



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

---

## Πειραματική Αξιολόγηση κυκλωμάτων πομπού και δέκτη για οπτικές διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων

---

Διπλωματική Εργασία

Κωνσταντίνος Μ. Τόκας

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2015





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

---

## Πειραματική Αξιολόγηση κυκλωμάτων πομπού και δέκτη για οπτικές διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων

---

Διπλωματική Εργασία

**Κωνσταντίνος Μ. Τόκας**

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13η Ιουλίου 2015.

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

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

.....  
Χρήστος Καψάλης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

.....  
Κωνσταντίνος Μ. Τόκας

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright ©Κωνσταντίνος Τόκας, 2015

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

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην πειραματική αξιολόγηση κυκλωμάτων πομπού και δέκτη για οπτικές διασυνδέσεις σε κέντρα δεδομένων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να παρουσιάσει τις επιδόσεις του πομπού και του δέκτη και να καταλήξει σε κάποια συμπεράσματα για τη χρήση τους.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τη Φωτονική Τεχνολογία και τις οπτικές επικοινωνίες καθώς και σημαντικές αναφορές στον τρόπο λειτουργίας των κέντρων δεδομένων (data centers). Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται πιο εκτενής αναφορά στα πλεονεκτήματα των Ενεργών οπτικών καλωδίων (Active Optical Cables), που αποτελούν βασικό μέσο διασύνδεσης στα data centers.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα lasers, τον τρόπο λειτουργίας τους, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους αλλά και τις ιδιότητές τους. Επίσης, γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε διάφορα είδη laser, ενώ αναφέρονται και τα διάφορα πεδία εφαρμογής τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνουμε την προσοχή μας σε ένα συγκεκριμένο είδος ημιαγωγικού laser, των laser επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser-VCSEL). Εν συνεχεία γίνεται αναφορά στις φωτοδιόδους (photodiodes) και στον τρόπο λειτουργίας τους και τέλος ασχολούμαστε με τους ενισχυτές TIA (Transimpedance Amplifier) που χρησιμοποιούνται προκειμένου να ενισχύσουν τα φωτορεύματα των φωτοδίοδων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για ορισμένα VCSELS. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζουμε αρχικά τις μετρήσεις για τις καμπύλες LIV των VCSEL και στη συνέχεια παραθέτουμε τις μετρήσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες μετρήσεις των S-parameters.

Στο τελευταίο κεφάλαιο (πέμπτο) παρουσιάζονται οι πειραματικές μετρήσεις του οπτικού πομπού και του οπτικού δέκτη, ξεχωριστά. Επιπλέον, γίνεται πειραματική αξιολόγηση των επιδόσεών τους καθώς και σχολιασμός όλων των αποτελεσμάτων με την παράθεση όλων των απαραίτητων διαγραμμάτων.

## Λέξεις κλειδιά

Κέντρα δεδομένων, Ενεργά οπτικά καλώδια, LASER, VCSEL, Φωτοδίοδος, TIA, Οπτικός πομπός, Οπτικός δέκτης





**National Technical University of Athens**  
**School of Electrical and Computer Engineering**  
**Photonics Communications Research Laboratory**

---

# **Experimental Evaluation of transmitter and receiver circuits for optical interconnections of data centers**

---

Diploma Thesis

**Konstantinos M. Tokas**

Supervisor: Hercules Avramopoulos, Professor NTUA

Athens, July 2015





## **Abstract**

This diploma thesis concerns the experimental evaluation of transmitter and receiver circuits for optical interconnections of data centers. The purpose of this study is to present the performance of an optical transmitter and an optical receiver and to reach to some conclusions about their use.

The first chapter presents general information for Photonic Technologies and optical communication and important references in the way that datacenters function. In the same chapter there are details about the advantages of Active Optical Cables (AOCs), which are the key tool in datacenter interconnection.

Lasers are studied in the second chapter. We present the way that lasers work, their specific features and their properties. Also, it is taken place a comparison between different kinds of laser.

In the third chapter we focus extensively on a particular type of semiconductor laser, the Vertical Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL). Then, we introduce Photodiodes and their structure details. Finally, we give emphasis on photocurrent amplification with a specific optical amplifier, the Transimpedance Amplifier (TIA).

In the fourth chapter we present the experimental measurements conducted for some VCSELs. Firstly, LIV curves from tested VCSELs are illustrated and secondly their S-parameters measurements.

Finally, in the fifth chapter we evaluate experimentally and separately the optical transmitter and optical receiver. It is described the experimental setup for each experiment and all the necessary diagrams are depicted.

## **Keywords**

Datacenter, AOCs, LASER, VCSEL, Photodiode, TIA, Optical transmitter, Optical receiver



## **Πρόλογος**

*Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2015, στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στον Τομέα Συστημάτων Μετάδοσης Πληροφορίας και Τεχνολογίας Υλικών.*

*Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή κ. Ηρακλή Αβραμόπουλο, επικεφαλής του Εργαστηρίου Φωτονικών Επικοινωνιών, που μου έδωσε την ευκαιρία να έρθω σε επαφή με το επιστημονικό αντικείμενο των οπτικών επικοινωνιών και να γνωρίσω τις δραστηριότητες του εργαστηρίου, καθώς επίσης και για την στήριξη και τη βοήθειά του καθ'όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας.*

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους υποψήφιους διδάκτορες Γιάννη Κανάκη και Νίκο Ηλιάδη για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια που μου προσέφεραν για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, καθώς και για την άψογη συνεργασία και επικοινωνία που είχαμε τους τελευταίους μήνες. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δημήτρη Καλαβουρζιώτη γιατί ήταν ο αυτός που μου έδωσε το έναυσμα για την εκπόνηση της διπλωματικής και ήταν καθοριστική η συμβολή του για την ολοκλήρωσή της.*

*Τέλος, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, τους φίλους μου και όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους για τη στήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν και στήριξαν τις επιλογές μου.*



# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή στη Φωτονική Τεχνολογία</b>	<b>1</b>
1.1	Εισαγωγικά - Οπτικές επικοινωνίες . . . . .	1
1.2	Datacenters . . . . .	3
1.3	Active Optical Cable (AOC) - Ενεργό Οπτικό Καλώδιο . . . . .	6
1.3.1	Ορισμός . . . . .	6
1.3.2	Τρόπος λειτουργίας των AOCs (μέσω παραδείγματος) . . . . .	8
1.3.3	Το μέλλον των AOCs . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Laser</b>	<b>13</b>
2.1	Εισαγωγικά . . . . .	13
2.2	Τα laser στις οπτικές επικοινωνίες . . . . .	14
2.3	Τύποι Lasers . . . . .	15
2.4	Βασικά στοιχεία της λειτουργίας των laser . . . . .	15
2.5	Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της δέσμης των laser . . . . .	18
2.5.1	Απόκλιση – Divergence . . . . .	18
2.5.2	Κατευθυντικότητα – Directionality . . . . .	18
2.5.3	Μονοχρωματικότητα – Monochromaticity . . . . .	18
2.5.4	Μήκος κύματος – Wavelength (or color) . . . . .	18
2.5.5	Ένταση – Intensity . . . . .	19
<b>3</b>	<b>VCSELs</b>	<b>21</b>
3.1	Εισαγωγικά . . . . .	21
3.2	Η δομή των VCSELs και των παραμέτρων τους . . . . .	23
3.2.1	Τα είδη των VCSELs και Γενικές Ιδιότητες . . . . .	23
3.2.2	Ανακλαστήρες Bragg (Bragg reflectors) . . . . .	26
3.2.3	Θερμική συμπεριφορά . . . . .	28
3.2.4	Ρεύμα κατωφλίου (Threshold Current) . . . . .	28
3.3	Ολοκληρωμένη Φωτοδίοδος (Intergrated Photodiode) . . . . .	31
3.3.1	Οπτική απορρόφηση - Συντελεστής απορρόφησης . . . . .	32
3.3.2	Βασική λειτουργία μιας p-i-n (PIN) φωτοδίοδου . . . . .	34

3.3.3	Αποδοτικότητα κβαντισμού (Quantum Efficiency) . . . . .	35
3.3.4	Οπτική απόκριση φωτοδίοδου (Responsivity) . . . . .	36
3.4	Transimpedance Amplifier (TIA) . . . . .	37
3.4.1	Προενισχυτές . . . . .	37
3.4.2	Transimpedance Amplifier (TIA) . . . . .	38
3.4.3	Βέλτιστο Εύρος Ζώνης για TIA [36] . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Πειραματική διαδικασία: Α' ΜΕΡΟΣ</b>	<b>43</b>
4.1	Πειραματικές Μετρήσεις σε VCSEL - LIV Μετρήσεις . . . . .	43
4.1.1	Εισαγωγικά . . . . .	43
4.1.2	Μέτρηση των χαρακτηριστικών L-I-V καμπύλων . . . . .	46
4.1.3	Πειραματικά Αποτελέσματα . . . . .	47
4.1.4	Σταθερότητα της πόλωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία . . . . .	52
4.2	Πειραματικές Μετρήσεις σε VCSEL: S-parameters . . . . .	54
4.2.1	Εισαγωγικά . . . . .	54
4.2.2	Παράμετροι Διασποράς (Scattering Parameters, S-parameters) . . . . .	55
4.2.3	Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyser VNA) . . . . .	57
4.2.4	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας . . . . .	57
4.2.5	Αποτελέσματα μετρήσεων S-parameters . . . . .	59
4.3	Συμπεράσματα . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Πειραματική διαδικασία: Β' ΜΕΡΟΣ</b>	<b>65</b>
5.1	Οπτικός Γραμμικός Πομπός NRZ (Linear Optical Trans-mitter) . . . . .	65
5.1.1	Πειραματική διάταξη . . . . .	65
5.1.2	Περιγραφή πειράματος . . . . .	66
5.1.3	Αποτελέσματα και σχολιασμός: Eye Diagrams και Καμπύλες BER . . . . .	69
5.1.4	Συμπεράσματα . . . . .	74
5.2	Οπτικός Γραμμικός Δέκτης 64Gb/s PAM-4 (Linear Optical Receiver) . . . . .	75
5.2.1	Πειραματική διάταξη . . . . .	75
5.2.2	Περιγραφή πειράματος . . . . .	76
5.2.3	Αποτελέσματα και σχολιασμός: Eye diagrams και καμπύλες BER . . . . .	78
5.2.4	Συμπεράσματα . . . . .	81
5.3	Μελλοντικές προοπτικές . . . . .	81
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>83</b>

# Κατάλογος σχημάτων

1.1	Η ιεραρχία των συστοιχειών σε δομές διασυνδέσεων: α)Σε ένα κτήριο β)Σε πολλαπλά κτήρια [29] . . . . .	3
1.2	Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου Datacenter [31] . . . . .	5
1.3	Ένα χαρακτηριστικό Active Optical Cable (AOC) 40GB/S QSFP+ της εταιρίας Fiberon Technologies [26] . . . . .	7
1.4	Διάγραμμα ενός Active Optical Cable (AOC) 40GB/S QSFP+[26] . . . . .	9
1.5	Ο διαφορετικός τρόπος που λειτουργούν τα AOC (πάνω) και τα κλασικά χάλκινα καλώδια (κάτω) [27] . . . . .	10
1.6	Κλασικές διεπαφές D-Subminiature και MIL-DTL 38999 . . . . .	10
1.7	Στοιχεία από την έρευνα αγορά “Multi-Gigabit Datacom Connector and Cable Assemblies” της Bishop & Associates . . . . .	11
2.1	Βασικά στοιχεία λειτουργίας ενός laser . . . . .	16
2.2	Οι τρεις διαφορετικοί τρόποι που συμπεριφέρεται το φως με τα άτομα: (α)Απορρόφηση, (β)Αυθόρμητη εκπομπή, (γ)Εξαναγκασμένη εκπομπή . . . . .	17
2.3	Η απόκλιση ως χαρακτηριστικό των laser . . . . .	18
2.4	Ένα απλό ημιτονοειδές κύμα . . . . .	19
2.5	Η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της συχνότητας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα . . . . .	20
3.1	Μια δισδιάστατη συστοιχία από VCSELs [12] . . . . .	23
3.2	Η σχηματική δομή και οι αρχές λειτουργίας των VCSELs . . . . .	24
3.3	Εναλλακτικό σχήμα για τη δομή VCSELs [8] . . . . .	24
3.4	Τρεις μέθοδοι για τον περιορισμό του ρεύματος: αριστερά η μέθοδος air-post, στη μέση η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων και στα δεξιά η μέθοδος επιλεκτικής οξειδωσης . . . . .	25
3.5	(Αριστερά) VCSEL με βομβαρδισμό πρωτονίων, το οποίο έχει κέρδος μόνο στην “βομβαρδισμένη” περιοχή, (Δεξιά) VCSEL με επιλεκτική οξειδωση που έχει οπτική κυματοδήγηση ακόμα και στην εσωτερική στήλη [18] . . . . .	25
3.6	Τρόπος εκπομπής των VCSELs (πάνω), LEDs (μέση), EELs (κάτω). Στα αριστερά φαίνεται η φυσική διάταξη των συσκευών, στη μέση η μορφή της δέσμης που εκπέμπουν και στα δεξιά η τομή της δέσμης τους . . . . .	26

3.7	Σχήμα από ένα πεπερασμένου μήκους DBR [17] . . . . .	28
3.8	Η οπτική ισχύς εξόδου και η τάση ως συνάρτηση του ρεύματος για ένα VCSEL [20] . . . . .	29
3.9	Ο συντελεστής απορρόφησης $\alpha$ διαφόρων σημαντικών υλικών συναρτήσει του μήκους κύματος . . . . .	33
3.10	Αντανάκλαση στην επιφάνεια ημιαγωγού με αντιανακλαστική επίστρωση . .	34
3.11	Αναλυτική δομή μιας φωτοδιόδου PIN (p-layer, intrinsic layer, n-layer) και η βασική λειτουργία μιας PIN φωτοδιόδου . . . . .	35
3.12	Μεταβολή της απόκρισης με το μήκος κύματος $\lambda$ . . . . .	36
3.13	Εξάρτηση (%) της οπτικής απόκρισης από την θερμοκρασία . . . . .	37
3.14	Η πιο απλή δομή ενός προενισχυτή . . . . .	38
3.15	Η βασική δομή ενός Transimpedance Amplifier (TIA) . . . . .	39
3.16	Το φάσμα συχνοτήτων των παλμών NRZ. Η γκρι περιοχή αντιπροσωπεύει το 90% της συνολικής ισχύος που μεταδίδεται . . . . .	40
3.17	Eye diagrams χωρίς θόρυβο (a-c) και με θόρυβο (d-f) σε διαφορετικά κανονικοποιημένα εύρη ζώνης συνυπολογίζοντας την απόκριση της συχνότητας Butterworth και του λευκού θορύβου. Το $\epsilon$ αντιπροσωπεύει την ρεαλιστικά βέλτιστη περίπτωση . . . . .	41
3.18	Η εξάρτηση της ευαισθησίας από το εύρος ζώνης συμπεριλαμβάνοντας τον λευκό θόρυβο και την ποινη ευαισθησίας εξαιτίας της ISI . . . . .	42
3.19	Ο θόρυβος εισόδου ενός TIA. (Σε λογαριθμική κλίμακα και οι δύο άξονες) . .	42
4.1	Το υπό μέτρηση VCSEL που χρησιμοποιήθηκε . . . . .	44
4.2	Οι δύο άξονες της πόλωσης αναφοράς: (α)Οριζόντια Πόλωση, (β)Κάθετη Πόλωση . . . . .	44
4.3	(α) Το wafer που είναι υπό μέτρηση, (β) Ο χάρτης μέτρησης του VCSEL . . . .	45
4.4	Ο σχεδιασμός του VCSEL . . . . .	45
4.5	Πειραματική διαδικασία για τη μέτρηση των LIV καμπύλων για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς . . . . .	46
4.6	(a-e) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C1, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση) . . . . .	48
4.7	(a-h) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C2, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση) . . . . .	50
4.8	(a-g) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C3, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση) . . . . .	51



4.9	Η συμπεριφορά της σταθερότητας της πόλωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία για το VCSEL C1-14-4 . . . . .	53
4.10	Η πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις των S-parameters . . . . .	54
4.11	Η πλατφόρμα δοκιμών: Αριστερά ο VNA, στο κέντρο ο probe station και από πάνω το οπτικό μικροσκόπιο . . . . .	54
4.12	Οι εξισώσεις των παραμέτρων $H$ , $Y$ και $Z$ . . . . .	55
4.13	Οι S-parameters για ένα δίθυρο . . . . .	56
4.14	Υπολογισμός των παραμέτρων $S_{11}$ και $S_{21}$ . . . . .	56
4.15	Υπολογισμός των παραμέτρων $S_{22}$ και $S_{12}$ . . . . .	56
4.16	Κοντινή φωτογραφία από (a) το RF probe tip, (b) την οπτική ίνα και το στήριγμά της . . . . .	58
4.17	(a) Η στιγμή της επαφής του GSG probe tip με τα VCSEL, (b) Το RF probe tip και το τσιπάκι του VCSEL μέσα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο . . . . .	58
4.18	(a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C1 . . . . .	60
4.19	(a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C2 . . . . .	61
4.20	(a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C3 . . . . .	62
5.1	Η πειραματική διάταξη του transmitter . . . . .	66
5.2	Παράδειγμα μιας τυχαίας ακολουθίας NRZ . . . . .	67
5.3	Η πλακέτα του πομπού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα . . . . .	67
5.4	Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που "οδηγεί" την πλακέτα του πομπού μέσω PC . . . . .	68
5.5	Η εφαρμογή της τεχνολογίας FEC στις οπτικές επικοινωνίες . . . . .	68
5.6	Ταχύτητα μετάδοσης $22Gb/s$ : Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b . . . . .	69
5.7	Ταχύτητα μετάδοσης $22Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $300m$ . . . . .	69
5.8	Ταχύτητα μετάδοσης $22Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $1km$ . . . . .	69
5.9	Καμπύλη BER για ταχύτητα $22Gb/s$ . . . . .	70
5.10	Ταχύτητα μετάδοσης $24Gb/s$ : Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b . . . . .	71
5.11	Ταχύτητα μετάδοσης $24Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $300m$ . . . . .	71
5.12	Ταχύτητα μετάδοσης $24Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $1km$ . . . . .	71
5.13	Καμπύλη BER για ταχύτητα $24Gb/s$ . . . . .	72
5.14	Ταχύτητα μετάδοσης $25Gb/s$ : Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b . . . . .	73
5.15	Ταχύτητα μετάδοσης $25Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $300m$ . . . . .	73
5.16	Ταχύτητα μετάδοσης $25Gb/s$ : Eye Diagram για απόσταση $1km$ . . . . .	73
5.17	Καμπύλη BER για ταχύτητα $25Gb/s$ . . . . .	74
5.18	Το απλοποιημένο block διάγραμμα του receiver . . . . .	75
5.19	Η μήτρα του receiver . . . . .	76
5.20	Η πειραματική διάταξη για τον receiver . . . . .	77

5.21	(a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα $25\text{Gbaud}$ . (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για $25\text{Gbaud}$ . . . . .	79
5.22	(a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα $28\text{Gbaud}$ . (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για $28\text{Gbaud}$ . . . . .	79
5.23	(a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα $32\text{Gbaud}$ . (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για $32\text{Gbaud}$ . . . . .	80
5.24	Οι καμπύλες του BER που υπολογίστηκαν μετά από ψηφιοποίηση του σήματος, offline ανάκτηση, αναδειγματοληψία και αυτόματο καθορισμό κατωφλίου στην ανίχνευση συμβόλου . . . . .	80

## Κατάλογος πινάκων

2.1	Μερικά laser που χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας . . . . .	17
3.1	Πλεονεκτήματα των VCSELS έναντι των EELs και των LEDs . . . . .	26
3.2	Σύγκριση τιμών χαρακτηριστικών παραμέτρων των κλασικών ημιαγωγικών laser και των επιφανειακής εκπομπής [19] . . . . .	31
4.1	Βλέπουμε συνοπτικά το ρεύμα μέγιστης απόδοσης, την οπτική ισχύ εξόδου-τον και τον λόγο σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων (Polarization Extinction Ratio) για τα VCSELS που μετρήθηκαν . . . . .	52

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή στη Φωτονική Τεχνολογία

### 1.1 Εισαγωγικά - Οπτικές επικοινωνίες

Από τα αρχαία χρόνια οι άνθρωποι βρίσκονταν πολύ συχνά αντιμέτωποι με την ανάγκη για επικοινωνία μεταξύ τους. Αυτή η ανάγκη τους οδήγησε στο να εφευρίσκουν διαχρονικά διάφορους τρόπους και συστήματα επικοινωνίας έτσι ώστε να καταφέρνουν να στέλνουν μηνύματα από το ένα μέρος στο άλλο. Ανάμεσα στα διάφορα συστήματα με τα οποία οι άνθρωποι προσπάθησαν να επικοινωνήσουν ήταν και διάφορες οπτικές μέθοδοι. Από την αρχαιότητα έχουμε παραδείγματα από τις πρώτες συνδέσεις οπτικής μετάδοσης όπως ήταν η μέθοδος των "σημάτων καπνού" που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως από πολλούς αρχαίους λαούς στους π.Χ. αιώνες. Με αυτόν τον τρόπο έστελναν μηνύματα έτσι ώστε να προειδοποιήσουν για κάτι, να καλέσουν για βοήθεια ή να ανακοινώσουν κάποιο σημαντικό γεγονός. Βέβαια, τέτοιου είδους μέθοδοι οπτικής επικοινωνίας δεν εξελίχθηκαν περαιτέρω λόγω των αρκετά περιορισμένων ορίων. Για παράδειγμα, η ταχύτητα αποστολής μια πληροφορίας μέσω μιας τέτοιας μεθόδου επικοινωνίας ήταν περιορισμένη καθώς ο ρυθμός μετάδοσης είχε άμεση εξάρτηση από την ταχύτητα κίνησης των χεριών του ανθρώπου-πομπού, από το κατά πόσο επιρρεπής ήταν στα λάθη ο άνθρωπος-δέκτης, από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν (ομίχλη ή βροχή κτλ). Έτσι προκειμένου να υπάρξει βεβαιότητα για την παράδοση κάποιου μηνύματος ήταν αναγκαίο να εγκαταλειφθεί αυτός ο τρόπος επικοινωνίας.

Έκτοτε δεν υπήρξε ουσιαστική πρόοδος στις οπτικές επικοινωνίες μέχρι την εφεύρεση των laser στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και πολύ περισσότερο με την δημιουργία των πρώτων οπτικών ινών την δεκαετία του 1970. Κι έτσι φτάνουμε κάπου στο 1978 όπου έχουμε και το πρώτο ολοκληρωμένο οπτικό σύστημα επικοινωνίας (lightwave communication systems). Αυτά τα συστήματα διαχειρίζονταν συχνότητες της υπέρυθρης ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, ενώ σαν μέσο μετάδοσης χρησιμοποιούσαν τις οπτικές ίνες. [1] Ένα επιπλέον στοιχείο που συνέβαλλε στην μεγάλη ανάπτυξη των οπτικών μέσων μετάδοσης ήταν και η εισαγωγή των ημιαγωγικών υλικών στις οπτικές συσκευές.

Έτσι, άρχισαν να εμφανίζονται και οι πρώτοι ορισμοί που αφορούσαν στην παραγωγή, μετάδοση και ανίχνευση του φωτός, άμεσα συνδεδεμένοι με τα συστήματα των οπτικών επικοινωνιών. Τέτοιοι ορισμοί είναι: η **ηλεκτρο-οπτική** (electro-optics), η **οπτοηλεκτρονική** (optoelectronics), **κβαντική ηλεκτρονική** (quantum electronics), **κβαντική οπτική** (quantum optics) και **φωτοκυματική τεχνολογία** (lightwave technology)

Ας δούμε συνοπτικά κάθε ορισμό:

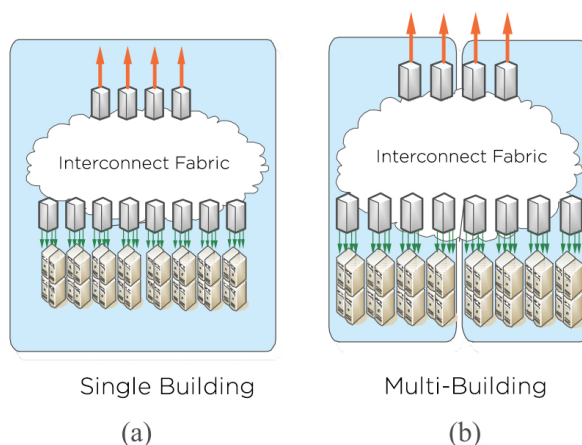
- **Ηλεκτρο-οπτική** (electro-optics): Αναφέρεται γενικώς για οπτικές συσκευές στις οποίες λαμβάνουν χώρα ηλεκτρικά φαινόμενα (π.χ. lasers, ηλεκτρο-οπτική διαμορφωτές και διακόπτες)
- **Οπτοηλεκτρονική** (optoelectronics): Αναφέρεται σε συστήματα που είναι εν γένει ηλεκτρονικά αλλά στα οποίες εμπλέκεται άμεσα το φως (π.χ. φωτοдиодοι LEDs, συσκευές LCD, φωτοανιχνευτές κ.ά.)
- **Κβαντική ηλεκτρονική** (quantum electronics): Είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να συνδέσει συσκευές και συστήματα που σχετίζονται θεμελιωδώς με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη. (π.χ. laser και μη-γραμμικές οπτικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για οπτική ενίσχυση και πολύπλεξη)
- **Κβαντική οπτική** (quantum optics): Αναφέρεται στη μελέτη των κβαντικών και συνεχών ιδιοτήτων του φωτός.
- **Φωτοκυματική τεχνολογία** (lightwave technology): Χρησιμοποιείται γενικώς για να περιγράψει συσκευές και συστήματα που συχνά χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες αλλά και στην επεξεργασία οπτικών σημάτων.

Επίσης ένας άλλος όρος ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως για να περιγράψει τις οπτικές τεχνολογίες είναι ο όρος **Φωτονική** (photonics). Ο όρος αυτός επινοήθηκε κατά τα πρότυπα της Ηλεκτρονικής (electronics) και αντανακλά την άμεση σύνδεση μεταξύ οπτικής και ηλεκτρονικής. Φωτονική, λοιπόν, ονομάζεται ο κλάδος των επιστημών και της τεχνολογίας που ασχολείται με την δημιουργία, τον έλεγχο και την ανίχνευση φωτονίων ιδιαίτερα στην περιοχή του ορατού φωτός και στο κοντινό υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Ο Γάλλος επιστήμονας **Pierre Aigrain** το 1967 είχε ορίσει [2]:

*”Φωτονική είναι η επιστήμη που τιθασεύει το φως. Η φωτονική συμπεριλαμβάνει την παραγωγή του φωτός, την ανίχνευση του φωτός, την διαχείριση του φωτός μέσω καθοδήγησης, χειραγώγησης και ενίσχυσης, αλλά κυρίως τη χρήση του φωτός προς όφελος της ανθρωπότητας”*

## 1.2 Datacenters

Στην εποχή της πληροφόρησης που ζούμε, η ταχύτατη ανάπτυξη του διαδικτύου αλλά και των cloud εφαρμογών έχει σαν αποτέλεσμα την αλματώδη ζήτηση για μεγαλύτερο εύρος ζώνης (bandwidth), η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην ανάγκη ανάπτυξης δικτύων μεγαλύτερης χωρητικότητας αλλά και μικρότερου κόστους. Όταν πλέον πολλές εφαρμογές (on line, on demand κτλ) παρέχονται δωρεάν, οι διαχειριστές τους έρχονται αντιμέτωποι με την πρόκληση να καταφέρουν να συγκεράσουν τις αυξανόμενες ανάγκες για περισσότερο εύρος ζώνης στο δίκτυο με το κόστος στις υποδομές και στην απαιτούμενη ισχύ. Η απάντηση σε αυτή τη με μεγάλη πρόκληση είναι τα φωτονικά δίκτυα [3, 1].



**Σχήμα 1.1:** Η ιεραρχία των συστοιχειών σε δομές διασυνδέσεων: α) Σε ένα κτήριο β) Σε πολλαπλά κτήρια [29]

Με τη βοήθεια λοιπόν της φωτονικής τεχνολογίας και δεδομένων των αυξημένων αναγκών, είναι επιτακτικός ο σχεδιασμός περισσότερων και πιο ισχυρών υπολογιστικών δομών. Τέτοιες δομές είναι τα Datacenters. Σήμερα, ένα τυπικό **Datacenter** περιλαμβάνει δεκάδες εκατοντάδων από servers που σχηματίζουν μία μαζική παράλληλη υπερ-υπολογιστική δομή. Η εικόνα 1.1 απεικονίζει μια τυπική συστοιχία datacenter, με τους servers τοποθετημένους σε στοίβες ραφιών των 20 με 40 υπολογιστών η καθεμία. Οι servers σε κάθε στοίβα συνδέονται με έναν μεταγωγέα (switch) στην κορυφή της στοίβας που ονομάζεται ToR (top-of-rack), ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται σε ανώτερο επίπεδο με τους αντίστοιχους μεταγωγείς από τις υπόλοιπες στοίβες (cluster switches). Αυτή λοιπόν η συστοιχία των μεταγωγέων παρέχει πλήρη συνδεσιμότητα μεταξύ των στοιβών ενώ σε αυτή στηρίζεται η λειτουργία μιας εξελισσόμενης κατηγορίας υπολογιστικών συστημάτων που ονομάζονται **warehouse-scale computers (WSCs)**. Ενδεικτικά αναλύουμε αυτήν την νέα έννοια: Έχουμε πλέον αρκετές εφαρμογές που "τρέχουν" στην πλευρά των servers και όχι σε κάθε μηχανήμα των χρηστών ξεχωριστά, αυτό μπορεί να περιλαμβάνει online εφαρμογές όπως είναι για παράδειγμα τα e-mails, οι χάρτες, και η εκτεταμένη αναζήτηση και ο αποθηκευτικός χώρος που παρέχουν

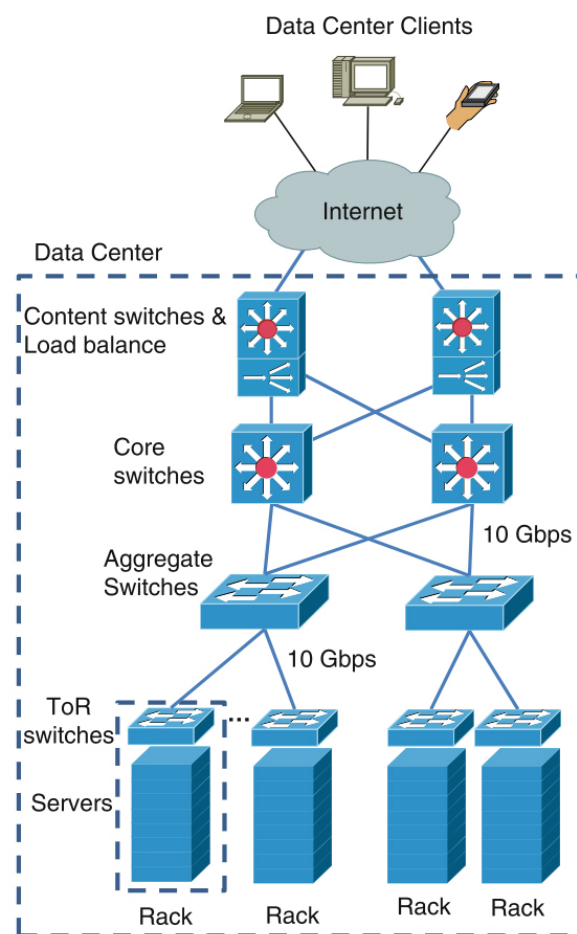
γνωστές εταιρείες όπως η Google, η Amazon, η Yahoo, η Microsoft και η Facebook. Μπορεί να θεωρηθεί ένας άλλος τύπος datacenter. [30] Εδώ να σημειώσουμε ότι ένα datacenter μπορεί να αποτελείται είτε από ένα μόνο κτήριο είτε από πολλά, όπως δείχνει και η εικόνα 1.1. [29]

Το σχήμα 1.2 δείχνει το διάγραμμα ενός τυπικού Datacenter. Ένα datacenter αποτελείται από πολλαπλά racks που φιλοξενούν τους servers που συνδέονται με το δίκτυο διασύνδεσης του datacenter. Όταν λαμβάνεται αίτημα από ένα χρήστη των παρεχόμενων εφαρμογών, τότε αυτό προωθείται μέσω του Internet στο πάνω μέρος του Datacenter. Εκεί το αίτημα εξετάζεται από τους μεταγωγείς περιεχομένου (content switches) και από τις συσκευές διαχείρισης του φορτίου (load balance devices) και δρομολογείται στους κατάλληλους servers. Ενδεχομένως ένα αίτημα να απαιτεί την επικοινωνία του server με πολλούς άλλους servers. Για παράδειγμα, ένα αίτημα για μια απλή αναζήτηση στο διαδίκτυο απαιτεί την επικοινωνία και τον συγχρονισμό μεταξύ πολλών servers (web server, application server, database server). Το μεγάλο αγκάθι στη αρχιτεκτονικής δομής που αναφέραμε προηγουμένως με τους ToR είναι η υψηλή κατανάλωση ισχύος και ο μεγάλος αριθμός φυσικών συνδέσεων (links) καθώς και η πολυπλοκότητά τους. [31]

Ας δούμε σε αυτό το σημείο ονομαστικά τα σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζονται στις επικοινωνίες μέσω ηλεκτρικών δομών (όπως είναι τα χάλκινα καλώδια) όταν ο ρυθμός της διαμόρφωσης υπερβαίνει κατά κάποια GHz και το μήκος της μετάδοσης είναι μεγαλύτερο από κάποια mm [31]:

1. Το ποσό της ενέργειας που απαιτείται για να οδηγήσει ένα μη επαναλήψιμο καλώδιο είναι θεμελιωδώς γραμμικό με το μήκος του καλωδίου και η καθυστέρηση είναι τετραγωνική με το μήκος.
2. Η καθυστέρηση καλωδίου μπορεί να μειωθεί και να γίνει σχεδόν γραμμική με τη χρήση κατάλληλων επαναληπτών χώρου με κόστος όμως την αύξηση της ισχύος.
3. Η ακεραιότητα του σήματος, για υψίσυχνα σήματα, είναι ένα σοβαρό πρόβλημα στις off-socket επικοινωνίες
4. Ο αριθμός των I/O (Input/Output) σημάτων και ο ρυθμός διαμόρφωσης αυξάνονται πολύ πιο αργά σε σχέση με τον αριθμό των τρανζίστορ που μπορούν να τοποθετηθούν επί της μήτρας. Αυτό δημιουργεί ένα πολύ σημαντικό περιορισμό του εύρους ζώνης της επικοινωνίας
5. Η χρήση SerDes I/O (Serializer/Deserializer) υψηλών ταχυτήτων είναι ένας τρόπος για να αυξηθεί το εύρος ζώνης, αλλά αυτά τα κυκλώματα απαιτούν αρκετή ισχύ.

Από την άλλη πλευρά η επικοινωνία μέσω οπτικών/φωτονικών δομών έχει διαφορετικές πλε-



**Σχήμα 1.2:** Η αρχιτεκτονική ενός δικτύου Datacenter [31]

ονεκτικές ιδιότητες [31]:

1. Εξαιτίας των πολύ χαμηλών ρυθμών απωλειών των κυματοδηγών ή των οπτικών ινών, η ενεργός ενέργεια καταναλώνεται κατά κύριο λόγο στα σημεία όπου γίνεται η μετατροπή από οπτική ισχύ σε ηλεκτρική ισχύ (OE) και αντίστροφα (EO). Ως εκ τούτου η ενέργεια που καταναλώνεται είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη από το μήκος της απόστασης στα όρια ενός Data center.
2. Το εύρος ζώνης δεν είναι αυστηρά εξαρτημένο από τον ρυθμό διαμόρφωσης, ενώ πολλαπλά μήκη κύματος του φωτός μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο ίδιο μέσο (κυματοδηγός/οπτική ίνα), μια επιλογή η οποία δεν είναι καθόλου πρακτική για υψηλής ταχύτητας ηλεκτρονικής σηματοδότηση.
3. Το πρόβλημα της ακεραιότητας του σήματος είναι σαφώς μειωμένο στο οπτικό πεδίο.

Ένα προφανές πρώτο συμπέρασμα που βγαίνει από τα παραπάνω είναι ότι μάλλον θα πρέπει να εγκαταλειφθεί η χρήση αμιγώς ηλεκτρικών συσκευών στις επικοινωνίες δίνοντας χώρο στη φωτονική τεχνολογία. Κι αυτό γιατί κερδίζει κατά κράτος σε δυο πολύ ουσιώ-

δεις αναπτυξιακές παραμέτρους: στο **εύρος ζώνης** και στην **ισχύ**. Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι πρέπει να αγνοήσουμε την διαφορά στο κόστος (τα οπτικά συστήματα είναι σαφώς πιο ακριβά) αλλά και την συνεχή εξέλιξη που παρουσιάζουν τα ηλεκτρονικά συστήματα. Το κόστος μιας ηλεκτρικής δομής επικοινωνίας είναι γνωστό και εύκολα προβλέψιμο εδώ και δεκαετίες. Αντίθετα με τις οπτικές συσκευές δεν είμαστε σε θέση να το γνωρίζουμε ή να το προβλέψουμε αφού είναι μια τεχνολογία που εφαρμόζεται πολύ λίγα χρόνια.

Τα μοντέρνα Data centers έχουν ήδη ασπαστεί την φωτονική τεχνολογία μακρινών αποστάσεων. Στο εσωτερικό μιας στοίβας (rack) του datacenter εξακολουθεί να βασίζεται σε ηλεκτρονικά μέσα διάδοσης, όμως τα ηλεκτρικά (χάλκινα) καλώδια ενός σημερινού datacenter έχουν ήδη αντικατασταθεί από οπτικά. Αυτά ονομάζονται Active Optical Cables (AOCs) και έχουν ενσωματωμένα μέσα τους μηχανισμούς μετατροπής από ηλεκτρικό σε οπτικό και αντίστροφα.

Ένα άλλο κομμάτι που έχει μεγάλη σημασία είναι ο τρόπος που το προσφερόμενο εύρος ζώνης μπορεί να αξιοποιηθεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Είναι βέβαιο ότι μια απλή ροή δεδομένων δεν μπορεί να ικανοποιεί τις αυξανόμενες απαιτήσεις σε ταχύτητα δεδομένου του εύρους ζώνης. Έτσι χρειάζεται να εφαρμοστούν διαδικασίες πολυπλεξίας ώστε να αξιοποιηθεί όσο το δυνατό περισσότερο το εύρος ζώνης που παρέχουν οι οπτικές ίνες. Τέτοιες διαδικασίες πολυπλεξίας είναι η πολυπλεξία με διαίρεση του χρόνου (Time division multiplexing TDM), η πολυπλεξία με διαίρεση του χώρου (Spacing division multiplexing SDM) και η πολυπλεξία με διαίρεση του μήκους κύματος (Wavelength division multiplexing WDM). Η τελευταία μέθοδος είναι αυτή που χρησιμοποιείται περισσότερο σε τέτοιου είδους εφαρμογές.

## 1.3 Active Optical Cable (AOC) - Ενεργό Οπτικό Καλώδιο

### 1.3.1 Ορισμός

Το καλώδιο που φαίνεται στην εικόνα 1.3 ονομάζεται **Ενεργό Οπτικό Καλώδιο (Active Optical Cable AOC)** και είναι ένα είδος καλωδίου υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, που χρησιμοποιείται προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα του περιορισμού του εύρους ζώνης που κυριαρχεί στα κλασικά χάλκινα καλώδια. Επί της ουσίας αποτελούνται από οπτική ίνα που στην αρχή και στο τέλος της έχει **ενσωματωμένους οπτικοηλεκτρονικούς πομποδέκτες (optoelectronic transceivers)**. Τα AOCs έχουν ήδη κατακτήσει μεγάλο μερίδιο της αγοράς, όχι μόνο για τα πλεονεκτήματά τους έναντι των κλασικών χάλκινων καλωδίων (μικρότερο βάρος, απώλειες, κόστος και μεγαλύτερες αποστάσεις μετάδοσης) αλλά



και γιατί είναι ευκολότερο να χρησιμοποιηθούν από τους χρήστες. Στην περίπτωση των AOCs ο χρήστης έχει να αντιμετωπίσει μόνο ηλεκτρικές συνδέσεις και στις δύο άκρες του καλωδίου. Αυτό από μόνο του έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως για παράδειγμα ότι επειδή μόνο οι ηλεκτρικές διεπαφές είναι τυποποιημένες έτσι οτιδήποτε που αφορά στην οπτική ισχύ (κόστος και διαμόρφωση) μπορεί να σχεδιαστεί ανάλογα με τις ανάγκες. [20] Αυτό με λίγα λόγια σημαίνει ότι από την μεριά του χρήστη οι διεπαφές των AOCs μοιάζουν ταυτόσημες με τους κλασικούς χάλκινους συνδέσμους, ενώ το σήμα μεταδίδεται οπτικά μέσω οπτικής ίνας χαμηλών απωλειών. [28] Επιπλέον, δεδομένου ότι το καλώδιο είναι εξολοκλήρου βιομηχανικά σφραγισμένο, η ασφάλεια του ματιού, η επαναληψιμότητα των οπτικών συνδέσμων, οι απώλειες και ο καθαρισμός αποφεύγονται. Η απουσία οπτικών συνδέσμων στα AOCs μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του κόστους μιας τέτοιας οπτικής διασύνδεσης και συνεπώς δίνει οικονομικά περιθώρια στην διαχείριση της ισχύος και της διαμόρφωσης. [20]



**Σχήμα 1.3:** Ένα χαρακτηριστικό Active Optical Cable (AOC) 40GB/S QSFP+ της εταιρίας Fiberon Technologies [26]

Σε αντίθεση με την αρχική εκτίμηση ότι τα AOCs θα ήταν μια βραχυπρόθεσμη και εξειδικευμένη λύση που θα διευκολύνει τη σύνδεση μεταξύ των καλωδίων χαλκού και των οπτικών ινών, εντούτοις τα AOCs έχουν εξελιχθεί σε μια ευρεία κατηγορία διεπαφών.

Τα πρώτα AOCs που κυκλοφόρησαν στην αγορά σχεδιάστηκαν σε εφαρμογές του προτύπου InfiniBand (InfiniBand: πρότυπο διαδικτυακής επικοινωνίας που χρησιμοποιείται σε υπολογιστές υψηλών επιδόσεων, διαθέτει πολύ υψηλή απόδοση και πολύ χαμηλή καθυστέρηση) που χρησιμοποιούσε διεπαφές 4X SFF 8470 CX4.

Έκτοτε, μια σειρά από γνωστές **τυποποιημένες διεπαφές I/O (Input/Output)** υψηλής ταχύτητας έχουν σχεδιαστεί με τα ισοδύναμα ενεργά οπτικά καλώδια (AOCs). Έτσι σήμερα η λίστα περιλαμβάνει:

- SFP+

- OSFP+
- CX4
- CDFP
- USB 3.0
- HDMI
- Thunderbolt

Κορυφαίοι προμηθευτές συσκευών διασύνδεσης όπως οι Amphenol, FCI Electronics, Molex, Samtec και TE Connectivity έχουν ήδη εισέλθει στην αγορά των AOCs μαζί με τους προμηθευτές AOCs όπως είναι η Corning. Παραδοσιακοί προμηθευτές καλωδίων όπως η Siemon αλλά και κατασκευαστές οπτικών στοιχείων όπως η Avago Technologies και η Finisar έχουν μπει για τα καλά στην παραγωγή AOCs. Επίσης AOCs παράγουν και οι γνωστές ασιατικές εταιρείες Hitachi, Fujitsu, Sumitomo και Fujikura.

Όμως τα Active Optical Cables δεν είναι τέλεια για κάθε εφαρμογή: Οι χρήστες πρέπει να τα αγοράζουν σε προκαθορισμένα μήκη σε αντίθεση με τα κλασικά καλώδια που είναι εύκολο να πετύχεις το επιθυμητό μήκος. Επίσης τα στοιχεία των AOCs που κάνουν την ηλεκτροοπτική μετατροπή (και αντίστροφα) απαιτούν ενέργεια προκειμένου να λειτουργήσουν, πράγμα που δεν συμβαίνει με τις συνήθεις διεπαφές σε κυκλώματα ισχύος. Οι προμηθευτές όμως προβάλλουν σαν σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα των AOCs την χαμηλή κατανάλωση ρεύματος. Ακόμα, κατά την ηλεκτρο-οπτική μετατροπή παράγεται θερμότητα, που όμως μπορεί να απομονωθεί και να μην επηρεάσει τον υπόλοιπο εξοπλισμό μιας και αυτή λαμβάνει χώρα εξωτερικά των συσκευών.

Οι μηχανικοί εκμεταλλεύονται τα AOCs σε υπολογιστές υψηλών επιδόσεων, στη μαζική αποθήκευση, στους servers αλλά και σε εφαρμογές δρομολόγησης με μήκος από 1m έως 100m. Τα AOCs μπορούν να έχουν το ίδιο ή και διαφορετικό είδος διεπαφής στα δυο τους άκρα. Επίσης μπορούν να υποστηρίξουν αρκετά πρωτόκολλα σηματοδότησης όπως InfiniBand SDR, DDR, QDR, FDR, SAS 3.0, 10/40/100 Gigabit Ethernet και PCIe. Το νέο καλώδιο CDFP AOC της TE Connectivity παρέχει 16 διπλά κανάλια που τρέχουν στα 25 Gb/s το καθένα και με αυτόν τον τρόπο προσφέρουν συνολικά εύρος ζώνης στα 400 Gb/s. [28]

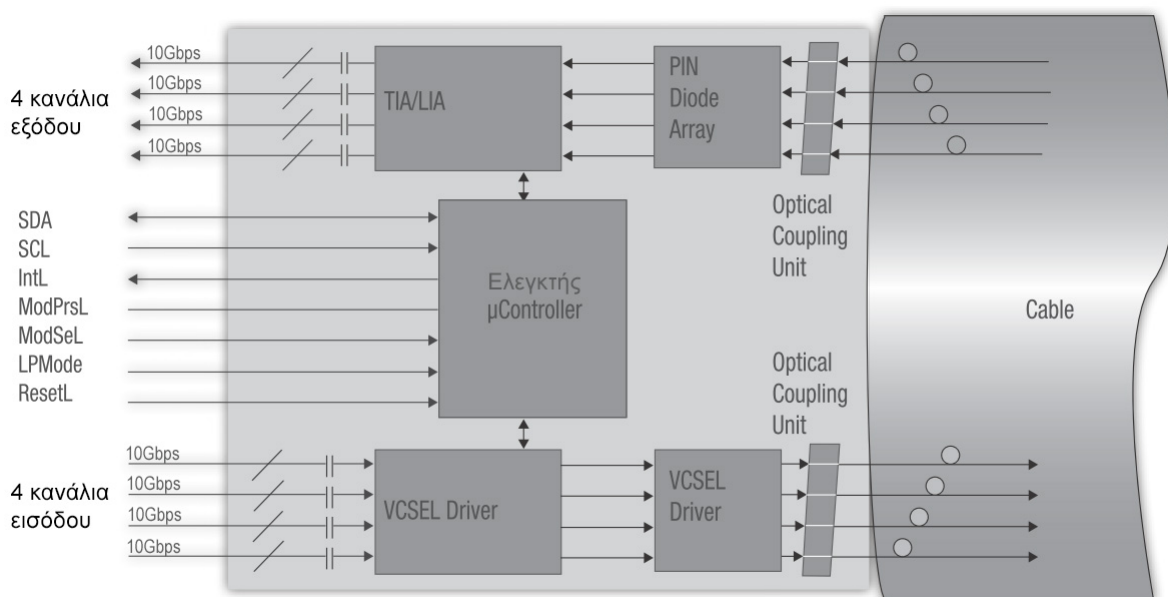
### 1.3.2 Τρόπος λειτουργίας των AOCs (μέσω παραδείγματος)

Στο σημείο αυτό θα προσπαθήσουμε να δούμε τον τρόπο λειτουργίας των AOCs δίνοντας ως παράδειγμα το καλώδιο 40GB/S QSFP+ της εταιρίας Fiberon Technologies [26] που φαίνεται στην εικόνα 1.3.

Το συγκεκριμένο AOC παρέχει 4 ανεξάρτητα κανάλια μετάδοσης δεδομένων και 4 κανάλια λήψης δεδομένων μέσω πολύτροπων οπτικών ινών, κάθε μια εκ των οποίων είναι ικανή να λειτουργεί σε ρυθμό μετάδοσης 10Gbps. Επομένως μπορεί να επιτευχθεί συνολικός ρυθμός μετάδοσης 40Gbps σε απόσταση άνω των 100 μέτρων με σκοπό να καλυφθούν οι ανάγκες για ταχύτατη ανταλλαγή υπολογιστικών δεδομένων.

Έχει σχεδιαστεί με παράγοντες σχεδιασμού για οπτικοηλεκτρικές συνδέσεις σύμφωνα με τις προδιαγραφές της συμφωνίας QSFP Multi-Source (MSA). Η συμφωνία αυτή δεν αποτελεί επίσημο πρότυπο οργανισμών, αλλά είναι συμφωνία μεταξύ εταιριών που παράγουν αυτόν τον εξοπλισμό έτσι ώστε να υπάρχει αρμονία μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών διεπαφών.

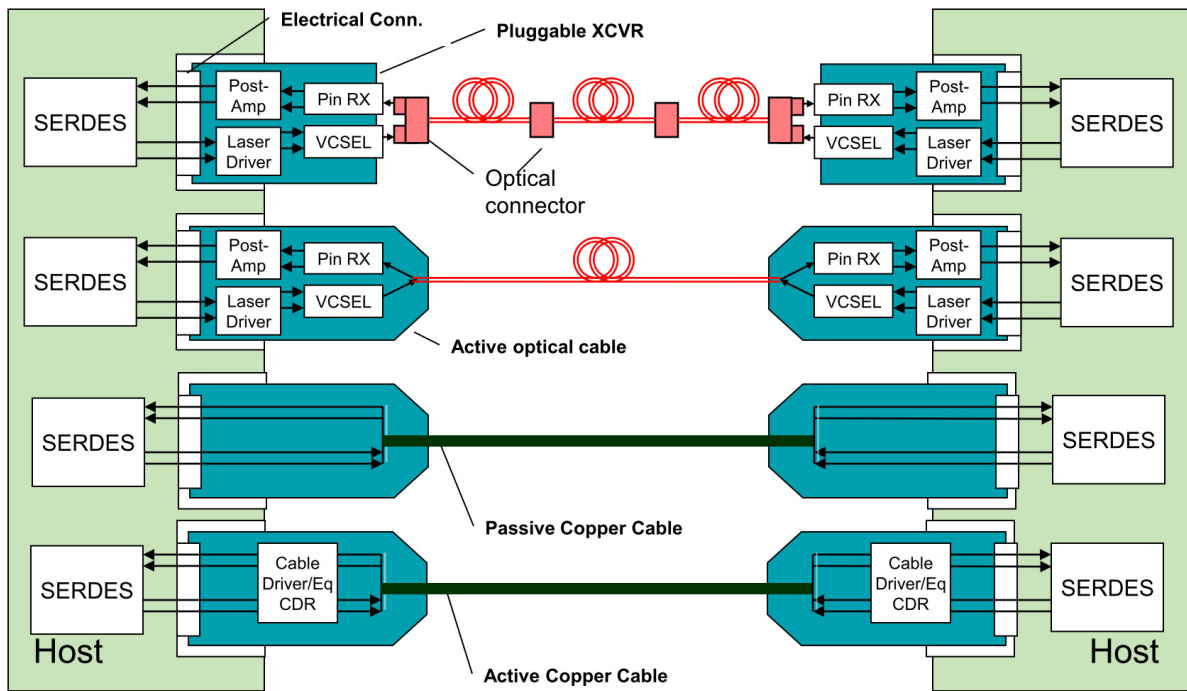
Η λειτουργία του με λίγα λόγια έχει ως εξής (σχήμα 1.4): Αρχικά η παράλληλη είσοδος ηλεκτρικών σημάτων μετατρέπεται μέσω μιας καθοδηγούμενης συστοιχίας από VCSEL σε παράλληλα οπτικά σήματα. Στη συνέχεια το φως μεταδίδεται ξεχωριστά μέσω των οπτικών ινών και μπορεί να ανιχνευθεί από τις φωτοδιόδους. Τέλος, τα οπτικά σήματα μετατρέπονται σε παράλληλα ηλεκτρικά σήματα και βγαίνουν ως έξοδος.



**Σχήμα 1.4:** Διάγραμμα ενός Active Optical Cable (AOC) 40GB/S QSFP+[26]

Αυτά τα καλώδια έχουν τρεις φορές την πυκνότητα των κλασικών SFP+ καλωδίων σύμφωνα με τα MSA και έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να αντέχουν στις σκληρότερες εξωτερικές συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, της υγρασίας και των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.[26]

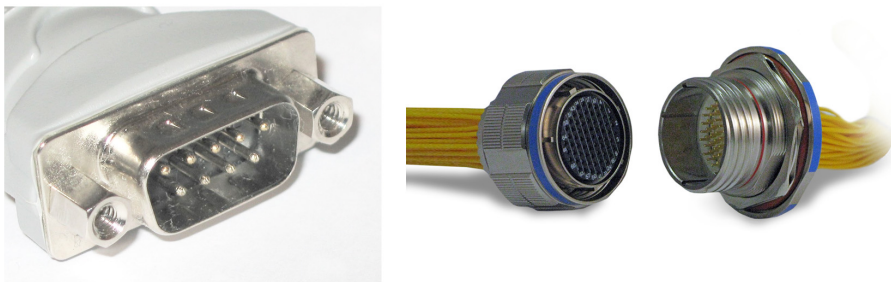
Στο σχήμα 1.5 φαίνεται ο διαφορετικός τρόπος λειτουργίας των κλασικών χάλκινων καλωδίων και των Active Optical Cables (AOC). [27]



**Σχήμα 1.5:** Ο διαφορετικός τρόπος που λειτουργούν τα AOC (πάνω) και τα κλασικά χάλκινα καλώδια (κάτω) [27]

### 1.3.3 Το μέλλον των AOCs

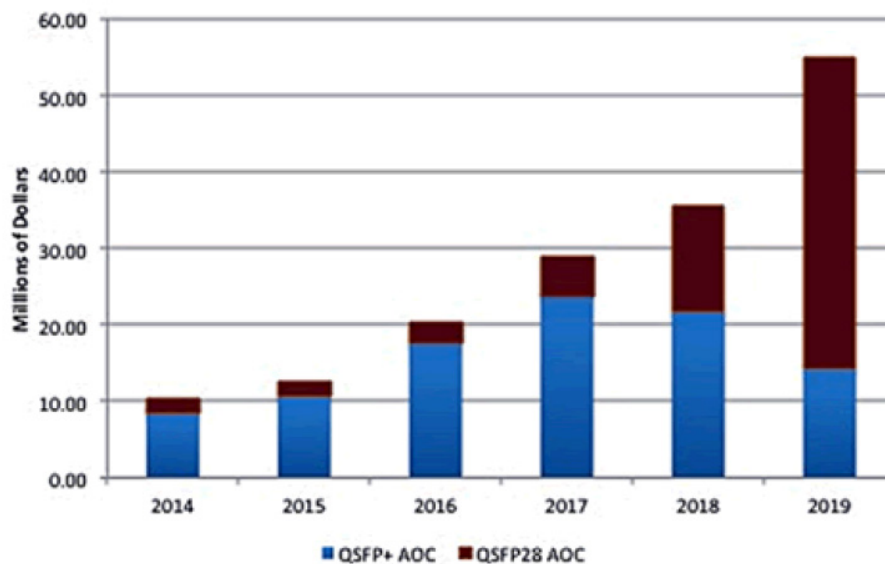
Τα active optical cables είναι βέβαιο ότι θα συνεχίσουν να αναπτύσσονται και να εισέρχονται σε νέες αγορές και εφαρμογές. Ήδη η Zephyr Photonics προσφέρει ένα ανθεκτικό AOC που έχει σχεδιαστεί για πολύ αντίξοες συνθήκες. Βασισμένο στις κλασικές διεπαφές διασύνδεσης D-Subminiature και MIL-DTL 38999 που φαίνονται στο σχήμα 1.6 αυτό το νέο καλώδιο μπορεί να έχει εφαρμογή στο βιομηχανικό και στρατιωτικό τομέα.



**Σχήμα 1.6:** Κλασικές διεπαφές D-Subminiature και MIL-DTL 38999

Αυτό που ξεκίνησε λοιπόν σαν μια μικρή κατηγορία εξειδικευμένου προϊόντος έχει ήδη φτάσει κοντά στα 500 εκατομμύρια δολάρια με μια μεγάλη γκάμα από καινούργιες εφαρμογές που εκμεταλλεύονται τα μεγάλα πλεονεκτήματα της οπτικής τεχνολογίας. Σύμφωνα με την πρόσφατη έκθεση έρευνας αγοράς “Multi-Gigabit Datacom Connector and Cable Assemblies”

της Bishop & Associates που δημοσιεύθηκε τον Νοέμβριο του 2014, η αξία μόνο των QSFP+ AOCs για 40 και 100 Gigabit Ethernet αναμένεται να φτάσει τα 55 εκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2019 (σχήμα 1.7).



**Σχήμα 1.7:** Στοιχεία από την έρευνα αγοράς “Multi-Gigabit Datacom Connector and Cable Assemblies” της Bishop & Associates

Σήμερα οι εφαρμογές που “καταναλώνουν” τα περισσότερα AOCs είναι τα μεσαία και μεγάλα Data Centers, όμως αναμένεται πολλές περισσότερες εφαρμογές να επωφεληθούν από τα συγκριτικά πλεονεκτήματα των AOCs. Η παγκόσμια αγορά των AOCs θα μπορούσε να φτάσει το 1 δις δολάρια μέχρι το 2020. [28]



# Κεφάλαιο 2

## Laser

### 2.1 Εισαγωγικά

Τα laser πρωτοεμφανίστηκαν στο πεδίο των μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος την δεκαετία του 1950 και η γνωστή ονομασία τους για τότε ήταν MASER (Microwave Amplified by Stimulated Emission of Radiation). Τα περισσότερα από τα laser που γνωρίζουμε σήμερα έχουν εφευρεθεί ήδη από το 1964, όμως πέρασαν πολλά χρόνια μέχρι να γίνουν αποδεκτά στο βιομηχανικό περιβάλλον. Ένας λόγος είναι ότι τα πρώτα lasers ήταν αναξιόπιστα, αλλά και πιθανώς εξίσου σημαντικά για την επίλυση σοβαρών προβλημάτων που όμως κανένας μέχρι εκείνη τη στιγμή δεν ήξερε την ύπαρξή τους.

Σήμερα, τα laser έχουν μπει για τα καλά τόσο στα σπίτια μας όσο και στους τομείς των επιστημών και των κατασκευών. Ήδη τα laser χρησιμοποιούνται ευρέως σε πάρα πολλές εφαρμογές όπως είναι η επεξεργασία μετάλλων στις κατασκευές πλοίων, αυτοκινήτων και αεροσκαφών, οι χειρουργικές επεμβάσεις, οι εντυπωσιακοί φωτισμοί, η συγκέντρωση αποδεικτικών στοιχείων, η μέτρηση της απόστασης της Γης από τη Σελήνη. Τα laser χρησιμοποιούνται ακόμα για να φτιάξουν μικροσκοπικά χαρακτηριστικά σε διάφορα υλικά που βρίσκουν εφαρμογή στην ηλεκτρονική, στην αεροδιαστημική, στην ιατρική, στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στην αυτοκίνηση και σε άλλες βιομηχανίες.

Αλλά τι ακριβώς είναι το LASER; Στην πραγματικότητα είναι μια συσκευή που παράγει ή ενισχύει φως. Το LASER αποτελεί το ακρώνυμο των λέξεων Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation. Τον όρο αυτό επινόησε και χρησιμοποίησε στις εργαστηριακές του έρευνες ο καθηγητής Gordon Gould όταν ήταν μαθητής του νομπελίστα καθηγητή Charles Townes στο Πανεπιστήμιο της Κολούμπια το 1957.

## 2.2 Τα laser στις οπτικές επικοινωνίες

Τα lasers παράγουν μακράν το καταλληλότερο είδος φωτός που είναι απαραίτητο για τις οπτικές επικοινωνίες. Αλλά ας δούμε συνοπτικά κάποια βασικά χαρακτηριστικά τους που τα καθιστούν αναντικατάστατα σε αυτού του είδους τις επικοινωνίες[8]:

- Ένα ιδανικό laser είναι μονοχρωματικό, δηλαδή εκπέμπει μόνο σε ένα μήκος κύματος. Αυτό εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται μέσα στο laser. Επιπλέον, παράγει δέσμες φωτός που είναι παράλληλες μεταξύ τους και συμφασικές. Τέτοιου είδους laser ονομάζονται *coherent*.
- Τα laser είναι πολύ εύκολο να ελεγχθούν από κατάλληλα κυκλώματα.
- Μπορούν να παράξουν δεσμίδες φωτός με σχετικά υψηλή ισχύ. Πράγματι κάποια είδη laser μπορούν να παράξουν  $kW$  ισχύος. Σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών, υπάρχουν ημιαγωγικά laser με ισχύ πάνω από  $20mW$ , αρκετές φορές παραπάνω από την ισχύ που μπορούν να παράξουν τα LEDs.
- Επειδή το φως εκπέμπεται σε παράλληλες δέσμες ένα μεγάλο ποσοστό του (μεταξύ 50% και 80 %) μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις μέσω οπτικών ινών.

Από την άλλη, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα στη χρήση των laser:

- Είναι αρκετά πιο ακριβά σε σχέση με τα LEDs. Ένα στοιχείο που ανεβάσει το κόστος της χρήσης των laser είναι ότι όταν αυτά χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις τότε είναι απαραίτητη και η χρήση ελεγκτών θερμοκρασίας και ισχύος στην έξοδο. Ο έλεγχος στη θερμοκρασία είναι απαραίτητος διότι διατηρεί ένα σταθερό κατώφλι εκπομπής, ενώ ο ελεγκτής της ισχύος εξασφαλίζει ότι θα φτάσει ένα καλό σήμα στον δέκτη. Όμως και τα δύο αυτά στοιχεία αυξάνουν αρκετά το κόστος.
- Το μήκος κύματος του φωτός που παράγει ένα laser εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το υλικό που χρησιμοποιείται αλλά και από τον φυσικό σχηματισμό που θα έχει. Δεν μπορεί κάποιος εύκολα να πει "Θέλω ένα laser σε X μήκος κύματος" και να το έχει διότι αυτό προϋποθέτει έναν συγκεκριμένο, εξειδικευμένο και πολύπλοκο σχεδιασμό. Υπάρχουν και "ρυθμιζόμενα" laser που όμως καλύπτουν ένα στενό εύρος μήκων κύματος.



## 2.3 Τύποι Lasers

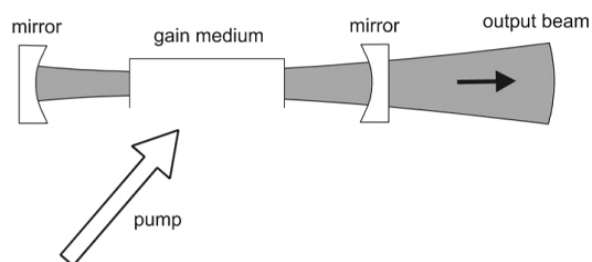
Οι πολλοί και διαφορετικοί τύποι laser που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα υποδηλώνουν ότι υπάρχει ένα πολύ μεγάλο εύρος από φυσικές και διαχειριστικές παραμέτρους. Πράγματι, εάν κατηγοριοποιήσουμε τα lasers με βάση την φυσική κατάσταση του ενεργού μέσου τότε βλέπουμε ότι έχουμε *laser στερεής, υγρής ή αέριας κατάστασης*. Μια ειδική περίπτωση έχουμε όταν το ενεργό μέσο αποτελείται από ελεύθερα ηλεκτρόνια με αλληλοσυσχετιζόμενη ταχύτητα, υπό την επίδραση ενός χωρικού μαγνητικού πεδίου (*free-electron laser*). Έαν, από την άλλη, τα laser χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας τότε έχουμε *laser υπέρυθρης ακτινοβολίας* (infrared lasers), *laser ορατού φωτός* (visible lasers), *laser υπεριώδους ακτινοβολίας* (UV laser) και *laser ακτίνων X* (X-ray laser). Τα αντίστοιχα μήκη κύματος κυμαίνονται από  $\sim 1mm$  μέχρι  $\sim 1nm$ . Επίσης τα laser κατηγοριοποιούνται και με βάση την εκπεμπόμενη ισχύ που μπορούν να εκπέμψουν. Έτσι έχουμε ότι για *laser συνεχούς κύματος* οι τυπικές τιμές της εκπεμπόμενης ισχύος ξεκινούν από πολύ λίγα  $mW$  για τα laser που χρησιμοποιούνται στις πηγές σημάτων (π.χ. οπτικές επικοινωνίες, bar-code scanners κ.ά.), σε μερικές δεκάδες  $kW$  για laser για την επεξεργασία υλικών, ενώ για διάφορες στρατιωτικές εφαρμογές η εκπεμπόμενη ισχύς των laser μπορεί να φτάσει κάποια  $MW$  (το πολύ  $5MW$ ). Για *παλμικά laser* (pulsed lasers) η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς μπορεί να είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι στα laser συνεχούς κύματος, φτάνοντας ακόμα και το  $1PW$  ( $10^{15}W$ )! Οι φυσικές διαστάσεις για τα laser ποικίλουν κι αυτές. Για παράδειγμα όσον αφορά την οπτική κοιλότητα των laser, το μήκος μπορεί να είναι αρκετά μικρό της τάξης του  $\sim 1\mu m$  για τα πολύ μικρά laser, ενώ για τα μεγαλύτερα το μήκος μπορεί να φτάσει και έως μερικά  $km$  (π.χ. ένα laser με μήκος  $6.5km$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γεωδαιτικές μελέτες).

Αυτή η μεγάλη ποικιλία από φυσικές και διαχειριστικές παραμέτρους υποδηλώνει εμφανώς τόσο την μεγάλη δύναμη των laser όσο και τις αδυναμίες τους. Όσον αφορά τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν laser αυτή η μεγάλη ποικιλία στις παραμέτρους προσδίδει μεγάλη δυναμική σε πολλά πεδία της θεμελιώδους και εφαρμοσμένης επιστήμης. Από την άλλη πλευρά, για τον τομέα των αγορών αυτή η μεγάλη ποικιλία επισημαίνει την ανάγκη για παραγωγή πολλών και διαφορετικών συσκευών και συστημάτων κάτι που αποτελεί αυταπόδεικτα εμπόδιο για στην μαζική παραγωγή, αφού το κόστος είναι σαφώς μεγαλύτερο.[6]

## 2.4 Βασικά στοιχεία της λειτουργίας των laser

Στο σχήμα 2.1 φαίνονται τα τρία βασικά στοιχεία που απαιτούνται για την λειτουργία των laser. Το **ενεργό μέσο** (gain medium,) που μπορεί να είναι σε οποιαδήποτε μορφή στερεή, αέρια, υγρή και πλάσμα, ενισχύει το φως, τα **υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρα** (mirrors) παρέχουν οπτική ανάδραση (optical feedback), ενώ θα πρέπει να υπάρχει και ένας μηχανισμός που να προσφέρει την απαραίτητη ενέργεια στο laser τον οποίο ονομάζουμε

**άντληση** (pumping process). Με τη χρήση των ανακλαστικών κατόπτρων καταφέρνουμε να «εγλωβίζουμε» το φως μέσα στο ενεργό μέσο, φτιάχνοντας έτσι μια οπτική κοιλότητα (optical cavity, optical resonator). Αυτή καταφέρει να φτιάξει μια οπτική ανάδραση με την έννοια ότι ένα μέρος της ενισχυμένης εξόδου (output) «επιστρέφει πίσω» για να ξαναγίνει είσοδος για περαιτέρω ενίσχυση. Ο συνδυασμός του ενεργού μέσου και της ανάδρασης είναι παρόμοιος και στα ηλεκτρικά κυκλώματα όπου οδηγούν στη δημιουργία ηλεκτρικών ταλαντώσεων. Στην πραγματικότητα, τα laser διέπονται από την ίδια λογική με αυτή του ηλεκτρικού ταλαντωτή υψηλών συχνοτήτων ( $\sim 10^{14}$  Hz). Όπως ακριβώς ο ηλεκτρικός ταλαντωτής χρειάζεται την κατάλληλη πηγή ενέργειας για να λειτουργήσει, έτσι και τα laser παίρνουν την ενέργεια που χρειάζονται μέσω της άντλησης που αναφέραμε νωρίτερα.

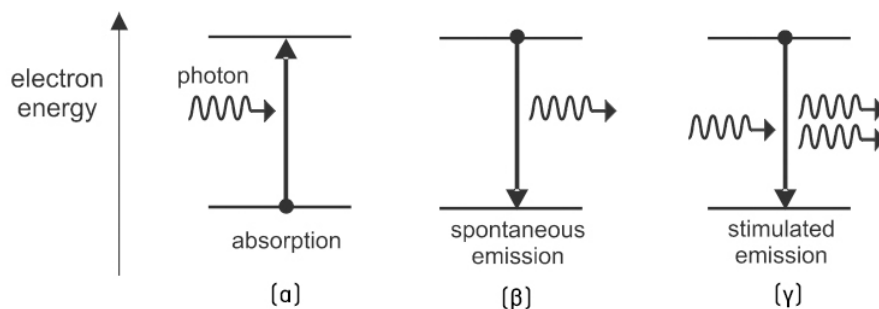


**Σχήμα 2.1:** Βασικά στοιχεία λειτουργίας ενός laser

Παρόλο που σε γενικές γραμμές οι ηλεκτρικοί και οι οπτικοί ταλαντωτές διέπονται από την ίδια λογική, διαφέρουν σημαντικά στις λεπτομέρειες που αφορούν στα τρία βασικά στοιχεία. Για παράδειγμα, η ανάδραση στα ηλεκτρικά κυκλώματα επιτυγχάνεται συνδέοντας μια αντίσταση μεταξύ της εξόδου και της εισόδου του συστήματος ενός ενισχυτή. Για την οπτική ανάδραση, από την άλλη, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στο σχεδιασμό της εκτιμώμενης οπτικής αντίστασης που θα χρησιμοποιηθεί.

Ο μηχανισμός της ενίσχυσης, λοιπόν, είναι ίσως η πιο θεμελιώδης διαφορά μεταξύ ηλεκτρικών και οπτικών ταλαντωτών. Στα laser, η ενίσχυση επιτυγχάνεται μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής (stimulated emission), μια διαδικασία που πρώτος πρότεινε ο Albert Einstein το 1917. Η κεντρική ιδέα της εξαναγκασμένης εκπομπής μπορεί να γίνει κατανοητή αν θεωρήσουμε τους τρεις διαφορετικούς τρόπους που συμπεριφέρεται το φως με τα άτομα. Οι τρόποι αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.

Στην **απορρόφηση** (absorption), ένα άτομο που βρίσκεται αρχικά στην χαμηλή ενεργειακή στάθμη μεταπηδάει σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη και ως εκ τούτου το προσπίπτον φωτόνιο απορροφάται. Η αντίστροφη διαδικασία ονομάζεται **αυθόρμητη εκπομπή** (spontaneous emission), κατά την οποία ένα άτομο που βρίσκεται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη μεταπίπτει σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη και έτσι εκπέμπεται ένα φωτόνιο. Στην τρίτη διαδικασία δηλαδή την **εξαναγκασμένη εκπομπή** (stimulated emission) υπάρχει πρόσπτωση ενός φωτονίου σε άτομο που βρίσκεται ήδη σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Τότε το άτομο



**Σχήμα 2.2:** Οι τρεις διαφορετικοί τρόποι που συμπεριφέρεται το φως με τα άτομα: (α) Απορρόφηση, (β) Αυθόρμητη εκπομπή, (γ) Εξαναγκασμένη εκπομπή

αυτό μπορεί να «εξαναγκαστεί» να εκπέμπει ένα επιπλέον φωτόνιο, που θα είναι πανομοιότυπο με τον προσπίπτον φωτόνιο, ένα «οπτικό κλώνο» δηλαδή. [5] Αυτό που πρέπει να τονίσουμε είναι ότι αυτό το επιπλέον φωτόνιο που εκπέμπεται έχει ακριβώς το ίδιο μήκος κύματος, την ίδια φάση και διεύθυνση με το υπάρχον φωτόνιο. [8] Αυτός ο διπλασιασμός των φωτονίων αποτελεί επι της ουσίας την διαδικασία της ενίσχυσης, ενώ μεγαλύτερος αριθμός των φωτονίων αντιστοιχεί σε περισσότερη ενέργεια στο κύμα του φωτός.

Στην εξαναγκασμένη εκπομπή, όλη η ενέργεια πρέπει να διατηρείται όπως συμβαίνει σε κάθε φυσική διαδικασία στην οποία η μάζα των σωματιδίων δεν μεταβάλλεται. Η αυξημένη οπτική ενέργεια προέρχεται από την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στα άτομα, και προκειμένου να επιτύχουμε συνεχή ενίσχυση του φωτός θα πρέπει να προσφέρουμε συνεχώς ενέργεια στα άτομα. Αυτή η μεταφορά ενέργειας προς τα άτομα επιτυγχάνεται με τη **διαδικασία της άντλησης**, η οποία μπορεί να πάρει διάφορες μορφές. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε αρκετές κατηγοριοποιήσεις στα είδη των laser. Ενδεικτικά κάποια από αυτά: Ruby Lasers, Neodymium Lasers, Fiber Lasers, Dye Lasers, Ti:Sapphire Laser, He-Ne Laser, Argon Ion Laser, Excimer Laser. [5] Επίσης στον πίνακα 2.1 παραθέτουμε τα lasers που χρησιμοποιούνται πιο συχνά σήμερα [4].

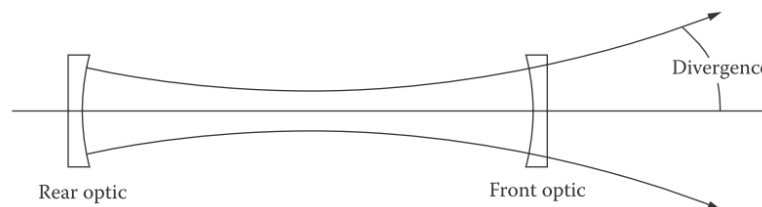
Type	Medium	Wavelength
Gas lasers	Excimer	193–351 nm
Gas lasers	CO <sub>2</sub>	10 μm
Solid-state lasers	Nd:YAG (fundamental)	1.064 μm
	Nd:YAG (second harmonic)	532 nm
	Nd:YAG (third harmonic)	355 nm
	Nd:YAG (fourth harmonic)	266 nm
Fiber lasers	Doped fibers	1064–2000 nm
Disk lasers	Doped thin disks	1064–1030 nm

**Πίνακας 2.1:** Μερικά laser που χρησιμοποιούνται ευρέως στις μέρες μας

## 2.5 Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της δέσμης των laser

### 2.5.1 Απόκλιση – Divergence

Οποιαδήποτε δέσμη φωτός όταν εξέρχεται από κάποιον περιορισμένο χώρο υφίσταται **απόκλιση** (Σχήμα 2.3). Όταν μιλάμε για laser απόκλιση θεωρείται ο βαθμός της εξάπλωσης που παρουσιάζει μια δέσμη laser αφότου περάσει από το μπροστινό άνοιγμα. Σε μηχανικές εφαρμογές η απόκλιση είναι ανεπιθύμητη επειδή οδηγεί σε μείωση ενέργειας και παραμόρφωση από το ένα στάδιο στο επόμενο.



Σχήμα 2.3: Η απόκλιση ως χαρακτηριστικό των laser

### 2.5.2 Κατευθυντικότητα – Directionality

Αυτή η ιδιότητα, μαζί με την απόκλιση, είναι αυτή που κάνει όλα τα φωτόνια να κατευθυνθούν σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση αφότου βγουν από το laser. [4] Η ιδιότητα αυτή αποτελεί άμεση συνέπεια του ότι το ενεργό μέσο του laser βρίσκεται σε οπτική κοιλότητα [6]

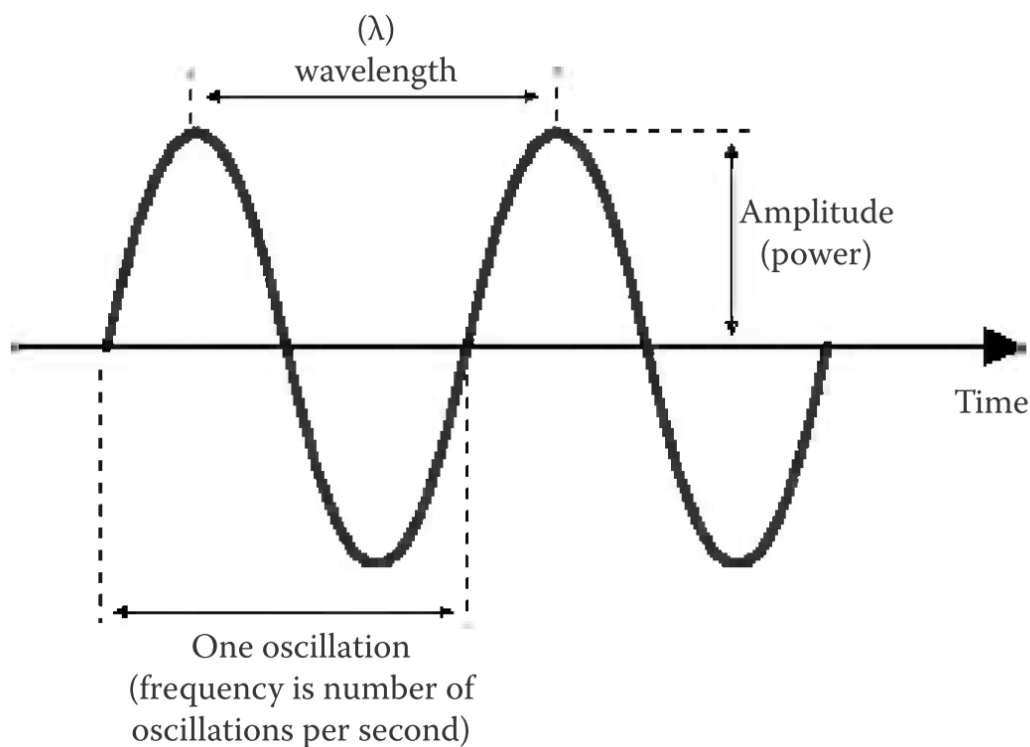
### 2.5.3 Μονοχρωματικότητα – Monochromaticity

Εν ολίγοις, μπορούμε να πούμε ότι αυτή η ιδιότητα αφορά στις επόμενες δύο περιπτώσεις: (1) Μόνο ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα με συχνότητα  $f_0$  μπορεί να ενισχυθεί. (2) Εφόσον τα δυο κάτοπτρα δημιουργούν μια συντονισμένη οπτική κοιλότητα, η ταλάντωση μπορεί να συμβεί μόνο στη συχνότητα συντονισμού της κοιλότητας. Στην δεύτερη περίπτωση το εύρος της δέσμης του laser γίνεται όλο και πιο στενό (μέχρι και 10 τάξεις μεγέθους!) σε σχέση με το σύνηθες εύρος που παρατηρείται στην αυθόρμητη εκπομπή. [6]

### 2.5.4 Μήκος κύματος – Wavelength (or color)

Το μήκος κύματος ή αλλιώς το χρώμα ενός ημιτονοειδούς κύματος είναι η χωρική περίοδος του κύματος δηλαδή η απόσταση μετά την οποία έχουμε επανάληψη του κύματος. Μετράται από κορυφή σε κορυφή ή από κοιλάδα σε κοιλάδα. Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως

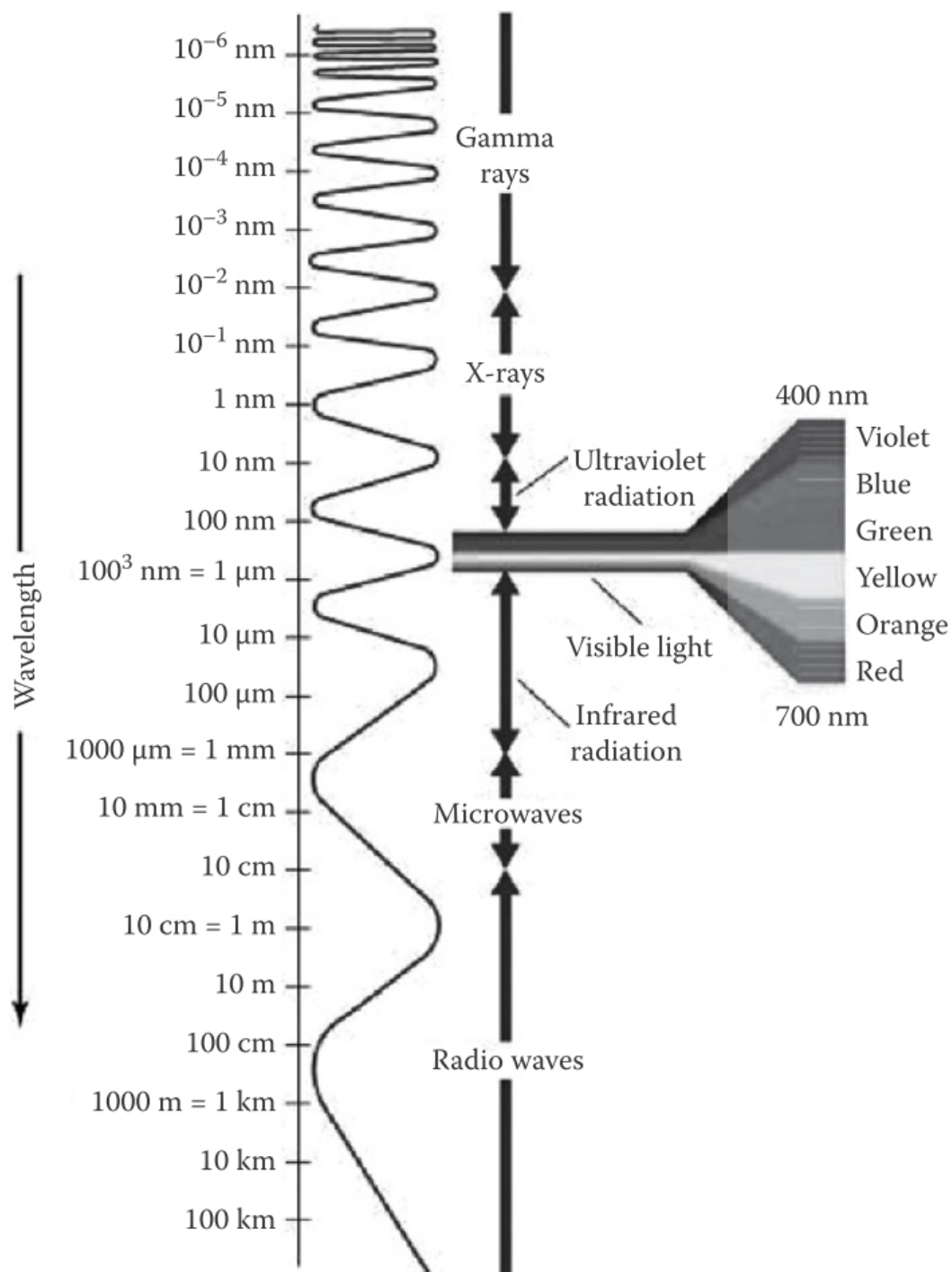
ανάλογο με την συχνότητα, κύματα με μεγαλύτερη συχνότητα έχουν μικρότερο μήκος κύματος, ενώ από την άλλη κύματα με μικρότερη συχνότητα έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος. Στο σχήμα 2.4 φαίνεται ένα από ημιτονοειδές κύμα, ενώ στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της συχνότητας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Σε γενικές γραμμές τα μόρια απορροφούν μόνο συγκεκριμένα και διακριτά μήκη κύματος του φωτός.[4] Τα περισσότερα laser έχουν την ιδιότητα να εκπέμπουν φως ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος μέσα από ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.[7]



Σχήμα 2.4: Ένα απλό ημιτονοειδές κύμα

### 2.5.5 Ένταση – Intensity

Καθορίζει την πυκνότητα των φωτονίων που χρησιμοποιούνται από τα laser ενώ συνήθως εκφράζεται σε Watt ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο. ( $Watt/cm^2$ ) [4]



**Σχήμα 2.5:** Η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της συχνότητας στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

# Κεφάλαιο 3

## VCSELs

Η λέξη VCSEL είναι ακρωνύμιο των λέξεων **Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser** ενώ περιγράφει μια κατηγορία μονοχρωματικού διαμήκους laser που διαφέρει σημαντικά από τα γνωστά laser. [12]. Η ελληνική μετάφραση είναι **laser επιφανειακής εκπομπής κάθετης κοιλότητας** ενώ αποτελεί βασικό στοιχείο φωτοεκπομπής το οποίο περιλαμβάνεται σε πλήθρα οπτικοηλεκτρονικών συστημάτων. [14] Τα VCSELs είναι ένας τύπος ημιαγωγικών laser που είναι ευρέως διαδεδομένο στην αγορά, ενώ χρησιμοποιείται κατά κόρον στη μετάδοση δεδομένων μέσω οπτικών ινών.[18]

### 3.1 Εισαγωγικά

Τα VCSELs έχουν υποστεί μια ασυνήθιστα τεράστια ανάπτυξη τις τρεις τελευταίες δεκαετίες. Η ιδέα των VCSELs παρουσιάστηκε αρχικά από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Kenichi Iga στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας του Τόκιο στα τέλη της δεκαετίας του 1970. Σήμερα τα VCSELs είναι απολύτως απαραίτητα συστατικό σε πολλές εφαρμογές ενώ ήδη χρησιμοποιείται καθημερινά από χιλιάδες χρήστες υπολογιστών αφού είναι το μέσο πλοήγησης στο πασίγνωστο για εμάς οπτικό ποντίκι. Αυτός ο τύπος laser έχει αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα laser εκπομπής ακμής (edge-emitting laser - EELs) στη χρήση πολύτροπων ινών με ταχύτητα οπτικής μετάδοσης δεδομένων της τάξης των Gbit/s σε διάφορα δίκτυα και στην διασύνδεση διαφόρων ειδών συμπλέγματος υπολογιστών. Επίσης υπερτερούν και έναντι των LEDs αφού πετυχαίνουν πολύ μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης (40 Gb/s και 100 Gb/s) ενώ τα LEDs περιορίζονται σε ρυθμό μετάδοσης χαμηλότερο των 622 MB/s.[12].

Τα πρώτα VCSELs βασιζόνταν στο τεχνολογικό σύστημα υλικών InGaAsP-InP. Η επανάσταση όμως στην τεχνολογία των VCSELs ήρθε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 με την παρουσίαση του πρώτου συνεχούς-κύματος VCSEL σε βάση GaAs που χρησιμοποιούσε μεταλλικά και διηλεκτρικά ανακλαστικά κάτοπτρα. Το 1989 παρουσιάστηκαν τα πλήρως μονολιθικά laser InGaAs-GaAs με ενσωματωμένα κάτοπτρα Bragg και μήκος κύματος εκπομπής

στα  $960nm$  και κατώφλι παλλόμενου ρεύματος στα  $1.3mA$ . Τα πρώτα VCSELs βγήκαν στην αγορά το 1996 από την εταιρεία Honeywell. Ως αποτέλεσμα τυποποίησης, αυτή η πρώτη γενιά VCSEL φτιάχνονταν από GaAs-AlGaAs και σύνθετους ημιαγωγούς, ενώ το μήκος κύματος που εξέπεμπαν ήταν στα  $850nm$ . Κατά τη διάρκεια μεταξύ των ετών 1992 και 2002 ιδρύθηκαν αρκετές εταιρίες με σκοπό την κεφαλαιοποίηση αυτού του συνεχώς αναπτυσσόμενου σχεδίου στην αγορά των τηλεπικοινωνιών και της μετάδοσης δεδομένων. Η φασματική περιοχή των  $850nm$  έχει κυριαρχήσει μέχρι και σήμερα, συμπεριλαμβανομένων και των εφαρμογών οπτικών πονικιών. Η παραγωγή στις μέρες μας είναι περίπου 100 εκατομμύρια laser τον χρόνο. [13]

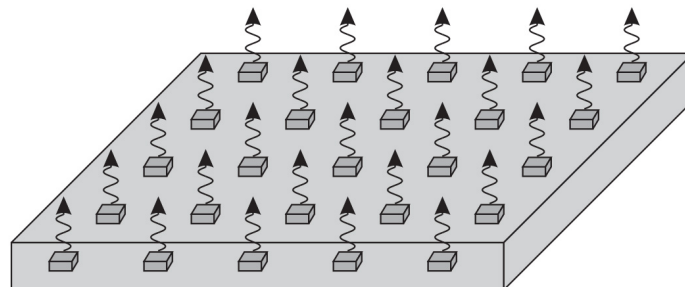
Η καθιέρωση των VCSELs στον τομέα της οπτικής μετάδοσης δεδομένων αποδίδεται στα εξής σημαντικά τους χαρακτηριστικά:

- Εκπέμπουν είτε από την κορυφή είτε από τη βάση της συσκευής σε αντίθεση με τα προηγούμενα ημιαγωγικά laser που εκπέμπουν στην διεύθυνση του επιπέδου της συσκευής. [18]
- Το **χαμηλό κατώφλι ρεύματος** που είναι μικρότερο από  $1mA$  και τα **αντίστοιχα μικρά ρεύματα οδήγησης** που απαιτούνται για να έχουμε οπτική ισχύ εξόδου της τάξεως των  $mW$ , ελαχιστοποιώντας έτσι την κατανάλωση ενέργειας αλλά και καθιστώντας πιο εύκολο τον σχεδιασμό των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων οδήγησης.
- Την άψογη συμπεριφορά τους στην **ψηφιακή διαμόρφωση** για ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που να φτάνουν και τα  $40Gbit/sec$ .
- Τις **υψηλές τους αποδόσεις** (της τάξης του 50%) στην μετατροπή ισχύος και ως εκ τούτου την χαμηλή κατανάλωση ισχύος.
- Ο σχηματισμός κυκλικών δεσμών με μικρές γωνίες απόκλισης που απλοποιούν τον σχηματισμό της οπτικής ακτίνας
- Η δυνατότητα λειτουργίας σε ένα περιβάλλον με θερμοκρασίες που να υπερβαίνουν τους  $+125^{\circ}C$ , κάτι που επιτρέπει την λειτουργία τους χωρίς ψύξη.
- Ο σχετικά απλός σχηματισμός ομοιογενών συστοιχιών από μονοδιάστατα ή δισδιάστατα laser (όπως φαίνεται στο σχήμα 3.1) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην μετάδοση δεδομένων συστημάτων διαίρεσης χώρου.
- Πλήρης έλεγχος και επιλογή των κατάλληλων συσκευών για κάθε επίπεδο, κάτι που **μειώνει σημαντικά το κόστος** σε σχέση με τα laser εκπομπής ακμής (edge-emitting laser).
- Η χρήση της τεχνολογίας παραγωγής και συσκευασίας που είναι ήδη πολύ γνωστή



από την παραγωγή των LEDs (light-emitting diode)

- Η υψηλή αξιοπιστία τους αφού η **διάρκεια ζωής** τους είναι της τάξεως των 10 εκατομμυρίων ωρών σε θερμοκρασία δωματίου. [13]



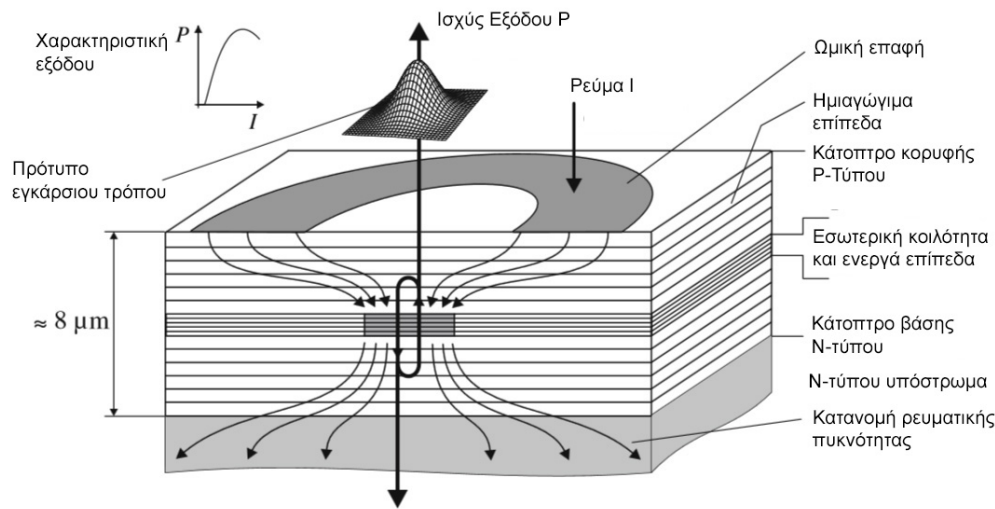
**Σχήμα 3.1:** Μια δισδιάστατη συστοιχία από VCSELs [12]

## 3.2 Η δομή των VCSELs και των παραμέτρων τους

Σε αυτό το κομμάτι της εργασίας θα δούμε τις βασικές ιδιότητες των VCSELs, τον τρόπο που λειτουργούν τα κάτοπτρα Bragg που χρησιμοποιούνται ως τα ανακλαστικά κάτοπτρα (mirrors) σε αυτού του είδους laser, αλλά και τις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν την λειτουργία τους όπως είναι το ρεύμα κατωφλίου, η πόλωση, το μήκος κύματος, η διαμόρφωση, η ισχύς εξόδου και ο συντελεστής απόδοσης. [14]

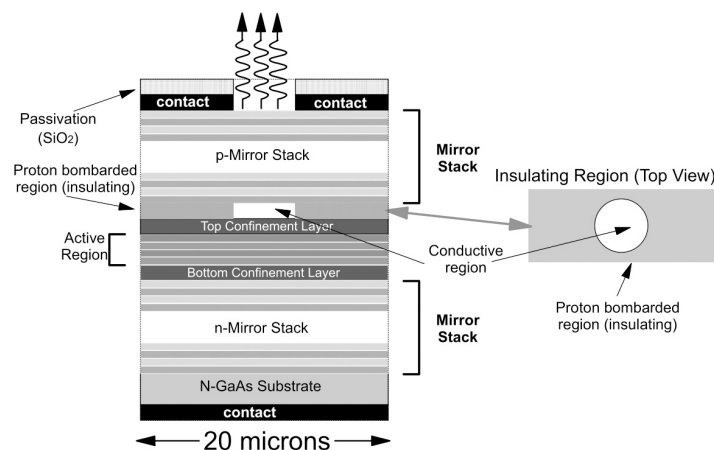
### 3.2.1 Τα είδη των VCSELs και Γενικές Ιδιότητες

Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται ένα τυπικό VCSEL. Η εσωτερική κοιλότητα (inner cavity), που περιέχει όλα τα ενεργά στοιχεία ενίσχυσης, περιβάλλεται από μια στοίβα πολλών λεπτών ηλεκτρικά ημιαγωγικών επιπέδων πάνω από ένα υπόστρωμα. Η ενεργός περιοχή (active region) των VCSELs σχηματίζεται από μερικά (συνήθως 3 [18]) κβαντικά πηγάδια (QWs - Quantum wells) λεπτότητας  $7 - 10\text{nm}$ , τα οποία περιβάλλονται από δύο κάτοπτρα Bragg μεγάλης ανακλαστικότητας ( $> 99.5\%$ ) τοποθετημένα επιταξιακώς στις πλευρές της ενεργού περιοχής σχηματίζοντας έτσι μια μικροκοιλότητα high-Q. Καθένα από αυτά τα κάτοπτρα είναι φτιαγμένο από αρκετά ζεύγη επιπέδων  $GaAs$  και  $AlAs$  με υψηλό και χαμηλό δείκτη διάθλασης [7] και λεπτότητας  $\lambda/4$  (όπου  $\lambda$  το μήκος κύματος εκπομπής του VCSEL). [15] Τα VCSELs που είναι σχεδιασμένα να εκπέμπουν σε μήκος κύματος στα  $850 - 980\text{nm}$  απαιτούν περίπου  $8\mu\text{m}$  επιταξιακού υλικού. [13] Πολλά από τα VCSELs που κυκλοφορούν στην αγορά βασίζονται στην εναλλαγή των υλικών  $GaAs/AlGaAs$  και εκπέμπουν στην περιοχή των  $850\text{nm} \pm 100\text{nm}$ . Επίσης τα VCSELs που είναι φτιαγμένα από  $GaInNAs/InAlGaAsP$  εκπέμπουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος συμπεριλαμβανομένων και των μηκών  $1.3$  και  $1.55\mu\text{m}$  που χρησιμοποιούνται ευρέως στις οπτικές επικοινωνίες. [7]



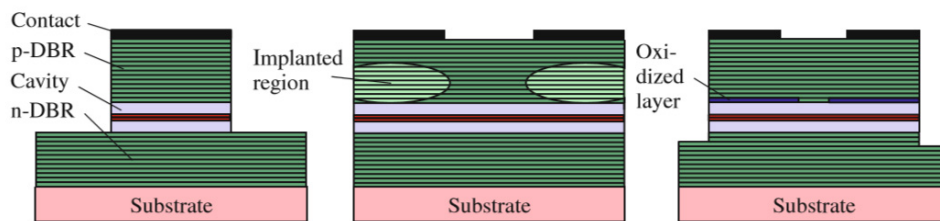
**Σχήμα 3.2:** Η σχηματική δομή και οι αρχές λειτουργίας των VCSELs

Στις πιο απλές διατάξεις, το ηλεκτρικό ρεύμα εγχέεται από τις ωμικές επαφές που βρίσκονται στην πάνω επιταξιακή πλευρά και την πίσω πλευρά του υποστρώματος (η κάτω επαφή παραλείπεται στο σχήμα 3.2). Μια ακολουθία PN προσμίξεων προτιμάται από μια NP λόγω της μικρότερης πυκνότητας ατελειών των υποστρωμάτων N-τύπου (που είναι ευεργετικές για την απόδοση της συσκευής και για την αξιοπιστία του laser) και των μειωμένων απωλειών απορρόφησης των κατόπτρων N-τύπου. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται ότι το ρεύμα κατά κάποιο περίεργο τρόπο περιορίζεται στο κέντρο της εσωτερικής κοιλότητας. [13]



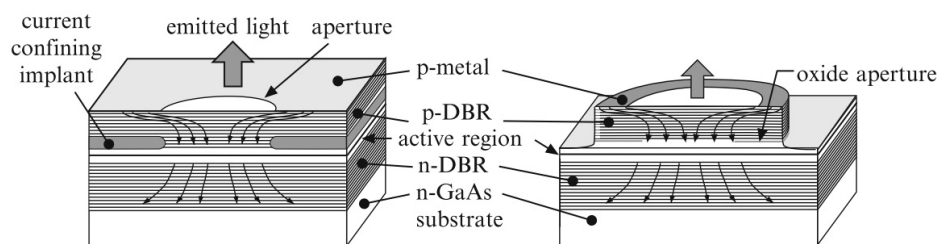
**Σχήμα 3.3:** Εναλλακτικό σχήμα για τη δομή VCSELs [8]

Έχουν αναπτυχθεί επιτυχώς αρκετές μέθοδοι ώστε να περιορίσουμε το ρεύμα σε μια καθορισμένη ενεργό περιοχή. Στο σχήμα 3.5 απεικονίζονται αριστερά η μέθοδος air-post, στη μέση η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων και στα δεξιά η μέθοδος επιλεκτικής οξείδωσης. Με την πρώτη μέθοδο εισάγονται απώλειες λόγω διασποράς στο οπτικό πεδίο, ενώ μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αξιοπιστίας σε περίπτωση που η ενεργός περιοχή εκτεθεί



**Σχήμα 3.4:** Τρεις μέθοδοι για τον περιορισμό του ρεύματος: αριστερά η μέθοδος *air-post*, στη μέση η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων και στα δεξιά η μέθοδος επιλεκτικής οξείδωσης

στον αέρα. Η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων ήταν η πρώτη που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή εμπορικών VCSELs εξαιρετικής παραγωγικότητας και αξιοπιστίας. Από την άλλη μεριά η μέθοδος επιλεκτικής οξείδωσης εισάγει αρκετά χαμηλότερες οπτικές απώλειες στην κοιλότητα και γι' αυτό έχει οδηγήσει σε μεγάλο άλμα την επίδοση των VCSELs. Σήμερα, η πλειοψηφία των VCSELs που κυκλοφορούν στην αγορά βασίζονται στην επιλεκτική οξείδωση.



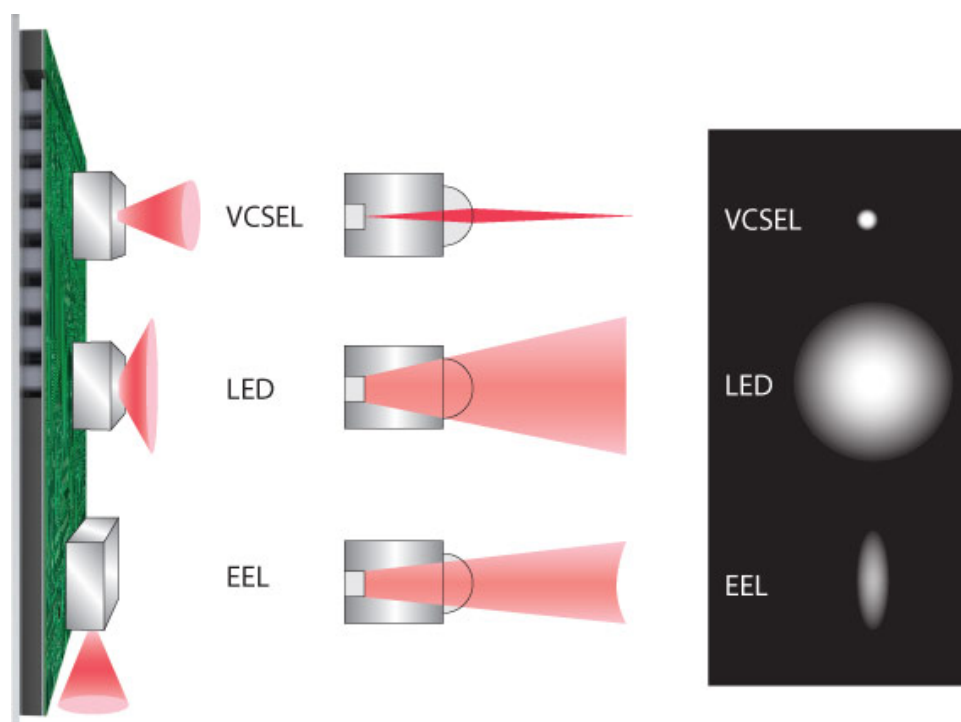
**Σχήμα 3.5:** (Αριστερά) VCSEL με βομβαρδισμό πρωτονίων, το οποίο έχει κέρδος μόνο στην "βομβαρδισμένη" περιοχή, (Δεξιά) VCSEL με επιλεκτική οξείδωση που έχει οπτική κυματοδηγηση ακόμα και στην εσωτερική στήλη [18]

Η ενεργός διάμετρος (active diameter) των VCSELs μπορεί να μειωθεί σε μερικά μικρόμετρα ( $\mu m$ ) όταν θέλουμε τα VCSELs να λειτουργήσουν με τον απλό εγκάρσιο τρόπο και ταυτόχρονα με το χαμηλότερο κατώφλι ρεύματος στα  $100 \mu A$ . Κατά γενικό κανόνα, επίπεδα VCSEL με επιλεκτική οξείδωση χωρίς όμως εκτενή κοιλότητα εκπέμπουν υπό απλό εγκάρσιο τρόπο με σχεδόν γκαουσιανή κατανομή όπως φαίνεται στο πάνω αριστερά μέρος του σχήματος 3.2, ενώ η ενεργός διάμετρός τους είναι περίπου  $4 \mu m$ .

Στο σχήμα 3.6 φαίνεται ο διαφορετικός τρόπος με τον οποίο λειτουργούν τα VCSELs σε σχέση με τα συμβατικά EELs και τις διόδους φωτοεκπομπής (LEDs). Επίσης στον Πίνακα 3.1 φαίνονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματά τους έναντι των άλλων.

VCSELs vs EELs	VCSELs vs LEDs
Χαμηλό κατώφλι ρεύματος	Μεγάλο εύρος ζώνης διαμόρφωσης
Υψηλή απόδοση σε χαμηλή ισχύ	Συγκεντρωμένη δέσμη εξόδου
Αργά αποκλινομένη κυκλική δέσμη	Στενό φάσμα
Wafer-level testing, χαμηλό κόστος	Χαμηλό ρεύμα λειτουργίας
Απλούστερη κατασκευή	Υψηλή ισχύς εξόδου
Δισδιάστατες συστοιχίες	Υψηλή απόδοση στην μετατροπή ισχύος

**Πίνακας 3.1:** Πλεονεκτήματα των VCSELs έναντι των EELs και των LEDs



**Σχήμα 3.6:** Τρόπος εκπομπής των VCSELs (πάνω), LEDs (μέση), EELs (κάτω). Στα αριστερά φαίνεται η φυσική διάταξη των συσκευών, στη μέση η μορφή της δέσμης που εκπέμπουν και στα δεξιά η τομή της δέσμης τους

### 3.2.2 Ανακλαστήρες Bragg (Bragg reflectors)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα μια πολύ σημαντική ιδιότητα της λειτουργίας των VCSELs είναι η πολύ μικρή οπτική τους περιοχή, η οποία προκειμένου να πετύχει την εκπομπή δέσμης laser απαιτεί κάτοπτρα πολύ υψηλής ανακλαστικότητας (>99%). Αυτό λοιπόν επιτυγχάνεται με την χρήση των **κατανεμημένων ανακλαστήρων Bragg (DBRs)** ο σχεδιασμός των οποίων σχετίζεται με την μέγιστη οπτική ανακλαστικότητα, τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, τον δείκτη διάθλασης του υλικού που χρησιμοποιείται και την οπτική απορρόφηση. Έτσι η ανάλυση των DBRs είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό των VCSELs επειδή η μεγάλη τους ανακλαστικότητα επηρεάζει όλες τις θεμελιώδεις ιδιότητες του laser.[16]

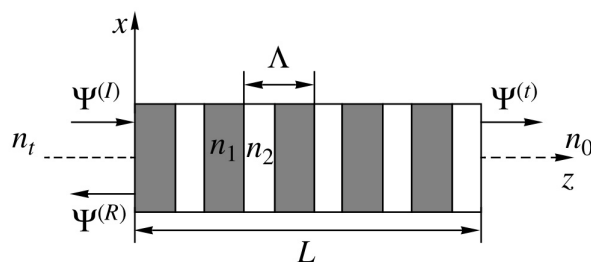
Τα κάτοπτρα που φαίνονται στο VCSEL του σχήματος 3.2 είναι ανακλαστικές Bragg (DBRs) και αποτελούνται από πολλά στρώματα με εναλλασσόμενους δείκτες διάθλασης, υψηλό και χαμηλό. Το πάχος αυτών των στρωμάτων είναι  $1/4$  του μήκους κύματος που εκπέμπει το VCSEL κάτι που προσδίδει στο laser εποικοδομητική παρεμβολή στο μήκος κύματος σχεδιασμού και έναν υψηλό συντελεστή ανάκλασης [17]. Εφόσον ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις τότε κάθε επιμέρους ανάκλαση που συμβαίνει, δρα επιπροσθέτως και άρα όσο προσθέτουμε επιπλέον κομμάτια Bragg, το μέγιστο της ανακλαστικότητας του κατόπτρου (mirror) συνεχίζει να αυξάνει. Λόγω της μικρής ενίσχυσης στα VCSELs, η μέση τιμή της ανακλαστικότητας (reflectivity) θα πρέπει να υπερβαίνει το  $\sim 97\%$ , ενώ για καθένα από τα δύο κάτοπτρα απαιτούνται τυπικά πάνω από 20 ημιαγώγιμα τέτοια ζεύγη στρωμάτων. Προκειμένου να υπολογιστεί σωστά ο αριθμός από τα επίπεδα που θα χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να επιτευχθεί το ανάλογο ποσοστό ανακλαστικότητας έχουν αναπτυχθεί κάποιες μέθοδοι, με πιο χαρακτηριστικές τη μέθοδο των πινάκων μεταφοράς (transfer matrix method) [13] και την μέθοδο συζευγμένων καταστάσεων (coupled mode theory) [16]. Κατά γενικό κανόνα, θα πρέπει ο DBR κορυφής να παρέχει ανακλαστικότητα μεταξύ  $99.0\% - 99.8\%$ , ενώ ο DBR της βάσης  $> 99.95\%$ [18]

Τα τρία πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν τα DBRs είναι:

- **Υψηλή ανακλαστικότητα**
- **Καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα**
- **Χαμηλή θερμική αντίσταση**

Τα VCSELs με βάση GaAs είναι από τις πιο συνηθισμένες πηγές μικρού μήκους κύματος, αφού εκπέμπουν στα  $850 - 980nm$ . Η ενεργός περιοχή των VCSELs από GaAs και από InGaAs είναι φτιαγμένες από GaAs/AlGaAs (ή AlAs) DBRs, ικανοποιώντας τις τρεις προϋποθέσεις και παρέχοντας ένα απλό κι αποδοτικό ρεύμα, μια κατάσταση απαλλαγμένη από το φαινόμενο της καταστροφικής οπτικής βλάβης (COD) [14] και τέλος ένα κατώφλι ρεύματος βελτιωμένο μέσω της επιλεκτικής οξείδωσης. Η επίτευξη υψηλής αποδοτικότητας και μεγάλου μήκους κύματος DBRs είναι ένας συνεχής στόχος. Σε αντίθεση με τα VCSELs με βάση GaAs που χρησιμοποιούν GaAs/AlGaAs DBRs, τα VCSEL με βάση InP, που λειτουργούν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά για τα κάτοπτρά τους. Αυτά τα υλικά για τα DBRs τοποθετούνται επιταξιακώς ενώ αποτελούν αντικείμενο έρευνας πολλών μελετών καθώς είναι πολύ πιθανό να προδώσουν πολύ μεγαλύτερα πλεονεκτήματα στα VCSELs μεγάλου μήκους κύματος. [17]

Κατά αναλογία με τον τρόπο που σχηματίζονται τα βασικά κάτοπτρα στα EELs Fabry-Perot, έτσι κι εδώ το πρώτο στρώμα του κατόπτρου κορυφής ή του κατόπτρου βάσης, σε σχέση πάντα με την εσωτερική κοιλότητα, θα πρέπει να είναι μικρότερου δείκτη διάθλασης από



Σχήμα 3.7: Σχήμα από ένα πεπερασμένου μήκους DBR [17]

αυτών των γειτονικών επιπέδων. Έτσι η απαίτηση να υπάρχει η ακολουθία των εναλλασσόμενων δεικτών διάθλασης οδηγεί σε έναν ακέραιο αριθμό από ζεύγη Bragg για το κάτοπτρο κορυφής ενός VCSEL βάσης AlGaAs, ενώ ένα μόνο στρώμα χαμηλού δείκτη διάθλασης και λεπτότητας ενός τετάρτου μήκους κύματος προσαρμοσμένο στο υπόστρωμα GaAs υψηλού δείκτη διάθλασης πρέπει να προστεθεί στο κάτοπτρο βάσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε ότι το κάτοπτρο κορυφής τερματίζεται σε ένα υλικό χαμηλού δείκτη διάθλασης όπως είναι ο αέρας. [13]

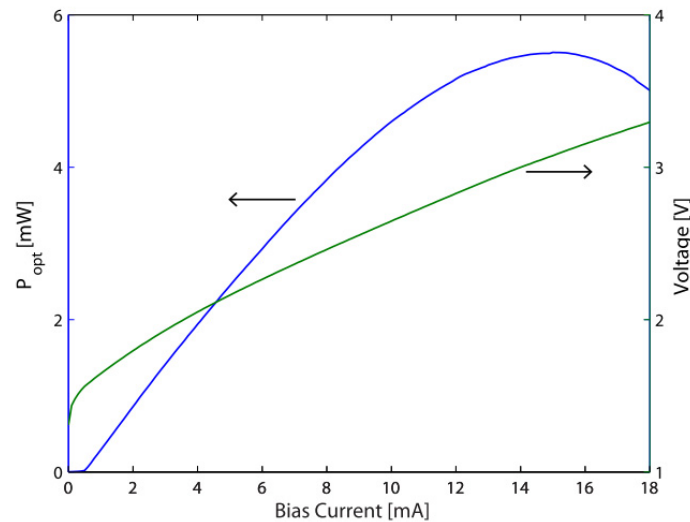
### 3.2.3 Θερμική συμπεριφορά

Τα VCSELs μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να είναι σχετικώς ανεξάρτητα από την θερμοκρασία δωματίου, πράγμα που όπως έχουμε ήδη αναφέρει αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματά τους. Παρουσιάζουν, ακόμη, ένα χαρακτηριστικό μέγιστο στην καμπύλη L-I και έχει αποδειχτεί ότι όταν λειτουργούν πάνω από αυτό το μέγιστο τότε φθείρονται πολύ πιο γρήγορα. Έτσι έχει βγει και ένας "άγραφος κανόνας" ο οποίος υπαγορεύει "ποτέ να μην λειτουργούν με μέση ισχύ μεγαλύτερη από το ένα τρίτο της μέγιστης ισχύος σε θερμοκρασία δωματίου" για VCSELs στα 1-4 Gbps (ή πάνω από το μισό της μέγιστης ισχύος για VCSELs των 10-17 Gbps). [18]

### 3.2.4 Ρεύμα κατωφλίου (Threshold Current)

Η βασική στατική ιδιότητα ενός οποιουδήποτε ημιαγωγικού laser (όπως και των VCSELs) είναι το πώς η οπτική ισχύς εξόδου  $P$  εξαρτάται από το ηλεκτρικό ρεύμα  $I$  που "οδηγεί" τη συσκευή. Στο σχήμα 3.8 απεικονίζεται η γραφική παράσταση της οπτικής ισχύος εξόδου του VCSEL σε συνάρτηση με το ρεύμα. Επίσης φαίνεται και η τάση συναρτηθεί του ίδιου ρεύματος. Παρατηρώντας καλύτερα το σχήμα 3.8 διαπιστώνουμε ότι η οπτική ισχύς εξόδου είναι πάρα πολύ μικρή για ρεύματα κάτω από το ρεύμα κατωφλίου, το οποίο εντοπίζεται στα 0.5 mA. Εν συνεχεία η ισχύς εξόδου αυξάνεται γρήγορα πάνω από το ρεύμα κατωφλίου. Η αύξηση είναι γραμμική για χαμηλές τιμές ρεύματος, ενώ σε ένα σημείο παρατηρείται κορεσμός

και αρχίζει να φθίνει όσο αυξάνεται το ρεύμα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας θερμικών φαινομένων που προκαλούνται με την αύξηση του ρεύματος καθώς έχουμε ταυτόχρονη αύξηση της θερμοκρασίας της συσκευής.



**Σχήμα 3.8:** Η οπτική ισχύς εξόδου και η τάση ως συνάρτηση του ρεύματος για ένα VCSEL [20]

Η γνώση της σχέσης μεταξύ της οπτικής ισχύος εξόδου και της τάσης της συσκευής ως συνάρτηση του ρεύματος μας δίνει τη δυνατότητα να μπορούμε να προβλέψουμε την αποδοτικότητα της ισχύος ενός laser, η οποία δίνεται από τη σχέση  $\eta = \frac{P}{I \cdot V}$ , όπου P είναι η οπτική ισχύς εξόδου, I το ρεύμα και V η τάση. Προφανώς όσο μεγαλύτερη είναι η αποδοτικότητα του laser, τόσο το καλύτερο αφού λιγότερη ενέργεια χάνεται με τη μορφή θερμότητας.

Τα VCSELs υψηλών ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση δεδομένων είναι συχνά συσκευές χαμηλής ισχύος, με μέγιστη ισχύ εξόδου που σπάνια ξεπερνά τα 10mW. Το κατώφλι ρεύματος είναι πολύ χαμηλό ενώ η χρήση τους είναι αρκετά αποδοτική, πράγμα πολύ σημαντικό από την άποψη της κατανάλωσης ισχύος. [20]

Οι φυσικές διαφορές μεταξύ των VCSELs και των συμβατικών laser φαίνονται στον πίνακα 3.2. Το στοιχείο που ξεχωρίζει είναι ότι το μήκος της κοιλότητας των VCSELs είναι της τάξης του μήκους κύματος και άρα είναι αρκετά μικρότερο από ότι στα συμβατικά laser με μήκος κύματος 300 $\mu$ m.

Το ρεύμα κατωφλίου  $I_{th}$  των VCSELs μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος κατωφλίου  $J_{th}$  από την εξής σχέση:

$$I_{th} = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 J_{th} = \frac{eV N_{th}}{\eta_i \tau_s} \cong \frac{eV B_{eff}}{\eta_i \eta_{spon}} N_{th}^2 \quad (3.1)$$

ενώ η πυκνότητα φορέων κατωφλίου (ηλεκτρόνια ή οπές) από τη σχέση:

$$N_{th} = N_t + \frac{\alpha_\alpha + \alpha_d + \alpha_m}{A_0 \xi} \quad (3.2)$$

όπου  $e$  είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $V$  ο όγκος της ενεργού περιοχής ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$V = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 d \quad (3.3)$$

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούμε στις εξισώσεις είναι οι εξής:

$\alpha_\alpha$	Συντελεστής απωλειών απορρόφησης κανονικοποιημένος στο μήκος
$\alpha_d$	Συντελεστής απωλειών περίθλασης κανονικοποιημένος στο μήκος
$\alpha_m$	Συντελεστής απωλειών καθρέφτη
$A_0$	Συντελεστής απολαβής που εκφράζει το διαφορικό κέρδος $A_0 = \frac{\partial g}{\partial N}$ όπου $g$ είναι η οπτική απολαβή ανά cm
$B_{eff}$	Συντελεστής ενεργού επανασύνδεσης
$d$	Συνολικό πάχος της ενεργής περιοχής
$D$	Διάμετρος ενεργού περιοχής
$L$	Ενεργό μήκος κοιλότητας μαζί με τα στρώματα διαχωρισμού και τα στρώματα των Bragg καθρεφτών
$N_t$	Πυκνότητα φορέων στην κατάσταση διαφάνειας
$\tau_p$	Χρόνος ζωής φωτονίου στην κοιλότητα
$\tau_s$	Χρόνος ζωής επανασύνδεσης
$\xi$	Παράγοντας παγίδευσης οπτικής ενέργειας, $\xi = \xi_t \xi_l$
$\xi_t$	Παράγοντας εγκάρσιας παγίδευσης
$\xi_l$	Παράγοντας διαμήκους παγίδευσης, που υπολογίζεται από $\xi_l = d/L$ (για σχετικά παχιά ενεργό στρώμα) και από $\xi_l = 2d/L$ (για λεπτό ενεργό στρώμα)
$n_i$	Συντελεστής απόδοσης έγχυσης
$n_{spont}$	Συντελεστής απόδοσης αυθόρμητης εκπομπής

Από τη σχέση 3.1 φαίνεται ότι αν θέλουμε να μειωθεί η τιμή του ρεύματος κατωφλίου τότε θα πρέπει να μειωθεί με κάποιο τρόπο ο όγκος της ενεργού περιοχής. Θεωρούμε πως η πυκνότητα των φορέων κατωφλίου δεν αλλάζει σημαντικά. Αν μειώσουμε τον ενεργό όγκο τότε μπορούμε να μειώσουμε και το κατώφλι αφού τελικά καταφέρνουμε να μικρύνουμε την ενεργό περιοχή. Συγκρίνοντας τις διαστάσεις των laser επιφανειακής εκπομπής και των κλασικών laser από τον πίνακα 3.2, παρατηρούμε ότι ο όγκος των VCSELs μπορεί να είναι  $V = 0.07 \mu m^3$ , ενώ στα κλασικά laser παραμένει  $V = 60 \mu m^3$ . Αυτό αμέσως φανερώνει και



το τι συμβαίνει με το ρεύμα κατωφλίου: στα κλασικά laser το ρεύμα κατωφλίου κυμαίνεται από μικροαμπέρ ( $\mu A$ ) και πάνω, ενώ για τα VCSELs οι τιμές του είναι μικρότερες από 1 μικροαμπέρ ( $1\mu A$ ) όταν χρησιμοποιούνται εξειδικευμένες μέθοδοι περιορισμού όπως είναι ο "βομβαρδισμός με πρωτόνια" όπως έχουμε αναφέρει σε προηγούμενη ενότητα. [19]

Παράμετρος	Σύμβολο	Κλασικά ημιαγωγικά laser	Laser επιφανειακής εκπομπής
Πάχος ενεργού στρώματος	$d$	$100\text{\AA} - 0.1\mu m$	$80\text{\AA} - 0.5\mu m$
Εμβαδόν ενεργού περιοχής	$S$	$3 \times 300\mu m^2$	$5 \times 5\mu m^2$
Ενεργός όγκος	$V$	$60\mu m^3$	$0.07\mu m^3$
Μήκος κοιλοτήτας	$L$	$300\mu m$	$\approx 1\mu m$
Ανακλαστικότητα	$R_m$	0.3	0.99 - 0.999
Οπτική παγίδευση	$\xi$	$\approx 3\%$	$\approx 4\%$
Εγκάρσια παγίδευση	$\xi_t$	3 - 5%	50 - 80%
Διαμήκης παγίδευση	$\xi_l$	50%	$2 \times 1\% \times 3(3QW's)$
Χρόνος ζωής φωτονίου	$\tau_p$	$\approx 1ps$	$\approx 1ps$
Συχνότητα χαλάρωσης	$f_r$	$< 5GHz$	$> 10GHz$

**Πίνακας 3.2:** Σύγκριση τιμών χαρακτηριστικών παραμέτρων των κλασικών ημιαγωγικών laser και των επιφανειακής εκπομπής [19]

### 3.3 Ολοκληρωμένη Φωτοδίοδος (Intergrated Photodiode)

Η ολοκληρωμένη φωτοδίοδος είναι το βασικό στοιχείο και το πρώτο επίπεδο ενός ολοκληρωμένου οπτικού δέκτη (intergrated optical receiver). Βασικές ιδιότητες της είναι η **αποδοτικότητα κβαντισμού** (Quantum efficiency), η **ταχύτητα**, η **χωρητικότητα** (capacitance) και το **ρεύμα διαρροής** (leakage current). Η αποδοτικότητα κβαντισμού και η ταχύτητα καθορίζονται από τον **συντελεστή απορρόφησης**  $\alpha$ . Η χωρητικότητα  $c_{PD}$ , η απόκριση (responsivity)  $R$  και ο θόρυβος (και ο θόρυβος των προενισχυτών που ακολουθούν) επηρεάζουν τη συνολική ευαισθησία ενός οπτικού δέκτη. [35].

Αυτό που επί της ουσίας κάνει η φωτοδίοδος είναι **να μετατρέπει την οπτική ισχύ σε ηλεκτρικό ρεύμα**. Είναι ικανή να μετατρέπει τα φωτόνια σε ζεύγη φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια-οπές) με μέγιστη απόδοση και να τα μεταφέρει ταχύτατα στα ηλεκτρόδια. Προκειμένου η φωτοδίοδος να φτάσει στο υψηλότερο δυνατό επίπεδο ευαισθησίας θα πρέπει η χωρητικότητά της να είναι όσο το δυνατό χαμηλότερη έτσι ώστε να διατηρούνται χαμηλές οι υψηλές απώλειες συχνότητας του φωτορεύματος (photocurrent). Αυτές οι απαιτήσεις όμως είναι μερικώς αντικρουόμενες. Έτσι θα πρέπει να γίνει ένας "έντιμος συμβιβασμός" τους, ιδίως λόγω της εξάρτησης του μήκους κύματος από το βάθος διείσδυσης.[34]

### 3.3.1 Οπτική απορρόφηση - Συντελεστής απορρόφησης

Το φως ταξιδεύει με ταχύτητα  $c$  σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$ ,

$$c = \frac{c_0}{n} \quad (3.4)$$

όπου  $c_0$  είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματός τους στο κενό  $\lambda_0$ , το οποίο είναι ανεξάρτητο από το μέσο διάδοσης και υπολογίζεται συναρτήσει της συχνότητας  $f$  από τη σχέση:

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f} \quad (3.5)$$

Κάθε μεμονωμένο φωτόνιο έχει τη δική του **ενέργεια**  $E$ :

$$E = hf = \frac{hc_0}{\lambda_0} \quad (3.6)$$

Όταν η ενέργεια του φωτονίου  $E$  είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα (π.χ. για το πυρίτιο έχουμε  $E_g = 1.1eV$ ), τότε τα φωτόνια παράγουν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Για το πυρίτιο το κρίσιμο μήκος κύματος είναι  $\lambda_c = 1.1\mu m$ , πάνω από αυτήν την τιμή το πυρίτιο είναι διαπερατό και δεν υπάρχει απορρόφηση. Έτσι οι φωτοдиодοι πυριτίου είναι χρήσιμες για μήκη κύματος που ξεκινούν κοντά στην υπέρυθη ακτινοβολία και φτάνουν έως την υπεριώδη ακτινοβολία.

Ένα μέρος της προσπίπτουσας στην φωτοδιόδο οπτικής ισχύος ( $P_{OPT}$ ) ανακλάται από την επιφάνεια. Η **οπτική ισχύς**  $P_0$  ακριβώς από κάτω από την επιφάνεια στον ημιαγωγό μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει του συντελεστή ανάκλασης  $R_{OPT}$  ως εξής: [34].

$$P_0 = (1 - R_{OPT})P_{OPT} \quad (3.7)$$

Ο **συντελεστής ανάκλασης**  $R_{OPT}$  (σχέση 3.8) εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης  $n$  (για τον αέρα ισχύει  $n = 1$ ) και από τον συντελεστή απόσβεσης  $\kappa$  ενός απορροφητικού μέσου και ισχύει η σχέση:

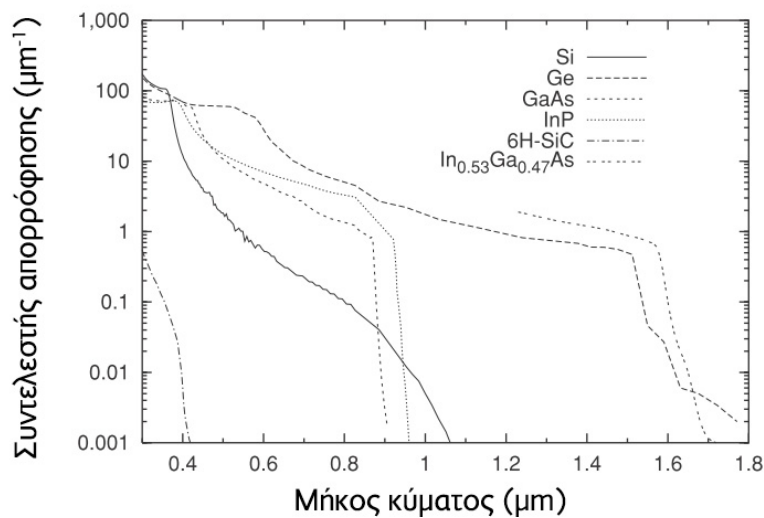
$$R_{OPT} = \frac{(1 - n)^2 + \kappa^2}{(1 + n)^2 + \kappa^2} \quad (3.8)$$

Ο συντελεστής απόσβεσης  $\kappa$  είναι αρκετός για την περιγραφή της απορρόφησης. Ο **συντε-**

λεστής απορρόφησης  $\alpha$  δίνεται από τη σχέση 3.9:

$$\alpha = \frac{4\pi\kappa^2}{\lambda_0} \quad (3.9)$$

Ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$  διαφόρων σημαντικών υλικών συναρτήσει του μήκους κύ-



**Σχήμα 3.9:** Ο συντελεστής απορρόφησης  $\alpha$  διαφόρων σημαντικών υλικών συναρτήσει του μήκους κύματος

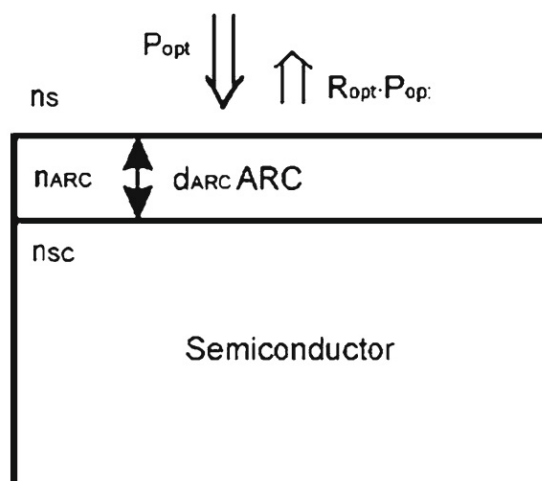
ματος φαίνεται στο σχήμα 3.9. Τα υλικά *Ge*, *GaAs*, *InP* και *InGaAs* παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο συντελεστή απορρόφησης και γι' αυτό είναι χρήσιμα για την κατασκευή φωτοδιόδων. Πιο συγκεκριμένα τα πιο κατάλληλα για οπτικούς δέκτες με μήκος κύματος στα  $1.3\mu\text{m}$  είναι τα *Ge* και *InGaAs*. [35].

Ο συντελεστής ανάκλασης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με μια αντανάκλαστική επίστρωση (anti-reflection coating -ARC) στην επιφάνεια του ημιαγωγού για συγκεκριμένα μήκη κύματος ή για μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Στο σχήμα 3.10 φαίνονται η δομή της αντανάκλαστικής επίστρωσης και η κατανομή της οπτικής ισχύος κάτω από την επιφάνεια του ημιαγωγού. Οι βέλτιστες τιμές για την λεπτότητα του ARC  $d_{ARC}$  και ο συντελεστής διάθλασης  $n_{ARC}$  υπολογίζονται από τις σχέσεις 3.10 και 3.11 όπου  $n_S$  είναι ο συντελεστής ανάκλασης του περιβάλλοντος και  $n_{SC}$  ο συντελεστής ανάκλασης του ημιαγωγού. Κατάλληλα υλικά για την επίστρωση ARC είναι τα  $\text{SiO}_2$  ( $n_{ARC} = 1.45$ ) και  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ( $n_{ARC} = 2.0$ ).

$$n_{ARC} = \sqrt{n_S n_{SC}} \quad (3.10)$$

$$d_{ARC} = \frac{\lambda_0}{4n_{ARC}} \quad (3.11)$$

Τα προσπίπτοντα φωτόνια με μήκη κύματος μικρότερα από το κρίσιμο μήκος κύματος  $\lambda_c$



**Σχήμα 3.10:** Αντανάκλαση στην επιφάνεια ημιαγωγού με αντιανακλαστική επίστρωση

έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να μεταφέρουν ένα ηλεκτρόνιο στην ζώνη σθένους. Αυτή η διαδικασία απορροφά το φωτόνιο και έτσι δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Ο συντελεστής οπτικής απορρόφησης  $\alpha$  καθορίζει το βάθος διείσδυσης  $\frac{1}{\alpha}$  του φωτός μέσα στον ημιαγωγό σύμφωνα με τον Νόμο του Lambert-Beer:

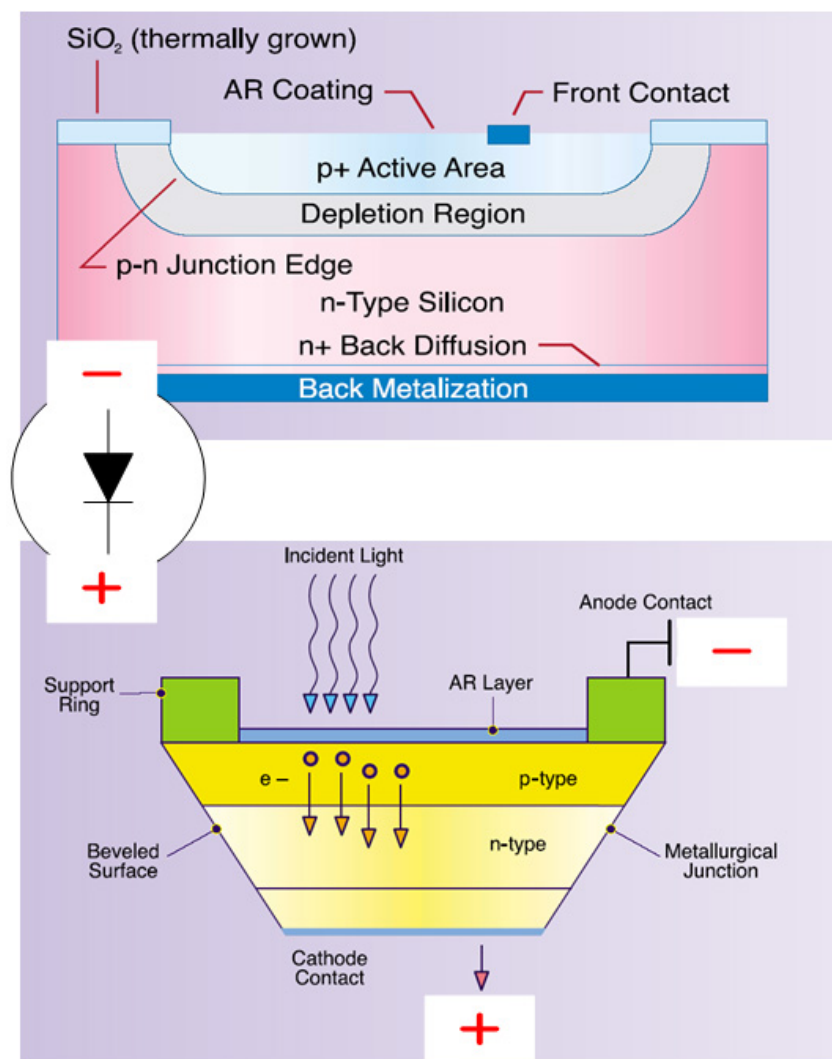
$$P(x) = P_0(x)e^{-\alpha x} \quad (3.12)$$

Το βάθος διείσδυσης  $\frac{1}{\alpha}$  για μήκος κύματος  $650nm$  είναι  $3.3\mu m$  και το σχετικό μήκος απορροφούμενης ισχύος για το 90 % της συνολικής ισχύος είναι  $d_{90\%} = 7.6\mu m$ . [34]

### 3.3.2 Βασική λειτουργία μιας p-i-n (PIN) φωτοδιόδου

Η βασική λειτουργία μιας PIN φωτοδιόδου μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά από τα παρακάτω βήματα και φαίνεται στο σχήμα 3.11:

- Το φως προσπίπτει στην περιοχή "p"
- Τα φωτόνια απορροφώνται στην περιοχή "i" (intrinsic)
- Δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων (e) και οπών (holes)
- Εφαρμόζεται ανάστροφη τάση στα άκρα της διόδου
- Παράγεται Φωτορεύμα (Photocurrent)
- Το φωτορεύμα συλλέγεται σε ηλεκτρόδια πριν τα ηλεκτρόνια επανασυνδεθούν με τις οπές



**Σχήμα 3.11:** Αναλυτική δομή μιας φωτοδιόδου PIN (*p-layer, intrinsic layer, n-layer*) και η βασική λειτουργία μιας PIN φωτοδιόδου

### 3.3.3 Αποδοτικότητα κβαντισμού (Quantum Efficiency)

Η **αποδοτικότητα κβαντισμού**  $\eta$  μιας φωτοδιόδου αφορά στη μετατροπή φωτονίων σε ηλεκτρόνια ( $e$  ή  $q$ ) και δίνει το ποσοστό (%) των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών για ένα προσπίπτον φωτόνιο, το οποίο μεταφέρεται στα ηλεκτρόδια.

Η αποδοτικότητα κβαντισμού, όπως δείχνει και η σχέση 3.13 μπορεί να διαχωριστεί σε δυο επιμέρους: την οπτική αποδοτικότητα κβαντισμού  $\eta_0$  (σχέση 3.14) και την εσωτερική αποδοτικότητα κβαντισμού  $\eta_i$ :

$$\eta = \eta_i \eta_0 \quad (3.13)$$

$$\eta_0 = (1 - R_{OPT}) \quad (3.14)$$

Η οπτική αποδοτικότητα κβαντισμού ( $\eta_0$ ) αφορά την μερική ανάκλαση της οπτικής ισχύος

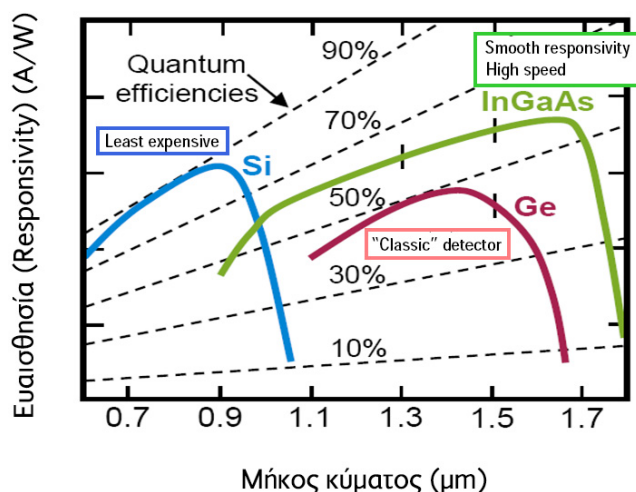
στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Με την κατάλληλη χρήση επιστρώσεων ARC στην επιφάνεια της φωτοδιόδου είναι δυνατό να μεγιστοποιηθεί για κάποια μήκη κύματος. Από την άλλη μεριά η εσωτερική αποδοτικότητα κβαντισμού  $\eta_i$  καθορίζει πόσο αποδοτικά μετατρέπεται η οπτική ισχύς σε ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, που έχει άμεση σχέση με το παραγόμενο φωτορεύμα. Επίσης η  $\eta_i$  παρουσιάζει μια συμπεριφορά εξαρτώμενη από τη συχνότητα, αφού εμπλέκονται δύο φαινόμενα μεταφοράς: η ολίσθηση φορέων (carried drift) και η διάχυση φορέων (carrier diffusion).[34, 35] Η ανάλυση αυτών των δύο φαινομένων ξεπερνά τα όρια της παρούσας εργασίας.

### 3.3.4 Οπτική απόκριση φωτοδιόδου (Responsivity)

Το αντίστροφο κλάσμα της οπτικής ισχύος  $P_{OPT}$  προς το φωτορεύμα  $I_{PH}$  ορίζεται ως **οπτική απόκριση της φωτοδιόδου (Responsivity)**  $R$  και υπολογίζεται από την σχέση:

$$R = \frac{I_{PH}}{P_{OPT}} = \frac{q\lambda_0\eta}{hc_0} = \frac{\lambda_0\eta}{1.243} (AW^{-1}) \quad (3.15)$$

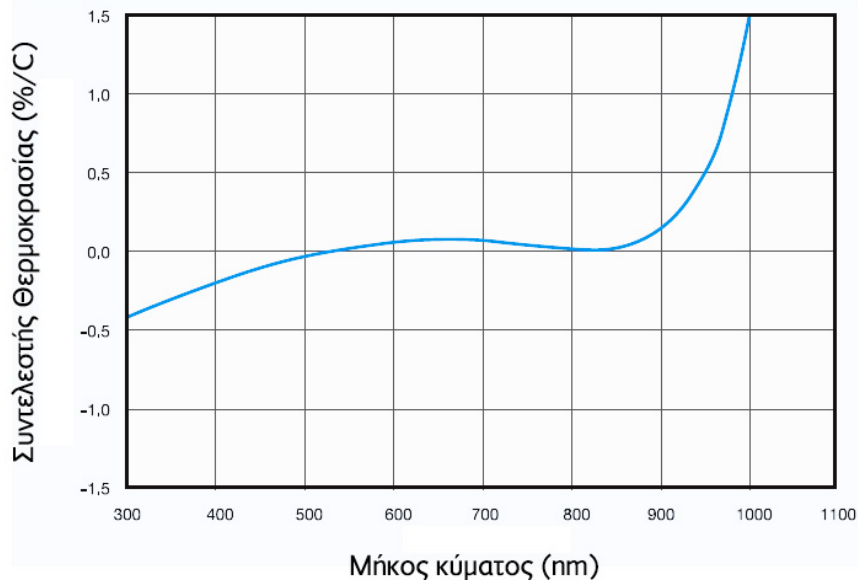
όπου το  $\lambda_0$  είναι σε  $\mu m$ ,  $h = 6.63 \cdot 10^{-34} (J \cdot s)$  η σταθερά του Plank,  $c_0 = 3 \cdot 10^8 (m/s)$  η ταχύτητα του φωτός στο κενό και  $q = 1.6 \cdot 10^{-19} (Cb)$  η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου.



**Σχήμα 3.12:** Μεταβολή της απόκρισης με το μήκος κύματος  $\lambda$

Η απόκριση της φωτοδιόδου είναι μια πολύ σημαντική σύνδεση μεταξύ της οπτικής ισχύος και του ρεύματος. Το να μπορούμε να υπολογίσουμε την οπτική απόκριση (ελάχιστη οπτική ισχύ για μετάδοση δεδομένων για συγκεκριμένο λόγο bit-error) ενός δέκτη (receiver) είναι απαραίτητο για ένα σύστημα. [34]

Στο σχήμα 3.12 φαίνεται η μεταβολή της απόκρισης με το μήκος κύματος  $\lambda$ , ενώ στο σχήμα 3.13 παρουσιάζεται η εξάρτηση (%) της οπτικής απόκρισης από την θερμοκρασία.



Σχήμα 3.13: Εξάρτηση (%) της οπτικής απόκρισης από την θερμοκρασία

### 3.4 Transimpedance Amplifier (TIA)

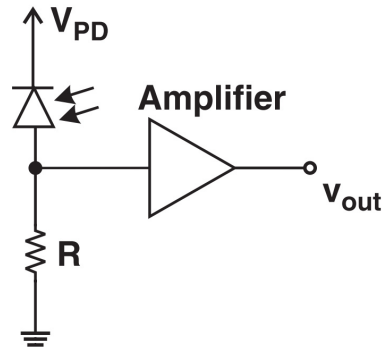
Οι φωτοδιόδοι δεν χρησιμοποιούν κάποιο είδος ενίσχυσης και γι' αυτό το λόγο η απόκρισή τους (ο λόγος εξερχόμενου ρεύματος προς την ένταση του εισερχόμενου φωτός) είναι για παράδειγμα  $\leq 0.5A/W$  για δίοδο πυριτίου σε μήκος κύματος στα  $650\mu m$ . Ως εκ τούτου σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της φωτοδιόδου με έναν ενισχυτή. Στους οπτικούς δέκτες είναι απαραίτητοι οι μετατροπείς του ρεύματος σε τάση έτσι ώστε να μετατρέπεται το φωτορεύμα που λαμβάνεται από τη φωτοδίοδο σε τάση εξόδου η οποία είναι αναλογική του ρεύματος εισόδου.

Το πιο κατάλληλο είδος προενισχυτή για τους οπτικοηλεκτρονικούς δέκτες (optoelectronic receivers) είναι ο **Transimpedance Amplifier (TIA)**. Οι περισσότερες εφαρμογές οπτικών δεκτών χρειάζονται υψηλό και ταυτόχρονα μεταβλητό κέρδος, μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλά επίπεδα θορύβου και μικρή αντίσταση εισόδου. [34]

#### 3.4.1 Προενισχυτές

Ο προενισχυτής χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει μετατροπή του εισερχόμενου φωτορεύματος σε τάση εξόδου, η οποία εν συνεχεία ενισχύεται από τα επόμενα στάδια. Ο πιο

απλός τρόπος να γίνει η μετατροπή είναι μια αντίσταση (resistor) μεταξύ της εξόδου της φωτοδιόδου και της τάσης τροφοδοσίας (supply voltage) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Η πιο απλή δομή ενός προενισχυτή

Ο προενισχυτής είναι ένα από τα καθοριστικά μέρη σχετικά με την ευαισθησία και το εύρος ζώνης ενός οπτικού δέκτη. Η ευαισθησία του δέκτη εξαρτάται κυρίως από την απόκριση της φωτοδιόδου και από τον θόρυβο του ρεύματος εισόδου του κυκλώματος. Επειδή το ρεύμα εξόδου της φωτοδιόδου είναι το μικρότερο σήμα του κυκλώματος, είναι και το πιο επιρρεπές στο θόρυβο. Ο σηματοθρομβικός λόγος (signal-to-noise ratio) στον κόμβο εισόδου του προενισχυτή είναι μια πολύ κρίσιμη παράμετρος. Ως εκ τούτου, ο θόρυβος του προενισχυτή είναι κυρίαρχο μέρος του αναφερόμενου θορύβου του ρεύματος εισόδου. Ο θόρυβος της αντίστασης και του πρώτου σταδίου ενίσχυσης είναι και αυτοί καθοριστικοί παράγοντες.

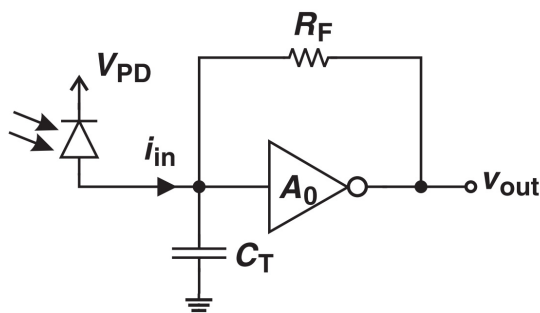
Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός προενισχυτή, επομένως, είναι το εύρος ζώνης και ο θόρυβος εισόδου στο κύκλωμα. Για τον απλό δέκτη του σχήματος 3.14 το εύρος ζώνης σχετίζεται έμμεσα με την χωρητικότητα του κόμβου εισόδου και της αντίστασης  $R$ . Εν προκειμένω στη χωρητικότητα του κόμβου εισόδου συνυπολογίζεται η χωρητικότητα της φωτοδιόδου και η χωρητικότητα του κυρίως ενισχυτή. Για να επιτευχθεί υψηλό εύρος ζώνης θα πρέπει η αντίσταση  $R$  να είναι μικρή, το ίδιο και η χωρητικότητα του κόμβου εισόδου.

### 3.4.2 Transimpedance Amplifier (TIA)

Ο **Transimpedance Amplifier (TIA)** είναι ένας προενισχυτής ο οποίος μπορεί να έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις. Το σχήμα 3.15 δείχνει το βασικό κύκλωμα ενός Transimpedance Amplifier (TIA) ως προενισχυτή.

Ο θόρυβος του ρεύματος εισόδου ενός TIA εξαρτάται και αυτός από τη χωρητικότητα του κόμβου εισόδου  $C_T$  και από την αντίσταση ανάδρασης  $R_F$ . Στο κύκλωμα του σχήματος 3.15 η χωρητικότητα  $C_T$ , αποτελείται από την χωρητικότητα της φωτοδιόδου και από την χωρητικότητα του TIA και είναι σχεδόν ίση με την χωρητικότητα εισόδου του πρώτου σταδίου ενίσχυσης. Το πλεονέκτημα του TIA σε σχέση με το απλό κύκλωμα ενίσχυσης (σχήμα 3.14) είναι το γεγονός ότι το εύρος ζώνης σχετίζεται έμμεσα με λόγο της αντίστασης  $R_F$  προς το





**Σχήμα 3.15:** Η βασική δομή ενός Transimpedance Amplifier (TIA)

κέρδος ανοιχτού βρόχου  $A_0$  του TIA:  $\frac{R_F}{A_0}$ . Έτσι, ο θόρυβος μπορεί να μειωθεί για ένα δοθέν εύρος ζώνης, εξαιτίας της μεγάλης αντίστασης  $R_F$ .

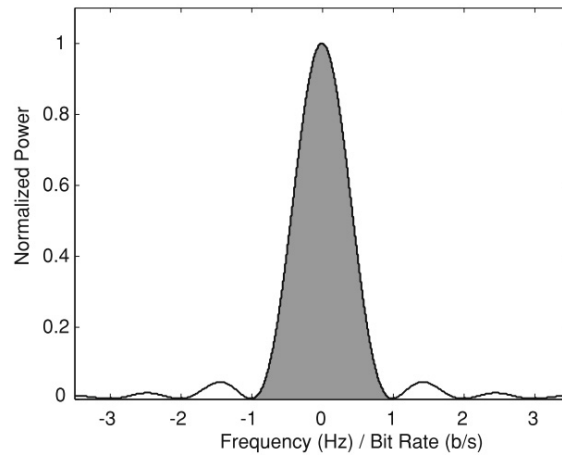
Όσο μικρότερη είναι η τιμή της  $C_T$  και μεγαλύτερη η αντίσταση  $R_F$ , τόσο υψηλότερη είναι η ευαισθησία για συγκεκριμένη τιμή της απόκρισης  $R$ . Για υψηλό εύρος ζώνης είναι σημαντικό να έχουμε μικρή τιμή για τη  $C_T$  και μικρή τιμή για την αντίσταση  $R_F$ . Επειδή η  $C_T$  μεταβάλλεται κυρίως λόγω της χωρητικότητας της φωτοδιόδου, πρέπει να βρούμε μια καλή σχέση μεταξύ της ευαισθησίας και του εύρους ζώνης για την αντίσταση ανάδρασης. [35]

### 3.4.3 Βέλτιστο Εύρος Ζώνης για TIA [36]

Ακόμα μία παράμετρος-κλειδί που σχετίζεται με την ταχύτητα ενός δέκτη είναι η απαιτούμενη απόκριση συχνότητας, έτσι ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή επεξεργασία του σήματος. Η κύρια παράμετρος που μετράει αυτήν την επίδοση είναι το μικρό εύρος ζώνης σήματος. Πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο TIA είναι η κύρια πηγή θορύβου, αφού όλες οι επόμενες βαθμίδες ενίσχυσης θα ενισχύσουν τον θόρυβο που εισάγει ο TIA, και ότι ο θόρυβος της φωτοδιόδου συνήθως δεν επηρεάζει ιδιαίτερα όπως αναφέραμε και προηγουμένως.

Είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι μεταξύ δύο αντίθετων φαινομένων υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο για το εύρος ζώνης. Από τη μία, ένα πολύ μεγάλο εύρος ζώνης εισάγει περισσότερο θόρυβο στην έξοδο (για παράδειγμα, θόρυβος από αντιστάσεις που είναι δεν εξαρτάται από τη συχνότητα). Η συνεισφορά λοιπόν του λευκού θορύβου ή/και του θερμικού θορύβου περιορίζεται από το εύρος ζώνης και υποβαθμίζει την ευαισθησία του δέκτη. Από την άλλη, αν το εύρος ζώνης είναι πολύ μικρό, το εισερχόμενο σήμα φιλτράρεται τόσο πολύ που είναι αδύνατη η ανακατασκευή του ψηφιακού σήματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.16, το φάσμα συχνοτήτων του NRZ σήματος εμπεριέχεται κυρίως εντός του ρυθμού μετάδοσης (bit rate), έτσι το απαιτούμενο εύρος ζώνης θα πρέπει να έχει περίπου αυτήν την τιμή.

Ας υποθέσουμε ότι το φάσμα θορύβου της εισόδου κυριαρχείται κυρίως από λευκό θόρυβο, δηλαδή σταθερή κατανομή θορύβου πάνω στη συχνότητα, τότε εάν το εύρος ζώνης διπλα-



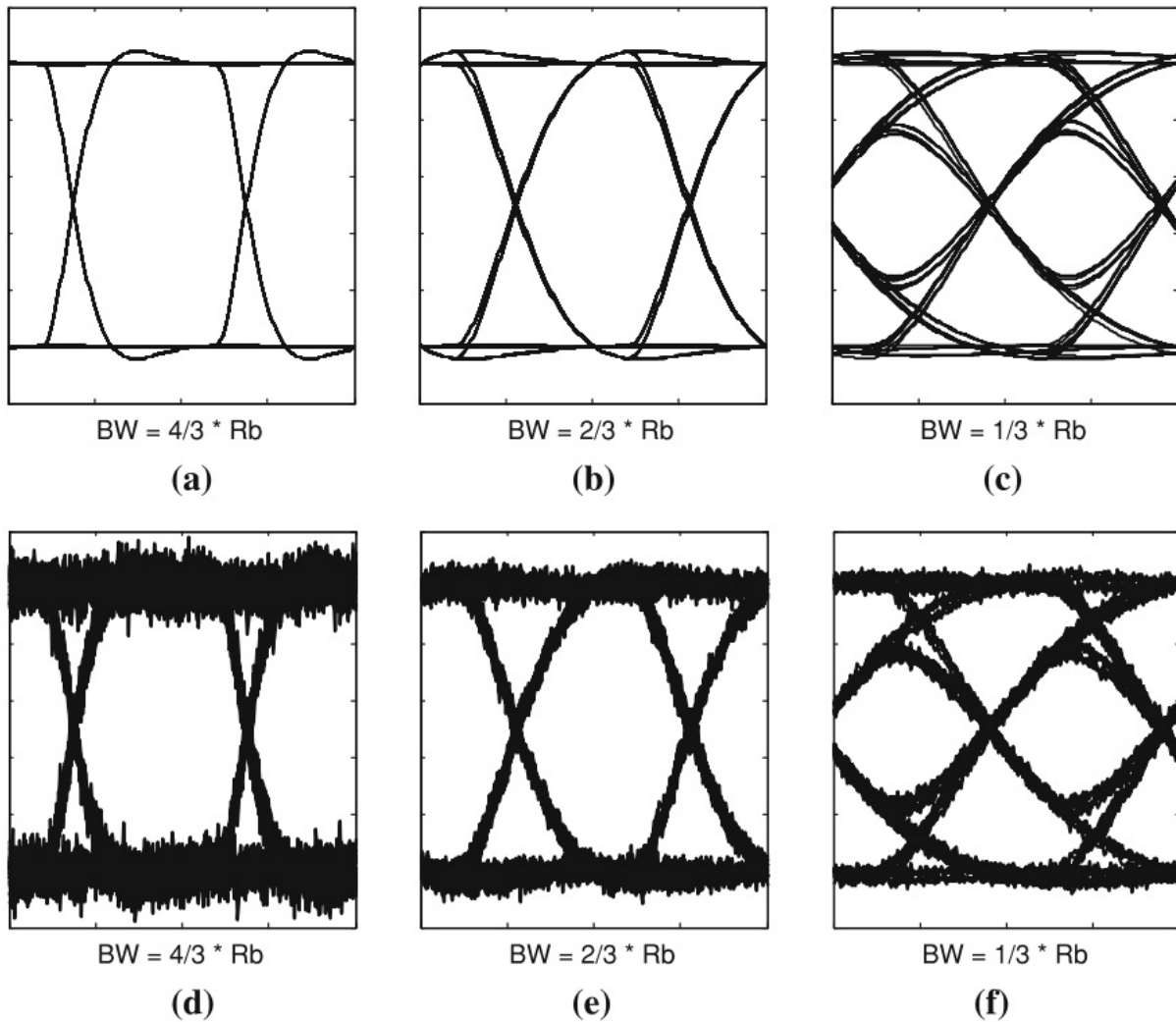
**Σχήμα 3.16:** Το φάσμα συχνοτήτων των παλμών NRZ. Η γκρι περιοχή αντιπροσωπεύει το 90% της συνολικής ισχύος που μεταδίδεται

σιαστεί ο συνολικός θόρυβος εξόδου αυξάνεται κατά έναν παράγοντα  $\sqrt{2}$ , καθώς το τετράγωνο του θορύβου εξόδου ολοκληρώνεται πάνω στη συχνότητα. Αυτό οδηγεί σε γραμμική εξάρτηση μεταξύ της ευαισθησίας και του εύρους ζώνης στην λογαριθμική κλίμακα με βήμα  $1.5dB$ , όπως φαίνεται στο σχήμα 3.18. Η διασυμβολική παρεμβολή (inter-symbol interference ISI) θα μπορούσε να προσθέσει μια ποινή ισχύος (power penalty PP). Το σχήμα 3.17c είναι φανερά το μόνο eye diagram που έχει επηρεαστεί από ISI, που εκτιμάται περίπου στο 50%, και που οδηγεί σε ποινή  $3dB$ . Στο σχήμα 3.18 φαίνεται επίσης η εξάρτηση μεταξύ της ευαισθησίας και του εύρους ζώνης συμπεριλαμβανομένου του λευκού θορύβου και της ποινής λόγω ISI.

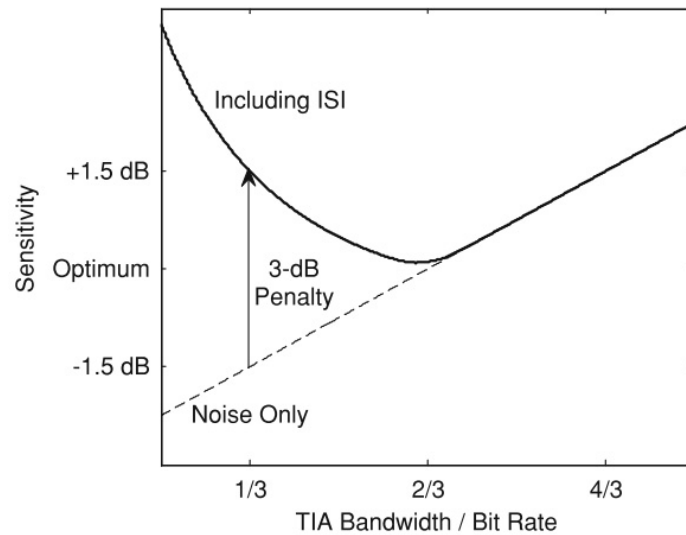
Παρόλα αυτά, στον θόρυβο εισόδου ενός τυπικού TIA δεν υπάρχει μόνο ο λευκός θόρυβος. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.19, υπάρχουν τρεις διαφορετικές ζώνες ανάλογα με το σχήμα του φάσματος ισχύος της κυρίαρχης κατανομής θορύβου. Στις χαμηλές συχνότητες, η κυρίαρχη κατανομή προέρχεται από τον θόρυβο flicker (flicker = αυτός που τρεμοπαίζει) με φάσμα ισχύος  $\frac{1}{f}$ . Στις υψηλές συχνότητες έχουμε κατανομή θορύβου με φάσμα ισχύος  $f^2$ . Μεταξύ των δύο προηγούμενων ζωνών ο κυρίαρχος θόρυβος είναι ο λευκός, που είναι ανεξάρτητος της συχνότητας.

Αν και το βέλτιστο εύρος ζώνης (υποθέτοντας λευκό θόρυβο και διασυμβολική παρεμβολή που προκαλείται από μία απόκριση Butterworth) παρουσιάζει μία βέλτιστη τιμή, στην πράξη, δεν περιορίζεται σε αυτή την θεωρητική τιμή αλλά συνήθως περιορίζεται μεταξύ:

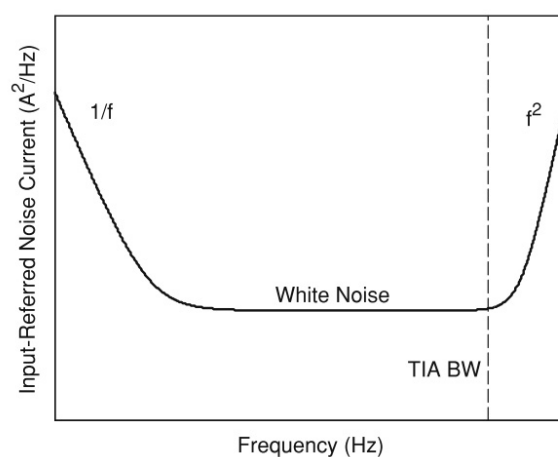
$$BW = [0.5, 0.7]R_b \quad (3.16)$$



**Σχήμα 3.17:** Eye diagrams χωρίς θόρυβο (a–c) και με θόρυβο (d–f) σε διαφορετικά κανονικοποιημένα εύρη ζώνης συνυπολογίζοντας την απόκριση της συχνότητας Butterworth και του λευκού θορύβου. Το e αντιπροσωπεύει την ρεαλιστικά βέλτιστη περίπτωση



**Σχήμα 3.18:** Η εξάρτηση της ευαισθησίας από το εύρος ζώνης συμπεριλαμβάνοντας τον λευκό θόρυβο και την ποινή ευαισθησίας εξαιτίας της ISI



**Σχήμα 3.19:** Ο θόρυβος εισόδου ενός TIA. (Σε λογαριθμική κλίμακα και οι δύο άξονες)

# Κεφάλαιο 4

## Πειραματική διαδικασία: Α' ΜΕΡΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε αναλυτικά και θα σχολιάσουμε το πρώτο μέρος των πειραματικών μετρήσεων της εργασίας που έγιναν στο εργαστήριο Φωτονικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Θα αναλύσουμε όλα τα επιμέρους στοιχεία των πειραματικών διαδικασιών ξεχωριστά, τον τρόπο βαθμονόμησης τους ενώ θα προσπαθήσουμε να βγάλουμε συμπεράσματα από την συμπεριφορά τους συνολικά.

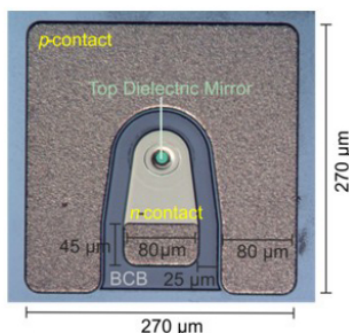
### 4.1 Πειραματικές Μετρήσεις σε VCSEL - LIV Μετρήσεις

#### 4.1.1 Εισαγωγικά

Η LIV (**light-current-voltage**) **καμπύλη** προκύπτει από την ταυτόχρονη μέτρηση της ισχύος εξόδου, του ρεύματος και της τάσης σε ένα laser. Μας δίνει μια πολύ καλή εικόνα της συμπεριφοράς του laser αφού από αυτή μπορούμε να εξάγουμε διάφορα συμπεράσματα:

- Για την **ηλεκτρική ισχύ** που καταναλώνει το laser συναρτήσει της οπτικής ισχύος εξόδου του
- Για τη **μέγιστη οπτική ισχύ εξόδου** που μπορούμε να πετύχουμε
- Για την **γραμμική περιοχή** του laser ούτως ώστε να τη λάβουμε υπόψη μας ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που μπορεί να χρησιμοποιήσουμε.
- Πόσο **σταθερό είναι το laser στις θερμικές μεταβολές** αν η μέτρηση μας επαναλαμβάνεται σε διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας.
- Τέλος από την καμπύλη LIV και με επανάληψη της μέτρησης για τις δυο διαφορετικές πολωτικές καταστάσεις, μπορούμε να εκτιμήσουμε το ρυθμό σβέσης (extinction ratio) μεταξύ των δυο καταστάσεων αυτών εκτιμώντας έτσι το κατά πόσο η λειτουργία του laser είναι single polarization ή όχι.

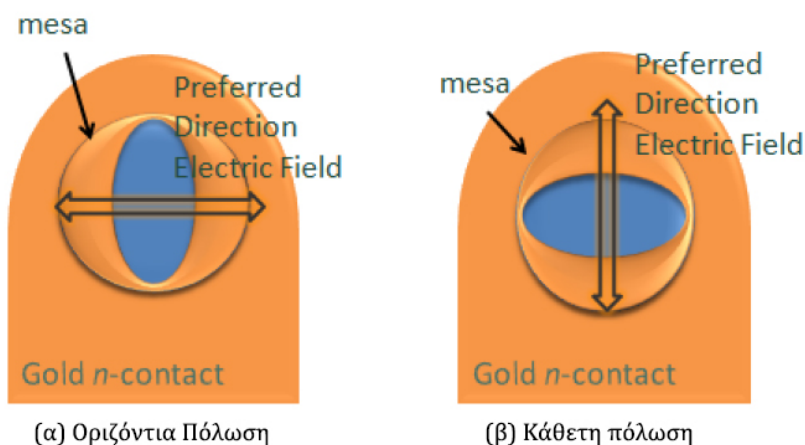
Με γνώμονα τα παραπάνω στοιχεία θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε τις χαρακτηριστικές μετρήσεις για τις διατάξεις των VCSELs που παρείχε στο Εργαστήριο Φωτονικής του ΕΜΠ το Πολυτεχνείο του Μονάχου TUM (Technische Universität München) στα πλαίσια του project MIRAGE. Στόχος είναι η αξιολόγηση της απόδοσης των προς μέτρηση VCSELs που διερευνάται σε σχέση με την ισχύ στην έξοδό τους συναρτήσει του διαχεόμενου ρεύματος διέγερσης για δύο άξονες πόλωσης αναφοράς.



**Σχήμα 4.1:** Το υπό μέτρηση VCSEL που χρησιμοποιήθηκε

Στο σχήμα 4.1 απεικονίζεται η φωτογραφία του VCSEL που είναι υπό μέτρηση. Το ολικό τσιπάκι του VCSEL έχει διαστάσεις  $0,27 \times 0,27 \text{ mm}^2$ . Επίσης στο ίδιο σχήμα απεικονίζονται και οι επαφές  $p-$  και  $n-$  του VCSEL.

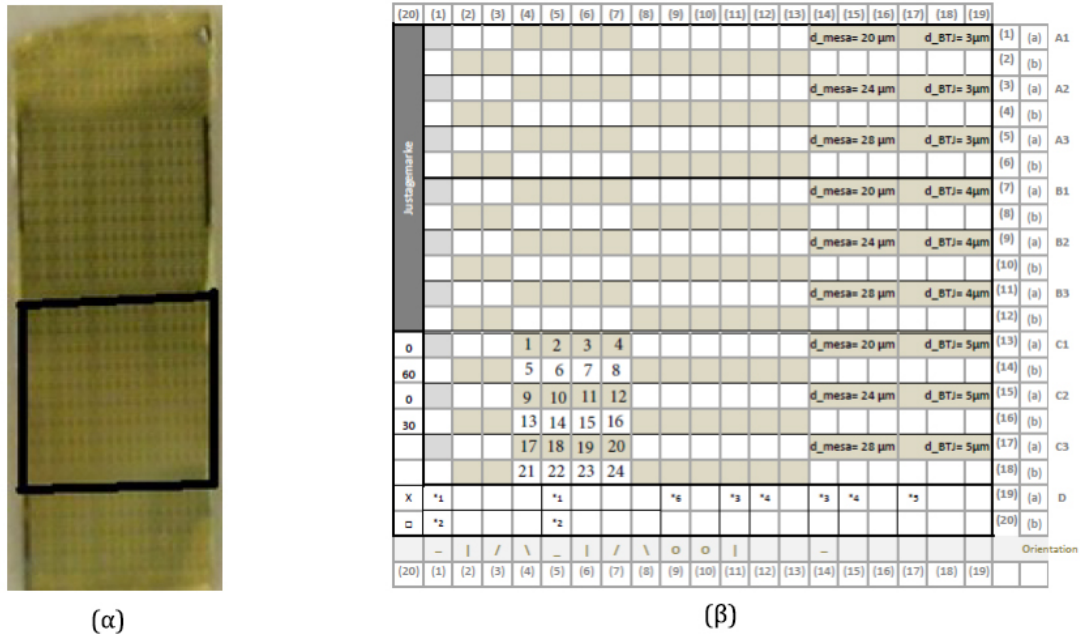
Όσον αφορά τον έλεγχο της πόλωσης σε συστοιχίες VCSEL, προκειμένου να γίνει διάκριση σε δύο άξονες πόλωσης αναφοράς χρησιμοποιήθηκε ένας πολωτής ελεύθερου χώρου της Newport. Αυτοί οι δύο άξονες πόλωσης αναφοράς απεικονίζονται στο σχήμα 4.2.



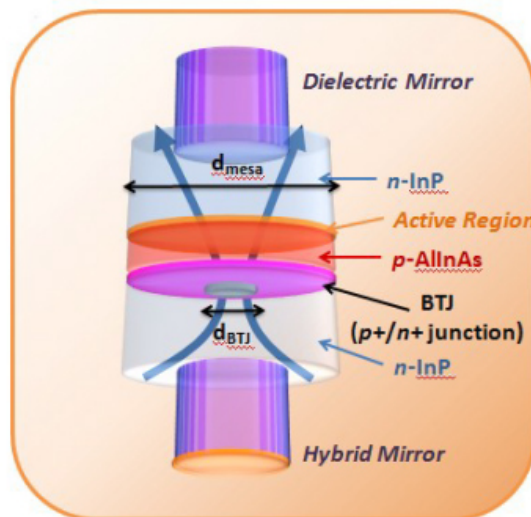
**Σχήμα 4.2:** Οι δύο άξονες της πόλωσης αναφοράς: (α) Οριζόντια Πόλωση, (β) Κάθετη Πόλωση

Στο σχήμα 4.3 (α) απεικονίζεται το wafer (επίπεδο κομμάτι από ημιαγωγικό υλικό πάνω στο οποίο τοποθετούνται τα δείγματα) με τα δείγματα που είναι υπό εξέταση ενώ επισημαίνεται η μονάδα (unit cell) που μετρήθηκε. Επίσης στο (β) απεικονίζεται ένας χάρτης μέτρησης του VCSEL που δείχνει τα VCSEL που έχουν δοκιμαστεί.

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.3(β) μετρήθηκαν όλα τα VCSEL τύπου C (C1, C2, C3) τα οποία έχουν BTJ  $5\mu m$  και κοιλότητα που ποικίλει από 20, 24 και  $28\mu m$ . Στο σχήμα 4.4 φαίνεται η σχεδιαστική δομή του VCSEL και οι διαστάσεις του BTJ και των κοιλοτήτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



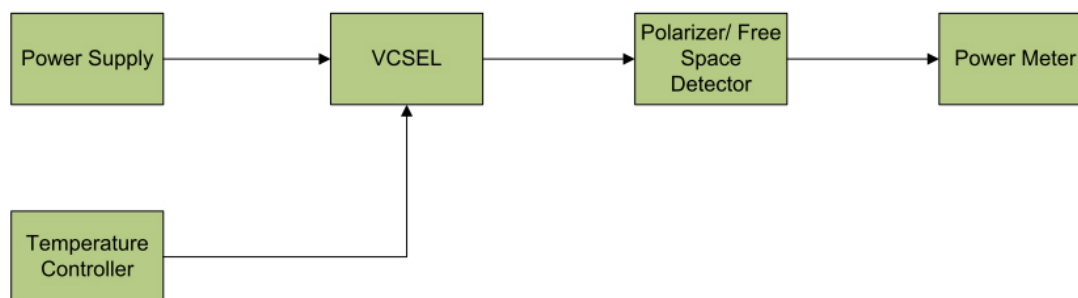
Σχήμα 4.3: (α) Το wafer που είναι υπό μέτρηση, (β) Ο χάρτης μέτρησης του VCSEL



Σχήμα 4.4: Ο σχεδιασμός του VCSEL

### 4.1.2 Μέτρηση των χαρακτηριστικών L-I-V καμπύλων

Στο σχήμα 4.5 απεικονίζεται η πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετρηθούν οι LIV καμπύλες των δειγμάτων 3QW VCSELs. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή η απόδοση των VCSELs εξετάζεται σε σχέση με την ισχύ στην έξοδό τους συναρτήσει του διαχεόμενου ρεύματος διέγερσης για δύο άξονες πόλωσης αναφοράς.



**Σχήμα 4.5:** Πειραματική διαδικασία για τη μέτρηση των LIV καμπύλων για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς

Για την έγχυση ρεύματος στην p-n επαφή του VCSEL χρησιμοποιήθηκε πηγή ισχύος μέσω κατάλληλων probe tips, με στόχο την ηλεκτρική διέγερση της ενεργού περιοχής. Η θερμοκρασία των tips ήταν ελεγχόμενη μέσω ενός TEC (temperature controller) και ενός θερμίστορ (thermistor) που τοποθετήθηκαν αρκετά κοντά και από κάτω από το τσιπάκι. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν υπό θερμοκρασία 23°C. Η οπτική ισχύς εξόδου του VCSEL μετρήθηκε μέσω ενός ανιχνευτή ελεύθερου χώρου σε συνδυασμό με έναν πολωτή της Newport, με στόχο να γίνουν μετρήσεις LIV καμπύλων για δύο άξονες πόλωσης (Οριζόντιο και Κάθετο). Τέλος, η οπτική ισχύς εξόδου μετρήθηκε με τη βοήθεια ενός μετρητή ισχύος (power meter). Ο συνδυασμός του πολωτή και του ανιχνευτή ελεύθερου χώρου τοποθετήθηκε όσο πιο κοντά ήταν δυνατό στο άνοιγμα εξόδου του VCSEL προκειμένου να συλλέξουμε τη μέγιστη οπτική ισχύ εξόδου. Η μέγιστη τιμή της οπτικής ισχύος μετρήθηκε για απόσταση μεταξύ του VCSEL και του ανιχνευτή (detector) που ήταν περίπου 2cm.

Όπως ήδη έχει αναφερθεί προηγουμένως όλα τα VCSELs τύπου C (C1, C2, C3) έχουν μετρηθεί, τα οποία έχουν BTJ 5μm και κοιλότητα που ποικίλει από 20, 24 και 28μm. Οι μετρήσεις της ισχύος εξόδου του VCSEL ως συνάρτηση του εγχόμενου ρεύματος για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς φαίνονται στα επόμενα σχήματα. Η πόλωση της εκπομπής του VCSEL μετρήθηκε μέσω ενός πολωτή (της Newport) που τοποθετήθηκε πριν από τον ανιχνευτή ελεύθερου χώρου ακριβώς από πάνω από την έξοδο του VCSEL. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται με βάση τη διαφορετική κοιλότητα (mesa) από κάθε τύπο VCSEL (C1, C2, C3). Επίσης, σημειώνεται και ο λόγος σβέσης μεταξύ των πολώσεων για κάθε VCSEL στο ρεύμα μέγιστης απόδοσης.

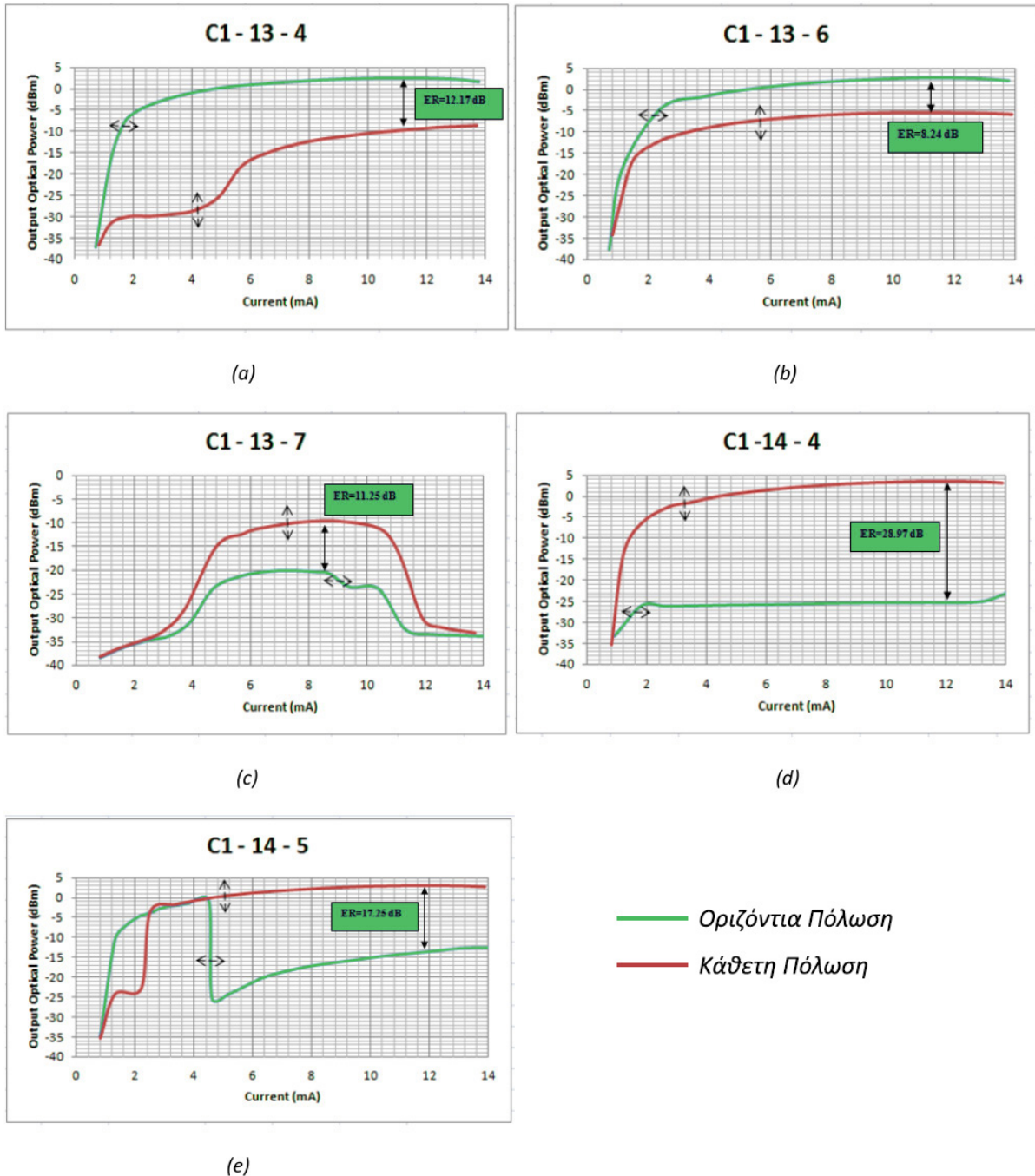


### 4.1.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

- Mesa: 20 $\mu$ m    BTJ: 5 $\mu$ m

Στο σχήμα 4.6 απεικονίζεται η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELS τύπου C1 με κοιλότητα ίση με 20 $\mu$ m. Ο τίτλος κάθε γραφικής παράστασης περιγράφει την θέση του κάθε VCSEL στον χάρτη μετρήσεων. Δηλαδή, το "C1-13-4" σημαίνει ότι το VCSEL είναι τύπου C1 και βρίσκεται στην 13η σειρά και 4η στήλη στον χάρτη. Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς. Παρατηρήθηκε για όλα τα τσιπάκια ότι έχουν παρόμοια οπτική συμπεριφορά με το ρεύμα κατωφλίου να είναι λιγότερο από 0.9mA. Η μέγιστη τιμή της οπτικής ισχύος εξόδου μετρήθηκε ίση με 2.32mW (3.66dBm) για το VCSEL C1-14-4 με ρεύμα μέγιστης απόδοσης στα 12mA (rollover current).

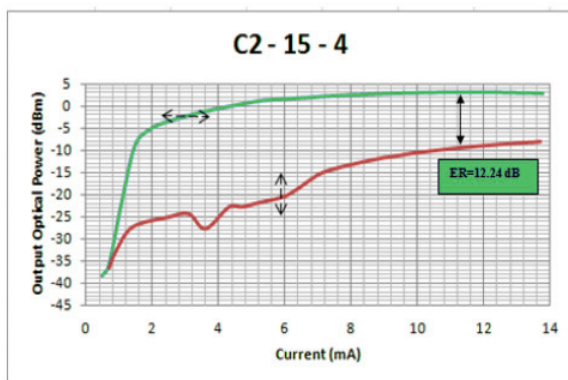
Παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός σβέσης (ER) μεταξύ των δύο πολώσεων για αυτά τα VCSELS ποικίλει μεταξύ 12.17dB και 28.97dB. Επίσης το VCSEL C1-13-7 παρουσιάζει χαμηλές επιδόσεις σχετικά με την οπτική ισχύ εξόδου (χαμηλότερη από 10dBm) και στους δύο άξονες πόλωσης. Επιπλέον, στο VCSEL C1-14-5 παρατηρήθηκε μια αλλαγή στον άξονα πόλωσης (από τον οριζόντιο στο κάθετο άξονα πόλωσης) περίπου στα 4.5mA. Τέλος, τα VCSELS C1-13-5, C1-14-6 και C1-14-7 δεν λειτουργούσαν.



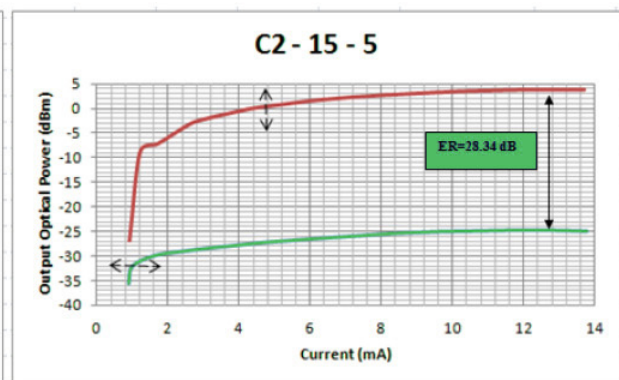
**Σχήμα 4.6:** (a-e) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C1, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση)

- Mesa:  $24\mu m$  BTJ:  $5\mu m$

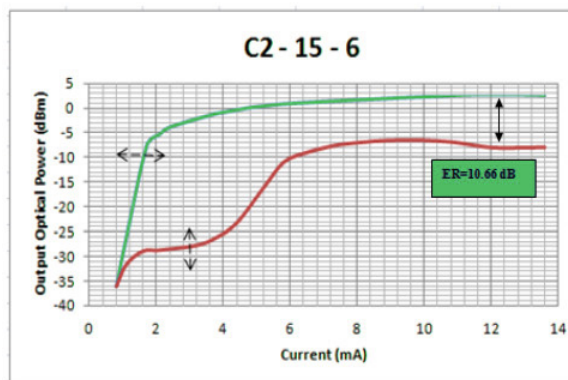
Στο σχήμα 4.7 απεικονίζεται η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELS τύπου C2 με κοιλότητα ίση με  $24\mu m$ . Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς. Παρατηρήθηκε για όλα τα τσιπάκια ότι έχουν παρόμοια οπτική συμπεριφορά με το ρεύμα κατωφλίου να είναι λιγότερο από  $0.9mA$ . Η μέγιστη τιμή της οπτικής ισχύος εξόδου μετρήθηκε ίση με  $2.36mW$  ( $3.72dBm$ ) για το VCSEL C2-15-5 με ρεύμα μέγιστης απόδοσης στα  $12.6mA$  (rollover current).



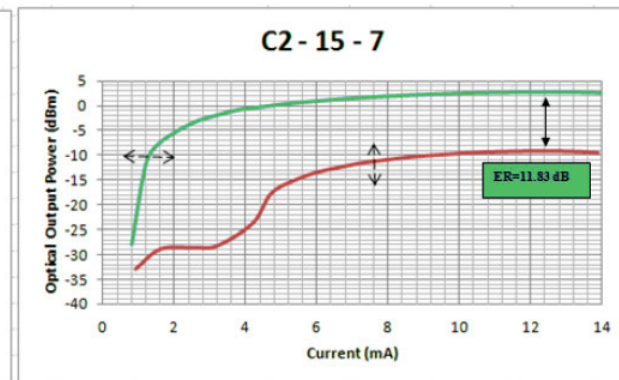
(a)



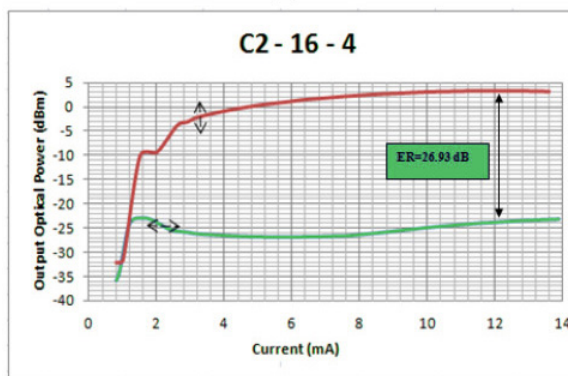
(b)



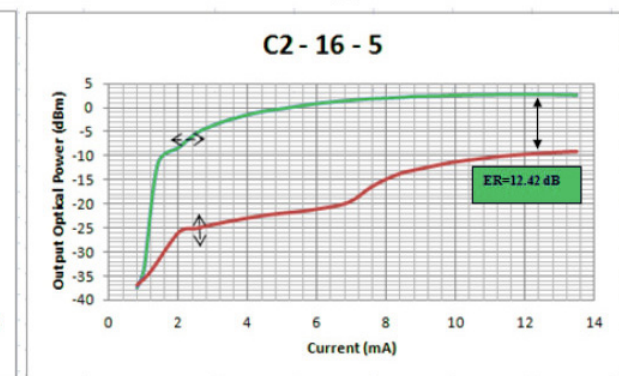
(c)



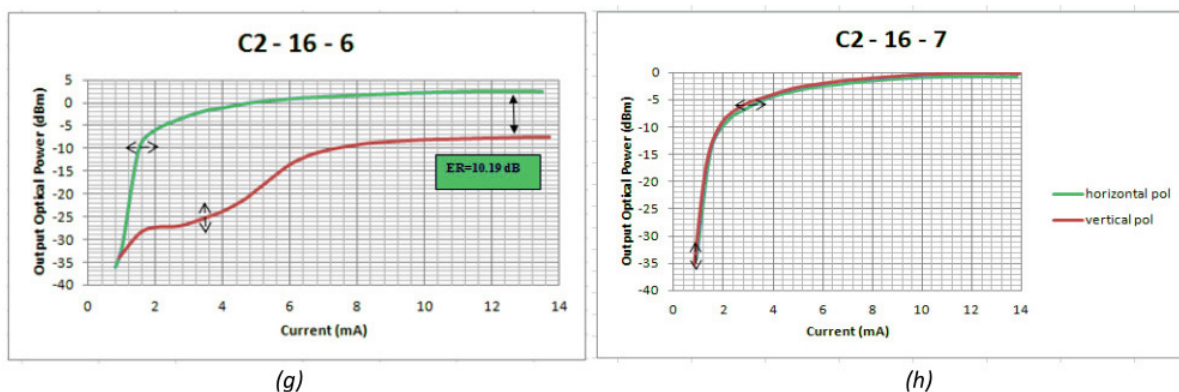
(d)



(e)



(f)

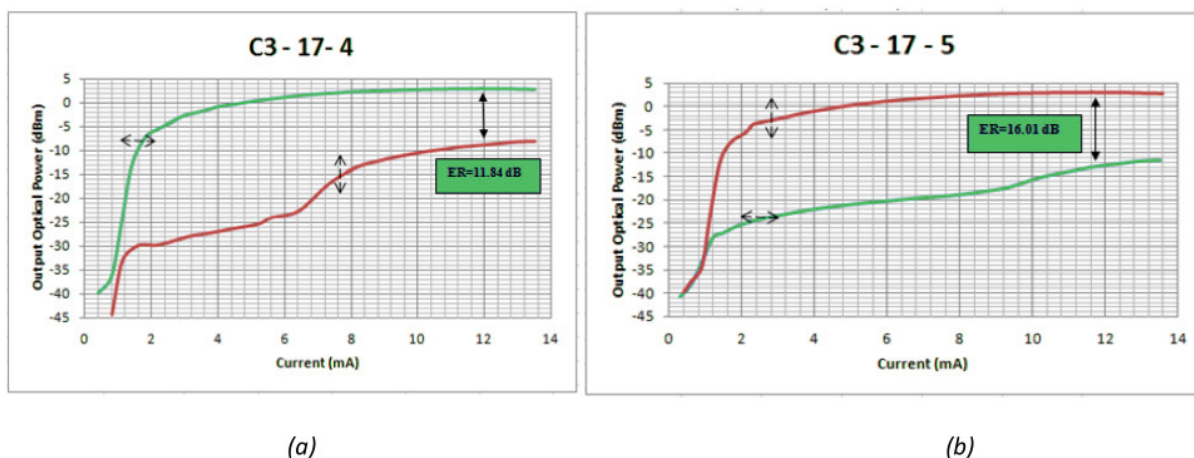


**Σχήμα 4.7:** (a-h) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C2, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση)

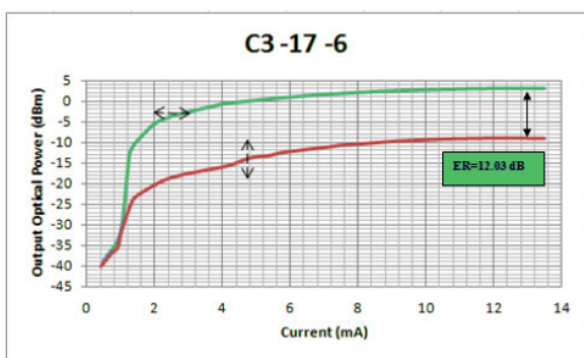
Παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων για αυτά τα VCSELs ποικίλει μεταξύ  $10.19\text{dB}$  και  $28.34\text{dB}$ . Το VCSEL C2-16-7 παρουσίασε την ίδια επίδοση στην οπτική ισχύ εξόδου και στους δύο άξονες πόλωσης.

- Mesa:  $28\mu\text{m}$  BTJ:  $5\mu\text{m}$

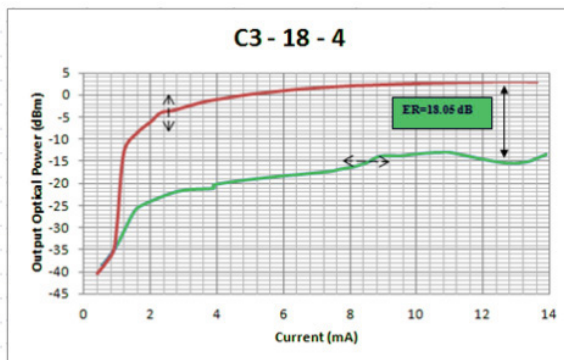
Το σχήμα 4.8 απεικονίζει τις χαρακτηριστικές L-I για τα VCSELs τύπου C3 με κοιλότητα ίση με  $28\mu\text{m}$ . Οι μετρήσεις έχουν πραγματοποιηθεί και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς. Παρατηρήθηκε για όλα τα τσιπάκια ότι έχουν παρόμοια οπτική συμπεριφορά με το ρεύμα κατωφλίου να είναι λιγότερο από  $0.8\text{mA}$ . Η μέγιστη τιμή της οπτικής ισχύος εξόδου μετρήθηκε ίση με  $2.15\text{mW}$  ( $3.32\text{dBm}$ ) για το VCSEL C3-18-7 με ρεύμα μέγιστης απόδοσης στα  $13\text{mA}$  (rollover current).



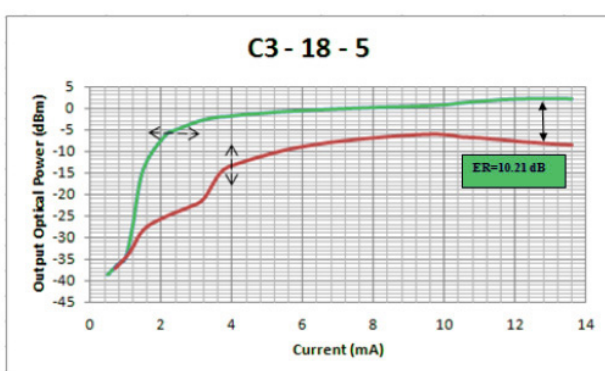
Παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων για αυτά τα VCSELs ποικίλει μεταξύ  $3.46\text{dB}$  και  $18.05\text{dB}$ . Το VCSEL C3-17-7 παρουσίασε χαμηλή επίδοση στην οπτική ισχύ εξόδου (χαμηλότερη από  $10\text{dB}$ ) και στους δύο άξονες πόλωσης.



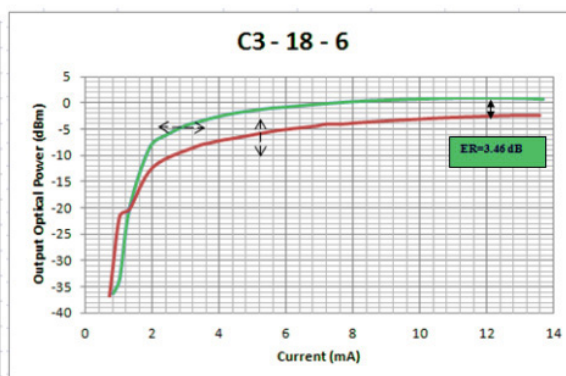
(c)



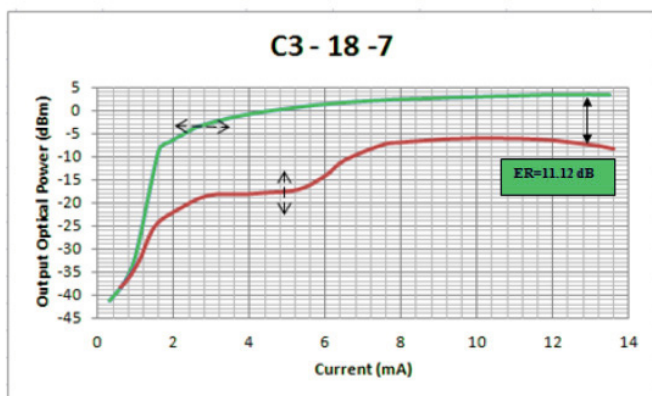
(d)



(e)



(f)



(g)

— Οριζόντια Πόλωση  
— Κάθετη Πόλωση

**Σχήμα 4.8:** (a-g) Η οπτική ισχύς εξόδου σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης για τα VCSELs τύπου C3, και για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς (Οριζόντια και Κάθετη Πόλωση)

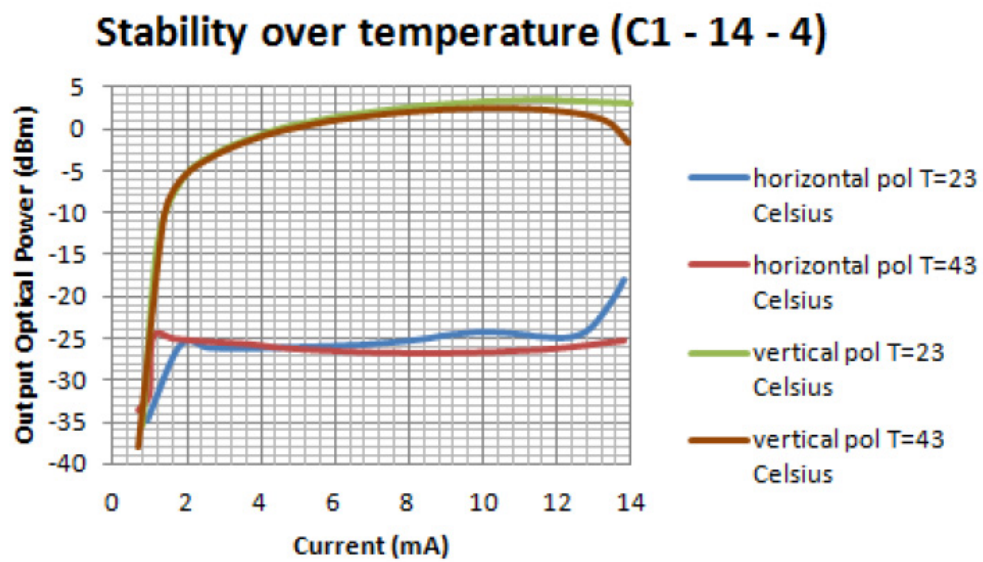
Στον επόμενο πίνακα 4.1 βλέπουμε συνοπτικά τον λόγο σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων (Polarization Extinction Ratio), το ρεύμα μέγιστης απόδοσης και την οπτική ισχύ εξόδου για τα VCSELs που μετρήθηκαν.

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 4.1:** Βλέπουμε συνοπτικά το ρεύμα μέγιστης απόδοσης, την οπτική ισχύ εξόδου και τον λόγο σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων (Polarization Extinction Ratio) για τα VCSELS που μετρήθηκαν

#### 4.1.4 Σταθερότητα της πόλωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία

Το σχήμα 4.9 της σελίδας 53 απεικονίζει την οπτική ισχύ εξόδου συναρτήσει του ρεύματος διέγερσης για το VCSEL C1-14-4 για τους δύο άξονες πόλωσης αναφοράς στους 23°C και 43°C. Το συγκεκριμένο VCSEL (C1-14-4) επιλέχθηκε για να εξετάσουμε την σταθερότητα της πόλωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία επειδή είχε υψηλό λόγο σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων. Παρατηρήθηκε ότι η κατάσταση της πόλωσης αυτού του VCSEL παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και στις δύο θερμοκρασίες. Ο λόγος σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων είναι 28.9dB στους 43°C, που είναι σχεδόν ίσος με τον αντίστοιχο λόγο σβέσης για τους 23°. Η μέγιστη οπτική ισχύς εξόδου είναι 3.66dBm στους 23°C και 2.52dBm στους 43°C.

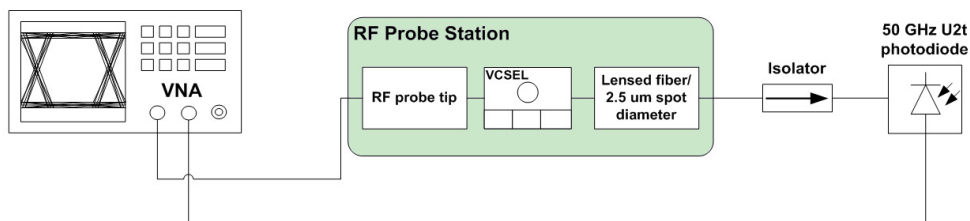


**Σχήμα 4.9:** Η συμπεριφορά της σταθερότητας της πόλωσης σε σχέση με τη θερμοκρασία για το VCSEL C1-14-4

## 4.2 Πειραματικές Μετρήσεις σε VCSEL: S-parameters

### 4.2.1 Εισαγωγικά

Στο κομμάτι αυτό μελετάμε μετρήσεις πάνω στις Παραμέτρους Διασποράς (Scattering Parameters, S-parameters) κάποιων VCSEL. Για να γίνουν αυτές οι μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε η διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 4.10. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε μια ηλεκτροοπτική πλατφόρμα δοκιμών στα  $40\text{GHz}$  η οποία αποτελείται από έναν **μικροκυματικό σταθμό βάσης** (RF probe station) Süss PM8 RF, ένα **διανυσματικό αναλυτή δικτύου** (VNA) μάρκας Anritsu στα  $40\text{GHz}$ , και ένα **οπτικό μικροσκόπιο**. Η εικόνα 4.11 απεικονίζει όλη την πλατφόρμα δοκιμών. Ο RF probe station μπορεί να φιλοξενήσει κομμάτια ή ολόκληρα πλακίδια (προς εξέταση) με διάμετρο έως και 8 ίντσες (σύμφωνα με το μέγεθος πλακιδίων που χρησιμοποιούνται στο AMS) και έχει σχεδιαστεί από τον κατασκευαστή αποκλειστικά για χαρακτηρισμούς RF. Στις επόμενες ενότητες και πριν από την παρουσίαση των μετρήσεων θα αναφέρουμε πιο συγκεκριμένα πράγματα για τις S-parameters και τον VNA.



Σχήμα 4.10: Η πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις των S-parameters



Σχήμα 4.11: Η πλατφόρμα δοκιμών: Αριστερά ο VNA, στο κέντρο ο probe station και από πάνω το οπτικό μικροσκόπιο




### 4.2.2 Παράμετροι Διασποράς (Scattering Parameters, S-parameters)

Στις υψηλές συχνότητες λειτουργίας, είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν η ολική τάση και το ολικό ρεύμα στις θύρες των υπό εξέταση συσκευών. Δεν είναι εύκολο να τοποθετηθεί απλά ένα βολτόμετρο ή ένας μετρητής ρεύματος για να παρθούν ακριβείς μετρήσεις εξαιτίας της χαρακτηριστικής αντίστασης των ίδιων των μετρητών και της δυσκολίας να τοποθετηθούν οι μετρητές στα επιθυμητά σημεία. Επιπλέον, οι ενεργές συσκευές ίσως να παρουσιάζουν ταλαντώσεις ή και να καταστρέφονται όταν έχουμε ανοιχτοκύκλωμα ή βραχυκύκλωμα. Για αυτό το λόγο δεν είναι δυνατό να γίνουν μετρήσεις με τις κλασικές παραμέτρους  $H$ ,  $Y$  και  $Z$  (σχήμα 4.12).

<u><math>H</math> parameters</u>	<u><math>Y</math> parameters</u>	<u><math>Z</math> parameters</u>
$V_1 = h_{11}I_1 + h_{12}V_2$	$I_1 = y_{11}V_1 + y_{12}V_2$	$V_1 = z_{11}I_1 + z_{12}I_2$
$I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}V_2$	$I_2 = y_{21}V_1 + y_{22}V_2$	$V_2 = z_{21}I_1 + z_{22}I_2$



$$h_{11} = \left. \frac{V_1}{I_1} \right|_{V_2=0} \quad (\text{Απαιτείται βραχυκύκλωμα})$$

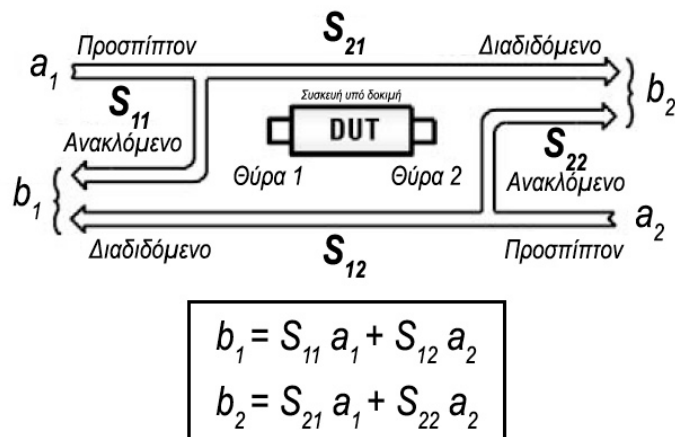
$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} \quad (\text{Απαιτείται ανοιχτοκύκλωμα})$$

**Σχήμα 4.12:** Οι εξισώσεις των παραμέτρων  $H$ ,  $Y$  και  $Z$ .

Ως εκ τούτου θα πρέπει να βρεθεί κάποια άλλη μεθοδολογία για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα και να είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός υψηλής συχνότητας δικτύων. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν οι **Παράμετροι Διασποράς** ή **Scattering Parameters** ή **S-parameters** οι οποίες έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των παραμέτρων  $H$ ,  $Y$  και  $Z$ . Σχετίζονται με γνωστές μετρήσεις όπως είναι το κέρδος (gain), οι απώλειες (losses) και ο συντελεστής ανάκλασης (reflection coefficient). Ορίζονται με βάση την τάση των οδεύοντων κυμάτων, τα οποία είναι εύκολο να μετρηθούν. Οι S-parameters δεν απαιτούν την σύνδεση της συσκευής με κάποιο ανεπιθύμητο εξωτερικό φορτίο. Οι S-parameters πολλαπλών συσκευών όταν μετρηθούν μπορούν να προβλέψουν την επίδοση ενός ολόκληρου συστήματος. Επίσης, εάν θελήσουμε μπορούμε να αναλύσουμε τις S-parameters σε παραμέτρους  $H$ ,  $Y$  και  $Z$ .

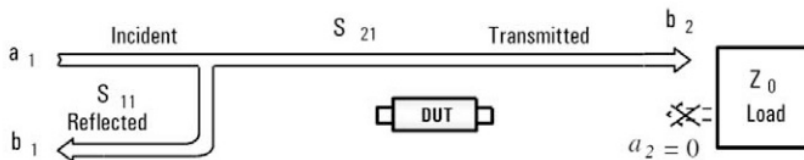
Μια συσκευή με  $N$  θύρες έχει  $N^2$  S-parameters. Έτσι μια συσκευή με δύο θύρες θα έχει τέσσερις S-parameters. Ο συμβολισμός των S-parameters που έχει επικρατήσει επιβάλλει ότι ο πρώτος αριθμός που ακολουθεί το "S" δείχνει τη θύρα από την οποία το σήμα "φεύγει" και ο δεύτερος αριθμός δείχνει τη θύρα στην οποία εφαρμόζεται το σήμα. Έτσι, το  $S_{21}$  είναι μια μέτρηση του σήματος που βγαίνει από την θύρα 2 σε σχέση με το RF ερέθισμα που μπαίνει

στην θύρα 1. Όταν οι αριθμοί είναι ίδιοι (π.χ.  $S_{11}$ ), αυτό δείχνει μια μέτρηση ανάκλασης αφού οι θύρες εισόδου και εξόδου είναι οι ίδιες. Οι προσπίπτοντες όροι ( $a_1, a_2$ ) και οι όροι εξόδου ( $b_1, b_2$ ) αντιπροσωπεύουν τα οδεύοντα κύματα.



Σχήμα 4.13: Οι S-parameters για ένα δίθυρο

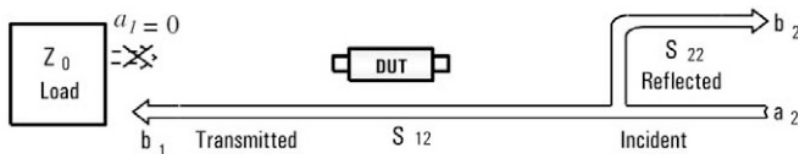
Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14 υπολογίζουμε τις παραμέτρους  $S_{11}$  και  $S_{21}$  που δίνονται στις σχέσεις 4.1.



Σχήμα 4.14: Υπολογισμός των παραμέτρων  $S_{11}$  και  $S_{21}$

$$S_{11} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (4.1)$$

Επίσης όπως φαίνεται στο σχήμα 4.15 υπολογίζουμε τις παραμέτρους  $S_{22}$  και  $S_{12}$  που δίνονται στις σχέσεις 4.2.



Σχήμα 4.15: Υπολογισμός των παραμέτρων  $S_{22}$  και  $S_{12}$

$$S_{22} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad S_{12} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (4.2)$$

### 4.2.3 Διανυσματικός Αναλυτής Δικτύου (Vector Network Analyser VNA)

Ο χαρακτηρισμός Αναλυτής Δικτύου δεν έχει να κάνει καθόλου με τα δίκτυα υπολογιστών. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο πολλών διαφόρων συσκευών που περιλαμβάνουν και παθητικά αλλά και ενεργά στοιχεία. Μέσω του VNA μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την γραμμική ή τη μη-γραμμική συμπεριφορά των συσκευών αυτών. [32]

Η ανάλυση του δικτύου αφορά στην ακριβή μέτρηση των λόγων του ανακλώμενου σήματος προς το προσπίπτον, και του διαδιδόμενου σήματος προς το προσπίπτον.

Ο κύριος λόγος που θέλουμε να μετράμε τη συμπεριφορά των διαφόρων στοιχείων ενός συστήματος είναι για να διασφαλίσουμε ότι δεν θα προκαλούν σημαντικές αλλοιώσεις στο σήμα. Τέτοιες αλλοιώσεις μπορούν να συμβούν για τα γραμμικά συστήματα στο σταθερό πλάτος και την γραμμική φάση, και στα μη-γραμμικά συστήματα στις αρμονικές συνιστώσες, στην διαμόρφωση, στη συμπίεση, στην μετατροπή AM σε PM κ.α. Επίσης είναι πολύ σημαντικό να αναφέρουμε ότι ο VNA μας δίνει τη δυνατότητα να μετράμε τη φάση των σημάτων κάτι που αποτελεί κυρίαρχο στοιχείο στην ανάλυση δικτύων.

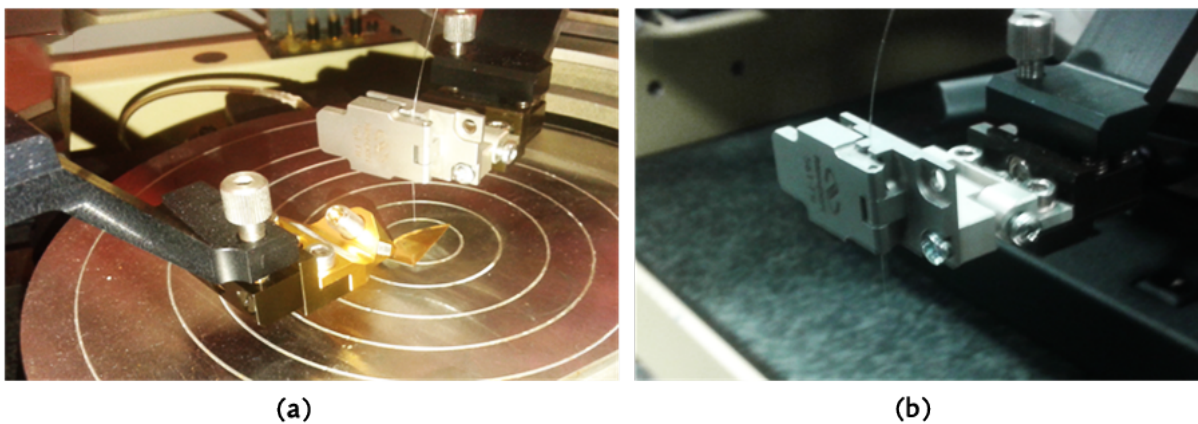
Ο **διανυσματικός αναλυτής δικτύου (Vector Network Analyser VNA)** είναι ένα μετρητικό όργανο το οποίο ελέγχει την απόκριση RF εξαρτημάτων ή δικτύων σαν συνάρτηση της συχνότητας ενός συνεχούς εφαρμοζόμενου μη-διαμορφωμένου RF σήματος. [33]

### 4.2.4 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

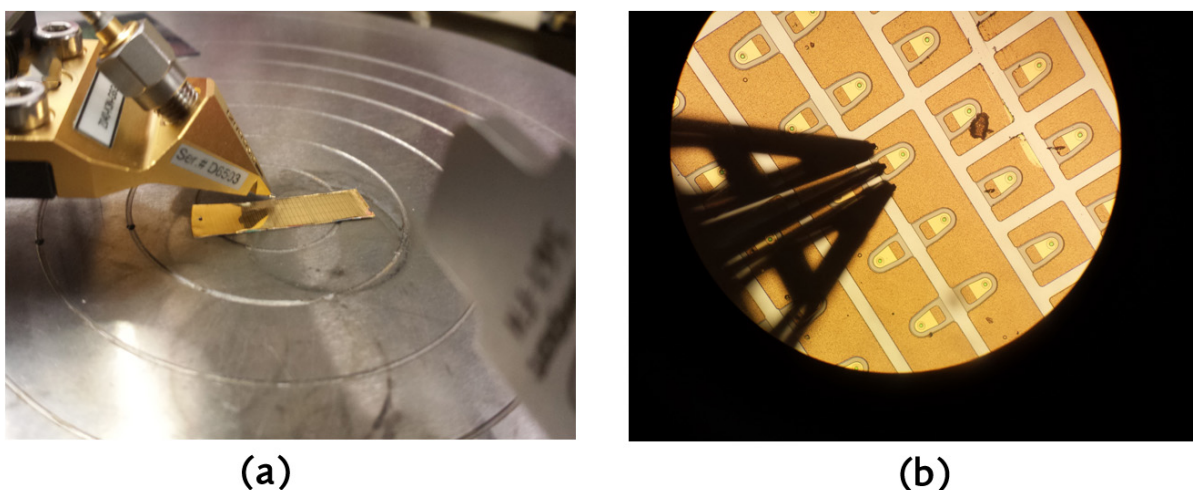
Σύμφωνα με τη διάταξη του σχήματος 4.10, τα δείγματα των VCSELs τοποθετούνται στον δίσκο δοκιμών 8 ιντσών του probe station (ο οποίος χρησιμοποιεί αέρα προκειμένου να τα κρατάει σταθερά) και εκεί τροφοδοτούνται ηλεκτρικά μέσω ενός probe tip GSG επιφάνειας  $100\mu m$  (εικόνα 4.16a). Τα VCSELs οδηγούνται πάνω από το ρεύμα κατωφλίου μέσω μιας πηγής τάσης υψηλής ακρίβειας και τους επιβάλλεται το RF σήμα που παράγεται από τον VNA, το οποίο υπερτίθεται στο σήμα DC. Το RF probe tip συνδέεται στην θύρα 1 (port 1) του VNA των  $40GHz$  μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου και πάλι  $40GHz$ . Επιπλέον, το RF probe tip έχει τοποθετηθεί με μηχανικό τρόπο σε ένα βραχίονα πάνω στο probe station σε έναν χειροκίνητο ρυθμιστή θέσης υψηλής ακρίβειας. Η ακριβής ευθυγράμμιση του probe tip με το δείγμα των VCSELs γίνεται πιο εύκολα με τη βοήθεια του μικροσκοπίου (εικόνα 4.17).

Στο συγκεκριμένο πείραμα το μικροσκόπιο είναι εξοπλισμένο με μια ποικιλία κατευθυντικών φακών που πετυχαίνουν μεγέθυνση από  $\times 10$  μέχρι  $\times 50$ .

Το οπικό σήμα που εκπέμπουν τα VCSEL συλλέγεται από την έξοδό τους μέσω μιας οπτικής ίνας προσαρμοσμένης σε κατάλληλο στήριγμα (εικόνα 4.16b). Αυτό το στήριγμα που κρατάει την οπτική ίνα έχει τοποθετηθεί σε έναν ρυθμιστή θέσης με ακρίβεια μικρόμετρων μέσω ενός βραχίονα του probe και με κατάλληλο μηχανισμό που σχεδιάστηκε στο εργαστήριο. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την πλευρική και κατακόρυφη προσαρμογή της οπτικής ίνας πάνω από το VCSEL καθώς και την ρύθμιση της γωνίας της οπτικής ίνας σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα, που επιτρέπει τη μέτρηση και άλλων οπτικών δομών εκτός από τα VCSEL. Το σήμα που συλλέγεται εισάγεται σε μια φωτοδίοδο U2t 50GHz η οποία συνδέεται στην θύρα 2 (port 2) του VNA, έτσι ώστε να είναι εφικτή η μέτρηση της S21 παραμέτρου.



**Σχήμα 4.16:** Κοντινή φωτογραφία από (a) το RF probe tip, (b) την οπτική ίνα και το στήριγμά της



**Σχήμα 4.17:** (a) Η στιγμή της επαφής του GSG probe tip με τα VCSEL, (b) Το RF probe tip και το τσιπάκι του VCSEL μέσα από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο

Για να ληφθούν αξιόπιστες μετρήσεις για τις S παραμέτρους (συντελεστές S11 και S22) είναι

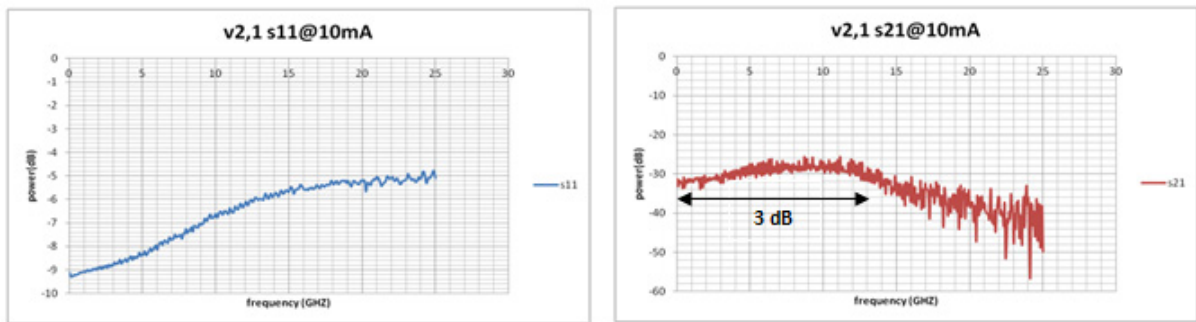
κρίσιμο να γίνει προσεκτική **βαθμονόμηση** (calibration) έτσι ώστε να εξαλειφθούν τα σφάλματα που εισάγονται από το μετρητικό σύστημα, όπως επίσης και να αποσυσχετιστούν τα χαρακτηριστικά των επιμέρους στοιχείων που ανήκουν στη διάταξη από την συσκευή που είναι υπό εξέταση. Τυπικά σφάλματα μέτρησης μπορούν να αποδοθούν σε ατέλειες της κατευθυντικότητας των ζευκτών στο εσωτερικό του VNA και σε σφάλματα που προκύπτουν από τις ανακλάσεις μεταξύ της θύρας του VNA που στέλνει το RF σήμα και των υπό δοκιμή δειγμάτων VCSELs. Επιπλέον, τα καλώδια RF στην πειραματική διάταξη εισάγουν εξασθένηση, χρονική καθυστέρηση και μια αντίστοιχη μετατόπιση φάσης που επηρεάζουν τις μετρήσεις του VNA. Η βαθμονόμηση του συστήματος βασίζεται σε μια τεχνική που λέγεται διανυσματική διόρθωση σφαλμάτων όπου τα συστηματικά σφάλματα μέτρησης εξαλείφονται με τη χρήση τυποποιημένων διαδικασιών.

Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι βαθμονόμησης που είναι ενσωματωμένοι στον VNA και μπορούν να επιλεγούν και να ακολουθηθούν σύμφωνα με τη φύση και τη στόχευση των μετρήσεων. Για την συγκεκριμένη ηλεκτρο-οπτική πλατφόρμα δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βαθμονόμησης **SOLT (Short, Open, Load Thru)**. Αυτή η μέθοδος βαθμονόμησης είναι η πιο απλή που χρησιμοποιείται για ηλεκτρο-οπτικές μετρήσεις και απαιτεί μια σειρά από δομές αναφοράς, όπως είναι το βραχυκύκλωμα (short circuit), το ανοιχτοκύκλωμα (open circuit), ένα φορτίο ακριβείας (συνήθως είναι 50Ω) και μια απευθείας σύνδεση. Μετά τη βαθμονόμηση το επίπεδο της μέτρησης αναφοράς έρχεται στην είσοδο των VCSELs υπό δοκιμή και έτσι όλα τα συστηματικά σφάλματα εξαλείφονται.

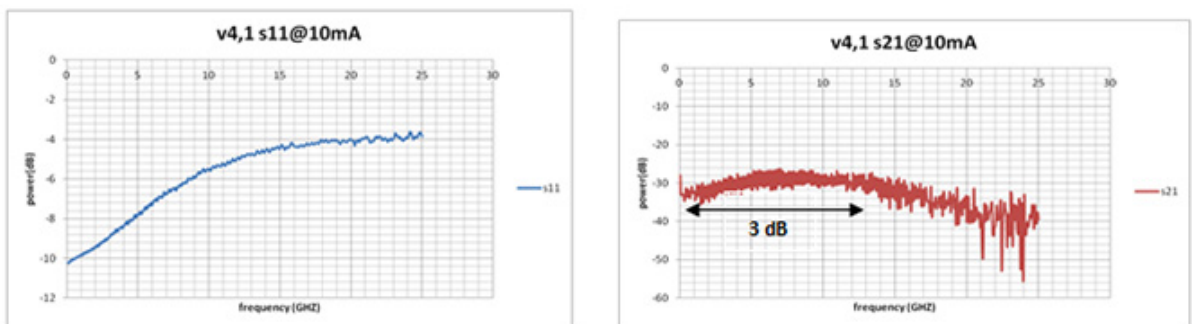
#### 4.2.5 Αποτελέσματα μετρήσεων S-parameters

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων των S-parameters για τα ίδια VCSEL που μετρήθηκαν και στην ενότητα 4.1.3. Στα διαγράμματα με τις μετρήσεις της παραμέτρου  $S_{21}$  αναφέρεται και το εύρος ζώνης 3dB (3dB bandwidth) για κάθε VCSEL. Οι μετρήσεις της παραμέτρου  $S_{21}$  και του εύρους ζώνης 3dB πραγματοποιήθηκαν για διάφορα σημεία πόλωσης των υπό δοκιμή VCSELs. Το εύρος ζώνης 3dB που φαίνεται στα διαγράμματα παρακάτω αντιστοιχεί στις τιμές του εγχεόμενου ρεύματος στις οποίες μετρήθηκε το μεγαλύτερο εύρος ζώνης 3dB του κάθε δείγματος. Αυτές οι τιμές του ρεύματος είναι πολύ κοντά στο ρεύμα μέγιστης απόδοσης κάθε δείγματος.

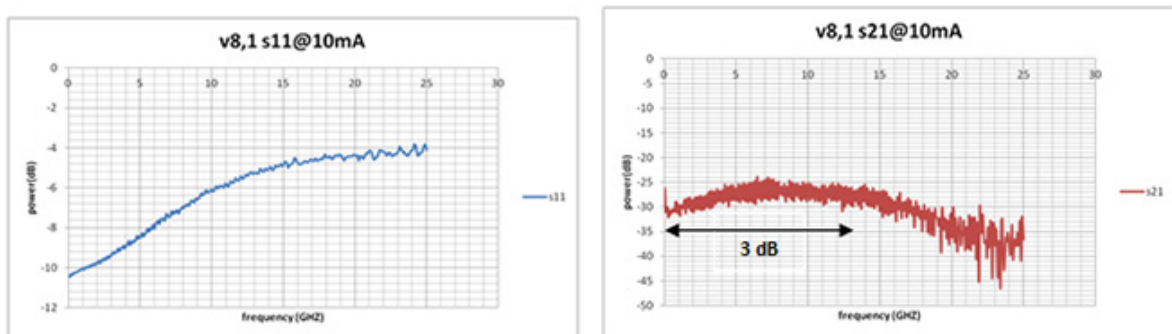
- Mesa:  $20\mu\text{m}$  BTJ:  $5\mu\text{m}$   $I = 10\text{mA}$



(a)



(b)

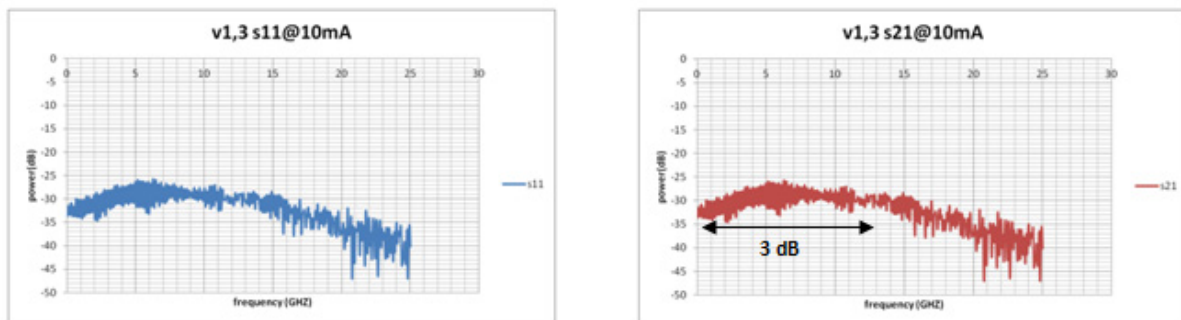


(c)

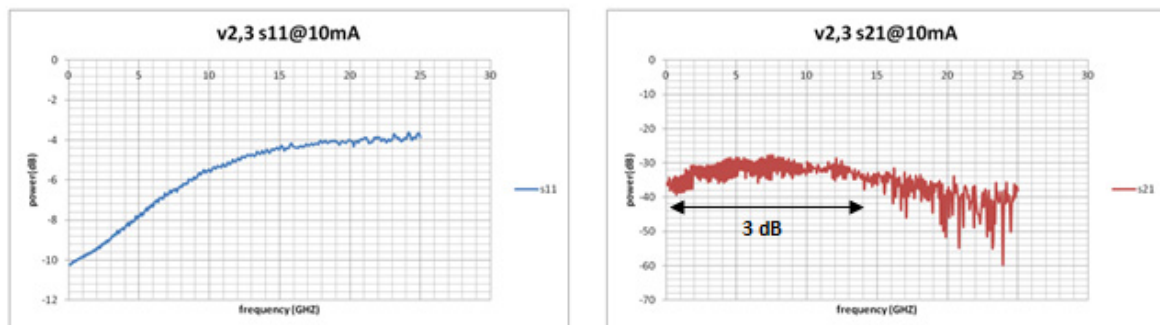
**Σχήμα 4.18:** (a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C1

Τα VCSELs του τύπου C1 παρουσίασαν όλα την ίδια επίδοση εύρους ζώνης 3dB το οποίο ήταν 13GHz (σχήμα 4.18).

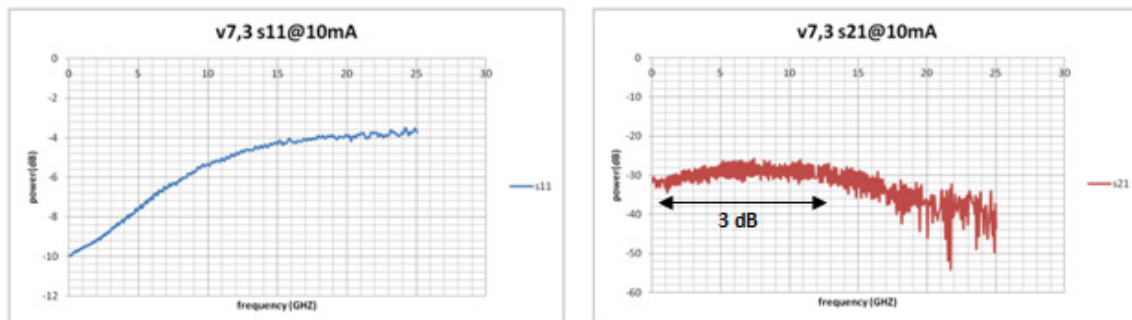
- Mesa: 24 $\mu$ m BTJ: 5 $\mu$ m  $I = 10$ mA



(a)



(b)

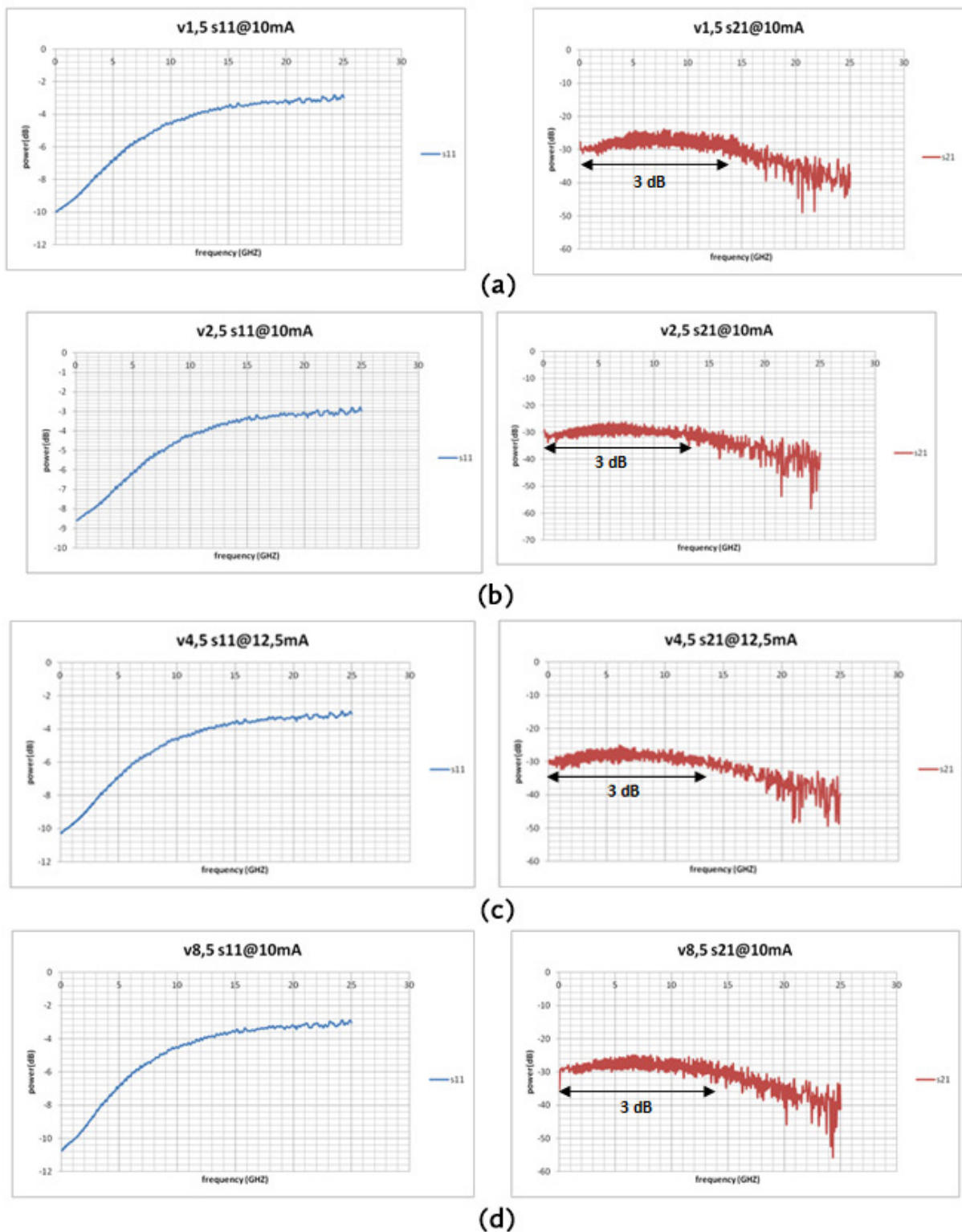


(c)

**Σχήμα 4.19:** (a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C2

Τα VCSELs του τύπου C2 παρουσίασαν τιμές εύρους ζώνης 3dB μεταξύ 13GHz και 14GHz (σχήμα 4.19).

- Mesa:  $28\mu\text{m}$  BTJ:  $5\mu\text{m}$   $I = 10\text{mA}$



Σχήμα 4.20: (a-c) Οι παράμετροι ανάκλασης και μετάδοσης του VCSEL τύπου C3

Τα VCSELs του τύπου C1 παρουσίασαν όλα την ίδια επίδοση εύρους ζώνης 3dB το οποίο ήταν 14GHz (σχήμα 4.20).



### 4.3 Συμπεράσματα

Έπειτα από την ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων που αφορούσαν τις LIV καμπύλες στην ενότητα 4.1 και τις S-parameters στην ενότητα 4.2 των υπό εξέταση VCSELs έγινε μια **αξιολόγηση** των αποτελεσμάτων με σκοπό την επιλογή των κατάλληλων VCSELs που θα χρησιμοποιηθούν για τον πομπό (transmitter) που εξετάζεται στο Κεφάλαιο 5 στην ενότητα 5.1 της εργασίας. Η αξιολόγηση αυτή έγινε με βάση τρεις παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα αξιολογήθηκαν η οπτική ισχύς εξόδου των VCSELs στο ρεύμα μέγιστης απόδοσης, ο ρυθμός σβέσης μεταξύ των δύο πολώσεων καθώς και οι μετρηθείσες τιμές για το εύρος ζώνης 3dB για τα υπό εξέταση VCSELs. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν συνοψίζονται στο παρακάτω πίνακα:

VCSEL	Output optical power (dBm)	Polarization extinction ratio (dB)	3dB Bandwidth (GHz)
Mesa: 20 $\mu$ m BTJ: 5 $\mu$ m	3.66	12.17 – 28.97	13
Mesa: 24 $\mu$ m BTJ: 5 $\mu$ m	3.72	10.19 – 28.34	14
Mesa: 28 $\mu$ m BTJ: 5 $\mu$ m	3.32	3.46 – 18.05	14

Μετά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του παραπάνω πίνακα αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν στον πομπό (transmitter) τα VCSELs με mesa 24 $\mu$ m και BTJ 5 $\mu$ m. Κύριο πλεονέκτημα αυτών των VCSELs αποτελεί το γεγονός ότι η οπτική ισχύς εξόδου είναι η μεγαλύτερη σε σχέση με τους άλλους δυο τύπους VCSELs (3.72 dBm) ενώ παράλληλα έχουν και το μεγαλύτερο 3 dB εύρος ζώνης (14 GHz). Επιπλέον, για αυτόν τον τύπο VCSEL έχει μετρηθεί ρυθμός σβέσης της τάξης των 28.34 dB.



# Κεφάλαιο 5

## Πειραματική διαδικασία: Β' ΜΕΡΟΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι διατάξεις, οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα σχετικά με οπτικό γραμμικό πομπό (transmitter) και οπτικό γραμμικό δέκτη (receiver) που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του project MIRAGE (Multi-coRe, multi-level, WDM-enabled embedded optical engine for Tera-bit board-to-board and rack-to-rack parallel optics) και διεξήχθησαν στο εργαστήριο Φωτονικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

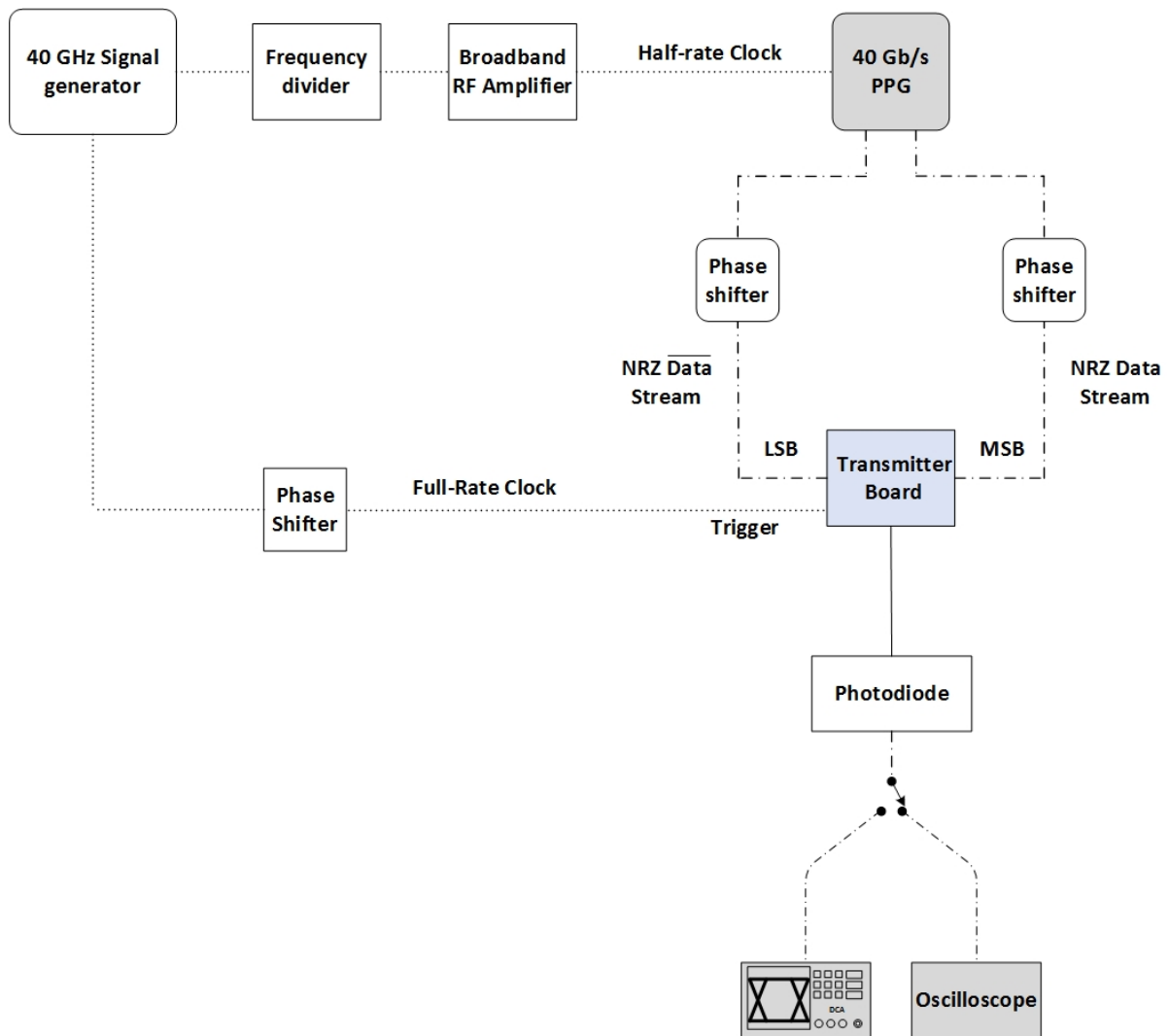
### 5.1 Οπτικός Γραμμικός Πομπός NRZ (Linear Optical Transmitter)

#### 5.1.1 Πειραματική διάταξη

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται η πειραματική διάταξη του transmitter. Τα μέρη του πειράματος που είναι απαραίτητα για τη μετάδοση σήματος από τον πομπό είναι:

- Γεννήτρια σήματος στα  $40GHz$  (**Signal Generator**)
- Διαιρέτης συχνότητας (**Frequency divider**)
- Ενισχυτής ευρείας ζώνης RF (**Broadband RF Amplifier**)
- Γεννήτρια παλμών (**Pulse Pattern Generator - PPG**)
- Συσκευές μετατόπισης της φάσης (**Phase shifters**)
- Πλακέτα πομπού (**Transmitter board**)

Προκειμένου να γίνουν ο έλεγχος και οι μετρήσεις του transmitter, χρησιμοποιήθηκε ως μέσο μετάδοσης **οπτική ίνα** και στη συνέχεια μια **φωτοδίοδος** για τη μετατροπή της οπτικής ισχύος σε τάση η οποία ανιχνεύεται εν συνεχεία από **παλμογράφο** ή από **Real Time Scope**.



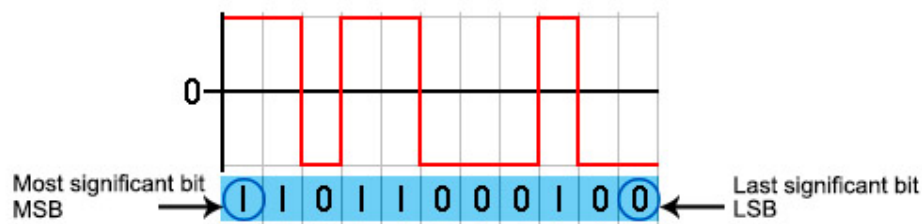
Σχήμα 5.1: Η πειραματική διάταξη του transmitter

### 5.1.2 Περιγραφή πειράματος

Η γεννήτρια του σήματος των  $40GHz$  έχει ένα πολύ βασικό ρόλο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Αυτός αφορά τον **απόλυτο συγχρονισμό** των επιμέρους συσκευών. Αποτελεί δηλαδή τη συσκευή που δίνει το "ρυθμό" και κλειδώνει **όλες** τις συσκευές στον κατάλληλο χρόνο έτσι ώστε να υπάρχει αρμονία μεταξύ τους. Έτσι η γεννήτρια σήματος πρέπει να δίνει σήμα χρονισμού στον PPG και στην Transmitter Board.

Όμως, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.1, ο PPG "κλειδώνει" όταν έχει σαν clock τη **μισή** συχνότητα από αυτή που θα έχει στην έξοδό του, δηλαδή εάν θέλουμε ένα μοτίβο στα  $40GHz$  θα πρέπει να του δίνουμε σαν είσοδο στο clock σήμα στα  $20GHz$ . Για αυτό το λόγο γίνεται η χρήση του διαιρέτη συχνότητας (frequency divider) ο οποίος ακολουθείται από έναν Broadband RF Amplifier έτσι ώστε να ενισχύσει το σήμα στα κατάλληλα επίπεδα. Αντίθετα, το clock της Transmitter Board συνδέεται απευθείας με την συχνότητα που δίνει η γεννήτρια

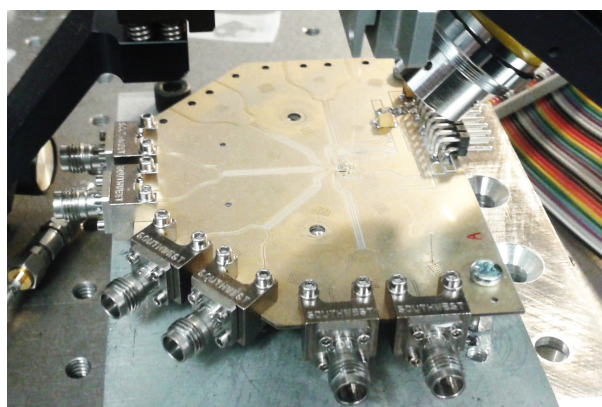
σήματος. Εδώ κρίνεται απαραίτητη η χρήση ενός μετατοπιστή φάσης έτσι ώστε να εξαλειφθούν φαινόμενα μετατόπισης της φάσης.



**Σχήμα 5.2:** Παράδειγμα μιας τυχαίας ακολουθίας NRZ

Στο πείραμά μας έχουμε προγραμματίσει τον PPG να δίνει μια ακολουθία παλμών NRZ. Γενικά στις τηλεπικοινωνίες, μια ακολουθία παλμών NRZ (Non-Return-to-Zero) είναι ένας δυαδικός κώδικας στον οποίο οι άσσοι αντιπροσωπεύονται από μια σημαντική κατάσταση (significant condition) που συνήθως είναι μια θετική τάση, ενώ τα μηδενικά αντιπροσωπεύονται από κάποια άλλη σημαντική κατάσταση που συνήθως είναι μια αρνητική τάση, χωρίς να υπάρχουν άλλες ουδέτερες ή ενδιάμεσες καταστάσεις. Μια ακολουθία NRZ φαίνεται στο σχήμα 5.2.

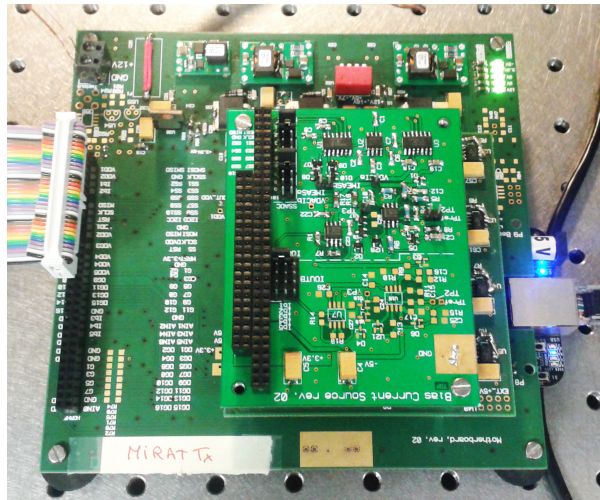
Μετά τον PPG έχουμε δύο NRZ ροές δεδομένων ( $data$  και  $\overline{data}$ ) που τροφοδοτούν τις αντίστοιχες εισόδους στην πλακέτα του πομπού, εικόνα 5.3, που προσφέρουν στις εισόδους τις MSB (Most significant bit) και LSB (Last significant bit) ψευδοτυχαίες δυαδικές ακολουθίες bit (PRBS 215-1). Και οι δύο ροές δεδομένων είναι ίδιες για τα σήματα εισόδου MSB και LSB. Οι δύο μετατοπιστές φάσης για τα MSB και LSB χρησιμοποιούνται για να καλυτερέψουν τον συγχρονισμό των ροών δεδομένων.



**Σχήμα 5.3:** Η πλακέτα του πομπού που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα

Εδώ να σημειώσουμε ότι στην πλακέτα του πομπού υπάρχει και μια είσοδος για "clock" όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Επίσης το κύκλωμα της πλακέτας οδηγείται ηλεκτρονικά μέσω υπολογιστή αφού παρέχεται και το ανάλογο ηλεκτρονικό κύκλωμα της εικόνας 5.4. Η πλα-

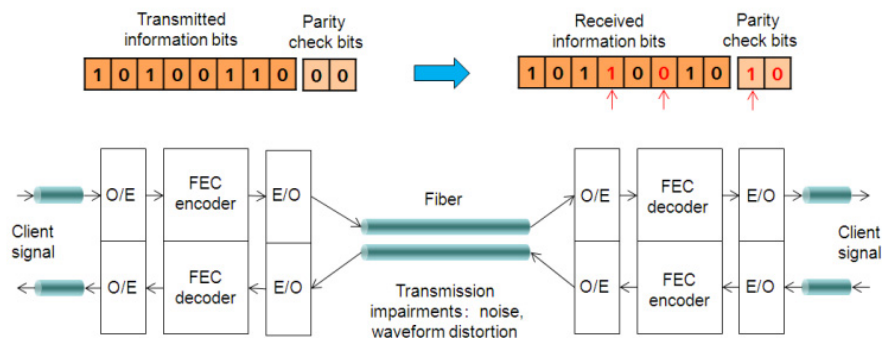
κέτα του πομπού είναι αυτή που αναλαμβάνει τη διαμόρφωση των εισερχόμενων σημάτων και την οπτική εκπομπή τους με την απαραίτητη ισχύ με τα VCSELs που διαθέτει.



Σχήμα 5.4: Το ηλεκτρονικό κύκλωμα που "οδηγεί" την πλακέτα του πομπού μέσω PC

Καταγράψαμε τα eye diagrams για ταχύτητες μετάδοσης  $22\text{Gb/s}$ ,  $24\text{Gb/s}$  και  $25\text{Gb/s}$  για απευθείας σύνδεση back-to-back (δηλαδή σχεδόν μηδενική απόσταση), για αποστάσεις  $300\text{m}$  και  $1\text{km}$  μέσω μονότροπης οπτικής ίνας SFM (single mode fiber) με τη βοήθεια ενός equivalent-time παλμογράφου.

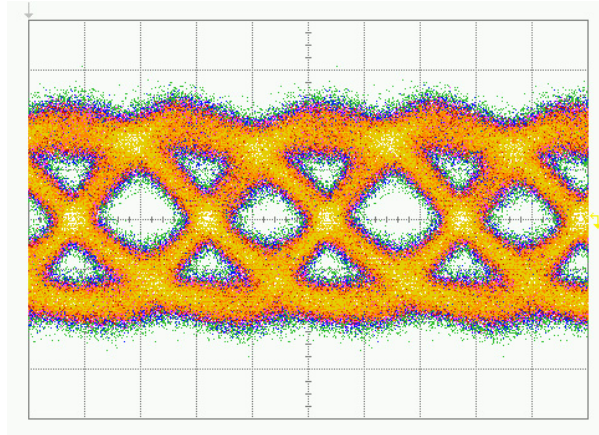
Οι καμπύλες του ποσοστού των εσφαλμένων bit **BER** (Bit Error Rate) ελήφθησαν για τις προαναφερθείσες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και με offline επεξεργασία. Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιείται η τεχνολογία FEC (forward error correction) για τη διόρθωση των λαθών (σχήμα 5.5). Σε γενικές γραμμές αυτό που κάνει η τεχνολογία αυτή είναι να εισάγει πριν τη μετάδοση κάποια επιπλέον bits τα οποία στη συνέχεια και μετά τη λήψη βοηθούν έτσι ώστε να γίνει διόρθωση των λανθασμένων bit που μεταδόθηκαν.



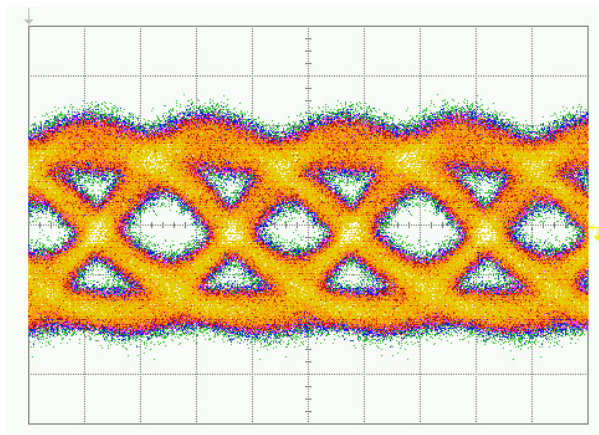
Σχήμα 5.5: Η εφαρμογή της τεχνολογίας FEC στις οπτικές επικοινωνίες

### 5.1.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός: Eye Diagrams και Καμπύλες BER

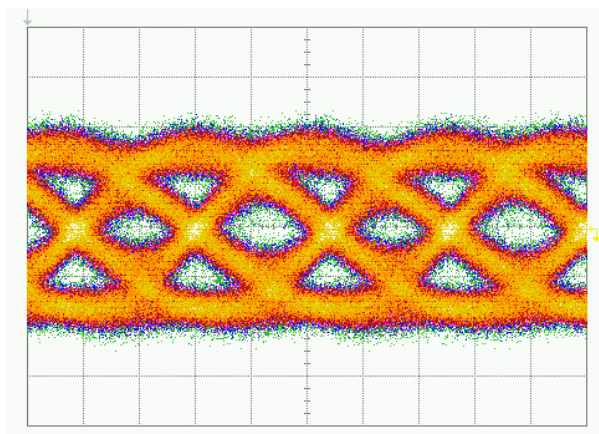
- Ταχύτητα μετάδοσης:  $22\text{Gb/s}$



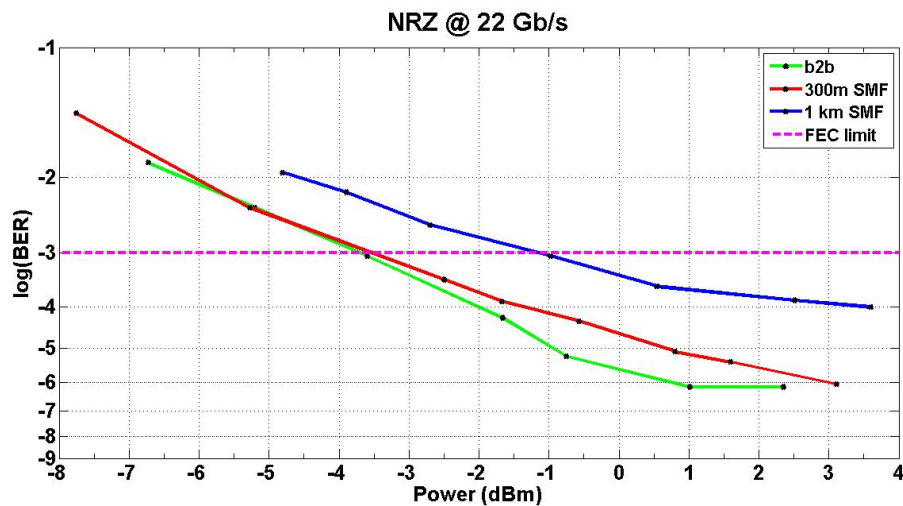
Σχήμα 5.6: Ταχύτητα μετάδοσης  $22\text{Gb/s}$ : Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b



Σχήμα 5.7: Ταχύτητα μετάδοσης  $22\text{Gb/s}$ : Eye Diagram για απόσταση 300m



Σχήμα 5.8: Ταχύτητα μετάδοσης  $22\text{Gb/s}$ : Eye Diagram για απόσταση 1km



Σχήμα 5.9: Καμπύλη BER για ταχύτητα 22Gb/s

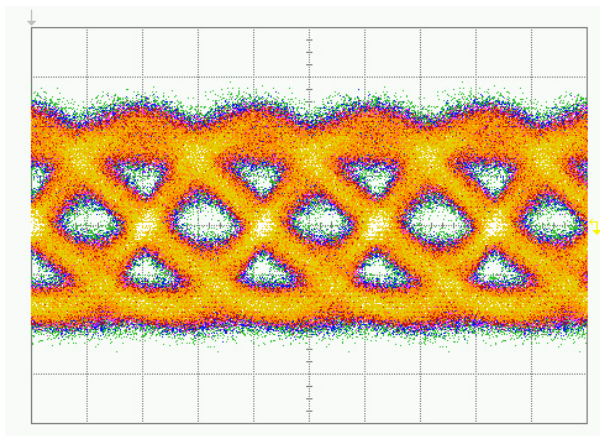
Στα σχήματα 5.6, 5.7 και 5.8 φαίνονται τα eye diagrams για διάταξη b2b, μετά από 300m και μετά από 1km μέσω μονότροπης οπτικής ίνας (SMF) αντίστοιχα για ταχύτητα μετάδοσης στα 22Gb/s, τα οποία μετρήθηκαν με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου 70GHz.

Όπως δείχνει το σχήμα 5.9, φαίνεται ότι ο ρυθμός BER είναι καλός κάτω από το όριο του FEC. Αυτό σημαίνει ότι κάτω από το όριο FEC θα μπορούμε να έχουμε επιτυχή διόρθωση λαθών. Ακόμα, είναι σαφές ότι όσο αυξάνεται το μήκος της μονότροπης οπτικής ίνας έχουμε επιδείνωση του eye diagram πράγμα που σημαίνει ότι γίνεται πιο δύσκολος ο διαχωρισμός των συμβόλων και άρα ενδεχομένως να έχουμε προβλήματα στη μετάδοση.

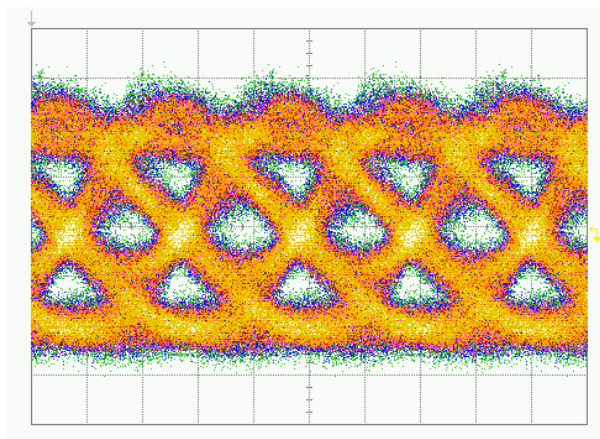
Εδώ να σημειώσουμε ότι οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν χωρίς να χρησιμοποιηθεί η παράμετρος FEE (feed-forward equalization). Αυτό σημαίνει ότι ενδεχομένως θα είχαμε καλύτερα αποτελέσματα σε περίπτωση που την λαμβάναμε υπόψη μας.



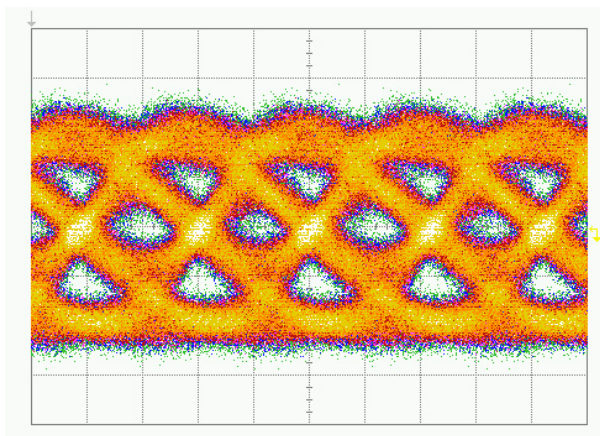
- Ταχύτητα μετάδοσης: 24Gb/s



**Σχήμα 5.10:** Ταχύτητα μετάδοσης 24Gb/s: Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b

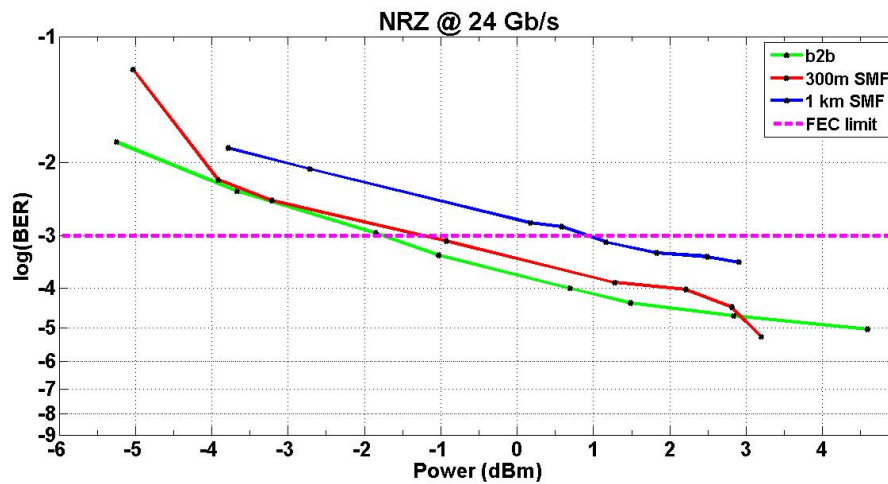


**Σχήμα 5.11:** Ταχύτητα μετάδοσης 24Gb/s: Eye Diagram για απόσταση 300m



**Σχήμα 5.12:** Ταχύτητα μετάδοσης 24Gb/s: Eye Diagram για απόσταση 1km

Στα σχήματα 5.10, 5.11 και 5.12 φαίνονται τα eye diagrams για διάταξη b2b, μετά από 300m και μετά από 1km μέσω μονότροπης οπτικής ίνας (SMF) αντίστοιχα για ταχύτητα μετάδοσης στα 24Gb/s, τα οποία μετρήθηκαν με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου 70GHz.

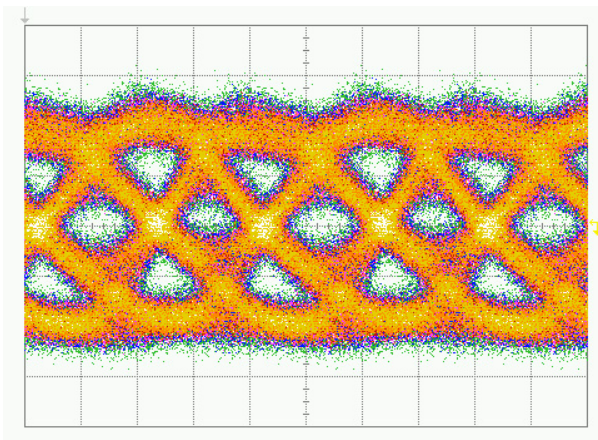


Σχήμα 5.13: Καμπύλη BER για ταχύτητα 24Gb/s

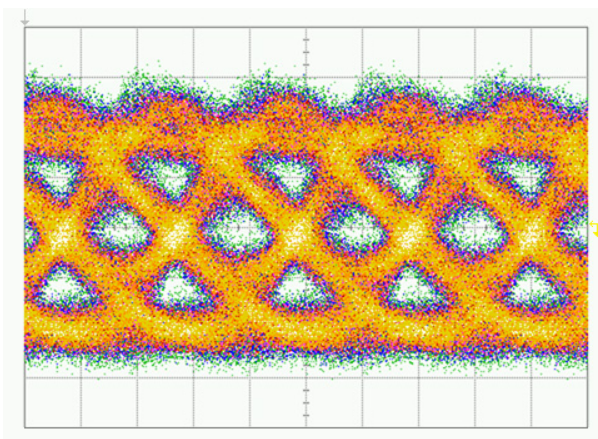
Όπως δείχνει το σχήμα 5.13, φαίνεται ότι ο ρυθμός BER είναι καλός κάτω από το όριο του FEC. Όπως και προηγουμένως αυτό σημαίνει ότι κάτω από το όριο FEC θα μπορούμε να έχουμε επιτυχή διόρθωση λαθών. Παρατηρούμε ότι επειδή έχουμε αύξηση του ρυθμού των bits υπάρχει μια επιδείνωση των eye diagrams σε σχέση με τον προηγούμενο ρυθμό (22Gb/s). Επίσης όπως συνέβαινε και προηγουμένως, όσο αυξάνεται το μήκος της μονότροπης οπτικής ίνας έχουμε επιπλέον επιδείνωση του eye diagram πράγμα που σημαίνει ότι γίνεται πιο δύσκολος ο διαχωρισμός των συμβόλων και άρα ενδεχομένως να έχουμε προβλήματα στη μετάδοση.

Εδώ να σημειώσουμε ότι οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν χωρίς να χρησιμοποιηθεί η παράμετρος FEE (feed-forward equalization). Αυτό σημαίνει ότι ενδεχομένως θα είχαμε καλύτερα αποτελέσματα σε περίπτωση που την λαμβάναμε υπόψη μας.

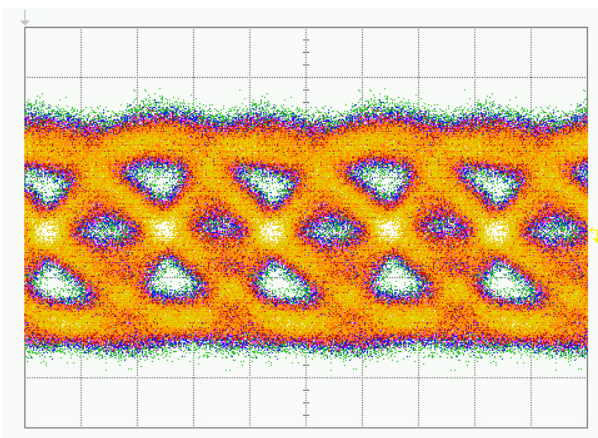
- Ταχύτητα μετάδοσης: 25Gb/s



**Σχήμα 5.14:** Ταχύτητα μετάδοσης 25Gb/s: Eye Diagram για απευθείας σύνδεση b2b

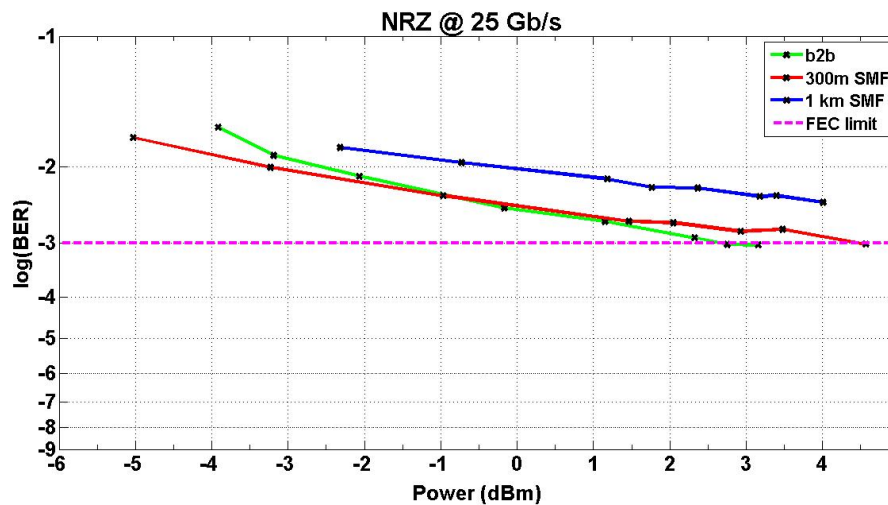


**Σχήμα 5.15:** Ταχύτητα μετάδοσης 25Gb/s: Eye Diagram για απόσταση 300m



**Σχήμα 5.16:** Ταχύτητα μετάδοσης 25Gb/s: Eye Diagram για απόσταση 1km

Στα σχήματα 5.14, 5.15 και 5.16 φαίνονται τα eye diagrams για διάταξη b2b, μετά από 300m και μετά από 1km μέσω μονότροπης οπτικής ίνας (SMF) αντίστοιχα για ταχύτητα μετάδοσης στα 25Gb/s, τα οποία μετρήθηκαν με έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου 70GHz.



Σχήμα 5.17: Καμπύλη BER για ταχύτητα 25Gb/s

Όπως δείχνει το σχήμα 5.17, φαίνεται ότι ο ρυθμός BER φτάνει οριακά το  $10^{-3}$  που είναι το όριο του FEC. Όπως και προηγουμένως αυτό σημαίνει ότι πλέον τα λάθη μας είναι πάρα πολλά και πολύ δύσκολα γίνεται διόρθωση μέσω FEC. Ιδιαίτερα όταν το μήκος της ίνας είναι στο 1km εκεί τα λάθη είναι μη αναστρέψιμα.

Παρατηρούμε ότι επειδή έχουμε αύξηση του ρυθμού των bits υπάρχει μια επιδείνωση των eye diagrams σε σχέση με τους προηγούμενους ρυθμούς (22Gb/s και 24Gb/s). Επίσης όπως συνέβαινε και προηγουμένως, όσο αυξάνεται το μήκος της μονότροπης οπτικής ίνας έχουμε επιπλέον επιδείνωση του eye diagram πράγμα που σημαίνει ότι γίνεται πιο δύσκολος ο διαχωρισμός των συμβόλων και άρα ενδεχομένως να έχουμε προβλήματα στη μετάδοση. Ιδιαίτερα όταν το μήκος της ίνας είναι στο 1km (σχήμα 5.16) το eye diagram είναι πολύ κακό.

Εδώ να σημειώσουμε ότι οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν χωρίς να χρησιμοποιηθεί η παράμετρος FEE (feed-forward equalization). Αυτό σημαίνει ότι ενδεχομένως θα είχαμε καλύτερα αποτελέσματα σε περίπτωση που την λαμβάναμε υπόψη μας.

#### 5.1.4 Συμπεράσματα

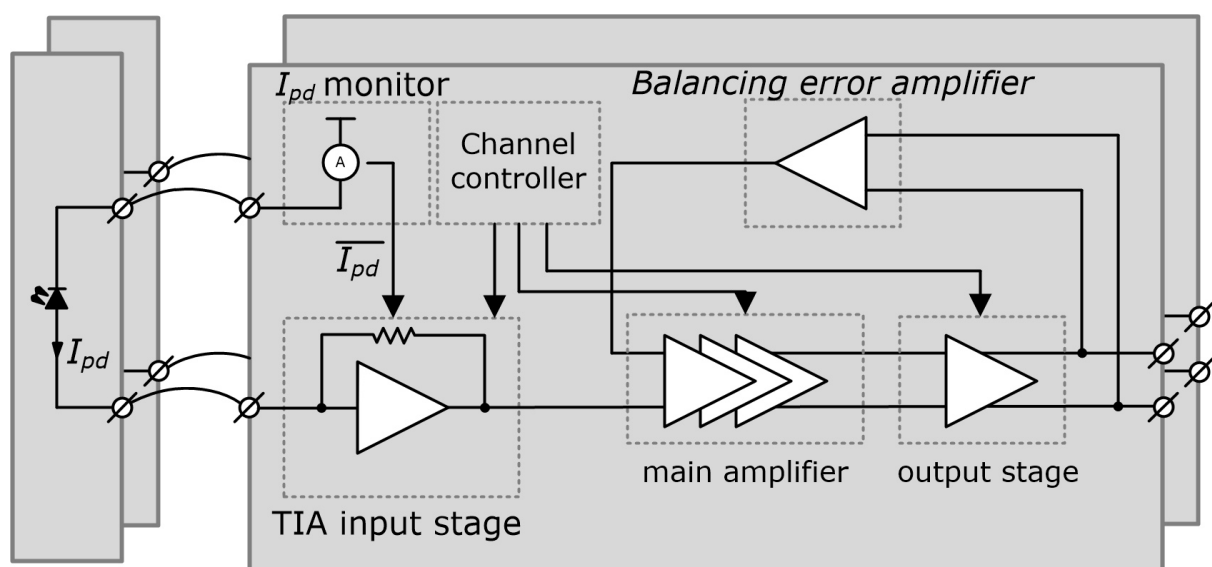
Η μετέπειτα offline επεξεργασία των μετρήσεων με την χρήση των κατάλληλων διαδικασιών εξισορρόπησης θα οδηγήσουν σε βελτίωση των παραπάνω αποτελεσμάτων. Κατά τη διάρκεια του πειράματος έγιναν μετρήσεις και για ρυθμούς υψηλότερους από τους παραπάνω (26Gb/s, 27Gb/s και 28Gb/s) στις οποίες παρατηρήθηκε ότι τα eye diagrams ήταν πάρα πολύ κλειστά και ως εκ τούτου δεν κρίθηκε χρήσιμο να τα παρουσιάσουμε. Επίσης οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν και για μήκος της οπτικής ίνας στα 2km που όμως η μετάδοση παρουσίαζε περαιτέρω έντονη επιδείνωση στο λαμβανόμενο σήμα.

## 5.2 Οπτικός Γραμμικός Δέκτης 64Gb/s PAM-4 (Linear Optical Receiver)

Στο κομμάτι αυτό θα ασχοληθούμε με έναν γραμμικό οπτικό δέκτη που βασίζεται στην τεχνολογία 130nm SiGe BiCMOS και τροφοδοτείται με διαμορφωμένα σήματα PAM-4 σε ρυθμούς μετάδοσης από 50Gb/s μέχρι 64Gb/s. Αυτές οι ταχύτητες είναι οι πιο γρήγορες που έχουν καταγραφεί μέχρι σήμερα. Ο δέκτης έχει σχεδιαστεί για μονότροπες (single-mode) συνδέσεις προκειμένου να αποφευχθούν οι περιορισμοί στο εύρος ζώνης σε σχέση με την απόσταση που παράγονται σε πολύτροπες οπτικές ίνες. Επίσης με αυτόν τον τρόπο παρουσιάζει υψηλή αξιοπιστία για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις (π.χ. σε μεγάλα datacenters). Τα στοιχεία που παρουσιάζουμε αποτελούν μέρος της δημοσίευσης [37].

### 5.2.1 Πειραματική διάταξη

Στο σχήμα 5.18 φαίνεται το απλοποιημένο block διάγραμμα του γραμμικού οπτικού δέκτη και των φωτοδιόδων. Οι φωτοδιόδοι έχουν οπτική απόκριση (συμπεριλαμβανομένης της απώλειας ζεύξης) 0.44A/W. Οι άνοδοι και οι κάθοδοι τους είναι συνδεδεμένες με σύρμα στον δέκτη, ελαχιστοποιώντας έτσι τη συνολική αυτεπαγωγή στο βρόχο και την ευαισθησία σε παρεμβολές. Ο δέκτης αποτελείται από δύο πανομοιότυπα κανάλια, οι διαύλοι δεδομένων των οποίων περιλαμβάνουν ένα στάδιο ειόδου με έναν Transimpedance Amplifier (TIA input stage) (υποενότητα 3.4.2), στη συνέχεια έναν κύριο γραμμικό ενισχυτή (main linear amplifier) και τέλος ένα γραμμικό στάδιο εξόδου (linear output stage).



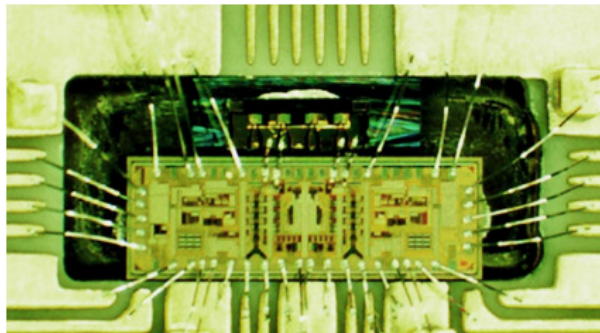
Σχήμα 5.18: Το απλοποιημένο block διάγραμμα του receiver

Το στάδιο εισόδου ΤΙΑ παρέχει χαμηλή αντίσταση εισόδου για το φωτορεύμα μέσω του κλάδου ανάδρασης της τοπολογίας του ενισχυτή. Η αντίσταση της ανάδρασης υλοποιείται από ένα nMOS transistor πολωμένο στη γραμμική περιοχή έτσι ώστε να ελέγχει το κέρδος διαεμπέδησης (transimpedance gain). Η τάση εξόδου αυτού του σταδίου εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο του κύριου ενισχυτή, ο οποίος αποτελείται από τρία εξολοκλήρου διαφορικά στάδια ενίσχυσης.

Το στάδιο εξόδου οδηγεί την διαφορική αντίσταση φορτίου των 100Ω. Επίσης εφαρμόζεται ένας βρόχος ελέγχου (control loop) χρησιμοποιώντας έναν ενισχυτή εξισορρόπησης σφαλμάτων (balancing error amplifier), ο οποίος εξαλείφει την dc συνιστώσα μεταξύ των δύο σημάτων εξόδου προσαρμόζοντας την τάση dc στην αναστρέφουσα είσοδο του κύριου ενισχυτή.

Το κανάλι ελέγχου επιτρέπει την ψηφιακή προσαρμογή του κέρδους και του εύρους ζώνης των σταδίων του δίαυλου δεδομένων και οδηγείται μέσω μιας εξωτερικής διεπαφής. Το μόνιτορ του φωτορεύματος μετράει το μέσο φωτορεύμα και πολώνει ανάλογα το στάδιο εισόδου ΤΙΑ, ενώ παρέχει 3.3V στην κάθοδο της. Επίσης παράγεται και ένα αντίγραφο αυτού του φωτορεύματος για τις ανάγκες των μετρήσεων.

Τέλος ο πυρήνας της μήτρας τροφοδοτείται με 2.5V και καταναλώνει 66mA για κάθε κανάλι. Ο ΤΙΑ έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με την τεχνολογία 130nm SiGe BiCMOS. Μια μικρογραφία της μήτρας, που συνδέεται με τις φωτοдиодους, φαίνεται στο σχήμα 5.19. Το συνολικό εμβαδόν του τσιπ είναι  $3000\mu m \times 900\mu m$ , με καθένα από τα κανάλια να καταλαμβάνει  $1100\mu m \times 900\mu m$ .



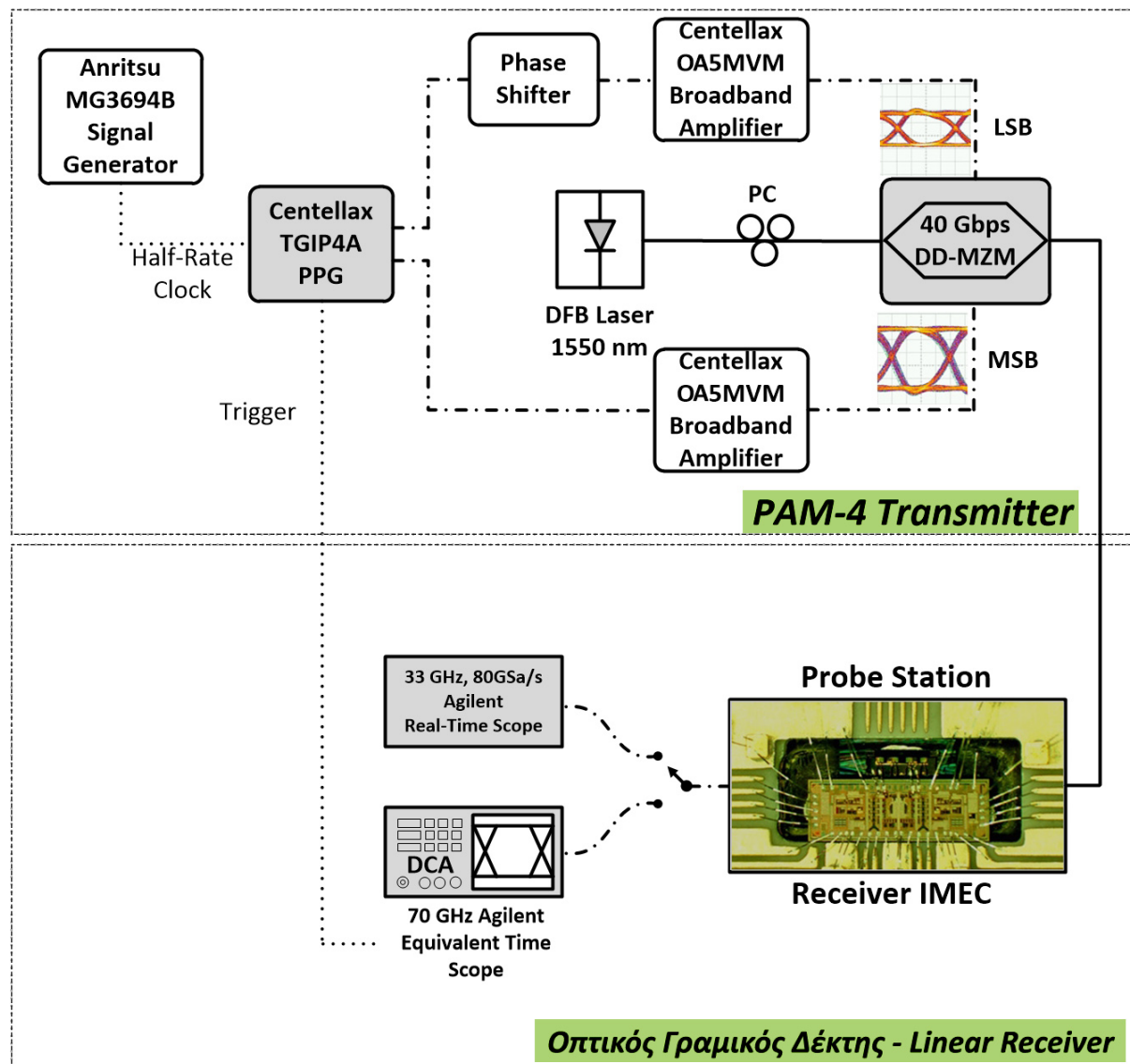
Σχήμα 5.19: Η μήτρα του receiver

### 5.2.2 Περιγραφή πειράματος

Το σχήμα 5.20 παρουσιάζει την πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση του γραμμικού δέκτη στα 25, 28 και 32 Gbaud. Το αριστερό μέρος του σχήματος 5.20 αφορά στην παραγωγή και μετάδοση του σήματος από έναν PAM-4 Transmitter που στη συνέχεια θα ανιχνευθεί

από τον γραμμικό μας δέκτη. Ο γραμμικός δέκτης φαίνεται στο δεξί μέρος του σχήματος 5.20.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε το **baud** (Bd) είναι μονάδα του ρυθμού συμβόλων, δηλαδή μεταφράζεται για παράδειγμα ως "σύμβολα ανά δευτερόλεπτο". Το κάθε σύμβολο αλλάζει ανάλογα με το είδος της διαμόρφωσης που επιλέγεται. Έτσι για διαμόρφωση PAM-4 έχουμε 4 πιθανές καταστάσεις και άρα χρειαζόμαστε 2 bits δηλαδή  $1Bd = 2bits$ .



Σχήμα 5.20: Η πειραματική διάταξη για τον receiver

### PAM-4 Transmitter

Οι συνιστώσες NRZ, που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του υπό δοκιμή PAM-4 σήματος, παράγονται από τον PPG που "κλειδώνει" στη μισή τιμή της γεννήτριας του σήματος (όπως ακριβώς αναφέραμε και στο προηγούμενο πείραμα στην ενότητα 5.1.2). Οι συμπληρωματικές NRZ έξοδοι του PPG αποσυσχετίζονται μέσω ομοαξονικών καλωδίων άνισου μή-

κους για κάθε διάυλο σήματος. Οι έξοδοι του PPG τροφοδοτούν τις κατάλληλες εισόδους ενός Ti:LiNbO<sub>3</sub> Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator (DD-MZM) παρέχοντας ως MSB και LSB εισόδους ψευδοτυχαίες ακολουθίες bit (PRBS).

Ακόμα, χρησιμοποιούνται δύο ενισχυτές ευρείας ζώνης ώστε να ρυθμιστούν τα επίπεδα της ισχύος εισόδου των MSB και LSB διαύλων δεδομένων, πριν αυτά εισέλθουν στον DD-MZM. Προκειμένου να παραχθεί ένα οπτικό σήμα PAM-4 στον DD-MZM, έπρεπε να οριστεί η τάση περίπου στα  $2/3 \cdot V_{\pi}$  και  $1/3 \cdot V_{\pi}$  για τους διαύλους MSB και LSB αντίστοιχα. Επίσης τοποθετήθηκε και ένας ηλεκτρικός μετατοπιστής φάσης στον έναν διάυλο δεδομένων για να γίνει ακριβής συγχρονισμός των ρευμάτων εισόδου στον MZM. Τέλος, ένα Distributed-Feedback (DFB) laser που εκπέμπει  $13dBm$  στα  $1550nm$  αποτελεί τον οπτικό φορέα για τον MZM.

### Γραμμικός Δέκτης (Linear Receiver)

Το οπτικό PAM-4 σήμα που παράγεται από τον MZM μεταδίδεται μέσω μονότροπης οπτικής ίνας και εισέρχεται στον **γραμμικό δέκτη** μέσω μιας κάθετης διάταξης ανίχνευσης. Για τις μετρήσεις του BER χρησιμοποιήθηκε ένας μεταβλητός οπτικός attenuator (εξασθενητής) για να ρυθμίζει την προσπίπτουσα οπτική ισχύ. Η έξοδος του δέκτη παρατηρήθηκε με τη βοήθεια ενός equivalent-time παλμογράφου της Agilent. Οι μετρήσεις του λόγου BER έγιναν μετά τη λήψη και των διαφορικών εξόδων του ληφθέντος PAM-4 σήματος μέσω ενός παλμογράφου πραγματικού χρόνου της Agilent και της μετέπειτα offline επεξεργασίας τους προκειμένου να εφαρμοστεί η συνάρτηση της οριακής τιμής στην μέτρηση του σφάλματος.

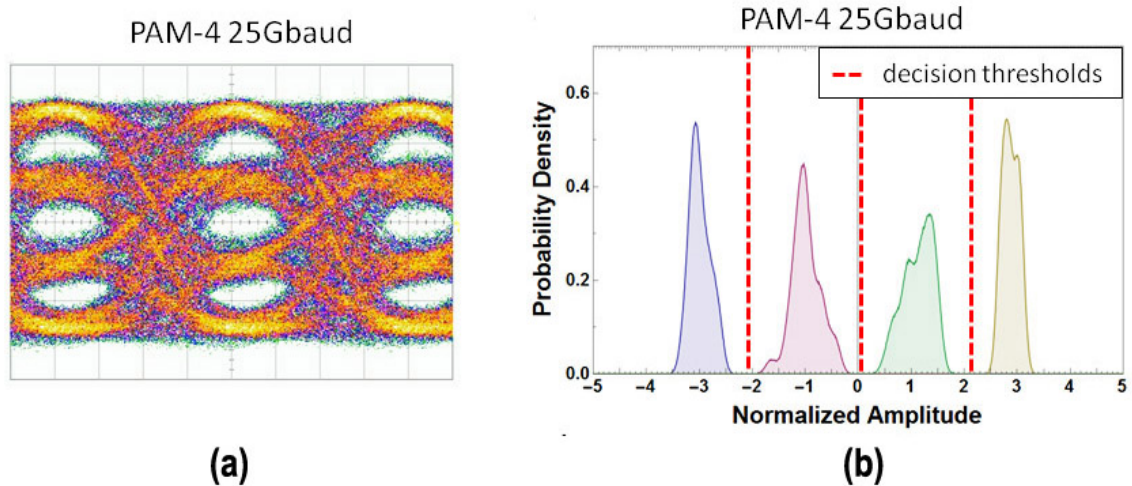
### **5.2.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός: Eye diagrams και καμπύλες BER**

Ο οπτικός γραμμικός δέκτης αξιολογήθηκε στα 25, 28 και 32 Gbaud. Τα ηλεκτρικά eye diagrams που λήφθηκαν με equivalent-time παλμογράφο φαίνονται στα σχήματα 5.21(a), 5.22(a) και 5.23(a). Η κατανομή των συμβόλων PAM-4 απεικονίζεται στα ιστογράμματα των σχημάτων 5.21(b), 5.22(b) και 5.23(b), και μετρήθηκαν μετά από την λήψη τους από τον παλμογράφο πραγματικού χρόνου, την offline επεξεργασία τους και τέλος την εκ νέου δειγματοληψία τους.

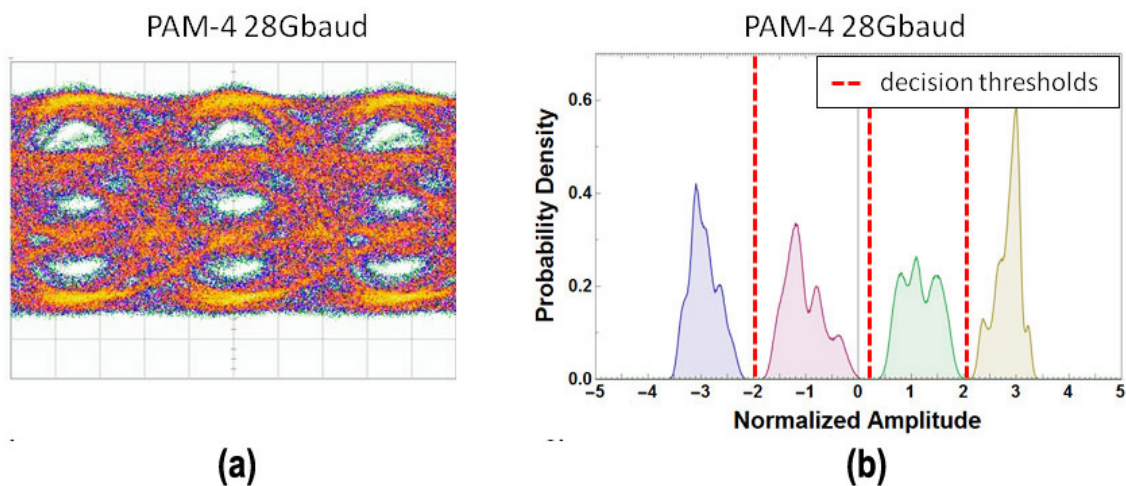
Παρατηρούμε ότι ακόμα κι όταν η επίδοση του δέκτη σταδιακά μειώνεται με την αύξηση του baud rate, τα eye diagrams είναι ακόμα αρκετά ανοιχτά για ρυθμό πάνω από τα 32 Gbaud, ενώ ο καθαρός διαχωρισμός της κατανομής των συμβόλων στα αντίστοιχα ιστογράμματα συνεπάγεται ότι έχουμε επαρκή απόδοση κατά την λήψη.

Το οπτικό σήμα PAM-4 που δημιουργήθηκε από τον MZM με άνισα πλάτη για τις συνιστώσες MSB και LSB παρουσιάζει έναν λόγο απόσβεσης (ER) περίπου  $20dB$ , ενώ η κατα-





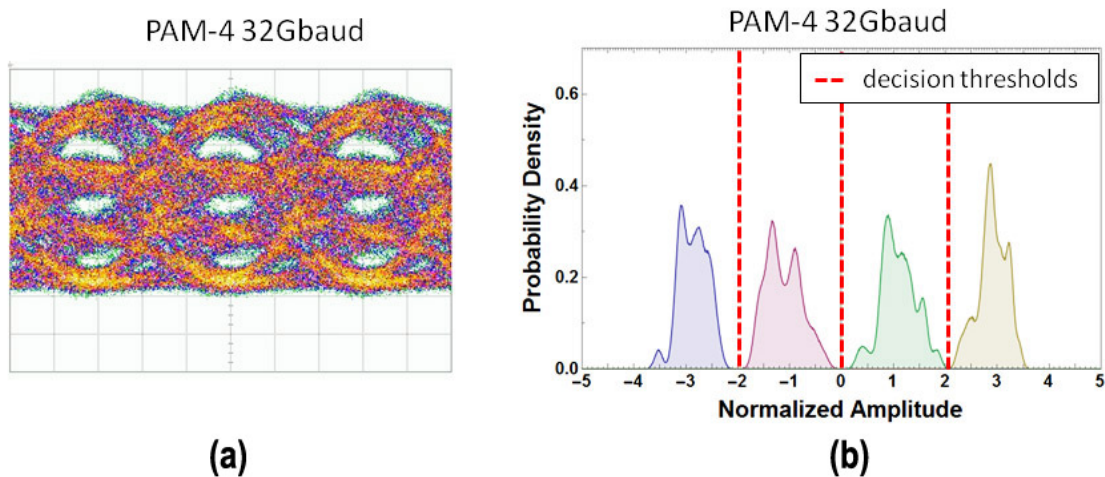
**Σχήμα 5.21:** (a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα 25Gbaud. (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για 25Gbaud



**Σχήμα 5.22:** (a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα 28Gbaud. (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για 28Gbaud

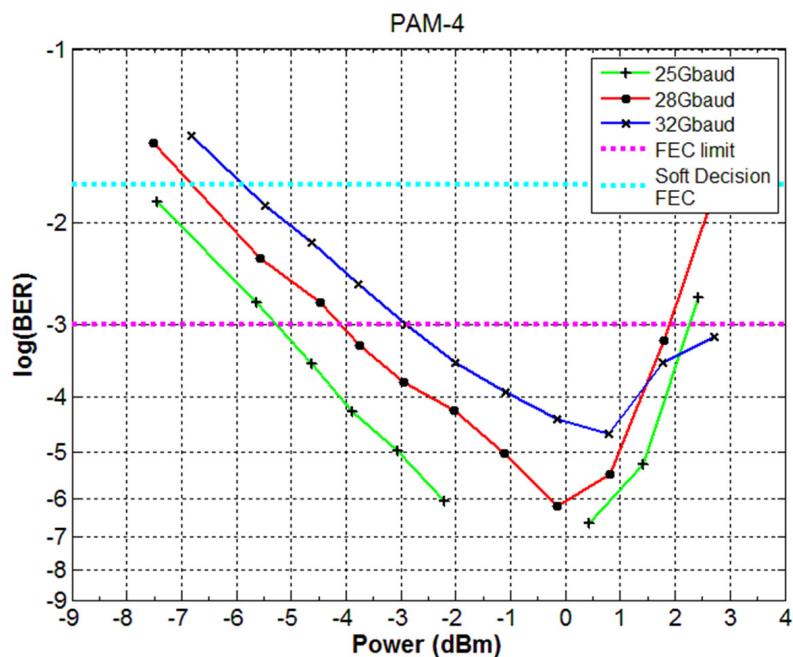
νάλωση ισχύος του TIA μετά την βελτιστοποίηση των ρυθμίσεων του δέκτη για είσοδο με τον προηγούμενο ER ήταν  $165mW$ , αποδίδοντας κατανάλωση ενέργειας  $2.578pJ/bit$  στα  $64Gb/s$ .

Οι μετρήσεις του λόγου σφαλμάτων ανά bit (Bit-error-rate BER) πραγματοποιήθηκαν στο ψηφιοποιημένο σήμα στον παλμογράφο πραγματικού χρόνου μετά από offline ανάκτηση, εκ νέου δειγματοληψία και αυτόματο καθορισμό κατωφλίου στην ανίχνευση συμβόλων, υποθέτοντας ότι έχουμε κωδικοποίηση Gray. Η απόδοση BER αξιολογήθηκε συγκρίνοντας το λαμβανόμενο δείγμα σήματος με την αρχική ακολουθία δυαδικών ψηφίων (bit) και καταμετρώντας τα πραγματικά σφάλματα συμβόλων που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της λήψης. Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι η περιορισμένη δυνατότητα απόκτησης δεδομένων ενός παλμογράφου πραγματικού χρόνου ( $1.28 \times 10^7 bits$  στα  $25Gbaud$ ) έθεσαν ένα αντίστοιχο



**Σχήμα 5.23:** (a) Eye diagram του σήματος εξόδου του receiver για ταχύτητα 32Gbaud. (b) Ιστογράφημα των συμβόλων για 32Gbaud

περιορισμό στις χαμηλότερες μετρήσιμες τιμές του BER.



**Σχήμα 5.24:** Οι καμπύλες του BER που υπολογίστηκαν μετά από ψηφιοποίηση του σήματος, offline ανάκτηση, αναδειγματοληψία και αυτόματο καθορισμό κατωφλίου στην ανίχνευση συμβόλου

Το σχήμα 5.24 παρουσιάζει τις μετρήσεις των καμπυλών BER για σήματα εισόδου στα 25, 28 και 32 Gbaud σε σχέση με την μέση λαμβανόμενη οπτική ισχύ, που προέκυψε από τις μετρήσεις του φωτορεύματος. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, σε ρυθμό 25 Gbaud και με τη μέση λαμβανόμενη οπτική ισχύ να κυμαίνεται μεταξύ  $-2\text{dBm}$  και  $0.4\text{dBm}$ , το λαμβανόμενο σήμα παρουσιάζει μηδενικά σφάλματα, πράγμα που αντιστοιχεί σε πάνω από 95% του

ορίου αξιοπιστίας των  $2.9 \times 10^{-7}$ . Είναι καθαρό ακόμα και στα 32 Gbaud η χαμηλότερη τιμή που μετρήθηκε για το BER βρίσκεται αρκετά καλά κάτω από το όριο του FEC, πράγμα που αποδεικνύει την επαρκή λειτουργία του γραμμικού δέκτη.

#### 5.2.4 Συμπεράσματα

Παρουσιάστηκε ένας γραμμικός δέκτης που κατασκευάστηκε σύμφωνα με την τεχνολογία 130nm SiGe BiCMOS, λειτουργώντας σε γραμμές με ρυθμό μετάδοσης 50Gb/s, 56Gb/s και 64Gb/s με διαμόρφωση PAM-4. Ο δέκτης κατανάλωσε 165mW, αποδίδοντας κατανάλωση ενέργειας 2.578pJ/bit στα 64Gb/s. Σε όλες τις περιπτώσεις επετεύχθη η λειτουργία του κάτω από το όριο FEC, αποδεικνύοντας έτσι την καταλληλότητα του δέκτη για τις μελλοντικές οπτικές διασυνδέσεις με ταχύτητες μετάδοσης πάνω από τα 50Gb/s.

### 5.3 Μελλοντικές προοπτικές

Είναι σαφές ότι τα προηγούμενα κυκλώματα πομπού και δέκτη αποτελούν αντικείμενα συνεχούς περαιτέρω έρευνας με σκοπό την μεγαλύτερη απόδοσή τους ώστε να ανταποκριθούν στις αυξανόμενες ανάγκες για εύρος ζώνης και ταχύτητα. Είναι δυνατή η προσαρμογή τους σε ένα ολοκληρωμένο οπτικό σύστημα επικοινωνίας που να προσεγγίζει πολύ υψηλές ταχύτητες και να έχει εφαρμογή σε οπτικά δίκτυα κέντρων δεδομένων. Προφανώς όσο η οπτική τεχνολογία εξελίσσεται αυτές οι δομές θα διαδραματίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο στις επικοινωνίες.



# Βιβλιογραφία

- [1] Gerd Keiser - Optical Fiber Communications 4th edition, Tata McGraw-Hill, 2008
- [2] Towards a Bright Future for Europe, Strategic Research Agenda in Photonics - European Technology Platform Photonics21 , April 2006
- [3] Ηρακλής Αβραμόπουλος - Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
- [4] Ronald D. Schaeffer - Fundamentals of Laser Micromachining, CRC Press, New York, 2012
- [5] Richard S. Quimby - Photonics and Lasers , Wiley, Hoboken, New Jersey, 2006
- [6] Orazio Svelto - Principles of Lasers (5th edition) , Springer, 2010
- [7] P. Milonni, J. Eberly - Laser Physics, Wiley, 2010
- [8] Harry J. R. Dutton - Understanding Optical Communications, IBM, 1998
- [9] William T. Silfvast, Laser Fundamentals, Cambridge
- [10] E. Siegman, Lasers, University Science Book, 1st Edition, California, 1986
- [11] Ηλίας Γλύτσης, Βασική Θεωρία Λειτουργίας των Laser, Σημειώσεις, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
- [12] Rajiv Ramaswami, Kumar N. Sivarajan, Galen H. Sasaki - Optical Networks, A Practical Perspective 3rd Edition, Morgan Kaufmann Publishers, ELSEVIER Inc, 2010
- [13] Rainer Michalzik - VCSELs: Fundamentals, Technology and Applications of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Springer, 2013
- [14] Μινόγλου Κυριακή, Οπτικοηλεκτρονικά κυκλώματα υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωσης για υψίρρυθμα φωτονικά μικροσυστήματα, Διδακτορική Διατριβή, ΕΚΠΑ, Αθήνα, Μάρτιος 2007
- [15] Govind P. Agrawal - Fiber-Optic Communication Systems (3rd edition), Wiley-Interscience, 2002

- [16] Francesco De Leonardis, Vittorio M. N. Passaro, Francesca Magno - Improved simulation of VCSEL distributed Bragg reflectors, Springel Science, 18 January 2007
- [17] V. M. N. Passaro, F. Magno, A. Rizzato, and F. De Leonardis - Analysis of VCSEL Distributed Bragg Reflectors by the Floquet–Bloch Theory. Περιλαμβάνεται στο Laser Physics, Vol. 16, No. 7, σελίδες 1029–1038, © MAIK “Nauka /Interperiodica” (Russia), 2006.
- [18] Robert W. Herrick - Reliability and Degradation of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers | Κεφάλαιο 6 από: Osamu Ueda, Stephen J. Pearton - Materials and Reliability Handbook for Semiconductor Optical and Electron Devices, Springer Science, 2013
- [19] Kenichi Iga - Surface-Emitting Laser – Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field (Invited Paper), IEEE JOURNAL ON SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 6, NOVEMBER/DECEMBER 2000
- [20] Krzysztof Szczerba, Multilevel modulation in short-range optical links (Thesis for the degree of Doctor of Philosophy), Photonics Laboratory Department of Microtechnology and Nanoscience (MC2), Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013
- [21] J.G. Proakis, M. Salehi, Fundamentals of Communication Systems (Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2005)
- [22] S. Benedetto, E. Biglieri, Principles of Digital Transmission with Wireless Applications (Kluwer/Plenum, New York, 1999)
- [23] H. Zimmermann, Integrated Silicon Optoelectronics (Springer, Berlin, 2000)
- [24] M. Atef, R. Swoboda, H. Zimmermann, A front-end optical receiver for multi-level data transmission, in Informationstagung Mikroelektronik (ME2008), 2008
- [25] M. Atef, R. Swoboda, H. Zimmermann, 1 Gbit/s transmission over step-index plastic optical fiber using an optical receiver with an integrated equalizer. Opt. Commun. 2011
- [26] Εγχειρίδιο ACTIVE OPTICAL CABLE (AOC) 40GB/S QSFP+ ACTIVE OPTICAL CABLE ASSEMBLY - Fiberon Technologies. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα [http://www.fiberon.com/news\\_files/pdf/F4M-AOC-QSFP-web.pdf](http://www.fiberon.com/news_files/pdf/F4M-AOC-QSFP-web.pdf)
- [27] Steffen Koehler - Active Optical Cables for InfiniBand QDR and FDR, © Finisar Corporation, Seattle, 2011. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα [www.finisar.com](http://www.finisar.com)
- [28] Rober Hult - Active Optical Cables Go the Distance, Connector and Cable Assembly Supplier, 2015. Διαθέσιμο στην

- ιστοσελίδα <http://www.connectorsupplier.com/active-optical-cables-go-the-distance>
- [29] Hong Liu, Cedric F. Lam, and Chris Johnson - Scaling Optical Interconnects in Datacenter Networks. Opportunities and Challenges for WDM - Mountain View, CA, Google Inc. 2010
- [30] Luiz André Barroso and Urs Hölzle - The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, Morgan & Claypool, 2009
- [31] Christoforos Kachris, Keren Bergman, Ioannis Tomkos - Optical Interconnects for Future Data Center Networks, Springer Science, 2013
- [32] Agilent Technologies, Network Analyzer Basics, USA, Inc. 2004. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: [www.agilent.com/find/backtobasics](http://www.agilent.com/find/backtobasics)
- [33] Ελένη Κοσμά - Πειραματική Μελέτη και Αξιολόγηση Ταχύρυθμων Laser Κάθετης Κοιλότητας για Υλοποίηση Οπτικών Διασυνδέσεων σε Υπολογιστικά Συστήματα, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2014
- [34] Mohamed Atef, Horst Zimmermann - Optical Communication over Plastic Optical Fibers, Intergrated Optical Receiver Technology, Springer, Berlin, 2013
- [35] K. Schneider, H. Zimmermann - Highly Sensitive Optical Receivers, Springer, 2006
- [36] Francisco Aznar, Santiago Celma, Belén Calvo - CMOS Receiver Front-ends for Gigabit Short-Range Optical Communications, Springer, 2013
- [37] Bart Moeneclaey, Giannis Kanakis, Jochen Verbrughe, Nikos Iliadis, Wouter Soenen, Dimitrios Kalavrouziotis, Christos Spatharakis, Stefanos Dris, Xin Yin, Paraskevas Bakopoulos, Elad Mentovich, Hercules Avramopoulos, and Johan 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.
- [38] K. Zoiros, K. Vlachos, T. Stathopoulos, C. Bintjas and H. Avramopoulos, 40GHz Mode Locked SOA Fiber Ring Laser with 20nm Tuning Range, 2000
- [39] Towards 2020 – Photonics driving economic growth in Europe, Photonics Multiannual Strategic Roadmap 2014-2020: [http://www.photonics21.org/download/Brochures/Photonics\\_Roadmap\\_final\\_lowres.pdf](http://www.photonics21.org/download/Brochures/Photonics_Roadmap_final_lowres.pdf)
- [40] Photonics Technologies and Markets for a Low Carbon Economy, European Commission's study SMART 2010/0066, <http://www.photonics21.org/download/Brochures/Photonics21-Internet.pdf>
-

- [41] The leverage effect of photonics technology: the European perspective, European Commission's study SMART 2009/0066, [http://www.photonics21.org/download/Leverage\\_Internetversion.pdf](http://www.photonics21.org/download/Leverage_Internetversion.pdf)
-



