



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

**Πειραματική αξιολόγηση ταχύρυθμων LASER κάθετης
κοιλότητας με χρήση τεχνικών διαμόρφωσης παλμού για την
υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων σε κέντρα υπολογιστικών
συστημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Ν. Κουρσάρης

Επιβλέπων : Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2016



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

**Πειραματική αξιολόγηση ταχύρυθμων LASER κάθετης
κοιλότητας με χρήση τεχνικών διαμόρφωσης παλμού για την
υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων σε κέντρα υπολογιστικών
συστημάτων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπυρίδων Ν. Κουρσάρης

Επιβλέπων : Ηρακλής Β. Αβραμόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14^η Ιουλίου 2016

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

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

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Σπυρίδων Ν. Κουρσάρης

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

Copyright © Σπυρίδων Κουρσάρης 2016.

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 αφορά την πειραματική αξιολόγηση LASER κάθετης κοιλότητας για την υλοποίηση οπτικών διασυνδέσεων με χρήση τεχνικών διαμόρφωσης παλμού για κέντρα υπολογιστικών συστημάτων. Τα πρώτα κεφάλαια αποτελούν το επιστημονικό υπόβαθρο, το οποίο οδηγεί στην καλύτερη κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας και αποτελεσμάτων.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την Φωτονική τεχνολογία και τις οπτικές επικοινωνίες. Εν συνεχεία αναλύεται η δομή και ο τρόπος λειτουργίας των κέντρων δεδομένων, ενώ γίνεται αναφορά και στις οπτικές διασυνδέσεις οι οποίες αρχίζουν να κυριαρχούν στα πιο προηγμένα υπολογιστικά κέντρα δεδομένων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανάλυση του τρόπου διάδοσης του φωτός στις οπτικές ίνες, με έμφαση στην πόλωση του ΗΜ πεδίου.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στα lasers, τον τρόπο λειτουργίας τους και τις ιδιότητες του φωτός που εκπέμπουν. Επικεντρωνόμαστε στα laser κάθετης κοιλότητας(VCSEL) και τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν για υλοποιήσεις διασυνδέσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές με τις οποίες επιτυγχάνεται η διαμόρφωση παλμού, αλλά και τα διάφορα σχήματα πολυπλεξίας που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται φίλτρα και ο τρόπος που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις οπτικές επικοινωνίες για να βελτιωθεί η ποιότητα του σήματος.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζουμε την πειραματική διαδικασία καθώς και τις πειραματικές μετρήσεις για δύο διατάξεις. Η πρώτη αφορά την άμεση διαμόρφωση VCSEL, ενώ η δεύτερη την δημιουργία σήματος PAM-4 με τεχνικές πολυπλεξίας πόλωσης. Επιπλέον γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και παράθεση όλων των απαραίτητων διαγραμμάτων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Φωτονική, Υπολογιστικά κέντρα, Διασυνδέσεις, LASER, VCSEL, Διαμόρφωση παλμού, RRC, Πολυπλεξία Πόλωσης



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
PHOTONICS COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY

**Experimental evaluation of high speed Vertical Cavity
Surface Emitting LASERs with the use of pulse shaping
techniques for the implementation of optical interconnects
in data centers**

Diploma Thesis

Spyridon N. Koursaris

Supervisor: Hercules Avramopoulos, Professor NTUA

Athens, July 2016

Abstract

This diploma thesis concerns the experimental evaluation of vertical cavity surface emitting LASERS with the use of pulse shaping techniques for the implementation of optical interconnects in datacenters. The first chapters are the scientific background , which lead to a better understanding of the experimental procedure and results.

The first chapter presents general data for the technology of Photonics and optical communications . Then the structure and the way data center operate is analyzed. Also we stress the importance of optical interconnects that begin to dominate the most advanced datacenters.

The second chapter is a brief analysis of how the light propagates in optical fibers, with emphasis on the polarization of the EM field.

The third chapter is an extensive reference to lasers, the way they function and the properties of the light they emit. We focus on the vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) and its advantages in implementations for interfaces.

The fourth chapter presents the techniques with which pulse modulation is achieved, but also the various multiplexing schemes used in optical communications.

The fifth chapter presents filters and how they can be used in optical communications to improve the signal quality.

The sixth and final chapter presents the experimental procedure and measurements for two different setups. The first regards the direct modulation of a VCSEL, while the second regards the generation of a PAM-4 signal with the use of polarization multiplexing techniques. Furthermore, we analyze the quality of the experimental results and include all the necessary diagrams.

KEYWORDS

Photonics, Data centers, Interconnects, LASER, VCSEL, Pulse Shaping, RRC, PMD

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του ακαδημαϊκού έτους 2016, 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.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χωρίς την πολύτιμη βοήθειά τους, θα ήταν δύσκολη η ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ 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.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στους υποψήφιους διδάκτορες Νίκο Ηλίαδη και Γιάννη Κανάκη για τις πολύτιμες επισημάνσεις, την καθοδήγηση και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Κωνσταντίνο Τόκα γιατί ήταν ο αυτός που μου έδωσε το έναυσμα για την εκπόνηση της διπλωματικής

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την πολύτιμη στήριξη της καθώς και τους φίλους και συμφοιτητές με τους οποίους δουλέψαμε και ζήσαμε μαζί αυτά τα μοναδικά χρόνια.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	21
1.1. Φωτονική.....	21
1.2. Data Centers- Interconnects	22
2. Κυματοδήγηση και πόλωση	27
2.1. Η διάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες	27
2.2. Πόλωση	29
3. Laser και Vcsel.....	32
3.1. Laser	32
3.1.1. Εισαγωγικά	32
3.1.1.1. Αυθόρμητη κι εξαναγκασμένη εκπομπή, απορρόφηση.....	33
3.1.2. Η δομή του laser	34
3.1.2.1. Ενεργό μέσο	34
3.1.2.2. Οπτική κοιλότητα	35
3.1.2.3. Αντληση.....	35
3.1.3. Ιδιότητες των δεσμών laser.....	36
3.1.3.1. Μονοχρωματικότητα	36
3.1.3.2. Συμφωνία (Coherence).....	36
3.1.3.3. Κατευθυντικότητα.....	38
3.1.3.4. Ένταση – Intensity	39
3.1.3.5. Παλμοί μικρής χρονικής διάρκειας	39
3.2. VCSEL	39
3.2.1. Δομή.....	39
3.2.1.1. Ενεργός περιοχή.....	40
3.2.1.2. DBR	40
3.2.1.3. Confinement.....	42
3.2.2. VCSEL Characterization	44
3.2.2.1. LIV Curve	44
3.2.2.2. Παράμετροι Διασποράς (Scattering parameters, S parameters)	46
4. External και direct modulation.....	49
4.1. Modulation εισαγωγικά.....	49

4.1.1.	Απαιτήσεις των τεχνικών διαμόρφωσης.....	50
4.1.1.1.	Ταχύτητα λειτουργίας	50
4.1.1.2.	Λόγος απόσβεσης	51
4.1.1.3.	Frequency chirping.....	51
4.2.	External και direct modulation.....	52
4.3.	Τεχνικές External Modulation	53
4.3.1.	Electrooptic and Magneto optic Effects.....	53
4.3.2.	Electro-Absorption Effects	54
4.3.3.	Acoustic Modulators	54
4.4.	Multiplexing	55
4.4.1.	TDM (Time Division Multiplexing).....	55
4.4.2.	SCM (Sub Carrier multiplexing)	56
4.4.3.	CDM (CODE Divison Multiplexing)	56
4.4.4.	WDM (Wavelength Division Multiplexing).....	57
4.4.5.	PDM (Polarization division multiplexing).....	57
5.	Filter theory	59
5.1.	Εισαγωγικά.....	59
5.2.	Ορθογωνικός παλμός	59
5.3.	Φίλτρα	62
5.3.1.	Raised Cosine Filter	62
5.3.1.1.	Στο πεδίο της συχνότητας.....	62
5.3.1.2.	Στο πεδίο του χρόνου	64
5.3.2.	Root raised cosine	65
5.3.3.	Gaussian Filter	66
4.4	Digital filters	67
6.	Πειραματική διαδικασία.....	71
6.1.	Παθητικές Μετρήσεις	71
6.2.	Τρόπος ποιοτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων	74
6.3.	VCSEL Direct Modulation	77
6.3.1.	Πειραματική διάταξη	77
6.3.2.	Πειραματικά αποτελέσματα.....	81

6.4. PAM-4 με τη χρήση PDM	84
6.4.1. Πειραματική διάταξη	84
6.4.2. Πειραματικά αποτελέσματα.....	85
6.5. Συμπεράσματα-Μελλοντικές προοπτικές	89
Βιβλιογραφία	90

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1.1	Βασικό σχήμα για data center 3 επιπέδων	22
Σχήμα 1.2	Τα χαρακτηριστικά της κίνησης σε ένα data center	23
Σχήμα 1.3	Σύγκριση ανάμεσα σε καλώδια Laserwire TM AOC,RJ-45 και CX4.....	24
Σχήμα 1.4	Διάγραμμα ενεργού οπτικού καλωδίου	24
Σχήμα 1.5	Διάγραμμα ενός Active Optical Cable	26
Σχήμα 2.1	Τομή μιας μονότροπης οπτικής ίνας.....	27
Σχήμα 2.2	Η πορεία που ακολουθεί το φως	28
Σχήμα 2.3	Η πορεία που ακολουθεί η ακτίνα όταν κυματοδηγείται στην ίνα.....	29
Σχήμα 2.4	Τα είδη της πόλωσης	30
Σχήμα 2.5	Σχηματικά η λειτουργία του πολωτικού φίλτρου	31
Σχήμα 3.1	Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε το 1960,.....	32
Σχήμα 3.2	(a) Αυθόρμητη εκπομπή, (b) εξαναγκασμένη εκπομπή (c)απορρόφηση ..	34
Σχήμα 3.3	Η βασική γεωμετρία της οπτικής κοιλότητας.....	35
Σχήμα 3.4	Μέτωπα σφαιρικών επιπέδων κυμάτων	36
Σχήμα 3.5	Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας τ_0	37
Σχήμα 3.6	Κοκκίωση δέσμης laser	38
Σχήμα 3.7	Η βασική δομή του VCSEL.....	40
Σχήμα 3.8	Δομή DBR	41
Σχήμα 3.9	Τρεις μέθοδοι για τον περιορισμό του ρεύματος.....	42
Σχήμα 3.10	VCSEL Wafer.....	44
Σχήμα 3.11	Παράδειγμα καμπύλης LIV	45
Σχήμα 3.12	Οι εξισώσεις των παραμέτρων H,Y,Z	46
Σχήμα 3.13	Οι S-parameters για ένα δίθυρο	47
Σχήμα 3.14	Υπολογισμός των παραμέτρων S_{11} και S_{21}	47
Σχήμα 3.15	Υπολογισμός των παραμέτρων S_{22} και S_{12}	48
Σχήμα 4.1	ASK, FSK και PSK	49
Σχήμα 4.2	Διάγραμμα με τις τεχνικές NRZ και RZ για την ίδια ροή bit.....	50
Σχήμα 4.3	Άμεση και εξωτερική διαμόρφωση	53
Σχήμα 4.4	Συμβολόμετρο Mach-Zehnder.....	54
Σχήμα 4.5	Παράδειγμα συστήματος TDM	55
Σχήμα 4.6	Πολυπλεξία υποφέροντος	56
Σχήμα 4.7	Παράδειγμα πολυπλεξίας κώδικα.....	56
Σχήμα 4.8	Παράδειγμα συστήματος point to point WDM	57
Σχήμα 4.9	Διαμόρφωση και πολυπλεξία στις οπτικές επικοινωνίες.....	58
Σχήμα 5.1	Ορθογωνικός παλμός	59
Σχήμα 5.2	Διασυμβολική παρεμβολή	60
Σχήμα 5.3	Το φάσμα ενός ορθογωνικού παλμού με περίοδο T_0	61
Σχήμα 5.4	Η απόκριση του raised cosine στο πεδίο της συχνότητας	63
Σχήμα 5.5	Η απόκριση του raised cosine στο πεδίο του χρόνου	65
Σχήμα 5.6	Γραφική αναπαράσταση της απόκρισης του γκαουσιανού φίλτρου	66

Σχήμα 5.7 Παράδειγμα δομής FIR.....	67
Σχήμα 5.8 RRC για $\alpha.128$ σημεία $\beta.64$	68
Σχήμα 5.9 Το φάσμα που προκύπτει με την χρήση του RRC.....	69
Σχήμα 5.10 Ανεπιθύμητο φασματικό περιεχόμενο ειδικά για λίγα “taps”	70
Σχήμα 6.1 Κοντινή φωτογραφία του RF probe tip	71
Σχήμα 6.2 Καμπύλες LIV για τον κάθε άξονα πόλωσης	72
Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για s-parameters	73
Σχήμα 6.4 Οι μεταβάσεις των διαδοχικών ψηφίων.....	74
Σχήμα 6.5 Ενδεικτικά 2 διαγράμματα ‘ματιού’	75
Σχήμα 6.6 Καμπύλες BER για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης	76
Σχήμα 6.7 Η εφαρμογή της τεχνολογίας FEC στις οπτικές επικοινωνίες.....	76
Σχήμα 6.8 Η πειραματική διάταξη της ταχύρυθμης άμεσης διαμόρφωσης VCSEL ..	77
Σχήμα 6.9 Παλαιότερη διάταξη για την αξιολόγηση του πομπού	77
Σχήμα 6.10 Η δομή μιας φωτοδιόδου PIN.....	80
Σχήμα 6.11 Η βασική δομή ενός Transimpedance Amplifier (TIA)	81
Σχήμα 6.12 32 Gbaud σε διάταξη back-to-back	82
Σχήμα 6.13 32 Gbaud μετά από διάδοση 500 μέτρων	82
Σχήμα 6.14 40 Gbaud σε διάταξη back-to-back	83
Σχήμα 6.15 Καμπύλες BER στα 32 και 40 Gbaud.....	84
Σχήμα 6.16 Η διάταξη του δεύτερου πειράματος	85
Σχήμα 6.17 28 Gb/s back-to-back με polarization multiplexing.....	86
Σχήμα 6.18 28Gb/s μετά από διάδοση 500 μέτρων με polarization multiplexing.....	86
Σχήμα 6.19 28 Gb/s back-to-back με direct modulation.....	87
Σχήμα 6.20 28Gb/s μετά από διάδοση 500 μέτρων με direct modulation	87
Σχήμα 6.21 Καμπύλες BER για την μέθοδο του polarization multiplexing	88

Λίστα σχέσεων

Σχέση 2.1 Νόμος του Snell	28
Σχέση 2.2 Η οριακή γωνία ολικής ανάκλασης	28
Σχέση 2.3 Μέγιστη γωνία διάθλασης για είσοδο σε ίνα.....	29
Σχέση 2.4 Μέγιστη γωνία εισόδου στην ίνα.....	29
Σχέση 2.5 Κάθετες συνιστώσες ΗΜ κύματος στην ίνα.....	29
Σχέση 3.1 Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου	34
Σχέση 3.2 Δείκτης ανάκλασης σε διαχωριστική επιφάνεια.....	40
Σχέση 3.3 Δείκτης ανάκλασης πολλαπλών ζεύγων	41
Σχέση 3.4 Υπολογισμός S_{11} και S_{21}	47
Σχέση 3.5 Υπολογισμός S_{22} και S_{12}	48
Σχέση 4.1 Το οπτικό φέρον.....	49
Σχέση 4.2 Λόγος απόσβεσης	51
Σχέση 4.3 Στιγμαία συχνότητα φέροντος	51
Σχέση 5.1 Απόκριση φίλτρου Raised cosine στην συχνότητα	62
Σχέση 5.2 Συχνότητα αποκοπής φίλτρου Raised cosine	64
Σχέση 5.3 Συχνότητα pass-band φίλτρου Raised cosine	64
Σχέση 5.4 Απόκριση φίλτρου Raised cosine στον χρόνο	64
Σχέση 5.5 Απόκριση φίλτρου Root Raised cosine στην συχνότητα.....	66
Σχέση 5.6 Απόκριση φίλτρου Gaussian στον χρόνο.....	66
Σχέση 6.1 BER.....	75

1. Εισαγωγή

1.1. Φωτονική

Η χρήση του φωτός για την μετάδοση πληροφορίας δεν είναι κάτι καινούριο. Η μετάδοση σημάτων με τη χρήση φωτιάς και καπνού ήταν διαδεδομένη χιλιάδες χρόνια πριν. Η ιδέα της χρήσης γυάλινης ίνας για την μετάδοση οπτικών σημάτων διατυπώθηκε πριν το 1900. Έπρεπε να περάσουν όμως 80 χρόνια και η αλματώδης ανάπτυξη τεχνολογιών στην παραγωγή ηλεκτρονικών και καλύτερων ινών ώστε να αρχίζει αυτή η ιδέα να εφαρμόζεται στην πράξη. Η μεγαλύτερη αλλαγή τελικά ήρθε στην δεκαετία του 1980 όταν οι οπτικές επικοινωνίες έφυγαν από την περιοχή του καθαρά ερευνητικού τομέα και έγιναν η κυρίαρχη τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι οπτικές επικοινωνίες δεν είναι σαν τις ηλεκτρονικές. Το φως δεν ταξιδεύει μέσα στις ίνες όπως το ηλεκτρικό σήμα μέσα από ένα καλώδιο, αλλά είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα και η ίνα ο κυματοδηγός.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που εισάγουν οι οπτικές επικοινωνίες είναι:

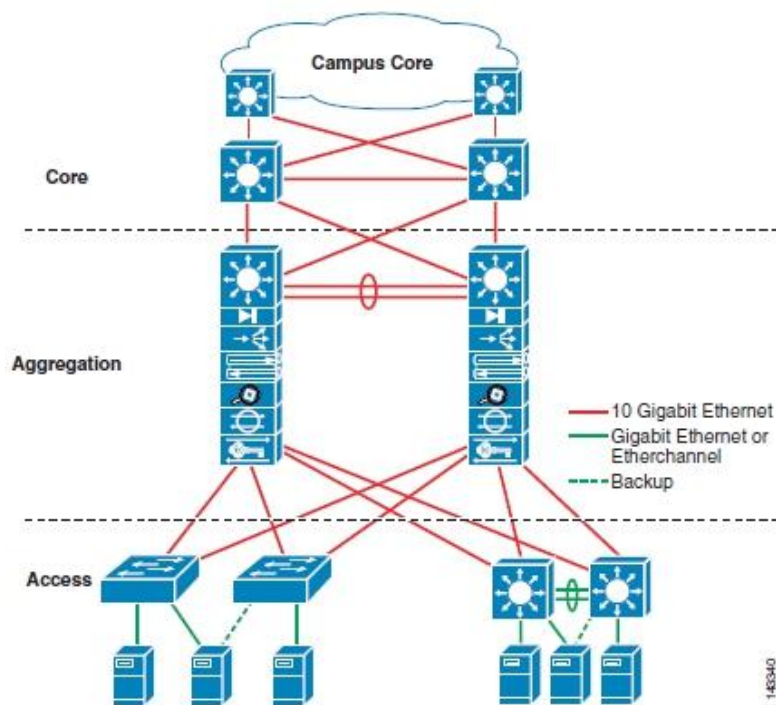
- *Κόστος υλικών:* Η οπτική ίνα κοστίζει σημαντικά λιγότερο από ότι ένα χάλκινο καλώδιο ίδιας χωρητικότητας
- *Χωρητικότητα:* Τα 10 Gbps που αποτελούν πλέον μια συνηθισμένη ταχύτητα διασύνδεσης μεταξύ συστημάτων σε data centers επιτυγχάνονται εύκολα με μία μονότροπη οπτική ίνα. Σε πολυκάναλα συστήματα με διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας ερευνητές έχουν καταφέρει να φτάσουν ρυθμούς μετάδοσης που ξεπερνούν τα 2 Tbps.
- *Λιγότερες ηλεκτρικές διασυνδέσεις:* Παρ'ότι προφανές, είναι σημαντικό ότι μειώνονται οι κίνδυνοι για βραχυκυκλώματα.
- *Χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές:* Σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά καλώδια όπου εισάγεται θόρυβος στο σήματα από αναρίθμητες πλέον πηγές, στις οπτικές είναι υπάρχουν ελάχιστες πηγές παρεμβολής και για αυτό το λόγο εμφανίζουν πολύ λίγα λάθη κατά τη μετάδοση.
- *Απόσταση μεταξύ επαναληπτών:* Λόγω της μεγάλης απόσβεσης που έχουν τα χάλκινα καλώδια πρέπει να τοποθετούνται επαναλήπτες τουλάχιστον κάθε 40 χιλιόμετρα. Με τις ίνες πυριτίου αυτή η απόσταση ξεπερνάει τα 100.
- *Ασφάλεια:* Είναι πολύ δύσκολο κάποιος να υποκλέψει το προς μετάδοση σήμα αφού αυτή η διαδικασία εισάγει παραπάνω απώλειες ισχύος που εύκολα παρατηρούνται από τον διαχειριστή του δικτύου.

Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποιοι περιορισμοί:

- *Λύγισμα ίνας:* Για να συνεχίσει να μεταδίδεται το οπτικό σήμα στην ίνα αυτή δεν θα πρέπει η ίνα να έχει λυγίσει παραπάνω από ένα επιτρεπόμενο όριο.
- *Αργή καθιέρωση προτύπων:* Παρά την πολύ γρήγορη ανάπτυξη της τεχνολογίας είναι πολλές φορές δύσκολο να υπάρξει συμφωνία για ένα παγκόσμιο πρότυπο το οποίο θα μπορεί να ενσωματωθεί για ποικίλες χρήσεις.
- *Οπτικό σήμα μόνο στην μετάδοση:* Λόγω της δυσκολίας στην ανάπτυξη λογικών οπτικών συστημάτων το σήμα πρέπει συνέχεια να μετατρέπεται από οπτικό σε ηλεκτρικό, αυξάνοντας τις συνολικές απαιτήσεις σε ισχύ.
- *Ηλεκτρικά πεδία:* Τα ηλεκτρικά πεδία υψηλής τάσης όπως και οι ακτίνες γ μπορούν να προκαλέσουν εκπομπή φωτός σε κάποια είδη γυαλιού.[1]

1.2. Data Centers- Interconnects

Το data center αποτελεί την στέγη όλης της υπολογιστικής ισχύος, του αποθηκευτικού χώρου και των εφαρμογών που χρειάζεται κάθε εμπορική επιχείρηση. Από αυτό προέρχονται και περνούν κρίσιμα δεδομένα για αυτό και είναι πολύ σημαντικός ο σωστός σχεδιασμός τους για να επιτυγχάνεται η επιθυμητή απόδοση, ανθεκτικότητα αλλά και η δυνατότητα εκσυγχρονισμού του στο μέλλον. Το σύγχρονο data center δομείται σε τρία επίπεδα, αφού αυτού του είδους ο σχεδιασμός έχει αποδειχτεί ότι ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η βασική αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος.

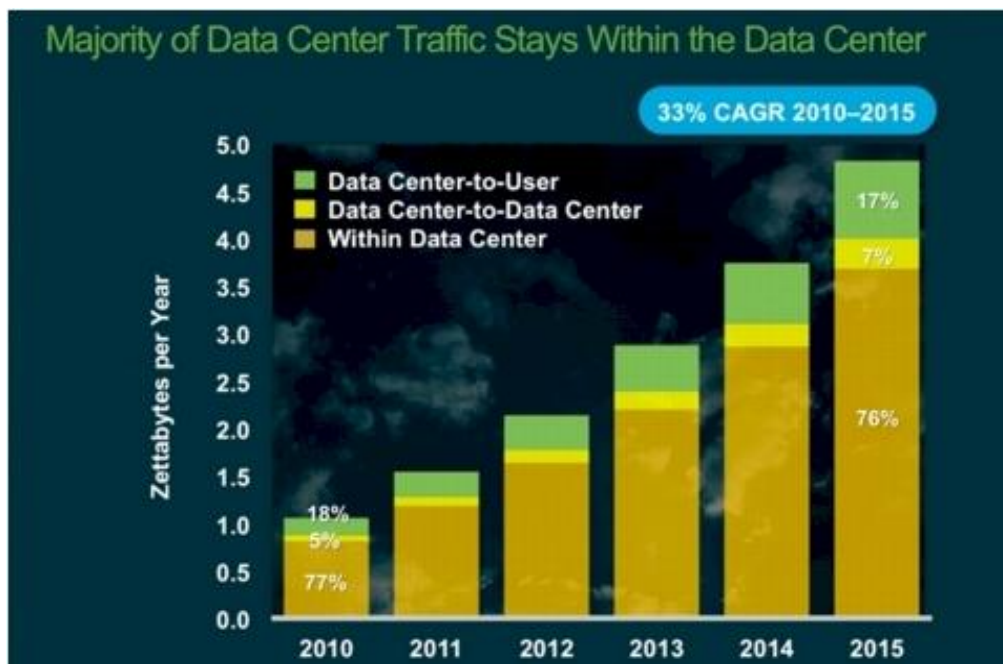


Σχήμα 1.1 Βασικό σχήμα για data center 3 επιπέδων

Τα επίπεδα του data center περιγράφονται σύντομα παρακάτω:

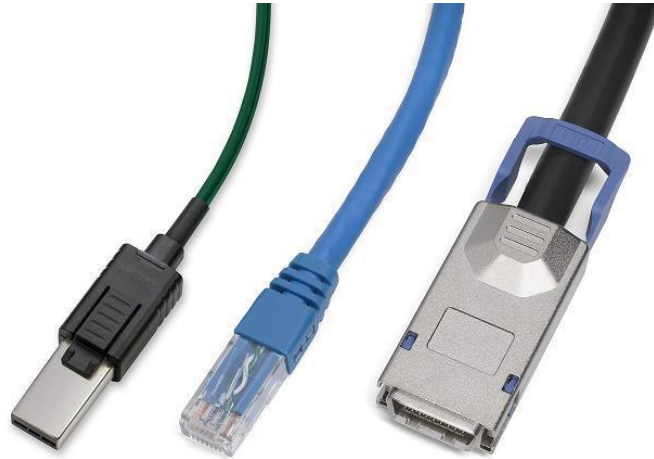
- Core layer - Σε αυτό το επίπεδο με κατάλληλους υψηλών ταχυτήτων switches οδηγούνται στον κατάλληλο προορισμό οι εισερχόμενες και εξερχόμενες ροές δεδομένων. Είναι αρκετά σημαντικό να υπάρχουν πολλαπλές διαδρομές ώστε να μην έχουμε single point of failure.
- Aggregation layer - Οι servers στα data centers είναι συνήθως τοποθετημένοι σε racks («ντουλάπες με ράφια»). Στην κορυφή αυτών των rack είναι τοποθετημένος ένας switch (top of rack switch). Το aggregation layer περιγράφει το επίπεδο στο οποίο τα ToR switches συνδέονται μεταξύ τους ώστε να έχουμε ένα πλήρως διασυνδεδεμένο data center.
- Access layer - Εδώ οι servers είναι που συνδέονται φυσικά με το υπόλοιπο δίκτυο. Με την βοήθεια των ToR switches που αναφέρθηκαν παραπάνω, όλοι οι servers στα racks συνδέονται μεταξύ τους αλλά και με τις υπόλοιπες υποδομές.[2]

Με την πρόσφατη έκρηξη της τεχνολογίας και την ραγδαία αύξηση ηλεκτρονικών συσκευών με πρόσβαση στο διαδίκτυο θα περίμενε κανείς η κίνηση δεδομένων σε ένα data center να προέρχεται από τους χρήστες. Επειδή όμως τα κέντρα αυτά συνήθως εξυπηρετούν πολλούς σκοπούς οι οποίοι απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ (οι υπηρεσίες cloud computing συνεχώς αυξάνονται), ένα απλό αίτημα τελικού χρήστη μπορεί να προκαλέσει μεγάλες μεταφορές δεδομένων προς επεξεργασία ανάμεσα στους servers. Έτσι όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2 η συνολική κίνηση, που αυξάνεται ραγδαία ετησίως, κατά μεγάλο ποσοστό αφορά ροές στο εσωτερικό της δομής του data centers, αλλά και κινήσεις μεταξύ data center.



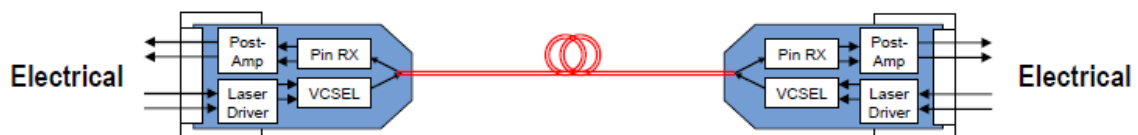
Σχήμα 1.2 Τα χαρακτηριστικά της κίνησης σε ένα data center[3]

Τα δύο παραπάνω γεγονότα (η συνεχής αύξηση στην κίνηση των δεδομένων και το μεγάλο ποσοστό αυτών στο εσωτερικό των data centers) καταδεικνύουν την ανάγκη ανάπτυξης διασυνδέσεων (interconnects) πολύ υψηλής ταχύτητας, χαμηλών ενεργειακών απαιτήσεων και κόστους μέσα στο data center. Σήμερα τα χάλκινα καλώδια των 10 Gbps αποτελούν την πιο οικονομική λύση, όμως οι οπτικές διασυνδέσεις υιοθετούνται από όλο και περισσότερες επιχειρήσεις λόγω κάποιων κρίσιμων πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν.



Σχήμα 1.3 Σύγκριση ανάμεσα σε καλώδια Laserwire™ AOC, RJ-45 και CX4

Ειδικότερα τα ενεργά οπτικά καλώδια (AOCs) με τα οποία ενσωματώνουν οπτικοηλεκτρονικούς πομποδέκτες (opticoelectronic transceivers) στα άκρα τους, βρίσκονται σήμερα στα πλέον εξελιγμένα data center στο πρότυπο κυρίως των 40Gbps.



Σχήμα 1.4 Διάγραμμα ενεργού οπτικού καλωδίου

Τα βασικά σημεία που καθιστούν τα AOCs δημοφιλή είναι:

- Σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια:
 - Υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης
 - Κατά συνέπεια λιγότερη πολυπλοκότητα στη διασύνδεση (λιγότερα AOC σε σχέση με τα χάλκινα καλώδια)
 - Δυνατότητα σύνδεσης σε μεγαλύτερες αποστάσεις

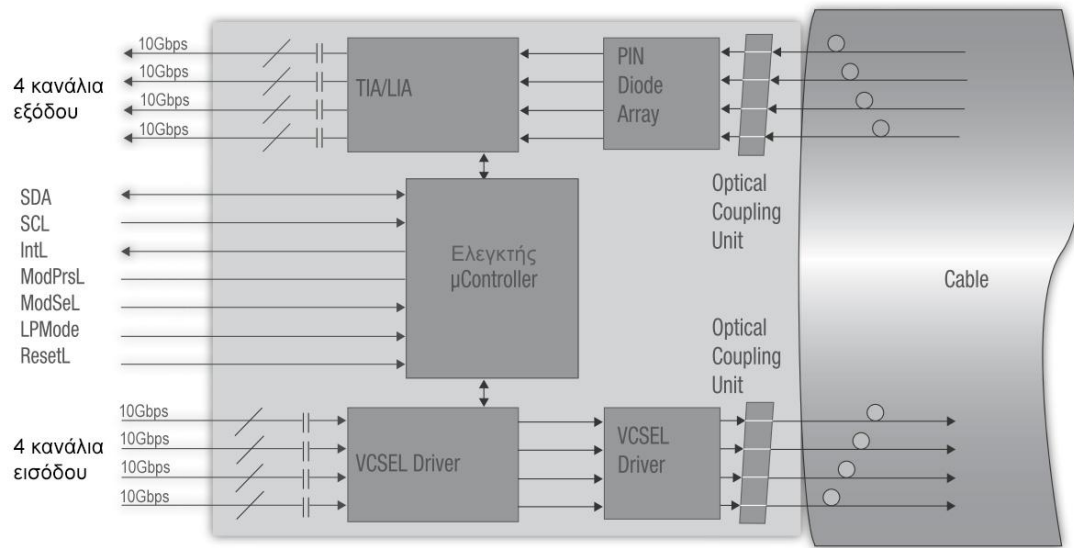
- Μικρότερο βάρος και δυνατότητα να λυγίζουν αρκετά, ώστε να είναι ευκολότερη η διαχείριση των καλωδίων
 - Λεπτότερα καλώδια που επιτρέπουν καλύτερη ροή αέρα για την ψύξη του data center
 - Μικρότερη κατανάλωση ενέργειας
 - Οι πλακέτες στις οποίες συνδέονται δεν έχουν ανάγκη ενεργής ψύξης
- Σε σχέση με τα παθητικά οπτικά καλώδια:
 - Έχουν καλύτερη σχέση απόδοσης/κόστους αφού δεν περιορίζονται από την απαίτηση για χρήση σε εφαρμογές μακρινών αποστάσεων
 - Δεν υπάρχει ανάγκη καθαρισμού της σύνδεσης, αφού εδώ τα άκρα συνδέονται ηλεκτρικά[4]

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 ηλεκτρο-οπτική 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.[5]

Ενεργά οπτικά καλώδια έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν μια σειρά από γνωστές τυποποιημένες διεπαφές όπως SFP+, OSFP+, CX4, CDFP, USB 3.0, HDMI, Thunderbolt. Εδώ θα προσπαθήσουμε να δούμε τον τρόπο λειτουργίας των AOCs δίνοντας ως παράδειγμα το καλώδιο 40GB/S QSFP+ της εταιρείας Fiberon Technologies[6] που φαίνεται στην εικόνα 1.5.

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 10 *Gbps*. Επομένως μπορεί να επιτευχθεί συνολικός ρυθμός μετάδοσης 40 *Gbps* 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 1.5): 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.



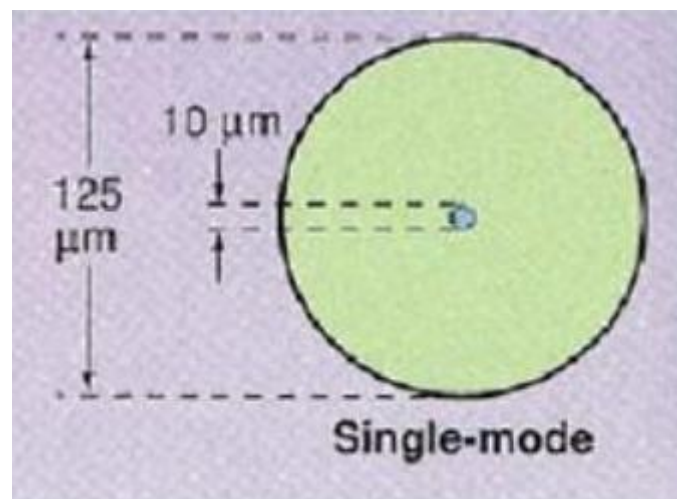
Σχήμα 1.5 Διάγραμμα ενός Active Optical Cable(AOC) 40GB/S QFSP+[6]

2. Κυματοδήγηση και πόλωση

Αξίζει να αναφέρουμε κάποιες βασικές αρχές για τον τρόπο που μεταδίδεται το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσα στις οπτικές ίνες, δίνοντας έμφαση στην πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου. Το τελευταίο κρίνεται απαραίτητο λόγω της χρήσης αυτής της ιδιότητας του φωτός στην πειραματική διαδικασία της ενότητας 6.3 .

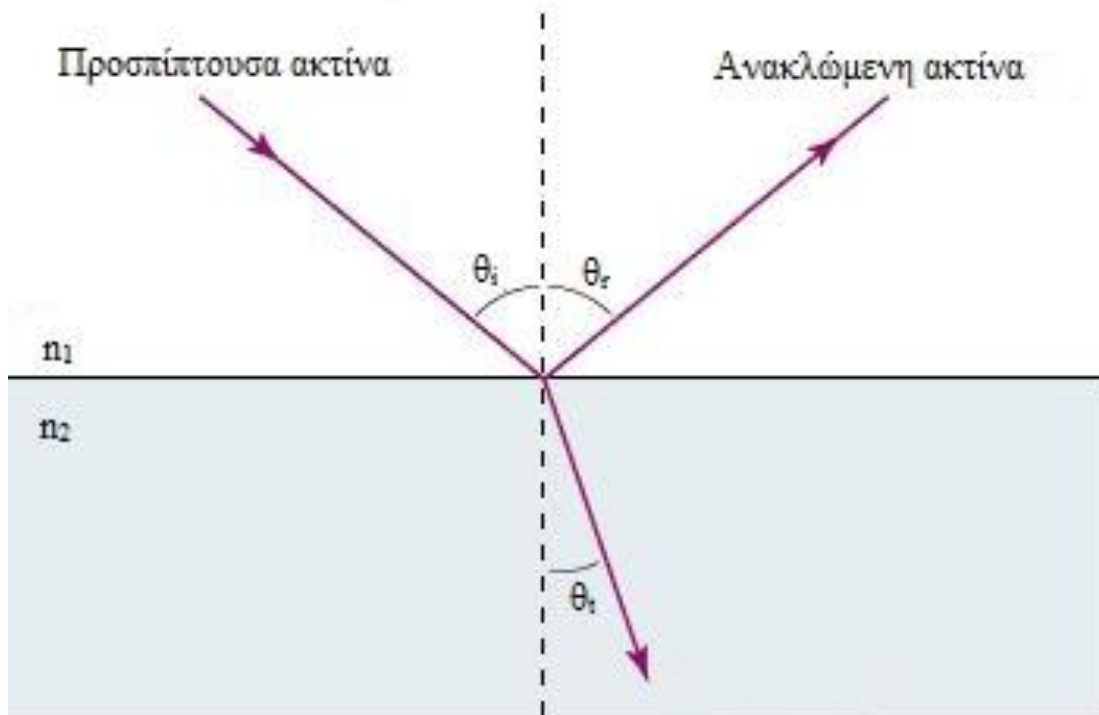
2.1. Η διάδοση του φωτός στις οπτικές ίνες

Η οπτική ίνα τοποθετείται σε προστατευτικό περίβλημα και στο κέντρο της έχει τον πυρήνα με δείκτη διάθλαση n_1 , ο οποίος περιβάλλεται από έναν μανδύα με οριακά μικρότερη τιμή δείκτη διάθλασης n_2 . Στις μονότροπες οπτικές ίνες (αυτές δηλαδή όπου το φως έχει μόνο έναν τρόπο διάδοσης) ο πυρήνας έχει διάμετρο κοντά στα $10\mu\text{m}$ ενώ μαζί με τον μανδύα η διάμετρος της ίνας φτάνει τα $125\mu\text{m}$, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες ο πυρήνας έχει αρκετά μεγαλύτερη διάμετρο ($50\text{-}62.5\mu\text{m}$) επιτρέποντας πολλαπλούς τρόπους διάδοσης[37].



Σχήμα 2.1 Τομή μιας μονότροπης οπτικής ίνας

Η παραπάνω δομή σκοπό έχει να συγκρατείται το φως στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Η διαδικασία με την οποία επιτυγχάνεται αυτό μπορεί να γίνει κατανοητή με τη χρήση απλής γεωμετρικής οπτικής. Συγκεκριμένα με τη βοήθεια του νόμου του Snell μπορούμε να δούμε πως συμπεριφέρεται το φως όταν συναντά την διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών με διαφορετικό δείκτη διάθλασης(σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2 Η πορεία που ακολουθεί το φως όταν προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια με βάση το νόμο του Snell

Αλγεβρικά ο νόμος του Snell είναι:

$$\begin{aligned}\theta_i &= \theta_r \\ n_1 \sin \theta_i &= n_2 \sin \theta_t\end{aligned}$$

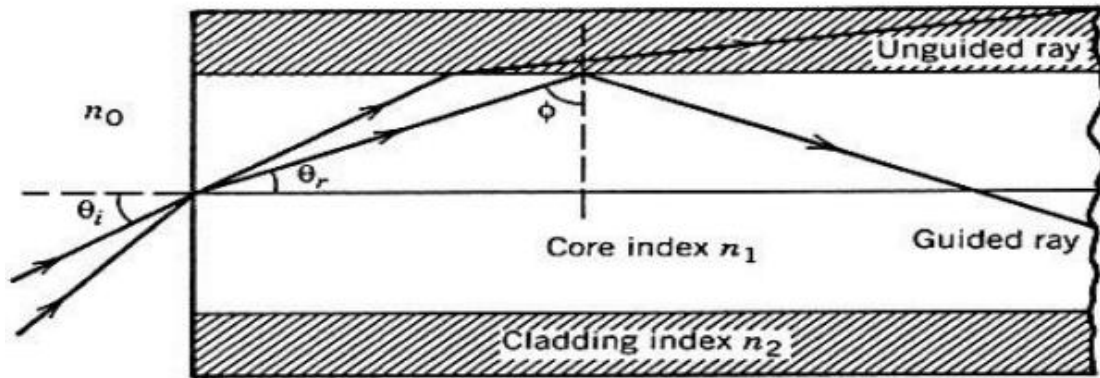
Σχέση 2.1

Βλέπουμε λοιπόν ένα μέρος του φωτός να ανακλάται και ένα μέρος του να συνεχίζει στο δεύτερο μέσο διαθλώμενο. Αν η γωνία πρόσπτωσης όμως είναι μεγαλύτερη από μία οριακή γωνία έχουμε ολική ανάκλαση, με ελάχιστη οπτική ισχύ να περνάει στο δεύτερο μέσο. Η γωνία αυτή είναι:

$$\varphi_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

Σχέση 2.2

Με αυτό τον νόμο μπορούμε να περιγράψουμε την πορεία που θα ακολουθεί το φως (ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο μέρος του) μέσα στην οπτική ίνα αλλά και να βρούμε την μέγιστη γωνία με την οποία μπορεί να εισέλθει το φως στην οπτική ίνα.



Σχήμα 2.3 Η πορεία που ακολουθεί η ακτίνα όταν εισέρχεται (από n_0 στο n_1) και όταν κυματοδηγείται στην ίνα

Έτσι με βάση το σχήμα 2.3 μπορούμε να βρούμε την μέγιστη επιτρεπτή γωνία διάθλασης κατά την είσοδο στην ίνα ώστε να έχουμε ολική ανάκλαση στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-μανδύα:

$$\theta_r^{max} = \frac{\pi}{2} - \varphi_c$$

Σχέση 2.3

Ωστε τελικά να υπολογίσουμε την μέγιστη επιτρεπτή γωνία εισόδου του φωτός για να μπορεί να κυματοδηγείται στην ίνα:

$$\sin\theta_i^{max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Σχέση 2.4

2.2. Πόλωση

Ως ΗΜ κύμα το φως ταλαντώνεται σε μια κατεύθυνση, την οποία μπορούμε να παρατηρήσουμε ως απόκριση των ατόμων του μέσου διάδοσης. Αυτή η κατεύθυνση ονομάζεται πόλωση. Αν αναλύσουμε το επίπεδο κύμα σε δύο κάθετες συνιστώσες έχουμε:

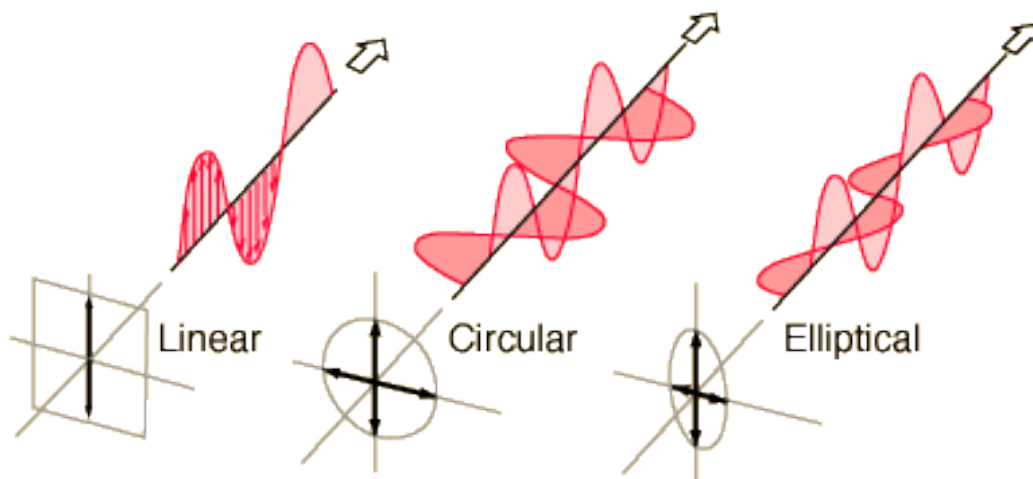
$$\begin{aligned}\vec{E}_x &= E_{0x} \cos(kz - \omega t) \hat{\beta} \\ \vec{E}_y &= E_{0y} \cos(kz - \omega t + \delta) \hat{\beta}\end{aligned}$$

Σχέση 2.5

Όπου δ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστωσών ενώ το συνολικό κύμα είναι το άθροισμα των δύο παραπάνω συνιστωσών. Αν το διάνυσμα της πόλωσης

αλλάζει με τυχαίο τρόπο το κύμα μας χαρακτηρίζεται απόλωτο, διαφορετικά χαρακτηρίζεται ολικά πολωμένο. Ανάλογα με το μέγεθος της κάθε συνιστώσας και τη διαφορά φάσης που έχουν μεταξύ τους διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις[38] :

- Γραμμική πόλωση έχουμε στην περίπτωση που οι δύο κάθετες συνιστώσες έχουν διαφορά φάσης μεταξύ του $\delta = k\pi$. Τότε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο ακολουθεί ευθεία γραμμή.
- Κυκλική πόλωση έχουμε στην περίπτωση που οι δύο κάθετες συνιστώσες έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους $\delta = k\pi/2$ και η καθεμία έχει ίδια ένταση με αυτή της συνισταμένης. Τότε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται σε περιφέρεια κύκλου
- Ελλειπτική πόλωση έχουμε στην περίπτωση που οι δύο κάθετες συνιστώσες δεν έχουν την ένταση, με την διαφορά φάσης τους να είναι τυχαία αλλά σταθερή. Τότε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται σε περιφέρεια έλλειψης.

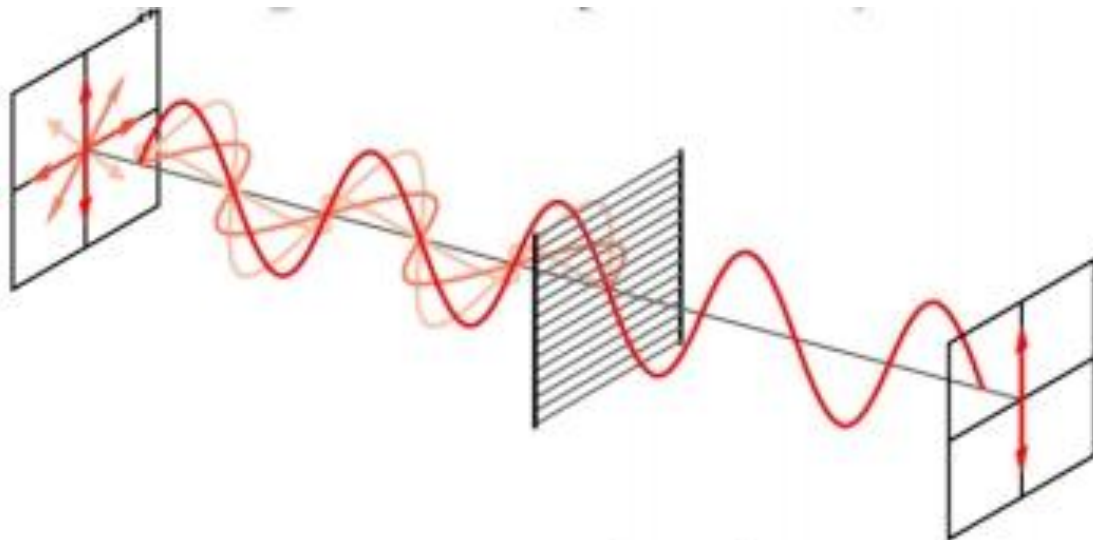


Σχήμα 2.4 Τα είδη της πόλωσης

Ο πυρήνας των οπτικών ινών δεν είναι ιδανικός, και έτσι η μικρή ασυμμετρία που μπορεί να εμφανίζει στα χαρακτηριστικά του δημιουργεί διαφορά φάσης ανάμεσα στους δείκτες διάθλασης n_x και n_y των δύο κάθετων αξόνων διάδοσης τους πυρήνα. Έτσι οι δύο πολωτικές συνιστώσες ταξιδεύουν σε διαφορετικούς δείκτες διάθλασης και άρα με διαφορετική ταχύτητα αλλά και απορρόφηση κατά μήκος της ίνας . Το φαινόμενο αυτό καλείται διπλοθλαστικότητα και οδηγεί σε παραμορφωμένο σήμα στο δέκτη μας λόγω της διασποράς των τρόπων πόλωσης. Επιπλέον λόγω των παραπάνω η διαφορά φάσης των δύο συνιστωσών δεν παραμένει σταθερή και για αυτό το λόγο παρατηρούμε το είδος της πόλωσης να μεταβάλλεται με το μοτίβο γραμμική, ελλειπτική, κυκλική, ελλειπτική, γραμμική κοκ Η διπλοθλαστικότητα

μπορεί να οφείλεται σε φυσικά χαρακτηριστικά της ίνας όπως η ελλειπτικότητα της ή άσκηση εσωτερικής πίεσης, αλλά μπορεί να είναι και επαγόμενη, όπως η άσκηση κάποιας εξωτερικής δύναμης, οι περιστροφές της ίνας και οι τυχαίες κάμψεις. Κατά τη μετάδοση όλα τα παραπάνω οδηγούν στην στροφή της πόλωσης του αρχικού κύματος μας. Υπάρχουν βέβαια διάφορες ίνες διατήρησης της πόλωσης που αντιμετωπίζουν αυτό το θέμα[8].

Σε αρκετές εφαρμογές όπως η πολυπλεξία πόλωσης υπάρχει η ανάγκη να μπορούμε να ελέγχουμε το διάνυσμα αυτό και για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορα στοιχεία προς αυτή την κατεύθυνση. Οι ελεγκτές πόλωσης αυτοί, είναι χειροκίνητοι ή ηλεκτρονικοί και μπορούν να δημιουργήσουν οποιαδήποτε κατάσταση πόλωσης εξόδου ανεξαρτήτως της εισόδου. Αυτό το επιτυγχάνουν έχοντας ένα ή περισσότερα στοιχεία καθυστέρησης στη σειρά με τον άξονα διπλοθλαστικότητας του καθενός να περιστρέφεται αυτόνομα. Άλλο χρήσιμο στοιχείο είναι ο πολωτής ο οποίος λειτουργεί σαν χαραμάδα και επιτρέπει στο φως να περάσει μόνο σε ένα επίπεδο[41].



Σχήμα 2.5 Σχηματικά η λειτουργία του πολωτικού φίλτρου

Τέλος ο διαχωριστής πόλωσης(PBS) αναλύει την πόλωση σε δύο κάθετους άξονες. Αν τον χρησιμοποιήσουμε σε συνδυασμό με έναν ελεγκτή μπορούμε να επιτύχουμε σταθεροποίηση της πόλωσης ελαχιστοποιώντας την ισχύ στον έναν άξονα.

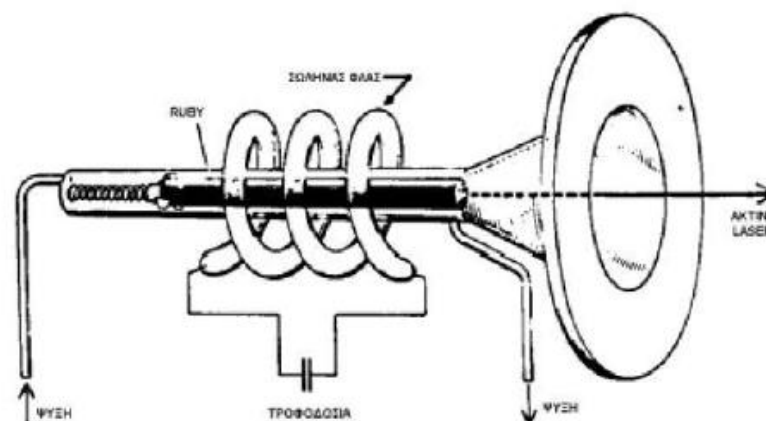
3. Laser και Vcsel

3.1. Laser

3.1.1. Εισαγωγικά

Η λέξη LASER αποτελεί ακρωνύμιο των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, και είναι μια συσκευή η οποία παράγει ή ενισχύει το φως. 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. Η αρχική του πρόταση ήταν το ακρωνύμιο να αλλάζει ανάλογα με το είδος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας(πχ kaser, unaser), αλλά αυτή η σκέψη δεν υιοθετήθηκε από την επιστημονική κοινότητα.

Το φαινόμενο της εξαναγκασμένης εκπομπής πάνω στο οποίο βασίζεται η λειτουργία του laser είχε διατυπωθεί θεωρητικά από τον Einstein ήδη από το 1917. Χρειάστηκαν περίπου 35 χρόνια, κυρίως λόγω της στροφής της έρευνας προς άλλους τομείς, για να κατασκευαστεί από τον Townes το πρώτο MASER, που αποτελούσε τον προκάτοχο του LASER[5]. Όταν τελικά το 1960 εφευρέθηκε το πρώτο LASER που εξέπεμπε μια λεπτή μονοχρωματική κόκκινη δέσμη φωτός από τον Theodore Maiman, το αποκάλεσαν “μία λύση που ψάχνει ένα πρόβλημα”. Μέχρι το 1964 υπήρξαν και άλλες υλοποιήσεις, όπως το πρώτο ημιαγώγιμο laser, αλλά και το LASER CO₂. Ήταν όμως αρχικά αναξιόπιστα και έτσι χρειάστηκε αρκετός καιρός για να γίνουν αποδεκτά στο βιομηχανικό περιβάλλον. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν βρεθεί παντού γύρω μας και έχουν εφαρμογή σε κάθε τομέα της σύγχρονης κοινωνίας, όπως οικιακές ηλεκτρονικές συσκευές, φωτισμοί, χειρουργικές επεμβάσεις, επεξεργασία μετάλλων, τηλεπικοινωνίες, μετρήσεις αποστάσεων, επιστημονική έρευνα κ.α[7].



Σχήμα 3.1 Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε το 1960, βασισμένο σε κρύσταλλο από ρουβίνιο(ruby)[19].

Το φως που παράγουν τα laser είναι μακράν το καλύτερο για χρήση στις οπτικές τηλεπικοινωνίες λόγω των παρακάτω[1]:

- Το ιδανικό laser παράγει φως σε ένα μόνο μήκος κύματος. Αυτό σχετίζεται με χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται στο laser. Το φως εκπέμπεται σε παράλληλες δέσμες οι οποίες έχουν όλες την ίδια φάση.
- Μπορούμε να διαμορφώσουμε το φως που βγαίνει από το laser με πολύ μεγάλη ακρίβεια.
- Τα laser παράγουν δέσμες υψηλής ισχύος. Μερικά παράγουν ισχύ της τάξεως των kW ενώ στις τηλεπικοινωνίες τα ημιαγώγιμα laser που χρησιμοποιούνται φτάνουν μέχρι και τα 20mW. Αυτοί οι αριθμοί είναι πολύ μεγαλύτεροι από την ισχύ που μπορούν να παράξουν τα LED.
- Καθώς το φως εκπέμπεται σε παράλληλες δέσμες, ένα μεγάλο ποσοστό του(50-80%) μπορεί να μεταφερθεί στην ίνα.

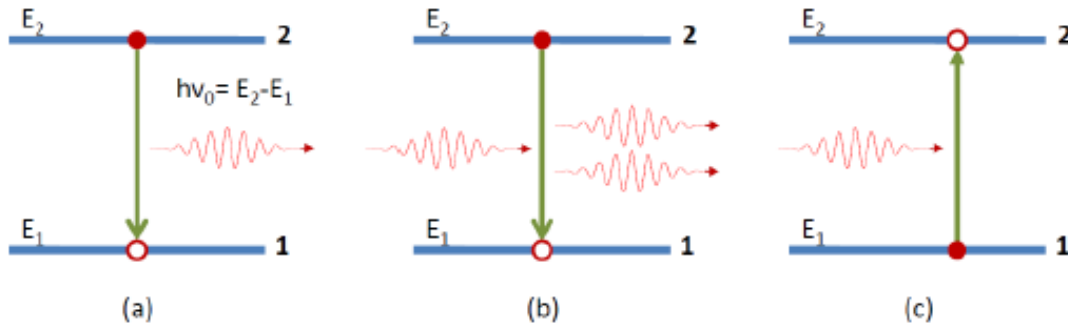
Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα:

- Είναι αρκετά πιο ακριβά σε σχέση με τα LEDs. Ένα στοιχείο που ανεβάζει 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.

3.1.1.1. Αυθόρμητη κι εξαναγκασμένη εκπομπή, απορρόφηση

Έστω το απλουστευμένο μοντέλο των δυο ενεργειακών σταθμών ενός ατόμου (ή μορίου ή άλλου φυσικού συστήματος) με ενέργειες E_1 κι E_2 με $E_1 < E_2$ (βλ. σχήμα 3.2). Ας υποθέσουμε επιπλέον ότι η E_1 είναι και η βασική του κατάσταση και ότι το σύστημα βρίσκεται στη διεγερμένη κατάσταση E_2 . Τότε γνωρίζουμε από την κβαντομηχανική ότι μετά από κάποιο χρονικό διάστημα θα αποδιεγερθεί στην βασική κατάσταση E_1 ελευθερώνοντας ενέργεια $E_2 - E_1$. Στην περίπτωση που η ενέργεια

εκπεμφθεί με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) ακτινοβολίας η διαδικασία ονομάζεται *αυθόρμητη εκπομπή* (spontaneous emission) και χαρακτηρίζεται από την εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας $h\nu_0 = E_2 - E_1$ (σχήμα 3.2.a). Η μετάβαση στην βασική κατάσταση μπορεί να γίνει και μη-ακτινοβολητικά, για παράδειγμα με κρούσεις με τα γειτονικά άτομα, και σε αυτή την περίπτωση η διαδικασία ονομάζεται *μη-ακτινοβολητική μετάβαση* (non-radiative decay).



Σχήμα 3.2 (a) Αυθόρμητη εκπομπή, (b) εξαναγκασμένη εκπομπή (c) απορρόφηση

Έστω τώρα ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση E_2 κι ένα ΗΜ κύμα συχνότητας $\nu = \nu_0$ το διαταράσσει. Από την κβαντομηχανική γνωρίζουμε πως υπάρχει πιθανότητα να μεταβεί στην βασική κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο $h\nu_0 = E_2 - E_1$ (Σχέση 3.1) εξαιτίας του διαταρακτικού ΗΜ πεδίου (σχήμα 3.2.b). Το φαινόμενο ονομάζεται *εξαναγκασμένη εκπομπή* (stimulated emission).

Αξίζει να τονίσουμε στο σημείο αυτό την θεμελιώδη διαφορά μεταξύ αυθόρμητης κι εξαναγκασμένης εκπομπής. Κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή τα άτομα εκπέμπουν ΗΜ κύματα που βρίσκονται σε συμφωνία φάσης με το προσπίπτον ΗΜ πεδίο κι εκπέμπονται στην ίδια διεύθυνση. Αντίθετα, στην αυθόρμητη εκπομπή τα εκπεμπόμενα ΗΜ κύματα δεν έχουν σταθερή σχέση φάσης με το προσπίπτον ΗΜ πεδίο (μη-συμφωνία φάσης) κι εκπέμπονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μπορούμε να πούμε πως στην εξαναγκασμένη εκπομπή τα εκπεμπόμενα κύματα αθροίζονται συμφώνως με τα προσπίπτοντα έτσι ώστε στο τέλος το ΗΜ πεδίο να προκύπτει ενισχυμένο. Τέλος έστω ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση E_1 κι ένα ΗΜ κύμα συχνότητας $\nu = \nu_0$ το διαταράσσει. Από την κβαντομηχανική γνωρίζουμε πως υπάρχει πιθανότητα το σύστημά μας να μεταβεί από την βασική κατάσταση E_1 στην διεγερμένη κατάσταση E_2 αυξάνοντας την ενέργειά του κατά $E_2 - E_1$ εξαιτίας του διαταρακτικού ΗΜ πεδίου (σχήμα 3.2.c). Το φαινόμενο ονομάζεται *απορρόφηση* (absorption)[7].

3.1.2. Η δομή του laser

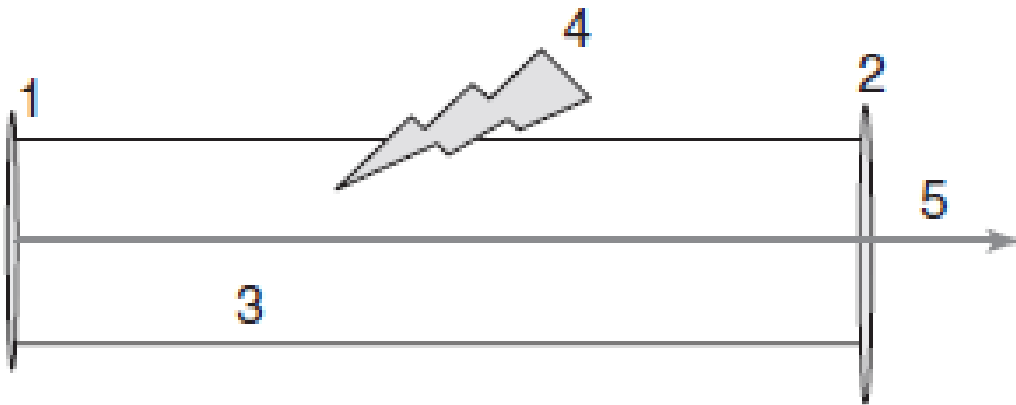
3.1.2.1. Ενεργό μέσο

Το ενεργό μέσο είναι το υλικό το οποίο μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής παράγει το φως laser και κάθε laser λοιπόν παίρνει το όνομα του από αυτό.

Μπορούμε μάλιστα να κατηγοριοποιήσουμε τα laser με βάση την φυσική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το ενεργό μέσο σε solid (GaAS, Nd:YAG), gas (He:Ne, CO₂), liquid και plasma.

3.1.2.2. Οπτική κοιλότητα

Η οπτική κοιλότητα είναι μία διάταξη οπτικών στοιχείων, που επιτρέπουν στο φως να ταλαντώνεται στο ίδιο μονοπάτι κάθε φορά, με σκοπό την εικονική αύξηση του μήκους τού ενεργού μέσου, ώστε να επιτυγχάνεται μεγάλη ενίσχυση του φωτός ανάλογη της θετικής ανάδρασης που έχουμε στους ηλεκτρονικούς ενισχυτές. Ο συνδυασμός της οπτικής κοιλότητας με ένα ενεργό μέσο συχνά αναφέρεται και ως *οπτικός ταλαντωτής*. Ένας ζευγάρι παράλληλων επίπεδων καθρεφτών, ο ένας πλήρως ανακλαστικός ($R \approx 100\%$) και ο δεύτερος μερικώς ($R \approx 95\%$), συνιστούν έναν απλό οπτικό ταλαντωτή (σχήμα 3.3). Συχνά βέβαια χρησιμοποιούνται και άλλες οπτικές διατάξεις (συνήθως κίλοι καθρέφτες) καθώς είναι δύσκολο να τοποθετηθούν οι δύο επίπεδοι καθρέφτες ακριβώς παράλληλα [9].



Σχήμα 3.3 Η βασική γεωμετρία της οπτικής κοιλότητας (1) 100% (2) 95-98% ανακλαστικοί καθρέφτες, (3) ενεργό μέσο, (4) πηγή άντλησης και (5) έξοδος του laser

3.1.2.3. Άντληση

Με τη διαδικασία της άντλησης προσφέρουμε συνεχώς ενέργεια στο ενεργό μέσο ώστε να διεγείρουμε τα άτομα και να πετύχουμε αναστροφή πληθυσμών, δηλαδή τα διεγερμένα άτομα να είναι περισσότερα από αυτά που βρίσκονται στην βασική κατάσταση. Παραπάνω για την επεξήγηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο μέσο μας, χρησιμοποιήσαμε ένα παράδειγμα με 2 ενεργειακές στάθμες. Στην πραγματικότητα όμως σε ένα τέτοιο σύστημα δεν μπορούμε να πετύχουμε αναστροφή πληθυσμού ώστε να είναι κυρίαρχη η εξαναγκασμένη εκπομπή, στην καλύτερη των περιπτώσεων τα διεγερμένα και μη διεγερμένα άτομα θα είναι ίσα σε αριθμό. Τα περισσότερα laser λοιπόν είναι συστήματα 3 ή 4 σταθμών. Αρχικά μέσα στην κοιλότητα κάποια από τα άτομα σε διεγερμένες καταστάσεις

παράγουν φωτόνια λόγω αυθόρμητης εκπομπής, τα οποία στη συνέχεια περνάνε μέσα από το ενεργό μέσο και ενισχύονται λόγω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης εκπομπής. Το μεγαλύτερο μέρος του φωτός ανακλάται συνεχώς στους δύο καθρέφτες και συνεχίζει να ενισχύεται μέχρι να φτάσουμε τελικά σε μια σταθερή κατάσταση ταλάντωσης. Όταν φτάσουμε σε αυτό το σημείο το φως που καταφέρνει να περνάει από τον μερικώς ανακλαστικό καθρέπτη είναι φως laser.

3.1.3. Ιδιότητες των δεσμών laser

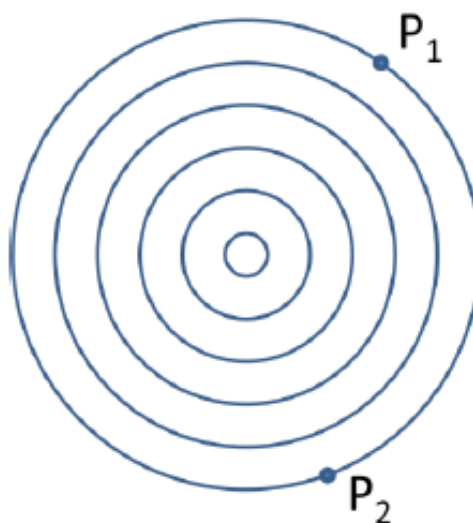
Η ακτινοβολία laser χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό μονοχρωματικότητας, συμφωνίας κατευθυντικότητας και λαμπρότητας. Μια άλλη σημαντική ιδιότητα που συμπεριλαμβάνεται εδώ είναι και η ικανότητα να παράγονται παλμοί πολύ μικρής χρονικής διάρκειας.[7]

3.1.3.1. Μονοχρωματικότητα

Η ιδιότητα αυτή προκύπτει από τα εξής δύο γεγονότα. Πρώτον μόνο η ΗΜ ακτινοβολία που έχει την κατάλληλη συχνότητα ν_0 μπορεί να ενισχυθεί και δεύτερον αυτή η συχνότητα υποστηρίζεται από το φάσμα συντονισμού της κοιλότητας του laser (μόνο για συγκεκριμένες συχνότητες μπορεί υπάρξει ταλάντωση στην κοιλότητα). Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια πολύ πιο στενή φασματικά γραμμή laser από αυτήν της μετάβασης κατά την αυθόρμητη εκπομπή.

3.1.3.2. Συμφωνία (Coherence)

Για κάθε ΗΜ κύμα μπορούμε να ορίσουμε σε πρώτη προσέγγιση τις έννοιες της χωρικής και χρονικής συμφωνίας.



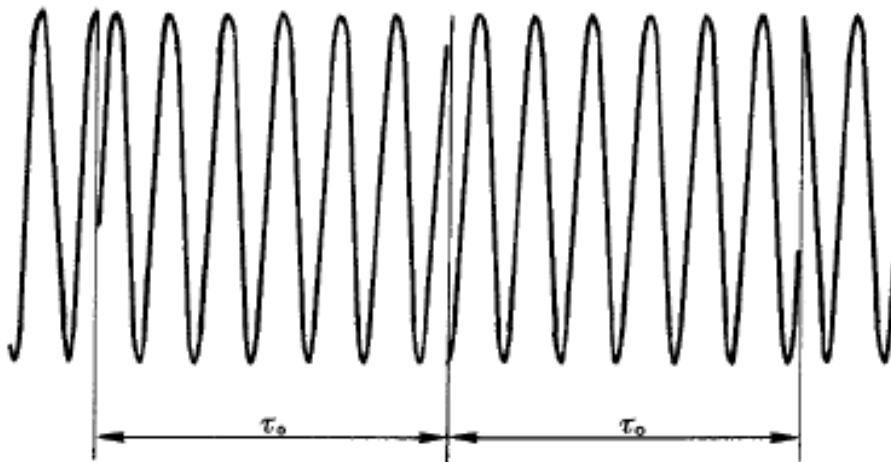
Σχήμα 3.4 Μέτωπα σφαιρικών επίπεδων κυμάτων

Χωρική συμφωνία: Έστω δύο σημεία P_1 και P_2 στο χώρο που την χρονική στιγμή $t = 0$ βρίσκονται στο ίδιο μέτωπο ενός ΗΜ κύματος, κι έστω $E_1(t)$ και $E_2(t)$ τα αντίστοιχα ηλεκτρικά πεδία (βλ. σχήμα 3.4). Εξ' ορισμού η διαφορά φάσης των δύο σημείων είναι μηδέν.

- a. Εάν η διαφορά φάσης των δύο σημείων παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$ τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια συμφωνία μεταξύ των δύο σημείων*.
- b. Εάν η διαφορά φάσης δύο οποιωνδήποτε σημείων του μετώπου κύματος παραμένει μηδέν για κάθε χρονική στιγμή $t > 0$ τότε λέμε πως υπάρχει *τέλεια χωρική συμφωνία* (perfect spatial coherence).
- c. Στην πράξη για να συμβαίνει το b τα σημεία P_1 και P_2 πρέπει να βρίσκονται «σχετικά κοντά» και τότε μιλάμε για *μερική χωρική συμφωνία* (partial spatial coherence). Σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να ορίσουμε την επιφάνεια συμφωνίας και το χαρακτηριστικό μήκος συμφωνίας που αντιστοιχεί στην επιφάνεια αυτή.

Χρονική συμφωνία: Έστω ηλεκτρικό πεδίο ΗΜ κύματος $E(t)$ σε σταθερό σημείο στο χώρο.

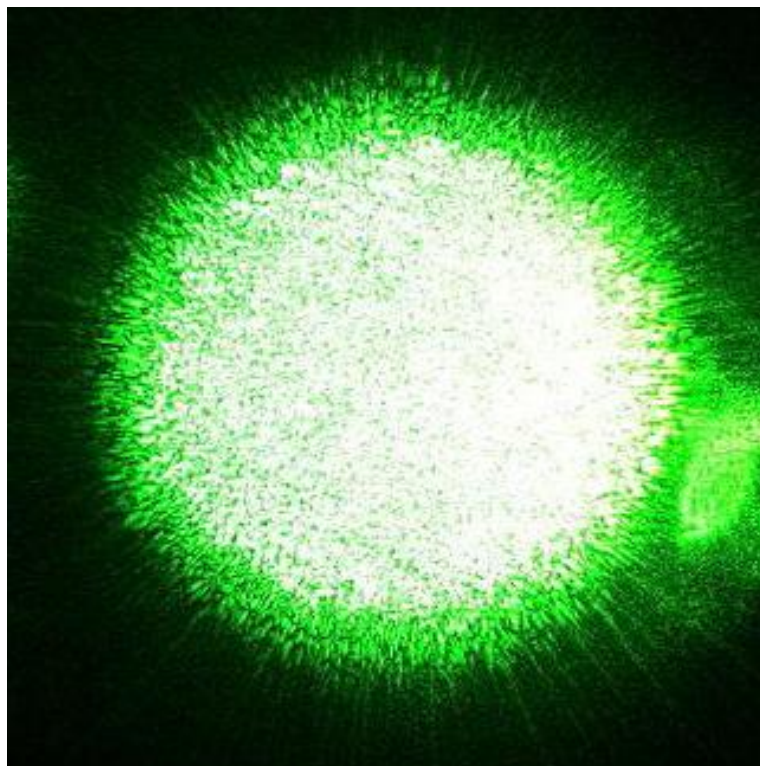
- a. Εάν για δεδομένη χρονική καθυστέρηση τ_0 η διαφορά φάσης μεταξύ $E(t)$ και $E(t + \tau_0)$ παραμένει σταθερή για κάθε t , τότε λέμε πως έχουμε χρονική συμφωνία για το διάστημα τ_0 (*μερική χρονική συμφωνία* – partial temporal coherence). Ο χρόνος τ_0 λέγεται χρόνος συμφωνίας. Η περίπτωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 3.5.
- b. Εάν αυτό συμβαίνει για κάθε τ_0 τότε λέμε πως έχουν *τέλεια χρονική συμφωνία* (perfect temporal coherence).



Σχήμα 3.5 Παράδειγμα μερικής χρονικής συμφωνίας με χρόνο συμφωνίας τ_0

Από το σχήμα 3.5 φαίνεται πως η χρονική συμφωνία και η μονοχρωματικότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένες. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί πως η χρονική και χωρική συμφωνία είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Το ηλεκτρικό πεδίο του σχήματος 3.5 θα μπορούσε να περιγράψει το πεδίο σε δυο σημεία του μετώπου του κύματος τα οποία να έχουν τέλεια χωρική συμφωνία ενώ για το κάθε σημείο υπάρχει μόνο μερική χρονική συμφωνία.

Αξίζει στο σημείο αυτό να αναφέρουμε μια πολύ γνωστή ιδιότητα των δεσμών laser που είναι αποτέλεσμα της χωροχρονικής συμφωνίας. Πρόκειται για την λεγόμενη *κοκκίωση* (speckle) η οποία παρατηρείται όταν ανακλάται μια δέσμη laser από μια μη λεία επιφάνεια. Η ανάκλασή της (παρατηρούμενη βέβαια σε γωνία διαφορετική αυτής της γωνίας πρόσπτωσης) παρουσιάζεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6 Κοκκίωση δέσμης laser

3.1.3.3. Κατευθυντικότητα

Η ιδιότητα αυτή είναι άμεση απόρροια του γεγονότος ότι η διαδικασία της ενίσχυσης του φωτός γίνεται μέσα στην κοιλότητα laser. Μόνο τα κύματα που διαδίδονται στον άξονα της κοιλότητας μπορούν υπάρξουν, να ενισχυθούν και τελικά να διαδοθούν εκτός της κοιλότητας. Η απόκλιση από την τέλεια κατευθυντικότητα (παράλληλη δέσμη) οφείλεται στην ύπαρξη οπών κατά τη διάδοση της δέσμης στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της περίθλασης (diffraction).[10]

3.1.3.4. Ένταση – Intensity

Καθορίζει την πυκνότητα των φωτονίων που χρησιμοποιούνται από τα laser ενώ συνήθως εκφράζεται σε Watt ανά τετραγωνικό εκατοστόμετρο. ($Watt/cm^2$) .[5]

3.1.3.5. Παλμοί μικρής χρονικής διάρκειας

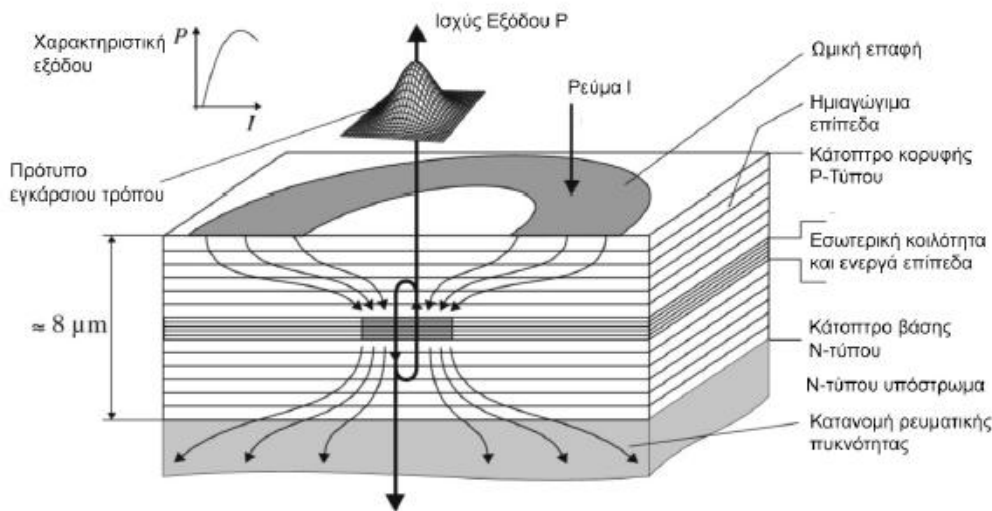
Η δυνατότητα παραγωγής παλμών laser εξαιρετικά μικρής χρονικής διάρκειας αναφέρεται στο σημείο αυτό ως ιδιότητα του φωτός laser. Παλμοί laser διάρκειας μερικών femtoseconds ($1 \text{ fsec} = 10^{-15} \text{ sec}$) είναι πλέον απαραίτητο εργαλείο στα περισσότερα εργαστήρια Ατομικής Μοριακής και Οπτικής Φυσικής (και όχι μόνο) ενώ παλμοί σύμφωνου φωτός με διάρκεια στην περιοχή των attoseconds ($1 \text{ asec} = 10^{-18} \text{ sec}$) παράγονται σε αρκετά εργαστήρια στον κόσμο.

3.2. VCSEL

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει στο να καταδείξει την δομή αλλά και τα πλεονεκτήματα που έχουν προσφέρει τα VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser) τις τελευταίες δεκαετίες. Λόγω της συνεχώς αυξανόμενης χρήσης τους στις οπτικές διασυνδέσεις μικρών αποστάσεων, τα VCSEL έχουν γίνει, τα τελευταία δέκα χρόνια, ιδιαίτερα δημοφιλή. Η πρόσφατη πρόοδος στην τεχνολογία τους, τα καθιστά πολύ υποσχόμενα σε διάφορες εφαρμογές και αρκετά ανταγωνιστικά σε σχέση με τα LED και τα laser ακμής, αφού συνδυάζουν το χαμηλό κόστος των πρώτων με την υψηλή απόδοση των δεύτερων. Ο κύριος λόγος για τον οποίο σχεδιάστηκαν ήταν λόγω της ανάγκης που υπήρχε για ενσωμάτωση οπτικών στοιχείων σε επίπεδες ηλεκτρονικές πλακέτες[11]. Αρχικά η ανάγκη για μια τέτοια δομή οδήγησε σε διατάξεις που απλά πρόσθεταν ανακλαστές 45° στα ήδη δημοφιλή EEL, με πολλά προβλήματα όμως στο τελικό φως αλλά και στην κατασκευή. Από την εφεύρεση τους το 1977 μέχρι την εμπορική διαθεσιμότητα τους στα τέλη της δεκαετίας του 1990 τα VCSEL συνεχώς βελτιώνονται και έχουν φτάσει σήμερα να υπάρχουν τέτοια laser για πολλά μήκη κύματος. Αυτό τα καθιστά κατάλληλα για χρήση όχι μόνο σε οπτικές διασυνδέσεις μικρών αποστάσεων αλλά και για εμπορικές εφαρμογές(εκτυπωτές laser, ποντίκι laser κα)[12].

3.2.1. Δομή

Το VCSEL έχει στην πραγματικότητα τα ίδια μέρη με τα laser που είδαμε παραπάνω, με τη διαφορά ότι εδώ προκύπτουν διαφοροποιήσεις για να εξυπηρετηθεί η απαίτηση της επίπεδης συσκευής που εκπέμπει από την κορυφή. Τα διάφορα μέρη του VCSEL τοποθετούνται επιταξιακά για να προκύψει η τελική δομή (σχήμα 3.7) .



Σχήμα 3.7 Η βασική δομή του VCSEL[5]

3.2.1.1. Ενεργός περιοχή

Όσον αφορά τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών, το ενδιαφέρον για την κατασκευή VCSEL επικεντρώνεται στις περιοχές των 1300nm και 1550nm λόγω της μειωμένης διασποράς ή απορρόφησης αντίστοιχα στις οπτικές ίνες πυριτίου. Κατάλληλα υλικά για αυτά τα μήκη κύματος είναι τα[13]:

- (GaIn)(NAs) σε υπόστρωμα GaAs για τα 1.31 μm
- (InGaAl)As, (InGa)(AsP), και (AlGa)(AsSb) σε InP για τα 1.31 μm και τα 1.55 μm . [14]

Στο VCSEL η ενεργός περιοχή εισάγει από μόνη της πολύ μικρή ενίσχυση του εκπεμπόμενου φωτός και έτσι είναι αναγκαία η χρήση κατόπτρων υψηλότερης ανακλαστικότητας από αυτή των EELs ώστε το φως να κάνει πολλαπλές διαδρομές μέσα από την ενεργό περιοχή. Αυτό τον ρόλο παίζουν στα VCSEL οι DBR.

3.2.1.2. DBR

Οι κατανομημένοι ανακλαστήρες Bragg(DBRs) στα VCSEL χρησιμοποιούνται ως καθρέφτες υψηλής ανακλαστικότητας αλλά θα πρέπει επίσης να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού και να εμφανίζουν καλή θερμική συμπεριφορά. Εδώ οι DBR είναι στην ουσία πολλές στρώσεις από δύο λεπτά ημιαγώγιμα φιλμ με διαφορετικό δείκτη διάθλασης τα οποία τοποθετούνται επιταξιακά[16]. Οι βασικές οπτικές ιδιότητες των DBR προκύπτουν από τον υπολογισμό του δείκτη ανάκλασης στην διαχωριστική επιφάνεια των δύο διαφορετικών φιλμ:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

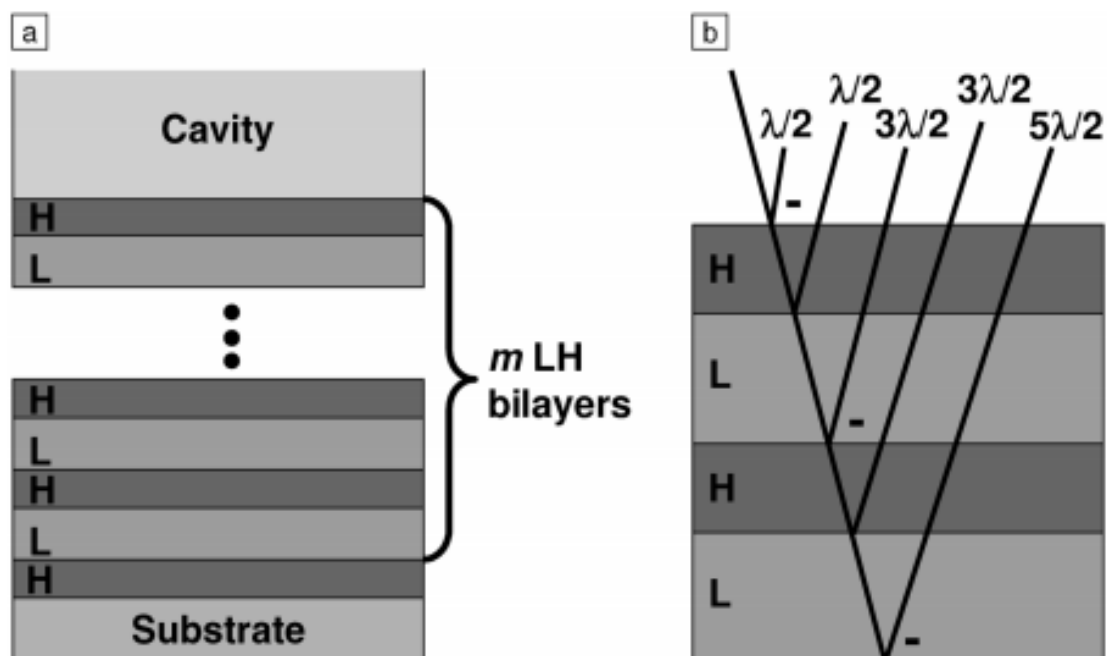
Σχέση 3.2

Με την τοποθέτηση πολλών ζευγαριών τελικά προκύπτει:

$$R = \left[\frac{n_o(n_2)^{2N} - n_s(n_1)^{2N}}{n_o(n_2)^{2N} + n_s(n_1)^{2N}} \right]^2$$

Σχέση 3.3

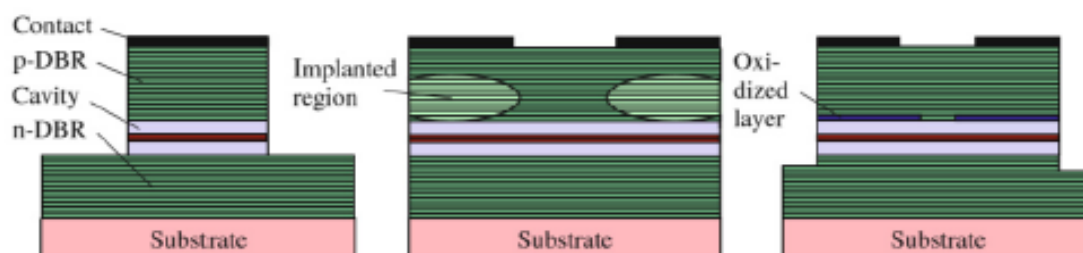
Όπου n_o είναι ο δείκτης διάθλασης του αρχικού μέσου, n_s ο δείκτης διάθλασης του τελικού μέσου και N ο αριθμός των ζευγαριών. Έτσι καταλήγουμε στον υψηλό δείκτη ανάκλασης που χρειάζεται το VCSEL (99-99.8% για τον ένα και >99.95% για τον δεύτερο). Επειδή όμως θέλουμε επίσης τα ΗΜ που προκύπτουν από τις διαδοχικές ανακλάσεις να μην αναιρούν το ένα το άλλο, το κάθε στρώμα θα πρέπει να έχει μήκος $\lambda/4$ ώστε τελικά να προκύπτει προσθετική συμβολή όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα 3.8. Τα πιο διαδεδομένα VCSEL με βάση GaAs χρησιμοποιούν DBRs GaAs/AlGaAs[15].



Σχήμα 3.8 (α)Δομή DBR, H για το μέσο με τον υψηλό δείκτη διάθλασης και L για το μέσο με τον χαμηλό δείκτη διάθλασης (β)Η προσθετική συμβολή των κυμάτων που προκύπτει με την χρήση στρωμάτων πάχους $\lambda/4$

Τέλος εκτός και αν η άντληση γίνεται μέσω κάποιου εξωτερικού laser, το ρεύμα που φτάνει στην ενεργό περιοχή θα πρέπει να περνάει από κάποιο μέρος τουλάχιστον του DBR. Για αυτό δημιουργείται η ανάγκη καλής ηλεκτρικής συμπεριφοράς. Η δομή όμως που περιγράφηκε παραπάνω δεν εμφανίζει πολύ καλές ιδιότητες αφού η διαχωριστικές επιφάνειες εισάγουν υψηλή αντίσταση και διασκορπισμό των φορέων.

3.2.1.3. Confinement



Σχήμα 3.9 Τρεις μέθοδοι για τον περιορισμό του ρεύματος: αριστερά η μέθοδος airpost, στη μέση η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων και στα δεξιά η μέθοδος επιλεκτικής οξείδωσης

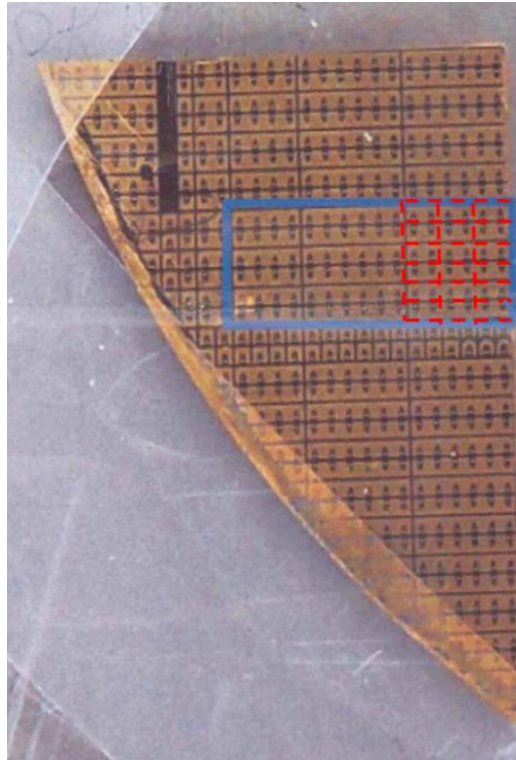
Έχουν αναπτυχθεί επιτυχώς αρκετές μέθοδοι ώστε να περιορίσουμε το ρεύμα σε μια καθορισμένη ενεργό περιοχή. Στο σχήμα 3.9 απεικονίζονται αριστερά η μέθοδος airpost, στη μέση η μέθοδος με βομβαρδισμό πρωτονίων και στα δεξιά η μέθοδος επιλεκτικής οξείδωσης. Με την πρώτη μέθοδο εισάγονται απώλειες λόγω διασποράς στο οπτικό πεδίο, ενώ μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αξιοπιστίας σε περίπτωση που η ενεργός περιοχή εκτεθεί 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. Η ενεργός διάμετρος (active diameter) των VCSELs μπορεί να μειωθεί σε μερικά μικρόμετρα (μm) 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 3.7, ενώ η ενεργός διάμετρος τους είναι περίπου $4\mu m$.

Πλεονεκτήματα

Τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει η τεχνολογία των VCSEL μπορούν να συμπυκνωθούν στα παρακάτω σημεία[17]

- 1. Σταθερότητα μήκους κύματος:** Το μήκος κύματος που εκπέμπουν τα VCSEL είναι πολύ σταθερό, αφού καθορίζεται από την μικρή (1-1.5 μήκη κύματος) κοιλότητα Fabry-Perot.
- 2. Ομοιογένεια μήκος κύματος:** Η τεχνολογία κατασκευής των VCSEL έχει βελτιωθεί αρκετά ώστε σε ένα wafer, η απόκλιση μεταξύ των δειγμάτων όσον αφορά το μήκος κύματος είναι μικρότερη από 1nm. Αυτό επιτρέπει την κατασκευή δυσδιάστατων δομών με πολύ μεγάλη ομοιογένεια. Αντιθέτως στα laser ακμής παρατηρούνται αποκλίσεις της τάξεως των 3-5nm.

- 3. Θερμική ευαισθησία του μήκους κύματος:** Το μήκος εκπομπής στα VCSEL είναι περίπου 5 φορές λιγότερο ευαίσθητο στις αλλαγές θερμοκρασίας από τα laser ακμής. Μια αλλαγή θερμοκρασίας 20°C μεταβάλλει το μήκος κύματος λιγότερο από 1.5nm στα VCSEL, σε σύγκριση με τα 7nm των laser ακμής.
- 4. Λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες:** Καθώς τα VCSEL λειτουργούν αξιόπιστα σε θερμοκρασίες έως και 80°C, μπορούν να χρησιμοποιούνται χωρίς κάποιο σύστημα ψύξης.
- 5. Ποιότητα δέσμης:** Τα VCSEL εκπέμπουν μια κυκλική δέσμη μικρής απόκλισης κάτι που κάνει πολύ απλή την διαδικασία της μετάδοσης του φωτός σε οπτική ίνα με μικρές απώλειες.
- 6. Αξιοπιστία:** Επειδή δεν μπορούν να υποστούν καταστροφικές οπτικές βλάβες είναι πολύ πιο αξιόπιστα από τα laser ακμής. Τυπικά παρατηρούνται λιγότερες από 10 βλάβες σε 1 δισεκατομμύριο ώρες λειτουργίας.
- 7. Ευκολία κατασκευής και κόστος:** Η ευκολία στην κατασκευή των laser είναι ένας από τους κύριους λόγους της μεγάλης διείσδυσης τους. Επίσης λόγω των δυσκολιών στην μαζική παραγωγή αξιόπιστων laser ακμής από ένα wafer 2” παίρνουμε περίπου 500 EEL σε σύγκριση με 5000 VCSEL. Η δυνατότητα μαζικής κατασκευής τους μειώνει συνεχώς το κόστος τους.
- 8. Γεωμετρία:** Εκπέμπουν είτε από τη κορυφή είτε από τη βάση και για αυτό το λόγο είναι ιδανικά για ενσωμάτωση σε ηλεκτρονικές πλακέτες.
- 9. Κατανάλωση Ενέργειας:** 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.
- 10. Διαμόρφωση:** Εμφανίζουν άψογη συμπεριφορά σε συνθήκες άμεσης διαμόρφωσης καθώς μπορούν να μεταδώσουν δεδομένα με ρυθμούς έως 40Gbps.



Σχήμα 3.10 VCSEL Wafer

3.2.2. VCSEL Characterization

Πριν χρησιμοποιηθεί κάποιο VCSEL σε μία πειραματική διάταξη είναι σημαντικό νωρίτερα να υπάρχει εικόνα για την συμπεριφορά του, ώστε να γνωρίζουμε ότι είναι κατάλληλο για το συγκεκριμένο σενάριο. Συνήθως, όταν τα VCSEL είναι ακόμα στη μορφή ενός wafer, μια αλληλουχία μετρήσεων μας βοηθά στον σωστό χαρακτηρισμό τους, δίνοντάς μας μια πιο ενδοσκοπική ματιά και τροφοδοτώντας μας με πληροφορίες για το πώς μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε. Παρακάτω επεξηγούνται οι μετρήσεις αυτές.

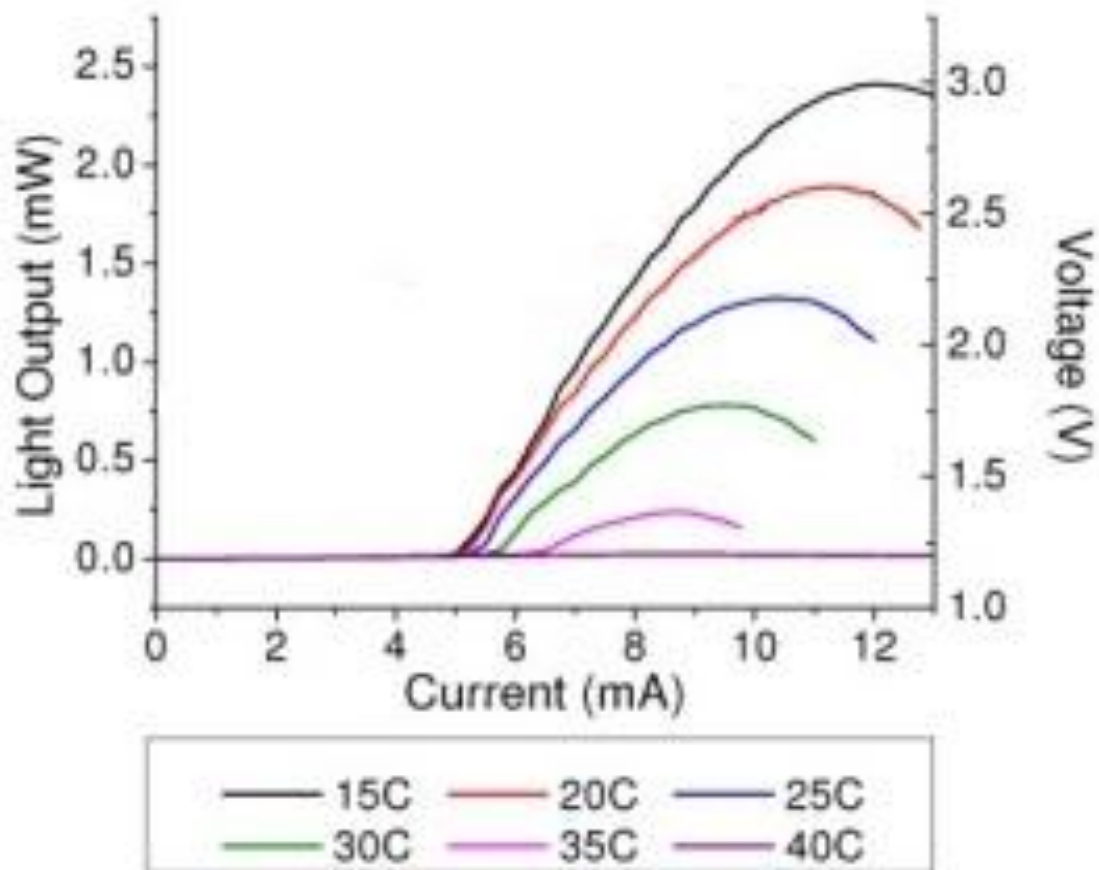
3.2.2.1. *LIV Curve*

Ο σχεδιασμός της καμπύλης light-current-voltage είναι μία από τις βασικές μετρήσεις και πρέπει να γίνεται σε κάθε laser πριν από την χρήση του, εμπορική ή ερευνητική[18]. Προκύπτει αν μετρήσουμε ταυτόχρονα την οπτική ισχύ που εκπέμπεται, το ρεύμα το οποίο οδηγεί το laser μας και της τάσης που του εφαρμόζεται. Έτσι παίρνουμε χρήσιμα αποτελέσματα:

- Για την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνει το laser συναρτήσει της οπτικής ισχύς εξόδου
- Για την μέγιστη οπτική ισχύ εξόδου που μπορεί να επιτευχθεί

- Για την γραμμική περιοχή του laser ώστε να τη λάβουμε υπόψη μας ανάλογα με το σχήμα διαμόρφωσης που μπορούμε 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 δύο διαφορετικές πολωτικές καταστάσεις μπορούμε να εκτιμήσουμε τον ρυθμό σβέσης(extinction ratio) μεταξύ των δύο καταστάσεων αυτών εκτιμώντας έτσι το κατά πόσο η λειτουργία του laser είναι single polarization ή όχι. [5]

Σημαντικό επίσης είναι η όλη διαδικασία να γίνεται και κάτω από συνθήκες ελεγχόμενης θερμοκρασίας με τη χρήση ενός ελεγκτή θερμοκρασίας.




Σχήμα 3.11 Παράδειγμα καμπύλης LIV [36]

Από το παράδειγμα της καμπύλης που φαίνεται στο σχήμα 3.11 βλέπουμε την οπτική ισχύ που μετρήθηκε σε VCSEL για διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας. Βγάζουμε συμπέρασμα λοιπόν για το ποια είναι η γραμμική του περιοχή, ενώ μπορούμε να δούμε και με ποιο ρεύμα επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση(rollover current). Πέρα από το σημείο αυτό παρότι καταναλώνουμε περισσότερη ισχύ το VCSEL έχει κορεστεί και δεν εκπέμπει υψηλότερη οπτική ισχύ .

3.2.2.2. Παράμετροι Διασποράς (Scattering parameters, S parameters)

Μια άλλη διαδομένη διαδικασία είναι να υπολογίσουμε μια μήτρα που σχετίζεται με την συνάρτηση μεταφοράς των laser. 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 3.12).

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



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

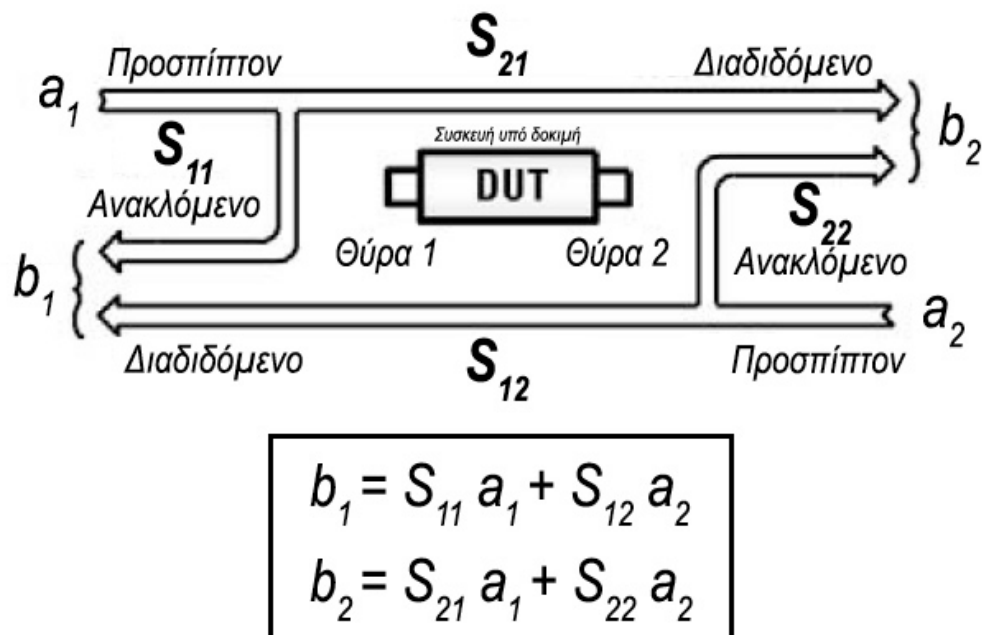
$$h_{12} = \left. \frac{V_1}{V_2} \right|_{I_1=0} \quad (\text{Απαιτείται ανοιχτοκύκλωμα})$$

Σχήμα 3.12 Οι εξισώσεις των παραμέτρων H, Y, 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.

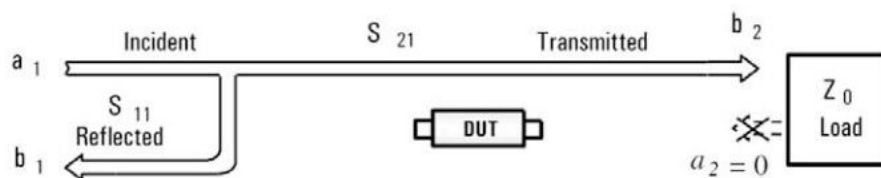
Επίσης, εάν θελήσουμε μπορούμε να αναλύσουμε τις S-parameters σε παραμέτρους H , Y και Z . Μια συσκευή με N θύρες έχει N^2 S-parameters. Έτσι μια συσκευή με δύο θύρες θα έχει τέσσερις S-parameters. Ο συμβολισμός των S-parameters που έχει επικρατήσει επιβάλλει ότι ο πρώτος αριθμός που ακολουθεί το "S" 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 3.13 Οι S-parameters για ένα δίθυρο

Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.14 υπολογίζουμε τις παραμέτρους S_{11} και S_{21} που δίνονται στις σχέσεις 3.4.

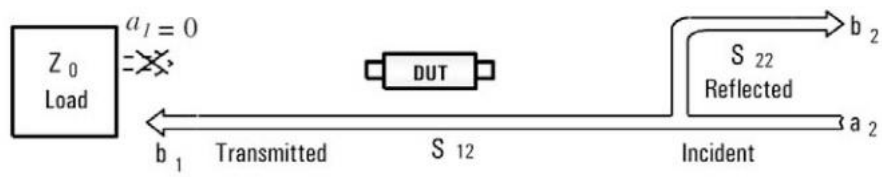


Σχήμα 3.14 Υπολογισμός των παραμέτρων S_{11} και S_{21}

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

Σχέση 3.4

Επίσης όπως φαίνεται στο σχήμα 3.16 υπολογίζουμε τις παραμέτρους S_{22} και S_{12} που δίνονται στις σχέσεις 3.5.



Σχήμα 3.15 Υπολογισμός των παραμέτρων S_{22} και S_{12}

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

Σχέση 3.5

4. External και direct modulation

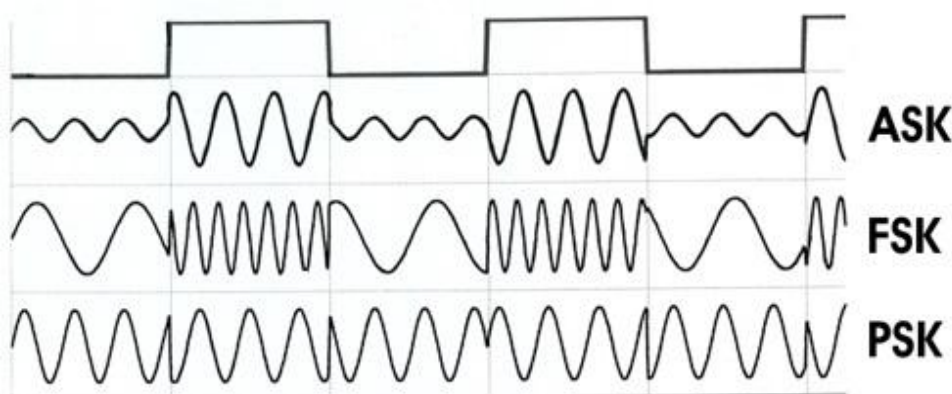
4.1. Modulation εισαγωγικά

Το οπτικό φέρον πριν από την όποια διαμόρφωση εκφράζεται ως εξής

$$E(t) = \hat{e} \operatorname{Re}[a \exp(i\varphi - i\omega_0 t)]$$

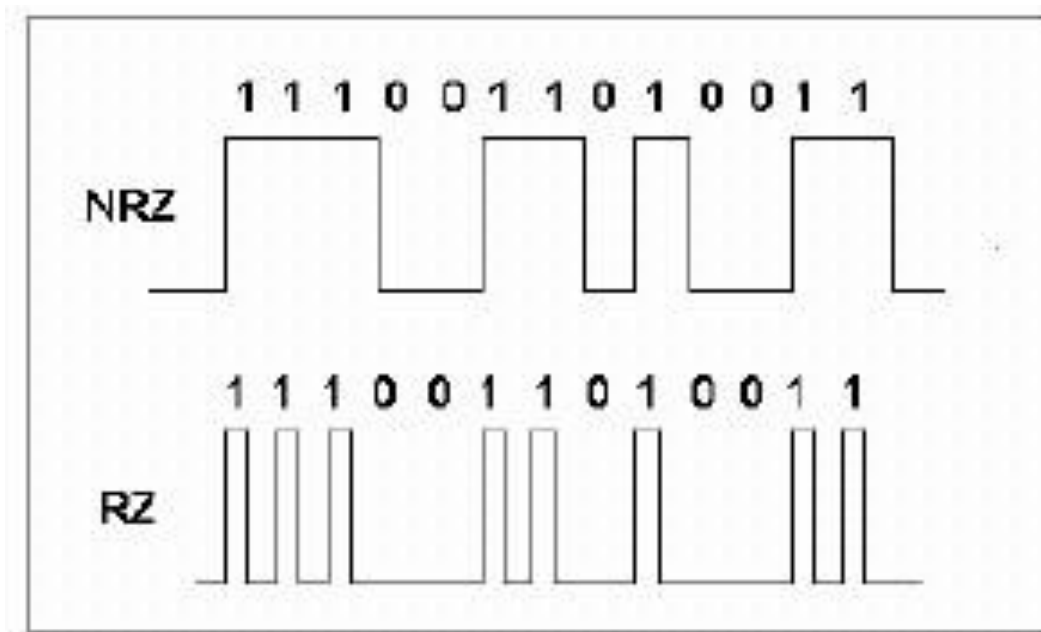
Σχέση 4.1

Όπου \hat{e} είναι το μοναδιαίο διάνυσμα πόλωσης, A είναι το πλάτος του σήματος, φ είναι η φάση του και ω_0 η γωνιακή συχνότητα φέροντος. Κάποιος μπορεί να επιλέξει να διαμορφώσει το πλάτος A , την συχνότητα ω_0 ή την φάση φ . Στην περίπτωση αναλογικής διαμόρφωσης, οι τρεις επιλογές διαμόρφωσης είναι γνωστές σαν *διαμόρφωση πλάτους (AM)*, *διαμόρφωση συχνότητας (FM)* και *διαμόρφωση φάσης (PM)*. Οι ίδιες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν στην ψηφιακή περίπτωση και ονομάζονται *ψηφιακή διαμόρφωση κατά πλάτος (ASK)*, *ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας (FSK)* και *ψηφιακή διαμόρφωση φάσης (PSK)*. Στην περίπτωση της απλούστερης ψηφιακής διαμόρφωσης το χαρακτηριστικό το οποίο έχουμε επιλέξει να διαμορφώσουμε μεταβάλλεται μεταξύ των δύο τιμών του δυαδικού ψηφιακού σήματος. Η συνηθισμένη τεχνική είναι να αλλάζει απλά η ένταση του σήματος μεταξύ των δύο επιπέδων, η μία εκ των οποίων είναι μηδέν. Συνήθως αυτή ονομάζεται *on-off keying (OOK)*. Από την άλλη η χρήση των FSK και PSK αρχικά είχε σχεδόν εγκαταλειφθεί λόγω των πολυπλοκότητων που υπήρχαν στο δέκτη. Αυτό άλλαξε μετά το 2000, καθώς έγινε αντιληπτό ότι η χρήση του PSK ήταν απαραίτητη για την φασματική απόδοση WDM συστημάτων στα οποία πλέον χρησιμοποιούνται τεχνικές διαμόρφωσης του πλάτους αλλά συγχρόνως και της φάσης του οπτικού φέροντος (πχ QPSK). [20]



Σχήμα 4.1 Ξεκινώντας από πάνω παρατηρούμε μία ροή bit που οδηγεί στα πρότυπα των ηλεκτρικών πεδίων όταν αυτή μετατρέπεται σε οπτικό χρησιμοποιώντας ASK, FSK και PSK αντίστοιχα[21].

Πέρα από την επιλογή της φυσικής μεταβλητής προς διαμόρφωση για τη μετάδοση της πληροφορίας, μία άλλη σημαντική απόφαση αφορά τον τρόπο με τον οποίο το ηλεκτρικό σήμα θα μετατραπεί σε μία ροή οπτικών bit. Οι δύο επιλογές που έχουμε είναι γνωστές σαν διαμόρφωση με επιστροφή στο μηδέν (RZ) και διαμόρφωση χωρίς επιστροφή στο μηδέν (NRZ). Στην RZ τεχνική διαμόρφωσης, κάθε οπτικός παλμός που αναπαριστά το bit “1” είναι βραχύτερος από την περίοδο του bit, και το πλάτος του επιστρέφει στο μηδέν πριν τελειώσει η διάρκεια του bit. Στην NRZ τεχνική διαμόρφωσης, ο οπτικός παλμός παραμένει σε όλη την διάρκεια της περιόδου του bit και το πλάτος του δεν πέφτει στο μηδέν μεταξύ δύο ή περισσότερων bit “1” (σχήμα 4.2). Έτσι στην NRZ τεχνική όταν υπάρχουν συνεχόμενα bit “1” μεταδίδεται παλμός με μεγαλύτερο εύρος σε αντίθεση με την RZ όπου οι παλμοί έχουν πάντα συγκεκριμένο εύρος. Η τεχνική NRZ χρησιμοποιείται συχνά στην πράξη, επειδή απαιτεί μικρότερο εύρος ζώνης.



Σχήμα 4.2 Διάγραμμα με τις τεχνικές NRZ και RZ για την ίδια ροή bit[22]

4.1.1. Απαιτήσεις των τεχνικών διαμόρφωσης

4.1.1.1. Ταχύτητα λειτουργίας

Σε κάθε τεχνική, θα πρέπει οι φυσικές διαδικασίες οι οποίες λαμβάνουν τόπο, και τις οποίες εκμεταλλευόμαστε για να πετύχουμε την διαμόρφωση, να είναι επαρκώς γρήγορες ώστε να επιτρέπουν ομαλή λειτουργία στον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης bit. Για παράδειγμα αν επιθυμούμε μετάδοση στα 10 Gbit/s, κάθε bit θα έχει διάρκεια 100ps και αναμένουμε από τον transmitter, άσχετα με τον σχήμα διαμόρφωσης, να μπορεί να μεταβάλλει το σήμα μεταξύ των καταστάσεων μέσα σε χρόνο αρκετά μικρότερο των 100ps.[23]

4.1.1.2. Λόγος απόσβεσης

Ο λόγος απόσβεσης ενός οπτικού σήματος ορίζεται ως

$$ER = \frac{P_1}{P_0}$$

Σχέση 4.2

όπου P_1 και P_0 είναι τα επίπεδα ισχύος που αντιστοιχούν στις καταστάσεις “on” και “off” αντιστοίχως. Είναι σημαντικό να επιτυγχάνεται αρκετά μεγάλος λόγος απόσβεσης για το οπτικό μας σήμα, αφού σημαίνει ότι οι δύο (ή και περισσότερες) καταστάσεις έχουν αρκετή απόσταση μεταξύ τους, ώστε να είναι εύκολα διαχωρίσιμες στον δέκτη. Επιπλέον επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της ισχύος στην κατάσταση “off”, για έχουμε όσο το δυνατόν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας. Αν ο λόγος απόσβεσης είναι μικρός τότε στην πλευρά του δέκτη θα απαιτούμε το λαμβανόμενο οπτικό σήμα να έχει υψηλότερη ισχύ, προκειμένου να πετύχουμε μετάδοση για ένα δοθέν BER(συνήθως 10^{-9}).[23]

4.1.1.3. Frequency chirping

Όπως δείξαμε στην σχέση 4.1 το οπτικό φέρον πριν την διαμόρφωση είναι

$$E(t) = \hat{e} \operatorname{Re}[a \exp(i\varphi - i\omega_0 t)]$$

Στην διαδικασία της διαμόρφωσης κατά πλάτος, μεταβάλλοντας την ηλεκτρική ισχύ, μεταβάλλουμε και την οπτική και κατά συνέπεια το πλάτος του σήματος μας. Όμως η διαμόρφωση αυτή, συνοδεύεται πολύ συχνά και από διαμόρφωση της φάσης του φέροντος οπτικού κύματος λόγω μικρών μεταβολών στο δείκτη διάθλασης. Συνεπώς δεν έχουμε μόνο την ισχύ ως συνάρτηση του χρόνου, αλλά και τη φάση, κάτι που δεν είναι επιθυμητό. Κάθε στιγμή λοιπόν η συχνότητα του φέροντος δίνεται ως εξής

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

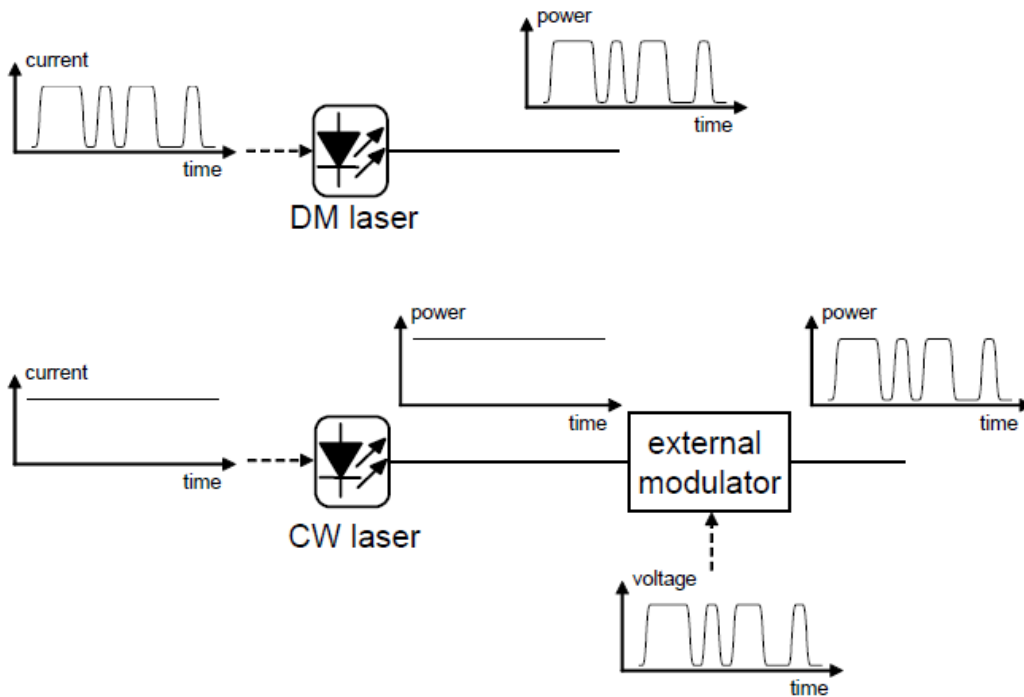
Σχέση 4.3

Επομένως η εξάρτηση της φάσης από τον χρόνο οδηγεί σε αλλαγή της στιγμιαίας συχνότητας. Η ανεπιθύμητη αυτή διαμόρφωση της συχνότητας συχνά αναφέρεται ως frequency chirping. Το μέγεθος αυτού του φαινομένου εξαρτάται από τους μηχανισμούς που έχουν χρησιμοποιηθεί για να επιτευχτεί η διαμόρφωση, αλλά και από τον ίδιο τον σχεδιασμό του διαμορφωτή. Το πρόβλημα που δημιουργείται οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται το σήμα μέσα από την οπτική ίνα εξαρτάται από την συχνότητα του. Έτσι οι διαφορετικές φασματικές

συνιστώσες του σήματος ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα με αποτέλεσμα ο παλμός στον δέκτη να είναι διευρυμένος. Στην περίπτωση της διαμόρφωσης κατά πλάτος, οι παλμοί διευρύνονται περὰ από το καθορισμένο time slot τους, με συνέπεια την διασυμβολική παρεμβολή και την εμφάνιση περισσότερων λαθών στην πλευρά του δέκτη. Ειδικά σε περιπτώσεις στις οποίες πρέπει το σήμα να διανύσει μεγάλες αποστάσεις το φαινόμενο αυτό επιδεινώνεται λόγω της διασποράς, οπότε απαίτηση είναι ο διαμορφωτής να εισάγει όσο το δυνατόν λιγότερο chirping. [24]

4.2. External και direct modulation

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η διαδικασία της διαμόρφωσης συνίσταται στην μεταφορά των δεδομένων προς μετάδοση, από το ηλεκτρικό στο οπτικό πεδίο. Δύο στρατηγικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη του παραπάνω (σχήμα 4.3). Στην πρώτη περίπτωση, η οποία ονομάζεται άμεση διαμόρφωση (direct modulation), φως εκπέμπεται από το ημιαγωγικό laser μόνο όταν θέλουμε να μεταδώσουμε το bit “1”, ενώ ιδανικά στην περίπτωση του bit “0” δεν εκπέμπεται καθόλου φως (μέγιστος λόγος απόσβεσης). Στην πραγματικότητα βέβαια, υπάρχουν περιορισμοί οι οποίοι πρακτικά δεν μας επιτρέπουν η μηδενική στάθμη να αντιστοιχεί σε μηδενική οπτική ισχύ. Στην δεύτερη περίπτωση της εξωτερικής διαμόρφωσης (external modulation), ένα laser συνεχούς κύματος (CW) χρησιμοποιείται για να εκπέμπει φως με σταθερή χρονικά ισχύ. Το δεύτερο κομμάτι του συστήματος, ο διαμορφωτής, χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως διακόπτης για να αφήνει το φως να περάσει όποτε θέλουμε να μεταδοθεί bit “1”, αλλά και να το εμποδίζει κάθε φορά που θέλουμε να μεταδοθεί το bit “0”. Αυτού του είδους οι διακόπτες μπορούν να υλοποιηθούν με διάφορους τρόπους και παρακάτω παρουσιάζουμε κάποια από τα φυσικά φαινόμενα τα οποία εκμεταλλευόμαστε για να επιτύχουμε διαμόρφωση η οποία να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που έχουμε παρουσιάσει παραπάνω.[23]



Σχήμα 4.3 Αναπαράσταση της άμεσης (direct modulation-πάνω) και εξωτερικής (external modulation-κάτω) διαμόρφωσης. Στην άμεση διαμόρφωση, το ρεύμα το οποίο οδηγεί ένα ημιαγωγικό laser αλλάζει ανάλογα με τα δεδομένα που θέλουμε να μεταδώσουμε. Στην εξωτερική διαμόρφωση, οδηγούμε το laser με σταθερό ρεύμα (bias current) ώστε να εκπέμπει συνεχές κύμα (Continuous wave) ενώ στη συνέχεια ένας εξωτερικός διαμορφωτής μεταβάλλει την οπτική ισχύ ανάλογα με τα δεδομένα.[23]

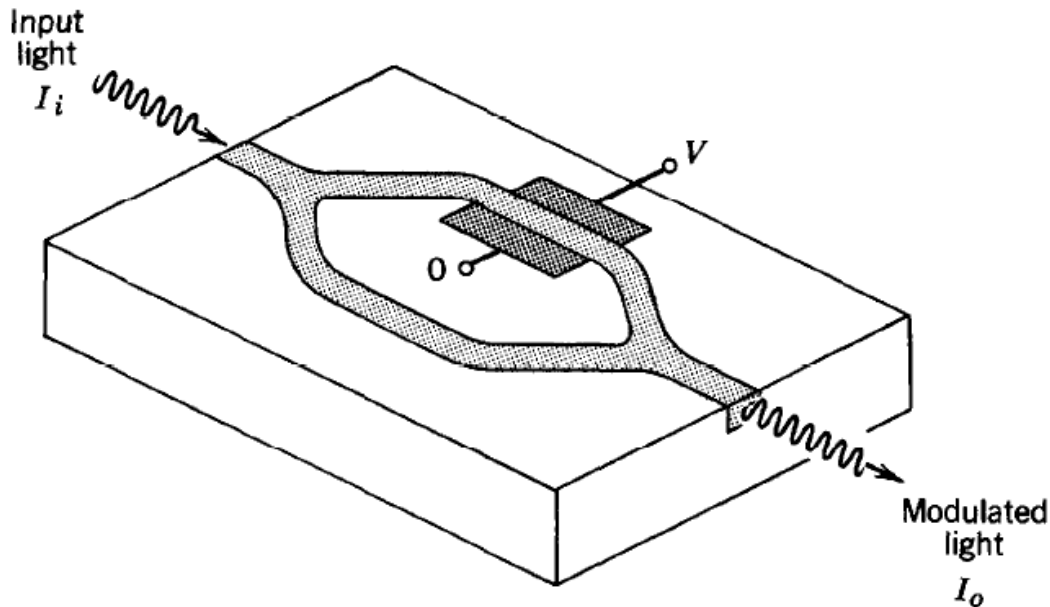
4.3. Τεχνικές External Modulation

Οι διαμορφωτές κατασκευάζονται από υλικά τα οποία αλλάζουν τις οπτικές ιδιότητες τους όταν τους επιβάλλεται μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο, και πιο σπάνια είναι η χρήση ακουστικών κυμάτων. Γενικά οι παρακάτω προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται:

4.3.1. Electrooptic and Magnetooptic Effects

Υπάρχουν αρκετά υλικά (όπως ο ασβετίτης CaCO_3 , ο χαλαζίας SiO_2 κ.α) που αλλάζουν τις οπτικές τους ιδιότητες παρουσία ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου (ή και των δύο). Συνήθως η αλλαγή που παρατηρείται αφορά αλλαγή στον δείκτη διάθλασης n , η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι διαφορετική για τις πολώσεις του προσπίπτοντος φωτός. Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης σε σχέση με το ηλεκτρικό πεδίο είναι, αναλόγως το υλικό, είτε γραμμική (φαινόμενο Kerr) είτε ανάλογη του τετραγώνου του πεδίου (φαινόμενο Pockels)[25]. Η αλλαγή του δείκτη διάθλασης προκαλεί αλλαγές στην ταχύτητα διάδοσης του κύματος και με καθορισμένο το

μήκος του υλικού στο οποίο ελέγχουμε το n μπορούμε να μεταβάλλουμε την φάση του ΗΜ κύματος. Αυτού του είδους η διαμόρφωση φάσης όμως δεν μας είναι πολύ χρήσιμη. Παρόλα αυτά συσκευές (όπως το συμβολόμετρο Mach-Zehnder στο σχήμα 4.4) χρησιμοποιούν αυτή τη διαδικασία για να επιτύχουν αλλαγές στο πλάτος του σήματος. Γενικά οι περισσότεροι διαμορφωτές υψηλού ρυθμού κατασκευάζονται βασισμένοι στο παραπάνω φαινόμενο.[23]



Σχήμα 4.4 Σε συμβολόμετρο Mach-Zehnder κατασκευασμένο με υλικά τα οποία αλλάζουν δείκτη διάθλασης παρουσία ηλεκτρικού πεδίου[26], μπορούμε εφαρμόζοντας τάση στον ένα κλάδο να αλλάξουμε την φάση του κύματος που περνά από αυτόν και να επιτύχουμε έτσι στο τέλος προσθετική ή αναιρετική συμβολή, με άλλα λόγια επιτυγχάνουμε διαμόρφωση κατά πλάτος[25].

4.3.2. Electro-Absorption Effects

Ένας ιδανικά απλός διαμορφωτής μπορεί να είναι κατασκευασμένος από ένα υλικό το οποίο να αλλάζει τον δείκτη απορρόφησης του παρουσία ηλεκτρικού πεδίου. Δυστυχώς δεν υπάρχουν πολλά υλικά με αυτό το χαρακτηριστικό. Όμως ημιαγωγοί (όπως GaAs) εμφανίζουν τέτοια συμπεριφορά και χρησιμοποιούνται στην κατασκευή διαμορφωτών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν θέλουμε το laser και ο διαμορφωτής να ενσωματώνονται στην ίδια συσκευή. [23]

4.3.3. Acoustic Modulators

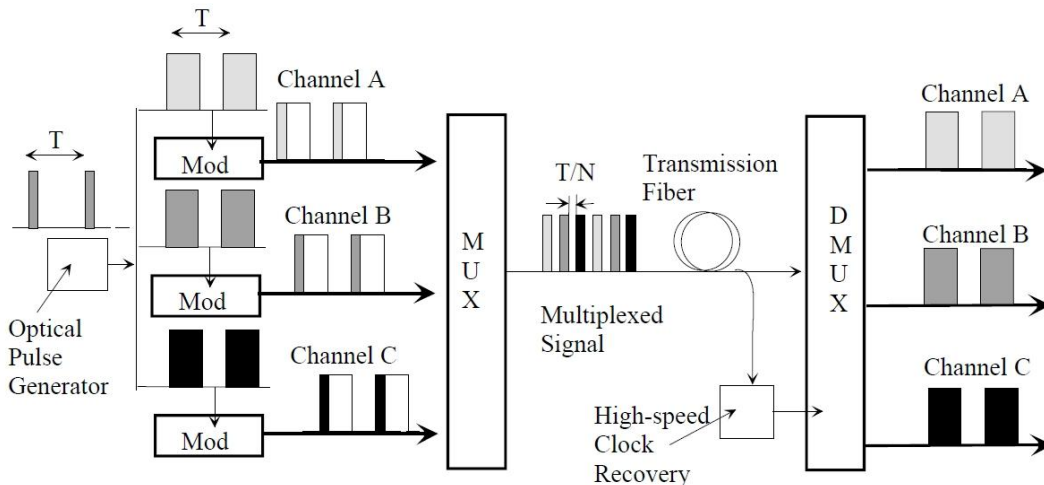
Οι ακουστικοί διαμορφωτές, λιγότερο δημοφιλείς, χρησιμοποιούν ήχο πολύ υψηλής συχνότητας ο οποίος ταξιδεύει μέσα σε κρύσταλλο ή σε επίπεδο κυματοδηγό για να διαθλαστεί το φως από το προκαθορισμένο του μονοπάτι σε άλλο. Ελέγχοντας

την ένταση του ήχου μπορούμε να ελέγξουμε την ποσότητα του φωτός που διαθλάται, να κατασκευάσουμε επομένως έναν διαμορφωτή.[28]

4.4. Multiplexing

Το εύρος ζώνης του σήματος στα οπτικά συστήματα επικοινωνίας μπορεί να υπερβεί το 1THz λόγω της μεγάλης συχνότητας του οπτικού φέροντος. Ωστόσο στην πράξη ο ρυθμός μετάδοσης bit συχνά περιορίζεται στα 10Gbps, λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από τη διασπορά και τη μη γραμμικότητα στις οπτικές ίνες καθώς και την ταχύτητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η μετάδοση των πολλαπλών οπτικών καναλιών μέσω της ίδιας οπτικής ίνας δίνει ένα πολύ απλό τρόπο χρήσης των ικανοτήτων που προσφέρει η οπτική σαν επιστήμη[20]. Η πολυπλεξία των καναλιών μπορεί να επιτευχθεί στην περιοχή του χρόνου, στην περιοχή της συχνότητας ή με άλλες τεχνικές, όπως η πολυπλεξία πόλωσης η οποία εξετάζεται πειραματικά σε παρακάτω κεφάλαιο. Στις οπτικές επικοινωνίες οι δύο πρώτες τεχνικές αυτές ονομάζονται OTDM(optical time division multiplexing) και WDM(wave division multiplexing). Τα οπτικά συστήματα που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους τεχνικές ονομάζονται πολυκάναλα συστήματα επικοινωνίας. Παρακάτω παρουσιάζονται διάφορες τεχνικές πολυπλεξίας.

4.4.1. TDM (Time Division Multiplexing)

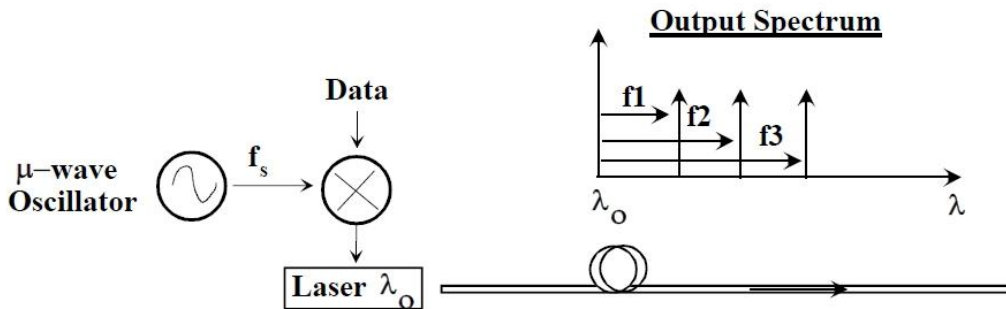


Σχήμα 4.5 Παράδειγμα συστήματος TDM

Για να επιτύχουμε την πολυπλεξία στο πεδίο του χρόνου, όπως βλέπουμε και στο σχήμα 4.5, αρχικά παράγουμε τους οπτικούς παλμούς μας σε υψηλό ρυθμό r με την βοήθεια μιας γεννήτριας και στην συνέχεια μειώνουμε την διάρκεια τους, σε $1/Nr$ όπου N είναι ο αριθμός των καναλιών μας. Κάθε ένα από τα κανάλια καθυστερείται κατάλληλα και καταλαμβάνει μια συγκεκριμένη χρονική θυρίδα(time slot) ώστε τελικά να γνωρίζουμε ποια ροή bit αντιστοιχεί σε κάθε κανάλι και να μπορέσουμε τελικά να ανακατασκευάσουμε την αρχική πληροφορία. Με την μείωση της διάρκειας

του παλμού εισάγονται προβλήματα που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο, για αυτό το λόγο η χρήση επαναληπτών, ενισχυτών και φίλτρων είναι διαδεδομένη σε αυτό το σχήμα πολυπλεξίας και με αυτό τον τρόπο έχουν επιτευχθεί πολύ υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης. Όλη η παραπάνω διαδικασία μπορεί να επιτευχθεί και αποκλειστικά στο οπτικό πεδίο(OTDM).

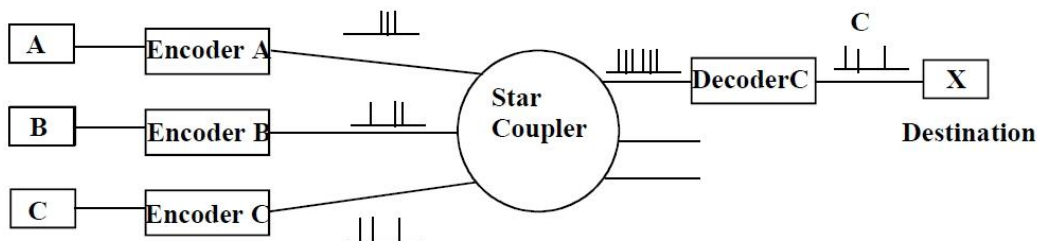
4.4.2. SCM (Sub Carrier multiplexing)



Σχήμα 4.6 Πολυπλεξία υποφέροντος

Η βασική ιδέα πίσω από την πολυπλεξία υποφέροντος είναι δανεισμένη από την τεχνολογία της μικροκυματικής επικοινωνίας, που χρησιμοποιεί πολλά μικροκυματικά φέροντα για μετάδοση πολλών καναλιών. Στα ηλεκτρικά ομοαξονικά καλώδια όμως το εύρος ζώνης είναι περιορισμένο κάτω από το 1 GHz σε αντίθεση με το τεράστιο εύρος ζώνης που έχουμε στις οπτικές επικοινωνίες. Με τη χρήση μικροκυματικού εξαρτήματος διαμορφώνονται ψηφιακά ή αναλογικά οι μικροκυματικές υποφέρουσες και στην συνέχεια χρησιμοποιούνται απευθείας για να διαμορφώσουν το οπτικό φέρον. Εδώ η πολυπλεξία και αποπολυπλεξία γίνονται με στο πεδίο του ηλεκτρικού σήματος περιορίζοντας το εύρος ζώνης. Συχνά αυτή η τεχνική συνδυάζεται με το TDM και το WDM.

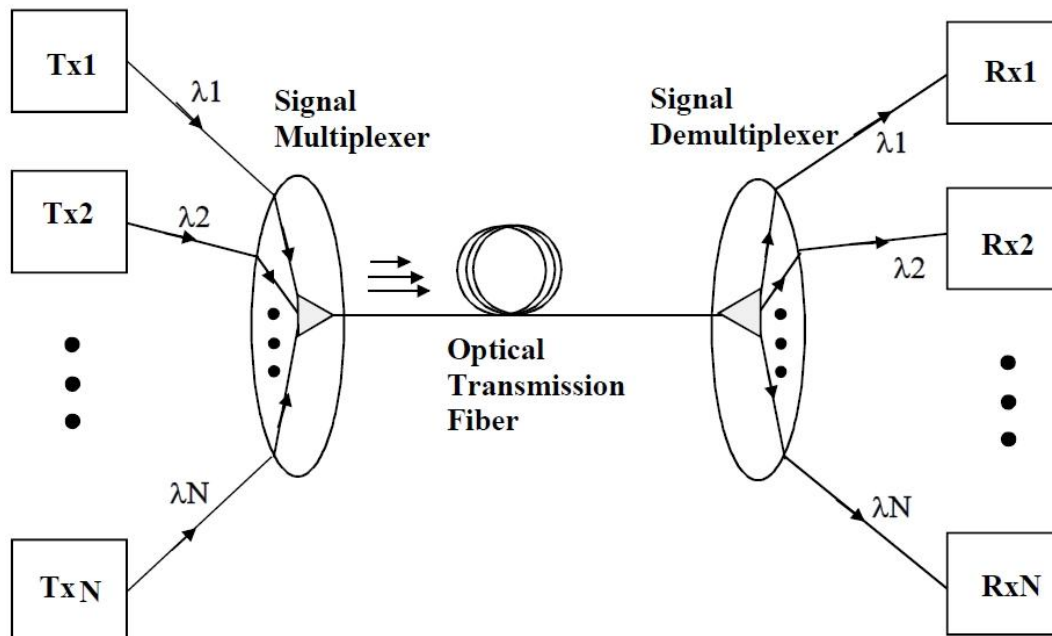
4.4.3. CDM (CODE Divison Multiplexing)



Σχήμα 4.7 Παράδειγμα πολυπλεξίας κώδικα

Στην πολυπλεξία με την χρήση κώδικα κάθε κανάλι μεταδίδει την ροή bit με κάποια συγκεκριμένη ακολουθία, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα μήκη κύματος και χρονικές θυρίδες.

4.4.4. WDM (Wavelength Division Multiplexing)



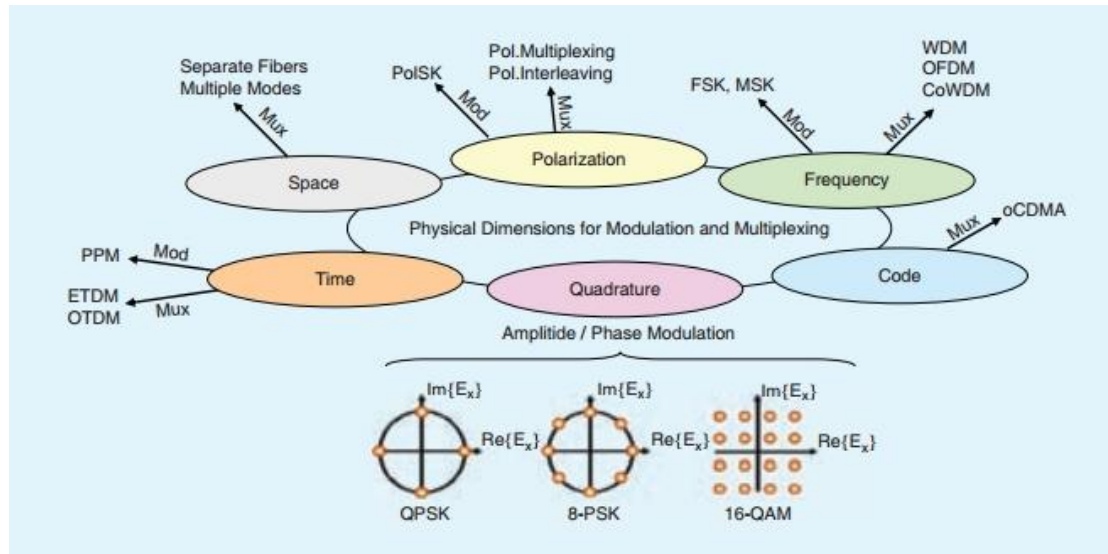
Σχήμα 4.8 Παράδειγμα συστήματος point to point WDM

Το πιο υποσχόμενο σχήμα πολυπλεξίας στις οπτικές τεχνολογίες είναι η πολυπλεξία μήκους κύματος. Κάθε πομπός εκπέμπει σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος τα οποία διαμορφώνονται χρησιμοποιώντας ανεξάρτητα ηλεκτρικά ρεύματα bit και κατόπιν μεταδίδονται μέσω της ίδιας οπτικής ίνας, με την πολυπλεξία και αποπολυπλεξία να επιτυγχάνονται οπτικά. Τα πρώτα συστήματα WDM χρησιμοποιούσαν ένα φέρον στα 1,3μm και ένα στα 1,5μm, περιοχές στις οποίες οι απώλειες είναι οι μικρότερες στις ίνες πυριτίου. Σήμερα έχουν κατασκευαστεί συστήματα όπου η απόσταση μεταξύ των καναλιών δεν ξεπερνά το 0,1nm και η συνολική χωρητικότητα ξεπερνάει τα 100Gbps(DWDM -CWDM). Η συνεχής ανάπτυξη νέων οπτικών φίλτρων έπαιξε καθοριστικό ρόλο ώστε τα κανάλια να μην παρεμβάλουν μεταξύ τους.[27]

4.4.5. PDM (Polarization division multiplexing)

Σε αυτό τον τρόπο πολυπλεξίας εκμεταλλευόμαστε το γεγονός σε ένα HM κύμα δύο ορθογωνικές καταστάσεις πόλωσης είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την καθεμία για την μετάδοση ανεξάρτητων ροών δεδομένων. Συνήθως βέβαια η πολυπλεξία στο πεδίο της πόλωσης συνδυάζεται με προηγούμενες τεχνικές όπως τις TDM και WDM ώστε να αυξηθεί η συνολική

χωρητικότητα του συστήματος. Με χρήση πολυπλεξίας PM έχει επιτευχθεί μάλιστα συνολικός μετάδοσης 1.28Tbit/s σε σύστημα OTDM.



Σχήμα 4.9 Οι φυσικές διαστάσεις τις οποίες εκμεταλλευόμαστε για να επιτύχουμε διαμόρφωση και πολυπλεξία στις οπτικές επικοινωνίες[35].

5. Filter theory

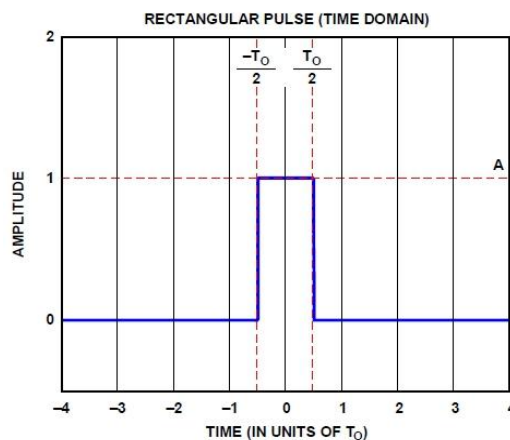
5.1. Εισαγωγικά

Τα συστήματα μετάδοσης δεδομένων τα οποία πρέπει να λειτουργούν σε ένα περιορισμένο εύρος ζώνης θα πρέπει να διαχειρίζονται σωστά το γεγονός ότι όταν περιορίζουμε το εύρος ζώνης ενός μεταδιδόμενου σήματος, αυξάνεται η πιθανότητα μιας λάθος ερμηνείας(αποκωδικοποίηση) στον δέκτη. Για αυτό το λόγο τέτοια συστήματα υιοθετούν συχνά τεχνικές αλλαγής στο σχήμα των παλμών(pulse shaping) που επιτρέπουν τον περιορισμό του εύρους ζώνης ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν την πιθανότητα για λάθη στο δέκτη.

Πριν γίνουν διαθέσιμα τα ψηφιακά φίλτρα, η αλλαγή στο σχήμα των παλμών γινόταν με την χρήση αναλογικών φίλτρων. Δυστυχώς όμως η απόκριση των αναλογικών φίλτρων επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις στις τιμές διάφορων εξαρτημάτων λόγω της μικρής ανοχής που έχουν σε αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας, όπως η θερμοκρασία αλλά και η γήρανση. Η απόκριση ενός ψηφιακού φίλτρου, αντιθέτως, εξαρτάται μόνο από τους συντελεστές του ίδιου, οι οποίοι είναι ανεξάρτητοι εξωτερικών παραγόντων. Επομένως, η ψηφιακή διαμόρφωση των παλμών έχει ενσωματωθεί σε πολλά ψηφιακά συστήματα μετάδοσης δεδομένων.

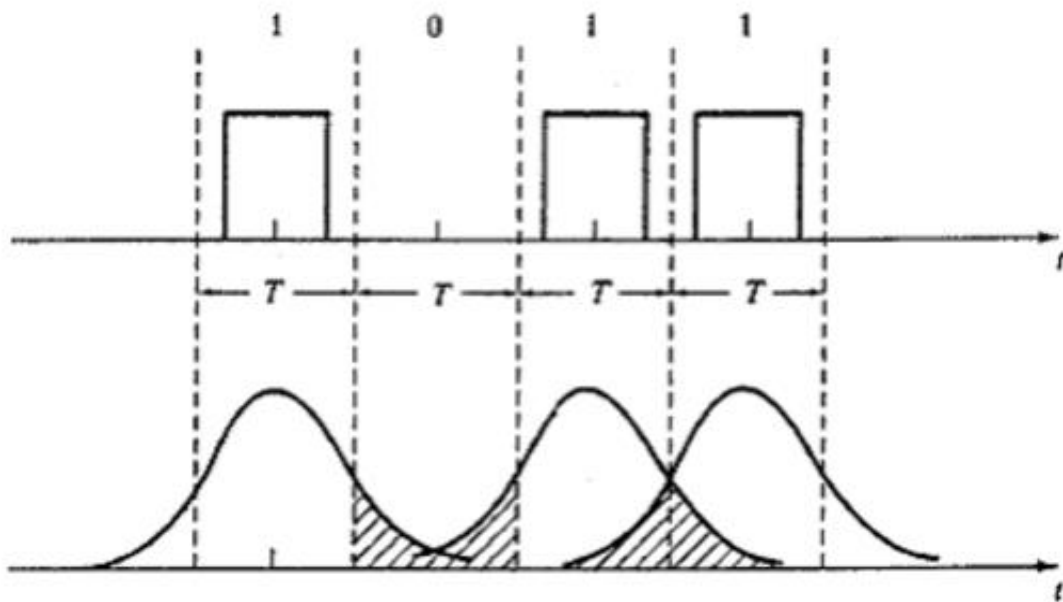
5.2. Ορθογωνικός παλμός

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ο πιο απλός τρόπος μετάδοσης πληροφορίας είναι με τη χρήση ορθογωνικών παλμών καθορισμένου πλάτους και περιόδου. Ένας τέτοιος παλμός φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 5.1 όπου $A=1$, $T=T_0$, με το κέντρο του παλμού στην αρχή του άξονα του χρόνου $t=0$. Πολλοί τέτοιοι διαδοχικοί παλμοί με χρονική απόσταση T μεταξύ τους αποτελούν την ροή της πληροφορίας η οποία μεταδίδεται με ρυθμό $1/T$ συμβόλων ανά δευτερόλεπτο (baud per sec). Αν χρησιμοποιούμε N στάθμες για να κωδικοποιήσουμε τα δεδομένα καταλήγουμε να έχουμε $\log_2 N$ bit ανά σύμβολο. Οπότε κάθε σύμβολο αντιστοιχεί σε ένα bit για ένα σύστημα δύο σταθμών, 2 bit σε συστήματα 4 σταθμών, 3 bit σε συστήματα 8 σταθμών κ.ο.κ.



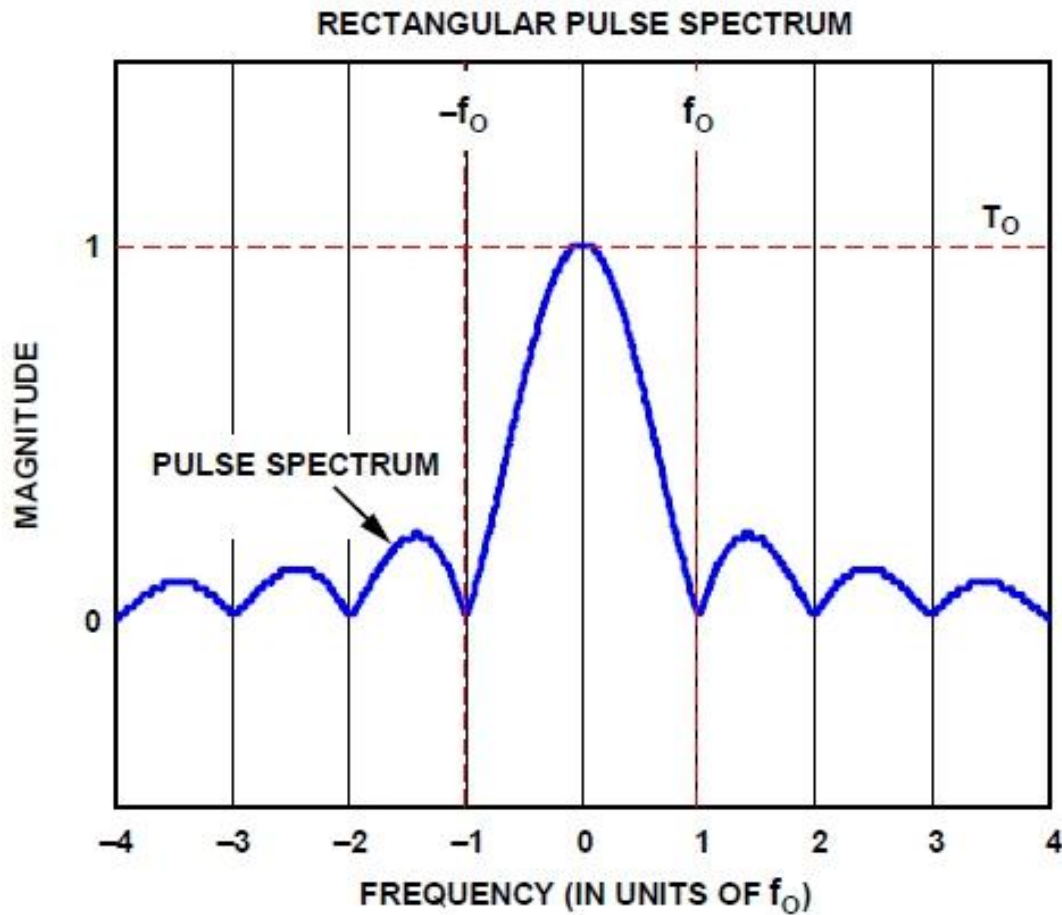
Σχήμα 5.1 Ορθογωνικός παλμός

Για να επιτύχουμε τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων σε ένα σύστημα APSK λοιπόν θέλουμε να έχουμε εφόσον είναι εφικτό περισσότερες στάθμες αλλά και όσο μικρότερη περίοδο T γίνεται. Η μείωση της περιόδου, εκτός από το ότι το προϋποθέτει αυξημένο εύρος ζώνης, εισάγει και ένα επιπλέον πρόβλημα. Λόγω του πεπερασμένου εύρους ζώνης αλλά και του φαινομένου της διασποράς ειδικά στις οπτικές επικοινωνίες (το οποίο εντείνεται σε παλμούς μικρής διάρκειας) οι παλμοί αποκλίνουν από το ιδανικό σχήμα, διευρύνονται χρονικά και καταλαμβάνουν περιοχές οι οποίες αφορούν τους επόμενους ή τους προηγούμενους παλμούς (σχήμα 5.2), δηλαδή έχουμε διασυμβολική παρεμβολή (ISI). Το γεγονός αυτό οδηγεί τον δέκτη σε λάθος αποκωδικοποίηση των συμβόλων ακόμα κι αν το δείγμα με βάση το οποίο ερμηνεύουμε την πληροφορία λαμβάνεται στο μέσο του παλμού. [40]



Σχήμα 5.2 Πάνω: τα δεδομένα προς μετάδοση σε ιδανικούς παλμούς Κάτω: το τελικό σήμα όπως φτάνει στο δέκτη όπου είναι εμφανής η διασυμβολική παρεμβολή [29]

Όταν εφαρμόσουμε μετασχηματισμό Fourier στον ορθογωνικό παλμό προκύπτει το φασματικό περιεχόμενό του, το οποίο φαίνεται στην εικόνα 5.3. Το σχήμα αυτό είναι η γνωστή απόκριση $\sin(x)/x$, η οποία συχνά αναφέρεται και ως sinc. Οι μηδενισμοί προκύπτουν πάντα σε σημεία που είναι ακέραια πολλαπλάσια του f_0 που είναι ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων. Επομένως οι μηδενισμοί αυτοί εξαρτώνται μόνο από την περίοδο T του παλμού. Θεωρητικά η συνάρτηση sinc επεκτείνεται μέχρι το άπειρο προσεγγίζοντας όμως το 0 όσο απομακρυνόμαστε από την αρχή των αξόνων. Για να μεταδοθεί λοιπόν τέλεια ένας ορθογωνικός παλμός απαιτείται άπειρο εύρος ζώνης, το οποίο είναι ανέφικτο.



Σχήμα 5.3 Το φάσμα ενός ορθογωνικού παλμού με περίοδο T_0

Η γενική μορφή που έχει το φάσμα μας δεν αλλάζει με βάση πλάτος του παλμού μας, καθώς αυτό επηρεάζει μόνο τις τιμές που παρατηρούμε στα τοπικά μέγιστα και όχι το που τοποθετούνται οι μηδενισμοί. Επομένως όταν η διαμόρφωση εξαρτάται μόνο από το πλάτος το φάσμα που έχουμε παίρνει πάντα την μορφή του σχήματος 5.3.

Λόγω της ιδιότητας του δυϊσμού του μετασχηματισμού Fourier αν αντιστρέψουμε τον παραπάνω μετασχηματισμό θα παρατηρήσουμε ότι αν ο παλμός προς μετάδοση έχει το σχήμα της sinc με τα 2 πρώτα μηδενικά να εμφανίζονται εκεί που ορίζαμε την περίοδο του τετραγωνικού παλμού, το εύρος ζώνης αυτή τη φορά όχι μόνο είναι σαφώς ορισμένου ως ένας ορθογωνικός παλμός αλλά απαιτείται και το μισό εύρος ζώνης από ότι απαιτούσε πριν η κύρια φασματική συνιστώσα μας, με όριο αυτή τη φορά τα $1/2T$ Hz. Αυτό είναι το πιο αποδοτικό σχήμα παλμού και αυτό το σχήμα προσπαθούμε να επιτύχουμε με τη χρήση φίλτρων αφού πέρα από τα παραπάνω η κλίση που θα έχει ο παλμός μέχρι να φτάσει στο μέγιστο του οδηγεί και σε μείωση της διασυμβολικής παρεμβολής[30].

5.3. Φίλτρα

5.3.1. Raised Cosine Filter

5.3.1.1. Στο πεδίο της συχνότητας

Ένα από τα πιο διαδομένα φίλτρα στο χώρο των επικοινωνιών είναι το raised cosine με απόκριση στο πεδίο της συχνότητας:

$$H(\omega) = \begin{cases} \tau, & 0 \leq \omega \leq c \\ \tau \left\{ \cos^2 \left[\frac{\tau(\omega - c)}{4a} \right] \right\}, & 0 \leq \omega \leq d \\ 0, & \omega > d \end{cases}$$

Σχέση 5.1

Όπου:

ω η γωνιακή συχνότητα

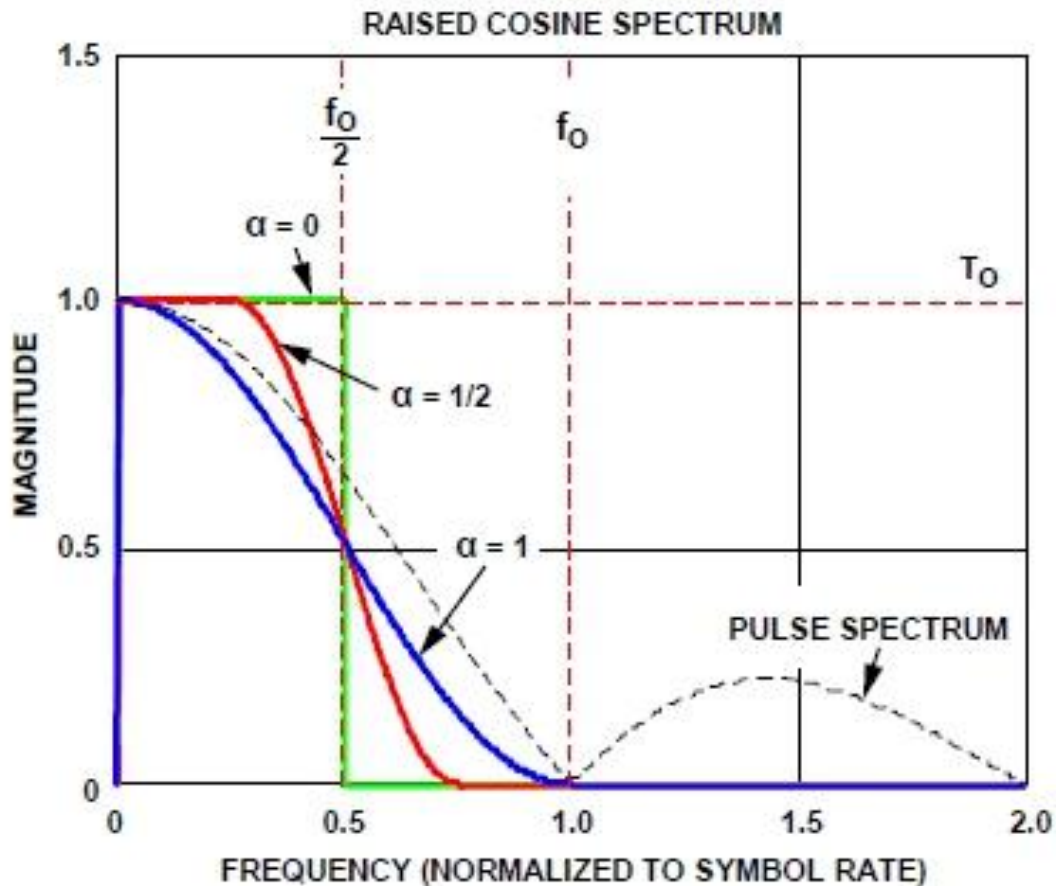
τ η περίοδος του παλμού

a ο παράγοντας roll off, $0 \leq a \leq 1$

c είναι ίσο με $(1-a)/\tau$

d είναι ίσο με $(1+a)/\tau$

Δυστυχώς με το μειώνουμε το εύρος ζώνης του ορθογωνικού παλμού εισάγουμε ανεπιθύμητη ταλάντωση στο σήμα μας. Ενώ ο ιδανικός παλμός έχει μη μηδενικό πλάτος μόνο για τον χρόνο T που θέλουμε να τον μεταδώσουμε, με την εφαρμογή του raised cosine παρατηρούμε κυματισμούς στο σήμα μας και πέρα από το αυτόν τον χρόνο. Αυτοί οι κυματισμοί μπορούν να οδηγήσουν σε λάθος ερμηνεία συμβόλου στον δέκτη μας αφού εκτείνονται στις χρονικές περιοχές των άλλων παλμών. Το raised cosine φίλτρο όμως μας δίνει την δυνατότητα να ελέγξουμε την παράμετρο a για να κάνουμε τον κατάλληλο συμβιβασμό ανάμεσα στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας. Παρακάτω βλέπουμε την απόκριση αυτού του φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας από όπου παίρνει και το όνομα του.



Σχήμα 5.4 Η απόκριση του raised cosine στο πεδίο της συχνότητας

Στο σχήμα 5.4 φαίνεται πως αλλάζει η απόκριση του φίλτρου για τις διάφορες τιμές του α :

- Για $\alpha=0$, το φάσμα περιορίζεται στο $\frac{1}{2} f_0$ (πράσινο)
- Για $\alpha=1$, το φάσμα περιορίζεται στο f_0 (μπλε)
- Για τιμές ανάμεσα στο 0 και το 1 η φασματική απόκριση περιορίζεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο τιμές.

Η μαύρη γραμμή στο σχήμα δείχνει το φάσμα ενός ορθογωνικού παλμού για σύγκριση. Αυτή η περιοχή συχνοτήτων αφορά το φίλτρο raised cosine, με την πρώτη συχνότητα να είναι γνωστή ως συχνότητα Nyquist η οποία και μας δείχνει το μικρότερο δυνατό φάσμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταδοθούν δεδομένα χωρίς να χάνεται πληροφορία.

Μια άλλη σημαντική συχνότητα που αφορά το φίλτρο μας είναι η συχνότητα αποκοπής (f_{stop}), που μηδενίζεται δηλαδή το φάσμα μας, η οποία συνδέεται με το α ως εξής:

$$f_{STOP} = (1 + a) \frac{f_o}{2}$$

Σχέση 5.2

Τέλος ορίζεται και η συχνότητα pass band όπου το φάσμα ξεκινά να φεύγει από το μέγιστο που εμφανίζεται. Το φίλτρο raised έχει τέτοια απόκριση ώστε το φάσμα μας να μένει στο μέγιστο από το f_o έως f_{PASS} :

$$f_{STOP} = (1 - a) \frac{f_o}{2}$$

Σχέση 5.3

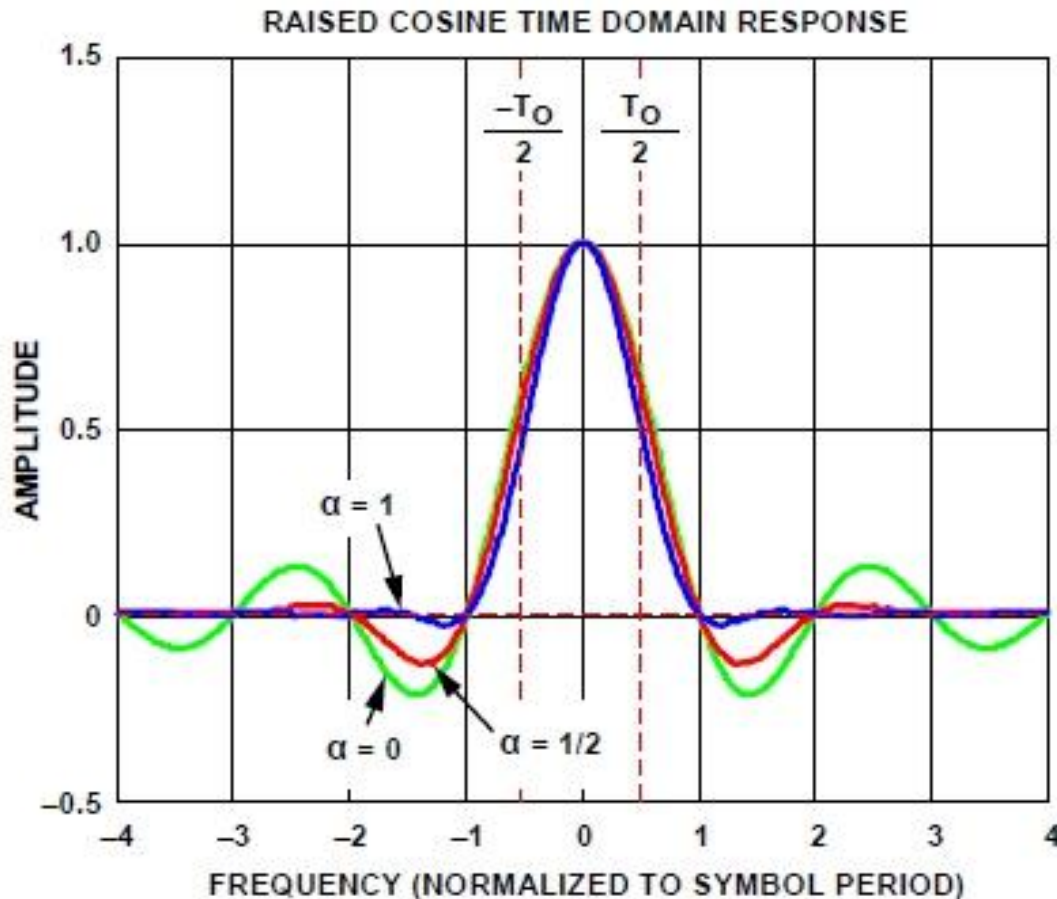
5.3.1.2. Στο πεδίο του χρόνου

Το φίλτρο raised cosine στο πεδίο του χρόνου έχει απόκριση:

$$h_{RC}(n) = \frac{\pi}{4} \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi n}{R}\right) * \left[\operatorname{sinc}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \frac{\pi n}{R}\right) + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha \frac{\pi n}{R}\right)}{\left(\frac{\pi}{2} + \alpha \frac{\pi n}{R}\right)} \right] \quad [31]$$

Σχέση 5.4

Το αποτέλεσμα της εφαρμογής του φίλτρου raised cosine στο πεδίο του χρόνου είναι ότι αλλάζει το σχήμα του αρχικά ορθογωνικού παλμού σε ένα πιο ομαλό και στρογγυλεμένο παλμό προσθέτοντας όμως και κυματισμούς πέρα από την περίοδο του αρχικού παλμού. Οι κυματισμοί αυτοί είναι προϊόν της συνέλιξης του ορθογωνικού παλμού με το φίλτρο raised cosine. Στο σχήμα 5.5, το οποίο είναι σε πλήρη αντιστοιχία με το προηγούμενο σχήμα στο πεδίο της συχνότητας βλέπουμε πως σχηματίζεται ο παλμός για τα διάφορα α . Οι κυματώσεις που παρατηρούνται δεν μπορούν να αποφευχθούν αφού εδώ έχοντας εφαρμόσει το φίλτρο μας έχουμε πλέον πεπερασμένο σήμα στο πεδίο της συχνότητας, γεγονός που συνεπάγεται ότι στο πεδίο του χρόνου το σήμα μας θα εκτείνεται στο άπειρο. Ένα από το πιο σημαντικά στοιχεία του φίλτρου raised cosine όμως είναι ότι οι μηδενισμοί που έχουν οι ταλαντώσεις συμπίπτουν με το κέντρο των γειτονικών παλμών. Έτσι σε ένα σύστημα όπου η απόφαση για την αποκωδικοποίηση λαμβάνεται ακριβώς στο κέντρο των παλμών, οι γειτονικοί παλμοί δεν παρεμβάλλονται.



Σχήμα 5.5 Η απόκριση του raised cosine στο πεδίο του χρόνου

Όπως προκύπτει από την σύγκριση των 2 σχημάτων καθώς αυξάνουμε το α αυξάνεται και το φασματικό περιεχόμενο του σήματος μας ενώ οι ταλαντώσεις στο πεδίο του χρόνου μειώνονται. Επομένως με $\alpha=0$ έχουμε την πιο αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης αλλά με πολύ μεγάλους κυματισμούς στο πεδίο του χρόνου. Όσο αυξάνουμε το α , αυξάνεται το εύρος ζώνης που χρειαζόμαστε αλλά συγχρόνως μειώνεται το πλάτος των κυματισμών. Παραπάνω αναφέραμε ότι οι κυματισμοί αυτοί εμφανίζονται στο μέσο των γειτονικών παλμών και δεν παρεμβάλλονται. Αυτό όμως ισχύει μόνο για ιδανικούς δέκτες οι οποίοι παίρνουν την απόφαση τους με βάση δείγμα που βρίσκεται ακριβώς στην μέση του παλμού. Αφού στην πραγματικότητα αυτό δεν είναι εφικτό θα πρέπει να γίνει ο κατάλληλος συμβιβασμός για την τιμή του α ώστε να ελαχιστοποιούνται και οι κυματώσεις αλλά και το απαιτούμενο εύρος ζώνης.

5.3.2. Root raised cosine

Μερικές φορές είναι επιθυμητό η απόκριση του φίλτρου raised cosine να μην εφαρμόζεται εξ' ολοκλήρου στον πομπό αλλά να προκύπτει ως το γινόμενο δύο πανομοιότυπων φίλτρων σε πομπό και δέκτη, αφού έτσι επιτυγχάνεται το μικρότερο δυνατό BER. Αυτά τα φίλτρα είναι γνωστά ως root-raised cosine και η απόκριση τους είναι:

$$H(\omega) = \begin{cases} \sqrt{\tau}, & 0 \leq \omega \leq c \\ \sqrt{\tau} \left\{ \cos \left[\frac{\tau(\omega - c)}{4a} \right] \right\}, & 0 \leq \omega \leq d \\ 0, & \omega > d \end{cases}$$

Σχέση 5.5

Με τις παραμέτρους να έχουν την ίδια φυσική σημασία με το φίλτρο raised cosine.[40]

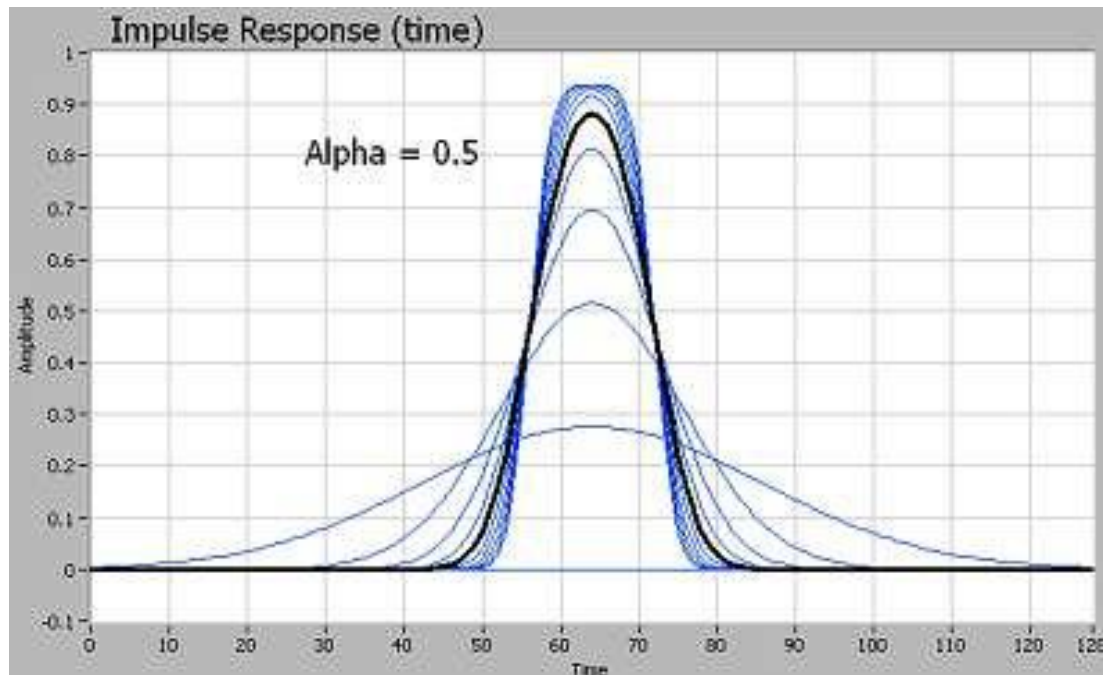
5.3.3. Gaussian Filter

Το φίλτρο αυτό δίνει έναν παλμό στο σχήμα της γκαουσιανής συνάρτησης. Συνήθως χρησιμοποιείται όταν έχουμε ψηφιακή διαμόρφωση συχνότητας(FSK). Μία κύρια διαφορά που έχει σε σχέση με τα φίλτρα raised cosine και root raised cosine είναι ότι δεν εμφανίζει περιοδικούς μηδενισμούς στο πεδίο του χρόνου. Η απόκριση αυτού του φίλτρου στο πεδίο του χρόνου είναι[32]:

$$h_G(t) = Q\left(\frac{2\pi\alpha}{\sqrt{\ln 2}}\left(n - \frac{1}{2}\right)\right) - Q\left(\frac{2\pi\alpha}{\sqrt{\ln 2}}\left(n + \frac{1}{2}\right)\right)$$

Σχέση 5.6

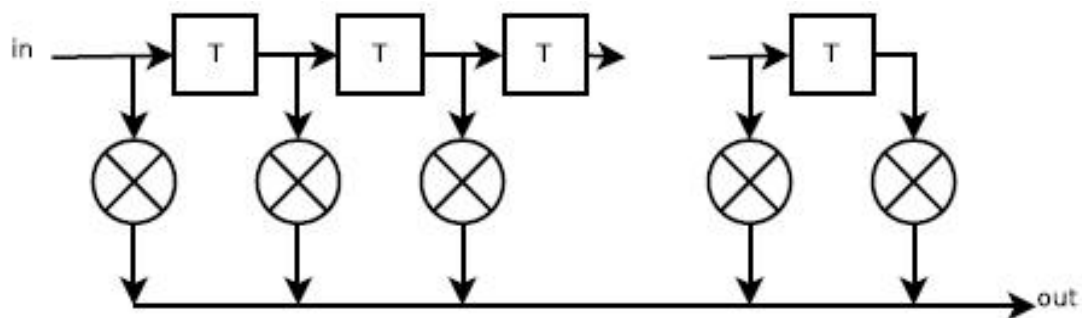
Η γραφική αναπαράσταση της απόκρισης αυτής φαίνεται στο σχήμα 5.6. Όπως αναφέραμε και παραπάνω δεν παρατηρούμε μηδενισμούς.



Σχήμα 5.6 Γραφική αναπαράσταση της απόκρισης του γκαουσιανού φίλτρου

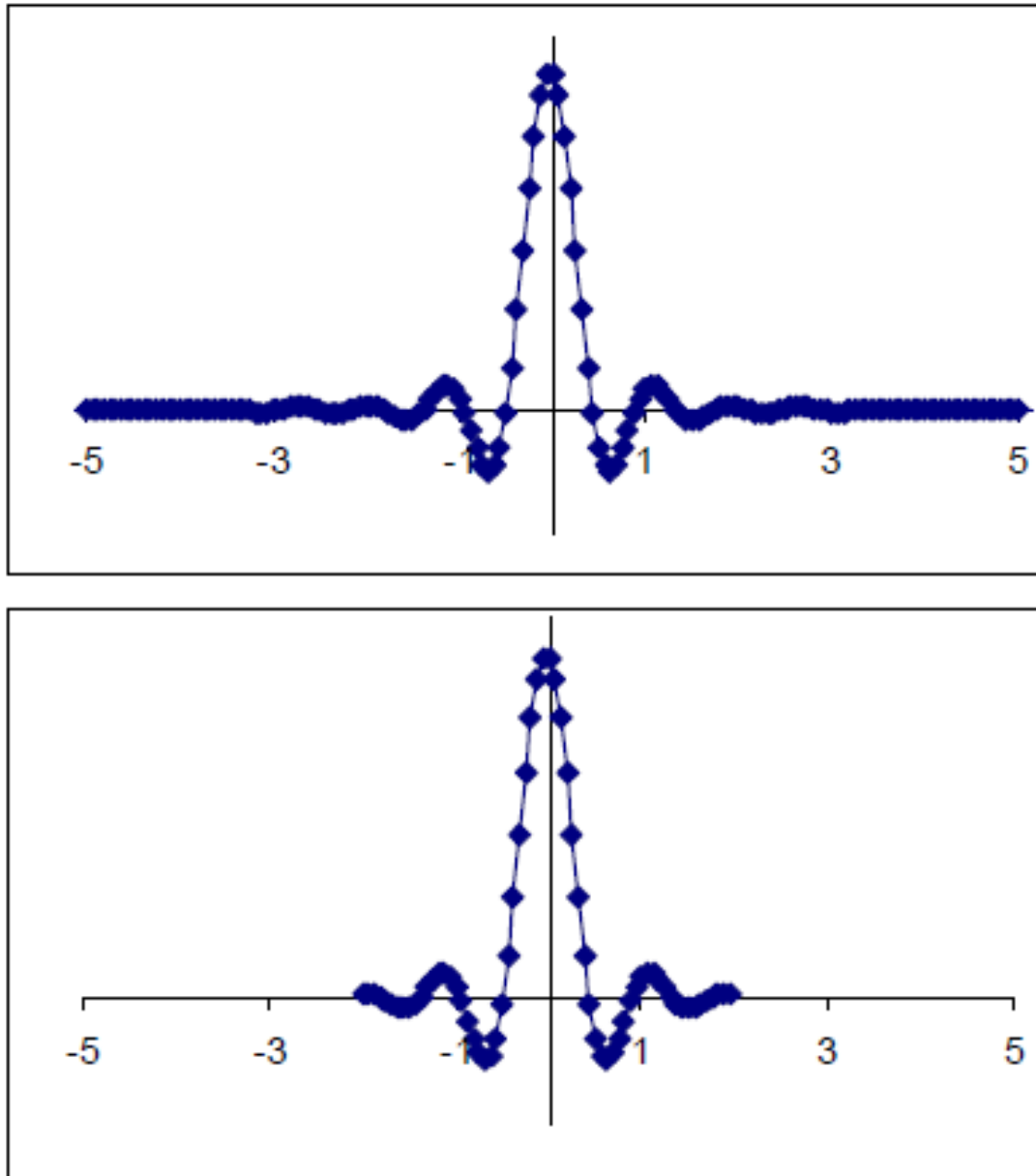
4.4 Digital filters [40]

Για να μπορέσουμε να έχουμε την ιδανική απόκριση στα παραπάνω φίλτρα θα έπρεπε να τα υλοποιήσουμε είτε ως αναλογικά(με τα μειονεκτήματα που έχουν αναφερθεί) είτε ως άπειρα ψηφιακά φίλτρα(IIR)[33]. Επειδή και η δεύτερη επιλογή δεν είναι πρακτική, στις περισσότερες διατάξεις ενσωματώνονται τελικά πεπερασμένα ψηφιακά φίλτρα(FIRs), τα οποία όμως εισάγουν δικούς τους περιορισμούς.



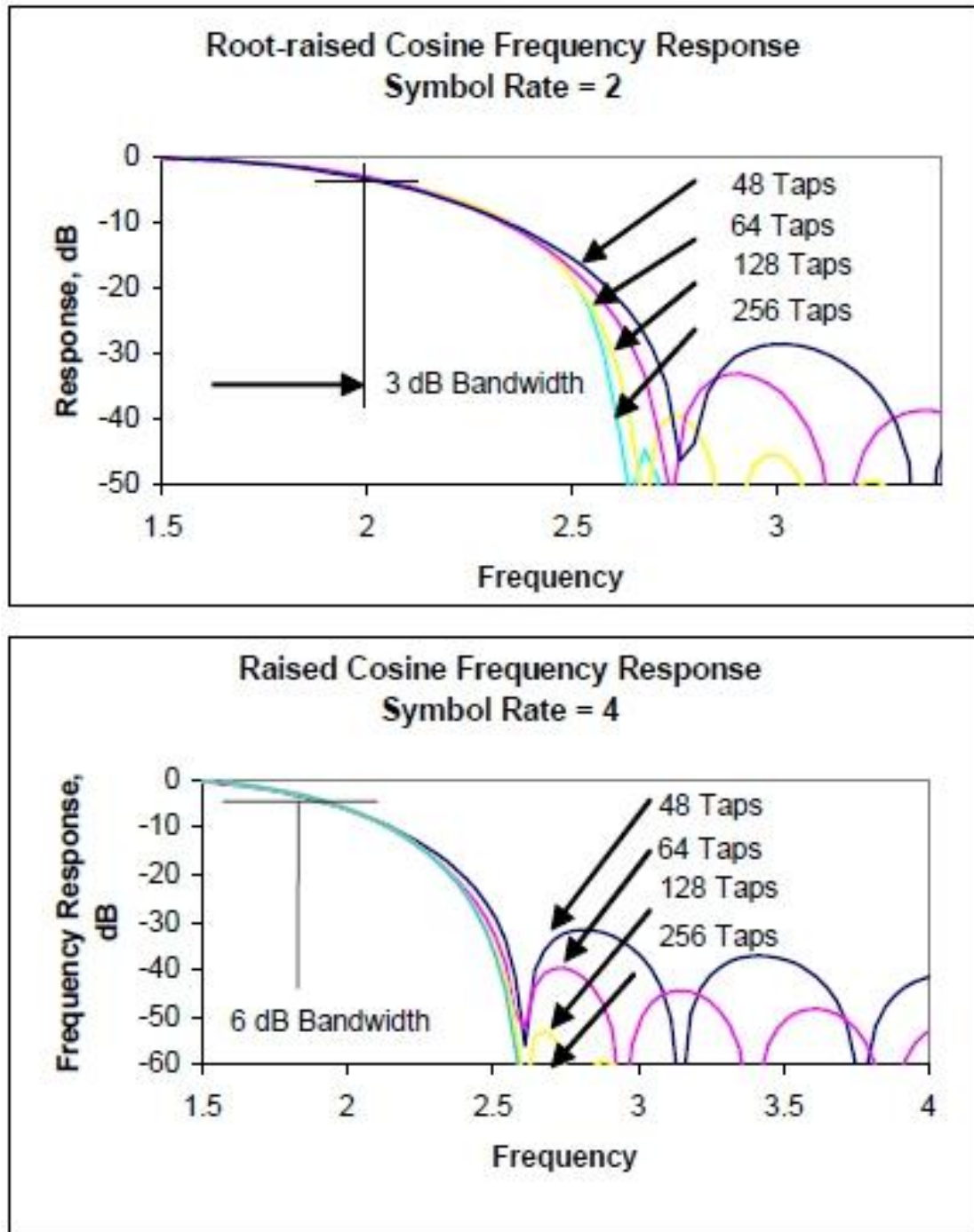
Σχήμα 5.7 Παράδειγμα δομής FIR[34]

Καθώς η εργασία που εκτελούν είναι στο πεδίο του χρόνου, το φίλτρο εφαρμόζεται σε διακριτά σημεία ώστε να σχηματιστεί τελικά ο παλμός μας. Το πόσα σημεία θα προκύπτουν για τον κάθε παλμό εξαρτάται από το μήκος του φίλτρου που έχουμε. Γενικά τα λιγότερα σημεία οδηγούν σε μικρότερου μήκους παλμό και χειρότερα αποτελέσματα όσον αφορά το φασματικό περιεχόμενο του παλμού προς μετάδοση. Παρακάτω δίνονται κάποια παραδείγματα παλμών για διαφορετικό μήκος φίλτρου RRC.

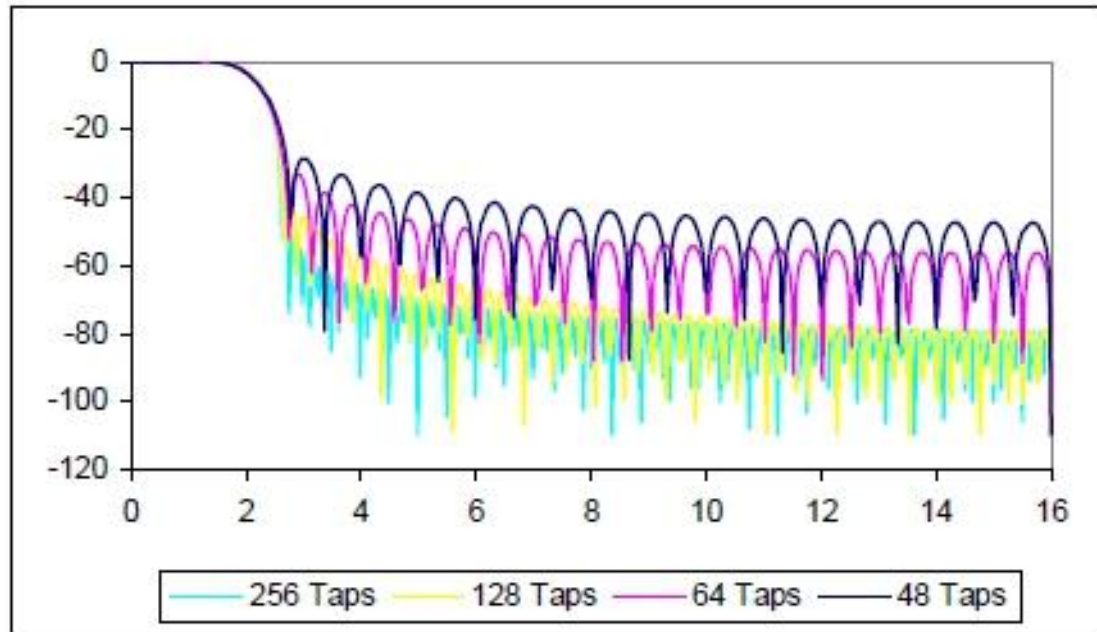


Σχήμα 5.8 RRC για $\alpha.128$ σημεία $\beta.64$

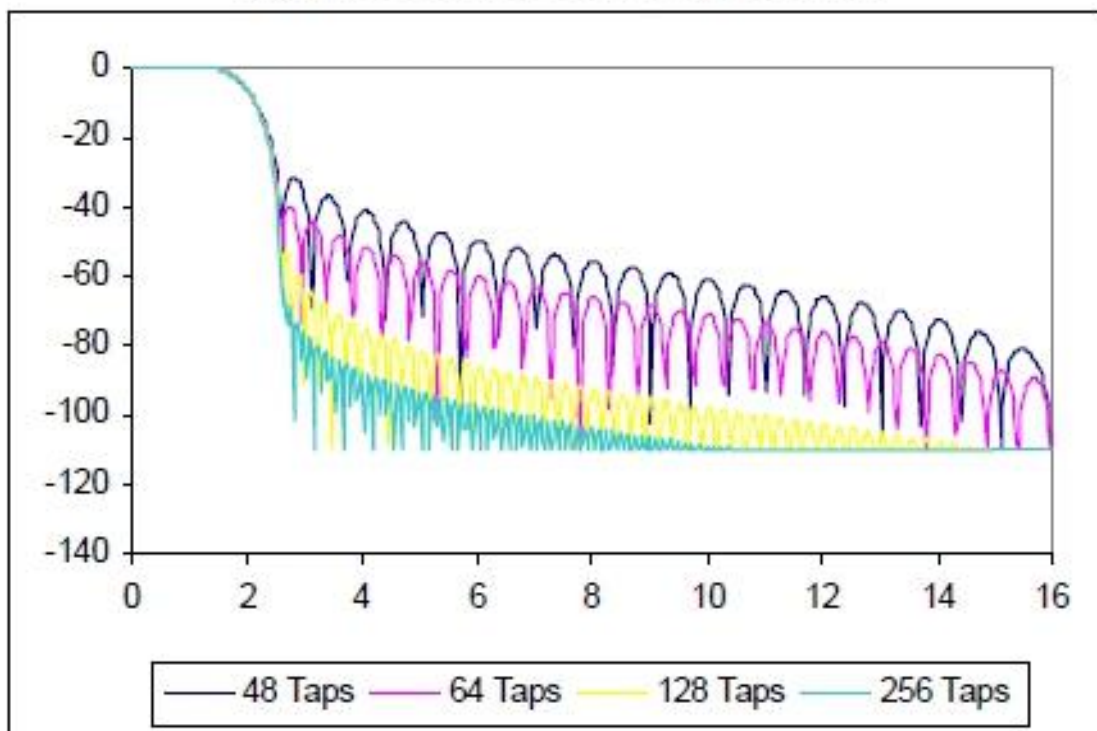
Όπως βλέπουμε το σχήμα παραμένει σε γενικές γραμμές ίδιο με τη μόνη διαφορά ότι ο πρώτος παλμός εκτείνεται λιγότερο. Στο πεδίο της συχνότητας λοιπόν ο πρώτος παλμός έχει ανεπιθύμητες φασματικές συνιστώσες οι οποίες καταπιέζονται λιγότερο απ' ότι στο φίλτρο με το μεγαλύτερο μήκος όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα. [30]



Σχήμα 5.9 Το φάσμα που προκύπτει με την χρήση του RRC στον πομπό και μετά την εφαρμογή δεύτερου RRC στον δέκτη.



(a) Root raised cosine spectrum



(b) Raised cosine spectrum

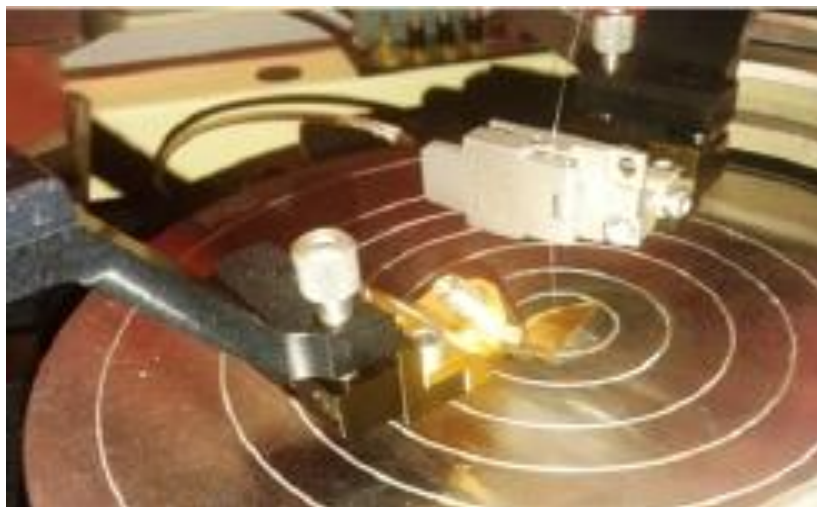
Σχήμα 5.10 Εξετάζοντας μεγαλύτερο κομμάτι του φάσματος βλέπουμε ότι υπάρχει εκτενές ανεπιθύμητο φασματικό περιεχόμενο ειδικά για λίγα “taps”

6. Πειραματική διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φωτονικών Επικοινωνιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πειράματα ήταν αποτέλεσμα της συνεργασίας του εργαστηρίου με το Πολυτεχνείο του Μονάχου (TUM) στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος MIRAGE. Το πρώτο είναι ουσιαστικά ένα πείραμα υψηλής μετάδοσης πληροφορίας με χρήση VCSEL και με την τεχνική της απευθείας διαμόρφωσης (direct modulation). Το δεύτερο, αφορά στην δημιουργία ενός PAM-4 σήματος εξ' ολοκλήρου στο οπτικό πεδίο με τη χρήση μιας τεχνικής πολυπλεξίας στην πόλωση. Για μια πιο ολιστική προσέγγιση στα βήματα που ακολουθήθηκαν πριν την πραγματοποίηση πειραμάτων, γίνεται μια step-by-step παρουσίαση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν ούτως ώστε να κατασκευαστούν τα συγκεκριμένα VCSELS.

6.1. Παθητικές Μετρήσεις

Το στοιχείο που χρησιμοποιήσαμε στα δυο πειράματα που ακολουθούν είναι ένα single polarization, single mode VCSEL με 3dB bandwidth στα 20,5 GHz. Όμως για να σχεδιαστεί αυτό δοκιμάστηκαν και μετρήθηκαν πολλοί διαφορετικοί τύποι VCSEL με μικρότερο bandwidth. Τα VCSEL αρχικά έρχονται με την μορφή wafer (σχήμα 3.10) και σκοπός μας κάθε φορά είναι να βρούμε αυτά που εμφανίζουν την καλύτερη συμπεριφορά όσον αφορά την διάταξη για την οποία προορίζονται. Κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας με την βοήθεια ενός ελεγκτή θερμοκρασίας εξάγουμε καμπύλες LIV(ενότητα 4.2.2.1) και τις s-parameters(ενότητα 4.2.2.2). Καθώς τα VCSEL βρίσκονται ακόμα στο wafer τα τοποθετούμε σε έναν μικροκυματικό σταθμό βάσης(RF probe station) και με την βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου τοποθετούμε το στοιχείο προς εξέταση στην κατάλληλη θέση για να τροφοδοτηθεί(σχήμα 6.1). Η θέση της οπτικής ίνας καθορίζεται επίσης με την βοήθεια του μικροσκοπίου ώστε να οδηγείται εκεί το μεγαλύτερο μέρος της οπτικής ισχύος.

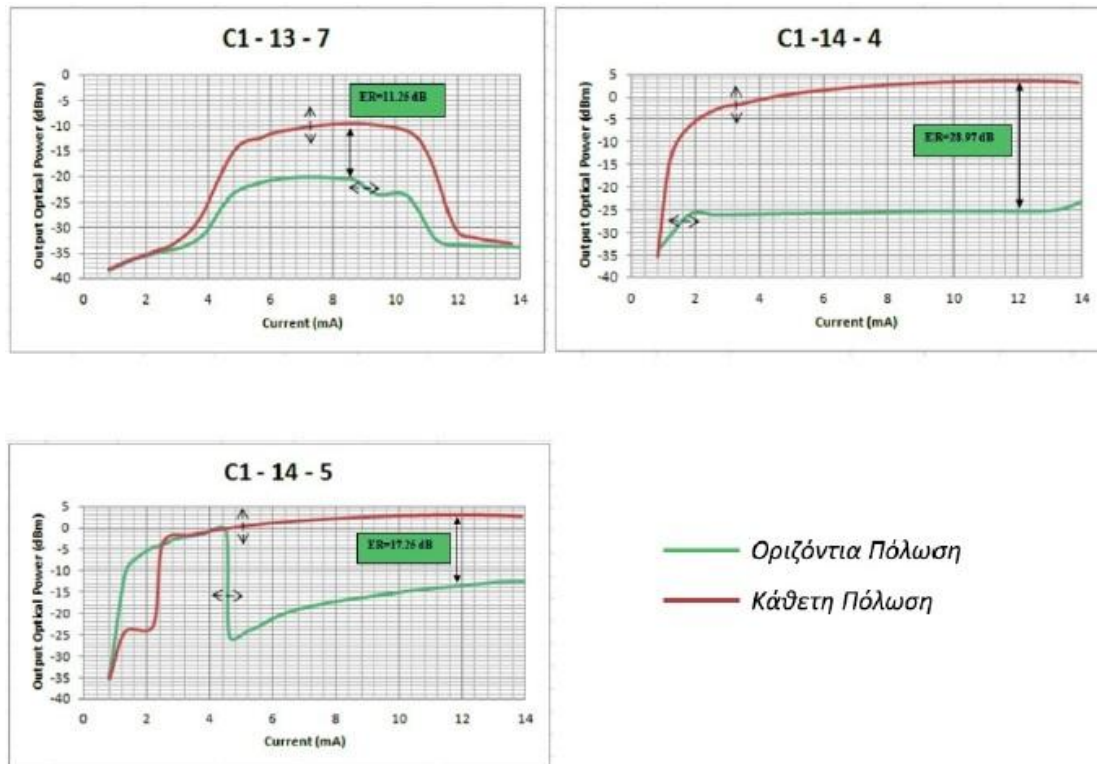


Σχήμα 6.1 Κοντινή φωτογραφία του RF probe tip

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω με τον σχεδιασμό της LIV καμπύλης προκύπτουν κάποιες περιοχές λειτουργίας. Η γραμμική περιοχή είναι πολύ σημαντική αφού για σχήματα διαμόρφωσης πλάτους κάνουμε bias το VCSEL στο μέσο αυτής, ώστε οι στάθμες που προκύπτουν να είναι διακριτές και να ακολουθούν το ρεύμα που τις αντιπροσωπεύει. Από έναν ρεύμα και πάνω επέρχεται κορεσμός και έτσι η περιοχή αυτή δεν μας είναι χρήσιμη αφού η οπτική ισχύς δεν είναι αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος και έτσι δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε διαμόρφωση πλάτους ενώ επιπλέον έχουμε μικρότερη απόδοση.

Εκτός από τα παραπάνω για αρκετά πειράματα είναι αναγκαίο να εξετάσουμε και την πόλωση(ενότητα 2.2) που ακολουθεί το ΗΜ κύμα κατά την μετάδοση του. Ορίζοντας 2 ανεξάρτητους κάθετους άξονες αναφοράς μπορούμε να σχεδιάσουμε LIV καμπύλες για τον καθένα και να δούμε αν η οπτική ισχύς, ανάλογα με το ρεύμα και την τάση που εφαρμόζεται, συγκεντρώνεται σε ΗΜ κύμα που αφορά κάποια συγκεκριμένη πόλωση ή αν με την αύξηση του ρεύματος η πόλωση αλλάζει.

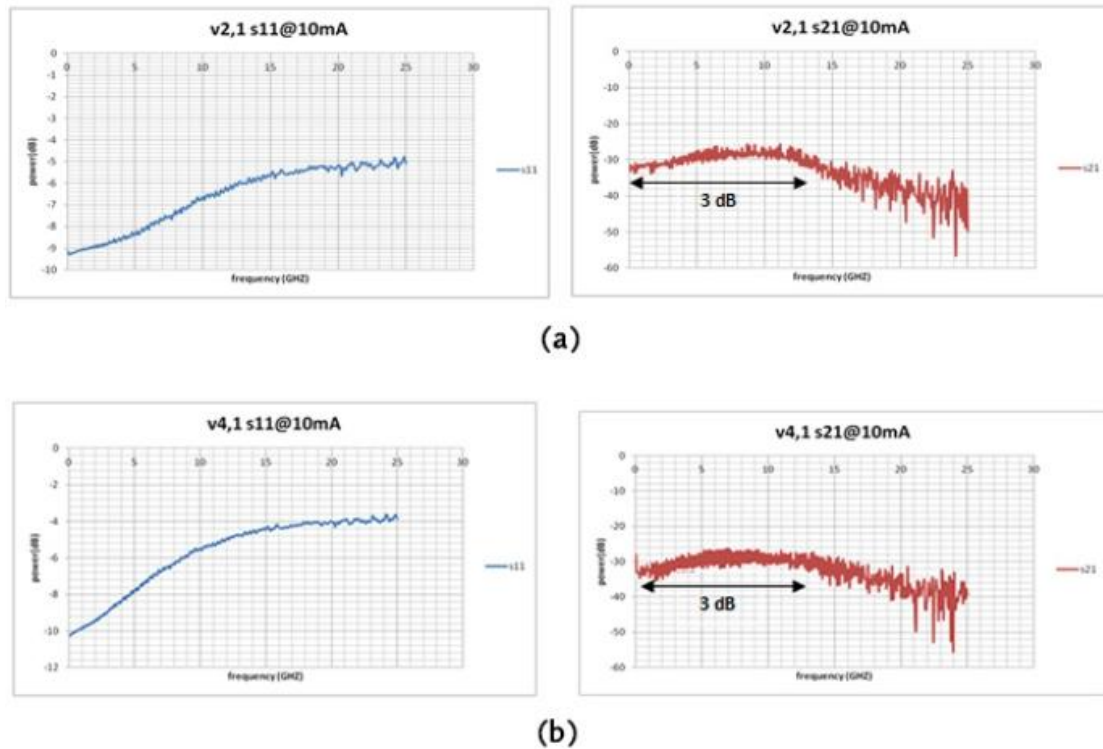
Στο σχήμα 6.2 που έχει σχεδιαστεί σε προηγούμενο πείραμα, μπορούμε να δούμε τέτοιες καμπύλες. Ο τίτλος κάθε γραφικής παράστασης περιγράφει την θέση του κάθε VCSEL στον χάρτη μετρήσεων. Δηλαδή, το "C1-13-4" σημαίνει ότι το VCSEL είναι τύπου C1 και βρίσκεται στην 13η σειρά και 4η στήλη στον χάρτη. Η μέγιστη 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). 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 $4.5mA$.



Σχήμα 6.2 Καμπύλες LIV για τον κάθε άξονα πόλωσης

Το επόμενο κομμάτι του χαρακτηρισμού των VCSEL αφορά τις s-parameters . Αυτές τις εξάγουμε με την βοήθεια ενός διανυσματικού αναλυτή δικτύου με την βοήθεια του οποίου παίρνουμε τελικά ακριβείς μετρήσεις των λόγων του ανακλώμενου σήματος προς το προσπίπτον και του διαδιδόμενου προς το προσπίπτον ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί όπως αναφέρονται στην ενότητα 4.2.2.2.

Στο Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για s-parameters βλέπουμε μετρήσεις για τις παραμέτρους S_{11} και S_{21} . Στις μετρήσεις της δεύτερης αναφέρεται και το εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος (3 dB bandwidth). 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. Τα δύο παρακάτω VCSEL εμφανίζουν ίδια επίδοση εύρους ζώνης 3dB το οποίο είναι 13 GHz.

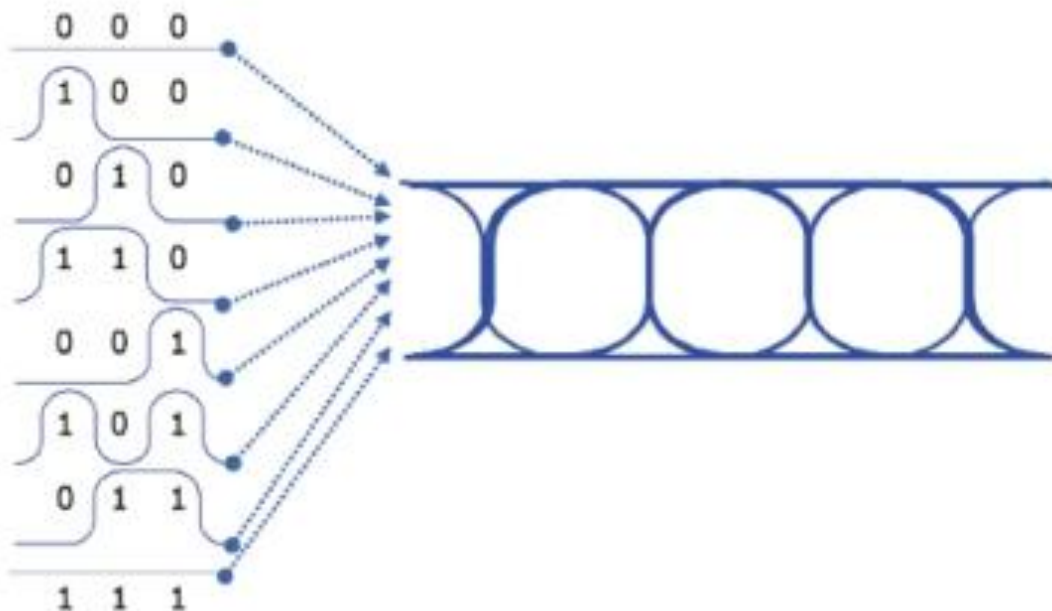


Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα πειραματικών μετρήσεων για s-parameters

Μετά το πέρας του χαρακτηρισμού, γίνεται η επιλογή του κατάλληλου VCSEL για την εκάστοτε διάταξη. Το wafer στέλνεται πίσω, ώστε να κοπεί (dice) και να ενσωματωθεί (όχι πάντα) το στοιχείο μας σε ηλεκτρονική πλακέτα (silicon chip). Τελικός σκοπός της παραπάνω αλυσίδας είναι κάποια από αυτά να αποτελέσουν την πηγή του transmitter που θα κατασκευαστεί στα πλαίσια του project.

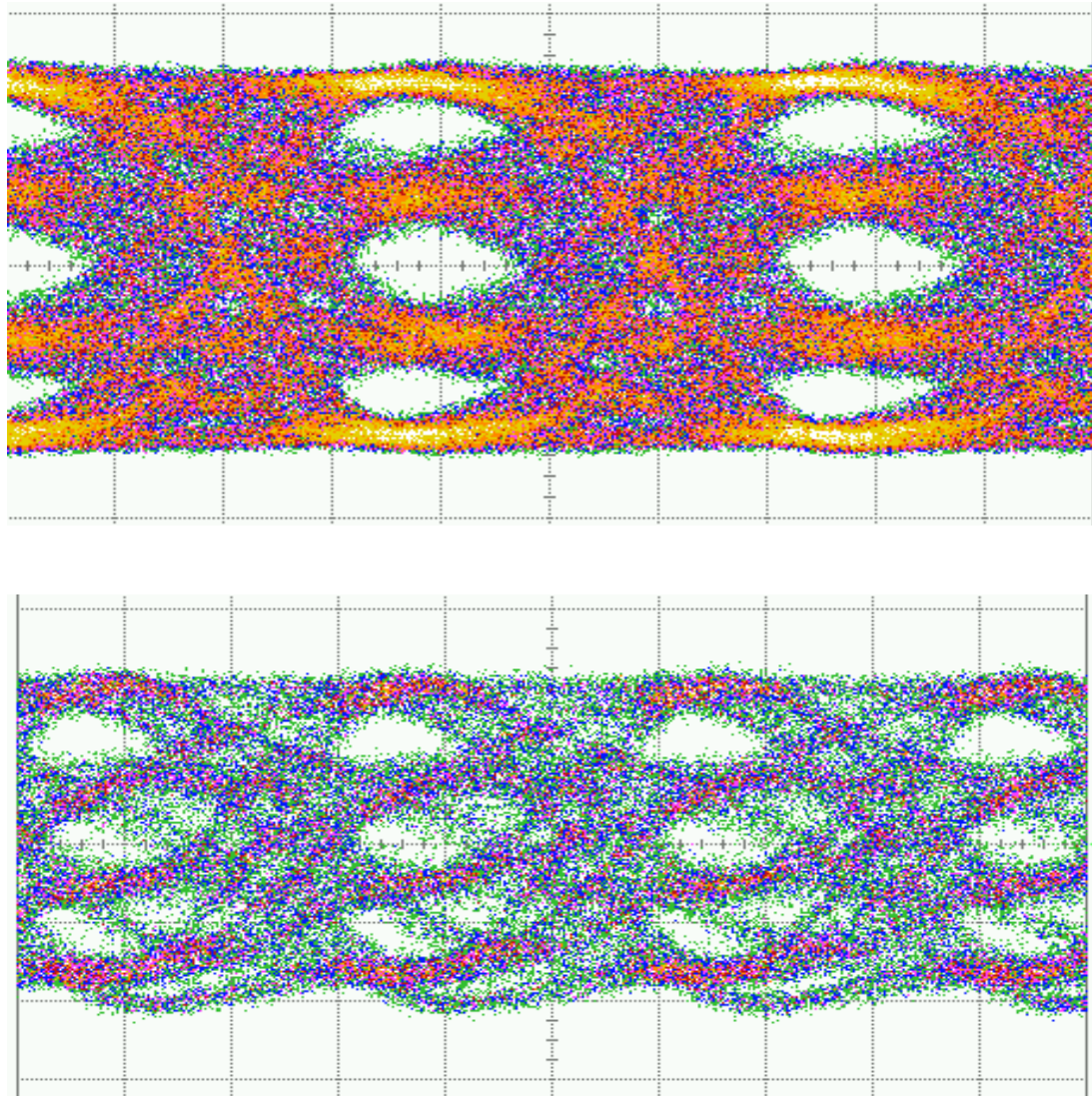
6.2. Τρόπος ποιοτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων

Ποικίλα πειράματα υλοποιούνται στο εργαστήριο τα οποία ασχολούνται με διάφορα είδη διαμόρφωσης και πολυπλεξίας. Αφού στηθεί επιτυχώς η διάταξη οι πρώτες ενδείξεις για την επιτυχία του πειράματος δίνονται από έναν παλμογράφο πραγματικού χρόνου(real time scope) στο οποίο και απεικονίζεται το διάγραμμα ματιού. Τα eye diagrams είναι ένας πολύ επιτυχημένος τρόπος να εξάγουμε γρήγορα και ακριβή συμπεράσματα για την ποιότητα ενός σήματος. Βασίζεται σε μία πολύ απλή ιδέα, δείχνοντας τις επικαλύψεις από όλες τις πιθανές μεταβάσεις οι οποίες μπορούν να συμβούν μεταξύ των διαδοχικών ψηφίων, στην περίπτωση του σχήματος 6.4 έχουμε ακολουθία από 3 ψηφία[39].



Σχήμα 6.4 Οι μεταβάσεις των διαδοχικών ψηφίων που η υπέρθεση τους δίνει την κατασκευή του διαγράμματος οφθαλμού

Ανάλογα με το πόσο διακριτές είναι οι στάθμες και πόσο απότομες οι μεταβάσεις μπορεί κανείς εμπειρικά να κρίνει άμεσα αν επιτυγχάνεται μετάδοση με λίγα λάθη. Για παράδειγμα στο σχήμα 6.5 το πρώτο διάγραμμα ματιού στα 25 Gbaud αφορά ένα ποιοτικότερο σήμα σε σύγκριση με το διάγραμμα των 35 Gbaud όπου είναι εμφανής ο «θόρυβος» που υπάρχει ανάμεσα στις στάθμες, αλλά και τις μεταβάσεις που δεν είναι απότομες αλλά εισέρχονται σε περιοχές απόφασης που αφορούν άλλα bit.



Σχήμα 6.5 Ενδεικτικά 2 διαγράμματα ‘ματιού’ που λήφθηκαν για πείραμα στα 25Gbaud (πάνω) και 35 Gbaud (κάτω).

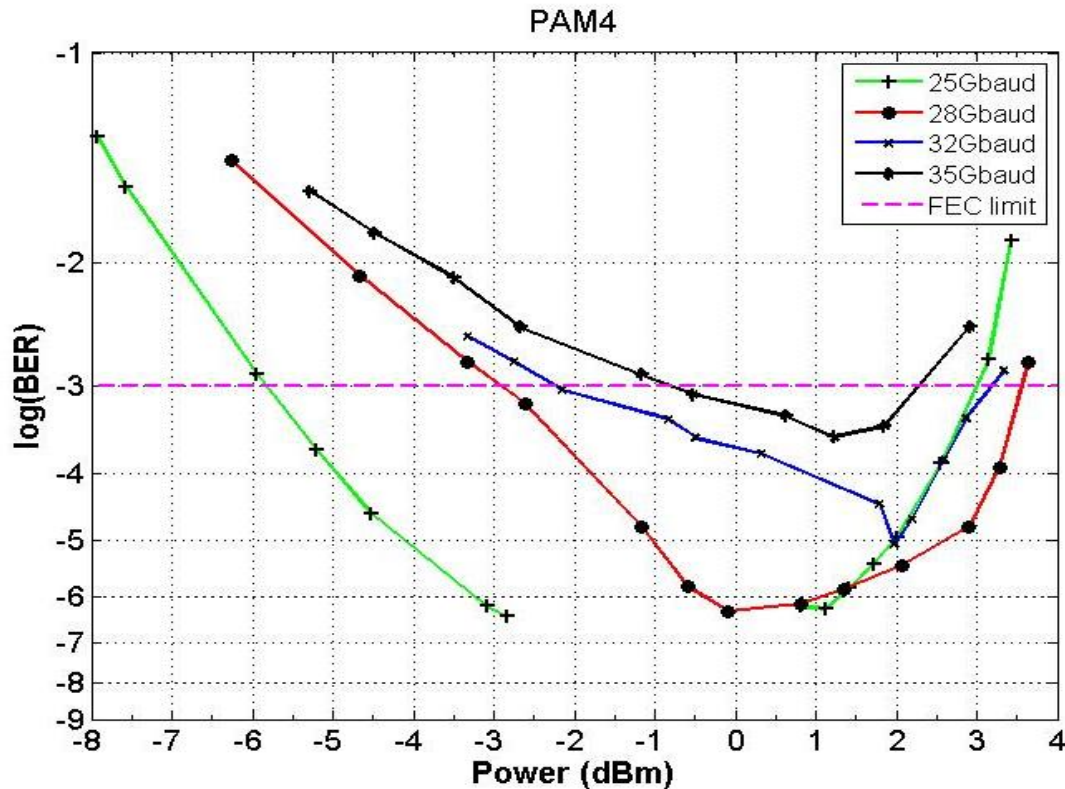
Στόχος των πειραμάτων είναι λαμβάνουμε τα δεδομένα με όσο το δυνατόν λιγότερα λάθη όταν τα συγκρίνουμε με το pattern που είχαμε πριν την μετάδοση. Τα λάθη στον δέκτη προκύπτουν λόγω θορύβου, παρεμβολών ή παραμόρφωσης του σήματος όπως παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 5. Ως μετρική κατάλληλη για την αξιολόγηση της ποιότητας της μετάδοσης ορίζεται το BER:

$$BER = \frac{E(t)}{N(t)}$$

Σχέση 6.1

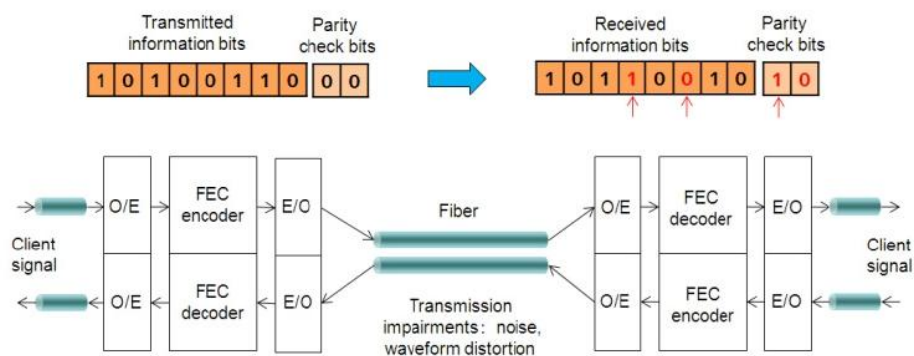
Όπου $E(t)$ ο αριθμός των εσφαλμένων bit και $N(t)$ ο συνολικός αριθμός των bit που λαμβάνει ο δέκτης. Με βάση τα αποτελέσματα για κάθε διαφορετικό ρυθμό, τα οποία αποθηκεύονται και εν συνεχεία περνούν από επεξεργασία στον υπολογιστή σχεδιάζεται συνήθως καμπύλη BER(Bit Error Rate) συναρτήσεως της ισχύος του

πομπού(σχήμα 6.6). Υπάρχει βέβαια και εξοπλισμός ο οποίος υπολογίζει άμεσα το BER και συνεχώς το ανανεώνει. Στα πειράματα μας δεν ακολουθήσαμε αυτή την προσέγγιση αφού ο εξοπλισμός αυτός είναι ικανός να εξάγει αποτέλεσμα για ρυθμούς μετάδοσης έως 10-11Gbps, σημαντικά πιο κάτω από τις μεταδόσεις που πετύχαμε.



Σχήμα 6.6 Καμπύλες BER για διάφορους ρυθμούς μετάδοσης

Εδώ πρέπει να αναφέρουμε ότι στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιείται η τεχνολογία FEC (forward error correction) για τη διόρθωση των λαθών (σχήμα 6.7), για αυτό και το όριο για μετάδοση χωρίς λάθη (error free) θεωρείται το 10^{-3} . 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[5].

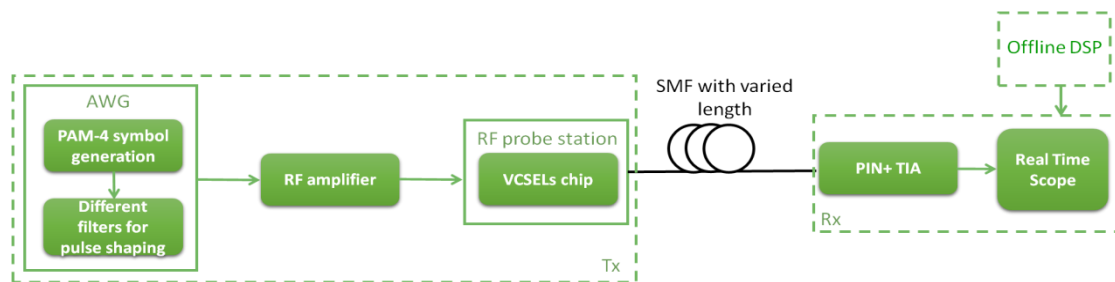


Σχήμα 6.7 Η εφαρμογή της τεχνολογίας FEC στις οπτικές επικοινωνίες

6.3. VCSEL Direct Modulation

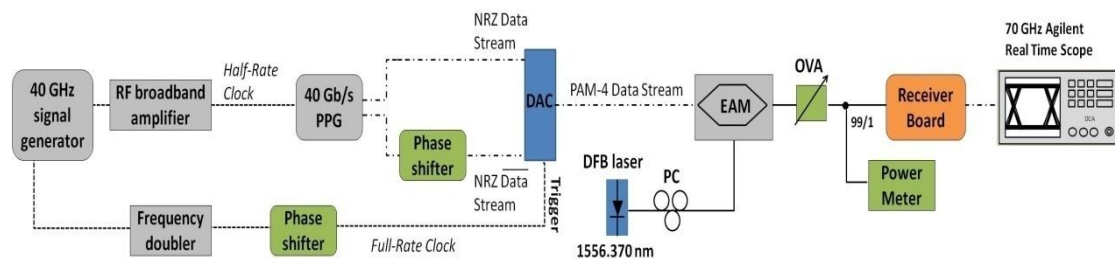
6.3.1. Πειραματική διάταξη

Με την εισαγωγή ενός AWG η πειραματική διάταξη(σχήμα 6.8) που υλοποιήθηκε είναι σχετικά απλή, αφού το σήμα (PAM-4 ή PAM-8) που παράγεται, πρώτα ενισχύεται και εν συνεχεία οδηγεί ένα VCSEL το οποίο παράγει το οπτικό σήμα που μεταδίδεται στην μονότροπη οπτική ίνα(SMF) με μήκος 500m. Τα φίλτρα που χρησιμοποιήθηκαν για το pulse shaping ήταν raised cosine για διαφορετικές τιμές του a και χρησιμοποιήθηκε επίσης απλό ορθογωνικό φίλτρο. Στη μεριά του δέκτη χρησιμοποιήθηκε ένας photoreceiver με 33 GHz 3dB bandwidth.



Σχήμα 6.8 Η πειραματική διάταξη για την αξιολόγηση της ταχύρυθμης άμεσης διαμόρφωσης VCSEL

Ο AWG ενσωματώνει τις λειτουργίες πολλών διαφορετικών μηχανημάτων τις οποίες αξίζει να αναλύσουμε. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε διάταξη που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του project MIRAGE για ερευνηθεί η συμπεριφορά του κυκλώματος του δέκτη.



Σχήμα 6.9 Παλαιότερη διάταξη για την αξιολόγηση του πομπού

Στο σχήμα 6.9 έχουμε:

- Γεννήτρια σήματος στα 40GHz (Signal Generator)

Η γεννήτρια του σήματος έως 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 στον DAC.

- Συσκευές μετατόπισης της φάσης (Phase shifters)

Καθώς σε 2 σημεία του σχήματος βλέπουμε από το ίδιο μηχάνημα να φεύγουν δύο καλώδια, ο συγχρονισμός όλων των εξαρτημάτων στο ίδιο ρολόι είναι αδύνατος αφού απαιτεί τα καλώδια να έχουν μήκος που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος του ημιτόνου που παράγει η γεννήτρια μας και να μην παρουσιάζουν ατέλειες. Για επιτύχουμε λοιπόν όσο καλύτερα αποτελέσματα γίνεται στο να φτάνει το σήμα συμφασικά σε όλα τα μηχανήματα είναι απαραίτητη η χρήση συσκευών μετατόπισης της φάσης, στην περίπτωση μας χειροκίνητων.

- Ενισχυτής ευρείας ζώνης RF (Broadband RF Amplifier)

Η ενίσχυση του σήματος σε υψηλότερο επίπεδο κρίνεται απαραίτητη ειδικότερα στον πάνω κλάδο του Tx μας όπως φαίνεται στο σχήμα, λόγω των πολλών επιπέδων που εισάγουν απόσβεση.

- Γεννήτρια παλμών (Pulse Pattern Generator - PPG)

Η γεννήτρια παλμών κλειδώνει έως τα 40GHz της γεννήτριας μας και παράγει μία ψευδοτυχαία ακολουθία παλμών NRZ έως 40Gbps η οποία στην συνέχεια θα οδηγήσει τον DAC.

- Μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα(DAC)

Το παραπάνω πείραμα αφορά την μετάδοση σήματος με διαμόρφωση PAM-4. Για την έξοδο 4 σταθμών χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό σήμα ο οποίος δέχεται ως είσοδο για το MSB και το LSB την ροή δεδομένων από μία έξοδο του PPG και από την συμπληρωματική της αντίστοιχα. Ανάλογα με τα 2 bit που πρέπει να μεταδοθούν ο DAC παράγει την κατάλληλη στάθμη προς μετάδοση.

- Διπλασιαστής συχνότητας (Frequency doubler)

Τα δεδομένα που φτάνουν από τον PPG στον DAC έρχονται με ρυθμό ίδιο με αυτό της γεννήτριας. Για να έχει όμως ο DAC τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων θα πρέπει τα δεδομένα να φτάνουν με την μισή ταχύτητα από ότι τα μεταδίδουμε. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με τη χρήση ενός διαιρέτη συχνότητας στον πάνω κλάδο, είτε όπως εδώ με τη χρήση διπλασιαστή συχνότητας για την λειτουργία του DAC.

- **DFB laser-EAM**

Το ηλεκτρικό σήμα που παράγει ο DAC στη συνέχεια οδηγεί έναν electroabsorption modulator (EAM) του οποίου η αρχή λειτουργίας έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4. Έτσι με την χρήση ενός συνεχούς κύματος (CW) DFB laser διαμορφώνουμε τελικά το οπτικό μας σήμα.

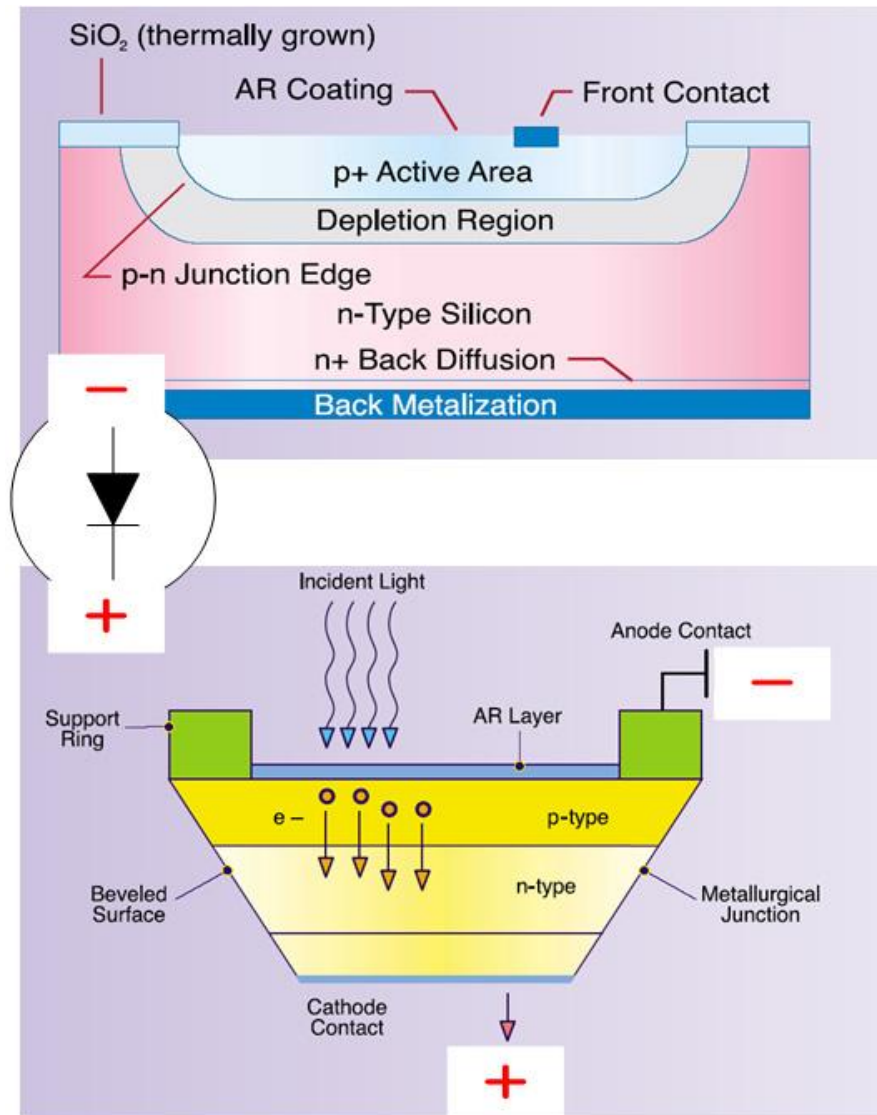
- **Optical Vector Analyzer(OVA) – Power meter**

Με τη χρήση του OVA προσπαθούμε να αναλύσουμε τα οπτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την μετάδοση στην οπτική ίνα ενώ στην συνέχεια μετράμε και την οπτική ισχύ που φτάνει στον δέκτη μας πριν το σήμα μας ερμηνευθεί.

- **Δέκτης (Receiver)**

Η πλακέτα του δέκτη ενσωματώνει δύο πολύ σημαντικά εξαρτήματα:

- Την **ολοκληρωμένη φωτοδίοδο p-i-n**, που είναι το βασικό στοιχείο ενός ολοκληρωμένου οπτικού δέκτη. Αυτό που κάνει επί της ουσίας η φωτοδίοδος είναι να μετατρέπει την οπτική ισχύ σε ηλεκτρικό ρεύμα, αφού είναι ικανή να μετατρέπει τα φωτόνια σε ζεύγη φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια-οπές) με μέγιστη απόδοση και να τα μεταφέρει ταχύτατα στα ηλεκτρόδια. Στο σχήμα 6.10 φαίνεται αναλυτικά η δομή ενός τέτοιου στοιχείου και σχηματικά ο τρόπος λειτουργίας του. Αρχικά το φως προσπίπτει στην περιοχή “p”, τα φωτόνια απορροφώνται στην περιοχή “i” και δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών. Στην συνέχεια εφαρμόζεται ανάστροφη τάση στα άκρα της διόδου και παράγεται φωτορεύμα (photocurrent) το οποίο συλλέγεται σε ηλεκτρόδια πριν προλάβουν τα ηλεκτρόνια να επανασυνδεθούν με τις οπές.



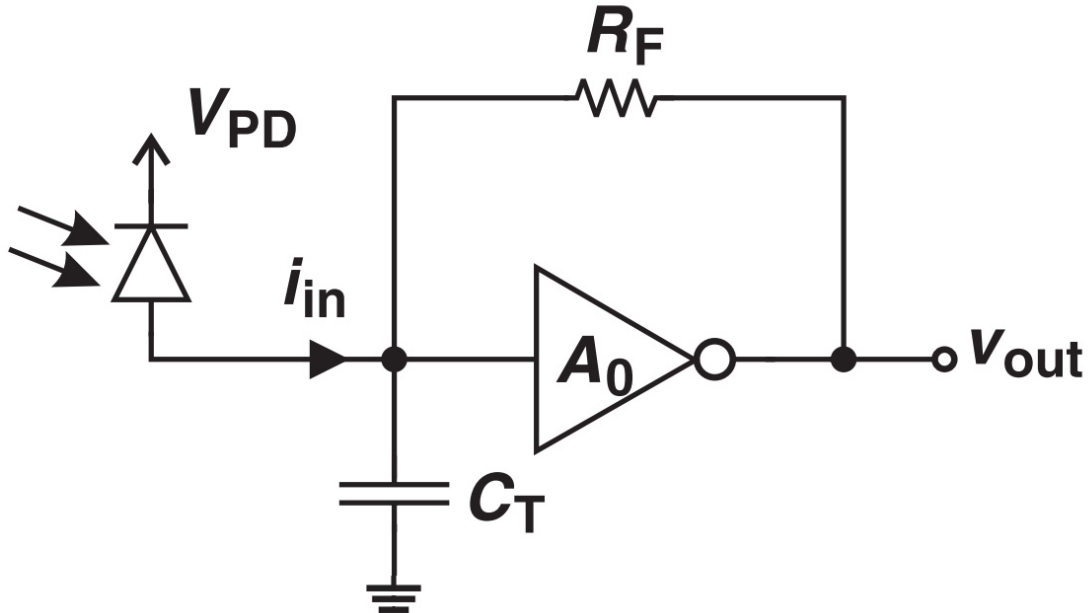
Σχήμα 6.10 Η δομή μιας φωτοδιόδου PIN (p-layer, intrinsic layer, n-layer) και η βασική λειτουργία μιας PIN φωτοδιόδου

Βασικές ιδιότητες των φωτοδιόδων είναι η αποδοτικότητα κβαντισμού (quantum efficiency) που μας δείχνει το ποσοστό των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών για ένα προσπίπτον φωτόνιο, η ταχύτητα, η χωρητικότητα και το ρεύμα διαρροής. Η αποδοτικότητα κβαντισμού και η ταχύτητα καθορίζονται από τον συντελεστή απορρόφησης.[5]

- Έναν προενισχυτή (Transimpedance amplifier, TIA)

Επειδή οι φωτοδιόδοι δεν χρησιμοποιούν κάποιο είδος ενίσχυσης η απόκριση τους (ο λόγος εξερχόμενου ρεύματος προς την ένταση του εισερχόμενου φωτός) είναι σχετικά χαμηλή. Για αυτό το λόγο συνδυάζονται στις πρακτικές εφαρμογές με έναν ενισχυτή. Στις οπτικές επικοινωνίες υπάρχει απαίτηση αυτή η δομή να εμφανίζει υψηλό και

ταυτόχρονα μεταβλητό κέρδος, μεγάλο εύρος ζώνης, χαμηλά επίπεδα θορύβου και μικρή αντίσταση εισόδου. Το βασικό κύκλωμα ενός TIA φαίνεται στο σχήμα 6.11.



Σχήμα 6.11 Η βασική δομή ενός Transimpedance Amplifier (TIA)

- Παλμογράφος πραγματικού χρόνου (Real time scope)

Το σήμα φτάνει στον receiver ο οποίος μετατρέπει το οπτικό σήμα ξανά σε ηλεκτρικό και με τη χρήση παλμογράφου πραγματικού χρόνου μπορούμε να δούμε κατευθείαν το διάγραμμα 'ματιού'(σχήμα) αλλά και να πάρουμε τις απαραίτητες μετρήσεις για το πώς αποκωδικοποιήθηκαν τα δεδομένα τα οποία εν συνεχεία επεξεργαζόμαστε με off-line processing.

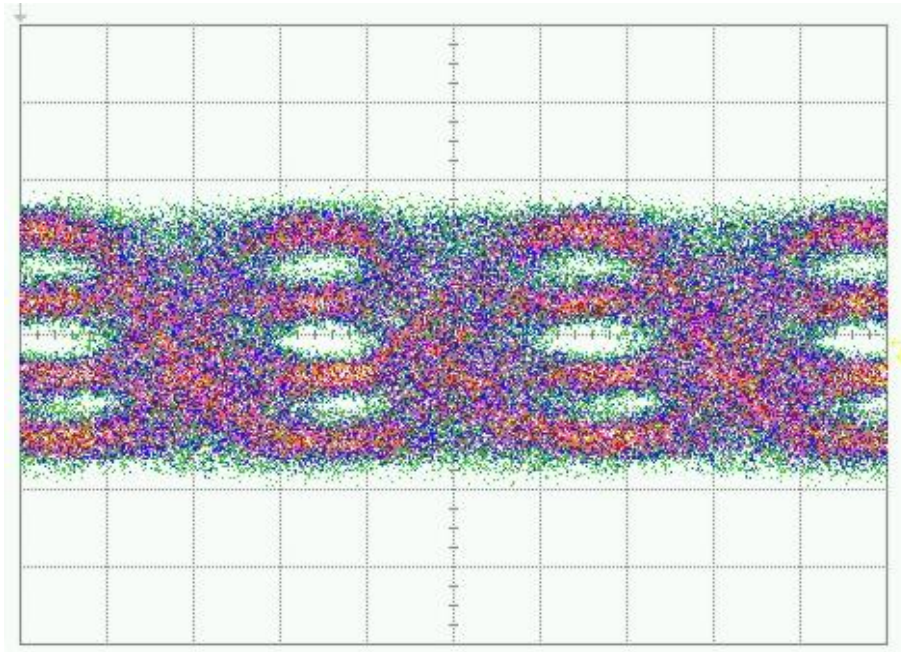
Είναι φανερό ότι με τη χρήση του AWG η πειραματική διαδικασία γίνεται πολύ πιο απλή ενώ επιπλέον μειώνονται οι πιθανότητες για λάθη κατά το στήσιμο της διάταξης. Από την άλλη η δεύτερη διάταξη είναι πιο ευέλικτη σε περίπτωση αστοχίας κάποιου μεμονωμένου εξαρτήματος.

6.3.2. Πειραματικά αποτελέσματα

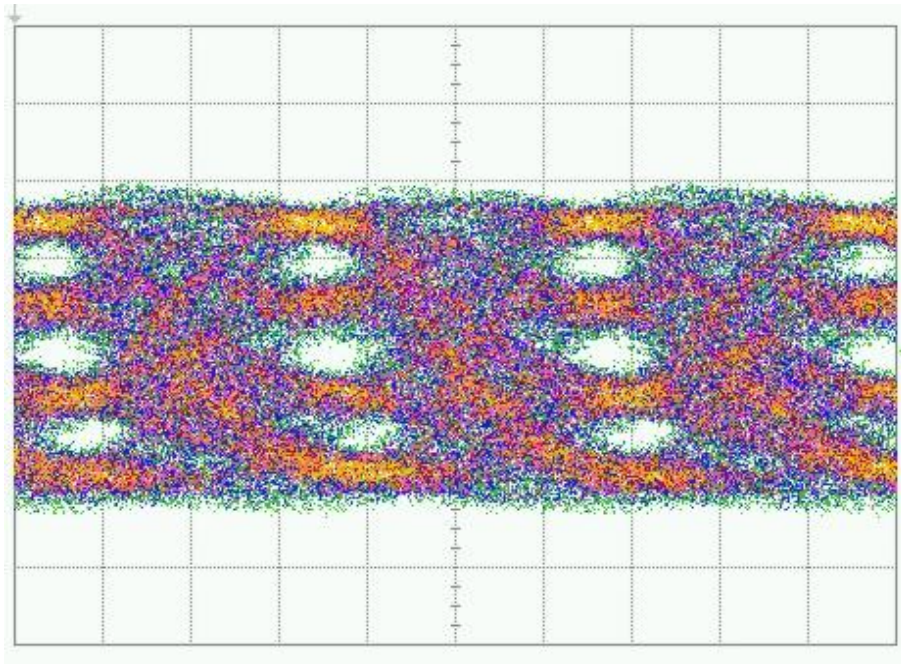
Το πείραμα, όπως αναφέραμε, αφορά την διάταξη 6.8 για την αξιολόγηση VCSEL με 3-dB bandwidth στα 20,5 GHz. Συγκεκριμένα με την χρήση PAM-4 έγιναν μετρήσεις σε ψευδοτυχαία ακολουθία στα 32 Gbaud και 40 Gbaud. Το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν Raised Cosine με $\alpha=1$, και η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς βρισκόταν κοντά στο 1,5dBm (1,41mW). Εν συνεχεία το σήμα εισέρχεται είτε στην

μονότροπη οπτική ίνα με μήκος 500 μέτρων, είτε κατευθείαν στον δέκτη(back to back). Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται μέτρηση της οπτικής ισχύος πιο πριν για να εξασφαλίσουμε ότι η λαμβανόμενη ισχύς δεν ξεπερνά τις προδιαγραφές του δέκτη μας. Το τελευταίο εξασφαλίζεται με την χρήση Power meter και OVA(optical variable attenuator), διευκολύνοντας επιπλέον τον σχεδιασμό καμπύλης BER.

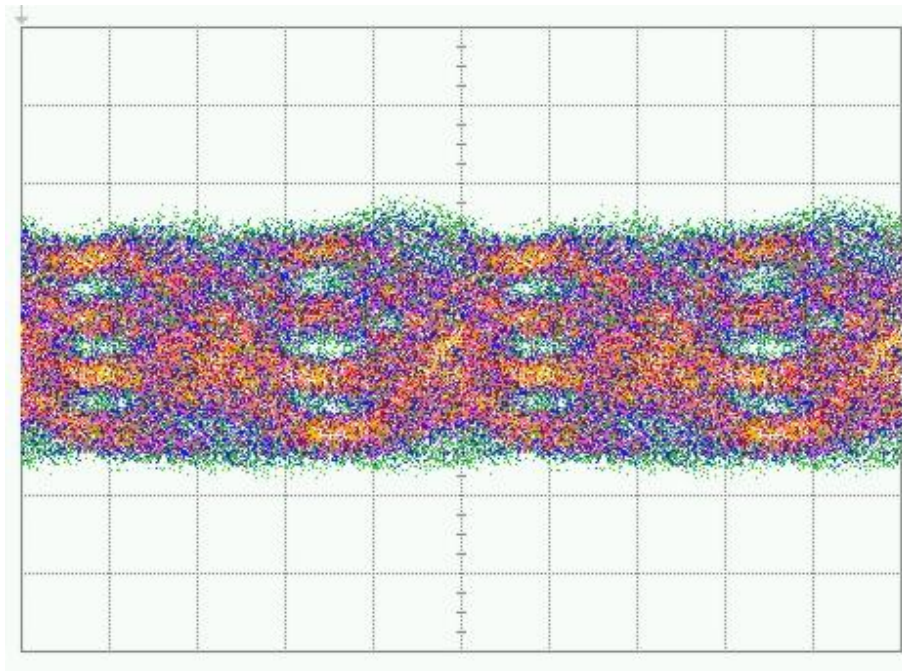
Στα σχήματα 6.12, 6.13 και 6.14 παρουσιάζονται τα eye diagrams τα οποία λήφθηκαν με την βοήθεια παλμογράφου κατά την διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 6.12 32 Gbaud σε διάταξη back-to-back



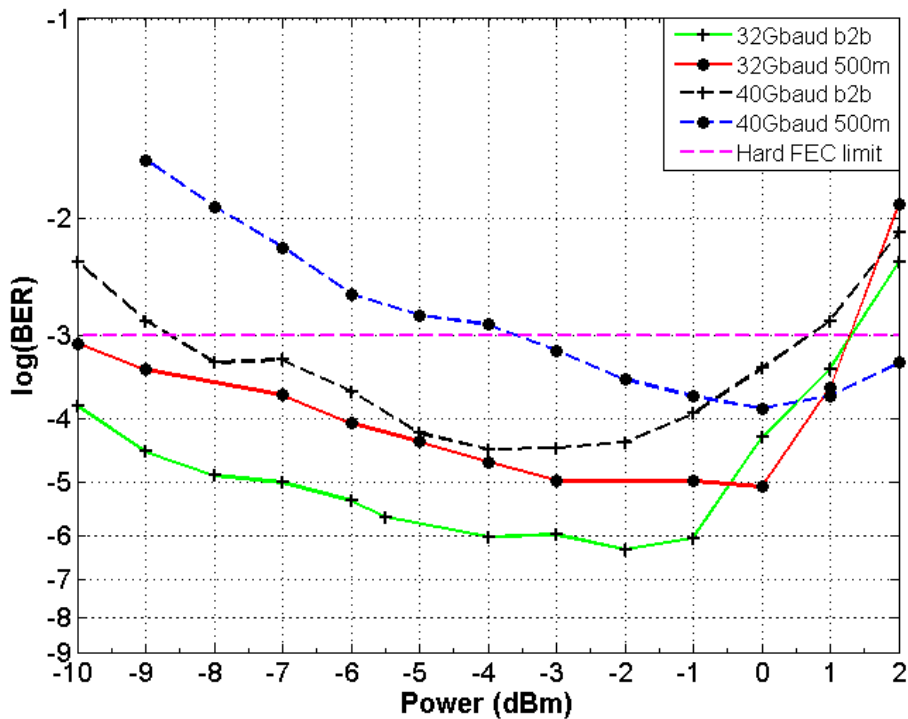
Σχήμα 6.13 32 Gbaud μετά από διάδοση 500 μέτρων



Σχήμα 6.14 40 Gbaud σε διάταξη back-to-back

Όπως περιγράφουμε και στην ενότητα 6.2 μετά τα eye diagrams εξάγεται συνήθως καμπύλη BER. Το λαμβανόμενο σήμα αποθηκεύτηκε με την βοήθεια του παλμογράφου πραγματικού χρόνου, ώστε να του γίνει offline επεξεργασία και να μετατραπεί η ληφθείσα κυματομορφή σε ψηφία. Έτσι αξιολογήθηκε η ποιότητα της μετάδοσης για τα 32 και 40 Gbaud σε back-to-back αλλά και μετά από την ίνα 500 μέτρων.

Στο σχήμα 6.15 φαίνονται αυτές οι καμπύλες BER. Η πράσινη και κόκκινη γραμμή αφορούν το ληφθέν οπτικό σήμα στα 32 Gbaud για διάταξη back-to-back και μετά τα 500μ αντίστοιχα. Ανάλογα, η διακεκομμένη μαύρη και μπλε γραμμή αφορούν το ληφθέν οπτικό σήμα στα 40 Gbaud για τα δύο διαφορετικά σενάρια μετάδοσης. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στα 32 Gbaud όταν η λαμβανόμενη οπτική ισχύς βρίσκεται ανάμεσα στα -10dBm(0.1mW) και στα 0dBm(1mW), η καμπύλη BER βρίσκεται κάτω από το όριο του FEC και για τα δύο σενάρια. Επιπλέον στα 40 Gbaud η καμπύλη BER εμφανίζει αρκετά χειρότερα αποτελέσματα, αφού πλέον αρχίζει να μας περιορίζει το εύρος ζώνης του VCSEL μας(3dB-20GHz). Παρ'όλα αυτά επιτεύχθηκε μετάδοση στα 40 Gbaud η οποία ήταν κάτω από το όριο FEC ακόμα και μετά από την μετάδοση στην μονότροπη ίνα 500 μέτρων.



Σχήμα 6.15 Καμπύλες BER στα 32 και 40 Gbaud για διατάξη back-to-back και μετά από διάδοση 500 μέτρων

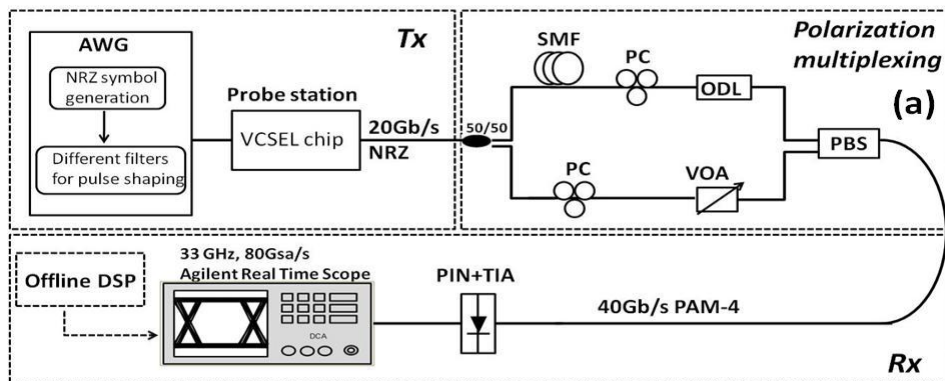
6.4. PAM-4 με τη χρήση PDM

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω(ενότητα 4.4.5) , η πολυπλεξία πόλωσης είναι μια τεχνική πολυπλεξίας η οποία έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα όσον αφορά στη μετάδοση πληροφορίας. Στην παρακάτω παράγραφο ακολουθεί αναλυτική περιγραφή μιας πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο μέσω της οποίας μεταδόθηκε πληροφορία χρησιμοποιώντας την τεχνική αυτή. Η ιδέα ήταν να παραχθεί οπτικά ένα PAM-4 σήμα μέσω της πολυπλεξίας πόλωσης χρησιμοποιώντας ένα single polarization VCSEL με 3-dB bandwidth στα 20.5 GHz. Με την τεχνική αυτή στόχος ήταν να κατασκευάσουμε ένα σήμα τεσσάρων επιπέδων χρησιμοποιώντας ως «είσοδο» ένα μόνο NRZ σήμα. Η τεχνική αυτή ουσιαστικά παρακάμπτει τη χρήση γραμμικών ηλεκτρονικών drivers καθώς και την απαίτηση να κάνουμε bias το VCSEL στο μέσο της γραμμικής του περιοχής.

6.4.1. Πειραματική διάταξη

Για να πραγματοποιηθούν τα παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που φαίνεται στην εικόνα 6.16. Πιο συγκεκριμένα, το VCSEL με 3dB bandwidth στα 20,5 GHz διαμορφώθηκε απευθείας με ένα NRZ σήμα στα 14 Gbaud, παρήγαγε οπτικό σήμα ισχύος 1mW το οποίο και τροφοδότησε έναν 50/50 coupler «μοιράζοντας» ουσιαστικά το οπτικό διαμορφωμένο σήμα μας στα δύο. Στη συνέχεια

και με δεδομένο ότι τα δυο σήματα μας έπρεπε να απόσυσχετιστούν πλήρως μεταξύ τους, χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό μήκος μονότροπης ίνας (SMF). Για να συγχρονιστούν οι περίοδοι των bit των δυο κλάδων, χρησιμοποιήθηκε ένα Optical Delay Line (ODL) ενώ ο Variable Optical Attenuator (VOA) βοήθησε στο να μειώσει την ισχύ του ενός κλάδου του συστήματος. Δυο ελεγκτές πόλωσης (polarization controller) ένας σε κάθε κλάδο βοήθησε στο να τροφοδοτηθεί με τη σωστή πολωτική γωνία ο διαχωριστής-συνδυαστής πόλωσης (Polarization Beam Splitter/Combiner - PBS/C). Τα υπόλοιπα στοιχεία της διάταξης αναλύθηκαν στην προηγούμενη διάταξη (6.2.1).



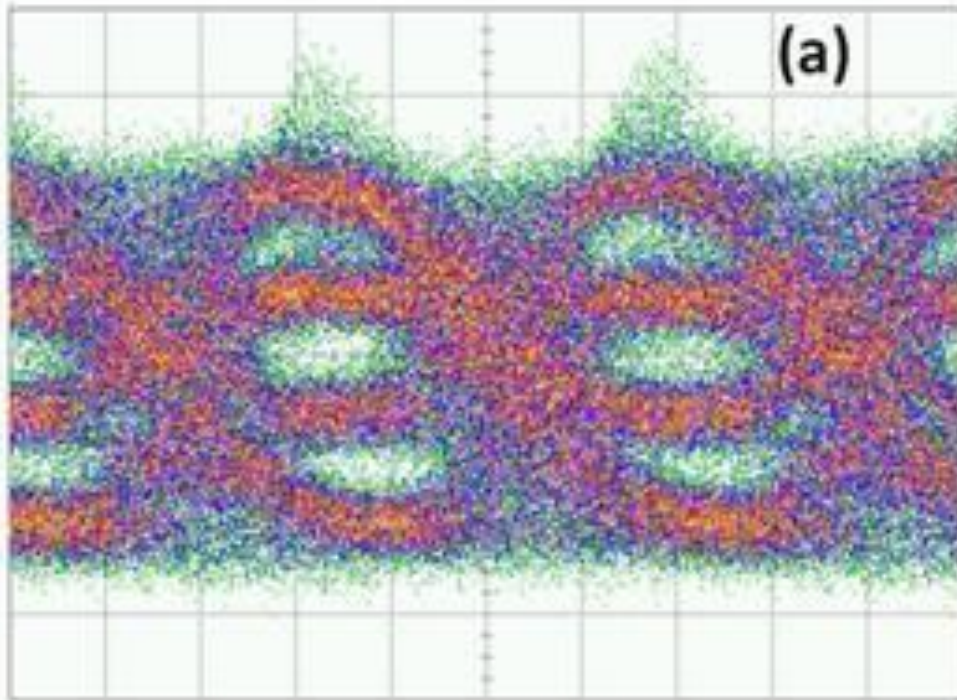
Σχήμα 6.16 Η διάταξη του δεύτερου πειράματος

Στην έξοδο του PBC τα οπτικά σήματα των δυο κλάδων ενώθηκαν. Αν σκεφτούμε την λαμβανομένη ισχύ ως διάνυσμα στο χώρο και με δεδομένο ότι μεταξύ τους υπήρξε διαφορά σε επίπεδο ισχύος, αυτό σημαίνει ότι οι στάθμες του πολυπλεγμένου σήματος θα είναι 4. Με άλλα λόγια, ακολουθώντας την παραπάνω μεθοδολογία κατασκευάσαμε έναν οπτικό DAC που παίρνει στην είσοδό του μόνο ένα σήμα 2 σταθμών και φτιάχνει ένα σήμα τεσσάρων.

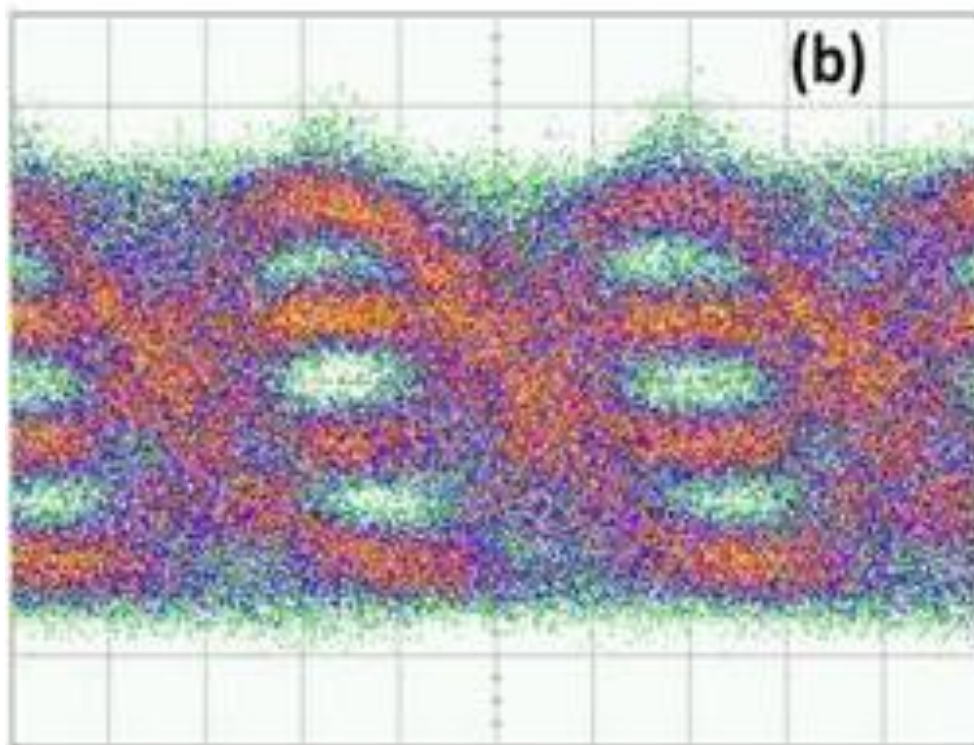
6.4.2. Πειραματικά αποτελέσματα

Η παραπάνω μέθοδος για την δημιουργία σήματος PAM-4 καθαρά στο οπτικό πεδίο, με την χρήση τεχνικών πολυπλεξίας πόλωσης αξιολογήθηκε για μετάδοση στα 14Gbaud (28GB/s) σε διάταξη back-to-back αλλά και για μετάδοση σε ένα 500 μέτρων.

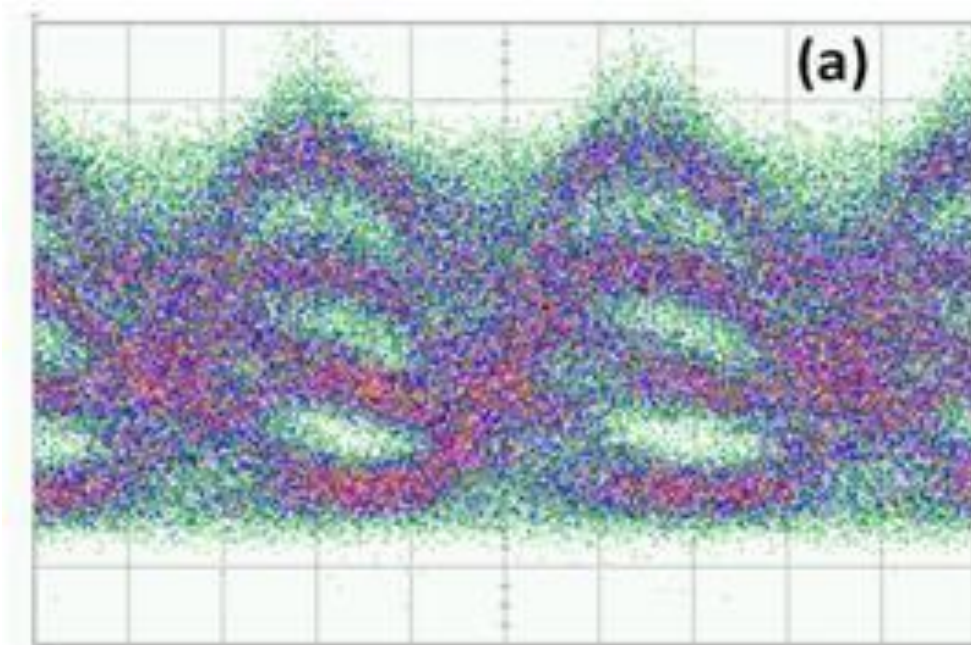
Στα σχήματα 6.17 και 6.18 βλέπουμε τα eye diagrams που προέκυψαν με την χρήση της παραπάνω διάταξης στα 28 GB/s. Στα σχήματα 6.19 και 6.20 βλέπουμε τα διαγράμματα για άμεση διαμόρφωση VCSEL στα 28GB/s και για τα δύο σενάρια. Όπως παρατηρούμε συγκρίνοντας τα eye diagrams, με το polarization multiplexing επιτυγχάνουμε πιο «ανοιχτό» μάτι, δηλαδή πιο διακριτές στάθμες σε σύγκριση με την άμεση διαμόρφωση.



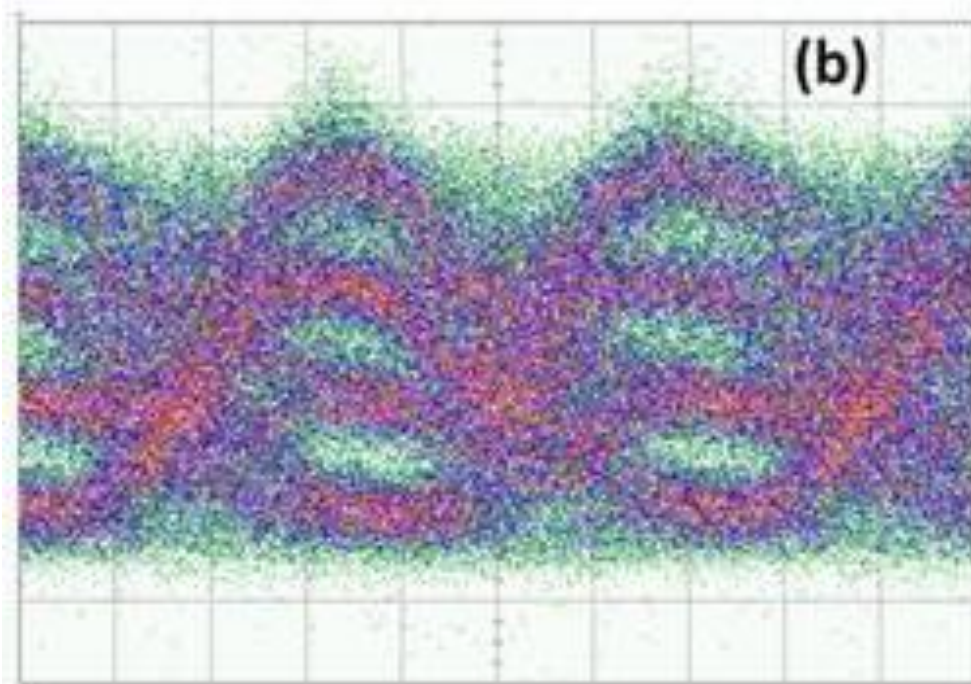
Σχήμα 6.17 28 Gb/s back-to-back με polarization multiplexing



Σχήμα 6.18 28Gb/s μετά από διάδοση 500 μέτρων με polarization multiplexing



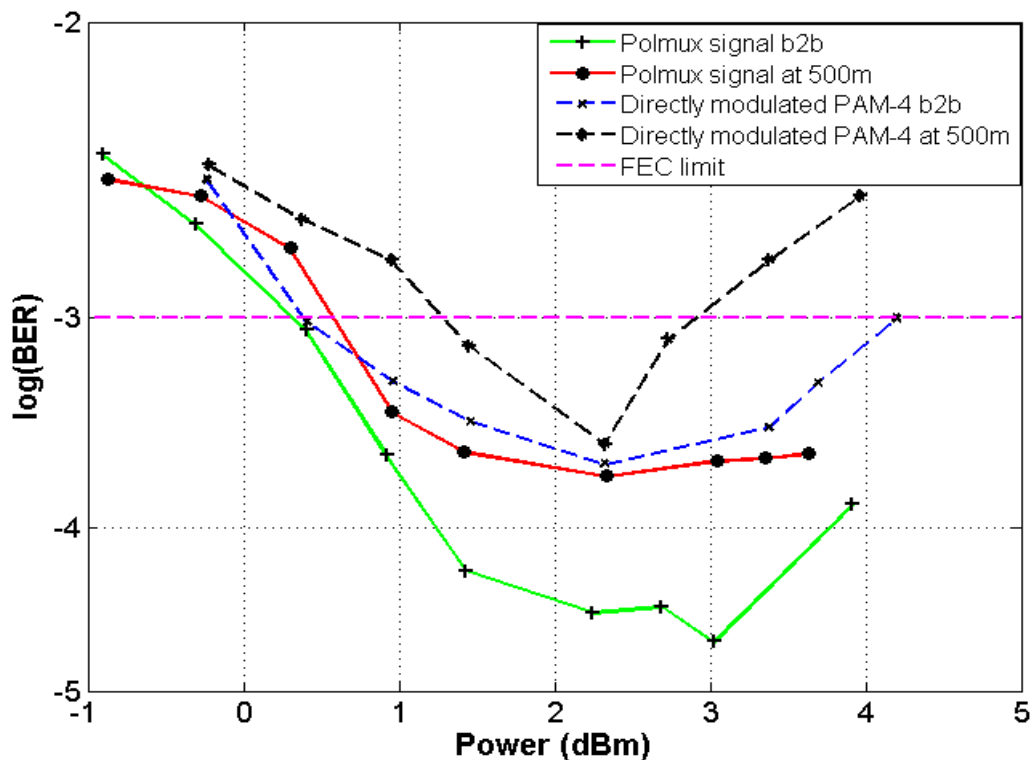
Σχήμα 6.19 28 Gb/s back-to-back με direct modulation



Σχήμα 6.20 28Gb/s μετά από διάδοση 500 μέτρων με direct modulation

Στην συνέχεια, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία με αυτή του προηγούμενου πειράματος σχεδιάστηκαν οι καμπύλες BER, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 6.21. Οι καμπύλες δείχνουν το BER σε σχέση με την ληφθείσα οπτική ισχύ για όλες τις περιπτώσεις που αναφέραμε. Η πράσινη και κόκκινη γραμμή αφορούν το ληφθέν σήμα για την μέθοδο του PAM-4 με polarization multiplexing, για το σενάριο

της διάταξης back-to-back και μετά από διάδοση σε ίνα 500 μέτρων αντίστοιχα. Ανάλογα, η διακεκομμένη μπλε και μαύρη γραμμή αφορούν το σήμα PAM-4 με άμεση διαμόρφωση και για τα δύο σενάρια. Όπως παρατηρούμε οι καμπύλες BER για το σήμα με polarization multiplexing εμφανίζουν καλύτερες επιδόσεις από τις αντίστοιχες της άμεσης διαμόρφωσης για κάθε σενάριο. Είναι εμφανές ότι στην περίπτωση του polarization multiplexing το σύνολο της συνάρτησης μεταφοράς του VCSEL χρησιμοποιείται πιο αποδοτικά, αφού με αυτό τον τρόπο δεν υπάρχει η ανάγκη να το οδηγούμε αποκλειστικά στην γραμμική του περιοχή για να επιτύχουμε την έξοδο 4 επιπέδων του PAM-4. Το BER μετρήθηκε αρκετά κάτω από το όριο FEC (7%) για σήμα PAM-4 με polarization multiplexing στο σενάριο back-to-back. Για μετάδοση μέσα από την ίνα 500 μέτρων έχουμε power penalty 0.5dB για ένα BER της τάξης του $3 \cdot 10^{-4}$. Παρομοίως για το σήμα από την άμεση διαμόρφωση του VCSEL στην μετάδοση με ίνα έχουμε power penalty 0.8dB για ένα BER της τάξης του $5 \cdot 10^{-4}$.



Σχήμα 6.21 Καμπύλες BER για την μέθοδο του polarization multiplexing και για direct modulation, για τα δύο διαφορετικά σενάρια

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι με την διάταξη μας επιτυγχάνεται καλύτερη μετάδοση σε σχέση με το PAM-4 με άμεση διαμόρφωση VCSEL. Επιπλέον δεν είναι αναγκαία η χρήση πολύπλοκων ηλεκτρικών οδηγών ή DAC, ενώ οι τελικές μετρήσεις αποδεικνύουν την εγκυρότητα της ιδέας αυτής, αφού οι καμπύλες BER στα 28Gb/s βρίσκονται αρκετά κάτω από το όριο FEC.

6.5. Συμπεράσματα-Μελλοντικές προοπτικές

Όπως αναφέραμε από το πρώτο κεφάλαιο οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των data center για υψηλής χωρητικότητας διασυνδέσεις, ωθεί την ανάπτυξη όλο και πιο αποδοτικών τεχνικών μετάδοσης. Οι οπτικές υλοποιήσεις φαίνεται να είναι ο πιο πιθανός υποψήφιος στο να αντικαταστήσουν πλήρως τις ηλεκτρικές διασυνδέσεις. Σε αυτό το πλαίσιο πραγματοποιήθηκαν τα παραπάνω πειράματα όπως η δοκιμή του PAM-4 με την χρήση polarization multiplexing . Όσο περνάει ο καιρός βέβαια θα επιτυγχάνονται στο εργαστήριο αξιόπιστες μεταδόσεις με όλο και υψηλότερες ταχύτητες, πυκνότερα σχήματα διαμόρφωσης(PAM-8, QAM-16) και πολυπλεξίας, με τα κανάλια να απέχουν όλο και λιγότερο μεταξύ τους. Αυτό προϋποθέτει βέβαια την ανάπτυξη VCSEL με μεγαλύτερο bandwidth. Χάρη στην δυναμική όμως, που έχουν αποκτήσει οι οπτικές επικοινωνίες πλέον, όλα τα παραπάνω είναι μάλλον ζήτημα χρόνου να γίνουν πράξη.

Βιβλιογραφία

- [1] Harry J. R. Dutton - Understanding Optical Communications, IBM, 1998
- [2] Cisco Data Center Infrastructure 2.5 Design Guide Cisco Validated Design I December 6, 2007
- [3] Cisco data center traffic,
http://www.theregister.co.uk/2011/11/29/cisco_cloud_data_center_traffic_index/
- [4] Active Optical Cables for InfiniBand QDR and FDR SC11 – Seattle, WA Steffen Koehler November 16, 2011
- [5] Κωνσταντίνος Μ. Τόκας Πειραματική Αξιολόγηση κυκλωμάτων πομπού και δέκτη για οπτικές διασυνδέσεις κέντρων δεδομένων, Αθήνα Ιούλιος 2015, ΕΜΠ
- [6] F4M AOC http://www.fiberon.com/news_files/pdf/F4M-AOC-QSFP-web.pdf
- [7] Σημειώσεις Μαθήματος Φυσική Των LASER, Μ.Μπένης Ιωάννινα 2013
- [8] Ηρακλής Αβραμόπουλος - Φωτονική Τεχνολογία για Τηλεπικοινωνίες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ
- [9] Lasers: Fundamentals, Types, and Operations Subhash Chandra Singh, Haibo Zeng, Chunlei Guo, and Weiping Cai
- [10] Orazio Svelto - Principles of Lasers (5th edition) , Springer, 2010
- [11] Angelique Rissons and Jean-Claude Mollier (2011). The Vertical-Cavity Surface Emitting Laser (VCSEL) and Electrical Access Contribution, Optoelectronics - Devices and Applications, Prof. P. Predeep (Ed.), ISBN: 978-953-307-576-1, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/optoelectronics-devices-and-applications/the-vertical-cavity-surface-emitting-laser-vcSEL-and-electrical-access-contribution>
- [12] Jean-Francois Seurin Harnessing power for high power applications <http://spie.org/newsroom/technical-articles-archive/1638-harnessing-light-for-high-power-applications>
- [13] Doctor of Philosophy in Materials Science and Engineering David Todd Mathes August 2002, Materials Issues for VCSEL Operation and Reliability

- [14] Surface emitting Laseres
<https://www.wsi.tum.de/Research/AmanngroupE26/AreasofResearch/SurfaceEmittingLasers/tabid/110/Default.aspx>
- [15] Distributed Bragg Reflectors for Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers
W.G. Breiland, A.A. Allerman,
- [16] Bragg Mirrors https://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html
- [17] Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology Princeton Optronics, Inc.
* 1 Electronics Drive * Mercerville, New Jersey 08619
- [18] Optical Interconnects Ray T. Chen and Chulchae Choi
www.morganclaypool.com ISBN-10: 1598290673
- [19] Ελένη Κοσμά - Πειραματική Μελέτη και Αξιολόγηση Ταχύρυθμων Laser Κάθετης Κοιλότητας για Υλοποίηση Οπτικών Διασυνδέσεων σε Υπολογιστικά Συστήματα, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, 2014
- [20] Govind P. Agrawal - Fiber-Optic Communication Systems (3rd edition), Wiley-Interscience, 2002
- [21] Digital Modulation <http://www.digitaler-bos-funk.de/digital/digital.htm>
- [22] RZ- NRZ http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1272077
- [23] Direct and External Modulation of Light, Christophe Peucheret DTU Fotonik Department of Photonics Engineering Technical University of Denmark
- [24] Giacomo Losio ProLabs Head of Technology White Paper, Modulation of Light
- [25] Fundamentals of Photonics Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich Copyright © 1991 John Wiley & Sons, Inc. ISBNs: 0-471-83965-5 (Hardback); 0-471-2-1374-8 (Electronic)
- [26] Broadband Circuits for Optical Fiber Communication. Eduard Sackinger Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 0-47 1-7 1233-7
- [27] Multiplexing Techniques, Networks and Devices
<http://www2.engr.arizona.edu/~ece487/wdm.pdf>
- [28] Ν.Κ Ουζούνoglou , Τηλεπικοινωνίες Οπτικών Ινών, Τεχνικές Διαμόρφωσης
- [29] Digital modulation
<http://ee.mouloudrahmani.com/Electrical/Communication/DigitalModulation.html>

- [30] ISI and Root-Raised Cosine filtering , Charan Langton 2002
- [31] Pulse-Shape Filtering in Communications Systems, www.ni.com
- [32] A. S Kang, Vishal Sharma, Pulse Shape Filtering in Wireless Communication, A Critical Analysis, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 2, No.3, March 2011
- [33] Raised Cosine Fir design , <https://iowegian.com/scopefir/tutorial/raised-cosine-fir-filter-design/>
- [34] Theory of Root-Raised Cosine Filter Michael Joost Research and Development, 47829 Krefeld, Germany
- [35] IEEE LEOS, February 2009 Volume 23, Modulation and multiplexing in optical communication systems
<http://photonicsociety.org/newsletters/feb09/23leos01-final.pdf>
- [36] Implantable semiconductor biosensor for continuous in vivo sensing of far-red fluorescent molecules, <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-12-12513>
- [37] Ηρακλής Αβραμόπουλος Διαφάνειες Μαθήματος Φωτονική Τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες-Κυματοδήγηση
- [38] Ηρακλής Αβραμόπουλος Διαφάνειες Μαθήματος Φωτονική Τεχνολογία στις τηλεπικοινωνίες-Πόλωση- Παθητικά στοιχεία
- [39] Γιάννης Κ. Κανάκης, Επισκόπηση θεωρίας των Mode-Locked Lasers και πειραματική επίδειξη τους σε OTDM σύστημα στα 160Gb/s, Αθήνα Νοέμβριος 2011
- [40] Digital Pulse-Shaping Filter Basics by Ken Gentile, One Technology Way