
1.1 Κέντρα δεδομένων .....	22
1.2 Μια ματιά μέσα στο κέντρο δεδομένων.....	23
1.3 Κέντρα δεδομένων νέφους .....	25
1.3.1 Πλεονεκτήματα των κέντρων δεδομένων νέφους .....	26
1.4 Τεχνολογίες Φωτονικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων .....	27
1.5 Είδη οπτικών διασυνδέσεων στα κέντρα δεδομένων.....	28
1.5.1 Διασυνδέσεις εντός πλακέτας (on-board) .....	28
1.5.2 Οπτικές διασυνδέσεις για επικοινωνία μεταξύ πλακετών (board-to-board) 30	
1.5.3 Διασύνδεση μεταξύ racks (rack-to-rack).....	31
1.6 Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση.....	32
1.6.1 Διασυνδέσεις μεταξύ κέντρων δεδομένων .....	33
1.6.2 Διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων.....	33
1.7 Εξέλιξη της υιοθέτησης οπτικών διασυνδέσεων εντός κέντρων δεδομένων	34
1.8 Οπτο-ηλεκτρονικοί Πομποδέκτες για Κέντρα Δεδομένων .....	35
1.9 Ενεργά Οπτικά Καλώδια .....	37
1.9.1 Τεχνολογίες και Τεχνικές για αυξημένη απόδοση των Ενεργών Οπτικών Καλωδίων.....	38
1.10 Σκοπός της έρευνας και δομή της διατριβής.....	41
1.10.1 Σκοπός της έρευνας.....	41
1.10.2 Δομή της διατριβής .....	43
Βιβλιογραφία .....	45
Κεφάλαιο 2 Δομικά στοιχεία και Αρχιτεκτονική Ενεργού Οπτικού Καλωδίου ...	52
2.1 Αρχιτεκτονική του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου.....	52
2.1.1 Καινοτομίες γύρω από την ανάπτυξη του ενεργού οπτικού καλωδίου. 53	
2.1.2 Πολύ υψηλής χωρητικότητας οπτικές διασυνδέσεις .....	55

2.2	Οι βασικές αρχές λειτουργίας των VCSELs .....	57
2.2.1	Κοιλότητα και κάτοπτρα .....	58
2.2.2	Ενεργός περιοχή.....	59
2.2.3	Οπτικός και ηλεκτρικός περιορισμός (confinement).....	60
2.2.4	Φασματικά Χαρακτηριστικά .....	62
2.2.5	Θερμικές ιδιότητες .....	64
2.3	Δομές VCSEL που αναπτύχθηκαν.....	65
2.4	Μικροκυματικός ιδιότητες δομών VCSEL .....	69
2.5	Φωτοδίοδοι κυματοδηγού.....	72
2.5.1	Αρχικός σχεδιασμός των φωτοδίοδων κυματοδηγού .....	74
2.6	3D ολοκλήρωση.....	77
2.6.1	Σχεδιασμός των στρωμάτων.....	78
2.7	Προδιαγραφές της πλατφόρμας.....	78
2.7.1	Παθητικές δομές στο πυρίτιο.....	78
2.7.2	Κυματοηγοί.....	79
2.7.3	Πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες .....	81
2.7.4	Grating couplers.....	81
2.7.5	Μετατροπείς ρυθμού.....	83
2.7.6	3D γυάλινες διεπαφές.....	84
2.7.7	208 Gb/s board-level οπτική διασύνδεση.....	86
2.7.8	320 Gb/s QSFP δομή Ενεργού Οπτικού Καλωδίου.....	88
2.7.9	960 Gb/s CXP δομή Ενεργού Οπτικού Καλωδίου .....	91
2.7.10	Διεπαφή μετατροπής CXP-σε-QSFP .....	94
	Βιβλιογραφία .....	95
Κεφάλαιο 3	Πολυπλέκτης και Αποπολυπλέκτης σε SOI πλατφόρμα .....	98
3.1	Μελέτη δομών.....	98
3.2	Σχεδιασμός MMI συζευκτών για τον SOI πολυπλέκτη και αποπολυπλέκτη 101	
3.2.1	Θεωρητική προσέγγιση .....	101
3.2.2	Μεθοδολογία .....	103
3.2.3	Σχέδιο του 1x2 MMI συζεύκτη.....	105
3.2.4	Σχέδιο για τον 2x2 MMI συζεύκτη.....	107
3.3	Θερμική μελέτη του SOI κυματοδηγού για τη λειτουργία πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη.....	109



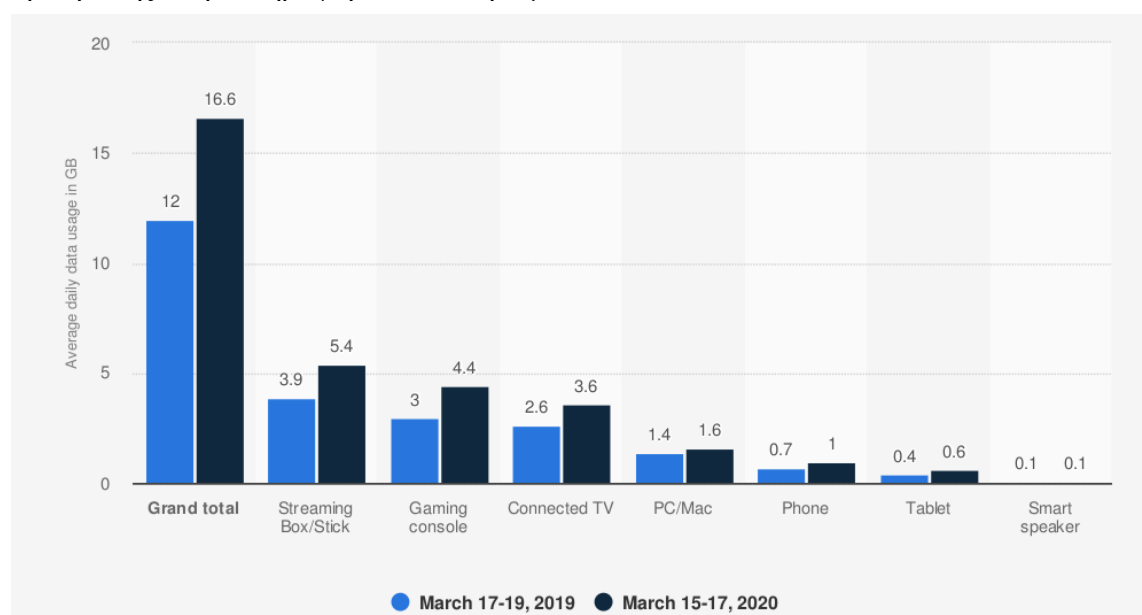
3.3.1	Εισαγωγή .....	109
3.3.2	Προσομοίωση της διατομής των κυματοδηγών και εκτίμηση του ενεργού δείκτη διάθλασης.....	109
3.3.3	Θερμική εξάρτηση του ενεργού δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού.....	111
3.4	Προσομοίωση δομής του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη.....	113
3.4.1	Μοντελοποίηση του πολυπλέκτη.....	114
3.4.2	Μοντελοποίηση του αποπολυπλέκτη.....	115
3.4.3	Προσομοίωση του πολυπλέκτη .....	116
3.4.4	Προσομοίωση αποπολυπλέκτη .....	118
3.5	Μάσκες για τον πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη .....	119
3.6	Κατασκευή των πρώτων συσκευών πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη .....	123
3.7	Πειραματικά αποτελέσματα .....	123
	Βιβλιογραφία .....	125
Κεφάλαιο 4	Πειραματική Μελέτη Δομών VCSELs Μεγάλου Εύρους Ζώνης στα 1550 nm	127
4.1	Εισαγωγή .....	127
4.2	Στατικός χαρακτηρισμός πρώτης γενιάς VCSELs πάνω σε πλακίδιο .....	127
4.3	Συστάδες VCSELs πρώτης γενιάς .....	129
4.3.1	Αρχιτεκτονική των συστάδων VCSELs πρώτης γενιάς.....	129
4.3.2	Μέθοδος κοπής των συστάδων VCSELs πρώτης γενιάς.....	131
4.3.3	Χαρακτηρισμός των VCSELs πριν τη διαδικασία αποκοπής .....	132
4.4	VCSELs πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα .....	140
4.5	Μετρήσεις στα VCSEL οκτώ κβαντικών πηγαδιών .....	142
4.6	Γέννηση παλμού διαμορφωμένου κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών (PAM-4) μέσα από την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση. ....	147
4.6.1	Εισαγωγικές σημειώσεις .....	147
4.6.2	Concept και Πειραματική Διάταξη .....	150
4.6.3	Πειραματικά Αποτελέσματα.....	152
4.7	Πείραμα VCSELs με διαμόρφωση τεσσάρων σταθμών σε ταχύτητες έως 80 Gb/s	155
	Βιβλιογραφία .....	159
Κεφάλαιο 5	Πειραματική Επίδειξη Δομών Πομπού, Δέκτη και Διεπαφής Απεμπλοκής	161
5.1	Πρώτη γενιά πομπού (PTL).....	161

5.2	Οπτο-ηλεκτρονικός Δέκτης υψηλών ταχυτήτων .....	164
5.2.1	Πρώτη γενιά δέκτη.....	164
5.2.2	Δεύτερης γενιάς δέκτης.....	173
5.3	Πείραμα οπτικού πομπού και δέκτη.....	180
5.4	Γυάλινος παρεμβολέας και διεπαφή απεμπλοκής.....	184
5.4.1	Περιγραφή .....	184
5.4.2	Παρεμβολέας πολυπυρηνικής ίνας τεσσάρων πυρήνων .....	184
5.4.3	Παρεμβολέας πολυπυρηνικής ίνας επτά πυρήνων.....	186
5.4.4	2x6 σε 3x4 γυάλινος παρεμβολέας (διεπαφή απεμπλοκής) .....	187
5.4.5	Συνολική αρχιτεκτονική του πολυπύρηνου καλωδίου και πειραματική επίδειξη του .....	189
	Βιβλιογραφία .....	195
Κεφάλαιο 6	Σύνοψη των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	197
6.1	Σύνοψη των αποτελεσμάτων .....	197
6.1.1	Δομή πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη σε πλατφόρμα SOI.....	198
6.1.2	Μονορυθμικά VCSELs μεγάλου εύρους ζώνης στα 1550 nm.....	199
6.1.3	Πειραματική επίδειξη πομπού, δέκτη και διεπαφής απεμπλοκής .....	199
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	200
6.2.1	Διασυνδέσεις εντός και μεταξύ κέντρων δεδομένων.....	200
6.2.2	Γρήγοροι μεταγωγείς για τη διασύνδεση δικτύων κέντρων δεδομένων	203
	Βιβλιογραφία .....	205
	Λίστα Δημοσιεύσεων .....	206
	Λίστα Σχημάτων .....	210
	Λίστα Πινάκων.....	218
	Extended Abstract .....	219

# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

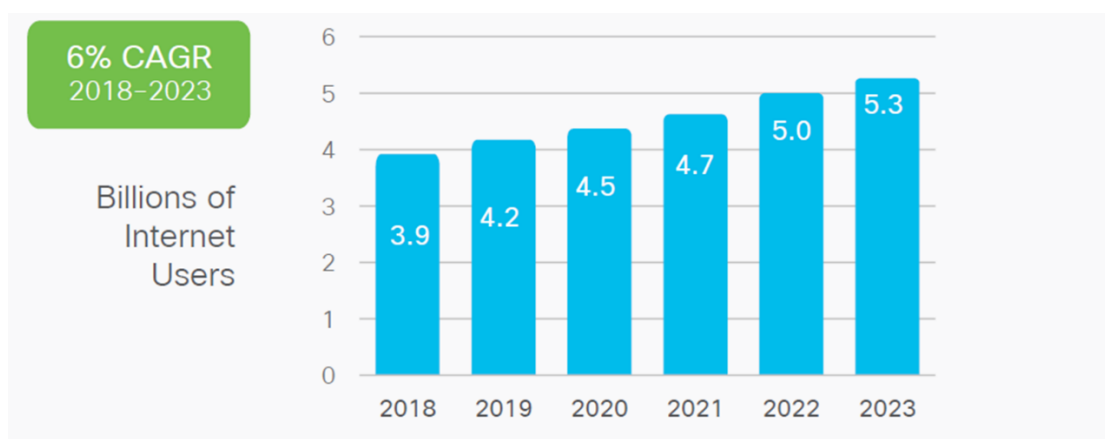
Ζούμε στο κατώφλι της λεγόμενης Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0), μια έννοια η οποία έχει επιστρατευτεί για να περιγράψει τα θολά πλέον όρια μεταξύ του φυσικού, βιολογικού και ψηφιακού κόσμου [1.1]. Αποτελεί επί της ουσίας το κράμα της προόδου σε μια σειρά από τεχνολογικούς τομείς όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things-IOT), το 3D printing, η ρομποτική, η γενετική μηχανική, οι κβαντικοί υπολογιστές, η νανοτεχνολογία, οι υπηρεσίες νέφους κ.α. που επιδιώκουν να δώσουν απαντήσεις σε προβλήματα τα οποία μέχρι τώρα έμοιαζαν δυσεπίλυτα. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της εποχής αυτής είναι ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιούνται τα νέα τεχνολογικά άλματα. Σε σύγκριση με τις προηγούμενες Βιομηχανικές Επαναστάσεις που είχαν ένα πιο γραμμικό χαρακτήρα στο χρόνο, οι εξελίξεις πλέον κινούνται με εκθετικούς ρυθμούς [1.2] μετασχηματίζοντας ριζικά το σύγχρονο τρόπο ζωής.

Καταλύτης όλων των παραπάνω τεχνολογικών τομών είναι αδιαμφισβήτητα η δυνατότητα αποθήκευσης, ανάλυσης, διακίνησης και επεξεργασίας των Δεδομένων (Data). Θεωρούνται ίσως ο πιο σημαντικός πόρος της εποχής μας και γι' αυτό τον λόγο έχουν χαρακτηριστεί εύστοχα και ως το πετρέλαιο του 21<sup>ου</sup> αιώνα [1.3]. Είναι χαρακτηριστικό ότι πλέον η διακίνηση των δεδομένων επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό κάθε πτυχή της καθημερινότητας, είτε αυτή αφορά στη διασκέδαση και στην κοινωνικοποίηση του ανθρώπου, είτε στην εξέλιξη της Επιστήμης και στην εργασία. Μεγεθυντικό φακό των παραπάνω αποτέλεσε το πρόσφατο ξέσπασμα της πανδημίας του COVID-19 που κατέδειξε με τον πιο εμφατικό τρόπο την εξάρτηση του καθημερινού τρόπου ζωής από την δυνατότητα της διασύνδεσης και της αδιάκοπης πρόσβασης στην πληροφορία, ιδιαίτερα μέσω του Διαδικτύου.



Εικόνα 1: Συγκριτικό διάγραμμα της οικιακής μέσης κατανάλωσης όγκου δεδομένων ανά μέρα στις ΗΠΑ για τους μήνες Μάρτιος 2019 και Μάρτιος 2020, ανάλογα με το είδος της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.

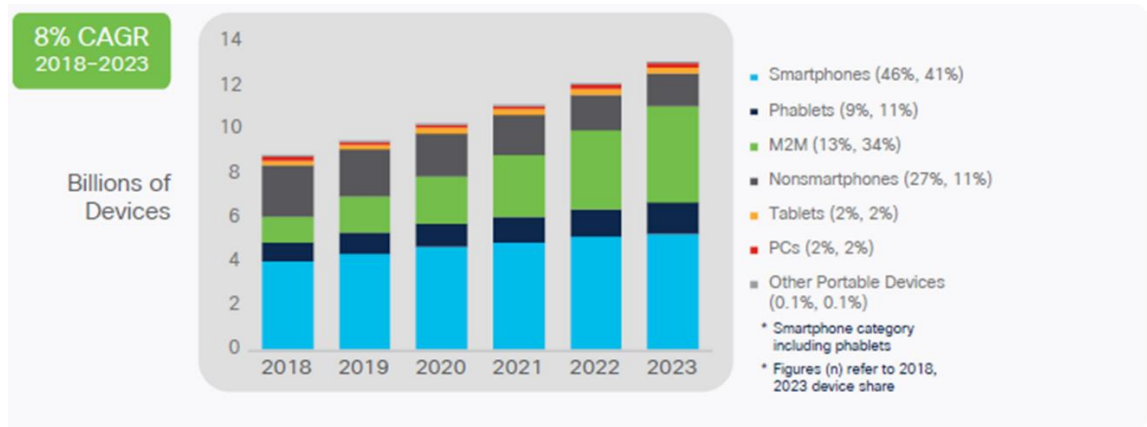
Εκατομμύρια εργαζόμενοι αναγκάστηκαν λόγω των περιοριστικών μέτρων να εργαστούν από το σπίτι τους ενώ μαθητές και φοιτητές παρακολουθούσαν τα μαθήματά τους online [1.4]. Η καθημερινή επαφή στον χώρο εργασίας και το σχολείο αντικαταστάθηκε από τις συναντήσεις μέσω εφαρμογών τηλεδιασκέψεων. Επίσης η χρήση εφαρμογών video-on-demand όπως το Netflix ή το YouTube, εκτινάχθηκε αφού σε πολλές περιπτώσεις αποτέλεσαν τη μόνη διέξοδο ψυχαγωγίας εντός της οικίας ενώ παρατηρήθηκε τεράστια αύξηση και στις αγορές μέσω Διαδικτύου [1.5]. Μόνο στην Αμερική, κατά τις πρώτες βδομάδες του Μαρτίου του 2020 (πρώτες εβδομάδες περιοριστικών μέτρων), η χρήση δεδομένων εντός της οικίας σημείωσε αύξηση 18% σε σχέση με τον αντίστοιχο μήνα του 2019 (Εικόνα 1).



Source: Cisco Annual Internet Report, 2018-2023

Εικόνα 2: Πρόβλεψη της παγκόσμιας ανάπτυξης των χρηστών του Διαδικτύου για την περίοδο 2018-2023

Στην μεγαλύτερη εικόνα, τα νούμερα είναι καταγιστικά και περιγράφουν με τον πιο γλαφυρό τρόπο την κατάσταση που διαμορφώνεται όσον αφορά στη χρήση των δεδομένων και την πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Μέχρι τα τέλη του 2023, σχεδόν τα 2/3 του παγκόσμιου πληθυσμού θα έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο (5.3 δισεκατομμύρια), ενώ ο αριθμός των συσκευών που θα είναι συνδεδεμένες σε δίκτυα έχοντας μια διεύθυνση IP θα είναι σχεδόν τριπλάσιος από τον παγκόσμιο πληθυσμό με την πλειοψηφία των συσκευών αυτών να έχουν κινητό χαρακτήρα [1.7]. Παράλληλα, με δεδομένη την εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet-of-Things), της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence) και των εφαρμογών νέφους (cloud applications), αναμένεται περαιτέρω έκρηξη στη διακίνηση των δεδομένων ετησίως. Πιο συγκεκριμένα, η κίνηση στα κέντρα δεδομένων (Data Centers) για το 2021 αναμένεται να αγγίξει τα 19.5 ZB, όταν το 2016 ήταν μόλις 6 ZB, με την πλειοψηφία αυτής της κίνησης να πραγματοποιείται εντός του κέντρου δεδομένων (71.5%).



Source: Cisco Annual Internet Report, 2018-2023

Εικόνα 3: Πρόγνωση της παγκόσμιας ανάπτυξης των κινητών συσκευών και των συνδέσεων.

Από τη σκοπιά των ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων, μέχρι το 2023 οι ρυθμοί των σταθερών ευρυζωνικών συνδέσεων (fixed broadband speeds) αναμένεται να διπλασιαστούν σε σχέση με τους αντίστοιχους του 2018, αγγίζοντας τα 110.4 Mbps (σε σχέση με τα 45.9 του 2018). Στο κομμάτι των κινητών επικοινωνιών, η μέση σύνδεση δικτύου θα έχει ταχύτητα 43.9 έως το 2023 ενώ οι ταχύτητες 5G θα αγγίζουν τα 575 Mbps, με τις συσκευές 5G να αποτελούν περίπου το 10% των κινητών συσκευών παγκοσμίως. Τέλος, οι ταχύτητες των δικτύων Wi-Fi αναμένεται κατά μέσο όρο να φτάσουν τα 92 Mbps μέχρι το 2023 από τα 30.3 Mbps που βρίσκονταν το 2018. Όλες αυτές οι στατιστικές προβολές εντός της πενταετίας 2018-2023, έρχονται να αποδείξουν τον συντριπτικό τρόπο με τον επέρχονται οι αλλαγές στα σύγχρονα δίκτυα και να καταστήσουν ευκρινή την απαίτηση για μεγάλου εύρους ζώνης, γρήγορη και υψηλής ποιότητας συνδεσιμότητα σε κάθε γωνιά του πλανήτη. Γίνεται ξεκάθαρο ότι τα κέντρα δεδομένων κατέχουν ένα βαρύνοντα ρόλο στην εκπλήρωση των παραπάνω απαιτήσεων. Όταν μάλιστα τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να επιτευχθούν με όσο το δυνατόν πιο οικονομικό τρόπο από μεριάς καταναλωτή ισχύος και κόστους, γίνεται αντιληπτό ότι το πρόβλημα έχει πολυδιάστατο χαρακτήρα.

Region	2018	2019	2020	2021	2022	2023	CAGR (2018-2023)
Global	45.9	52.9	61.2	77.4	97.8	110.4	20%
Asia Pacific	62.8	74.9	91.8	117.1	137.4	157.1	20%
Latin America	15.7	19.7	34.5	41.2	51.5	59.3	30%
North America	56.6	70.1	92.7	106.8	126.0	141.8	20%
Western Europe	45.6	53.2	72.3	87.4	105.6	123.0	22%
Central and Eastern Europe	35.0	37.2	57.0	65.5	77.8	87.7	20%
Middle East and Africa	9.7	11.7	25.0	29.0	34.9	41.2	33%

Source: Cisco Annual Internet Report, 2018-2023

Εικόνα 4: Πρόβλεψη ταχυτήτων σταθερών ευρυζωνικών συνδέσεων 2018-2023

Στο απαιτητικό λοιπόν αυτό περιβάλλον, τα κέντρα δεδομένων αναζητούν διασυνδέσεις που θα επιτρέπουν την ανταλλαγή πληροφορίας σε πολύ υψηλές ταχύτητες (στην περιοχή των Tb/s) ενώ παράλληλα θα είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης [1.7]. Η φωτονική-οπτική τεχνολογία προβάλλει ως η μόνη αξιόπιστη λύση, προσφέροντας πλεονεκτήματα που την κάνουν πιο

ελκυστική και αποτελεσματική σε σχέση με παλαιότερες εφαρμογές όπως τα καλώδια χαλκού [1.8], [1.9]. Οι οπτικές διασυνδέσεις εκμεταλλευόμενες τις τεράστιες δυνατότητες τόσο των οπτικών ινών όσο και της φωτονικής ολοκλήρωσης, κυριαρχούν στο κομμάτι της διασύνδεσης κέντρων δεδομένων όλων των τύπων (intra- και inter- datacenter interconnection). Μια τέτοιου τύπου οπτική διασύνδεση, η οποία αποτελεί και την πιο διαδεδομένη λύση όσον αφορά στις διασυνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων (intra-datacenter interconnects), είναι το Ενεργό Οπτικό Καλώδιο (Active Optical Cable-AOC) το οποίο προσφέρεται για επικοινωνία rack-to-rack είτε σε κοντινή απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών racks, είτε μεταξύ racks τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικό δωμάτιο μέσα σε ένα data center. Έτσι τα Ενεργά Οπτικά Καλώδια έχουν τη δυνατότητα να καλύψουν αποστάσεις από μερικά μέτρα έως και μερικές εκατοντάδες μέτρα (ακόμα και αποστάσεις χιλιομέτρου).

## 1.1 Κέντρα δεδομένων

Τα κέντρα δεδομένων επι της ουσίας είναι εγκαταστάσεις οι οποίες παρέχουν χώρο, ισχύ και ψύξη σε υποδομές δικτύων και συγκεντρώνουν τις IT λειτουργίες και τον εξοπλισμό ενός οργανισμού για τους σκοπούς της αποθήκευσης, επεξεργασίας και διάδοσης δεδομένων και εφαρμογών [1.10]. Επειδή στεγάζουν τα κρίσιμα και ιδιωτικά στοιχεία ενός οργανισμού, τα κέντρα δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία των καθημερινών δραστηριοτήτων τους. Τα στοιχεία κλειδιά για το σχεδιασμό ενός κέντρου δεδομένων περιλαμβάνουν δρομολογητές (routers), διακόπτες (switches), firewalls, αποθηκευτικά συστήματα, διακομιστές (servers) και application delivery controllers (ADC).

Στο παρελθόν τα κέντρα δεδομένων αποτελούσαν φυσικές υποδομές οι οποίες ελέγχονταν σε ένα ανώτερο επίπεδο από το δίκτυο, παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια αυτό έχει αλλάξει κατά πολύ. Η υποδομή έχει πλέον μετασχηματιστεί από την παραδοσιακή φυσική υποδομή με τη μορφή in-house διακομιστή, σε εικονικά δίκτυα (virtual networks) τα οποία υποστηρίζουν εφαρμογές και αναλαμβάνουν υπολογιστικό φόρτο εργασίας (workload) σε ομαδοποιήσεις φυσικών υποδομών (pools of physical infrastructure) και σε περιβάλλον πολλαπλού νέφους (multicloud) [1.11], [1.12]. Πλέον τα δεδομένα υπάρχουν και διασυνδέονται μεταξύ πολλαπλών κέντρων δεδομένων, του edge του δικτύου, δημοσίων και ιδιωτικών νεφών. Έχει επιτευχθεί λοιπόν μη τύπου αποκεντροποίηση στον τρόπο με τον οποίο διαμοιράζονται τα δεδομένα και έτσι ένα κέντρο δεδομένων πρέπει να μπορεί να επικοινωνεί με όλα αυτά τα επίπεδα οργάνωσης. Ακόμα και μια δημόσια υπηρεσία νέφους είναι μια συλλογή από κέντρα δεδομένων. Όταν οι εφαρμογές φιλοξενούνται στο δημόσιο νέφος, χρησιμοποιούν πόρους κέντρων δεδομένων από τον πάροχο του νέφους.

Με δεδομένο ότι τα κέντρα δεδομένων αναπτύσσονται ταχύτατα και η αγορά γύρω από τη διασύνδεσή τους έχει εξελιχθεί παράλληλα, οι τεχνικές και φυσικές προκλήσεις που εγείρονται είναι πολλές και μεταξύ άλλων περιλαμβάνουν [1.13]:

- Περιορισμούς στην **χωρητικότητα** (capacity) και την **επεκτασιμότητα** (scalability): Πολύ συχνά ο όγκος των δεδομένων που διακινούνται προς και

από το κέντρο δεδομένων είναι πολύ μεγάλος, από μερικά εκατοντάδες gigabytes έως και terabytes. Αυτή η ποσότητα λοιπόν των δεδομένων απαιτεί δικτυακό εξοπλισμό ικανό να παρέχει αξιόπιστες συνδέσεις υψηλής χωρητικότητας με αυξημένη ικανότητα αναπροσαρμογής προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα αναβάθμισης των υπηρεσιών -αν αυτό κριθεί αναγκαίο- υιοθετώντας υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων.

- **Περιορισμοί λόγω απόστασης:** Οι αποστάσεις μεταξύ των κέντρων δεδομένων ποικίλλουν και αυτό είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό των κέντρων δεδομένων λόγω της αρχιτεκτονικής τους. Μιλάμε για διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων οι οποίες καλούνται να διασχίσουν λίγα χιλιόμετρα είτε εκατοντάδες χιλιόμετρα είτε ακόμα και έναν ωκεανό. Το κόστος μπορεί να αυξηθεί δραματικά όσο οι αποστάσεις αυτές αυξάνουν, προκαλώντας την ανάγκη για ενίσχυση/αναγέννηση σήματος και δεδομένου ότι το εύρος ζώνης το οποίο μπορεί να φιλοξενηθεί σε ένα μήκος κύματος μειώνεται ανάλογα με την απόσταση που πρέπει να καλύψει. Αυτοί οι παράγοντας αυξάνουν το συνολικό κόστος ανά bit (cost/bit).
- **Περιορισμοί λόγω οικονομικού και ενεργειακού κόστους:** Με την αναμενόμενη αύξηση της κίνησης μεταξύ των κέντρων δεδομένων να είναι στο 30% για κάθε χρόνο, τα κόστη που συνδέονται με την περαιτέρω ανάπτυξη του δικτύου και των διασυνδέσεων είναι πολύ σημαντικά. Επιπλέον η συντήρηση, η κατανάλωση ισχύος και η ψύξη των ήδη υπαρχόντων κέντρων δεδομένων έχει ένα πολύ αυξημένο λειτουργικό κόστος.
- **Περιορισμοί ασφάλειας:** Τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε ένα κέντρο δεδομένων και μπορεί μεταξύ άλλων να είναι οικονομικές συναλλαγές, προσωπικά ή εταιρικά αρχεία δημιουργούν την απαίτηση για αξιόπιστες και ασφαλείς διασυνδέσεις.

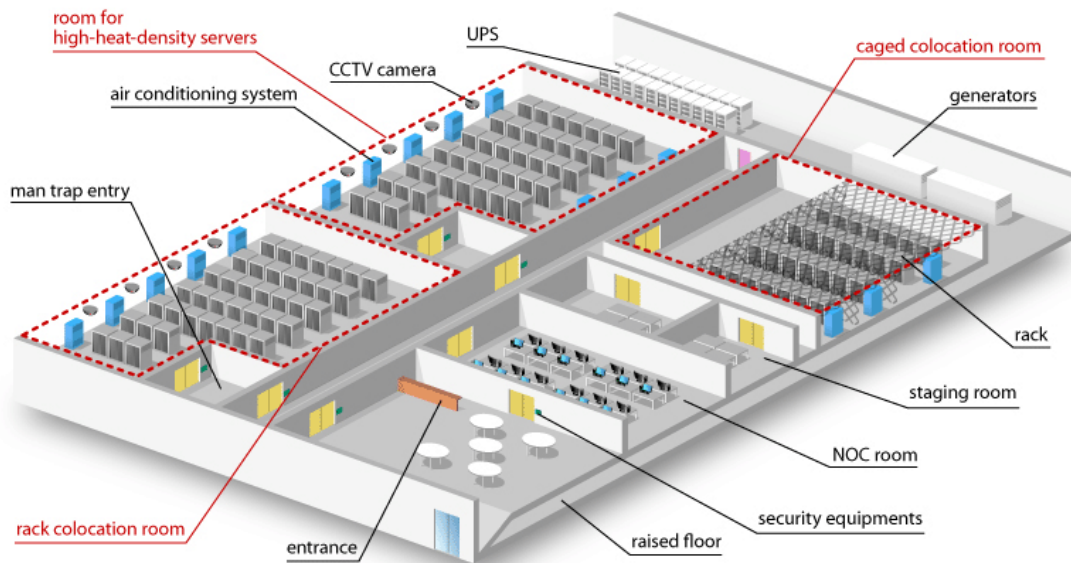
Είναι δεδομένο λοιπόν ότι όλες αυτές οι προκλήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν κατά τη διαδικασία διασύνδεσης υπολογιστικών κέντρων. Είναι εξάλλου και οι βασικοί άξονες μελέτης πάνω στους οποίους αναπτύσσονται οι νέες τεχνολογικές λύσεις.

## 1.2 Μια ματιά μέσα στο κέντρο δεδομένων

Ο IT εξοπλισμός που βρίσκεται μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων επιτελεί τρεις κύριες λειτουργίες οι οποίες είναι απαραίτητες προκειμένου το περιβάλλον που φιλοξενούν να λειτουργεί απρόσκοπτα [1.14], [1.15]:

1. **Υπολογιστική:** Η μνήμη και η υπολογιστική ισχύς που χρειάζεται για να εκτελούνται οι εφαρμογές οι οποίες συνήθως παρέχονται από εταιρικούς διακομιστές
2. **Αποθήκευση:** Τα κέντρα δεδομένων περιλαμβάνουν πρωτεύουσες και εφεδρικές συσκευές αποθήκευσης. Μεταξύ αυτών μπορεί να είναι σκληροί δίσκοι ακόμα και μαγνητικοί δίσκοι αλλά οι καλύτερες εγκαταστάσεις στην κατηγορία αυτή διαθέτουν all-flash arrays (συστοιχίες flash δίσκων).

3. **Δικτύωση:** Περιλαμβάνουν μια ευρεία γκάμα εξοπλισμού δικτύωσης που κυμαίνεται από δρομολογητές και διακόπτες έως ελεγκτές και τείχη προστασίας (firewalls).



Εικόνα 5: Ενδεικτική κάτοψη ενός κέντρου δεδομένων- ενός ορόφου

Εκτός από τον IT εξοπλισμό που περιέχει, κάθε κέντρο δεδομένων διαθέτει την υποδομή υποστήριξης του εξοπλισμού, συμπεριλαμβανομένων των εξής:

- **Περιβαλλοντικούς ελεγκτές:** Οι αισθητήρες παρακολουθούν τη ροή αέρα, την υγρασία και τη θερμοκρασία στην εγκατάσταση ανά πάσα στιγμή, με συστήματα που εξασφαλίζουν ότι η θερμοκρασία και η υγρασία παραμένουν εντός των καθορισμένων περιοχών.
- **Racks διακομιστών (server):** Το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού ενός κέντρου δεδομένων, φιλοξενείται σε ειδικά σχεδιασμένα ράφια (racks) ή σε cabinets που σχεδιάζονται γι' αυτό το λόγο.
- **Τροφοδοσίες:** Τα περισσότερα κέντρα δεδομένων χρησιμοποιούν εφεδρικά συστήματα τροφοδοσίας με βάση την μπαταρία ικανά να αντισταθμίσουν τις βραχυπρόθεσμες διακοπές ρεύματος και μεγαλύτερες γεννήτριες που μπορούν να τροφοδοτήσουν σε περίπτωση μεγαλύτερων διακοπών δικτύου.
- **Συστήματα καλωδίωσης και διαχείρισης καλωδίων:** Ένα κέντρο δεδομένων μιας επιχείρησης μπορεί να περιλαμβάνει εκατοντάδες χιλιόμετρα οπτικών ινών. Γίνεται αντιληπτό ότι για να διατηρείται τακτοποιημένη αυτή η καλωδίωση και να είναι προσβάσιμη θα πρέπει να υπάρχουν κατάλληλα συστήματα που θα επιτελούν αυτή τη λειτουργία.

Πολλά μεγάλα κέντρα δεδομένων στεγάζονται σε ειδικά κτίρια. Μικρότερα κέντρα δεδομένων μπορεί να βρίσκονται σε ειδικά σχεδιασμένους χώρους εντός κτιρίων που κατασκευάζονται για να εξυπηρετούν πολλαπλές λειτουργίες. Δεδομένου ότι τα κέντρα δεδομένων καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι φυσικές δομές που τις στεγάζουν είναι καλά σχεδιασμένες και



κατάλληλα μονωμένες για τη βελτιστοποίηση των ελέγχων της θερμοκρασίας και της ενεργειακής τους απόδοσης. Τα κέντρα δεδομένων πρέπει να βρίσκονται κοντά σε αξιόπιστες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας και να διαθέτουν συνδεσιμότητα δικτύου υψηλής ταχύτητας. Η εγκατάσταση δεν πρέπει να βρίσκεται εντός ή κοντά σε ζώνες στις οποίες συμβαίνουν συχνά πλημμύρες, ούτε να είναι έκθετη σε άλλους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Οι ικανότητες των τοίχων και των δαπέδων του κτηρίου πρέπει να είναι επαρκείς για το βάρος του υλικού, των ραφιών και άλλων υποδομών υποστήριξης που θα φιλοξενηθούν. Παράλληλα η εγκατάσταση πρέπει να διαθέτει άφθονα συστήματα ασφαλείας και πυρόσβεσης, καθώς και κατάλληλα συστήματα καταγραφής.

Το πιο ευρέως διαδεδομένο πρότυπο για τον σχεδιασμό και την υποδομή των κέντρων δεδομένων είναι το ANSI/TIA-942 [1.16]. Περιλαμβάνει κατάλληλα πρότυπα για πιστοποίηση, η οποία διασφαλίζει τη συμμόρφωση με μια από τις τέσσερις κατηγορίες βαθμίδων (tiers) κέντρων δεδομένων τα οποία αξιολογούν τα επίπεδα ανοχής σφαλμάτων και πλεονασμού (redundancy) [1.17].

- **Επίπεδο 1:** Τοποθεσία βασικής υποδομής. Το κέντρο δεδομένων επιπέδου 1 προσφέρει περιορισμένη προστασία έναντι φυσικών συμβάντων. Διαθέτει στοιχεία μονής χωρητικότητας (single capacity) και μία μη πλεονάζουσα διαδρομή διανομής (nonredundant distribution path).
- **Επίπεδο 2:** Τοποθεσία υποδομής με πλεονάζουσα χωρητικότητα. Αυτό το κέντρο δεδομένων προσφέρει βελτιωμένη προστασία έναντι των φυσικών συμβάντων. Διαθέτει στοιχεία πλεονάζουσας χωρητικότητας και μία μη πλεονάζουσα διαδρομή διανομής.
- **Επίπεδο 3:** Τοποθεσία παράλληλης διατήρησης υποδομής. Αυτό το κέντρο δεδομένων προστατεύει από σχεδόν όλα τα φυσικά συμβάντα, παρέχοντας στοιχεία πλεονάζουσας χωρητικότητας και πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές διανομής. Κάθε στοιχείο μπορεί να αφαιρεθεί ή να αντικατασταθεί χωρίς να διαταραχθούν οι υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες.
- **Επίπεδο 4:** Τοποθεσία υποδομής με ανοχή σφάλματος. Αυτό το κέντρο δεδομένων παρέχει τα υψηλότερα επίπεδα ανοχής σφαλμάτων και πλεονασμού. Τα εξαρτήματα πλεονάζουσας χωρητικότητας και πολλές ανεξάρτητες διαδρομές διανομής επιτρέπουν ταυτόχρονη συντήρηση και ένα σφάλμα οπουδήποτε στην εγκατάσταση δεν προκαλεί διακοπή λειτουργίας.

### 1.3 Κέντρα δεδομένων νέφους

Όταν οι επιχειρήσεις διατηρούν τα δεδομένα τους και τον φόρτο εργασίας τους (workload) σε κέντρα δεδομένων νέφους, στηρίζονται σε φυσικές υποδομές όπως ακριβώς αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω και οι οποίες φιλοξενούνται εντός της επιχείρησης (on-premises). Παρόλα αυτά ο πελάτης της υπηρεσίας νέφους δεν είναι πλέον υποχρεωμένος να σχεδιάζει, φιλοξενεί, να συντηρεί, να τροφοδοτεί με ενέργεια, να διαθέτει προσωπικό ή να ασφαλίσει μια κτιριακή υποδομή. Αντ' αυτού ο πάροχος της υπηρεσίας νέφους αναλαμβάνει την ευθύνη της διάθεσης και της συντήρησης των πόρων ενός κέντρου δεδομένων. Εκτός των άλλων, η λογική αυτή

απελευθερώνει τους πελάτες των κέντρων δεδομένων νέφους από το κόστος της συντήρησης και ανάπτυξης τους. Με την υιοθέτηση των υπηρεσιών νέφους (cloud computing) να συνεχίζει να αυξάνεται, τα κέντρα δεδομένων νέφους φιλοξενούν όλο και μεγαλύτερο ποσοστό φόρτου εργασίας των επιχειρήσεων. Σύμφωνα με μελέτες (gartner), το 80% των επιχειρήσεων θα έχουν κλείσει τα παραδοσιακά κέντρα δεδομένων τους έως το 2025 [1.18]. Ο πάροχος υπηρεσιών νέφους συνήθως προσφέρει στους πελάτες κοινόχρηστη πρόσβαση σε εικονικούς πόρους υπολογιστών (π.χ. εικονικές μηχανές (VM)) ή αποκλειστική πρόσβαση σε συγκεκριμένους μεμονωμένους φυσικούς υπολογιστές, αποθηκευτικούς χώρους και hardware δικτύωσης.

### 1.3.1 Πλεονεκτήματα των κέντρων δεδομένων νέφους

Οι πάροχοι υπηρεσιών κέντρων δεδομένων νέφους απολαμβάνουν τα πλεονεκτήματα των οικονομικών κλίμακας και έτσι είναι σε θέση να παρέχουν στους ενοικιαστές τους σύγχρονο hardware, προηγμένη ασφάλεια και καλύτερη διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα από ό, τι οι ίδιοι οι ενοικιαστές θα μπορούσαν να αντέξουν οικονομικά αν δημιουργούσαν τα δικά τους κέντρα δεδομένων. Μερικά από τα βασικά οφέλη των κέντρων δεδομένων νέφους είναι τα ακόλουθα [1.19], [1.20], [1.21]:

- **Αποτελεσματική χρήση πόρων:** Σε αρχιτεκτονικές δημόσιου νέφους, πολλοί ενοικιαστές μοιράζονται την ίδια φυσική υποδομή. Αυτό σημαίνει ότι μεμονωμένες επιχειρήσεις δεν χρειάζεται να αγοράζουν, να χτίζουν και να συντηρούν πόρους για λειτουργίες όπως ο υπολογισμός και η αποθήκευση. Αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι ο σχεδιασμός των πόρων αυτών γίνεται εκτιμώντας τις περιόδους μέγιστης χρήσης (peak usage periods) αλλά και παρέχοντας δυνατότητες ανακατεύθυνσης σε περίπτωση σφαλμάτων, καταλαβαίνουμε ότι το κόστος γίνεται δυσανάλογα μεγάλο.
- **Γρήγορη ανάπτυξη (deployment) και επεκτασιμότητα (scalability):** Οι πόροι μπορούν να παρασχεθούν με λίγα μόνο κλικ, οπότε η ανάπτυξη νέων υπηρεσιών διαρκεί μόνο ένα μικρό κλάσμα του χρόνου που θα χρειαζόταν η αντίστοιχη ενέργεια στην περίπτωση των on-premises εγκαταστάσεων.
- **Μειωμένο κόστος κεφαλαιουχικών δαπανών (CAPEX):** Επειδή οι ενοικιαστές υπηρεσιών νέφους πληρώνουν ανάλογα με τις ανάγκες τους, συνήθως μέσω ενός μοντέλου συνδρομής, δεν χρειάζεται να πραγματοποιούνται σημαντικές εκ των προτέρων επενδύσεις σε νέο hardware.
- **Απελευθέρωση IT προσωπικού:** Ο πάροχος υπηρεσιών νέφους αναλαμβάνει την ευθύνη για την ασφάλεια και τη συντήρηση της υποδομής, ελευθερώνοντας τα τμήματα πληροφορικής των πελατών από καθημερινές εργασίες συντήρησης του εξοπλισμού.
- **Πρόσβαση σε ένα παγκόσμιο δίκτυο κέντρων δεδομένων:** Οι κύριοι πάροχοι υπηρεσιών νέφους έχουν διανείμει τα κέντρα δεδομένων τους σε πολλές περιοχές και ηπείρους. Αυτό επιτρέπει στους πελάτες να πληρούν τις απαιτήσεις ασφάλειας και κανονισμών τους και διασφαλίζει ότι η

επεξεργαστική απόδοση είναι βελτιστοποιημένη για την πελατειακή τους βάση, ανεξάρτητα από τον τόπο στον οποίο βρίσκονται. Η απόδοση των δικτύων παγκοσμίως μπορεί να εκτιμηθεί συγκρίνοντας την απόσταση που πρέπει να διανύσουν τα δεδομένα με την ταχύτητα που μπορεί να ταξιδεύει το φως στις οπτικές ίνες, της οποίας η απόδοση μπορεί να εκτιμηθεί στον πιθανό χρόνο επιστροφής (return trip time- RTT) για τα δεδομένα. Όσο πιο κοντά αποθηκεύονται τα δεδομένα στους χρήστες, τόσο καλύτερη είναι η απόδοση των υπηρεσιών.

Με όλα τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι η διασύνδεση των κέντρων δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την εύρυθμη λειτουργία τους και στο πρόβλημα αυτό έρχονται να απαντήσει η φωτονική τεχνολογία μέσω της ανάπτυξης οπτικών διασυνδέσεων.

#### **1.4 Τεχνολογίες Φωτονικών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων**

Η Φωτονική είναι η φυσική επιστήμη εκείνη που μελετάει τη γέννηση, την ανίχνευση και τη διαχείρισή του φωτός μέσω εκπομπής, διάδοσης, διαμόρφωσης, επεξεργασίας σήματος, ενίσχυσης και αναδρομολόγησης [1.22]. Αποτελεί έναν πολύ ζοηρό τομέα της παγκόσμιας οικονομίας, με την αγορά των φωτονικών να εκτιμάται στα \$829.775δισ. για το 2025 [1.23]. Οι εφαρμογές της είναι πανταχού παρούσες σε όλους τους τομείς, από την καθημερινή ζωή μέχρι τις πιο εξελιγμένες εφαρμογές της επιστήμης. Μερικές μόνο από αυτές είναι οι τηλεπικοινωνίες, η επεξεργασία της πληροφορίας, η φασματογραφία, η ανάπτυξη μηχανημάτων και αισθητήρων σε ιατρικές και βιολογικές εφαρμογές, η ρομποτική κ.α. Προκειμένου λοιπόν να καλυφθεί αυτή η τεράστια ανάγκη για φωτονικές δομές υψηλής λειτουργικότητας αλλά παράλληλα και χαμηλού κόστους, η τεχνολογία των φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχει αναπτυχθεί ραγδαία.

Ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (photonic integrated circuit- PIC) είναι μια συσκευή στην οποία βρίσκονται ολοκληρωμένες διάφορες οπτικές διατάξεις οι οποίες επιτελούν πολλαπλές φωτονικές λειτουργίες κατά αναλογία με ένα ηλεκτρονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα [1.24], [1.25], [1.26]. Πολλές οπτικές συσκευές όπως οι οπτικοί ενισχυτές, διαμορφωτές, (απο)πολυπλέκτες, lasers, φωτοδέκτες, διεπαφές κ.α. ολοκληρώνονται σε ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Τα κυκλώματα αυτά κατασκευάζονται σε κλίμακα wafers με τη χρήση συνήθως τεχνικών λιθογραφίας. Σε αντίθεση με την ηλεκτρονική ολοκλήρωση όπου το πυρίτιο είναι το κυρίαρχο υλικό κατασκευής, τα φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα εκμεταλλεύονται διάφορες πλατφόρμες υλικών μεταξύ των οποίων ηλεκτρο-οπτικοί κρύσταλλοι όπως το lithium niobate ( $\text{LiNbO}_3$ ), διοξείδιο του πυριτίου σε πυρίτιο (silica on silicon), διοξείδιο του πυριτίου με μονωτή (silicon on insulator), διάφορα πολυμερικά και ημιαγώγιμα υλικά όπως το InP και το GaAs. Όλα τα διαφορετικά αυτά συστήματα υλικών χρησιμοποιούνται γιατί παρέχουν το κάθε ένα ξεχωριστά πλεονεκτήματα αλλά παράλληλα έχουν και ξεχωριστούς περιορισμούς. Αναλόγως λοιπόν και με το ρόλο και τη λειτουργία που καλείται να επιτελέσει ένα φωτονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα, επιλέγεται και η κατάλληλη πλατφόρμα που μπορεί να το υποστηρίξει. Για παράδειγμα, το διοξείδιο του πυριτίου

έχει πολύ ελκυστικές ιδιότητες για την κατασκευή παθητικών φωτονικών κυκλωμάτων λόγω των πολύ χαμηλών απωλειών της πλατφόρμας και της χαμηλής θερμικής της ευαισθησίας [1.27], [1.28]. Αντιστοίχως φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα ημιαγωγών σε τεχνολογίες όπως η GaAs και η InP επιτρέπουν την απευθείας ολοκλήρωση τόσο ενεργών όσο και παθητικών στοιχείων πάνω στο ίδιο πλακίδιο (chip) [1.29], [1.30]. Τέλος τα κυκλώματα που βασίζονται σε πλατφόρμες πυριτίου επιτρέπουν την από κοινού ολοκλήρωση φωτονικών διατάξεων και transistor-based CMOS ηλεκτρονικών. Με βάση λοιπόν την τεχνολογία της φωτονικής και με χρήση φωτονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, αναπτύσσονται οπτικές διασυνδέσεις για κέντρα δεδομένων οι οποίες μπορούν να απαντάνε στις σύγχρονες προκλήσεις που γεννιούνται από την τεράστια έκρηξη διακίνησης των δεδομένων.

## **1.5 Είδη οπτικών διασυνδέσεων στα κέντρα δεδομένων**

Με την επεξεργαστική ισχύ των υπολογιστικών συστημάτων να αυξάνεται κάθε χρόνο, είναι σαφές ότι το κομμάτι της διασύνδεσης σε ένα κέντρο δεδομένων είναι εξαιρετικής σημασίας με δεδομένο ότι αυτή μπορεί να αποτελέσει μια σημαντική στενωπό που θα «επιβραδύνει» τον ρυθμό ανταλλαγής δεδομένων. Στα παραπάνω πλαίσια θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι τρεις κύριες εφαρμογές των οπτικών διασυνδέσεων στα υπολογιστικά κέντρα.

### **1.5.1 Διασυνδέσεις εντός πλακέτας (on-board)**

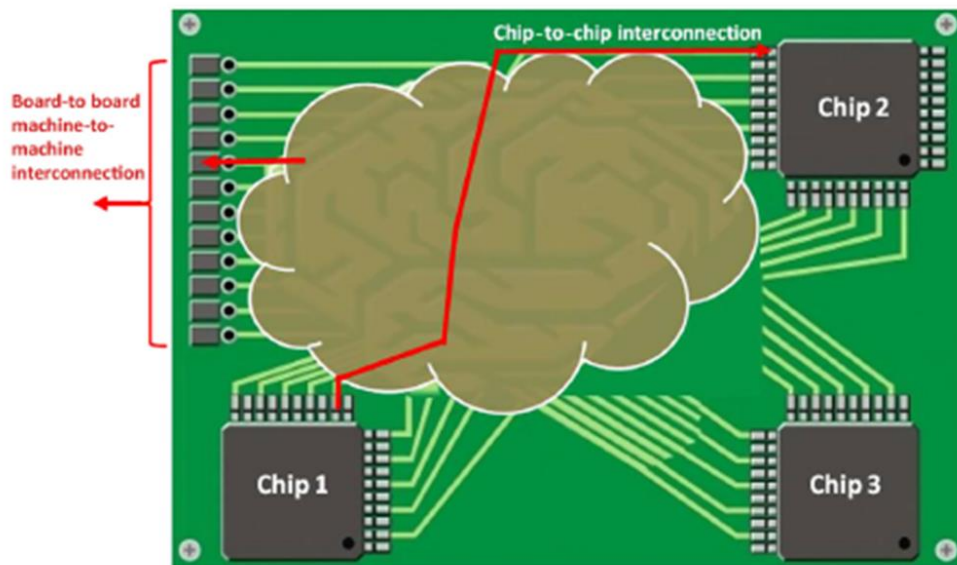
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια πιθανή εφαρμογή μιας οπτικής διασύνδεσης εντός μια πλακέτας εξυπηρετητή. Μια τυπική πλακέτα φιλοξενεί πάνω της μια σειρά από δομές όπως:

- Ξεχωριστούς επεξεργαστές, στην μορφή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, και μνήμες προκειμένου να κατανείμει την επεξεργασία των δεδομένων.
- Έναν κεντρικό δρομολογητή για τη δρομολόγηση των δεδομένων μεταξύ των επεξεργαστών (στην εικόνα αναπαρίσταται με το σύννεφο). Ο δρομολογητής ακολουθεί την τοπολογία του δικτύου, η οποία με τη σειρά της υπαγορεύεται από την εκτελούμενη εφαρμογή που υποδεικνύει πως θα κινούνται τα δεδομένα μεταξύ των ξεχωριστών chips εντός της πλακέτας. Επίσης μπορεί να ανακατευθύνει τα δεδομένα προς τις I/O θύρες της πλακέτας για επικοινωνία μεταξύ ξεχωριστών πλακετών ή ακόμα και διακριτών racks.
- Έναν αριθμό από I/O θύρες για την επικοινωνία των επεξεργαστών της πλακέτας με το υπόλοιπο δίκτυο του κέντρου δεδομένων το οποίο βρίσκεται είτε εντός του ίδιου rack σε διαφορετική όμως πλακέτα, είτε σε διαφορετικό rack μέσα στο δίκτυο.

Στόχος των οπτικών διασυνδέσεων είναι η ανάπτυξη οπτο-ηλεκτρονικών πομποδεκτών στις I/O θύρες των πλακετών, για μετάδοση ή λήψη οπτικών δεδομένων τα οποία εν συνεχεία θα μετατρέπονται σε ηλεκτρονικά για να επεξεργαστούν ή να αποθηκευτούν στο chip. Ο πομποδέκτης περιλαμβάνει οπτικές πηγές (είτε εξωτερικής είτε απευθείας διαμόρφωσης), φωτοδέκτες καθώς και τα

κατάλληλα ηλεκτρονικά κυκλώματα οδήγησης (οδηγητές laser και διαμορφωτή, TIAs στην μεριά του δέκτη). Οι ίδιες απαιτήσεις διαμορφώνονται και στην πλευρά του κεντρικού δρομολογητή όταν αυτός αναπτύσσεται στην μορφή ηλεκτρονικού κυκλώματος. Στο κομμάτι αυτό συγκεντρώνονται αρκετές ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ηλεκτρο-οπτικών switching matrices με υψηλό throughput και ελάχιστη καθυστέρηση, είτε ακόμα και οπτικών switching matrices προκειμένου να αποφεύγονται οι μετατροπές μεταξύ οπτικών και ηλεκτρονικών σημάτων [1.31], [1.32]. Τέλος, η πλακέτα θα πρέπει να διαθέτει φωτονικούς κυματοδηγούς προκειμένου να αντικατασταθούν τα σύρματα χαλκού, όπως επίσης και οπτικές διεπαφές (interfaces) για την κίνηση των δεδομένων από και προς την πλακέτα καθώς και προς τους πομποδέκτες κάθε ενός chip.

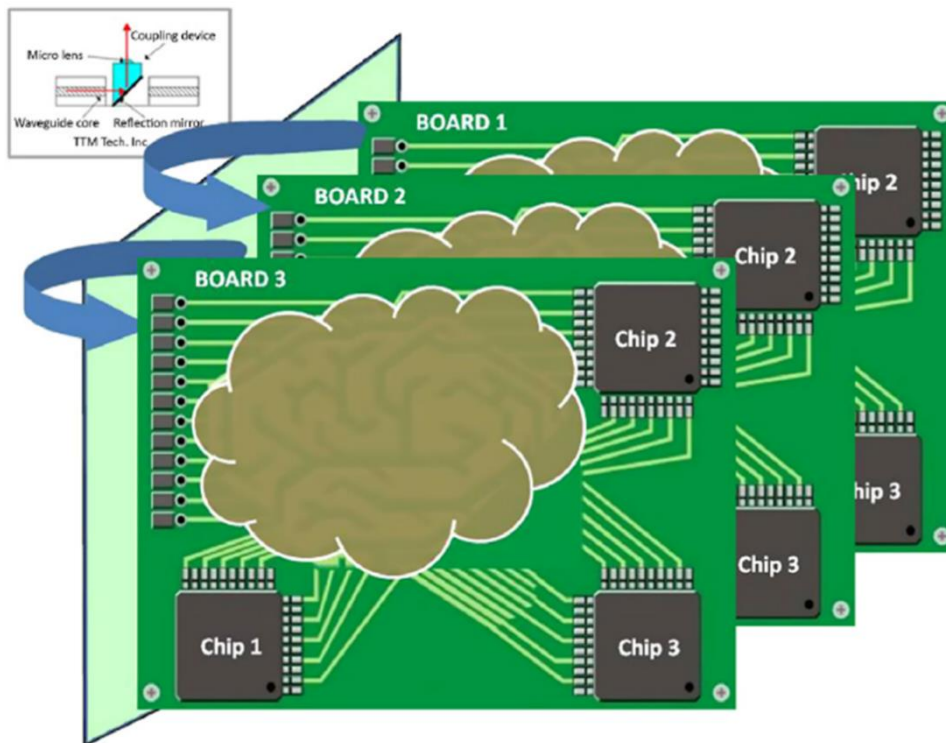
Έχοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, μπορούμε πλέον εύκολα να κατανοήσουμε ποιοι είναι οι περιορισμοί από μεριάς τεχνολογίας αλλά και προς ποια κατεύθυνση θα κινηθούν οι τάσεις στο μέλλον. Πιο συγκεκριμένα, ο οδικός χάρτης όσον αφορά στο κομμάτι των εξυπηρετητών και πλακετών υποδεικνύει την ανάγκη για την αύξηση του αριθμού των επεξεργαστών που θα φιλοξενούνται πάνω στην ίδια πλακέτα ούτως ώστε να αυξηθεί η απόδοση κρατώντας το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας σε χαμηλά επίπεδα. Σε ένα ακόμα ανώτερο επίπεδο, το όραμα των οπτικών επικοινωνιών αφορά στην «οπτική ενοποίηση» όλων των λειτουργιών σε ένα chip ούτως ώστε να μην είναι αναγκαίες οι οπτο-ηλεκτρονικές μετατροπές και άρα να εκτιναχθούν οι ταχύτητες επεξεργασίας και εκτέλεσης. Προσπάθειες για την υλοποίηση ολοκληρωμένων οπτικών μνημών αλλά και οπτικών μνημών RAM έχουν ήδη δειχθεί και κινούνται προς αυτή την κατεύθυνση [1.33] [1.34].



Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση μια πλακέτας που φέρει πάνω της διάφορα chips επεξεργαστών, I/O θύρες και δρομολογητή δεδομένων. Καταδεικνύει την χρησιμότητα των οπτικών διασυνδέσεων σε επίπεδο πλακέτας.

### 1.5.2 Οπτικές διασυνδέσεις για επικοινωνία μεταξύ πλακετών (board-to-board)

Το επόμενο επίπεδο στην ιεραρχία των οπτικών διασυνδέσεων είναι αυτό της επικοινωνίας μεταξύ πλακετών (board-to-board)[1.35], [1.36]. Στην συνθήκη αυτή, τα δεδομένα από μια πλακέτα πρέπει να μεταδοθούν σε μια άλλη που βρίσκεται είτε στο ίδιο backplane (η περίπτωση αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα) είτε στο ίδιο rack. Στη δεύτερη περίπτωση ο συνολικός ισολογισμός απωλειών (loss budget) αυξάνεται καθώς εισάγονται τόσο απώλειες από το link, με δεδομένο ότι το μήκος διάδοσης είναι μεγαλύτερο, όσο και από την κάθετη ζεύξη με δεδομένο ότι το φως πρέπει να περάσει από την πλακέτα στον οπτικό κυματοδηγό του backplane και πάλι πίσω σε μια άλλη πλακέτα. Στις περισσότερες board-to-board εφαρμογές, ο σχεδιασμός τους απαιτεί οι πλακέτες να έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης (pluggable) [1.37], [1.38]. Αυτό επιτρέπει την εύκολη αντικατάσταση της πλακέτας σε περίπτωση βλάβης, προσφέρει πιο εξορθολογισμένη κατασκευή για εφαρμογές που απαιτούν πολλαπλές πλακέτες και παρέχει ευκολία στη δυνατότητα αναβάθμισης ή προσαρμογής μελλοντικών αλλαγών στο σχεδιασμό. Συνεπώς, σε οπτικές πλακέτες με δυνατότητα σύνδεσης η ζεύξη του φωτός θα πρέπει να γίνεται στον κατακόρυφο άξονα από την πλακέτα στο backplane και αντιστρόφως με τη βοήθεια κατόπτρων και μικρο-φακών όπως φαίνεται και στην ένθετη εικόνα του παρακάτω σχήματος. Γι' αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η χρήση κατόπτρων χαμηλών απωλειών και υψηλού εύρους ζώνης προκειμένου αφενός να επιτευχθεί χαμηλός ισολογισμός απωλειών και αφετέρου δυνατότητα πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος (WDM).

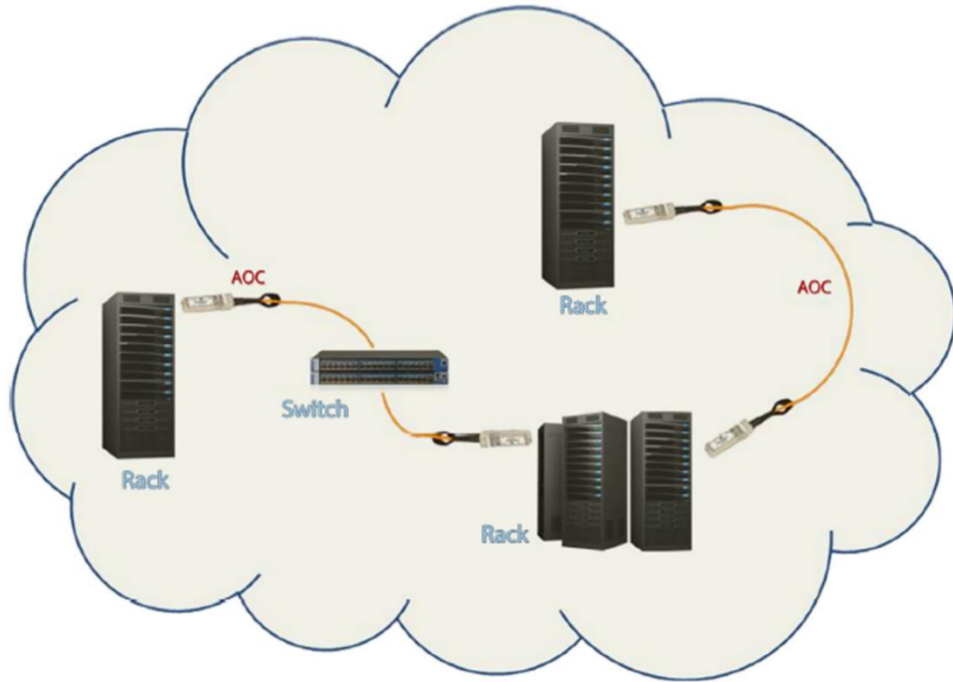


Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της διασύνδεσης board-to-board με ένθετη εικόνα που περιγράφει το concept της κάθετης ζεύξης.

### 1.5.3 Διασύνδεση μεταξύ racks (rack-to-rack)

Ένα σύγχρονο κέντρο δεδομένων αποτελείται από πολλές διαφορετικές δομικές μονάδες (building blocks), οι οποίες έχουν ξεχωριστές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται από τα διάφορα υποσυστήματα που λειτουργούν. Οι δομικές αυτές μονάδες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων, συστοιχίες αποθήκευσης δεδομένων (data storage arrays), ολοκληρωμένες πλατφόρμες εφαρμογών, εξυπηρετητές αποθήκευσης δεδομένων, διακόπτες αλλά και υψηλών επιδόσεων υποσυστήματα τα οποία επιτελούν τις λειτουργίες της αποθήκευσης και του υπολογισμού. Εάν όλα αυτά τα δομικά στοιχεία μπορούσαν να διευθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πραγματικά αρθρωτά (modular), δηλαδή να λειτουργούν ανεξάρτητα από τη θέση τους εντός του κέντρου δεδομένων, και εάν οι περιορισμοί του μήκους και του εύρους ζώνης της διασύνδεσης μεταξύ των υποσυστημάτων μπορούσαν να αγνοηθούν, τότε αυτό θα επέτρεπε μια πραγματικά καταναεμημένη αρχιτεκτονική. Σε αυτή την περίπτωση, ο συνδυασμός των υποσυστημάτων που απαιτείται ούτως ώστε να επιτελούνται οι συγκεκριμένες λειτουργίες δεν μπορεί να περιορίζεται μέσα σε ένα rack ή μια ομαδοποίηση (cluster) από racks, αλλά διασπείρεται στο φυσικό υπόστρωμα ολόκληρου του κέντρου δεδομένων [1.39]. Ιδανικά, στον χρήστη παρέχεται ένα εικονικό κέντρο δεδομένων με τον βέλτιστο συνδυασμό υπολογιστικής ισχύος, μνήμης και αποθήκευσης ακόμα και αν το hardware που απαιτείται για να επιτελέσει αυτές τις λειτουργίες είναι διεσπαρμένο. Επιπρόσθετα είναι εξαιρετικής σημασίας το πως θα επιτελεστούν στο ακέραιο οι απαιτούμενες λειτουργίες χωρίς να γίνεται κατασπατάληση των διαθέσιμων πόρων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται χαμηλού κόστους, ευρυζωνικά οπτικά links τα οποία έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν δεδομένα σε πολύ υψηλούς ρυθμούς και πολύ μεγάλες αποστάσεις.

Σε ένα κέντρο δεδομένων, τα racks διασυνδέονται με τρόπο ανάλογο με τη διασύνδεση των χρηστών στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, χρησιμοποιώντας δικτυακή υποδομή και διακόπτες δεδομένων [1.40], [1.41]. Αυτό επιτυγχάνετε με τη χρήση καλωδίων και διακοπών που υποστηρίζουν μετάδοση τόσο σε υψηλούς ρυθμούς όσο και σε μακρινές αποστάσεις. Με δεδομένο ότι τα κέντρα δεδομένων γίνονται όλο και μεγαλύτερα, προκειμένου να ικανοποιήσουν τις τεράστιες απαιτήσεις των υπηρεσιών νέφους, η διασυνδέσεις των racks μπορεί να φτάνουν και τα λίγα χιλιόμετρα υποστηρίζοντας ταχύτητες ακόμα και 100 Gb/s. Για τον λόγο αυτό τα Ένεργά Οπτικά Καλώδια έχουν υπερισχύσει έναντι των καλωδίων χαλκού με δεδομένο ότι μπορούν να προσφέρουν τέτοιες καλές επιδόσεις.

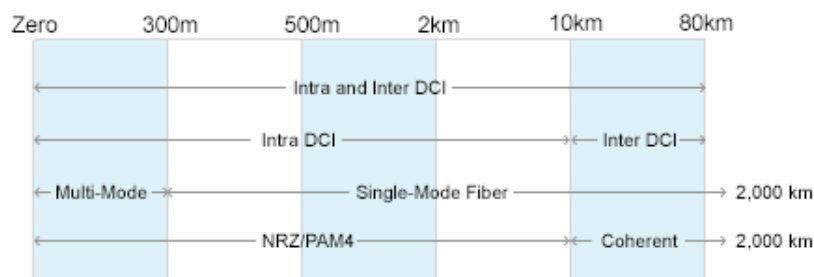


Εικόνα 8: Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση διακοπών και Ενεργών Οπτικών Καλωδίων

## 1.6 Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των οπτικών διασυνδέσεων γίνεται με βάση την απόσταση που αυτές καλούνται να καλύψουν: οι διασυνδέσεις εντός του υπολογιστικού κέντρου (intra-datacenter interconnects) και οι διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων (inter-datacenter interconnects). Ο κύριος λόγος της διάκρισης αυτής είναι το γεγονός ότι αναλόγως με το μήκος της ζεύξης υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Η πρώτη κατηγορία, αυτή των διασυνδέσεων εντός υπολογιστικού κέντρου, αφορά σε συνδέσεις που μπορεί να γίνονται εντός ενός κτιρίου ή μεταξύ κτιρίων που μπορεί να βρίσκονται εντός του ίδιου campus, γι' αυτό και οι αποστάσεις τους κυμαίνονται μεταξύ μερικών μέτρων έως και 10 km [1.42]. Από την άλλη, η κατηγορία των διασυνδέσεων μεταξύ υπολογιστικών κέντρων κινείται σε αποστάσεις που βρίσκονται στο εύρος των 10 km- 80 km [1.43]. Ζεύξεις που απαιτούν διασύνδεση σε μεγαλύτερες αποστάσεις θεωρούνται ως metro ή long haul διασυνδέσεις οι οποίες εν μέρει καλύπτονται από τις τεχνολογίες των inter-datacenter interconnects αλλά γενικά εντάσσονται σε άλλο κάδρο. Η παρακάτω εικόνα δίνει σημαντική πληροφορία για τις αποστάσεις που καλύπτει η κάθε κατηγορία αλλά και για τις διαφορετικές βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στην κάθε περίπτωση.





Εικόνα 9: Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση και βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται.

### 1.6.1 Διασυνδέσεις μεταξύ κέντρων δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι διασυνδέσεις μεταξύ υπολογιστικών κέντρων αφορούν αποστάσεις 10 km- 80 km. Η αποστάσεις αυτές οι οποίες συμπίπτουν με τις αρχιτεκτονικές metro είναι εξαιρετικά σημαντικές μιας και καταλαμβάνουν ένα αρκετά μεγάλο κομμάτι της συνολικής κίνησης. Ας δώσουμε ένα παράδειγμα που θα βοηθήσει καλύτερα στην κατανόηση της αναγκαιότητας διασύνδεσης κέντρων δεδομένων σε τέτοιες αποστάσεις. Αν ένα βίντεο σε μια πλατφόρμα όπως το YouTube είναι δημοφιλές, τότε δεν φυλάσσεται μόνο σε μια κεντρική τοποθεσία αλλά πολλά αντίγραφα του μεταφέρονται στα metro κέντρα δεδομένων όπου η πρόσβαση στο βίντεο είναι ευκολότερη με δεδομένο ότι βρίσκονται εγγύτερα στους χρήστες. Παράλληλα, αποσυμφορίζεται και η κίνηση στα long-haul δίκτυα που είναι ένα σημαντικό κέρδος για την εύρυθμη λειτουργία του δικτύου.

Στο επίπεδο της τεχνολογίας, ενώ υπάρχουν σημαντικές προσπάθειες για την χρήση σχημάτων απευθείας διαμόρφωσης σήματος ιδιαίτερα για διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων μέχρι τα 40 km, η κυρίαρχη τεχνολογία στο πεδίο αυτό είναι τα σύμφωνα οπτικά (coherent optics) [1.44]. Δίνουν τη δυνατότητα απρόσκοπτης μετάδοσης σημάτων με λιγότερα σφάλματα και παράλληλα υποστηρίζουν ένα οπλοστάσιο από αλγορίθμους DSP που επιτρέπουν τη διόρθωση βλαβών που υφίστανται τα σήματα από το δίκτυο, όπως για παράδειγμα τα φαινόμενα της χρωματικής διασποράς και των μη-γραμμικοτήτων.

### 1.6.2 Διασυνδέσεις εντός του κέντρου δεδομένων

Για την καλύτερη επεξήγηση του τύπου της κίνησης που δημιουργείται εντός κέντρου δεδομένων παρατίθεται το παρακάτω παράδειγμα. Ας θεωρηθεί ότι υπάρχει ένα ερώτημα σε μια αναζήτησης (search query) το οποίο καταλήγει στο κέντρο δεδομένων της μηχανής αναζήτησης αυτής. Η απάντηση στο ερώτημα γίνεται υπό τη μορφή μια σελίδα αποτελεσμάτων της μηχανής αναζήτησης η οποία απαριθμεί έναν αριθμό από απαντήσεις. Παρόλα αυτά, για τη σύνθεση της απάντησης είναι πολύ πιθανό να συμμετείχαν διαφορετικά μέρη του υπολογιστικού κέντρου. Εξάλλου, η πλειονότητα της κίνησης που δημιουργείται από τέτοιου τύπου ερωτήματα είναι του τύπου machine-to-machine, δηλαδή αυτό σημαίνει ότι το ερώτημα «διαχωρίζεται», τα διάφορα «κομμάτια δεδομένων» στη συνέχεια ανακτώνται και συγκεντρώνονται στο κέντρο δεδομένων προτού αποσταλούν πίσω στο χρήστη.

Για να γίνουν πιο κατανοητά τα μεγέθη και εν τέλει να ερμηνευτούν και οι αποστάσεις των ζεύξεων πρέπει να δοθεί μια περιγραφή των διαστάσεων ενός κέντρου δεδομένων. Κάποιες φορές λοιπόν, τα κέντρα δεδομένων μπορεί να είναι μεγάλα κτίρια στο μέγεθος ενός ποδοσφαιρικού γηπέδου, και κάποιες άλλες να είναι πολλαπλά κτίρια τα οποία φιλοξενούνται μέσα σε ένα campus [1.45]. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι τα πάντα μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων διασυνδέονται στους εξυπηρετητές μέσω δρομολογητών και διακοπών. Έτσι αν πάρουμε για παράδειγμα την περίπτωση πολλαπλών κτιρίων εντός ενός campus, ακόμα και αν πρέπει να διασυνδεθούν δυο διπλανά κτίρια σε απόσταση 200 m, η ίνα πρώτα θα περάσει από ένα hub το οποίο μπορεί να απέχει απόσταση μεγαλύτερη του 1 km και μετά θα καταλήξει στον εξυπηρετητή. Με αυτού του τύπου τη δρομολόγηση λοιπόν αυξάνεται και η απόσταση της ζεύξης και για το λόγο αυτό οι διασυνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 10 km.

Για αποστάσεις έως 300 m, οι διασυνδέσεις εντός υπολογιστικών κέντρων πολύ συχνά γίνονται με τη χρήση πολυρυθμικών ινών και ο λόγος είναι ότι τα διάφορα στοιχεία (components) που χρησιμοποιούνται είναι πολύ πιο οικονομικά από μεριάς κόστους. Παρόλα αυτά, εξαιτίας της διασποράς τρόπων διάδοσης που είναι επικρατούσα στις MMF οι μεγαλύτερες αποστάσεις ζεύξης είναι σχεδόν απαγορευτικές οπότε και χρησιμοποιούνται μονορυθμικές ίνες. Στο επίπεδο του τρόπου διαμόρφωσης, η διαμόρφωση κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών (PAM4) είναι αυτή που έχει επικρατήσει τα τελευταία χρόνια έναντι της NRZ μιας και αυξάνει τη χωρητικότητα της ζεύξης (κωδικοποιεί 2 bit ανά σύμβολο) χωρίς να απαιτεί πιο πολύπλοκο ηλεκτρονικό εξοπλισμό για την αποδιαμόρφωσή της.

## **1.7 Εξέλιξη της υιοθέτησης οπτικών διασυνδέσεων εντός κέντρων δεδομένων**

Τα μεγάλης κλίμακας κέντρα δεδομένων υιοθέτησαν τις οπτικές τεχνολογίες κατά τη μετάβαση τους από ρυθμούς του 1 Gb/s στα 10 Gb/s μέσα στο χρονικό διάστημα 2007-2010, έως τότε η διασύνδεση γινόταν αποκλειστικά με τη χρήση καλωδίων χαλκού. Το 2007, η Google εισήγαγε τις οπτικές επικοινωνίες στο κέντρο δεδομένων της χρησιμοποιώντας πομποδέκτες τύπου SFP των 10 Gb/s, βασισμένους σε VCSELs και πολυρυθμική ίνα, για μετάδοση δεδομένων μέχρι και 200 m. Από εκείνη την περίοδο και μετά, η πλήρης υιοθέτηση των οπτικών τεχνολογιών ήταν μονόδρομος με δεδομένη τη συνεχή αύξηση της κίνησης. Έχοντας ως βάση την προσέγγιση ότι ο όγκος των δεδομένων που διακινείται από τους εξυπηρετητές διπλασιάζεται κάθε χρόνο [1.46], μεταβάσεις από τα 10 στα 40 Gb/s, από τα 40 στα 100 Gb/s και από εκεί σε ακόμα υψηλότερους ρυθμούς, είχαν προβλεφθεί ήδη από νωρίς [1.47]. Το 2017, διασυνδέσεις των 40 Gb/s, βασισμένες στο πρωτόκολλο Ethernet, είχαν ήδη εγκατασταθεί σε μεγάλα κέντρα δεδομένων [1.46]. Παράλληλα, πομποδέκτες με δυνατότητα διασύνδεσης στα 100 Gb/s ήταν εμπορικά διαθέσιμοι από το 2014 και η ευρεία χρήση τους στα κέντρα δεδομένων ξεκίνησε από τα τέλη του 2018. Πλέον στην περίοδο που διανύουμε, η αγορά των συνδέσιμων (pluggable) δομών στα 400GbE αναμένεται να αναπτυχθεί τάχιστα μέχρι το 2023 [1.48].

Στο επίπεδο των ερευνητικών προσπαθειών, πολλές δομές έχουν παρουσιαστεί που ανοίγουν το δρόμο για την ουσιαστική εγκαθίδρυση των πομποδεκτών στα 400 Gb/s. Το 2019, παρουσιάστηκε ένας PAM-4 πομπός με μονολιθικό laser σε πλατφόρμα φωτονικών πυριτίου κατάλληλος για εφαρμογές short-reach 400GbE [1.49]. Το πανεπιστήμιο McGill επίσης επέδειξε ένα πομπό τεσσάρων γραμμών κατάλληλο για τέτοιου τύπου συνδεσιμότητα εντός ενός κέντρου δεδομένων [1.50], ενώ και το πανεπιστήμιο της Γάνδης στην κατεύθυνση αυτή έχει κατασκευάσει έναν PAM-4 πομπό τεχνολογίας φωτονικών πυριτίου με δυνατότητα ρυθμοδότησης 128 Gb/s, σε αποστάσεις μέχρι 1 km χωρίς τη χρήση τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος [1.51]. Στην ίδια κατεύθυνση έχει παρουσιαστεί ένας PAM-4/PAM-8 πομπός στα 260 Gb/s με χρήση τεχνικών προ-αντιστάθμισης [1.52] και ένας πομπός υβριδικής ολοκλήρωσης με ταχύτητα στα 208 Gb/s και δυνατότητα κάλυψης απόστασης έως και 1 km [1.53].

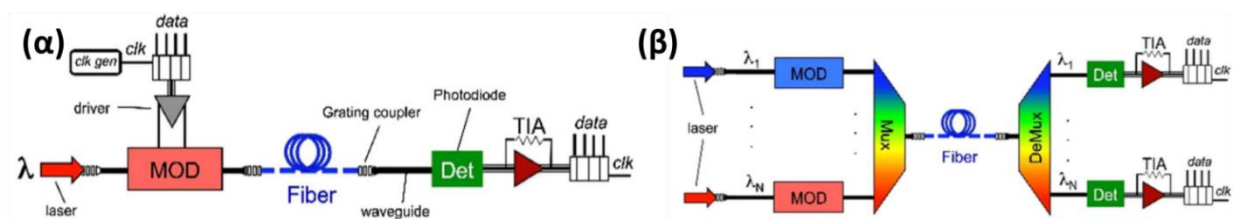
Στα πλαίσια της ευρύτερης αγοράς διασυνδέσεων, το παρόν τοπίο περιλαμβάνει πολλά παραδείγματα επίδειξης ταχυτήτων έως 400 Gb/s, καθώς και κάποια πρώτα pluggable στοιχεία. Η εταιρεία Finisar παρουσίασε έναν πομποδέκτη QSFP στα 400G κατάλληλο για εφαρμογές διασύνδεσης εντός υπολογιστικών κέντρων [1.54], ενώ η Colorchip ανακοίνωσε την έναρξη των δοκιμών σε οπτικούς πομποδέκτες που στοχεύουν στην ίδια ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων [1.55]. Η Mellanox έχει ήδη από το 2019 επιδείξει ένα 400G QSFP πομποδέκτη [1.56] ενώ η Innolight διαθέτει μια γκάμα από 400G πομποδέκτες και οπτικά καλώδια [1.57]. Η Kaiam έχει διαθέσιμους διάφορους 400G πομποδέκτες οι οποίοι είναι προσαρμοσμένοι σε διάφορα πρωτόκολλα (όπως τα LR8/FR8/FR4) και form factors [1.58]. Τέλος, η Lumentum έχει κυκλοφορήσει 400G οπτικούς πομποδέκτες με δυνατότητα μετάδοσης στα 2 και 10 km [1.59]. Αν τα παραπάνω αποδεικνύουν κάτι, είναι τον φρενήρη ρυθμό με τον οποίο κινείται η έρευνα και η «βιομηχανία» στο κομμάτι της εύρεσης και ανάπτυξης δομών προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών. Με δεδομένο κιόλας ότι κάποιες φορές η αύξηση της απαίτησης γίνεται με γεωμετρικό τρόπο, όπως το πρόσφατο παράδειγμα της αύξησης της κίνησης λόγω των επιπτώσεων της κρίσης της πανδημίας του COVID-19, οι προσπάθειες για εξεύρεση καινοτόμων λύσεων δεν σταματά ποτέ.

## **1.8 Οπτο-ηλεκτρονικοί Πομποδέκτες για Κέντρα Δεδομένων**

Ένας οπτο-ηλεκτρονικός πομποδέκτης είναι το βασικό στοιχείο μια rack-to-rack οπτικής διασύνδεσης [1.60], [1.61]. Είναι επί της ουσίας μια συσκευή η οποία μπορεί να μεταδώσει και να λάβει δεδομένα υπό την μορφή οπτικών παλμών χρησιμοποιώντας ως μέσο την οπτική ίνα. Τρεις είναι οι κύριες ζώνες μηκών κύματος στις οποίες μεταδίδονται δεδομένα: γύρω από τα 850 nm, γύρω από τα 1310 nm και γύρω από τα 1550 nm. Τα δεδομένα αυτά ταξιδεύουν σε πολύ υψηλές ταχύτητες και έχουν τη δυνατότητα λόγω των χαμηλών απωλειών της οπτικής ίνας να ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις. Οι πομποδέκτες μπορούν είτε να συνδεθούν (pluggable) είτε να ενσωματωθούν (embedded) σε μια συσκευή δικτύου και είναι τα στοιχεία εκείνα που

μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα σε οπτικά και το αντίθετο. Αναπτύσσονται σε διαφορετικά σχήματα και μεγέθη κάτι που περιγράφεται από τον όρο form factor.

Η «ανατομία» ενός πομποδέκτη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τα βασικά δομικά στοιχεία του είναι η οπτική πηγή (laser), ο διαμορφωτής (modulator) και ο φωτοδέκτης (photodetector). Σημαντικό ρόλο παίζουν επίσης παθητικά στοιχεία όπως οι (από)πολυπλέκτες ή οι διαφόρων τύπων διεπαφές που ολοκληρώνονται πάνω στα chips πομποδεκτών και επιτρέπουν είτε τον πολλαπλασιασμό του εύρους ζώνης των πομποδεκτών είτε διευκολύνουν την είσοδο και την έξοδο του φωτός στις διάφορες ολοκληρωμένες δομές και την ίνα. Στο επίπεδο της ολοκλήρωσης μια σειρά από υποψήφιες τεχνολογίες δοκιμάζονται προκειμένου να κατασκευαστούν οι δομές των πομποδεκτών κάθε μια από τις οποίες φέρει τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά της. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν με συνοπτικό τρόπο οι διάφορες τεχνολογικές προσεγγίσεις που αφορούν στην ανάπτυξη των βασικών δομικών στοιχείων ενός πομποδέκτη.



Εικόνα 10: Χαρακτηριστική αρχιτεκτονική: (α) ενός point-to-point φωτονικού link που χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος και (β) ενός φωτονικού link που χρησιμοποιεί πολυπλεξία κατά μήκος κύματος με τη χρήση ολοκληρωμένων (από)πολυπλεκτών.

**Lasers:** Η πλειοψηφία των εμπορικά διαθέσιμων οπτικών διασυνδέσεων για αποστάσεις μικρότερες από τα 300 m κάνουν χρήση πολυρυθμικών ινών και δομών VCSEL τεχνολογίας GaAs με μήκος κύματος εκπομπής στα 850 nm. Τα VCSEL επιτρέπουν τεχνικές απευθείας διαμόρφωσης (direct modulation) και επιτυγχάνουν υψηλά εύρη ζώνης με χαμηλά ρεύματα οδήγησης. Αξιοσημείωτες επιδόσεις έχουν δειχθεί στη βιβλιογραφία για μια σειρά από προσεγγίσεις όπως πολύ γρήγορες ταχύτητες [1.62], χρήση αναβαθμισμένων σχημάτων διαμόρφωσης [1.63] και τεχνικών πολυπλεξίας [1.64]-[1.68]. Οι αυξημένες όμως απαιτήσεις για ζεύξεις σε πιο μεγάλες αποστάσεις έχουν οδηγήσει στην υιοθέτηση in-plane δομών laser όπως τα DFBs βασισμένων στην πλατφόρμα των III-V ημιαγωγών τα οποία τοποθετούνται σε wafers φωτονικών πυριτίου με διάφορους τρόπους πρόσδεσης (bonding). Χαρακτηριστικά θα αναφερθούν κάποια παραδείγματα από τη βιβλιογραφία [1.69]-[1.77].

**Διαμορφωτές:** Οι διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro-absorption modulators-EAMs), αποτελούν την κυρίαρχη τεχνολογία όταν δεν γίνεται επιλογή χρήσης απευθείας διαμόρφωσης. Συνήθως η από κοινού τους ανάπτυξη με τα DFB lasers οδηγεί στην ανάπτυξη δομών που αποκαλούνται EMLs (electroabsorption modulator lasers). Μια πλειάδα εφαρμογών EAMs βασισμένα στην τεχνολογία III-V υπάρχει στη βιβλιογραφία [1.78]-[1.80], ενώ και υλικά όπως το Ge έχουν επίσης δειχτεί [1.81]-[1.82]. Εκτός των EAMs σε μικρότερη συχνότητα παρατηρούνται

εφαρμογές που χρησιμοποιούν electro-refraction [1.83]-[1.84] και cascaded ring [1.85]-[1.86] διαμορφωτές.

**Φωτοδέκτες:** Με δεδομένο ότι το κόστος είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος, οι PIN φωτοдиодοι είναι οι πιο διαδεδομένες δομές που χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό [1.87]-[1.88]. Πλέον, κερδίζουν έδαφος και υλοποιήσεις που κάνουν χρήση είτε unitraveling-carrier (UTC) φωτοδιόδων [1.89] είτε avalanche (APD) φωτοδεκτών [1.90].

**(Από)Πολυπλέκτες:** Στο επίπεδο την οπτική πολυπλεξίας οι δομές που χρησιμοποιούνται βασίζονται κυρίως σε thin films [1.90], gratings περίθλασης [1.91]-[1.92], arrayed waveguide gratings [1.93]-[1.95] και φίλτρα βασιζόμενα σε δομές μικρο-δακτυλίων [1.96]-[1.100].

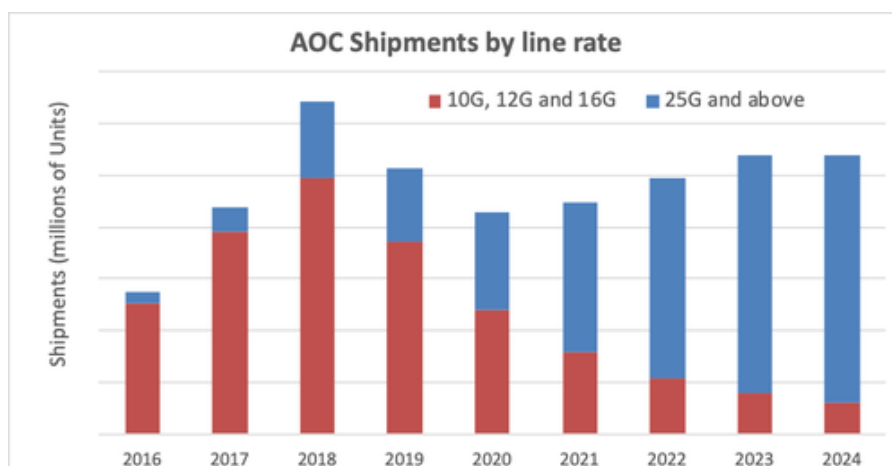
## 1.9 Ενεργά Οπτικά Καλώδια

Όπως αναφέραμε παραπάνω οι οπτικοί πομποδέκτες μετατρέπουν τα ηλεκτρικά σήματα δεδομένων σε οπτικά με τη βοήθεια δομών όπως τα lasers και οι διαμορφωτές και εν συνεχεία το φως αυτό διαδίδεται μέσα στην οπτική ίνα. Οι οπτικοί πομποδέκτες έχουν έναν αποσπώμενο οπτικό συνδετήρα (optical connector) προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα αποσύνδεσης της δομής από την οπτική ίνα. Στα ενεργά οπτικά καλώδια (Active Optical Cables- AOCs) η βασική διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η οπτική ίνα είναι μόνιμα συνδεδεμένη με τον πομποδέκτη δημιουργώντας έτσι μια άμεσα ενσωματώσιμη δομή στη λογική του «plug and play». Είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για τη διασύνδεση εντός υπολογιστικών κέντρων και υπερυπολογιστικών (high performance computing-HPC) εφαρμογών και αντικατέστησαν τα καλώδια του χαλκού (direct Attach Copper-DAC cables) προσφέροντας μια σειρά από αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα [1.101], [1.102].

Σε σχέση λοιπόν με τα DACs, τα AOCs προσφέρουν δυνατότητα ζεύξης σε μεγαλύτερες αποστάσεις, μεγαλύτερο εύρος ζώνης, πιο αξιόπιστο κανάλι μετάδοσης, μικρότερο μέγεθος και βάρος, καθώς και ανοσία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Επιπρόσθετα, σε σύγκριση με άλλους οπτικούς πομποδέκτες τα AOCs έχουν χαμηλότερη κατανάλωση, χαμηλότερο κόστος συντήρησης και εν γένει είναι πολύ πιο οικονομικά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι ένας πλήρης διπλός AOC πομποδέκτης (μαζί με την καλωδίωσή του-οπτική ίνα) κοστίζει συνήθως όσο ένας μονός οπτικός πομποδέκτης. Συνήθως τα AOCs καλύπτουν αποστάσεις από μερικά μέτρα έως 4 km. Αναλόγως με την απόσταση προσαρμόζουν και την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, έτσι για παράδειγμα για διασυνδέσεις μέχρι 100 m συνηθίζεται να βασίζονται σε πολυρυθμική τεχνολογία. Τα AOCs κατασκευάζονται σε διάφορες διαστάσεις προκειμένου να είναι συμβατά με μια πλειάδα από τύπους συνδετήρων, αναφορικά: SFP+, SFP28, QSFP+, QSFP28 κ.α.

Για τα παραπάνω χαρακτηριστικά τους λοιπόν και παρά το γεγονός ότι υπάρχει μια πολύ μεγάλη ποικιλία από επιλογές όσον αφορά στη διασύνδεση εντός κέντρων δεδομένων, τα ενεργά οπτικά καλώδια παραμένουν ίσως η σημαντικότερη τεχνολογία

στην αγορά, με τις πωλήσεις να διατηρούνται σε πολύ υψηλά επίπεδα όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα. Είναι επίσης αξιοσημείωτο το γεγονός ότι σχεδόν τα 2/3 των προϊόντων μέχρι το 2024 θα αφορούν σε λύσεις 1x10G και 1x25G καταδεικνύοντας πόσο σημαντικές είναι οι τεχνολογίες αυτές για την ανάπτυξη των διασυνδέσεων εντός υπολογιστικών κέντρων και HPCs όχι μόνο στο παρόν αλλά και στο άμεσο μέλλον [1.103]. Επιπρόσθετα, με χρήση πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος τα AOCs έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται σε όλα τα σύγχρονα standards (λ.χ. 8x25G, 10x10G, 8x50G κτλ). ένα πρόβλημα στο οποίο και η παρούσα διατριβή χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία καλείται να προσεγγίσει.



Εικόνα 11: Εκτίμηση της αγοράς Ενεργών Οπτικών Καλωδίων μέχρι το 2024 για τεχνολογίες 10G και 25G per lane.

### 1.9.1 Τεχνολογίες και Τεχνικές για αυξημένη απόδοση των Ενεργών Οπτικών Καλωδίων

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα ενεργά οπτικά καλώδια στη διασύνδεση των κέντρων δεδομένων είναι πολλά και περιγράφηκαν σε παραπάνω παράγραφο. Παράλληλα, οι διάφορες τεχνολογίες και τεχνικές προσεγγίσεις δίνουν τη δυνατότητα τα οφέλη αυτά να πολλαπλασιαστούν. Από μεριάς τεχνολογιών δύο είναι οι προσεγγίσεις πάνω στις οποίες βασίζονται οι κατασκευαστές: τα laser κάθετης κοιλότητας (VCSELs) και τα φωτονικά πυριτίου.

**VCSELs:** Τα VCSELs είναι η κινητήριος δύναμη των οπτικών διασυνδέσεων όπως περιγράφηκε και παραπάνω εξαιτίας του χαμηλού τους κόστους, της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος και της αξιοπιστίας τους. Ένα ακόμα πολύ ωφέλιμο χαρακτηριστικό τους είναι το γεγονός ότι λόγω του μικρού τους μεγέθους (20000 VCSELs μπορούν να ολοκληρωθούν σε ένα 3-inch wafer) έχουν μεγάλη ανταποδοτικότητα και μπορούν να ελεγχθούν στο επίπεδο του wafer προτού κοπούν και συσκευαστούν. Τα πολυρυθμικά VCSELs με μήκος κύματος εκπομπής στα 850 nm είναι η πιο διαδεδομένη τεχνολογία, παρόλα αυτά η υιοθέτηση δομών με μεγαλύτερο μήκος κύματος εκπομπής θεωρείται ως μια επωφελής μετάβαση καθώς θα προσφέρει βελτιωμένη απόδοση ισχύος και υψηλότερες ταχύτητες διαμόρφωσης με την ίδια αξιοπιστία. Η βασική πρόκληση στα VCSELs είναι η δυνατότητα αύξησης της ταχύτητας λειτουργίας τους εξαιτίας του γεγονότος ότι η απόδοσή τους

έχει υψηλή εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Για παράδειγμα κλασικές προσεγγίσεις περιορίζονται στα 25 Gb/s στους 55°C [1.103] κάτι το οποίο περιορίζει τις εμπορικές εφαρμογές των VCSELs σε δομές που απαιτούν υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης. Για να ξεπεραστεί αυτή η στενωπός, η κατασκευή VCSELs σε μεγάλες συστάδες μπορεί να δώσει μια λύση με σοβαρούς όμως περιορισμούς ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψιν τα ηλεκτρονικά οδήγησης (driving electronics) που αυτές απαιτούν.

**Φωτονικά πυριτίου:** Παρόλο που η τεχνολογία ημιαγωγών III-V θεωρείται η πιο ώριμη πλατφόρμα ολοκλήρωσης φωτονικών δομών διότι δίνει τη δυνατότητα κατασκευής και ενεργών στοιχείων, η τεχνολογία φωτονικών πυριτίου (silicon photonics) προβάλλει πολύ δυναμικά έχοντας ιδιαίτερα δελεαστικά χαρακτηριστικά. Αυτό διότι η χρήση του πυριτίου επιτρέπει την αξιοποίηση των υποδομών της CMOS τεχνολογίας ηλεκτρονικών κρατώντας το κόστος ανάπτυξης χαμηλά και δίνει έτσι τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής μεγάλου όγκου παθητικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Επίσης, μειώνει δραματικά το μέγεθος των chip και τη συνολική κατανάλωση ισχύος. Επίσης ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των φωτονικών πυριτίου είναι η δυνατότητα συνδυασμού τους με ηλεκτρικά κυκλώματα σε μια κοινή πλατφόρμα ολοκλήρωσης οδηγώντας έτσι σε ανάπτυξη σύνθετων δομών με μειωμένο μέγεθος και κόστος. Παρόλα αυτά η αδυναμία κατασκευής ενεργών στοιχείων παραμένει ένα από τα βασικά εμπόδια στην τεχνολογία των φωτονικών πυριτίου. Η δυνατότητα κατασκευής διαμορφωτών πυριτίου έχει προσφάτως δείχτει καθώς και η δημιουργία φωτοδεκτών σε Γερμάνιο και η ετερο-ολοκλήρωση (heterointegration) laser III-V σε πυρίτιο, όμως οι προσεγγίσεις αυτές απαιτούν σύνθετες κατασκευαστικές διαδικασίες και πολύ εξειδικευμένο εξοπλισμό κάτι το οποίο αυτομάτως αφαιρεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης της τεχνολογίας. Εταιρείες όπως η Intel και η Moxe, έχουν αναπτύξει τέτοιου τύπου δομές, βρίσκοντας το δρόμο για την εμπορική τους εκμετάλλευση [1.105], με αρκετούς όμως προβληματισμούς για τη δυνατότητα αναβάθμισής τους. Η μετάβαση σε υβριδικού τύπου προσεγγίσεις παρότι φαίνεται ότι βελτιώνουν το κομμάτι της ταχύτητας σε βάρος όμως της πρόσθετης πολυπλοκότητας και τη μη συμβατότητας με τα CMOS ηλεκτρονικά.

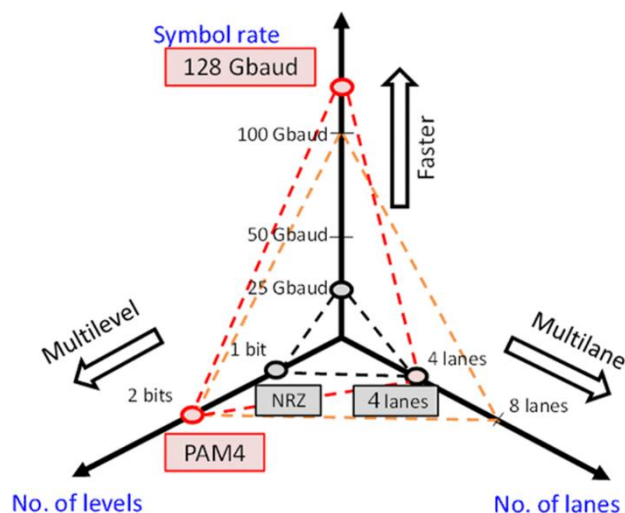
Είναι εμφανές λοιπόν ότι και οι δύο τεχνολογίες έχουν τα δυνατά τους σημεία αλλά παράλληλα έχουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αποτρέπουν τη δυνατότητα της κλιμάκωσης της απόδοσής τους. Για τον λόγο αυτό και προκειμένου οι μελλοντικές ανάγκες των ενεργών οπτικών καλωδίων να ικανοποιηθούν, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν τα κατάλληλα εργαλεία προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η πιο κλασική προσέγγιση σε αυτό το πρόβλημα είναι η παράλληλη «κίνηση» στους τρεις άξονες του παρακάτω διαγράμματος. Δηλαδή, η αύξηση της ταχύτητας, η αύξηση του σχήματος διαμόρφωσης και η αύξηση των παράλληλων γραμμών. Παράλληλα, με αυτές τις τεχνικές υπάρχει μια σειρά από άλλες δυνατότητες που κινούνται σε μια τέτοια κατεύθυνση και πιο συγκεκριμένα:

- Η **μετάβαση σε μεγαλύτερα μήκη κύματος** (1.3  $\mu\text{m}$  και 1.5  $\mu\text{m}$ ) ούτως ώστε να επιτευχθεί επέκταση της ζεύξης που μπορούν να καλύψουν τα ενεργά οπτικά καλώδια που συνήθως περιορίζεται στα 300 m. Έτσι θα καλυφθούν

όλες οι δυνατές απαιτήσεις για διασύνδεση εντός κέντρων δεδομένων. Τα φωτονικά πυριτίου εξάλλου είναι βελτιστοποιημένα στις συγκεκριμένες ζώνες μηκών κύματος ενώ και τα VCSEL επιτυγχάνουν καλύτερη απόδοση ισχύος και υψηλότερη αξιοπιστία [1.106].

- Η **υιοθέτηση της μονορυθμικής λειτουργίας** η οποία φαντάζει ως το λογικό επακόλουθο για να ξεπεραστούν οι περιορισμοί του εύρους ζώνης που προκύπτουν από της πολυρυθμικές ίνες. Με δεδομένη την απαίτηση για αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων και της απόστασης των ζεύξεων η μονορυθμική ίνα είναι η μόνη λύση η οποία μάλιστα είναι και φθηνότερη.
- Η **πολυπλεξία κατά μήκος κύματος**. Η χρήση της μονορυθμικής ίνας δίνει τη δυνατότητα για πολυπλεξία μήκους κύματος κάτι το οποίο εκτινάσσει την συνολικό όγκο μετάδοσης των δεδομένων ενώ επιτρέπει και την αποτελεσματική επαναχρησιμοποίηση των πόρων.
- Η **χωρική πολυπλεξία** με τη χρήση **πολυπύρηνων ινών** κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στις τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές. Η χρήση υψηλής ποιότητας γυάλινων ινών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους αφού περιορίζεται σημαντικά ο αριθμός και το μέγεθος των διαπαφών των πομποδεκτών. Η μικρότερη διατομή των ινών σε σύγκριση με τις δέσμες ινών (fiber bundles) μπορεί να δώσει λύση σε ζητήματα όπως ο εξαερισμός και η συνολικότερη διαχείριση των ινών τα οποία απασχολούν σε σημαντικό βαθμό τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων. Σε σύγκριση με αντίστοιχες εφαρμογές σε πολυρυθμικές ίνες [1.107], [1.108] οι πολυπύρηνες μονορυθμικές ίνες προσφέρουν βελτιωμένα χαρακτηριστικά μετάδοσης.
- Τα **σχήματα διαμόρφωσης πολλών επιπέδων** επιτρέπουν υψηλότερο throughput χωρίς να πιέζουν το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά γραμμή πέρα από τα όρια των ηλεκτρονικών οδήγησης. Ιδιαίτερα η διαμόρφωση κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών- PAM4 είναι η κυρίαρχη σε εφαρμογές διασύνδεσης όχι μόνο εντός των κέντρων δεδομένων αλλά και μεταξύ τους για αποστάσεις που φτάνουν μέχρι και τα 40 km.
- Οι **αναβαθμισμένες τεχνικές συσκευασίας** μπορούν να δώσουν πολύ σημαντικές λύσεις με δεδομένο ότι δομές με πολύ διαφορετικές λειτουργίες, όπως για παράδειγμα τα φωτονικά και τα ηλεκτρονικά, καλούνται να βρίσκονται μέσα στο ίδιο «πακέτο». Η 3D ολοκλήρωση συγκεκριμένα, επιτρέπει την βελτιστοποίηση των επιμέρους στοιχείων/λειτουργιών στο «πακέτο» με ταυτόχρονη μείωση του συνολικού αποτυπώματος. Παράλληλα, σε εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων μπορεί να ελαχιστοποιήσει τα μήκη των συρμάτων (wires) και με αυτό τον τρόπο να μειώσει τα παρασιτικά φαινόμενα και να εξαλείψει τις ωμικές απώλειες επιτυγχάνοντας σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.
- Η **διάδραση μεταξύ φωτονικών και ηλεκτρονικών**, υπό την έννοια της ευθυγράμμισης των ταχυτήτων των δυο τεχνολογιών προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση SerDes (serializer/ deserializer) οι οποίοι είναι οικονομικά και ενεργειακά ασύμφοροι.





Εικόνα 12: Αύξηση της συνολικής χωρητικότητας ως συνάρτηση της ταχύτητας, του σχήματος διαμόρφωσης και των παράλληλων γραμμών,

## 1.10 Σκοπός της έρευνας και δομή της διατριβής

### 1.10.1 Σκοπός της έρευνας

Το 2016 ο κόσμος έφτασε σε ένα ψηφιακό ορόσημο. Η παγκόσμια διαδικτυακή κίνηση (IP traffic) για πρώτη φορά ξεπέρασε το 1 zettabyte ( $10^{21}$  bytes) εκκινώντας μια νέα εποχή ανταλλαγής πολύ μεγάλων δεδομένων η οποία ονομάστηκε zettabyte era. Στην έκρηξη αυτή, κυρίαρχο ρόλο διαδραμάτισαν τρεις καθοριστικοί παράγοντες.

- Η ραγδαία αύξηση του **video streaming** με την κυρίαρχη θέση να την καταλαμβάνουν οι πλατφόρμες του Netflix (32.72%) και του YouTube (17.31%). Χαρακτηριστικό είναι ότι ενώ το 2011 το video streaming κατείχε το 25-40% της συνολικής IP κίνησης, οι εκτιμήσεις για το 2021 κάνουν λόγο για ένα ποσοστό της τάξης του 82% [1.6].
- Η αύξηση της κίνησης λόγω της **ασύρματης και κινητής τεχνολογίας**. Η πρόσβαση σε δίκτυα IP από κινητές συσκευές έχει εκτιναχθεί τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα να συμβάλει αποφασιστικά στη συνολική αύξηση της IP κίνησης. Ένα πολύ ενδιαφέρον στατιστικό είναι ότι το 2016, δηλαδή ουσιαστικά την πρώτη χρονιά της zettabyte περιόδου, την πλειοψηφία της κίνησης την κατείχαν ακόμα οι σταθερές συσκευές κάτι το οποίο αλλάζει ταχύτατα με τις προβλέψεις να ρίχνουν το ποσοστό αυτό στο 37% για το 2021 [1.6].
- Η αύξηση των **ευρυζωνικών συνδέσεων-ταχυτήτων** (broadband). Η ταχύτητα της πρόσβασης στο δίκτυο είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον όγκο της IP κίνησης ο οποίος διακινείται, όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερα δεδομένα μπορούν να διατρέχουν τα δίκτυα. Το 2016 η μέση ταχύτητα παγκοσμίως άγγιξε τα 27.5 Mbps ενώ το 2021 αναμένεται να φτάσει τα 53 Mbps δηλαδή πρακτικά να διπλασιαστεί [1.109].

Οι τρεις αυτοί πυλώνες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εκτίναξη της κίνησης την προηγούμενη περίοδο και είναι χαρακτηριστικό πως μέσα σε λιγότερο από 5 χρόνια τα νούμερά τους έχουν αλλάξει ήδη ριζικά. Λαμβάνοντας υπόψιν και το γεγονός ότι νέες τεχνολογίες ωριμάζουν με γρήγορους ρυθμούς, όπως το 5G, το IoT κ.α. και θα αρχίσουν πλέον να παίζουν και αυτές καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της κίνησης, καταλαβαίνουμε ότι η αύξηση θα συνεχίσει να είναι εκθετική. Το 2022 αναμένεται να υπάρχουν 4.8 δις χρήστες του διαδικτύου παγκοσμίως, με 28.5 δις. συνδεδεμένες συσκευές και πρόσβαση στο διαδίκτυο με μέσες ταχύτητες 75.4 Mbps [1.110]! . Κινούμαστε λοιπόν με ταχείς ρυθμούς προς την Yottabyte era [1.111], [1.112].

Στο περιβάλλον αυτό, τα κέντρα δεδομένων κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο αφού το βάρος της αποθήκευσης, διακίνησης και επεξεργασίας της πληροφορίας πέφτει επί της ουσίας πάνω τους. Γι' αυτό λοιπόν και η διασύνδεσή τους είναι εξαιρετικής σημασίας αφού ουσιαστικά είναι αυτή η οποία επιτρέπει την αδιάλειπτη κίνηση της πληροφορίας είτε εντός ενός υπολογιστικού κέντρου είτε μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών κέντρων με το σημαντικότερο βάρος να πέφτει στην πρώτη κατηγορία. Στην κατεύθυνση αυτή η φωτονική τεχνολογία έρχεται να δώσει ουσιαστική λύση ξεπερνώντας μια για πάντα τις στενωπούς που έθεταν οι παραδοσιακές διασυνδέσεις χαλκού, προσφέροντας τα πλεονεκτήματα του φωτός ως μέσου μετάδοσης της πληροφορίας. Οι οπτικοί πομποδέκτες που αναπτύσσονται προσφέρουν πολύ μεγάλες ταχύτητες, με δυνατότητα μετάδοσης σε μεγάλες αποστάσεις με λίγες απώλειες και όλα αυτά με χαμηλό οικονομικό και ενεργειακό κόστος.

Ίσως η πιο ώριμη τεχνολογία όσον αφορά στις διασυνδέσεις εντός κέντρων δεδομένων (αλλά και μεταξύ υπερυπολογιστών) είναι τα ενεργά οπτικά καλώδια που προσφέρουν αξιόπιστες λύσεις, μεγάλο εύρος ζώνης και χαμηλού κόστους. Στην ανάπτυξή τους συμβάλλουν πολύ καθοριστικά και τεχνολογίες όπως τα φωτονικά πυριτίου και τα lasers κάθετης κοιλότητας (VCSELs) πολλαπλασιάζοντας τις δυνατότητες τους. Επιπρόσθετα, ο συνδυασμός τους με μια σειρά από τεχνικές όπως τα ανώτερης τάξης σχήματα διαμόρφωσης και οι διάφοροι τύπων πολυπλεξίες (κατά μήκος κύματος, χωρική κ.α.) δίνουν σημαντική ώθηση στη χωρητικότητά (capacity) τους. Παρόλα αυτά, με το τοπίο των δικτύων να είναι ρευστό και τον όγκο της πληροφορίας που διακινείται να αυξάνεται με συντριπτικούς ρυθμούς, απαιτούνται νέες τεχνολογικές λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις των χρηστών με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Στο σημείο αυτό έρχεται από μεριάς της να συμβάλλει και η παρούσα διδακτορική διατριβή. Μελετώντας, σχεδιάζοντας και μετρώντας πειραματικά διαφορετικές οπτικές/ οπτο-ηλεκτρονικές δομές, καθώς και συνδυάζοντας νέες τεχνολογίες και τεχνικές, προτείνει μια αρχιτεκτονική ενός ενεργού οπτικού καλωδίου που απαντά στις σύγχρονες προκλήσεις των διασυνδέσεων εντός κέντρων δεδομένων. Στα πλαίσια αυτά, ο συγγραφέας στην πορεία του διδακτορικού καταπιάστηκε με:

- Τη μελέτη, το σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση δομών πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη σε πλατφόρμα SOI με δυνατότητα (απο)πολυπλεξίας κατά

μήκος κύματος και στόχο την ενσωμάτωση τους σε δομές ενεργών οπτικών καλωδίων.

- Τη μελέτη και την πειραματική αξιολόγηση δομών lasers κάθετης κοιλότητας για τη χρήση τους ως ταχύρρυθμες πηγές απευθείας διαμόρφωσης του φωτός σε ενεργά οπτικά καλώδια υψηλής χωρητικότητας.
- Τη μελέτη τρόπων διαμόρφωσης ανώτερης τάξης και τεχνικών πολυπλεξίας για την αύξηση της χωρητικότητας των ενεργών οπτικών καλωδίων.
- Τη μελέτη και την πειραματική επίδειξη διαφόρων δομών πομπού, δέκτη και διεπαφής απεμπλοκής που στόχο έχουν την οπτική διασύνδεση εντός υπολογιστικών κέντρων.

### 1.10.2 Δομή της διατριβής

Με βάση την παραπάνω περιγραφή, η παρούσα διδακτορική διατριβή ακολουθεί την παρακάτω δομή:

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του ενεργού οπτικού καλωδίου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια μια συνεργατικής ερευνητικής προσπάθειας κομμάτι της οποίας ήταν και η συγκεκριμένη δουλειά. Αναλύονται διεξοδικά τα στοιχεία, η τεχνολογική πλατφόρμα και οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη δομή. Γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στα lasers κάθετης κοιλότητας τόσο από φυσική όσο και από κατασκευαστική σκοπιά μιας και αποτελούν καθοριστικό στοιχείο του ενεργού οπτικού καλωδίου αλλά και κυρίαρχο κομμάτι της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζεται ο σχεδιασμός ενός πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη βασισμένου στις αρχές ενός συμβολομέτρου Mach-Zehnder, για να εξυπηρετήσει on-chip τεχνικές πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος πάνω σε SOI πλατφόρμα. Περιγράφεται αναλυτικά η μελέτη και ο σχεδιασμός των MMI συζευκτών που χρησιμοποιήθηκαν στη δομή, η μελέτη του ενεργού δείκτη διάθλασης των SOI κυματοδηγών της δομής και η θερμική τους εξάρτηση, καθώς και η μοντελοποίηση και προσομοίωση της συνολικής δομής του πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη. Τέλος, παρατίθεται η διαδικασία σχεδιασμού μάσκας που περιλαμβάνει τις δομές πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη και κάποια αρχικά πειραματικά αποτελέσματα μετά την κατασκευή της.

Στο **Κεφάλαιο 4**, γίνεται αναλυτική περιγραφή της τεχνολογίας των δομών Laser κάθετης κοιλότητας (VCSEL) που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια συνεργασίας με το TUM και δοκιμάστηκαν πειραματικά στο ΕΦΕ. Παρουσιάζονται διαφορετικές γενιές δομών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, από τις οποίες επιλέχθηκαν οι κατάλληλες για την κατασκευή ενός Ενεργού Οπτικού Καλωδίου για τη διασύνδεση Υπολογιστικών Κέντρων. Επίσης, επεξηγούνται αναλυτικά όλες οι πειραματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή των VCSELs.

Στο **Κεφάλαιο 5**, ερμηνεύονται τα αποτελέσματα της πειραματικής επίδειξης των δομών πομπού, δέκτη και διεπαφής απεμπλοκής που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια συνεργασίας και περιέχουν στοιχεία τα οποία σχεδιάστηκαν αλλά και μελετήθηκαν πειραματικά από τον συγγραφέα. Οι δομές αυτές αφού δοκιμάστηκαν,

ολοκληρώθηκαν σε ένα ανώτερο επίπεδο και αποτέλεσαν ένα Ενεργό Οπτικό Καλώδιο με δυνατότητα διασύνδεσης rack-to-rack εντός Υπολογιστικού Κέντρου με συνολική ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων που ξεπέρασε το 1 Tb/s.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της διατριβής ενώ προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές δραστηριότητες σε περιοχές συναφής με την παρούσα διδακτορική διατριβή, οι οποίες διαθέτουν επιστημονικό ενδιαφέρον.

Τέλος, στο **Παράρτημα Α** παρατίθεται η λίστα με τις δημοσιεύσεις του συγγραφέα σε διεθνή έγκριτα επιστημονικά περιοδικά και επιστημονικά συνέδρια με κρίση.

# Βιβλιογραφία

- [1.1] <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>
- [1.2] [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/human-capital/Deloitte\\_Review\\_26\\_Fourth\\_Industrial\\_Revolution.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/human-capital/Deloitte_Review_26_Fourth_Industrial_Revolution.pdf)
- [1.3] <https://towardsdatascience.com/is-data-really-the-new-oil-in-the-21st-century-17d014811b88>
- [1.4] <https://www.statista.com/topics/6241/coronavirus-impact-on-online-usage-in-the-us/>
- [1.5] <https://www.statista.com/statistics/1106863/covid-19-daily-in-home-data-usage-change-us-2020/>
- [1.6] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [1.7] <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/the-data-center-is-almost-dead/>
- [1.8] «Φωτονική Τεχνολογία στις Τηλεπικοινωνίες», Ηρακλή Αβραμόπουλος.
- [1.9] “Fiber Optic Communication Systems”, G. Agrawal, Wiley- Interscience.
- [1.10] <https://www.ibm.com/cloud/learn/data-centers>
- [1.11] <https://www.isaca.org/resources/news-and-trends/isaca-now-blog/2020/storing-for-the-future-how-data-centers-will-advance-in-2020>
- [1.12] <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/data-center-virtualization/what-is-a-data-center.html#~:infrastructure-evolution>
- [1.13] <https://www.ciena.com/insights/infobriefs/Data-Center-Interconnect-Challenges-prx.html>
- [1.14] D. Tsiokos, G.T. Kanellos, 2 - Optical interconnects: Fundamentals, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Optical Interconnects for Data Centers, Woodhead Publishing, 2017, Pages 43-73.
- [1.15] Qixiang Cheng, Meisam Bahadori, Madeleine Glick, Sébastien Rumley, and Keren Bergman, "Recent advances in optical technologies for data centers: a review," Optica 5, 1354-1370 (2018)
- [1.16] [https://www.ieee802.org/3/hssg/public/nov06/diminico\\_01\\_1106.pdf](https://www.ieee802.org/3/hssg/public/nov06/diminico_01_1106.pdf)
- [1.17] <https://phoenixnap.com/blog/data-center-tiers-classification>
- [1.18] <https://www.networkworld.com/article/3599213/what-are-data-centers-how-they-work-and-how-they-are-changing-in-size-and-scope.html>
- [1.19] <https://www.cloverinfotech.com/blog/5-advantages-of-adopting-a-cloud-based-data-center/>
- [1.20] <https://www.flatworldsolutions.com/IT-services/articles/advantages-disadvantages-data-center-outsourcing.php>
- [1.21] <https://www.vxchnge.com/blog/pros-cons-on-prem-colocation-cloud>
- [1.22] <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-photonics.html>
- [1.23] <https://www.researchandmarkets.com/reports/4986691/global-photonics-market-forecasts-from-2020-2025>
- [1.24] <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-photonic-integrated-circuit.html>

- [1.25] [http://www.photonics.ntua.gr/OptikaDiktyaEpikoinwnias/Lecture\\_6\\_Integration.pdf](http://www.photonics.ntua.gr/OptikaDiktyaEpikoinwnias/Lecture_6_Integration.pdf)
- [1.26] J. E. Bowers, "Evolution of photonic integrated circuits," 2017 75th Annual Device Research Conference (DRC), South Bend, IN, USA, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/DRC.2017.7999388.
- [1.27] [https://europractice-ic.com/SiPhotonics\\_general.php](https://europractice-ic.com/SiPhotonics_general.php)
- [1.28] <https://www.epic-assoc.com/technology/photonic-integrated-circuits/>
- [1.29] <http://pics4all.jeppix.eu/>
- [1.30] <https://www.jeppix.eu/>
- [1.31] Dabos G, Bolten J, Prinzen A, Giesecke AL, Pleros N, Tsiokos D. Perfectly vertical and fully etched SOI grating couplers for TM polarization. *Opt. Communications* 2015.
- [1.32] Karinou F, Borkowski R, Zibar D, Roudas I, Vlachos KG, Tafur Monroy I. Advanced modulation techniques for high-performance computing optical interconnects. *IEEE J Sel Top Quantum Electron* 2013.
- [1.33] <https://www.nature.com/articles/s41377-020-0325-9>
- [1.34] <https://www.osapublishing.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-44-7-1821>
- [1.35] Wu, F., VJ, L., Islam, M.S. et al. Integrated receiver architectures for board-to-board free-space optical interconnects. *Appl. Phys. A* 95, 1079–1088 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00339-009-5114-5>.
- [1.36] Xiaohui Lin, Amir Hosseini, Xinyuan Dou, Harish Subbaraman, and Ray T. Chen, "Low-cost board-to-board optical interconnects using molded polymer waveguide with 45 degree mirrors and inkjet-printed micro-lenses as proximity vertical coupler," *Opt. Express* 21, 60-69 (2013).
- [1.37] Qixiang Cheng, Madeleine Glick, Keren Bergman, Chapter 18 - Optical interconnection networks for high-performance systems, Editor(s): Alan E. Willner, *Optical Fiber Telecommunications VII*, Academic Press, 2020, Pages 785-825,
- [1.38] J. J. Maki, "Evolution of Pluggable Optics and What Is Beyond," in *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper Th3A.2.
- [1.39] Yu Gong, Xuezhi Hong, Yang Lu, Sailing He, and Jiajia Chen, "Passive optical interconnects at top of the rack: offering high energy efficiency for datacenters," *Opt. Express* 23, 7957-7970 (2015).
- [1.40] Dimitrios Apostolopoulos, Paraskevas Bakopoulos, Dimitrios Kalavrouziotis, Giannis Giannoulis, Giannis Kanakis, Nikos Iliadis, Christos Spatharakis, Johan Bauwelinck, Hercules Avramopoulos, "Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects," *Proc. SPIE* 8991, *Optical Interconnects XIV*, 89910D (8 March 2014).

- [1.41] N. Terzenidis, M. Moralis-Pegios, S. Pitris, G. Mourgias-Alexandris, C. Mitsolidou, K. Fotiadis, K. Vysokinos, T. Alexoudi, N. Pleros, "Board- and rack-scale optical interconnection architectures for disaggregated data centers," Proc. SPIE 11286, Optical Interconnects XX, 1128606 (28 February 2020).
- [1.42] <https://www.neophotonics.com/understanding-intra-data-center-interconnect/>
- [1.43] <https://www.neophotonics.com/what-is-inter-data-center-interconnect-dci/>
- [1.44] <https://www.datacenterknowledge.com/industry-perspectives/coherent-vs-direct-detection-metro-data-center-interconnectivity>
- [1.45] Saurabh Kumar, George Papen, Katharine Schmidtke, Chongjin Xie, Chapter 14 - Intra-data center interconnects, networking, and architectures, Editor(s): Alan E. Willner, Optical Fiber Telecommunications VII, Academic Press, 2020.
- [1.46] A. Singh, J. Ong, A. Agarwal, G. Anderson, A. Armistead, R. Bannon, S. Boving, G. Desai, B. Felderman, P. Germano, A. Kanagala, H. Liu, J. Provost, J. Simmons, E. Tanda, J. Wanderer, U. Holzle, S. Stuart, and A. Vahdat, "Jupiter rising: a decade of Clos topologies and centralized control in Google's datacenter network," Commun. ACM 59, 88–97 (2016).
- [1.47] C. F. Lam, "Optical network technologies for datacenter networks (invited paper)," in Conference on Optical Fiber Communication (OFC/NFOEC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference (2010).
- [1.48] [https://www.lightcounting.com/News\\_100218.cfm](https://www.lightcounting.com/News_100218.cfm)
- [1.49] K. Zhong, et al., "400 Gbps PAM-4 Signal Transmission Using a Monolithic Laser Integrated Silicon Photonics Transmitter," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019.
- [1.50] Eslam El-Fiky, et al., "First demonstration of a 400 Gb/s 4λ CWDM TOSA for datacenter optical interconnects," Opt. Express 26, 19742-19749 (2018)
- [1.51] Verbist J, et al. First real-time demonstration of 128 Gb/s PAM-4 transmission over 1 km SMF using a Si Photonics transmitter. 2018.
- [1.52] J. Zhang, et al., "Demonstration of 260-Gb/s Single-Lane EML-Based PS-PAM-8 IM/DD for Datacenter Interconnects," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, OSA.
- [1.53] J. Verbist, et al., "104 Gbaud OOK and PAM-4 Transmission over 1km of SMF using a Silicon Photonics Transmitter with Quarter-Rate Electronics," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019.
- [1.54] <http://investor.finisar.com/news-releases/news-release-details/finisar-introduces-400g-qsfp-dd-dr4-transceiverdata-center>
- [1.55] <https://www.mwee.com/news/colorchip-tests-next-generation-400g-qsfp-dd-fr4-optical-transceiver>
- [1.56] [https://www.mellanox.com/news/press\\_release/mellanox-showcases-live-system-demonstrations-linkxac-200g-400g-cables-transceivers-ofc-2019](https://www.mellanox.com/news/press_release/mellanox-showcases-live-system-demonstrations-linkxac-200g-400g-cables-transceivers-ofc-2019)
- [1.57] <https://www.prnewswire.com/news-releases/innolight-technology-conducts-live-demo-of-400g-qsfp-dd-fr4-opticaltransceivers-at-ofc-2018-300609601.html>

- [1.58] <http://kaiam.com/?p=8679>
- [1.59] <https://www.lumentum.com/en/products/qsfp56-dd-400g-fr4-optical-transceiver>
- [1.60] <https://www.lightwaveonline.com/data-center/article/16654650/data-center-interconnects-the-road-to-400g-and-beyond>
- [1.61] <https://www.gigalight.com/show-654.html>
- [1.62] D. M. Kuchta, A. V. Rylyakov, F. E. Doany, C. L. Schow, J. E. Proesel, C. W. Baks, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, and A. Larsson, "A 71-Gb/s NRZ modulated 850-nm VCSEL-based optical link," *IEEE Photon. Technol. Lett.* 27, 577–580 (2015).
- [1.63] R. Puerta, M. Agustin, L. Chorchos, J. Toński, J. R. Kropp, N. Ledentsov, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, R. Henker, I. T. Monroy, J. J. V. Olmos, and J. P. Turkiewicz, "107.5 Gb/s 850 nm multi- and single-mode VCSEL transmission over 10 and 100 m of multi-mode fiber," in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* (2016).
- [1.64] C. Kottke, C. Caspar, V. Jungnickel, R. Freund, M. Agustin, and N. N. Ledentsov, "High speed 160 Gb/s DMT VCSEL transmission using pre-equalization," in *Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, California (2017).
- [1.65] E. Haglund, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, E. P. Haglund, A. Larsson, M. Geen, and A. Joel, "30 GHz bandwidth 850 nm VCSEL with sub-100 fJ/bit energy dissipation at 25–50 Gbit/s," *Electron. Lett.* 51, 1096–1098 (2015).
- [1.66] F. Karinou, N. Stojanovic, C. Prodaniuc, Z. Qiang, and T. Dippon, "112 Gb/s PAM-4 optical signal transmission over 100-m OM4 multimode fiber for high-capacity data-center interconnect," in *42<sup>nd</sup> European Conference on Optical Communication (ECOC)* (2016).
- [1.67] D. M. Kuchta, T. Huynh, F. Doany, A. Rylyakov, C. L. Schow, P. Pepeljugoski, D. Gazula, E. Shaw, and J. Tatum, "A 4- $\lambda$  40 Gb/s/ $\lambda$  bandwidth extension of multimode fiber in the 850 nm rang," in *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* (2015).
- [1.68] Y. Sun, R. Lingle, R. Shubochkin, A. H. Mccurdy, K. Balemarthy, D. Braganza, J. Kamino, T. Gray, W. Fan, K. Wade, F. Chang, D. Gazula, G. Landry, J. Tatum, and S. Bhoja, "SWDM PAM4 transmission Review Article Vol. 5, No. 11 / November 2018 / *Optica* 1366 over next generation wide-band multimode optical fiber," *J. Lightwave Technol.* 35, 690–697 (2017).
- [1.69] A. De Groote, P. Cardile, A. Z. Subramanian, A. M. Fecioru, C. Bower, D. Delbeke, R. Baets, and G. Roelkens, "Transfer-printing-based integration of single-mode waveguide-coupled III-V-on-silicon broadband light emitters," *Opt. Express* 24, 13754–13762 (2016).
- [1.70] S. Arai, N. Nishiyama, T. Maruyama, and T. Okumura, "GaInAsP/InP membrane lasers for optical interconnects," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 17, 1381–1389 (2011).



- [1.71] S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka, “40-Gbit/s direct modulation of membrane buried heterostructure DFB laser on SiO<sub>2</sub>/Si substrate,” in International Semiconductor Laser Conference (2014).
- [1.72] A. W. Fang, H. Park, O. Cohen, R. Jones, M. J. Paniccia, and J. E. Bowers, “Electrically pumped hybrid AlGaInAs-silicon evanescent laser,” *Opt. Express* 14, 9203–9210 (2006).
- [1.73] H. Duprez, A. Descos, T. Ferrotti, C. Sciancalepore, C. Jany, K. Hassan, C. Seassal, S. Menezo, and B. Ben Bakir, “1310 nm hybrid InP/InGaAsP on silicon distributed feedback laser with high side-mode suppression ratio,” *Opt. Express* 23, 8489–8497 (2015).
- [1.74] B. R. Koch, E. J. Norberg, B. Kim, J. Hutchinson, J.-H. Shin, G. Fish, and A. Fang, “Integrated silicon photonic laser sources for telecom and datacom,” in Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, California (2013).
- [1.75] S. Chen, W. Li, J. Wu, Q. Jiang, M. Tang, S. Shutts, S. N. Elliott, A. Sobiesierski, A. J. Seeds, I. Ross, P. M. Smowton, and H. Liu, “Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot lasers on silicon,” *Nat. Photonics* 10, 307–311 (2016).
- [1.76] J. E. Bowers, J. T. Bovington, A. Y. Liu, and A. C. Gossard, “A path to 300 mm hybrid silicon photonic integrated circuit,” in OFC (2014).
- [1.77] A. Kovsh, I. Krestnikov, D. Livshits, S. Mikhlin, J. Weimert, and A. Zhukov, “Quantum dot laser with 75 nm broad spectrum of emission,” *Opt. Lett.* 32, 793–795 (2007).
- [1.78] M. A. Mestre, H. Mardoyan, C. Caillaud, R. Rios-Müller, J. Renaudier, P. Jennevé, F. Blache, F. Pommereau, J. Decobert, F. Jorge, P. Charbonnier, A. Konczykowska, J.-Y. Dupuy, K. Mekhazni, J.-F. Paret, M. Faugeron, F. Mallecot, M. Achouche, and S. Bigo, “Compact InP-based DFB-EAM enabling PAM-4 112 Gb/s transmission over 2 km,” *J. Lightwave Technol.* 34, 1572–1578 (2016).
- [1.79] S. Kanazawa, T. Fujisawa, K. Takahata, T. Ito, Y. Ueda, W. Kobayashi, H. Ishii, and H. Sanjoh, “Flip-chip interconnection lumped-electrode EADFB laser for 100-Gb/s/ $\lambda$  transmitter,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* 27, 1699–1701 (2015).
- [1.80] Y. Tang, J. D. Peters, and J. E. Bowers, “Over 67 GHz bandwidth hybrid silicon electroabsorption modulator with asymmetric segmented electrode for 1.3  $\mu$ m transmission,” *Opt. Express* 20, 11529–11535 (2012).
- [1.81] S. Jongthammanurak, J. Liu, K. Wada, D. D. Cannon, D. T. Danielson, D. Pan, L. C. Kimerling, and J. Michel, “Large electro-optic effect in tensile strained Ge-on-Si films,” *Appl. Phys. Lett.* 89, 161115 (2006).
- [1.82] Y.-H. Kuo, Y. K. Lee, Y. Ge, S. Ren, J. E. Roth, T. I. Kamins, D. A. B. Miller, and J. S. Harris, “Strong quantum-confined Stark effect in germanium quantum-well structures on silicon,” *Nature* 437, 1334–1336 (2005).

- [1.83] J. Sun, M. Sakib, J. Driscoll, R. Kumar, H. Jayatilleka, Y. Chetrit, and H. Rong, "A 128 Gb/s PAM4 silicon microring modulator," in *Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)* (2018).
- [1.84] R. Dubé-Demers, S. Larochelle, and W. Shi, "Ultrafast pulse-amplitude modulation with a femtojoule silicon photonic modulator," *Optica* 3, 622–627 (2016).
- [1.85] C.-H. Chen, M. A. Seyedi, M. Fiorentino, D. Livshits, A. Gubenko, S. Mikhlin, V. Mikhlin, and R. G. Beausoleil, "A comb laser-driven DWDM silicon photonic transmitter based on microring modulators," *Opt. Express* 23, 21541–21548 (2015).
- [1.86] Q. Xu, B. Schmidt, J. Shakya, and M. Lipson, "Cascaded silicon microring modulators for WDM optical interconnection," *Opt. Express* 14, 9431–9436 (2006).
- [1.87] H. Ito, S. Kodama, Y. Muramoto, T. Furuta, T. Nagatsuma, and T. Ishibashi, "High-speed and high-output InP-InGaAs untraveling-carrier photodiodes," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 10, 709–727 (2004).
- [1.88] F. Nakajima, M. Nada, and T. Yoshimatsu, "High-speed avalanche photodiode and high-sensitivity receiver optical subassembly for 100 Gb/s ethernet," *J. Lightwave Technol.* 34, 243–248 (2016).
- [1.89] Z. Huang, C. Li, D. Liang, K. Yu, C. Santori, M. Fiorentino, W. Sorin, S. Palermo, and R. G. Beausoleil, "25 Gbps low-voltage waveguide SiGe avalanche photodiode," *Optica* 3, 793–798 (2016).
- [1.90] T. Ishibashi, T. Furuta, H. Fushimi, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, N. Shimizu, and Y. Miyamoto, "InP/InGaAs uni-traveling-carrier photodiodes," *IEICE Trans. Electron.* 83, 938–949 (2000).
- [1.91] T. Saeki, S. Sato, M. Kurokawa, A. Moto, M. Suzuki, K. Tanaka, K. Tanaka, N. Ikoma, and Y. Fujimura, "100 Gbit/s compact transmitter module integrated with optical multiplexer," in *IEEE Photonics Conference* (2013).
- [1.92] A. Stavdas, P. Bayvel, and J. E. Midwinter, *Design and Performance of Concave Holographic Gratings for Applications as Multiplexers/Demultiplexers for Wavelength Routed Optical Networks* (SPIE, 1996).
- [1.93] S. Kamei, M. Ishii, I. Kitagawa, M. Itoh, and Y. Hibino, "64-channel ultralow crosstalk arrayed-waveguide grating multi/demultiplexer module using cascade connection technique," *Electron. Lett.* 39, 81–82 (2003).
- [1.94] X. J. M. L. M. Nikoufard, Y. C. Zhu, J. J. M. Kwaspen, E. A. J. M. Bente, and M. K. Smit, "An 8 × 25 GHz Polarization-Independent Integrated Multi-Wavelength Receiver," in *Optical Amplifiers and Their Applications/Integrated Photonics Research, Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2004), paper IThB2.
- [1.95] X. Wang, S. Xiao, W. Zheng, F. Wang, Y. Li, Y. Hao, X. Jiang, M. Wang, and J. Yang, "Athermal silicon arrayed waveguide grating with polymerfilled slot structure," *Opt. Commun.* 282, 2841–2844 (2009).

- [1.96] M. Bahadori, S. Rumley, H. Jayatilleka, K. Murray, N. A. F. Jaeger, L. Chrostowski, S. Shekhar, and K. Bergman, "Crosstalk penalty in microring-based silicon photonic interconnect systems," *J. Lightwave Technol.* 34, 4043–4052 (2016).
- [1.97] C. L. Manganeli, P. Pintus, F. Gambini, D. Fowler, M. Fournier, S. Faralli, C. Kopp, and C. J. Oton, "Large-FSR thermally tunable double-ring filters for WDM applications in silicon photonics," *IEEE Photon. J.* 9, 1–10 (2017).
- [1.98] G. Pouloupoulos et al., "Air Trenches-Assisted Highly Selective, Fully Flexible SOI Filtering Element," 2019 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1-3.
- [1.99] N. Iliadis et al., "16 × 1 Packaged MUX/DEMUX for Flexible-Grid Optical Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 14, pp. 3050-3059, 15 July 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2711646.
- [1.100] G. Kanakis, et al., "16×1 Dual Polarization SOI MUX/DEMUX for Flexible-Grid Optical Networks," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016)*, paper W2A.17.
- [1.101] <https://community.mellanox.com/s/article/introduction-to-active-optical-cables--aocs-x>
- [1.102] <https://www.wireandcabletips.com/what-are-active-optical-cables/>
- [1.103] <https://www.lightcounting.com/light-trends/active-optical-cables-aocs-and-embedded-optical-modules-eoms-are-moving-higher-speeds/>
- [1.104] M. Muller et. al., "1550-nm High-Speed Short-Cavity VCSELs", *IEEE Journal Sel. Top. Quant. Electr.*, vol. 17, no. 5, September/October 2011.
- [1.105] "The InfiniBand roadmap gets redrawn", *Gazettabyte* article, Wednesday June 2, 2010, available online: <http://www.gazettabyte.com/home/2010/6/2/the-infiniband-roadmap-gets-redrawn.html>.
- [1.106] E. Kapon and A. Sirbu, "Long-wavelength VCSELs: Power-efficient answer", *Nature Photonics* 3, 27 – 29 (2009).
- [1.107] S. Loquai et. al., "10.7Gb/s discrete multitone transmission over 25m bend-insensitive multicore Polymer Optical Fiber", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22 n. 21, 01/11/2010, pp. 1604-1606.
- [1.108] B. G. Lee et. al., "120-Gb/s 100-m Transmission in a Single Multicore Multimode Fiber Containing Six Cores Interfaced with a Matching VCSEL Array", in *Proc. IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series 2010*, 19-21 July 2010 Playa del Carmen, pp. 223 – 224.
- [1.109] <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/photronics-market-market>
- [1.110] <https://www.techrepublic.com/article/the-internet-will-add-1-4-billion-new-users-by-2022-as-the-world-enters-the-multi-zettabyte-era/>
- [1.111] <https://now.northropgrumman.com/zipping-past-the-zettabyte-era-whats-next-for-the-internet/>
- [1.112] <https://www.arnnet.com.au/brand-post/content/680811/where-are-you-going-to-keep-your-yottabytes-the-new-era-of-storage/>

# Κεφάλαιο 2 Δομικά στοιχεία και Αρχιτεκτονική Ενεργού Οπτικού Καλωδίου

Έχοντας περιγράψει το τοπίο όσον αφορά στη διακίνηση της πληροφορίας σήμερα και δίνοντας βαρύτητα στο κομμάτι των διασυνδέσεων εντός των κέντρων δεδομένων, στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί πιο συγκεκριμένα μια πρόταση ανάπτυξης ενός ενεργού οπτικού καλωδίου. Η δομή αυτή η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια συνεργασίας του ΕΦΕ με άλλα πανεπιστήμια και φορείς, έχει κάποιες χαρακτηριστικά που το καθιστούν καινοτόμο στην υπερνίκηση των εμποδίων που ανέκυψαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αφού παρουσιαστεί συνολικά η αρχιτεκτονική του, στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα δοθεί μια πιο ενδοσκοπική ματιά στα στοιχεία που το συναποτελούν, τις διάφορες τεχνικές και τεχνολογίες που επιστρατεύθηκαν. Εξάλλου η παρούσα διατριβή, πέρα από το γεγονός ότι πειραματικά αξιολογεί τη δομή αυτή έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη και των δομικών της στοιχείων.

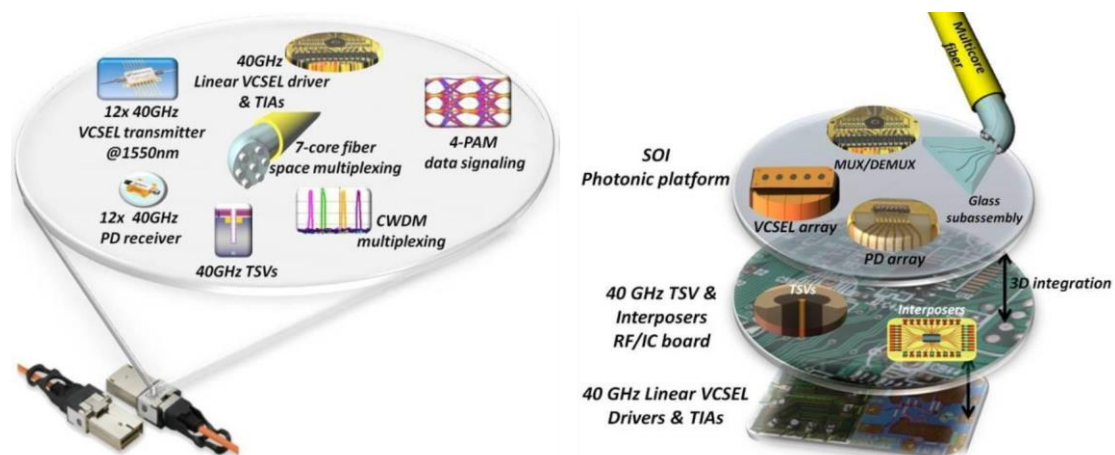
## 2.1 Αρχιτεκτονική του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου

Με βάση τη λογική που αναπτύχθηκε στο τέλος του πρώτου κεφαλαίου αναφορικά με τα εργαλεία και τις τεχνολογίες που έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν τις υφιστάμενες δομές ενεργών οπτικών καλωδίων, προτάθηκε μια δομή η οποία αποτελεί επι της ουσίας μια ευέλικτη «οπτική μηχανή» με δυνατότητα συνολικής χωρητικότητας της τάξης του terabit. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν στοιχεία με ταχύτητες που έφταναν μέχρι και τα 80 Gb/s ανά κανάλι, με μονορυθμική λειτουργία, ενώ παράλληλα έγινε χρήση χωρικής πολυπλεξίας (πολυπύρηνη ίνα), πολυπλεξίας μήκους κύματος καθώς και διαμόρφωσης ανώτερης τάξης. Επιπρόσθετα, προκειμένου η υλοποίηση αυτή να έχει χαμηλό κόστος, επιστρατεύθηκε ένα μείγμα από καθιερωμένες τεχνολογίες ενεργών οπτικών καλωδίων (VCSELs, φωτονικά πυριτίου) και καινοτόμων μεθόδων 3D ολοκλήρωσης. Η πλατφόρμα του πυριτίου προσφέρει μεγάλη αξιοπιστία και οικονομική αποτελεσματικότητα καθώς και τη δυνατότητα για πυκνή ολοκλήρωση παθητικών και ενεργών δομών υψηλής απόδοσης χάρις στο ανεπτυγμένο οπλοστάσιο των φωτονικών πυριτίου.

Έτσι λοιπόν αναπτύχθηκαν VCSELs με μήκος κύματος εκπομπής γύρω από τα 1550 nm σε πλατφόρμα InP, με δυνατότητα μετάδοσης στα 40 Gbaud και λειτουργίας σε θερμοκρασίες έως και 60°C. Τα VCSELs αυτά κατασκευάστηκαν με κατάλληλο τρόπο προκειμένου να μπορούν να προσδεθούν (bond) πάνω σε υπόστρωμα SOI και κατά αυτό τον τρόπο να η συνολική διάταξη να ωφεληθεί από τα πλεονεκτήματα και των δυο αυτών τεχνολογιών. Για να επιτευχθεί η δυνατότητα πολυπλεξίας στο μήκος κύματος στην πλατφόρμα, αναπτύχθηκαν μονολιθικές συστάδες VCSELs δώδεκα

στοιχείων με αποστάσεις κεντρικών μηκών κύματος εκπομπής στα 10 nm. Για τη σύζευξη του φωτός μέσα στην πολυπύρηνη ίνα, αναπτύχθηκαν 3D κυματοδηγοί εγγεγραμμένοι μέσα σε γυαλί, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για πρώτη φορά να συνυπάρχει η SOI πλατφόρμα με πολυπύρηνες ίνες. Στη μεριά των ηλεκτρονικών, κατασκευάστηκαν συστάδες γραμμικών οδηγών VCSELs και TIAs σε πυρίτιο επιτρέποντας τη λειτουργία με σχήματα διαμόρφωσης πολλαπλών επιπέδων σε ταχύτητες έως και 40 Gbaud. Τέλος, για το συνδυασμό των ηλεκτρονικών και των φωτονικών στην ίδια πλατφόρμα πυριτίου, χρησιμοποιήθηκε μια καινοτόμα μέθοδος 3D ολοκλήρωσης (με νίσις πυριτίου και interposers) [2.1]-[2.4].

Ο συνδυασμός όλων αυτών των τεχνολογιών, οδηγεί σε εντυπωσιακά αποτελέσματα σε σχέση με τις υπάρχουσες λύσεις ενεργών οπτικών καλωδίων. Αρχικά, στο κομμάτι του ρυθμού μετάδοσης ανά κανάλι, σημειώνει μια αύξηση της τάξης του 60%. Ο συνδυασμός με διαφορετικού είδους πολυπλεξίες (χωρική και μήκους κύματος) και σχήματα διαμόρφωσης ανώτερης στάθμης οδήγησε σε αύξηση +640% σε συνολική χωρητικότητα με 70% λιγότερη κατανάλωση ισχύος [2.5]-[2.10]. Επιπλέον, η τεχνολογία του ενεργού οπτικού καλωδίου αυτού επιτρέπει τη μαζική του παραγωγή αφού δεν διαθέτει καθετοποιημένη λογική στον τρόπο ανάπτυξής του.



Εικόνα 13: Η αρχιτεκτονική του ενεργού οπτικού καλωδίου με αποτυπωμένες τόσο τις βασικές καινοτομίες όσο και τον τρόπο της 3D ολοκλήρωσής τους πάνω στην πλατφόρμα.

### 2.1.1 Καινοτομίες γύρω από την ανάπτυξη του ενεργού οπτικού καλωδίου

Στην παρακάτω παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια αναφοράς των βασικών καινοτομιών που συνέβαλλαν στην ανάπτυξη του ενεργού οπτικού καλωδίου με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

**VCSELs:** Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, αναπτύχθηκαν VCSELs υψηλής ταχύτητας (40 Gaud) με μήκος κύματος λειτουργίας στην περιοχή των 1550 nm με δυνατότητα λειτουργίας σε θερμοκρασίες έως και 60°C. Η επίδοση αυτή είναι σημαντική αφού αποτελεί ουσιαστικά βελτίωση κατά 60% των μέχρι εκείνη τη στιγμή εμπορικά διαθέσιμων VCSEL μεγάλου μήκους κύματος. Επίσης και η ανοχή στη θερμοκρασία ήταν άλλος ένας παράγοντας καινοτομίας με τις αντίστοιχες εμπορικές δομές μέχρι τότε να έχουν σχεδόν 10% ανοχές. Πρέπει να σημειωθεί ότι η

δυνατότητα λειτουργίας σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες, εξασφαλίζει καλύτερη επίδοση αλλά και ενεργειακή κατανάλωση αν λάβει κανείς υπόψιν ότι το ζήτημα της ψύξης των κέντρων δεδομένων είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος [2.11], [2.12]. Προκειμένου το ενεργό οπτικό καλώδιο να έχει τη δυνατότητα πολυπλεξίας κατά μήκος κύματος, τα VCSELs αναπτύχθηκαν σε συστάδες με διαφορές κεντρικών μηκών κύματος εκπομπής στα 10 nm. Τέλος, τα VCSELs αναπτύχθηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να είναι κατάλληλα για flip-chip πρόσδεση στη SOI πλατφόρμα. Για το λόγο αυτό, οι θερμικές, οπτικές, μηχανικές και μικροκυματικές τους ιδιότητες σχεδιάστηκαν προσεκτικά για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα στη λειτουργία τους χωρίς περαιτέρω υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Τα VCSELs αναπτύχθηκαν στο Πολυτεχνείο του Μονάχου (TUM).

**Ανάπτυξη μιας οπτικής μηχανής με 3D ολοκλήρωση:** Με τον όρο οπτική μηχανή εννοούμε μια δομή η οποία διαθέτει τα κατάλληλα φωτονικά και ηλεκτρονικά στοιχεία για να είναι πλήρως λειτουργική στο ρόλο τον οποίο καλείται να επιτελέσει. Στα πλαίσια λοιπόν της ανάπτυξης του ενεργού οπτικού καλωδίου που παρουσιάζεται, έγινε σημαντική μελέτη για τον τρόπο με τον οποίο θα επιτευχθεί αυτού του τύπου η ολοκλήρωση. Προκειμένου τα φωτονικά και ηλεκτρονικά στοιχεία να είναι χωροθετημένα με το βέλτιστο τρόπο πάνω στην πλατφόρμα του ενεργού οπτικού καλωδίου, ακολουθήθηκε μια λογική ολοκλήρωσης σε στοιβάδες (layer stacks). Πιο συγκεκριμένα, κατασκευάστηκε ένα οπτικό SOI board με συζεύκτες τύπου grating (grating couplers), κατάλληλα σχεδιασμένους για κάθετη σύζευξη του φωτός με καλή απόδοση και μικρές απώλειες ανακλάσεων. Στην κατεύθυνση αυτή κατασκευάστηκαν και γραμμικοί οδηγητές και TIAs στα 40 Gbaud σε συστάδες των τεσσάρων με τις αντίστοιχες διεπαφές τους ούτως ώστε να μπορούν να διασυνδεθούν με τα ανάλογα οπτο-ηλεκτρονικά στοιχεία.

Για να ακολουθηθεί μια 3D λογική αρχιτεκτονικής στο ενεργό οπτικό καλώδιο, χρησιμοποιήθηκαν through silicon vias (TSVs) που επι της ουσίας αποτελούν ηλεκτρικές συνδέσεις που περνάνε διαμέσου του wafer πυριτίου, μικραίνοντας την απόσταση της ηλεκτρικής διασύνδεσης σε αντίθεση με άλλους τύπους (π.χ. με wire bonding), επιτρέποντας υψηλότερες ταχύτητες και μικρότερη απαγωγή θερμότητας [2.13]. Επιπρόσθετα, για να προσδεθούν τα ενεργά στοιχεία (VCSELs και φωτοδιόδοι) πάνω στην πλατφόρμα πυριτίου με μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ευθυγράμμισης υψηλής ακρίβειας (της τάξης του 1 μm). Τέλος, για την διασύνδεση των υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικών στην 3D στοιβάδα επιστρατεύτηκαν τεχνικές πρόσδεσης με παρεμβολείς (interposers) πυριτίου. Στην πραγματοποίηση αυτής της 3D δομής, συνεργάστηκαν μαζί με το ΕΦΕ, το ΑΠΘ, το ινστιτούτο IMEC (Βέλγιο) και οι εταιρείες AMO και AMS.

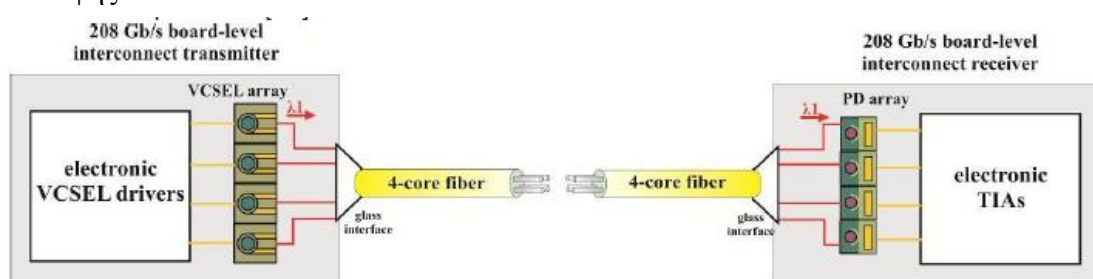
**Χρήση πολλών επιπέδων παραλληλοποίησης:** Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια σειρά από τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του ενεργού οπτικού καλωδίου. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε σχήμα διαμόρφωσης κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών (PAM-4) για να επιτευχθεί συνολική ταχύτητα ανά VCSEL της τάξης των 80 Gb/s [2.14]. Ο τρόπος διαμόρφωσης αυτός διευκολύνεται από τη γραμμική περιοχή του VCSEL (όσο μεγαλύτερη γραμμική

περιοχή τόσο πιο εύκολο το να «χωρέσουν» περισσότερες στάθμες ισχύος) αλλά και από τη γραμμικότητα που επιδεικνύουν τα ηλεκτρονικά στοιχεία της δομής, δηλαδή οι οδηγητές και οι TIAs. Η συνολική κατανάλωση ισχύος ανά bit με τη χρήση και της PAM-4 διαμόρφωσης κατέληξε στα 3.5 mW/Gb/s μια τιμή η οποία είναι κοντά στο 70% λιγότερη από άλλες υλοποιήσεις ενεργών οπτικών καλωδίων. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν στην πλατφόρμα του πυριτίου δομές πολυπλεξίας και αποπολυπλεξίας βασισμένες σε συμβολόμετρα Mach-Zehnder, κατάλληλα σχεδιασμένες για σήματα τα οποία απέχουν 10 nm μεταξύ τους. Τέλος, για να γίνει δυνατή η χωρική πολυπλεξία, δηλαδή η χρήση πολυπύρηνης ίνας, αναπτύχθηκαν κατάλληλες διεπαφές βασισμένες σε 3D γυαλιά. Οι δομές αυτές μεταφράζουν την κυκλική κατανομή του φωτός μέσα στους πυρήνες της ίνας σε γραμμική πραγματοποιώντας ταυτόχρονα εναλλαγή ρυθμού (mode conversion) ούτως ώστε να το φως να συζευχθεί με λίγες απώλειες (1dB) στο SOI chip.

### 2.1.2 Πολύ υψηλής χωρητικότητας οπτικές διασυνδέσεις

Στόχος της έρευνας που διενεργήθηκε, κομμάτι της οποίας είναι και η παρούσα διατριβή, υπήρξε η ανάπτυξη ενός Ενεργού Οπτικού Καλωδίου που θα διευκολύνει την οπτική διασύνδεση εντός υπολογιστικών κέντρων δεδομένων, με υψηλή ταχύτητα και με βέλτιστο τρόπο από τη σκοπιά της ενέργειας που καταναλώνεται. Σε αυτή την κατεύθυνση ανάπτυξης υπήρξαν συγκεκριμένα βήματα ανάπτυξης πρωτοτύπων προκειμένου να μετρηθούν και να αξιολογηθούν σε μια σειρά παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα καθορίστηκαν τρεις δομές οπτικών πομποδεκτών:

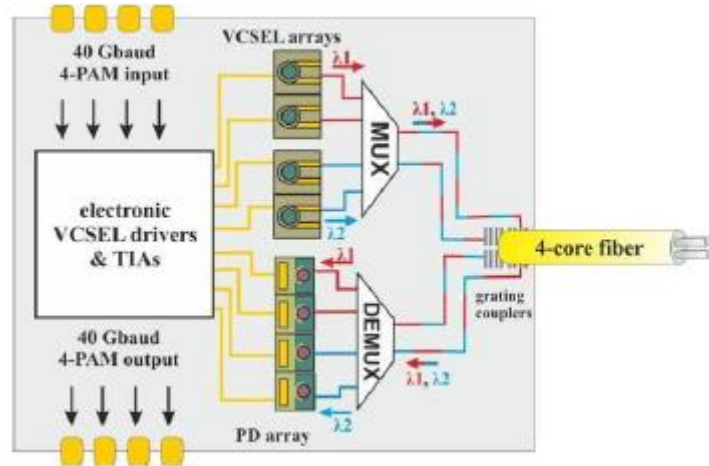
**Ένας 208 Gb/s πομποδέκτης σε για συνδέσεις board-to-board:**  
 Πραγματοποιήθηκε η κατασκευή μιας διασύνδεσης τεσσάρων καναλιών με ένα πλήρως λειτουργικό πομπό και δέκτη. Η μεταξύ τους διασύνδεση έγινε με τετραπύρηνη μονορυθμική οπτική ίνα. Ο πομπός βασίστηκε σε μια συστάδα τεσσάρων VCSELs τα οποία είχαν παράθυρο εκπομπής στα 1550 nm και εύρος ζώνης διαμόρφωσης στα 26 Gb/s με ηλεκτρικά σήματα τεσσάρων σταθμών (4-PAM) προκειμένου να επιτευχθεί συνολική on-chip χωρητικότητα στα 208 Gb/s. Και οι δυο μεριές (πομπός και δέκτης), διέθεταν τους αντίστοιχους οδηγητές ενώ η διεπαφή με την πολυπύρηνη ίνα πραγματοποιήθηκε με έναν απλό 3D γυάλινο κυματοδηγό διεπαφής.



Εικόνα 14: Μπλοκ διάγραμμα της 208 Gb/s οπτικής διασύνδεσης, επιπέδου board.

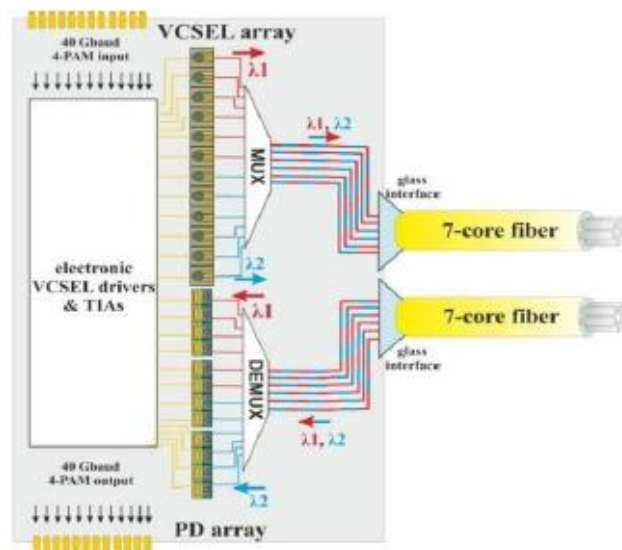
**320 Gb/s QSFP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο:** Πραγματοποιήθηκε η ολοκλήρωση ενός πομποδέκτη τεσσάρων καναλιών σε QSFP μορφή χρησιμοποιώντας την 3D οπτική μηχανή. Στο πλακίδιο (chip) ολοκληρώθηκαν συστάδες VCSEL με εύρος ζώνης

διαμόρφωσης 40 Gb/s και δυο διαφορετικά κεντρικά μήκη κύματος εκπομπής. Όλα τα απαραίτητα ηλεκτρικά κυκλώματα οδήγησης, οι δομές πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας και οι συστάδες φωτοδίοδων, συνδυάστηκαν και αυτά στο ίδιο πλακίδιο πυριτίου. Όσον αφορά στην χωρική πολυπλεξία (SDM), επιστρατεύτηκε μια τετραπύρηνη μονορυθμική οπτική ίνα και για τις δυο κατευθύνσεις της διάδοσης, ενώ το φως εισερχόταν μέσα στο πλακίδιο πυριτίου τεχνολογίας SOI με τη χρήση καθέτων grating couplers.



Εικόνα 15: 320 Gb/s QSFP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο

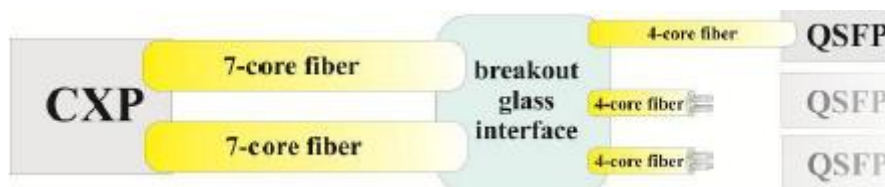
**960 Gb/s CXP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο:** Τελική δομή ήταν ένας πομποδέκτης 12 καναλιών σε μορφή ενός CXP ενεργού οπτικού καλωδίου. Για να γίνει αυτό εφικτό συνδυάστηκαν μονολιθικές συστάδες VCSEL με χρήση πολυπλεξίας μήκους κύματος (WDM), με τετράδες οδηγητών/TIAs και εμπορικά διαθέσιμες συστάδες φωτοδίοδων πάνω στην SOI πλατφόρμα. Η δομή του πομποδέκτη συνδέθηκε με μια δίδυμη συστοιχία επταπύρηνων οπτικών ινών οι οποίες επέτρεπαν την αμφικατευθυντική ζεύξη. Οι διεπαφές με τις πολυπύρηνες οπτικές ίνες πραγματοποιήθηκαν μέσω δομών γυάλινων 3D κυματοδηγών.



Εικόνα 16: 960 Gb/s CXP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο



Σκοπός ήταν η δομή του 960 Gb/s CXP ενεργού οπτικού καλωδίου, να συνδεθεί με τρεις δομές 320 Gb/s QSFP ενεργών οπτικών καλωδίων με μια δομή 3D γυάλινης διεπιφάνειας κυματοδηγού (απεμπλοκής). Με τη συνένωση αυτή θα πραγματοποιούταν ένα Ενεργό Οπτικό Καλώδιο χωρητικότητας terabit εξοπλισμένο τόσο με CXP όσο και με QSFP ακροδέκτες το οποίο θα είχε τη δυνατότητα να επεξεργαστεί και διαχειριστεί διαφορετικά προφίλ κίνησης.

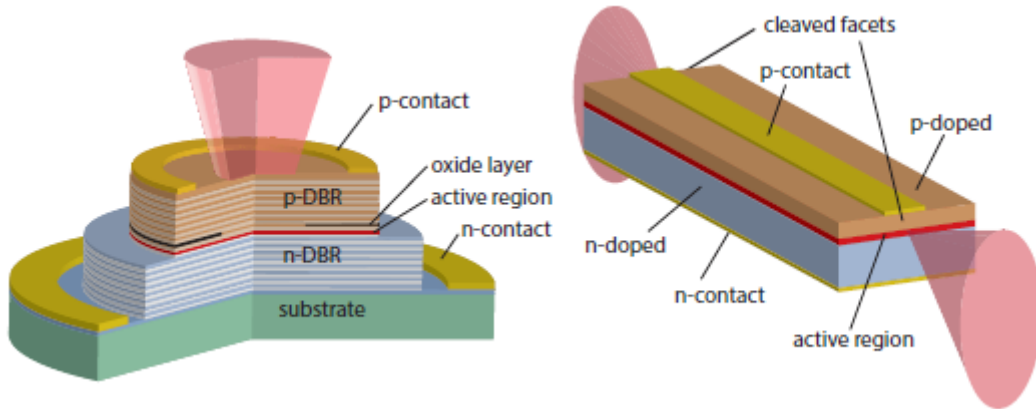


Εικόνα 17: CXP σε QSFP break-out Ενεργό Οπτικό Καλώδιο.

Αφού παρουσιάστηκε η αρχιτεκτονική και η λογική πίσω από την κατασκευή του ενεργού οπτικού καλωδίου και των ενδιάμεσων πρωτοτύπων, στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μια πιο αναλυτική περιγραφή των συστατικών στοιχείων που θα απαρτίζουν τις προαναφερόμενες δομές.

## 2.2 Οι βασικές αρχές λειτουργίας των VCSELs

Όπως υποδεικνύει και η ονομασία τους τα VCSELs είναι laser τα οποία έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν φως κάθετα διαθέτοντας μια κάθετη κοιλότητα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η κοιλότητα αυτή δημιουργείται με δυο κάτοπτρα DBR υψηλής ανακλαστικότητας (~99.5%) και με μια pn- ένωση η οποία είναι forward biased και βρίσκεται μεταξύ τους παρέχοντας έτσι το οπτικό κέρδος. Τα DBRs είναι επί της ουσίας κάτοπτρα τα οποία δημιουργούνται από πολλές επιστρώσεις διαφορετικών υλικών και οι οποίες έχουν διακύμανση στο δείκτη διάθλασής τους. Κάθε όριο της επίστρωσης προκαλεί μερική ανάκλαση ενός οπτικού κύματος. Για κύματα όπου το μήκος κύματος τους είναι κοντά στον  $\lambda/4$  του οπτικού πάχους των επιστρώσεων, οι πολλές μερικές ανακλάσεις συμβάλλουν και έτσι οι δομές λειτουργούν ως υψηλής ποιότητας κάτοπτρα. Σε αντίθεση με τα VCSELs τα Fabry Perot lasers έχουν οριζόντιες κοιλότητες με επιφάνειες αέρα-ημιαγωγού που λειτουργούν ως καθρέπτες. Αυτό σημαίνει ότι όταν οι δομές αυτές ολοκληρωθούν σε ένα wafer, για να είναι λειτουργικές θα πρέπει να υποστούν διάσπαση (cleaving) ενώ τα VCSELs μπορούν να δοκιμαστούν on-wafer χωρίς κάποια επιπλέον επεξεργασία. Τα VCSELs έχουν σημαντικά πλεονεκτήματα εξαιτίας της μικρής τους κοιλότητας, όπως το χαμηλό ρεύμα κατωφλίου και τις εξαιρετικές ιδιότητές τους όσον αφορά στην ταχύτητα και την κατανάλωση ισχύος [2.15], [2.16].



Εικόνα 18: (α) VCSEL και (β) ένα Fabry Perot laser.

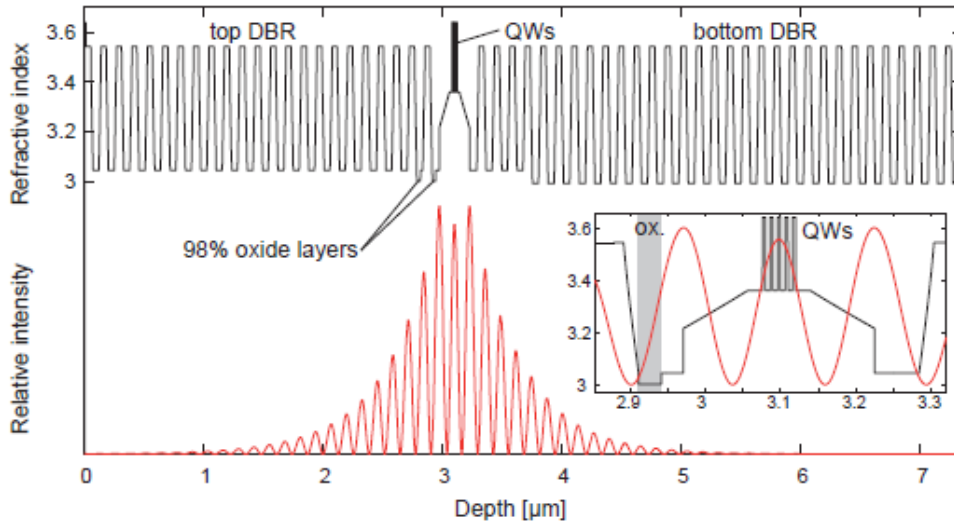
### 2.2.1 Κοιλότητα και κάτοπτρα

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, οι Distributed Bragg Reflectors είναι κάτοπτρα τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενες επιστρώσεις υψηλού-χαμηλού δείκτη διάθλασης όπου το φως ανακλάται μερικώς σε κάθε μια επιφάνεια [2.17]. Αν το οπτικό πάχος κάθε υποστρώματος ισούται με το  $\frac{1}{4}$  του μήκους κύματος που εκείνη τη στιγμή ανακλάται, το μήκος κύματος αυτό θα υποστεί την κατάσταση Bragg, δηλαδή όλες οι ανακλάσεις που συμβαίνουν από τις επιστρώσεις θα προστεθούν στη φάση οδηγώντας έτσι σε μια μεγάλη ανάκλαση από όλη τη στοίβα όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Η μέγιστη ανακλαστικότητα εξαρτάται από τον αριθμό των ζευγών DBR και τη διαφορά των δεικτών διάθλασης  $\Delta n$  μεταξύ των υλικών με τον υψηλό και το χαμηλό δείκτη διάθλασης. Παράλληλα, το πλάτος του εύρους ζώνης ανάκλασης (reflection stopband) εξαρτάται κυρίως από το  $\Delta n$ . Οι DBRs κατασκευάζονται συνήθως είτε από διηλεκτρικά είτε από επιταξικά (epitaxial) υλικά. Τα διηλεκτρικά DBRs μπορούν να επιτύχουν υψηλή ανακλαστικότητα με λιγότερα από δέκα ζεύγη εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς δείκτη διάθλασης, ενώ τα επιταξικά DBRs χρειάζονται περίπου 20-30 ζεύγη λόγω της χαμηλής αντίστοιχης τιμής δεικτών διάθλασης. Από την άλλη, τα επιταξικά DBRs μπορούν να υποβληθούν σε πρόσμιξη και συχνά να λειτουργήσουν ως σημειακές διασκορπιστές (spreaders) για να επιτύχουν ομοιόμορφη κατανομή φορέων έγχυσης στην ενεργό περιοχή [2.18]-[2.20].

Τα VCSELS έχουν μια κοντή κοιλότητα μήκους  $L_{cav}$  οι οποία είναι τοποθετημένη ανάμεσα στα δυο DBRs. Παρόλα αυτά, το αποτελεσματικό (effective) μήκος της κοιλότητας  $L_{eff}$  είναι μεγαλύτερο λόγω της διείσδυσης του οπτικού πεδίου μέσα στα DBRs. Ο διαμήκης συντονισμός της κοιλότητας ενός VCSEL ρυθμίζεται από την κατάσταση της φάσης που υπαγορεύει ότι το οπτικό πεδίο πρέπει να επαναλαμβάνει τον εαυτό του μετά από ένα κυκλική διαδρομή (round trip) στην κοιλότητα. Με αυτό το σκεπτικό, 2 φορές το effective οπτικό μήκος  $L_{eff} n_{eff}$  θα πρέπει να ισούται με έναν ακέραιο αριθμό  $m$  των μηκών κύματος  $\lambda_0$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$2L_{eff}n_{eff} = m\lambda_0 \Rightarrow \lambda_0 = \frac{2L_{eff}n_{eff}}{m} \quad (1)$$

Λόγω του μικρού μήκους της κοιλότητας, μόνο ένας διαμήκης ρυθμός εμπίπτει μέσα στο εύρος ζώνης κέρδους κάνοντας έτσι το VCSEL δομικά μονορυθμικό όσον αφορά στους διαμήκης ρυθμούς (συνήθως δεν ισχύει το ίδιο και για τους εγκάρσιους).



Εικόνα 19: Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και το προσομοιωμένο στάσιμο κύμα του οπτικού πεδίου μέσα στην κοιλότητα του VCSEL με μήκος κοιλότητας στα  $3/2$  του  $\lambda$ , και μια διπλή επίστροφη οξειδίου πάνω από την ενεργό περιοχή. Η ένθετη εικόνα δείχνει την επικάλυψη του στάσιμου κύματος με το κβαντικό πηγάδι και το κοντινότερο στρώμα οξειδίου.

### 2.2.2 Ενεργός περιοχή

Η ενεργός περιοχή ενός VCSEL είναι το μέσο αυτό που παρέχει το οπτικό κέρδος. Κατά τη διάρκεια του lasing, το κέρδος ρυθμών (modal gain), πρέπει να ισορροπήσει τις οπτικές απώλειες σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left( \alpha_i + \frac{1}{2L_{eff}} \ln \frac{1}{R_m^T R_m^B} \right) \quad (2)$$

Όπου  $g_{th}$  είναι το κέρδος κατωφλίου,  $\Gamma$  ο παράγοντας οπτικού περιορισμού (confinement factor) ο οποίος αναπαριστά το κλάσμα του στάσιμου κύματος που έχει επικάλυψη με την ενεργό περιοχή,  $\alpha_i$  οι εσωτερικές οπτικές απώλειες (εξαιτίας της απορρόφησης ελεύθερων φορέων και τις απώλειες περίθλασης) και  $R_m^T, R_m^B$  οι ανακλαστικότητες των καθρεπτών κορυφής και πυθμένα. Στα ημιαγωγικά lasers, το οπτικό κέρδος από την εξαναγκασμένη εκπομπή επιτυγχάνεται με την έγχυση φορέων σε μια ορθώς πολωμένη pn- ένωση. Τα ηλεκτρόνια και οι οπές συσσωρεύονται στη ζώνη αγωγιμότητας και σθένους αντιστοίχως, η οποία υπό αρκετά υψηλές συνθήκες έγχυσης προκαλεί αναστροφή του πληθυσμού και επομένως οπτικό κέρδος. Η ενεργός περιοχή που συνήθως είναι μια pin heterojunction με κβαντικά πηγάδια τα οποία είναι τοποθετημένα σε χαμηλότερες ζώνες σθένους. Τα κβαντικά πηγάδια εγκλωβίζουν τους φορείς προσφέροντας έτσι υψηλή πυκνότητα φορέων και καλή χωρική επικάλυψη μεταξύ των κυματικών συναρτήσεων των ηλεκτρονίων και των οπών. Με δεδομένο ότι η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι συνδεδεμένη με την ισχύ του οπτικού πεδίου, τα κβαντικά πηγάδια τοποθετούνται

στην κοιλία (μέγιστο πλάτος ενός στάσιμου κύματος) του οπτικού πεδίου για να επιτευχθεί υψηλό κέρδος.

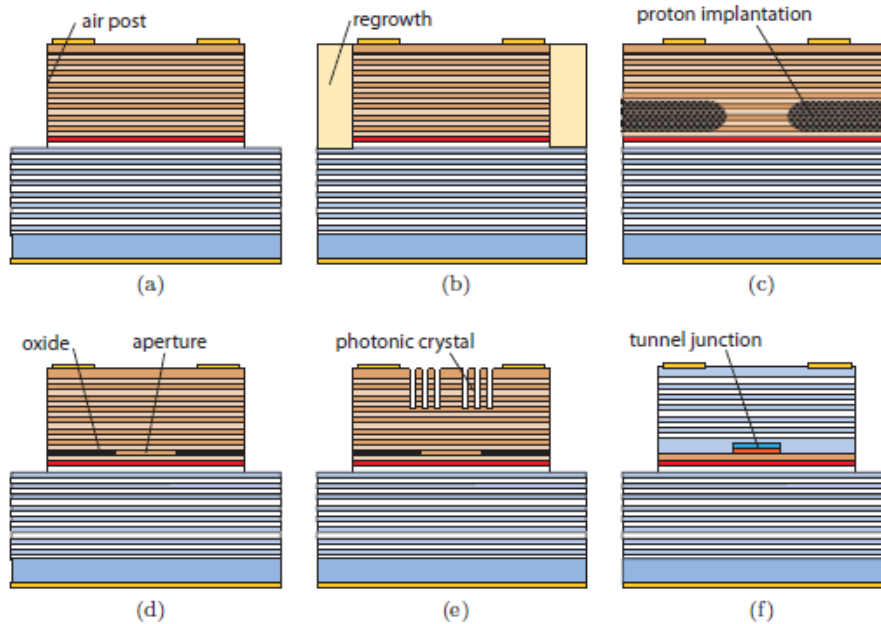
### 2.2.3 Οπτικός και ηλεκτρικός περιορισμός (confinement)

Τα DBRs περιορίζουν το οπτικό πεδίο στην διαμήκη κατεύθυνση παράλληλα όμως θα πρέπει και η εγκάρσια κατεύθυνση να περιορίζεται. Επιπλέον, το ηλεκτρικό ρεύμα πρέπει και αυτό να περιορίζεται ούτως ώστε να αντλεί μόνο ενεργό υλικό το οποίο επικαλύπτεται με τους ρυθμούς του lasing. Στα περισσότερα μοντέλα VCSEL ο οπτικός και ηλεκτρικός περιορισμός προκύπτουν από το ίδιο χαρακτηριστικό. Τα πρώτα VCSELs αποτελούνταν από mesa το οποίο είχε χαραμάδες αέρα (etched air-post mesa) όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η διαφορά του δείκτη διάθλασης από το ημιαγώγιμο υλικό στον αέρα ήταν ο μηχανισμός που παρείχε περιορισμό του οπτικού πεδίου στην εγκάρσια κατεύθυνση. Παρότι απλή, αυτή η αρχιτεκτονική είχε διάφορα ζητήματα όπως υψηλή θερμική αντίσταση λόγω του περιβάλλοντος αέρα, μεγάλες απώλειες σκέδασης που προκύπταν από την τραχύτητα των πλευρικών τοιχωμάτων και προβλήματα όσον αφορά στη διαχείριση των απωλειών απορρόφησης.

Ένα βήμα βελτιστοποίησης ήταν τα VCSEL με buried heterostructure. Αναγεννώντας ημι-μονωτικό, ημιαγώγιμο υλικό γύρω από το χαραγμένο mesa, αποφεύγονταν τα προβλήματα που προέκυπταν από τη θερμική αντίσταση και τις απώλειες, αλλά η διαδικασία της αναγέννησης αποτελούσε μια πρόκληση. Τα πρώτα εμπορικά VCSEL χρησιμοποιούσαν εμφύτευση (implantation) πρωτονίων. Τα πρωτόνια εμφυτεύονταν βαθιά στο DBR κορυφής κάνοντας έτσι το υλικό μονωτικό και σχηματίζοντας ένα άνοιγμα ρεύματος (current aperture). Το εμφυτευμένο υλικό δεν σχημάτιζε απευθείας μια διαφορά δεικτών διάθλασης για τον οπτικό περιορισμό στον εγκάρσιο άξονα. Παρόλα αυτά, όσο το κέντρο του κυματοδηγού ανέβαζε θερμοκρασία κατά τη λειτουργία, ο δείκτης διάθλασης αύξανε εκθετικά. Αυτό το φαινόμενο, το οποίο ονομάζετε θερμικό lensing, περιόριζε το οπτικό πεδίο αλλά ταυτόχρονα οδηγούσε και ασταθής ιδιότητες των παραγόμενων ρυθμών αφού υπήρχε εξάρτηση από το δυναμικό του ρεύματος. Επιπρόσθετα, η περίθλαση των πρωτονίων κατά τη διάρκεια της εμφύτευσης έκανε πολύ δύσκολη την κατασκευή δομών με πολύ μικρό άνοιγμα.

Σταθερές ιδιότητες ως προς τους ρυθμούς, αποκτήθηκαν όταν ενσωματώθηκε μια διαφορά του δείκτη διάθλασης η οποία ήταν αρκετά μεγάλη σε σύγκριση με το θερμικό lensing, την οδήγηση κέρδους (gain guiding) και το plasma effect (τη μείωση του δείκτη διάθλασης με την αύξηση της συγκέντρωσης φορέων). Μια προσέγγιση ήταν να χρησιμοποιηθεί μια επιλεγμένα οξειδωμένη επίστρωση η οποία σχημάτιζε ένα άνοιγμα οξειδίου. Μια επίστρωση με περιεκτικότητα σε αλουμίνιο (συνήθως  $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ ) τοποθετούσε το DBR κοντά στην ενεργό περιοχή. Όταν η πλευρά με το χαραγμένο mesa εκτίθεται σε ζεστούς ατμούς νερού, η επίστρωση του οξειδώνεται και σχηματίζει ένα μονωτή με μειωμένο δείκτη διάθλασης. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί ένα άνοιγμα ρεύματος που παρέχει ταυτόχρονα και την εγκάρσια οπτική οδήγηση. Ο ρυθμός της οξείδωσης στηρίζεται κυρίως στο περιεχόμενο του αλουμινίου, με αυτόν τον τρόπο η επίστρωση που έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε

αλουμίνιο θα σχηματίσει μικρότερο άνοιγμα οξειδίου. Για να αποφευχθούν οι απώλειες σκέδασης η επίστρωση οξειδίου τοποθετείται συνήθως κοντά στους δεσμούς (τα σημεία με πλάτος μηδέν ενός στάσιμου κύματος) του οπτικού πεδίου. Πολλαπλές επιστρώσεις οξειδίου μπορεί να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να περιοριστεί η χωρητικότητα του mesa ούτως ώστε να μετριαστούν τα παρασιτικά φαινόμενα στο εύρος ζώνης.



Εικόνα 20: Διαφορετικές μέθοδοι ηλεκτρικού και οπτικού περιορισμού: (a) με χρήση air post etching, (b) με αναγέννηση του mesa, (c) με εμφύτευση πρωτονίων, (d) με άνοιγμα οξειδίου, ε με φωτονικό κρύσταλλο και (f) με buried tunnel-junction.

Η διάδοση του πλευρικού ρεύματος και η διάχυση στην περιοχή μεταξύ του ανοίγματος οξειδίου και των κβαντικών πηγαδιών μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή φορέα, συνοδευόμενη από μείωση της εσωτερικής κβαντικής απόδοσης και αυξημένο ρεύμα κατωφλίου. Γι' αυτό το λόγο ένας ισχυρός πλευρικός περιορισμός των φορέων είναι επιθυμητός προκειμένου οι δομές VCSEL να είναι αποδοτικές ενεργειακά. Με δεδομένο ότι οι οπές έχουν χαμηλότερη κινητικότητα από ότι τα ηλεκτρόνια, το άνοιγμα οξειδίου τοποθετείται στην p-μεριά για να περιορίζει τις αργές οπές, εμποδίζοντας παράλληλα τα ηλεκτρόνια να εξαπλώνονται προς τα έξω λόγω της απαίτησης ουδετερότητας φορτίου. Η εξάπλωση του ρεύματος μπορεί να μειωθεί με τη χρήση μη εμπλουτισμένο εγγενούς υλικού (un-doped intrinsic material) μεταξύ του ανοίγματος οξειδίου και των κβαντικών πηγαδιών. Η εξάπλωση του ρεύματος μπορεί να αποτελέσει σημαντικό ζήτημα αν υπάρχει εμπλουτισμένο υλικό μεταξύ του ανοίγματος οξειδίου και των κβαντικών πηγαδιών.

Η αποσύνδεση του ηλεκτρικού και οπτικού περιορισμού για την προσαρμογή των οπτικών ιδιοτήτων του κυματοδηγού VCSEL μπορεί να επιτευχθεί με τη χάραξη ενός 2D φωτονικού κρυστάλλου στο DBR κορυφής ενός περιορισμένου με οξείδιο ή ενός εμφυτευμένου με πρωτόνια VCSEL. Εκτός από την αυξημένη πολυπλοκότητα σχεδίασης και επεξεργασίας, η δομή φωτονικών κρυστάλλων αυξάνει τις απώλειες οπτικής σκέδασης, οδηγώντας σε χαμηλότερη ισχύ εξόδου και σε μεγαλύτερο

κατώφλι ρεύματος. Για VCSEL με μήκη κύματα λειτουργίας στα παράθυρα των 1.3 και 1.55  $\mu\text{m}$ , ακολουθείται η προσέγγιση του buried tunnel junction για οπτικό και ηλεκτρικό περιορισμό με δεδομένο ότι δεν υπάρχει οξειδίο υψηλής ποιότητας σε αυτό το σύστημα υλικών.

#### 2.2.4 Φασματικά Χαρακτηριστικά

Ένα VCSEL υψηλής ταχύτητας συνήθως έχει τα μικρότερα δυνατά μήκη κοιλότητας της τάξης του  $1/2 \lambda$  ή  $3/2 \lambda$ , με δεδομένο ότι αυτή η προσέγγιση βελτιώνει το εύρος ζώνης διαμόρφωσης (modulation bandwidth). Εξαιτίας της μικρής κοιλότητας, τα VCSELs είναι εγγενώς μονορρυθμικά με δεδομένο ότι μόνο ένας διαμήκης ρυθμός εμπίπτει εντός τους εύρους ζώνης κέρδους. Ωστόσο, λόγω των μεγάλων πλευρικών διαστάσεων (διάμετρος ανοίγματος οξειδίου  $\geq 10\lambda$ ), η κοιλότητα VCSEL υποστηρίζει συχνά αρκετούς εγκάρσιους ρυθμούς. Τα φασματικά χαρακτηριστικά των VCSELs μπορούν να μελετηθούν αναλυτικά χρησιμοποιώντας την μέθοδο του αποτελεσματικού δείκτη διάθλασης (effective index method), κατά την οποία η διαφορά του ακτινικού δείκτη διάθλασης μοντελοποιείται ως αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης με πραβολικό προφίλ και συγκεκριμένα:

$$n^2(r) = \begin{cases} n_c^2 \left(1 - \frac{2\Delta r^2}{a^2}\right), & r \leq a \\ n_s^2 = \text{const} & , r > a \end{cases} \quad \text{with } \Delta = \frac{n_c^2 - n_s^2}{2n_c^2} \approx \frac{n_c - n_s}{n_c} \quad (3)$$

Όπου  $r$  είναι η ακτινική απόσταση,  $a$  είναι η ακτίνα του ανοίγματος οξειδίου,  $n_c$  ο αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης του πυρήνα και  $n_s$  ο αποτελεσματικός δείκτης διάθλασης της περιβάλλουσας περιοχής του οξειδίου. Το παραπάνω αναλυτικό προφίλ του δείκτη διάθλασης είναι πολύ χρήσιμο γιατί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθούν αναλυτικές εκφράσεις και για τα φασματικά χαρακτηριστικά του VCSEL και άρα πληροφορίες και για τις ιδιότητες των ρυθμών του. Λύνοντας την κυματική εξίσωση σε μια κυκλικά συμμετρική δομή, η ένταση του κοντινού πεδίου των εγκάρσιων ρυθμών γίνεται:

$$S_{lp}(r, \Phi) \propto |E_{lp}(r, \Phi)|^2 \\ \propto \left(\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \left[ L_{p-1}^{(l)}\left(\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) \right]^2 \left\{ \begin{matrix} (\cos^2(l\Phi)) \\ (\sin^2(l\Phi)) \end{matrix} \right\} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_0^2}\right) \quad (4)$$

Όπου  $E$  είναι η ένταση του οπτικού πεδίου,  $\omega_0$  η  $1/e^2$  ακτίνα,  $L_{p-1}^{(l)}$  η  $l^{\text{th}}$  Laguerre πολωνυμική της τάξης  $(p-1)$  και  $\Phi$  το αζιμούθιο. Οι ρυθμοί αναφέρονται ως γραμμικά πολωμένοι LP $lp$  με κατανομή έντασης όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για  $l > 0$  οι παράγοντες  $\sin$  και  $\cos$  αναπαριστούν δυο διαφορετικές ορθογώνιες καταστάσεις η οποίες έχουν στραφεί κατά  $90^\circ/l$  η μια ως προς την άλλη. Επιπλέον, κάθε ρυθμός έχει δυο ορθογώνιες πολωτικές καταστάσεις με ηλεκτρικό πεδίο να ταλαντώνεται κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης. Έτσι, ο Gaussian θεμελιώδης ρυθμός LP01 έχει δυο πολωτικές καταστάσεις, ενώ ανώτερης τάξης

ρυθμοί με  $l > 0$  έχουν τέσσερις καταστάσεις ανά LP1p ρυθμό. Το μήκος κύματος  $\lambda_{lp}$  του ρυθμού LP1p διαφέρει από τον θεμελιώδη διαμήκη ρυθμό  $\lambda_0$  κατά:

$$\lambda_{lp} = \left[ 1 - (2p + l - 1) \frac{\sqrt{\Delta}}{\sqrt{2\pi} n_c a} \frac{\lambda_0}{\lambda_0} \right] \quad (5)$$

Η οποία αποδεικνύει ότι οι ρυθμοί με τον ίδιο δείκτη διάθλασης ρυθμού  $m = 2p + l - 1$  έχουν το ίδιο μήκος κύματος εκπομπής. Από την παραπάνω σχέση, η απόσταση μεταξύ των ρυθμών είναι:

$$\Delta\lambda = |\lambda_m - \lambda_{m+1}| = \frac{\sqrt{\Delta}}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda_0^2}{n_c a} \propto \frac{\sqrt{\Delta}}{D_{ox}} \quad (6)$$

Όπου  $D_{ox} = 2a$  είναι η διάμετρος του ανοίγματος οξειδίου. Ο αριθμός των κυματοδηγούμενων ρυθμών καθορίζεται από την κανονικοποιημένη συχνότητα:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_s^2} \quad (7)$$

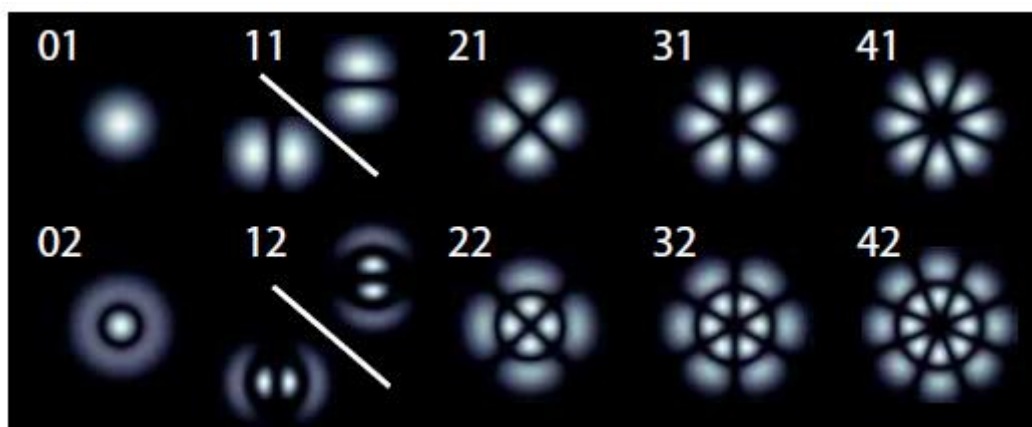
Όπως και μια step-index ίνα, ένας κυματοδηγός είναι μονορρυθμικός αν ισχύει η συνθήκη  $V < 2.405$ . Για μεγάλα  $V$  ο αριθμός των κυματοδηγούμενων εγκάρσιων ρυθμών μπορεί να προσεγγιστεί από την:

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (8)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι χρήσιμες για την κατανόηση των εγκάρσιων ρυθμών ενός VCSEL. Στην πραγματικότητα είναι πολύ απλουστευμένες για να περιγράψουν την περίπλοκη σχέση μεταξύ κυματοδηγησης, κέρδους και απωλειών σε μια δομή VCSEL. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν και να συγκριθούν διαφορετικές δομές VCSEL, τα standards επικοινωνίας συνήθως καθορίζουν μια μέγιστη τιμή RMS για το φασματικό εύρος η οποία και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta\lambda_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_{tot}} (\lambda_i - \langle\lambda\rangle)^2}, \quad \langle\lambda\rangle = \sum_{i=1}^N \frac{P_i}{P_{tot}} \lambda_i, \quad P_{tot} = \sum_{i=1}^N P_i \quad (9)$$

Όπου  $N$  ο αριθμός των σημείων δειγματοληψίας του μετρούμενου φάσματος,  $P_i$  Η ισχύς του σημείου  $i$  στο  $\lambda_i$  και  $P_{tot}$  η συνολική οπτική ισχύς.



Εικόνα 21: Κατανομές εγκάρσιας έντασης των κατώτερης τάξης ρυθμών LPIr σύμφωνα με την εξίσωση 4.

### 2.2.5 Θερμικές ιδιότητες

Τα ενεργειακά αποδοτικά και υψηλής ταχύτητας VCSELs τυπικά έχουν wall-plug efficiencies (η αποδοτικότητα με την οποία το σύστημα μετατρέπει την ηλεκτρική ισχύ σε οπτική) της τάξης του 25-35% ενώ το υπόλοιπο ~70% της παρεχόμενης dc ισχύος διασκορπίζεται ως θερμότητα εντός της δομής ως Joule θέρμανση (resistive Joule heating), μη-ακτινοβολούμενο επανασυνδυασμό (recombination) και εσωτερική οπτική απορρόφηση. Ο συνδυασμός αυτών των πηγών θερμότητας προκαλεί μια σημαντική αύξηση στην εσωτερική θερμοκρασία της συσκευής με την αύξηση του ρεύματος τροφοδοσίας. Σε ένα συγκεκριμένο σημείο ενεργοποιείται μια διαδικασία διαφυγής, όπου η υψηλή θερμοκρασία οδηγεί σε μια επιταχυνόμενη μείωση της εσωτερικής κβαντικής αποτελεσματικότητας (quantum efficiency) κυρίως λόγω της διαρροής των φορέων από τα κβαντικά πηγάδια, προκαλώντας έτσι μια αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Αυτό το φαινόμενο, μαζί με την αύξηση του ρεύματος κατωφλιού εξαιτίας της μειωμένης εσωτερικής κβαντικής αποτελεσματικότητας και του κέρδους, προκαλούν ένα κορεσμό στην πυκνότητα των φωτονίων και στην ισχύ εξόδου. Συνήθως τα εμπορικά διαθέσιμα VCSELs σε οπτικές διασυνδέσεις πρέπει να λειτουργούν αδιάληπτα σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μέχρι και 85°C καθιστώντας έτσι τη θερμική διαχείριση ως πολύ σημαντική προτεραιότητα.

Σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τη θερμική συμπεριφορά των VCSEL είναι η ευθυγράμμιση της κορυφής του κέρδους (gain peak) και ο συντονισμός της κοιλότητας (cavity resonance). Τα κλασσικού τύπου Fabry-Perot lasers με πολύ κοντινούς διαμήκους ρυθμούς πάντα εκπέμπουν στην κορυφή του κέρδους. Από την άλλη, τα VCSELs έχουν μόνο ένα διαμήκη ρυθμό του οποίου η θέση αναφορικά με την κορυφή του κέρδους μπορεί να κατασκευαστεί. Αυτός ο διαχωρισμός καλείται αποσυντονισμός (detuning). Εξαιτίας της θερμικής εξάπλωσης (thermal expansion) και του δείκτη διάθλασης της κοιλότητας του VCSEL ο οποίος εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το μήκος κύματος συντονισμού υφίσταται μια θετική μετατόπιση (red-shift) κατά 0.06 nm/ °C με την αύξηση της θερμοκρασίας. Παράλληλα, η κορυφή του



κέρδους μετατοπίζεται (red-shifted) κατά 0.32-0.33 nm/°C εξαιτίας της συρρίκνωσης της ζώνης σθένους. Όσο η κορυφή του κέρδους μετατοπίζεται γρηγορότερα κάποια στιγμή θα ξεπεράσει το συντονισμό της κοιλότητας οδηγώντας έτσι σε μειωμένο κέρδος υλικού και αυξανόμενο ρεύμα κατωφλιού σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντισταθμιστεί με αρχικό αρνητικό detuning. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η βελτιωμένη επικάλυψη του κέρδους και του συντονισμού αντισταθμίζει την μείωση του κέρδους που προκαλεί η θερμοκρασία και επιτρέπει χαμηλά ρεύματα κατωφλιού ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας [2.21], [2.22].

### 2.3 Δομές VCSEL που αναπτύχθηκαν

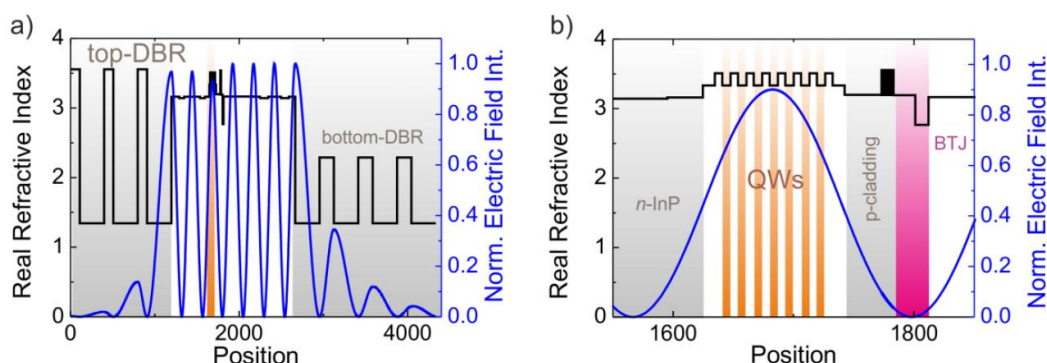
Στα πλαίσια της συγκεκριμένης ερευνητικής προσπάθειας, ούτως ώστε να ικανοποιηθούν οι παραπάνω απαιτήσεις, επιλέχθηκε ο σχεδιασμός και η κατασκευή συστοιχιών VCSELS προκειμένου να παρέχουν υψηλές επιδόσεις με χαμηλό κόστος. Επιπλέον, η λογική της συστοιχίας εξασφαλίζει μια συμπαγή αρχιτεκτονική ενώ επιτρέπει και την χωρική πολυπλεξία και την πολυπλεξία μήκους κύματος σε πολυπύρηνες ίνες. Τα ηλεκτρικά, οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά των δομών έχουν βελτιστοποιηθεί ούτως ώστε να συναντήσουν τις απαιτήσεις για ολοκλήρωση με την πλατφόρμα του SOI. Πιο συγκεκριμένα, προκρίθηκε η ανάπτυξη VCSELS κοντής κοιλότητας (short cavity) με buried tunnel junction (BTJ) και μήκος κύματος εκπομπής στα 1.55 μm για λειτουργία στα 40 Gbaud σε θερμοκρασίες έως και 60 °C. Ο σχεδιασμός VCSELS κοντής κοιλότητας αυξάνει το εύρος ζώνης διαμόρφωσης (modulation bandwidth) των δομών. Κυκλικά BTJs με διάμετρο 3, 4 και 5 μm υποβλήθηκαν σε επεξεργασία για να βρεθεί ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ της έγχυσης ρεύματος και της μονορρυθμικής λειτουργίας. Επιπλέον το μέγεθος του mesa, βελτιστοποιήθηκε για να διευκολύνει τη λειτουργία των δομών σε υψηλές ταχύτητες. Τέλος, οι δομές επιχειρήθηκε να έχουν υψηλή γραμμικότητα προκειμένου να συνδυαστούν με γραμμικούς ηλεκτρονικούς οδηγητές (drivers) για την επίδειξη PAM-4 οπτικής μετάδοσης στα 80 Gb/s.

Η δομή της διαστρωμάτωσης των VCSEL αναπτύχθηκε με τη διαδικασία του Molecular Beam Epitaxy, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης στρώσεων στην κλίμακα των nm με ακριβές πάχος και σύνθεση [2.23]. Ο έλεγχος ακριβείας και οι χαμηλές θερμοκρασίες κατά την εναπόθεση που προσφέρονται από το MBE, δίνουν τη δυνατότητα να αναπτύσσονται ισχυρά συμπιεσμένα κβαντικά πηγάδια (compressively strained quantum wells) στην ενεργό περιοχή, βελτιώνοντας έτσι την απόδοση λόγω του διαφορικού κέρδους (differential gain) του laser.

Στις συγκεκριμένες δομές, χρησιμοποιήθηκαν ισχυρά συμπιεσμένα AlGaInAs κβαντικά πηγάδια τα οποία και τοποθετήθηκαν στο μέγιστο του οπτικού πεδίου όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα. Αυτά είναι ενσωματωμένα μεταξύ μιας χαμηλής n-doped InP στοιβάδας και ενός υψηλού p-doped περιβλήματος. Προκειμένου να επιτευχθεί ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ υψηλής ισχύος εκπομπής και χαμηλού ρεύματος κατωφλιού, διερευνήθηκαν VCSELS τριών και οκτώ κβαντικών πηγαδιών. Ο περιορισμός του ρεύματος (current confinement)

επιτυγχάνεται με ένα p+-AlGaInAs/n+-GaInAs BTJ, το οποίο είναι υψηλά αγώγιμο σε μια περιοχή κυκλικού σχήματος με διάμετρο  $d_{BTJ}$ . Η απομόνωση του ρεύματος έξω από την περιοχή του BTJ επιτυγχάνεται με μια ανάστροφα πολωμένη p<sup>+</sup>n διακλάδωση η οποία δημιουργείται από επεξεργασία σκληρής χάραξης (dry etching) στο n<sup>+</sup> GaInAs. Επιπρόσθετα, η ελαχιστοποίηση της στρώσης του p-περιβλήματος μειώνει συνεπακόλουθα την ηλεκτρική αντίσταση. Τα υψηλής πρόσμιξης στρώματα διακλάδωσης τοποθετούνται στο ελάχιστο του οπτικού πεδίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, ούτως ώστε να μειώσουν τις απώλειες απορρόφησης. Η δομημένη διασταύρωση σήραγγας (tunnel junction) αναπτύσσεται εκ νέου με n-InP ούτως ώστε να ταιριάζει με το μήκος της κοιλότητας.

Σε αυτόν τον πρώτο επιταξικό γύρο αναπτύσσεται η βασική αρχιτεκτονική της δομής η οποία αποτελείται από ένα διπλό etch stop για την αφαίρεση υποστρωμάτων (GaInAs etch stop, InP buffer layer, GaInAs n-side contact layer), ακολουθούμενο από ένα n-περίβλημα, την ενεργό περιοχή, το p-περίβλημα και τέλος δυο στρώματα υψηλής πρόσμιξης του BTJ. Το υπόστρωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ένα πλακίδιο (wafer) InP n-πρόσμιξης και πάχους 2 inch. Όταν το δείγμα αφαιρείται από το θάλαμο που συμβαίνει η MBE, η ποιότητα της επίταξης ελέγχεται πρώτα οπτικά (πχ η τραχύτητα της επιφάνειας) και στη συνέχεια μετριέται το φάσμα της φωταυγείας (photoluminescence).



Εικόνα 22: (α) Πραγματικός όρος του δείκτη διάθλασης και κανονικοποιημένη κατανομή έντασης πεδίου κατά μήκος ενός εγκάρσιου τμήματος του VCSEL και (β) μεγέθυνση της ενεργού περιοχής και θέση της διασταύρωσης σήραγγας.

Οι συστοιχίες των VCSELs παράχθηκαν σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

1. Δόμηση της διασταύρωσης σήραγγας. Η πάνω στρώση του BTJ αφαιρείται αφήνοντας πίσω μόνο μικρές περιοχές όπου οι στρώσεις είναι παρούσες όπως φαίνεται και στην εικόνα XX. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι δομές, χρησιμοποιείται οπτική λιθογραφία. Σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή, το δείγμα επικαλύπτεται από ένα ανθεκτικό περίβλημα και εκτίθεται αφήνοντας μόνο μικρούς κύκλους (διαμέτρου 2 με 5  $\mu\text{m}$ ) μη εκτεθειμένους. Μετά την ανάπτυξη, αυτοί οι κύκλοι καλύπτουν τις περιοχές που θα υπάρχουν τα ανοίγματα BTJ των δομών. Τα ακάλυπτα τμήματα στη συνέχεια χαράσσονται με τη χρήση επαγωγικών διαβρωτικών ιόντων. Με δεδομένο ότι η περιοχή που πρέπει να χαραχθεί είναι κοντά στα 12-15 nm, χρειάζεται ένας πολύ αργός ρυθμός χάραξης ο οποίος επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μείγματος αερίων με μεθάνιο, άζωτο και

- υδρογόνο. Μετά τη χάραξη το βάθος της αξιολογείται και το δείγμα καθαρίζεται προτού υποστεί την επόμενη κατεργασία.
2. Επιταξική υπερανάπτυξη (epitaxial overgrowth) του δείγματος: Κατά τη διάρκεια της υπερανάπτυξης, η n-doped InP στρώση και η n-doped, p-side GaInAs στρώση επαφής αναπτύσσονται.
  3. Διάνοιξη της στρώματος επαφής (contact layer). Το στρώμα επαφής αφαιρείται από την κορυφή του κάθε BTJ με τη χρήση επιλεκτικής υδροχημικής χάραξης με φωσφορικό οξύ. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο προκειμένου να αποφευχθούν οι υψηλές απώλειες που προκύπτουν από το στρώμα επαφής.
  4. Δόμηση του mesa: Μια μάσκα οξειδίου του πυριτίου εξατμίζεται μετά από καθορισμό των mesas με τη χρήση οπτικής λιθογραφίας. Με μια διαδικασία ανύψωσης, αφαιρείται το στρώμα οξειδίου στην κορυφή του περιβλήματος. Το σύστημα εξάτμισης χρησιμοποιείται γιατί επιτρέπει την ανάπτυξη λεπτών στρώσεων οι οποίες μπορούν να αφαιρεθούν κατά της διαδικασία της ανύψωσης. Για τη χάραξη του mesa, χρησιμοποιείται η ίδια διαδικασία στεγνής χάραξης όπως και στην περίπτωση του BTJ. Και στα δυο βήματα, η στεγνή χάραξη προτιμάται με δεδομένο ότι προσφέρει ένα ανισοτροπικό προφίλ κατά τη χάραξη. Γι' αυτό το βήμα χρησιμοποιείται μια άλλη σύνθεση αερίων: μεθάνιο, υδρογόνο και χλώριο ενώ η ισχύς διέγερσης είναι υψηλότερη προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός υψηλός ρυθμός χάραξης. (βάθος χάραξης περίπου στα 1.5-2  $\mu\text{m}$ ). Επίσης, κατά τη διάρκεια της χάραξης πραγματοποιείται επιτόπιος έλεγχος με φασματομέτρο μάζας: το κλάσμα μάζας της αρσίνης και της φωσφίνης μετρείται στην έξοδο, πράγμα που βοηθά στον προσδιορισμό του κατά πόσο χαράσσεται στη δεδομένη στιγμή ένα στρώμα που περιέχει φώσφορο (InP) ή αρσενικό (InGaAs, AlGaInAs). Μετά τη στεγνή χάραξη ένα επιπλέον βήμα λιθογραφίας πραγματοποιείται ούτως ώστε να καλυφθεί το mesa με έναν ελαφρά μεγαλύτερο κύκλο και η στρώση η οποία χρησιμοποιείται για λόγους ασφαλείας (buffer layer), απομακρύνεται με τη χρήση υγρών χημικών οδηγώντας έτσι σε μια πολύ πιο λεία επιφάνεια. Μετά τη χάραξη αυτή, η μάσκα απομακρύνεται και το δείγμα είναι έτοιμο για περαιτέρω επεξεργασία.
  5. Απόθεση Βενζοκυκλοβουτάνης (Benzocyclobutene-BCB): Τα βασικά πλεονεκτήματα του BCB είναι: η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά (η οποία περιορίζει την παρασιτική χωρητικότητα), ο χαμηλός δείκτης διάθλασης (το BCB είναι διαφανές), η χημική σταθερότητα και το γεγονός ότι το δείγμα μπορεί να καλυφθεί με BCB μέσω spin coating το οποίο εξασφαλίζει καλή συμπεριφορά στην πόλωση. Πριν το BCB, ένα στρώμα από  $\text{SiO}_2$  διασκορπίζεται επειδή το BCB κολλάει καλύτερα στο  $\text{SiO}_2$  από ότι στον ημιαγωγό. Το ίδιο ισχύει και μετά την επιπεδοποίηση με το BCB για να εξασφαλιστεί η καλύτερη συγκόλληση του περιβλήματος. Μετά τη διαδικασία της επιπεδοποίησης με το BCB, τα στρώματα στην κορυφή του mesa πρέπει να απομακρυνθούν προκειμένου να επιτραπεί η ηλεκτρική επαφή και η απόθεση του καθρέπτη, η οποία γίνεται με λιθογραφικό προσδιορισμό των απαραίτητων περιοχών και επιλεκτική χάραξη διαμέσου των στρωμάτων BCB και  $\text{SiO}_2$ .

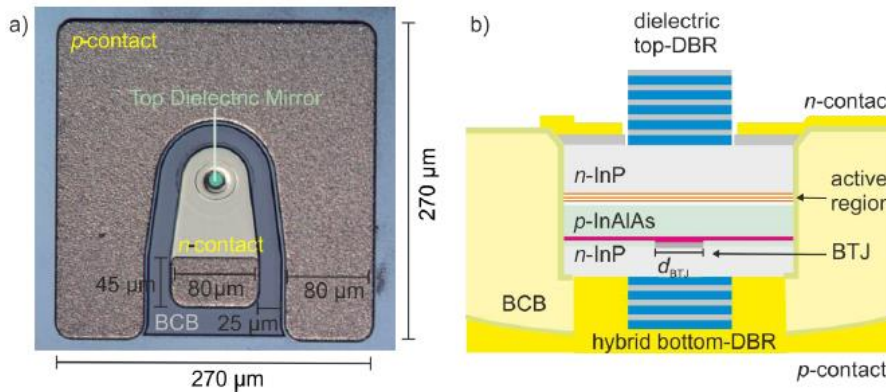
6. Εξάτμιση του δακτυλίου επαφής: Οι δακτύλιοι επαφής που αποτελούνται από τιτάνιο, πλατίνα και χρυσό, εξατμίζονται και κατασκευάζονται μέσω της διαδικασίας ανύψωσης (lift-off procedure). Αυτό το βήμα είναι γνωστό ότι προκαλεί προβλήματα καθώς το εσωτερικό τμήμα του δακτυλίου συχνά δεν αφαιρείται, επομένως χρησιμοποιείται μια ανύψωση ψεκασμού με ακετόνη.
7. Εξάτμιση καταναμημένου Bragg ανακλαστήρα (distributed Bragg reflector-DBR): Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το DBR είναι 3.5 ζεύγη διηλεκτρικών υλικών  $\text{AlF}_3$  ( $n=1.34$ ) και  $\text{ZnS}$  ( $n=2.28$ ). Ο καθρέπτης ολοκληρώνεται με 100 nm χρυσού προκειμένου να δημιουργηθεί ένα υβριδικό DBR, όπως φαίνεται και στο σχήμα XXb. Με αυτή τη μέθοδο μπορούμε να φθάσουμε σε μια τιμή ανακλαστικότητας ισχύος περίπου στο 99.95%.
8. Προσδιορισμός της συσκευής: Πάνω στο BCB χαράσσονται λωρίδες για να δημιουργηθούν γραμμές που χωρίζουν το κάθε VCSEL με το γειτονικό του και επίσης χαράσσονται τα VIAs για την επαφή με την πίσω πλευρά. Μια στρώση  $\text{Ti/Pt/Au}$  εξατμίζεται και μια επιπλέον μεγέθους 50-60 μm προστίθεται στο δείγμα. Το πάχος ελέγχεται με τη στάθμιση του δείγματος κατά τη διάρκεια της ηλεκτρολυτικής επικάλυψης (electroplating).
9. Αναστροφή (flip-chip) της δομής: Μετά τη διαδικασία της ηλεκτρολυτικής επικάλυψης, η διαδικασία συνεχίζει στην πίσω πλευρά του wafer όπου θα βρίσκεται η μελλοντική πάνω πλευρά της δομής. Αρχικά αφαιρείται το  $\text{InP}$  στρώμα μέσω επιλεκτικής χάραξης με υδροχλωρικό οξύ. Στη συνέχεια, αφαιρούνται με χάραξη οι περιοχές που έχουν τοποθετηθεί ως ασφάλειες (etch stop και buffer layer), επιτρέποντας την πρόσβαση στις δομές από τη μεριά του  $\text{InP}$  υποστρώματος (η οποία πλέον είναι η πάνω πλευρά).

Τα επιπλέον βήματα στην περιοχή αυτής της πλευράς είναι παρόμοια με αυτά που ακολουθήθηκαν για την πίσω πλευρά:

10. Άνοιγμα στρώματος επαφής κορυφής: Αυτή η διαδικασία είναι ανάλογη με το άνοιγμα του στρώματος επαφής στον πυθμένα.
11. Εξάτμιση των επιφανειών επαφής κορυφής: Επιπρόσθετα, στην κορυφή των επιφανειών επαφής γίνεται ηλεκτρολυτική επικάλυψη με χρυσό ούτως ώστε να βελτιωθεί η διάχυση της θερμότητας και η επαφή μεταξύ των δομών. Για να προστατευτεί ο πάνω καθρέπτης του VCSEL κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης και για να μεγιστοποιηθεί το φως το οποίο εισάγεται στη δομή του grating coupler, έπρεπε να εξακριβωθεί το βέλτιστο ύψος των επιφανειών επαφής οι οποίες προκύπτουν με ηλεκτρολυτική επικάλυψη. Ως αρχική τιμή επιλέχθηκε η απόσταση μεταξύ του πάνω καθρέπτη και των πάνω επιφανειών επαφής ( $\Delta h$ ) να είναι 300 nm και -300 nm για τις διαφορετικές συσκευές όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.
12. Εξάτμιση του πάνω DBR: Πέντε ζεύγη  $\text{AlF}_3/\text{ZnS}$  υλοποιούνται με ανακλαστικότητα κοντά στο 99.4%.

Ακολουθώντας τη διαδικασία που μόλις περιγράφηκε, το TUM ανέπτυξε την πρώτη γενιά VCSEL και συστοιχιών VCSEL. Μια εικόνα της δομής από οπτικό

μικροσκόπιο, όπως επίσης και μια σχηματική διατομή του τελικού VCSEL δίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23: (α) Πρώτη γενιά μονών VCSEL όπως φαίνονται από ένα οπτικό μικροσκόπιο, (β) σχηματικό της διατομής του τελικού VCSEL.

## 2.4 Μικροκυματικές ιδιότητες δομών VCSEL

Στα πλαίσια του συνολικού χαρακτηρισμού των δομών VCSELS, πέρα από τις μετρήσεις για τις χαρακτηριστικές LIV καμπύλες και τις μετρήσεις για την πολωτική τους συμπεριφορά οι οποίες και παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο, ο ραδιοκυματικός χαρακτηρισμός είναι άλλη μια μέτρηση η οποία προσφέρει εξαιρετικά σημαντική πληροφορία για τις δομές. Πιο συγκεκριμένα, κεντρικό ρόλο στη διαδικασία του ραδιοκυματικού χαρακτηρισμού μιας δομής παίζουν οι παράμετροι σκέδασης (scattering-parameters) οι οποίες περιγράφουν την ηλεκτρική συμπεριφορά γραμμικών ηλεκτρικών δικτύων όταν αυτά διεγείρονται από ηλεκτρικά σήματα [2.24]. Πολλές ηλεκτρικές ιδιότητες δομών μπορούν να περιγραφούν με τη χρήση των s- παραμέτρων όπως για παράδειγμα το κέρδος, οι απώλειες επιστροφής, το VSWR (voltage standing wave ratio), ο συντελεστής ανάκλασης και η σταθερότητα ενός ενισχυτή. Ο όρος ‘σκέδαση’ αναφέρεται στο φαινόμενο που παρατηρείται όταν ένα επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε ένα εμπόδιο ή διέρχεται από διαφορετικά διηλεκτρικά μέσα. Στα πλαίσια των s-παραμέτρων, η σκέδαση αφορά στον τρόπο με τον οποίο ένα διαδιδόμενο ρεύμα ή μια διαδιδόμενη τάση επηρεάζεται όταν ταξιδεύει σε μια γραμμή μεταφοράς από μια ασυνέχεια που προκύπτει από το σύστημα. Στην περίπτωση ενός δίθρου συστήματος, οι s-παραμέτροί του μπορούν να αναπαρασταθούν σε ένα διάγραμμα Smith. Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιεί πολικές συντεταγμένες για να αποτυπώσει τις s-παραμέτρους του δίθρου.

Προκειμένου να είναι δυνατή αυτού του τύπου η μέτρηση, απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ο οποίος περιγράφεται παρακάτω. Συγκεκριμένα περιγράφεται η ηλεκτρο-οπτική πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών η οποία επιτρέπει ραδιοκυματικές μετρήσεις μέχρι και τα 40 GHz. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται: ο ραδιοκυματικός σταθμός βάσης (RF probe station) Süss PM8, ο 40 GHz Anritsu Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyzer- VNA) και το οπτικό μικροσκόπιο. Ο VNA είναι το όργανο εκείνο που μετράει τις s- παραμέτρους της δομής και τις αποτυπώνει σε ένα διάγραμμα

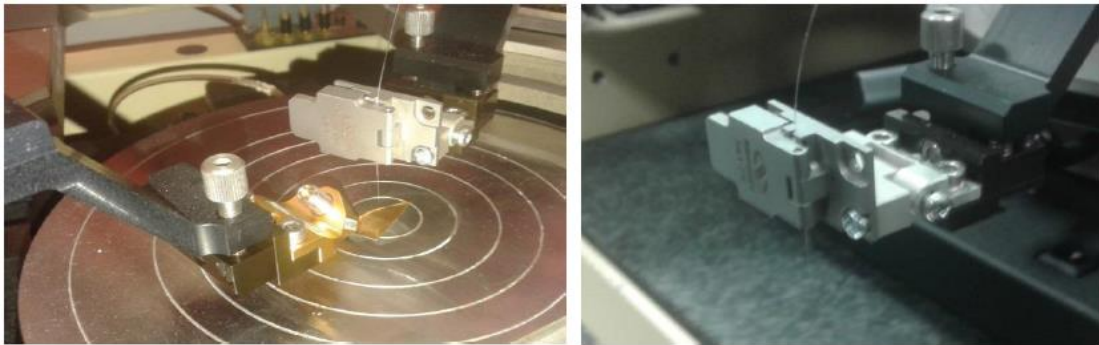
Smith [2.25]. Ο ραδιοκυματικός σταθμός βάσης μπορεί να φιλοξενήσει chips ή wafers με διάμετρο ως και 8 ίντσες και είναι σχεδιασμένος από τον κατασκευαστή αποκλειστικά για ραδιοκυματικούς χαρακτηρισμούς. Προκειμένου να μετρηθούν οι s-παράμετροι των δομών VCSEL ο σταθμός βάσης έπρεπε να διαμορφωθεί με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να διευκολυνθεί η ηλεκτρο-οπτική του λειτουργικότητα.

Τα δείγματα των VCSELS τοποθετούνται πάνω στο σφιγκτήρα κενού (vacuum chuck) διαμέτρου 8 ιντσών και προσεγγίζονται ηλεκτρικά μέσω ενός ειδικού ακροφυσίου (probe tip) με διάταξη GSG και απόσταση 100  $\mu\text{m}$ . Προκειμένου τα VCSELS να οδηγούνται πάνω από το κατώφλι λειτουργίας τους (lasing threshold), χρησιμοποιήθηκε ένα τροφοδοτικό τάσης ακριβείας. Το ραδιοκυματικό σήμα που παράγεται από τον VNA υπερτίθεται στο DC σήμα του τροφοδοτικού με τη χρήση ενός bias-T το οποίο επιτελεί ακριβώς αυτή τη διεργασία δηλαδή υπερθέτει AC και DC σήματα. Το ραδιοκυματικό probe tip συνδέεται στη θύρα 1 του VNA μέσω ενός 40 GHz ομοαξονικού καλωδίου. Επιπρόσθετα, το ραδιοκυματικό probe tip συνδέεται μηχανικά με ένα χειροκίνητο ρυθμιστή θέσης (positioner) ο οποίος διαθέτει ακρίβεια υπό του μικρού (submicron) μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου βραχίονα. Η ακριβής ευθυγράμμιση του probe tip με την επιφάνεια επαφής του προς-μέτρηση δείγματος (VCSEL) γίνεται με τη βοήθεια ενός οπτικού μικροσκοπίου. Για να υπάρχει πληθώρα επιλογών αναλόγως με την περίπτωση μέτρησης, το μικροσκόπιο εξοπλίστηκε με μια ποικιλία αντικειμενικών φακών μέσω των οποίων επιτυγχάνονταν μεγεθύνσεις της τάξης του 10x έως 50x.



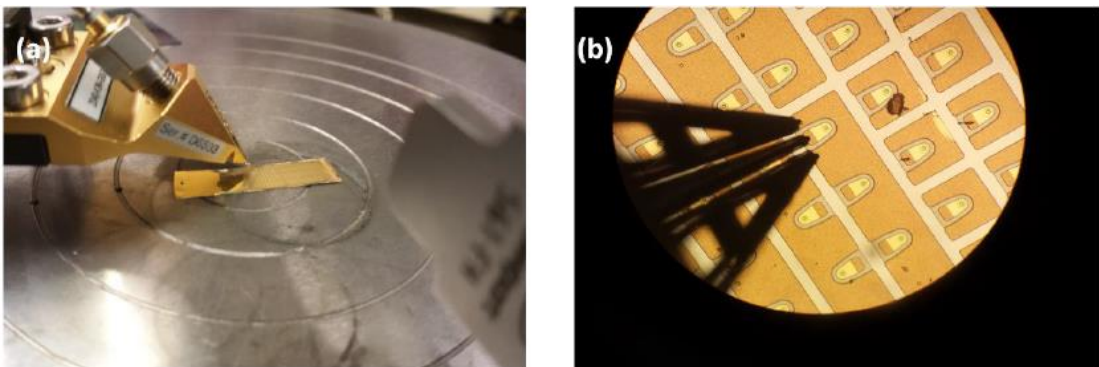
Εικόνα 24: Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω. Στην εικόνα φαίνονται: ο ραδιοκυματικός σταθμός βάσης, το οπτικό μικροσκόπιο και ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA).

Το οπτικό σήμα συλλέγεται στην έξοδο του VCSEL μέσω lensed οπτικής ίνας η οποία είναι προσδεμένη σε μια προσαρμοσμένη βάση στήριξης οπτικής ίνας (optical fiber holder). Η βάση στήριξης τοποθετήθηκε σε ένα ρυθμιστή θέσης ακριβείας submicron μέσω ενός βραχίονα και μιας κατάλληλης μηχανικής διεπαφής η οποία σχεδιάστηκε ad hoc. όπως διαμορφώθηκε η διάταξη αυτή, επιτρέπει την οριζόντια και κάθετη προσαρμογή της ίνας πάνω από το VCSEL όπως επίσης και την προσαρμογή της γωνίας της ίνας ως προς την κάθετη θέση επιτρέποντας και τη μέτρηση άλλων οπτικών δομών πέραν των VCSELs όπως π.χ. grating couplers. Η σωστή χωροθέτηση της ίνας επιτυγχάνεται μετρώντας την οπτική ισχύ εξόδου του VCSEL. Για δεδομένες τιμές ρεύματος έγχυσης, το σημείο στο οποίο η ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται είναι το βέλτιστο σημείο τοποθέτησης της ίνας. Το συλλεγμένο οπτικό σήμα εισάγεται σε μια 50 GHz φωτοδιόδο η οποία και συνδέεται με τη θύρα 2 του VNA προκειμένου να είναι δυνατή η μέτρηση της  $s_{21}$  παραμέτρου. Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει μια πιο κοντινή άποψη του VCSEL chip πάνω στο σφιγκτήρα κενού (vacuum chuck), μαζί με το ραδιοκυματικό probe tip και την ίνα.



Εικόνα 25: Κοντινή άποψη του (α) ραδιοκυματικού probe tip και (β) της προσαρμοσμένης βάσης στήριξης της οπτικής ίνας.

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε τον τρόπο με τον οποίο το ραδιοκυματικό probe tip έρχεται σε επαφή με το εξεταζόμενο chip, όπως επίσης και την άποψη μέσα από το μικροσκόπιο κατά τη διάρκεια της ευθυγράμμισης του probe tip με τις επιφάνειες επαφής των δομών VCSEL.

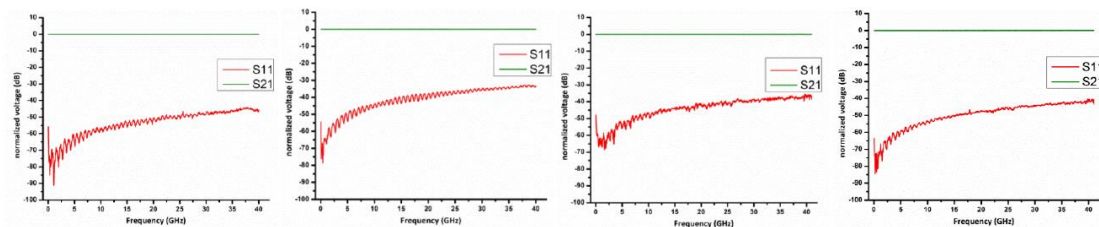


Εικόνα 26: (α) Η επαφή ενός GSG probe tip με το chip των VCSELs και (β) το ραδιοκυματικό probe tip και το chip με VCSELs όπως φαίνεται μέσα από το μικροσκόπιο.

Προκειμένου η μέτρηση των  $s$ - παραμέτρων να είναι αξιόπιστη είναι απαραίτητο να διενεργηθεί προσεκτική βαθμονόμηση (calibration) για να εξαλειφθούν τα λάθη τα

οποία εισάγονται με συστηματικό τρόπο από το μετρούμενο σύστημα, καθώς και να απαλειφθεί η υποβάθμιση που εισάγεται από άλλες δομές του συστήματος πέρα από την εξεταζόμενη δομή (device under test). Τυπικά λάθη κατά τη μέτρηση μπορεί να αποδοθούν σε ατέλειες που αφορούν στην κατευθυντικότητα των συζευκτών εντός του VNA και λάθη που προκύπτουν από τις ανακλάσεις μεταξύ της θύρας του VNA που στέλνει το ραδιοκυματικό σήμα και των υπό εξέταση δειγμάτων VCSEL. Επιπρόσθετα, τα ραδιοκυματικά καλώδια εισάγουν εξασθένηση στην πειραματική διάταξη, χρονική καθυστέρηση και στροφή φάσης επηρεάζοντας σημαντικά τις μετρήσεις του VNA. Η βαθμονόμηση του συστήματος βασίζεται σε μια τεχνική που ονομάζεται διόρθωση σφάλματος διανύσματος (vector error correction) όπου τα συστηματικά σφάλματα μιας μέτρησης εξαλείφονται χρησιμοποιώντας μια συγκεκριμένη αλληλουχία διαδικασιών.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι βαθμονόμησης οι οποίοι μπορούν να εφαρμοστούν από έναν VNA και αναλόγως με τη φύση της μέτρησης μπορούν να επιλεγθούν καταλλήλως. Για την περίπτωση της συγκεκριμένης ηλεκτρο-οπτικής πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, ο αλγόριθμος βαθμονόμησης (calibration) που επιλέχθηκε ήταν ο SOLT (Short, Open, Load, Thru) που είναι ο πιο απλός και συνήθης αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για βαθμονόμηση πριν από τη διενέργεια τέτοιου είδους ηλεκτρο-οπτικών μετρήσεων [2.26]. Προκειμένου να εφαρμοστεί χρειάζεται ένας αριθμός από δομές αναφοράς όπως μια δομή ανοιχτοκυκλώματος, μια (open) βραχυκυκλώματος (short), μια αντίσταση ακριβείας των 50 Ohm (load) και μια απευθείας σύνδεση (through connection). Μετά τη βαθμονόμηση, το επίπεδο αναφοράς της μέτρησης καταλήγει στην είσοδο της μετρούμενης δομής (VCSEL) και όλα τα συστηματικά σφάλματα εξαλείφονται.



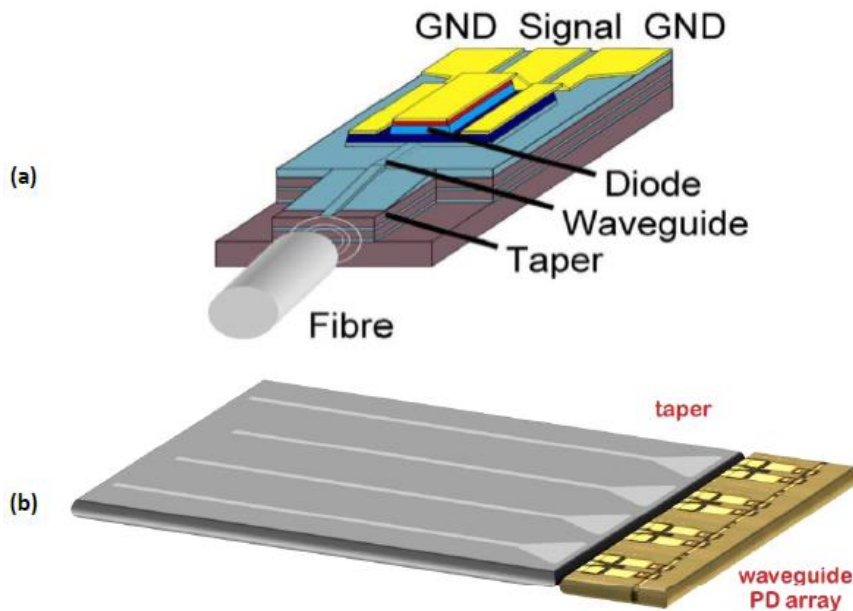
Εικόνα 27: Το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας τη SOLT μέθοδο σε υπόστρωμα αντίστασης 50 Ohm. Τα στιγμιότυπα πάρθηκαν με χρονική απόσταση μιας ώρας το ένα από το άλλο. Απώλειες επιστροφής (return loss) της τάξης των 30 dB παρατηρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις.

## 2.5 Φωτοδίοδοι κυματοδηγού

Φεύγοντας από το σημαντικό κομμάτι της πηγής που χρησιμοποιήθηκε, ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο πάνω σε ένα ενεργό οπτικό καλώδιο είναι η φωτοδίοδος. Στα πλαίσια αυτά λοιπόν επιλέχθηκε μια φωτοδίοδος κυματοδηγού να είναι εκείνη η οποία θα αποτελέσει τον δέκτη της δομής [2.27], [2.28]. Σε αντίθεση με τις φωτοδιόδους επιφανείας (surface photodiodes) που φωτίζουν με κάθετο τρόπο, μια προσέγγιση ολοκληρωμένου κυματοδηγού επιτρέπει τη ζεύξη του φωτός με επίπεδο τρόπο στη φωτοδίοδο. Μια τυπική ολοκληρωμένη φωτοδίοδος κυματοδηγού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και φέρει ένα κυματοδηγό ράβδωσης (rib-waveguide). Το φως από τον κυματοδηγό συζευγνύεται από την κατώτερη πλευρά στη στρώμα



απορρόφησης που έχει ένα μικρό κενό (small-gap absorpction layer). Μια μονολιθική δομή taper χρησιμοποιείται επίσης στην είσοδο του κυματοδηγού προκειμένου να αυξήσει την αντοχή σε πιθανές αποκλίσεις στην ευθυγράμμιση (alignment tolerances). Η ολοκληρωμένη φωτοδίοδος κυματοδηγού προκρίνεται ως λύση σε πιο προχωρημένες δομές δεκτών όπου είναι απαραίτητες επιπρόσθετες λειτουργίες στο SOI board όπως για παράδειγμα αποπολυπλεξία μήκους κύματος (wavelength demultiplexing). Σε μια τέτοια εφαρμογή το φως συζευγνύεται από την ίνα στο SOI chip μέσω μια γυάλινης 3D διεπαφής. Μετά την αποπολυπλεξία μήκους κύματος η οποία λαμβάνει χώρα στο SOI chip, το φως συζευγνύεται με επίπεδο τρόπο στη φωτοδίοδο κυματοδηγού. Αυτή η αρχιτεκτονική απλοποιεί κατά πολύ το σχέδιο του δέκτη σε σύγκριση με μια προσέγγιση κάθετης σύζευξης. Ο κύριος λόγος αυτής της απλοποίησης συνίσταται στην εξάρτηση πόλωσης που έχουν οι δομές κάθετης σύζευξης όπως π.χ. οι grating couplers. Δεδομένης της στοχαστικής κατάστασης της πόλωσης της πόλωσης του φωτός που καταφθάνει στο δέκτη, σε μια προσέγγιση κάθετης σύζευξης θα ήταν απαραίτητη η χρήση grating couplers δυο διαστάσεων με δυνατότητα λειτουργίας και στους δυο πολωτικούς άξονες. Τα δυο βασικά μειονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι αφενός θα αυξάνονταν σημαντικά οι απώλειες της σύζευξης και αφετέρου θα μεγάλωνε η αρχιτεκτονική της δομής καταλαμβάνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο περισσότερο χώρο πάνω στο chip. Γι' αυτό μια επίπεδη φωτοδίοδος κυματοδηγού προκρίνεται σε πιο περίπλοκες δομές όπως στην περίπτωση μας όπου το υπό ανάπτυξη Ενεργό Οπτικό Καλώδιο θα υλοποιηθεί με χαρακτηριστικά συμβατότητας με QSFP και CXP.



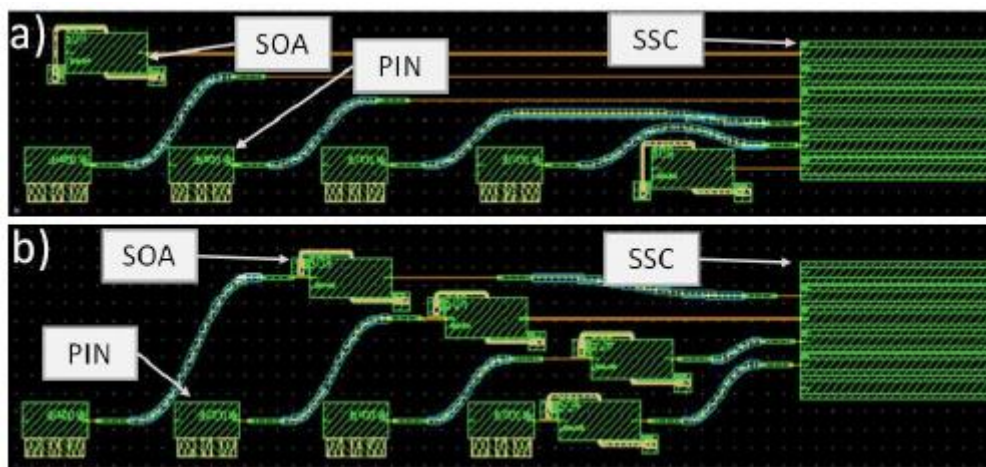
Εικόνα 28: (α) Τυπική υλοποίηση μιας φωτοδίοδου κυματοδηγού και (β) ο προτεινόμενος τρόπος υλοποίησης του δέκτη στην περίπτωση μας με χρήση φωτοδίοδων κυματοδηγού για συμβατότητα με QSFP και CXP Ενεργά Οπτικά Καλώδια.

Πέρα από το προφανές πλεονέκτημα των φωτοδίοδων κυματοδηγού, δηλαδή τη δυνατότητα επίπεδης σύζευξης, οι δομές αυτές έχουν υψηλότερη απόκριση (responsivity) καθώς και υψηλότερο ηλεκτρο-οπτικό εύρος ζώνης σε σύγκριση με τις

φωτοδιόδους φωτιζόμενης επιφανείας (surface-illuminating photodiodes). Επιπρόσθετα, μια πολύ σημαντική ιδιότητα των φωτοδιόδων κυματοδηγού είναι η συμβατότητά τους με τα Silicon Photonics. Οι φωτοδιόδοι κυματοδηγού που βασίζονται σε ανάπτυξη Γερμανίου (Ge-grown) πάνω σε νανοφωτονικούς κυματοδηγούς πυριτίου έχουν δειχθεί κατ' εξακολούθηση στη βιβλιογραφία, πετυχαίνοντας εύρος ζώνης 40 Gb/s με απόκριση 1 A/W [2.29], [2.30].

### 2.5.1 Αρχικός σχεδιασμός των φωτοδιόδων κυματοδηγού

Το Ινστιτούτο HHI στη Γερμανία, παρείχε το foundry του και συγκεκριμένα MPW (Multi-Project Wafer) runs μέσα σε αυτό, σε διάφορους φορείς με σκοπό τη μονολιθική ανάπτυξη ολοκληρωμένων δομών πάνω σε πλατφόρμα InP στα πλαίσια μια ευρωπαϊκής προσπάθειας για τον πολλαπλασιασμό των δυνατοτήτων κατασκευής φωτονικών δομών [2.31]. Με την ευκαιρία αυτή, σχεδιάστηκε μια πρώτη μάσκα από το ΕΦΕ με δομές φωτοδιόδων επίπεδου κυματοδηγού (in-plane waveguide photodiodes) προκειμένου στη συνέχεια να δοκιμαστούν ως προς την καταλληλότητά τους για χρήση στο υπό ανάπτυξη Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. Η σχεδιαστική βιβλιοθήκη του HHI παρείχε όλα τα απαραίτητα δομικά στοιχεία προκειμένου οι φωτοδιόδοι που θα κατασκευαστούν να είναι πλήρως συμβατοί με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις του foundry. Οι μάσκες οι οποίες κατασκευάστηκαν φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



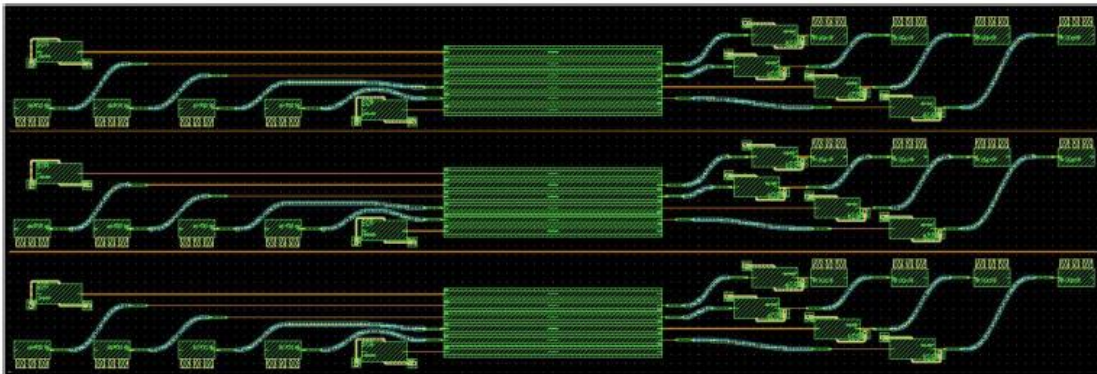
Εικόνα 29: Σχεδιαστική απεικόνιση των chip με τις φωτοδιόδους. (α) Μη ενισχυμένοι δέκτες και (β) δέκτες με προ-ενίσχυση.

Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των масκών προσέχθηκε ιδιαίτερα το τελικό αποτέλεσμα να είναι πλήρως συμβατό και με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις της ενσωμάτωσης στο Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. Σημαντικά σημεία ήταν η σχεδίαση κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να διευκολυνθεί η διασύνδεση (bonding) με το SOI board όπως επίσης και να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του ηλεκτρικού σήματος το οποίο στη συνέχεια θα κατευθυνθεί στα chips με τους TIAs. Έτσι με αυτό το γνώμονα καθορίστηκαν και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομών.

Η πρώτη σχεδιαστική προσέγγιση περιλάμβανε τέσσερις φωτοδιόδους (PIN) ανά chip συνδεδεμένες με spot-size-converters, δηλαδή δομές που είναι υπεύθυνες για την επιτυχή σύζευξη φωτός από την έξοδο μιας SMF ίνας στον ολοκληρωμένο InP

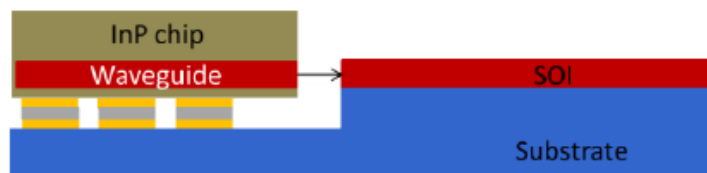
κυματοδηγό. Η διάσταση του spot-size-converter ήταν στα 127  $\mu\text{m}$  επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τον έλεγχο της λειτουργίας των δομών με μια τυπική συστάδα ινών (fiber array). Κατά το σχεδιασμό προβλέφθηκαν επίσης δυο Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs) οι οποίοι συνδέθηκαν με τους εξωτερικούς spot-size-converters. Αυτοί οι SOAs περιλήφθηκαν στο σχεδιασμό του chip προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως στοιχεία εκπομπής φωτός κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ενεργούς ευθυγράμμισης (active alignment) των φωτοδιόδων στο chip πυριτίου διευκολύνοντας με αυτόν τον τρόπο τη συνδεσμολογία (assembly) της ολοκληρωμένης 3D δομής (3D stack).

Η δεύτερη σχεδιαστική προσέγγιση, βασίζεται στην ιδέα ενός προ-ενισχυμένου δέκτη με την εισαγωγή μιας συστάδας από SOAs μεταξύ των PIN φωτοδίοδων και των spot-size-converters, η οποία θα χρησιμοποιηθεί σαν ένα οπτικό προ-ενισχυτικό στάδιο βελτιώνοντας το συνολικό budget απωλειών του υπό ανάπτυξη Ενεργού Οπτικού Καλωδίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακολουθώντας τη συγκεκριμένη σχεδιαστική προσέγγιση, δε χρειάζεται επιπλέον SOAs για ενεργή ευθυγράμμιση δεδομένου ότι οι προ-ενισχυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και γι' αυτό το σκοπό. Στο τελικό chip συμπεριλήφθηκαν τρια αντίγραφα από κάθε σχέδιο και το αποτέλεσμα της τελικής μάσκας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

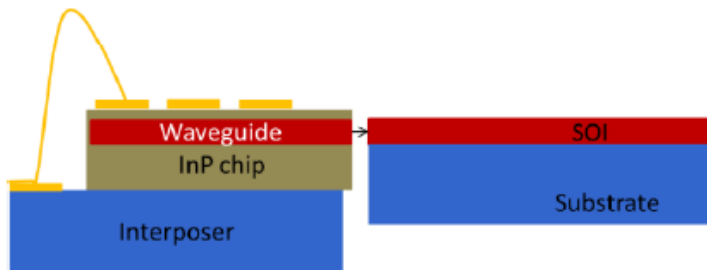


Εικόνα 30: Το σχέδιο της τελικής μάσκας με τις δυο διαφορετικές προσεγγίσεις στη σχεδίαση των φωτοδίοδων

Με τα παραπάνω δεδομένα, δυο μέθοδοι ολοκλήρωσης είναι πιθανοί: η flip-chip προσέγγιση όπου η συστάδα φωτοδίοδων κυματοδηγού θα τοποθετηθεί στην άκρη του πλακιδίου πυριτίου (για παράδειγμα σε μια κοιλότητα) ή η τοποθέτηση της συστάδας με κανονικό τρόπο (face-up) σε ένα υπόστρωμα και στη συνέχεια η χρήση τεχνικής ενεργούς ευθυγράμμισης (active alignment) προκειμένου να επιτευχθεί ακριβής σύζευξη στην άκρη του SOI πλακιδίου (butt-coupling τεχνική). Οι δυο αυτές μέθοδοι αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα.



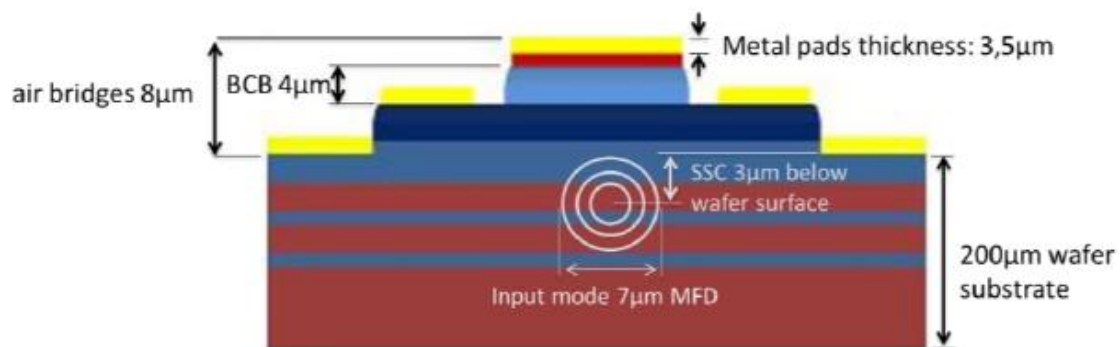
(a)



(b)

Εικόνα 31: Διαφορετικές μέθοδοι τοποθέτησης της συστάδας φωτοδιόδων κυματοδηγού: (α) Flip-chip μέθοδος και (β) butt-coupling, χρήση wirebonds και ενεργή ευθυγράμμιση.

Η προσεγγιστική μέθοδος που εκμεταλλεύεται την flip-chip τεχνική, είναι πιο θελκτική από μεριάς ολοκλήρωσης αλλά παράλληλα ενέχει και περισσότερα κατασκευαστικά ρίσκα. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, η πάνω όψη της PIN φωτοδιόδου δεν είναι επίπεδη, κάτι το οποίο καθιστά πολύ δύσκολο τον ακριβή έλεγχο της θέσης της δομής στον κάθετο άξονα. Αυτή η ακρίβεια στον κάθετο άξονα είναι εξαιρετικά σημαντική με δεδομένο ότι η ευθυγράμμιση στην περίπτωση της flip-chip μεθόδου είναι παθητική. Μια ακόμα πρόκληση συνδέεται με την κατασκευή της κοιλότητας. Με δεδομένο ότι οι κυματοδηγοί τόσο στο πλακίδιο InP όσο και στο SOI υπόστρωμα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένοι μετά το flip-chip, η κοιλότητα πρέπει να είναι σημαντικά βαθύτερη από ότι το στρώμα κυματοδηγού στο πλακίδιο SOI (τουλάχιστον 20  $\mu\text{m}$  με βάση τις διαστάσεις στο παρακάτω σχήμα και το πάχος το οποίο απαιτείται για τα pads επαφής στην κοιλότητα).

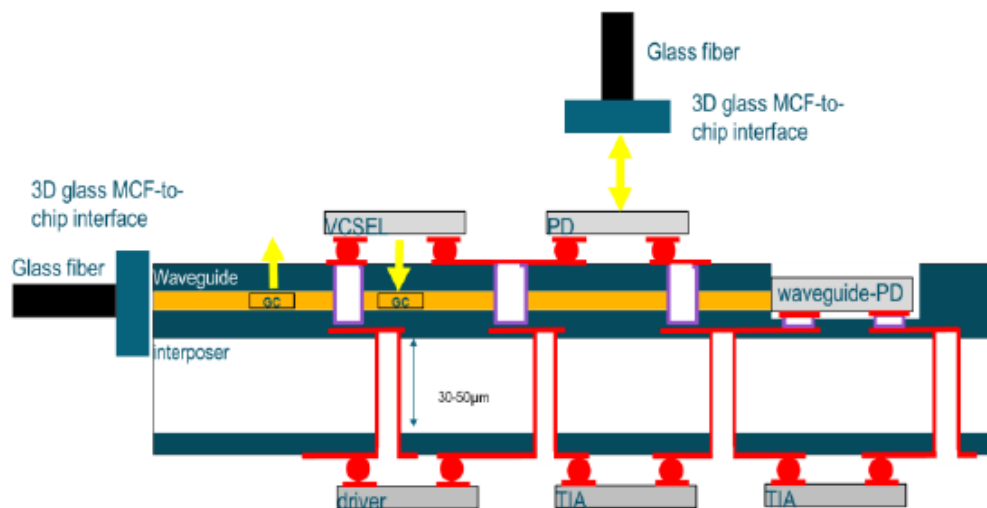


Εικόνα 32: Διατομή της φωτοδιόδου κυματοδηγού με αποτυπωμένες τις πιο χαρακτηριστικές διαστάσεις της.

Από την άλλη μεριά, η κλασική μέθοδος τοποθέτησης (face-up), χρησιμοποιεί wirebonds προκειμένου να υπάρχει ηλεκτρική επαφή

## 2.6 3D ολοκλήρωση

Για την κατασκευή των παραπάνω ηλεκτρο-οπτικών συσκευών ακολουθήθηκε μια προσέγγιση 3D ολοκλήρωσης. Τα ηλεκτρονικά, φωτονικά και ηλεκτρο-οπτικά στοιχεία τα οποία επιτελούν τις απαραίτητες λειτουργίες, συνδυάστηκαν σε μια πολυστρωματική στοίβα (multi-layer stack) εξασφαλίζοντας πολύ υψηλές επιδόσεις. Η 3D ολοκλήρωση καθώς και η συνδεσμολογία (assembly) έγιναν με συγκεκριμένες διεργασίες, που λαμβάνουν χώρα και στη βιομηχανία, και είναι κατάλληλες και για μαζική παραγωγή. Το λειτουργικό διάγραμμα της προσέγγισης με 3D ολοκλήρωση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 33: Λειτουργικό διάγραμμα της 3D ολοκλήρωσης.

Ως βασικό στρώμα το οποίο φέρει πάνω του όλες τις διαφορετικές λειτουργικές μονάδες, χρησιμοποιείται ένας παρεμβολέας (interposer). Η φωτοδιόδος και το VCSEL πρέπει να είναι σε πολύ κοντινή απόσταση με τον κυματοδηγό προκειμένου να κρατηθούν οι απώλειες όσο το δυνατόν χαμηλότερα. Οι απώλειες αυτές προκύπτουν από την απόκλιση της ακτίνας του φωτός με αποτέλεσμα να μην κατορθώνεται να κυματοδηγηθεί μεγάλο κομμάτι της ισχύος εκπομπής (λήψης). Στην εικόνα συμπεριλαμβάνονται και οι δυο επιλογές όσον αφορά στο είδος της φωτοδιόδου δηλαδή τόσο η φωτοδιόδος επιφανείας όσο και η φωτοδιόδος κυματοδηγού. Στην πρώτη προσέγγιση η φωτοδιόδος επιφανείας τοποθετείται πάνω από το στρώμα των κυματοδηγών και το φως συζευγνύεται στη φωτοδιόδο μέσα από μια γυάλινη διεπαφή. Στη δεύτερη προσέγγιση, μια φωτοδιόδος κυματοδηγού τοποθετείται στο ίδιο επίπεδο με τους κυματοδηγούς ούτως ώστε να πλησιάσει η ενεργός της περιοχή όσο το δυνατόν πιο κοντά και άρα να ελαττωθούν οι απώλειες σύζευξης φωτοδιόδου-κυματοδηγού. Επιπλέον, για την επικοινωνία της πολυπύρηνης ίνας και του chip υπήρχαν δυο προσεγγίσεις οι οποίες και οι δυο χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικά σημεία του chip. Η μια αφορούσε στην κατασκευή grating couplers για να διευκολύνει την κάθετη σύζευξη του φωτός από και προς το chip και η δεύτερη αφορούσε στην κατασκευή δομών SOI tapers που λειτουργούν ως μετατροπείς ρυθμού διευκολύνοντας την σύζευξη στον οριζόντιο άξονα. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία (οδηγητής VCSEL και TIA) συνδέονται στην άλλη πλευρά του

παρεμβολέα και η ηλεκτρική τους σύνδεση με τα ηλεκτρο-οπτικά στοιχεία του board γίνεται μέσω υψηλής ταχύτητας TSVs (through Silicon Vias).

### **2.6.1 Σχεδιασμός των στρωμάτων**

Ο σχεδιασμός των διαφόρων στρωμάτων του πομποδέκτη φαίνεται στην παραπάνω εικόνα. Οι κυματοδηγοί κατασκευάζονται στον πυρήνα της συσκευής με δεδομένο ότι είναι οι κεντρικές μονάδες για την κατανομή του φωτός. Οι κυματοδηγοί δημιουργούνται από SOI wafers με μια μονοκρυσταλλική επιφάνεια πυριτίου και μια επιφάνεια οξειδίου του πυριτίου που δρα ως μονωτής. Αυτές οι δυο στρώσεις προσδένονται σε έναν παρεμβολέα, ο οποίος φέρει τα ηλεκτρικά στοιχεία και συγκεκριμένα τους οδηγητές για τα VCSELs και τους TIAs για τις φωτοδιόδους. Αυτά τα ηλεκτρικά στοιχεία είναι συνδεδεμένα στους παρεμβολείς με bumps. Για να μπορέσει να υλοποιηθεί η έγχυση των bumps στην κορυφή των στρωμάτων των οξειδίων, δημιουργείται μια μεταλλική επίστρωση. Ως επόμενο βήμα μετά την κατασκευή της μεταλλικής επίστρωσης, κατασκευάζεται μια παθητική στρώση (passivation layer). Τα ανοίγματα τα οποία δημιουργούνται στην τελευταία πάνω από τα μεταλλικά pads καθορίζουν και τη θέση των bumps. Για τις ηλεκτρικές επαφές με την μεριά του κυματοδηγού, επιστρατεύονται TSVs μέσω των παρεμβολέων. Στην κορυφή του στρώματος των κυματοδηγών τοποθετούνται κατάλληλα τα ηλεκτρο-οπτικά στοιχεία προκειμένου να μπορούν να είναι σε διάδραση με τους κυματοδηγούς. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία αυτά που πρέπει να είναι σε διάδραση με τους κυματοδηγούς είναι: τα VCSELs, οι φωτοδιόδοι, οι πολυπύρηνη ίνα και οι γυάλινες διεπαφές ίνας-chip.

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, δυο δομές είναι υπεύθυνες για την επικοινωνία. Οι grating couplers, όπου πάνω από τους κυματοδηγούς επιτρέπονται μόνο στρώσεις οξειδίου, και οι οριζόντιοι συζεύκτες όπου είναι καλυμμένοι από ένα επιπλέον υπόστρωμα περιβλήματος (cladding layer). Στη δεδομένη περίπτωση χρησιμοποιείται Silicon Nitride που έχει κατάλληλο δείκτη διάθλασης για να χρησιμοποιηθεί γι' αυτό το σκοπό. Είναι επίσης ένα υλικό που χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή CMOS δομών. Η κύρια πρόκληση είναι η παραγωγή και των δυο δομών παράλληλα στο ίδιο wafer με τους ίδιους κυματοδηγούς γι' αυτό το λόγο και δοκιμάστηκαν δυο προσεγγίσεις. Στην πρώτη, το υπόστρωμα του περιβλήματος εγχέεται πριν τα υποστρώματα οξειδίου και μετά το Nitride απομακρύνεται από τους κυματοδηγούς και από τους grating couplers. Στη δεύτερη περίπτωση, το οξείδιο εγχέεται πρώτα έπειτα απομακρύνεται το οξείδιο πάνω από τους in-plane συζεύκτες και τέλος το Silicon Nitride εγχέεται επιλεκτικά και δομείται κατάλληλα.

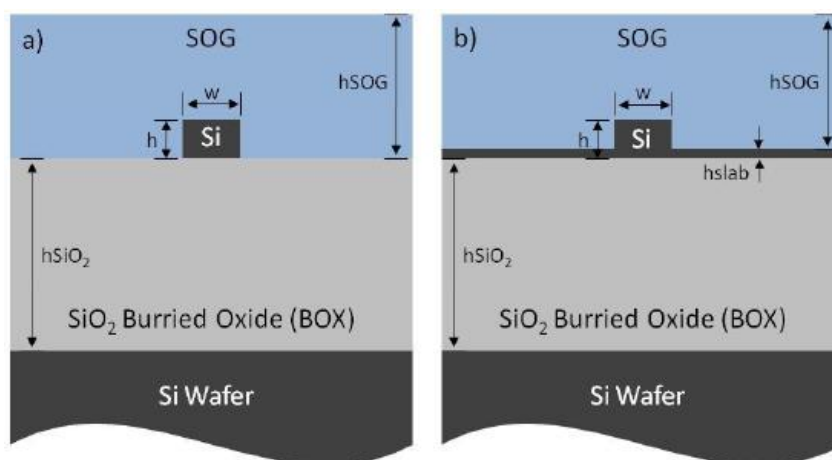
## **2.7 Προδιαγραφές της πλατφόρμας**

### **2.7.1 Παθητικές δομές στο πυρίτιο**

Στην πλατφόρμα SOI αναπτύχθηκαν οι εξής δομές: κυματοδηγοί, πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες μήκους κύματος, grating couplers και μετατροπείς ρυθμού. Οι προδιαγραφές αυτών των δομών περιγράφονται παρακάτω.

## 2.7.2 Κυματοδηγοί

Δυο τύποι κυματοδηγών είναι οι πιο διαδεδομένοι στην τεχνολογία Silicon-on-Insulator, οι strip και οι rib κυματοδηγοί [2.32]. Οι strip κυματοδηγοί αποτελούνται από ένα πυρήνα πυριτίου ο οποίος τοποθετείται κατευθείαν στην κορυφή του υποστρώματος διοξειδίου πυριτίου (Buried oxide- BOX) ενώ οι rib κυματοδηγοί περιλαμβάνουν επιπλέον μια πλάκα (slab) πυριτίου ως υπόστρωμα μεταξύ του πυρήνα και του BOX [2.33], [2.34]. Το ύψος του slab πυριτίου ποικίλλει ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή και τις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Και στις δυο περιπτώσεις οι κυματοδηγοί συνήθως καλύπτονται από ένα επιπλέον προστατευτικό περίβλημα προκειμένου να διασφαλιστεί αναισθησία στις φαινόμενα και αλλαγές του γύρω περιβάλλοντος όπως η οξείδωση.



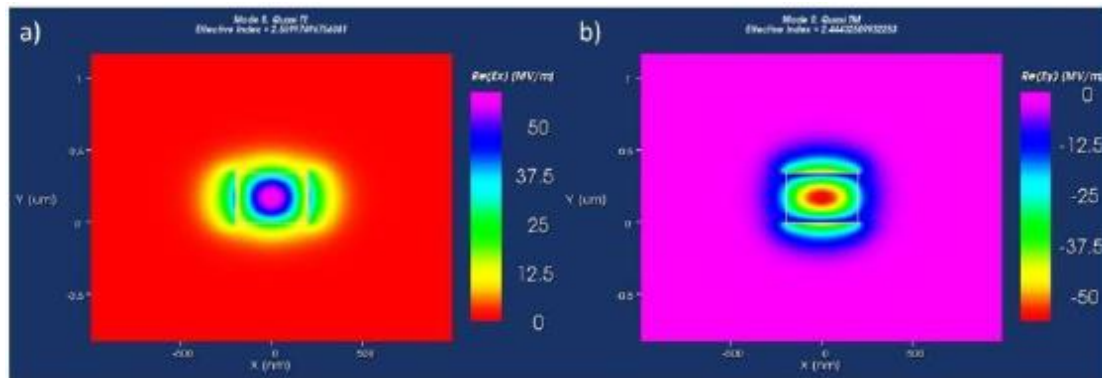
Εικόνα 34: (α) Strip SOI κυματοδηγός, (β) Rib SOI κυματοδηγός.

Στην περίπτωση αυτή, ερευνήθηκε η strip αρχιτεκτονική για τους κυματοδηγούς. Ο λόγος ήταν ότι αυτή η προσέγγιση διαθέτει πιο εύκολη διαδικασία κατασκευής (process flow) και έχει και πιο ακριβή αποτελέσματα όσον αφορά στις διαστάσεις του πυρήνα και την ποιότητα της διατομής. Ένα επιπλέον στοιχείο που επιλέχθηκε πέρα από τη μονορυθμική λειτουργία των κυματοδηγών είναι και η αναισθησία τους στην πόλωση. Με δεδομένο αυτό, οι διαστάσεις των κυματοδηγών σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να υποστηρίζουν και τον TE και τον TM ρυθμό διάδοσης. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι σημαντικές παράμετροι της αρχιτεκτονικής του κυματοδηγού.

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Si Refractive Index @1550 nm	nSi		3.48		
SiO <sub>2</sub> (BOX) Refractive Index	nSiO <sub>2</sub>		1.43		
SOG Refractive Index	nSOG		1.38		
SiO <sub>2</sub> Box Height	hSiO <sub>2</sub>		2		μm
Si waveguide width	w		400		nm
Si waveguide height	h		340		nm
TE Propagation losses @ 1550 nm	$\alpha_{TE}$	2	2.5	3	dB/cm
TM Propagation losses @ 1550 nm	$\alpha_{TM}$	2	2.5	3	dB/cm

Πίνακας 1: Παράμετροι αναφοράς της αρχιτεκτονικής των κυματοδηγών

Προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά των κυματοδηγών αλλά και να διερευνηθούν οι αντοχές στις κατασκευαστικές ατέλειες, ως πρώτο βήμα επιλέχθηκε η προσομοιωτική τους προσέγγιση. Χωρίς να μπορούμε σε μεγαλύτερες λεπτομέρειες στο κομμάτι αυτό (στο Κεφάλαιο 3 γίνεται πιο αναλυτική αναφορά σε προσομοιωτικά εργαλεία για το σχεδιασμό MMIs) αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα προσομοιωτικά εργαλεία (mode solvers) που χρησιμοποιούν τις μεθόδους Film-Mode-Matching και Finite-Difference, προκειμένου να εξαχθούν οι σταθερές διάδοσης (π.χ. δείκτες διάθλασης) και οι δομικές απώλειες των κυματοδηγών. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα προσομοιώσεων με τα εργαλεία αυτά για τη διάδοση του TE και του TM ρυθμού μέσα σε έναν strip κυματοδηγό μεγέθους 400x340 nm.



Εικόνα 35: (α) Θεμελιώδης TE και (β) θεμελιώδης TM ρυθμός μέσα σε έναν 400x340 nm strip SOI κυματοδηγό.

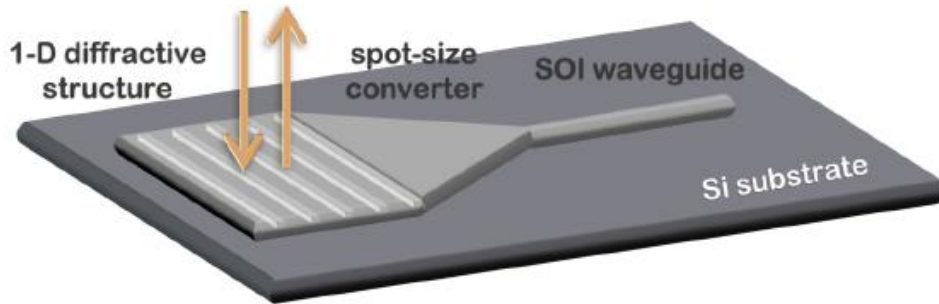


### 2.7.3 Πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες

Οι QSFP [2.35] και CXP [2.36] δομές που αναπτύχθηκαν, προκειμένου να διπλασιάσουν την ταχύτητα μετάδοσης, χρησιμοποίησαν εκπομπή διπλού μήκους κύματος στη C-μπάντα στα 320 Gb/s και 960 Gb/s αντίστοιχα. Η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος έγινε εφικτή με τη χρήση κατάλληλων πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών οι οποίοι αναπτύχθηκαν πάνω στην SOI motherboard. Η απόσταση των μηκών κύματος καθορίστηκε στα 10 nm ενώ υιοθετήθηκε μια λύση με τη χρήση συμβολομέτρων Mach-Zehnder με δεδομένο ότι οι δομές αυτές έχουν υψηλές αντοχές στις θερμοκρασιακές αλλαγές σε σύγκριση με προσεγγίσεις που κάνουν χρήση κοιλοτήτων όπως οι οπτικοί δακτύλιοι (ring resonators) και άρα μπορεί να διευκολύνουν μια σχεδιαστική προσέγγιση που δεν θα κάνει χρήση ψυκτικών μέσων. Επιπρόσθετα, με δεδομένο όπως ειπώθηκε και παραπάνω ότι επιλέχθηκε η λειτουργία των δομών με αναισθησία στην πόλωση, δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στο σχεδιαστικό κομμάτι προκειμένου οι πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες να έχουν παρόμοια συμπεριφορά στον TE και στον TM ρυθμό. Πιο αναλυτική περιγραφή των συγκεκριμένων στοιχείων γίνεται στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

### 2.7.4 Grating couplers

Προκειμένου να επιτευχθεί ζεύξη στον κάθετο άξονα από και προς το οπτικό SOI board, αναπτύχθηκαν κατάλληλοι grating couplers [2.37]. Η λειτουργία στον κάθετο άξονα σύζευξης του φωτός, καθιστά τις δομές αυτές ιδανικές όταν συνδυάζονται με την παρουσία VCSEL. Επιπλέον ευνοείται η χρήση τους με δεδομένη την απαίτηση για σύζευξη πολλών κυματοδηγών σε μια πολυπύρνη ίνα. Ο grating coupler είναι μια περιθλαστική δομή (diffractive structure) η οποία μπορεί να σχεδιαστεί για να συζευγνύει το φως στην επιφάνεια του κυματοδηγού μέσω μιας από της τάξεις την περίθλασής του. Μια τυπική δομή grating coupler φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αποτελείται από μια περιθλαστική δομή μιας διάστασης (one-dimensional diffractive structure) ακολουθούμενη από μια αδιαβατική δομή taper προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική σύζευξη του φωτός που περιθλάται μέσα στον κυματοδηγό. Οι grating couplers χρησιμοποιούνται ευρέως σε νανο-φωτονικές δομές πυριτίου γιατί προσφέρουν υψηλή απόδοση και έχουν την ικανότητα δοκιμής σε κλίμακα wafers. Οι δομές των grating couplers που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης τεχνολογίας, σκοπό είχαν την αύξηση της απόδοσης σύζευξης (coupling efficiency) ταυτόχρονα με τη μείωση της περίθλασης δεύτερης τάξης η οποία προκαλεί οπισθοσκεδάσεις στο VCSEL με πιθανώς καταστροφικά αποτελέσματα.



Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση ενός SOI grating coupler.

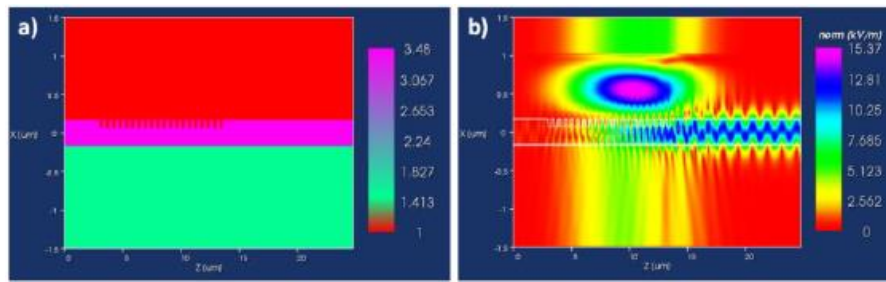
Σε πιο συγκεκριμένες πληροφορίες, οι δομές που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου, θα διαθέτουν gratings υψηλής διαφοράς δείκτη διάθλασης (high-index contrast) οι οποίες θα έχουν χαμηλές απώλειες σύζευξης και μεγάλη ανεκτικότητα όσον αφορά στην ευθυγράμμιση (alignment tolerances). Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των grating couplers φαίνονται παρακάτω.

Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
Grating periods		21		
Grating width		11		μm
Filling factor		TBD		
Pitch		TBD		nm
Diffractive structure footprint		11 x 21		μm
Optical 3dB-Bandwidth		40		nm
Incidence angle		0°	±2° *	deg
Insertion losses	2	3	4	dB
1dB loss alignment tolerance		2	3	μm

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των δομών grating couplers που χρησιμοποιήθηκαν.

Οι δομές grating coupler, σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας εργαλεία 2D-FDTD εμπορικά διαθέσιμα από την εταιρεία Phoenix BV, σε συνδυασμό με μοντέλα τα οποία αναπτύχθηκαν στο πρόγραμμα ComSol. Προκειμένου ο σχεδιασμός της δομής να συμμορφώνεται πλήρως με τις δυνατότητες του εργαλείου προσομοίωσης, η μια διάσταση του grating coupler (το πλάτος) θεωρήθηκε ημι-άπειρη. Αυτή είναι μια πολύ γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση που δεν επηρεάζει σημαντικά την εγκυρότητα του αποτελέσματος σχεδιασμού καθώς ο κατασκευασμένος συζεύκτης είναι αρκετά ευρύς ώστε να συζευγνύει όλο το φως που βγαίνει από το VCSEL ή την ίνα. Η δομή προσομοιώθηκε τόσο στο πεδίο του χρόνου

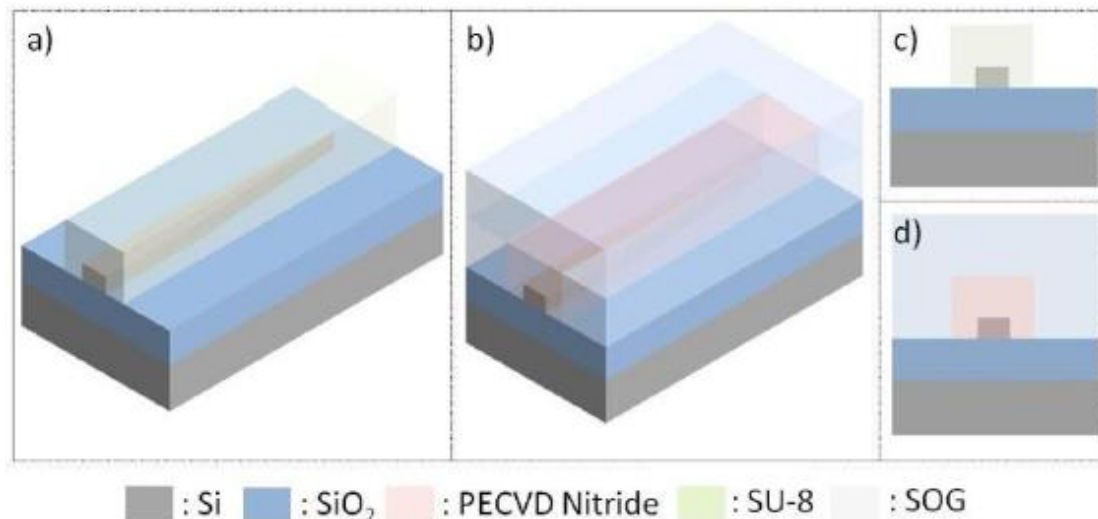
όσο και σε αυτό της συχνότητας παρέχοντας έτσι πληροφορία για την απόδοση σύζευξης, το μήκος κύματος λειτουργίας και το διαθέσιμο εύρος ζώνης.



Εικόνα 37: Προσομοίωση της δομής του grating coupler χρησιμοποιώντας τον 2D-FDTD solver

### 2.7.5 Μετατροπείς ρυθμού

Στα πλαίσια της κατασκευής του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου, κατασκευάστηκαν επίπεδοι μετατροπείς ρυθμού για την επίτευξη αποτελεσματικής σύζευξης του φωτός μεταξύ του SOI board και της πολυπύρηνης ίνας ή των φωτοδιόδων. Αυτοί οι μετατροπείς ρυθμού βασίστηκαν σε δομές οι οποίες συναντώνται στη βιβλιογραφία αλλά και τη βιομηχανία και αποτελούνταν από κωνοειδείς (tapered) κυματοδηγούς πυριτίου με αδιαβατική μείωση του πλάτους τους, οι οποίοι ήταν επικαλυμμένοι από έναν μεγαλύτερο πολυμερικό κυματοδηγό όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Η αρχή της λειτουργίας τους βασίζεται στην εκθετική μετατροπή του ρυθμού που κυματοδηγείται μέσα στον κυματοδηγό πυριτίου υψηλής διαφοράς δείκτη διάθλασης, στο ρυθμό ο οποίος υποστηρίζεται από τον κυματοδηγό-περίβλημα που διαθέτει χαμηλή διαφορά δείκτη διάθλασης [2.38], [2.39]. Ο σωστός καθορισμός των διαστάσεων του κυματοδηγού πυριτίου και του πολυμερικού περιβλήματος, επέτρεψε την εύρυθμη λειτουργία της δομής με ανοσία στην πόλωση.



Εικόνα 38: (α), (c) Τυπική δομή ανεστραμμένου taper- συζεύκτη το οποίο διαθέτει ένα SU-8 περίβλημα και για υπερ-περίβλημα (overcladding) χρησιμοποιεί τον αέρα, (b), (d) επίπεδη δομή συζεύκτη η οποία χρησιμοποιεί Silicon Nitride ως περίβλημα και SOG ως υπερ-περίβλημα.

Η κλασική τεχνολογία που χρησιμοποιείται σε αντίστοιχες δομές, εκμεταλλεύεται το πολυμερικό υλικό SU-8 για την κατασκευή του περιβλήματος και ολόκληρη η δομή απαιτείται να καλύπτεται είτε από αέρα είτε από υλικό με πολύ χαμηλό δείκτη

διάθλασης. Με δεδομένο όμως ότι το υλικό SU-8 δεν ήταν συμβατό με την εταιρεία που κατασκεύαζε τις δομές στα πλαίσια της συνεργασίας, χρησιμοποιήθηκε άλλο υλικό για την κατασκευή του περιβλήματος. Έτσι, δημιουργήθηκαν δοκιμαστικά wafers με διαφορετικές επιστρώσεις από silicon oxide και silicon nitride οι οποίες εγχύθηκαν στην κορυφή των wafers πυριτίου με τις κλασσικές μεθόδους επεξεργασίας. Τα wafers αυτά χαρακτηρίστηκαν πειραματικά με βασικές τεχνικές ελλειψομετρίας προκειμένου να προσδιοριστεί το κατάλληλο υλικό το οποίο θα έχει ικανό δείκτη διάθλασης για να μεσολαβήσει ως υπόστρωμα μεταξύ του κυματοδηγού περιβλήματος και του υποστρώματος από buried oxide.

Ο συνδυασμός του μήκους κύματος του laser, της γωνίας πρόσπτωσης του laser, του πάχους του υποστρώματος και του δείκτη διάθλασης του υλικού δεν επέτρεψε ακριβή μέτρηση για όλους τους συνδυασμούς υποστρωμάτων και μηκών κύματος. Παρόλα αυτά εξήχθησαν δυο πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Το ένα είναι ότι αφενός οι δείκτες διάθλασης των πέντε silicon oxides είναι πολύ κοντά στις τιμές οι οποίες πάρθηκαν από το υπόστρωμα αναφοράς buried oxide. Λαμβάνοντας υπόψιν την ακρίβεια της μέτρησης, η διαφορά στους δείκτες διάθλασης μεταξύ αυτών των υποστρωμάτων και του υποστρώματος αναφοράς είναι πολύ κοντά στην αβεβαιότητα της μέτρησης. Έτσι, αυτά τα υποστρώματα δεν είναι κατάλληλα να χρησιμοποιηθούν ως υλικό για την κατασκευή του κυματοδηγού περιβλήματος. Το άλλο είναι ότι οι δείκτες διάθλασης των PECVD nitride για όλα τα μήκη κύματος δίνουν μια αντίθεση δείκτη διάθλασης με το buried oxide περίπου στο 0.5. Γι' αυτό τον λόγο αυτό το υλικό αποδείχθηκε ως κατάλληλο για την κατασκευή των κυματοδηγών περιβλήματος.

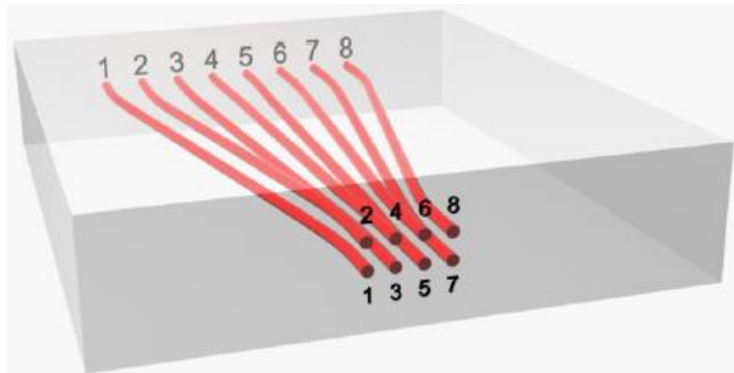
Ως εκ τούτου, τα προϋπάρχοντα προβλήματα που αφορούσαν τη συμβατότητα των διαφορετικών τεχνολογιών επεξεργασίας για την κατασκευή των επίπεδων συζευκτών, επιλύθηκαν με την αντικατάσταση του SU-8 με PECVD nitride ως περίβλημα κυματοδηγού. Λόγω αυτού, ήταν απαραίτητη η προσαρμογή του φωτονικού σχεδιασμού του συζεύκτη στα νέα δεδομένα και συγκεκριμένα στην επιλογή του περιβλήματος νιτριδίου. Έτσι το ανάστροφο taper, σχεδιάστηκε με βάση το παραπάνω σχήμα (b,d) προκειμένου να ληφθούν υπόψιν οι νέες συνθήκες δείκτη διάθλασης του περιβλήματος.

### **2.7.6 3D γυάλινες διεπαφές**

Στα πλαίσια της κατασκευής του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου και προκειμένου να συζευγνύεται το φως από τη SOI πλατφόρμα στην πολυπύρηνη ίνα αναπτύχθηκαν 3D γυάλινες διεπαφές. Η κατασκευή των γυάλινων κυματοδηγών έγινε με τη χρήση της τεχνικής 3D direct laser writing ούτως ώστε να ανακατανεμηθεί η γεωμετρία της πολυπύρηνης ίνας η οποία είναι σε μορφή συστοιχίας 2D σε μια γραμμική συστοιχία που είναι συμβατή με τη γεωμετρία του φωτονικού πλακιδίου. Η επεξεργασία του γυάλινου κυματοδηγού επίσης χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή της breakout διεπαφής μεταξύ των ινών μετατρέποντας έτσι την επταπύρηνη σε τετραπύρηνη.

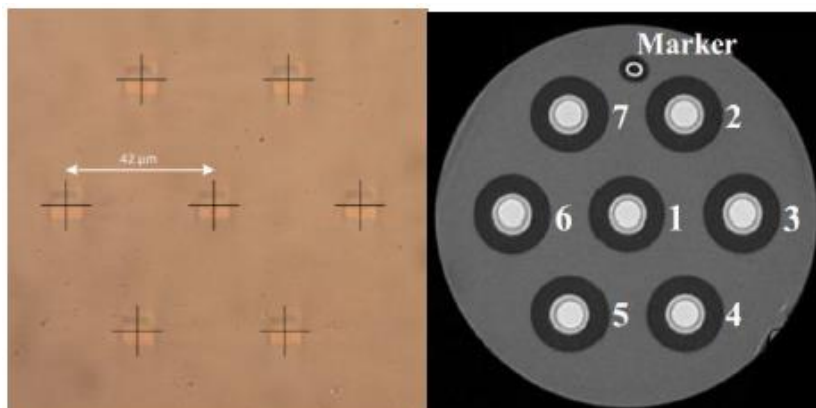
Οι διεπαφές SOI - MCF που αναπτύχθηκαν αποτελούνταν από ενσωματωμένους κυματοδηγούς 3D οι οποίοι παράχθηκαν από ακτινοβολία υψηλής έντασης με τη χρήση εστιασμένων παλμών laser femtosecond. Με τον προσεκτικό έλεγχο της

εναπόθεσης ενέργειας (energy deposition), προκλήθηκαν μόνιμες θετικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης με ελεγχόμενη διατομή, επιτρέποντας τον σχηματισμό αληθινά τρισδιάστατων δομών κυματοδηγού υψηλής ποιότητας. Οι δομές αυτές κατασκευάστηκαν με σκοπό να προσφέρουν υψηλής ποιότητας σύζευξη καταλαμβάνοντας παράλληλα πολύ μικρό χώρο στη συνολική δομή. Επιπλέον, επιτεύχθηκε εξαιρετική ταύτιση της διαμέτρου των ρυθμών των κυματοδηγών και της ίνας παρουσιάζοντας έτσι πολύ λίγες απώλειες. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται το σχηματικό διάγραμμα μιας τυπικής 3D γυάλινης φωτονικής δομής.



Εικόνα 39: Σχηματικό διάγραμμα της οκτακάναλης fanout δομής που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως διεπαφή για την πολυπύρηνη ίνα. Η διάσταση της 2D συστοιχίας είναι περίπου στα 30  $\mu\text{m}$  ενώ της 1D στα 127  $\mu\text{m}$ .

Οι γεωμετρία των δομών που αναπτύχθηκαν ήταν τετραγωνική από τη μεριά της τετραπύρηνης ίνας και εξαγωνική (με μια επιπλέον ίνα στο κέντρο του εξάγωνου) από τη μεριά της επταπύρηνης ίνας. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά αυτών των δομών δίνονται στον παραπάνω πίνακα. Οι απώλειες εισόδου των δομών αυτών ήταν πανομοιότυπες και από τις δυο μεριές, ενώ η απόσταση των ινών ήταν στα 250  $\mu\text{m}$ . Ο σχεδιασμός τους έγινε με τη χρήση CAD εργαλείων, mode solvers και BPM προγραμμάτων. Τα χαρακτηριστικά που προέκυψαν από τη μέτρηση της δομής όταν αυτή κατασκευάστηκε και ενσωματώθηκε με τις πολυπύρηνες ίνες μετρήθηκαν και παρουσιάζονται σε παρακάτω κεφάλαιο.



Εικόνα 40: Αριστερά, η εικόνα από το μικροσκόπιο της επιφάνειας με τα επτά κανάλια, δεξιά η εικόνα από το μικροσκόπιο μιας αντίστοιχης εμπορικά διαθέσιμης διεπαφής επτά καναλιών.

Αφού παρουσιάστηκαν αναλυτικά όλες οι τεχνολογίες και τεχνικές που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη του ενεργού οπτικού καλωδίου, στις παρακάτω

παραγράφους παρατίθενται πιο συγκεκριμένες παράμετροι για την κάθε δομή (πρωτότυπο) από τη σκοπιά του συστήματος.

### **2.7.7 208 Gb/s board-level οπτική διασύνδεση**

Λειτουργικό διάγραμμα

Η οπτική διασύνδεση με ταχύτητα μετάδοσης στα 208 Gb/s έχει στόχο να υλοποιήσει μια μονοκατευθυντική ζεύξη τεσσάρων γραμμών η οποία περιλαμβάνει τα παρακάτω βασικά στοιχεία:

- Τέσσερις ηλεκτρικούς οδηγητές (drivers)
- Τέσσερα απευθείας διαμορφωμένα (directly modulated) VCSEL
- Μια διεπαφή σύνδεσης του πλακιδίου με την πολυπύρηνη ίνα, που διασυνδέει τον πομπό με την ίνα
- Μια τετραπύρηνη μονορυθμική οπτική ίνα (MCF)
- Μια διεπαφή σύνδεσης του πλακιδίου με την πολυπύρηνη ίνα, που διασυνδέει το δέκτη με την ίνα
- Τέσσερις φωτοδιόδοι
- Τέσσερις γραμμικοί TIAs

Οι ηλεκτρικές είσοδοι ροών δεδομένων ενισχύονται από τους ηλεκτρικούς οδηγητές οι οποίοι εν συνεχεία τροφοδοτούν τις δομές των VCSEL. Οι τέσσερις παραγόμενες οπτικές ροές δεδομένων εισάγονται στην μονορυθμική τετραπύρηνη ίνα μέσω μιας κατάλληλης διεπαφής που τη συνδέει με το πλακίδιο. Μετά τη διάδοση στην ίνα, άλλη μια διεπαφή σύνδεσης μεταξύ ίνας και πλακιδίου μεσολαβεί προκειμένου το φως να συζευχθεί στο πλακίδιο του δέκτη. Κάθε ένα από τα τέσσερα αποπολυπλεγμένα κανάλια ανιχνεύεται μέσω μιας φωτοδιόδου. Τέλος, γραμμικοί TIAs χρησιμοποιούνται προκειμένου να ενισχύσουν το φωτορεύμα που παράγεται από τις φωτοδιόδους κατάλληλα.

Η συγκεκριμένη δομή υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 26 Gbaud ανά κανάλι και είναι συμβατή με τις προδιαγραφές του Infiniband EDR (25.78125 Gb/s) [2.40]. Τα σχήματα διαμόρφωσης που υποστηρίζει είναι OOK και PAM-4, δίνοντας έτσι την κατάλληλη ευελιξία στον πομποδέκτη να ρυθμίζει το ρυθμό δεδομένων είτε στα 26 Gb/s είτε στα 52 Gb/s αντιστοίχως. Οι ηλεκτρικές προδιαγραφές της δομής καθώς και οι οπτο-ηλεκτρονικές παράμετροι της δίνονται στους παρακάτω πίνακες και αφορούν τις θερμοκρασίες και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας. Ο πομπός και ο δέκτης είναι και οι δύο AC coupled.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage	±5%		3.3		V
Power dissipation per channel			TBD		W
Input signal rise and fall time	10-90%		12.5		ps
Input impedance, differential	up to 26 GHz		100		Ohm
Input voltage, differential		175		800	mVpp
Output Signal Rise and Fall Time	10-90%		12.5		ps
Output single-ended voltage swing			1		Vpp
Within pair skew				2	ps
Bandwidth	-3 dB		17		GHz

Πίνακας 3: Οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του πομπού

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Frequency		191.2		196.0	THz
Fibre launch power		-5		0	dBm
Rx maximum sensitivity	NRZ with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-13.2			dBm
	PAM-4 with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-8.5			dBm
Rx minimum overload		-5			dBm
Fibre length		1		300	m
Fibre attenuation	C-band		0.22		dB/km
Fibre chromatic dispersion			18		ps/[nm km]

Πίνακας 4: Οπτικές ιδιότητες της πομποδέκτη

Στη μεριά του πομπού, το φως το οποίο εκπέμπεται από τα VCSEL συζευγνύεται στο SOI board μέσω δομών grating couplers, οι οποίοι είναι καταλλήλως σχεδιασμένοι για κάθετη σύζευξη. Αντίστοιχες δομές από grating couplers χρησιμοποιούνται και για τη ζεύξη του φωτός από το board στην πολυπύρηνη ίνα. Στη μεριά του δέκτη, το σήμα εισέρχεται στις φωτοδιόδους από την πολυπύρηνη ίνα με τη χρήση μιας

γυάλινης 3D διεπαφής κυματοδηγού (3D waveguide glass interface). Ο σχεδιασμός της δομής απλοποιείται αφού δεν χρησιμοποιείται καθόλου πολυπλεξία/ αποπολυπλεξία μήκους κύματος πάνω στα boards. Οι συνολικές απώλειες του πομπού υπολογίστηκαν στα 7 dB, 3 dB από κάθε grating coupler και 1 dB από τις απώλειες κυματοδηγού. Για το δέκτη οι απώλειες πέφτουν στα 0.7 dB που ουσιαστικά προέρχονται από τη 3D γυάλινη διεπαφή. Τέλος, με δεδομένο ότι οι ζεύξεις θα έχουν μήκος 150 m και 300 m, έχουμε άλλα 0.03 dB και 0.06 dB απώλειες αντιστοίχως. Συνολικά μιλώντας και για τη χειρότερη περίπτωση, οι εκτιμώμενες απώλειες του πομποδέκτη θα είναι στα 7.76 dB.

### 2.7.8 320 Gb/s QSFP δομή Ενεργού Οπτικού Καλωδίου

Το 320 Gb/s QSFP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο θα υλοποιηθεί ως ένα αμφίδρομο link τεσσάρων καναλιών και θα περιλαμβάνει τις παρακάτω βασικές δομές:

- Τέσσερις ηλεκτρικούς οδηγητές
- Τέσσερα απευθείας διαμορφούμενα VCSELs
- Δυο πολυπλέκτες μήκους κύματος
- Μια διεπαφή σύνδεσης του chip με την πολυπύρηνη ίνα
- Μια τετραπύρηνη μονορυθμική ίνα
- Δύο αποπολυπλέκτες μήκους κύματος
- Τέσσερις φωτοδιόδους
- Τέσσερις γραμμικούς TIAs

Οι ηλεκτρικές εισοδοι οι οποίες αποτελούν τη διεπαφή με τους SerDes [2.41] ενισχύονται από τέσσερις ηλεκτρικούς οδηγητές πριν την είσοδο των VCSELs. Οι τέσσερις δομές VCSEL συνδυάζονται σε ζεύγη από τα οποία το καθένα εκπέμπει σε διαφορετικό WDM μήκος κύματος. Το διαμορφωμένο φως από τις εξόδους των VCSELs, πολυπλέκεται κατά μήκος κύματος στους αντίστοιχους πολυπλέκτες σε δυο ροές WDM (η κάθε ροή αποτελείται από δυο μήκη κύματος). Οι ροές αυτές εισάγονται στην πολυπύρηνη ίνα μέσω της διεπαφής που υπάρχει με το chip. Δυο πυρήνες από την πολυπύρηνη ίνα χρησιμοποιούνται για κάθε κατεύθυνση της διάδοσης. Στη μεριά του δέκτη, οι WDM ροές από την ίνα εισάγονται στο chip πάλι από την διεπαφή που υπάρχει. Η αποπολυπλεξία μήκους κύματος γίνεται από τους δυο αποπολυπλέκτες και κάθε ένα από τα τέσσερα αποπολυπλεγμένα κανάλια ανιχνεύεται με ένα φωτο ανιχνευτή. Η διεπαφή της QSFP δομής με τον SerDes διευκολύνεται με τη χρήση γραμμικών TIAs οι οποίοι μετατρέπουν το λαμβανόμενο φωτορεύμα της φωτοδιόδου σε μια αντίστοιχη τάση με πλάτος κατάλληλο για τον SerDes. Η δομή υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 40 Gbaud ανά κανάλι. Προκειμένου να έχει συμβατότητα και με τις προδιαγραφές του Infiniband EDR θα διαθέτει και τη δυνατότητα λειτουργίας στα 26 Gbaud. Οι υποστηριζόμενοι τρόποι διαμόρφωσης θα είναι οι OOK και PAM-4 δίνοντας έτσι στη δομή μας μεγάλη ευελιξία με εύρος λειτουργίας από τα 26 Gb/s έως τα 80 Gb/s.

Οι ηλεκτρικές προδιαγραφές και οι οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες της δομής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα και είναι τιμές αναφοράς για όλες τις θερμοκρασίες και συχνότητες λειτουργίας της. Ο πομπός και ο δέκτης είχαν και οι



δυο AC σύζευξη ενώ ηλεκτρική αντιστάθμιση (electrical equalization) συμπεριλήφθηκε και στις δυο μεριές προκειμένου να αντισταθμιστούν τα επαγόμενα φαινόμενα της διασποράς σε μεγάλες αποστάσεις, τα οποία εισάγουν περιορισμούς στο εύρος ζώνης.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage	±5%		3.3		V
Power dissipation per channel			TBD		W
Input signal rise and fall time	10-90%		12.5		ps
Input impedance, differential	up to 40 GHz		100		Ohm
Input voltage, differential		500		1200	mVpp
Output Signal Rise and Fall Time	10-90%		12.5		ps
Output single-ended voltage swing			1000		mVpp
Within pair skew				2	ps
Bandwidth	-3 dB		26		GHz

Πίνακας 5: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του QSFP στη μεριά του πομπού.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage	±5%		3.3		V
Power dissipation per channel			TBD		W
Output impedance, differential			100		Ohm
Output Signal Rise and Fall Time	10-90%		12.5		ps
Output differential voltage swing			400		mVpp
Within pair skew				2	ps
Bandwidth	-3 dB		26		GHz

Πίνακας 6: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του QSFP στη μεριά του δέκτη.

Οι οπτικές ιδιότητες της δομής QSFP συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα ενώ η 3D απεικόνιση της στην παρακάτω εικόνα όπου αποτυπώνεται μόνο το οπτικό της κομμάτι προς χάριν απλότητας. Ακολουθώντας την ίδια λογική και με την πρώτη

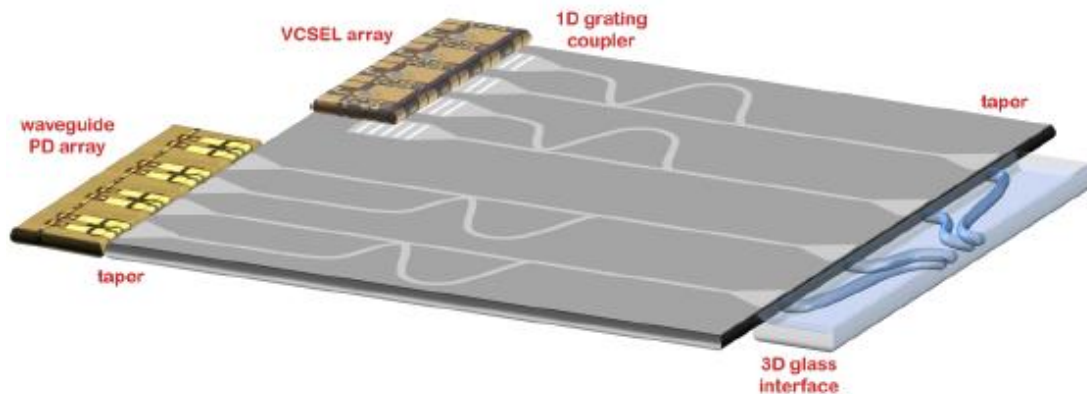
δομή, στη μεριά του πομπού υπάρχουν τέσσερις grating couplers οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη σύζευξη του εκπεμπόμενου φωτός από τα VCSELs. Οι grating couplers αυτοί έχουν κατάλληλη αρχιτεκτονική προκειμένου να διευκολύνουν μια κατακόρυφη σύζευξη εισάγοντας στον άξονα αυτό ένα μικρό αριθμό απωλειών. Η πολυπλεξία μήκους κύματος λαμβάνει χώρα πάνω στο SOI board με τη χρήση δυο πολυπλεκτών, την αρχιτεκτονική των οποίων θα συναντήσουμε σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας. Αφού τα τέσσερα σήματα πολυπλεχθούν, σε ζεύγη των δυο, εν συνεχεία μέσω μιας 3D διεπαφής γυαλιού συζευγνύονται στην πολυπύρνηνη ίνα. Προκειμένου οι κυματοδηγούμενοι ρυθμοί στο SOI board να μπορούν να ταιριάζουν στους ρυθμούς που υποστηρίζει η γυάλινη διεπαφή, χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλοι μετατροπείς ρυθμού (mode converters). Επι της ουσίας οι μετατροπείς αυτοί έχουν κωνοειδή μορφή και διαπλάτυνονται με σταδιακό τρόπο προκειμένου ένα ρυθμός που διαδίδεται σε ένα κυματοδηγό συγκεκριμένου πλάτους, να μπορεί να διαδοθεί και σε έναν άλλο με μεγαλύτερο πλάτος χωρίς να υπάρχουν απώλειες ισχύος. Από τη μεριά του δέκτη, το λαμβανόμενο πολυπλεγμένο σήμα διαχωρίζεται μέσω ενός ανάλογου SOI αποπολυπλέκτη μήκους κύματος και οι ανάλογες οπτικές ροές καταλήγουν σε συστοιχίες φωτοδιόδων για ανίχνευση. Για την περίπτωση της QSFP δομής, προκρίθηκε η επιλογή της in-plane ζεύξης στις φωτοδιόδους κυματοδηγού. Η επιλογή αυτή προτιμήθηκε έναντι της κάθετης σύζευξης (π.χ. με τη χρήση grating couplers), λόγω της τυχαίας κατάστασης της πόλωσης (state of polarization) που καταφθάνει στο δέκτη. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται μετατροπείς ρυθμού προκειμένου να υπάρχει και αυξημένη αντοχή στις απώλειες ευθυγράμμισης.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Frequency		191.2		196.0	THz
WDM channel spacing		5			nm
Fibre launch power		-4		0	dBm
Rx maximum sensitivity	NRZ with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-14.4			dBm
	PAM-4 with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-9.7			dBm
Rx minimum overload		-5			dBm
Fibre length		150		2000	m
Fibre attenuation	C-band		0.22		dB/km
Fibre chromatic dispersion			18		ps/[nm km]

Πίνακας 7: Οπτικές ιδιότητες της QSFP δομής.

Όσον αφορά στην εκτίμηση των συνολικών απωλειών της δομής, υπολογίστηκε ότι ο grating coupler που μεσολαβεί μεταξύ του VCSEL και του SOI chip θα έχει απώλειες της τάξης των 3 dB, οι απώλειες κυματοδηγού και πολυπλέκτη αθροιστικά θα είναι

στα 3 dB, ο μετατροπέας ρυθμού θα εισάγει απώλεια 2 dB και η γυάλινη 3D διεπαφή 0.7 dB. Οπότε στη μεριά του πομπού οι εκτιμώμενες απώλειες είναι 8.7 dB. Από τη μεριά του δέκτη, η μόνη διαφορά είναι η ύπαρξη ενός ακόμα μετατροπέα ρυθμού που αντικαθιστά τον αντίστοιχο grating coupler του πομπού οπότε οι συνολικές απώλειες υπολογίστηκαν στα 7.7 dB. Λαμβάνοντας υπόψη και τις απώλειες διάδοσης στην ίνα για αποστάσεις 300 m (0.06 dB) και 2 km (0.4 dB) που είναι οι ενδεικνύμενες για τη συγκεκριμένη δομή QSFP, οι συνολικές απώλειες της δομής για τη χειρότερη περίπτωση (διάδοση στα 2 km) διαμορφώνονται στα 16.8 dB.



Εικόνα 41: Σχηματική 3D απεικόνιση της QSFP δομής.

### 2.7.9 960 Gb/s CXP δομή Ενεργού Οπτικού Καλωδίου

Η δομή το 960 Gb/s Ενεργού Οπτικού Καλωδίου αποτελεί ουσιαστικά μια αναβάθμιση της παραπάνω QSFP δομής και είχε στόχο να υλοποιήσει μια αμφίδρομη ζεύξη δώδεκα γραμμών. Η δομή περιείχε τα παρακάτω βασικά δομικά στοιχεία:

- Δώδεκα ηλεκτρικού οδηγητές
- Δώδεκα απευθείας διαμορφωμένα VCSELs
- Έξι πολυπλέκτες μήκους κύματος
- Μια διεπαφή chip και πολυπύρηνης ίνας
- Δυο επταπύρηνες μονορυθμικές ίνες
- Έξι αποπολυπλέκτες μήκους κύματος
- Δώδεκα φωτοανιχνευτές
- Δώδεκα γραμμικούς TIAs

Οι ηλεκτρικές εισοδοι οι οποίες επικοινωνούν με τον SerDes ενισχύονται μέσω της χρήσης αντίστοιχων ηλεκτρικών οδηγητών οι οποίοι προηγούνται των VCSELs. Οι δώδεκα δομές από VCSEL ολοκληρώνονται στο ίδιο chip είτε με μονολιθικό τρόπο είτε χωρίζονται σε δυο συστοιχίες των έξι. Σε κάθε περίπτωση τα VCSEL οργανώνονται σε δυο ομάδες των έξι όπου η κάθε μια εκπέμπει σε διαφορετικό WDM μήκος κύματος. Το διαμορφωμένο φως από την έξοδο του VCSEL, πολυπλέκεται κατά μήκος κύματος στους πολυπλέκτες σε έξι WDM ροές, όπου η κάθε μια αποτελείται από δυο μήκη κύματος. Οι WDM ροές εισάγονται στην πολυπύρηνη ίνα μέσω μιας διεπαφής chip-ίνας. Έξι πυρήνες της πολυπύρηνης ίνας δεσμεύονται για κάθε κατεύθυνση διάδοσης. Στη μεριά του δέκτη, οι WDM ροές εισέρχονται στο chip πάλι από την αντίστοιχη διεπαφή. Η αποπολυπλεξία μήκους

κύματος γίνεται μέσω των ανάλογων αποπολυπλεκτών και κάθε ένα από τα δώδεκα αποπολυπλεγμένα κανάλια ανιχνεύεται με τη χρήση φωτοδεκτών. Η επικοινωνία του CXP με τον SerDes μεσολαβείται και από γραμμικούς TIAs οι οποίοι μετατρέπουν το λαμβανόμενο φωτορεύμα από τη φωτοδίοδο στην αντίστοιχη τάση και μάλιστα με κατάλληλο πλάτος που ταιριάζει στις προδιαγραφές του SerDes.

Η δομή φτιάχτηκε για να υποστηρίξει ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 40 Gbaud ανά κανάλι. Προκειμένου όμως να υπάρχει συμβατότητα και με προδιαγραφές χαμηλότερης ταχύτητας, η δομή είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί και στα 26 Gbaud. Τα υποστηριζόμενα σχήματα διαμόρφωσης είναι τα OOK και PAM-4 οπότε με αυτό τον τρόπο η δομή έχει μια ευελιξία ταχύτητας από τα 26 Gb/s έως τα 80 Gb/s ανά κανάλι. Οι ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές προδιαγραφές της CXP δομής αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Προκειμένου να αντισταθμιστούν φαινόμενα τα οποία επάγονται από τη διασπορά στην περίπτωση της διάδοσης σε μεγάλο μήκος ίνας, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρική αντιστάθμιση (equalization) τόσο στη μεριά του πομπού όσο και σε αυτή του δέκτη.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Supply voltage	±5%		3.3		V
Power dissipation per channel			TBD		W
Input signal rise and fall time	10-90%		12.5		ps
Input impedance, differential	up to 40 GHz		100		Ohm
Input voltage, differential		500		1200	mVpp
Output Signal Rise and Fall Time	10-90%		12.5		ps
Output differential voltage swing			1		Vpp
Within pair skew				2	ps
Bandwidth	-3 dB		26		GHz

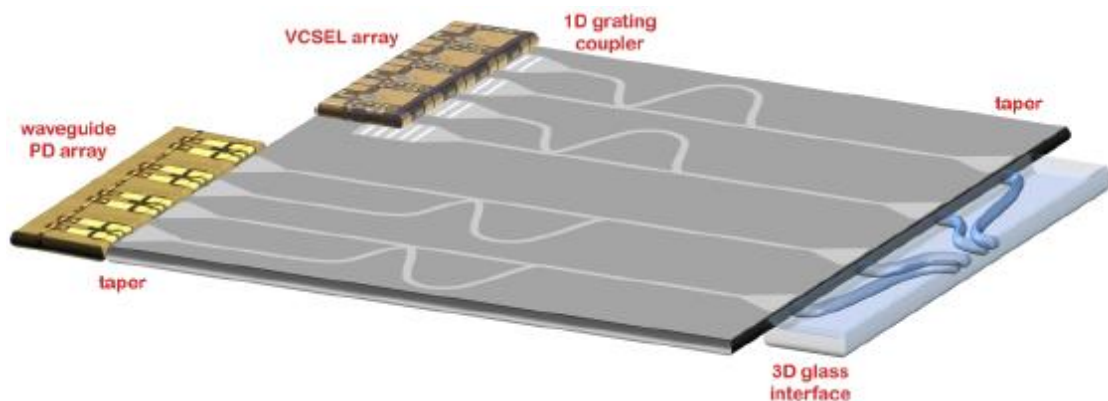
Πίνακας 8: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές προδιαγραφές του πομπού του CXP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου.

Όσον αφορά στις οπτικές ιδιότητες της δομής, αυτές περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα για το εύρος των θερμοκρασιών και συχνοτήτων λειτουργίας της. Η 3D απεικόνιση της δομής αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα και ακολουθεί την ίδια αρχιτεκτονική με την παραπάνω QSFP δομή όπου βέβαια αποτυπώνεται μόνο το οπτικό κομμάτι του κυκλώματος προς χάριν απλοποίησης και μάλιστα τέσσερεις από τις δώδεκα γραμμές της. Στη μεριά του πομπού, τα VCSEL συζευγνύονται στο SOI boars με τη χρήση grating couplers. Το φως παράγεται από τη συστοιχία των VCSEL

και εν συνεχεία γίνεται πολυπλεξία μήκους κύματος. Για να καταλήξουν τα πολυπλεγμένα σήματα στην πολυπύρηνη ίνα, μεσολαβεί μια γυάλινη 3D διεπαφή. Κατάλληλη μετατροπείς ρυθμού επιστρατεύονται για να μην υπάρχουν απώλειες μεταξύ κυματοδηγού και γυάλινης επιφάνειας. Η ίδια ακριβώς λογική χρησιμοποιείται και στη μεριά του δέκτη οπότε και το αποπολυπλεγμένο σήμα ανιχνεύεται από την κατάλληλη συστοιχία φωτοδιόδων. Χρησιμοποιείται in-plane μέθοδος σύζευξης με δεδομένο ότι επιλέχθηκε η χρήση φωτοδιόδων κυματοδηγού.

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Operating Frequency		191.2		196.0	THz
WDM channel spacing		5			nm
Fibre launch power		-4		0	dBm
Rx maximum sensitivity	NRZ with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-14.4			dBm
	PAM-4 with FEC-RS (255,223) $1 \times 10^{-3}$	-9.7			dBm
Rx minimum overload		-5			dBm
Fibre length		150		2000	m
Fibre attenuation	C-band		0.22		dB/km
Fibre chromatic dispersion			18		ps/[nm km]

Πίνακας 9: Οπτικές ιδιότητες της CXP δομής.



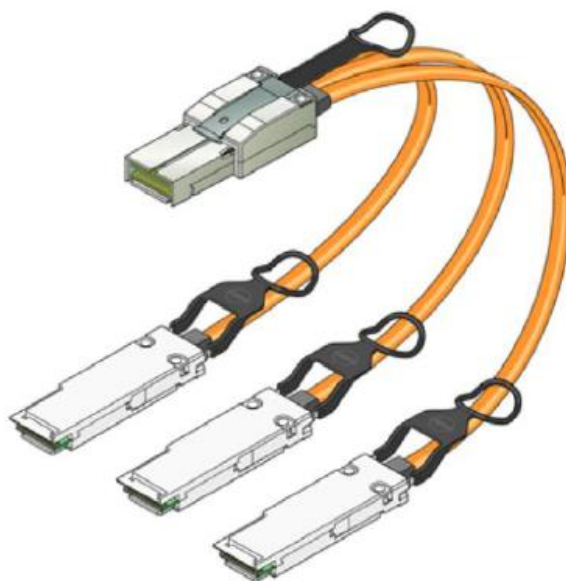
Εικόνα 42: Η απλουστευμένη 3D απεικόνιση του CXP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου. Αποτυπώνονται μόνο τα τέσσερα από τα δώδεκα κανάλια της δομής.

Η εκτίμηση απωλειών για τη δομή CXP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου είναι ακριβώς ίδια με την αντίστοιχη που έγινε για το QSFP με δεδομένο ότι έχει ακολουθηθεί η ίδια ακριβώς αρχιτεκτονική προσέγγιση. Έτσι η εκτίμηση για την χειρότερη συνθήκη από μεριάς απωλειών, συμπεριλαμβανομένων και των απωλειών διάδοσης στην ίνα, κλείνει στα 16.8 dB.

## 2.7.10 Διεπαφή μετατροπής CXP-σε-QSFP

Το καλώδιο απεμπλοκής μεταξύ της δομής του CXP και του QSFP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου, είναι χρήσιμο προκειμένου να διασυνδέει συσκευές μέσα σε ένα υπολογιστικό κέντρο οι οποίες λειτουργούν είτε με 12 θύρες είτε με τρία ξεχωριστά τετράθυρα, εκμεταλλευόμενοι τα ίδια pins. Η δομή υποστηρίζει ρυθμούς δεδομένων έως 40 Gbaud ανά κανάλι ενώ διαθέτει και συμβατότητα με το πρότυπο Infiniband EDR (26 Gbaud/ κανάλι). Οι υποστηριζόμενοι τρόποι διαμόρφωσης δεδομένων είναι οι OOK και PAM-4 δίνοντας έτσι την κατάλληλη ευελιξία στη δομή.

Το σχηματικό διάγραμμα της συνολικής δομής απεμπλοκής έχει παρουσιαστεί και παραπάνω (Εικόνα 17). Βασικό δομικό συστατικό της είναι η γυάλινη διεπαφή απεμπλοκής η οποία αντιστοιχίζει τις δυο επταπύρηνες είναι που φέρει η μεριά του CXP πομποδέκτη με τις τρεις τετραπύρηνες που φέρει η μεριά του QSFP πομποδέκτη. Η γυάλινη αυτή διεπαφή δημιουργείται από ένα γυάλινο 3D κυματοδηγό ο οποίος έχει πολύ χαμηλές απώλειες. Η εκτίμηση των συνολικών απωλειών της δομής του καλωδίου απεμπλοκής είναι στα 17.5 dB στη χειρότερη περίπτωση. Σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας θα δούμε την πειραματική της μέτρηση και επίδειξη αλλά και τον πειραματικό προσδιορισμό των απωλειών της.



Εικόνα 43: Το καλώδιο «απεμπλοκής» CXP-σε-QSFP.

# Βιβλιογραφία

- [2.1] Y. Zhang, A. Samanta, K. Shang and S. J. B. Yoo, "Scalable 3D Silicon Photonic Electronic Integrated Circuits and Their Applications," in IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 26, no. 2, pp. 1-10, March-April 2020, Art no. 8201510, doi: 10.1109/JSTQE.2020.2975656.
- [2.2] Bahram Jalali, Tejaswi Indukuri, Prakash Koonath, "3D integration of sub-surface photonics with CMOS," Proc. SPIE 6124, Optoelectronic Integrated Circuits VIII, 61240U (3 March 2006); <https://doi.org/10.1117/12.652242>
- [2.3] Yoo, S., Guan, B. & Scott, R. Heterogeneous 2D/3D photonic integrated microsystems. *Microsyst Nanoeng* 2, 16030 (2016). <https://doi.org/10.1038/micronano.2016.30>
- [2.4] J.M. Fedeli, E.Augendre, J.M. Hartmann, L. Vivien, P.Grosse, V.Mazzocchi, W.Bogaerts, D.Van Thourhout and F.Schrank, "Photonics and Electronics Integration in the HELIOS project", presented in 7th International Conference on Group IV Photonics, 1-3 September 2010, Beijing, China.
- [2.5] <http://www.intel.com/content/www/us/en/architecture-and-technology/many-integrated-core/intel-manyintegrated-core-architecture.html>
- [2.6] <http://www.finisar.com/products/active-cables/C.wire>
- [2.7] T. Tokoro et. al., "Engineering a 150 Gbit/s optical active cable to meet the needs of the data center environment", in Proc. OFC 2011, 6-10 Mar. 2011.
- [2.8] J. Uemura et. al., "1060-nm 10-Gb/s × 12-channel parallel-optical modules for optical interconnects", in Proc. IEEE CPMT Symposium Japan, 24-26 Aug. 2011.
- [2.9] [http://www.molex.com/molex/products/family?key=quad\\_small\\_formfactor\\_pluggable\\_plus\\_qsfp\\_interconnect\\_solution&channel=products&chanName=family&pageTitle=Introduction](http://www.molex.com/molex/products/family?key=quad_small_formfactor_pluggable_plus_qsfp_interconnect_solution&channel=products&chanName=family&pageTitle=Introduction)
- [2.10] [http://www.molex.com/molex/products/family?key=zqsfp\\_interconnect\\_system&channel=products&chanName=family&pageTitle=Introduction#overview](http://www.molex.com/molex/products/family?key=zqsfp_interconnect_system&channel=products&chanName=family&pageTitle=Introduction#overview)
- [2.11] <https://www.ldpassociates.com/the-importance-of-cooling-in-data-centers/>
- [2.12] <https://journal.uptimeinstitute.com/a-look-at-data-center-cooling-technologies/>
- [2.13] J. Dukovic et al., "Through-silicon-via technology for 3D integration," 2010 IEEE International Memory Workshop, Seoul, Korea (South), 2010, pp. 1-2, doi: 10.1109/IMW.2010.5488399.
- [2.14] J. Man, W. Chen, H. Zhang, Zhiwei Li, S. Fu and L. Zeng, "High speed optical interconnects with PAM4 modulation for short-reach applications," 2015 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), Kyoto, Japan, 2015, pp. 70-72, doi: 10.1109/ICSJ.2015.7357362.
- [2.15] Michalzik R., Ebeling K.J. (2003) Operating Principles of VCSELs. In: Li H.E., Iga K. (eds) Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. Springer Series in Photonics, vol 6. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-05263-1\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05263-1_3)

- [2.16] [https://www.rp-photonics.com/vertical\\_cavity\\_surface\\_emitting\\_lasers.html#:~:text=VCSELs%20are%20semiconductor%20lasers%2C%20more,%E2%86%92%20distributed%20Bragg%20reflector%20lasers](https://www.rp-photonics.com/vertical_cavity_surface_emitting_lasers.html#:~:text=VCSELs%20are%20semiconductor%20lasers%2C%20more,%E2%86%92%20distributed%20Bragg%20reflector%20lasers)).
- [2.17] Passaro, V.M.N., Magno, F., Rizzato, A. et al. Analysis of VCSEL distributed Bragg reflectors by the Floquet-Bloch theory. *Laser Phys.* 16, 1029–1038 (2006). <https://doi.org/10.1134/S1054660X06070024>
- [2.18] Spiga S., Amann M.C. (2017) High-Speed InP-Based Long-Wavelength VCSELs. In: Eisenstein G., Bimberg D. (eds) *Green Photonics and Electronics. NanoScience and Technology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-67002-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-67002-7_2)
- [2.19] Erik Haglund, “VCSELs for High-Speed, Long-Reach, and Wavelength-Multiplexed Optical Interconnects”, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 2015
- [2.20] <https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/s11772-007-0028-2/html>
- [2.21] Włodzimierz Nakwaski, Marek Osiński, III: *Thermal Properties of Vertical-Cavity Surface-Emitting Semiconductor Lasers*, Editor(s): E. Wolf, *Progress in Optics*, Elsevier, Volume 38, 1998,
- [2.22] Lee, J.H., Moon, J.H., Su, P.C. et al. Numerical analysis of injected current effects on thermal characteristics of vertical-cavity surface-emitting laser. *J Mech Sci Technol* 32, 1463–1469 (2018). <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0250-5>
- [2.23] K. Y. Cheng, “Development of molecular beam epitaxy technology for III–V compound semiconductor heterostructure devices”, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 31, 050814 (2013).
- [2.24] [https://www.ieee.li/pdf/essay/scattering\\_parameters\\_concept\\_theory\\_applications.pdf](https://www.ieee.li/pdf/essay/scattering_parameters_concept_theory_applications.pdf)
- [2.25] <https://dl.cdn-anritsu.com/en-us/test-measurement/files/Manuals/Measurement-Guide/10580-00289M.pdf>
- [2.26] R.-F. Ye, J. Xu, “SOLT calibration method and its application to radio-frequency measurement”, March 2006
- [2.27] Hao Jiang, Dong-Soo Shin, Tsai-Sheng Liao, Phil Mages, Arthur R. Clawson, Paul K. L. Yu, Timothy A. Vang, David C. Scott, "Waveguide photodiodes for high-speed detection," *Proc. SPIE 4111, Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics II*, (18 December 2000); <https://doi.org/10.1117/12.422154>
- [2.28] J. Gao, K. Sun, D. Jung, J. Bowers, and A. Beling, "High-Speed InGaAs/InAlGaAs Waveguide Photodiodes Grown on Silicon by Heteroepitaxy," in *Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020)*, paper SM3R.3.
- [2.29] T. Torikai, T. Nakata, T. Kato, and K. Makita, "40-Gbps Waveguide Avalanche Photodiodes," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers Conference, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2005)*, paper OFM3.



- [2.30] Nicholas J. D. Martinez, Christopher T. Derosé, Reinhard W. Brock, Andrew L. Starbuck, Andrew T. Pomerene, Anthony L. Lentine, Douglas C. Trotter, and Paul S. Davids, "High performance waveguide-coupled Ge-on-Si linear mode avalanche photodiodes," *Opt. Express* 24, 19072-19081 (2016)
- [2.31] <https://www.hhi.fraunhofer.de/en/departments/pc/projects/archive/paradigm.html>
- [2.32] B. Dong et al., "Silicon-on-Insulator Waveguide Devices for Broadband Mid-Infrared Photonics," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1-10, June 2017, Art no. 4501410, doi: 10.1109/JPHOT.2017.2692039.
- [2.33] A. G. Rickman, G. T. Reed and F. Namavar, "Silicon-on-insulator optical rib waveguide loss and mode characteristics," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 10, pp. 1771-1776, Oct. 1994, doi: 10.1109/50.337489.
- [2.34] F. De Leonardis, G. Giannoccaro, B. Troia, V. M. N. Passaro and A. G. Perri, "Design of optimized SOI slot waveguides for homogeneous optical sensing in near infrared," 2011 4th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces (IWASI), Savelletri di Fasano, Italy, 2011, pp. 142-147, doi: 10.1109/IWASI.2011.6004705.
- [2.35] <http://www.qsfdd.com/>
- [2.36] <https://www.eetimes.com/high-speed-channel-pluggable-cxp-copper-and-optical-interconnect-system/>
- [2.37] Faezeh Fesharaki, Nadir Hossain, Sebastien Vigne, Mohamed Chaker, and Ke Wu, "Accurate theoretical and experimental characterization of optical grating coupler," *Opt. Express* 24, 21027-21037 (2016)
- [2.38] Daoxin Dai and Mao Mao, "Mode converter based on an inverse taper for multimode silicon nanophotonic integrated circuits," *Opt. Express* 23, 28376-28388 (2015).
- [2.39] Giannis Pouloupoulos, Catherine Baskiotis, Dimitrios Kalavrouziotis, Lars Brusberg, Henning Schröder, Dimitrios Apostolopoulos, Hercules Avramopoulos, "SiN-assisted flip-chip adiabatic coupler between SiPh and Glass OPCBs," *Proc. SPIE 9753, Optical Interconnects XVI*, 975310 (15 March 2016).
- [2.40] [www.nvidia.com/en-us/networking/infiniband-adapters/](http://www.nvidia.com/en-us/networking/infiniband-adapters/)
- [2.41] <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-serdes.html>

# Κεφάλαιο 3

## Πολυπλέκτης και Αποπολυπλέκτης σε SOI πλατφόρμα

### 3.1 Μελέτη δομών

Ένας κρίσιμος παράγοντας κατά το σχεδιασμό πομποδεκτών υψηλών επιδόσεων, είναι η μετάδοσης πληροφορίας με όσο το δυνατόν βέλτιστο τρόπο. Στην κατεύθυνση αυτή δυο παράμετροι είναι πολύ σημαντικές, η αύξηση της μετάδοσης δεδομένων με όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση ισχύος και σε όσο το δυνατόν πιο μικρό αποτύπωμα (footprint) [3.1]. Για το λόγο αυτό, πέρα από την ανάπτυξη ενεργών δομών που επιτρέπουν τη μετάδοση σε δεδομένων σε υψηλές ταχύτητες, είναι σημαντική και η χρήση τεχνικών που αναβαθμίζουν κι άλλο τις δυνατότητες αυτές. Οι διάφορες μορφές πολυπλεξίας προσφέρουν το κατάλληλο έδαφος για τη βέλτιστη εκμετάλλευση των υπάρχοντων δομών [3.2].

Προκειμένου να αναβαθμιστεί η χωρητικότητα πάνω στο πλακίδιο (on-chip capacity) επιλέχθηκαν μια σειρά από τεχνικές πολυπλεξίας σε διάφορα στάδια της υλοποίησης των πομποδεκτών. Έτσι η πολυπλεξία μήκους κύματος (wavelength division multiplexing) [3.3], η χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) με τη χρήση πολυπύρηνων ιών [3.4] αλλά και η πολυσταθμική (multi-level) διαμόρφωση [3.5] κινούνται σε αυτή την κατεύθυνση του πολλαπλασιασμού δηλαδή των δυνατοτήτων μετάδοσης πληροφορίας των δομών. Η πολυπλεξία κατά μήκος κύματος συγκεκριμένα, διευκολύνθηκε με τη χρήση VCSELs τα οποία είχαν τη δυνατότητα εκπομπής σε διάφορα μήκη κύματος (multi-wavelength VCSELs) όπως επίσης και από τη χρήση πολυπλεκτών/αποπολυπλεκτών για το συνδυασμό και διαχωρισμό των σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος, πριν και μετά τη διάδοση στην οπτική ίνα. Οι δομές του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη υλοποιήθηκαν πάνω στην SOI πλατφόρμα διαστάσεων 400x340 nm.

Ο σχεδιασμός των οπτικών δομών για την πολυπλεξία/αποπολυπλεξία είχε μια σειρά από παραμέτρους που έπρεπε να εξεταστούν διεξοδικά και αφορούσαν στις απαιτήσεις της εφαρμογής από τη μια μεριά και των τεχνολογικών ιδιοτήτων της οπτικής μηχανής (optical engine) από την άλλη. Πιο συγκεκριμένα, οι βασικές παράμετροι που εξετάστηκαν για το σχεδιασμό του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη ήταν:

- Η απαίτηση για λειτουργία και στις δυο καταστάσεις πόλωσης. Στη μεριά του πομπού, ο άξονας της πόλωσης εκπομπής ήταν καλά καθορισμένος με δεδομένη τη λειτουργία μονής πόλωσης (single-polarization) των VCSELs. Ως αποτέλεσμα αυτού, ο σχεδιασμός ενός πολυπλέκτη μονής πόλωσης ήταν αρκετός για το συνδυασμό των πολλών μηκών κύματος στον πομπό. Από την άλλη μεριά στον δέκτη η κατάσταση της πόλωσης δεν ήταν καθορισμένη. Η κατάσταση της πόλωσης του προσπίπτοντος σήματος με δεδομένο ότι αυτό

έχει διαδοθεί μέσα σε μονότροπη οπτική ίνα ήταν τυχαία. Εξετάστηκε ο πλήρης διαχωρισμός της πόλωσης πάνω στο πλακίδιο αλλά κρίθηκε ασύμφορος τόσο από τη μεριά των απωλειών εισόδου (insertion losses) όσο και από τη μεριά του μεγέθους. Έτσι, επιλέχθηκε ο σχεδιασμός ενός αποπολυπλέκτη ο οποίος θα ήταν σε θέση να λειτουργεί και για τις δυο καταστάσεις της πόλωσης. Αυτή η δυνατότητα μεταφράζεται στην απαίτηση για μια δομή που όχι μόνο λειτουργεί και στις δυο πολώσεις αλλά επιπρόσθετα θα επιφέρει πολύ μικρή μετατόπιση συχνότητας που εξαρτάται από την πόλωση (polarization dependent frequency shift-PDFS). Αυτή η μετατόπιση συχνότητας λόγω της πόλωσης είναι ένα σύννηθες φαινόμενο στις συμβολομετρικές δομές οι οποίες κατασκευάζονται σε πλατφόρμα SOI και οφείλεται στη διπλοθλαστικότητα των κυματοδηγών. Αποτέλεσμα αυτού είναι το σήμα να υφίσταται μια μετατόπιση της συνάρτησης μεταφοράς του σύμφωνα με την πόλωσή του. Στη δεδομένη περίπτωση της εφαρμογής μας, η απαίτηση δεν είναι απαραίτητα να εξαλειφθεί πλήρως το φαινόμενο της μετατόπισης της συχνότητας αλλά να μειωθεί τόσο ώστε το φάσμα του VCSEL να μπορεί να «φιλοξενηθεί» και στις δυο πολώσεις (λιγότερο από 0.5 nm FWHM).

- Μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος λόγω της θερμότητας. Όπως είναι λογικό από την ίδια τη δομή των VCSELS, υπάρχει μια εξάρτηση του μήκους κύματος λειτουργίας τους από τη θερμοκρασία [3.6]. Η μετατόπιση που προκαλείται μετρήθηκε και βρέθηκε ίση με 0.1 nm/°C. Δεδομένης της μεγάλης απόστασης (spacing) των κεντρικών μηκών κύματος στα WDM VCSELS της περίπτωσης μας (μέχρι και 10 nm), η θερμική εξάρτηση των δομών από τη θερμοκρασία μπορεί να ληφθεί υπόψη με τη σχεδίαση φίλτρων τα οποία είτε ακολουθούν αυτή τη μετατόπιση του μήκους κύματος (με άλλα λόγια έχουν ακριβώς την ίδια εξάρτηση από τη θερμοκρασία), είτε είναι σχετικά αναισθητα στις θερμοκρασιακές αλλαγές (με το δεδομένο όμως ότι παρέχουν ένα ικανοποιητικό εύρος ζώνης), είτε ένα συνδυασμό των δυο.
- Ανοχές κατασκευής (fabrication tolerances). Η κατασκευή τόσο του VCSEL όσο και του πολυπλέκτη /αποπολυπλέκτη σε πλατφόρμα SOI περιλαμβάνει ανοχές από κατασκευαστικής σκοπιάς οι οποίες επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μήκους κύματος των διάφορων δομών. Από τη σκοπιά του VCSEL, η μετατόπιση του μήκους κύματος που προκύπτει από την επιταξική (epitaxial) διαδικασία έχει διακυμάνσεις μήκους κύματος οι οποίες μπορεί και να ξεπερνούν τα 6 nm κατά μήκος του wafer. Όσον αφορά στο τμήμα του SOI, οι κατασκευαστικές ανοχές έχουν ως αποτέλεσμα σε μετατόπιση του κεντρικού μήκους κύματος η οποία βέβαια διαφέρει αναλόγως με την οπτική δομή. Στην περίπτωση ενός SOI συμβολομέτρου καθυστέρησης, μια διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης της τάξης του 0.005 μπορεί να μετατοπίσει τη συνάρτηση μεταφοράς μέχρι και 2 nm, ενώ στην περίπτωση ενός φίλτρου το οποίο βασίζεται σε αρχιτεκτονική κοιλότητας δακτυλίου (ring resonator) αυτή η μετατόπιση αυξάνεται σημαντικά λόγω του συντονισμού (resonance) της δομής. Τα φαινόμενα αυτά τα οποία προκαλούνται από κατασκευαστικές

ατέλειες είναι στοχαστικά (σε αντίθεση με τις θερμοκρασιακές μετατοπίσεις οι οποίες έχουν ντετερμινιστικό χαρακτήρα) και καταλήγουν να έχουν αθροιστικά συγκρίσιμο αποτέλεσμα στην απόσταση μήκους κύματος του VCSEL. Έτσι θεωρήθηκε απαραίτητο να εισαχθεί δυνατότητα ρύθμισης (tunability) στις δομές των φίλτρων ούτως ώστε να υπάρχει ο κατάλληλος μηχανισμός αντιστάθμισης των φαινομένων αυτών και κατά συνέπεια και των θερμικών μετατοπίσεων.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, διερευνήθηκε ένας αριθμός από οπτικές δομές οι οποίες θα μπορούσαν να υλοποιήσουν το ζητούμενο πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη. Αρχικά, διερευνήθηκαν οι δομές echelle grating ως WDM πολυπλέκτες με δεδομένο ότι προσφέρουν την πιθανότητα χαμηλότερης εξάρτησης από τις κατασκευαστικές ατέλειες παρότι η κατασκευή των κατακόρυφων επιφανειών πλέγματος περιθλάσεως (vertical diffraction grating facets) συνεπάγεται κάποιες προκλήσεις ειδικότερα όσον αφορά στην πόλωση [3.7]. Echelle gratings τα οποία έχουν τη δυνατότητα για λειτουργία και στις δυο καταστάσεις της πόλωσης έχουν δείχθει σε κλίμακα mm σε κυματοδηγούς πυριτίου [3.8]. Παρόλα αυτά σε πλατφόρμα SOI με κλίμακα nm η ανάπτυξη echelle gratings ως πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες με λειτουργία και στις δυο πολώσεις δεν έχει επιτευχθεί και είναι μια πολύ δύσκολη προσπάθεια. Σαν εναλλακτική λύση, οι κοιλότητες δακτυλίου συντονισμού (ring resonators) μπορούν επίσης να παρέχουν μια ευέλικτη δομή φιλτραρίσματος, με εκτεταμένες σχεδιαστικές επιλογές για την προσαρμογή του σχήματος του φίλτρου κάνοντας χρήση ανώτερης τάξης δακτυλίων [3.9]. Από την άλλη, οι ανώτερης τάξης δακτύλιοι συντονισμού περιλαμβάνουν περισσότερα ρυθμιζόμενα (tuning) τμήματα και πιο περίπλοκες διαδικασίες ρύθμισης ενώ και τα PDFS τους είναι ιδιαίτερα υψηλά λόγω της εξαιρετικά ευαίσθητης φύσης τους όσον αφορά στο μηχανισμό του συντονισμού. Τέλος, διερευνήθηκε η δομή του συμβολομέτρου καθυστέρησης (delay interferometer-DI) η οποία και επιλέχθηκε για το σχεδιασμό του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη λόγω της απλότητάς του, του μηχανισμού ρύθμισης και της καταλληλότητάς του για λειτουργία και στις δυο καταστάσεις πόλωσης με πολύ χαμηλά PDFS.

Η κύρια πρόκληση στο σχεδιασμό του συμβολομέτρου καθυστέρησης παρέμεινε η απαίτηση για λειτουργία του αποπολυπλέκτη και στις δυο καταστάσεις της πόλωσης. Αυτό απαιτεί οπτικές δομές σύζευξης στο συμβολόμετρο με τον ίδιο λόγο ζεύξης (coupling ratio) τόσο για την TE όσο και την TM πόλωση, καθώς και ακριβή έλεγχο των PDFS στο στάδιο του σχεδιασμού [3.10]. Η πρώτη πρόκληση αντιμετωπίστηκε με την ανάπτυξη ενός σχεδίου MMI και για τις δυο πολώσεις, το οποίο θα περιγραφεί στη συνέχεια. Η δεύτερη, αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη σε ένα ρεαλιστικό σενάριο κατά το οποίο οι κατασκευαστικές ατέλειες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Συγκεκριμένα, μια κατασκευαστική ατέλεια της τάξης του  $\pm 1 \mu\text{m}$  στο μήκος του συμβολομέτρου μεταφράζεται σε διακύμανση των PDFS της τάξης των  $\pm 150 \text{ GHz}$  η οποία είναι ένα σημαντικό ποσοστό της απόστασης μεταξύ των κεντρικών μηκών κύματος (wavelength spacing) του αποπολυπλέκτη. Για να ξεπεραστούν τα PDFS, σχεδιάστηκε η συνολική διπλοθλαστικότητα (birefringence) των βραχιόνων του

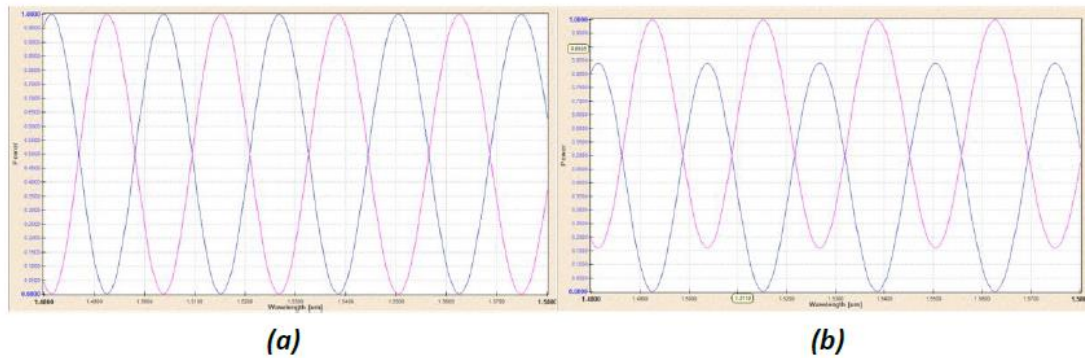
συμβολομέτρου για το επιδιωκόμενο μήκος κύματος χρησιμοποιώντας μια λογική ενός κυματοδηγού δυο τμημάτων (dual-segment waveguide). Από την άλλη, για να ξεπεραστούν οι κατασκευαστικές αστοχίες οι οποίες επηρεάζουν την πολωτική συμπεριφορά του φίλτρου, προβλέφθηκε ξεχωριστή θερμική ρύθμιση του κάθε τμήματος. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την τελειοποίηση της συνολικής διπλοθλαστικότητας μεταξύ των βραχιόνων του συμβολομέτρου έτσι ώστε οι κορυφές και οι κοιλάδες της συνάρτησης μεταφοράς του φίλτρου να συμπίπτουν για την TE και την TM πόλωση, στα επιδιωκόμενα μήκη κύματος. Η συνολική ρύθμιση του κεντρικού μήκους κύματος (και του TE και του TM) παραμένει εφικτή με την ταυτόχρονη προσαρμογή και των δυο τμημάτων κατάλληλα.

Ακολουθώντας τη λογική που περιγράφηκε παραπάνω, σχεδιάστηκαν δυο στοιχεία φίλτραρίσματος (filtering elements) και τα δυο βασισμένα σε συμβολομετρικές δομές: α) ένας ρυθμιζόμενος πολυπλέκτης βελτιστοποιημένος για λειτουργία στην TM πόλωση και β) ένας ρυθμιζόμενος αποπολυπλέκτης βελτιστοποιημένος για ταυτόχρονη λειτουργία στην TE και TM πόλωση. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για το σχεδιασμό των δομών περιγράφεται στις παρακάτω ενότητες και περιλαμβάνει το σχεδιασμό MMI συζευκτών για λειτουργία διπλής πόλωσης, σχεδιασμό θερμικά ρυθμιζόμενων τμημάτων κυματοδηγών μέσα από τη μελέτη των αντίστοιχων διατομών των κυματοδηγών, διερεύνηση της θερμικής εξάρτησης του ενεργού δείκτη διάθλασης και το σχεδιασμό δομών βασισμένο στην ανάπτυξη δομικών στοιχείων (MMIs και θερμικώς ρυθμιζόμενα τμήματα κυματοδηγών) χρησιμοποιώντας τόσο την αναλυτική όσο και την προσομοιωτική μέθοδο.

## **3.2 Σχεδιασμός MMI συζευκτών για τον SOI πολυπλέκτη και αποπολυπλέκτη**

### **3.2.1 Θεωρητική προσέγγιση**

Όπως περιγράφηκε παραπάνω η κύρια πρόκληση που αφορά στον σχεδιασμό του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη ήταν η ομοιόμορφη συμπεριφορά τους και στις δυο πολώσεις. Όσον αφορά στο σχεδιασμό του συμβολομέτρου, αυτή η απαίτηση μεταφράζεται σε ιδανικό λόγο σύζευξης 50:50 της δομής σύζευξης εισόδου και εξόδου ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί ο λόγος σβέσης (extinction ratio) και στις δυο θύρες όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα. Η σύζευξη 50:50 θα πρέπει να διατηρηθεί και για τις δυο πολώσεις, σε αντίθετη περίπτωση ο λόγος σβέσης του συμβολομέτρου θα υποβαθμιστεί για την αντίστοιχη πόλωση και άρα η ομοιογένεια θα διαταραχθεί σημαντικά. Γι' αυτό το λόγο επιδιώχθηκαν δομές συζευκτών με ομοιόμορφη απόκριση στην TE και TM πόλωση.

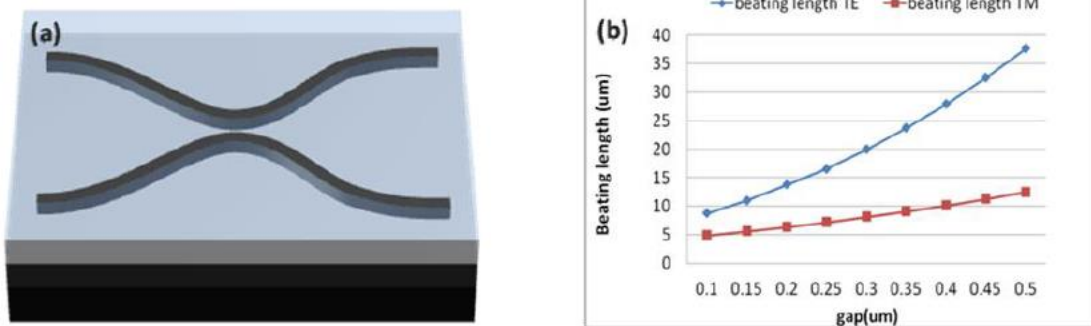


Εικόνα 44: Η συμπληρωματική συνάρτηση μεταφοράς στις δυο εξόδους ενός Mach Zehnder στην περίπτωση λόγου ζεύξης (α) 50:50 και (β) 70:30.

Η πρώτη και πιο απλή επιλογή που εξετάστηκε ήταν αυτή ενός κατευθυντικού συζεύκτη (directional coupler) [3.11]. Ωστόσο, αυτή η επιλογή εν τέλει αποκλείστηκε λόγω της υψηλής ευαισθησίας της στην πόλωση η οποία και επιβεβαιώθηκε μέσα από προσομοιώσεις στην πλατφόρμα του SOI και αποτυπώνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το μήκος αλληλοσύζευξης (beat length) της δομής περιγράφεται με τον παρακάτω τύπο:

$$L_{\text{beat}} = WL / (n_{\text{effmode0}} - n_{\text{effmode1}}),$$

όπου WL είναι το μήκος κύματος για το οποίο εξετάζουμε τη δομή,  $n_{\text{effmode0}}$  και  $n_{\text{effmode1}}$  οι ενεργοί δείκτες διάθλασης του θεμελιώδη (fundamental) και του πρώτου ρυθμού (συμμετρικός και αντισυμμετρικός ρυθμός).



Εικόνα 45: (α) 3D απεικόνιση και (β) μήκος αλληλοσύζευξης ως συνάρτηση του κενού για τις δυο πολωτικές καταστάσεις σε έναν κατευθυντικό συζεύκτη

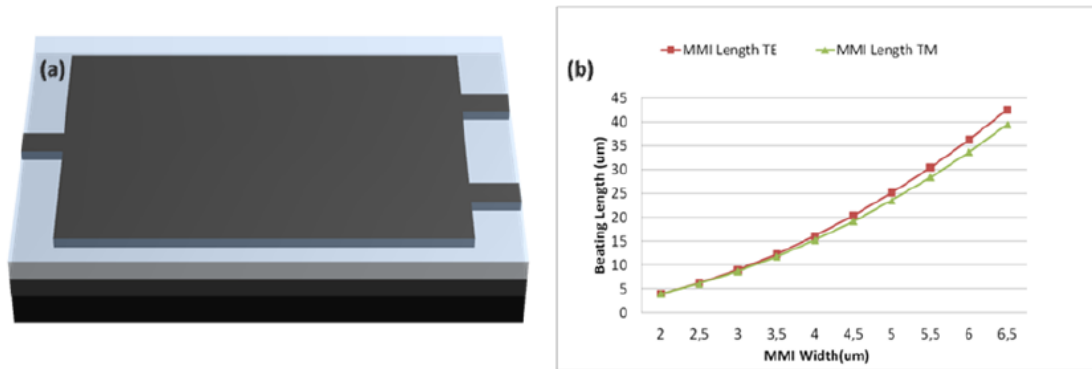
Το μήκος του κατευθυντικού συζεύκτη για το οποίο επιτυγχάνεται λειτουργία 50:50, ορίζεται ως η απόσταση στην οποία ο θεμελιώδης και ο πρώτης τάξης ρυθμός αλληλεπιδρούν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να πραγματοποιείται μια 3 dB κατανομή του πεδίου. Αυτός ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται για απόσταση όπου το φως έχει μια στροφή φάσης ίση με:

$$\Delta\phi = \pi/4 \cdot (L_{\text{beat}}/4).$$

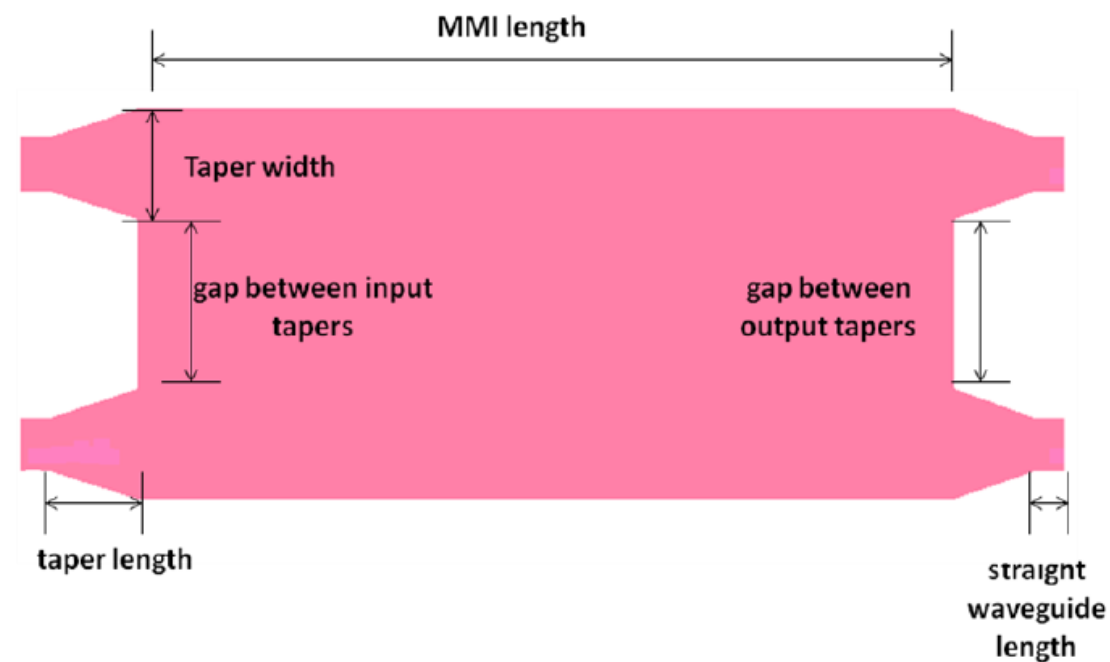
Η δομή του 1x2 (και του 2x2) MMI συζεύκτη επιλέχθηκε λόγω της σχεδιαστικής της ευελιξίας που προσφέρει τη δυνατότητα για πολύ χαμηλή ευαισθησία στην πόλωση αν σχεδιαστεί προσεκτικά [3.12], [3.13]. Όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα, για συγκεκριμένα πλάτη MMI μπορεί να παρατηρηθεί πολύ μικρή

διπλοθλαστικότητα. Ο ορισμός του μήκους αλληλοσύζευξης είναι λίγο διαφορετικός από ότι στον κατευθυντικό συζεύκτη και ορίζεται ως το μήκος για το οποίο ο θεμελιώδης και ο δεύτερης τάξης ρυθμός αλληλεπιδρούν ανααιρετικά (destructively) πραγματοποιώντας έτσι ένα λόγο διαχωρισμού της τάξης των 3 dB [3.14]. Από τη σκοπιά της φάσης σε αυτή την περίπτωση το φως έχει μετατόπιση φάσης ίση με:

$$\Delta\varphi = \pi/2 \cdot (L_{\text{beat}}/2).$$

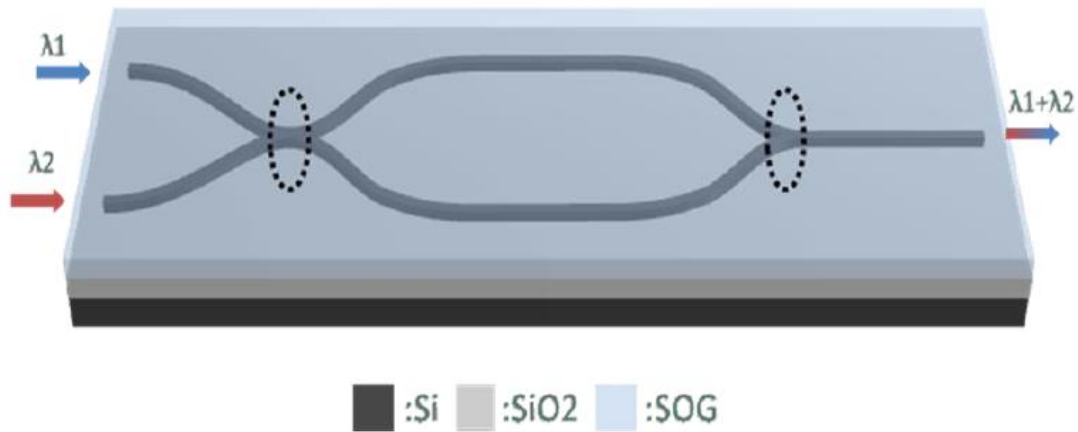


Εικόνα 46: (α) 3D αποτύπωση του 1x2 MMI συζεύκτη και (β) μήκος αλληλοσύζευξης ως συνάρτηση του κενού μεταξύ των κυματοδηγών εξόδου και για τις δυο πολωτικές καταστάσεις



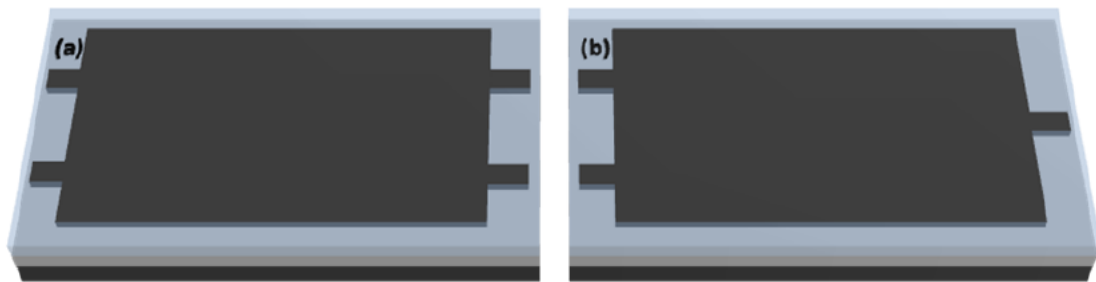
Εικόνα 47: Η κάτοψη του 2x2 συζεύκτη με αποτυπωμένες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές. Το πλάτος και μήκος των κωνικών δομών (tapers) καθώς επίσης και το μήκος των straight κυματοδηγών ήταν ίδια για τις δομές εισόδου και εξόδου. Για τον 1x2 MMI συζεύκτη οι μεταβλητές ήταν οι ίδιες.

### 3.2.2 Μεθοδολογία



Εικόνα 48: Σχηματική απεικόνιση του Mach Zehnder ως πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη. Οι δομές των MMIs είναι κυκλωμένες πάνω στο σχήμα.

Βάσει των παραπάνω υποθέσεων, και λόγω της ανάγκης για έναν 2x1 πολυπλέκτη (1x2 αποπολυπλέκτη) ο οποίος θα ήταν αναισθητός στην πόλωση, η συμβολομετρική δομή που επιλέχθηκε ήταν αυτή ενός Mach Zehnder με MMI συζεύκτες και στις δυο μεριές της ζεύξης [3.15]. Στη μεριά του πομπού η συμβολομετρική δομή πολυπλέκει δυο μήκη κύματος σε ένα μόνο κανάλι και οι MMI συζεύκτες ακολουθούν τη διάταξη που περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα. Στη μεριά του δέκτη προφανώς η διάταξη χρησιμοποιείται ανάποδα.

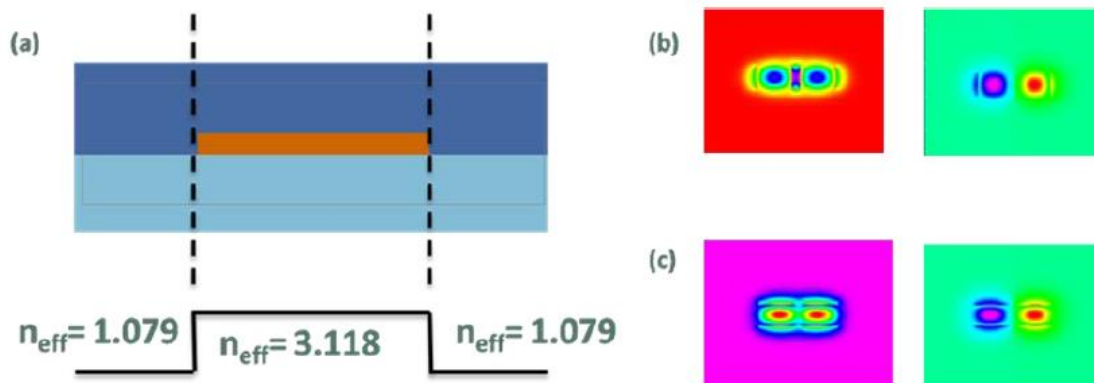


Εικόνα 49: Σχηματικό ενός (α)2x2 και ενός (β)2x1 συζευκτών που χρησιμοποιήθηκαν στις δυο άκρες μιας δομής Mach Zehnder.

Ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των MMI συζευκτών έγινε με τη χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου της Phoenix (Phoenix Software). Το πρώτο βήμα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εργαλείο mode solver (Field Designer) της συγκεκριμένες σουίτας λογισμικού. Οι διάφοροι ενεργοί δείκτες διάθλασης, και άρα και τα διαφορετικά μήκη αλληλοσύζευξης, υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μεταβλητό πλάτος του συζεύκτη. Όπως περιγράφηκε και παραπάνω, για τη δομή του 1x2 MMI συζεύκτη το μήκος αλληλοσύζευξης είναι το μήκος για το οποίο ο θεμελιώδης ρυθμός και ο ρυθμός δεύτερης τάξης έχουν μια διαφορά φάσης  $\pi/2$  και συμβάλλουν. Για την δομή του 2x2 MMI συζεύκτη, το μήκος αλληλοσύζευξης ορίζεται ως το μήκος για το οποίο ο θεμελιώδης ρυθμός και ο ρυθμός πρώτης τάξης έχουν μια διαφορά φάσης  $3\pi/4$  και συμβάλλουν. Η επιλογή του τελικού πλάτους έγινε με σκοπό την επίτευξη της μικρότερης δυνατής ευαισθησίας της δομής του MMI στην πόλωση. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε και η κατανομή του πεδίου μέσα στη δομή αυτή.



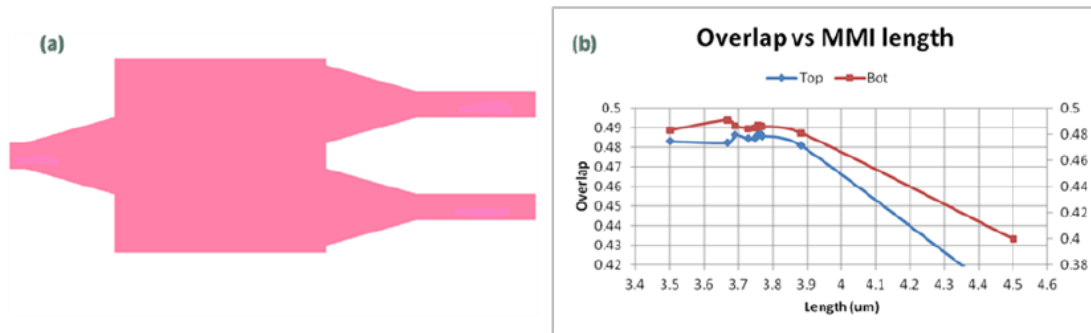
Το επόμενο βήμα ήταν η προσομοίωση της διάδοσης του φωτός μέσω του MMI χρησιμοποιώντας την 2D Beam Propagation Method η οποία ήταν διαθέσιμη στο πρόγραμμα OptoDesigner της σουίτας της Phoenix. Η αποφασιστική παράμετρος σε αυτό το κομμάτι της μελέτης ήταν η επικάλυψη των ρυθμών στις δυο εξόδους του συζεύκτη. Η επιλογή έγινε ούτως ώστε η δομή να λειτουργεί ως ένας 3 dB συζεύκτης. Η πιο κρίσιμη παράμετρος ήταν το μήκος του συζεύκτη, αν και πραγματοποιήθηκε μια σειρά και από άλλες παραλλαγές. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιείχε έναν αριθμό από βήματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας τη μέθοδο διχοτόμησης (bisectional method) ούτως ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση μεταξύ των τιμών των δυο αλληλοεπικαλύψεων εξόδου όσο το δυνατόν περισσότερο και όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή του 50%. Ο εσωτερικός βρόχος έτρεξε επτά βήματα: το μήκος του συζεύκτη, το κενό μεταξύ των κωνικών δομών εξόδου (taper length), το μήκος του ευθύγραμμου κυματοδηγού και ένα ακόμα τελευταίο βήμα βελτιστοποίησης του μήκους του συζεύκτη. Το τελευταίο βήμα έγινε αφού ρυθμίστηκαν όλες οι υπόλοιπες παράμετροι και έτσι υπήρχε ένα περιθώριο οριστικοποίησης του μήκους το οποίο είναι και μια πολύ κρίσιμη παράμετρος αφού εκτός των άλλων κρίνει και το μέγεθος του ολοκληρωμένου κυκλώματος που θα κατασκευαστεί.



Εικόνα 50: (α) διατομή του κυματοδηγού με τους ενεργούς δείκτες διάθλασης, (β) θεμελιώδης ρυθμός και ρυθμός δεύτερης τάξης της TE πολωτικής κατάστασης και (γ) θεμελιώδης ρυθμός και ρυθμός δεύτερης τάξης της TM πολωτικής κατάστασης για έναν MMI συζεύκτη με πλάτος 2  $\mu\text{m}$ .

### 3.2.3 Σχέδιο του 1x2 MMI συζεύκτη

Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς λογική που περιγράφηκε στις παραπάνω παραγράφους, στο πρώτο βήμα βελτιστοποίησης του 1x2 MMI συζεύκτη μεταβλήθηκε το μήκος της δομής. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα.



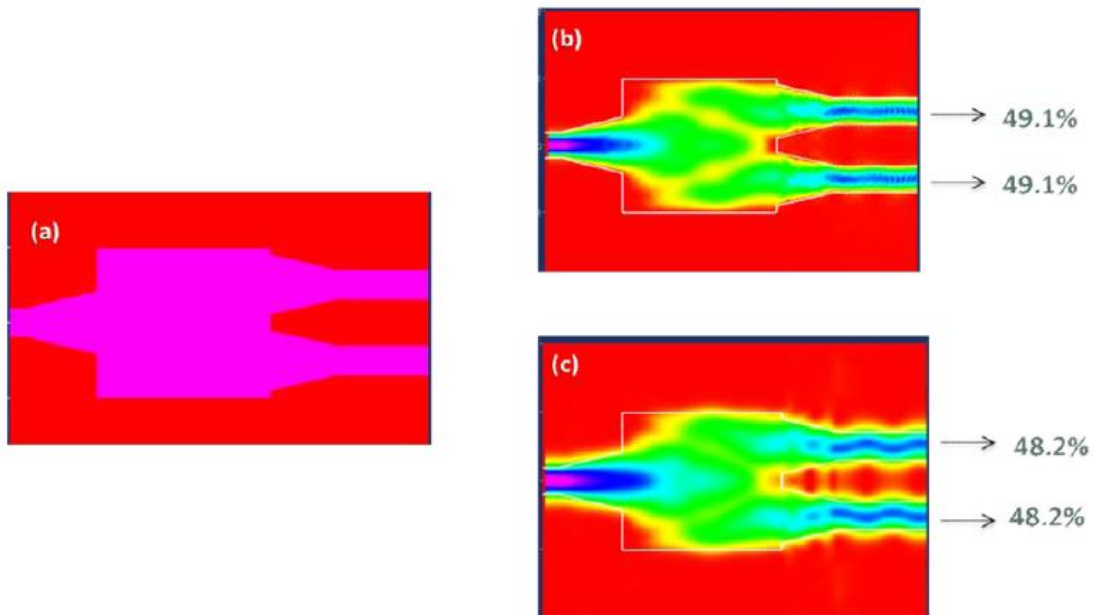
Εικόνα 51: (α) Κάτοψη του 1x2 MMI συζεύκτη και (β) βήματα βελτιστοποίησης με μεταβλητό μήκος MMI

Τα πλήρη αποτελέσματα της προσομοίωσης για την αρχιτεκτονική του 1x2 MMI συζεύκτη καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

	1x2 MMI
MMI length	3.766 μm
input taper length	1.5 μm
output taper length	1.5 μm
taper width	841.85 nm
waveguide section length	500 nm
taper separation	219 nm

Πίνακας 10: Τελικές παράμετροι του 1x2 MMI συζεύκτη

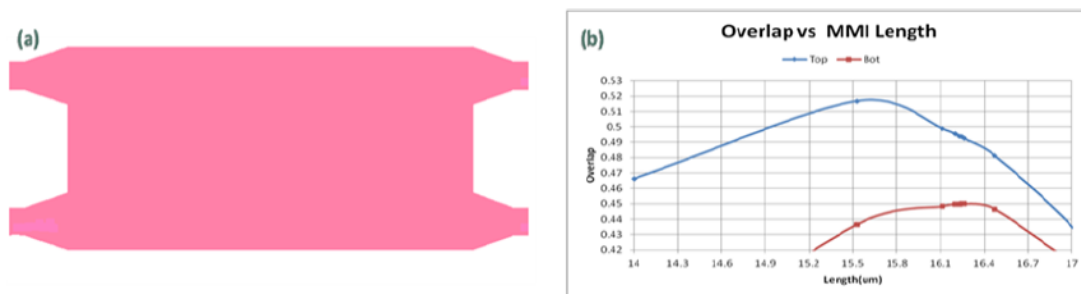
Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού ικανοποίησαν τους δυο κύριους στόχους του concept. Η δομή επιτυγχάνει λόγω ζεύξης ο οποίος είναι ελάχιστα μικρότερος από 50% και έτσι οι επιπλέον απώλειες είναι πολύ μικρές, της τάξης των 0.07 και 0.16 dB για την TE και την TM πόλωση αντίστοιχα. Επιπλέον, η διαφορά μεταξύ του λόγου ζεύξης του TE και του TM ρυθμού είναι πολύ μικρή και ως αποτέλεσμα, ο 1x2 MMI συζεύκτης έχει πολύ χαμηλές απώλειες λόγω της πόλωσης (polarization dependent loss) της τάξης των 0.09 dB και άρα λειτουργεί αποτελεσματικά και για τις δυο καταστάσεις. Τέλος, το μήκος αλληλοσύζευξης που εξήχθη από την μέθοδο 2D BPM είναι σε συμφωνία με την αντίστοιχη τιμή που εξήχθη από τον mode solver.



Εικόνα 52: (α) Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και η κάτοψη της BPM διάδοσης ενός 1x2 MMI συζεύκτη με τις αντίστοιχες τιμές αλληλοεπικάλυψης για (β) TE και (γ) TM καταστάσεις πόλωσης

### 3.2.4 Σχέδιο για τον 2x2 MMI συζεύκτη

Ακολουθώντας επίσης την ίδια λογική στη μελέτη μας όπως στην 1x2 δομή, τα αποτελέσματα για τον 2x2 MMI συζεύκτη περιγράφονται παρακάτω.



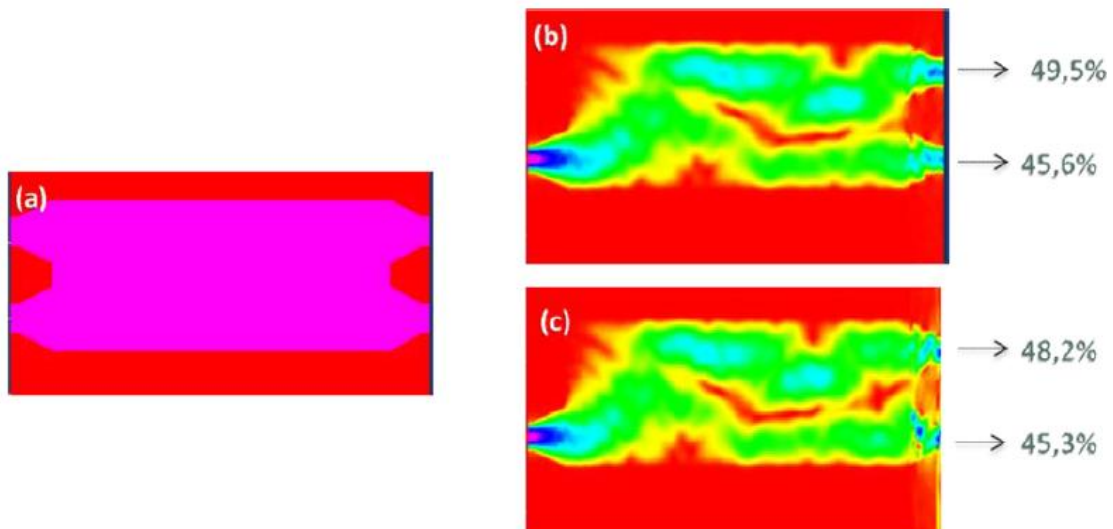
Εικόνα 53: (α) Κάτοψη και (β) βήματα βελτιστοποίησης με διακύμανση του μήκους του MMI για έναν 2x2 MMI συζεύκτη

Τα πλήρη αποτελέσματα της προσομοίωσης για την αρχιτεκτονική του 2x2 MMI συζεύκτη περιλαμβάνονται στον παρακάτω πίνακα.

	2x2 MMI
MMI length	15.2457 $\mu\text{m}$
input taper length	1.625 $\mu\text{m}$
output taper length	1.49 $\mu\text{m}$
taper width	790 nm
waveguide section length	500 nm
taper separation	420 nm

Πίνακας 11: Παράμετροι του τελικού σχεδίου για τον 2x2 MMI συζεύκτη.

Τα αποτελέσματα του μήκους αλληλοσύζευξης όπως προέκυψαν από την μέθοδο 2D BPM είναι σε πλήρη συμφωνία με τις τιμές οι οποίες αποκτήθηκαν από τους mode solvers. Οι επιπλέον απώλειες της δομής είναι ελαφρώς υψηλότερες από αυτές του 1x2 MMI συζεύκτη (0.22 και 0.29 dB για την TE και την TM πόλωση αντίστοιχα) αλλά είναι αρκετά χαμηλά για να ανταποκριθούν στις ανάγκες της εφαρμογής. Μια μικρή διαφορά στους λόγους ζεύξης των δυο εξόδων μπορεί να παρατηρηθεί και για τις δυο πολωτικές καταστάσεις, η οποία παραμένει όμως μικρότερη από 4%. Η εξάρτηση της πόλωσης (διαφορά μεταξύ των λόγων ζεύξης του TE και του TM ρυθμού) είναι πολύ χαμηλή (μεταξύ 0.05 dB και 0.13 dB) και κατά συνέπεια, ο 1x2 συζεύκτης είναι κατάλληλος για χρήση στη δομή του αποπολυπλέκτη.



Εικόνα 54: (α) Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και η κάτοψη της BPM διάδοσης ενός 2x2 MMI συζεύκτη με τις αντίστοιχες τιμές αλληλοεπικάλυψης για (β) TE και (γ) TM καταστάσεις πόλωσης.

### **3.3 Θερμική μελέτη του SOI κυματοδηγού για τη λειτουργία πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη**

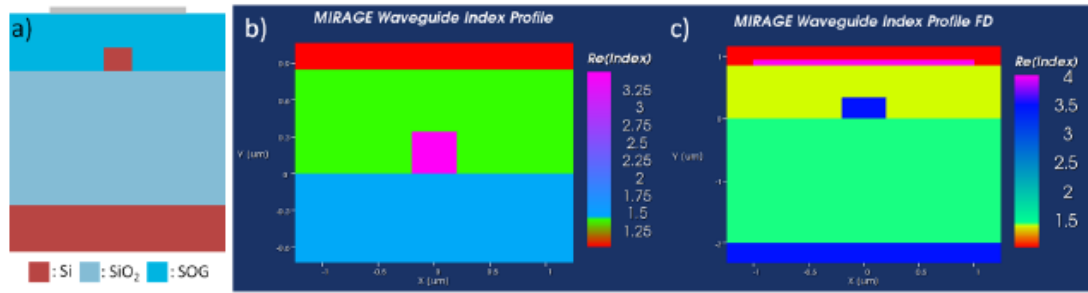
#### **3.3.1 Εισαγωγή**

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, τόσο τα VCSELs όσο και οι δομές του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη στη SOI πλατφόρμα είναι ευαίσθητα στις κατασκευαστικές ατέλειες καθώς και στις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που μπορούν να μεταβάλλουν το μήκος κύματος λειτουργίας τους κατά πολλά νανόμετρα. Ως εκ τούτου, κρίθηκε αναγκαίο να εισαχθεί η δυνατότητα ρύθμισης του μήκους κύματος στις δομές του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη επιτρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο την αντιστάθμιση αυτών των φαινομένων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Με δεδομένο ότι η πλατφόρμα των κυματοδηγών είναι βασισμένη πάνω στην τυπική SOI τεχνολογία ολοκλήρωσης με 340 nm άνω στρώμα πυριτίου [3.16], ο συντονισμός του μήκους κύματος μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την εισαγωγή ηλεκτροδίων θέρμανσης πάνω στους κυματοδηγούς πυριτίου. Στην περίπτωση αυτή εκμεταλλευόμαστε την αλληλεπίδραση φωτός και ύλης η οποία προκαλείται από τη θερμότητα, αποτέλεσμα του θερμο-οπτικού φαινομένου [3.17].

Η διερεύνηση της θερμικής συμπεριφοράς της πλατφόρμας των κυματοδηγών έγινε κάνοντας χρήση των τεχνικών Film Mode Matching (FMM) [3.18] και Finite Difference (FD) [3.19] των mode solvers που ήταν διαθέσιμοι από την σουίτα λογισμικού της Phoenix. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή θερμο-οπτικής προσομοίωσης η οποία υπολογίζει την χωρική κατανομή της θερμότητας (υποθέτοντας θερμική ισορροπία) μέσα σε μια δομή και τη μεταφράζει σε διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης του κάθε υλικού. Για τη μεθοδολογία της προσομοίωσης ακολουθήθηκε μια βαθμιαία προσέγγιση, ξεκινώντας από τον ορισμό του ενεργού δείκτη διάθλασης των θεμελιωδών ρυθμών όταν δεν εφαρμόζεται θερμότητα σε αυτές. Εν συνεχεία, έγινε εξαγωγή της μέγιστης θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου βάσει πειραματικά διαθέσιμων δεδομένων. Τέλος, υπολογίστηκε η θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης και το αντίστοιχο μήκος  $\lambda$  για την TE και την TM πόλωση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου.

#### **3.3.2 Προσομοίωση της διατομής των κυματοδηγών και εκτίμηση του ενεργού δείκτη διάθλασης**

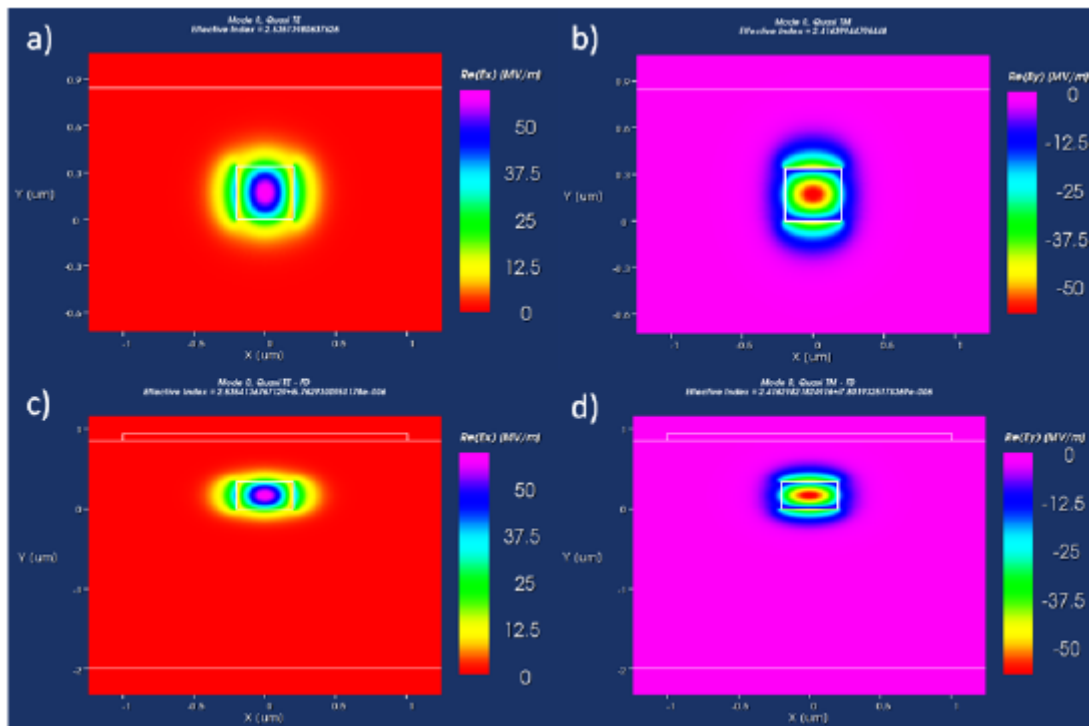
Η εκτίμηση των ενεργών δεικτών διάθλασης για τον TE και τον TM ρυθμό όταν το θερμαντικό στοιχείο δεν λειτουργεί (OFF state), έγινε με τη χρήση των FMM και FD mode solvers. Η διατομή του κυματοδηγού όπως εισήχθη στο λογισμικό της προσομοίωσης παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 55α) ενώ το προφίλ των δεικτών διάθλασης το οποίο υπολογίστηκε από τις FMM και FD μεθόδους παρουσιάζεται στην Εικόνα 55β και Εικόνα 55γ αντίστοιχα.



Εικόνα 55: (α) Διατομή του κυματοδηγού όπως εισήχθη στους Mode solvers, (β) προφίλ του κυματοδηγού από την FMM μέθοδο και (γ) προφίλ του κυματοδηγού από την FD μέθοδο

Από τις εικόνες μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μέθοδος FMM δε λαμβάνει υπόψη ούτε το μεταλλικό θερμαντικό στοιχείο ούτε το υπόστρωμα πυριτίου λόγω του δομικού της περιορισμού να μην μπορεί να δουλέψει με τα φανταστικά μέρη ενός δείκτη διάθλασης. Ως εκ τούτου, σε αυτή την περίπτωση η μέθοδος FMM χρησιμοποιείται μόνο για να παρέχει έναν αριθμητικό στόχο στον αλγόριθμο της FD μεθόδου, μειώνοντας σημαντικά τον απαραίτητο χρόνο της προσομοίωσης, ενώ οι πραγματικές τιμές του ενεργού δείκτη διάθλασης εξάγονται από την FD μέθοδο.

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 56α,β) αποτυπώνει την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου των θεμελιωδών TE και TM ρυθμών όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τον FMM mode solver. Αντιστοίχως στην Εικόνα 56γ,δ αναπαρίστανται τα αντίστοιχα προφίλ των ρυθμών όπως αυτά υπολογίστηκαν από τον FD mode solver. Είναι ξεκάθαρο ότι το παράθυρο υπολογισμού (calculation window) στη δεύτερη περίπτωση είναι αρκετά μεγαλύτερο ούτως ώστε να λάβει υπόψη το αποτέλεσμα που έχει το υψηλό δείκτη διάθλασης υπόστρωμα πυριτίου στους υποστηριζόμενους ρυθμούς.



Εικόνα 56: Θεμελιώδης (α) TE και (β) TM ρυθμός χρησιμοποιώντας τον FMM αλγόριθμο. Αντίστοιχα, θεμελιώδης (c) TE και (d) TM ρυθμός χρησιμοποιώντας τον FD αλγόριθμο.

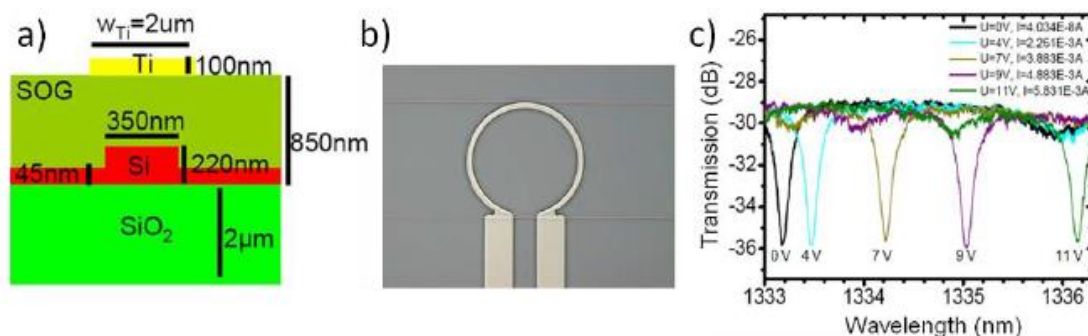
Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα αποτελέσματα της FD προσομοίωσης για τον TE και τον TM ρυθμό. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, και οι δυο ρυθμοί υποστηρίζονται σχεδόν εξίσου με τον TE να είναι ελαφρώς καλύτερα περιορισμένος (confined) παρουσιάζοντας υψηλότερη τιμή για τον ενεργό δείκτη διάθλασης, χαμηλότερο δείκτη διάθλασης ομάδας και λιγότερες απώλειες από το μεταλλικό στέλεχος.

	Effective index (real part)	Group index (real part)	Metal losses (dB/cm)
Fundamental TE Mode	2.535	4.310	2.029
Fundamental TM Mode	2.416	4.475	2.747

Πίνακας 12: ενεργός δείκτης διάθλασης, δείκτης διάθλασης ομάδας και απώλειες λόγω του μεταλλικού στελέχους για τον TE και τον TM ρυθμό όπως υπολογίστηκαν από τον FD mode solver.

### 3.3.3 Θερμική εξάρτηση του ενεργού δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού

Προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού, έπρεπε να προσδιοριστεί η μέγιστη θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου ούτως ώστε να εισαχθεί στη θερμική προσομοίωση. Για τον σκοπό αυτόν, χρησιμοποιήθηκαν ήδη υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα από την AMO τα οποία αφορούσαν στη ρύθμιση μήκους κύματος μονών κοιλοτήτων συντονισμού δακτυλίου (single ring resonators) εφοδιασμένων με θερμαντικά στοιχεία και παράθυρο λειτουργίας τα 1.3  $\mu\text{m}$  [3.20]. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται η διατομή του δακτυλίου συντονισμού της AMO, μια κάτοψη η οποία έχει παρθεί από μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίου (scanning electron microscope-SEM) και η θερμικά επαγόμενη μετατόπιση μήκους κύματος μιας κατά TE πολωμένης δέσμης ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης.

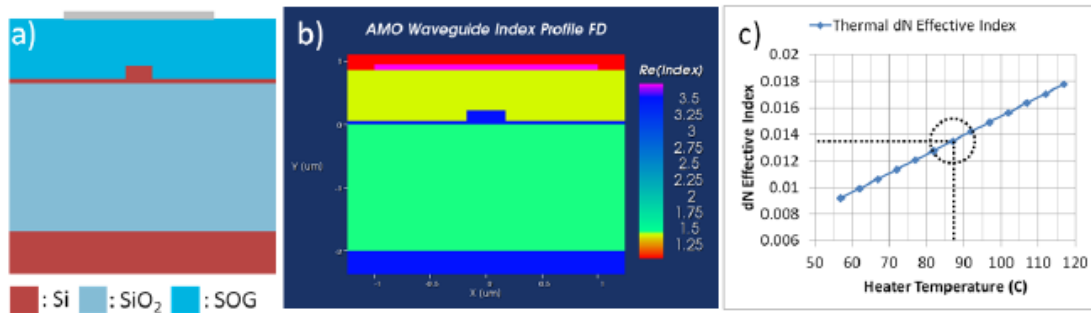


Εικόνα 57: (α) Διατομή του κυματοδηγού του δακτυλίου, (β) SEM κάτοψη της δομής και (γ) μετατόπιση μήκους κύματος ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης

Χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση, η διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης που αντιστοιχεί σε μετατόπιση μήκους κύματος λόγω εφαρμογής 11 V τάσης μπορεί εύκολα να εξαχθεί [3.21]:

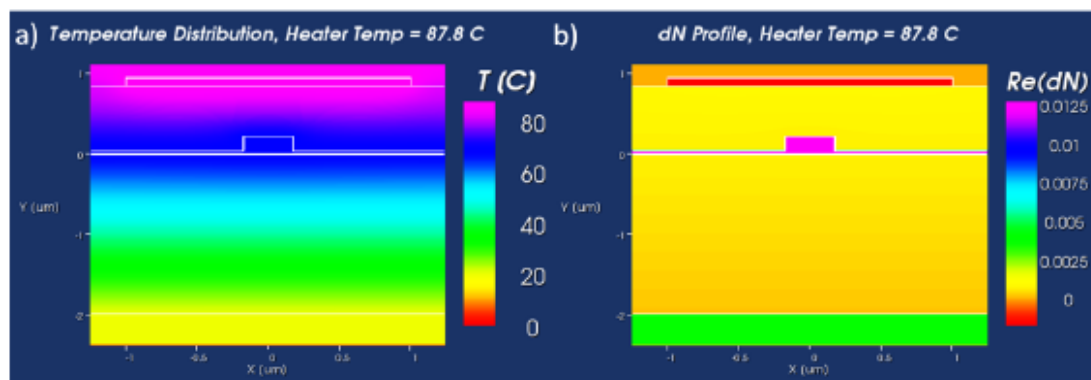
$$dN = \frac{n_g \cdot d\lambda_m \cdot \frac{dn}{dT}}{\lambda_m \cdot (n_{eff} \cdot a_{sub} + \frac{dn}{dT})}$$

Προκειμένου να μεταφραστεί η ήδη υπολογισμένη τιμή της διακύμανσης του ενεργού δείκτη διάθλασης στην αντίστοιχη θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου, ο δακτύλιος συντονισμού εισήχθη στους FMM και FD mode solvers του εργαστηρίου όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ακολουθώντας τον ορισμό του ενεργού δείκτη διάθλασης του θεμελιώδη TE ρυθμού όταν το θερμαντικό στοιχείο είναι κλειστό, πραγματοποιήθηκε μια θερμική μελέτη στοχεύοντας στον υπολογισμό της αλλαγής του ενεργού δείκτη διάθλασης (dN) για διακύμανση της θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου από 60 σε 120 °C. Το αποτέλεσμα της μελέτης αυτής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα και αποκαλύπτει μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ των δυο μεταβλητών. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, η διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης, η οποία υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, αντιστοιχεί σε θερμοκρασία θερμαντικού στοιχείου ίση με 87.8 °C.



Εικόνα 58: (α) Η διατομή και το προφίλ του δακτυλίου συντονισμού της AMO, (β) το προφίλ της δομής όπως υπολογίστηκε από τον FD solver και (γ) η διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης της δομής ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του θερμαντικού στοιχείου.

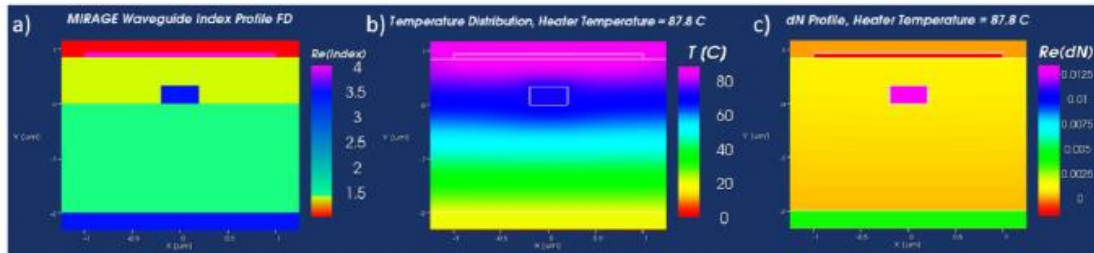
Η κατανομή της θερμοκρασίας όπως επίσης και η διακύμανση του δείκτη διάθλασης του δακτυλίου συντονισμού της AMO όπως υπολογίστηκε από τους θερμικούς solvers για θερμοκρασία θερμαντικού στοιχείου ίση με 87.8 °C φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.



Εικόνα 59: (α) κατανομή της θερμοκρασίας και (β) θερμικά επαγόμενη διακύμανση του δείκτη διάθλασης για το δακτύλιο συντονισμού της AMO για θερμοκρασία θερμαντικού στοιχείου ίση με 87.8 °C.



Με δεδομένο ότι οι διαστάσεις του υλικού του θερμαντικού στοιχείου που χρησιμοποιήθηκε στο δακτύλιο συντονισμού της AMO είναι ίδιες με αυτές του ηλεκτροδίου που χρησιμοποιήθηκε στους κυματοδηγούς της πλατφόρμας μας, η εξαγόμενη μέγιστη θερμοκρασία του ηλεκτροδίου θεωρείται η ίδια και στις δυο περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η θερμική συμπεριφορά του κυματοδηγού μπορεί πολύ εύκολα να υπολογιστεί θέτοντας τη θερμοκρασία του θερμαντικού στοιχείου στους 87.8 °C και «τρέχοντας» την αντίστοιχη θερμική προσομοίωση.



Εικόνα 60: (α) Προφίλ δεικτών διάθλασης των κυματοδηγών της συγκεκριμένης πλατφόρμας όπως υπολογίστηκε από τον FD solver, (β) κατανομή της θερμοκρασίας και (γ) προφίλ της διακύμανσης του δείκτη διάθλασης θεωρώντας θερμοκρασία ηλεκτροδίου ίση με 87.8 oC.

Η παραπάνω εικόνα (Εικόνα 60α) δείχνει το προφίλ των δεικτών διάθλασης του κυματοδηγού όπως αυτό υπολογίστηκε από τους FD mode solvers ενώ στην εικόνες Εικόνα 60β και Εικόνα 60γ αποτυπώνεται η κατανομή της θερμοκρασίας και την αντίστοιχη θερμικά επαγόμενη διακύμανση του δείκτη διάθλασης. Το αποτέλεσμα της θερμικής μελέτης των κυματοδηγών συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι και οι δυο πλώσεις παρουσιάζουν παρόμοια θερμική συμπεριφορά. Επίσης το μήκος του κυματοδηγού που χρειάζεται ούτως ώστε να έχουμε θερμο-οπτικά επαγόμενη στροφή φάσης κατά  $\pi$  είναι 50.456  $\mu\text{m}$  για την TE και 50.098  $\mu\text{m}$  για την TM πόλωση. Αυτό σημαίνει ότι ένας βραχίονας του MZI με μήκος 50  $\mu\text{m}$  θα επιτρέψει μια μετατόπιση του μήκους κύματος ίση με το μισό της ελεύθερης φασματικής του περιοχής (free spectral range-FSR).

	Effective index (real part)	Thermal dN (real part)	Thermal Pi length ( $\mu\text{m}$ )
Fundamental TE Mode	2.535	0.0154	50.456
Fundamental TM Mode	2.416	0.0155	50.098

Πίνακας 13: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικώς επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης και θερμικά  $\pi$  μήκη για την TE και την TM πόλωση, όπως υπολογίστηκε από τον FD και τον θερμικό solver.

### 3.4 Προσομοίωση δομής του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, η υλοποίηση των δομών του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη βασίστηκε στη λογική ενός συμβολομέτρου καθυστέρησης με δεδομένο ότι είναι μια εγγενώς απλή δομή με πολύ απλό μηχανισμό

συντονισμού του μήκους κύματος. Επιπλέον, εισάγοντας μικρές τροποποιήσεις στο γενικό σχεδιασμό, ο οποίος βασίζεται σε ένα Mach Zehnder συμβολόμετρο (MZI), οι δομές του συμβολομέτρου καθυστέρησης μπορούν να επιτρέψουν τη λειτουργία και στις δυο πολωτικές καταστάσεις κάτι το οποίο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ειδικά για την περίπτωση του αποπολυπλέκτη όπου, όπως έχουμε αναφέρει ξανά, το ληφθέν σήμα είναι σε τυχαία πόλωση η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες περιβάλλοντος και τη μηχανική καταπόνηση του δικτύου των οπτικών ινών.

### 3.4.1 Μοντελοποίηση του πολυπλέκτη

Η συσκευή του πολυπλέκτη ακολουθεί μια απλή σχεδιαστική προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με συγκεκριμένη διαφορά μήκους μεταξύ των δυο βραχιόνων του και εξοπλισμένου με θερμικά στοιχεία στην κορυφή των δυο βραχιόνων προκειμένου να επιτρέπεται η θερμική ρύθμιση του μήκους κύματος λειτουργίας. Ένα 3D σχηματικό της δομής του πολυπλέκτη παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 61: 3D σχηματικό του πολυπλέκτη

Όπως παρατηρήθηκε η συσκευή χρησιμοποιεί ένα 2x2 MMI συζεύκτη στην είσοδο και έναν 1x2 MMI συζεύκτη στην έξοδο βασισμένους στα μοντέλα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η διαφορά μήκους μεταξύ των δυο βραχιόνων ορίζεται χρησιμοποιώντας τις γνωστές MZI εξισώσεις [3.22]:

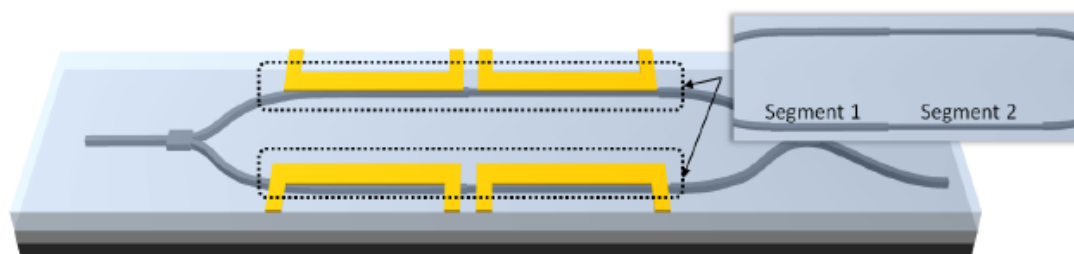
$$FSR_{TM} = \frac{c}{\Delta L \cdot n_{gTM}}$$

$$\Delta L = \frac{c}{FSR_{TM} \cdot n_{gTM}}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση του πολυπλέκτη μόνο η μια κατάσταση της πόλωσης είναι σημαντική με δεδομένο ότι τα σήματα εισόδου προέρχονται κατευθείαν από τη συστοιχία των WDM VCSELs η οποία εκπέμπει γραμμικά πολωμένο φως σε μια συγκεκριμένη και ελέγξιμη κατεύθυνση. Με δεδομένο ότι οι συζεύκτες κάθετου πλέγματος (grating couplers) που αναπτύχθηκαν στην SOI πλατφόρμα και θα χρησιμοποιηθούν ως μηχανισμοί ζεύξης μεταξύ VCSEL και των κυματοδηγών, λειτουργούν στην TM πόλωση, οι συναρτήσεις λαμβάνονται υπόψη μόνο για την TM πόλωση.

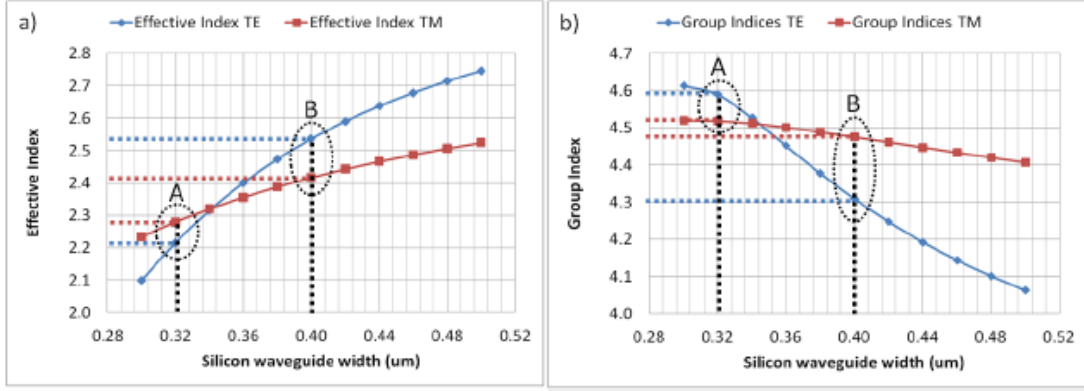
### 3.4.2 Μοντελοποίηση του αποπολυπλέκτη

Η συσκευή του αποπολυπλέκτη ακολουθεί μια πιο ενδεδειγμένη προσέγγιση σχεδιασμού ούτως ώστε να χειρίζεται εξίσου την TE και την TM πόλωση επιτρέποντας την απρόσκοπτη λειτουργία του δέκτη ανεξαρτήτως πόλωσης. Το σχέδιο βασίζεται στη χρήση δυο τμημάτων κυματοδηγού μέσα σε κάθε MZI βραχίονα οι οποίοι διαφέρουν σε πλάτος. Μια 3D απεικόνιση του σχεδίου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 62: 3D απεικόνιση του πολυπλέκτη

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, και οι δυο βραχίονες αποτελούνται από δυο διακριτά τμήματα το καθένα από τα οποία έχει ξεχωριστό θερμαντικό ηλεκτρόδιο. Η διαφορά του πλάτους μεταξύ των τμημάτων επιλέγεται κατάλληλα ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί «ψευδο» αντιστάθμιση διασποράς μέσα στους βραχίονες του αποπολυπλέκτη. Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει τον ενεργό δείκτη διάθλασης και το δείκτη διάθλασης ομάδας που υπολογίστηκε για κυματοδηγό με λωρίδα πυριτίου στην κορυφή ύψους 340 nm (top Si strip waveguide). Το ονομαστικό πλάτος της πλατφόρμας του κυματοδηγού είναι 400 nm το οποίο αντιστοιχεί στην περιοχή του γραφήματος με τη σήμανση B. σύμφωνα με τα γραφήματα του δείκτη διάθλασης ομάδας, ο δείκτης αυτός για την TM πόλωση, σε εκείνη την περιοχή, είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για την TE πόλωση. Ωστόσο, καθώς το πλάτος του κυματοδηγού μειώνεται (και άρα η διατομή του κυματοδηγού τείνει να γίνεται τετράγωνη) οι δυο δείκτες διάθλασης ομάδας παίρνουν σταδιακά την ίδια τιμή, ενώ για πλάτη μικρότερα από 340 nm ο δείκτης διάθλασης ομάδας του TE γίνεται μεγαλύτερος. Αυτό σημαίνει ότι επιλέγοντας πλάτη κυματοδηγών μικρότερα από 340 nm για το δεύτερο τμήμα του κυματοδηγού και υπολογίζοντας τα μήκη των τμημάτων των κυματοδηγών κατάλληλα, μπορεί να επιτευχθεί ίσος δείκτης διάθλασης ομάδας μεταξύ της TE και της TM πόλωσης. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης δουλειάς επιλέχθηκε πλάτος κυματοδηγού 0.32 μm (περιοχή γραφήματος «A») ούτως ώστε να εξασφαλιστεί από τη μια αδιάλειπτη λειτουργία ανεξαρτήτως της πόλωσης και από την άλλη επαρκής περιορισμός (confinement) της TM πόλωσης. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, για πλάτη μικρότερα από 0.32 μm ο ενεργός δείκτης διάθλασης της TM πόλωσης πέφτει σημαντικά οδηγώντας σε ασθενέστερη υποστήριξη του TM ρυθμού.



Εικόνα 63: (α) ενεργός δείκτης διάθλασης και (β) δείκτης διάθλασης ομάδας ως συνάρτηση του πλάτους του κυματοδηγού για την TE και την TM πόλωση.

Οι απαιτούμενες διαφορές στα μήκη των δυο τμημάτων του MZI,  $\Delta L_1$  και  $\Delta L_2$ , μπορούν να προσδιοριστούν από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$FSR_{TE} = \frac{c}{\Delta L_1 \cdot n_{1TE} + \Delta L_2 \cdot n_{2TE}}$$

$$FSR_{TM} = \frac{c}{\Delta L_1 \cdot n_{1TM} + \Delta L_2 \cdot n_{2TM}}$$

$$FSR_{TE} = FSR_{TM}$$

Οι πρώτες δυο εξισώσεις, αντιστοιχούν στις γνωστές MZI FSR εξισώσεις τροποποιημένες με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να προσαρμόζονται στη δομή του MZI δυο τμημάτων για την TE και την TM πόλωση. Η τελευταία εξίσωση αντιπροσωπεύει την αναγκαία συνθήκη που επιτρέπει την ανεξαρτήτου πόλωσης λειτουργία της δομής του αποπολυπλέκτη. Λύνοντας τις παραπάνω εξισώσεις, οι τιμές των  $\Delta L_1$  και  $\Delta L_2$  μπορούν εύκολα να εξαχθούν υποθέτοντας  $FSR_{TE} = FSR_{TM} = FSR$ :

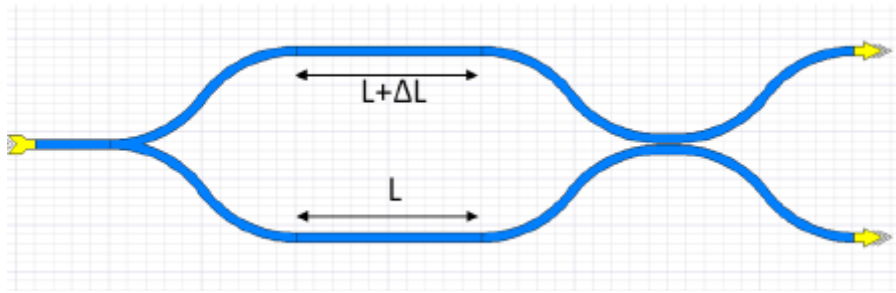
$$\Delta L_1 = \frac{c \cdot (n_{2TE} - n_{2TM})}{FSR \cdot (n_{1TM} \cdot n_{2TE} - n_{1TE} \cdot n_{2TM})}$$

$$\Delta L_2 = \frac{c \cdot (n_{1TM} - n_{1TE})}{FSR \cdot (n_{1TM} \cdot n_{2TE} - n_{1TE} \cdot n_{2TM})}$$

όπου οι διάφορες τιμές του  $n$  αντιστοιχούν στους δείκτες διάθλασης ομάδας για την TE και την TM πόλωση.

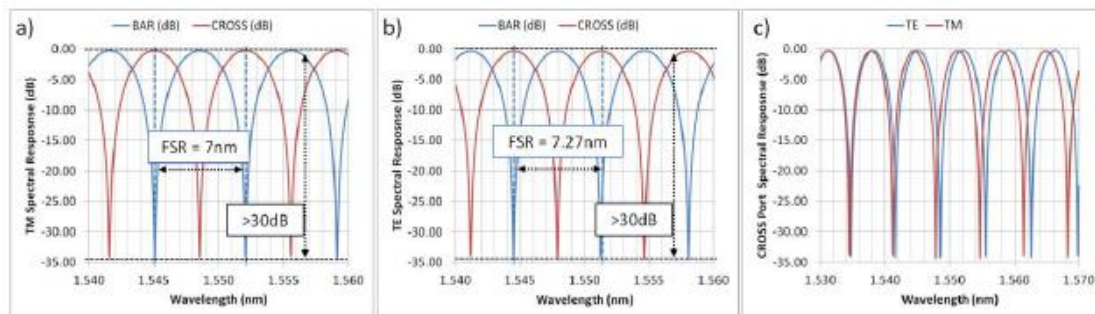
### 3.4.3 Προσομοίωση του πολυπλέκτη

Ακολουθώντας αναλυτικούς υπολογισμούς για την απόκριση του πολυπλέκτη, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο σε επίπεδο συσκευής (component level model) κάνοντας χρήση του λογισμικού ASPIC, ούτως ώστε να επαληθευτεί η σωστή λειτουργία του πολυπλέκτη. Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε κατά της διαδικασία αυτή της προσομοίωσης φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 64: Η διάταξη του πολυπλέκτη όπως αναπτύχθηκε στο ASPIC.

Οι τομείς σύζευξης που χρησιμοποιήθηκαν στην διάταξη της προσομοίωσης για τον πολυπλέκτη βασίζονται στα αποτελέσματα της αριθμητικής μελέτης που περιγράφηκε παραπάνω, ενώ οι σταθερές διάδοσης (ενεργός δείκτης διάθλασης και δείκτης διάθλασης ομάδας) προκύπτουν από τα γραφήματα της Εικόνα 65. Το ελεύθερο φασματικό εύρος της δομής αποφασίστηκε να είναι στα 7 nm ούτως ώστε να συμμορφώνεται με το διακριτικότητα των 3.5 nm που διαθέτουν τα VCSELs. Λύνοντας τις αντίστοιχες εξισώσεις για τη συγκεκριμένη περίπτωση, η διαφορά του μήκους βρέθηκε να είναι στα 76.6 μm.



Εικόνα 65: Φασματική απόκριση των θυρών BAR και CROSS για (α) TM και (β) TE πόλωση και (γ) TE και TM φασματική απόκριση της θύρας CROSS

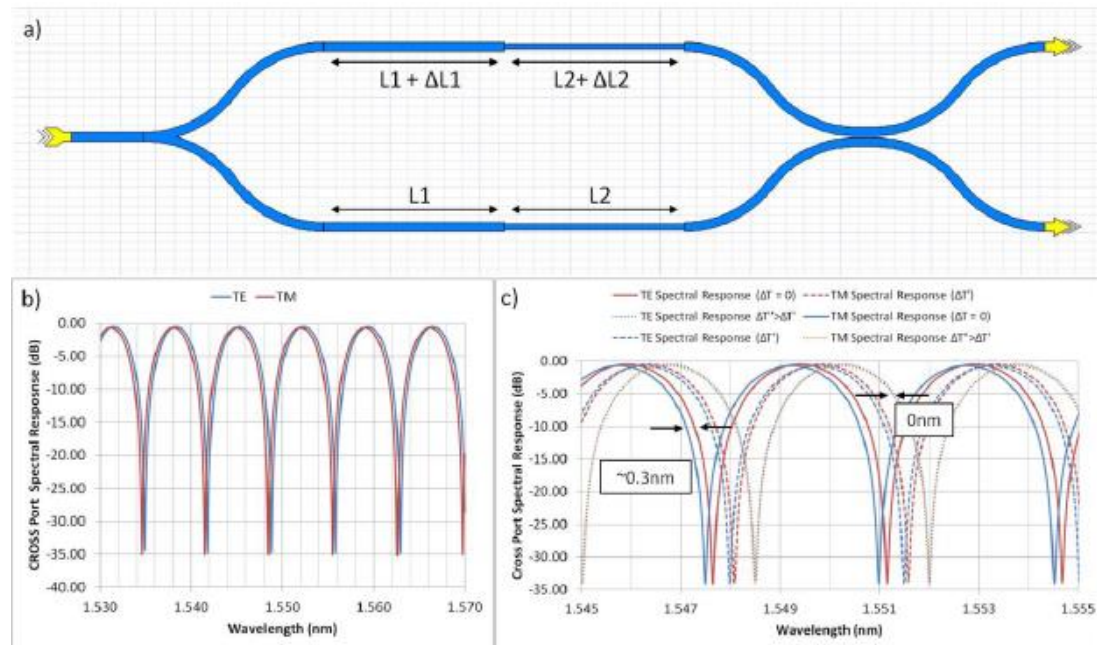
Η παραπάνω εικόνα αποτυπώνει τη φασματική απόκριση των θυρών BAR (άνω) και CROSS (κάτω) της συσκευής του πολυπλέκτη για την TE και την TM πόλωση αντίστοιχα. Ο λόγος σβέσης των δυο θυρών είναι μεγαλύτερος από 30 dB αποκαλύπτοντας την σωστή λειτουργία των MMI συζευκτών στην είσοδο και την έξοδο της δομής. Όπως ήταν αναμενόμενο, η τιμή του ελεύθερου φασματικού εύρους είναι διαφορετική για την TE και την TM πόλωση οδηγώντας σε αναντιστοιχία μεταξύ των αντίστοιχων φασματικών συμπεριφορών όπως φαίνεται και στην εικόνα Εικόνα 65γ. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την εφαρμογή τάσης στα θερμαντικά στοιχεία της δομής, θα μπορούσε κανείς να μετατοπίσει τη συνάρτηση μεταφοράς του MZI. Παρόλα αυτά, η διόρθωση της φασματικής αναντιστοιχίας μεταξύ των δυο πολώσεων δεν είναι εφικτή ανεξαρτήτως από την εφαρμοζόμενη τάση ή το ηλεκτρόδιο, καθώς προέρχεται μόνο από τη διπλοθλαστικότητα του κυματοδηγού. Ο παρακάτω πίνακας είναι μια επέκταση του πίνακα Πίνακας 13 για να εμπεριέχει και τη διαφορά του μήκους όπως και τις αντίστοιχες τιμές για το ελεύθερο φασματικό εύρος του TE και του TM ρυθμού.

	Effective index (real part)	Thermal dN (real part)	Thermal Pi length ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	FSR (nm)
Fundamental TE Mode	2.535	0.0154	50.456	76.6	<b>7.270</b>
Fundamental TM Mode	2.416	0.0155	50.098	76.6	<b>7.000</b>

Πίνακας 14: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης, θερμικά  $\pi$  μήκη, διαφορά μηκών του MZI και FSR για τον TE και τον TM ρυθμό.

### 3.4.4 Προσομοίωση αποπολυπλέκτη

Ακολουθώντας την προσομοιωτική διαδικασία που πολυπλέκτη, ένα παρόμοιο μοντέλο αναπτύχθηκε για τη συσκευή του αποπολυπλέκτη στην προσομοιωτική πλατφόρμα του ASPIC προκειμένου να επαληθευτεί η σωστή λειτουργία του. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 66: (α) Συσκευή αποπολυπλέκτη που αναπτύχθηκε στο ASPIC, (β) φασματική απόκριση του TE της CROSS θύρας για τον TE και τον TM ρυθμό και (γ) θερμο-οπτική ρύθμιση της φασματικής συμπεριφοράς του TE και του TM ρυθμού.

Οι περιοχές ζεύξης του μοντέλου του πολυπλέκτη βασίστηκαν στα αποτελέσματα της αριθμητικής μελέτης που περιγράφεται παραπάνω ενώ οι σταθερές διάδοσης ορίστηκαν βάσει των τιμών A και B οι οποίες αποτυπώνονται στα διαγράμματα της εικόνας Εικόνα 66. Για τιμή ελεύθερης φασματικής περιοχής ίση με 7 nm, οι εξισώσεις της σελίδας 114 για τη διαφορά μήκους του πρώτου και του δεύτερου τμήματος γίνονται  $\Delta L1 = 23.7 \mu\text{m}$  και  $\Delta L2 = 52.4 \mu\text{m}$  αντίστοιχα.

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνονται οι ληφθείσες συναρτήσεις μεταφοράς της θύρας CROSS από τις οποίες είναι φανερό ότι η ελεύθερη φασματική περιοχή έχει τιμή 7nm και για τις δυο πολώσεις TE και TM, επαληθεύοντας έτσι και τη σκοπιμότητα του μοντέλου με τα δυο τμήματα. Επιπλέον στην Εικόνα 44c

αποδεικνύεται ότι μπορούμε να έχουμε μετατόπιση της κάθε συνάρτησης μεταφοράς, για τους ρυθμούς TE και TM, ξεχωριστά με το να λειτουργούμε τα θερμαντικά στοιχεία είτε του πρώτου είτε του δεύτερου τμήματος του βραχίονα. Οι συμπαγείς γραμμές αντιστοιχούν στη φασματική αναντιστοιχία η οποία είναι της τάξης των 0.3 nm με τα θερμαντικά στοιχεία να είναι κλειστά (OFF mode) ενώ ανάβοντας τα θερμαντικά στοιχεία αυτή η διαφορά μπορεί να μειωθεί στο μηδέν (με τη διακεκομμένη γραμμή).

Ο παρακάτω πίνακας επεκτείνει τον Πίνακα 14 ούτως ώστε να συμπεριλαμβάνει και τη διαφορά μήκους και το αντίστοιχο ελεύθερο φασματικό εύρος, όπως επίσης και τους ενεργούς δείκτες διάθλασης και τους δείκτες διάθλασης ομάδας του TE και του TM ρυθμού για τα τμήματα του αποπολυπλέκτη.

	Segment 1 ( $w_{Si} = 0.4 \mu\text{m}$ )				Segment 2 ( $w_{Si} = 0.32 \mu\text{m}$ )				FSR (nm)
	Effective index	Group index	Thermal Pi length ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	Effective Index	Group Index	Thermal Pi length ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta L$ ( $\mu\text{m}$ )	
Fundamental TE Mode	2.535	4.310	50.456	23.7	2.215	4.590	50.796	52.4	7.000
Fundamental TM Mode	2.416	4.475	50.098	23.7	2.279	4.519	50.781	52.4	7.000

Εικόνα 67: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης, θερμικό  $\pi$  μήκος, διαφορά μήκους MZI και για τους δυο βραχίονες του αποπολυπλέκτη, τιμές του ελεύθερου φασματικού εύρους για τον TE και τον TM ρυθμό.

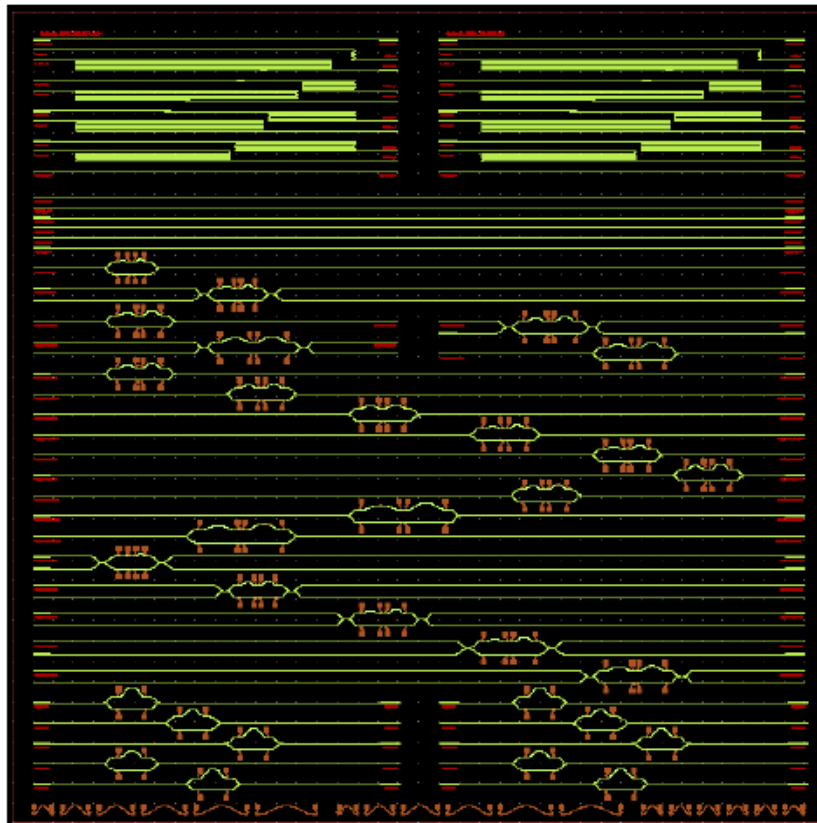
Συνοψίζοντας, στα πλαίσια αυτά κατασκευάστηκαν δυο στοιχεία φίλτρων βασισμένα σε δομές συμβολομέτρων καθυστέρησης: (α) ένας ρυθμιζόμενος πολυπλέκτης χρησιμοποιώντας μια απλή δομή MZI το οποίο βελτιστοποιήθηκε για χρήση στον TM ρυθμό και (β) ένας ρυθμιζόμενος αποπολυπλέκτης ακολουθώντας μια πιο αναβαθμισμένη προσέγγιση στο μοντέλο το οποίο και βασίστηκε σε μια τμηματική λογική η οποία επιτρέπει ταυτόχρονη λειτουργία τόσο στον TE όσο και στον TM ρυθμό. Η μεθοδολογία του σχεδιασμού ακολούθησε μια βηματική προσέγγιση ξεκινώντας από μια αριθμητική μελέτη σχεδίων 1x2 και 2x2 MMIs με χαμηλή διπλοθλαστικότητα τα οποία βελτιστοποιήθηκαν για λειτουργία και στις δυο πολώσεις. Εν συνεχεία, έγινε μια θερμική μελέτη στη διατομή των κυματοδηγών της συγκεκριμένης πλατφόρμας προκειμένου να ερευνηθεί η θερμική εξάρτηση του ενεργού δείκτη διάθλασης και της αποτελεσματικότητας της αντίστοιχης θερμο-οπτικής ρύθμισης των ολοκληρωμένων δομών. Τέλος, έγινε μια μοντελοποίηση στο επίπεδο της συσκευής (device) του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη βασισμένη στις αναπτυγμένες δομικές μονάδες (building blocks) χρησιμοποιώντας τόσο αναλυτική όσο και προσομοιωτική προσέγγιση.

### 3.5 Μάσκες για τον πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη

Σε συνέχεια του σχεδιασμού του πολυπλέκτη και του αποπολυπλέκτη που περιγράφηκε παραπάνω, κατασκευάστηκε ένα σχέδιο μάσκας (mask layout) το οποίο αποτελούταν από αρκετά συμβολόμετρα καθυστέρησης και δομές δοκιμών στοχεύοντας στην επαλήθευση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων προσομοίωσης. Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν αβεβαιότητες κατά τη διαδικασία του χαρακτηρισμού που σχετίζονται με την ποιότητα κοπής ή την απόδοση των in-plane

οπτικών συζευκτών, η είσοδος και η έξοδος του φωτός από το πλακίδιο αποφασίστηκε να βασιστεί σε grating couplers που είναι πιο κατάλληλη για το χαρακτηρισμό ολοκληρωμένων φωτονικών δομών. Με δεδομένο όμως ότι τα διαθέσιμα σχέδια grating couplers είχαν τη δυνατότητα να λειτουργούν μόνο στη μια πόλωση, η μάσκα αναγκαστικά συμπεριέλαβε την κάθε δομή από δυο φορές, μια φορά έχοντας έναν TE grating coupler και μια έχοντας έναν TM.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι κάθε συμβολόμετρο καταλαμβάνει σημαντικό χώρο πάνω στη μάσκα, και ότι η ενεργή περιοχή έχει εμβαδό  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ , αυτό θα οδηγούσε σε σημαντική απώλεια χώρου πάνω στο πλακίδιο. Προκειμένου λοιπόν να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός ακολουθήθηκε η παρακάτω προσέγγιση: κάθε δομή εξοπλίστηκε με TE grating coupler στη μια του πλευρά και με TM στην άλλη. Με τη δεδομένη διάταξη, ο χαρακτηρισμός τόσο της TE όσο και της TM πόλωσης θα υποφέρει από αυξημένες απώλειες λόγω της μη βελτιστοποιημένης συμπεριφοράς ενός μόνο grating coupler. σύμφωνα με τη θεωρία και τις προσομοιώσεις, οι απώλειες υπολογίστηκαν ότι θα είναι στο εύρος τιμών μεταξύ 30 dB και 40 dB. Παρόλα αυτά, η διαθέσιμη ισχύς (power budget) για το χαρακτηρισμό του πλακιδίου ξεπερνάει τα 80 dB, επιτρέποντας τη μέτρηση των δομών για τον πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που οι grating couplers που χρησιμοποιούταν ήταν της ίδιας πόλωσης και από τις δυο μεριές, αυτό θα σήμαινε ότι για το μη βελτιστοποιημένο πολωτικό άξονα, οι απώλειες θα έφταναν στα επίπεδα της συνολικής διαθέσιμης ισχύος και άρα η δυνατότητα επιτυχούς μέτρησης δεν θα ήταν εφικτή.



Εικόνα 68: Η άποψη της μάσκας που σχεδιάστηκε για τις δομές του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη



Αναλυτικά η διάταξη της μάσκας (mask layout) που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα περιείχε τις ακόλουθες δομές:

- Δυο τομείς cutback κυματοδηγών, μια με TM grating couplers και μια με TE, επιτρέποντας τη μέτρηση της απόδοσης των ζεύξεων εισόδου και εξόδου όπως επίσης και την εκτίμηση των απωλειών κυματοδότησης και για τις δυο πολώσεις.
- Έναν τομέα με ευθύς κυματοδηγούς (straight waveguides) εξοπλισμένους με TM grating coupler στη μια πλευρά και TE στην άλλη οι οποίοι και θα χρησιμοποιηθούν ως αναφορά
- Έναν τομέα που αποτελείται από 1x1 και 2x2 συμβολόμετρα καθυστέρησης με δυο τμήματα με βελτιστοποιημένα MMI χαρακτηριστικά, ελεύθερο φασματικό εύρος 7 nm και μήκος θερμαντικών στοιχείων με εύρος από 300 μm έως 800 μm και βήμα 100 μm. Η αναλογία του πλάτους πρώτου/ δευτέρου τμήματος για τα πρώτα δυο συμβολόμετρα ήταν 0.4 μm/0.3 μm ενώ για τα υπόλοιπα είναι 0.4 μm/0.32 μm.
- Έναν τομέα με 1x1 συμβολόμετρα καθυστέρησης με δυο τμήματα με 0.4 μm/0.32 μm αναλογία πλάτους κυματοδηγού και θερμαντικά στοιχεία μήκους 500 μm. Τα μήκη των συμβολόμετρων ήταν από 3.36 μm έως 4.16 μm με βήμα 0.2 μm ενώ το ελεύθερο φασματικό εύρος ταυτόχρονα είχε μια διακύμανση από 6 nm σε 8 nm με βήμα 0.5 nm.
- Έναν τομέα με 1x1 συμβολόμετρα καθυστέρησης δυο τμημάτων με 0.4 μm/0.32 μm αναλογία πλάτους κυματοδηγού και θερμαντικά στοιχεία μήκους 1000 μm. Το 2x1 MMI taper εξόδου είχε πλάτος με διακύμανση από 0.69 μm έως 0.89 μm με βήμα 0.2 μm ενώ το ελεύθερο φασματικό εύρος των δομών ήταν από 5 έως 5.5 nm με βήμα 0.5 nm.
- Ένα τομέα με 2x2 συμβολόμετρα καθυστέρησης δυο τμημάτων με 0.4 μm/0.32 μm αναλογία πλάτους κυματοδηγού και ελεύθερο φασματικό εύρος 7 nm. Το 2x1 συμβολόμετρο καθυστέρησης είχε μήκος από 13.85 έως 17.85 μm με βήμα 1 μm ενώ το μήκος των θερμαντικών στοιχείων είχε μια διακύμανση από 300 σε 500 μm με βήμα 100 μm.
- Έναν τομέα με 1x1 συμβολόμετρα καθυστέρησης ενός τμήματος με βελτιστοποιημένες παραμέτρους MMI και τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:
  - Ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με TE grating couplers και ένα με TM, με ελεύθερο φασματικό εύρος 3 nm, μήκος θερμαντικών στοιχείων ίσο με 700 μm και πλάτος του κυματοδηγού του βραχίονα ίσο με 0.4 μm.
  - Ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με TE grating couplers και ένα με TM, με ελεύθερο φασματικό εύρος 5 nm, μήκος θερμαντικών στοιχείων ίσο με 700 μm και πλάτος του κυματοδηγού του βραχίονα ίσο με 0.4 μm.
  - Ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με TE grating couplers και ένα με TM, με ελεύθερο φασματικό εύρος 3 nm, μήκος θερμαντικών

στοιχείων ίσο με 700  $\mu\text{m}$  και πλάτος του κυματοδηγού του βραχίονα ίσο με 0.32  $\mu\text{m}$ .

- Ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με TE grating couplers και ένα με TM, με ελεύθερο φασματικό εύρος 5 nm, μήκος θερμαντικών στοιχείων ίσο με 700  $\mu\text{m}$  και πλάτος του κυματοδηγού του βραχίονα ίσο με 0.32  $\mu\text{m}$ .
- Ένα συμβολόμετρο καθυστέρησης με TE grating couplers και ένα με TM, με ελεύθερο φασματικό εύρος 3 nm, μήκος θερμαντικών στοιχείων ίσο με 700  $\mu\text{m}$  και πλάτος του κυματοδηγού του βραχίονα ίσο με 0.3  $\mu\text{m}$ .
- Έναν τομέα με θερμαντικά στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν για ηλεκτρικό χαρακτηρισμό ούτως ώστε να προσδιοριστεί η αντίστασή τους καθώς και η αντίστασή των contact pads. Αυτός ο τομέας ήταν χωρισμένος στους ακόλουθους υπο-τομείς:
  - Ένας με θερμαντικά στοιχεία πλάτους 2  $\mu\text{m}$  και μήκος με διακύμανση από 500 έως 1500  $\mu\text{m}$  με βήμα 200  $\mu\text{m}$ .
  - Ένας με θερμαντικά στοιχεία πλάτους 3  $\mu\text{m}$  και μήκος με διακύμανση από 500 έως 1500  $\mu\text{m}$  με βήμα 200  $\mu\text{m}$ .
  - Ένας με θερμαντικά στοιχεία μήκους 500  $\mu\text{m}$  και πλάτος με διακύμανση από 1 έως 6  $\mu\text{m}$  με βήμα 1  $\mu\text{m}$ .

Για τις προαναφερθείσες δομές υπολογίστηκαν οι ακόλουθες βελτιστοποιημένες παράμετροι με τη χρήση του προσομοιωτικού εργαλείου που αναφέρθηκε παραπάνω:

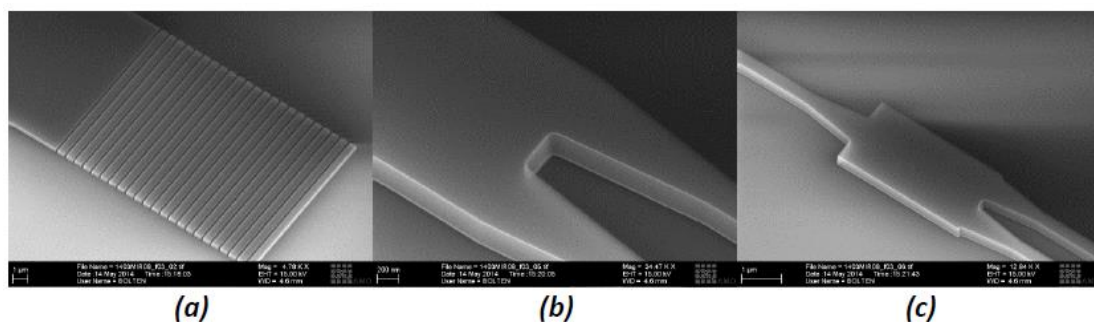
- 1x2 MMI:
  - Μήκος ίσο με 3.76  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος ίσο με 2  $\mu\text{m}$
  - Μήκος taper εισόδου ίσο με 1.5  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος taper εισόδου ίσο με 0.84  $\mu\text{m}$
  - Μήκος taper εξόδου ίσο με 1.41  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος taper εξόδου ίσο με 0.79  $\mu\text{m}$
  - Κενό εξόδου ίσο με 1.02  $\mu\text{m}$
- 2x2 MMI:
  - Μήκος ίσο με 15.85  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος ίσο με 2  $\mu\text{m}$
  - Μήκος taper εισόδου ίσο με 1.625  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος taper εισόδου ίσο με 0.79  $\mu\text{m}$
  - Κενό εισόδου ίσο με 1.02  $\mu\text{m}$
  - Μήκος taper εξόδου ίσο με 1.49  $\mu\text{m}$
  - Πλάτος taper εξόδου ίσο με 0.79  $\mu\text{m}$
  - Κενό εξόδου ίσο με 1.02  $\mu\text{m}$
- Θερμαντικά στοιχεία με πλάτος 2  $\mu\text{m}$

Λαμβάνοντας υπόψιν την αυξημένη πολυπλοκότητα του σχεδιασμού του πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη όπως επίσης και την εξάρτηση της φασματικής τους συμπεριφοράς από τις κατασκευαστικές ατέλειες, αποφασίστηκε να δοθεί έμφαση

στο να συμπεριληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες παραλλαγές στη μάσκα ούτως ώστε να διευκολυνθεί η σωστή μοντελοποίηση των συσκευών.

### 3.6 Κατασκευή των πρώτων συσκευών πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη

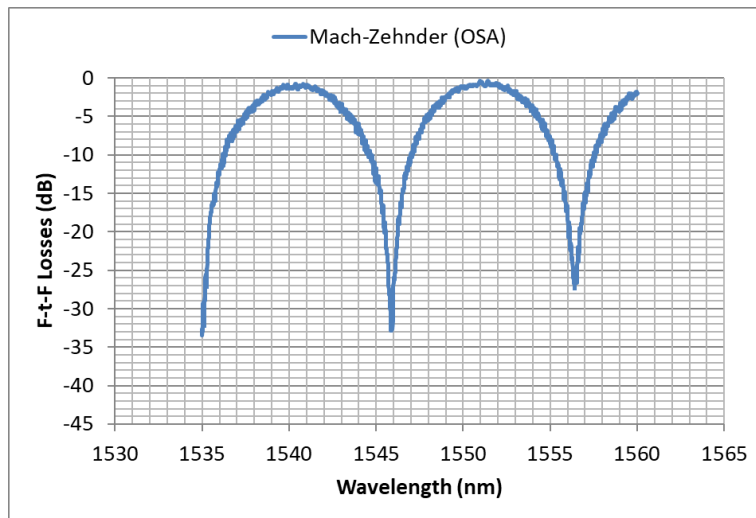
Έχοντας ως βάση το σχέδιο της παραπάνω μάσκας, τα πλακίδια κατασκευάστηκαν στις εγκαταστάσεις της AMO στη Γερμανία και περιείχαν όλες τις δομές συμβολομέτρων καθυστέρησης που περιγράφηκαν καθώς και θερμαντικά στοιχεία για τη θερμική ρύθμιση του κεντρικού μήκους κύματος των συσκευών. Ένας αρχικός οπτικός χαρακτηρισμός που έγινε στην εταιρεία κατά τη διάρκεια κατασκευής, αποκάλυψε ότι οι δομές είχαν περίπου 6-7 dB απώλειες ζεύξης ανά κάθε grating coupler πριν από τη απόθεση spin-on-glass (SOG) υλικού στην επιστροφή του περιβλήματος του πλακιδίου, κάτι το οποίο ήταν πολύ κοντά στα εκτιμώμενα από το ΕΦΕ προσομοιωτικά αποτελέσματα για τις απώλειες των grating couplers. Επιπλέον, οι απώλειες κυματοδότησης μετρήθηκαν και βρέθηκαν στο εύρος του 1-2 dB/cm. Οι εικόνες των δομών από το μικροσκόπιο σάρωσης ηλεκτρονίου (scanning electron microscope -SEM) φαίνονται παρακάτω.



Εικόνα 69: SEM εικόνες των κατασκευασμένων δομών. (α) ένας grating coupler, (β) και (γ) MMI couplers

### 3.7 Πειραματικά αποτελέσματα

Το πλακίδιο που κατασκευάστηκε μετρήθηκε στις εγκαταστάσεις του ΕΦΕ σε ένα κάθετο σταθμό βάσης (vertical probe station). Εξαιτίας μια επιστροφής πολυμερικού υλικού πάνω από την πλειοψηφία των δομών, δεν ήταν δυνατή η μέτρηση τους. Παρακάτω παρουσιάζεται μια συνάρτηση μεταφοράς ενός Mach-Zehnder γύρω από την περιοχή των 1550 nm. Για τη μέτρηση χρησιμοποιήθηκε μονότροπη ίνα, μια πηγή laser στα 1550 nm με δυνατότητα ρύθμισης του κεντρικού μήκους κύματος λειτουργίας και ένα οπτικός αναλυτής φάσματος (Optical Spectrum Analyzer- OSA). Η συνάρτηση μεταφοράς του συμβολομέτρου κανονικοποιήθηκε αφού λήφθηκαν υπόψη οι απώλειες κυματοδότησης.



Εικόνα 70: Συνάρτηση μεταφοράς ενός Mach-Zehnder

# Βιβλιογραφία

- [3.1] D. Tsiokos, G.T. Kanellos, 2 - Optical interconnects: Fundamentals, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Optical Interconnects for Data Centers, Woodhead Publishing, 2017, p. 43-73, ISBN 9780081005125.
- [3.2] Dai, Daoxin and John E. Bowers. "Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects." *Nanophotonics* 3 (2013): 283 - 311.
- [3.3] Y. Yang and J. Wang, "Cost-effective designs of WDM optical interconnects," in *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 51-66, Jan. 2005.
- [3.4] M. Fiorani et al., "Spatial division multiplexing for high capacity optical interconnects in modular data centers," in *IEEE/OSA JOCN*, vol. 9, no. 2, pp. A143-A153, Feb. 2017.
- [3.5] J. Man, W. Chen, H. Zhang, Zhiwei Li, S. Fu and L. Zeng, "High speed optical interconnects with PAM4 modulation for short-reach applications," 2015 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), Kyoto, 2015, pp. 70-72.
- [3.6] N. I. Khan, S. H. Choudhury and A. A. Roni, "A comparative study of the temperature dependence of lasing wavelength of conventional edge emitting stripe laser and vertical cavity surface emitting laser," *Proceedings of the International Conference on Optical Communication Systems*, Seville, 2011, pp. 1-5.
- [3.7] F. Horst, W.M.J Green, B.J. Offrein, Y.A Vlasov, "Silicon-on-Insulator Echelle Grating WDM Demultiplexers With Two Stigmatic Points" *IEEE Photon. Tech. Lett*, vol 21, issue 23, Dec. 1 2009.
- [3.8] Dazeng Feng, Wei Qian, Hong Liang, Cheng-Chih Kung, Joan Fong, B. Jonathan Luff, and Mehdi Asghari, "Fabrication Insensitive Echelle Grating in Silicon-on-Insulator Platform", *IEEE Photon. Tech. Lett*, vol 23, issue 5, Mar. 1 2011.
- [3.9] Fengnian Xia, Mike Rooks, Lidija Sekaric, and Yurii Vlasov, "Ultra-compact high order ring resonator filters using submicron silicon photonic wires for on-chip optical interconnects," *Opt. Express* 15, 11934-11941 (2007).
- [3.10] H. H. Yaffe, C. H. Henry, R. F. Kazarinov and M. A. Milbrodt, "Polarization-independent silica-on-silicon Mach-Zehnder interferometers," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 64-67, Jan. 1994.
- [3.11] Chen, C. (2005). *Optical Directional Couplers and their Applications*. In *Foundations for Guided-Wave Optics*, C. Chen (Ed.). doi:10.1002/9780470042229.ch6
- [3.12] Hongqiang Li, Xiaye Dong, Enbang Li, Zhihui Liu, Yaoting Bai, Highly compact 2×2 multimode interference coupler in silicon photonic nanowires for array waveguide grating demodulation integration microsystem, *Optics & Laser Technology*, Volume 47, 2013, Pages 366-371.

- [3.13] Millan-Mejia, Alonso J. and J. J. G. M. van der Tol. “1 1 x 2 Multimode interference coupler with ultra-low reflections in membrane photonic integrated circuits.” (2017).
- [3.14] Shun Lien Chuang. 2009, *Physics of Photonic Devices* (2 ed.), Wiley Publishing.
- [3.15] Karthik, Uppu and Bijoy Krishna Das. “Multimode Interference based Mach-Zehnder Interferometer in SOI Platform for DWDM applications.” (2013).
- [3.16] Colinge JP. (2004) *Basics of Silicon-on-Insulator (SOI) Technology*. In: Alexe M., Gösele U. (eds) *Wafer Bonding*. Springer Series in MATERIALS SCIENCE, vol 75. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [3.17] Cocorullo, Giuseppe et al. “Thermo-optic effect exploitation in silicon microstructures.” (1998).
- [3.18] Sudbo, Aa. S.. “Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides.” (1993).
- [3.19] Peter Hawkes, Erwin Kasper, Chapter 11 - *The Finite-Difference Method (FDM)*, Editor(s): Peter Hawkes, Erwin Kasper, *Principles of Electron Optics (Second Edition)*, Elsevier, 2018, Pages 167-183, ISBN 9780081022566.
- [3.20] U. Plachetka et al., "Fabrication of Photonic Ring Resonator Device in Silicon Waveguide Technology Using Soft UV-Nanoimprint Lithography," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 7, pp. 490-492, April 1, 2008.
- [3.21] K. Padmaraju, K. Bergman, "Resolving the thermal challenges for silicon microring resonator devices [invited]," *Nanophotonics* 2 (4) (Sep 2013).
- [3.22] Stanley, A. I., Ghanshyam Singh, James Eke, Hiroyuki Tsuda, Afzalpulkar, Nitin, Srivastava, Vishnu Singh, Ghanshyam, Bhatnagar, Deepak, 2016, *Mach-Zehnder Interferometer: A Review of a Perfect All-Optical Switching Structure*, *Proceedings of the International Conference on Recent Cognizance in Wireless Communication & Image Processing*, Springer India, New Delhi.

# Κεφάλαιο 4

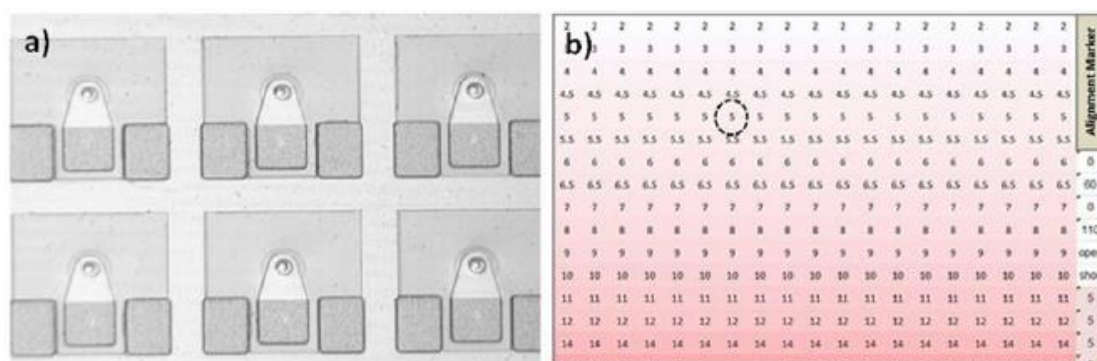
## Πειραματική Μελέτη Δομών VCSELs Μεγάλου Εύρους Ζώνης στα 1550 nm

### 4.1 Εισαγωγή

Προκειμένου να επιλεχθούν τα κατάλληλα VCSELs που θα χρησιμοποιούνταν στον γρήγορο πομποδέκτη, εξετάστηκαν τα χαρακτηριστικά διαφορετικών δομών αναλυτικά σε μια βηματικού τύπου προσέγγιση. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από τη δοκιμή μιας σειράς δομών που κατασκευάστηκαν στο Technical University of Munich (TUM).

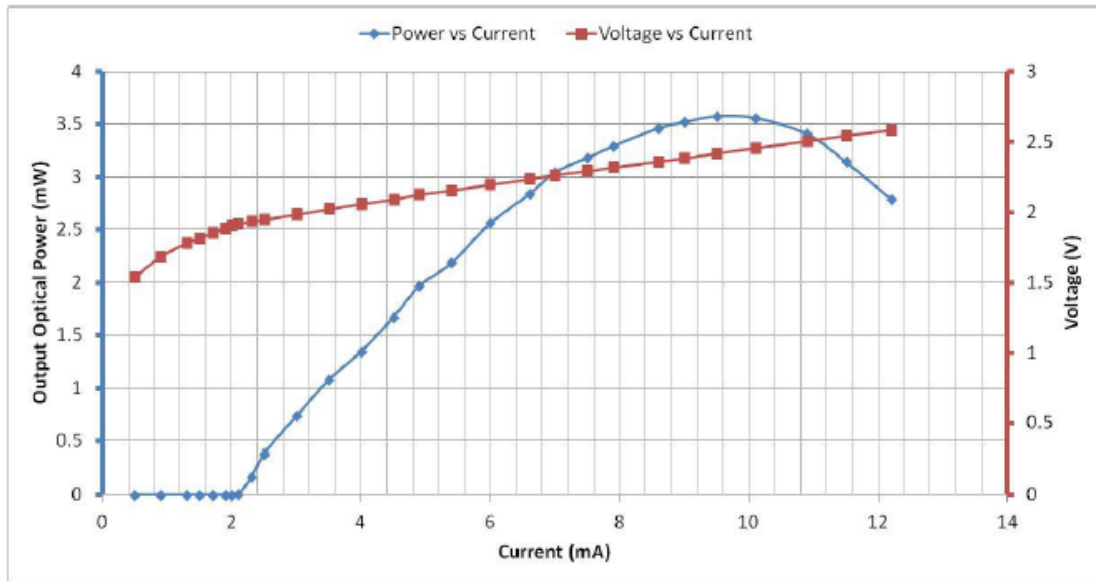
### 4.2 Στατικός χαρακτηρισμός πρώτης γενιάς VCSELs πάνω σε πλακίδιο

Το πρώτο πλακίδιο με VCSELs που κατασκευάστηκε στο TUM [4.1] μετρήθηκε στο ΕΦΕ με στατικό τρόπο χρησιμοποιώντας ένα σταθμό βάσης κάθετης ζεύξης (vertical-coupling probe station). Το πλακίδιο περιείχε διάφορες δομές με διακύμανση στο BTJ οι οποίες επιχειρήθηκε να χαρακτηριστούν. Αρκετές από αυτές δεν λειτουργούσαν και όσες μετρήθηκαν επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά οπότε παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το έβδομο VCSEL με τιμή BTJ 5  $\mu\text{m}$  το οποίο επισημαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



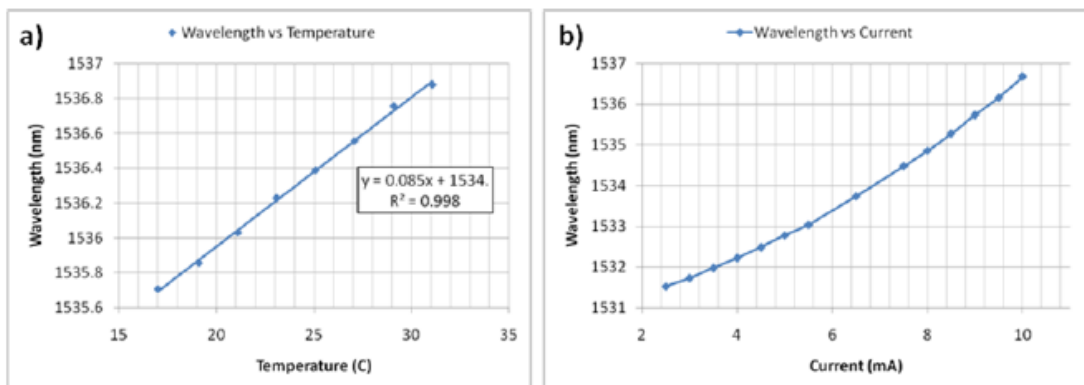
Εικόνα 71: (α) Εικόνα μικροσκοπίου από τα VCSELs του πρώτου πλακιδίου που κατασκευάστηκαν στο TUM και (β) η μάσκα του πλακιδίου M5262-1 με επισημασμένο το μετρημένο VCSEL

Το παρακάτω διάγραμμα αποτυπώνει την LIV χαρακτηριστική καμπύλη του μετρούμενου VCSEL [4.2] η οποία ελήφθη χρησιμοποιώντας dc ηλεκτρικούς ακροδέκτες (dc electrical probe tips) τα οποία ήταν συνδεδεμένα με μια πηγή ρεύματος προκειμένου να τροφοδοτείται η δομή, όπως επίσης και έναν ανιχνευτή μεγάλης περιοχής (large area detector) για τη μέτρηση της οπτικής ισχύος εξόδου. Η μπλε γραμμή αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου (αριστερά κατακόρυφος άξονας) ενώ η κόκκινη αντιστοιχεί στην τάση (δεξιά κατακόρυφος άξονας). Και οι δυο τιμές απεικονίζονται γραφικά ως συνάρτηση του εγγεόμενου ρεύματος.



Εικόνα 72: LIV χαρακτηριστική καμπύλη του μετρούμενου VCSEL, οπτική ισχύς εξόδου (μπλε γραμμή) και τάση (κόκκινη γραμμή) ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το ρεύμα κατωφλιού της δομής είναι της τάξης των 2 mA ενώ το ρεύμα roll-over είναι κοντά στα 9.6 mA. Η μέγιστη ισχύς, η οποία εκτιμήθηκε στο roll-over ρεύμα, μετρήθηκε λίγο πάνω από 3.5 mW.

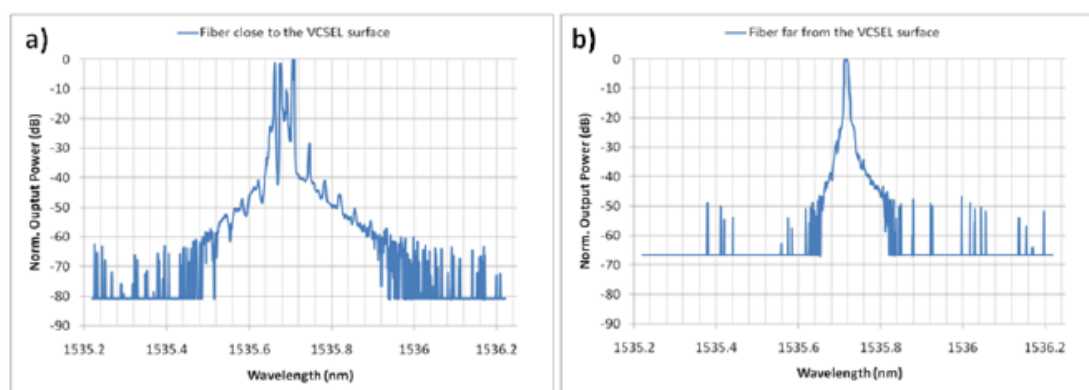


Εικόνα 73: Εξάρτηση του κεντρικού μήκους κύματος από (α) τη θερμοκρασία λειτουργίας και (β) το εγχεόμενο ρεύμα

Η φασματική συμπεριφορά του VCSEL επίσης μετρήθηκε. Για το λόγο αυτό ο ανιχνευτής μεγάλης περιοχής (large area detector) αντικαταστάθηκε από lensed οπτική ίνα με διάμετρο (spot diameter) 5  $\mu\text{m}$  και απόσταση λειτουργίας (working distance, βέλτιστη απόσταση μεταξύ της ίνας και της δομής που δοκιμάζεται προκειμένου να κυματοδηγηθεί η μέγιστη ισχύς στο εσωτερικό της) στα 26  $\mu\text{m}$  [4.3]. Στην Εικόνα 73α αποτυπώνεται η μετατόπιση του μήκους κύματος της δομής ως συνάρτηση της θερμοκρασίας λειτουργίας στο εύρος των 17 έως 30  $^{\circ}\text{C}$ . Η ρύθμιση της θερμοκρασίας κατέστη εφικτή με τη ρύθμιση του ελεγκτή θερμοκρασίας της βάσης κενού (vacuum chuck) πάνω στην οποία τοποθετήθηκε το πλακίδιο στο σταθμό βάσης. Η κλίση της συνάρτησης η οποία χρησιμοποιήθηκε ως γραμμική προσέγγιση (linear fit), αποκαλύπτει ότι το μήκος κύματος εκπομπής μετατοπίζεται κατά 85  $\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ . Η Εικόνα 73β δείχνει την εξάρτηση του κεντρικού μήκους κύματος



από το εγγεόμενο ρεύμα. Έτσι, βλέπουμε ότι το μήκος κύματος του VCSEL μετατοπίζεται κατά 5 nm όταν το εγγεόμενο ρεύμα μεταβάλλεται από το ρεύμα κατοφλίου στο roll-over ρεύμα.



Εικόνα 74: Κανονικοποιημένο φάσμα εκπομπής του VCSEL όταν η ίνα είναι τοποθετημένη (α) στην περιοχή λειτουργίας και (β) όταν είναι απομακρυσμένη από την επιφάνεια του VCSEL.

Η παραπάνω εικόνα αποτυπώνει το κανονικοποιημένο φάσμα εκπομπής του VCSEL με τιμή BTJ ίση με 5  $\mu\text{m}$  σε δυο περιπτώσεις: (α) όταν η lensed ίνα είναι τοποθετημένη στην απόσταση λειτουργίας και (β) όταν είναι κατακόρυφα εκτοπισμένη από την επιφάνεια του VCSEL. Είναι εμφανές ότι στην πρώτη περίπτωση η λειτουργία του VCSEL επηρεάζεται σημαντικά από το φως το οποίο ανακλάται από την άκρη της ίνας πίσω στην κοιλότητα, οδηγώντας σε πλευρικούς ρυθμούς (sidemodes) [4.4] και μεταπήδηση ρυθμού (mode hopping) [4.5], [4.6]. Αυτό το φαινόμενο ελαττώνεται (σε βάρος των απωλειών σύζευξης) όταν η ίνα τραβιέται πιο μακριά από την επιφάνεια της δομής.

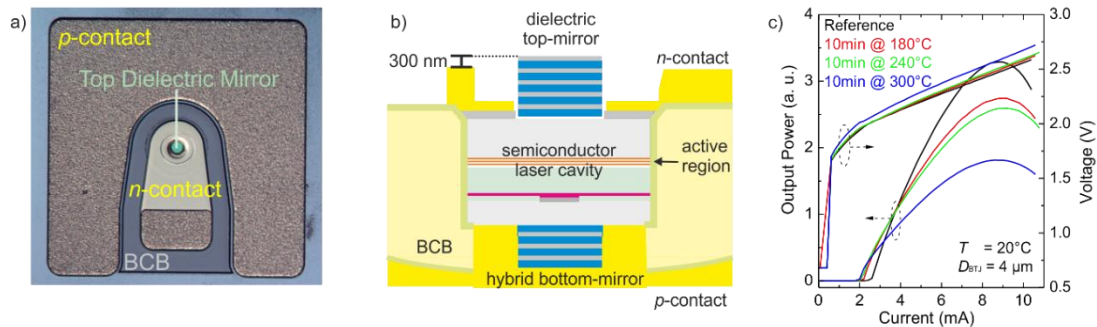
### 4.3 Συστάδες VCSELs πρώτης γενιάς

#### 4.3.1 Αρχιτεκτονική των συστάδων VCSELs πρώτης γενιάς

Το TUM ανέπτυξε δυο διαφορετικού τύπου συστάδες από μονολιθικά VCSELs της μορφής 2x2 και 1x4 τα οποία έχουν αρκετά πλεονεκτήματα ούτως ώστε να χρησιμοποιηθούν ως οπτικές πηγές, αναφορικά: χαμηλό κόστος, χαμηλή κατανάλωση ισχύος και υψηλό εύρος ζώνης διαμόρφωσης (high modulation bandwidth) μεγαλύτερο από 15 GHz [4.7]. Για να είναι δυνατή η ενσωμάτωση των VCSELs στην συγκεκριμένη SOI πλατφόρμα, οι συστοιχίες σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν για ανεστραμμένη συγκόλληση (flip-chip bonding) όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα [4.8]. Επιπλέον, υλοποιήθηκαν επιφάνειες επαφής με ηλεκτρόλυση (electroplated contact pads) των οποίων το ύψος ήταν 300 nm χαμηλότερο από αυτό του καθρέπτη. Αυτές οι επιφάνειες επαφής που λειτουργούν και ως μέσα ψύξης (heat sink), προστατεύουν τον διηλεκτρικό πάνω καθρέπτη και παρέχουν ανθεκτικότητα ούτως ώστε να υποδεχθούν τους ηλεκτρικούς ακροδέκτες (probe tips) που θα χρησιμοποιηθούν στον χαρακτηρισμό.

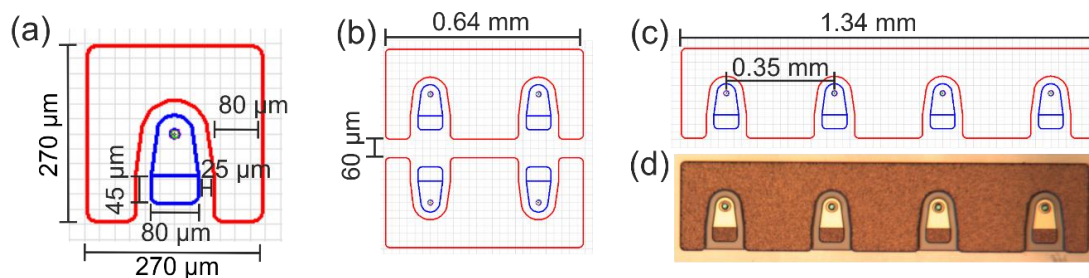
Για τη σύνδεση των συστοιχιών VCSELs με την πλατφόρμα SOI ερευνήθηκαν διάφορες δυνατότητες. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία που απαιτείται για αυτές τις διεργασίες (> 100 °C) μπορεί να θέσει σε κίνδυνο ανεπανόρθωτα την ηλεκτρική και

οπτική απόδοση των συσκευών. Στο Εικόνα 75 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά ισχύος-ρεύματος-τάσης ενός VCSEL πριν και μετά από 10 λεπτά ανόπτησης (annealing) στους 180 ° C, 240 ° C και 300 ° C σε ατμόσφαιρα αέρα. Αυτό το γράφημα δείχνει ότι η μέγιστη ισχύς εξόδου του VCSEL μειώνεται κατά σχεδόν 3 dB μετά την ανόπτηση 300 ° C και υποδεικνύει ότι η μέγιστη θερμοκρασία σύνδεσης δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 200 ° C.



Εικόνα 75: (α) Εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο ενός από τα μετρούμενα VCSELS, (β) σχηματικό της διατομής των VCSELS και (γ) L-I-V χαρακτηριστική ενός VCSEL μετά από ανόπτηση 10 λεπτών στους 180 ° C, 240 ° C και 300 ° C σε ατμόσφαιρα αέρα.

Το μέγεθος και η αρχιτεκτονική των ηλεκτρικών επαφών αποτυπώνεται την παρακάτω εικόνα για διατάξεις ενός μονού VCSEL αλλά και 2x2 και 1x4 συστοιχιών. Για λόγους σύγκρισης, μια εικόνα οπτικού μικροσκοπίου της συστοιχίας VCSEL 1x4 στοιχείων παρουσιάζεται επίσης στο ίδιο σχήμα. Η παραπάνω γεωμετρία έχει επιλεγεί ως ο καλύτερος συμβιβασμός μεταξύ υψηλής απόδοσης και συμπαγούς μεγέθους ούτως ώστε να μπορεί το VCSEL να ενσωματωθεί στην SOI πλατφόρμα. Οι μεγάλες p- επιφάνειες επαφής (p- contact pads) χρησιμεύουν ως ενσωματωμένη ψύξη- διαφυγή θερμότητας από την πλατφόρμα και επίσης αυξάνουν την ανοχή στα σφάλματα κοπής και συγκόλλησης. Ωστόσο, η παρασιτική χωρητικότητα (parasitic capacitance) μεταξύ των δυο επιφανειών επαφής αυξάνει με την αύξηση του χώρου της n- επιφάνειας [4.9]. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η εξεύρεση ενός συμβιβασμού μεταξύ της παρασιτικής χωρητικότητας και του μεγέθους (άρα και της δυνατότητας on-chip συνδέσεων). Η ηλεκτρικά επιμεταλλωμένη (electroplated) περιοχή των επιφανειών η-επαφής επιλέχθηκε να είναι 80 μm x 45 μm ενώ η ηλεκτρικά επιμεταλλωμένη περιοχή επαφής -p γεμίζει τα κενά μεταξύ γειτονικών VCSELS.



Εικόνα 76: Σχηματική απεικόνιση με διαστάσεις για (α) ένα μονό VCSEL, (β) μια 2x2 συστοιχία και (c) μια 1x4 συστοιχία. (δ) Εικόνα μιας 1x4 συστοιχίας από οπτικό μικροσκόπιο.

### 4.3.2 Μέθοδος κοπής των συστάδων VCSELs πρώτης γενιάς

Η μέθοδος κοπής με laser (laser dicing) ήταν αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των VCSELs για μια σειρά από λόγους. Προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη διαδικασία κοπής με laser παρόλα αυτά δοκιμάστηκαν δυο διαφορετικές μέθοδοι με τη χρήση τόσο ενός picosecond (σε μήκος κύματος λειτουργίας 355 nm και πλάτος παλμού 12 ps) [4.10] όσο και ενός femtosecond (σε μήκος κύματος λειτουργίας 1030 nm και πλάτος παλμού 273 fs) laser [4.11]. Και οι δυο προσεγγίσεις έχουν θετικά και αρνητικά στοιχεία όπως φάνηκε και από τις δοκιμές. Το femtosecond laser επηρεάζεται λιγότερο από τη θερμότητα και διαθέτει μικρότερη διάμετρο δέσμης (beam spot-size) κάτι το οποίο βοηθάει στη ακρίβεια της διαδικασίας κοπής. Παρόλα αυτά, για την αδιάλειπτη λειτουργία του κατά τη διάρκεια της αποκοπής, είναι αναγκαία η χρήση ενός ακροφυσίου κοπής (για να επιτρέπει την ισχυρή ροή του αέρα) για να αποτρέπει μια πιθανή μόλυνση του αντικειμενικού φακού από ρινίσματα που προκύπτουν από την κοπή. Επειδή η χρήση του ακροφυσίου αυτού δεν ήταν εφικτή, προκρίθηκε η λύση του picosecond laser η οποία και ερευνήθηκε σε βάθος ούτως ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαδικασία.

Τρεις διαφορετικές μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την εξεύρεση της ιδανικότερης λύσης και παρουσιάζονται παρακάτω:

- Στην πρώτη προσέγγιση, τα VCSELs τοποθετήθηκαν πάνω σε ένα γυάλινο υπόστρωμα χρησιμοποιώντας ένα λεπτό φιλμ κεριού χαμηλής θερμοκρασίας (70 °C σημείο τήξης). Το γυάλινο υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε ούτως ώστε να είναι πιο εύκολη η επιθεώρηση των δομών. Για να προστατευθεί η ενεργός περιοχή των VCSELs χρησιμοποιήθηκε ένα λεπτό στρώμα PVA (polyvinyl alcohol) στην κορυφή του δισκίου (wafer) κάνοντας χρήση της τεχνικής επίστρωσης περιστροφής (spin coating) [4.12]. Μετά από την αποκοπή των συστοιχιών VCSEL (1x4 και 2x2) η επίστρωση PVA πλύθηκε σε νερό και έπειτα το δισκίο απελευθερώθηκε από τον φορέα αφού αποσυντέθηκε το κερύ σε ένα διάλυμα εστέρα. Τέλος, τα αποκομμένα δείγματα πλύθηκαν σε ακετόνη, IPA (ισοπροπυλική αλκοόλη) και αποσταγμένο νερό για 3 λεπτά.
- Με την παραπάνω προσέγγιση υπήρχε ο κίνδυνος μόλυνσης/ καταστροφής της ενεργού περιοχής και της επικάλυψης του καθρέπτη του VCSEL. Γι' αυτό το λόγο στην δεύτερη μέθοδο δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου επικάλυψη PVA στην κορυφή του πλακιδίου και έτσι οι συστοιχίες VCSEL μετά την αποκοπή απελευθερώθηκαν από τον φορέα και καθαρίστηκαν σε ακετόνη και IPA. Για να αξιολογηθεί η επίδραση που έχει η μέθοδος αυτή στα χαρακτηριστικά των VCSELs ελέγχθηκε η χαρακτηριστική I-V καμπύλη πριν και μετά τη διαδικασία της αποκοπής.

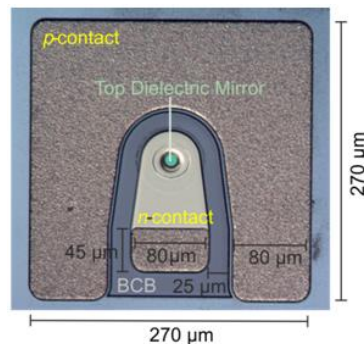
Ο έλεγχος αυτός έγινε σε VCSEL τα οποία ήταν δοκιμαστικά χωρίς οπτικές λειτουργίες (dummy) και δεν φάνηκε να υπάρχει καμία επίδραση στην ηλεκτρική τους συμπεριφορά όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Παρόλα αυτά όταν η διαδικασία της αποκοπής εφαρμόστηκε σε VCSELs τα οποία προορίζονταν για πλήρη οπτική και ηλεκτρική λειτουργία παρατηρήθηκαν διάφορα προβλήματα.

Κυριότερο ήταν το γεγονός ότι οι καθρέπτες και η ενεργός περιοχή του VCSEL δεν ήταν αρκετά ανθεκτικές στα βήματα επεξεργασίας μετά την αποκοπή (απομάκρυνση κεριού, καθαρισμός με ακετόνη και IPA. Μετά την απομάκρυνση του κεριού και τα βήματα καθαρισμού, η επικάλυψη του καθρέπτη του VCSEL απομακρύνθηκε. Επιπρόσθετα, ήταν αρκετά δύσκολο να απομακρυνθούν εντελώς τα σημάδια από τους διαλύτες από τις μη επίπεδες επιφάνειες του VCSEL και ειδικά από τους καθρέπτες οι οποίοι είναι τοποθετημένη βαθύτερα από ότι οι επιφάνειες συγκόλλησης και επαφής (contact and bonding pads).

- Στην τρίτη προσέγγιση το πλακίδιο με τα VCSELS κολλήθηκε στον γυάλινο φορέα χωρίς χρήση κάποιου κεριού ούτως ώστε να αποφευχθεί η χρήση επεξεργασίας καθαρισμού με διαλύτες στη συνέχεια. Τα αποτελέσματα σε αυτή την περίπτωση ήταν αρκετά ενθαρρυντικά με μόνο αρνητικό κάποια υπολείμματα από τη διαδικασία της αποκοπής στις άκρες των VCSEL τα οποία όμως δεν φαίνεται να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην λειτουργία τους και στη διαδικασία της συγκόλλησης τους.

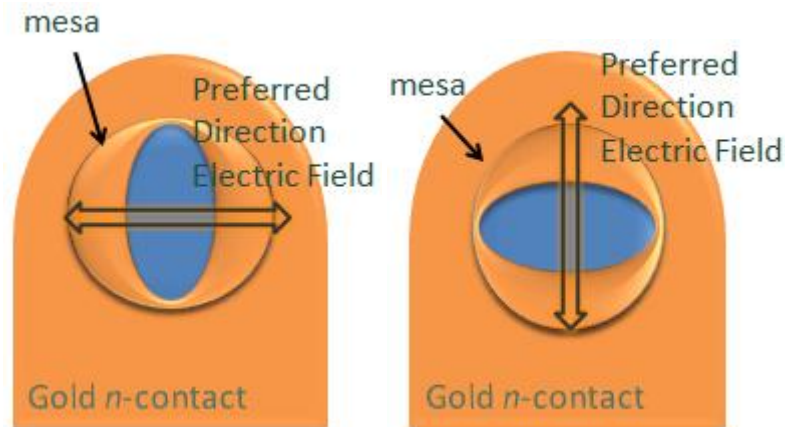
### 4.3.3 Χαρακτηρισμός των VCSELS πριν τη διαδικασία αποκοπής

Τα παρακάτω αποτελέσματα έχουν προκύψει από τις μετρήσεις χαρακτηρισμού συστοιχιών VCSELS (οπτικοί πομποί κάθετης κοιλότητας) τα οποία κατασκευάστηκαν στο TUM στα πλαίσια συνεργασίας με το ΕΦΕ. Οι επιδόσεις του VCSEL για κάθε πολωτικό άξονα αναφοράς μετρήθηκαν σε σχέση με την ισχύ εξόδου τους ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος.



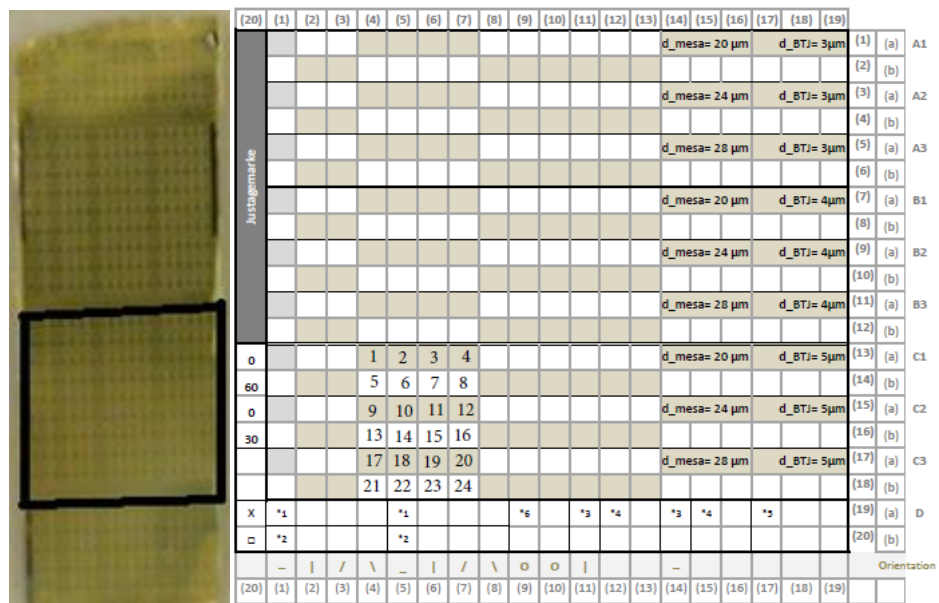
Εικόνα 77: Η στοιχειώδης δομή VCSEL που μετρήθηκε

Στην Εικόνα 77 αποτυπώνεται η στοιχειώδης δομή VCSEL που μετρήθηκε στο εργαστήριο. Το συνολικό μέγεθος του πλακιδίου ολοκλήρωσης (chip) είναι  $270 \times 270 \mu\text{m}^2$  ενώ το μέγεθος των p- και n- επιφανειών επαφής είναι  $80 \times 45 \mu\text{m}^2$ . Για να μπορέσουμε να εξασφαλίσουμε τον σωστό πολωτικό άξονα σε κάθε μέτρηση, χρησιμοποιήθηκε ένας πολωτής ελεύθερου χώρου από την κατασκευάστρια εταιρεία Newport. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι δυο πολωτικοί άξονες αναφοράς στις συστοιχίες των VCSEL που μετρήθηκαν.



Εικόνα 78: Οι δυο πολωτικοί άξονες αναφοράς πάνω στις δομές των VCSEL: (α) Οριζόντιος πολωτικός άξονας, (β) κάθετος πολωτικός άξονας

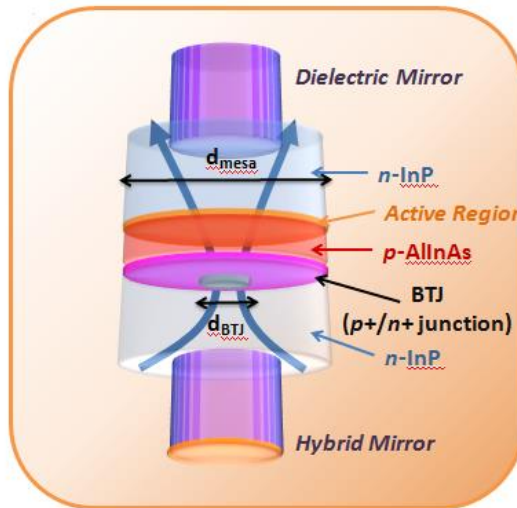
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται το wafer (δισκίο πυριτίου) που φέρει τα δείγματα VCSELs υπό δοκιμή. Με μαύρο πλαίσιο επισημαίνεται η περιοχή εκείνη που δοκιμάστηκε στο εργαστήριο. Επιπλέον, γίνεται μια ομαδοποίηση των διαφορετικών VCSELs με βάση τις τιμές του mesa και του BTJ ενώ υποδεικνύονται και οι δομές που έχουν δοκιμαστεί. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 79: (α) Πλακίδιο πυριτίου που δοκιμάστηκε, (β) ο χάρτης με τα μετρούμενα VCSEL

μετρήθηκαν όλα τα VCSEL του τύπου C (C1, C2, C3), τα οποία έχουν μήκος BTJ 5  $\mu\text{m}$  και τιμές mesa 20, 24 και 28  $\mu\text{m}$ .

Παρακάτω βλέπουμε την ακριβή αρχιτεκτονική του VCSEL με τις προαναφερόμενες διαστάσεις αποτυπωμένες.

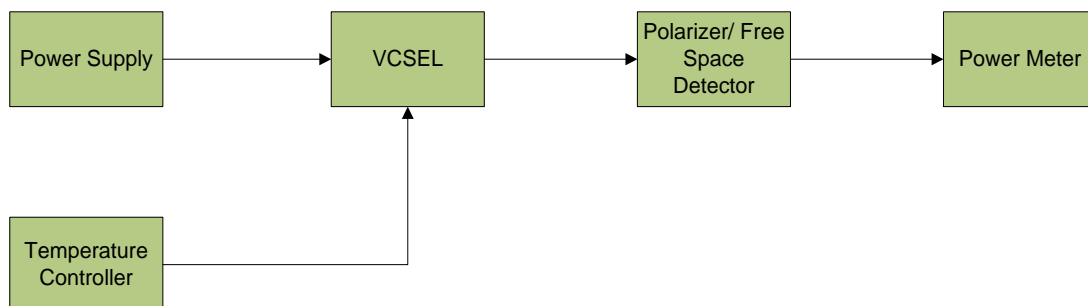


Εικόνα 80: Η αρχιτεκτονική των VCSEL που μετρήθηκαν

### 4.3.3.1 Μετρήσεις L-I-V καμπυλών

Οι L-I-V (light-current-voltage) καμπύλες αποτελούν μια θεμελιώδη μέτρηση που καθορίζει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός [4.13]. Οι καμπύλες αυτές χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το σημείο λειτουργίας (operating point) των οπτικών πηγών, με άλλα λόγια περιγράφουν το ρεύμα οδήγησης (drive current) για αντίστοιχες τιμές ισχύος εξόδου και το ρεύμα κατοφλιού πάνω από το οποίο το Laser ξεκινάει να λειτουργεί. Επίσης ελέγχουν αν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του ρεύματος οδήγησης και της οπτικής ισχύος εξόδου. Για τον λόγο αυτό είναι μια πολύ «περιεκτική» μέτρηση που μας δίνει ποσοτικούς και ποιοτικούς δείκτες για την λειτουργία ενός Laser.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των L-I-V καμπυλών των δειγμάτων VCSEL που διαθέτουν 3 κβαντικά πηγάδια (quantum wells). Η απόδοσή τους εξετάστηκε σε σχέση με την ισχύ εξόδου τους ως συνάρτηση του ρεύματος που εγχύθηκε για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς.



Εικόνα 81: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των LIV καμπυλών για τους δυο διαφορετικούς πολωτικούς άξονες.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ένα τροφοδοτικό τάσης με κατάλληλους ηλεκτρικούς ακροδέκτες (probe tips) χρησιμοποιήθηκε για να εγχύσει ρεύμα στις p- και n- επιφάνειες επαφής (contact pads) του VCSEL ούτως ώστε να τροφοδοτηθεί κατάλληλα την ενεργό περιοχή του. Η θερμοκρασία λειτουργίας του πλακιδίου

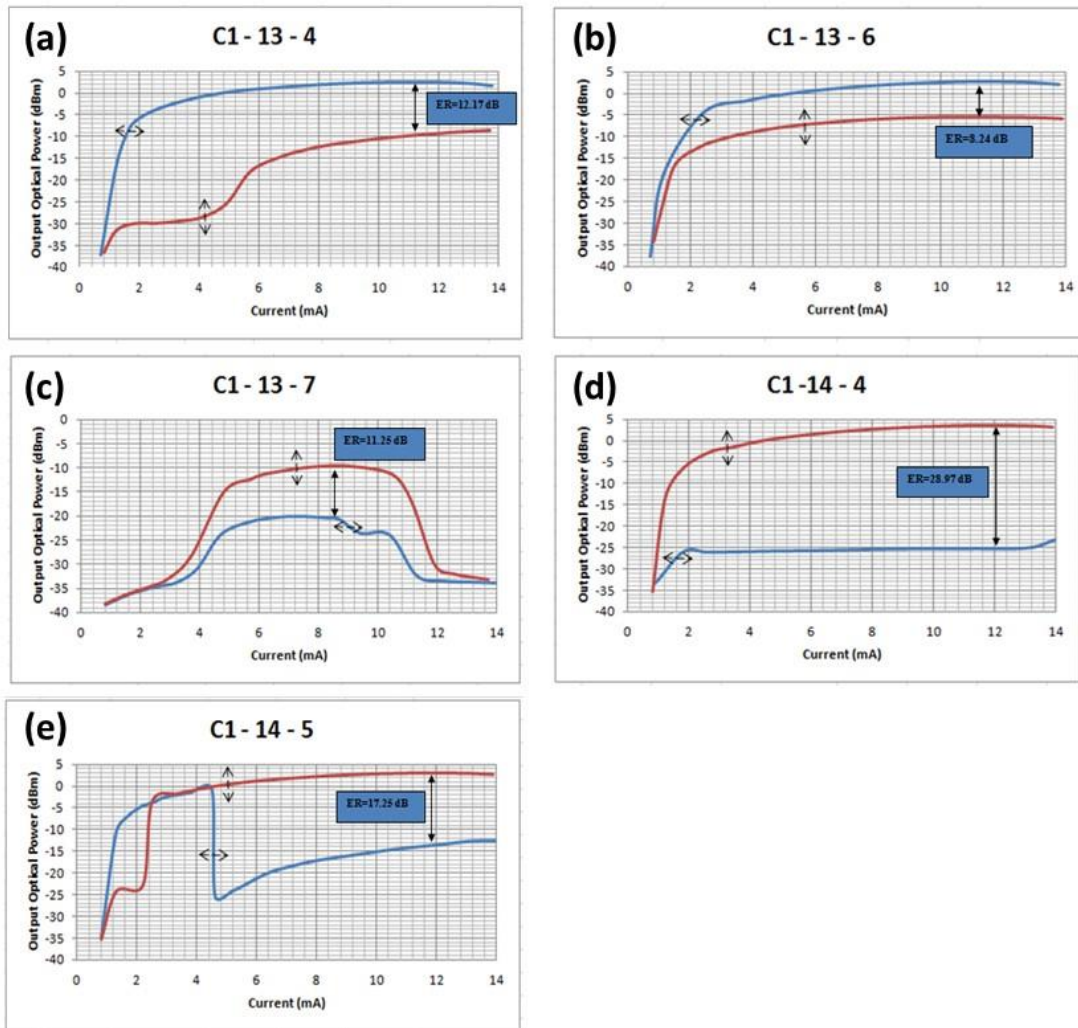
ολοκλήρωσης ελέγχθηκε με τη βοήθεια ενός ειδικού ελεγκτή θερμοκρασίας (TEC) και ενός θερμίστορ το οποίο τοποθετήθηκε κάτω από το στήριγμα του chip. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία 230° C. Η οπτική ισχύς εξόδου του VCSEL ανιχνεύθηκε μέσω ενός αισθητήρα ισχύος ελεύθερου χώρου (free space sensor), ο οποίος συνδυάστηκε με έναν πολωτή, προκειμένου να ληφθούν οι μετρήσεις LIV για τους δύο άξονες πόλωσης (οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση). Τέλος, η οπτική ισχύς εξόδου μετρήθηκε με μετρητή ισχύος (power meter). Ο συνδυασμός του πολωτή και του αισθητήρα ελεύθερου χώρου προσέγγισε όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο άνοιγμα εξόδου του VCSEL προκειμένου να συλλεχθεί η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου (περίπου 2 cm).

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι μετρήσεις της ισχύος εξόδου των VCSELs ως συνάρτηση του ρεύματος έγχυσης για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς. Για διευκόλυνση τα αποτελέσματα έχουν ομαδοποιηθεί με βάση τις τιμές του BTJ και του mesa για κάθε VCSEL. Για την μέτρηση του πολωτικού άξονα εκπομπής του VCSEL χρησιμοποιήθηκε ένας πολωτής πριν από τον αισθητήρα ισχύος ελεύθερου χώρου. Ο λόγος σβέσης (extinction ratio) της πόλωσης κάθε VCSEL έχει μετρηθεί για την τιμή του ρεύματος ανατροπής (rollover current). Για την καλύτερη παρουσίαση των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν ως εικόνες μόνο οι μετρήσεις των πρώτων δομών, ενώ στις υπόλοιπες ομαδοποιήσεις έχει κρατηθεί μόνο ο σχολιασμός των χαρακτηριστικών τους.

### **4.3.3.2 Πειραματικά αποτελέσματα**

#### **Mesa: 20 um- BTJ: 5 um**

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του ρεύματος έγχυσης για τα VCSEL τύπου C1 που διαθέτουν mesa 20 μm και BTJ 5 μm. Ο τίτλος του διαγράμματος περιγράφει τη θέση του κάθε VCSEL στον χάρτη μέτρησης. Για παράδειγμα, το C1-13-4 σημαίνει ότι το VCSEL είναι τύπου C1 και βρίσκεται στη 13<sup>η</sup> σειρά- 4<sup>η</sup> στήλη στον χάρτη μέτρησης. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, διεξήχθησαν μετρήσεις και για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς (οριζόντια και κάθετη πόλωση). Παρόμοια λειτουργία παρατηρήθηκε σε όλα τα πλακίδια ολοκλήρωσης με ρεύμα κατωφλίου μικρότερο από 0.9 mA. Η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου μετρήθηκε ίση με 2.32 mW (3.66 dBm) για το VCSEL C1-14-4 στο ρεύμα ανατροπής 12 mA.



Εικόνα 82: (a-e) Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγγεόμενου ρεύματος για τα VCSELs του τύπου C1, για τους δυο διαφορετικούς πολωτικούς άξονες αναφοράς

Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος σβέσης των συγκεκριμένων VCSELs έχει μια διακύμανση από 12.17 έως 28.97 dB. Το VCSEL C1-13-7 κακή απόδοση όσον αφορά στην οπτική ισχύ εξόδου (μικρότερη από 10 dBm) και στους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς. Επιπλέον, στο VCSEL C1-14-5 παρατηρήθηκε μια σημαντική αλλαγή στον πολωτικό άξονα (από τον οριζόντιο στον κάθετο πολωτικό άξονα) στα 4.5 mA. Επίσης, τα VCSELs C1-13-5, C1-14-6 και C1-14-7 δοκιμάστηκαν και δε λειτουργούσαν

Mesa: 24 um- BTJ: 5 um

Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε για όλες τις δομές με ρεύμα κατωφλιού μικρότερο από 0.9 mA. Η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου μετρήθηκε ίση με 2.36 mW (3.72 dBm) για το VCSEL C2-15-5 στο rollover ρεύμα των 12.6 mA. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι ο λόγος σβέσης της πόλωσης (polarization extinction ratio) των παραπάνω VCSELs που μετρήθηκαν κυμαίνεται μεταξύ 10.19 dB και 28.34 dB. Επιπλέον το VCSEL C2-16-7 παρουσίασε ίδια συμπεριφορά και στους δυο άξονες πόλωσης.

Mesa: 28 um- BTJ: 5 um



Όπως και παραπάνω, η συγκεκριμένη ομαδοποίηση δομών έχει παρόμοια συμπεριφορά με ρεύμα κατωφλίου που δεν ξεπερνάει τα 0.8 mA. Η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου μετρήθηκε 2.15 mW (3.32 dBm) για το VCSEL C3-18-7 στο rollover ρεύμα των 13 mA. Παρατηρήθηκε ότι ο λόγος σβέσης της πόλωσης γι' αυτή την ομάδα των VCSELs έχει μια διακύμανση από 3.46 έως 18.05 dB. Το VCSEL C3-17-7 είχε κακή απόδοση όσον αφορά στην οπτική ισχύ εξόδου του (μικρότερη από 10 dBm) και στους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι τιμές του λόγου σβέσης της πόλωσης, του rollover ρεύματος και της οπτικής ισχύος εξόδου των μετρούμενων VCSELs.

VCSEL	Rollover Current (mA)	Output Optical Power (dBm)	Polarization extinction ratio (dB)
C1-13-4	11.3	2.57	12.17
C1-13-6	11.2	2.74	8.24
C1-13-7	8.5	-9.5	11.25
C1-14-4	12	3.66	28.97
C1-14-5	11.8	3.08	17.25
C2-15-4	11.3	3.05	12.24
C2-15-5	12.6	3.72	28.34
C2-15-6	12.2	2.66	10.66
C2-15-7	12.1	2.65	11.83
C2-16-4	12.1	3.28	26.93
C2-16-5	12.4	2.78	12.42
C2-16-6	12.6	2.54	10.19
C3-17-4	11.9	2.83	11.84
C3-17-5	11.7	3.11	16.01
C3-17-6	12.9	3	12.03
C3-18-4	12.5	3.05	18.05
C3-18-5	12.7	2.29	10.21
C3-18-6	12.1	1.04	3.46
C3-18-7	13	3.32	11.12

Πίνακας 15: Σύνοψη των τιμών του λόγου σβέσης της πόλωσης, του rollover ρεύματος και της οπτικής ισχύος εξόδου των μετρούμενων VCSELs.

### 4.3.3.3 Μετρήσεις συστάδων μετά από νέα κοπή

Ως συνέχεια του παραπάνω χαρακτηρισμού, το δισκίο (wafer) με τα μετρούμενα VCSELs, αφού στάλθηκε για επεξεργασία και αποκοπή, επέστρεψε στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών προκειμένου να μετρηθούν και νέες δομές. Οι νέες αυτές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε σύγκριση με τις προηγούμενες ούτως ώστε να αξιολογηθεί αν η διαδικασία της αποκοπής επηρέασε την επίδοσή τους. Στη

διαδικασία αυτή μετρήθηκαν VCSELs με διαφορετικά mesas και BTJs. Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των μετρούμενων VCSELs και συγκεκριμένα το rollover ρεύμα, η οπτική ισχύς εξόδου και ο λόγος σβέσης της πόλωσης.

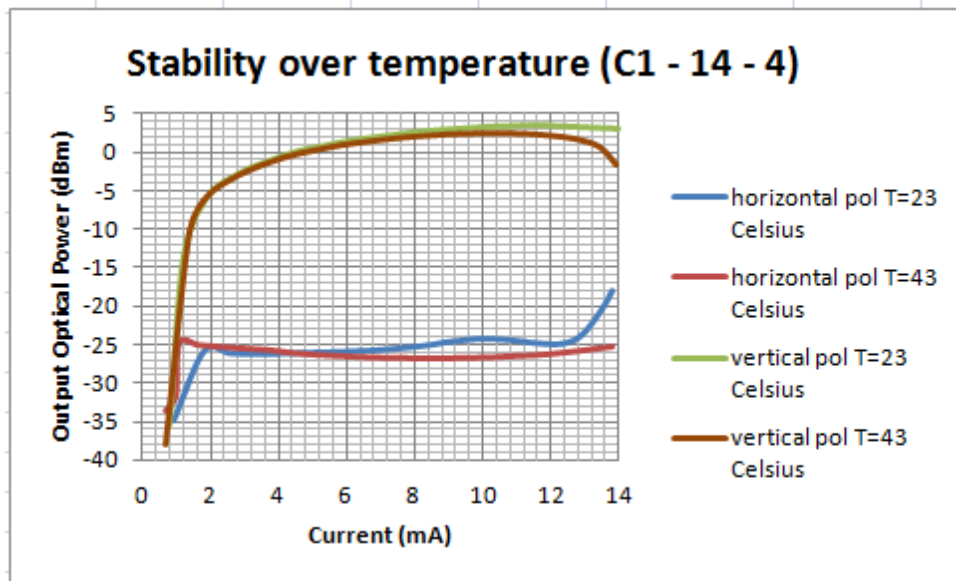
<b>VCSEL</b>	<b>Rollover Current (mA)</b>	<b>Output Optical Power (dBm)</b>	<b>Polarization extinction ratio (dB)</b>
A2-3-3	7.4	3.33	13.5
A2-4-3	7.3	3.5	21.07
A2-8-3	6.9	3.2	22.3
A3-1-5	7.3	3.33	8.82
A3-4-5	7.1	3.62	23.28
A3-8-5	6.7	3.31	28.45
B1-2-7	8.2	2.12	6.65
B1-4-7	9.5	2.66	3.47
B1-8-7	9.8	3.47	3.63
B2-1-9	10	4.74	4.79
B2-2-9	9.6	4.11	8.84
B2-4-9	10.2	3.8	6.58
B2-8-9	9.8	2.99	3.16
B3-1-11	9.6	4.64	12.31
B3-2-11	9	3.23	26.23
B3-4-11	8.6	3.23	3.72
B3-8-11	9.8	3.97	6.4
C1-8-13	11.3	3.6	6.4
C2-8-15	7.6	4.5	22.48
C3-8-17	12.6	5.18	18.95

Πίνακας 16: Σύνοψη των τιμών του λόγου σβέσης της πόλωσης, του rollover ρεύματος και της οπτικής ισχύος εξόδου των μετρούμενων VCSELs.

#### **4.3.3.4 Μέτρηση της σταθερότητας της πόλωσης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας**

Ένα κομβικό ζήτημα που συναντάται μέσα σε ένα data center είναι αυτό της διαχείρισης της θερμοκρασίας. Για μια σειρά από ζητήματα που αφορούν τόσο στη θερμότητα που εκλύεται, και άρα στην ενέργεια που καταναλώνεται, καθώς και στη σταθερότητα της λειτουργίας των δομών που συναποτελούν ένα data center, η διαχείριση αυτού του ζητήματος είναι πολύ ψηλά στις προτεραιότητες [4.14], [4.15], [4.16]. Σε αυτή την κατεύθυνση χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές που επιδιώκουν αφενός τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε όσο το δυνατόν πιο σταθερές τιμές και σε όσο πιο χαμηλά επίπεδα γίνεται. Παρόλα αυτά, πολλές δομές κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να έχουν ανοχή στις μεταβολές της θερμοκρασίας και να μπορούν να λειτουργούν σε αρκετά υψηλά επίπεδα.

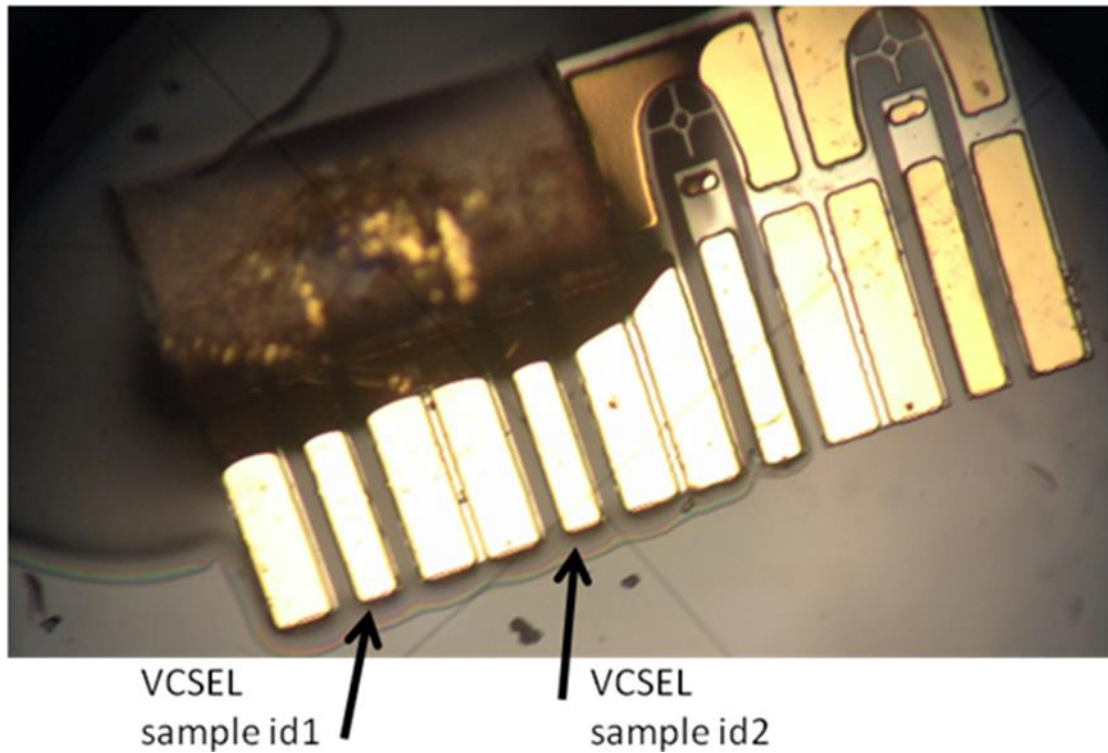
Προκειμένου να ελεγχθεί η δυνατότητα των μετρούμενων VCSELs να λειτουργούν στις συνθήκες ενός data center πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον μέτρηση που αφορά στον έλεγχο της πολωτικής κατάστασης των δομών ως συνάρτηση της αλλαγής θερμοκρασίας. Στην εικόνα που ακολουθεί αποτυπώνεται η οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος στο VCSEL C1-14-4 του δυο πολωτικούς άξονες στους 23 °C και 43 °C. Το συγκεκριμένο VCSEL επιλέχθηκε λόγω του υψηλού λόγου σβέσης της πόλωσης του. Παρατηρήθηκε ότι η δομή αυτή επιδεικνύει παρόμοια συμπεριφορά στον πολωτικό του άξονα και στις δυο περιπτώσεις. Ο λόγος σβέσης της πόλωσης στην περίπτωση των 43 °C είναι 28.9 dB που είναι σχεδόν ίσος με τον αντίστοιχο στην περίπτωση των 23 °C. Παρόλα αυτά είναι σαφές ότι σε τέτοιες διαφορές θερμοκρασίας τα χαρακτηριστικά του VCSEL δεν μένουν τελείως αναλλοίωτα. Η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου του VCSEL στις δυο αυτές θερμοκρασίες μετρήθηκε 3.66 dBm στους 23 °C και 2.52 dBm στους 43 °C. Η διαφορά αυτή είναι αναμενόμενη και μέσα στα αποδεκτά όρια λειτουργίας.



Εικόνα 83: Σταθερότητα της πόλωσης του VCSEL C1-14-4 ως συνάρτηση της θερμοκρασίας

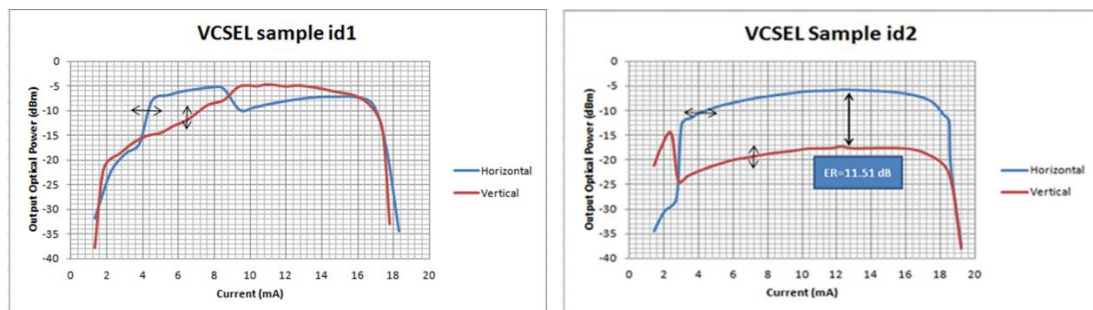
#### 4.4 VCSELs πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα

Το TUM σε συνεργασία με το IMEC, κατασκεύασαν και απέστειλαν στο ΕΦΕ τρία δείγματα (S1, S2, S3) τα οποία αποτελούνταν από συστοιχίες VCSEL πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα σε συνδυασμό μεταλλικές επιστρώσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την τροφοδότηση των δομών με ρεύμα. Μετά από διαλογή επιλέχθηκε να αξιολογηθεί η απόδοση των δειγμάτων S3 σε σχέση με την ισχύ εξόδου του ως συνάρτηση του ρεύματος που εγχύθηκε, και για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση του δείγματος S2 μετρήθηκαν οι s-παράμετροι των ηλεκτρικών γραμμών για να ερευνηθεί αν όντως είναι κατάλληλα κατασκευασμένες για εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές ταχύτητες.



Εικόνα 84: Τα VCSELs σε γυάλινο υπόστρωμα τα οποία μετρήθηκαν

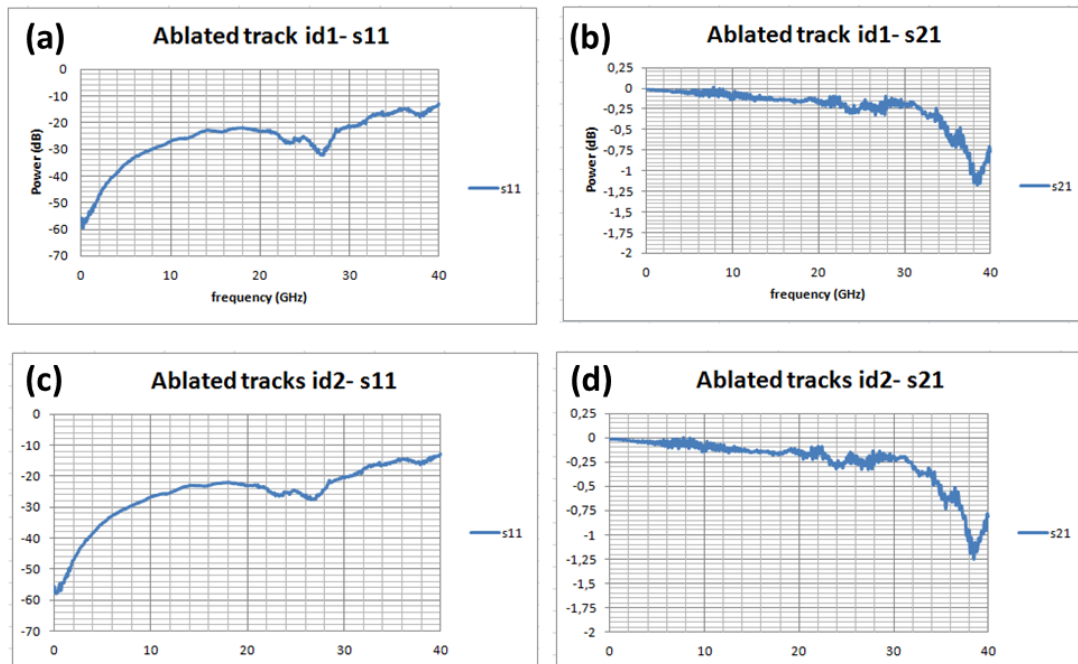
Από τις διατάξεις VCSEL προς μέτρηση στο δείγμα S3, μόνο οι δυο πρώτες δομές λειτουργούσαν (id1 και id2). Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνονται οι προαναφερθείσες μετρήσεις. Παρόμοια lasing συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στα δυο δείγματα με ρεύμα κατωφλιού μικρότερο από 0.9 mA.



Εικόνα 85: Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος για τα VCSELs id1 και id2 για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς

Παρατηρήθηκε ότι και οι δυο δοκιμαζόμενες δομές επέδειξαν χαμηλή απόδοση στο κομμάτι της οπτικής ισχύος εξόδου και στις δυο συνθήκες της πόλωσης. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη οπτική ισχύς των δομών id1 και id2 μετρήθηκε στο rollover ρεύμα και βρέθηκε -4.76 dBm και -5.83 dBm αντίστοιχα. Στην περίπτωση του id2 ο λόγος σβέσης της πόλωσης βρέθηκε 11.51 dB. Επιπρόσθετα, κατά τη μέτρηση του VCSEL id1 παρατηρήθηκε αλλαγή του πολωτικού άξονα κατά την αύξηση του εγχεόμενου ρεύματος. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρήθηκαν πιθανώς λόγω του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για την κόλληση των δομών στο γυαλί (epoxy), το οποίο και διαχύθηκε κατά τη διαδικασία πάνω στα VCSELs.

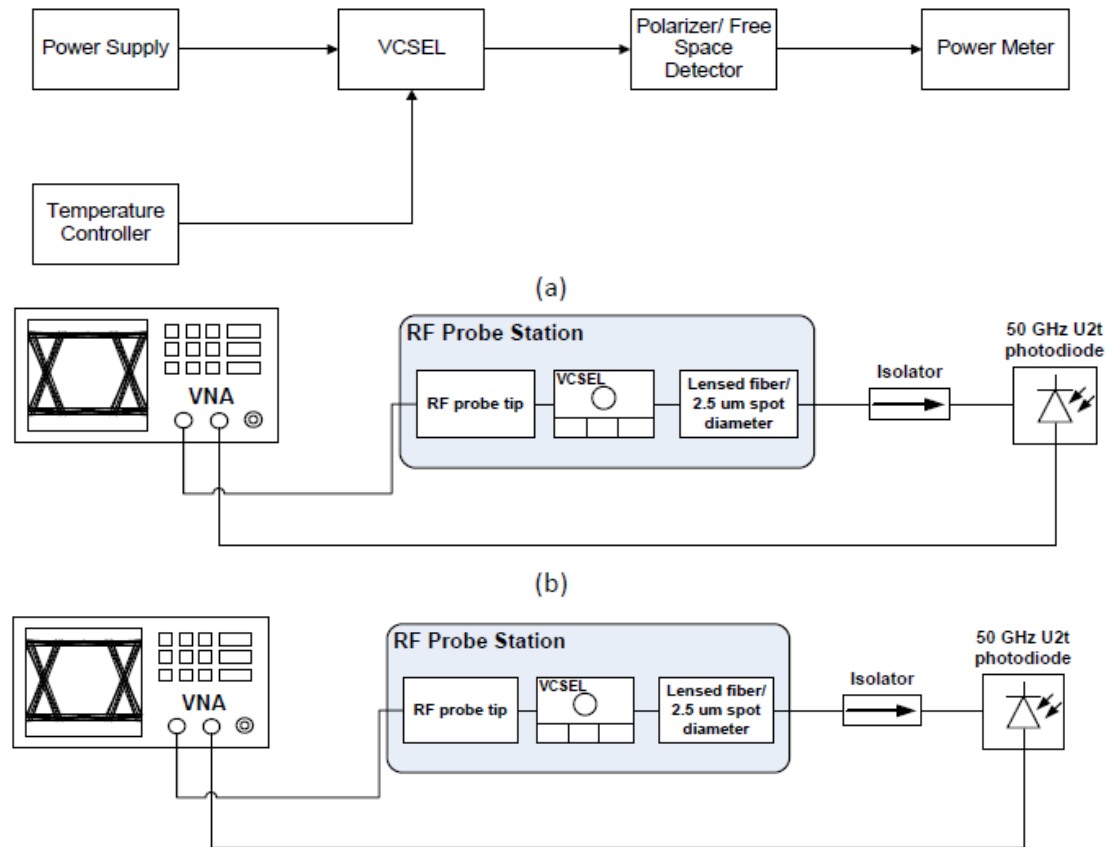
Οι μετρήσεις των  $s$ -παραμέτρων ( $S_{11}$  και  $S_{21}$ ) για τις RF γραμμές των δομών φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Και στις δυο περιπτώσεις δειγμάτων, η μέτρηση της διάδοσης δηλαδή της παραμέτρου  $S_{21}$  αντιστοιχεί σε μια επίπεδη γραμμή για συχνότητες μέχρι τα 40 GHz.



Εικόνα 86: Μετρήσεις ανάκλασης ( $S_{11}$ ) και διάδοσης ( $S_{21}$ ) για τις RF γραμμές των δειγμάτων id1 και id2.

#### 4.5 Μετρήσεις στα VCSEL οκτώ κβαντικών πηγαδιών

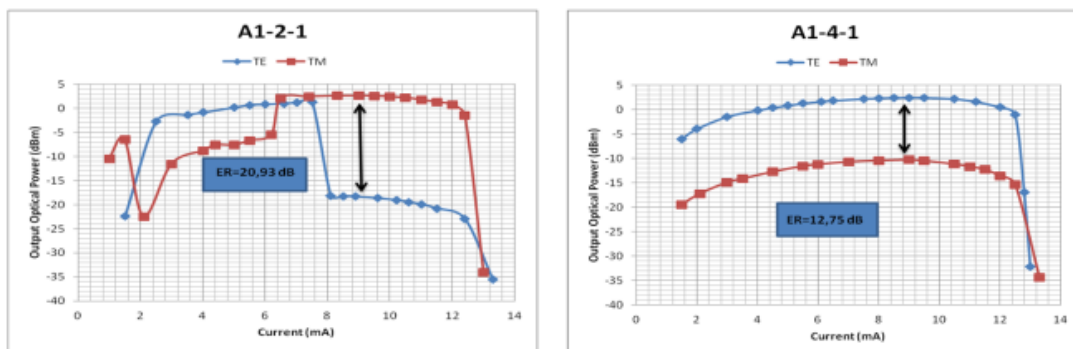
Ένα πλακίδιο που έφερε πάνω του VCSEL με οκτώ κβαντικά πηγάδια στάλθηκε από το TUM στο ΕΦΕ για εκ νέου χαρακτηρισμό. Ο χάρτης των δομών ακολουθεί την ίδια ονοματοδοσία που ακολουθήθηκε και παραπάνω. Όπως και με τα VCSELs των τριών κβαντικών πηγαδιών, μετρήθηκαν οι LIV καμπύλες και για τις δυο πολώσεις με τη διάταξη που φαίνεται παρακάτω. Στα πλαίσια της συνολικής διερεύνησης των χαρακτηριστικών των VCSELs με οκτώ κβαντικά πηγάδια, έγιναν και μετρήσεις των  $s$ -παραμέτρων τους. Βασικές παράμετροι ενδιαφέροντος κατά τη μέτρηση αυτή ήταν η μέτρηση του εύρους ζώνης των δομών μέσω της παραμέτρου  $s_{21}$  καθώς και το κομμάτι των ανακλάσεων μέσω της παραμέτρου  $s_{11}$ . Οι  $s$ - παράμετροι μετρήθηκαν με τη βοήθεια της 40 GHz ηλεκτρο-οπτικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε και παραπάνω για τη μέτρηση δομών VCSELs.

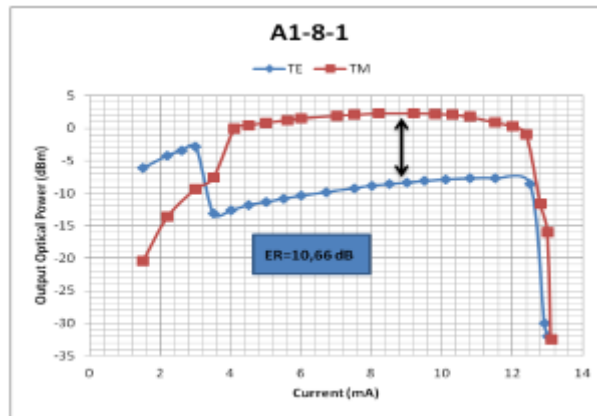


Εικόνα 87: (α) Πειραματική διάταξη για τις καμπύλες LIV και (β) πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των s-παραμέτρων.

Στα διαγράμματα που αποτυπώνουν την  $s_{21}$  παράμετρο υποδεικνύεται και το 3 dB εύρος ζώνης της δομής. Η μέτρηση αυτή έγινε σε διάφορα bias σημεία των δοκιμαζόμενων δομών και στα διαγράμματα αποτυπώνεται η μεγαλύτερη τιμή που μετρήθηκε. Οι βέλτιστες τιμές ρεύματος όσον αφορά στο εύρος ζώνης βρέθηκαν πολύ κοντά στις τιμές του roll-over. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται με βάση την τιμή του BTJ και του mesa. Προς χάριν οικονομίας, παρουσιάζονται ενδεικτικά μόνο τα διαγράμματα της πρώτης περίπτωσης (mesa 20  $\mu\text{m}$ - BTJ 3 $\mu\text{m}$ ) ενώ στις υπόλοιπες ομάδες δομών παρατίθεται μόνο ο σχολιασμός των μετρήσεων.

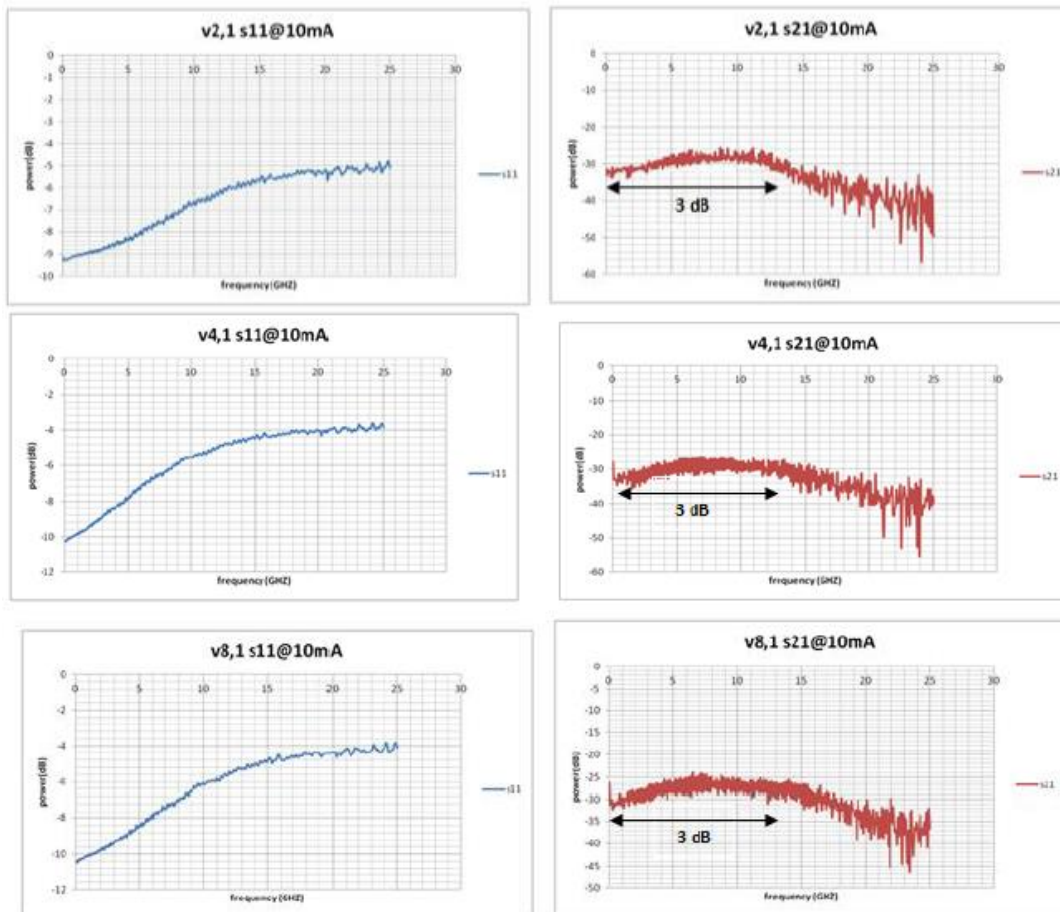
Mesa: 20  $\mu\text{m}$ - BTJ: 3  $\mu\text{m}$





Εικόνα 88: Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχόμενου ρεύματος για τα VCSELs τύπου A1

Ο λόγος σβέσης της πόλωσης των VCSELs τύπου A1 έχει διακύμανση από 10.66 έως 20.93 dB. για τα VCSEL A1-2-1 και A1-8-1 παρατηρήθηκε αλλαγή του πολωτικού άξονα στα 6 mA και 3.5 mA αντίστοιχα. Όσον αφορά στο εύρος ζώνης 3 dB, οι δομές επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά με τιμή κοντά στα 13 GHz στα 10 mA.



Εικόνα 89: Ανάκλαση και διάδοση για τα VCSELs τύπου A1

**Mesa: 24 um- BTJ: 3 um**

Ο λόγος σβέσης της πόλωσης των VCSELs τύπου A2 είχε διακύμανση μεταξύ 5.55 και 21.21 dB στο roll-over ρεύμα ενώ το 3 dB εύρος ζώνης τους ήταν μεταξύ 13 και 14 GHz στα 10 mA.



Mesa: 28 um- BTJ: 3 um

Παρατηρήθηκε ότι τα VCSEL A3-4-5 και A3-88-5 είχαν παρόμοια συμπεριφορά στην οπτική ισχύ εξόδου τους και στους δυο πολωτικούς άξονες. Οι υπόλοιπες δομές είχαν λόγο σβέσης πόλωσης στα 5.08 dB. Το εύρος ζώνης των δομών ήταν στα 14 GHz στα 10 mA

Mesa: 20 um- BTJ: 4 um

Ο λόγος σβέσης πόλωσης των VCSELs τύπου B1 κυμάνθηκε από 5.38 έως 21.37 dB ενώ με την αύξηση του εγγεόμενου ρεύματος παρατηρήθηκε αλλαγή του πολωτικού άξονα. Το 3 dB εύρος ζώνης μετρήθηκε στα 12.5 mA και βρέθηκε μεταξύ 15 και 17 GHz.

Mesa: 24 um- BTJ: 4 um

Ο λόγος σβέσης στις συγκεκριμένες δομές ήταν μεταξύ 4.49 και 24.66 dB ενώ το εύρος ζώνης κυμάνθηκε μεταξύ 14 και 16 GHz στα 12.5 mA.

Mesa: 28 um- BTJ: 4 um

Τα συγκεκριμένα VCSELs τύπου B3 επέδειξαν κακή συμπεριφορά όσον αφορά στο λόγο σβέσης ης πόλωσης τους με τιμές μεταξύ 3.7 και 8.24 dB.το εύρος ζώνης τους μετρήθηκε στα 12.5 mA και βρέθηκε μεταξύ 13 και 16 GHz.

Mesa: 20 um- BTJ: 5 um

Οι δομές C1-4-13 και C1-8-13 επέδειξαν παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά στην οπτική ισχύ εξόδου τους και στους δυο πολωτικούς άξονες. Για το VCSEL C1-2-13 η τιμή του PER ήταν στα 7.78 dB. Οι αντίστοιχες τιμές εύρους ζώνης ήταν μεταξύ 16 και 17 GHz στα 12.5 GHz.

Mesa: 24 um- BTJ: 5 um

Ο λόγος σβέσης της πόλωσης των VCSELs τύπου C2 κυμάνθηκε μεταξύ 8.94 και 19.51 dB ενώ στα 12.5 mA εγγεόμενου ρεύματος οι τιμές του εύρους ζώνης κινήθηκαν μεταξύ 15 και 17 GHz.

Mesa: 28 um- BTJ: 5 um

Ο λόγος σβέσης της πόλωσης για τα VCSELs τύπου C3 είχε διακύμανση από 4.53 έως 8.67 dB και για τους δυο πολωτικούς άξονες. Οι δομές C3-2-17 και C3-8-17 είχαν αλλαγή στον πολωτικό άξονα με την αύξηση του εγγεόμενου ρεύματος. Στα 12.5 mA εγγεόμενου ρεύματος οι τιμές του εύρους ζώνης κινήθηκαν μεταξύ 14 και 15.5 GHz.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις μετρούμενες τιμές για τα VCSELs τύπου C3.

VCEL	Rollover Ρεύμα (mA)	Οπτική Ισχύ Εξόδου (dBm)	Λόγος Σβέσης Πόλωσης (dB)	3-dB Εύρος Ζώνης (GHz)
A1-2-1	9	2.63	20.93	13
A1-4-1	9	2.45	12.75	13
A1-8-1	9.2	2.33	10.66	13

A2-1-3	11.2	1.49	5.55	13
A2-2-3	10.7	2.22	13.92	14
A2-7-3	8.3	2.33	17.77	13
A2-8-3	8.6	2.76	21.12	-
A3-1-5	8.7	2.4	5.08	14
A3-2-5	8.8	1.25	5.08	13.5
A3-4-5	11.9	0.5	8.55	14
A3-8-5	8.4	1.7	2.08	14
B1-1-7	8.4	1.19	5.38	16
B1-2-7	12.7	3.15	5.82	16
B1-4-7	12	3.62	21.37	15
B1-8-7	12	3.63	18.2	17
B2-1-9	10.2	2.33	4.49	14
B2-4-9	11.9	3.41	24.66	15
B2-8-9	12.4	3.05	12.75	16
B3-1-11	12	2.48	4.06	16
B3-2-11	12.9	2.21	3.7	13.5
B3-4-11	12.2	3.17	8.24	13
B3—11	14.7	2.41	4.8	14
C1-2-13	15.5	1.84	7.78	16
C1-4-13	13.2	2.54	1.9	17
C1-8-13	12.6	2.38	1.39	-
C2-1-15	14.5	4.84	8.94	17
C2-2-15	14.6	5.13	16.73	16
C2-5-15	15.1	4.81	0.48	15

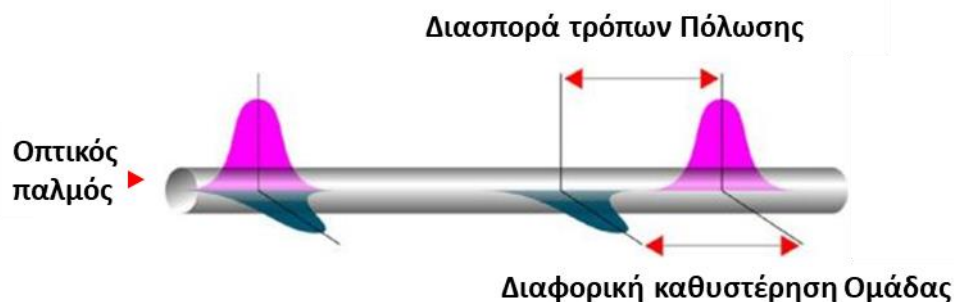
C2-8-15	14.8	4.51	19.51	15
C3-1-17	15.4	4.83	8.67	15.5
C3-2-17	14.5	5.09	7.91	15
C3-4-17	16.7	3.53	4.53	15
C3-8-17	15.1	4.64	7.43	14

Πίνακας 17: Ρεύμα rollover, οπτική ισχύς εξόδου, λόγος σβέσης πόλωσης και εύρος ζώνης 3 dB για τις δομές VCSELs τύπου C3

## 4.6 Γέννηση παλμού διαμορφωμένου κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών (PAM-4) μέσα από την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση.

### 4.6.1 Εισαγωγικές σημειώσεις

Προκειμένου να αυξηθεί η χωρητικότητα των ζεύξεων στα δίκτυα, προτείνονται πιο προηγμένες τεχνικές πολυπλεξίας σε μια προσπάθεια να εξαντληθούν όλα τα μέσα που υπάρχουν στη διάθεση του δικτύου [4.17]. Στα πλαίσια αυτά, η τεχνική της πολυπλεξίας πόλωσης προσφέρει τη δυνατότητα διπλασιασμού της απόδοσης του εύρους ζώνης εκμεταλλευόμενοι κάποια χαρακτηριστικά των οπτικών πηγών [4.18]. Σαν τεχνική πολυπλεξίας της πόλωσης (Polarization-Division Multiplexing) χαρακτηρίζουμε την πολυπλεξία που επιτρέπει δυο κανάλια πληροφορίας να μεταδοθούν στην ίδια συχνότητα φέροντος χρησιμοποιώντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα με δυο ορθογώνιες πολωτικές καταστάσεις.



Εικόνα 90: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της διασποράς τρόπων πόλωσης

Ωστόσο, το κύριο πρόβλημα το οποίο συναντάται κατά τη διάδοση σε ίνα και αφορά στην πολυπλεξία της πόλωσης, είναι το φαινόμενο της διασποράς τρόπων πόλωσης (polarization mode dispersion) [4.19]. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στα δομικά χαρακτηριστικά της οπτικής ίνας. Σε κανονικές συνθήκες, όταν το φως ταξιδεύει σε μια τέλεια κυλινδρική ίνα χωρίς λυγίσματα, το φαινόμενο της διασποράς τρόπων πόλωσης δεν υφίσταται. Παρόλα αυτά στην πραγματικότητα αυτή η ιδανική συνθήκη

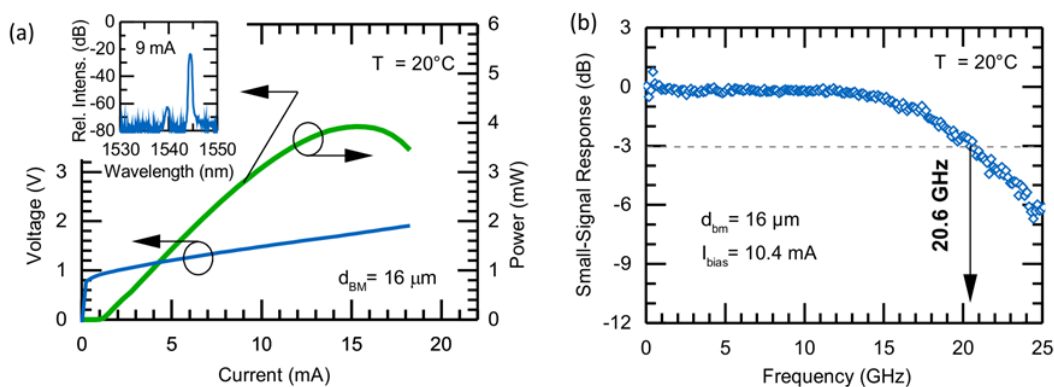
δεν συναντάται αφού η οπτική ίνα είναι δομικά ατελής, υπό την έννοια ότι δεν έχει απόλυτα κυκλική διατομή. Έτσι, εμφανίζεται το φαινόμενο της διπλοθλαστικότητας που υπαγορεύει ότι σε διαφορετικούς άξονες της ίνας το φως ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα αφού «βλέπει» διαφορετικό ενεργό δείκτη διάθλασης (effective index) ο οποίος είναι αποτέλεσμα της διαφοράς του πλάτους του κάθε άξονα. Αποτέλεσμα όλων αυτών λοιπόν είναι η διασπορά τρόπων πόλωσης η οποία στην άκρη του συστήματος έχει «ξεχωρίσει» (διασπείρει) τις δυο πολωτικές καταστάσεις, αφού έχουν ταξιδέψει σε διαφορετικό χρόνο. Η διασπορά τρόπων πόλωσης είναι ένα στοχαστικό φαινόμενο το οποίο οφείλεται εν πολλοίς στις γεωμετρικές ατέλειες της ίνας ή ακόμα και τα λυγίσματα που αποκτά κατά την εγκατάσταση. Έτσι το φαινόμενο αυτό έχει μια συνεχή διακύμανση που δεν μας επιτρέπει την αυστηρή ποσοτικοποίηση του αλλά την προσέγγιση μιας μέσης τιμής στον χρόνο [4.20]. Στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι η διασπορά τρόπων πόλωσης είναι φαινόμενο καθοριστικό για τη διάδοση ενός σήματος όταν είναι συγκρίσιμο χρονικά με τη διάρκεια ενός παλμού, με άλλα λόγια όσο αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης, στενεύει η χρονική περίοδος του παλμού και άρα είναι πιο επιρρεπής σε φαινόμενα διαπλάτυνσης.

Για τους παραπάνω λόγους, η χρήση της τεχνικής πολυπλεξίας πόλωσης απαιτεί αντισταθμιστικούς μηχανισμούς απέναντι σε αυτή τη χρονική ολίσθηση των δυο κάθετων πολώσεων στην ίνα. Δυο μέθοδοι είναι αρκετά διαδεδομένες για αντιστάθμιση, η ενεργή παρακολούθηση της πόλωσης (active polarization tracking) ή η σύμφωνη ανίχνευση (coherent detection) με δέκτη ευαίσθητο στην πόλωση και συνεπικουρούμενο από ψηφιακή επεξεργασία σήματος. Η τελευταία τεχνική είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη στα οπτικά δίκτυα, παρόλα αυτά είναι αρκετά σύνθετη, έχει υψηλό κόστος και υψηλή κατανάλωση ισχύος [4.21]. Στα πλαίσια των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΦΕ με τα VCSEL που κατασκευάστηκαν στο TUM, διερευνήθηκε μια νέα μέθοδος πολυπλεξίας στην πόλωση χρησιμοποιώντας την μονορυθμικότητά τους και αποφεύγοντας τη χρήση σύμφωνης ανίχνευσης. Άμεση ανίχνευση (direct detection) χρησιμοποιήθηκε στη μεριά του δέκτη όπως σε ένα απλό PAM-4 σχήμα και έτσι μειώθηκε η συνολική πολυπλοκότητα. Επιπλέον, η συγκεκριμένη τεχνική παρακάμπτει τη χρήση γραμμικών ηλεκτρονικών ενισχυτών (linear electronic drivers) και δεν απαιτεί την οδήγηση των δομών αυστηρά στη γραμμική τους περιοχή.

Τα VCSEL που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το πείραμα είναι βασισμένα σε μια αρχιτεκτονική κοντής κοιλότητας (short cavity) και διπλού mesa (double mesa) στην οποία το μήκος της κοιλότητας του ημιαγωγού είναι τριπλάσιο από το μήκος κύματος εκπομπής του laser [4.22]. Για να μειωθούν τα παρασιτικά φαινόμενα στο πλακίδιο (chip parasitics) η δομή σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με διπλό mesa και εν συνεχεία ενθυλακώθηκε (encapsulated) πλήρως σε βενζοκυκλοβουτένη (benzocyclobutene-BCB). Το μικρότερο mesa καθορίζει την χωρητικότητα και έχει διάμετρο  $d_{bm}$ . Η δομή με αυτό το χαρακτηριστικό, επιτρέπει την κατασκευή mesas με διάμετρο έως και 14  $\mu\text{m}$  μειώνοντας έτσι τη συνολική χωρητικότητα κατά ένα

παράγοντα δυο σε σύγκριση με άλλες πιο παραδοσιακές προσεγγίσεις στην αρχιτεκτονική VCSELs [4.23].

Προκειμένου να ενισχυθεί η εγγενής δυναμική απόδοση (intrinsic dynamic performance) της δομής, η ενεργή περιοχή του VCSEL «τεντώθηκε» (strained) με τη χρήση 6 AlGaInAs κβαντικών πηγαδιών με πάχος 5 nm και 1.7% συμπίεση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η ενεργός περιοχή είναι ενσωματωμένη μεταξύ μια ντοπαρισμένης με αρνητικά ιόντα (n-doped) InP στρώσης και ενός υψηλά ντοπαρισμένου (highly doped) AlInAs περιβλήματος. Ο περιορισμός του ρεύματος (current confinement) επιτεύχθηκε με μια p+-AlGaInAs/n+-GaInAs διασταύρωση σήραγγας (buried tunnel junction-BTJ) η οποία είναι πλήρως αγωγήμη σε μια περιοχή κυκλικού σχήματος με διάμετρο  $d_{BTJ} = 5 \mu\text{m}$ . Εκτός αυτής της περιοχής, το μπλοκάρισμα του ρεύματος (current blocking) επιτυγχάνεται με μια ανάστροφα πολωμένη (reverse biased) p<sup>+</sup>n διακλάδωση η οποία εκτείνεται σε όλη την περιοχή του mesa του πυθμένα (bottom mesa). Η διασταύρωση σήραγγας, έχει αναπτυχθεί με μια αρνητικά ντοπαρισμένη (n-doped) στρώση InP, ούτως ώστε να ταιριάζει με το μήκος της κοιλότητας. Η απότομη αλλαγή στη συγκέντρωση μικροσωματιδίων (impurities concentration) στην ανάστροφα πολωμένη διασταύρωση, οδηγεί σε μια περιοχή απογύμνωσης (depletion region) η οποία συνδέεται με χωρητικότητα ανάλογη με τη διαφορά των τετραγώνων της διαμέτρου του mesa πυθμένα και της διαμέτρου της διασταύρωσης σήραγγας ( $d_{bm}^2 - d_{btj}^2$ ). Το VCSEL με την διπλή mesa αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί ένα διηλεκτρικό κατανεμημένο Bragg ανακλαστή (distributed Bragg reflector) και ένα υβριδικό κατανεμημένο Bragg ανακλαστή πυθμένα με τιμή παραμέτρου ανακλαστικότητας ίση με 99.3% και 99.9% αντίστοιχα.

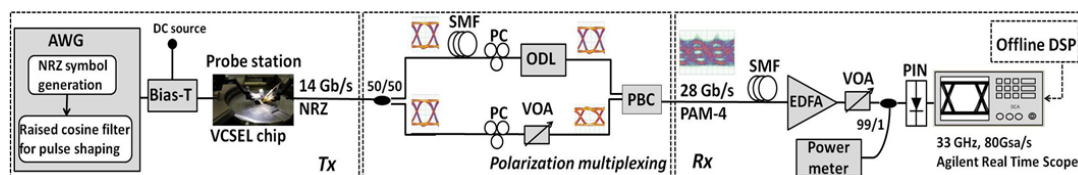


Εικόνα 91: (a) LIV χαρακτηριστικές και οπτικό φάσμα, (b)  $S_{11}$  μέτρηση ενός 16  $\mu\text{m}$  διπλού mesa VCSEL.

Σε θερμοκρασία δωματίου, το ρεύμα κατωφλίου είναι της τάξης του 1.0 mA και η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου είναι ελαφρώς μικρότερη από 4 mW. Η διαφορική αντίσταση μετρήθηκε και βρέθηκε 52  $\Omega$ . Στο ένθετο της Εικόνα 91α φαίνεται το οπτικό φάσμα του VCSEL όταν αυτό τροφοδοτείται με 9 mA. Το μέγιστο εύρος ζώνης διαμόρφωσης της δομής βρέθηκε 20.6 GHz το οποίο επιτεύχθηκε για 10.4 mA εγχεόμενου ρεύματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 91β.

## 4.6.2 Concept και Πειραματική Διάταξη

Το πείραμα βασίστηκε στην ιδέα της δημιουργίας ενός διαμορφωμένου κατά πλάτος σήματος τεσσάρων σταθμών κατευθείαν στον οπτικό τομέα, χρησιμοποιώντας τις εξόδους δύο VCSEL μονής πόλωσης (single mode VCSELs) και εφαρμόζοντας πολυπλεξία στην πόλωση. Ακολουθώντας αυτή τη λογική και παράγοντας επί της ουσίας ένα πολυσταθμικό (multilevel) σήμα με οπτικό τρόπο, αποφεύγεται η χρήση ηλεκτρικού Ψηφιακού-σε-Αναλογικό Μετατροπέα (Digital-to-Analog Converter-DAC). Έτσι η υλοποίηση απλοποιείται σημαντικά τόσο σε επίπεδο κόστους και εγκατάστασης όσο και σε επίπεδο κατανάλωσης ισχύος. Επιπρόσθετα, η ανάγκη οδήγησης του VCSEL εντός της γραμμικής του περιοχής παραλείπεται, προσφέροντας ένα ευρύτερο δυναμικό φάσμα. Ως αποτέλεσμα, το παραγόμενο σήμα είναι λιγότερο περιορισμένο όσον αφορά στο πλάτος ενώ οι στάθμες και οι μεταβάσεις του στο διάγραμμα ματιού είναι πολύ πιο διακριτές. Η πειραματική διάταξη που στήθηκε προς επαλήθευση της λειτουργικότητας της ιδέας, επειδή δεν διέθετε δυο διαφορετικά VCSELs, περιλάμβανε τη γέννηση ενός οπτικού NRZ σήματος από μια μόνο δομή. Ο παλμός αυτός εν συνεχεία χωρίστηκε, και στον ένα από τους δυο κλάδους εισήχθη καθυστέρηση ούτως ώστε να δημιουργηθούν δυο διακριτές (decorrelated) ροές δεδομένων (data streams). Προκειμένου να κατασκευαστεί το σήμα με τις τέσσερις στάθμες, σε μια από τις δυο ροές δεδομένων εισήχθη εξασθένιση ούτως ώστε αυτή να αποτελέσει τη ροή του λιγότερου χρήσιμου bit (least significant bit-LSB) ενώ αντιθέτως η άλλη ροή αποτέλεσε το περισσότερο χρήσιμο bit (most significant bit-MSB). Οι δυο ροές συνδυάζονται στο τέλος έχοντας κάθετες πολώσεις μεταξύ τους δημιουργώντας ένα οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών. Στην πραγματικότητα αυτό που κάναμε είναι να συνδυάσουμε τις δυο οπτικές ροές με κατάλληλα πλάτη ούτως ώστε να εξομοιώσουμε τη λειτουργία ενός ηλεκτρονικού DAC.



Εικόνα 92: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της οπτικής γέννησης παλμού τεσσάρων σταθμών

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της οπτικής γέννησης διαμορφωμένου κατά πλάτος σήματος τεσσάρων σταθμών. Για να μπορούμε να συγκρίνουμε την επιτυχία της προτεινόμενης υλοποίησης, το VCSEL διαμορφώθηκε αρχικά με NRZ ηλεκτρικό σήμα για να πολυπλεχθεί στην πόλωση και στη συνέχεια με ένα σήμα τεσσάρων σταθμών ούτως ώστε να συγκριθούν μεταξύ τους. Τα ηλεκτρικά NRZ και PAM-4 σήματα στα 14 Gbaud παράχθηκαν από μια 8-bit, 65 GSa/s παλμογεννήτρια (Arbitrary Waveform Generator-AWG) από την οποία παράχθηκε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο (repeating pattern) μήκους  $2^{10}$  σύμβολα. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο Raised Cosine (RC) για το περιορισμό του εύρους ζώνης

του παλμού (pulse shaping) με παράγοντα roll-off ίσο με  $\alpha=1$ . Το φίλτρο αυτό επί της ουσίας για να περιορίσει το εύρος ζώνης του σήματός μας ούτως ώστε να «κουβαλάει» μόνο την ωφέλιμη πληροφορία, καταπιέζει τους πλευρικούς λοβούς. Έτσι το σήμα βασικής ζώνης (baseband signal) έχει εύρος ζώνης στα 14 GHz ακριβώς. Στην περίπτωση της προτεινόμενης κατασκευής PAM-4 σήματος με οπτικό τρόπο, δηλαδή με την τεχνική πολυπλεξίας στην πόλωση, από την παλμογεννήτρια κατασκευάστηκε NRZ ηλεκτρικό σήμα με πλάτος 600 mV<sub>P-P</sub>. Από την άλλη, για την κλασσική μέθοδο παραγωγής PAM-4 σήματος κατασκευάστηκε κατευθείαν PAM-4 ηλεκτρικός παλμός με πλάτος 500 mV<sub>P-P</sub>. Και στις δυο περιπτώσεις, τα ηλεκτρικά σήματα που γεννήθηκαν από την παλμογεννήτρια διαμόρφωσαν κατευθείαν το VCSEL και το οπτικό σήμα εξόδου είχε και στις δυο περιπτώσεις ισχύ 0 dBm.

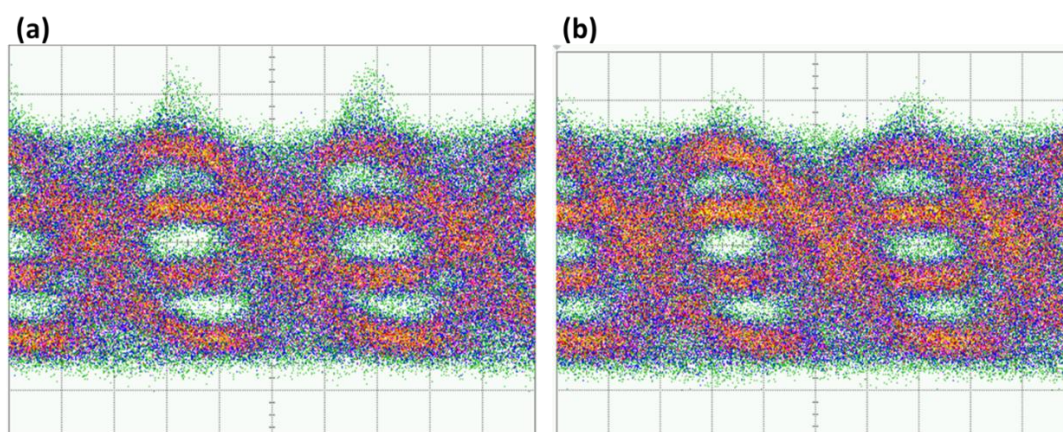
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προτεινόμενη τεχνική κατασκευής διαμορφωμένων σημάτων τεσσάρων σταθμών με πολυπλεξία κατά πόλωση, το NRZ οπτικό σήμα με ταχύτητα 14 Gb/s, χωρίστηκε σε δυο ταυτόσημα σήματα μισής ισχύος από την αρχική με τη χρήση ενός διαχωριστή ισχύος. Για να αποσυσχετιστούν χρονικά μεταξύ τους οι δυο ροές σήματος, χρησιμοποιήθηκε στην μια από αυτές κατάλληλο μήκος οπτικής ίνας για να προστεθεί η απαιτούμενη καθυστέρηση. Αφού επιτεύχθηκε η χρονική καθυστέρηση, που επί της ουσίας εξασφαλίζει ότι τα δυο σήματα μεταξύ τους δεν θα είναι ταυτόσημα, το ζητούμενο ήταν να υπάρξει συγχρονισμός στη βάση των περιόδων των bits. Έτσι, χρησιμοποιήθηκε μια προσαρμοζόμενη οπτική γραμμή καθυστέρησης (tunable optical delay line) στον ένα από τους δυο κλάδους, ούτως ώστε να επιτευχθεί ο συγχρονισμός στο επίπεδο των περιόδων των bits. Με δεδομένο ότι ο σκοπός ήταν η κατασκευή ενός σήματος τεσσάρων σταθμών, αναγκαία ήταν και η φροντίδα των τιμών ισχύος των δυο ροών έτσι ώστε το παραγόμενο σήμα να έχει στάθμες οι οποίες ισαπέχουν μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα προσαρμοζόμενος οπτικός αποσβέτης (variable optical attenuator) στον ένα από τους δυο κλάδους. Χρησιμοποιήθηκαν επίσης δυο ελεγκτές πόλωσης (polarization controllers), ένας σε κάθε κλάδο, για να ευθυγραμμιστούν οι πολωτικοί άξονες του κάθε σήματος με αυτούς του συνδυαστή πόλωσης (polarization beam combiner). Για να ελέγξουμε τη βιωσιμότητα της μεθόδου αυτής και σε ένα σενάριο διάδοσης, επιστρατεύθηκε μια καλούμπα μονότροπης οπτικής ίνας μήκους 500 m.

Στη μεριά του δέκτη, και με δεδομένη την απουσία από το εργαστήριο ενός γρήγορου φωτοδέκτη, χρησιμοποιήθηκε ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifier-EDFA) σε συνδυασμό με μια 50 Gb/s pin φωτοδίοδο με αποκρισιμότητα της τάξης του 0.65. Ένας επιπλέον προσαρμοζόμενος οπτικός αποσβέτης χρησιμοποιήθηκε στην είσοδο της φωτοδίοδου για να καταστήσει δυνατή τη μέτρηση του BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος του σήματος. Το φωτορεύμα που παράχθηκε από τη φωτοδίοδο, λήφθηκε από έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope) με αναλογικό εύρος ζώνης στα 33 GHz και 80 GSa/s ρυθμό δειγματοληψίας προκειμένου να ψηφιοποιηθεί και να του γίνει η κατάλληλη επεξεργασία.

Για να συγκριθεί η προτεινόμενη κατασκευή οπτικού σήματος τεσσάρων σταθμών με τη συμβατική μέθοδο που περιλαμβάνει την απευθείας οδήγηση του VCSEL με ένα ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών, η πειραματική διάταξη τροποποιήθηκε κατάλληλα. Έτσι, η παλμογεννήτρια παράγαγε ένα ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών με πλάτος  $500 \text{ mV}_{\text{P-P}}$  στο οποίο εφαρμόστηκε το ίδιο φίλτρο Raised Cosine (RC) για το περιορισμό του εύρους ζώνης του παλμού (pulse shaping) με παράγοντα roll-off ίσο με  $\alpha=1$ . Προφανώς ο μηχανισμός πολυπλεξίας στην πόλωση που φαίνεται στο σχήμα παραλήφθηκε και στη μεριά του δέκτη ο εξοπλισμός παρέμεινε ο ίδιος. Το σήμα αξιολογήθηκε τόσο στην απευθείας μετάδοση του όσο και σε συνθήκες διάδοσης σε μονότροπη οπτική ίνα μήκους 500 m.

### 4.6.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

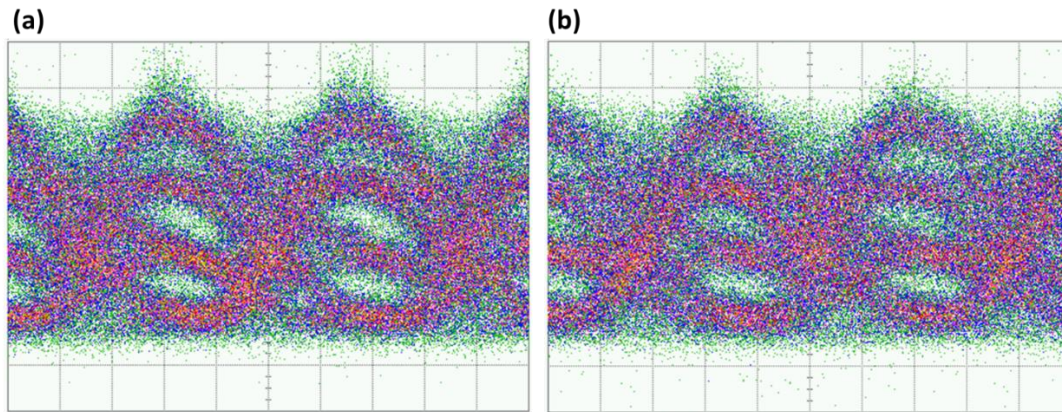
Για την ποιοτική αξιολόγηση της μεθόδου οπτικής κατασκευής σήματος τεσσάρων σταθμών μέσω πολυπλεξίας στην πόλωση, παρουσιάζονται τα οπτικά διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s τόσο στην περίπτωση της απευθείας διάδοσης όσο και της μετάδοσης μέσω μονότροπης οπτικής ίνας μήκους 500 m. Τα διαγράμματα ματιού ελήφθησαν από έναν παλμογράφο ισοδύναμου χρόνου (equivalent-time oscilloscope).



Εικόνα 93: Οπτικά διαγράμματα ματιού για το οπτικά κατασκευασμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών στα 28 Gb/s για (α) απευθείας διάδοση και (β) διάδοση στα 500 m.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα αντίστοιχα οπτικά διαγράμματα ματιού για την περίπτωση της απευθείας οδήγησης του VCSEL με ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών σε ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων 28 Gb/s.

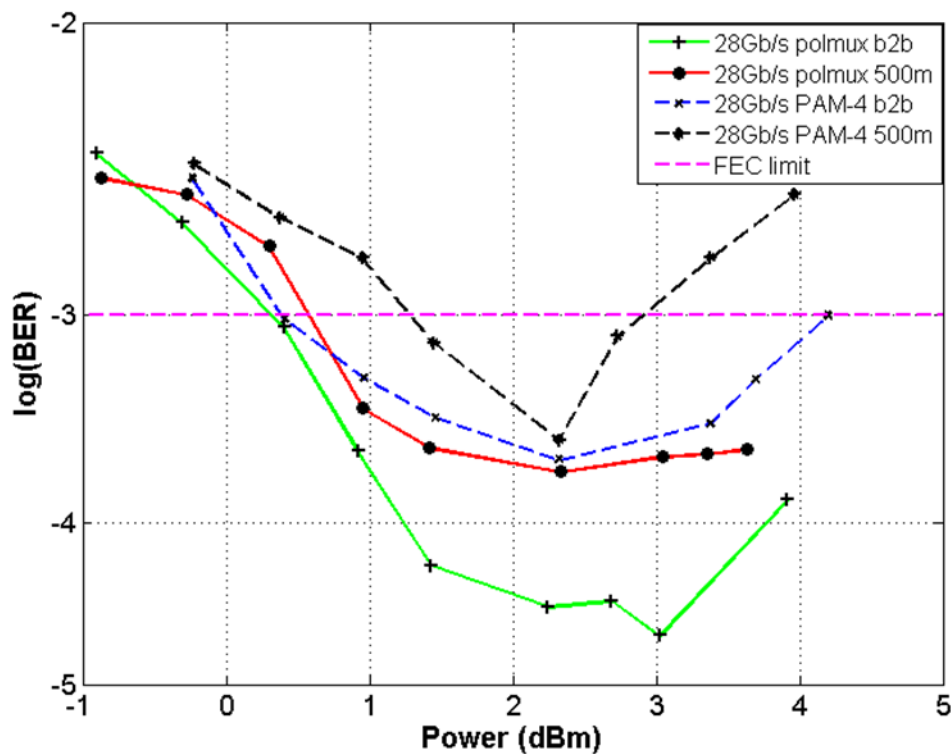




Εικόνα 94: Οπτικά διαγράμματα ματιού για την απευθείας οδήγηση του VCSEL με ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών στα 28 Gb/s για (α) απευθείας διάδοση και (β) διάδοση στα 500 m.

Στο ψηφιοποιημένο σήμα, αφού ελήφθη στον παλμογράφο πραγματικού χρόνου (real time oscilloscope), πραγματοποιήθηκε επαναδειγματοληψία (resampling), ανάκτηση χρονισμού συμβόλων (symbol timing recovery) και εφαρμόστηκε και ένας στατικός ισοσταθμιστής (static equalizer) για να αντισταθμίσει τους περιορισμούς εύρους ζώνης του καναλιού. Για την ανάκτηση των συμβόλων χρησιμοποιήθηκε αυτόματος καθορισμός κατωφλιών (automatic thresholding) και ακολούθως εκτελέστηκε αξιολόγηση της τιμής του BER. Η αξιολόγηση του BER έγινε συγκρίνοντας το ληφθέν σήμα με την αρχική ακολουθία bits και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bits του λαμβανόμενου σήματος.

Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται οι καμπύλες BER για τις διαφορετικές μεθόδους κατασκευής PAM-4 σήματος στα 28 Gb/s σε περιπτώσεις απευθείας διάδοσης και διάδοσης μέσα από 500 m μονότροπης οπτικής ίνας. Οι καμπύλες έχουν σχεδιαστεί ως συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος στο δέκτη η οποία υπολογίζεται από το μετρούμενο φωτορεύμα. Η πράσινη και η κόκκινη συμπαγής γραμμή αντιστοιχεί στο σήμα το οποίο παράχθηκε με την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση για απευθείας διάδοση και διάδοση στα 500 m αντίστοιχα. Κατά τον ίδιο τρόπο η διακεκομμένη μπλε και μαύρη γραμμή αντιστοιχούν στο σήμα το οποίο προέκυψε με απευθείας διαμόρφωση τεσσάρων σταθμών για τις δυο περιπτώσεις διάδοσης. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η μέτρηση της καμπύλης BER ενώ προσεγγίζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την υποβάθμιση του σήματος κατά τη διάδοση, σαν μετρικός δείκτης περιέχει και την πληροφορία της ευαισθησίας του δέκτη μας. Ένας δέκτης έχει ένα αποδεκτό εύρος τιμών μέσα στο οποίο έχει γραμμική συμπεριφορά. Έξω από αυτό το εύρος εισάγει περαιτέρω υποβάθμιση στο σήμα μας η οποία είναι πολύ δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί και έτσι προστίθεται στην ήδη υπάρχουσα υποβάθμιση από τη διαδικασία της διάδοσης. Για τον λόγο αυτό προσπαθούμε να διεξάγουμε τις μετρήσεις μας μέσα στο εύρος τιμών στο οποίο ο δέκτης συμπεριφέρεται με γραμμικό τρόπο.



Εικόνα 95: Μετρήσεις BER για το 28 Gb/s PAM-4 σήμα το οποίο κατασκευάστηκε είτε με την τεχνική πολυπλεξίας στην πόλωση είτε με απευθείας διαμόρφωση του VCSEL για περιπτώσεις απευθείας διάδοσης και διάδοσης σε μονότροπη οπτική ίνα μήκους 500 m.

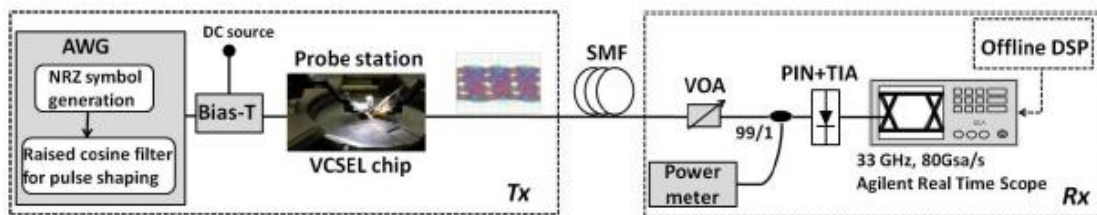
Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι καμπύλες BER αποκαλύπτουν ότι το σήμα το οποίο κατασκευάστηκε μέσω της τεχνικής πολυπλεξίας στην πόλωση, παρουσιάζει καλύτερη απόδοση όσον αφορά στις ληφθείσες, τιμές BER σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στην περίπτωση της απευθείας διαμόρφωσης του VCSEL. Η βελτιωμένη αυτή απόδοση μάλιστα ισχύει και στην περίπτωση της διάδοσης σε μονότροπη οπτική ίνα μήκους 500 m. Είναι επίσης σαφές ότι στην περίπτωση της τεχνικής πολυπλεξίας στην πόλωση, εκμεταλλευόμαστε αποτελεσματικά όλη την συνάρτηση μεταφοράς του VCSEL και άρα αποφεύγεται η ανάγκη να οδηγούμε τη δομή μόνο στη γραμμική της περιοχή. Στην δεύτερη περίπτωση, επειδή η γραμμική περιοχή είναι μικρότερη, ένα διαμορφωμένο σήμα και ιδιαίτερα ένα σήμα το οποίο φέρει πλέον των δυο σταθμών, θα έχει πολύ μικρότερη δυνατότητα μετάδοσης με δεδομένο ότι σε πολύ μικρό εύρος πλάτους θα πρέπει να «χωρέσουν» περισσότερες στάθμες ισχύος. Αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε και από το διάγραμμα ματιού όπου στην περίπτωση της απευθείας διαμόρφωσης είναι πολύ πιο «κλειστό». Επί της ουσίας σε ένα διαμορφωμένο σήμα στο οποίο οι στάθμες ισχύος (και άρα η κωδικοποίηση των συμβόλων) είναι πιο κοντά, αυτό σημαίνει ότι το σήμα είναι πιο επιρρεπές στη διασυμβολική παρεμβολή και αντιστοίχως ο δέκτης μας θα αντιμετωπίσει δυσκολία στο να διακρίνει σωστά τα σύμβολα κάτι το οποίο θα οδηγήσει και σε περισσότερα λάθη και άρα και σε χειρότερη τιμή BER.

Στην περίπτωση του σήματος τεσσάρων σταθμών που κατασκευάστηκε με την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση, οι τιμές του λαμβανόμενου BER βρίσκονται

κάτω από το όριο του FEC (7% επικεφαλίδα) για την περίπτωση της απευθείας διάδοσης. Για τη διάδοση σε 500 m μονότροπης οπτικής ίνας το penalty ισχύος είναι περίπου 0.5 dB για BER ίσο με  $3 \times 10^{-4}$ . Αντιστοίχως στην περίπτωση της απευθείας διαμόρφωσης του σήματος τεσσάρων σταθμών στο VCSEL η τιμή του penalty ισχύος διαμορφώνεται στα 0.8 dB για τιμή BER της τάξης του  $5 \times 10^{-4}$ . Εν κατακλείδι, η παραπάνω πειραματική διαδικασία πιστοποιεί ότι η προτεινόμενη τεχνική κατασκευής οπτικού σήματος τεσσάρων σταθμών υπερτερεί ως προς την απόδοσή της αλλά παράλληλα είναι και πιο απλή αφού παρακάμπτει τον πολύπλοκο ηλεκτρικό εξοπλισμό που απαιτείται στη μεριά του πομπού και του δέκτη. Για τον λόγο αυτό είναι και πιο οικονομική τόσο από μεριάς κατανάλωσης ενέργειας όσο και από μεριάς κόστους.

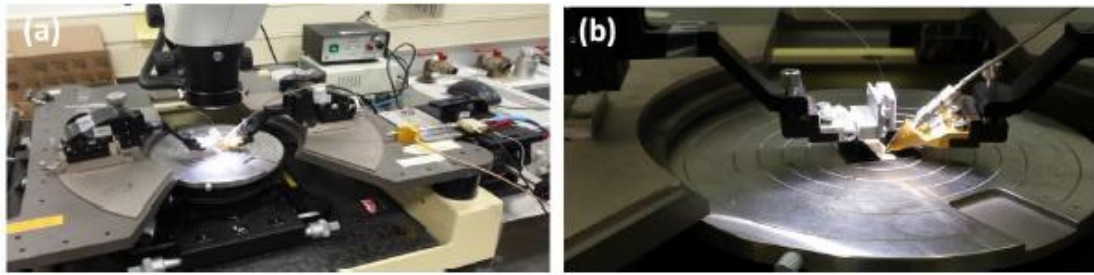
#### 4.7 Πείραμα VCSELs με διαμόρφωση τεσσάρων σταθμών σε ταχύτητες έως 80 Gb/s

Με δεδομένο το μεγάλο εύρος ζώνης των δομών VCSELs, το οποίο έφτανε τα 20.5 GHz, δοκιμάστηκαν τα όρια της δυνατότητας μετάδοσης πληροφορίας με τη χρήση διαμόρφωσης τεσσάρων σταθμών. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκαν ταχύτητες μετάδοσης πέρα από τα 28 Gbaud και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον σκοπό αυτό, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 96: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης των VCSELs σε ταχύτητες πέρα από τα 28 Gbaud.

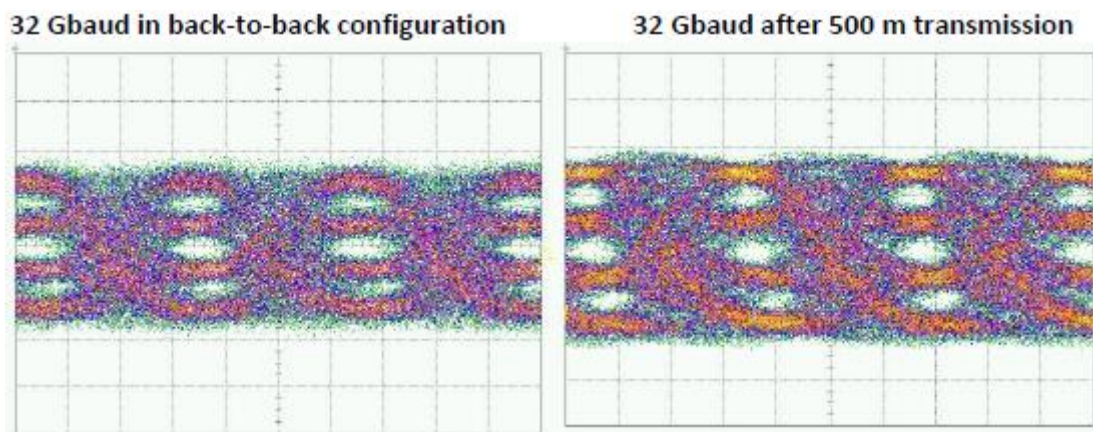
Για τη μέτρηση αυτή, δημιουργήθηκε ένας πομπός μετάδοσης διαμορφωμένου σήματος σε τέσσερις στάθμες, βασισμένος σε μια 8-bit, 65 GSa/s γεννήτρια κυματομορφών (Arbitrary Waveform Generator-AWG). Τα ηλεκτρικά σήματα που παρήγαγε η γεννήτρια ήταν στα 32 και 40 Gbaud με επαναλαμβανόμενο μοτίβο πληροφορίας (repeating pattern) μήκους  $2^{10}$  σύμβολα. Προκειμένου να περιοριστεί το εύρος ζώνης του διαδιδόμενου σήματος μόνο στον κεντρικό λοβό, εφαρμόστηκε μορφοποίηση παλμού (pulse shaping) τύπου raised cosine (RC) με παράγοντα roll-off  $\alpha=1$ . Και στις δυο περιπτώσεις μετάδοσης, το παραγόμενο ηλεκτρικό διαμορφωμένο σήμα τεσσάρων σταθμών, είχε πλάτος 550 mV<sub>P-P</sub> και εισήχθη κατευθείαν στη δομή του VCSEL δημιουργώντας έτσι ένα οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών με οπτική ισχύ εξόδου ίση με 1.5 dBm. Πιο συγκεκριμένα, το VCSEL «οδηγήθηκε» πάνω από το lasing κατώφλι του (lasing threshold) με τη βοήθεια ενός τροφοδοτικού τάσης ακριβείας. Το ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών υπερτέθηκε πάνω στο DC σήμα από το τροφοδοτικό. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ο μικροκυματικός σταθμός βάσης που χρησιμοποιήθηκε για το συγκεκριμένο πείραμα.



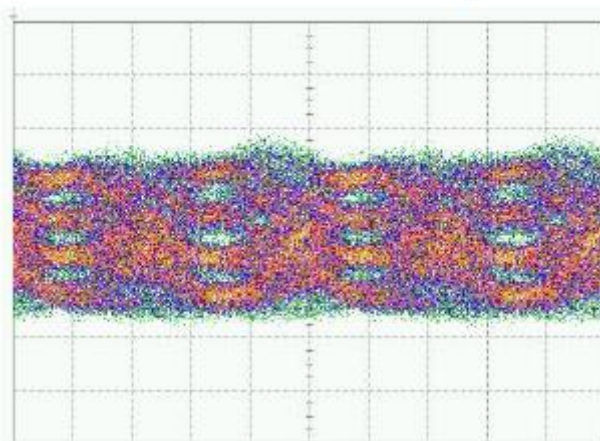
Εικόνα 97: (α) Ο μικροκυματικός σταθμός βάσης που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις και (β) κοντινή άποψη της κατακόρυφης διάταξης ανίχνευσης

Προκειμένου να έχουμε και ένα σενάριο διάδοσης του διαμορφωμένου οπτικού σήματος στο μέσο, χρησιμοποιήθηκαν 500 m τυπικής μονορρυθμικής ίνας (SMF). Προκειμένου η δέσμη εξόδου του VCSEL να κυματοδηγηθεί στην οπτική ίνα, έγινε χρήση μιας κατακόρυφης διάταξης ζεύξης (vertical probing arrangement) όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα και ίνας lensed. Αυτός ο τύπος ίνας επιτρέπει τη βέλτιστη ζεύξη του φωτός από το φωτονικό ολοκληρωμένο πλακίδιο στην ίνα λόγω της ιδιαίτερης δομής του με δεδομένο ότι στην άκρη φέρει έναν φακό με διάμετρο πεδίου ρυθμού (mode field diameter) που ταιριάζει με το αντίστοιχο του φωτονικού κυκλώματος (mode matching). Κατά αυτόν τον τρόπο έχουμε λιγότερες απώλειες στη ζεύξη. Το οπτικό σήμα ελήφθη από έναν εμπορικό 40 GHz δέκτη πριν από τον οποίο ένας ρυθμιζόμενος οπτικός αποσβέτης χρησιμοποιήθηκε για να ρυθμίζει τα επίπεδα της ισχύος εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο υπήρχε η δυνατότητα διεξαγωγής μετρήσεων BER ως προς την οπτική ισχύ εισόδου στο δέκτη.

Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει τα ενδεικτικά διαγράμματα ματιού στα 32 και 40 Gbaud για απευθείας διάδοση (back-to-back) τα οποία ελήφθησαν με τη χρήση ενός 70 GHz equivalent time oscilloscope. Στην περίπτωση των 32 Gbaud αποτυπώνεται και το διάγραμμα ματιού μετά από διάδοση σε 500 m μονορρυθμικής οπτικής ίνα.



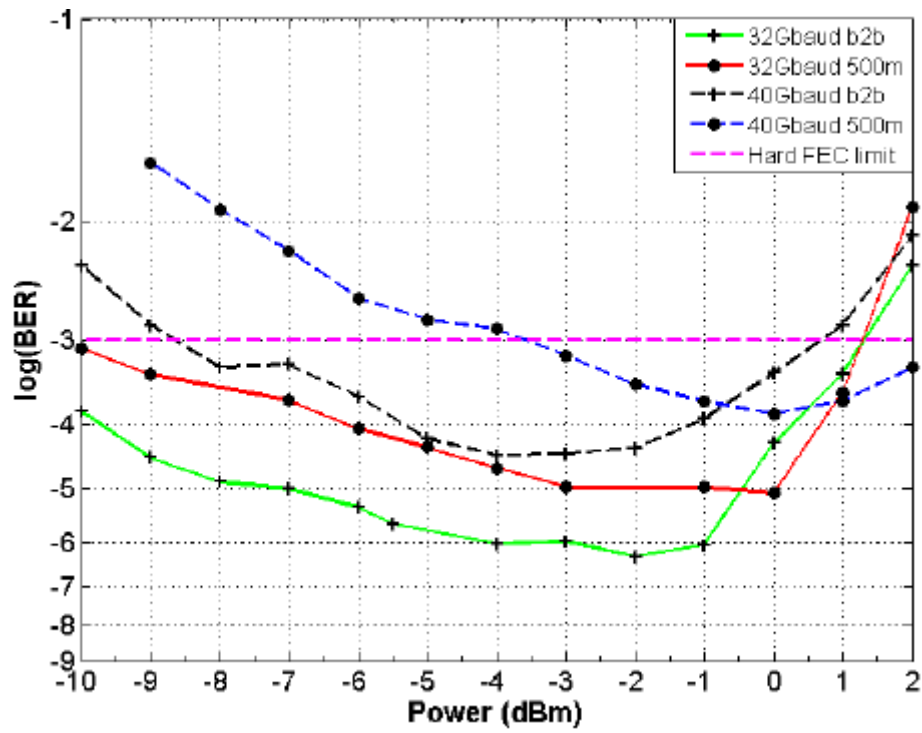
#### 40 Gbaud in back-to-back configuration



Εικόνα 98: Διαγράμματα ματιού (α) για back-to-back διάδοση στα 32 Gbaud, (b) διάδοση σε 500 m SMF και (γ) για back-to-back διάδοση στα 40 Gbaud

Οι μετρήσεις BER έγιναν αφού το διαμορφωμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών μετατράπηκε σε φωτορεύμα από τον δέκτη και η διαφορική του έξοδος συνδέθηκε με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope) με αναλογικό εύρος ζώνης στα 33 GHz και 80 GSa/s ρυθμό δειγματοληψίας. Στο κομμάτι της ψηφιακής επεξεργασίας του λαμβανόμενου σήματος έγινε offline επαναδειγματοληψία (re-sampling), ανάκτηση χρονισμού συμβόλου (symbol timing recovery) και εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκε στατικός ισοσταθμιστής (static equalizer) ούτως ώστε να αντισταθμίσει τους περιορισμούς στο εύρος ζώνης που έθετε το ίδιο το κανάλι. Πραγματοποιήθηκε επίσης αυτόματος ορισμός κατωφλιού (automatic thresholding) για την ανίχνευση των συμβόλων και αξιολόγηση της τιμής του BER τόσο για την απευθείας διάδοση όσο και για τη διάδοση σε ένα μήκος 500 m. Η απόδοση του BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με την αρχική αλληλουχία των bit και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bit.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις μετρούμενες καμπύλες BER ως συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης οπτικής ισχύος στο δέκτη για τα σήματα στα 32 και 40 Gbaud. Η πράσινη και κόκκινη γραμμή αντιστοιχούν στο λαμβανόμενο σήμα στα 32 Gbaud για την περίπτωση τόσο της απευθείας διάδοσης όσο και της διάδοσης σε 500 m οπτικής ίνας αντίστοιχα. Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς λογική, η διακεκομμένη μαύρη και μπλε γραμμή αντιστοιχούν στα αντίστοιχα σενάρια διάδοσης για το σήμα των 40 Gbaud. Όπως παρατηρείται, στην περίπτωση των 32 Gbaud και για τιμή οπτικής ισχύος εισόδου στο δέκτη που κυμαίνεται από -10 έως 0 dBm, η καμπύλη BER βρίσκεται κάτω από το hard FEC όριο και για τα δυο σενάρια διάδοσης. Στα 40 Gbaud, παρατηρείται μια λογική υποβάθμιση του μετρούμενου BER κυρίως λόγω του ότι το εύρος ζώνης του VCSEL έθετε ένα περιορισμό στη μετάδοση της πληροφορίας. Παρόλα αυτά στα 40 Gbaud, οι BER καμπύλες βρισκόταν πάλι κάτω από το όριο του hard FEC ακόμα και στην περίπτωση διάδοσης στα 500 m. Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από το εύρος ζώνης του VCSEL, η περιορισμένη λειτουργία του δέκτη ήταν άλλος ένας παράγοντας που επιβάρυνε τη συνολικότερη απόδοση ιδιαίτερα για περιπτώσεις σήματος εισόδου με υψηλή οπτική ισχύ.



Εικόνα 99: Καμπύλες BER για τα σενάρια διάδοσης διαμορφωμένων σημάτων τεσσάρων σταθμών στα 32 και 40 Gbaud με χρήση της δομής του VCSEL.

# Βιβλιογραφία

- [4.1] M. Mueller, W. Hofmann, T. Gruendl, M. Horn, P. Wolf, R. D. Nagel, E. Rönneberg, G. Boehm, D. Bimberg, M. C. Amann, “1550 nm High-Speed Short-Cavity VCSELs”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 17, No. 5, pp. 1158-1166, Sept./Oct., 2011.
- [4.2] Michalzik, Rainer. VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. , 2013. Internet resource.
- [4.3] Jeffrey L. Guttman, “Mode-Field Diameter and "Spot Size" Measurements of Lensed and Tapered Specialty Fibers”, January 2002
- [4.4] Finisar White Paper, “Optical Modes in VCSELs”,2007
- [4.5] J. Tatum et al, “High Speed Characteristics of VCSELs,” Proc. SPIE 3004, 1997. Available at [www.finisar.com/aoc.php](http://www.finisar.com/aoc.php)
- [4.6] M. Sciamanna, K. Panajotov, H. Thienpont, I. Veretennicoff, P. Mégret, and M. Blondel, "Optical feedback induces polarization mode hopping in vertical-cavity surface-emitting lasers," Opt. Lett. 28, 1543-1545 (2003).
- [4.7] Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, Mohamed S. Alghamdi, Hamed Dalir, and Fumio Koyama, "Enhancing the modulation bandwidth of VCSELs to the millimeter-waveband using strong transverse slow-light feedback," Opt. Express 23, 15365-15371 (2015).
- [4.8] K.S. Kaur, A.Z. Subramanian, P. Cardile, R. Verplancke, J. Van Kerrebrouck, S. Spiga, R. Meyer, J. Bauwelinck, R. Baets, and G. Van Steenberge, "Flip-chip assembly of VCSELs to silicon grating couplers via laser fabricated SU8 prisms," Opt. Express 23, 28264-28270 (2015)
- [4.9] Chih-Hao Chang, L. Chrostowski and C. J. Chang-Hasnain, "Parasitics and design considerations on oxide-implant VCSELs," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 13, no. 12, pp. 1274-1276, Dec. 2001.
- [4.10] C. Fornaroli, J. Holtkamp, A. Gillner, Dicing of Thin Si Wafers with a Picosecond Laser Ablation Process, Physics Procedia, Volume 41, 2013, Pages 603-609, ISSN 1875-3892, <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.122>.
- [4.11] B. Raillard, F. Mücklich, Ablation effects of femtosecond laser functionalization on surfaces, Editor(s): J. Lawrence, D.G. Waugh, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Laser Surface Engineering, Woodhead Publishing, 2015, Pages 565-581, ISBN 9781782420743.
- [4.12] Nam-Trung Nguyen, Chapter 4 - Fabrication technologies, Editor(s): Nam-Trung Nguyen, In Micro and Nano Technologies, Micromixers (Second Edition), William Andrew Publishing, 2012, Pages 113-161, ISBN 9781437735208.
- [4.13] Michalzik R., Ebeling K.J. (2003) Operating Principles of VCSELs. In: Li H.E., Iga K. (eds) Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. Springer Series in Photonics, vol 6. Springer, Berlin, Heidelberg.

- [4.14] Yogendra Joshi, Pramod Kumar, "Energy Efficient Thermal Management of Data Centers", Springer, 2012, ISBN 978-1-4419-7124-1.
- [4.15] Alfonso Capozzoli, Gianluca Serale, Lucia Liuzzo, Marta Chinnici, Thermal Metrics for Data Centers: A Critical Review, Energy Procedia, Volume 62, 2014, Pages 391-400, ISSN 1876-6102.
- [4.16] T. J. Chainer, M. D. Schultz, P. R. Parida and M. A. Gaynes, "Improving Data Center Energy Efficiency With Advanced Thermal Management," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 7, no. 8, pp. 1228-1239, Aug. 2017.
- [4.17] Dai, Daoxin and John E. Bowers. "Silicon-based on-chip multiplexing technologies and devices for Peta-bit optical interconnects." Nanophotonics 3 (2013): 283 - 311.
- [4.18] Darko Ivanovich, Samuel B. Powell, Viktor Gruev, Roger D. Chamberlain, "Polarization division multiplexing for optical data communications," Proc. SPIE 10538, Optical Interconnects XVIII, 105381D (22 February 2018).
- [4.19] William Shieh, Ivan Djordjevic, Chapter 5 - Polarization Effects in Optical Fiber, Editor(s): William Shieh, Ivan Djordjevic, OFDM for Optical Communications, Academic Press, 2010, Pages 149-182, ISBN 9780123748799.
- [4.20] Nelson, L. & Jopson, R. J Optic Comm Rep (2004) 1: 312. <https://doi.org/10.1007/s10297-004-0001-5>.
- [4.21] C. Xie et. al., "Generation and transmission of 100-Gb/s PDM 4-PAM using directly modulated VCSELs and coherent detection," OFC, OSA Technical Digest (online), Th3K.2 (2014).
- [4.22] S. Spiga, D. Schoke, A. Andrejew, G. Boehm, and M.-C. Amann, OI Conference (2016).
- [4.23] S. Spiga et, al., "Single-mode 1.5- $\mu\text{m}$  VCSELs with 22-GHz small-signal bandwidth," OFC, Tu3D.4 (2016).



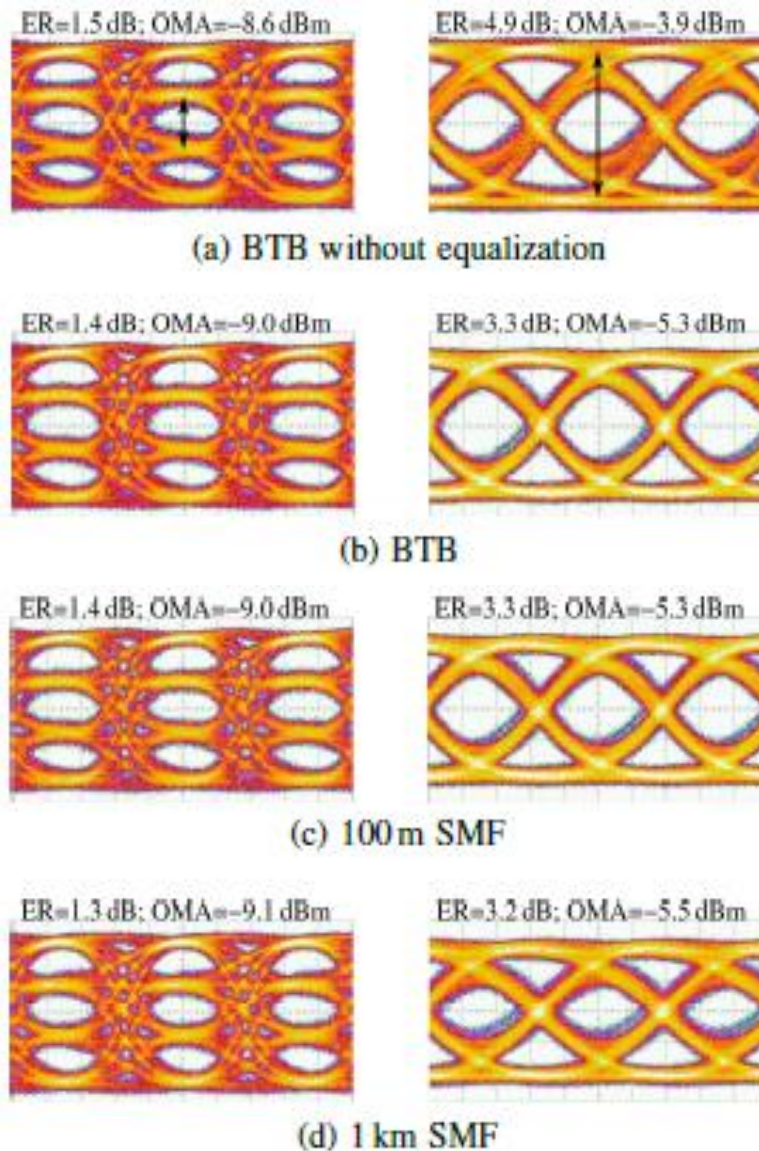
# Κεφάλαιο 5

## Πειραματική Επίδειξη Δομών Πομπού, Δέκτη και Διεπαφής Απεμπλοκής

### 5.1 Πρώτη γενιά πομπού (PTL)

Στην κατεύθυνση μια βηματικής προσέγγισης στην υλοποίηση του πομποδέκτη, δοκιμάστηκε η λειτουργία του αρχικού μοντέλου του πομπού ως ξεχωριστή συσκευή προκειμένου να διερευνηθεί η καταλληλότητά του για εφαρμογή στη διασύνδεση υπολογιστικών συστημάτων. Οι πειραματικές μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο του IMEC [5.1] και είχαν δυο σκέλη. Στο πρώτο πείραμα, διερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της χρωματικής διασποράς στην ποιότητα του διαμορφωμένου σήματος μέσα από τη διάδοσή του σε οπτική ίνα με μήκη 100 m και 1 km. Εξετάστηκαν δυο σχήματα διαμόρφωσης, τεσσάρων (PAM-4) και δυο (NRZ) σταθμών, με ταχύτητα μετάδοσης στα 28 Gb/s. Τα ηλεκτρικά διαγράμματα ματιού μετά τον δέκτη κατασκευάστηκαν από ένα 50 GHz παλμογράφο ενώ οι καμπύλες του BER μετρήθηκαν με τη χρήση ενός BER αναλυτή. Τα αποτελέσματα για την απευθείας (back-to-back) μετάδοση, μετά από βελτιστοποίηση του εφαρμοζόμενου feed-forward equalizer (FFE), χρησιμοποιήθηκαν ως μετρήσεις αναφοράς. Στο δεύτερο πείραμα, διερευνήθηκε η μέγιστη δυνατή ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας με τη χρήση του πομπού και συγκρίθηκε με έναν αντίστοιχο εμπορικά διαθέσιμο πομπό με VCSEL στα 850 nm αλλά και ένα εξωτερικά διαμορφωμένο laser (externally modulated laser).

Τα διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για τις διαφορετικές περιπτώσεις μετάδοσης φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Να σημειωθεί ότι παρουσιάζονται οι περιπτώσεις απευθείας μετάδοσης με και χωρίς τη χρήση FFE προκειμένου να συγκριθούν. Είναι εμφανές ότι στην ταχύτητα αυτή το VCSEL ξεκινάει να εισάγει περιορισμούς λόγω του περιορισμένου εύρους ζώνης του με αποτέλεσμα να έχουμε διασυμβολική παρεμβολή (Intersymbol Interference- ISI). Με τη χρήση του FFE αντισταθμίζεται το φαινόμενο αυτό και υποκαθίσταται η εικόνα του διαγράμματος ματιού [5.2], [5.3]. Παρόλα αυτά ο εφαρμοζόμενος FFE μειώνει το οπτικό πλάτος διαμόρφωσης (optical modulation amplitude-OMA) ιδιαίτερα για την περίπτωση του NRZ σήματος. Αυτό σημαίνει ότι το power penalty της τάξης των 4.7 dB στην περίπτωση του PAM-4 σήματος δεν ισχύει πλέον για και έχει καταπέσει στα 3.7 dB.

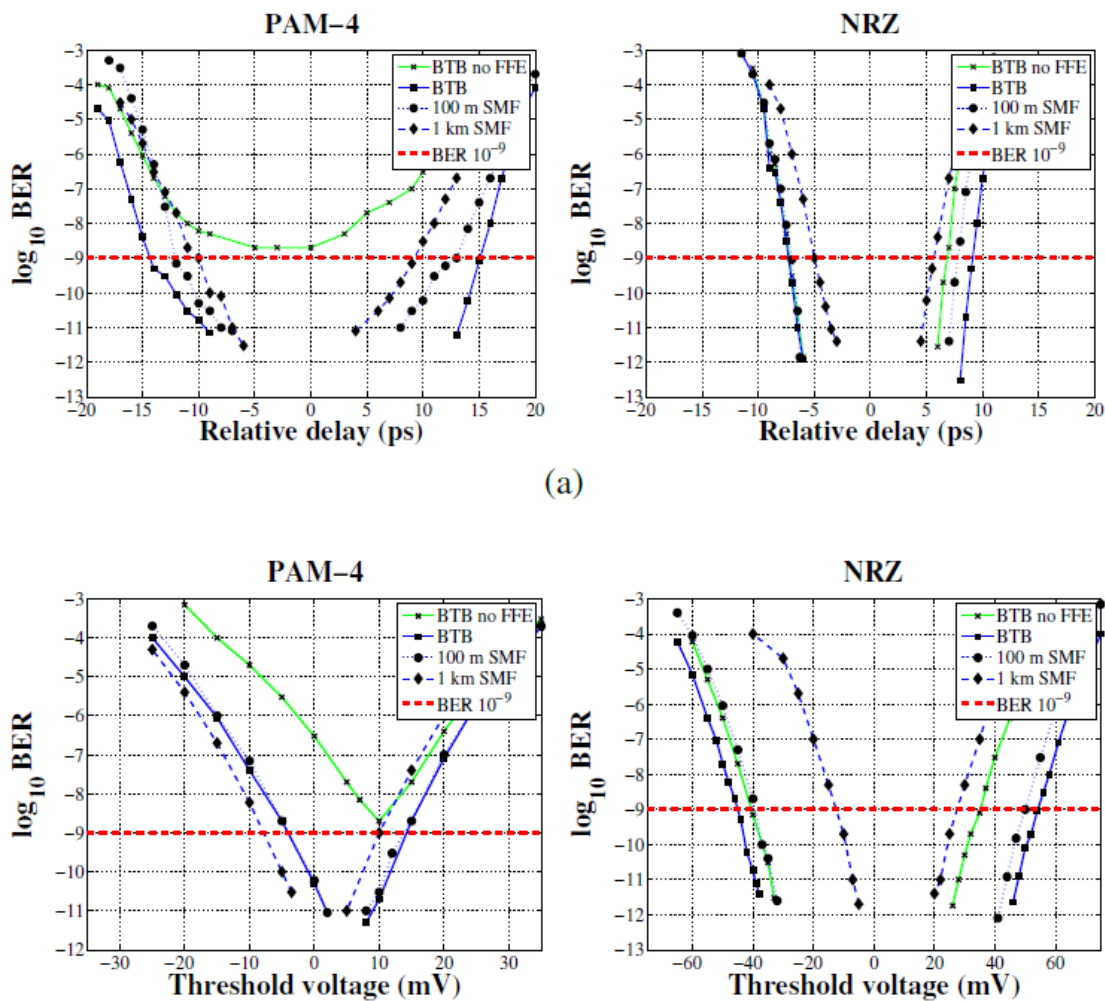


Εικόνα 100: 28 Gb/s PAM-4 και NRZ λαμβανόμενα διαγράμματα ματιού

Οι καμπύλες BER που αποτυπώνονται στο παρακάτω σχήμα σε συνδυασμό με τα διαγράμματα ματιού, αποδεικνύουν ότι η λειτουργία του FFE αποκαθιστά το ύψος και το πλάτος του ματιού κατά 30% και 17% αντίστοιχα στην περίπτωση του NRZ σήματος, ενώ στην περίπτωση του PAM-4 σήματος διαμορφώνει συνθήκες μετάδοσης χωρίς σφάλματα (error free). Οι δομικά ασύμμετροι χρόνοι ανόδου και καθόδου του VCSEL δεν αντισταθμίζονται από τον FFE όπως προκύπτει από το ασύμμετρο σχήμα των καμπυλών και των διαγραμμάτων ματιού. Η επέκταση της απόστασης διάδοσης στα 100 m και 1 km καταδεικνύει ότι και οι δυο μέθοδοι διαμόρφωσης υφίστανται παρόμοιο χρονικό περιορισμό ο οποίος είναι της τάξης του 35% στο 1 km σε σύγκριση με την περίπτωση της απευθείας διάδοσης (back-to-back). Επιπλέον, υπάρχει μια εμφανής επιβάρυνση στο κάθετο περιθώριο του διαγράμματος ματιού (vertical eye margin) [5.4], [5.5].

Στα 100 m το ύψος του διαγράμματος ματιού στην περίπτωση διαμόρφωσης NRZ, συμπιέζεται κατά 10% το οποίο ποσοστό ανεβαίνει στο 60% για την περίπτωση διάδοσης σε 1 km SMF ίνας. Μια μείωση μικρότερη από 5% στο ύψος του

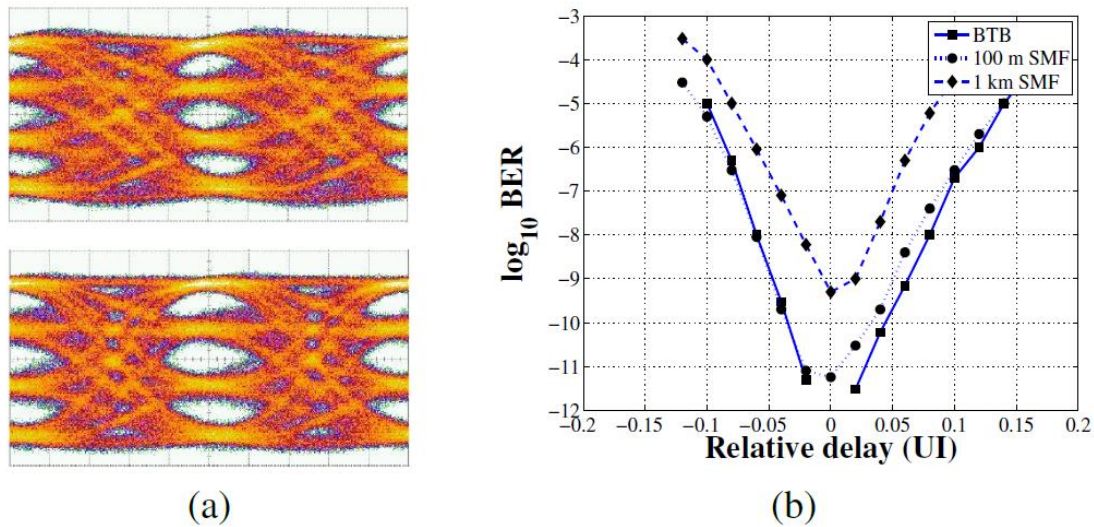
ανοίγματος του διαγράμματος ματιού στην περίπτωση διαμόρφωσης PAM-4 επιβεβαιώνει το αναμενόμενο, δηλαδή ότι ο συγκεκριμένος τρόπος διαμόρφωσης είναι πολύ πιο ανθεκτικός στη χρωματική διασπορά σε σχέση με τον NRZ στα VCSEL απευθείας διαμόρφωσης (directly modulated VCSELs). Παρόλο που τα αποτελέσματα του BER δείχνουν ότι η περίπτωση NRZ διαμόρφωσης έχει καλύτερη απόδοση από την PAM-4, πρέπει να σημειωθεί ότι ένα ασφαλές συμπέρασμα δεν μπορεί να εξαχθεί αν ο δέκτης δεν βελτιστοποιηθεί κατάλληλα για το κάθε σχήμα διαμόρφωσης. Παράμετροι όπως η ευαισθησία [5.6], η προ-ενίσχυση (pre-emphasis) [5.7] και η διασπορά θα μειώσουν περαιτέρω την επιβάρυνση ισχύος (power penalty) η οποία σχετίζεται με το PAM-4 όταν το bit rate αυξάνεται.



Εικόνα 101: Καμπύλες BER στα 28 Gb/s για PAM-4 και NRZ διαμόρφωση για τα διάφορα μήκη ίνας SMF. (α) Οριζόντιο περιθώριο διαγράμματος ματιού και (β) κάθετο περιθώριο διαγράμματος ματιού.

Η λειτουργία χωρίς λάθη διατηρήθηκε μέχρι τα 40 Gb/s στην περίπτωση της PAM-4 απευθείας διάδοσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 101. Η τιμή του BER ανεβαίνει στις τιμές  $10^{-11}$  και  $10^{-9}$  καθώς η απόσταση διάδοσης αυξάνει στα 100 m και 1 km αντίστοιχα. Με απόδοση ενέργειας (energy efficiency) ίση με 9.4 pJ/bit, ο συγκεκριμένος PAM-4 VCSEL πομπός είναι σε θέση να ανταγωνιστεί του πομπούς NRZ με τεχνολογία SiGe BiCMOS στα 850 nm όπως φαίνεται και από τον παρακάτω πίνακα [5.8], [5.9] (2, 3 στον παρακάτω πίνακα). Είναι σχεδόν τρεις φορές πιο αποδοτικός από έναν πομπό μεγάλου μήκους κύματος (long wavelength)

αποτελούμενο από ένα electro-absorption modulated edge-emitting laser [5.10] (4 στον παρακάτω πίνακα).



Εικόνα 102: 40 Gb/s PAM-4 διάδοση. (α) Το λαμβανόμενο διάγραμμα ματιού σε απευθείας διάδοση και διάδοση σε 1 km ίνας και (β) καμπύλη BER στο οριζόντιο περιθώριο του διαγράμματος ματιού για τα διάφορα μήκη διάδοσης

COMPARISON OF THE STATE OF THE ART IN OPTOELECTRONIC TRANSMITTERS

Reference	1	2	3	4	This work
Technology	32 nm SOI CMOS	0.13 $\mu$ m SiGe	0.13 $\mu$ m SiGe	150 GHz InP-DHBT	0.13 $\mu$ m SiGe
Bit rate (Gb/s)	35	40	64	56	40
Modulation format	NRZ	NRZ	NRZ	NRZ	PAM-4
Laser bandwidth (GHz)	N/A	16	26	35	>15
Supply voltage (V)	1.1/3.1	2.5/3.3	N/A	-5.2	2.5/3.85
Energy efficiency (pJ/bit)	1.3	7.8	14.1	26.8	9.4
Wavelength (nm)	850 nm	850 nm	850 nm	1300 nm	1550 nm

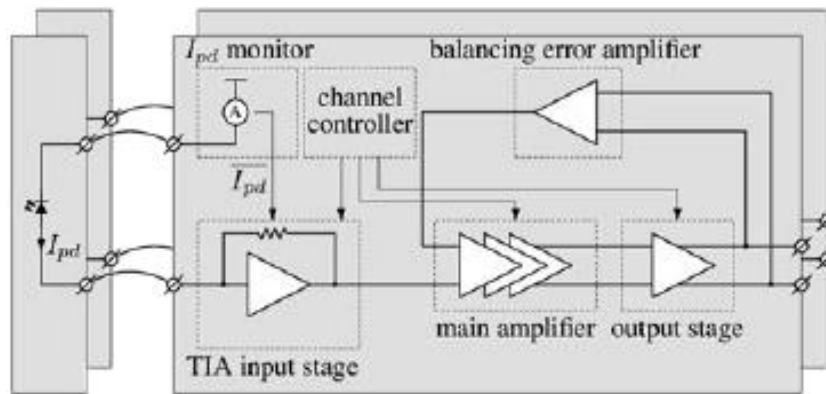
Πίνακας 18: Σύγκριση του state-of-the-art για οπτο-ηλεκτρονικούς πομπούς

## 5.2 Οπτο-ηλεκτρονικός Δέκτης υψηλών ταχυτήτων

### 5.2.1 Πρώτη γενιά δέκτη

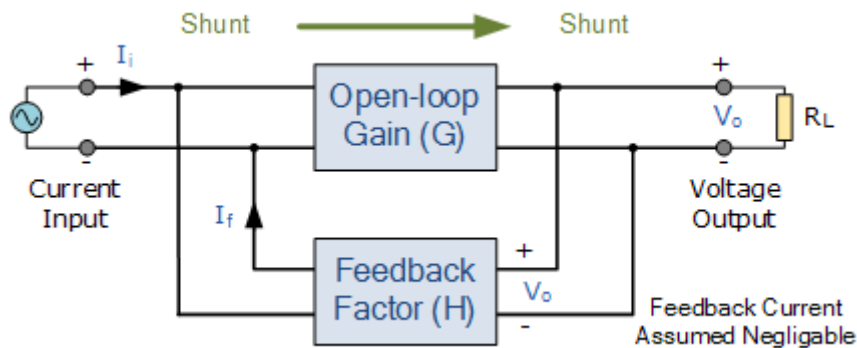
Το μπλοκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης του γραμμικού δέκτη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ο δέκτης αποτελείται από δυο όμοια κανάλια τα οποία «οδηγούν» τις αντίστοιχες φωτοδιόδους προσφέροντας τις κατάλληλες παραμέτρους για βελτίωση της συμπεριφοράς «υποδοχής» του σήματος. Οι φωτοδιόδοι έχουν απαντησιμότητα (responsivity) της τάξης των 0.44 A/W περιλαμβανομένων και το απωλειών σύζευξης (coupling losses) [5.12]. Ουσιαστικά η απαντησιμότητα μιας φωτοδιόδου όπως αναλυτικά περιγράφηκε και στο κεφάλαιο 2 μετράει την ηλεκτρική έξοδο (electrical output) ανά οπτική ισχύ εισόδου. Για γραμμικές δομές η τιμή της απαντησιμότητας είναι μοναδική ενώ για μη-γραμμικά συστήματα η τιμή αυτή έχει «τοπικό» χαρακτήρα και εξαρτάται από την τοπική κλίση της καμπύλης στο σημείο ενδιαφέροντος. Πρακτικά αυτό που μας δείχνει είναι την ουσιαστική απόδοση ενός δέκτη, δηλαδή τη δυνατότητα του να μεταφράζει την είσοδο σε έξοδο με όσο πιο απόλυτο τρόπο αυτό είναι εφικτό χωρίς απώλειες. Ο δρόμος των δεδομένων (data path) περιλαμβάνει έναν στάδιο εισόδου (input stage)

ενισχυτή δια-σύνθετης αντίστασης (transimpedance amplifier-TIA) [5.13], έναν γραμμικό κύριο ενισχυτή και ένα γραμμικό στάδιο εξόδου.



Εικόνα 103: Μπλοκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης των φωτοδιόδων

Το στάδιο εισόδου του TIA παρέχει είσοδο χαμηλής αντίστασης για το φωτορεύμα χάρις στην τοπολογία του ενισχυτή η οποία είναι της μορφής shunt-shunt ανάδρασης (shunt-shunt feedback) [5.14]. Η τοπολογία αυτή η οποία εναλλακτικά είναι γνωστή με το όνομα shunt ανάδραση τάσης (shunt voltage feedback), λειτουργεί σαν ένα σύστημα ανάδρασης με ελεγχόμενη τάση και ρεύμα (current-voltage controlled feedback system). Στην συγκεκριμένη αρχιτεκτονική το σήμα το οποίο ανατροφοδοτείται είναι παράλληλο με το σήμα εισόδου. Η τάση εξόδου ανιχνεύεται και το ρεύμα αφαιρείται από το ρεύμα εισόδου σε μια διακλάδωση.



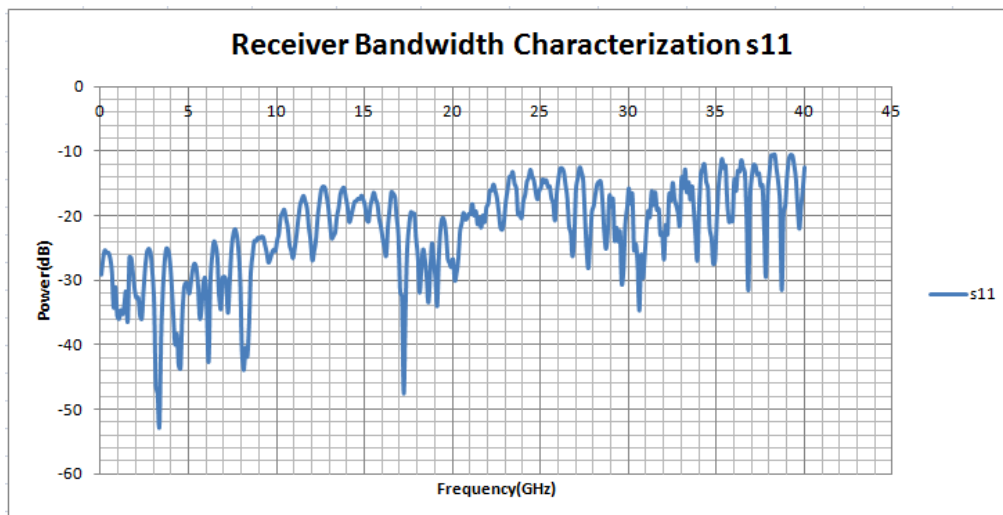
Εικόνα 104: Τυπική shunt- shunt τοπολογία ανάδρασης.

Η αντίσταση ανάδρασης υλοποιήθηκε ως ένα nMOS τρανζίστορ το οποίο γίνεται οδηγείται στη γραμμική του περιοχή ούτως ώστε να ελεγχθεί το κέρδος της δια-σύνθετης αντίστασης (transimpedance gain). Η τάση εξόδου αυτού του σταδίου εφαρμόζεται στην μη-αναστρέψιμη είσοδο του κύριου ενισχυτή, η οποία αποτελείται από τρία πλήρως διαφορεικά στάδια κέρδους. Το στάδιο εξόδου οδηγεί τη διαφορική αντίσταση φορτίου (differential load impedance) των 100 Ω. Τα τρία στάδια κέρδους και ο οδηγητής εξόδου (output driver) χρησιμοποιούν ένα διαφορικό ζευγάρι το οποίο εκφυλίζεται από ένα nMOS τρανζίστορ το οποίο τροφοδοτείται στη γραμμική του περιοχή προκειμένου να ελεγχθεί το κέρδος. Ένας βρόχος ελέγχου (control loop) διαμορφώθηκε χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή σφάλματος εξισορρόπησης (balancing error amplifier) ο οποίος απομακρύνει την dc συνιστώσα (dc-offset)

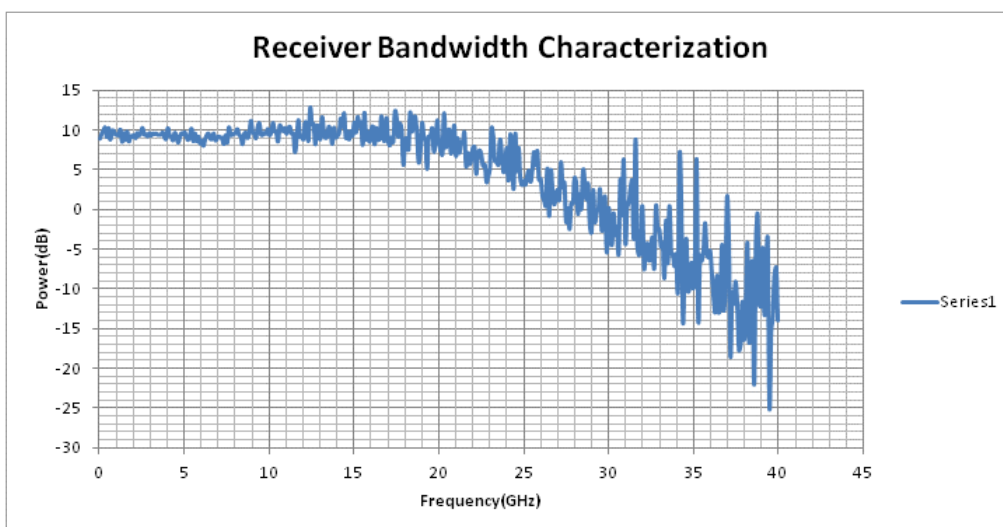
μεταξύ των δυο σημάτων εξόδου μέσω της ρύθμισης της dc τάσης στην αναστρέψιμη είσοδο του κύριου ενισχυτή [5.15]. Το πλακίδιο με ο κύκλωμα οδήγησης και της φωτοδιόδου παίρνει μια τροφοδοσία 2.5 V η οποία απαιτεί ρεύμα της τάξης των 66 mA ανά κανάλι. Ο γραμμικός δέκτης κατασκευάστηκε σε πλατφόρμα της τεχνολογίας 130 nm SiGe BiCMOS [5.16]. Το εμβαδό του chip ήταν 3000  $\mu\text{m}$  x 900  $\mu\text{m}$  με κάθε κανάλι να καταλαμβάνει χώρο μεγέθους 1100  $\mu\text{m}$  x 900  $\mu\text{m}$ .

### 5.2.1.1 RF χαρακτηρισμός δέκτη πρώτης γενιάς

Προκειμένου να ερευνηθεί το εύρος ζώνης του δέκτη αλλά και να προσδιοριστεί το κομμάτι των ανακλάσεων σε αυτός, έγινε rf χαρακτηρισμός του σε μικροκυματικό σταθμό βάσης (rf probe station). Στο σταθμό βάσης αυτόν όπως έχει περιγραφεί αναλυτικά και στο κεφάλαιο 2, με τη βοήθεια ενός VNA προσδιορίστηκαν οι s-παράμετροι από τις οποίες μπορούμε να εξαγάγουμε το εύρος ζώνης μιας δομής και συγκεκριμένα από την παράμετρο  $s_{21}$  που είναι και αυτή της διάδοσης. Στις παρακάτω εικόνες αποτυπώνονται τόσο το διάγραμμα της παραμέτρου  $s_{11}$  όσο και αυτό της παραμέτρου  $s_{21}$ .

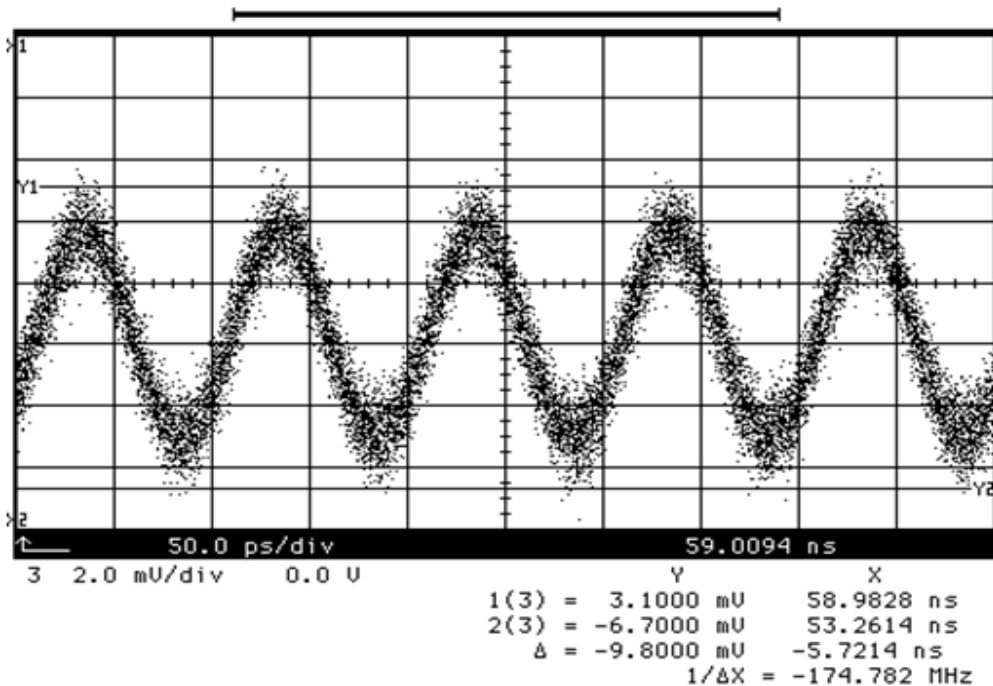


Εικόνα 105: Παράμετρος  $s_{11}$  του δέκτη



Εικόνα 106: Παράμετρος  $s_{21}$  του δέκτη

Όπως μπορούμε να εξάγουμε από το διάγραμμα s<sub>21</sub> το εύρος ζώνης του δέκτη είναι στα 21 GHz. Προκειμένου να ελέγξουμε την ευαισθησία του δέκτη στις αλλαγές της ισχύος, αλλάχθηκε τόσο η οπτική ισχύς εισόδου στο δέκτη όσο και η ισχύς του rf σήματος στον διαμορφωτή και παρατηρήθηκε ότι το εύρος ζώνης της δομής δεν μεταβάλλεται. Επιπλέον για να μετρηθεί το οπτικό πλάτος διαμόρφωσης (optical modulation amplitude- OMA) [5.17] επιστρατεύτηκε ένας μικροκυματικός φασματογράφος (rf spectrum analyzer). Το οπτικό πλάτος διαμόρφωσης είναι η διαφορά μεταξύ δυο οπτικών επιπέδων ισχύος ενός ψηφιακού σήματος και χρησιμοποιείται για να εκφράζει την ωφέλιμη διαμόρφωση σε ένα σήμα όταν αυτό έχει μικρό σηματοθορυβικό λόγο και άρα οποιαδήποτε προσέγγισή του μπορεί να είναι λανθασμένη.



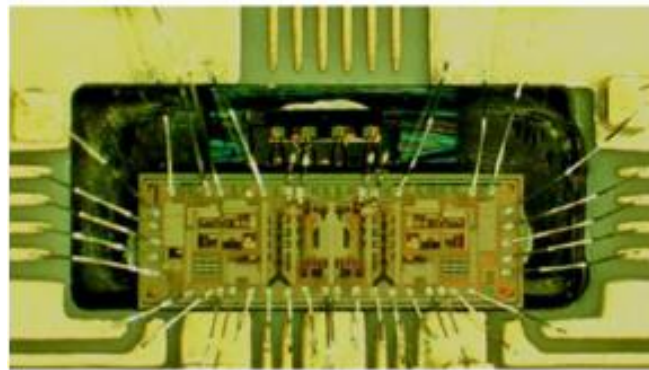
Εικόνα 107: Οπτικό πλάτος διαμόρφωσης του ψηφιακού μας σήματος στον δέκτη όπως αποτυπώθηκε με τη χρήση ενός μικροκυματικού φασματογράφου

Στη δεδομένη περίπτωση το φωτορεύμα που είχαμε ήταν 270  $\mu$ A και στην μέτρησή μας οι μέγιστη στάθμη βρέθηκε στα 3.1 mV και η ελάχιστη στα -6.7 mV με αποτέλεσμα το οπτικό πλάτος διαμόρφωσης της δομής να μετρηθεί 9.8 mV.

### 5.2.1.2 Μετρήσεις υψηλών ταχυτήτων με την πρώτη γενιά δέκτη

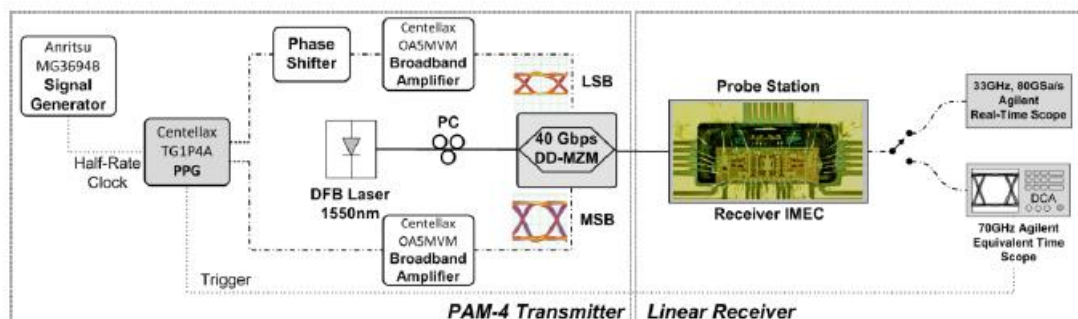
Προτού το ηλεκτρικό κύκλωμα του δέκτη κατασκευαστεί εξ' ολοκλήρου, μια πρώτη γενιά του δέκτη δοκιμάστηκε προκειμένου να διερευνηθεί η λειτουργία του. Το πινάκιο (board) του δέκτη έφερε πάνω του τόσο το κομμάτι των φωτοδιόδων όσο και το ηλεκτρικό κύκλωμα οδήγησης όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Οι δοκιμές χρησιμοποίησαν μια βήμα-προς-βήμα προσέγγιση (step-by-step approach) και έτσι ο δέκτης αρχικά δοκιμάστηκε σε σχήμα διαμόρφωσης κατά πλάτος δυο σταθμών (Non-return-to-Zero, NRZ) και εν συνεχεία σε σχήμα τεσσάρων σταθμών κατά πλάτος (PAM-4). Επίσης δοκιμάστηκαν διαφορετικά μήκη ψευδοτυχαίων

ακολουθιών συμβόλων (PRBS) προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή επίδραση που μπορεί να έχουν στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος.



Εικόνα 108: Εικόνα του γραμμικού δέκτη από το μικροσκόπιο

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση αυτής της γενιάς του δέκτη φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Με μικρή τροποποίηση χρησιμοποιήθηκε και για την κατασκευή του σήματος με διαμόρφωση δυο σταθμών και σε αυτή με διαμόρφωση τεσσάρων σταθμών. Βάση για τον πομπό μας ήταν ένας Mach-Zehnder διαμορφωτής (MZM) [5.18] στα 40 Gbps ο οποίος για την περίπτωση του σήματος δυο σταθμών οδηγήθηκε από την μια rf είσοδό του (single drive) ενώ για την περίπτωση της διαμόρφωσης τεσσάρων σταθμών οδηγήθηκε και από τις δυο rf εισόδους (dual drive) που είναι και η περίπτωση που αποτυπώνεται στην εικόνα της διάταξης. Για το οπτικό φέρον χρησιμοποιήθηκε ένα DFB laser στα 1550 nm και ένας ελεγκτής πόλωσης (polarization controller) για τον καθορισμό της γωνίας πρόσπτωσης του εισερχόμενου σήματος στον διαμορφωτή. Για το ηλεκτρικό σκέλος της διάταξης χρησιμοποιήθηκε μια γεννήτρια σήματος της οποίας η ταχύτητα ρυθμιζόταν αναλόγως με την επιθυμητό ρυθμό δεδομένων και μια γεννήτρια παλμών (pulse/pattern generator-PPG). Οι δύο έξοδοι της γεννήτρια παλμών (μια στην περίπτωση κατασκευής οπτικού σήματος δυο σταθμών) ενισχύθηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να δημιουργηθούν δυο ηλεκτρικά σήματα NRZ (MSB και LSB) με διαφορά πλάτους κατάλληλη για την κατασκευή ενός οπτικού σήματος τεσσάρων σταθμών στο διαμορφωτή.



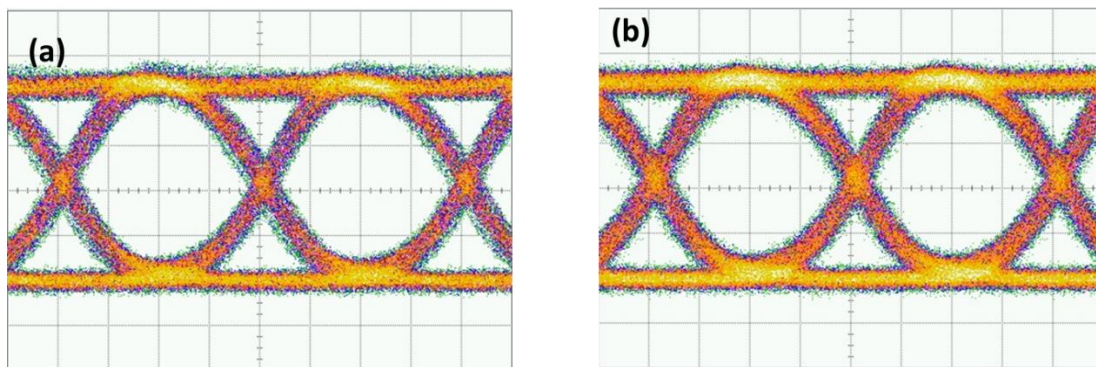
Εικόνα 109: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Για να φτάσει το οπτικό σήμα στο δέκτη, χρησιμοποιήθηκε κοινή μονότροπη οπτική ίνα η οποία και ευθυγραμμίστηκε με την φωτοδίοδο κάνοντας χρήση των τοποθετητών (positioners) ενός σταθμού βάσης (probe station). Η κατανάλωση

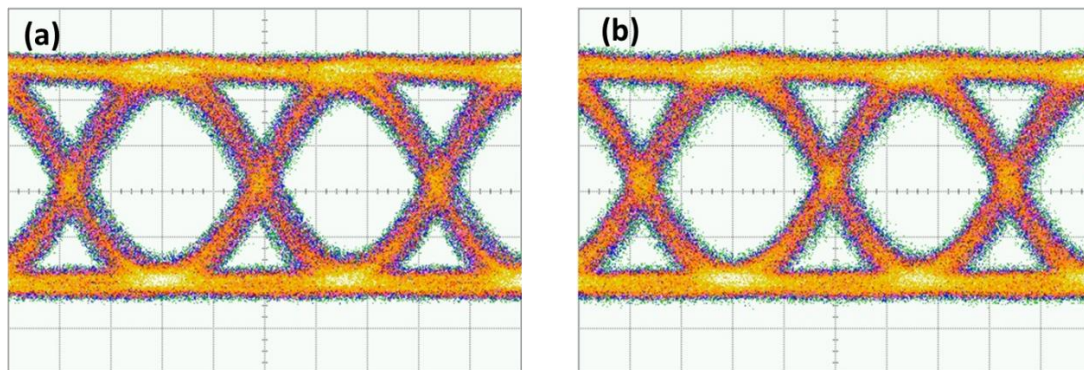


ισχύος στο δέκτη, μετά τις κατάλληλες ρυθμίσεις για την μέγιστη απόδοση, ήταν 165 mW η οποία μεταφράζεται σε κατανάλωση ενέργειας 2.578 pJ/bit στα 64 Gb/s/. Τα λαμβανόμενα διαγράμματα ματιού κατασκευάστηκαν με τη χρήση ενός equivalent time scope. Η απόδοση του λαμβανόμενου σήματος αξιολογήθηκε με μετρήσεις BER αφότου η έξοδος του γραμμικού δέκτη ψηφιοποιήθηκε με τη χρήση ενός 33 GHz, 80 GSa/s παλμογράφου πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope). Απλή επεξεργασία έγινε στο σήμα η οποία περιείχε ανάκτηση ρολογιού (clock recovery), επαναδειγματοληψία (re-sampling) και αυτόματο ορισμό κατωφλιού (automatic thresholding) για την ανίχνευση των συμβόλων, υποθέτοντας Gray κωδικοποίηση (Gray encoding) [5.19]. Η απόδοση του BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με την αρχική αλληλουχία των bit και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bit.

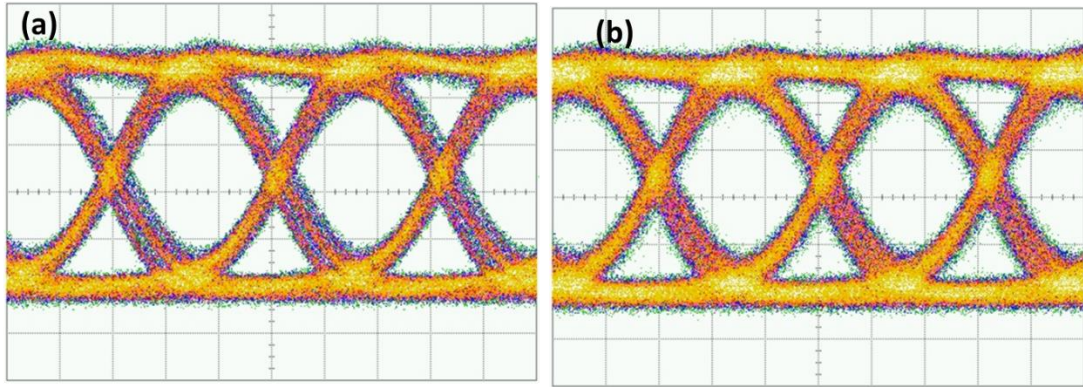
Παρακάτω εμφανίζονται τα διαγράμματα ματιού και η καμπύλες BER για την περίπτωση της διαμόρφωσης δυο σταθμών (NRZ).



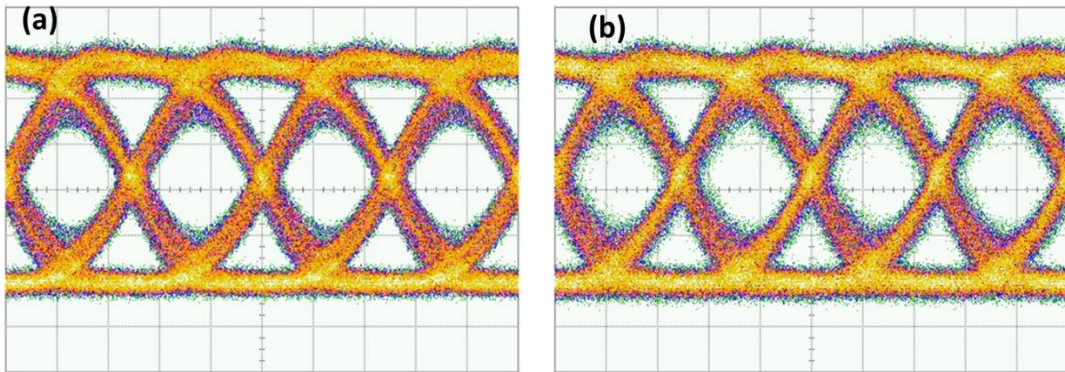
Εικόνα 110: Διαγράμματα ματιού στα 25 Gb/s για PRBS μήκος (α)  $2^7-1$  και (β)  $2^{15}-1$  σύμβολα



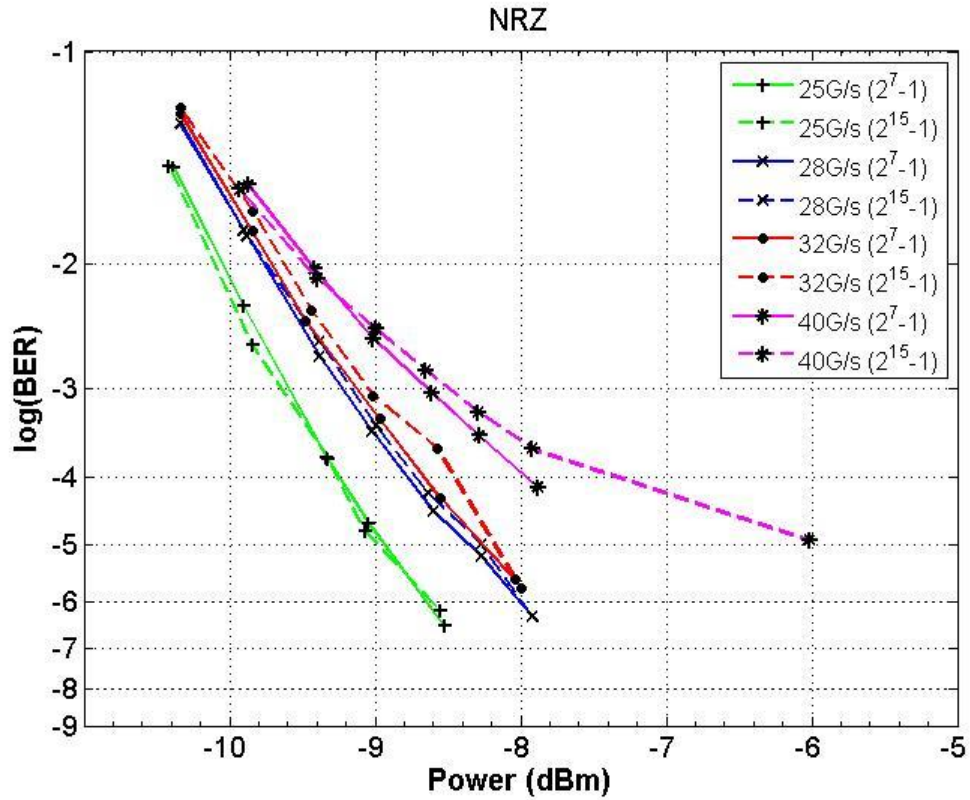
Εικόνα 111: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α)  $2^7-1$  και (β)  $2^{15}-1$  σύμβολα



Εικόνα 112: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α)  $2^7-1$  και (β)  $2^{15}-1$  σύμβολα



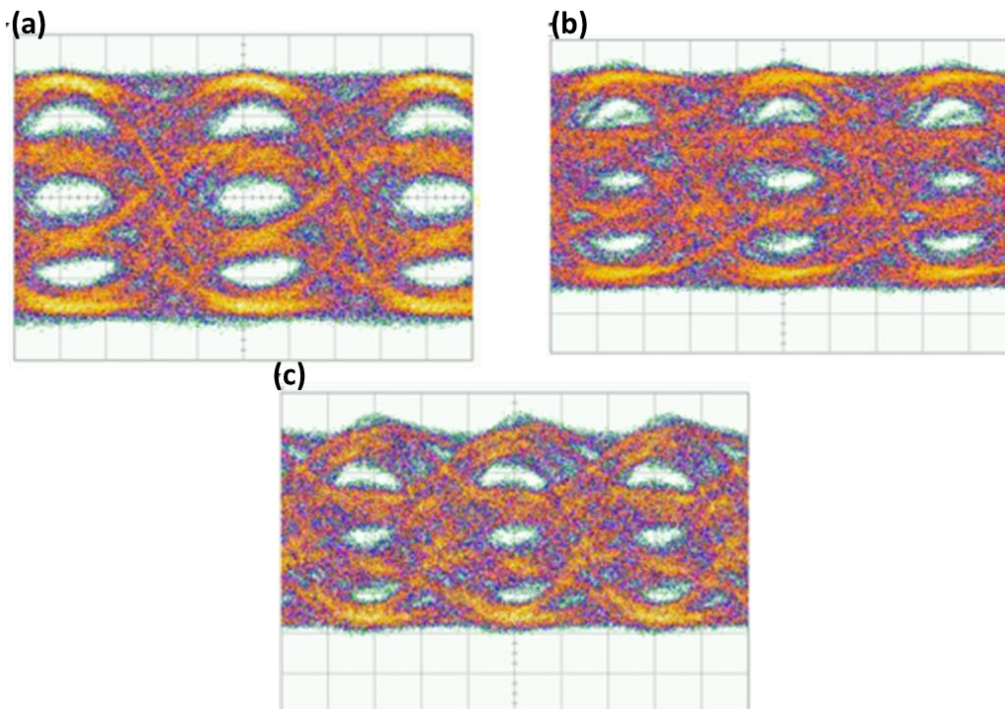
Εικόνα 113: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α)  $2^7-1$  και (β)  $2^{15}-1$  σύμβολα



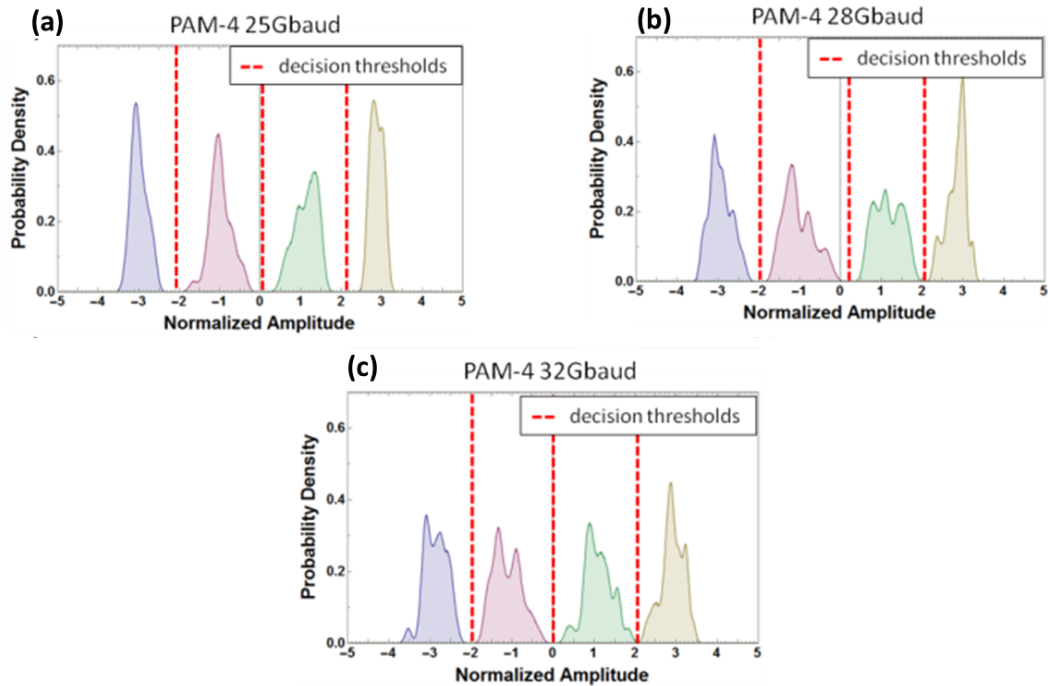
Εικόνα 114: Καμπύλες BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη για τις διαφορετικές περιπτώσεις ρυθμού συμβόλων και μήκους PRBS

Είναι εμφανές ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα διαγράμματα ματιού έχουν πολύ ικανοποιητικό «άνοιγμα» πράγμα το οποίο προμηνύει ότι η μετάδοση της πληροφορίας θα είναι απρόσκοπτη για τους συγκεκριμένους ρυθμούς συμβόλων. Το μήκος της PRBS φαίνεται να μην έχει μεγάλες επιπτώσεις στα λαμβανόμενα σήματά μας. Όπως βλέπουμε και από τις καμπύλες BER όντως η αλλαγή της PRBS έχει πολύ μικρή επίπτωση στην ποιότητα του σήματος. Συγκεκριμένα με την αύξηση του μήκους των συμβόλων έχουμε ελαφρά χειρότερη τιμή του BER. Επίσης, όπως είναι λογικό, με την αύξηση του ρυθμού των συμβόλων η τιμή του BER αυξάνεται. Πιο ειδικά βλέπουμε ότι στα 40 Gb/s έχουμε μια σημαντική υποβάθμιση του σήματος αλλά παρόλα αυτά κατορθώνουμε να επιτύχουμε τιμές BER κάτω από το όριο του FEC. Για τιμή BER ίση με  $10^{-4}$  το power penalty από τα 32 Gb/s στα 40 Gb/s είναι περίπου 0.5 dBm. Το αντίστοιχο power penalty για τιμή BER ίση με  $10^{-4}$  από τα 25 Gb/s στα 28 Gb/s είναι 0.8 dBm. Τέλος, το power penalty ο τα 28 Gb/s στα 32 Gb/s είναι αμελητέο. Μια σημαντική διαπίστωση είναι ότι με την αύξηση της ισχύος εισόδου στο δέκτη η τιμή του BER μικραίνει. Λόγω περιορισμού στην πειραματική διάταξη, δεν κατορθώσαμε να επιτύχουμε υψηλότερες τιμές ισχύος εισόδου στο δέκτη και άρα, όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα, δεν καταφέραμε να εξαντλήσουμε και τη γραμμική του περιοχή, πολλώ δε μάλλον να τον κορέσουμε.

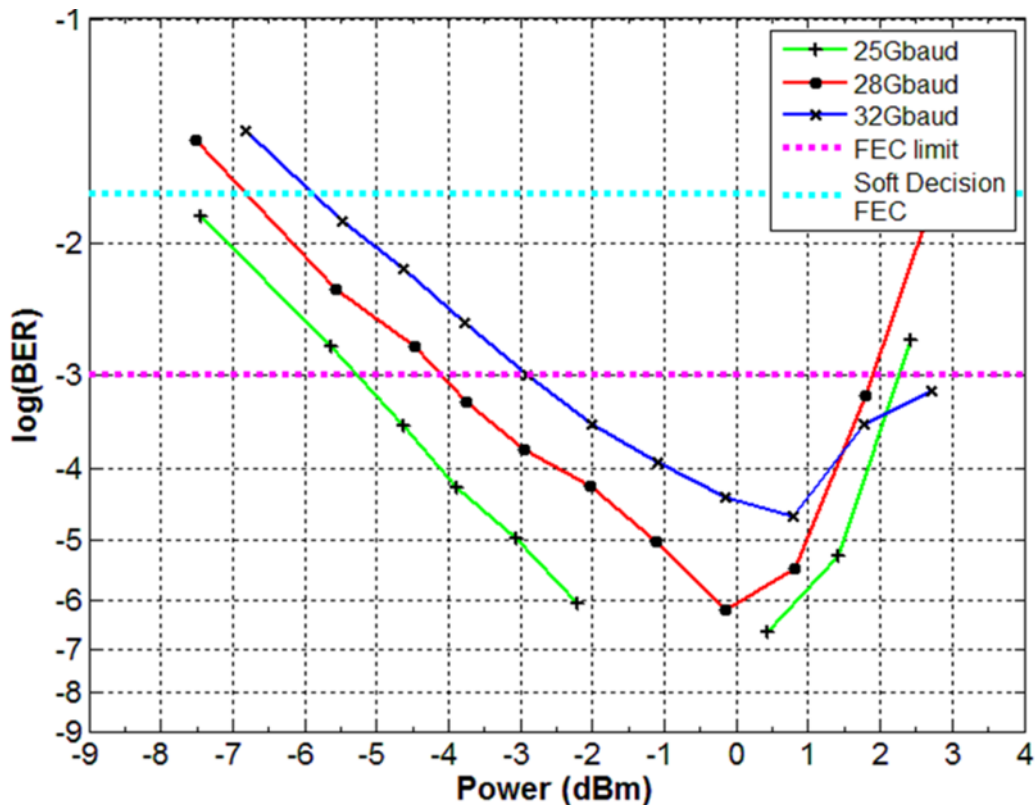
Τα διαγράμματα ματιού για την περίπτωση της διαμόρφωσης κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών και τα αντίστοιχα ιστογράμματα του λαμβανόμενου σήματος αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα. Επί της ουσίας τα ιστογράμματα δείχνουν την πυκνότητα της κατανομής της ισχύος στις τέσσερις στάθμες που αντιπροσωπεύουν τα σύμβολα στη συγκεκριμένη μέθοδο διαμόρφωσης. Επιπλέον παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες καμπύλες BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη.



Εικόνα 115: Διαγράμματα ματιού για διαμόρφωση κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών στα (α) 25 Gbaud, (β) 28 Gbaud και (γ) 32 Gbaud.



Εικόνα 116: Ιστογράμματα που αποτυπώνουν σε στάθμες την λαμβανόμενη ισχύ στο δέκτη.



Εικόνα 117: Καμπύλες BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη για περιπτώσεις μετάδοσης στα 25, 28 και 32 Gbaud

Είναι εμφανές ότι ακόμα και για ρυθμό συμβόλων 32 Gbaud, παρότι το σήμα χειροτερεύει το διάγραμμα ματιού είναι αρκετά «ανοικτό». Οι μεταβάσεις επίσης μεταξύ των σταθμών ενώ περιέχουν, όπως είναι λογικό, κάποιο θόρυβο είναι αρκετά καθαρές. Ο καθαρός διαχωρισμός μεταξύ των σταθμών του διαμορφωμένου σήματος

είναι εμφανής και στα ιστογράμματα που ακολουθούν κάτι το οποίο προμηνύει ικανοποιητική απόδοση του δέκτη. Στην Εικόνα 117 αποτυπώνονται οι καμπύλες BER για περιπτώσεις ρυθμού συμβόλων στα 25, 28 και 32 Gbaud ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος η οποία υπολογίζεται από το φωτορεύμα στο δέκτη. Είναι εμφανές ότι για ρυθμό συμβόλων στα 25 Gbaud έχουμε άριστη απόδοση. Ιδιαίτερα για τιμές ισχύος εισόδου μεταξύ -2 dBm και 0.4 dBm η λειτουργία του δέκτη έχει μηδενικά λάθη κάτι το οποίο αντιστοιχεί στο άνω 95% όριο εμπιστοσύνης (confidence limit) του  $2.9 \times 10^{-7}$ . Για ρυθμούς συμβόλων 28 και 32 Gbaud, παρότι δεν έχουμε error free λειτουργία, οι καμπύλες είναι αρκετά κάτω από το όριο του FEC πράγμα το οποίο αποδεικνύει ότι ο δέκτης μπορεί να λειτουργεί αδιάλειπτα σε αυτούς τους ρυθμούς [5.20]. Επιπλέον από το διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι για τιμές ισχύος εισόδου στο δέκτη μεταξύ -2 dBm και 1 dBm ο δέκτης έχει παρόμοια συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι μεταξύ αυτών των σημείων μπορούμε να εντοπίσουμε τη γραμμική του περιοχή. Προφανώς για τιμές ισχύος εισόδου μεγαλύτερες από 1 dBm η φωτοδίοδος του δέκτη ξεπερνάει τη γραμμική περιοχή λειτουργίας της και εν συνεχεία κορένεται έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος. Η επίδοση αυτή του δέκτη αποδεικνύει ότι η δομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οπτικές διασυνδέσεις οι οποίες ξεπερνούν τα 50 Gb/s ανά γραμμή (line rate).

## 5.2.2 Δεύτερης γενιάς δέκτης

Έχοντας ως βάση τις μετρήσεις για την απόδοση των συστοιχιών από TIAs της πρώτης γενιάς, επιχειρήθηκε από το IMEC μια δεύτερη βελτιωμένη προσέγγιση η οποία θα προσφέρει καλύτερη απόδοση. Συγκεκριμένα, έγινε ένας επανασχεδιασμός του σταδίου εισόδου του TIA ούτως ώστε να βελτιωθεί το δυναμικό του εύρος (dynamic range). Σε επίπεδο τεχνικών προδιαγραφών, η βελτίωση αποτυπώνεται στην κατανάλωση ισχύος ανά κανάλι η οποία μειώθηκε από 250 mW σε 170 mW. Στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται όλες οι τιμές ενδιαφέροντος για τη νέα γενιά του δέκτη.

Παράμετρος	Μικρότερη τιμή	Τυπική τιμή	Μέγιστη τιμή	Μονάδα
Peak-to-peak διαφορική τάση εξόδου	200	400		mV
Τάση τροφοδοσίας		2.5		V
Κατανάλωση ισχύος ανά κανάλι		170		mW
rms θόρυβος εισόδου @ 40 Gbaud		7.5	15	μA

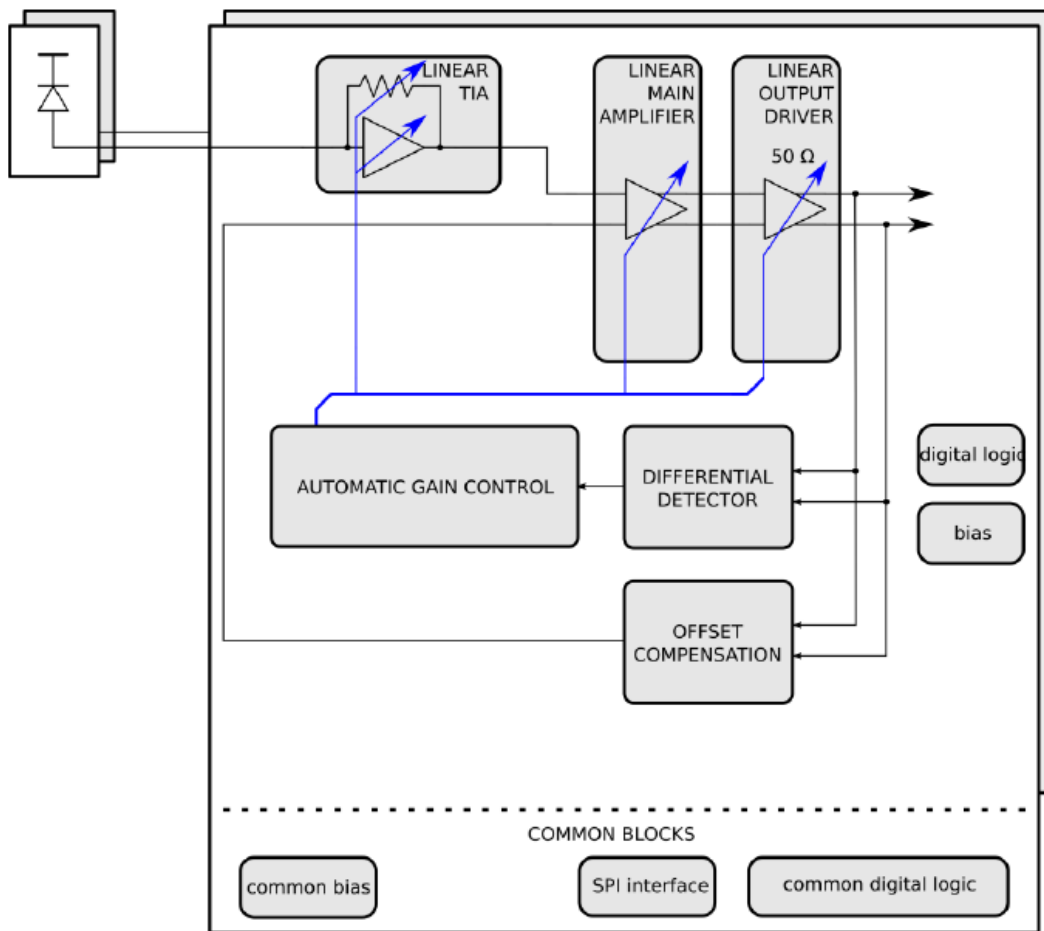
rms θόρυβος εισόδου @ 26 Gbaud		4.5	9	μΑ
Εύρος ζώνης @ 40 Gbaud		26		GHz
Εύρος ζώνης @ 26 Gbaud		17		GHz
Μέγιστο peak-to-peak ρεύμα εισόδου (για να επιτευχθεί BER<10 <sup>-12</sup> )	2			mA

Πίνακας 19: Τεχνικές προδιαγραφές της δεύτερης γενιάς δέκτη

Επιγραμματικά τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του TIA οδηγητή είναι τα παρακάτω:

- Οι PAM-4 έξοδοι δεδομένων είναι διαφορικές και μπορούν να είναι είτε DC- είτε AC- συζευγμένες. Ο τύπος της σηματοδοσίας (signaling) είναι “Current-Mode Logic” (CML) [5.21] με διαφορική τάση μεγαλύτερη από 200 mV<sub>pp</sub> και τάση κοινού τρόπου (common-mode voltage) στα 2.1 V . Η CML είναι μια διαφορική ψηφιακή λογική η οποία χρησιμοποιείται για την μετάδοση δεδομένων σε ταχύτητες έως και 3.125 Gb/s μέσα σε πίνακες τυπωμένων κυκλωμάτων (printed circuit boards-PCBs). Η διάδοση κατά τη λογική αυτή γίνεται από σημείο προς σημείο (point-to-point) και συνήθως τερματίζεται όταν φτάσει στον επιθυμητό προορισμό της με αντιστάσεις των 50 Ω προς την παροχή ισχύος.
- Σειριακή περιφερειακή διεπαφή (serial peripheral interface-SPI) με 5 pins και συμβατή με 2.5 V CMOS.
- 3.3 V παροχή για τις φωτοδιόδους
- Μια ανοδική και δυο καθοδικές συνδέσεις για τις φωτοδιόδους
- Παροχή τάσης 2.5 V για το αναλογικό κύκλωμα
- 1.2 V παροχή για τα ψηφιακά κελιά (digital cells) κατά τον έλεγχο του κέρδους (gain control)
- Εξωτερική αντίσταση παροχής (bias resistor) 5kΩ ή 100 μΑ παροχή ρεύματος
- Προαιρετικό ελεγκτή αυτόματου κέρδους (automatic gain control- AGC) για την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων του ρεύματος.

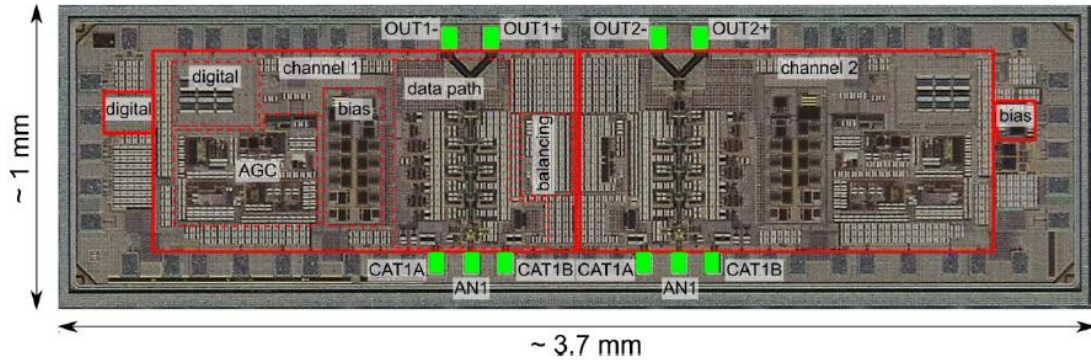
Η δεύτερη γενιά του TIA είναι βασισμένη στην πρώτη με βελτιωμένο επανασχεδιασμό στο TIA front-end ούτως ώστε να βελτιωθεί η συνολική του απόδοση. Η τοπολογία και η φιλοσοφία σχεδιασμού είναι αντίστοιχη με την αρχική. Ένας ελεγκτής κέρδους/εύρους ζώνης ο οποίος τροφοδοτείται από μια ενέργεια (event-driven), επιτρέπει τον προγραμματισμό των διάφορων ρυθμίσεων της τροφοδοσίας (bias settings) κάθε σταδίου ούτως ώστε να ελεγχθεί το κέρδος και το εύρος ζώνης για τα διάφορα στάδια εισόδου. Η αρχιτεκτονική του TIA οδηγητή σε υψηλότερο επίπεδο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 118: Μπλοκ διάγραμμα της δεύτερης γενιάς της 2x1 TIA συστοιχίας

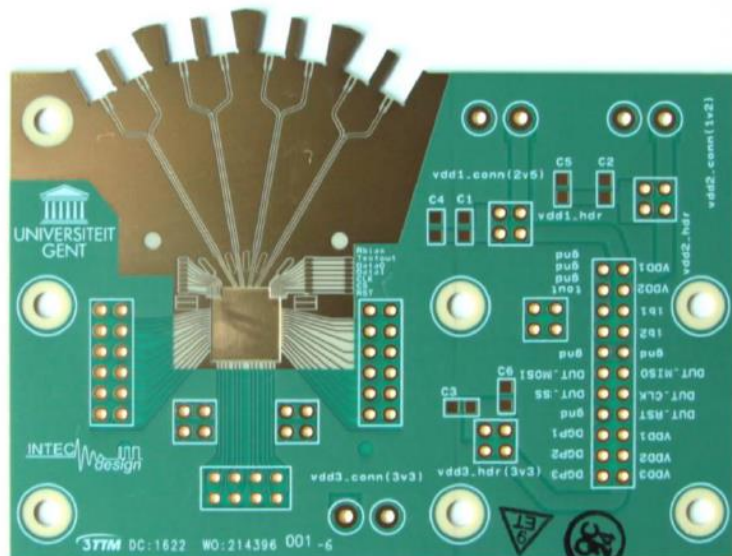
Όσον αφορά στον επανασχεδιασμό του σταδίου εισόδου του TIA, αυτό διαμορφώθηκε ούτως ώστε να μπορεί να είναι πλήρως ρυθμιζόμενο. Το κέρδος του ενισχυτή δια-σύνθετης αντίστασης (transimpedance amplifier) και το κέρδος βρόχου μπορούν να ελεγχθούν πλήρως. Επιπλέον, διάφορες τάσεις τροφοδοσίας (bias voltages) και ρεύματα είναι ελέγξιμα μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής. Οι δυνατότητες αυτές επιτρέπουν την ακριβή διαμόρφωση του εύρους ζώνης, του κέρδους και της γραμμικότητας του σταδίου για τις διάφορες τιμές ισχύος εισόδου.

Δυο πανομοιότυπα αλλά κατοπτρικά τοποθετημένα κανάλια χρησιμοποιήθηκαν πάνω σε ένα πλακίδιο με κοινό block τροφοδοσίας (bias block) και σειριακή περιφερειακή διεπαφή. Κατασκευάστηκε σε 130 nm SiGe BiCMOS πλατφόρμα από την ST microelectronics. Η μικρογραφία του καλουπιού που χρησιμοποιήθηκε με τα σημαντικά blocks και τις εισόδους-εξόδους τους αποτυπώνεται στην παρακάτω εικόνα. Η δομή έχει διαστάσεις 3.7 mm x 1 mm ενώ η απόσταση μεταξύ των pads εισόδου της ανόδου αυξήθηκε από 500 μm που ήταν στην πρώτη γενιά σε 750 μm.



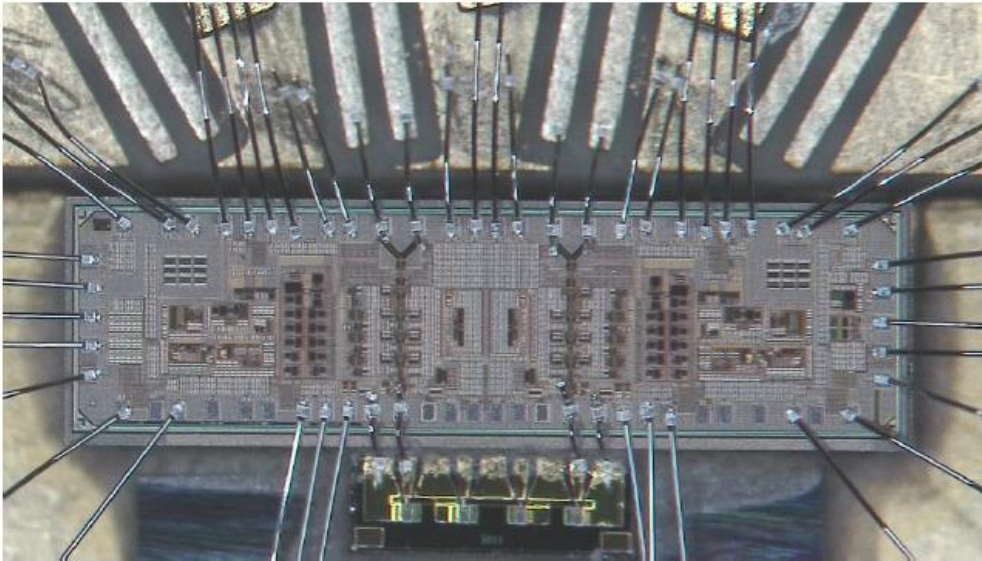
Εικόνα 119: Μικρογραφία του ΤΙΑ δεύτερης γενιάς με αποτυπωμένα τα σημαντικά blocks της δομής καθώς και τα pads εισόδου-εξόδου.

Προκειμένου η δομή να είναι έτοιμη να δοκιμαστεί πειραματικά σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το IMEC ένα PCB που θα τη φιλοξενήσει. Ο δεύτερης γενιάς ΤΙΑ και η PIN συστοιχία φωτοдиодων συνδέθηκαν με το PCB μέσω wire bonds.



Εικόνα 120: Το PCB που φιλοξένησε τον δεύτερης γενιάς δέκτη

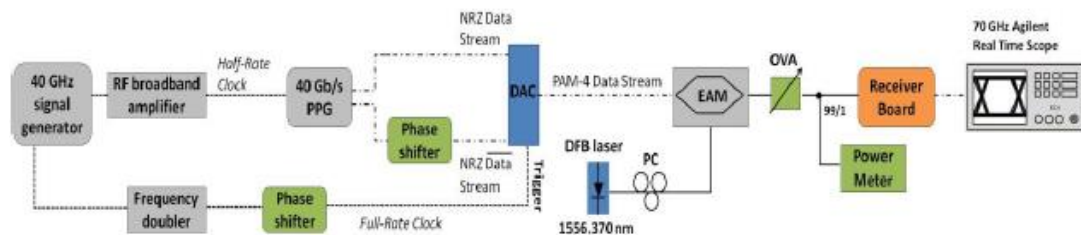




Εικόνα 121: Η λεπτομέρεια του wire-bonded δέκτη με την δεύτερης γενιάς δομή των TIAs και των φωτοδιόδων.

### 5.2.2.1 Πείραμα σε ταχύτητα μέχρι 35 Gbaud με τον γραμμικό δέκτη και εμπορικά διαθέσιμο πομπό

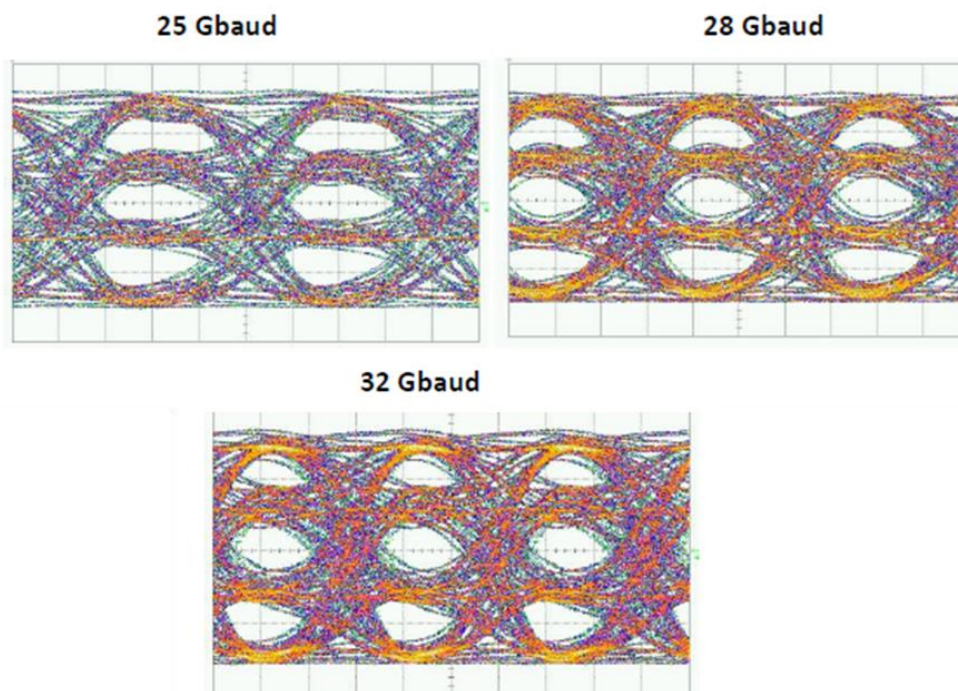
Ο γραμμικός δέκτης αξιολογήθηκε σε υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων ούτως ώστε να διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης του σε εφαρμογές οπτικών διασυνδέσεων με σχήμα διαμόρφωσης τεσσάρων σταθμών και σε ταχύτητες μεγαλύτερες από 56 Gb/s [5.22]. Για τον λόγο αυτό στήθηκε μια πειραματική διάταξη με έναν PAM-4 πομπό ο οποίος στηρίζονταν σε έναν εμπορικά διαθέσιμο 40 Gb/s διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης (Electro-absorption modulator- EAM) [5.23]. Το 3-dB εύρος ζώνης του διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης ήταν στα 23.4 GHz. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 122: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή του γραμμικού δέκτη σε υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης.

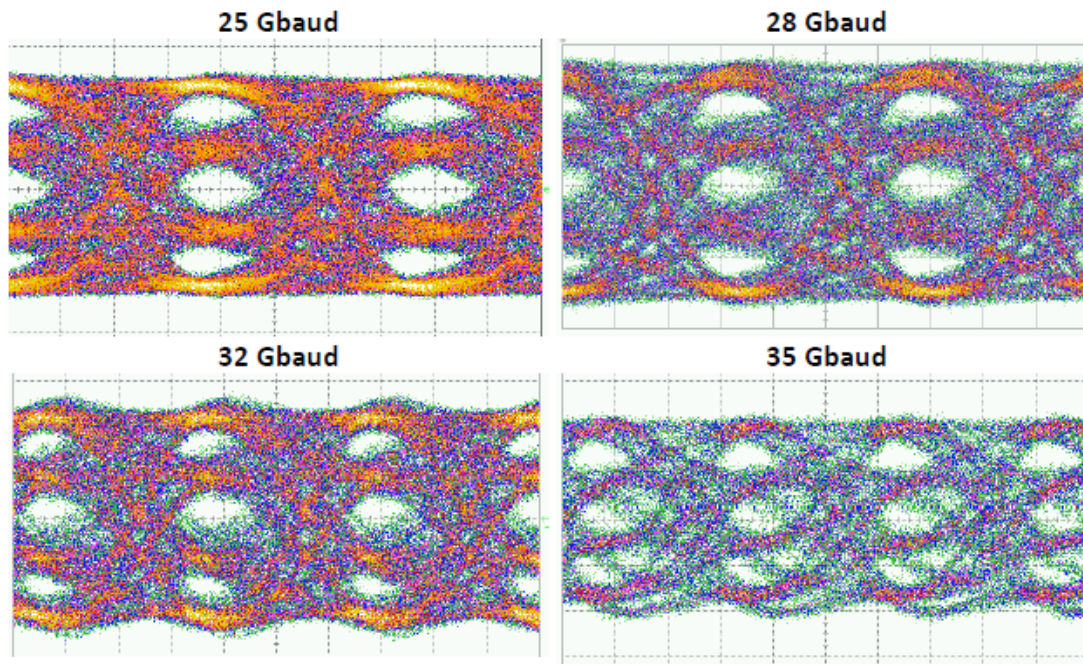
Πιο αναλυτικά, η οπτική φέρουσα παράχθηκε από ένα laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed Feedback laser- DFB) [5.24] το οποίο βρισκόταν σε λειτουργία συνεχούς κύματος (continuous wave- CW). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι το laser είχε μια σταθερή ακτίνα εξόδου με ελεγχόμενη θερμοκρασία, διάρκεια και ένταση. Προκειμένου να δημιουργηθεί το ηλεκτρικό σήμα που θα οδηγήσει τον διαμορφωτή κατασκευάστηκαν δυο δυαδικοί «δρόμοι» δεδομένων (MSB και LSB) οι οποίοι ήταν συμπληρωματικοί μεταξύ τους. Οι δυο αυτές ροές δεδομένων ήταν οι έξοδοι μιας γεννήτριας παλμών (pulse/pattern generator- PPG) η οποία παρήγαγε δυο

συμπληρωματικές ψευδοτυχαίες ακολουθίες data και  $\overline{data}$  με μήκος  $2^9-1$  σύμβολα. Για να αποσυσχετιστούν πλήρως οι δυο αυτές ροές δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν μικροκυματικά καλώδια (rf cables) με διαφορετικά μήκη ούτως ώστε να εισαχθεί κατάλληλη διαφορική καθυστέρηση. Ένας ηλεκτρικός στροφέας φάσης (phase shifter) χρησιμοποιήθηκε για το συγχρονισμό των περιόδων των bits των δυο ροών. Εν συνεχεία, ένας ψηφιακός-σε-αναλογικό μετατροπέας (digital-to-analog converter-DAC) δημιούργησε το ψηφιακό σήμα τεσσάρων σταθμών ρυθμίζοντας κατάλληλα τα επίπεδα. Τέλος, για το συγχρονισμό του PPG (απαίτηση για half-rate clock) και του DAC (απαίτηση για full-rate clock) χρησιμοποιήθηκε μια παλμογεννήτρια στα 40 GHz και ένας διπλασιαστής συχνότητας (frequency doubler). Τα ηλεκτρικά διαγράμματα ματιού στην είσοδο του διαμορφωτή ηλεκτρο-απορρόφησης φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



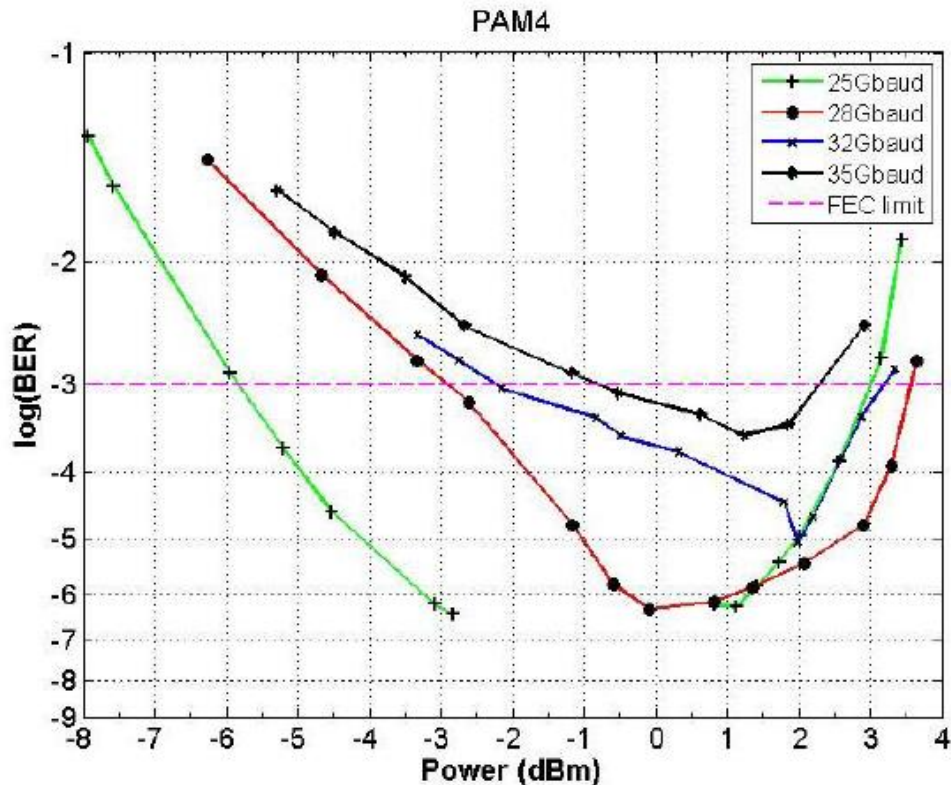
Εικόνα 123:PAM-4 ηλεκτρικά διαγράμματα ματιού στην είσοδο του EAM

Το οπτικό διαμορφωμένο σήμα τεσσάρων σταθμών εισήχθη στον γραμμικό δέκτη και τα διαγράμματα ματιού αποτυπώθηκαν σε ένα παλμογράφο ισοδύναμου χρόνου (equivalent time oscilloscope) στα 70 GHz. Τα διαγράμματα ματιού για ρυθμούς δεδομένων στα 25, 28, 32 και 35 Gbaud αποτυπώνονται στην παρακάτω εικόνα. Όπως είναι λογικό, για χαμηλότερους ρυθμούς συμβόλων τα διαγράμματα ματιού είναι πιο «ανοικτά» ενώ όσο αυξάνεται ο ρυθμός τα διαγράμματα χειροτερεύουν εξαιτίας του περιορισμού εύρους ζώνης που επιβάλλει τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης [5.25].



Εικόνα 124: PAM-4 οπτικά διαγράμματα ματιού στην έξοδο του γραμμικού δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης στα 25, 28, 32 και 35 Gbaud.

Προκειμένου να αξιολογηθεί η απόδοση του λαμβανόμενου σήματος, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις BER αφότου η έξοδος του γραμμικού δέκτη ψηφιοποιήθηκε με τη χρήση ενός 33 GHz, 80 GSa/s παλμογράφου πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope). Απλή επεξεργασία έγινε στο σήμα η οποία περιείχε ανάκτηση ρολογιού (clock recovery), επαναδειγματοληψία (re-sampling) και αυτόματο ορισμό κατωφλιού (automatic thresholding) για την ανίχνευση των συμβόλων, υποθέτοντας Gray κωδικοποίηση (Gray encoding). Η απόδοση του BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με την αρχική αλληλουχία των bit και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bit.

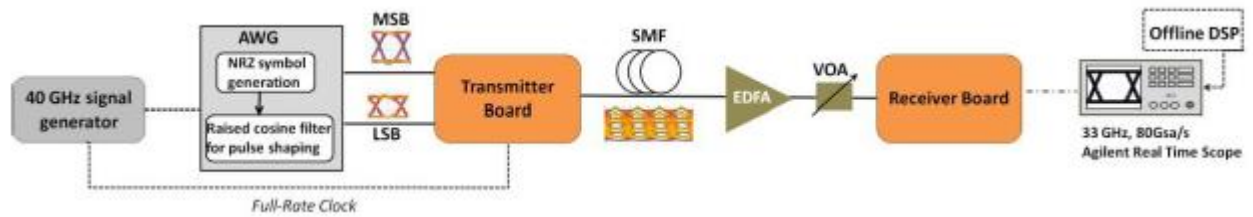


Εικόνα 125: Καμπύλες BER για ρυθμούς συμβόλων 25, 28, 32 και 35 Gbaud

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνονται οι καμπύλες BER ως συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης ισχύος για ρυθμούς συμβόλων 25, 28, 32 και 35 Gbaud. όπως παρατηρείται, στα 25 Gbaud και για μέση ισχύ εισόδου (στο δέκτη) μεταξύ -6 dBm και +3 dBm, το λαμβανόμενο σήμα δεν έχει καθόλου λάθη, κάτι το οποίο αντιστοιχεί στο ανώτερο 95% όριο εμπιστοσύνης (confidence limit) του  $2.9 \times 10^{-7}$ . Ακόμα και στην περίπτωση των 35 Gbaud η τιμή του BER βρίσκεται κάτω από το όριο του FEC, αποδεικνύοντας την καταλληλότητα του γραμμικού δέκτη για εφαρμογή ακόμα και σε οπτικές διασυνδέσεις μακρινών αποστάσεων (long-reach optical interconnects) [5.26]. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιορισμένη δυνατότητα λήψης δεδομένων του παλμογράφου πραγματικού χρόνου ( $1.28 \times 10^7$  στα 25 Gbaud), έθεσε ένα περιορισμό στο χαμηλότερο μετρούμενο BER.

### 5.3 Πείραμα οπτικού πομπού και δέκτη

Για να αξιολογηθεί η απόδοση μιας πλήρους ζεύξης (link) μεταξύ πομπού και δέκτη, πραγματοποιήθηκε μια πειραματική μέτρηση χρησιμοποιώντας σχήμα διαμόρφωσης ανώτερης τάξης και συγκεκριμένα διαμόρφωσης κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών (PAM-4). Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας δεν ελέγχθηκε απλά η λειτουργία των δομών αλλά επιχειρήθηκε η οδήγησή τους στην μεγαλύτερη δυνατή μετάδοση δεδομένων ούτως ώστε να διαπιστωθεί η καταλληλότητά τους για χρήση ως ενεργά οπτικά καλώδια υψηλής ταχύτητας μετάδοσης. Η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



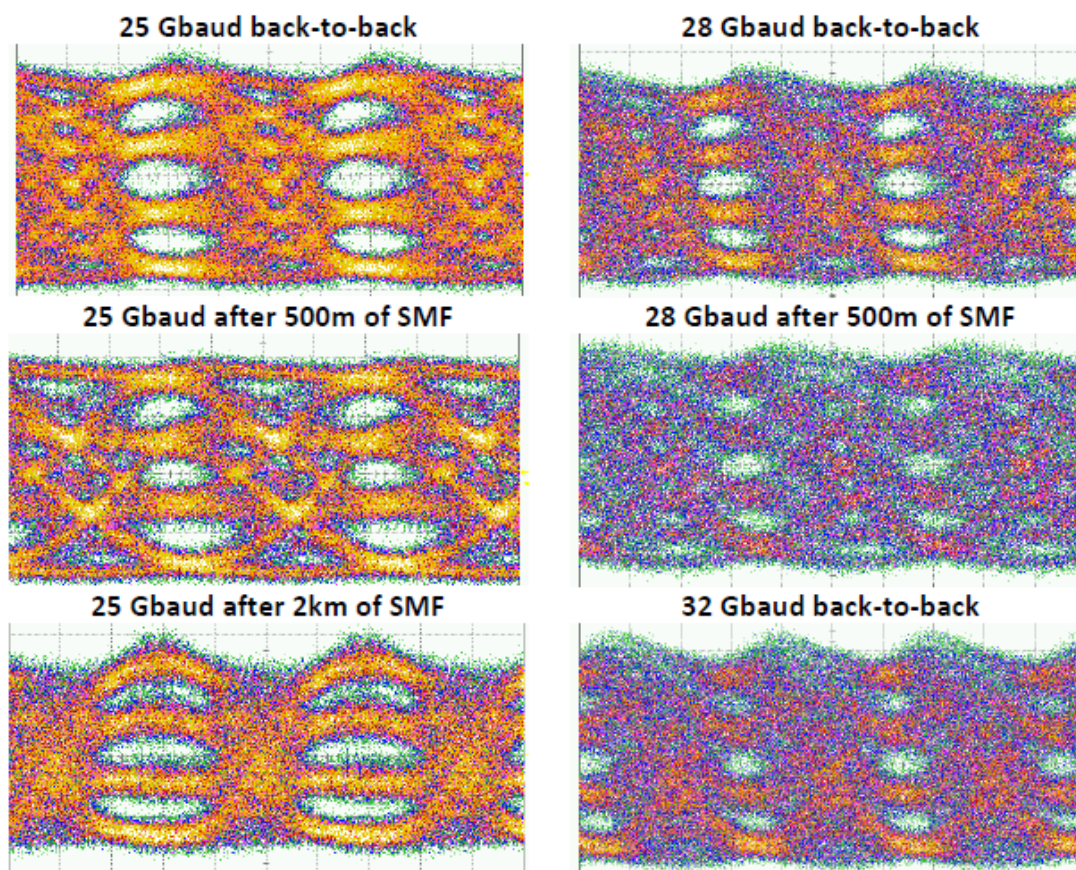
Εικόνα 126: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της πλήρους ζεύξης.

Στη μεριά της εκπομπής προκειμένου να κατασκευαστεί το ηλεκτρικό διαμορφωμένο σήμα που θα τροφοδοτήσει την πλατφόρμα του πομπού χρησιμοποιήθηκε μια 8-bit, 65 GSa/s παλμογεννήτρια AWG από την Keysight. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι δυο μονές έξοδοί της (single-ended outputs) για την κατασκευή δυο πανομοιότυπων NRZ σημάτων με επαναλαμβανόμενο μοτίβο (repeating pattern) με μήκος  $2^9-1$  σύμβολα και πλάτος 500 mV<sub>P-P</sub>. Τα δυο ηλεκτρικά αυτά σήματα τροφοδότησαν τις αντίστοιχες ροές εισόδου του περισσότερο και λιγότερο χρήσιμου bit (MSB-LSB) πάνω στην πλακέτα του πομπού (transmitter board). Οι εισοδοί αυτοί ήταν AC- συζευγμένες (AC-coupled) πράγμα το οποίο σημαίνει ότι χρησιμοποιούν στο ηλεκτρικό τους κύκλωμα έναν πυκνωτή προκειμένου να φιλτράρει την DC συνιστώσα του σήματος η οποία δρα ως offset στην τάση. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αύξηση της ανάλυσης (resolution) μιας μέτρησης του σήματος.

Ούτως ώστε να αποσυσχετιστούν πλήρως οι δυο έξοδοι από την παλμογεννήτρια εισήχθη μια καθυστέρηση της τάξης των 10 bits μεταξύ των δυο εξόδων της. Ο ρυθμός συμβόλων (baud rate) ρυθμίστηκε σε μια ποικιλία από τιμές προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση του link σε διάφορα σενάρια μετάδοσης. Για να περιοριστεί το εύρος ζώνης του σήματος και να συμπιεστούν οι πλευρικοί του λοβοί, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο Raised Cosine (RC) με παράγοντα roll-off ίσο με  $\alpha=1$ . Μια επιπλέον παλμογεννήτρια στα 40 GHz χρησιμοποιήθηκε για να κλειδώσει στο επίπεδο της φάσης την πλακέτα του πομπού με την παλμογεννήτρια AWG. Η αρχιτεκτονική της πλακέτας ήταν τέτοια που απαιτούσε ένα πλήρες ρολόι αναφοράς ως είσοδο (full rate clock). Το διαμορφωμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών μετά τον πομπό διαδόθηκε σε μονορρυθμικές ίνες με μήκος 500 m και 2 km, αποστάσεις οι οποίες είναι τυπικές στην περίπτωση συνδεσιμότητας εντός ενός κέντρου δικτύων (intra-datacenter connectivity). Ένας οπτικός ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA) και ένας ρυθμιζόμενος οπτικός αποσβέτης χρησιμοποιήθηκαν ούτως ώστε να ρυθμίζεται κατάλληλα η εγχεόμενη οπτική ισχύς στο γραμμικό δέκτη διευκολύνοντας έτσι την μέτρηση της τιμής του BER ως συνάρτηση της ισχύος.

Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται τα διαγράμματα ματιού (eye diagrams) για ρυθμούς συμβόλων 25, 28 και 32 Gbaud. Επιπρόσθετα, ελέγχονται τρεις διαφορετικοί τύποι διάδοσης: απευθείας διάδοση (back-to-back) και διάδοση στα 500 m και 2 km. Όπως αναμενόταν, για χαμηλότερους ρυθμούς συμβόλων τα διαγράμματα ματιού είναι πιο «ανοικτά» με δεδομένο ότι δεν περιορίζεται τόσο το εύρος ζώνης της πληροφορίας από το αντίστοιχο εύρος ζώνης των στοιχείων της διάταξης. Πιο καθοριστική σημασία από μεριάς περιορισμού του εύρους ζώνης έχει ο πομπός και

συγκεκριμένα η δομή του VCSEL. Ένας άλλος λόγος ο οποίος οδηγεί στο «κλείσιμο» του ματιού, και ιδιαίτερα στη συγκεκριμένη περίπτωση που έχουμε διαμόρφωση κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών, είναι και το φαινόμενο της διασυμβολικής παρεμβολής (Intersymbol Interference- ISI) [5.27] το οποίο προκαλείται από τα γραμμικά και μη γραμμικά φαινόμενα σε ένα κανάλι και είναι πιο καθοριστικό σε μεγαλύτερες αποστάσεις διάδοσης.

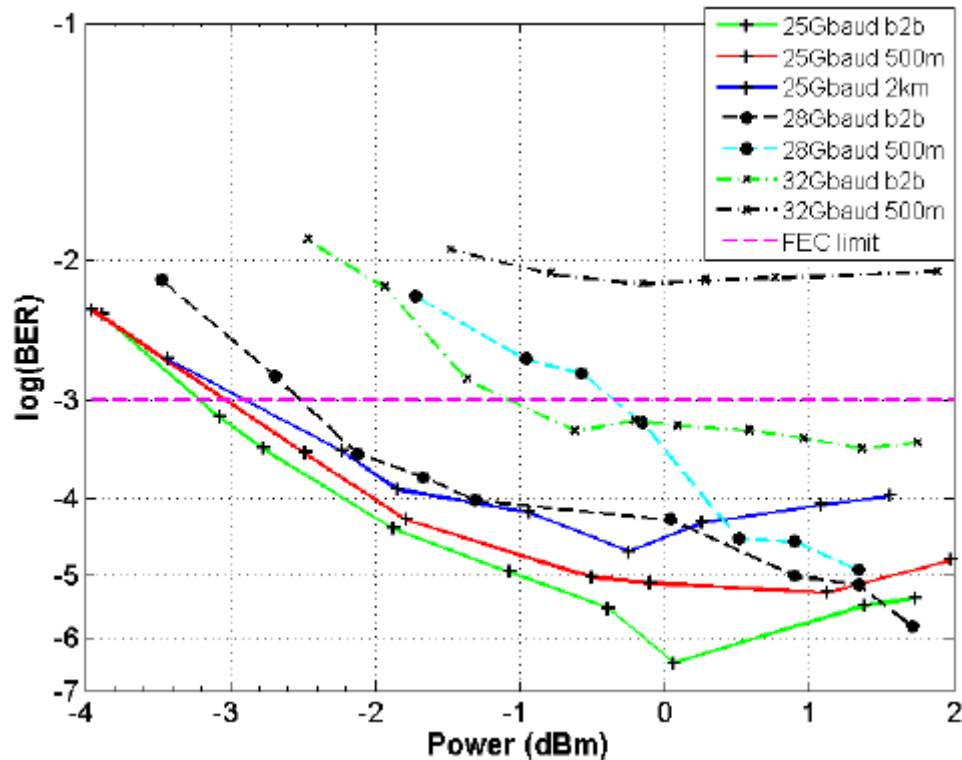


Εικόνα 127: Διαγράμματα ματιού οπτικών σημάτων τεσσάρων σταθμών στην έξοδο του γραμμικού δέκτη στα 25, 28 και 32 Gbaud. Οι μετρήσεις είναι για περιπτώσεις απευθείας διάδοσης και διάδοσης σε 500 m και 2 km μονορυθμικής οπτικής ίνας.

Οι μετρήσεις BER έγιναν αφού το διαμορφωμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών μετατράπηκε σε φωτορεύμα από τον δέκτη και η διαφορική του έξοδος συνδέθηκε με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope) με αναλογικό εύρος ζώνης στα 33 GHz και 80 GSa/s ρυθμό δειγματοληψίας. Η ψηφιακή επεξεργασία του σήματος που ακολούθησε αποτελούνταν από επαναδειγματοληψία (re-sampling), ανάκτηση χρονισμού συμβόλου (symbol timing recovery), έναν στατικό εξισωτή (static equalizer) για να αντισταθμιστεί μερικώς ο περιορισμός εύρους ζώνης που εισάγεται από το κανάλι και αυτόματο ορισμό κατωφλιού (automatic thresholding) για την ανίχνευση των συμβόλων. Η απόδοση του BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με την αρχική αλληλουχία των bit και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bit.

Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει τις καμπύλες BER ως συνάρτηση της μέσης λαμβανόμενης ισχύος στον δέκτη η οποία προέκυψε από τη μέτρηση του

φωτορεύματος. Οι καμπύλες είναι αποτέλεσμα μετρήσεων για ρυθμούς συμβόλων 25, 28 και 32 Gbaud και για περιπτώσεις απευθείας μετάδοσης και διάδοσης σε μονορρυθμική οπτική ίνα με μήκη 500 m και 2 km. Οι καμπύλες που έχουν ένα σταυρό πάνω τους αντιστοιχούν σε ρυθμό συμβόλων 25 Gbaud για όλες τις περιπτώσεις μετάδοσης. Ακολουθώντας την ίδια λογική, οι μαύροι κύκλοι αντιστοιχούν στα 28 Gbaud ενώ με x έχουν σημαδευτεί τα 32 Gbaud.



Εικόνα 128: Καμπύλες BER για ρυθμούς συμβόλων 25, 28 και 32 Gbaud για περιπτώσεις απευθείας μετάδοσης και διάδοσης σε μονορρυθμική οπτική ίνα με μήκη 500 m και 2 km.

Είναι εμφανές ότι για χαμηλότερους ρυθμούς συμβόλων, το λαμβανόμενο διαμορφωμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών θα έχει καλύτερη επίδοση η οποία θα αποτυπώνεται και στην τιμή του BER. Είναι επίσης σαφές ότι για μεγαλύτερες αποστάσεις διάδοσης η τιμή του BER θα μειώνεται αφού επιδρούν στο σήμα οι περιορισμοί από το κανάλι. Ιδιαίτερα γραμμικά φαινόμενα όπως η χρωματική διασπορά επηρεάζουν σημαντικά το σήμα μας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, για τις περιπτώσεις ρυθμού συμβόλων 25 και 28 Gbaud, η απόδοση του BER βρίσκεται κάτω από το όριο του FEC για απευθείας μετάδοση και διάδοση στα 500 m. Μετάδοση στα 2 km με τιμές BER κάτω από το όριο του FEC επιτυγχάνεται μόνο για την περίπτωση των 25 Gbaud μιας και στα 28 Gbaud η επίδραση της διασποράς είναι καθοριστική. Στην περίπτωση των 32 Gbaud, μόνο η απευθείας μετάδοση δίνει τιμές BER κάτω από το όριο του FEC. Η ποινή ισχύος (power penalty) για διάδοση σε 500 m και 2 km μονορρυθμικής οπτικής ίνας στα 25 Gbaud είναι 0.2 και 0.6 dB αντίστοιχα για BER ίσο με  $6 \times 10^{-4}$ . Ομοίως, το λαμβανόμενο οπτικό διαμορφωμένο σήμα στα 28 Gbaud και μετά από 500 m έχει ποινή ισχύος 1.8 dB για BER ίσο με  $5 \times 10^{-4}$ .

## 5.4 Γυάλινος παρεμβολέας και διεπαφή απεμπλοκής

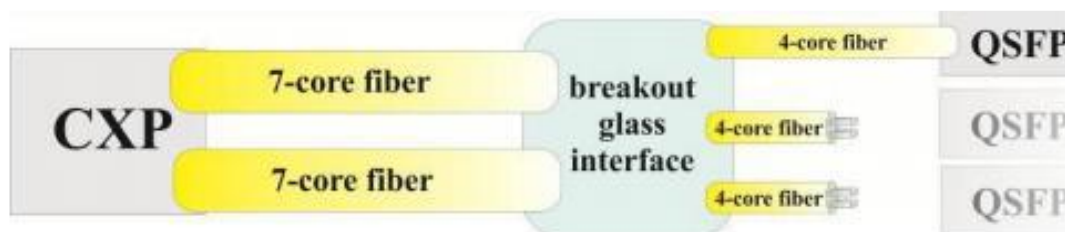
### 5.4.1 Περιγραφή

Το οπτικό σκέλος της υπό ανάπτυξη πλακέτας, η οπτική μηχανή (optical engine), περιλαμβάνει διεπαφές παρεμβολής με βάση το γυαλί (glass-based interposer interfaces) οι οποίες χρησιμοποιούνται ούτως ώστε να διευκολύνουν την οπτική διεπαφή του πομπού και του δέκτη με την ίνα πολλαπλών πυρήνων (multi-core fiber). Αυτές οι διεπαφές γυαλιού χρησιμοποιούν 3D ενσωματωμένους κυματοδηγούς οι οποίοι παράγονται με μια τεχνική που ονομάζεται ultrafast direct laser writing [5.28] και επιτρέπει την αποτελεσματική ευθυγράμμιση της γεωμετρίας των πυρήνων της πολύ-πυρηνικής ίνας (multi-core fiber) με τη γραμμική συστοιχία ινών για άμεση σύζευξη (butt coupling) στο άκρο της SOI πλατφόρμας.

Στα πλαίσια του έργου, αναπτύχθηκαν οι παρακάτω παρεμβολείς (interposers) σε γυαλί:

- Ένας παρεμβολέας για τετραπύρηνη πολυ-πυρηνική ίνα (multi-core fiber), ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη ζεύξη του QSFP ενεργού οπτικού καλωδίου (active optical cable- AOC) με την πολύ-πυρηνική ίνα.
- Ένας παρεμβολέας για επταπύρηνη πολυ-πυρηνική ίνα, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τη ζεύξη του CXP ενεργού οπτικού καλωδίου (active optical cable- AOC) με μια δίδυμη (twin) επταπύρηνη συστοιχία. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται οι έξι από τους 7 πυρήνες σε κάθε μέρος του ζεύγους και έτσι προκύπτει επικοινωνία με 12 κανάλια (12 lanes).
- 2x6 σε 3x4 γυάλινος παρεμβολέας για την ζεύξη του CXP ενεργού οπτικού καλωδίου με τρία QSFP ενεργά οπτικά καλώδια. Ο παρεμβολέας αυτός ονομάζεται διεπαφή απεμπλοκής (breakout interface).

Η αρχιτεκτονική της όλης διάταξης μαζί με τα CXP και QSFP ενεργά οπτικά καλώδια καθώς και με τη διεπαφή απεμπλοκής, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 129: Η αρχιτεκτονική της διεπαφής απεμπλοκής μαζί με τα CXP και QSFP ενεργά οπτικά καλώδια

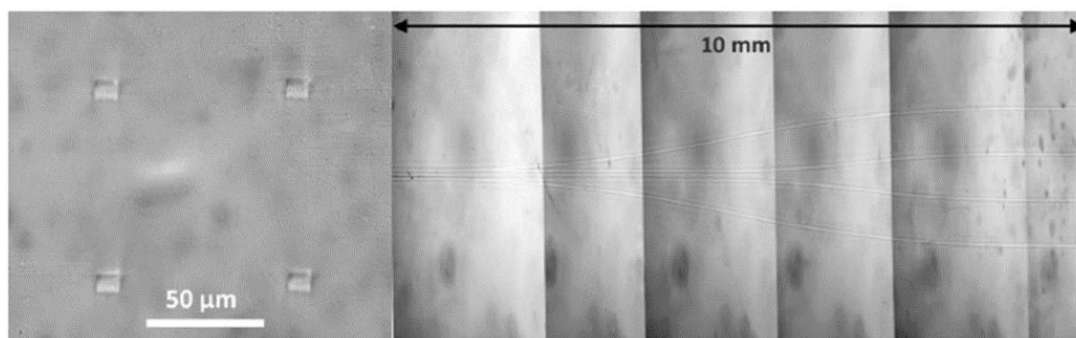
### 5.4.2 Παρεμβολέας πολυπυρηνικής ίνας τεσσάρων πυρήνων

Προκειμένου να επιλεγθεί η κατάλληλη πολυπυρηνική ίνα τεσσάρων πυρήνων έγινε μια έρευνα ανάμεσα στα εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα για την καταλληλότητά τους στο επίπεδο της εφαρμογής. Έτσι επιλέχθηκε ο τύπος ίνας Fibercore SM-4C1500 [5.29] λόγω της συνοχής που τον διακρίνει όσον αφορά στην απόσταση μεταξύ των πυρήνων. Προκειμένου να ταιριάζει στη γεωμετρία την πολυπύρηνης ίνας, κατασκευάστηκε ένας τετραπύρηνος παρεμβολέας από γυαλί. Οι κυματοδηγοί



σχεδιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε ο ρυθμός κυματοδηγήσής τους να ταιριάζει με τον αντίστοιχο ρυθμό της πολυπύρηνης ίνας με τιμή διαμέτρου πεδίου ρυθμού (Mode Field Diameter-MFD) στα 10  $\mu\text{m}$ . Η κατασκευή του κυματοδηγού έγινε από την Optoscribe με χρήση της τεχνικής εγγραφής με laser (laser inscription technique). Η συγκεκριμένη τεχνική παράγει κυματοδηγούς με τετράγωνη ή ορθογώνια διατομή σε αντίθεση με τις συνήθεις τεχνικές που παράγουν κυκλικούς ή ασύμμετρους κυματοδηγούς. Οι παραγόμενοι κυματοδηγοί με αυτόν τον τρόπο έχουν τη δυνατότητα να μπορούν να συγκριθούν απευθείας με επίπεδους κυματοδηγούς που παράγονται από τη λιθογραφία.

Οι διαδρομές του κυματοδηγού σχεδιάστηκαν σε 3D περιβάλλον κάνοντας χρήση ενός αυτοματοποιημένου εργαλείου σχεδιασμού της Optoscribe το οποίο επιτρέπει την αυθαίρετη τοποθέτηση των συντεταγμένων εισόδου και εξόδου του κάθε κυματοδηγού. Η παρακάτω εικόνα έχει παρθεί από ένα μικροσκόπιο εγκάρσιας διατομής και αποτυπώνει έναν τετραπύρνηνο παρεμβολέα σε λειτουργία μετάδοσης που κατασκευάστηκε με απόσταση 78  $\mu\text{m}$  μεταξύ των πυρήνων (αριστερά). Στην εικόνα επίσης φαίνεται μια συρραφή λήψεων από το μικροσκόπιο που δείχνει τη μετάβαση από μια γραμμική συστοιχία με απόσταση 127  $\mu\text{m}$  σε μια τετραγωνική διάταξη με απόσταση 36,25  $\mu\text{m}$  σε ένα μήκος 10 mm (δεξιά).



Εικόνα 130: (Αριστερά) εικόνα μικροσκοπίου της πρόοψης του πλακιδίου με τον τετραπύρνηνο παρεμβολέα. (Δεξιά) αρθρωτή εικόνα που αποτυπώνει την μεταβολή του κυματοδηγού παρεμβολής.

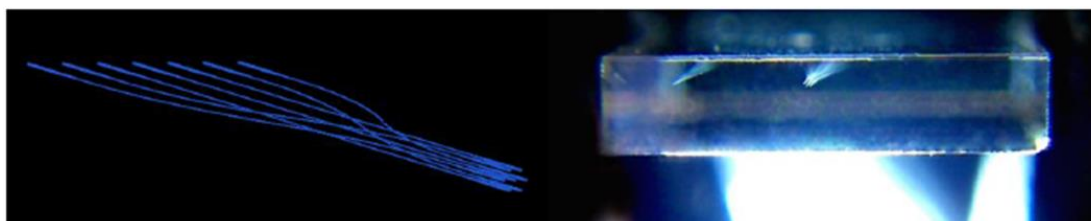
Τα αποτελέσματα για τις απώλειες εισόδου (insertion losses) της περιγραφόμενης δομής, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός Πυρήνα	Απώλειες εισόδου
Πυρήνας 1	0.65 dB
Πυρήνας 2	0.62 dB
Πυρήνας 3	0.59 dB
Πυρήνας 4	0.61 dB

Πίνακας 20: Οι απώλειες εισόδου του τετραπύρνηνου παρεμβολέα

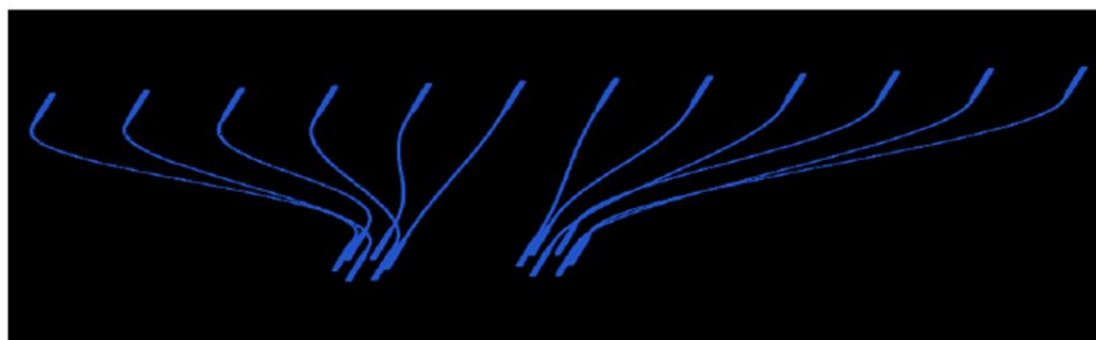
### 5.4.3 Παρεμβολέας πολυπυρηνικής ίνας επτά πυρήνων

Ο παρεμβολέας για την περίπτωση της πολυπυρηνικής ίνας με τους επτά πυρήνες σχεδιάστηκε ακολουθώντας τη γεωμετρία της ίνας Fibercore SM-7C15000 η οποία μετρήθηκε και βρέθηκε ανώτερη από τις υπόλοιπες εμπορικά διαθέσιμες τόσο σε ποιότητα όσο και σε χρηστικότητα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μαζί με ένα κατασκευασμένο fanout επτά καναλιών σε γυάλινο υπόστρωμα.



Εικόνα 131: (Αριστερά) σχηματικό διάγραμμα του επταπύρηνου παρεμβολέα. (Δεξιά) εικόνα του κατασκευασμένου fanout με επτά κανάλια πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα.

Σαν επόμενο βήμα, κατασκευάστηκε ένας διπλός γυάλινος παρεμβολέας έξι καναλιών ούτως ώστε να αντιστοιχεί στη γεωμετρία των δυο Fibercore πολυπύρηνων ινών που θα χρησιμοποιηθούν. Ο κεντρικός πυρήνας από κάθε επταπύρηνη ίνα δεν συζεύχθηκε με κάποιον κυματοδηγό και έτσι η συνολική γεωμετρία είναι 2x6. Αυτή η 2D συστοιχία από κυματοδηγούς μετατράπηκε σε μια 1D γραμμική συστοιχία προκειμένου να γίνει η ζεύξη με τους κυματοδηγούς. Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει το σχεδιασμό της συσκευής. Οι κατασκευασμένοι κυματοδηγοί έχουν διάμετρο πεδίου ρυθμού (mode field diameter) της τάξης των 7  $\mu\text{m}$ , λίγο μικρότερη από αυτή της πολυπύρηνης ίνας που έχει 8  $\mu\text{m}$ .



Εικόνα 132: Σχηματικό διάγραμμα ενός 2x6 και ενός 1x12 fanout

Οι απώλειες εισόδου για το συγκεκριμένο παρεμβολέα είναι αυτές που αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός Πυρήνα Ίνας 1	Απώλειες εισόδου (dB)	Αριθμός Πυρήνα Ίνας 2	Απώλειες εισόδου (dB)
Πυρήνας 1	0.8	Πυρήνας 7	1.0
Πυρήνας 2	0.8	Πυρήνας 8	0.9

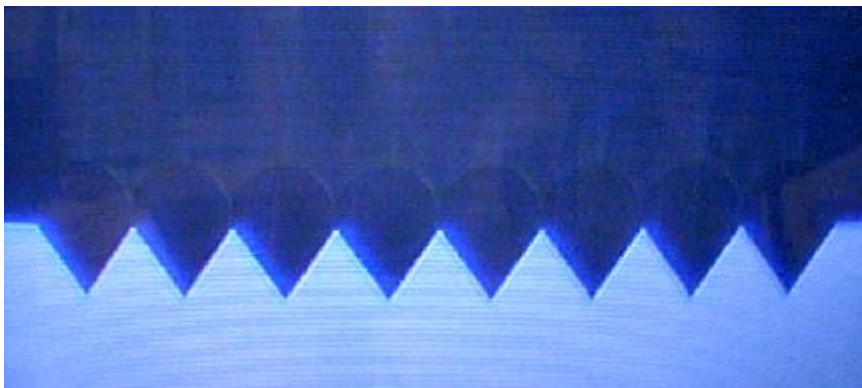
Πυρήνας 3	1.0	Πυρήνας 3	1.0
Πυρήνας 4	0.9	Πυρήνας 9	0.8
Πυρήνας 5	0.8	Πυρήνας 10	1.1
Πυρήνας 6	0.7	Πυρήνας 11	1.0

Πίνακας 21: Απώλειες εισόδου για τον διπλό επταπύρηνο παρεμβολέα

Η μέγιστη τιμή των απωλειών εισόδου που μετρήθηκε για τον συγκεκριμένο παρεμβολέα ήταν της τάξης των 1.1 dB η οποία παρατηρήθηκε όμως σε ένα κανάλι. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι απώλειες εισόδου ήταν  $\leq 1.0$  dB.

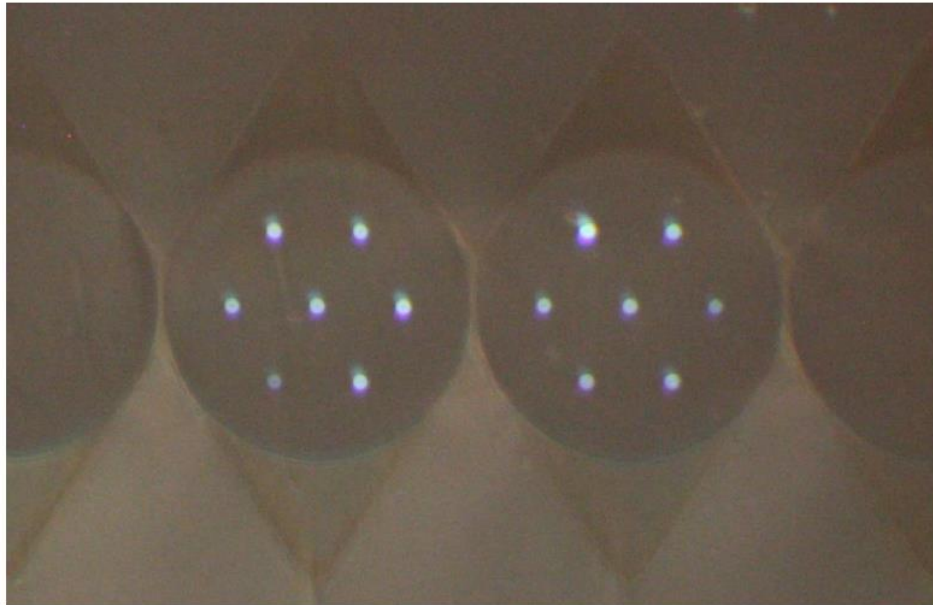
#### 5.4.4 2x6 σε 3x4 γυάλινος παρεμβολέας (διεπαφή απεμπλοκής)

Προκειμένου να γίνει δυνατή η διεπαφή του γυάλινου παρεμβολέα με την πολυπύρηνη ίνα, απαιτείται οι ίνες να «στεγαστούν» σε ένα ειδικά διαμορφωμένο αυλάκι σε σχήμα V (fiber V-groove array-FVA). Ο συγκεκριμένος τύπος αυλάκωσης έχει τη μορφή συστοιχίας και ενδεικτικά η γεωμετρία του παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 133: Διατομή μιας αυλάκωσης τύπου V (Fiber V-groove array) που φιλοξενεί μια συστοιχία από ίνες

Πρακτικά η αυλάκωση επιτρέπει στην πολυπύρηνη ίνα να κρατείται σε μια σταθερή γεωμετρία και να επικολληθεί ασφαλώς και με ακρίβεια στην επιφάνεια του παρεμβολέα. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολλαπλές διεπαφές των πολυπύρηνων ιών με τις εισόδους και τις εξόδους του παρεμβολέα είναι απαιτούμενο οι ίνες να ευθυγραμμίζονται περιστροφικά μέσα στην V αυλάκωση. Ο σχεδιασμός αυτού του τύπου είναι μια σημαντική προϋπόθεση αφού σε αντίθετη περίπτωση οποιαδήποτε περιστροφική διακύμανση μεταξύ των ιών θα οδηγούσε σε εσφαλμένη ευθυγράμμιση των κυματοδηγών στο γυάλινο παρεμβολέα. Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνονται τα V-grooves που αναπτύχθηκαν για την περίπτωση της επταπύρηνης ίνας.



Εικόνα 134: Διατομή των δυο επταπύρηνων ινών και των V-grooves που τις υποστηρίζουν

FVAs δυο καναλιών με επταπύρηνες ίνες καθώς και FVAs τριών καναλιών με τετραπύρηνες ίνες χαρακτηρίστηκαν και ένα σχέδιο παρεμβολέα δώδεκα καναλιών αναπτύχθηκε ούτως ώστε να ταιριάζει με την υπάρχουσα γεωμετρία. Η διάταξη της διεπαφής απεμπλοκής 12 καναλιών σχεδιάστηκε σε 3D αυτοματοποιημένο περιβάλλον και οι απώλειες εισόδου της αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Αριθμός Πυρήνα Ίνας 1	Απώλειες εισόδου (dB)	Αριθμός Πυρήνα Ίνας 2	Απώλειες εισόδου (dB)
Πυρήνας 1	1.7	Πυρήνας 7	2.0
Πυρήνας 2	2.1	Πυρήνας 8	2.0
Πυρήνας 3	1.8	Πυρήνας 3	2.0
Πυρήνας 4	2.0	Πυρήνας 9	1.6
Πυρήνας 5	2.1	Πυρήνας 10	1.7
Πυρήνας 6	2.3	Πυρήνας 11	1.6

Πίνακας 22: Μέτρηση των απωλειών εισόδου για όλα τα κανάλια της διεπαφής απεμπλοκής.

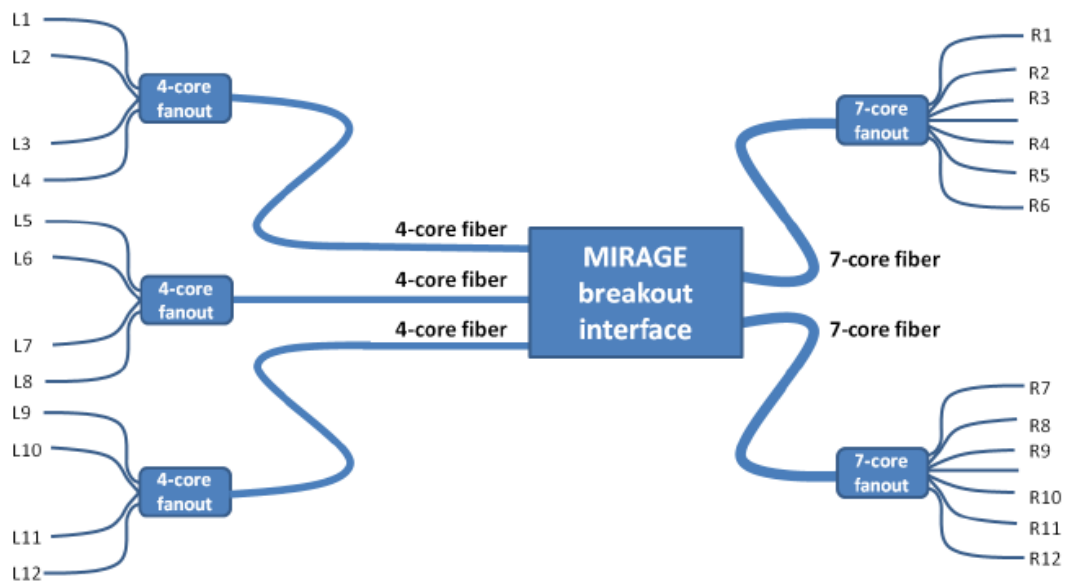
Ο παρεμβολέας εμφανίζει μικρές απώλειες ζεύξης ( $\leq 2.3$  dB ανά κανάλι) από την μετάφραση μεταξύ της 3x4 και της 2x7 πολυπύρηνες ίνας και έτσι είναι μια κατάλληλη δομή για τη διεπαφή μεταξύ του CXP και του QSFP ενεργού οπτικού καλωδίου. Επιπρόσθετα μετρήθηκε και η τιμή της παρεμβολής (crosstalk) μεταξύ των καναλιών της δομής. Η μέγιστη τιμή μετρήθηκε στα -46.5 dB όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Channel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-47.2	-48.1	-53.7	-51.0	-61.8	-51.0	-55.3	-69.5	-46.5	X	-57.0	-57.3
2	-51.1	-52.9	-52.7	-47.7	-71.1	-55.2	-57.6	-65.2	X	-55.9	-62.9	-60.8
3	-55.2	X	-56.6	-56.3	-67.8	-57.5	-66.9	-69.5	-56.7	-60.1	-65.1	-58.6
4	-53.4	-52.1	X	-47.5	-69.3	-60.0	-63.1	-69.7	-61.4	-63.1	-65.6	-62.0
5	X	-61.4	-56.4	-57.2	-66.4	-61.8	-68.9	-76.5	-56.5	-62.0	-70.0	-64.1
6	-54.7	-50.6	-52.3	X	-61.3	-59.6	-77.2	-76.5	-58.5	-64.0	-73.8	-60.6
7	-62.9	-60.5	-61.0	-58.8	X	-56.0	-63.1	-62.9	-60.0	-61.5	-64.5	-60.0
8	-61.3	-64.4	-57.4	-62.3	-58.1	X	-57.9	-63.8	-56.7	-62.5	-64.1	-59.7
9	-53.8	-57.1	-62.6	-60.6	-54.8	-49.7	-60.9	X	-57.4	-57.6	-59.6	-56.2
10	-56.4	-55.2	-59.3	-58.6	-58.7	-58.7	-58.4	-63.3	-59.3	-60.4	-62.7	X
11	-64.9	-62.2	-59.9	-68.2	-57.3	-58.0	X	-55.3	-62.6	-61.1	-58.9	-57.7
12	-59.3	-60.5	-64.4	-60.6	-60.0	-52.9	-51.4	-61.6	-57.3	-59.3	X	-53.0

Πίνακας 23: Τιμές του crosstalk μεταξύ των καναλιών της δομής

### 5.4.5 Συνολική αρχιτεκτονική του πολυπύρηνου καλωδίου και πειραματική επίδειξή του

Η αρχιτεκτονική του πολυπύρηνου καλωδίου μαζί με τη διεπαφή απεμπλοκής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Από τη μια μεριά έχουμε τρεις τετραπύρηνες ίνες με τα αντίστοιχα fanouts που τις διαχωρίζουν σε απλές μονοπύρηνες ίνες και από την άλλη δυο επταπύρηνες με παρόμοια fanouts για το διαχωρισμό. Όπως έχει ειπωθεί παραπάνω, ένας από τους επτά πυρήνες σε κάθε περίπτωση δεν χρησιμοποιείται ούτως ώστε να έχουμε μια ένα προς ένα αντιστοίχιση και από τις δυο μεριές. Η διεπαφή απεμπλοκής χρησιμοποιείται ως η ενδιάμεση δομή που κάνει την απαιτούμενη «μετάφραση» μεταξύ των γεωμετριών των δυο μεριών όπως έχει περιγραφεί και παραπάνω. Για να είναι πιο εύκολη η χρήση της δομής σε μια πειραματική διάταξη στις μονοπύρηνες ίνες εκατέρωθεν έχουν τοποθετηθεί συνδετήρες (fiber connectors).



Εικόνα 135: Σχηματική απεικόνιση της διεπαφής απεμπλοκής με τις πολυπύρηνες ίνες εκατέρωθεν

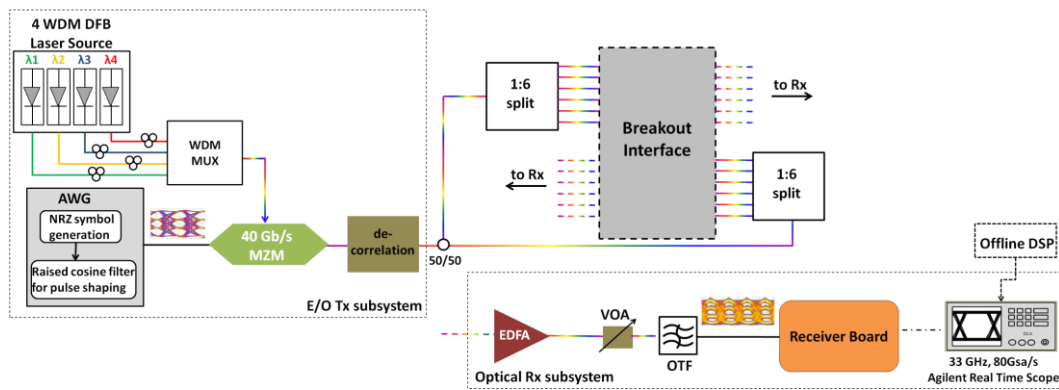
Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται οι αντιστοιχίσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων του καλωδίου.

Αριστερή μεριά	Δεξιά μεριά
L10	R1
L9	R2
L2	R3
L3	R4
L1	R5
L4	R6
L5	R7
L6	R8
L8	R9
L12	R10
L7	R11
L11	R12

Πίνακας 24: Αντιστοίχιση εισόδων εξόδων της δομής

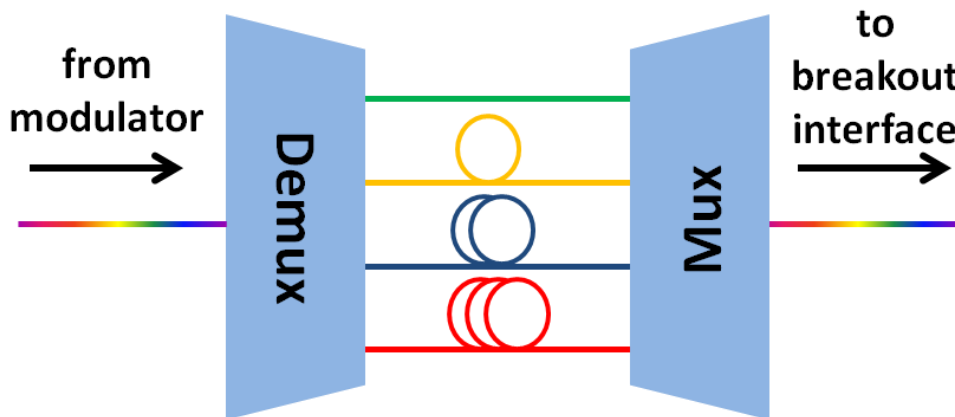
### Πειραματική διάταξη και αποτελέσματα

Στην παρακάτω εικόνα αποτυπώνεται η πειραματική διάταξη που στήθηκε για τη μέτρηση της απόδοσης της προαναφερθείσας δομής. Οι 12 πυρήνες του καλωδίου χωρίζονται σε δυο ομάδες των 6 πυρήνων και από τις δύο μεριές του καλωδίου ούτως ώστε να εξυπηρετηθεί η επίδειξη κίνησης δεδομένων διαμέσου της δομής και από τις δυο κατευθύνσεις. Σε κάθε πυρήνα διαδόθηκε ένα WDM σήμα αποτελούμενο από τέσσερα 28 Gbaud PAM-4 σήματα, επιτυγχάνοντας έτσι συνολική χωρητικότητα της τάξης των 224 Gb/s ανά πυρήνα και 1.344 Tb/s ανά κατεύθυνση. Ο συνδυασμός της πολυπλεξίας στο μήκος κύματος (WDM) και της χωρικής πολυπλεξίας (SDM), παρέχει 24 γραμμές ανά κατεύθυνση οι οποίες συνδυάζονται στην πλευρά της επταπύρηνης ίνας και διαχωρίζονται χωρικά στη μεριά της τετραπύρηνης ίνας σε τρεις ομάδες των οκτώ γραμμών (2 πυρήνες x 4 μήκη κύματος). Με αυτόν τον τρόπο η δομή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως διεπαφή μεταξύ ενός QSFP και ενός CXP ενεργού οπτικού καλωδίου συνδυάζοντας χωρική πολυπλεξία και πολυπλεξία κατά μήκος κύματος.



Εικόνα 136: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε

Στη μεριά του πομπού, χρησιμοποιήθηκε μια 8-bit 65 GSa/s παλμογεννήτρια ούτως ώστε να κατασκευαστεί ένα ηλεκτρικό διαμορφωμένο σήμα τεσσάρων σταθμών (PAM-4) στα 28 Gbaud με επαναλαμβανόμενο μοτίβο (repeating pattern) με μήκος  $2^7-1$  σύμβολα. Για να περιοριστεί το εύρος ζώνης του σήματος και να συμπιεστούν οι πλευρικοί του λοβοί, χρησιμοποιήθηκε φίλτρο Raised Cosine (RC) με παράγοντα roll-off ίσο με  $\alpha=1$ . Το ηλεκτρικό σήμα από την παλμογεννήτρια οδήγησε έναν 40 Gb/s ηλεκτρο-οπτικό διαμορφωτή Ti:LiNbO<sub>3</sub> Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Modulator, MZM) διπλής οδήγησης (Dual-Drive). Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα WDM σήμα με διαφορετικές ροές πληροφορίας (flows) χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα DFB (distributed feedback) lasers ως οπτικές φέρουσες. Οι τέσσερις αυτές οπτικές ροές ευθυγραμμίστηκαν στο επίπεδο της πόλωσης χρησιμοποιώντας τέσσερις ελεγκτές πόλωσης (polarization controllers) και πολυπλέχθηκαν με τη χρήση ενός DWDM πολυπλέκτη τεσσάρων καναλιών. Τα κεντρικά μήκη κύματος που χρησιμοποιήθηκαν ήταν στα 1554.940, 1556.555, 1558.173 και 1559.794 nm αντίστοιχα ενώ η ισχύς εξόδου του κάθε laser ρυθμίστηκε στα 10 dBm. Ούτως ώστε να αποσυσχετιστούν πλήρως τα διαμορφωμένα οπτικά σήματα στην έξοδο του διαμορφωτή, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ουσιαστικά χρησιμοποιώντας έναν DWDM απο-πολυπλέκτη τεσσάρων καναλιών, με τα ίδια κεντρικά μήκη κύματος, χωρίσαμε τα τέσσερα σήματα και χρησιμοποιώντας οπτικές ίνες διαφορετικών μηκών σε κάθε κανάλι πέτυχαμε την ουσιαστική αποσυσχέτιση των σημάτων. Τα σήματα επανασυνδυάστηκαν με την εκ νέου χρήση ενός πολυπλέκτη προκειμένου να τροφοδοτήσουν την διεπαφή απεμπλοκής.



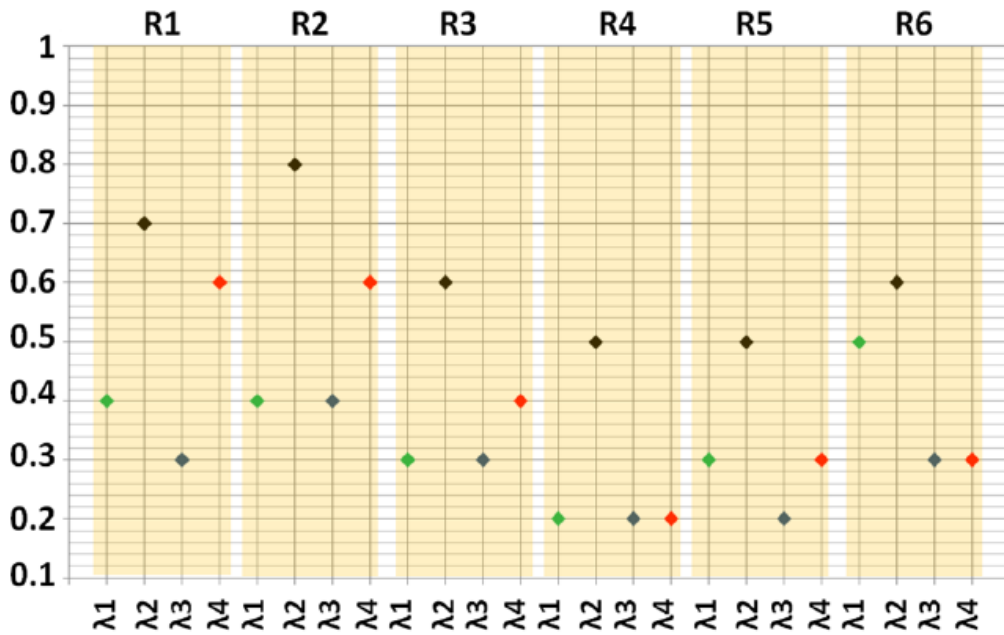
Εικόνα 137: Αποσυσχέτιση καναλιών με τη χρήση ινών διαφορετικού μήκους

Στη μεριά του δέκτη χρησιμοποιήθηκε ένας ενισχυτής ίνας ερβίου σε συνδυασμό με ένα ρυθμιζόμενο οπτικό αποσβέτη ούτως ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου της εγχεόμενης ισχύος στον δέκτη. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα για μέτρηση της τιμής του BER ως συνάρτηση με την ισχύ εισόδου στο δέκτη. Προκειμένου να επιλέγεται το κατάλληλο κανάλι κάθε φορά, χρησιμοποιήθηκε ένα επαναρρυθμιζόμενο οπτικό φίλτρο πριν το δέκτη του οποίου το κεντρικό μήκος κύματος ρυθμίζεται στο αντίστοιχο του επιθυμητού καναλιού.

Οι μετρήσεις BER έγιναν αφού το διαμορφωμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών μετατράπηκε σε φωτορεύμα από τον δέκτη και η διαφορική του έξοδος συνδέθηκε με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου (real-time oscilloscope) με αναλογικό εύρος ζώνης στα 33 GHz και 80 GSa/s ρυθμό δειγματοληψίας. Ακολούθως έγινε ψηφιακή επεξεργασία του σήματος η οποία αποτελούταν από ανάκτηση ρολογιού (clock recovery), επανα-δειγματοληψία (re-sampling) και αυτόματος ορισμός κατωφλιού (automatic thresholding) για την ανίχνευση συμβόλων χρησιμοποιώντας Gray κωδικοποίηση. Η απόδοση του BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο σήμα με την αρχική αλληλουχία των bit και μετρώντας τα πραγματικά λανθασμένα bit.

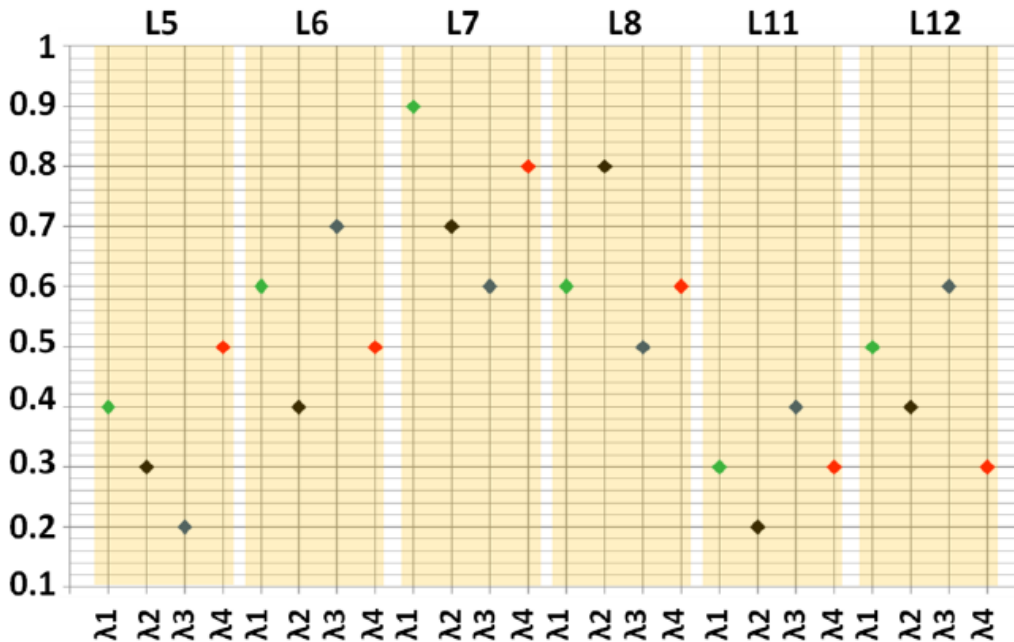
Το BER μετρήθηκε ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος τόσο σε back-to-back μετάδοση όσο και σε διάδοση μέσα από τη διεπαφή απεμπλοκής. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε τη δυνατότητα να ποσοτικοποιήσουμε την επιβάρυνση στο BER που εισάγει η διάταξή μας. Για την επιλογή του καναλιού, όπως περιεγράφηκε και παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε το επαναρρυθμιζόμενο οπτικό φίλτρο του οποίου το κεντρικό μήκος κύματος άλλαζε αναλόγως. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ποινή ισχύος (power penalty) που επιδρά στα τέσσερα κανάλια μας όταν αυτά διαδίδονται μέσα από τους πυρήνες της πολυπύρηνης ίνας και τη διεπαφή απεμπλοκής. Υπενθυμίζεται ότι τα τέσσερα σήματα είναι τεσσάρων σταθμών στα 28 Gbaud και είναι πλήρως αποσυσχετισμένα μεταξύ τους. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η διάδοση γίνεται από τη μεριά των δύο επταπύρηνων ινών (δεξιά μεριά) και συγκεκριμένα τις εισόδους R1 έως R6. Η υποβάθμιση ισχύος προσεγγίστηκε για το επίπεδο του FEC, θεωρώντας Reed Solomon κωδικοποίηση [5.30] με pre-FEC τιμή BER σα  $1.1 \times 10^{-3}$ .





Εικόνα 138: Υποβάθμιση ισχύος ανά μήκος κύματος για διάδοση από τη μεριά της επταπύρηνης ίνας για τις εισόδους R1 έως R6

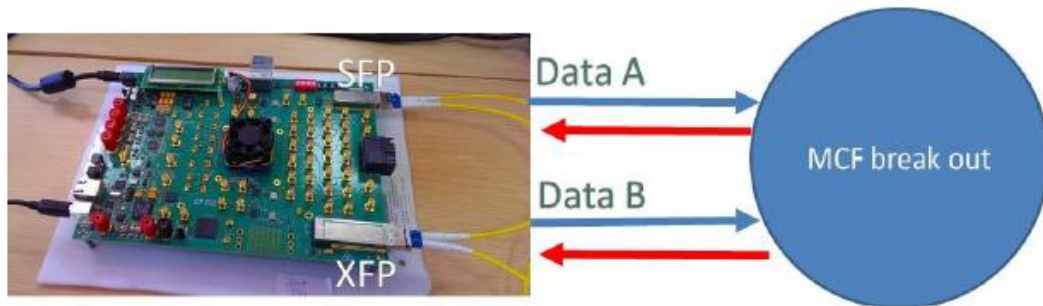
Ακολουθώντας την ίδια ακριβώς λογική, ελέγχθηκε η διάδοση μέσα από τη δομή και από την άλλη κατεύθυνση (αριστερή μεριά). Έτσι, η κίνηση που περιγράφηκε παραπάνω (τέσσερα κανάλια), αυτή τη φορά διαδόθηκε από την μεριά των τριών τετραπύρηνων ινών (είσοδοι L5 έως L12). Η παρακάτω εικόνα αποτυπώνει την υποβάθμιση ισχύος για τα τέσσερα κανάλια σε αυτή την περίπτωση.



Εικόνα 139: Υποβάθμιση ισχύος ανά μήκος κύματος για διάδοση από τη μεριά των τετραπύρηνων ινών για τις εισόδους L5 έως L12.

Και στις δυο περιπτώσεις τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι η διάδοση μέσα από τη διεπαφή απεμπλοκής εισάγει μόνο μια ελάχιστη υποβάθμιση στην ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος με μέγιστη καταγεγραμμένη τιμή αυτή των 0.9 dB.

Προκειμένου να ελεγχθεί η συμβατότητα της δομής με εμπορικά διαθέσιμα συνδέσιμα οπτικά (pluggable optics), πραγματοποιήθηκε μια ακόμα πειραματική επίδειξη. Για την αξιολόγηση της απόδοσης της δομής, χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (Field Programmable Gate Array-FPGA) και δυο εμπορικά διαθέσιμα ενεργά οπτικά καλώδια (Active Optical Cable-AOC). Με τη βοήθεια του FPGA κατασκευάστηκαν δεδομένα με συγκεκριμένη ψευδοτυχαία δυαδική ακολουθία (Pseudorandom Binary Sequence- PRBS) τα οποία μεταδόθηκαν ταυτόχρονα μέσω ενός SFP+ (data A) και ενός XFP (data B) ενεργού οπτικού καλωδίου στα 10 Gb/s. Και οι δυο κατευθύνσεις συνδέονται στη μεριά των επταπύρηνων ινών και στη συνέχεια χωρίζονται σε κάθε μια από τις εξόδους που βρίσκονται στη μεριά των τετραπύρηνων ινών. Κάθε ένα εξόδου συνδέεται εν συνεχεία πίσω στους δέκτες των ενεργών οπτικών καλωδίων. Οι BER μετρήσεις που έγιναν από το FPGA έδειξαν ότι δεν εισάγεται επι της ουσίας υποβάθμιση σήματος από τη διεπαφή απεμπλοκής.



Εικόνα 140: Πείραμα για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της διεπαφής απεμπλοκής με εμπορικά διαθέσιμα συνδέσιμα οπτικά

# Βιβλιογραφία

- [5.1] W. Soenen et al., "40 Gb/s PAM-4 Transmitter IC for Long-Wavelength VCSEL Links," in IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, no. 4, pp. 344-347, 15 Feb.15, 2015.
- [5.2] Kahlon, Nakshdeep Kaur and Gurmeet Kaur. "Various Dispersion Compensation Techniques for Optical System: A Survey." (2014).
- [5.3] Ming Li, Fan Zhang, Zhangyuan Chen, and Anshi Xu, "Chromatic dispersion compensation and fiber nonlinearity mitigation of OOK signals with diverse-VSB-filtering FFE and DFE," Opt. Express 16, 21991-21996 (2008).
- [5.4] Anritsu White Paper, "Enabling Precision Eye Pattern Analysis", MP2100A Series, BERTWave.
- [5.5] Semiconductor Components Industry White Paper, "Understanding Data Eye Diagram Methodology for Analyzing High Speed Digital Signals", AND9075/D, June 2015, Rev1.
- [5.6] Stewart D. Personick, "Optical Detectors and Receivers," J. Lightwave Technol. 26, 1005-1020 (2008).
- [5.7] R. S. Fyath, A. J. McDonald and J. J. O'Reilly, "Sensitivity and power penalty considerations for laser preamplified direct detection optical receivers," in IEE Proceedings J - Optoelectronics, vol. 136, no. 4, pp. 238-248, Aug. 1989.
- [5.8] D. Kuchta, A. V. Rylyakov, C. L. Schow, J. Proesel, C. Baks, P. Westbergh, J. S. Gustavsson, and A. Larsson, "64Gb/s Transmission over 57m MMF using an NRZ Modulated 850nm VCSEL," in Opt. Fiber Commun. Conf., San Francisco, CA, USA, 2014, p. Th3C.2.
- [5.9] Y. Tsunoda, M. Sugawara, H. Oku, S. Ide, and K. Tanaka, "8.9 A 40Gb/s VCSEL over-driving IC with group-delay-tunable pre-emphasis for optical interconnection," in IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Pap., San Francisco, CA, USA, Feb. 2014, pp. 154–155.
- [5.10] T. Tatsumi, K. Tanaka, S. Sawada, H. Fujita, and T. Abe, "1.3  $\mu\text{m}$ , 56-Gbit/s EML Module target to 400GbE," in Opt. Fiber Commun. Conf., Washington, D.C., USA, 2012, p. OTh3F.4.
- [5.11] J. Proesel, B. G. Lee, C. W. Baks, and C. Schow, "35-Gb/s VCSELBased Optical Link using 32-nm SOI CMOS Circuits," in Opt. Fiber Commun. Conf., Anaheim, CA, USA, 2013, p. OM2H.2.
- [5.12] OSI Optoelectronics White Paper, "Photodiode Characteristics and Applications", found at: <http://www.osioptoelectronics.com/application-notes/AN-Photodiode-Parameters-and-Characteristics.pdf>
- [5.13] Hooman Hasemi, "Transimpedance Amplifiers (TIA): Choosing the Best Amplifier for the Job", Texas Instruments Application Report, SNOA942A, Rev. May 2017.
- [5.14] <https://www.electronics-tutorials.ws/systems/feedback-systems.html>
- [5.15] James Karki, "Fully-Differential Amplifiers", Texas Instruments Application Report, SLOA054E, Rev. September 2016.

- [5.16] D. L. Harame et al., "Current status and future trends of SiGe BiCMOS technology," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 48, no. 11, pp. 2575-2594, Nov. 2001.
- [5.17] Peter Ohlen, Krister Frojdh, "Optical Modulation Amplitude Specifications", New Orleans, September 2000, found in: [http://www.ieee802.org/3/ae/public/nov00/ohlen\\_2\\_1100.pdf](http://www.ieee802.org/3/ae/public/nov00/ohlen_2_1100.pdf)
- [5.18] Theresa Maldonado, "Electro-Optic Modulators", Chapter 13 in Handbook of Optics, OSA, 1995.
- [5.19] Djordjevic, Ivan B., "Advanced Coding for Optical Communications." (2013).
- [5.20] A. Tychopoulos, O. Koufopavlou and I. Tomkos, "FEC in optical communications - A tutorial overview on the evolution of architectures and the future prospects of outband and inband FEC for optical communications," in IEEE Circuits and Devices Magazine, vol. 22, no. 6, pp. 79-86, Nov.-Dec. 2006.
- [5.21] John Rogers, Calvin Plett, Foster Dai, "Integrated Circuit Design for High-Speed Frequency Synthesis", Artech House Publishers, 2006.
- [5.22] Hongtao Zhang, Brandon Jiao, Yu Liao, Geoff Zhang, "PAM4 Signaling for 56G Serial Link Applications- A Tutorial", Xilinx, January 2016, found in <https://www.xilinx.com/publications/events/designcon/2016/slides-pam4signalingfor56gserial-zhang-designcon.pdf>
- [5.23] Xu, Lin et al. "Electroabsorption modulators used for all-optical signal processing and labelling." (2004).
- [5.24] Haque, Md. Mahfuzul and Rabeya Ferdousy. "Study on Characteristics of Distributed Feedback (DFB) LASER as Light Source for Optical Fiber Communication System." (2014).
- [5.25] Anritsu Technical Note, "Enabling Precision Eye Pattern Analysis", MP2100A Series.
- [5.26] Mellanox Technologies, "Long Reach Optics in Data Centers", found in: <https://community.mellanox.com/s/article/long-reach-optics-in-the-data-center>
- [5.27] Chethan, B et al. "The effects of Inter Symbol Interference (ISI) and FIR Pulse Shaping Filters: A survey." (2014).
- [5.28] Huang, Leilei. "Fabrication and characterisation of ultrafast direct laser written waveguides." (2015).
- [5.29] <https://www.fibercore.com/mediaLibrary/images/english/8938.pdf>
- [5.30] Stephen B. Wicker; Vijay K. Bhargava, "An Introduction to Reed-Solomon Codes," in Reed-Solomon Codes and Their Applications , , IEEE, 1994, pp.1-16

# Κεφάλαιο 6

## Σύνοψη των αποτελεσμάτων και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 6.1 Σύνοψη των αποτελεσμάτων

Όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά και στο εισαγωγικό κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, οι τεράστιες ανάγκες που δημιουργούνται από την έκρηξη του υπο διακίνηση όγκου δεδομένων, βαρύνουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τα κέντρα δεδομένων. Η διασύνδεσή τους λοιπόν είναι εξαιρετικά σημαντική αφού είναι αυτή που καλείται να εξασφαλίσει την αδιάλειπτη μετάδοση της πληροφορίας με τρόπο γρήγορο, ασφαλή και συμφέρον τόσο από μεριάς κόστους όσο και από μεριάς κατανάλωσης ισχύος. Ξεφεύγοντας λοιπόν όλο και περισσότερο από τις παραδοσιακές λύσεις που είχαν ως βάση το χαλκό, οι οπτικές διασυνδέσεις είναι η πλέον ώριμη τεχνολογία που απαντά με τον καλύτερο τρόπο στις νέες προκλήσεις. Επιπρόσθετα, η έρευνα και τα αποτελέσματά που παράγονται στον τομέα της φωτονικής ολοκλήρωσης επιτρέπει στις οπτικές διασυνδέσεις να «κοιτούν» μπροστά και να απαντούν ακόμα και σε μελλοντικές προκλήσεις.

Ένας βασικός διαχωρισμός μεταξύ των οπτικών διασυνδέσεων, όπως ήδη αναλύθηκε, είναι αυτός της απόστασης που καλούνται να καλύψουν. Για τον λόγο αυτόν μιλάμε για διασυνδέσεις εντός (intra-datacenter) και μεταξύ (inter-datacenter) κέντρων δεδομένων. Το μεγαλύτερο κομμάτι της πρώτης κατηγορίας, όσον αφορά στη συχνότητα που συναντάται η ζεύξη αυτή, το καταλαμβάνουν οι διασυνδέσεις σε αποστάσεις μέχρι τα 2 km, ουσιαστικά δηλαδή εντός ενός κέντρου δεδομένων όπου τα υπολογιστικά του συστήματα φιλοξενούνται σε ένα κτήριο (σε αντιπαραβολή λ.χ. με διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων εντός ενός campus που εμπίπτουν στην ίδια κατηγορία). Το σημαντικότερο μερίδιο στην αγορά των δομών που καλύπτουν τις ζεύξεις αυτές καταλαμβάνουν τα ενεργά οπτικά καλώδια. Η βασική τους διαφορά από έναν κλασσικό οπτικό πομποδέκτη είναι το γεγονός ότι η οπτική ίνα είναι συνδεδεμένη πάνω στην «άκρη» της οπτικής τους μηχανής. Επιπρόσθετα, έχουν κάποια πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους άλλους πομποδέκτες όπως το χαμηλό τους κόστος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

Παρόλα αυτά εγείρεται μια σημαντική πρόκληση· με ποιο τρόπο και με χρησιμοποιώντας ποιες τεχνολογίες, τα ενεργά οπτικά καλώδια θα συνεχίσουν να ικανοποιούν τις ολοένα και διογκούμενες ανάγκες της κίνησης της πληροφορίας. Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχείρησε να συμβάλλει δημιουργικά στο ερώτημα αυτό. Σχεδιάστηκαν, μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν πειραματικά οπτικές και οπτο-ηλεκτρονικές δομές οι οποίες αξιολογήθηκαν προκειμένου να κριθεί η καταλληλότητά τους για την ολοκλήρωσή τους σε ένα γρήγορο, μεγάλης χωρητικότητας και αξιόπιστο ενεργό οπτικό καλώδιο το οποίο αναπτύχθηκε σε συνέργεια με άλλα Πανεπιστήμια αλλά και εταιρίες της Ευρώπης. Για να γίνει αυτό

συνδυάστηκαν μια σειρά από τεχνολογίες και τεχνικές οι οποίες συνοπτικά ήταν οι εξής: η πλατφόρμα των φωτονικών πυριτίου, δομές μονορυθμικών VCSELs με λειτουργία στο παράθυρο της C-band (1550 nm), πολυπλεξία στο μήκος κύματος, χωρική πολυπλεξία με χρήση πολυπύρηνης ίνας, διαμόρφωση τεσσάρων σταθμών κατά πλάτος (PAM-4) και αναβαθμισμένη τεχνική συσκευασίας.

Στις παρακάτω υποενότητες παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής:

### **6.1.1 Δομή πολυπλέκτη/ αποπολυπλέκτη σε πλατφόρμα SOI**

Σκοπός της μελέτης και σχεδιασμού της συγκεκριμένης δομής ήταν η χρήση της για πολυπλεξία στο μήκος κύματος πάνω στην SOI πλατφόρμα και μάλιστα με ομοιόμορφη απόκριση στην πόλωση (αναισθησία στην πόλωση). Συγκεκριμένα, ο ρόλος των πολυπλεκτών ήταν να πολυπλέκει ανά δυο τα σήματα τα οποία εκπέμπονταν από τα μονορυθμικά VCSELs και εισέρχονταν στην SOI πλατφόρμα μέσω grating couplers. Αντιστοίχως, στη μεριά του δέκτη οι αποπολυπλέκτες χρησιμοποιούνταν πριν από τις φωτοδιόδους προκειμένου το κάθε σήμα να διαχωριστεί και να καταλήξει σε μια φωτοδίοδο. Για την υλοποίηση της δομής διερευνήθηκαν οι διαφορετικές επιλογές υλοποίησης ως προς την καταλληλότητά τους. Έτσι μελετήθηκαν δομές όπως τα echelle gratings, οι δακτύλιοι συντονισμού (ring resonators) και τα συμβολόμετρα καθυστέρησης τα οποία και επιλέχθηκαν λόγω των ιδιοτήτων τους ως τα πλέον κατάλληλα. Πιο συγκεκριμένα, ο (απο)πολυπλέκτης βασίστηκε στη λογική ενός Mach-Zehnder συμβολομέτρου (MZI). Για την ανάπτυξη των συζευκτών του MZI χρησιμοποιήθηκαν MMIs μετά από μελέτη η οποία έγινε για τις πιθανές διαφορετικές επιλογές υλοποίησης (edge couplers, directional couplers). Η αναισθησία στην πόλωση που ήταν και ένα από τα βασικά ζητούμενα έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη επιλογή των MMIs ως συζευκτών του MZI.

Το πρώτο βήμα ήταν ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση των 1x2 (ή 2x1 η λειτουργία είναι κοινή) και 2x2 MMI συζευκτών. Για τον λόγο αυτό επιστρατεύτηκε το προσομοιωτικό εργαλείο Field Designer της Phoenix. Ουσιαστικά μέσω των προσομοιώσεων αυτών καθορίστηκε το πλάτος των δομών MMIs, υπολογίζοντας τους ενεργούς δείκτες διάθλασης που συναντούν οι διάφοροι κυματοδηγούμενοι ρυθμοί μέσα στην SOI πλατφόρμα. Εν συνεχεία, και με τη χρήση ενός άλλου εργαλείου της σουίτας της Phoenix, του OptoDesigner, μελετήθηκε τόσο το μήκος των δομών όσο και οι ακριβείς διαστάσεις των θυρών εισόδου/εξόδου τους. Με δεδομένο ότι οι οποιεσδήποτε κατασκευαστικές ατέλειες κατά την ανάπτυξη των (από)πολυπλεκτών, θα επηρέαζαν ουσιαστικά τη λειτουργία τους, κρίθηκε αναγκαίο οι δομές αυτές να έχουν δυνατότητα ρύθμισης (tunability) με τη χρήση ηλεκτροδίων θέρμανσης πάνω στους κυματοδηγούς του πυριτίου. Έτσι, ως επόμενο βήμα μελετήθηκε η θερμική εξάρτηση του ενεργού δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού προκειμένου να προσδιοριστεί η θερμική συμπεριφορά της πλατφόρμας. Αφού προσδιορίστηκαν οι παραπάνω παράμετροι του φυσικού υποστρώματος, μελετήθηκε συνολικά το MZI (μαζί με τους MMI συζεύκτες) για να καθοριστούν οι διαστάσεις της δομής. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ASPIC στο οποίο πλέον το MZI

μελετάται ως μοντέλο στο επίπεδο της συσκευής (component). Τέλος, κατασκευάστηκαν οι μάσκες για τους πολυπλέκτες/αποπολυπλέκτες με κατάλληλες διακυμάνσεις σε διάφορα χαρακτηριστικά τους προκειμένου να δοκιμαστούν στο εργαστήριο και να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους. Το πλακίδιο που προέκυψε μετρήθηκε στο εργαστήριο αλλά οι δομές δεν ήταν λειτουργικές λόγω αστοχιών (μολύνσεις- contamination) κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης.

### **6.1.2 Μονορυθμικά VCSELs μεγάλου εύρους ζώνης στα 1550 nm.**

Τα VCSELs είναι ίσως η πιο καθοριστική δομή που μελετήθηκε για την ανάπτυξη του Ενεργού Οπτικού Καλωδίου. Αποτελούν πέρα από την πηγή της φέρουσας ακτινοβολίας και το στοιχείο πάνω στο οποίο γίνεται η διαμόρφωση του οπτικού σήματος. Για τον λόγο αυτό έγινε μια πολύ επισταμένη μελέτη της φυσικής λειτουργίας των VCSELs και μετρήθηκε ένα πολύ μεγάλος αριθμός δομών προκειμένου να επιλεγθούν αυτές με τα ευνοϊκότερα χαρακτηριστικά. Οι μετρήσεις περιλάμβαναν τη λήψη των L-I-V καμπυλών για τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας τους, τις μετρήσεις συμπεριφοράς της πόλωσης ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και τον προσδιορισμό των s-παραμέτρων μέσω μετρήσεων πάνω σε μικροκυματικό σταθμό βάσης. Αφού ολοκληρώθηκε η μελέτη αυτή και επιλέχθηκαν οι πιο κατάλληλες δομές, εν συνεχεία χρησιμοποιήθηκαν, προτού ενσωματωθούν στο ενεργό οπτικό καλώδιο, σε δυο συστημικά (system) πειράματα. Στο πρώτο πείραμα χρησιμοποιήθηκε μια καινοτόμος μέθοδος δημιουργίας ενός PAM-4 παλμού μέσα από την τεχνική της πολυπλεξίας στην πόλωση. Η τεχνική αυτή εκμεταλλεύτηκε τη μονορυθμικότητα των VCSELs προκειμένου να διπλασιάσει ουσιαστικά την απόδοση του εύρους ζώνης τους. Επίσης, η προτεινόμενη αυτή τεχνική διέθετε κάποια πολύ ευεργετικά χαρακτηριστικά αφού απέφευγε τη χρήση σύμφωνης ανίχνευσης, η οποία προσθέτει κόστος και πολυπλοκότητα στο σύστημα, και απέφευγε τη χρήση γραμμικών ηλεκτρονικών ενισχυτών και δεν απαιτούσε την «αυστηρή» οδήγηση των δομών εντός της γραμμικής τους περιοχής. Επιτεύχθηκε μετάδοση 28 Gb/s στα 500 m, με κύρια στενωπό να αποτελεί η φωτοδίοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη. Το δεύτερο πείραμα το οποίο πραγματοποιήθηκε στο ΕΦΕ με τις συγκεκριμένες δομές VCSEL ήταν η μετάδοση πληροφορίας back-to-back στα 80 Gb/s, με τρόπο διαμόρφωσης τεσσάρων σταθμών, που για τη συγκεκριμένη τεχνολογία το χρονικό διάστημα εκείνο αποτελούσε ρυθμό δεδομένων ρεκόρ. Να σημειωθεί ότι η επιτεύχθηκε επίσης μετάδοση στα 64 Gb/s σε μήκος ίνας 500 m.

### **6.1.3 Πειραματική επίδειξη πομπού, δέκτη και διεπαφής απεμπλοκής**

Ως συνέχεια της δουλειάς που περιγράφηκε, ολοκληρωμένες δομές πομπού, δέκτη καθώς και διεπαφής απεμπλοκής δοκιμάστηκαν στο εργαστήριο σε συστημικά πειράματα. Οι δομές αυτές αποτελούνταν από στοιχεία και κυκλώματα τα οποία μελετήθηκαν, σχεδιάστηκαν και μετρήθηκαν στα πλαίσια συνεργασίας με άλλα πανεπιστήμια και εταιρείες. Το πρώτο πείραμα που περιγράφεται έγινε με τη χρήση του πομπού πρώτης γενιάς με τον οποίο επιτεύχθηκε μετάδοση δεδομένων στα 40 Gb/s με τη χρήση PAM-4 διαμόρφωσης σε απόσταση έως και 1 km. Στη συνέχεια,

έλαβαν χώρα πειράματα με τον πρώτης και δεύτερης γενιάς δέκτη. Στην περίπτωση του πρώτου, επιτεύχθηκε λήψη NRZ σήματος στα 40 Gb/s και PAM-4 στα 64 Gb/s. Ο δεύτερης γενιάς δέκτης διαθέτοντας βελτιωμένο σχεδιασμό είχε επιτυχή λήψη PAM-4 σήματος στα 70 Gb/s. Το επόμενο βήμα ήταν η επιστράτευση τόσο του πομπού όσο και του δέκτη σε μια κοινή πειραματική διάταξη προκειμένου να αξιολογηθεί το συνολικό link που θα αποτελούσε κομμάτι (συγκεκριμένα το ένα lane) του ενεργού οπτικού καλωδίου. Το αποτέλεσμα ήταν ιδιαίτερα θετικό αφού έγινε back-to-back μετάδοση PAM-4 σήματος στα 64 Gb/s. Τέλος, η δομή η οποία εξετάστηκε ήταν αυτή της διεπαφής απεμπλοκής. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν τέσσερα οπτικά διαμορφωμένα σήματα PAM-4 στα 28 Gb/s και αφού διαδόθηκαν μέσα στη διεπαφή απεμπλοκής λήφθηκαν από τον δεύτερης γενιάς δέκτη. Η δομή λειτούργησε ικανοποιητικά με δεδομένο ότι πρόσθεσε ελάχιστη επιβάρυνση στην ποιότητα των διαδιδόμενων σημάτων.

## **6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

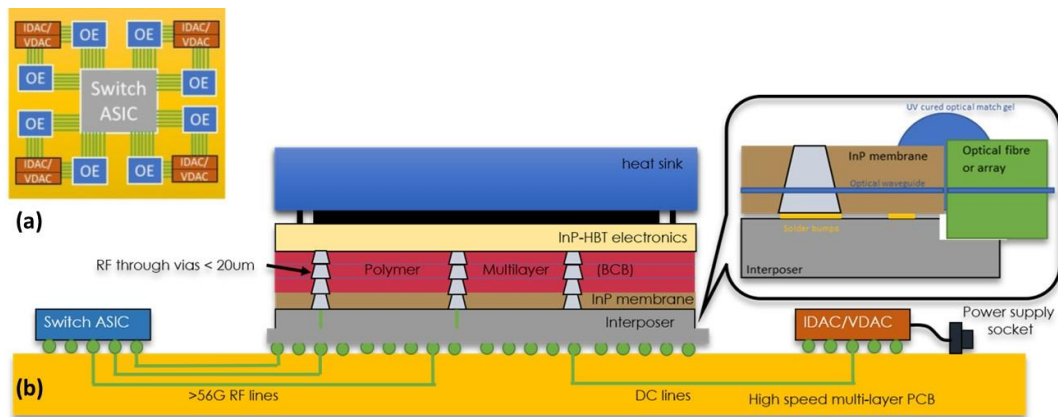
Η παρούσα διδακτορική διατριβή επιχειρεί να συμβάλει στο κομμάτι της οπτικής διασύνδεσης εντός κέντρων δεδομένων μέσω της μελέτης και της ανάπτυξης ενός Ενεργού Οπτικού Καλωδίου μεγάλου εύρους ζώνης. Στην κατεύθυνση αυτή υπάρχουν αρκετές προσεγγίσεις ως προς τις τεχνολογίες και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται κάτι το οποίο αξίζει να διερευνηθεί μελλοντικά. Επιπρόσθετα, η ανάγκη διασύνδεσης όπως έχει υποδειχθεί και παραπάνω δεν αφορά μόνο σε εφαρμογές εντός αλλά και μεταξύ κέντρων δεδομένων. Επίσης διαφορετικές προσεγγίσεις συναγωνίζονται στο κομμάτι αυτό τόσο για τους πομποδέκτες που πρέπει να αναπτυχθούν όσο και για άλλα σημαντικά στοιχεία όπως η αρχιτεκτονική του δικτύου ή δομές όπως οι διακόπτες (switches) που είναι απαραίτητη. Τέλος, ξεφεύγοντας και από τα πλαίσια των κέντρων δεδομένων, οι οπτικές διασυνδέσεις διαδραματίζουν κομβικό ρόλο σε μια σειρά από άλλα δίκτυα επικοινωνίας. Για όλα τα παραπάνω θα περιγραφούν στις επόμενες παραγράφους συνοπτικά κάποιες προτάσεις οι οποίες δυνητικά θα μπορούσαν να αποτελέσουν βάση για μελλοντική έρευνα.

### **6.2.1 Διασυνδέσεις εντός και μεταξύ κέντρων δεδομένων**

Όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις από μεριάς των χρηστών του δικτύου, τόσο παραπάνω βάρος πέφτει στα κέντρα δεδομένων και στη διασύνδεσή τους. Οι λύσεις που αναζητούνται είναι σε όλα τα επίπεδα, αρχιτεκτονικής, τεχνολογίας αλλά και τεχνικών, προκειμένου να ανταπεξέλθουν τα κέντρα δεδομένων στις νέες αυτές προκλήσεις. Τόσο το κομμάτι των διασυνδέσεων εντός, όσο και αυτό των διασυνδέσεων μεταξύ κέντρων δεδομένων είναι στο προσκήνιο. Ήδη η έρευνα στρέφεται στις επόμενες γενιές διασυνδέσεων που θα παρέχουν 800 Gb/s και 1.6 Tb/s ρυθμούς μετάδοσης [6.1]. Για να γίνει όμως αυτό δυνατό απαιτείται πέρα από τη δυνατότητα αύξησης χωρητικότητας ανά γραμμή (per lane) και ένα νέο παράδειγμα που θα ξεπερνά τα εμπόδια που θέτουν οι υπάρχουσες τεχνικές συσκευασίας των pluggables. Έτσι υπάρχει μια μετατόπιση του ενδιαφέροντος προς λύσεις στις οποίες οι οπτικοί πομποδέκτες συσκευάζονται μαζί με τα switch ASICs (co-packaged optics)



σε ένα κοινό PCB και λειτουργούν ως δορυφόροι του [6.2]-[6.4]. Αυτά τα Multi-Chip-Modules δηλαδή οι συνενώσεις πολλών πλακιδίων σε ένα φορέα, μεταφέρουν τις οπτικές δομές μακριά από την πρόσοψη των διακοπών προς το εσωτερικό τους, ξεπερνώντας τις στενωπούς που θέτουν τα front panels στους ρυθμούς μετάδοσης των δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται τόσο με την ελαχιστοποίηση όσο και με την απλοποίηση των συνδέσεων μεταξύ των διαφορετικών δομών πάνω στο PCB.



Εικόνα 141: (a) Η περιγραφόμενη λογική συσκευασία των οπτο-ηλεκτρικών μηχανών που δρουν ως δορυφόροι του ASIC. Πάνω στο ίδιο board συνυπάρχουν και η προγραμματιζόμενες πηγές τάσεις/ρεύματος, (b) Η ολοκλήρωση ενός προτεινόμενου τέτοιου συστήματος.

Πέρα όμως από τις τεχνικές που ανοίγουν το δρόμο σε πιο αξιόπιστες και μεγαλύτερης χωρητικότητας διασυνδέσεις, ίσως τον πιο κρίσιμο ρόλο διαδραματίζουν οι οπτικές και ηλεκτρονικές δομές. Το επόμενο βήμα σε μια γενιά με πιο γρήγορες, ενεργειακά και οικονομικά συμφέρουσες δομές που θα πολλαπλασιάσουν τις παρούσες δυνατότητες των διασυνδέσεων, είναι το «ιερό δισκοπότηρο» των οπτικών επικοινωνιών. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες και πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες που συμβάλλουν στην κατεύθυνση αυτή είναι η τεχνολογία του InP [6.5], [6.6]. Το InP είναι ένας από τους λίγους ημιαγωγούς που μπορούν να παρέχουν τόσο ενεργές όσο και παθητικές οπτικές συσκευές και είναι ο βασικός ανταγωνιστής των φωτονικών πυριτίου σε εφαρμογές που αφορούν στα κέντρα δεδομένων. Ενδεικτικά μπορούν να αναφερθούν υψηλής απόδοσης ενεργές δομές που έχουν κατασκευαστεί με τη χρήση της τεχνολογίας InP όπως lasers, φωτοδέκτες, διαμορφωτές ηλεκτρο-απορρόφησης και φάσης, διακόπτες, ενισχυτές και αποσβενυτές. Παράλληλα, οι επιταξικές διαστρωματώσεις του InP μπορούν να σχεδιαστούν κατάλληλα ούτως ώστε να λειτουργούν στα δυο βασικά τηλεπικοινωνιακά παράθυρα των 1310 nm και 1550 nm δίνοντας έτσι και υψηλής ποιότητας παθητικά στοιχεία όπως κυματοδηγούς, κατευθυντικούς συζεύκτες, MMI συζεύκτες, AWGs, Echelle gratings, Bragg gratings, φίλτρα δακτυλίων, πολωτικά στοιχεία κ.α. Μέσα στο παράθυρο που ανοίγουν τα InP φωτονικά βρίσκεται και η τεχνολογία των InP μεμβρανών που είναι μια νέα μέθοδος φωτονικής ολοκλήρωσης που βασίζεται σε μια λεπτή InP μεμβράνη [6.7]. Πιο συγκεκριμένα, αφαιρείται το InP υπόστρωμα και αντικαθίσταται με ένα υπόστρωμα πολυμερούς όπου έχει τη δυνατότητα να περιορίζει τα παρασιτικά φαινόμενα. Αυτή η τεχνική προσφέρει υψηλό οπτικό περιορισμό (confinement) μέσα στους κυματοδηγούς οι οποίοι

ολοκληρώνονται στη μεμβράνη, επιτρέποντας έτσι τη λειτουργία σε υψηλές ταχύτητες με χαμηλές απώλειες. Επιπρόσθετα, λόγω του περιορισμού του φωτός στη μεμβράνη μπορούν να δημιουργηθούν πολύ συμπαγείς συσκευές (ultracompact devices). Μια επίσης πολύ σημαντική δυνατότητα που προσφέρουν, όπως και τα InP φωτονικά εν γένει, είναι η ολοκλήρωση τόσο ενεργών όσο και παθητικών στοιχείων. Η πλατφόρμα αυτή συνδυασμένη με μια σειρά από τεχνικές που θα αναλύσουμε παρακάτω μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ ενδιαφέρον πεδίο που χρήζει διερεύνησης ως μια υψηλής χωρητικότητας λύση για τη διασύνδεση κέντρων δεδομένων.

Στην κατεύθυνση αυτή λοιπόν, υπάρχει η δυνατότητα ενεργών δομών με πολύ μεγάλο εύρος ζώνης. Συγκεκριμένα, δομές EMLs με εύρος ζώνης άνω των 100 GHz, καθώς και UTC φωτοδιόδοι επίσης με εύρος ζώνης στα 100 GHz. Λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι μπορούν να αναπτυχθούν συστάδες (arrays) από τέτοιες δομές, γίνεται αντιληπτό ότι διαμορφώνεται η δυνατότητα για πολύ μεγάλη χωρητικότητα on-chip, τέτοια που απαντάει αποτελεσματικά στις προκλήσεις των μελλοντικών απαιτήσεων. Επίσης, με τη δυνατότητα κατασκευής SOAs στην ίδια πλατφόρμα εξασφαλίζεται και η αποτελεσματική ενίσχυση των παραγόμενων σημάτων. Παράλληλα, όσον αφορά τα παθητικά στοιχεία, μπορούν να κατασκευαστούν κατάλληλες δομές για (απο)πολυπλεξία των συστάδων EMLs και φωτοδιόδων που θα κατασκευαστούν. Ένα πολύ ενδιαφέρον χαρακτηριστικό έρχεται να προστεθεί από την τεχνική του Selective Area Growth (SAG) [6.8]. Επί της ουσίας η SAG επιτρέπει την συν-ολοκλήρωση (co-integration) στο ίδιο chip, ενεργών με διαφορετικό παράθυρο λειτουργίας. Έτσι είναι δυνατό σε ένα μόνο fabrication round να παράγονται δομές οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα να παράγονται EMLs και φωτοδιόδων κάποιες από τις οποίες θα λειτουργούν στην O-band και κάποιες στην C-band. Ανοίγει λοιπόν με πολύ μικρό επιπλέον κόστος, η βεντάλια των εφαρμογών στις οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δομές αυτές.

Στη μεριά των ηλεκτρονικών, η τεχνολογία InP-HBT μοιράζεται το ίδιο σύστημα υλικών με τις InP μεμβράνες με αποτέλεσμα να υπάρχει ταύτιση των θερμικών συντελεστών τους και έτσι να δημιουργείται η δυνατότητα οι δύο «κόσμοι» να πλησιάσουν σε πολύ κοντινή απόσταση on-chip (<20μm) μέσω wafer-scale bonding. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την κατασκευή πολύ γρήγορων ηλεκτρονικών τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στη μεριά του πομπού όσο και σε αυτή του δέκτη. Με δεδομένο ότι οι οπτικές δομές οι οποίες μπορούν να κατασκευαστούν έχουν πολύ μεγάλο εύρος ζώνης και άρα οι ρυθμοί της πληροφορίας που θα μεταδοθούν μπορούν να είναι πολύ υψηλοί, υπάρχει αντίστοιχη απαίτηση και από το κομμάτι των ηλεκτρονικών. Παρόλα αυτά, οι διαθέσιμοι SERDES στην αγορά ακόμα δεν μπορούν να φτάσουν στις ταχύτητες αυτές. Προκειμένου να γίνει η διεπαφή τους λοιπόν με την οπτοηλεκτρονική μηχανή, μπορούν να κατασκευαστούν γραμμικοί αναλογικοί πολυπλέκτες και αποπολυπλέκτες στο πεδίο του χρόνου. Οι δομές αυτές στην τεχνολογία InP-HBT έχουν ήδη επιδείξει εύρος ζώνης μεγαλύτερο από τα 110 GHz και έτσι κρίνονται ιδανικές. Στη μεριά λοιπόν του πομπού θα υπάρχουν 2 σε 1 αναλογικοί πολυπλέκτες σε συνδυασμό με drivers για τα EMLs και στη μεριά του δέκτη αναλογικοί αποπολυπλέκτες σε συνδυασμό με TIAs. Οι ηλεκτρονικές αυτές

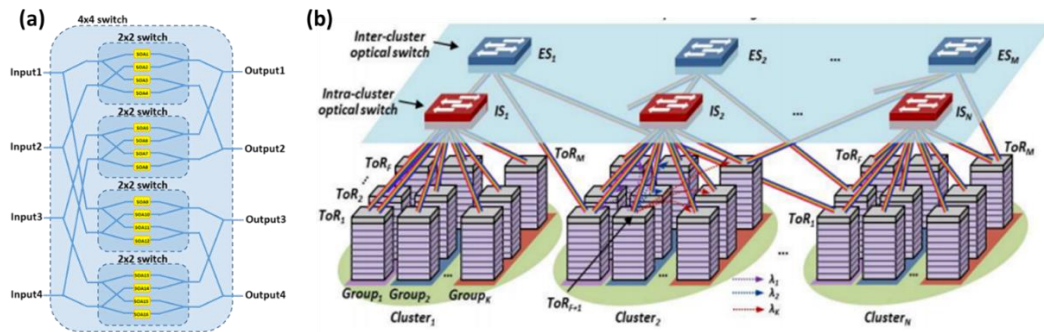
δομές μπορούν να κατασκευάζονται και σε συστάδες και άρα να ταιριάζουν απόλυτα με τις οπτικές δομές που καλούνται να «οδηγήσουν» σε συστήματα πολύ υψηλής χωρητικότητας.

Με τα παραπάνω δεδομένα, δίνεται η δυνατότητα να κατασκευαστούν δυο διαφορετικές εφαρμογές για τη διασύνδεση των υπολογιστικών κέντρων και μάλιστα αυτό να γίνει σε κοινό fabrication round. Υπάρχουν λοιπόν από τη μια μεριά οι δομές που λειτουργούν στο παράθυρο της ελάχιστης διασποράς (O-band) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη οπτικών διασυνδέσεων εντός υπολογιστικών κέντρων, ενώ από την άλλη οι δομές που λειτουργούν στο παράθυρο των ελάχιστων απωλειών (C-band) να βρουν την εφαρμογή τους στη διασύνδεση μεταξύ κέντρων δεδομένων. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για ζεύξεις έως και τα 10 km και στη δεύτερη για την κρίσιμη απόσταση των 10-40 km. Όλα αυτά θα γίνουν με τη χρήση του σχήματος διαμόρφωσης PAM-4 σε ρυθμούς μετάδοσης συμβόλων στα 112 Gbaud (224 Gb/s) ανά γραμμή. Με τη δυνατότητα που παρέχεται από την τεχνολογία για την παραγωγή συστάδων από δομές, αναλόγως με τον αριθμό των ολοκληρωμένων δομών on-chip (4 ή 8) μπορεί να επιτευχθεί συνολικός ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στα 800 Gb/s και 1.6 Tb/s αντίστοιχα. Παράγονται έτσι λύσεις που απευθύνονται στις μελλοντικές απαιτήσεις που θα γεννηθούν στη διασύνδεση τόσο εντός όσο και μεταξύ των κέντρων δεδομένων.

### **6.2.2 Γρήγοροι μεταγωγείς για τη διασύνδεση δικτύων κέντρων δεδομένων**

Η διασύνδεση κέντρων δεδομένων γίνεται επί της ουσίας μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας. Η αρχιτεκτονική που θα ακολουθήσει αυτό το δίκτυο είναι ένα ζήτημα το οποίο έχει διαφορετικές προσεγγίσεις, με πιο επικρατούσες όμως να είναι οι τοπολογίες κυρίως του Leaf-Spine και μετέπειτα του Fat-tree. Για μικρά και μεσαία δίκτυα κέντρων δεδομένων, η πιο διαδεδομένη αρχιτεκτονική είναι η Leaf-Spine δυο στρωμάτων η οποία διασυνδέει δεκάδες έως και εκατοντάδες TORs το κάθε ένα από τα οποία διασυνδέουν έως και 40 εξυπηρετητές. Για μεγάλα και mega δίκτυα κέντρων δεδομένων, χρησιμοποιείται συνήθως η τοπολογία Leaf-Spine τριών στρωμάτων. Οι κυριότερες απαιτήσεις που καλούνται να ικανοποιήσουν τόσο οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές όσο και οι δομές που συναποτελούν τα δίκτυα είναι το μεγάλο εύρος ζώνης, η χαμηλή καθυστέρηση και ο τεράστιος όγκος διασύνδεσης. Σημαντική θέση μέσα στα δίκτυα αυτά κατέχουν οι δομές των μεταγωγέων (switches). Στα σύγχρονα δίκτυα κέντρων δεδομένων οι πιο διαδεδομένοι μεταγωγείς είναι ηλεκτρικοί (που ακολουθούν το πρωτόκολλο Ethernet) με ταχύτητες 40 έως 100 Gb/s ανά θύρα. Παράλληλα έχουν αρχίσει να εγκαθίστανται και μεταγωγείς στα 400 Gb/s ανά θύρα. Παρόλα αυτά όταν χτίζεται ένα κέντρο δεδομένων με μεγάλο αριθμό από εξυπηρετητές (>100000) όπου ο καθένας λειτουργεί σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων (>100 Gb/s), οι υπάρχοντες ηλεκτρικοί μεταγωγείς αποτελούν στενωπούς εύρους ζώνης, εισάγουν μεγάλη καθυστέρηση μεταξύ των εξυπηρετητών, δεν είναι μεγάλης πυκνότητας (high radix) και έχουν και πολύ μικρή απόδοση κόστους. Έτσι για να αντισταθμιστούν κάπως τα φαινόμενα αυτά, χρησιμοποιούνται ιεραρχικές

δομές πολλών στρώματων κάτι το οποίο βέβαια δεν δίνει σημαντική λύση στο πρόβλημα.



Εικόνα 142: (a) Η υλοποίηση ενός 4x4 μεταγωγέα με SOAs και MMIs, (b) η εφαρμογή που βρίσκει στη διασύνδεσης ToRs σε μια OPS αρχιτεκτονική

Για να καταστεί δυνατή η επεκτάσιμη ανάπτυξη τόσο στον αριθμό των συνδεδεμένων δομών όσο και στον όγκο της κίνησης που ανταλλάσσεται απαιτούνται νέες αρχιτεκτονικές και τεχνολογίες. Στην κατεύθυνση αυτή, η τεχνολογία των οπτικών μεταγωγέων (optical switching) έχει αρκετά ελκυστικά χαρακτηριστικά αφού μπορούν να εξυπηρετήσουν μεγάλους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, σε οποιοδήποτε σχήμα διαμόρφωσης προσφέροντας επίσης σημαντική ενεργειακή αποδοτικότητα. Έτσι μειώνονται σημαντικά οι οπτο-ηλεκτρονικές και ηλεκτρο-οπτικές μεταβολές, ενώ μειώνονται και τα στρώματα της αρχιτεκτονικής απλοποιώντας κατά πολύ την όλη υλοποίηση. Νέες αρχιτεκτονικές που εκμεταλλεύονται την τεχνολογία των οπτικών μεταγωγέων έχουν διερευνηθεί για την περίπτωση της διασύνδεσης δικτύων εντός των κέντρων δεδομένων [6.9], [6.10]. Η χρήση της τεχνολογίας των InP μεμβρανών θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί για την ανάπτυξη γρήγορων οπτικών μεταγωγέων. Με τη χρήση των πολωτικά αναίσθητων SOAs που περιγράφηκαν και παραπάνω, καθώς και με παθητικές δομές συζευκτών όπως οι MMIs γίνεται δυνατό να κατασκευαστούν οπτικοί χωρικοί μεταγωγείς με πολύ γρήγορη απόκριση (της τάξης των ns). Οι SOAs, οι οποίοι θα λειτουργούν ως on/off διακόπτες, μπορούν να ολοκληρωθούν μονολιθικά σε πολύ μεγάλο όγκο (>100 SOAs) πάνω στο ίδιο φωτονικό στρώμα βοηθώντας με αυτόν τον τρόπο στη μείωση των συνολικών διαστάσεων της τελικής δομής. Θα υλοποιηθούν έτσι πολύ γρήγοροι μεταγωγείς NxN, με πολύ χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα οι οποίοι μπορούν να διασυνδέουν τα ToRs εντός ενός κέντρου δεδομένων ακολουθώντας μια OPS (optical packet switching) αρχιτεκτονική. Εν κατακλείδι, με την τεχνολογία των InP μεμβρανών μπορεί να δοθεί μια συνολική απάντηση στις μελλοντικές απαιτήσεις διασύνδεσης των κέντρων δεδομένων, τόσο με την κατασκευή οπτικών πομποδεκτών όσο και μεταγωγέων. Για το λόγο αυτό, αποτελεί μια τεχνολογία που αξίζει να μελετηθεί σε βάθος.

# Βιβλιογραφία

- [6.1] <https://ethernetalliance.org/the-2019-ethernet-roadmap/>
- [6.2] S. Fatholouloumi et. al., “1.6Tbps Silicon Photonics Integrated Circuit for Co-Packaged Optical-IO Switch Applications”, in proc. OFC 2020, paper T3H.1.
- [6.3] <https://fuse.wikichip.org/news/3233/ayar-labs-realizes-co-packaged-silicon-photonics/>
- [6.4] <https://www.lightwaveonline.com/optical-tech/components/article/14170143/rockley-photonics-demos-copackaged-optics-optoasic-switch-system-with-multiple-partners>
- [6.5] <https://www.infinera.com/wp-content/uploads/The-Advantages-of-InP-Photonic-Integration-in-High-Performance-Coherent-Optics-0223-WP-RevB-0121.pdf>
- [6.6] <https://research.tue.nl/en/publications/indium-phosphide-inp-for-optical-interconnects>
- [6.7] Jiao, Y., Nishiyama, N., van der Tol, J., van Engelen, J., Pogoretskiy, V., Reniers, S., Kashi, A. A., Wang, Y., Calzadilla, V. D., Spiegelberg, M., Cao, Z., Williams, K., Amemiya, T., & Arai, S. (2020). InP membrane integrated photonics research. *Semiconductor Science and Technology*, 36(1), [013001].
- [6.8] Graham J. Davies, P. J. Skevington, J. S. Foord, C. L. French, C. L. Levoguer, "Selective area growth of III-V semiconductors by chemical beam epitaxy: study of reaction mechanisms," *Proc. SPIE 2140, Epitaxial Growth Processes*, (11 May 1994).
- [6.9] W. M. Mellette, R. Das, Y. Guo, R. McGuinness, A. C. Snoeren, and G. Porter, “Expanding across time to deliver bandwidth efficiency and low latency”, in proc. 17th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '20), February 25–27, 2020, Santa Clara, CA, USA.
- [6.10] W. Miao, F. Yan N. Calabretta, “Towards Petabit/s All-Optical Flat Data Center Networks Based on WDM Optical Cross-Connect Switches with Flow Control”, *J. of Lightwave Techn.*, 34(17), 4066–75, 2016.

# Λίστα Δημοσιεύσεων

## Δημοσιεύσεις σε διεθνή έγκριτα περιοδικά με κρίση:

1. Housseem Brahmi, Giannis Giannoulis, Mourad Menif, Vasilis Katopodis, Dimitrios Kalavrouziotis, Christos Kouloumentas, Panos Groumas, **Giannis Kanakis**, Christos Stamatiadis, Hercules Avramopoulos, Didier Erasme, "On the fly all-optical packet switching based on hybrid WDM/OCDMA labeling scheme", *Optics Communications*, Volume 312, 2014.
2. Dimitrios Apostolopoulos, Paraskevas Bakopoulos, Dimitrios Kalavrouziotis, Giannis Giannoulis, **Giannis Kanakis**, Nikos Iliadis, Christos Spatharakis, Johan Bauwelinck, Hercules Avramopoulos, "Photonic integration enabling new multiplexing concepts in optical board-to-board and rack-to-rack interconnects," *Proc. SPIE 8991*, Optical Interconnects XIV, 89910D (8 March 2014).
3. B. Moeneclaey, **G. Kanakis**, J. Verbrugge, N. Iliadis, W. Soenen, D. Kalavrouziotis, C. Spatharakis, S. Dris, X. Yin, P. Bakopoulos, E. Mentovich, H. Avramopoulos, and J. Bauwelinck, "A 64 Gb/s PAM-4 Linear Optical Receiver," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online)* (Optical Society of America, 2015), paper M3C.5.
4. A. Abbasi, C. Spatharakis, **G. Kanakis**, N. Andre, H. Louchet, A. Katumba, J. Verbist, H. Avramopoulos, P. Bienstman, X. Yin, J. Bauwelinck, G. Roelkens, G. Morthier, "High Speed Direct Modulation of a Heterogeneously Integrated InP/SOI DFB Laser," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 8, pp. 1683-1687, 15 April 15, 2016.
5. F. Zacharatos, N. Iliadis, J. Kanakis, P. Bakopoulos, H. Avramopoulos, I. Zergioti, "Laser direct writing of 40GHz RF components on flexible substrates", *Optics & Laser Technology*, Volume 79, 2016, Pages 108-114, ISSN 0030-3992.
6. N. Iliadis, **G. Kanakis**, N. Argyris, G. Goetz, A. Dede, D. Kalavrouziotis, G. Pouloupoulos, J. Bolten, I. Lazarou, T. Wahlbrink, A. Giesecke, A. Vannucci, D. Apostolopoulos, H. Avramopoulos, "16 × 1 Packaged MUX/DEMUX for Flexible-Grid Optical Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 14, pp. 3050-3059, 15 July 15, 2017.
7. C. Delezoide, K. Christodouloupoulos, A. Kretsis, N. Argyris, **G. Kanakis**, A. Sgambelluri, N. Sambo, P. Giardina, G. Bernini, D. Roccatto, A. Percelsi, R. Morro, H. Avramopoulos, E. Varvarigos, P. Castoldi, P. Layec, S. Bigo, "Marginless Operation of Optical Networks," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 7, pp. 1698-1705, 1 April 1, 2019, doi: 10.1109/JLT.2018.2881840.
8. N. Sambo, K. Christodouloupoulos, N. Argyris, P. Giardina, C. Delezoide, A. Sgambelluri, A. Kretsis, **G. Kanakis**, F. Fresi, G. Bernini, H. Avramopoulos, E. Varvarigos, P. Castoldi, "Experimental Demonstration of a Fully Disaggregated and Automated White Box Comprised of Different Types of Transponders and Monitors," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 824-830, 1 Feb. 1, 2019.
9. N. Sambo, K. Christodouloupoulos, N. Argyris, P. Giardina, C. Delezoide, D. Rocatto, A. Percelsi, R. Morro, A. Sgambelluri, A. Kretsis, **G. Kanakis**, G. Bernini, E. Varvarigos, P. Castoldi, "Field Trial: Demonstrating Automatic Reconfiguration of Optical Networks Based on Finite State Machine," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 16, pp. 4090-4097, 15 Aug. 15, 2019.
10. **Kanakis, G.**; Iliadis, N.; Soenen, W.; Moeneclaey, B.; Argyris, N.; Kalavrouziotis, D.; Spiga, S.; Bakopoulos, P.; Avramopoulos, H.; "High-Speed VCSEL-Based Transceiver

- for 200 GbE Short-Reach Intra-Datacenter Optical Interconnects”, Appl. Sci. 2019, 9, 2488.
11. K. Christodoulopoulos, C. Delezoide, N. Sambo, A. Kretsis, I. Sartzetakis, A. Sgambelluri, N. Argyris, **G. Kanakis**, P. Giardina, G. Bernini, D. Roccatto, A. Percelsi, R. Morro, H. Avramopoulos, P. Castoldi, P. Layec, and S. Bigo, "Toward efficient, reliable, and autonomous optical networks: the ORCHESTRA solution [Invited]," J. Opt. Commun. Netw. 11, C10-C24 (2019).
  12. Giannis Giannoulis, Konstantinos Tokas, Giannis Pouloupoulos, **Giannis Kanakis**, Panagiotis Toumasis, Konstantina Kanta, Dimitrios Apostolopoulos & Hercules Avramopoulos (2019) Integrated Photonic Filters in Support of Converged 5G Mobile Fronthaul & Midhaul Transport Layers, Fiber and Integrated Optics, 38:6, 333-348.
  13. Maria Spyropoulou, **Giannis Kanakis**, Yuqing Jiao, Ripalta Stabile, Nicola Calabretta, Kevin Williams, Jean-Yves Dupuy, Agnieszka Konczykowska, Richard Schatz, Oskars Ozolins, Jakub Zveřina, Martin Žoldák, Paraskevas Bakopoulos, Giannis Patronas and Hercules Avramopoulos, “Towards 1.6T datacentre interconnect technologies: the TWILIGHT perspective”, 2020, J. Phys. Photonics, 2 041002.

***Δημοσιεύσεις σε συνέδρια (με κρίση):***

1. P. Bakopoulos, D. Apostolopoulos, D. Kalavrouziotis, G. Giannoulis, **G. Kanakis**, N. Iliadis, C. Spatharakis, J. Bauwelinck, H. Avramopoulos, “Enabling new multiplexing concepts in optical interconnects through photonic integration”, (2014) Workshop Optical Interconnect in Data Centers.
2. N. Iliadis, **G. Kanakis**, N. Argyris, G. Gotz, I. Lazarou, D. Kalavrouziotis, J. Bolten, T. Wahlbrink, A. L. Giesecke, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, "Bandwidth-Flexible and Wavelength-Selective SOI Filtering Element for Flexible-Grid Applications," in Asia Communications and Photonics Conference 2015, C. Lu, J. Luo, Y. Ji, K. Kitayama, H. Tam, K. Xu, P. Ghiggino, and N. Wada, eds., OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper ASu1B.3.
3. I. Lazarou, **G. Kanakis**, N. Iliadis, D. Kalavrouziotis, G. Pouloupoulos, D. Apostolopoulos, P. Bakopoulos, and H. Avramopoulos, "Bandwidth and Wavelength-Selective MUX/DEMUX Microresonator Elements for Flexible-Grid Applications," in Advanced Photonics 2015, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper IT4A.6.
4. A. Abbasi, C. Spatharakis, **G. Kanakis**, N. S. Andre, H. Louchet, A. Katumba, J. Verbist, X. Yin, J. Bauwelinck, H. Avramopoulos, G. Roelkens, G. Morthier, "PAM-4 and Duobinary direct modulation of a hybrid InP/SOI DFB laser for 40 Gb/s transmission over 2 km single mode fiber," 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), Anaheim, CA, 2016, pp. 1-3.
5. **G. Kanakis**, N. Iliadis, N. Argyris, G. Goetz, A. Dede, G. Pouloupoulos, D. Kalavrouziotis, J. Bolten, I. Lazarou, T. Wahlbrink, A. L. Giesecke, A. Vanucci, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, "16×1 Dual Polarization SOI MUX/DEMUX for Flexible-Grid Optical Networks," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper W2A.17.
6. K. Tokas, C. Spatharakis, **G. Kanakis**, N. Iliadis, P. Bakopoulos, H. Avramopoulos, I. Patronas, N. Liakopoulos, D. Reisis, "A scalable optically-switched datacenter network with multicasting," 2016 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Athens, 2016, pp. 265-270, doi: 10.1109/EuCNC.2016.7561045.

7. N. Iliadis, **G. Kanakis**, N. Argyris, C. Spatharakis, P. Bakopoulos, H. Avramopoulos, S. Spiga, M. C. Amann, "Optical PAM-4 generation through polarization multiplexing in single-polarization single-mode VCSELs," 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Monte Carlo, 2016, pp. 360-363, doi: 10.1109/ICECS.2016.7841207.
8. C. Spatharakis, **G. Kanakis**, N. Iliadis, P. Bakopoulos, H. Avramopoulos, K. Maragos, G. Lentaris, D. Soudris, "A 56 Gbaud reconfigurable FPGA feed-forward equalizer for optical datacenter networks with flexible baudrate- and modulation-format," 2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), Monte Carlo, 2016, pp. 356-359, doi: 10.1109/ICECS.2016.7841206.
9. N. Sambo, K. Christodouloupoulos, N. Argyris, P. Giardina, C. Delezoide, D. Roccatto, A. Percelsi, R. Morro, A. Sgambelluri, **G. Kanakis**, G. Bernini, and P. Castoldi, "Dynamic (re)configuration of optical networks based on monitoring information: field trial," in Advanced Photonics 2018 (BGPP, IPR, NP, NOMA, Sensors, Networks, SPPCom, SOF), OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper NeM2F.3.
10. K. Christodouloupoulos, N. Sambo, N. Argyris, P. Giardina, **G. Kanakis**, A. Kretsis, F. Fresi, A. Sgambelluri, G. Bernini, C. Delezoide, F. Cugini, H. Avramopoulos, and E. Varvarigos, "Observe-Decide-Act: Experimental Demonstration of a Self-Healing Network," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper M3A.7.
11. N. Sambo, K. Christodouloupoulos, N. Argyris, P. Giardina, C. Delezoide, A. Sgambelluri, A. Kretsis, **G. Kanakis**, F. Fresi, G. Bernini, H. Avramopoulos, E. Varvarigos, and P. Castoldi, "Experimental demonstration of fully disaggregated white box including different types of transponders and monitors, controlled by NETCONF and YANG," in Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2018), paper M4A.3.
12. C. Delezoide, K. Christodouloupoulos, A. Kretsis, N. Argyris, **G. Kanakis**, A. Sgambelluri, N. Sambo, P. Giardina, G. Bernini, D. Rocatto, A. Percelsi, R. Morro, H. Avramopoulos, E. Varvarigos, P. Castoldi, P. Layec, S. Bigo, "Pre-Emptive Detection and Localization of Failures Towards Marginless Operations of Optical Networks," 2018 20th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bucharest, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTON.2018.8473928.
13. C. Delezoide, K. Christodouloupoulos, A. Kretsis, N. Argyris, **G. Kanakis**, A. Sgambelluri, N. Sambo, P. Giardina, G. Bernini, D. Rocatto, A. Percelsi, R. Morro, H. Avramopoulos, E. Varvarigos, P. Castoldi, P. Layec, S. Bigo, "Field Trial of Marginless Operations of An Optical Network Facing Ageing and Performance Fluctuations," 2018 European Conference on Optical Communication (ECOC), Rome, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/ECOC.2018.8535236.
14. G. Pouloupoulos, **G. Kanakis**, P. Toumasis, G. Giannoulis, D. Kalavrouziotis, D. Apostolopoulos, and H. Avramopoulos, "Air Trenches-assisted Highly Selective, Fully Flexible SOI Filtering Element," in Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper W2A.6.
15. C. Zervos, M. Spyropoulou, **G. Kanakis**, I. Lazarou, K.-O. Velthaus, E. Rouvalis, G. Torfs, E. Goobar, R. Santos, N. M. Tessema, T. Lamprecht, T. K. Johansen, R. Hersent, H. Mardoyan, S. Dris, T. Alexoudi, P. G. Giardina, D. Roccatto, G. Vickers, H. Avramopoulos, "A new generation of high-speed electro-optical transceivers and flexible bandwidth wavelength selective switches for coherent DCI: the QAMeleon project approach," Proc. SPIE 10924, Optical Interconnects XIX, 109240E (4 March 2019).



**16.**M. Spyropoulou, **G. Kanakis**, Y. Jiao, R. Stabile, N. Calabretta, K. Williams, V. Nodjiadjim, R. Hersent, A. Konczykowska, R. Schatz, O. Ozolins, M. Joharifar, J. Zvěřina, M. Žoldák, P. Bakopoulos, G. Patronas, H. Avramopoulos, "The path to 1Tb/s and beyond datacenter interconnect networks: technologies, components, and subsystems," Proc. SPIE 11712, Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links IV, 117120G (5 March 2021).

# Λίστα Σχημάτων

Εικόνα 1: Συγκριτικό διάγραμμα της οικιακής μέσης κατανάλωσης όγκου δεδομένων ανά μέρα στις ΗΠΑ για τους μήνες Μάρτιος 2019 και Μάρτιος 2020, ανάλογα με το είδος της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε. ....	19
Εικόνα 2: Πρόβλεψη της παγκόσμιας ανάπτυξης των χρηστών του Διαδικτύου για την περίοδο 2018-2023. ....	20
Εικόνα 3: Πρόγνωση της παγκόσμιας ανάπτυξης των κινητών συσκευών και των συνδέσεων. ....	21
Εικόνα 4: Πρόβλεψη ταχυτήτων σταθερών ευρυζωνικών συνδέσεων 2018-2023. ....	21
Εικόνα 5: Ενδεικτική κάτοψη ενός κέντρου δεδομένων- ενός ορόφου. ....	24
Εικόνα 6: Σχηματική απεικόνιση μια πλακέτας που φέρει πάνω της διάφορα chips επεξεργαστών, I/O θύρες και δρομολογητή δεδομένων. Καταδεικνύει την χρησιμότητα των οπτικών διασυνδέσεων σε επίπεδο πλακέτας. ....	29
Εικόνα 7: Σχηματική αναπαράσταση της διασύνδεσης board-to-board με ένθετη εικόνα που περιγράφει το concept της κάθετης ζεύξης. ....	30
Εικόνα 8: Διασύνδεση rack-to-rack με τη χρήση διακοπών και Ενεργών Οπτικών Καλωδίων. ....	32
Εικόνα 9: Κατηγορίες οπτικών διασυνδέσεων με βάση την απόσταση και βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. ....	33
Εικόνα 10: Χαρακτηριστική αρχιτεκτονική: (α) ενός point-to-point φωτονικού link που χρησιμοποιεί ένα μήκος κύματος και (β) ενός φωτονικού link που χρησιμοποιεί πολυπλεξία κατά μήκος κύματος με τη χρήση ολοκληρωμένων (από)πολυπλεκτών. ....	36
Εικόνα 11: Εκτίμηση της αγοράς Ενεργών Οπτικών Καλωδίων μέχρι το 2024 για τεχνολογίες 10G και 25G per lane. ....	38
Εικόνα 12: Αύξηση της συνολικής χωρητικότητας ως συνάρτηση της ταχύτητας, του σχήματος διαμόρφωσης και των παράλληλων γραμμών, ....	41
Εικόνα 13: Η αρχιτεκτονική του ενεργού οπτικού καλωδίου με αποτυπωμένες τόσο τις βασικές καινοτομίες όσο και τον τρόπο της 3D ολοκλήρωσής τους πάνω στην πλατφόρμα. ....	53
Εικόνα 14: Μπλοκ διάγραμμα της 208 Gb/s οπτικής διασύνδεσης, επιπέδου board. ....	55
Εικόνα 15: 320 Gb/s QSFP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. ....	56
Εικόνα 16: 960 Gb/s CXP Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. ....	56
Εικόνα 17: CXP σε QSFP break-out Ενεργό Οπτικό Καλώδιο. ....	57
Εικόνα 18: (α) VCSEL και (β) ένα Fabry Perot laser. ....	58
Εικόνα 19: Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και το προσομοιωμένο στάσιμο κύμα του οπτικού πεδίου μέσα στην κοιλότητα του VCSEL με μήκος κοιλότητας στα 3/2 του λ, και μια διπλή επίστρωση οξειδίου πάνω από την ενεργό περιοχή. Η ένθετη εικόνα δείχνει την επικάλυψη του στάσιμου κύματος με το κβαντικό πηγάδι και το κοντινότερο στρώμα οξειδίου. ....	59
Εικόνα 20: Διαφορετικές μέθοδοι ηλεκτρικού και οπτικού περιορισμού: (a) με χρήση air post etching, (b) με αναγέννηση του mesa, (c) με εμφύτευση πρωτονίων, (d) με άνοιγμα οξειδίου, (e) με φωτονικό κρύσταλλο και (f) με buried tunnel-junction. ....	61

Εικόνα 21:Κατανομές εγκάρσιας έντασης των κατώτερης τάξης ρυθμών LP <sub>1p</sub> σύμφωνα με την εξίσωση 4. ....	64
Εικόνα 22: (α) Πραγματικός όρος του δείκτη διάθλασης και κανονικοποιημένη κατανομή έντασης πεδίου κατά μήκος ενός εγκάρσιου τμήματος του VCSEL και (β) μεγέθυνση της ενεργού περιοχής και θέση της διασταύρωσης σήραγγας. ....	66
Εικόνα 23: (α) Πρώτη γενιά μονών VCSEL όπως φαίνονται από ένα οπτικό μικροσκόπιο, (β) σχηματικό της διατομής του τελικού VCSEL. ....	69
Εικόνα 24: Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε παραπάνω. Στην εικόνα φαίνονται: ο ραδιοκυματικός σταθμός βάσης, το οπτικό μικροσκόπιο και ο διανυσματικός αναλυτής δικτύου (VNA). ....	70
Εικόνα 25: Κοντινή άποψη του (α) ραδιοκυματικού probe tip και (β) της προσαρμοσμένης βάσης στήριξης της οπτικής ίνας. ....	71
Εικόνα 26: (α) Η επαφή ενός GSG probe tip με το chip των VCSELs και (β) το ραδιοκυματικό probe tip και το chip με VCSELs όπως φαίνεται μέσα από το μικροσκόπιο. ....	71
Εικόνα 27: Το αποτέλεσμα της βαθμονόμησης χρησιμοποιώντας τη SOLT μέθοδο σε υπόστρωμα αντίστασης 50 Ohm. Τα στιγμιότυπα πάρθηκαν με χρονική απόσταση μιας ώρας το ένα από το άλλο. Απώλειες επιστροφής (return loss) της τάξης των 30 dB παρατηρήθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις. ....	72
Εικόνα 28: (α) Τυπική υλοποίηση μιας φωτοδιόδου κυματοδηγού και (β) ο προτεινόμενος τρόπος υλοποίησης του δέκτη στην περίπτωση μας με χρήση φωτοδιόδων κυματοδηγού για συμβατότητα με QSFP και CXP Ενεργά Οπτικά Καλώδια. ....	73
Εικόνα 29: Σχεδιαστική απεικόνιση των chip με τις φωτοδιόδους. (α) Μη ενισχυμένοι δέκτες και (β) δέκτες με προ-ενίσχυση. ....	74
Εικόνα 30: Το σχέδιο της τελικής μάσκας με τις δυο διαφορετικές προσεγγίσεις στη σχεδίαση των φωτοδιόδων. ....	75
Εικόνα 31: Διαφορετικές μέθοδοι τοποθέτησης της συστάδας φωτοδιόδων κυματοδηγού: (α) Flip-chip μέθοδος και (β) butt-coupling, χρήση wirebonds και ενεργή ευθυγράμμιση. ....	76
Εικόνα 32: Διατομή της φωτοδιόδου κυματοδηγού με αποτυπωμένες τις πιο χαρακτηριστικές διαστάσεις της. ....	76
Εικόνα 33: Λειτουργικό διάγραμμα της 3D ολοκλήρωσης. ....	77
Εικόνα 34: (a) Strip SOI κυματοδηγός, (β) Rib SOI κυματοδηγός. ....	79
Εικόνα 35: (α) Θεμελιώδης TE και (β) θεμελιώδης TM ρυθμός μέσα σε έναν 400x340 nm strip SOI κυματοδηγό. ....	80
Εικόνα 36: Σχηματική αναπαράσταση ενός SOI grating coupler. ....	82
Εικόνα 37: Προσομοίωση της δομής του grating coupler χρησιμοποιώντας τον 2D-FDTD solver ....	83
Εικόνα 38: (α), (c) Τυπική δομή ανεστραμμένου taper- συζεύκτη το οποίο διαθέτει ένα SU-8 περίβλημα και για υπερ-περίβλημα (overcladding) χρησιμοποιεί τον αέρα, (b), (d) επίπεδη δομή συζεύκτη η οποία χρησιμοποιεί Silicon Nitride ως περίβλημα και SOG ως υπερ-περίβλημα. ....	83

Εικόνα 39: Σχηματικό διάγραμμα της οκτακάναλης fanout δομής που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως διεπαφή για την πολυπύρηνη ίνα. Η διάσταση της 2D συστοιχίας είναι περίπου στα 30 μm ενώ της 1D στα 127 μm. ....	85
Εικόνα 40: Αριστερά, η εικόνα από το μικροσκόπιο της επιφάνειας με τα επτά κανάλια, δεξιά η εικόνα από το μικροσκόπιο μιας αντίστοιχης εμπορικά διαθέσιμης διεπαφής επτά καναλιών.....	85
Εικόνα 41: Σχηματική 3D απεικόνιση της QSFP δομής.....	91
Εικόνα 42: Η απλουστευμένη 3D απεικόνιση του CXP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου. Αποτυπώνονται μόνο τα τέσσερα από τα δώδεκα κανάλια της δομής. ....	93
Εικόνα 43: Το καλώδιο «απεμπλοκής» CXP-σε-QSFP.....	94
Εικόνα 44: Η συμπληρωματική συνάρτηση μεταφοράς στις δυο εξόδους ενός Mach Zehnder στην περίπτωση λόγου ζεύξης (α) 50:50 και (β) 70:30. ....	102
Εικόνα 45: (α) 3D απεικόνιση και (β) μήκος αλληλοσύζευξης ως συνάρτηση του κενού για τις δυο πολωτικές καταστάσεις σε έναν κατευθυντικό συζεύκτη.....	102
Εικόνα 46: (α) 3D αποτύπωση του 1x2 MMI συζεύκτη και (β) μήκος αλληλοσύζευξης ως συνάρτηση του κενού μεταξύ των κυματοδηγών εξόδου και για τις δυο πολωτικές καταστάσεις.....	103
Εικόνα 47: Η κάτοψη του 2x2 συζεύκτη με αποτυπωμένες τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές. Το πλάτος και μήκος των κωνικών δομών (tapers) καθώς επίσης και το μήκος των straight κυματοδηγών ήταν ίδια για τις δομές εισόδου και εξόδου. Για τον 1x2 MMI συζεύκτη οι μεταβλητές ήταν οι ίδιες. ....	103
Εικόνα 48: Σχηματική απεικόνιση του Mach Zehnder ως πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη. Οι δομές των MMIs είναι κυκλωμένες πάνω στο σχήμα. ....	104
Εικόνα 49: Σχηματικό ενός (α)2x2 και ενός (β)2x1 συζευκτών που χρησιμοποιήθηκαν στις δυο άκρες μιας δομής Mach Zehnder.....	104
Εικόνα 50: (α) διατομή του κυματοδηγού με τους ενεργούς δείκτες διάθλασης, (β) θεμελιώδης ρυθμός και ρυθμός δεύτερης τάξης της TE πολωτικής κατάστασης και (γ) θεμελιώδης ρυθμός και ρυθμός δεύτερης τάξης της TM πολωτικής κατάστασης για έναν MMI συζεύκτη με πλάτος 2 μm.....	105
Εικόνα 51: (α) Κάτοψη του 1x2 MMI συζεύκτη και (β) βήματα βελτιστοποίησης με μεταβλητό μήκος MMI.....	106
Εικόνα 52: (α) Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και η κάτοψη της BPM διάδοσης ενός 1x2 MMI συζεύκτη με τις αντίστοιχες τιμές αλληλοεπικάλυψης για (β) TE και (γ) TM καταστάσεις πόλωσης.....	107
Εικόνα 53: (α) Κάτοψη και (β) βήματα βελτιστοποίησης με διακύμανση του μήκους του MMI για έναν 2x2 MMI συζεύκτη .....	107
Εικόνα 54: (α) Το προφίλ του δείκτη διάθλασης και η κάτοψη της BPM διάδοσης ενός 2x2 MMI συζεύκτη με τις αντίστοιχες τιμές αλληλοεπικάλυψης για (β) TE και (γ) TM καταστάσεις πόλωσης.....	108
Εικόνα 55: (α) Διατομή του κυματοδηγού όπως εισήχθη στους Mode solvers, (β) προφίλ του κυματοδηγού από την FMM μέθοδο και (γ) προφίλ του κυματοδηγού από την FD μέθοδο .....	110

Εικόνα 56: Θεμελιώδης (α) TE και (β) TM ρυθμός χρησιμοποιώντας τον FMM αλγόριθμο. Αντίστοιχα, θεμελιώδης (c) TE και (d) TM ρυθμός χρησιμοποιώντας τον FD αλγόριθμο.....	110
Εικόνα 57: (α) Διατομή του κυματοδηγού του δακτυλίου, (β) SEM κάτοψη της δομής και (γ) μετατόπιση μήκους κύματος ως συνάρτηση της εφαρμοζόμενης τάσης.....	111
Εικόνα 58: (α) Η διατομή και το προφίλ του δακτυλίου συντονισμού της AMO, (β) το προφίλ της δομής όπως υπολογίστηκε από τον FD solver και (γ) η διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης της δομής ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του θερμοαντικειμένου.....	112
Εικόνα 59: (α) κατανομή της θερμοκρασίας και (β) θερμικά επαγόμενη διακύμανση του δείκτη διάθλασης για το δακτύλιο συντονισμού της AMO για θερμοκρασία θερμοαντικειμένου ίση με 87.8 °C.....	112
Εικόνα 60: (α) Προφίλ δεικτών διάθλασης των κυματοδηγών της συγκεκριμένης πλατφόρμας όπως υπολογίστηκε από τον FD solver, (β) κατανομή της θερμοκρασίας και (γ) προφίλ της διακύμανσης του δείκτη διάθλασης θεωρώντας θερμοκρασία ηλεκτροδίου ίση με 87.8 οC.....	113
Εικόνα 61: 3D σχηματικό του πολυπλέκτη.....	114
Εικόνα 62: 3D απεικόνιση του πολυπλέκτη.....	115
Εικόνα 63: (α) ενεργός δείκτης διάθλασης και (β) δείκτης διάθλασης ομάδας ως συνάρτηση του πλάτους του κυματοδηγού για την TE και την TM πόλωση.....	116
Εικόνα 64: Η διάταξη του πολυπλέκτη όπως αναπτύχθηκε στο ASPIC.....	117
Εικόνα 65: Φασματική απόκριση των θυρών BAR και CROSS για (α) TM και (β) TE πόλωση και (γ) TE και TM φασματική απόκριση της θύρας CROSS.....	117
Εικόνα 66: (α) Συσκευή αποπολυπλέκτη που αναπτύχθηκε στο ASPIC, (β) φασματική απόκριση του TE της CROSS θύρας για τον TE και τον TM ρυθμό και (γ) θερμοοπτική ρύθμιση της φασματικής συμπεριφοράς του TE και του TM ρυθμού. ....	118
Εικόνα 67: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης, θερμικό π μήκος, διαφορά μήκους MZI και για τους δυο βραχίονες του αποπολυπλέκτη, τιμές του ελεύθερου φασματικού εύρους για τον TE και τον TM ρυθμό.....	119
Εικόνα 68: Η άποψη της μάσκας που σχεδιάστηκε για τις δομές του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη.....	120
Εικόνα 69: SEM εικόνες των κατασκευασμένων δομών. (α) ένας grating coupler, (β) και (γ) MMI couplers.....	123
Εικόνα 70: Συνάρτηση μεταφοράς ενός Mach-Zehnder.....	124
Εικόνα 71: (α) Εικόνα μικροσκοπίου από τα VCSELs του πρώτου πλακιδίου που κατασκευάστηκαν στο TUM και (β) η μάσκα του πλακιδίου M5262-1 με επισημασμένο το μετρημένο VCSEL.....	127
Εικόνα 72: LIV χαρακτηριστική καμπύλη του μετρούμενου VCSEL, οπτική ισχύς εξόδου (μπλε γραμμή)και τάση (κόκκινη γραμμή) ως συνάρτηση του εγγεόμενου ρεύματος.....	128
Εικόνα 73: Εξάρτηση του κεντρικού μήκους κύματος από (α) τη θερμοκρασία λειτουργίας και (β) το εγγεόμενο ρεύμα.....	128

Εικόνα 74: Κανονικοποιημένο φάσμα εκπομπής του VCSEL όταν η ίνα είναι τοποθετημένη (α) στην περιοχή λειτουργίας και (β) όταν είναι απομακρυσμένη από την επιφάνεια του VCSEL.....	129
Εικόνα 75: (α) Εικόνα από οπτικό μικροσκόπιο ενός από τα μετρούμενα VCSELS, (β) σχηματικό της διατομής των VCSELS και (γ) L-I-V χαρακτηριστική ενός VCSEL μετά από ανόπτηση 10 λεπτών στους 180 ° C, 240 ° C και 300 ° C σε ατμόσφαιρα αέρα. ....	130
Εικόνα 76: Σχηματική απεικόνιση με διαστάσεις για (α) ένα μονό VCSEL, (β) μια 2x2 συστοιχία και (c) μια 1x4 συστοιχία. (δ) Εικόνα μιας 1x4 συστοιχίας από οπτικό μικροσκόπιο. ....	130
Εικόνα 77: Η στοιχειώδης δομή VCSEL που μετρήθηκε .....	132
Εικόνα 78: Οι δυο πολωτικοί άξονες αναφοράς πάνω στις δομές των VCSEL: (α) Οριζόντιος πολωτικός άξονας, (β) κάθετος πολωτικός άξονας.....	133
Εικόνα 79: (α) Πλακίδιο πυριτίου που δοκιμάστηκε, (β) ο χάρτης με τα μετρούμενα VCSEL.....	133
Εικόνα 80: Η αρχιτεκτονική των VCSEL που μετρήθηκαν .....	134
Εικόνα 81: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των LIV καμπυλών για τους δυο διαφορετικούς πολωτικούς άξονες.....	134
Εικόνα 82: (a-e) Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος για τα VCSELS του τύπου C1, για τους δυο διαφορετικούς πολωτικούς άξονες αναφοράς.....	136
Εικόνα 83: Σταθερότητα της πόλωσης του VCSEL C1-14-4 ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.....	140
Εικόνα 84: Τα VCSELS σε γυάλινο υπόστρωμα τα οποία μετρήθηκαν .....	141
Εικόνα 85: Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος για τα VCSELS id1 και id2 για τους δυο πολωτικούς άξονες αναφοράς .....	141
Εικόνα 86: Μετρήσεις ανάκλασης (S11 ) και διάδοσης (S21 ) για τις RF γραμμές των δειγμάτων id1 και id2.....	142
Εικόνα 87: (α) Πειραματική διάταξη για τις καμπύλες LIV και (β) πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των s-παραμέτρων.....	143
Εικόνα 88: Οπτική ισχύς εξόδου ως συνάρτηση του εγχεόμενου ρεύματος για τα VCSELS τύπου A1 .....	144
Εικόνα 89: Ανάκλαση και διάδοση για τα VCSELS τύπου A1 .....	144
Εικόνα 90: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της διασποράς τρόπων πόλωσης .....	147
Εικόνα 91: (a) LIV χαρακτηριστικές και οπτικό φάσμα, (b) S <sub>11</sub> μέτρηση ενός 16 μm διπλού mesa VCSEL. ....	149
Εικόνα 92: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της οπτικής γέννησης παλμού τεσσάρων σταθμών .....	150
Εικόνα 93: Οπτικά διαγράμματα ματιού για το οπτικά κατασκευασμένο οπτικό σήμα τεσσάρων σταθμών στα 28 Gb/s για (α) απευθείας διάδοση και (β) διάδοση στα 500 m.....	152
Εικόνα 94: Οπτικά διαγράμματα ματιού για την απευθείας οδήγηση του VCSEL με ηλεκτρικό σήμα τεσσάρων σταθμών στα 28 Gb/s για (α) απευθείας διάδοση και (β) διάδοση στα 500 m.....	153

Εικόνα 95: Μετρήσεις BER για το 28 Gb/s PAM-4 σήμα το οποίο κατασκευάστηκε είτε με την τεχνική πολυπλεξίας στην πόλωση είτε με απευθείας διαμόρφωση του VCSEL για περιπτώσεις απευθείας διάδοσης και διάδοσης σε μονότροπη οπτική ίνα μήκους 500 m.....	154
Εικόνα 96: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόδοσης των VCSELs σε ταχύτητες πέρα από τα 28 Gbaud. ....	155
Εικόνα 97: (α) Ο μικροκυματικός σταθμός βάσης που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις και (β) κοντινή άποψη της κατακόρυφης διάταξης ανίχνευσης.....	156
Εικόνα 98: Διαγράμματα ματιού (α) για back-to-back διάδοση στα 32 Gbaud, (b) διάδοση σε 500 m SMF και (γ) για back-to-back διάδοση στα 40 Gbaud.....	157
Εικόνα 99: Καμπύλες BER για τα σενάρια διάδοσης διαμορφωμένων σημάτων τεσσάρων σταθμών στα 32 και 40 Gbaud με χρήση της δομής του VCSEL. ....	158
Εικόνα 100: 28 Gb/s PAM-4 και NRZ λαμβανόμενα διαγράμματα ματιού .....	162
Εικόνα 101: Καμπύλες BER στα 28 Gb/s για PAM-4 και NRZ διαμόρφωση για τα διάφορα μήκη ίνας SMF. (α) Οριζόντιο περιθώριο διαγράμματος ματιού και (β) κάθετο περιθώριο διαγράμματος ματιού. ....	163
Εικόνα 102: 40 Gb/s PAM-4 διάδοση. (α) Το λαμβανόμενο διάγραμμα ματιού σε απευθείας διάδοση και διάδοση σε 1 km ίνας και (β) καμπύλη BER στο οριζόντιο περιθώριο του διαγράμματος ματιού για τα διάφορα μήκη διάδοσης .....	164
Εικόνα 103: Μπλοκ διάγραμμα του ηλεκτρονικού κυκλώματος οδήγησης των φωτοδιόδων.....	165
Εικόνα 104: Τυπική shunt- shunt τοπολογία ανάδρασης. ....	165
Εικόνα 105: Παράμετρος $s_{11}$ του δέκτη .....	166
Εικόνα 106: Παράμετρος $s_{21}$ του δέκτη .....	166
Εικόνα 107: Οπτικό πλάτος διαμόρφωσης του ψηφιακού μας σήματος στον δέκτη όπως αποτυπώθηκε με τη χρήση ενός μικροκυματικού φασματογράφου .....	167
Εικόνα 108: Εικόνα του γραμμικού δέκτη από το μικροσκόπιο .....	168
Εικόνα 109: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. ....	168
Εικόνα 110: Διαγράμματα ματιού στα 25 Gb/s για PRBS μήκος (α) $2^7-1$ και (β) $2^{15}-1$ σύμβολα.....	169
Εικόνα 111: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α) $2^7-1$ και (β) $2^{15}-1$ σύμβολα.....	169
Εικόνα 112: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α) $2^7-1$ και (β) $2^{15}-1$ σύμβολα.....	170
Εικόνα 113: Διαγράμματα ματιού στα 28 Gb/s για PRBS μήκος (α) $2^7-1$ και (β) $2^{15}-1$ σύμβολα.....	170
Εικόνα 114: Καμπύλες BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη για τις διαφορετικές περιπτώσεις ρυθμού συμβόλων και μήκους PRBS.....	170
Εικόνα 115: Διαγράμματα ματιού για διαμόρφωση κατά πλάτος τεσσάρων σταθμών στα (α) 25 Gbaud, (β) 28 Gbaud και (γ) 32 Gbaud. ....	171
Εικόνα 116: Ιστογράμματα που αποτυπώνουν σε στάθμες την λαμβανόμενη ισχύ στο δέκτη.....	172
Εικόνα 117: Καμπύλες BER ως συνάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος στο δέκτη για περιπτώσεις μετάδοσης στα 25, 28 και 32 Gbaud .....	172

Εικόνα 118: Μπλοκ διάγραμμα της δεύτερης γενιάς της 2x1 ΓΙΑ συστοιχίας.....	175
Εικόνα 119: Μικρογραφία του ΓΙΑ δεύτερης γενιάς με αποτυπωμένα τα σημαντικά blocks της δομής καθώς και τα pads εισόδου-εξόδου.....	176
Εικόνα 120: Το PCB που φιλοξένησε τον δεύτερης γενιάς δέκτη .....	176
Εικόνα 121: Η λεπτομέρεια του wire-bonded δέκτη με την δεύτερης γενιάς δομή των ΓΙΑs και των φωτοδιόδων.....	177
Εικόνα 122: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή του γραμμικού δέκτη σε υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης. ....	177
Εικόνα 123: PAM-4 ηλεκτρικά διαγράμματα ματιού στην είσοδο του EAM .....	178
Εικόνα 124: PAM-4 οπτικά διαγράμματα ματιού στην έξοδο του γραμμικού δέκτη για ρυθμούς μετάδοσης στα 25, 28, 32 και 35 Gbaud. ....	179
Εικόνα 125: Καμπύλες BER για ρυθμούς συμβόλων 25, 28, 32 και 35 Gbaud.....	180
Εικόνα 126: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της πλήρους ζεύξης. ....	181
Εικόνα 127: Διαγράμματα ματιού οπτικών σημάτων τεσσάρων σταθμών στην έξοδο του γραμμικού δέκτη στα 25, 28 και 32 Gbaud. Οι μετρήσεις είναι για περιπτώσεις απευθείας διάδοσης και διάδοσης σε 500 m και 2 km μονορυθμικής οπτικής ίνας. .	182
Εικόνα 128: Καμπύλες BER για ρυθμούς συμβόλων 25, 28 και 32 Gbaud για περιπτώσεις απευθείας μετάδοσης και διάδοσης σε μονορρυθμική οπτική ίνα με μήκη 500 m και 2 km. ....	183
Εικόνα 129: Η αρχιτεκτονική της διεπαφής απεμπλοκής μαζί με τα CXP και QSFP ενεργά οπτικά καλώδια.....	184
Εικόνα 130: (Αριστερά) εικόνα μικροσκοπίου της πρόοψης του πλακιδίου με τον τετραπύρρηνο παρεμβολέα. (Δεξιά) αρθρωτή εικόνα που αποτυπώνει την μεταβολή του κυματοδηγού παρεμβολής. ....	185
Εικόνα 131: (Αριστερά) σχηματικό διάγραμμα του επταπύρηνου παρεμβολέα. (Δεξιά) εικόνα του κατασκευασμένου fanout με επτά κανάλια πάνω σε γυάλινο υπόστρωμα. ....	186
Εικόνα 132: Σχηματικό διάγραμμα ενός 2x6 και ενός 1x12 fanout .....	186
Εικόνα 133: Διατομή μιας αυλάκωσης τύπου V (Fiber V-groove array) που φιλοξενεί μια συστοιχία από ίνες.....	187
Εικόνα 134: Διατομή των δυο επταπύρηνων ιών και των V-grooves που τις υποστηρίζουν .....	188
Εικόνα 135: Σχηματική απεικόνιση της διεπαφής απεμπλοκής με τις πολυπύρηνες ίνες εκατέρωθεν .....	189
Εικόνα 136: Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε .....	191
Εικόνα 137: Αποσυσχέτιση καναλιών με τη χρήση ιών διαφορετικού μήκους .....	192
Εικόνα 138: Υποβάθμιση ισχύος ανά μήκος κύματος για διάδοση από τη μεριά της επταπύρηνης ίνας για τις εισόδους R1 έως R6 .....	193
Εικόνα 139: Υποβάθμιση ισχύος ανά μήκος κύματος για διάδοση από τη μεριά των τετραπύρηνων ιών για τις εισόδους L5 έως L12.....	193
Εικόνα 140: Πείραμα για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της διεπαφής απεμπλοκής με εμπορικά διαθέσιμα συνδέσιμα οπτικά.....	194



Εικόνα 141: (a) Η περιγραφόμενη λογική συσκευασίας των οπτο-ηλεκτρικών μηχανών που δρουν ως δορυφόροι του ASIC. Πάνω στο ίδιο board συνυπάρχουν και η προγραμματιζόμενες πηγές τάσεις/ρεύματος, (b) Η ολοκλήρωση ενός προτεινόμενου τέτοιου συστήματος.....201

Εικόνα 142: (a) Η υλοποίηση ενός 4x4 μεταγωγέα με SOAs και MMIs, (b) η εφαρμογή που βρίσκεται στη διασύνδεσης TORs σε μια OPS αρχιτεκτονική .....204

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Παράμετροι αναφοράς της αρχιτεκτονικής των κυματοδηγών .....	80
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των δομών grating couplers που χρησιμοποιήθηκαν. ..	82
Πίνακας 3: Οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του πομπού.....	87
Πίνακας 4: Οπτικές ιδιότητες της πομποδέκτη.....	87
Πίνακας 5: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του QSFP στη μεριά του πομπού.....	89
Πίνακας 6: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές ιδιότητες του QSFP στη μεριά του δέκτη.....	89
Πίνακας 7: Οπτικές ιδιότητες της QSFP δομής.....	90
Πίνακας 8: Ηλεκτρικές και οπτο-ηλεκτρονικές προδιαγραφές του πομπού του CXP Ενεργού Οπτικού Καλωδίου.....	92
Πίνακας 9: Οπτικές ιδιότητες της CXP δομής.....	93
Πίνακας 10: Τελικές παράμετροι του 1x2 MMI συζεύκτη .....	106
Πίνακας 11: Παράμετροι του τελικού σχεδίου για τον 2x2 MMI συζεύκτη.....	108
Πίνακας 12: ενεργός δείκτης διάθλασης, δείκτης διάθλασης ομάδας και απώλειες λόγω του μεταλλικού στελέχους για τον TE και τον TM ρυθμό όπως υπολογίστηκαν από τον FD mode solver.....	111
Πίνακας 13: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικώς επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης και θερμικά $\pi$ μήκη για την TE και την TM πόλωση, όπως υπολογίστηκε από τον FD και τον θερμικό solver.....	113
Πίνακας 14: Ενεργός δείκτης διάθλασης, θερμικά επαγόμενη διακύμανση του ενεργού δείκτη διάθλασης, θερμικά $\pi$ μήκη, διαφορά μηκών του MZI και FSR για τον TE και τον TM ρυθμό.....	118
Πίνακας 15:Σύνοψη των τιμών του λόγου σβέσης της πόλωσης, του rollover ρεύματος και της οπτικής ισχύος εξόδου των μετρούμενων VCSELs. ....	137
Πίνακας 16: Σύνοψη των τιμών του λόγου σβέσης της πόλωσης, του rollover ρεύματος και της οπτικής ισχύος εξόδου των μετρούμενων VCSELs. ....	139
Πίνακας 17: Ρεύμα rollover, οπτική ισχύς εξόδου, λόγος σβέσης πόλωσης και εύρος ζώνης 3 dB για τις δομές VCSELs τύπου C3 .....	147
Πίνακας 18: Σύγκριση του state-of-the-art για οπτο-ηλεκτρονικούς πομπούς.....	164
Πίνακας 19: Τεχνικές προδιαγραφές της δεύτερης γενιάς δέκτη .....	174
Πίνακας 20: Οι απώλειες εισόδου του τετραπύρηνου παρεμβολέα.....	185
Πίνακας 21: Απώλειες εισόδου για τον διπλό επταπύρηνου παρεμβολέα.....	187
Πίνακας 22: Μέτρηση των απωλειών εισόδου για όλα τα κανάλια της διεπαφής απεμπλοκής.....	188
Πίνακας 23: Τιμές του crosstalk μεταξύ των καναλιών της δομής.....	189
Πίνακας 24: Αντιστοίχιση εισόδων εξόδων της δομής .....	190

# Extended Abstract

We live in the doorstep of the so called 4th Industrial Revolution or Industry 4.0, a concept that has been used to describe the now blurred boundaries between the physical, biological and digital world. It is essentially the result of the progress that has been made the last few years in a number of technological fields such as Artificial Intelligence, Internet of Things (IOT), 3D printing, robotics, genetic engineering, quantum computing, nanotechnology, cloud services etc. seeking to provide answers to problems that hitherto seemed intractable. A very interesting characteristic of this era is the pace at which new technological leaps are made. Compared to the previous Industrial Revolutions which had a more linear evolution in time, the technological innovations are now moving at an exponential pace radically transforming the modern way of life. The key enabler of all the above technological breakthroughs is undoubtedly the capability of storing, analyzing, handling and processing Data. Data are considered perhaps the most important resource of our time and for this reason they have been aptly described as the oil of the 21st century. Every aspect of our everyday life, whether it concerns entertainment and socialization, or the evolution of Science and labor, is closely related and depends on the seamless circulation of Data. The recent outbreak of the COVID-19 pandemic, highlighted in the most dramatic way the dependence of our everyday life on the ability of interconnection and uninterrupted access to information, especially through the Internet.

Millions of employees were forced to work from home due to restrictive measures while pupils and students attended their classes remotely. Daily contact at work and school has been replaced by meetings through teleconferencing applications. Also, the use of video-on-demand applications such as Netflix or YouTube, has skyrocketed since in many cases this was the only alternative for personal entertainment while there was a huge increase in online shopping too. In the United States alone, in the first weeks of March 2020 (first weeks of the restrictive measures), in-house data usage increased by 18% compared to the corresponding month of 2019. In the big picture, the numbers are tremendous and describe with the most vivid colours the situation in terms of data usage and Internet access. By the end of 2023, almost 2/3 of the world's population will have access to the Internet (5.3 billion), while the number of devices connected to networks with an IP address will be almost threefold the world's population with the majority of these devices being mobile. At the same time, given the evolution of the Internet of Things, Artificial Intelligence and cloud applications, a further increase in data traffic is expected annually. More specifically, the traffic in Data Centers for 2021 is expected to reach 19.5 ZB, when in 2016 it was only 6 ZB, with most of this traffic staying within the data center (71.5%).

As far as data transmission speeds are concerned, by 2023 the data rates of fixed broadband connections are expected to double compared to the corresponding ones of 2018, reaching 110.4 Mbps (compared to 45.9 of 2018). In the field of mobile communications, the average network connection will have a speed of 43.9 Mbps by 2023 while 5G speeds will reach 575 Mbps, with 5G devices accounting for about

10% of mobile devices worldwide. Finally, the speeds of Wi-Fi networks are expected to reach 92 Mbps on average by 2023 from 30.3 Mbps in 2018. All these statistical projections within the five year period of 2018-2023, prove in the most emphatic way the highly volatile landscape of modern networks, making it clear that broadband, fast and high quality connectivity are by now well established demands in every corner of the globe. Network providers are pushed into the edge trying to offer high quality services in the most power and energy efficient way. Data centers play a fundamental role in order to meet the above requirements.

Data centers are essentially facilities that provide space, power, and cooling to network infrastructure and bring together an organization's IT functions and equipment for the purposes of storing, processing, and transmitting data and applications. Key elements for designing a data center include routers, switches, firewalls, storage systems, servers, and application delivery controllers (ADCs). Through the years, the architecture of the data centers has evolved. The infrastructure has now been transformed from the traditional physical infrastructure in the form of an in-house server, into virtual networks that support applications and take on workload in pools of physical infrastructure and cloud. So, due to this rationale data nowadays exists and interfaces between multiple data centers, the network edge, public and private clouds.

So, in this demanding environment, data centers are looking for interconnects that will allow the exchange of information at extremely high speeds (in the Tb/s scale) in a low-cost and low-power consumption way. Photonics is emerging as the only reliable solution, offering advantages that make it more appealing and efficient than older approaches such as copper cables. Optical interconnects, leveraging advantageous characteristics from optical fibers as a means of transmission and from photonic integration, dominate the market of data centers' interconnects of all types (intra- and inter-datacenter interconnection). Active Optical Cables (AOCs) are a major example of such an established technology. They offer rack-to-rack communication either between two adjacent racks, or between racks located in a different room within a data center. Thus, Active Optical Cables cover distances from a few meters to a few hundred meters (even kilometers).

As mentioned above, optical transceivers convert electrical data signals into optical ones and vice versa with the help of structures such as lasers and modulators and then this light is propagated through the optical fiber. Optical transceivers have a detachable optical connector so that the structure can be disconnected from the optical fiber. In Active Optical Cables (AOCs) the main difference is that the optical fiber is permanently connected to the transceiver thus creating a directly integral structure following a "plug and play" rationale. It is the most widely adopted technology for interconnection within data centers and high performance computing (HPC) applications and has replaced copper cables (Direct Attached Cable- DAC) offering a plethora of undoubted advantages.

Compared to DACs, AOCs offer the capability of connecting longer distances, offering more bandwidth, more reliable transmission channels, smaller size, and

weight, as well as immunity to electromagnetic interference. In addition, compared to other optical transceivers, AOCs have lower power consumption, lower maintenance costs and are generally much cheaper. It is typically stated that a complete dual AOC transceiver (alongside with its fiber-optic wiring) usually costs as much as a single optical transceiver. AOCs usually cover distances from a few meters to few kilometers. Depending on the distance, they adapt the technology they use, so for example for interconnections up to 100 m, it is usually based on multi-mode optics. AOCs are fabricated in various form factors to be compatible with a variety of connector types, including: SFP, QSFP, etc. For their aforementioned characteristics and despite the fact that there is a very wide variety of options in terms of interconnection within data centers, active optical cables remain perhaps the most important technology on the market, with sales maintained at very high levels. It is also noteworthy that almost 2/3 of the products by 2024 will be for 1x10G and 1x25G solutions, demonstrating how important these technologies are for the development of interconnects within data centers and HPCs not only now but also in the near future. In addition, by using wavelength multiplexing, AOCs are capable of meeting all modern interconnect standards (eg 8x25G, 10x10G, 8x50G, etc.).

The advantages offered by active optical cables in interconnecting data centers are a lot. At the same time, the various technologies and technical approaches multiply the effect of these benefits. In terms of technologies, there are two approaches on which the manufacturers rely: vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs) and silicon photonics.

**VCSELs:** VCSELs are the power horse of AOCs due to their low cost, low power consumption and reliability. Another very useful feature is the fact that due to their small size they have high yield and can be tested at the wafer-level before being cut and packaged. Multi-mode VCSELs with an emission wavelength of 850 nm are the most common technology, however the adoption of structures with longer emission wavelengths is considered a beneficial transition as it will offer improved power efficiency and higher modulation speeds while keeping the same reliability. The main challenge in VCSELs is the ability to increase their operating speed due to the fact that their performance is highly dependent on temperature. For example, classical approaches are limited to 25 Gb/s at 55 oC which limits the commercial applications of VCSELs to structures that require higher transmission speeds. To overcome this bottleneck, the construction of VCSELs in large arrays can provide a viable solution with serious limitations though, especially when considering the driving electronics that they require.

**Silicon photonics:** Although III-V semiconductor technology is considered the most mature platform for the integration of photonic structures because it allows for the development of active elements too, silicon photonics technology stands out very dynamically leveraging some very attractive key features. This is because the use of silicon allows the utilization of the infrastructure of CMOS electronic technology keeping the development costs low and thus enabling the mass production of a large volume of passive photonic integrated circuits. It also reduces dramatically the chip

size and the overall power consumption. Furthermore, one of the key advantages of silicon photons is the capability of combining them with electrical integrated circuits in a common integration platform thus leading to the development of complex structures with reduced size and cost. Nevertheless, the inability to fabricate active elements remains one of the main obstacles in silicon photonics' technology.

It is therefore obvious that both technologies have their strengths but at the same time they have some disadvantages which block the overall performance of the system. For this reason and in order to meet the future needs of the data centers, active optical cables need to adopt techniques that will permit the increment of their capabilities. More specifically:

- Migration to longer wavelengths (1.3  $\mu\text{m}$  and 1.5  $\mu\text{m}$ ) in order to extend the covering distance of the interconnection which is usually limited to 300 m. Silicon photonics are also optimized in these wavelength bands while VCSELs achieve better power efficiency and higher reliability.
- The adoption of single-mode operation which overcomes the bandwidth limitations resulting from the multi-mode fibers.
- Wavelength division multiplexing. Wavelength multiplexing boosts the overall capacity of data transmission and allows for efficient reuse of resources.
- Spatial multiplexing with the use of multicore fibers is gaining more and more ground in telecommunication applications. The use of high quality glass fibers can lead to a significant cost reduction as the number and size of transceiver interfaces is significantly limited.
- Higher order modulation formats allow for higher throughput without pushing the data rate per line beyond the limits of the electronics. Especially PAM4 is the dominant modulation format especially as far as intra-datacenter interconnects are concerned.
- Upgraded packaging techniques can provide very important solutions as structures with very different functions, such as photonics and electronics, can be hosted in the same "package". 3D integration in particular, allows the optimization of the individual elements / functions in a single while reducing the overall footprint.

This is where the current doctoral dissertation attempts to step-in. By studying, designing, and measuring experimentally, different photonic and opto-electronic structures, as well as combining new technologies and techniques, proposes a concept of an active optical cable that addresses modern data center interconnect requirements and challenges. In this context, the author in the course of the doctorate dealt with:

- The study, design and modeling of an SOI multiplexer/demultiplexer for on-chip wavelength multiplexing/demultiplexing.
- The study and experimental evaluation of VCSELs in order to be employed as high-speed sources in active high-capacity optical cables.
- The study alternative multiplexing and modulation techniques to increase the capacity of active optical cables.

- The study and experimental demonstration of various transmitter, receiver and interfacing structures that comprise a high-speed AOC.

In more detail, in Chapter 2 the architecture of the proposed AOC is described. The AOC was eventually developed as part of a collaborative research effort of PCRL with other European Institutions and companies. More specifically, single-mode and single polarization VCSELs capable of operating at data rates of up to 80 Gb/s were developed, while the use of spatial multiplexing (multicore fiber), Wavelength Division Multiplexing and PAM-4 modulation format, permitted the proliferation of the total capacity of the structure. In addition, the use of the silicon photonics platform and the innovative 3D integration approach allowed to keep the overall implementation cost as low as possible. The silicon photonics platform offers great reliability and economic efficiency as well as the capability of ultra-dense integration of high efficiency structures.

VCSELs were developed with an emission wavelength of around 1550 nm on an InP platform, capable of transmitting at data rates of 40 Gbaud and operating at temperatures up to 60 °C. The structures were based on a double-mesa short-cavity design with a length threefold the laser's emission wavelength, permitting the minimization of the photon lifetime. To reduce parasitic limitations, the double-mesa VCSEL module was fully encapsulated in benzocyclobutene (BCB). A highly strained active region embedded between an n-doped InP layer and a highly doped AlInAs cladding enhanced the intrinsic dynamic performance of the structure. The optical gain was provided by six AlGaInAs quantum wells with a 5.0 nm thickness, grown with a 1.7% compressive strain. The dielectric distributed Bragg reflectors (DBRs) at the top and the bottom of the design had reflectivity percentages of 99.3% and 99.9% respectively. A circular buried tunnel junction (BTJ) with a diameter of 5  $\mu\text{m}$  confined the current within the structure. A p+n junction with a reversed bias expanded over the bottom mesa diameter to achieve current blocking outside the aforementioned area, whereas the BTJ was overgrown by an n-type doped indium phosphide layer to counterpart the length of the cavity. The capacitance of the structure was associated with the depleted region due to the steep change in the concentration of the reverse-biased junction impurities. Moreover, these VCSELs were constructed in an appropriate manner so that they could be bonded to an SOI substrate and thus the overall device could benefit from the advantages of both technological platforms.

To enable on-platform wavelength division multiplexing, the VCSELs were fabricated in twelve-arrays with central emission wavelength distances of 10 nm. For the coupling of light to the multicore fiber, 3D glass waveguides were developed, thus enabling the coexistence of the SOI platform with the multicore fiber. On the electronics side, arrays of linear VCSEL drivers and TIAs were developed in silicon allowing operation at speeds up to 40 Gbaud. Finally, for the combination of electronics and photonics on the same silicon platform, an innovative 3D integration method with silicon vias and interposers was used. The combination of all these technologies led to impressive results compared to the state of the art AOCs. In terms

of the transmission rate per channel, it marked an increase of 60% 70% less power consumption. In addition, the technology of this active optical cable enables its mass reproducibility. Three different prototypes were presented thoroughly: a 208 Gb/s transceiver for board-to-board interconnection, a 320 Gb/s QSFP AOC and a 960 Gb/s CXP AOC. All the technical details, the elements used, the architecture followed, and the specifications were outlined.

Moreover, in this chapter a detailed description of the principle of operation of VCSELs was given alongside with the measurement techniques that were used in order to evaluate their performance. Following the same rationale, the physics behind the waveguide photodiodes was explained and the first attempt to design a mask layout with multiple structures was reported. Details on the 3D integration concept, the layer stack used, the interfaces and the specifications of the SOI platform were also included in this chapter. Special attention is given to the developed passive structures on the SOI platform. The strip waveguides that were studied through simulations, were designed in such a way in order to be operational both in the TE and in the TM states of polarization. The grating couplers, for coupling light in and out of the SOI board in the vertical access, exhibited a high-index contrast to reduce the coupling losses and increase the alignment tolerances. The mode converters were based on silicon adiabatic tapers covered by a larger polymer waveguide. Their operation principle was based on the exponential conversion of the waveguide mode inside the high-index contrast silicon waveguide to the mode supported by the low-index contrast polymer waveguide.

A crucial factor that is being taken into account when designing high-performance optical transceivers is the multiplication of the overall capacity in the most efficient way. In this regard, two parameters play a very important role, the increase of data transmission with as little power consumption as possible and in the smallest possible footprint. For this reason, in addition to the development of active structures that allow the transmission of data at high speeds, the use of techniques that further upgrade these capabilities is also important. The various forms of multiplexing provide the right ground for the optimal use of existing structures. In Chapter 3 the design of a SOI multiplexer/demultiplexer for on-chip wavelength multiplexing/demultiplexing is presented and discussed. The structure was based on a Mach-Zehnder interferometer. As a first step, the study for the different options for implementing the multiplexing structures is outlined. The most important aspects that were taken into account were: polarization insensitivity, fabrication tolerances and central wavelength shifting due to thermal effects.

- The requirement for polarization insensitivity. On the transmitter side, the emission polarization axis was well defined given the single-polarization operation of the VCSELs. As a result, the design of a single polarization multiplexer was sufficient to combine the different wavelengths in the transmitter. On the other hand in the receiver the state of polarization was not determined. The state of polarization of the incident signal given that it has propagated through a single-mode optical fiber is by default random. Thus, the design of the demultiplexer was chosen appropriately in



order to be able to operate for both polarization states. This capability translates into the requirement for a structure that not only works on both polarizations but will also result in a negligible polarization-dependent frequency shift (PDFS). This frequency shift due to polarization is a common phenomenon in interferometric structures built on an SOI platform and is due to the bifurcation of the waveguides. The result is that the signal undergoes a displacement of its transfer function according to its polarization.

- Central wavelength shift due to thermal effects- thermal dependence of the emission wavelength. The thermal dependence of the central emitting wavelength of the VCSEL, is a structural characteristic. The induced displacement was measured and found to be 0.1 nm/oC. Given the large spacing of the central wavelengths in the WDM VCSELs of our case (up to 10 nm), the thermal dependence of the structures on the temperature can be taken into account by designing filters which either follow this wavelength shift (in other words they have exactly the same dependence on temperature), either they are relatively insensitive to temperature changes (but given that they provide a sufficient bandwidth), or a combination of the two.
- Fabrication tolerances. The construction of both the VCSEL and the multiplexer/demultiplexer on an SOI platform includes tolerances from a construction point of view which affect the wavelength behavior of the various structures. As far as VCSELs are concerned, the wavelength shift resulting from the epitaxial process has wavelength fluctuations that can exceed 6 nm along the wafer. As far as the SOI part is concerned, the fabrication tolerances result to a shift of the central wavelength which of course differs depending on the optical structure. In the case of an SOI delay interferometer, a variation of the active refractive index of 0.005 can shift the transfer function up to 2 nm, while in the case of a filter based on a ring resonator this shift is significantly increased due to of the resonance of the structure. These phenomena caused by structural defects are stochastic (in contrast to temperature shifts which have a more deterministic nature) and end up having a cumulative effect on the VCSEL's wavelength range. Thus, it was considered necessary to introduce a tunability mechanism in the structures of the filters in order to compensate for these phenomena and consequently the thermal shifts.

Based on the above requirements, a number of optical structures was investigated and reported in this chapter in order to implement the required multiplexer/demultiplexer in the optimal way. Initially, echelle gratings were investigated due to their lower dependence on fabrication tolerances. Furthermore, ring resonators which exhibit high flexibility, were also an alternative option that was investigated. Finally, the structure of the delay interferometer (DI) was explored, which was eventually chosen due to its simplicity, its flexible adjustment mechanism and its suitability for operation in both polarization states with very low polarization dependent frequency shifts.

Subsequently, the design and modeling of the structure is presented. The first step towards the realization of such a structure was to design and model the couplers that were used at the input and the output of the MZI. Due to their inherent characteristics MMIs were the couplers of choice. Both 1x2 (or 2x1 the exact same functionality)

and 2x2 MMI couplers were investigated. For this reason, the Field Designer simulation tool from Phoenix was employed. Through this simulation study, the width of the MMIs structures was determined, by calculating the effective refractive indices that each propagating mode encounters within the SOI platform. Then, by exploiting another software tool from the suite of Phoenix, OptoDesigner, both the length of the structures and the exact dimensions of their input/output ports were studied. Given that any structural defects during the fabrication of the (de)multiplexes, would substantially affect their operation, it was deemed necessary for these structures to be tunable using heating electrodes on the silicon waveguides. Thus, as a next step, the thermal dependence of the effective refractive index of the waveguide was studied in order to investigate the thermal behavior of the platform. After determining the above physical layer parameters of the structure, the overall MZI structure (alongside with the MMI couplers) was studied to define its overall dimensions. The ASPIC software tool was used, for device (component) level modeling of the MZI. The results acquired from the simulation studies led to the design of the respective masks under fabrication in the MaskDesigner software tool of Phoenix. The masks were constructed with appropriate variations in crucial design parameters in order to be tested in the laboratory and to assess their suitability for implementation into the AOC. Initial experimental results from the fabricated chip are also reported in this chapter.

As it is also mentioned above, VCSELs are perhaps the most crucial structures that were studied for the development of Active Optical Cable. Beyond being the optical source that provides the optical carrier, it is also the element on which the optical signal is modulated. In Chapter 4, the experimental measurements of the developed VCSELs are presented. A very large number of structures with varied characteristics was measured in order to select the most appropriate ones in terms of characteristics for the desired application. The measurements included static characterization through L-I-V curves to determine their operating characteristics, polarization measurements to determine their behavior as a function of temperature, and the measurement of the s-parameters using an RF probe station.

The next step after completing this study and selecting the most suitable VCSELs, was to test them in system experiments as standalone structures prior to integrating them to the platform of the Active Optical Cable. These structures, at standard temperature conditions, achieved a lasing threshold of around 1.0 mA whilst the peak output power was met at approximately 4 mW. The maximum modulation bandwidth of the VCSELs was achieved at 10.4 and measured to be 20.5 GHz. The first experiment used a novel method for optical generation of PAM-4 signals by means of polarization multiplexing of their binary optical tributaries, leveraging the single-polarization operation of the single-mode VCSEL. The proposed technique obviated the need for linear electronic drivers. Thus the implementation was significantly simplified both in terms of cost and implementation as well as in terms of power consumption. In addition, the need to drive the VCSEL within its linear range was eliminated, offering a wider available dynamic range. As a result, the signal produced

was less restricted in width while its levels and transitions in the eye diagram are much more distinct.

The experimental setup to verify the functionality of the concept, since there was no second structure available, involved the generation of an optical NRZ signal from a single structure. This pulse was then split through an optical coupler, and a delay was introduced in one of the two branches to create two decorrelated and independent data streams. In order to construct the four level signal, the two amplitude levels were tuned appropriately via introducing attenuation in one of the two data streams to represent the least significant bit (LSB) while the other stream represented the most significant bit (MSB). The two data streams, exhibiting a vertical polarization relation in between them, were combined creating the desired four-level optical signal. In fact, what we did was combine the two optical streams with the appropriate widths to simulate the operation of an electronic DAC.

Furthermore, although the concept involved the generation and transmission of a polarization-multiplexed signal, direct detection was employed at the receiver, similar to a conventional PAM-4 system, thus reducing the scheme's overall complexity and cost. The proposed scheme in combination with silicon photonics gives a low complexity implementation that increases the functionality of VCSEL-based integration engines. This approach offers polarization stability with no back reflections and can be implemented with only a few excess integrated components and small overhead in cost. The concept was verified via a data transmission experiment at 28 Gb/s that exhibited BER within FEC limits even after transmission within 500 m of standard single-mode fiber. Moreover, comparison of the polarization division multiplexed signal with an electrical PAM-4 modulated signal from the VCSEL at the same bit rate proved superior performance in both the back-to-back and the 500-m cases.

The second system experiment that is reported in Chapter 4 exploits the same generation of single-mode VCSELs in order to achieve data transmission of up to 80 Gb/s. A high-speed testbed was prepared for this reason based on an Arbitrary Waveform Generator that provided the appropriate RF signals. Raised Cosine pulse shaping was opted to restrict the optical signal to the main lobe. The specific data rate was achieved using PAM-4 modulation format in a back-to-back configuration. Moreover, a PAM-4 signal at 64 Gb/s was transmitted through 500 m of single mode fiber. The transmission speed that was achieved (80 Gb/s) constituted a record transmission speed with VCSELs, during the time that the experiment was carried, and proved the suitability of the specific VCSELs' design for implementation to the high-speed Active Optical Cable.

Chapter 5 involves the performance evaluation of the different generations of the transmitter prototype, the receiver prototype, and the multicore fiber with the breakout interface in system experiments. The prototypes were fabricated as a result of the work that is reported in the previous chapters.

In more detail, the transmitter prototype comprised the VCSEL, a PAM-4 linear VCSEL driver and the appropriate interfaces for coupling the light out of the board.

The linear driver comprised a four-tap symbol-spaced feed-forward equalizer and a selective falling-edge pre-emphasis. The equalizer's taps were independently controlled, which allowed the driver to be optimally configured according to the specific transmission scenario, whereas the SFEP module was used to reduce the effect of pulse width distortion on the generated PAM-4 signal. The VCSEL driver chip was fabricated in 130 nm SiGe BiCMOS technology and exhibited a footprint of  $1 \times 2.8$  mm. The transmitter board comprised a two-channel VCSEL driver and a respective array of single-mode VCSELs described in Section 2.1.1. The assembly rested on a PCB (Printed Circuit Board), designed to simultaneously drive two VCSEL driver chips. To reduce the parasitic inductance between the VCSEL and the driver, the VCSEL anode voltage was supplied by the driver chip. A second technique used to reduce the parasitic inductance was to place the decoupling capacitors directly underneath the VCSELs, omitting additional bond wires, while using the thickness of the capacitors to put the VCSEL and driver surface at the same height. The first experiment that is reported in this chapter was performed using only the transmitter prototype. The module achieved data transmission of 40 Gb/s using PAM-4 modulation format at a distance of up to 1 km.

The next reported experiment in this chapter involved the first generation of the receiver prototype. The receiver consisted of two identical channels which "led" the respective photodiodes, offering the appropriate parameters to improve the "reception" behavior of the signal. The photodiodes had responsivities of 0.44 A / W. The feedback resistor was implemented as an nMOS transistor which was driven in its linear regime so as to control the transimpedance gain. The output voltage of this stage was applied to the irreversible input of the main amplifier, which consisted of three completely differential gain stages. The output stage drove the differential load impedance of 100  $\Omega$ . A control loop was created using a balancing error amplifier that removed the dc-offset between the two output signals by adjusting the dc voltage at the reversible input of the main amplifier. The linear receiver was built on a platform of 130 nm SiGe BiCMOS technology. The chip size was 3000  $\mu\text{m}$  x 900  $\mu\text{m}$  with each channel occupying a size of 1100  $\mu\text{m}$  x 900  $\mu\text{m}$ . This prototype achieved 40 Gb/s NRZ and 64 Gb/s PAM-4 signal reception.

The second generation of the linear receiver board comprised a two-channel linear TIA that operated in tandem with a surface-illuminated photodiode array. Commercial 25 Gb/s photodiodes were used for the assembly. The TIA exploited a multi-stage low-noise linear data path architecture that converted the photocurrent to the respective voltage value, amplified it, and fed it to a 50  $\Omega$  output buffer. The saturation between the different amplifier stages was obviated by using an event-driven gain-bandwidth control loop that provided the necessary linearity and bandwidth for PAM-4 detection. The fabrication of the TIA chip was based again on 130 nm SiGe BiCMOS technology and had a footprint of  $1 \times 3.7$  mm. The assembly rested on a PCB that featured a cavity to align the top of the TIA with the top of the PCB to minimize the bond wire length. The second generation of the receiver prototype, with the improved design, achieved had a successful PAM-4 signal

reception at 70 Gb/s. The next reported experiment in this chapter utilized both the transmitter and the second generation receiver in a common experimental setup in order to evaluate the overall link that would be part (specifically one lane) of the active optical cable. Data transmission at 64 Gb/s PAM-4 was achieved in a back-to-back configuration whereas 56 Gb/s per lane capacity was achieved over a 2 km link. This experiment proved the suitability of the transceiver for implementation in 200 GbE intra-datacenter applications.

Finally, the multicore fiber with the breakout interface was tested. The aforementioned transceivers employed glass-based interposer interfaces in order to facilitate coupling between the SOI platform and the multi-core fibre. The CXP module utilized a 12-channel interposer between SOI and a 2 x 7-core MCF. These glass interfaces allowed for efficient rerouting of the core geometries of the multi-core fibre to the linear array for direct butt coupling to the SOI platform. A break-out interface was then required in order to interface between the QSFP modules and the CXP module. So a 12-channel fiber break-out glass interposer was developed, transitioning from 2 x 7-core MCFs to 3 x 4-core MCFs. To test the structure, four modulated PAM-4 optical signals were generated at 28 Gb/s and after propagating through it were received by the second generation receiver. The structure exhibited good performance with only a negligible power penalty being added to the transmitted signals.

Chapter 6 involves the summary of the most important results that were presented in the previous chapters and the conclusions that were drawn from them. In more detail, the general context of the work is described as well as the key elements of the proposed implementation of an AOC. In a nutshell, the technologies and techniques that were employed were the platform of silicon photonics, single-mode C-band VCSELs, on-chip wavelength division multiplexing (WDM, space multiplexing by the use of a multicore fiber, four level amplitude modulation format and 3D integration. The procedure that was followed for the design of the SOI multiplexer/demultiplexer is outlined. Furthermore, all the related laboratory tests and experiments that were made by employing the single-mode VCSELs are described, underlining also the most notable results. Finally, the system experiments that were made with the use of the transmitter prototype, the receiver prototype and the multicore fiber with the breakout interface are presented. The suitability of all the outcomes of this thesis for the realization of a high-speed AOC is remarked.

Moreover, this chapter includes suggestions for future research activities as an extend to the proposed work. To this rationale, a novel photonic integration platform is proposed based on a thin InP-based membrane. This technology platform opens up new routes towards ultra-high operation due to its inherent characteristics stemming from the removal of the InP substrate and its replacement with a low-dielectric polymer BCB adhesion layer eliminating parasitic effects. This process offers high optical confinement within the waveguides enabling high-speed operation and low loss devices. Moreover, the platform offers the capability of monolithic integration of both actives and passive and also enables the development of ultracompact devices

due to its aforementioned properties. In addition, by exploiting Selective Area Growth and butt joint process the development of O-band and C-band high-speed components such as Electro Absorption Modulated Laser (EMLs) and photodiodes will be feasible. The combination of the developed components with high-speed InP- HBT electronics will permit the fabrication of high-speed interconnects both for intra- and inter-datacenter applications. Since the end of pluggable modules is approaching, this solution can be implemented as a Multi-Chip Module (MCM) with the transceivers acting as satellites to a switch ASIC on the same carrier, upgrading the overall capacity while reducing the complexity of the scheme. Finally, by using the same technological platform, the fabrication of nanosecond scale and polarization insensitive SOAs is proposed. The SOAs can be used as ultra-fast on/off switches that can be monolithically integrated in very large numbers alongside with MMIs and constitute very fast optical switches. These high-radix NxN switches will exhibit very low energy footprint and can be used to interconnect TORs within a data center following an Optical Packet Switching (OPS) architecture. In conclusion, the proposed InP membrane technology can provide a robust solution to the future data center interconnection requirements, with the development of both optical transceivers and switches. For this reason, it is a technological platform that is worth studying.