



Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο ΠΜΣ Πληροφορικής & Τηλεματικής

«Silicon Photonics»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μπαμπέκος Παναγιώτης – Χρήστος

A.M. 13208

Ημερομηνία : 22/2/2017

Επιβλέπων Διπλωματικής Εργασίας

Δρ. Θωμάς Καμαλάκης

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

1. Δρ Καμαλάκης
Θωμάς

2. Δρ. Δαλάκας Β.

3. Δρ. Νικολαΐδου Μ.

Περιεχόμενα

Abstract	7
Περίληψη.....	7
1. Φωτονική	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Οπτικές Επικοινωνίες	11
1.2.1 Τεχνική μετάδοση της πληροφορίας	12
2. Οπτική Τεχνολογία	13
2.1 Ορισμός κυματοδηγού	13
2.2 Συντελεστές ανακλαστικότητας	15
2.3 Ρυθμοί ενός πεδιακού κυματοδηγού	15
2.4 Εξισώσεις του Maxwell	16
2.5 Κυματική εξίσωση	16
2.6 Οπτικές ίνες και επικοινωνίες	17
2.6.1 Δομή των Οπτικών Ινών	17
2.6.2 Ρυθμοί οπτικής ίνας	18
2.6.3 Επιδόσεις και χαρακτηριστικά	21
2.6.4 Διασπορά στις οπτικές ίνες.....	22
2.6.4.1 Modal ή Intermodal διασπορά.....	22
2.6.4.2 Intramodal διασπορά (Ενδοτροπική διασπορά)	23
2.6.4.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD).....	25
2.6.5 Μη γραμμικά φαινόμενα.....	26
2.6.5.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin , SBC	26
2.6.5.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS.....	26
2.6.5.3 Self-phase modulation , SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης)	27
2.6.5.4 Cross-phase modulation, XPM (διασταυρωμένη φάση διαμόρφωσης).....	27
2.6.5.5 Μείξη Τεσσάρων κυμάτων.....	27
2.7 Οπτικοί Πομποί	28
2.8 Οπτικοί Ενισχυτές Ίνας Ερβίου & Σπανίων Γαιών	29
3. Πηγές Φωτός & Ανιχνευτές	30
3.1 LASER και Αρχή λειτουργίας.....	30
3.1.1 Δίοδοι Laser	33
3.1.2 Σχεδιασμός διόδου LASER	34
3.1.3 Fabry – Perot Laser	36

3.2 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (Light Emitting Diodes).....	37
3.2.1 Διπλό LED ετεροεπαφής (Dual Junction led).....	38
3.2.2 Διαφορετικοί τύποι LED.....	39
3.3 Χαρακτηριστικά των LASER και των LEDs.....	40
3.3.1 Ισχύς εξόδου	40
3.3.2 Λοβός ακτινοβολίας	41
3.3.3 Φασματικό εύρος των LDs και LEDs	42
3.3.4 Τύποι Διαμόρφωσης	42
3.4 Οπτικοί Ανιχνευτές	43
3.4.1 Φωτοδίοδος τύπου P-N	44
3.4.2 Φωτοδίοδος τύπου PIN	46
4. Στοιχεία Οπτικού Δικτύου	48
4.1 Πηγές φωτός και Ανιχνευτές	48
4.2 Αναμεταδότες	50
4.3 Οπτικοί Ενισχυτές.....	51
4.3.1 Ινο-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (EDFA).....	52
4.3.2 Βασικές Παράμετροι.....	55
4.4 Οπτικοί Πολυπλέκτες/Αποπολυπλέκτες	56
4.4.1 Συσκευές Πολυπλεξίας-Αποπολυπλεξίας.....	57
4.5 Οπτικοί Πολυπλέκτες – Προσθαφαίρεσης (Add/Drop).....	59
4.6 Οπτικοί Διασταυρωτήρες.....	59
4.7 Δρομολόγηση Μήκους Κύματος	61
4.7.1 Μεταγωγείς Μήκους Κύματος (Wavelength Switches).....	61
4.7.2 Μετατροπή Μήκους Κύματος	62
5. Τεχνολογία WDM	63
5.1 Τεχνολογία SONET/SDH.....	63
5.1.1 Δομικά Στοιχεία της Τεχνολογίας SONET/SDH	65
5.1.2 Αρχιτεκτονικές Δικτύων SONET/SDH	67
5.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM)	68
5.3 Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)	71
5.3.1 Πολυπλεξία Orthogonal FDM.....	72
5.4 Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (WDM)	72
5.4.1 Πολυπλεξία Coarse WDM (CWDM)	74
5.4.2 Πολυπλεξία Dense WDM (DWDM).....	75

6. Τεχνολογία Φωτονικής Πυριτίου	77
6.1 Διαμόρφωση σε Si	79
6.1.1 Υπόβαθρο Διαμορφωτών	79
6.1.2 Πρόοδος σε Διαμορφωτές Πυριτίου (Si modulator)	80
6.1.3 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI)	85
6.2 Raman Σκέδαση	86
6.3 Ανιχνευτές Οπτικού Φωτός Si και Επόμενης Γενιάς Συσκευές	87
6.3.1 Ανιχνευτές Οπτικού Φωτός (Si)	87
6.3.2 Σκοτεινό Ρεύμα	89
6.3.3 Εύρος Ζώνης	89
6.3.4 Ευαισθησία R	90
6.3.5 Χωρητικότητα	90
6.4 Ολοκλήρωση Γερμανίου (Ge) σε Πυρίτιο (Si)	91
6.5 Επόμενης Γενιάς Συσκευές.....	91
6.6 Passive Συσκευές.....	94
6.6.1 Κυματοδηγοί Si	94
6.6.2 Couplers –Συζευκτές.....	98
6.6.3 Διαχωριστής-Περιστροφέας Πόλωσης (Splitter/Rotator)	99
6.6.4 Διαχωριστής Δέσμης Πόλωσης (Polarization Beam Splitter).....	100
6.6.5 Περιστροφέας Πόλωσης (Polarization Rotator)	101
6.7 Ενεργές Συσκευές (Active Devices)	102
6.7.1 Lasers.....	103
6.7.1.1 Υβριδικό Laser σε πυρίτιο	104
6.7.1.2 Laser Raman Πυριτίου	105
6.7.2 Ring-Assisted Mach–Zehnder συμβολόμετρο (RAMZI)	106
6.7.3 Ανιχνευτές Πυριτίου	108
6.7.3.1 Ανιχνευτές III-V.....	109
6.7.3.2 Ανιχνευτές Ge-on-Si.....	110
6.8 Ολοκλήρωση και Πακετοποίηση (packaging).....	111
6.9 Εφαρμογές.....	113
6.9.1 Οπτική Διασύνδεση	113
6.9.2 Βελτιστοποίηση Grating Couples	115
6.9.2.1 Πόλωση ανενεργού 2D συζευκτή φράγματος	117
7. Silicon Switching 50x50 with MEMs-actuated Adiabatic Coupler	118

7.1 Σχεδιασμός	119
7.3 Κατασκευή & Πειραματικά αποτελέσματα	120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	123

Abstract

Silicon photonics has attracted tremendous attention and research effort as a promising technology in optoelectronic integration for computing, communications, sensing, and solar harvesting. Mainly due to the combination of its excellent material properties and the complementary metal–oxide semiconductor (CMOS) fabrication processing technology, silicon has becoming the material choice for photonic and optoelectronic circuits with low cost, ultra-compact device footprint, and high-density integration. This review paper provides an overview on silicon photonics, by highlighting the early work from the mid-1980s on the fundamental building blocks such as silicon platforms and waveguides, and the main milestones that have been achieved so far in the field. A summary of reported work on functional elements in both passive and active devices, as well as the applications of the technology in interconnect, grating couplers optimization, switching, is identified.

Keywords: silicon photonics; review; history; passive devices; active devices; integration, grating couplers, Switching

Περίληψη

Φωτονική Πυριτίου έχει προσελκύσει τεράστια προσοχή και ερευνητική προσπάθεια ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία σε οπτοηλεκτρονική ολοκλήρωση για την πληροφορική, τις επικοινωνίες, τους αισθητήρες και την ηλιακή «συγκομιδή». Κυρίως λόγω του συνδυασμού των εξαιρετικών ιδιοτήτων του υλικού και της τεχνολογίας CMOS, το πυρίτιο έχει επιλεγεί ως το υλικό για την κατασκευή φωτονικών και οπτοηλεκτρονικών κυκλωμάτων με χαμηλό κόστος, υπερ-μικρό αποτύπωμα συσκευής και υψηλής πυκνότητας ολοκλήρωση. Σε αυτήν την εργασία θα κάνουμε μια επισκόπηση για την φωτονική πυριτίου, τονίζοντας το πρώιμο έργο από τα μέσα της δεκαετίας του 80 σχετικά με τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία όπως πλατφόρμες πυριτίου και κυματοδηγούς, και τα κύρια θεμελιώδη δομικά στοιχεία που έχουν επιτευχθεί μέχρι σήμερα στον τομέα αυτό. Μια περίληψη των αναφερόμενων εργασιών για τα λειτουργικά στοιχεία ενεργητικών και παθητικών συσκευών, καθώς και τις εφαρμογές τεχνολογίας στην διασύνδεση (interconnection), την βελτιστοποίηση συζευκτών φράγματος και την μεταγωγή (switching).

Λέξεις-κλειδιά : Φωτονική πυριτίου; Αναφορές; ιστορία ; παθητικές συσκευές; Ενεργές συσκευές; Ολοκλήρωση/διαμόρφωση, συζευκτές φράγματος, μεταγωγή

1 Φωτονική

1.1 Εισαγωγή

Φωτονική είναι η επιστήμη που ασχολείται με την τεχνολογία της παραγωγής και της εκμετάλλευσης του φωτός και άλλων μορφών ακτινοβόλου ενέργειας όπου η κβαντική μονάδα είναι το φωτόνιο. Πιο αναλυτικά, η φωτονική διερευνά την παραγωγή, την εκπομπή, τη μετάδοση, τη διαμόρφωση, την περίθλαση, την ενίσχυση και την ανίχνευση του φωτός από οπτικά στοιχεία και όργανα, λέιζερ και άλλες πηγές φωτός, οπτικές ίνες, ηλεκτρο-οπτικές συσκευές και άλλα περίπλοκα συστήματα. Οι εφαρμογές της φωτονικής επεκτείνονται από την παραγωγή ενέργειας στην ανίχνευση και επεξεργασία πληροφοριών. Η φωτονική υπογραμμίζει ότι τα φωτόνια έχουν σημειακή και κυματική φύση, και καλύπτει όλες τις τεχνικές εφαρμογές του φωτός από το υπεριώδες μέχρι το υπέρυθρο φάσμα.[1]

Γενικώς, υπάρχουν 5 εφαρμογές και προτεραιότητες εστίασης της Φωτονικής και

αυτές είναι:

i. **ICT και Καταναλωτικά Προϊόντα Φωτονικής** (Οπτικές επικοινωνίες,

Ηλεκτρονικές οθόνες, Αποθήκευση στοιχείων)

ii. **Βιολογική Επιστήμη και Υγειονομική Περίθαλψη** (Βιοφωτονική, Συσκευές,

Μικροσκόπηση)

iii. **Υπηρεσίες Άμυνας και Ασφάλειας** (Συστήματα Άμυνας και Ασφάλειας)

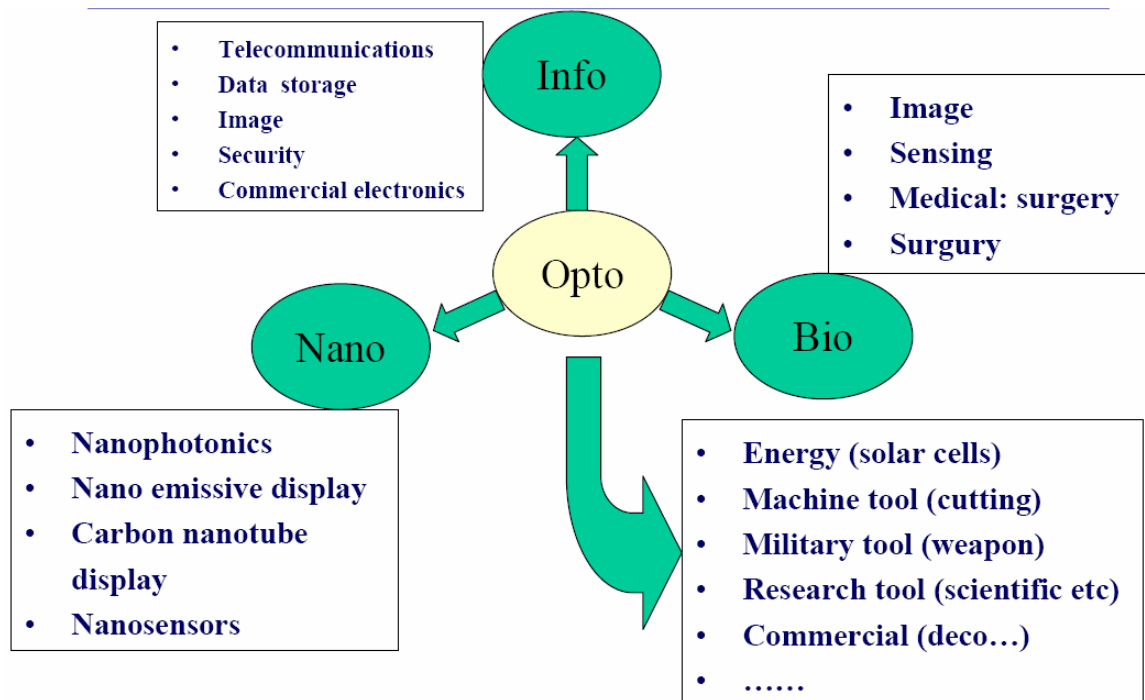
iv. **Φωτισμός και Ενέργεια** (Φωτισμός στερεάς κατάστασης, Φωτοβολταϊκά

Συστήματα)

v. **Βιομηχανική Φωτονική** (Λέιζερ, Συστήματα αισθητήρων, Απεικόνιση,

Βιομετρικά συστήματα).

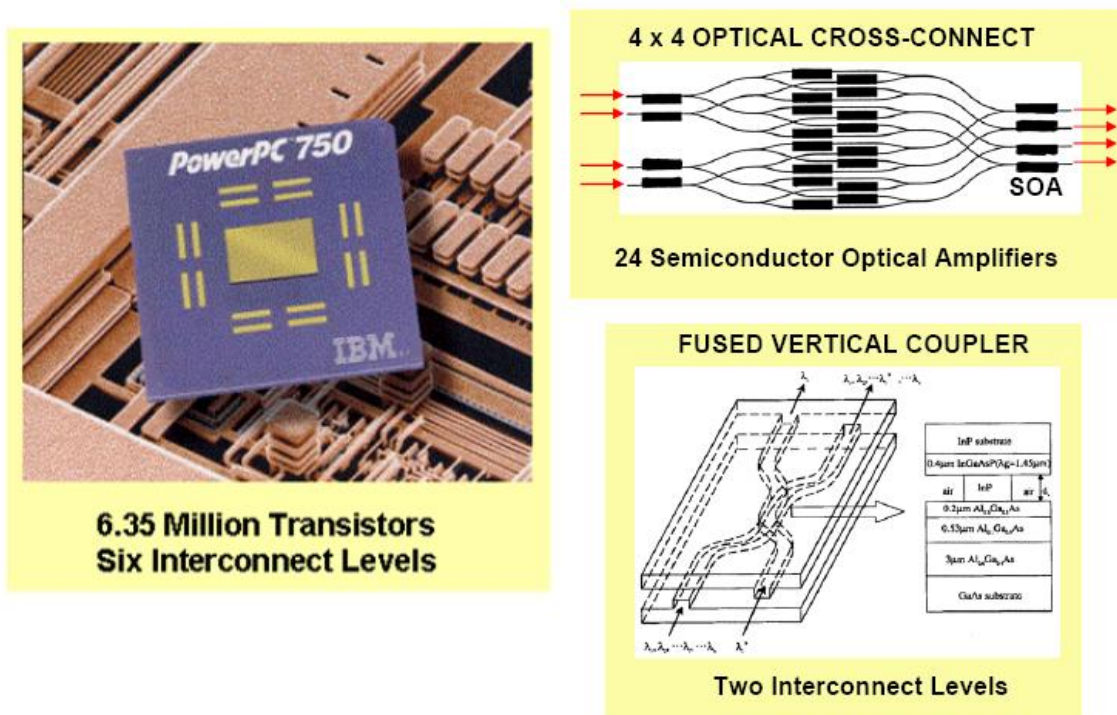
Παρακάτω μπορούμε να διακρίνουμε πού έχουν εφαρμογές οι φωτονικές συσκευές (βλ. Εικόνα 1.1):



Εικόνα 1.1 Εφαρμογές φωτονικών συσκευών

Η φωτονική βρίσκει εφαρμογές σε περιοχές κοινές με την ηλεκτρονική (όπου η κβαντική μονάδα είναι το ηλεκτρόνιο) (βλ. Εικόνα 1.2). Η φωτονική έχει τα εξής πλεονεκτήματα έναντι της ηλεκτρονικής :

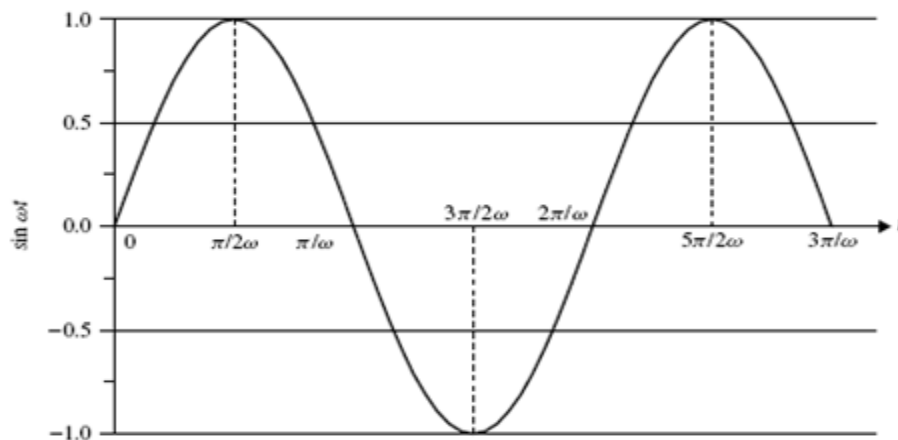
- i. Το ασυγκράτητο φως είναι χιλιάδες φορές γρηγορότερο από τα ηλεκτρόνια στα chip ενός υπολογιστή
- ii. Έχουμε περισσότερα μήκη κύματος (δηλαδή κανάλια πληροφοριών) σε μία οπτική ίνα έτσι ώστε το εύρος της ζώνης μετάδοσης να αυξάνεται από τα συμβατικά χάλκινα καλώδια
- iii. Το φως δεν αντιμετωπίζει καμία ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή όπως το ηλεκτρόνιο στο χάλκινο καλώδιο[1]



Εικόνα 1.2 Ολοκληρωμένα κυκλώματα: Ηλεκτρονικά και φωτονικά

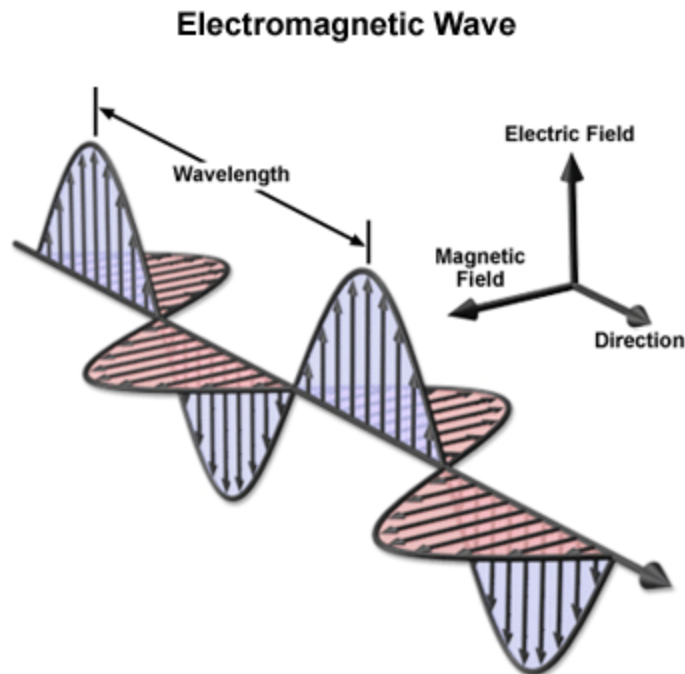
Οι τρεις βασικές έννοιες της φωτονικής είναι η φάση, η πόλωση και η παρεμβολή.

Η φάση τονίζει την έννοια της γωνιακής συχνότητας $\omega = 2\pi f$, όπου f η συχνότητα μέσα στο οπτικό κύμα όπου $E = E_0 \sin(kz \pm \omega t)$ όπου $K = \frac{2\pi}{\lambda}$ ο κυματαριθμός, λ το μήκος κύματος και η αλλαγή φάσης σε σχέση με την απόσταση και τον κυματαριθμό δίνεται ως $\phi = Kz$ (βλ. Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3 Φάση, Πόλωση & Παρεμβολή

Το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα με τα χαρακτηριστικά του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου (βλ. Εικόνα 1.4).



Εικόνα 1.4 Ημιτονοειδές επίπεδο κύμα που παρουσιάζει ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία.

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση του ηλεκτρικού & του μαγνητικού πεδίου. Μπορούμε να επισημάνουμε τρία χαρακτηριστικά.

1. Το κύμα αυτό είναι επίπεδο επειδή οι τιμές του ηλεκτρικού (άξονας X) και του μαγνητικού (άξονας Y) πεδίου είναι σταθερές οπουδήποτε στο z-πεδίο.
2. Το κύμα είναι εγκάρσιο επειδή και το ηλεκτρικό πεδίο & μαγνητικό πεδίο είναι εγκάρσια στην διεύθυνση διάδοσης.
3. Το κύμα είναι πολωμένο επειδή το ηλεκτρικό πεδίο & το μαγνητικό πεδίο υπάρχουν σε μία μόνο κατεύθυνση. [1]

Το φαινόμενο γνωστό και ως παρεμβολή είναι ένας βασικό παράγοντας για την επιτυχή λειτουργία πολλών ολοκληρωμένων οπτικών συσκευών. Δηλαδή, με όρους φωτονικής, η παρεμβολή ορίζει τα δύο τυχαία κύματα σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο, όπου τα πεδία προστίθενται μεταξύ τους (βλ. Εικόνα 1.5) [1].

1.2 Οπτικές Επικοινωνίες

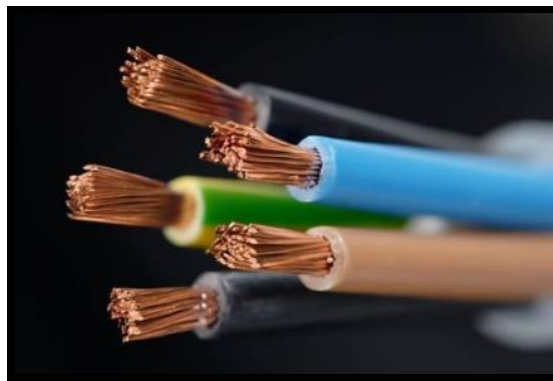
Στην παρούσα πτυχιακή εργασία θα εστιάσουμε την προσοχή μας στην εφαρμογή της Φωτονικής στις οπτικές επικοινωνίες. Οι αρχαιότερες μέθοδοι διάδοσης μιας οπτικής πληροφορίας ήταν με τα σήματα καπνού και το ανάμμα των πυρσών. Σε παλαιότερες εποχές , οι άνθρωποι επικοινωνούσαν με τις φρυκτωρίες , όπου με το ανάμμα των πυρσών από περιοχή σε περιοχή έφθανε η πληροφορία κινδύνου στην ενδοχώρα κατά την διάρκεια της νύχτας. Το οπτικό αυτό σύστημα βελτιώθηκε αργότερα (2^ο π.Χ. αιώνα) με την κατασκευή ενός οπτικού τηλέγραφου με τον οποίο μπορούσε να στείλει ένα σύνθετο μήνυμα χωρίς προσυνεννόηση.

Ο **Graham Bell (1876)** και ο **Samuel Morse (1854)** ουσιαστικά έθεσαν τα θεμέλια για τις «σύγχρονες» τηλεπικοινωνίες. Την δεκαετία του '50 αρχίζει να εμφανίζεται η ηλεκτρονική επεξεργασία της πληροφορίας, που θα οδηγήσει, στις μέρες μας, στην ψηφιακή μετάδοση δεδομένων (**ΟΕ 2011**).

Η μετάδοση δεδομένων στηρίζεται σε τεχνικές, που χαρακτηρίζαν την κάθε εποχή.

Εποχή του χαλκού (20ός αιώνας και μετά) :

Γίνεται χρήση χάλκινων καλωδίων για την μεταφορά διαμορφώσεων ηλεκτρικών σημάτων. Χρησιμοποιούνται πλήθος χάλκινων καλωδίων , εξ αιτίας της περιορισμένης ικανότητας μετάδοσης της πληροφορίας από καλώδιο σε καλώδιο (**βλ. Εικόνα 1.6**) [2].



Εικόνα 1.6 Γίνεται Χρήση Χάλκινων καλωδίων

Εποχή των ασύρματων επικοινωνιών (19ος αιώνας και μετά) :

Γίνεται μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στον ελεύθερο χώρο (ραδιοφωνικά κύματα, κινητή τηλεφωνία).

Εποχή των ημιαγωγών:

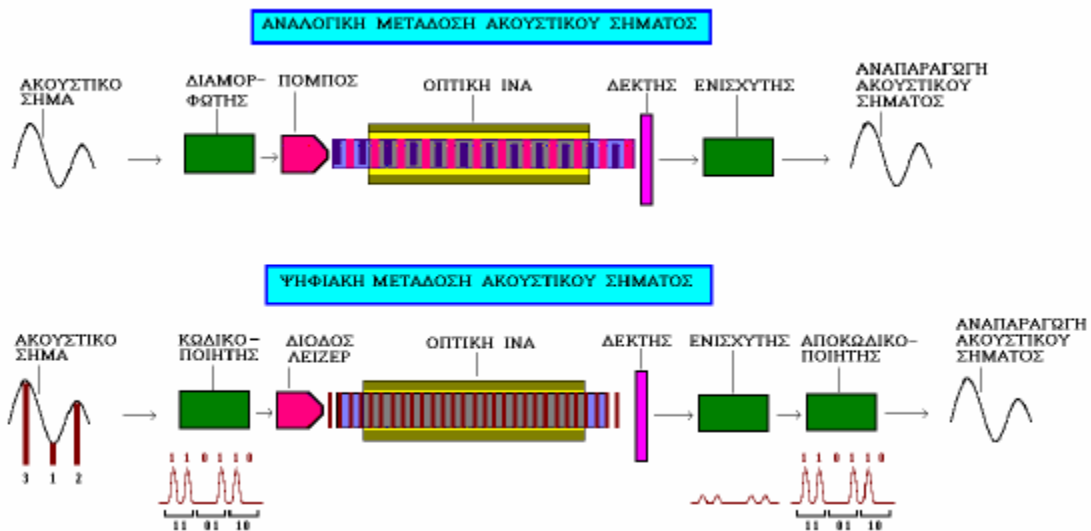
Σήμερα , έχει γίνει αντικατάσταση των δαπανηρών και βαρέων χάλκινων καλωδίων με οπτικές ίνες που κοστίζουν ελάχιστα, διαθέτουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα για μετάδοση των πληροφοριών , επηρεάζονται ελάχιστα από εξωτερικές παρεμβολές και επιτυγχάνουν σημαντικές εμβέλειες. Το πλεονέκτημα των ψηφιακών επικοινωνιών στηρίζεται στην ικανότητα υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων (μέχρι $4 \times 10^{10} \text{ bit/s}$) με υπερταχείς φωτεινούς παλμούς διάρκειας μερικών ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) [2].

1.2.1 Τεχνική μετάδοση της πληροφορίας

Η τεχνική μετάδοσης μιας πληροφορίας αποτελείται από τα εξής μέρη (βλ. Εικόνα 1.7):

- i. Τον πομπό που μετατρέπει το ηλεκτρικό σήμα (πληροφορία) σε φωτεινό σήμα. Η πληροφορία διαμορφώνεται συνήθως σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή σε ακολουθία εκατομμυρίων παλμών,

- ii. Την Οπτική ίνα με ενδεχομένως ενδιάμεσους αναμεταδότες
- iii. Τον Δέκτη που αποκαθιστά, στο σταθμό λήψης, το ηλεκτρικό σήμα **(ΟΕ 2011)**.



Εικόνα 1.7 Αναλογική και Ψηφιακή μετάδοση ακουστικού σήματος

2 Οπτική Τεχνολογία

2.1 Ορισμός κυματοδηγού

Ένα **κυματοδηγός** είναι μία δομή που καθοδηγεί κύματα, όπως ηλεκτρομαγνητικά ή ηχητικά κύματα. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι κυματοδηγών για κάθε τύπο κύματος (π.χ. βλ. εικόνα 2.1). Η αρχική και πιο κοινή έννοια είναι ένας κοίλος αγωγίμος σωλήνας μετάλλων που χρησιμοποιείται για να φέρει τα ραδιοκύματα υψηλής συχνότητας, και ιδιαίτερα τα μικροκύματα. Οι κυματοδηγοί διαφέρουν ως προς την γεωμετρία τους που μπορεί να περιορίσει την ενέργεια σε μια διάσταση (π.χ. κυματοδηγοί πλακών) ή σε δύο διαστάσεις (π.χ. κυματοδηγοί ινών ή καναλιών). Επιπλέον, διαφορετικοί κυματοδηγοί απαιτούνται για να καθοδηγήσουν διαφορετικές συχνότητες. Για παράδειγμα, μια οπτική ίνα που καθοδηγεί το φως (*high frequency*) δεν θα καθοδηγήσει τα μικροκύματα (που έχουν μια πολύ χαμηλότερη συχνότητα). Εμπειρικά το πλάτος ενός κυματοδηγού πρέπει να είναι του ίδιου μεγέθους με το μήκος κύματος του καθοδηγούμενου κύματος. Όταν αναφερόμαστε σε **οπτικούς κυματοδηγούς** και όχι σε οπτικές ίνες, περιοριζόμαστε στην θεωρητική δομή τριών στρωμάτων που αποτελείται από τον πυρήνα και δύο επιστρώσεις εξωτερικού τοιχώματος. Το «στρώμα» πυριτίου είναι λίγα micron σε πυκνότητα, και το θαμμένο διοξείδιο του πυριτίου είναι περίπου μισό micron. Ο σκοπός της θαμμένης στρώσης οξειδίου είναι να συμπεριφέρεται ως η χαμηλή επίστροψη εξωτερικού τοιχώματος και συνεπώς να εμποδίζει το πεδίο που σχετίζεται με τους οπτικούς ρυθμούς ώστε να μην διαπεράσει το υπόστρωμα πυριτίου από κάτω [1].



Εικόνα 2.1 Silicon On Insulator (SOI) κυματοδηγός

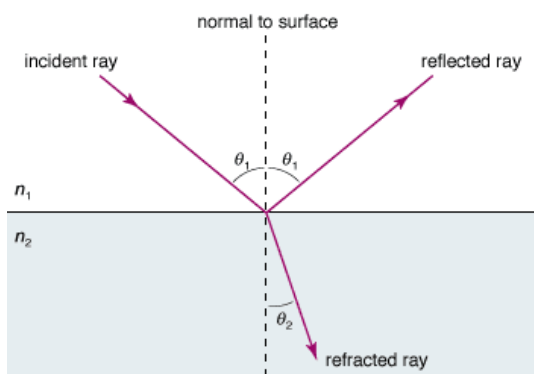
Στην οπτική και στην φυσική ο **νόμος του Σνέλ** (Snell) (γνωστός και ως ο νόμος του Descartes ή ο νόμος του Snell-Descartes ή ως ο νόμος της διάθλασης) είναι μια μαθηματική σχέση που περιγράφει την σχέση της γωνίας πρόσπτωσης με την γωνία διάθλασης του φωτός σε μια διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων (π.χ. από αέρα-κενό σε νερό ή γυαλί). Στην επιστήμη της οπτικής ο νόμος αυτός χρησιμοποιείται για να βρούμε την τροχιά του φωτός που προσπίπτει ή διαθλάται σε μια επιφάνεια. Στην πειραματική οπτική ο νόμος αυτός χρησιμοποιείται για την εύρεση του δείκτη διάθλασης ενός υλικού.

Ο νόμος έχει πάρει το όνομα του Ολλανδού μαθηματικού *Willebrond Snellius*. Ο νόμος αναφέρει ότι ο λόγος $\frac{n_2}{n_1}$ των δεικτών διάθλασης (ο δείκτης αυτός εξαρτάται από το μέσο) είναι αντιστρόφως ανάλογος με το λόγο των ταχυτήτων στα δύο μέσα και αντιστρόφως ανάλογος του λόγου των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης θ_1 και διάθλασης θ_2 .

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\eta\mu\theta_1}{\eta\mu\theta_2}$$

Ο νόμος του Σνέλ ακολουθεί την αρχή του ελαχίστου χρόνου (**Αρχή Φερμά**) η οποία ακολουθεί την θεώρηση του φωτός ως κύματα.

Ο νόμος του Snell ορίζει ότι $n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$, θ_1 γωνία πρόσπτωσης, θ_2 γωνία ανάκλασης, n_1 δείκτης διάθλασης του υλικού 1, n_2 ο δείκτης διάθλασης του υλικού 2 (βλ. Εικόνα 2.2) [1].



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

Εικόνα 2.2 Γωνία Ανάκλασης

2.2 Συντελεστές ανακλαστικότητας

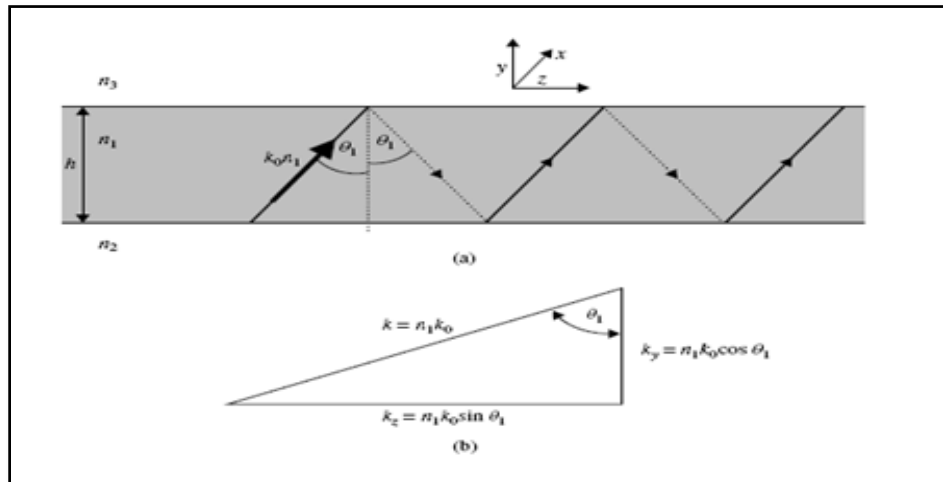
Για να κατανοηθεί πλήρως η έννοια του οπτικού κυματοδηγού είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Είναι γνωστό ότι τα ανακλώμενα και μεταδιδόμενα κύματα μπορούν να περιγραφούν από τη φόρμουλα Fresnel $E_r = r E_i$, όπου το r είναι ο μιγαδικός συντελεστής ανακλαστικότητας. Ο συντελεστής ανακλαστικότητας είναι συνάρτηση της γωνίας συμβάντος και της πόλωσης του φωτός. Αυτός ο συντελεστής εξαρτάται από τις TE (Εγκάρσιο Ηλεκτρικό Πεδίο) και TM (Εγκάρσιο Μαγνητικό Πεδίο) συνθήκες. Η TE ορίζεται ως η συνθήκη όπου τα ηλεκτρικά πεδία των κυμάτων είναι κάθετα στο πεδίο του συμβάντος και η TM ορίζεται ως η συνθήκη όπου τα μαγνητικά πεδία των κυμάτων είναι κάθετα στο πεδίο του συμβάντος. Με την βοήθεια της φόρμουλας Fresnel και του νόμου του Snell βρίσκουμε τους συντελεστές για το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα,

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}, r_{TM} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}{n_1 \cos \theta_1 + \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

Η φάση του κυματοδηγού είναι $\phi = k z \pm \omega t$, όπου η παράγωγος της ως προς το χρόνο είναι η γωνιακή συχνότητα $\omega = 2 \pi f$, και η παράγωγος της ως προς την απόσταση είναι ο κυματαριθμός $k = 2\pi/\lambda$ [1].

2.3 Ρυθμοί ενός πεδιακού κυματοδηγού

Μία ακτίνα φωτός μπορεί να περάσει από έναν κυματοδηγό ύψους h και αφού υποστεί ανάκλαση συγκεκριμένης γωνίας, να οδηγηθεί στην έξοδο του κυματοδηγού (βλ. Εικόνα 2.3)



Εικόνα 2.3 α) Διάδοση σε έναν επίπεδο κυματοδηγό, **β)** σχέση μεταξύ των σταθερών διάδοσης στις y , z και κυματο-κανονικές κατευθύνσεις

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα και καθαρή γεωμετρία, καταλήγουμε ότι ο κυματάρριθμος στο z -επίπεδο θα είναι $k_z = n_1 k_0 \sin \theta_1$ όπου k_0 είναι ο θεμελιώδης κυματάρριθμος, στο y -επίπεδο $k_y = n_1 k_0 \cos \theta_1$ και η φάση στο συγκεκριμένο επίπεδο θα είναι $\phi_h = 2 k_0 n_1 h \cos \theta_1$. Με αυτή την μέθοδο μπορεί κανείς να κατανοήσει ότι μόνο συγκεκριμένοι ρυθμοί μπορούν να

περάσουν από τον κυματοδηγό , δηλαδή το φώς μπορεί να περάσει μόνο σε συγκεκριμένες και όχι σε τυχαίες γωνίες θ. Κάθε ρυθμός διάδοσης έχει το δικό του αριθμό m. Για παράδειγμα , ο πρώτος TE ρυθμός, ο θεμελιώδης ρυθμός, περιγράφεται ως TE₀. Ένας κυματοδηγός μπορεί εύκολα να υποστηρίξει ένα μοναδικό ρυθμό για κάποια συγκεκριμένη πόλωση του φωτός. Τέτοιοι κυματοδηγοί ονομάζονται μονορυθμικοί [1].

2.4 Εξισώσεις του Maxwell

Οι εξισώσεις του Maxwell είναι ένα σύνολο τεσσάρων μερικών διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν πώς τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία αφορούν τις πηγές , την πυκνότητα δαπανών και την πυκνότητα ρεύματος ¹ τους , και πώς εξελίσσονται στο μέλλον. Χωριστά οι τέσσερις εξισώσεις που αποτελούν το σύγχρονο σύνολο εξισώσεων Maxwell είναι γνωστές ως νόμος του Gauss, νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό, νόμος του Faraday για την επαγωγή και νόμος του Ampere με την διόρθωση Maxwell. Μαζί με το όνομα δύναμης Lorentz , αυτές οι εξισώσεις διαμορφώνουν την βάση της κλασσικής ηλεκτροδυναμικής, της κλασσικής οπτικής και των ηλεκτρικών κυκλωμάτων (Fowler 2009). Οι εξισώσεις αυτές δίνονται στον **πίνακα 2.1**.

Πίνακας 2.1 Αναπαράσταση των βασικών εξισώσεων του Maxwell

Name	Differential form	Integral form
Gauss's law	$\nabla D = \rho_f$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{D} \times d\mathbf{A} = Q_f(V)$
Gauss's law for magnetism	$\nabla B = 0$	$\oiint_{\partial V} \mathbf{B} \times d\mathbf{A} = 0$
Maxwell – Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_{D,S}}{\partial t}$
Ampere's Circuital law (with Maxwell's correction)	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_{\partial S} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{f,s} - \frac{\partial \Phi_{D,S}}{\partial t}$

2.5 Κυματική εξίσωση

Η κυματική εξίσωση $\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{U^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$ όπου ∇^2 η Λαπλασιανή , U η ταχύτητα και E η ενέργεια του πεδίου , περιγράφει τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Λύνοντας την κυματική εξίσωση για κυματοδηγούς παρουσιάζονται οι ρυθμοί των κυματοδηγών μαθηματικά. Έχοντας αυτήν την εξίσωση και την εξίσωση του ηλεκτρικού πεδίου (2.4) σε όλα τα επίπεδα

¹ Η **πυκνότητα ρεύματος** είναι η μετακίνηση της πυκνότητας δαπανών. Η εξίσωση συνοχής λέει ότι εάν η δαπάνη κινείται από έναν διαφορικό όγκο (I.e. η απόκλιση της πυκνότητας ρεύματος είναι θετική) έπειτα το ποσό δαπάνης μέσα σε εκείνο τον όγκο πρόκειται να μειωθεί, έτσι το ποσοστό αλλαγής της πυκνότητας δαπανών είναι αρνητικό. Επομένως η εξίσωση συνοχής ανέρχεται σε συντήρηση της δαπάνης.

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j} + E_z \vec{k} \quad (2.4)$$

Ορίζουμε τις συνοριακές συνθήκες του κυματοδηγού. Κάνοντας ανάλυση στην x-κατεύθυνση και σύμφωνα με τις συνοριακές συνθήκες καταλήγουμε ότι στο υψηλό υπόστρωμα θα ισχύει

$$E_x(y) = \exp\left[-k_{yu}\left(y - \frac{h}{2}\right)\right] \quad \text{για } y \geq \frac{h}{2} \quad (2.5)$$

, όπου k_{yu} ο κυματάρριθμος στο υψηλό υπόστρωμα, h το ύψος του κυματοδηγού, στον πυρήνα θα ισχύει

$$E_x(y) = E_c \exp[-jk_{yc}y] \quad \text{για } -\frac{h}{2} \leq y \leq \frac{h}{2} \quad (2.6)$$

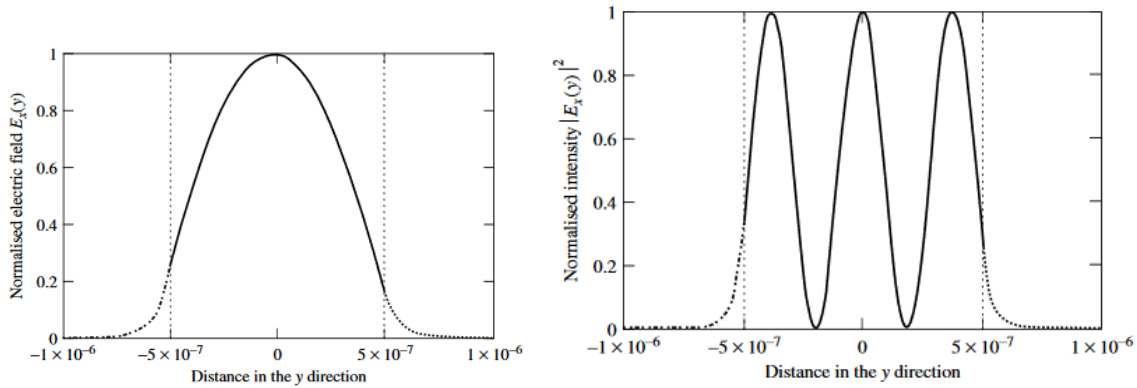
, όπου k_{yc} ο κυματάρριθμος στον πυρήνα και στο χαμηλό υπόστρωμα θα ισχύει

$$E_x(y) = E_l \exp\left[k_{yl}\left(y + \frac{h}{2}\right)\right] \quad \text{για } y \leq -\frac{h}{2} \quad (2.7)$$

, όπου k_{yl} ο κυματάρριθμος στο χαμηλό υπόστρωμα. Με περαιτέρω ανάλυση καταλήγουμε ότι

$$E_u = \frac{k_{yc}}{k_{yu}} E_c \sin\left(k_{yc} \frac{h}{2} + \varphi\right) \text{ και } E_l = \frac{k_{yc}}{k_{yl}} E_c \sin\left(k_{yc} \frac{h}{2} - \varphi\right) \quad (2.8)$$

[1]. Όσον αφορά το διάγραμμα των ρυθμών μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μοναδικό ρυθμό έχουμε γραφική παράσταση σε σχήμα «καμπάνας», δηλαδή μια Gauss κατανομή, ενώ για πολλαπλούς ρυθμούς έχουμε ημιτονοειδείς μορφές, ανάλογα με τον αριθμό m . Για παράδειγμα, για $m=2$ έχουμε 3 κορυφές, όπως παρατηρείται στην εικόνα 2.4 **[1]**.



Εικόνα 2.4 α) Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικών πεδίων του θεμελιώδους ρυθμού ($m = 0$), **β)** Σχεδιάγραμμα έντασης του δεύτερου άρτιου ρυθμού ($m = 2$)

2.6 Οπτικές ίνες και επικοινωνίες

2.6.1 Δομή των Οπτικών Ινών

Μια οπτική ίνα είναι μια λεπτή, εύκαμπτη, διαφανής ίνα που ενεργεί ως κυματοδηγός, ή «ελαφρύς σωλήνας», για να διαβιβάσει το φως μεταξύ των δύο άκρων της ίνας. Ο τομέας της

εφαρμοσμένης επιστήμης και της εφαρμοσμένης μηχανικής που ασχολείται με το σχεδιασμό και την εφαρμογή των οπτικών ινών είναι γνωστός ως οπτική ινών.

Η **οπτική ίνα** αποτελεί ένα αρκετά συνηθισμένο είδος καλωδίου στις σύγχρονες καλωδιώσεις. Χρησιμοποιείται, κυρίως, για μεγάλες αποστάσεις όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το καλώδιο συνεστραμμένων ζευγών και όταν οι απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης είναι αρκετά αυξημένες. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οπτική ίνα για να καλύψουμε απόσταση 5 Km ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων φθάνουν τα 10 Gbps. Η βασική κατασκευή μιας οπτικής ίνας φαίνεται στην εικόνα 2.5. Στο κέντρο του καλωδίου υπάρχει η οπτική ίνα, η οποία κατασκευάζεται από γυαλί ικανό να μεταφέρει φωτεινή δέσμη συγκεκριμένου μήκους κύματος με πολύ λίγες απώλειες. Την οπτική ίνα περιβάλλει ειδική επίστρωση υλικού με μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό της ίνας, το οποίο ονομάζεται cladding ή buffer. Το υλικό αυτό βοηθά στη συνεχή ανάκλαση της φωτεινής δέσμης, η οποία θα πέσει μέσα στην οπτική ίνα, εφόσον η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη της οριακής καθώς σε άλλη περίπτωση θα έχουμε διάθλαση στην εξωτερική επίστρωση (cladding). Με αυτό τον τρόπο η οπτική ίνα εγκλωβίζει τη δέσμη του φωτός και την οδηγεί στην άκρη της.

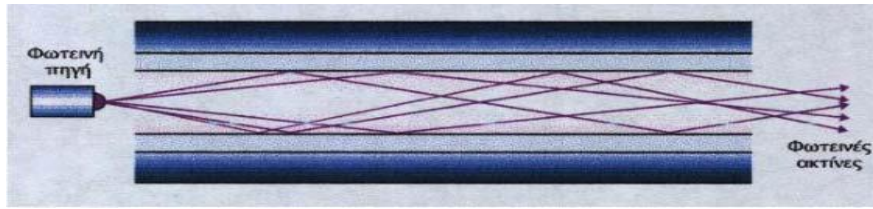


Εικόνα 2.5 α) Δομή της οπτικής ίνας, **β)** Απεικόνιση οπτικής ίνας στο εργαστήριο

Την επίστρωση περιβάλλει δέσμη συνθετικών ινών, οι οποίες έχουν στόχο την προστασία της ίνας από πιθανά τραβήγματα, που είναι επικίνδυνο να σπάσει το γυαλί, το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της ίνας. Όλα τα παραπάνω περικλείονται σε εξωτερικό πλαστικό περίβλημα όμοιο με αυτό των καλωδίων συνεστραμμένων ζευγών [1].

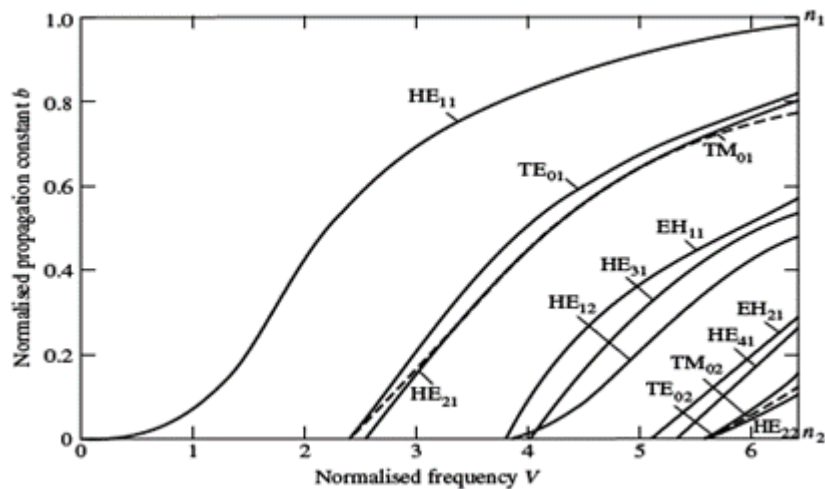
2.6.2 Ρυθμοί οπτικής ίνας

Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ της οπτικής ίνας και του πεδιακού κυματοδηγού είναι το γεγονός ότι η οπτική ίνα περιορίζει το φως σε δύο, αντί σε μία, διάσταση. Με εφαρμογή της λεγόμενης βηματικής μεθόδου [1] η ακτίνα θα ακολουθήσει το μονοπάτι σε μορφή ζίγκ-ζάγκ διαμέσου της ίνας, περνώντας μέσα από την ίνα με σχεδόν παρόμοιο τρόπο όπως οι κυματοδηγοί. Αυτές οι ακτίνες αναφέρονται ως μεσημβρινές ακτίνες (βλ. **Εικόνα 2.6**).

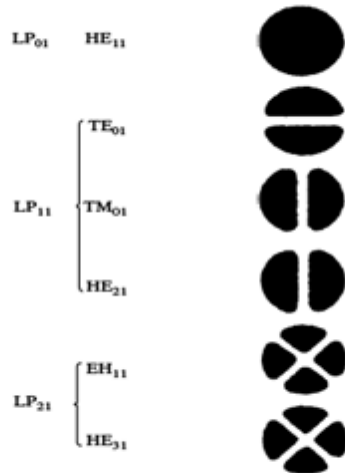


Εικόνα 2.6 Απεικόνιση οπτικής ίνας με την μέθοδο του βηματικού δείκτη

Ωστόσο, υπάρχει η πιθανότητα μία ακτίνα να πολλαπλασιαστεί μέσα στην ίνα. Η ακτίνα αυτή ονομάζεται λοξή και ακολουθεί ένα ελικοειδές μονοπάτι διαμέσου της ίνας, δίχως να περνάει από τον άξονα της. Όλες αυτές οι ακτίνες είναι αποτέλεσμα της ολικής ανάκλασης, αλλιώς δεν θα έμεναν περιορισμένες μέσα στον κυματοδηγό, αλλά οι γωνίες διάδοσης των λοξών ακτίνων είναι τέτοιες ώστε να είναι πιθανό οι συντελεστές του ηλεκτρικού (E) και μαγνητικού (H) πεδίου να είναι εγκάρσιοι στον άξονα της ίνας. Έτσι, οι ρυθμοί που παράγονται από αυτές τις ακτίνες ονομάζονται HE_{lm} ή EH_{lm} ανάλογα με το αν το E ή το H πεδίο κυριαρχούν στο εγκάρσιο πεδίο. Αυτό σημαίνει ότι μερικές από τις ρυθμικές λύσεις έχουν περίπου την ίδια σταθερά διάδοσης, κι έτσι αυτές οι λύσεις συνήθως υπολογίζονται από τους γραμμικά πολωμένους ρυθμούς (Linear Polarized modes) και χαρακτηρίζονται ως LP_{lm} . Παρακάτω, φαίνονται τα σχεδιαγράμματα των ρυθμών ανάλογα με το ποιος κυριαρχεί την κάθε στιγμή στο πεδίο, (βλ. εικόνα 2.7), όπως και το τι μορφή παίρνουν οι ρυθμοί ανάλογα με τον αριθμό που χαρακτηρίζει τον καθένα (βλ. Εικόνα 2.8). Για να γίνει η προσέγγιση πιο κατανοητή, ο πίνακας 2.2 δείχνει την αντιστοιχία μεταξύ των LP και των ακριβών ρυθμών-λειτουργιών [1].



Εικόνα 2.7 Διάδοση σταθεράς των ακριβών ρυθμών που σχεδιάζονται συναρτήσει της κανονικοποιημένης συχνότητας

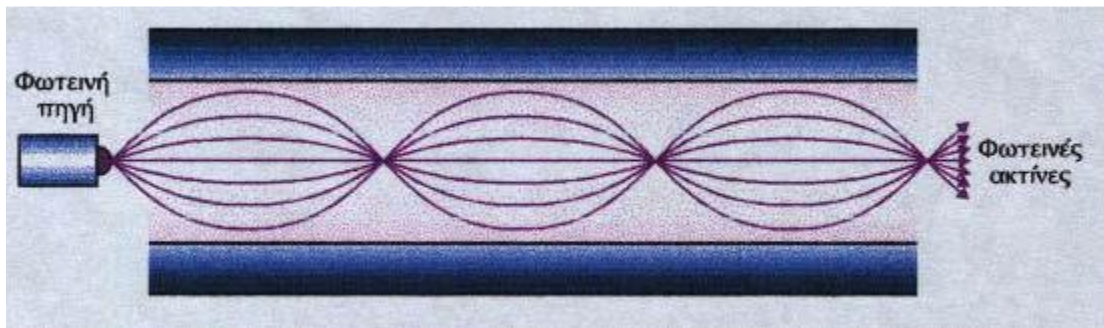


Εικόνα 2.8 Σχεδιαγράμματα έντασης των τριών ρυθμών χαμηλής τάξης LP

Linearly polarized	Exact modes
LP ₀₁	HE ₁₁
LP ₁₁	HE ₂₁ , TE ₀₁ , TM ₀₁
LP ₂₁	HE ₃₁ , EH ₁₁
LP ₀₂	HE ₁₂
LP ₃₁	HE ₄₁ , EH ₂₁
LP ₁₂	HE ₂₂ , TE ₀₂ , TM ₀₂
LP _{lm}	HE _{2m} , TE _{0m} , TM _{0m}
LP _{lm} (l ≠ 0 or 1)	HE _{l+1,m} , EH _{l-1,m}

Πίνακας 2.2 Σχέση μεταξύ των κατά προσέγγιση ρυθμών LP και των ακριβών ρυθμών

Με την διαβαθμισμένη μέθοδο μπορούμε να φανταστούμε ότι οι ακτίνες είναι μια σειρά από διακριτά βήματα, όπου υπάρχουν διαφορετικά μέγιστα και ελάχιστα μέσα στην ίνα και αυτό σημαίνει ότι η ακτίνα μπορεί να μην περάσει από τον πυρήνα της ίνας (βλ, Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9 Απεικόνιση οπτικής ίνας με την μέθοδο του διαβαθμισμένου δείκτη

Όσον αφορά τους ρυθμούς των οπτικών ινών σε σχέση με αυτούς των κυματοδηγών, οι δισδιάστατοι ορθογωνικοί ρυθμοί των κυματοδηγών απαιτούν δύο δείκτες (subscripts) για να τα αναγνωρίσουν. Παρόλα αυτά δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ίδια συνθήκη όπως στις οπτικές ίνες, επειδή οι ορθογωνικοί κυματοδηγοί δεν είναι κυκλικά συμμετρικοί. Έτσι, είναι φυσικό να χρησιμοποιούμε καρτεσιανές συντεταγμένες. Σε έναν ορθογωνικό κυματοδηγό υπάρχουν δύο οικογένειες ρυθμών, ο HE ρυθμός και ο EH ρυθμός, που πολώνονται στις TE και TM κατευθύνσεις αντίστοιχα. Έτσι, αυτοί οι ρυθμοί αναφέρονται σαν E^x ή E^y ρυθμοί, βεβαίως εξαρτάται από το πώς είναι πολωμένοι στην x ή y κατεύθυνση [1].

2.6.3 Επιδόσεις και χαρακτηριστικά

Οι επιδόσεις μία οπτικής ίνας συνδέονται με τον ρυθμό μετάδοσης του σήματος στην ίνα, με το αν, δηλαδή, η ίνα είναι πολύτροπη ή μονότροπη και με το μήκος κύματος του φωτός, που εκπέμπεται από την πηγή. Στις μονότροπες οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται μήκη κύματος μεταξύ 1310nm και 1550nm. Στις πολύτροπες οπτικές ίνες έχουμε μήκη κύματος από 850nm έως 1300nm. Θα πρέπει να τονιστεί ότι για δεδομένη εγκατάσταση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένος τρόπος μετάδοσης και μόνο ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος από τις πηγές σε όλη την έκταση της εγκατάστασης. Οι οπτικές ίνες μπορούν να μεταφέρουν σήματα σε πολύ μεγάλο εύρος ζώνης σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ μικρή εξασθένιση του σήματος. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αποστάσεις, που υπερβαίνουν τα 3 Km, ενώ οι μονότροπες οπτικές ίνες μπορούν να υπερβούν τα 10km. Υπάρχουν όμως και άλλοι παράγοντες που περιορίζουν την μετάδοση στις παραπάνω αποστάσεις. Τέτοιοι παράγοντες είναι το εύρος ζώνης της πηγής και του δέκτη των σημάτων σε μια οπτική ίνα καθώς και η χρωματική διασπορά του μεταδιδόμενου σήματος μέσα στην οπτική ίνα. Η αύξηση της χρωματικής διασπορά έχει ως αποτέλεσμα να εξασθενεί το σήμα. Επίσης ένας παράγοντας που επιβαρύνει την μετάδοση είναι η χρήση συνδέσμων και διακλαδωτών στην πορεία των οπτικών ινών. Θα πρέπει σημειωθεί ότι στις πολύτροπες οπτικές ίνες είναι πιο ανεκτό να χρησιμοποιήσουμε συνδέσμους και διακλαδωτές από ότι στις μονότροπες οπτικές ίνες. Επίσης, στις πολύτροπες οπτικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν χαμηλού κόστους LED, ενώ οι μονότροπες οπτικές ίνες οδηγούνται συνήθως από πηγή Laser. Παράδειγμα μια τυπική τιμή εξασθένισης σήματος για 62.5/125 πολύτροπη οπτική ίνα είναι 3.5dB/km για σήμα με μήκος κύματος 850nm και 1.0dB/km για μήκος κύματος 1300nm. Τυπικό μέγεθος εξασθένισης σήματος για μονότροπη οπτική ίνα είναι 0.5dB/km στα 1310nm και 0.4dB/km στα 1550nm. Συνοπτικά

αναφέρουμε σε ένα πίνακα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των οπτικών ινών σε σχέση με τα συμβατικά καλώδια (βλ. Πίνακα 2.3).

Πίνακας 2.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των οπτικών ινών

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μεγάλη χωρητικότητα της τάξης των Gbps	Δυσκολία στη σύνδεση , με συνέπεια την ανάγκη ύπαρξης, επιδέξιων εγκαταστατών
Νέες τεχνικές πολυπλεξίας με διαίρεση μήκους κύματος (WDM) επιτυγχάνονται ταχύτητες της τάξης των Tbps	Δυσκολία διασύνδεσης πολλών χρηστών πάνω σε ένα καλώδιο
Μικρό μέγεθος και βάρος	Ακριβές για μικρές αποστάσεις
Χαμηλή εξασθένιση	-
Απρόσβλητη σε περιβαλλοντικές παρεμβολές	-
Υψηλή ασφάλεια – δυσκολία στις υποκλοπές	-
Μεγάλες εγκαταστάσεις μειώνουν το κόστος	-

2.6.4 Διασπορά στις οπτικές ίνες

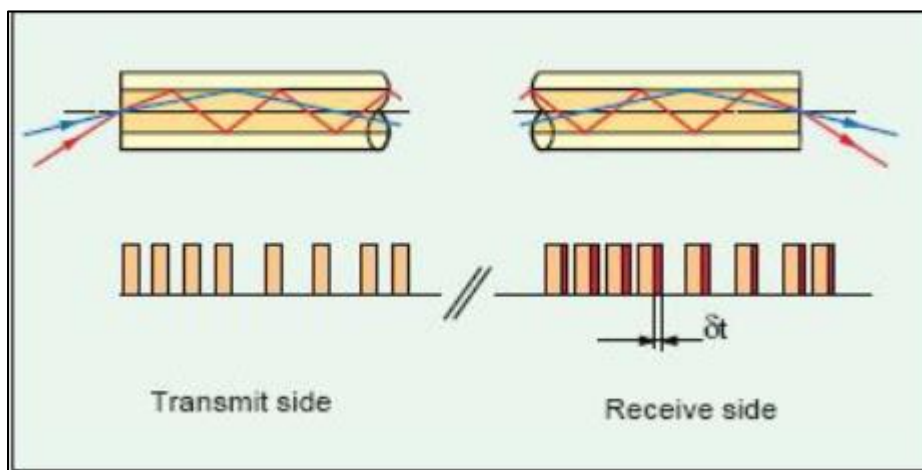
Το φως που ταξιδεύει μέσα σε ένα κυματοδηγό θα υποστεί παραμόρφωση. Το εκπεμπόμενο φως θα διευρυνθεί στο πεδίο του χρόνου. Στον τομέα της οπτικής ινών το παραπάνω φαινόμενο ονομάζεται διασπορά. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη διασποράς:

- Η **intermodal (διατροπική)** διασπορά που εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες
- Η **intramodal (ενδοτροπική)** διασπορά που εμφανίζεται στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες

2.6.4.1 Modal ή Intermodal διασπορά

Ένας παλμός φωτός που διαδίδεται μέσα σε μία πολύτροπη οπτική ίνα πρέπει να θεωρείται ως ένας μεγάλος αριθμός υπο-παλμών, ο καθένας με τη χαρακτηριστική του γωνία πρόσπτωσης μέσα στην ίνα. Το μήκος της ακτίνας διαδρομής διαφέρει λόγω των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης. Έτσι οι παλμοί φωτός που διαδίδονται ταυτόχρονα θα φτάσουν στο τέλος της ίνας σε ελάχιστα διαφορετικούς χρόνους. Το γεγονός αυτό μπορεί να περιγραφεί ως διεύρυνση του παλμού (κατά την διάρκεια διάδοσης του μέσα στην ίνα) , λόγω αύξησης της διάρκειας του. Το φαινόμενο αυτό περιορίζει αρκετά τις τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών.

Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ότι το φως διαδίδεται μέσα σε οπτική ίνα μήκους 1km σε χρόνο 5μs. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα η διαφορά χρόνου θα είναι $dt = 50 \text{ Ns}$. Η χρονική καθυστέρηση κάθε ρυθμού διάδοσης παραμορφώνει το σήμα.[177]



Εικόνα 2.10

Λόγω του ότι οι διαφορετικοί τρόποι ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές μέσα στην ίνα, ένας παλμός διευρύνεται ανάλογα με το μήκος της ίνας.

Η modal ή intermodal διασπορά προκαλεί τα παρακάτω προβλήματα :

- Μείωση τους εύρους μετάδοσης (Mbit/s)
- Μείωση της απόστασης μετάδοσης

Υπάρχει ένας φυσικός τρόπος μείωσης της Modal διασποράς μέσα σε μία ίνα. Ο κάθε ρυθμός μετάδοσης μεταφέρει ενέργεια από και προς κάποιον άλλο. Οι ρυθμοί χαμηλής τάξης (ρυθμοί με μικρή γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετατρέπονται σε ρυθμούς υψηλής τάξης (μεγάλη γωνία ως προς τον κεντρικό άξονα) μετά την μεταφορά ενέργειας. Το mode coupling, όπως ονομάζεται το προηγούμενο φαινόμενο, λαμβάνει χώρα περισσότερο σε σημεία «μη καθαρότητας» του πυρήνα, σε κολλήσεις (splices) και σε απότομα λυγίσματα της οπτικής ίνας. Στις σύγχρονες ίνες, ήταν δυνατό να μειώσουμε το mode coupling , βελτιώνοντας την ποιότητα της ίνας. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την ουσιαστική αδρανοποίηση του παράγοντα διαφοράς χρόνου Δt . Η διαφορά αυτή δεν αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση του μήκους κύματος της ίνας, αλλά σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$\Delta t \approx \sqrt{\text{fiberlength}(L)}$$

Η modal διασπορά μπορεί να αδρανοποιηθεί πλήρως, μειώνοντας τη διάμετρο του πυρήνα, έτσι ώστε να διαδίδεται μέσα στην ίνα μόνο ένας ρυθμός, ο θεμελιώδης (μονότροπη οπτική ίνα).[177]

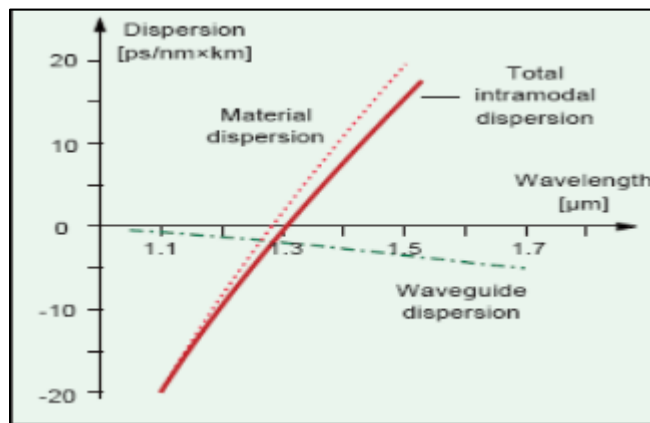
2.6.4.2 Intramodal διασπορά (Ενδοτροπική διασπορά)

Ακόμα και αν αδρανοποιηθεί πλήρως η Modal διασπορά , επιτρέποντας μόνο στο θεμελιώδη ρυθμό να μεταδίδεται μέσα στην ίνα (μονότροπη), θα συνεχίσει να υπάρχει διασπορά του συγκεκριμένου ρυθμού. Η παραμόρφωση αυτού του τύπου ονομάζεται **χρωματική διασπορά** μαζί με διασπορά πόλωσης ρυθμού μετάδοσης. Η **χρωματική διασπορά**

μέσα σε μονότροπη οπτική ίνα συνίσταται από την **διασπορά υλικού** και την **διασπορά κυματοδηγού**[177].

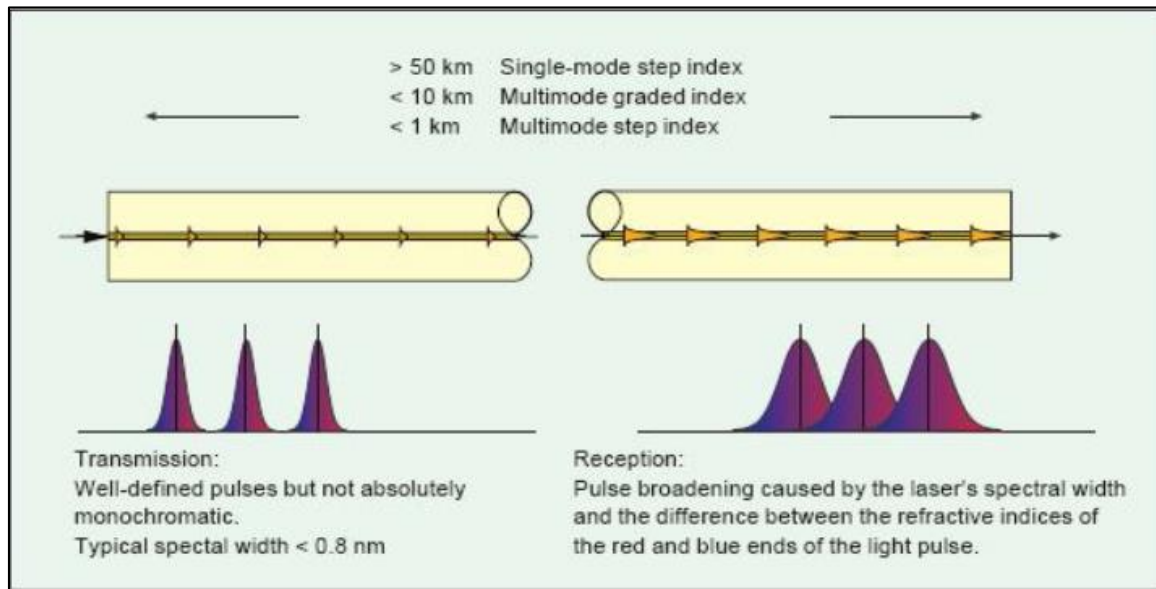
Η διασπορά υλικού και κυματοδηγού τείνουν να αλληλοαναιρούνται σε μήκη κύματος κοντά στα 1310nm , όπου η χρωματική διασπορά θεωρείται μηδέν. Για μικρότερα μήκη κύματος η χρωματική διασπορά είναι αρνητική ενώ για μεγαλύτερα μήκη κύματος είναι θετική. Η διασπορά υλικού μπορεί να διορθωθεί μόνο αν αλλάξουμε τη σύσταση του γυαλιού στον πυρήνα και στον μανδύα της ίνας. Η διασπορά κυματοδηγού οφείλεται στο προφίλ δείκτη διάθλασης του κυματοδηγού και μπορεί να διορθωθεί μόνο αλλάζοντας αυτό το προφίλ.

Ο πρωτεύον λόγος εμφάνισης του φαινομένου της χρωματικής διασποράς είναι η πηγή διάδοσης του φωτός. Τα laser δεν είναι 100% μονοχρωματικά, γεγονός που σημαίνει ότι κάθε παλμός που διαδίδεται περιέχει φως το οποίο ξεφεύγει από το κόκκινο και μπλέ όριο (άνω και κάτω όριο) του φάσματος του συγκεκριμένου μήκους κύματος που χρησιμοποιείται. Ο παράγοντας αυτός καλείται φασματικό εύρος και για εμβέλεια μήκους κύματος 1-1.5μm, μια δίοδος laser έχει φασματικό εύρος 0.1-1nm ενώ για LED 50-100nm. Η χρωματική διασπορά είναι μηδέν ή περίπου μηδέν κοντά στα 1310nm για μία συνηθισμένη μονότροπη οπτική ίνα. Η ελάχιστη εξασθένηση της ίνας λαμβάνει χώρα γύρω στα 1550nm. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην κατασκευή ειδικών ινών, των οποίων το σημείο μηδενισμού της χρωματικής διασποράς έχει μετατοπιστεί σε μεγαλύτερα μήκη κύματος.(**Εικόνα 2.11**)



Εικόνα 2.11

Η χρωματική διασπορά είναι το άθροισμα της διασποράς υλικού και κυματοδηγού.



Εικόνα 2.12

Διεύρυνση παλμού λόγω διασποράς. Σε μονότροπη ίνα εμφανίζονται η χρωματική διασπορά και η διασπορά πόλωσης τρόπου μετάδοσης PMD. Σε πολύτροπη ίνα η modal διασπορά προκαλεί κατά κύριο λόγο τη διεύρυνση του παλμού.

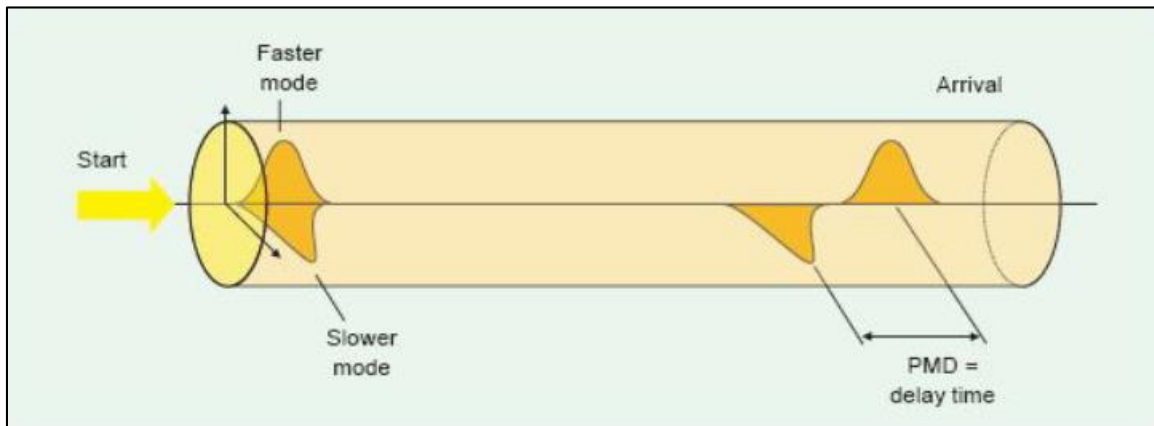
2.6.4.3 Διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης (PMD)

Η μονότροπη διάδοση δεν είναι ποτέ στην πραγματικότητα μονότροπη. Υπάρχουν πάντα δύο ρυθμοί διάδοσης. Όταν το φως εισέρχεται στην ίνα από το laser, τα πεδία αυτά είναι σύγχρονα και κάθετα μεταξύ τους. Κάθε ένα από αυτά τα πεδία έχουν διαφορετική πόλωση.

Η διαφορά μεταξύ των χρόνων άφιξης στο τέρμα της ίνας των δύο αυτών ρυθμών διαφορετική πόλωσης, ονομάζεται **διασπορά πόλωσης του ρυθμού μετάδοσης ή PMD και είναι της τάξης των psec**. Μετρώντας για ένα χιλιόμετρο ο παράγοντας PMD μίας ίνας έχει μονάδα $ps/\sqrt{km}$, αυτό συμβαίνει λόγω του mode coupling. Κάποιες από τις πρώτες οπτικές ίνες και κάποιες ίνες χαμηλής ποιότητας που κατασκευάζονται ακόμα και σήμερα έχουν παράγοντα PMD μέχρι και $6 ps/\sqrt{km}$ ενώ ίνες υψηλής ποιότητας έχουν παράγοντα μικρότερο από 0.2. Οι οργανισμοί τυποποίησης προτείνουν ο παράγοντας PMD μιας ίνας να μην ξεπερνά το 1/10 της περιόδου bit. Αυτό μεταφράζεται σε μέγιστο PMD 40 Ps για συστήματα 2.5 Gbit/s και 10 Gbit/s. Για μια ζεύξη 400km οι τιμές PMD είναι :

- $\frac{40}{\sqrt{400}} = 2 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ για σύστημα 2.5 Gbit/s
- $\frac{10}{\sqrt{400}} = 0.5 \frac{ps}{\sqrt{km}}$ για σύστημα 10 Gbit/s

Η τιμή 0.5 είναι η τυποποιημένη τιμή που απαιτείται για οπτικά καλώδια ζεύξης. Νέες απαιτήσεις για υψηλότερα bit rate 0.1 για σύστημα 50 Gbit/s.



Εικόνα 2.13

Διεύρυνση παλμού PMD

2.6.5 Μη γραμμικά φαινόμενα

Η ισχύς εισόδου μίας ίνας έχει αυξηθεί σημαντικά στις μέρες μας. Η ανακάλυψη των οπτικών ενισχυτών σε συνδυασμό με τη ταυτόχρονη μετάδοση πολλών μηκών κύματος έκανε πιο έντονη την εμφάνιση φαινομένων όπως τα μη γραμμικά φαινόμενα καθώς αυτά εμφανίζονται αποκλειστικά σε υψηλά επίπεδα ισχύος. Τα μη γραμμικά φαινόμενα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- Διεγερόμενη σκέδαση
- Διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης

Τα επίπεδα ισχύος στα οποία εμφανίζονται τα μη γραμμικά φαινόμενα ονομάζονται «κατώτατα όρια» . Δεν θα μελετήσουμε τα φαινόμενα αυτά σε βάθος, δεν είναι μέσα στους στόχους της εργασίας, εκτός από το φαινόμενο μείξης τεσσάρων κυμάτων που αποτελεί το πρώτο φαινόμενο που πρέπει να αντιμετωπίσουμε όταν έχουμε να κάνουμε με πολυπλεξία μήκους κύματος.

2.6.5.1 Διεγερόμενη σκέδαση Brillouin , SBC

Η διεγερόμενη σκέδαση Brillouin είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ ακουστικών κυμάτων και κυμάτων φωτός μέσα στην οπτική ίνα. Κάποιο ποσοστό του διαδιδόμενου φωτός διαδίδεται ξανά προς τα πίσω , με αποτέλεσμα να «κλέβει» ισχύ από το εμπρός διαδιδόμενο φώς. Έτσι μειώνεται η ισχύς που φτάνει στο δέκτη. Η SBC εμφανίζεται για ισχύ εισόδου 6-20 dBm. **[178-179]**

2.6.5.2 Διεγερόμενη σκέδαση Raman, SRS

Η διεγερόμενη σκέδαση Raman SRS **[2]** είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του φωτός και των δονήσεων των μορίων της ίνας. Η SRS σκεδάζει το φώς και προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Η μετάδοση ισχύος προς τα πίσω μπορεί να μηδενιστεί χρησιμοποιώντας ένα οπτικό απομονωτή . Η SRS εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 27 dBm, δηλαδή κοντά στο 1 W. Η διεγερόμενη σκέδαση Raman αποτελεί σημαντικότερο πρόβλημα για την μετάδοση μέσω μιας οπτικής ίνας αλλά εμφανίζεται , όπως προαναφέραμε , αποκλειστικά όταν η ισχύς εισόδου είναι αρκετά υψηλή (περίπου 1 W). Τέτοια πάντως επίπεδα ισχύος στην είσοδο της οπτικής ίνας

θεωρούνται υπερβολικά υψηλά ιδιαίτερα για τις μονότροπες οπτικές ίνες. Γι' αυτό η διεγερόμενη σκέδαση Raman υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν εμφανίζεται σε ένα δίκτυο οπτικών ινών. Σε αντίθεση με την σκέδαση Brillouin που εμφανίζεται για χαμηλότερη ισχύ εισόδου αλλά η επίδραση της δεν είναι τόσο σημαντική. Γενικώς καλό είναι η ισχύς εισόδου να μην ξεπερνάει τα 6 dBm για να αποφεύγονται τα μη γραμμικά φαινόμενα που εμφανίζονται όταν το διαδιδόμενο σήμα έχει υψηλή ισχύ. [178-179]

2.6.5.3 Self-phase modulation , SPM (αυτό-διαμόρφωση φάσης)

Η SPM [2] περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός φωτός στην ίδια του τη φάση. Η ίδια ισχύς του διαδιδόμενου παλμού μπορεί να μεταβάλει τον δείκτη διάθλασης της ίνας μέσα στην οποία διαδίδεται ο παλμός με διαφορετικό τρόπο για τα διάφορα μήκη κύματος. Ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης διαμορφώνει τη φάση του μεταδιδόμενου κύματος. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στην διεύρυνση του φάσματος του διαδιδόμενου παλμού. Αν είναι αρκετά μεγάλη η αυτή η διεύρυνση μπορεί να επικαλυφθούν κανάλια σε συστήματα DWDM. Η SPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm. Η αυτό-διαμόρφωση φάσης είναι αρκετά σύνηθες φαινόμενο στα οπτικά δίκτυα που χρησιμοποιούν μονότροπες ίνες. Πέρα από την φασματική διεύρυνση του παλμού , η αυτό-διαμόρφωση φάσης μπορεί να προκαλέσει και έντονη παραμόρφωση του παλμού. Η επίδραση του φαινομένου της αυτό-διαμόρφωσης γίνεται πιο έντονη καθώς αυξάνεται η ισχύς. Οπότε κρίνεται αναγκαίο κατά την διάδοση ενός παλμού μέσα από την οπτική ίνα τα επίπεδα ισχύος του να μην ξεπερνάνε αυτά , στα οποία αρχίζει να εμφανίζεται το φαινόμενο της αυτό-διαμόρφωσης.

2.6.5.4 Cross-phase modulation, XPM (διασταυρωμένη φάση διαμόρφωσης)

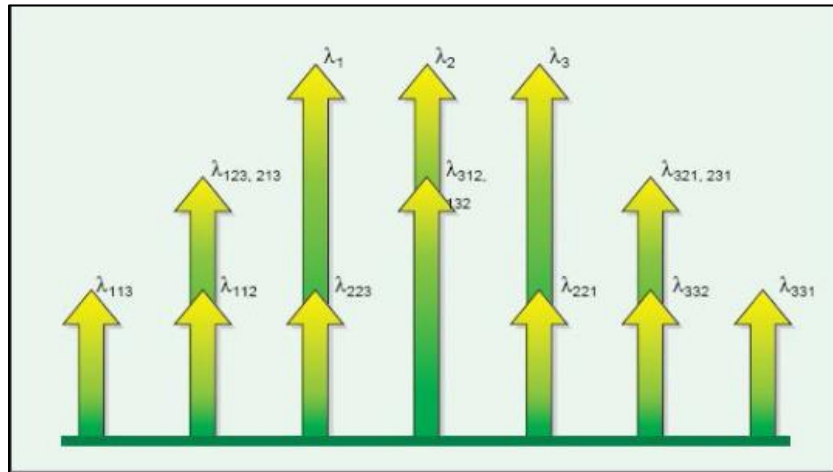
Η XPM [2] σχετίζεται αρκετά με την SPM. Η SPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στον εαυτό του ενώ η XPM περιγράφει την επίδραση που έχει ένας παλμός στους παλμούς άλλων καναλιών. Η SPM μπορεί να εμφανιστεί σε μονοκάναλα και πολυκάναλα συστήματα ενώ η XPM εμφανίζεται μόνο σε πολυκάναλα συστήματα. Η XPM εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 5 dBm ενώ η επίδραση της είναι ίδια με την SPM. Συνήθως το φαινόμενο της ετερο-διαμόρφωσης φάσης εμφανίζεται στις πολύτροπες ίνες όπου κύματα με διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται.

2.6.5.5 Μείξη Τεσσάρων κυμάτων

Ένα από τα πιο σοβαρά μη γραμμικά φαινόμενα είναι η μείξη τεσσάρων κυμάτων. Εμφανίζεται όταν πολλαπλά σήματα μεταδίδονται ταυτόχρονα. Τα σήματα αυτά «αναμειγνύονται» με αποτέλεσμα να παράγουν νέα κανάλια που μπορούν να «κλέψουν» ισχύ από τα ήδη υπάρχοντα κανάλια και να τα επικαλύψουν. Η **Εικ. 2.14** παριστάνει το παραπάνω φαινόμενο για 3 κανάλια που ισαπέχουν μεταξύ του λ_1 , λ_2 και λ_3 . Οι συντελεστές μείξης εμφανίζονται για :

$$\lambda_{xyz} = \lambda_x + \lambda_y - \lambda_z$$

Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα, κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια. Το φαινόμενο της μείξης των τεσσάρων κυμάτων εμφανίζεται για ισχύ εισόδου μεγαλύτερη από 0 dBm.



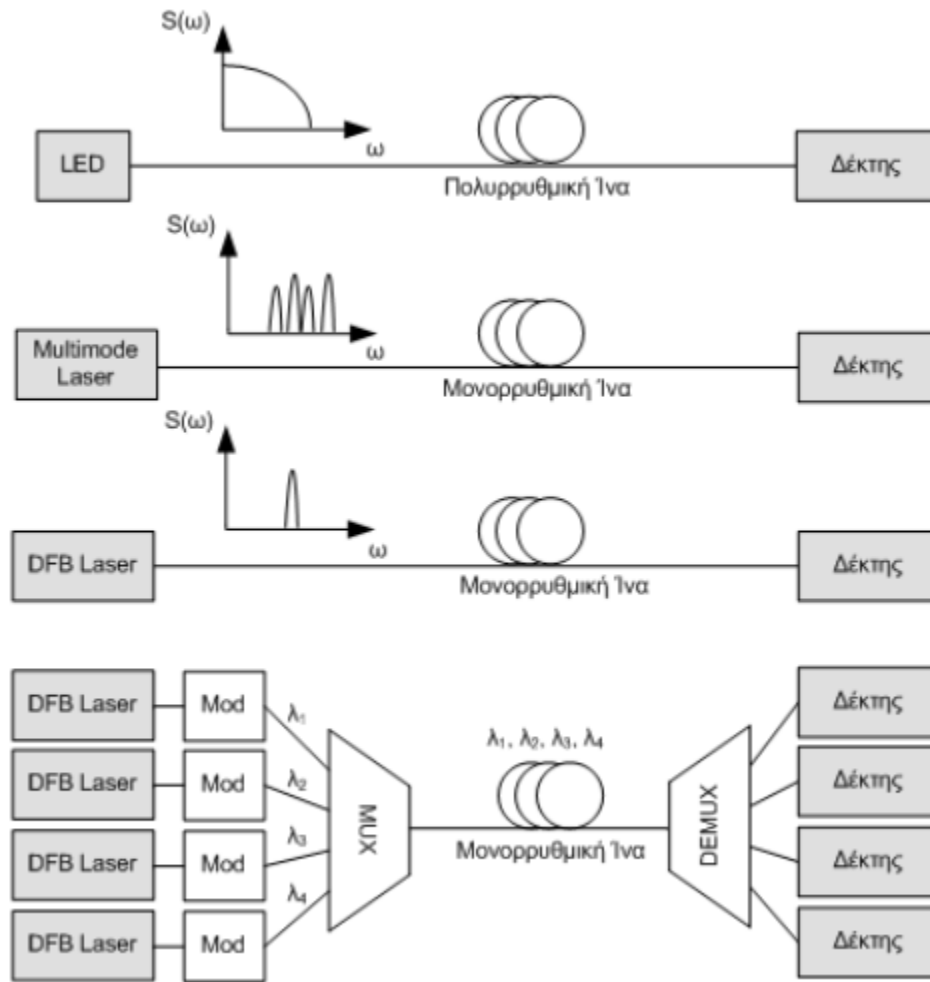
Εικόνα 2.14

Λόγω του ότι τα κανάλια (μήκη κύματος) λ_1 , λ_2 και λ_3 ισαπέχουν μεταξύ τους σε αυτό το παράδειγμα , κάποια από τα σήματα που δημιουργούνται επιδρούν στα ήδη υπάρχοντα κανάλια

Ο αριθμός των καναλιών (κυμάτων) που δημιουργούνται υπολογίζεται από τον τύπο: $\frac{1}{2} (N^3 - N^2)$ όπου N είναι ο αριθμός των αρχικών καναλιών. Για ένα σύστημα με 3 κανάλια, δημιουργούνται 9 κανάλια σύμφωνα με τον τύπο, ενώ για ένα σύστημα με 16 κανάλια δημιουργούνται 1920. Η διαδικασία μείξης τεσσάρων κυμάτων αποτελεί πολύ σοβαρό ζήτημα για το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς , αφού έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την προσπάθεια μας να κρατήσουμε τη διασπορά στο ελάχιστο.

2.7 Οπτικοί Πομποί

Πέραν της εξέλιξης των οπτικών ινών, η αύξηση των ρυθμών μετάδοσης στα οπτικά δίκτυα επιτεύχθηκε μέσω της υλοποίησης κατάλληλων οπτικών πομπών. Οι πρώτοι οπτικοί πομποί που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα **Light Emitting Diodes – LEDs**, τα οποία παρήγαγαν οπτικούς παλμούς μέσω της διαμόρφωσης του ρεύματος τους. Βασικό μειονέκτημα των LEDs αποτελεί η χαμηλή οπτική ισχύς που παράγουν, οπότε σύντομα αντικαταστάθηκαν από διοδικά lasers. Τα πρώτα διοδικά lasers έδιναν μεγαλύτερη οπτική ισχύ από τα LEDs , αλλά παρήγαγαν παλμούς με μεγάλο φασματικό εύρος, το οποίο σε συνδυασμό με την χρωματική διασπορά της ίνας προκαλούσε σημαντική διεύρυνση στους οπτικούς παλμούς. Η εξέλιξη των διοδικών lasers καταμετρήμενης ανάδρασης (**Distributed Feedback Lasers- DFBs**) , επέτρεψε τη μείωση του φασματικού τους εύρους των παραγόμενων οπτικών παλμών, και συνεπώς ελαχιστοποίησε την επίδραση της χρωματικής διασποράς. Ο ρυθμός μετάδοσης όμως , που είναι δυνατόν να επιτευχθεί σε DFBs με διαμόρφωση του ρεύματος τους περιορίζεται σε μερικά Gbps. Η εξέλιξη των οπτικών πομπών στην σημερινή τους μορφή έγινε με διαχωρισμό της λειτουργίας παραγωγής του οπτικού σήματος από τη λειτουργία διαμόρφωσής του. Στους σημερινούς πομπούς , τα DFBs αποτελούν τους ταλαντωτές ακριβείας για την παραγωγή του οπτικού σήματος, ενώ η διαμόρφωση του οπτικού σήματος από τα ηλεκτρικά δεδομένα γίνεται σε εξωτερικούς ηλεκτρο-οπτικούς διαμορφωτές , οι οποίοι έχουν την δυνατότητα λειτουργίας σε ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των 10-40 Gbps.



Εικόνα 2.15

2.8 Οπτικοί Ενισχυτές Ίνας Ερβίου & Σπάνιων Γαιών

Η Οπτική ίνα , όπως και κάθε μέσο διάδοσης, παρουσιάζει απώλειες οι οποίες συντελούν στην εξασθένηση του μεταδιδόμενου σήματος. Αν υποθέσουμε ότι ο οπτικός πομπός στέλνει ισχύ P_t και ο οπτικός δέκτης λαμβάνει ισχύ P_r , τότε η εξασθένηση ορίζεται ως

$$\gamma = \frac{P_r}{P_t}$$

$$\gamma_{dB} = 10 \log_{10}(\gamma) = 10 \log_{10}(P_r) - 10 \log_{10}(P_t).$$

Η εξασθένηση των οπτικών ινών στην περιοχή των 1.55μm ισούται με 0.18dB/km. Σημειώνεται ότι η οπτική ισχύς μετράται σε W ή mW . Συνήθως , όμως χρησιμοποιούνται εναλλακτικές μονάδες μέτρησης όπως τα dBW και dBm που ορίζονται ως

$$P_{dBW} = 10 \log_{10}(P_w), P_{dBm} = 10 \log_{10}(P_{mW})$$

Για παράδειγμα 1 mW ισούται με 0 dBm και -30 dBW. Η εξασθένηση των οπτικών ινών αντισταθμίστηκε με την υλοποίηση οπτικών ενισχυτών ίνας με προσμίξεις σπάνιων γαιών. Ανάλογα με την σπάνια γαία η οποία προσμειγνύεται στην ίνα είναι δυνατόν να ενισχυθεί οπτικό

σήμα το οποίο ανήκει στην S-, C-, ή L-Band. Συγκεκριμένο παράδειγμα αποτελεί το Έρβιο , το οποίο έχει φάσμα εκπομπής στην περιοχή των 1.55 μm και δίνει την δυνατότητα ενίσχυσης στην C-Band. Οι ενισχυτές σπάνιων γαιών δίνουν την δυνατότητα ταυτόχρονης ενίσχυσης πολλαπλών καναλιών , γεγονός το οποίο συντέλεσε καίρια στην ανάπτυξη συστημάτων πολυπλεγμένων κατά WDM (Wavelength Division Modulation) . Μέχρι αυτήν την στιγμή , έχουν υλοποιηθεί WDM συστήματα με συνολικό ρυθμό μετάδοσης που υπερβαίνει το 1 Tbps και σε αποστάσεις οι οποίες προσεγγίζουν μερικές χιλιάδες χιλιόμετρα. Σε επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε περισσότερο με την πολυπλεξία σε συνδυασμό με οπτικές συσκευές.[2][6]

3 Πηγές Φωτός & Ανιχνευτές

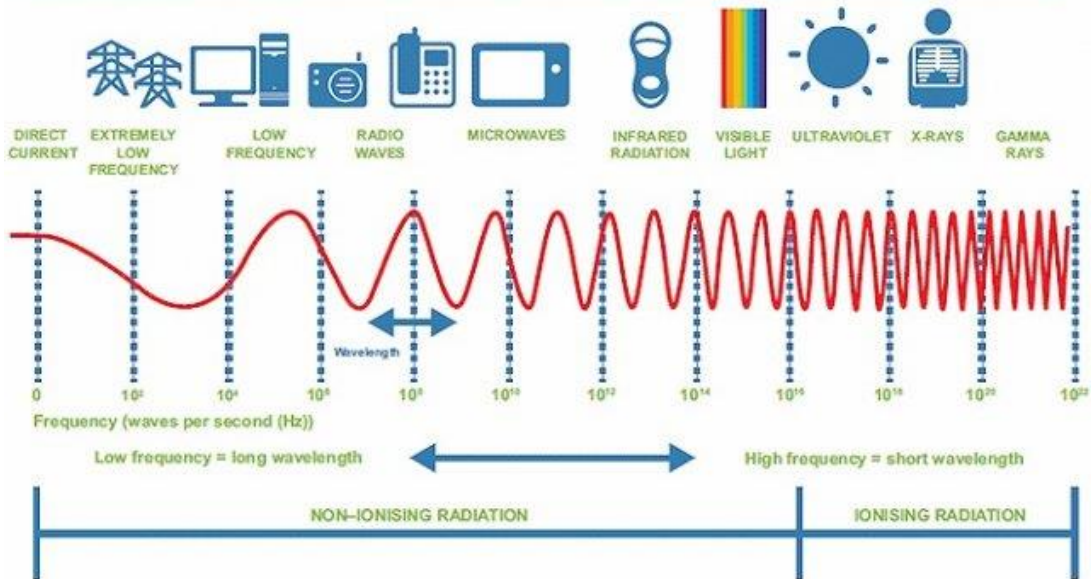
Στο κεφάλαιο αυτό , θα εξετάσουμε τις πηγές οπτικής εκπομπής τις συσκευές φωτοανίχνευσης που χρησιμοποιούνται σε οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Εισαγωγικά ,δίνεται μια γενική παρουσίαση των laser και ειδικότερα των διόδων laser και των LED's. Παραθέτονται επίσης ημιαγώγιμα υλικά και η λειτουργία τους και περιγράφεται η ποικιλία των οπτο-ηλεκτρικών εξαρτημάτων (OE components) που χρησιμοποιούνται σαν πηγές φωτός σε πληροφοριακά συστήματα οπτικών ινών. Στη συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά, στους κυριότερους τύπους οπτικών ανιχνευτών και στους παράγοντες που επηρεάζουν την ανίχνευση φωτός σε συστήματα οπτικών ινών.

3.1 LASER και Αρχή λειτουργίας

Ο όρος λέιζερ προέρχεται από το αγγλικό ακρωνύμιο Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που αποδίδεται στα ελληνικά ως ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας και καλύπτει τόσο τις συσκευές που την παράγουν όσο και την αντίστοιχη ακτινοβολία.

Τα laser είναι μία πηγή φωτός όπως ένα φακός, μια ηλεκτρική λάμπα ή ο ήλιος. Προς το παρόν το laser παράγει ακτινοβολία σε μια περιοχή συχνοτήτων από το υπέρυθρο μέχρι και το υψηλό υπεριώδες με σοβαρή πιθανότητα πώς σύντομα θα επεκταθεί και στην περιοχή συχνοτήτων των ακτίνων Χ.

Electromagnetic spectrum



Εικόνα 3 Ηλεκτρομαγνητικό Φάσμα

Σαν πηγή ακτινοβολίας το laser έχει 4 ιδιότητες που το ξεχωρίζουν από τις άλλες γνωστές πηγές και που δημιουργούν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για τις πολλές και ποικίλες εφαρμογές του. Οι ιδιότητες αυτές είναι :

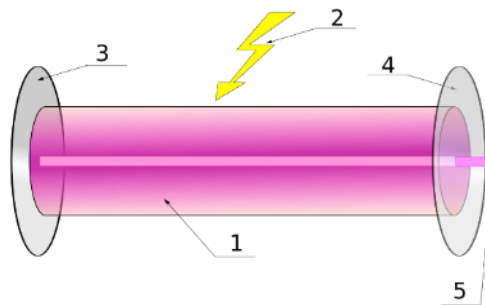
- **Μεγάλη ένταση** (Πολλή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και ανά περιοχή συχνότητων).
- **Μονοχρωματικότητα** (Η ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε μία στενή περιοχή συχνότητων).
- **Κατευθυντικότητα** (Η δέσμη αποκλίνει πολύ λίγο).
- **Συμφωνία φάσης** (Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που αποτελούν τη δέσμη ακολουθούν το ένα το άλλο με τάξη).

Η λειτουργία των **laser** ερμηνεύεται από την θεωρία της κβαντικής μηχανικής και της θερμοδυναμικής. Πολλά υλικά έχουν βρεθεί ότι έχουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να αποτελέσουν ενεργό υλικό των laser , με αποτέλεσμα την δημιουργία πολλών τύπων laser με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο εύρος εφαρμογών.

Η εφεύρεση των laser στηρίχθηκε στην κατασκευή των maser στην δεκαετία του 1950. Το πρώτο laser κατασκευάστηκε το 1960, από τότε όμως τα laser βρήκαν εφαρμογή στις θετικές επιστήμες, στην βιομηχανία, στην ιατρική και στην ηλεκτρονική.

Τα **laser** αποτελούνται από το ενεργό υλικό, και την οπτική κοιλότητα. Το ενεργό υλικό μετατρέπει την εξωτερική ενέργεια σε δέσμη φωτός. Συνήθως είναι υλικό με συγκεκριμένο μέγεθος , σύσταση, καθαρότητα και μορφή, που παράγει φως μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής, η οποία αποτελεί κβαντομηχανική διαδικασία που προτάθηκε από τον Αλβέρτο Αϊνστάιν για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το ενεργό υλικό αντλείται από μία εξωτερική πηγή ενέργειας. Τέτοιες πηγές μπορεί να είναι ηλεκτρικές ή φωτεινές, όπως λυχνία έκλαμψης (flash lamp) ή κάποια άλλη πηγή laser. Η ενέργεια που απορροφάται, αποτίθεται στα σωματίδια του ενεργού υλικού έτσι, ώστε αυτά να οδηγηθούν σε μία διεγερμένη κβαντική κατάσταση. Όταν ο

αριθμός των σωματιδίων που βρίσκονται στην διεγερμένη κατάσταση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των ατόμων που βρίσκεται στην βασική κατάσταση, επιτυγχάνεται αντιστροφή πληθυσμού. Έτσι λοιπόν, μια δέσμη φωτός που περνάει μέσα από το υλικό έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσει σε εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από ότι σε εξαναγκασμένη εκπομπή απορρόφηση, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ενίσχυση της δέσμης. Ένα διεγερμένο ενεργό υλικό μπορεί να λειτουργήσει επίσης και σαν οπτικός ενισχυτής.



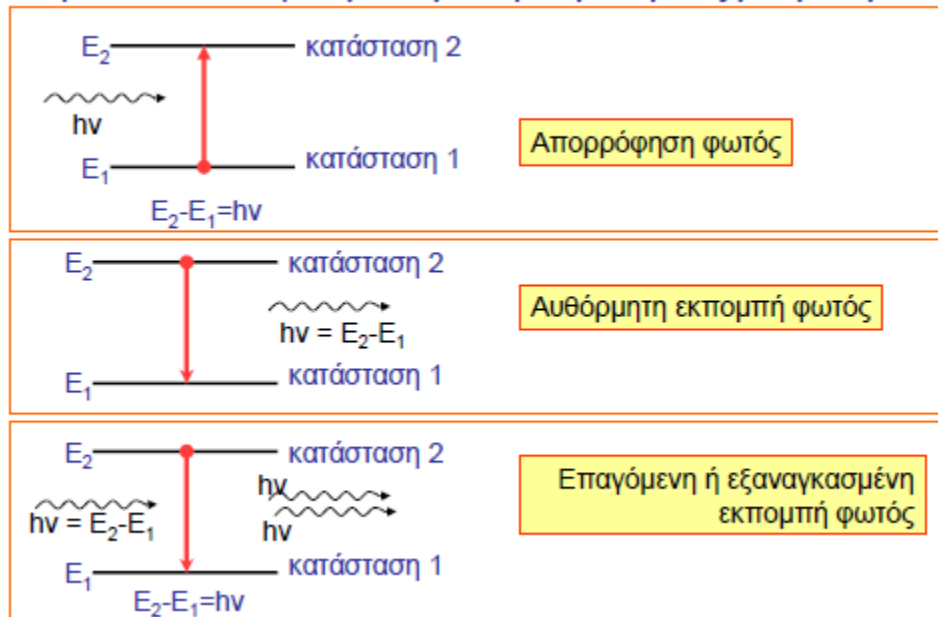
Εικόνα 3.1. Αρχή λειτουργίας του Laser:

1. Ενεργό υλικό του Laser
2. Προσφερόμενη ενέργεια άντλησης
3. Υψηλής ανακλαστικότητας κάτοπτρο
4. Διάταξη εξόδου δέσμης
5. Δέσμη Laser

Τα χαρακτηριστικά του φωτός που παράγονται από εξαναγκασμένη εκπομπή είναι παρόμοια με αυτά του αρχικού φωτός, ως προς το μήκος κύματος, την πόλωση και την φάση. Έτσι λοιπόν, το φως του Laser που παράγεται είναι σύμφωνο, ενώ η σταθερότητα της πόλωσης και η μονοχρωματικότητα εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της οπτικής κοιλότητας.

Η οπτική κοιλότητα αποτελεί παράδειγμα κοιλότητας ταλάντωσης και περιέχει μία σύμφωνη δέσμη φωτός μεταξύ δύο ανακλαστικών επιφανειών, έτσι ώστε κάθε φωτόνιο να περνά τουλάχιστον δύο φορές από το ενεργό υλικό προτού φύγει από την οπή εξόδου της πηγής laser ή να χαθεί λόγω απορρόφησης ή περίθλασης. Αν η ενίσχυση που προέρχεται από την επαναλαμβανόμενη διέλευση του φωτός μέσα από το ενεργό υλικό, είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες της κοιλότητας, τότε εμφανίζεται εκθετική αύξηση της ισχύς του φωτός μέσα στην κοιλότητα. Όμως, κάθε εξαναγκασμένη εκπομπή αναγκάζει ένα σωματίδιο να επιστρέψει από την διεγερμένη κατάσταση στην βασική, μειώνοντας έτσι την ικανότητα του ενεργού υλικού για επιπλέον ενίσχυση. Όταν αυτό το φαινόμενο μεγιστοποιείται τότε λέμε ότι η ενίσχυση έχει φτάσει σε κορεσμό. Η συνθήκη όπου η ισχύς άντλησης γίνεται περίπου ίση με την τιμή κορεσμού της ενίσχυσης και με τις απώλειες της κοιλότητας οδηγεί σε κατάσταση ισορροπίας της ισχύς του laser μέσα στην κοιλότητα. Αυτή η τιμή ισορροπίας καθορίζει και το σημείο λειτουργίας του laser. Αν ισχύς άντλησης που απαιτείται για την παραγωγή laser ονομάζεται κατώφλι laser. Το ενεργό υλικό ενισχύει οποιοδήποτε φωτόνιο περάσει μέσα από αυτό, αλλά μόνο αυτά που είναι ευθυγραμμισμένα με την κοιλότητα μπορεί να περάσουν περισσότερο από μία φορά μέσα από το ενεργό υλικό για να επιτευχθεί σημαντική ενίσχυση.[1][2]

Θεωρία του Einstein για την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη



Εικόνα 3.2

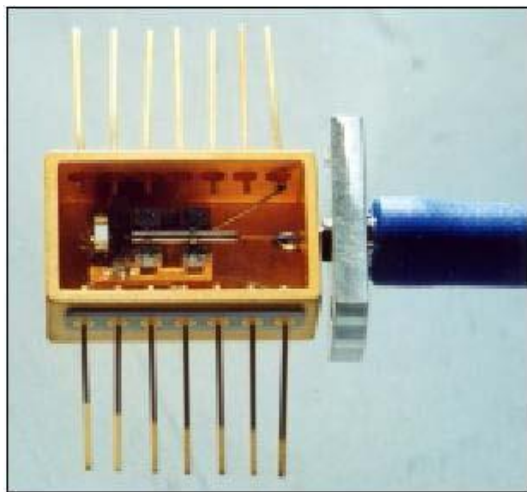
Αν η δέσμη δημιουργείται και διαδίδεται σε ελεύθερο περιβάλλον και όχι μέσα σε κυματοηγούς (όπως στην περίπτωση των οπτικών ινών), τότε η ένταση του φωτός εμφανίζεται κανονική (Gaussian) κατανομή, κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης της. Η δέσμη του Laser είναι σχεδόν απόλυτα ευθυγραμμισμένη, δηλαδή δεν αποκλίνει. Παρόλα αυτά, τέλεια ευθυγραμμισμένη δέσμη δεν μπορεί να υπάρξει λόγω περίθλασης. Για παράδειγμα, μια δέσμη με αρχική διάμετρο 2mm, που δημιουργείται από ένα μικρό εργαστηριακό Laser (όπως ένα Laser-Neon), αποκλίνει αποκτώντας διάμετρο 1.6 χιλιόμετρα, όταν διανύσει απόσταση ίση με αυτή της γής-σελήνης.

3.1.1 Δίοδοι Laser

Η πρώτη δίοδος laser βασισμένη στην τεχνολογία των ημιαγωγών παρουσιάστηκε το 1962, όμως στην δεκαετία του 80 αυτός ο τύπος laser χρησιμοποιήθηκε μαζικά. Η αλματώδης εξέλιξη στην τεχνολογία laser στηρίχθηκε σε 2 βασικά στοιχεία: τη διαθεσιμότητα σε νέα τεχνολογία ώστε να παράγονται καλύτερα, μικρότερα και φθηνότερα ημιαγωγικά lasers και τον μεγάλο αριθμό των τομέων εφαρμογής τους τα τελευταία χρόνια.

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των ημιαγωγών ήταν δραματική και κατέληξε στη δημιουργία μικρότερων αλλά πιο περίπλοκων εξαρτημάτων με εμφανώς βελτιωμένη αξιοπιστία και αυξημένη διάρκεια ζωής. Έχει καταστεί δυνατή η ανάπτυξη διόδων Laser για μεγαλύτερα ή μικρότερα μήκη κύματος, μεγαλύτερη ισχύ εξόδου, καλύτερα ελεγχόμενη φωτεινή εκπομπή και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Παράλληλα με αυτή την εξέλιξη, υπήρξε δραματική αύξηση στις περιοχές εφαρμογής των διόδων laser. Οι τηλεπικοινωνίες και οι συσκευές οπτικής αποθήκευσης και αναπαραγωγής (CD players) είναι πιθανώς οι γνωστότερες περιοχές εφαρμογής των διόδων laser στις οποίες έχουμε ωφεληθεί σημαντικά.

Οι **δίοδοι laser** έχουν πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενες με τα άλλα ημιαγωγικά υλικά. Είναι μικρές, αποτελεσματικές, φθηνές και ενδείκνυται για μαζική παραγωγή. Εξαιρώντας μερικά χαρακτηριστικά υπερέχουν σαφώς έναντι των «προκατόχων τους» (λαμπτήρες, ρελέ). Τα μικρότερα, fully mounted lasers με φωτοδίοδο, ψήκτρα και πλαίσιο προστασίας ακτινοβολίας καταλαμβάνουν χώρο 50 mm³. Ανεξάρτητα από την μικροσκοπική δομή τους παρέχουν συνεχή ισχύ εξόδου 100mW. Η αποτελεσματικότητα των lasers ημιαγωγού φτάνει το 20% σε σύγκριση με τα lasers αερίου τύπου He-Ne, τα οποία έχουν απόδοση όχι περισσότερο από 2 %. Επάνω από το όριο εκπομπής φωτός, σχεδόν το 80% της ισχύος εισόδου μετατρέπεται σε φώς.



Εικόνα 3.3

Εσωτερική άποψη σύγχρονου ημιαγωγού laser για χρήση σε τυπωμένα κυκλώματα.

Τα ημιαγωγικά εξαρτήματα μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε ραγδαίες αλλαγές του ρεύματος οδήγησης. Η ακτίνα του laser μπορεί λοιπόν να διαμορφωθεί με την χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων. Αυτό δεν είναι δυνατό με τα lasers αερίου χωρίς τη χρήση ολοκληρωμένου, περιφερειακού εξοπλισμού.

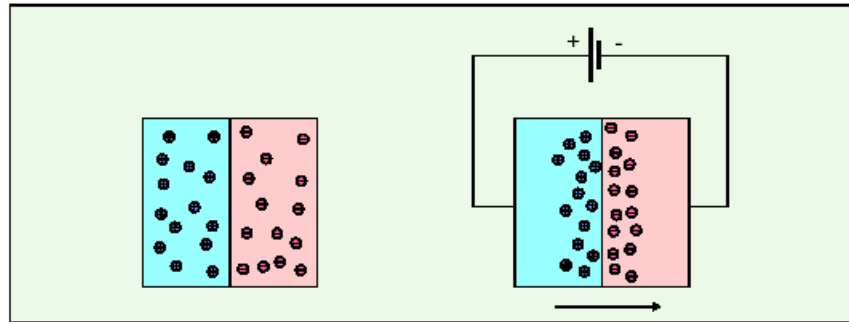
Οι δίοδοι **laser** έχουν πολλές ομοιότητες με τα LED's με τον ίδιο τρόπο που υπάρχουν πολλές ομοιότητες ανάμεσα στα lasers αερίου και τους λαμπτήρες. Και οι LD και τα LEDs κατασκευάζονται από τα άτομα των ομάδων 13-15 του περιοδικού πίνακα (γάλλιο, αρσενικό, φωσφορούχο ίνδιο , αρσενιούχο ίνδιο κ.α.) . Τα πιο σημαντικά στοιχεία είναι το αρσενιούχο γάλλιο και τα παράγωγα του, τα οποία εκπέμπουν φώς στα μήκη κύματος 660-900nm , και το φωσφορούχο ίνδιο και τα παράγωγα του που εκπέμπουν φώς σε μήκη κύματος 1300-1550nm . Η τελευταία περιοχή μηκών κύματος είναι και η ιδανική για Lasers που χρησιμοποιούνται στις οπτικές τηλεπικοινωνίες. Το ορατό φώς κυμαίνεται ανάμεσα σε 390-760nm.

3.1.2 Σχεδιασμός διόδου LASER

Από την στιγμή που το ποσό της αυθόρμητης και της εξαναγκασμένης ακτινοβολίας εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων ηλεκτρονίων και οπών σε κάθε ενεργειακή στάθμη, πρέπει να εισάγουμε κάποιο μέσο που να επηρεάζει τους πληθυσμούς αυτούς. Στη θερμική ισορροπία, υπάρχουν περισσότερα ηλεκτρόνια στις χαμηλότερες παρά στις υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Στην περίπτωση αυτή, ένα εισερχόμενο φωτόνιο είναι πολύ πιθανό να

απορροφηθεί. Η δημιουργία περισσότερων διεγερμένων ζευγών ηλεκτρονίων/οπών σε σχέση με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μπορούν ακόμη να διεγερθούν, χρειάζεται μια διαδικασία που ονομάζεται **αναστροφή πληθυσμών**, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τον «εμβολιασμό» μιας ακτίνας ηλεκτρονίων ή με οπτική διέγερση.

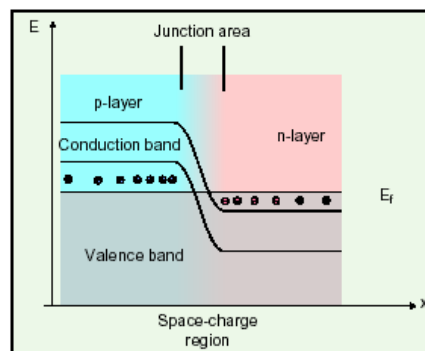
Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ημιαγωγών είναι η δυνατότητα που έχουμε να προκαλέσουμε τη δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών με την εισαγωγή φορέων μειονότητας σε μια επαφή P-n. Αυτή είναι μια πολύ απλή και αποτελεσματική μέθοδος διέγερσης.



Εικόνα 3.4

Στην ορθή πόλωση παρατηρείται συγκέντρωση ηλεκτρονίων και οπών στην επαφή ανάμεσα στους τομείς p- και n-

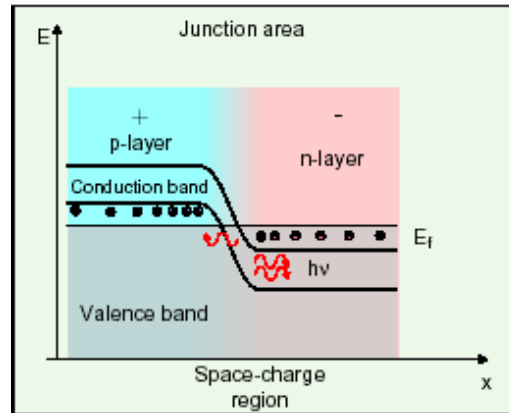
Χωρίς την ύπαρξη ορθής πόλωσης, το επίπεδο Fermi (E_f) είναι το ίδιο μέσα στο υλικό σαν συνέπεια της κατάστασης ισορροπίας που βρίσκεται ο ημιαγωγός. Χάρη στην ανισορροπία που δημιουργείται από την πληθώρα ηλεκτρονίων στην περιοχή n- και την πληθώρα οπών στην περιοχή p-, εμφανίζεται ηλεκτρικό πεδίο γύρω από την επαφή p-n. Το ηλεκτρικό αυτό πεδίο δημιουργείται από τους ιονισμένους δότες και δέκτες στον κρύσταλλο όταν τα ηλεκτρόνια τους και οι οπές τους ανασυνδέονται. Η τάση που αναπτύσσεται είναι ακριβώς αυτή που χρειάζεται ώστε να αποφευχθεί η ροή ρεύματος από την περιοχή p- στην περιοχή n-.



Εικόνα 3.5

Το ενεργειακό διάγραμμα για μία επαφή P-n με βαριά νόθευση των περιοχών p- και n-

Εάν τώρα μια εξωτερική τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της διόδου μπορεί είτε να προστεθεί στη ήδη υπάρχουσα εσωτερική τάση (αναστροφή πόλωση) είτε να αφαιρεθεί από την εσωτερική αυτή τάση (ορθή πόλωση) . Στην περίπτωση που η εξωτερική τάση δίνει ορθή πόλωση , το «εμπόδιο» που παρουσιάζει το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο στον ημιαγωγό αρχίζει να υποχωρεί και εμφανίζεται ροή ρεύματος.



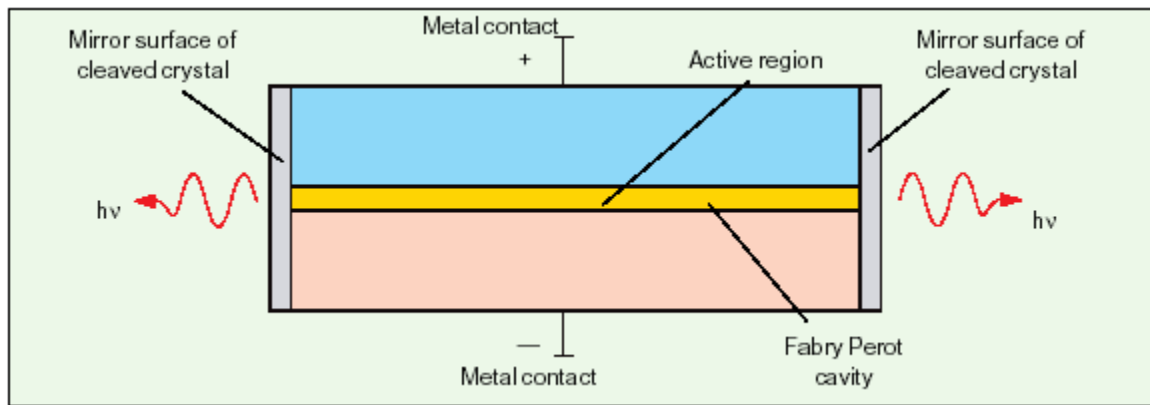
Εικόνα 3.6

Ορθά πολωμένη επαφή p-n. Το ρεύμα προκαλεί την επανασύνδεση μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων – οπών στην περιοχή επαφής. Ο πλεονασμός ενέργειας εκπέμπεται με τη μορφή κβάντων φωτός (φωτονίων).

Στην περίπτωση αυτή , ηλεκτρόνια από την περιοχή n και οπές από την περιοχή P συναντώνται σε μεγάλους αριθμούς γύρω από την επαφή p-n , όπου και ανασυνδέονται . Η επανασύνδεση δημιουργεί αυτόματα εκπομπή από την περιοχή επαφής (με την επιλογή βέβαια των κατάλληλων υλικών). Με την βαριά νόθευση των περιοχών p και n μπορούμε επίσης να επιτύχουμε αναστροφή πληθυσμών, δηλαδή την ύπαρξη περισσότερων ασύνδετων ζευγών ηλεκτρονίων – οπών σε σχέση με τα συνδεδεμένα ζεύγη. Υπό αυτές τις συνθήκες μπορούμε να λάβουμε εξαναγκασμένη εκπομπή και, τελικά, οπτικό κέρδος. Τοποθετώντας λοιπόν αυτήν την επαφή μέσα σε μία «οπτική κοιλότητα» προκαλείται φαινόμενο feedback της παραγόμενης ακτινοβολίας, δηλαδή δημιουργία ενός ταλαντωτή (laser) .

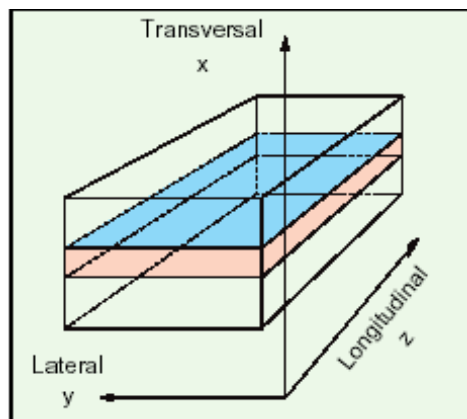
3.1.3 Fabry – Perot Laser

Για την βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας διόδου laser για όσο το δυνατόν περισσότερες εφαρμογές , αναπτύχθηκε μια ποικιλία διαφορετικών lasers. Οι απλούστερες διόδοι laser καλούνται «broadstripe Fabry-Perot». Ο χαρακτηρισμός broadstripe προκύπτει από το σχετικά μεγάλο πλάτος (>10μm) της μεταλλικής επαφής κατά μήκος του laser, Fabry-Perot είναι το όνομα της οπτικής κοιλότητας.



Εικόνα 3.7 Laser απλούστερης μορφής. Αυτός ο τύπος Laser (Fabry-Perot) έχει μόνο μία επαφή p-n. Για το λόγο αυτό καλείται και Laser ομοεπαφής.

Η διαφορά του δείκτη διάθλασης ανάμεσα στον αέρα και στον ημιαγωγό προκαλεί μερική ανάκλαση που επιτρέπει σε ένα μέρος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας να εξέρχεται του laser και σε ένα άλλο μέρος της να ανακλάται και να χρησιμεύει ως ανατροφοδότηση. Αυτά τα απλά lasers συνήθως δίνουν μη γραμμική έξοδο (όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της ισχύος), λόγω της αδυναμίας ελέγχου της οπτικής κοιλότητας τους και ταλαντώνονται σε πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα.



Καθορισμός των κατευθύνσεων σε μία διάταξη laser

3.2 Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι (Light Emitting Diodes)

Ένα άλλο πολύ σημαντικό εξάρτημα στις οπτικές επικοινωνίες είναι η φωτοεκπέμπουσα δίοδος (LED) . Το LED διαφέρει από τη laser δίοδο κυρίως στο ότι μέσα σε ένα LED δεν παρουσιάζεται εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός. Το LED λειτουργεί με βάση την αρχή της αυθόρμητης εκπομπής. Για το λόγο αυτό, το LED παρουσιάζει ορισμένα μειονεκτήματα σε σύγκριση με την δίοδο laser:

- Εισέρχεται λιγότερη ισχύς στην ίνα
- Σχετικά μικρό, ικανό να διαμορφωθεί εύρος ζώνης (< 50 Mhz) , αν και ορισμένα LEDs μπορούν να φτάσουν τα 150MHz
- Ευρύτερο φασματικό πλάτος

Αυτά τα μειονεκτήματα μπορεί να παρουσιάζουν το LED ως μια χειρότερη λύση από την δίοδο laser. Ωστόσο, το LED έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη δίοδο laser και σε πολλές περιπτώσεις, προτιμάται στα οπτικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα. Τα πλεονεκτήματα είναι :

- Απλούστερη κατασκευή (δεν χρειάζονται επιφάνειες ανάκλασης, γραμμική γεωμετρική σχεδίαση)
- Φθηνότερα . Παρατηρείται μεγάλη μείωση του κόστους παραγωγής με τη χρήση του LED και των αντίστοιχων κυκλωμάτων οδήγησης
- Αξιοπιστία. Ένα LED δεν «γερνά» τόσο γρήγορα όσο η δίοδος Laser
- Μικρότερη ευαισθησία στη θερμοκρασία. Η ένταση του φωτός σχετικά με τα κυκλώματα οδήγησης επηρεάζεται λιγότερο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σύγκριση με την ένταση του φωτός μιας δόδου laser
- Γραμμικότητα. Ένα laser μπορεί να κατασκευαστεί γραμμικό αρκετά, γεγονός που καθιστά τα LEDs καταλληλότερα για αναλογική διαμόρφωση.

Τα παραπάνω πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα εξηγούν και την χρήση των LEDs κυρίως σε τοπικά δίκτυα (LANs) , σε εφαρμογές υπολογιστών και στους τηλεοπτικούς δέκτες. Το σύστημα FDDI (Fiber Distributed Data Interface) αποτελεί ρυθμιστικό σύστημα που έχει αναπτυχθεί αποκλειστικά για τις οπτικές ίνες και είναι ένα κλασικό παράδειγμα χρήσης των LEDs για οπτική εκπομπή.

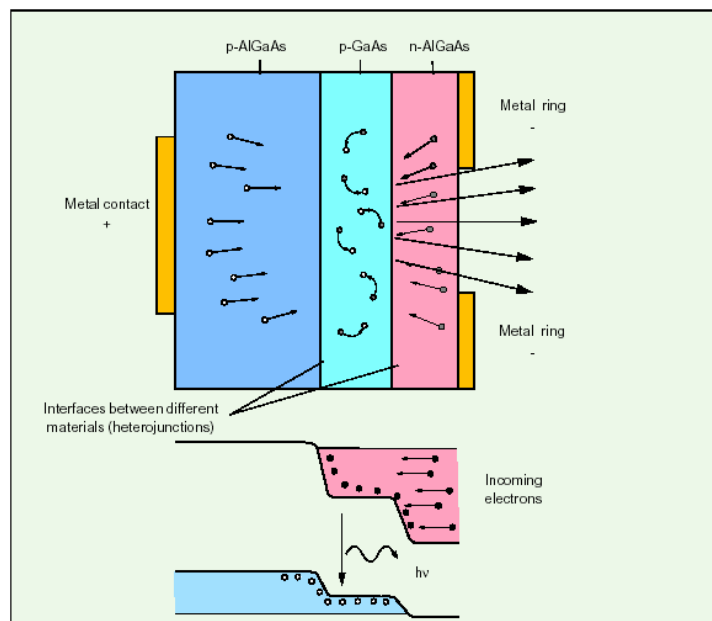
Τα **LEDs** κατασκευάζονται από τον ίδιο συνδυασμό υλικών με τις δίοδους laser. Ένα LED που κατασκευάζεται από GaAs / AlGaAs είναι ιδανικό για μικρότερα μήκη κύματος μέχρι 870nm. Για μήκη κύματος από 1310 nm έως 1550nm χρησιμοποιείται συνδυασμός InGaAs και InP.

3.2.1 Διτλό LED ετεροεπαφής (Dual Junction led)

Η λειτουργία του DH (Double Heterostructure) LED και η δομή του περιγράφονται στην εικόνα που ακολουθεί :

Εικόνα 3.8 DH LED

Στο πάνω μέρος της αριστερής φωτογραφίας φαίνονται τα διαφορετικά στρώματα και στο κάτω μέρος της φωτογραφίας φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα LED



Τα LEDs με δομή DH είναι κοινά όταν απαιτείται μεγάλη απόδοση, περισσότερη από το συμφασικό φως. Το μειονέκτημα είναι ότι το ποσοστό του φωτός που εισέρχεται στην ίνα είναι σχετικά μικρό.

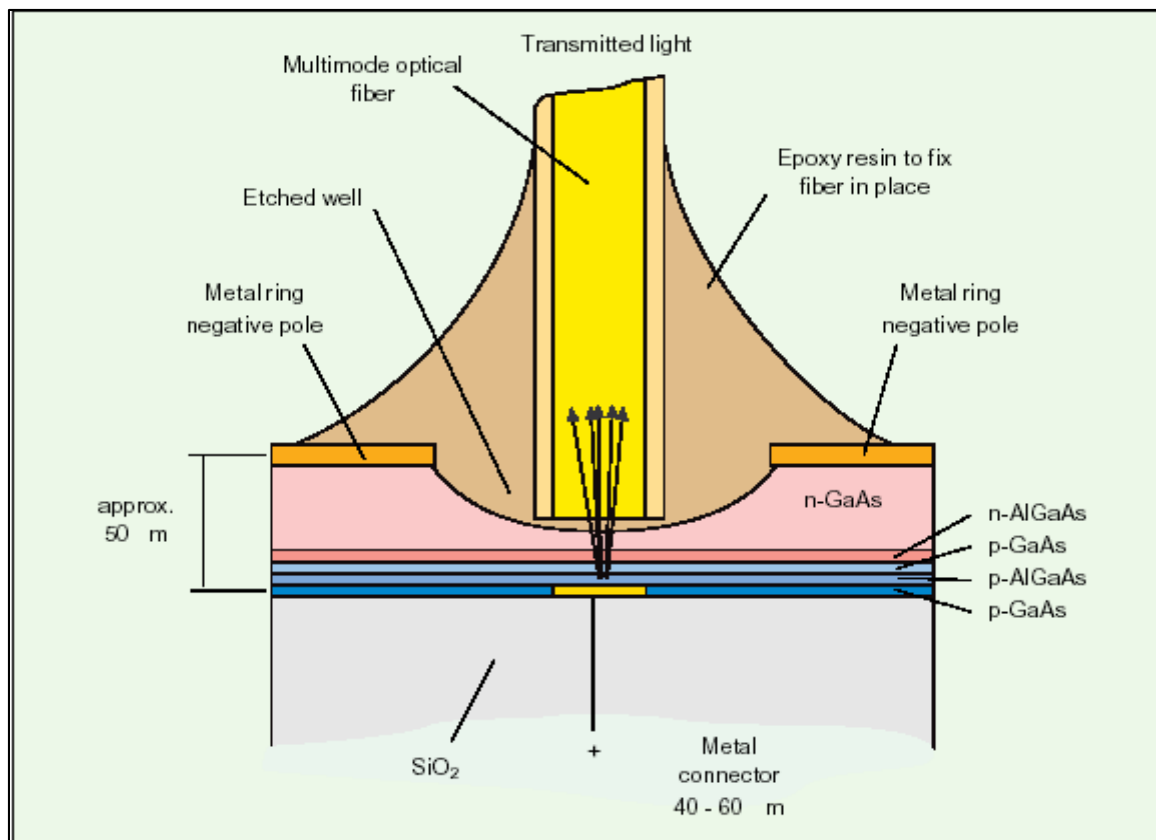
3.2.2 Διαφορετικοί τύποι LED

Υπάρχουν 4 βασικοί τύποι LED από τους οποίους οι πρώτοι 2 χρησιμοποιούνται σε συστήματα οπτικών επικοινωνιών και οι επόμενοι 2 σε συσκευές συναγερμών, σε remote controls τηλεοράσεων, αριθμομηχανές κλπ.

- LED τύπου Burrus
- Ακμολυροδοτούτο LED (edge emitting)
- Επίπεδο LED (planar)
- Θολωτό LED (dome)

LED τύπου Burrus

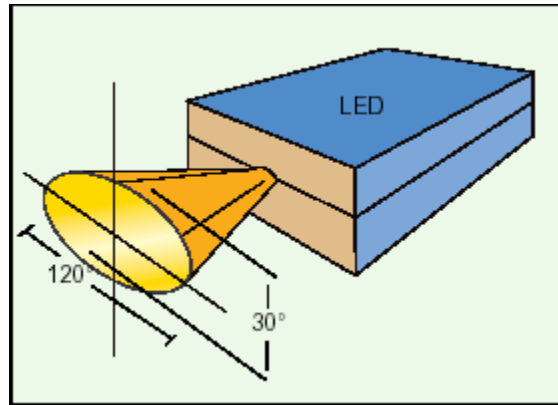
Το LED της παρακάτω εικόνας έχει κατασκευαστεί για μήκη κύματος 800-900nm. Η εσωτερική απορρόφηση ελαχιστοποιείται χάρη στο μεγάλο ενεργειακό διάκενο που υπάρχει στα γειτονικά στρώματα της ενεργού περιοχής. Το πλάτος του «αυλακιού» είναι σύμφωνο με τη διάμετρο της ίνας ώστε να διασφαλίζεται καλύτερη εισαγωγή του φωτός στην ίνα. Η ιδανική εισαγωγή φωτός επιτυγχάνεται όταν η ακτινοβολούσα επιφάνεια ανταποκρίνεται στην επιφάνεια κυματοδότησης του πυρήνα της ίνας.



Εικόνα 3.8 LED τύπου Burrus με κατάλληλο σχήμα αύλακας για το περιορισμό της απορρόφησης στο στρώμα τύπου n του GaAs.

Ακμοφυροδότητο LED (edge emitting)

Τα LEDs αυτού του τύπου κατασκευάζονται με παρόμοιο τρόπο με τα κοινά stripe lasers. Σε αυτά τα LED χρησιμοποιείται ο συνδυασμός διάφανων, κυματοδηγών στρωμάτων και ενός λεπτού ενεργού στρώματος (50-100nm). Το διάφανο στρώμα λειτουργεί ως κυματοδηγός έτσι ώστε ο φωτεινός «κώνος» να εκπέμπεται με γωνία περίπου 30 μοιρών στο κάθετο επίπεδο και περίπου 120 μοιρών στο οριζόντιο επίπεδο.[1]



Εικόνα 3.9

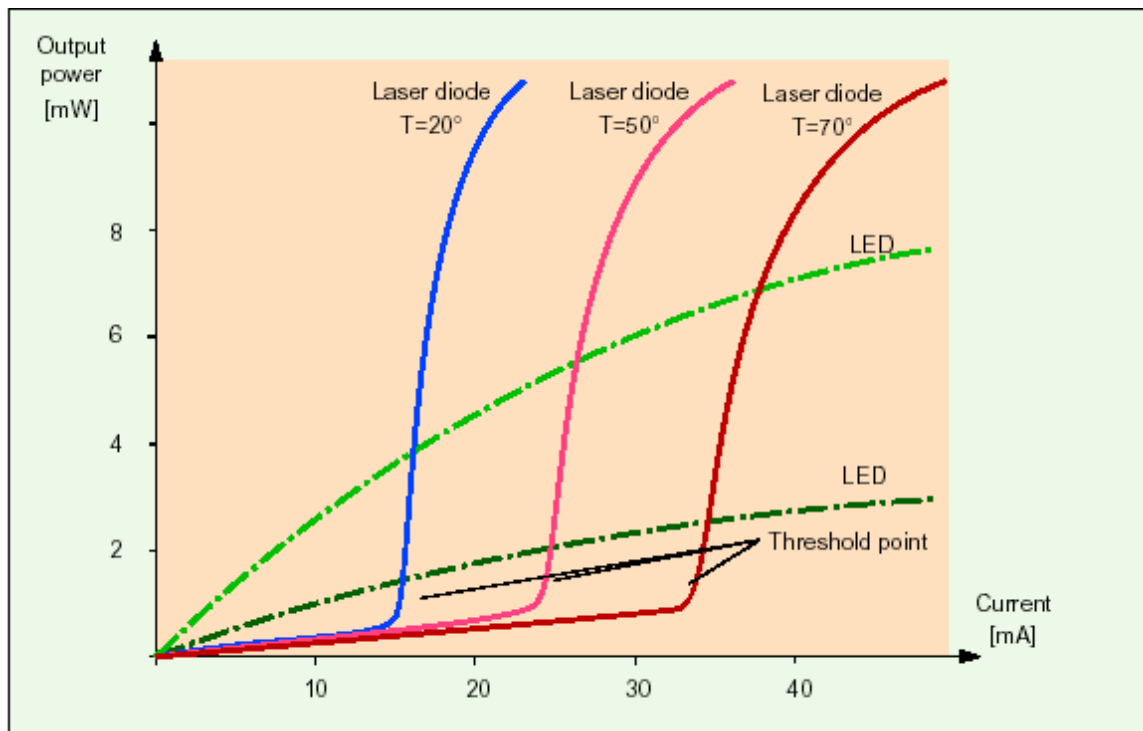
Ο λοβός εκπομπής είναι μια έλλειψη με οριζόντιο άνοιγμα 115-125 μοίρες και κάθετο άνοιγμα 25-35 μοίρες.

Η μία επιφάνεια εξόδου καλύπτεται από ανακλαστικό στρώμα που σημαίνει ότι σχεδόν όλη η ακτινοβολία οδηγείται προς μια κατεύθυνση. Με την χρήση των διαφανειών κυματοδηγών 4 με 7 φορές περισσότερο φως μπορεί να εισαχθεί σε μια οπτική ίνα με μικρό αριθμητικό άνοιγμα σε σύγκριση με τα surface emitting LEDs.

3.3 Χαρακτηριστικά των LASER και των LEDs

3.3.1 Ισχύς εξόδου

Η τεράστια διαφορά ανάμεσα σε μια δίοδο Laser και ένα LED μπορεί να γίνει φανερή από το I_P διάγραμμά τους. Η γραφική παράσταση για τη δίοδο Laser ακολουθεί παρόμοια καμπύλη με την γραφική παράσταση για το LED μέχρι ενός σημείου (threshold) όπου το ρεύμα I αναγκάζει τη δίοδο να εκπέμψει φως. Μετά από το σημείο αυτό, η ισχύς εξόδου της διόδου Laser αυξάνεται ραγδαία και σχεδόν γραμμικά. Από την άλλη μεριά, το LED, που βασίζεται στην αυθόρμητη εκπομπή, δεν έχει σημείο κατωφλίου αλλά συνεχίζει να αυξάνει την εξόδο του ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος. Αυτό συμβαίνει μέχρι τη στιγμή που η ισχύς εξόδου φτάνει σε ένα σημείο που αρχίζει να ελαττώνεται (όταν ο ημιαγωγός ζεσταίνεται στους $\theta > 700^\circ\text{C}$).

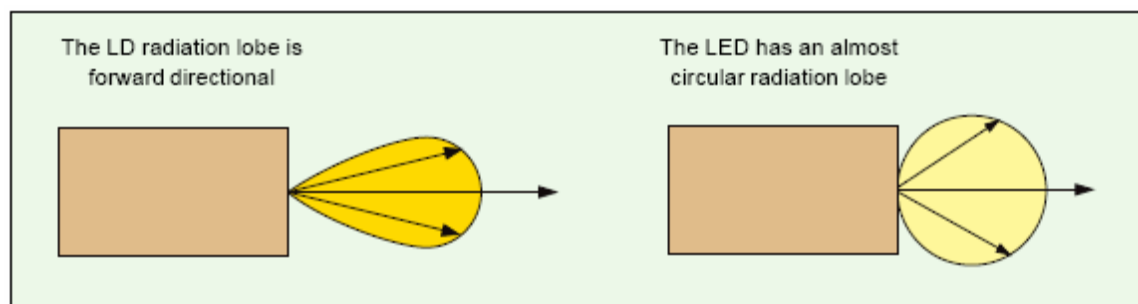


Εικόνα 3.10

Το διάγραμμα δείχνει τη σχέση μεταξύ του ρεύματος οδήγησης και της ισχύος εξόδου. Η δίοδος laser λειτουργεί ως κοινό LED μέχρι το σημείο κατωφλίου.

3.3.2 Λοβός ακτινοβολίας

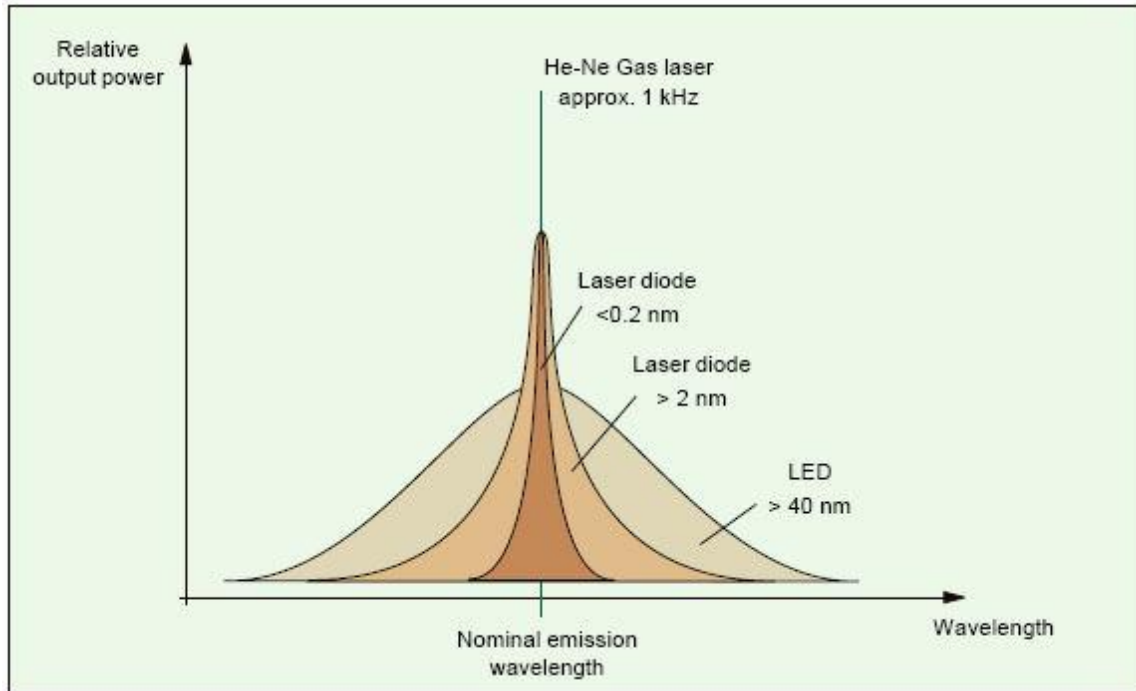
Οι λοβοί ακτινοβολίας των LDs και των LEDs είναι πολύ διαφορετικοί μεταξύ τους. Ο λοβός ακτινοβολίας του LD παρουσιάζει έντονη κατευθυντικότητα ενώ ο λοβός ακτινοβολίας του LED είναι περίπου κυκλικός.



Εικόνα 3.11 Οι διαφορές μεταξύ των λοβών ακτινοβολίας ενός LD και ενός LE

3.3.3 Φασματικό εύρος των LDs και LEDs

Φασματικό εύρος των LDs/LEDs ονομάζουμε το εύρος του οπτικού φάσματος τους. Το οπτικό φάσμα περιέχει τον φορέα που στην περίπτωση μας έχει συχνότητα 10¹⁴Hz. Αν το LD/LED είναι διαμορφωμένο, θα εμφανιστούν πλευρικές ζώνες και στις δύο μεριές του φορέα (περιέχονται επίσης στο οπτικό φάσμα), όπως συμβαίνει σε κάθε πομπό. Αυτές οι πλευρικές ζώνες είναι συμβατές με το ηλεκτρικά διαμορφωμένο εύρος ζώνης. Η καθαρότητα της συχνότητας του σήματος των LDs/LEDs δεν είναι τόσο μεγάλη. Έτσι οι πλευρικές ζώνες είναι συχνά «κρυμμένες» σε ένα ευρύ περίπλοκο οπτικό φάσμα, του οποίου οι παράγοντες σήματος είναι αδύνατο να διακριθούν.



Εικόνα 3.12 Οπτικά Φάσματα ενός gas laser, ενός LD και ενός LED.

Χρησιμοποιώντας τη σχέση που συνδέει το μήκος κύματος με τη συχνότητα $f = c / \lambda$, προκύπτει ένας τύπος που συνδέει το εύρος του οπτικού φάσματος με το μήκος κύματος ή τη συχνότητα:

$$\Delta f = \frac{c}{\lambda^2} \cdot \Delta \lambda$$

Το εύρος φάσματος Laser είναι αρκετά πιο ευρύ από το ηλεκτρικά διαμορφωμένο εύρος ζώνης. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί οι πλευρικές ζώνες δεν είναι ορατές στο οπτικό φάσμα.

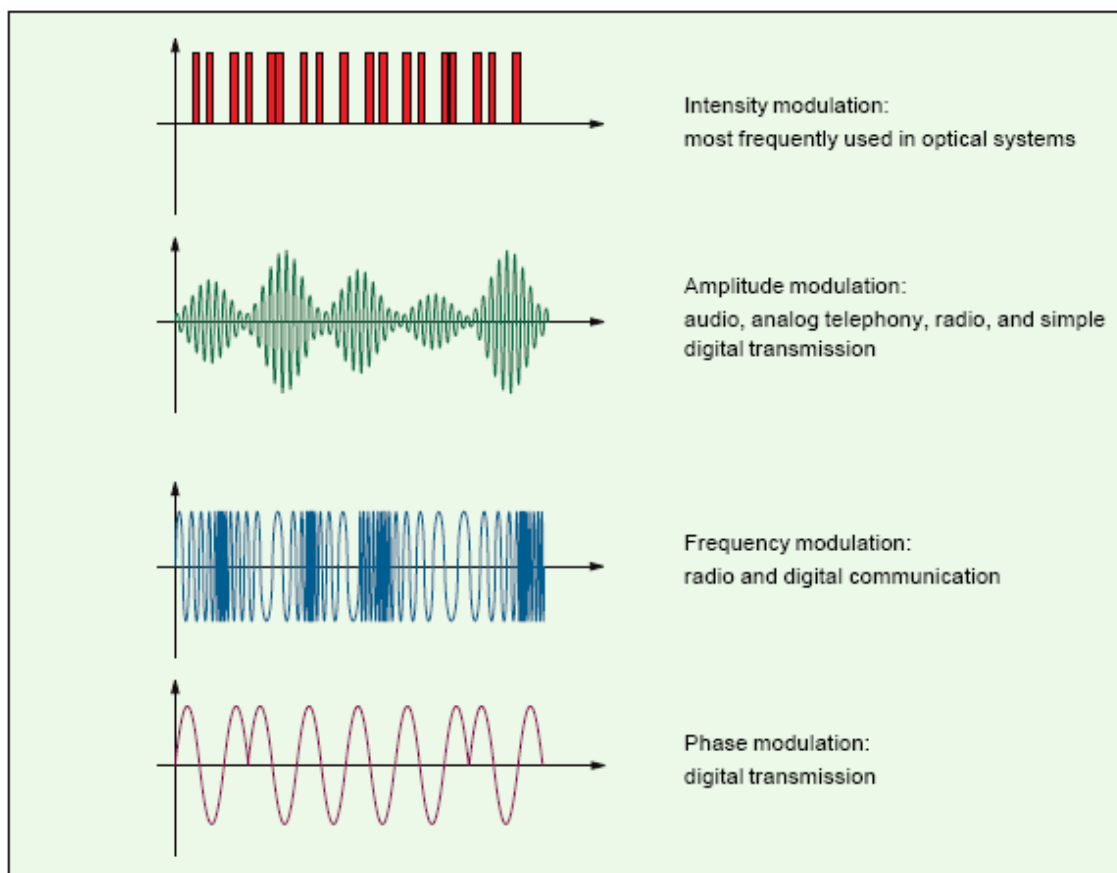
3.3.4 Τύποι Διαμόρφωσης

Όπως συμβαίνει και με τους ράδιο-πομπούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύποι διαμόρφωσης για να μεταδοθεί μία πληροφορία με ένα οπτικό φορέα. Ο πιο απλός τύπος οπτικής διαμόρφωσης είναι αυτός που μοιάζει με την ψηφιακή διαμόρφωση των bits (switch light on – off). Ο τύπος αυτός ονομάζεται (pulse) intensity modulation (IM).

Όλες οι τεχνικές διαμόρφωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί σε ράδιο-επικοινωνίες μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς και στις οπτικές επικοινωνίες. Μια νέα τεχνική διαμόρφωσης είναι η εξής: γίνεται μείξη δύο ακτίνων φωτός σε μια φωτο-δίοδο και τελικά παράγεται μια μεσαία συχνότητα ανάλογη με τη διαφορά των οπτικών συχνοτήτων των δύο ακτίνων φωτός. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται στις μέρες μας είναι οι εξής :

- Intensity modulation (IM)
- Amplitude modulation (AM)
- Frequency modulation (FM)
- Phase modulation (PM)

Στα οπτικά δίκτυα, η διαμόρφωση intensity modulation (IM) χρησιμοποιείται συνήθως για τη μεταφορά πληροφοριών ανάμεσα σε δύο σημεία.



Εικόνα 3.13

Διάφοροι τύποι διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση πληροφοριών

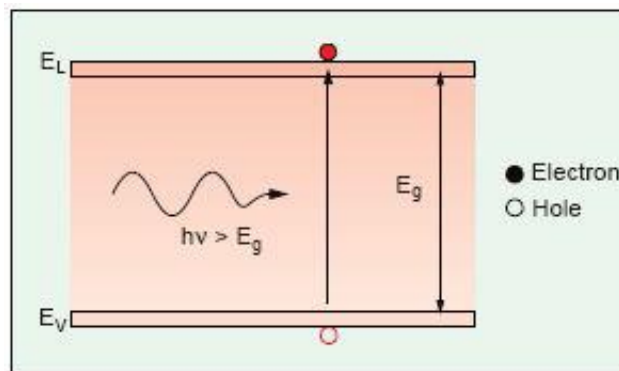
3.4 Οπτικοί Ανιχνευτές

Οι οπτικοί ανιχνευτές (φωτοδίοδοι) [2] επιτελούν αντίστροφη λειτουργία από εκείνη των LEDs και των LDs. Ο οπτικός ανιχνευτής μετατρέπει την οπτική ενέργεια σε ηλεκτρική. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια μπορεί να ενισχυθεί χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι ανιχνευτές που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα οπτικά συστήματα. Οι τρεις τύποι φωτοδίοδων που θα παρουσιάσουμε είναι οι εξής:

- P-N photodiode
- PIN photodiode
- Avalanche photodiode (APD)

Γίνεται συνεχής προσπάθεια στον τομέα των οπτικών τηλεπικοινωνιών, να λειτουργήσουν τα δίκτυα σε όλο και μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το γεγονός αυτό έχει αντίκτυπο και στους οπτικούς ανιχνευτές. Έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται νέα υλικά ημιαγωγών : πυρίτιο (Si) για τα 850nm και Γερμάνιο (Ge) και InGaAs για μήκη κύματος 1300 – 1600 nm.

Η **φωτοδίοδος [2]** λειτουργεί με βάση το γεγονός ότι ένα φωτόνιο με οπτική ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα δύο καταστάσεων του ημιαγωγού, μπορεί να ωθήσει ένα ηλεκτρόνιο να μεταπηδήσει από την κατάσταση ισορροπίας σε μία άλλη διεγερμένη κατάσταση. Αν εφαρμόσουμε μια εξωτερική τάση στη φωτοδίοδο τότε τα ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών θα ρέουν μέσα στον ημιαγωγό , δημιουργώντας ηλεκτρική ένταση που θα είναι ανάλογη με την ένταση του φωτός που απορροφάται.

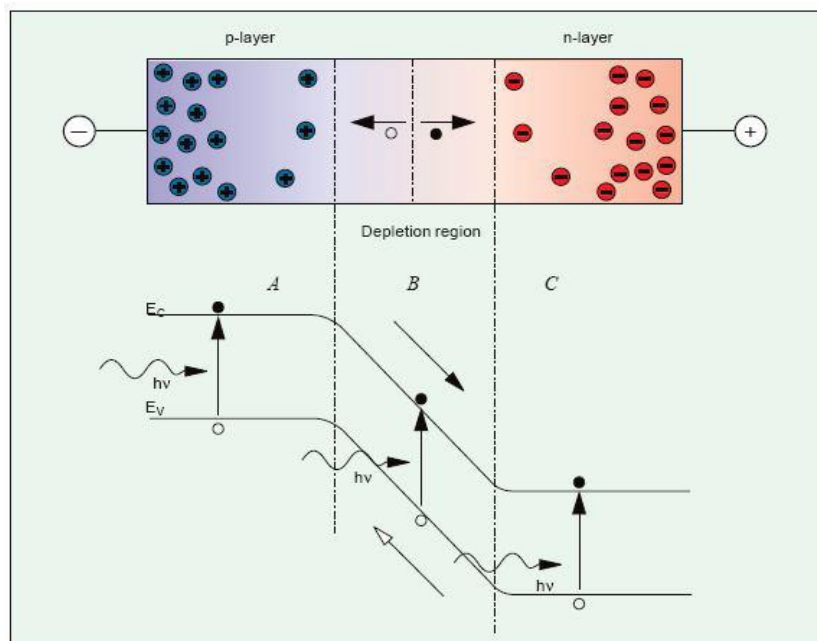


Εικόνα 3.14

Φώς διεγείρει ένα ηλεκτρόνιο κάνοντας το να μεταπηδήσει από μία χαμηλότερη σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Δημιουργείται λοιπόν ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής

3.4.1 Φωτοδίοδος τύπου P-N

Η πιο **απλή φωτοδίοδος** είναι εκείνη που αποτελείται από μία επαφή p-n. Αυτός ο τύπος διόδου χρησιμοποιείται σπάνια στα οπτικά συστήματα αλλά κρίνεται απαραίτητη η παρουσίαση του , για να κατανοήσουμε τις βασικές αρχές λειτουργίας μιας φωτοδίοδου. Στην **Εικόνα 3.15** παρουσιάζεται μια φωτοδίοδος τύπου p-n. Παρατηρούμε ότι η δίοδος αποτελείται από ένα p και ένα n στρώμα. Αν εφαρμοστεί αρνητική τάση στη δίοδο (*αρνητικός πόλος στο P-στρώμα*), το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μια περιοχή αραίωσης μεταξύ των δύο στρωμάτων. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και όπως θα αρχίσουν να απομακρύνονται από την περιοχή επαφής και η ίδια περιοχή θα παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση. [2]

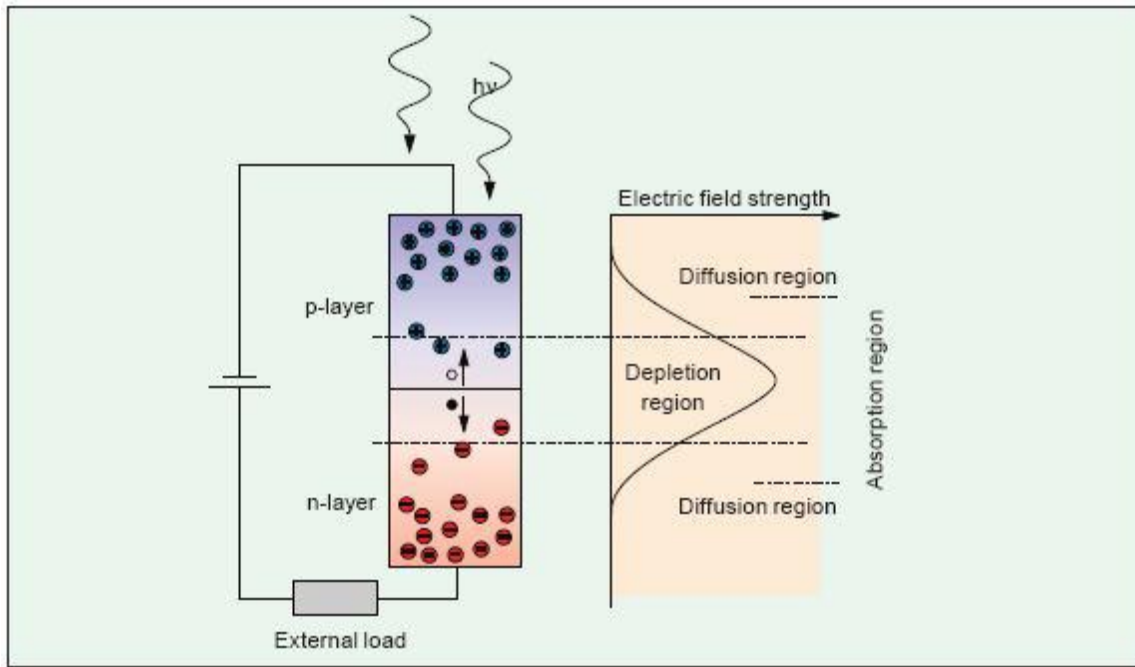


Εικόνα 3.15

Ένα φωτόνιο μπορεί να δημιουργήσει ζεύγη $e-h$ σε τρεις διαφορετικές περιοχές διόδου (A, B & C). Μόνο στην περιοχή αραίωσης (B) παρατηρείται άμεση ανίχνευση αυτών των ζευγών.

Στην περιοχή A, ένα προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί μια οπή και ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από την ανάστροφη πόλωση της διόδου, το ηλεκτρόνιο θα αρχίσει σιγά-σιγά να απομακρύνεται από την περιοχή αραίωσης (δημιουργία ηλεκτρικής έντασης). Η ροή των ζευγών στις περιοχές A και C είναι τόσο αργή που οι κατασκευαστές διόδων πασχίζουν για να σχεδιάσουν μια **p-n φωτοδίοδο** με ελάχιστη ανίχνευση στις παραπάνω περιοχές. [2]

Αν βέβαια ένα φωτόνιο δημιουργήσει ένα ζεύγος οπής-ηλεκτρονίου στην περιοχή B (περιοχή αραίωσης), τότε το ηλεκτρόνιο θα κινηθεί ακαριαία προς το n-στρώμα ενώ η οπή θα κινηθεί ακαριαία προς το p-στρώμα. Αυτή η ακαριαία κίνηση οφείλεται στο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζεται στην περιοχή.



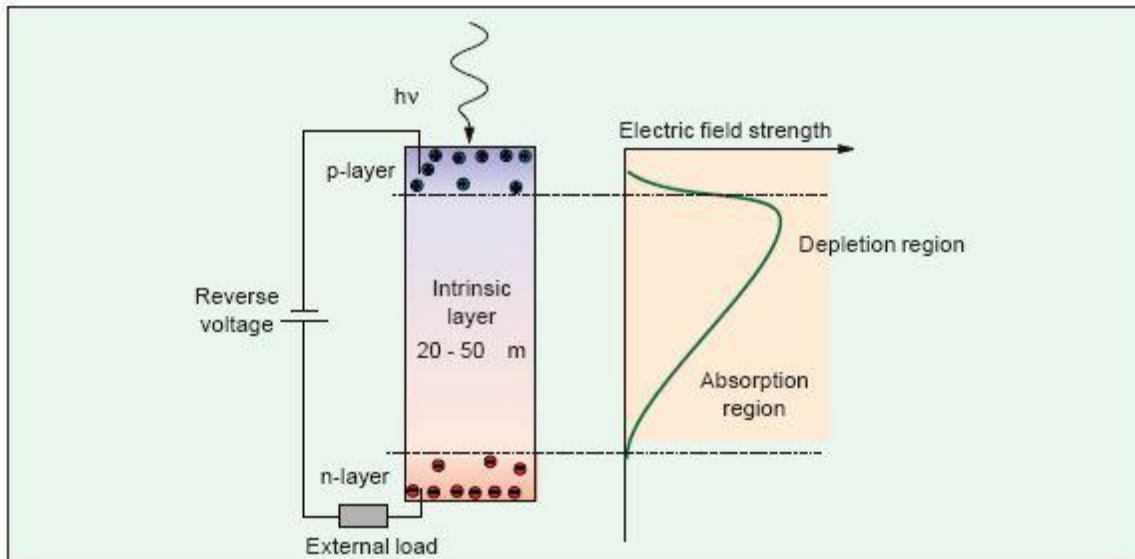
Εικόνα 3.16

Σχηματικό διάγραμμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου σε μία p-n δίοδο.

Όπως φαίνεται και παραπάνω, η διαδικασία διάχυσης στις περιοχές A και είναι πολύ πιο αργή συγκριτικά με εκείνη στην περιοχή B και μπορεί να συνεχιστεί ακόμα και μετά το τέλος της πρόσπτωσης φωτονίων. Τοποθετώντας μια ελαφρά νοθευμένη περιοχή μεταξύ των στρωμάτων p και n, η οποία ονομάζεται intrinsic περιοχή και κάνοντας το p-στρώμα πιο λεπτό, η παραγωγή ζευγών e-h μπορεί να περιοριστεί αποκλειστικά στην περιοχή αραίωσης (B). Ο παραπάνω τρόπος σχεδιασμού διόδου (PIN diode) είναι πολύ πιο αποτελεσματικός.

3.4.2 Φωτοδίοδος τύπου PIN

Η δίοδος p-n μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση του ορατού φωτός. Για την ανίχνευση της υπέρυθρης ακτινοβολίας (μεγαλύτερα μήκη κύματος) έχει αναπτυχθεί ένας άλλος τύπος διόδου. Το φως μεγάλου μήκους κύματος διαπερνά περισσότερο το p-στρώμα απ' ό,τι το φως μικρού μήκους κύματος. Μια λύση θα ήταν να κάνουμε το p-στρώμα πιο λεπτό. Στην περίπτωση αυτή όμως πολλά ζεύγη e-h θα συνδυάζονταν μεταξύ τους εντός του στρώματος p χωρίς να δημιουργούν ηλεκτρική ένταση. Καταλήγουμε λοιπόν στην τοποθέτηση ενός σχετικά λεπτού στρώματος ημιαγωγού νοθευμένου με p παράγοντες, ανάμεσα στα στρώματα p-n (δίοδος τύπου PIN).

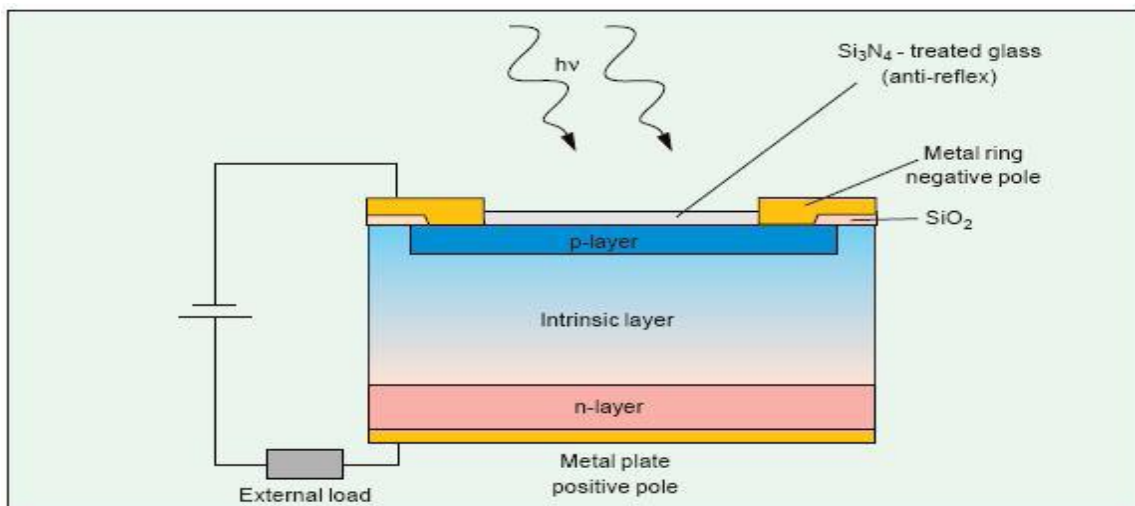


Εικόνα 3.17

Τοποθετώντας ένα intrinsic στρώμα μεταξύ των στρώματων p-n πετυχαίνουμε μεγαλύτερη περιοχή απορρόφησης από εκείνη που παρουσιάζει η απλή διάδος p-n

Το **intrinsic** στρώμα ή αλλιώς i-στρώμα, παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση και το ηλεκτρικό πεδίο που εμφανίζει είναι πολύ ισχυρό. Τα χαρακτηριστικά του i-στρώματος διευρύνουν αρκετά την περιοχή αραίωσης της φωτοδίοδου. Έτσι τα περισσότερα ζεύγη e-h παράγονται στην περιοχή αραίωσης με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη ηλεκτρική ένταση και αμεσότερη ανίχνευση του φωτός.

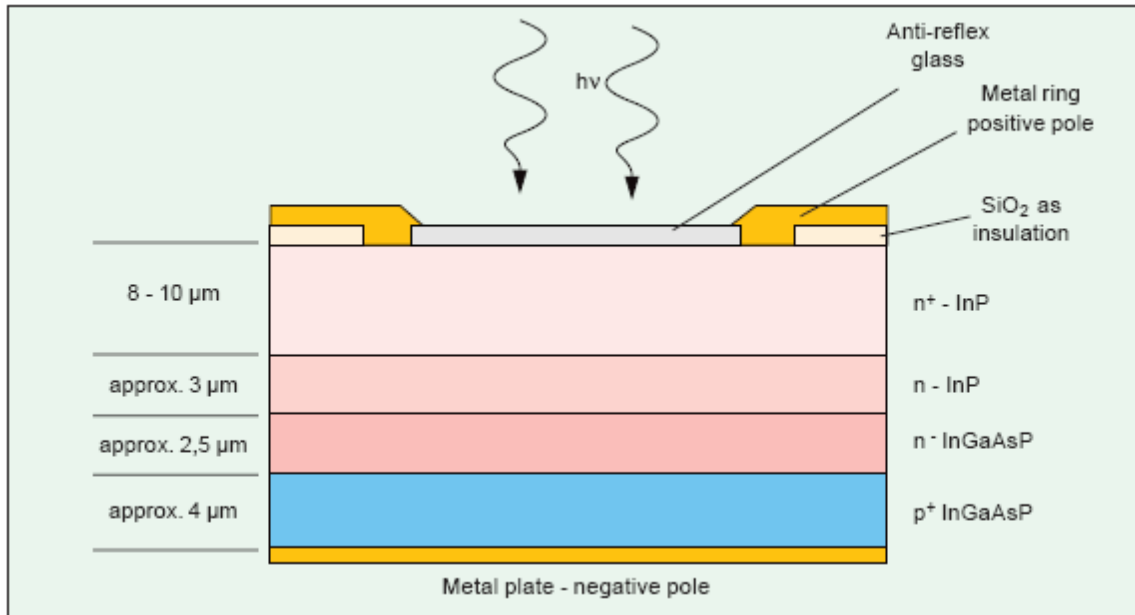
Η **εικόνα 3.18** παρουσιάζει μία **πυριτίου (Si) PIN δίοδο**. Αυτός ο τύπος δίοδου χρησιμοποιείται για μήκη κύματος 0.8μm – 0.9μm. Ένα μεταλλικό δακτυλίδι λειτουργεί σαν αρνητικός πόλος. Κάτω από αυτό το δακτυλίδι βρίσκεται ένα λεπτό p-στρώμα και κάτω από αυτό ένα λεπτό i-στρώμα (20-50μm). Το i-στρώμα είναι όσο πιο λεπτό γίνεται (με από ένα σημείο ο χρόνος αντίδρασης αρχίζει κ αυξάνεται). Με το πάχος που δίνεται στο παράδειγμα, ο χρόνος αντίδρασης είναι 1 ns και το dark current* (βλέπε παρακάτω) είναι μικρότερο από 1 nA.



Εικόνα 3.18

Τα 3 στρώματα της Si PIN δίοδου.

Τελευταία έχουν αρχίσει και χρησιμοποιούνται συνδυασμοί υλικών που δεν περιέχουν πυρίτιο και γερμάνιο. Για ακόμα μεγαλύτερα μήκη κύματος οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν συνδυασμούς InGaAsP με InP ή GaAlAsSb με GaSb. Η **Εικόνα 3.19** παρουσιάζει τον τρόπο κατασκευής μιας φωτοδιόδου σύμφωνα με τον πρώτο συνδυασμό. Μια τέτοια δίοδος παρουσιάζει dark current μικρότερο από 0.2 nA και χρόνο αντίδρασης μικρότερο από 100 ps.



Εικόνα 3.29

PIN δίοδος για μεγάλα μήκη κύματος. Ημιαγωγοί : InP και InGaAsP

4. Στοιχεία Οπτικού Δικτύου

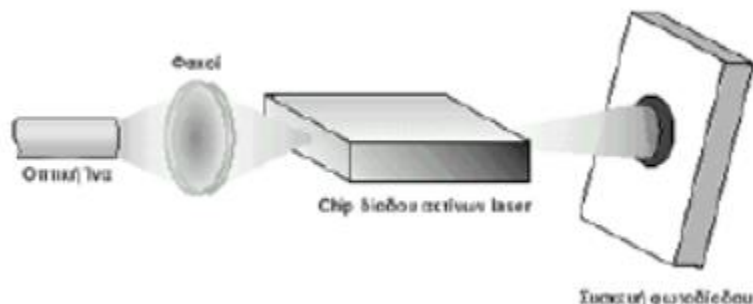
Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τα βασικά στοιχεία της τεχνολογίας WDM. Θα αναλύσουμε στοιχεία όπως πηγές φωτός και ανιχνευτές (Light Sources and Detectors) , Αναμεταδότες (Transponders) , Οπτικούς ενισχυτές (Optical Amplifiers) , οπτικούς πολυπλέκτες-αποπολυπλέκτες (Multiplexers and Demultiplexers), Οπτικούς Πολυπλέκτες προσθαφαίρεσης (OADM's) και οπτικούς διασταυρωτές (OXC's). Επίσης θα αναλύσουμε κάποιες τεχνικές πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας και θα αναφερθούμε στην δρομολόγηση μήκους κύματος.

4.1 Πηγές φωτός και Ανιχνευτές

Οι πηγές φωτός και οι συσκευές φωτοανίχνευσης (Light Sources and Detectors) βρίσκονται στα αντίθετα άκρα ενός συστήματος οπτικής εκπομπής. Οι πηγές/πομποί οπτικών σημάτων αναλαμβάνουν τη μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε παλμούς φωτός. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται είτε μέσω της εξωτερικής διαμόρφωσης ενός συνεχούς οπτικού σήματος, είτε με τη χρήση κατάλληλης συσκευής που παράγει άμεσα διαμορφωμένους παλμούς

φωτός. Υπάρχουν δύο γενικοί τύποι συσκευών εκπομπής φωτός, οι δίοδοι φωτοεκπομπής (LEDs) και οι δίοδοι ακτινών laser ή ημιαγωγοί laser (laser diodes/semiconductor lasers).[2]

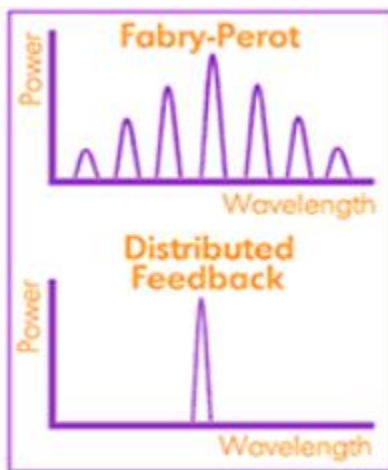
Οι **δίοδοι φωτοεκπομπής (LEDs)** αποτελούν συσκευές χαμηλών ταχυτήτων, κατάλληλες για εφαρμογές με ταχύτητες χαμηλότερες από 1 Gbps , ενώ παράγουν ακτινοβολία σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα. Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφαρμογές πολύτροπων οπτικών ινών. Από την άλλη, οι ημιαγωγοί laser (semiconductor lasers) διαθέτουν χαρακτηριστικά και απόδοση που τους καθιστά καταλληλότερους για εφαρμογές μονότροπης οπτικής ίνας. Στο ακόλουθο σχήμα, περιγράφονται οι γενικές αρχές εισαγωγής οπτικού σήματος στην οπτική ίνα.



Εικ. 4.1

Τυπικός Σχεδιασμός για την τροφοδοσία παλμών φωτός σε οπτική ίνα

Τα είδη των laser που συναντάμε είναι τα τύπου κατανεμημένης ανάδρασης- Distributed Feedback (DFB) και τα Fabry-Perot. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός, ότι τα DFB εκπέμπουν ένα μόνο μήκος κύματος, ενώ τα Fabry-Perot εκπέμπουν πολλά μήκη κύματος το ένα κοντά στο άλλο. (Σχ. 4.2).

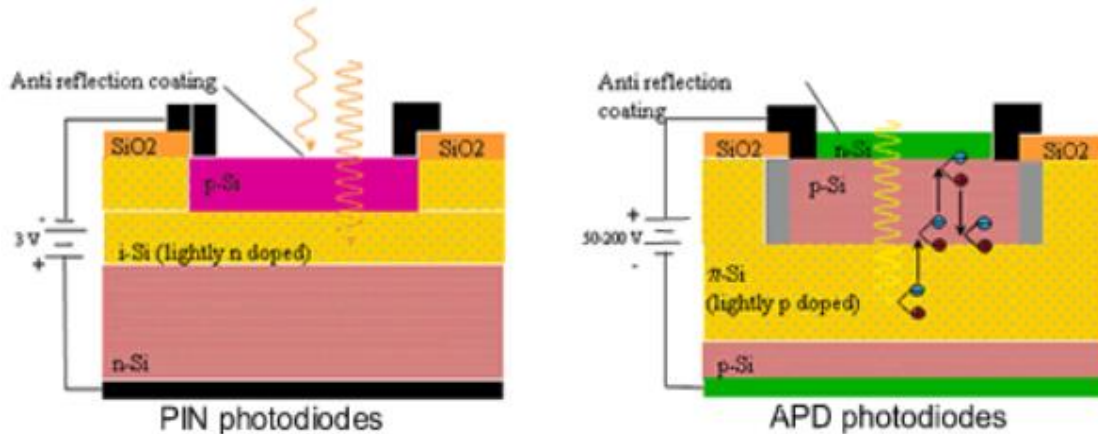


Εικ. 4.2

DFB και Fabry-Perot Laser

Οι συσκευές φωτοανίχνευσης είναι διαθέσιμες σε δύο γενικούς τύπους, τις φωτοδιόδους PIN (Positive Intrinsic Negative) και τις φωτοδιόδους χιονοστιβάδας APD των LED's, μετατρέποντας τα φωτεινά σήματα σε ηλεκτρόνια μέσω μιας σχέσης 1:1. Ο δεύτερος τύπος διαφέρει από τον προηγούμενο στο γεγονός ότι παρέχει επιπλέον και τη διεργασία της ενίσχυσης, μέσω της μετατροπής ενός φωτονίου σε πολλά ηλεκτρόνια (**Εικ. 4.3**). Τα κύρια

πλεονεκτήματα των PIN φωτοδιόδων περιλαμβάνουν το χαμηλό κόστος και την αξιοπιστία, ενώ οι APD φωτοδιόδοι έχουν μεγαλύτερο κόστος, υψηλότερη ακρίβεια αλλά και ευαισθησία.

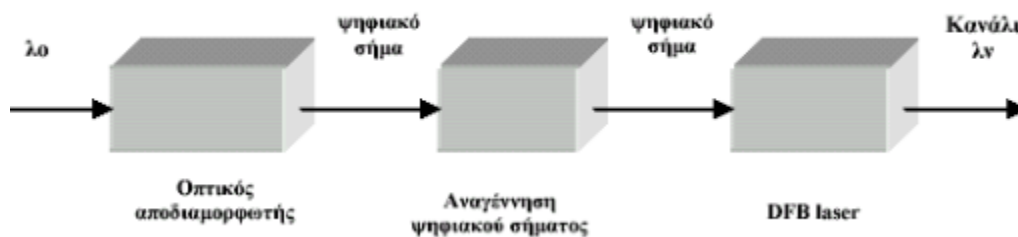


Εικ. 4.3
PIN & APD φωτοδιόδοι

4.2 Αναμεταδότες

Ο ρόλος των αναμεταδοτών (Transponders) είναι η δημιουργία οπτικών σημάτων συμβατών με την τεχνολογία WDM, για την οποία θα αναφερθούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Τα οπτικά σήματα που τροφοδοτούν τους αναμεταδότες προέρχονται από άλλα ινοοπτικά δίκτυα και δεν ικανοποιούν κατ' ανάγκη τις απαιτήσεις των συστημάτων WDM. Έτσι, ο κάθε αναμεταδότης λαμβάνει ένα οπτικό σήμα, εξάγει (μέσω ηλεκτρο-οπτικής αποδιαμόρφωσης) το αντίστοιχο ψηφιακό σήμα πληροφορίας και με αυτό διαμορφώνει ένα laser τα χαρακτηριστικά του οποίου (μήκος κύματος εκπομπής, οπτική ισχύς εξόδου , εύρος μήκους κύματος) είναι προκαθορισμένα και συμβατά με τις απαιτήσεις της τεχνολογίας WDM.

Το Laser αυτό υψηλών επιδόσεων (συνήθως τύπου κατανεμημένης ανάδρασης – Distributed Feedback – DFB) και κατασκευασμένο έτσι ώστε να εκπέμπει σε μία από τις προκαθορισμένες (για τη ζεύξη WDM) περιοχές μήκους κύματος. Με τον τρόπο αυτόν, από διαθέσιμους αναμεταδότες , δημιουργούνται ισάριθμα οπτικά κανάλια (με κεντρικά μήκη κύματος τα λ_1 , λ_2 , , λ_n) καθένα από τα οποία χρησιμοποιείται για την μετάδοση ενός ψηφιακού σήματος πληροφορίας. Στις εξόδους των αναμεταδοτών , μπορούν να τοποθετηθούν εξασθενητές για την προσαρμογή της οπτικής ισχύος στις απαιτήσεις του πολυπλέκτη και των οπτικών ενισχυτών που ακολουθούν (**Εικ. 4.4**).



Εικ. 4.4
Διάγραμμα Δομής αναμεταδότη

Σημείωση

Η χρήση αναμεταδοτών μπορεί να αποφευχθεί (με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του κόστους) όταν έχει ληφθεί πρόνοια τα προς πολυπλεξία οπτικά σήματα να είναι συμβατά με την προς ανάπτυξη ζεύξη WDM (κάτι τέτοιο είναι π.χ. δυνατόν όταν μια ζεύξη WDM εγκαθίσταται μαζί με το ινοοπτικό δίκτυο που παρέχει τα προς πολυπλεξία οπτικά σήματα).

Τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση της εξόδου του DFB laser του αναμεταδότη. Η διαμόρφωση αυτή (τύπου κλειδώματος πλάτους – Amplitude Shifting Key – ASK) μπορεί να είναι είτε άμεση (με εφαρμογή του ψηφιακού σήματος απευθείας στην τροφοδοσία του laser) είτε εξωτερική , συνήθως με χρήση ηλεκτροοπτικών διαμορφωτών Mach-Zehnder.

Η ανάγκη για συμβατότητα μεταξύ των χρησιμοποιούμενων διατάξεων και συστημάτων έχει οδηγήσει την ITU-T στην υιοθέτηση συγκεκριμένων μηκών κύματος στα οποία μπορεί να εκπέμψει ένας αναμεταδότης (Σύσταση G.692) . Αυτά τα μήκη κύματος (και οι αντίστοιχες συχνότητες) συνιστούν ένα «πλέγμα» (grid) τιμών (Πίνακας 4.1) με συχνότητα αναφοράς τα 193.100 GHz (1552,527 nm) και απόσταση μεταξύ των συχνοτήτων $\Delta f = 100$ GHz.

f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)	f (THz)	λ (nm)
197,100	1521,020								
197,000	1521,792	195,000	1537,400	193,000	1553,331	191,000	1569,597	189,000	1586,206
196,900	1522,565	194,900	1538,189	192,900	1554,137	190,900	1570,419	188,900	1587,046
196,800	1523,338	194,800	1538,978	192,800	1554,943	190,800	1571,242	188,800	1587,886
196,700	1524,113	194,700	1539,769	192,700	1555,750	190,700	1572,066	188,700	1588,728
196,600	1524,888	194,600	1540,560	192,600	1556,557	190,600	1572,891	188,600	1589,570
196,500	1525,664	194,500	1541,352	192,500	1557,366	190,500	1573,716	188,500	1590,414
196,400	1526,441	194,400	1542,145	192,400	1558,175	190,400	1574,543	188,400	1591,258
196,300	1527,218	194,300	1542,939	192,300	1558,986	190,300	1575,370	188,300	1592,103
196,200	1527,997	194,200	1543,733	192,200	1559,797	190,200	1576,199	188,200	1592,949
196,100	1528,776	194,100	1544,528	192,100	1560,609	190,100	1577,028	188,100	1593,796
196,000	1529,556	194,000	1545,325	192,000	1561,422	190,000	1577,858	188,000	1594,643
195,900	1530,337	193,900	1546,122	191,900	1562,235	189,900	1578,689	187,900	1595,492
195,800	1531,118	193,800	1546,919	191,800	1563,050	189,800	1579,520	187,800	1596,342
195,700	1531,901	193,700	1547,718	191,700	1563,865	189,700	1580,353	187,700	1597,192
195,600	1532,684	193,600	1548,517	191,600	1564,681	189,600	1581,187	187,600	1598,044
195,500	1533,468	193,500	1549,318	191,500	1565,499	189,500	1582,021	187,500	1598,896
195,400	1534,253	193,400	1550,119	191,400	1566,316	189,400	1582,856	187,400	1599,749
195,300	1535,038	193,300	1550,921	191,300	1567,135	189,300	1583,692	187,300	1600,603
195,200	1535,825	193,200	1551,723	191,200	1567,955	189,200	1584,529	187,200	1601,458
195,100	1536,612	193,100	1552,527	191,100	1568,775	189,100	1585,367	187,100	1602,314

Πίνακας 4.1

Πλέγμα συχνοτήτων (μηκών κύματος) κατά την ITU-T (Σύσταση G.692).

4.3 Οπτικοί Ενισχυτές

Η παρουσία συσκευών οπτικού σήματος καθίσταται απαραίτητη λόγω της εξασθένησης του κατά τη μετάδοση του μέσα από την οπτική ίνα. Πριν την ανάπτυξη τους, ο μόνος τρόπος να ενισχυθεί το σήμα ήταν μέσω ηλεκτρικής αναγέννησης, δηλαδή να μετατραπεί το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό, να ενισχυθεί, να επαναμετατραπεί σε οπτικό και ακολούθως να μεταδοθεί. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε μία ξεχωριστή συσκευή (regenerator-αναγεννητή) για κάθε μήκος κύματος. Αντιθέτως, ο οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει ταυτόχρονα όλα τα μήκη κύματος σε μία ίνα. Έτσι, το κόστος της ενίσχυσης μπορεί να κατανεμηθεί σε διάφορους χρήστες ή εφαρμογές.[2]

Ένα πρόσθετο **πλεονέκτημα** είναι πως επειδή είναι αυστηρά οπτικές συσκευές, είναι ανεξάρτητες από πρωτόκολλο και ρυθμό μετάδοσης. Αυτό το γεγονός παρέχει ευελιξία στο ότι

μία σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει διάφορα πρωτόκολλα (π.χ. ATM, SONET, PPP) με οποιονδήποτε ρυθμό μετάδοσης. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πώς πρόκειται για μικρές σε μέγεθος συσκευές και με ελάχιστες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ κάτι που αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα.

Επιπρόσθετα της χρήσης των συσκευών αυτών στις οπτικές συνδέσεις, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν και για την ενίσχυση της ισχύος του σήματος μετά από διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης, οι οποίες προκαλούν απώλειες στο σύστημα. Ειδικά για την περίπτωση της τεχνολογίας WDM, η οποία επιβάλλει την εκπομπή υψίρρυθμων σημάτων και σε μεγάλες αποστάσεις, ο ιδανικός τύπος οπτικού ενισχυτή είναι ο Ινο-Οπτικός Ενισχυτής ίνας Ερβίου (Erbium-Doped Fiber Amplifier-EDFA) [3][4].

Είχαμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο για τους εν λόγω ενισχυτές EDFA. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει μια πιο εκτενή αναφορά.

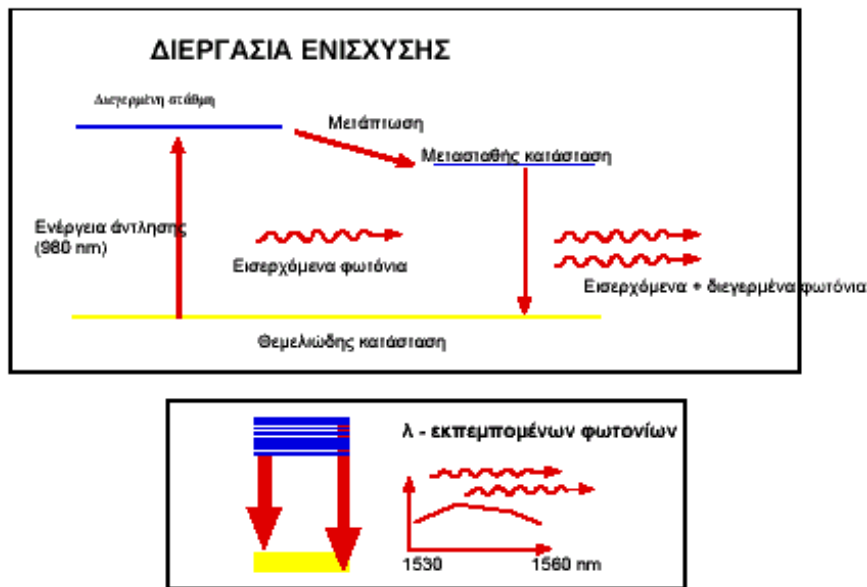
4.3.1 Ινο-Οπτικός Ενισχυτής Ερβίου (EDFA)

Οι οπτικοί ενισχυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα στα ινοοπτικά δίκτυα είναι ινο-οπτικοί Ενισχυτές Ερβίου (Erbium-Doped Fibre Amplifiers – EDFAs). Το βασικό στοιχείο των ενισχυτών αυτών είναι μια οπτική ίνα, μήκους μερικών δεκάδων μέτρων, της οποίας ο πυρήνας είναι νοθευμένος με ιόντα Ερβίου. Όταν η ίνα αυτή τροφοδοτηθεί με τη δέσμη ενός laser άντλησης (pump laser) , με τη «μεσολάβηση» των ιόντων Ερβίου, ξεκινάει μια διεργασία «αναστροφής πληθυσμών», η οποία οδηγεί σε (αμιγώς οπτική) ενίσχυση των πολυπλεγμένων οπτικών σημάτων. Λόγω του ότι, στους συνήθεις EDFAs, η οπτική ενίσχυση, επιτελείται στην περιοχή 1525 – 1565 nm, οι ζεύξεις WDM λειτουργούν στο οπτικό παράθυρο των 1550nm.[2]

Ο μηχανισμός της οπτικής ενίσχυσης στους EDFAs απεικονίζει στην **Εικόνα 4.5**. Λόγω της παρουσίας των ιόντων Ερβίου στο υλικό της ίνας ενίσχυσης, δημιουργείται μια δομή τριών ενεργειακών ζωνών, με ενεργειακές διαφορές ΔΕ12 και ΔΕ31, τέτοιες ώστε τα αντίστοιχα μήκη κύματος $\lambda_{12} = hc/\Delta E_{12}$ και $\lambda_{31} = hc/\Delta E_{31}$ να είναι ίσα με 980nm και 1525 – 1565nm αντίστοιχα. (Ως γνωστόν, ενεργειακή διαφορά ΔΕ αντιστοιχεί σε φωτόνια συχνότητας f (αντίστοιχα, μήκους κύματος $\lambda = c/f$), μέσω του τύπου $\Delta E = hf = hc/\lambda$, όπου h είναι η σταθερά του Plank).

Υπό την επίδραση της δέσμης του laser άντλησης ($\lambda_{12} = 980 \text{ nm}$), φωτόνια «μεταφέρονται» στην ανώτερη ζώνη, από την οποία «μεταπίπτουν» στην ενδιάμεση. Η ζώνη αυτή είναι μετασταθής (Metastable) και, λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής της (10 ms), προσφέρεται για τη «συσσώρευση» ηλεκτρονίων και τη δημιουργία κατάστασης «αναστροφής πληθυσμών» σε βάρος της βασικής ζώνης. Έτσι, μεταξύ της μετασταθούς και της βασικής ζώνης ξεκινάει μια διεργασία «εξαναγκασμένης εκπομπής» (lasing) η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία φωτονίων μηκών κύματος $\lambda = 1525 – 1565 \text{ nm}$ και την ενίσχυση του αρχικού οπτικού σήματος (που περιέχει τα πολυπλεγμένα κανάλια).

Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.4**, η διεργασία άντλησης μπορεί να πραγματοποιηθεί και με laser μήκους κύματος 1480 nm (τα φωτόνια «μεταφέρονται» απευθείας στην ενδιάμεση μετασταθή ζωή). Πράγματι, lasers άντλησης 1480 χρησιμοποιούνται στους Ενισχυτές Ίνας Ερβίου, προσφέροντας μεγαλύτερες ενισχύσεις αλλά και υψηλότερο θόρυβο.



Εικ. 4.5

Μηχανισμός Οπτικής Ενίσχυσης Ερβίου

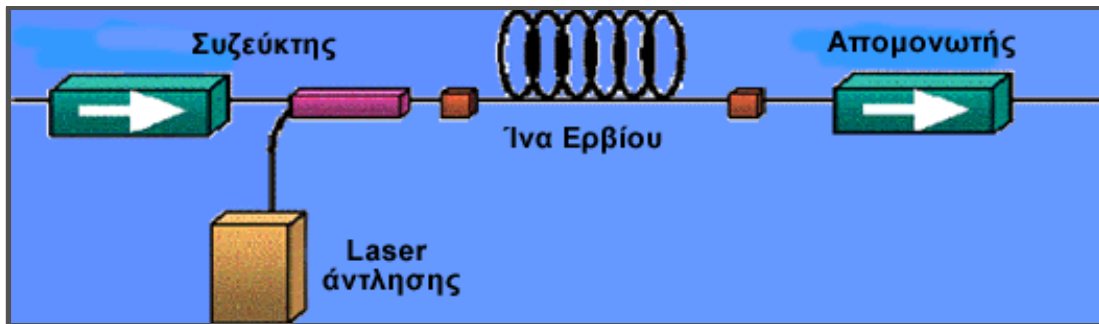
Επειδή αυτός ο μηχανισμός ενίσχυσης είναι ανεξάρτητος από το μήκος κύματος εντός μιας συγκεκριμένης φασματικής περιοχής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση σημάτων διαφορετικών μηκών κύματος στην ίδια οπτική ίνα. Έτσι, περισσότεροι τέτοιοι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να συνδιαστούν σε σειρά για τη διάδοση του οπτικού σήματος μέσω μιας οπτικής ίνας για χιλιάδες χιλιόμετρα. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι ο μέγιστος αριθμός ενισχυτών σε σειρά δεν πρέπει να υπερβαίνει τους έξι, λόγω θορύβου που εισάγουν και που ενισχύεται σε κάθε βαθμίδα. Επιπλέον, έχει διαπιστωθεί ότι οι **οπτικοί ενισχυτές [3]** δουλεύουν ικανοποιητικά στο κομμάτι εκείνο του φάσματος στο οποίο λειτουργούν τα συστήματα οπτικών ινών.

Σε ότι αφορά τη θέση των οπτικών ενισχυτών σε μια ζεύξη **WDM**, διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις :

- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως **ενισχυτής ισχύος (booster amplifier ή post amplifier)** τοποθετούνται στην έξοδο του οπτικού πομπού, ο οποίος εκπέμπει ασθενές σήμα, με σκοπό να αυξήσει την ισχύ του σήματος με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται μεγαλύτερο μήκος ζεύξης, καθώς το ενισχυμένο οπτικό σήμα θα μπορεί να υποστεί μεγαλύτερες απώλειες, άρα μεγαλύτερη διαδρομή, προτού γίνει τόσο ασθενές ώστε να μην μπορεί να ανιχνευθεί σωστά. Ένας τέτοιος ενισχυτής μπορεί να αυξήσει την απόσταση της μετάδοσης κατά 100χλμ ή και παραπάνω, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή
- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως **ενισχυτής γραμμής (in-line amplifier)** και τοποθετείται κατά μήκος της οπτικής ζεύξης (συνήθως 80-120km) αντικαθιστώντας τους ηλεκτρονικούς αναμεταδότες για την ενίσχυση και αναγέννηση του εξασθενημένου σήματος λόγω απωλειών ισχύος και φαινομένων διασποράς. Ειδικά στα πολυκάναλα οπτικά συστήματα αποτελούν μια πολύ ελκυστική λύση, καθώς η ενίσχυση γίνεται ταυτόχρονα σε όλα τα κανάλια.

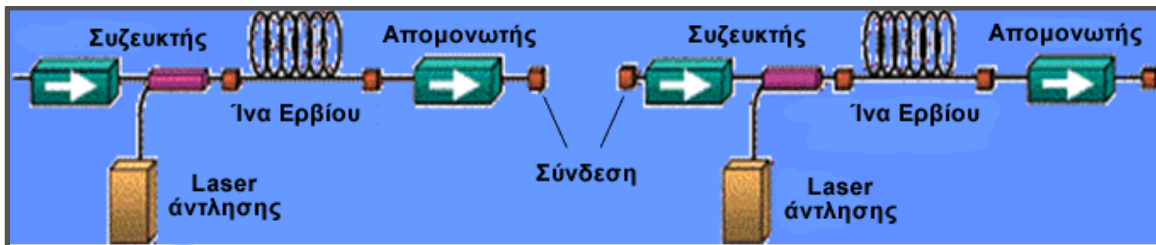
- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται ως **προενισχυτής (pre-amplifier)** πριν την είσοδο του αποπολυπλέκτη, προκειμένου το οπτικό σήμα να αποκτήσει επαρκή ισχύ για τη διεργασία της αποπολυπλεξίας και τη λήψη των αποπολυπλεγμένων καναλιών από τους επιμέρους δέκτες.
- Ο οπτικός ενισχυτής χρησιμοποιείται και ως **ενισχυτής τοπικών δικτύων (LAN)** όπου και χρησιμοποιούνται για αντιστάθμιση ισχύος, καθώς λόγω απωλειών κατανομής περιορίζεται ο αριθμός κόμβων στο δίκτυο.

Η βασική διάταξη ενός ινο-οπτικού Ενισχυτή Ερβίου φαίνεται στην **Εικ. 4.6**. Στην **Εικ. 4.7** φαίνεται η ενίσχυση με δύο βαθμίδες, η οποία επιτυγχάνει ενίσχυση με χαμηλό θόρυβο στην πρώτη βαθμίδα και μεγαλύτερη ενίσχυση στην δεύτερη.



Εικ. 4.6

Βασική Σχεδίαση Ινο-Οπτικού Ενισχυτή Ερβίου



Εικ. 4.7

Ενίσχυση με δύο βαθμίδες

Το μειονέκτημα των EDFA είναι ότι λειτουργούν στο διάστημα **1530 – 1560 nm**, ενώ η εξασθένηση του σήματος στην περιοχή **1500 – 1600 nm** είναι ελάχιστη. Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι ότι η απόσταση μεταξύ των διαφορετικών μηκών κύματος είναι πολύ μικρή, στο διάστημα **0.8 – 1.6 nm**, κάτι που προκαλεί crosstalk. Για αυτούς τους λόγους οδηγηθήκαμε στους Silica Erbium fiber-based Dual-band fiber Amplifier (DBFA), οι οποίοι δρουν στο διάστημα **1528 – 1610 nm**. Οι **DBFA** ουσιαστικά είναι σαν τους EDFA με λειτουργία σε πρόσθετο διάστημα, κάτι που έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους EDFA όπως το ότι **φθάνουν στον κόρο πιο αργά** και ότι **εμφανίζουν λιγότερο θόρυβο**. [1]

4.3.2 Βασικές Παράμετροι

Υπάρχουν αρκετές οπτικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν ένα συγκεκριμένο οπτικό ενισχυτή. Για τον πρακτικό σχεδιασμό ενός οπτικού συστήματος είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω παράμετροι :

- Κέρδος
- Κέρδος εύρους ζώνης
- Ισχύς σήματος εξόδου
- Συντελεστής θορύβου

Κέρδος

Το κέρδος ενός οπτικού ενισχυτή αναφέρεται από τον κατασκευαστή και δηλώνει τη διαφορά σε dB της ισχύος του σήματος εισόδου με τη ισχύ του σήματος εξόδου. Στον υπολογισμό του κέρδους συμπεριλαμβάνονται οι απώλειες από τον απομονωτή αλλά όχι οι απώλειες από την κόλληση του ενισχυτή στη γραμμή μετάδοσης του συστήματος. Σε εργαστηριακό περιβάλλον έχει επιτευχθεί κέρδος κοντά στα 50dB. Οι συνηθισμένοι ενισχυτές που κυκλοφορούν στην αγορά παρέχουν κέρδος κοντά στα 30 dB.

Κέρδος εύρους ζώνης

Το κέρδος εύρους ζώνης μπορεί να οριστεί με διάφορους τρόπους. Η πιο σημαντική πληροφορία που μας παρέχει είναι η μέγιστη απόκλιση από το καθορισμένο κέρδος του ενισχυτή μέσα σε ένα συγκεκριμένο διάστημα μηκών κύματος. Τις περισσότερες φορές παρέχεται από τον κατασκευαστή ένα διάγραμμα του κέρδους του ενισχυτή σε συνάρτηση με το μεταδιδόμενο μήκος κύματος για συγκεκριμένη τιμή ισχύος εισόδου. Το διάγραμμα αυτό μας βοηθά να επιλέξουμε το κεντρικό μήκος κύματος στο οποίο θα μεταδίδει ο πομπός.

Ισχύς σήματος εξόδου

Λόγω φαινομένων κορεσμού, το κέρδος μειώνεται όταν η ισχύς ξεπερνά κάποια συγκεκριμένη τιμή. Στην περίπτωση αυτή ο ενισχυτής δεν είναι πιά ενεργός λέμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση κορεσμού. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το ποσό της ισχύος σήματος που μπορούμε να πάρουμε από κάποιον ενισχυτή για συγκεκριμένο επίπεδο άντλησης. Στα περισσότερα βιβλία η ισχύς εξόδου κορεσμού, ορίζεται ως η ισχύς σήματος εξόδου για την οποία το κέρδος μειώνεται κατά 3 dB από την τιμή που έχει καθορίσει ο κατασκευαστής. Οι κατασκευαστές συνήθως καθορίζουν το ποσό της ισχύος εξόδου που μπορεί να αποδώσει ένας ενισχυτής σε συνάρτηση της ισχύος σήματος εισόδου. Με χρήση μεγαλύτερων επιπέδων άντλησης μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ του σήματος εξόδου.

Συντελεστής Θορύβου

Κυριότερη συνιστώσα θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή, ASE. Κατά το φαινόμενο αυτό ένα διεγερμένο ιόν αποδιεγείρεται εξαναγκασμένα χωρίς την πρόσπτωση φωτονίου σήματος. Το ασύμφωνο φωτόνιο που παράγεται ενισχύεται κινούμενο και προς τα δύο τερματικά άκρα, με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε σήμα, άσχετο με το πραγματικό σήμα, που μπορεί να μην υπάρχει.

Το σημαντικότερο μέγεθος που χρησιμοποιείται στην πράξη για το θορυβικό χαρακτηρισμό ενός οπτικού ενισχυτή είναι ο συντελεστής θορύβου N_f που δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$N_f = \frac{S/N_{without\ amplifier}}{S/N_{with\ amplifier}}$$

Ο συντελεστής θορύβου δίνει τη μεταβολή του σηματοθορυβικού λόγου κατά μήκος της ίνας. Καθώς ο ενισχυτής εισάγει πάντα πρόσθετο θόρυβο, είναι λογικό να αναμένουμε ότι ο N_f θα είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή η ίνα δεν μπορεί να βελτιώσει τον SNR του σήματος. Μπορεί ναδειχτεί ότι για υψηλό σήμα εισόδου, η μεγαλύτερη πηγή θορύβου είναι ο όρος που προκύπτει από την αυθόρμητη εκπομπή ακτινοβολίας του ενισχυτή. Τότε $N_f = 2nsp$, όπου nsp είναι ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής.[1][2]

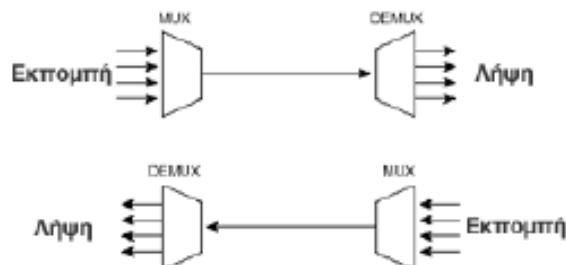
Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε, ότι για ένα συγκεκριμένο σήμα εισόδου, υπάρχει ένα βέλτιστο ζεύγος (μήκος ίνας, ισχύς άντλησης) για το οποίο ο συντελεστής θορύβου παίρνει την ελάχιστη τιμή του. Αυξάνοντας το μήκος της ίνας και την ισχύ άντλησης θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της **ASE** (Amplified Spontaneous Emission) προς την αντίθετη κατεύθυνση και τον κορεσμό του κέρδους στο μπροστινό μέρος όπου το σήμα είναι χαμηλό.

4.4 Οπτικοί Πολυπλέκτες/Αποπολυπλέκτες

Οι συσκευές πολύπλεξης και αποπολύπλεξης επιτρέπουν το συνδυασμό των εισερχόμενων προς μετάδοση σημάτων (σημείο εκπομπής) ή το διαχωρισμό του οπτικού σήματος στα στοιχειώδη σήματα που το απαρτίζουν (σημείο λήψης) αντίστοιχα.

Συνήθως οι παραπάνω λειτουργίες συνδυάζονται σε μια συσκευή, αν και σε κάποιες περιπτώσεις ο πολυπλέκτης και αποπολύπλεκτης είναι διαφορετικές συσκευές. Πολλές συσκευές πολύπλεξης-αποπολύπλεξης λειτουργούν χωρίς ηλεκτρική παροχή, δηλαδή είναι εντελώς παθητικά στοιχεία και συμπεριφέρονται σαν φίλτρα υψηλής επιλεκτικότητας, που συνδυάζουν και διαχωρίζουν τα μήκη κύματος του οπτικού σήματος. Τα περισσότερα παθητικά στοιχεία λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο και όταν αντιστραφεί η φορά του οπτικού σήματος.

Οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης διαφοροποιούνται ελαφρώς ανάλογα με το αν τα συστήματα μετάδοσης είναι μονόδρομης ή αμφίδρομης κατεύθυνσης (Unidirectional/Bidirectional Systems). Το γεγονός αυτό απεικονίζεται στα ακόλουθα σχήματα :



Εικ. 4.8
Εκπομπή/Λήψη σε Διαφορετικές Οπτικές Ίνες



Εικ. 4.9

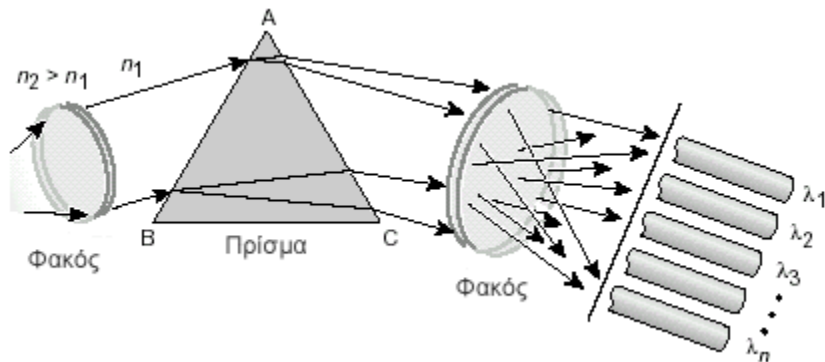
Εκπομπή/Λήψη σε μία Οπτική Ίνα

4.4.1 Συσκευές Πολυπλεξίας-Αποπολυπλεξίας

Όσον αφορά τις υφιστάμενες τεχνικές αποπολύπλεξης, αυτές απεικονίζονται στα παρακάτω σχήματα. Είναι προφανές ότι οι ίδιες διατάξεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντίστροφα για την πολύπλεξη πολλών μηκών κύματος σε μια οπτική ίνα.

Μία απλή τεχνική πολυπλεξίας-αποπολυπλεξίας βασίζεται στη χρήση ενός πρίσματος. Η **Εικόνα 4.10** δείχνει την διάταξη αποπολυπλεξίας. Μια παράλληλη ακτίνα του πολυχρωματικού φωτός προσπίπτει στην επιφάνεια ενός πρίσματος.

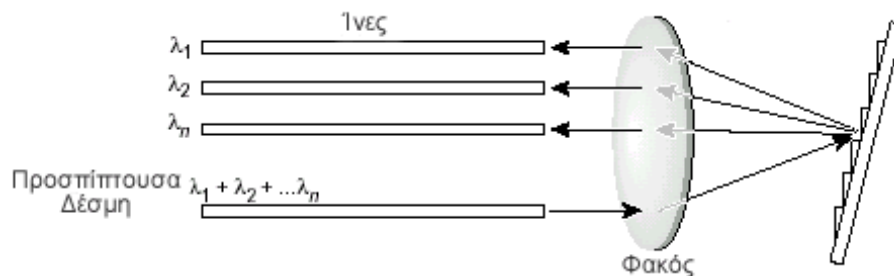
Κάθε μήκος κύματος διαθλάται με διαφορετική γωνία. Αυτό είναι φαινόμενο αντίστοιχο της ανάλυσης του φωτός στο «ουράνιο τόξο» (rainbow effect). Ένας φακός εστιάζει κάθε μήκος κύματος στο σημείο εισαγωγής ανεξάρτητης οπτικής ίνας.



Εικ. 4.10

Διάταξη Αποπολύπλεξης με χρήση Πρίσματος (Prism Refraction Demultiplexing)

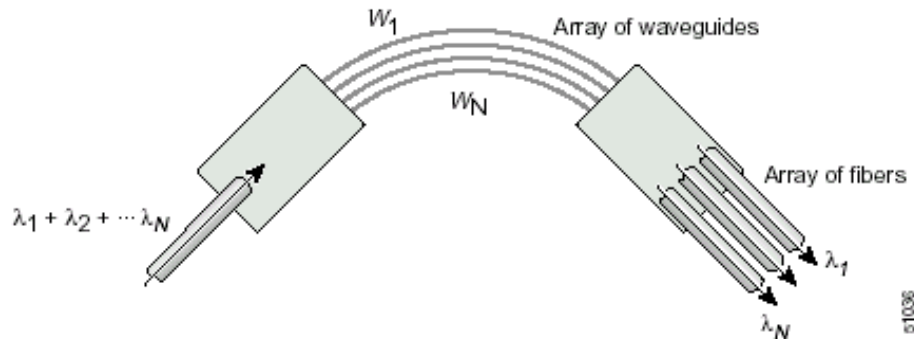
Μια άλλη τεχνική είναι βασισμένη στις αρχές της διάθλασης και της οπτικής περίθλασης. Όταν μια πολυχρωματική πηγή φωτός προσπίπτει σε ένα οπτικό φράγμα. (Εικ. 4.11), κάθε μήκος κύματος ανακλάται με διαφορετική γωνία. Με τη χρήση ενός φακού, μπορούμε να συλλέξουμε τα μήκη κύματος να τα στρέψουμε πάνω σε μεμονωμένες οπτικές ίνες.



Εικ. 4.11

Κυματοδηγός πλέγματος περίθλασης (Waveguide Grating Diffraction)

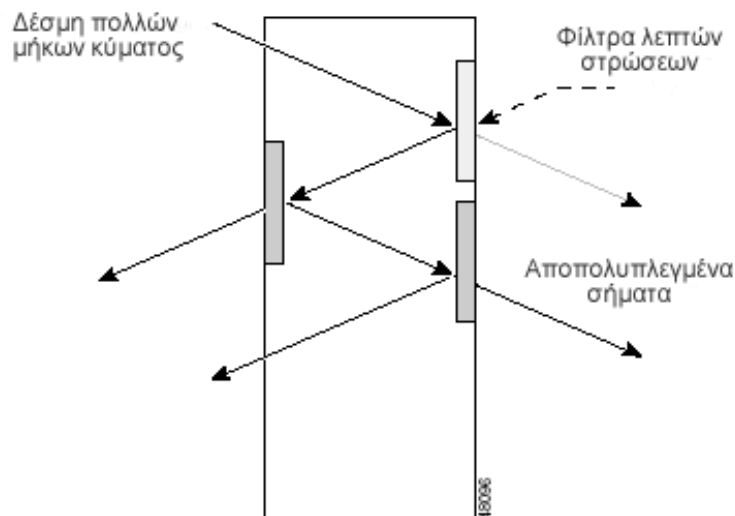
Η τεχνική του πλέγματος κυματοδηγών (AWG) είναι επίσης βασισμένη στις αρχές της συμβολής του φωτός. Μια συσκευή AWG, που πολλές φορές καλείται οπτικός κυματοδηγός δρομολόγησης ή κυματοδηγός δρομολόγησης πλέγματος, αποτελείται από μία σειρά κυματοδηγών-κυρτών καναλιών- με σταθερή διαφορά στο μήκος μετάδοσης (Εικ. 4.12)



Εικ. 4.12

Πλέγμα κυματοδηγών (Arrayed Waveguide Grating-AWG)

Μια διαφορετική τεχνική χρησιμοποιεί φίλτρα υψηλής επιλεκτικότητας σε συσκευές που ονομάζονται φίλτρα λεπτών στρώσεων ή φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων. Με τον προσδιορισμό θέσης των φίλτρων, που αποτελούνται από λεπτές στρώσεις διαφορετικού συντελεστή διάθλασης, τα μήκη κύματος μπορούν να αποπολυπλεχτούν (Εικ. 4.13).



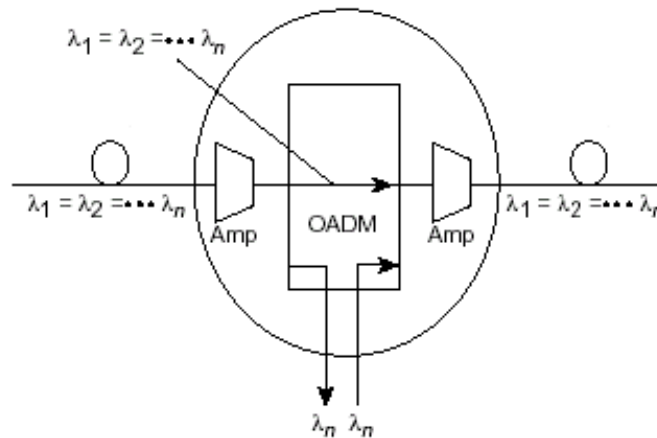
Εικ. 4.13

Φίλτρα πολλαπλών στρωμάτων (Multilayer Interference Filters).

Οι τεχνικές AWG και των φίλτρων πολλαπλών στρωμάτων φαίνεται να υπερτερούν. Η τεχνική των φίλτρων παρεμβολής προσφέρει υψηλή σταθερότητα και απομόνωση μεταξύ των καναλιών με ικανοποιητικό κόστος, έχοντας ωστόσο μεγάλες απώλειες παρεμβολής του συστήματος (insertion losses). Η τεχνική AWG έχει ως βασικότερο πλεονεκτήματα τη δυνατότητα σχεδιασμού ώστε οι διαδικασίες πολύπλεξης/αποπολύπλεξης να πραγματοποιούνται ταυτόχρονα. Επιπλέον, είναι κατάλληλη όταν απαιτείται μεγάλος αριθμός καναλιών, ενώ εμφανίζει χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής (insertion losses). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η θερμοκρασιακή ευαισθησία των διατάξεων της, καθιστώντας την έτσι ακατάλληλη για ορισμένα περιβάλλοντα.

4.5 Οπτικοί Πολυπλέκτες – Προσθαφαίρεσης (Add/Drop)

Μια ειδική κατηγορία οπτικών πολυπλεκτών, αυτή των οπτικών πολυπλεκτών προσθαφαίρεσης (Optical Add/Drop Multiplexers- OADM's) κατέχει σημαντικότατο ρόλο στην προσπάθεια δημιουργίας εξολοκλήρου οπτικών δικτύων. Ο ρόλος τους είναι η εξαγωγή (dropping) από το σύνθετο (aggregate) οπτικό σήμα ή/και η εισαγωγή (adding) σε αυτό, ενός ή περισσοτέρων οπτικών καναλιών(**Εικ. 4.14**). Ένας OADM μπορεί να εκτελέσει τις παραπάνω λειτουργίες απευθείας στο οπτικό επίπεδο (**optical layer**) χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εξαγωγή των ψηφιακών σημάτων από τα οπτικά κανάλια στο ηλεκτρικό επίπεδο. Η λειτουργία τους έχει πολλά κοινά σημεία με τις αντίστοιχες **ADM/SONET** διατάξεις, με τη βασική διαφορά-πλεονέκτημα της μη μετατροπής του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό πριν το διαχωρισμό. Η σημαντικότερη παράμετρος για έναν OADM είναι ο αριθμός των καναλιών τα οποία μπορεί να εισάγει/εξάγει. Ανάλογα με τον κατασκευαστή, ο αριθμός αυτός ποικίλει από 4 έως 32.



Εικ. 4.14

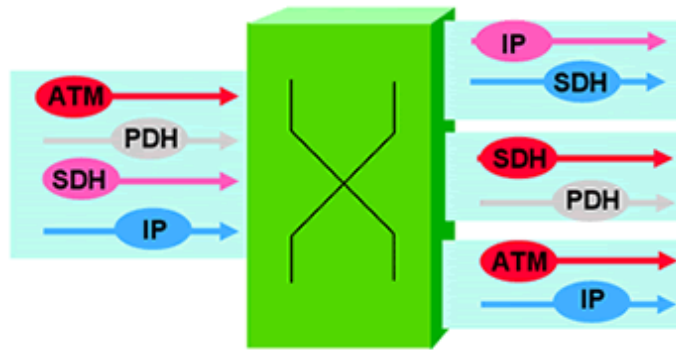
Οπτικός πολυπλέκτης προσθαφαίρεσης (σηματική αναπαράσταση)

Υπάρχουν δυο γενικοί τύποι των **OADM's**². Ο πρώτος τύπος είναι μία σταθερή συσκευή που είναι φυσικά διαμορφωμένη ώστε να εξαγάγει (**drop**) συγκεκριμένα και προκαθορισμένα μήκη κύματος καθώς εισάγει (**add**) άλλα. Ο δεύτερος τύπος είναι ικανός να επιλέγει δυναμικά ποια μήκη κύματος να εισάγει (**add**) και ποια να εξαγάγει (**drop**).

4.6 Οπτικοί Διασταυρωτήρες

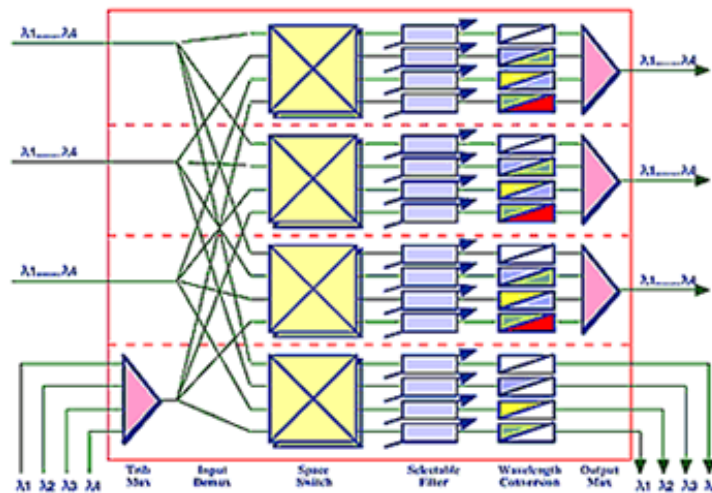
Ένας οπτικός διασταυρωτήρας (Optical Cross Connect – OXC) είναι μια διάταξη N οπτικών εισόδων και N οπτικών εξόδων, η οποία, στην πιο εξελιγμένη της μορφή, έχει τη δυνατότητα δρομολόγησης οπτικών καναλιών (στο οπτικό επίπεδο, χωρίς εξαγωγή των ψηφιακών σημάτων από τα οπτικά κανάλια στο ηλεκτρικό επίπεδο) από οποιαδήποτε είσοδο σε οποιαδήποτε έξοδο και μάλιστα δυναμικά. Η σημασία μιας τέτοιας διάταξης, για την ανάπτυξη ευέλικτων όλο-οπτικών δικτύων (all-optical networks) είναι προφανής.

² Τα φίλτρα λεπτών στρώσεων ή φίλτρα παρεμβολής πολλαπλών στρωμάτων έχουν αποδειχθεί ως η καλύτερη επιλογή για OADM's μητροπολιτικών WDM συστημάτων λόγω του χαμηλότερου κόστους και της σταθερότητας τους.



Εικ. 4.15

Οπτικός διασταυρωτής (σηματική αναπαράσταση)

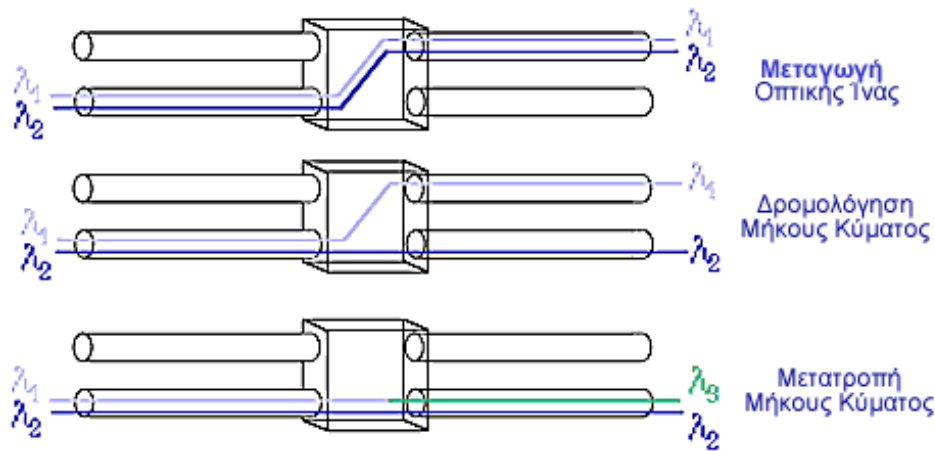


Εικ. 4.16

Οπτικός Διασταυρωτής (Block Διάγραμμα)

Στην οπτική περιοχή, όπου μπορούν να μεταδοθούν 40 οπτικά κανάλια από μία μόνο οπτική ίνα, απαιτείται ένα στοιχείο δικτύου να μπορεί να δέχεται διάφορα μήκη κύματος στις εισόδους του και να τα καθοδηγεί στις κατάλληλες εξόδους. Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο οπτικός διασταυρωτής (OXC) χρειάζεται τρεις δομικές μονάδες (Εικ. 4.15) :

- Μεταγωγή Οπτικής ίνας (fiber switching)- Η ικανότητα να καθοδηγούνται όλα τα μήκη κύματος από μία οπτική ίνα εισόδου σε μια διαφορετική οπτική ίνα εξόδου.
- Δρομολόγηση μήκους κύματος (wavelength switching)- Η ικανότητα συγκεκριμένων μήκων κύματος από μία οπτική ίνα εισόδου σε πολλαπλές οπτικές ίνες εξόδου.
- Μετατροπή μήκους κύματος (wavelength conversion)- Η ικανότητα μετατροπής επαναχρωματισμού των εισερχόμενων μήκων κύματος και η μετάδοση τους με άλλη συχνότητα στην έξοδο.



Εικ. 4.17

Δομικές μονάδες OXC

Αν και επί του παρόντος, δεν διατίθενται οπτικοί διασταυρωτήρες από τους κατασκευαστές, αρκετές εταιρείες έχουν ανακοινώσει τη μελλοντική διάθεση των πρώτων σχετικών προϊόντων. Στα ερευνητικά εργαστήρια, έχουν δοκιμαστεί και δοκιμάζονται διαφορετικές τεχνικές με ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Κύριοι στόχοι, στις προσπάθειες αυτές, είναι η μείωση του χρόνου διασταύρωσης (cross-connection line), σήμερα της τάξης των 2 – 30 ms (ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη τεχνική), η μείωση των απωλειών παρεμβολής (insertion losses) και η επίτευξη υψηλής (80dB) διακαναλικής απομόνωσης (interchannel isolation) για την αποφυγή αλληλοπαρεμβολών.

4.7 Δρομολόγηση Μήκους Κύματος

Ένα οπτικό δίκτυο περιλαμβάνει δρομολογητές μήκους κύματος (wavelength switches) και τελικούς κόμβους που συνδέονται ανά ζεύγη. Οι μεταγωγείς δρομολόγησης μήκους κύματος (wavelength-routing switches) διασυνδέονται μέσω οπτικής ίνας. Παρόλο που κάθε σύνδεση μπορεί να υποστηρίξει πολλά σήματα, απαιτείται κάθε ένα από αυτά να έχει ξεχωριστό μήκος κύματος. Οι δρομολογητές (routers) μεταδίδουν το σήμα στο ίδιο μήκος κύματος με το οποίο λαμβάνουν. Ένα πλήρως οπτικό wavelength-routed δίκτυο είναι ένα δίκτυο το οποίο μεταφέρει δεδομένα από τον ένα σταθμό στον άλλο χωρίς να γίνεται καμία οπτική ή ηλεκτρική μετατροπή.

4.7.1 Μεταγωγείς Μήκους Κύματος (Wavelength Switches)

Οι μεταγωγείς μήκους κύματος (wavelength switches) χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες:

- *Μη επαναδιαμορφώσιμος μεταγωγέας:* Αυτού του είδους οι μεταγωγείς, για κάθε θύρα εισόδου και κάθε μήκος κύματος μεταδίδουν προς ένα καθορισμένο σύνολο θυρών εξόδου στο ίδιο μήκος κύματος. Αυτό δε μπορεί να αλλάξει από τη στιγμή που θα διαμορφωθεί η διάταξη μεταγωγής. Τα δίκτυα που περιέχουν μόνο τέτοιους μεταγωγείς ονομάζονται μη-επαναδιαμορφώσιμα δίκτυα.
- *Επαναδιαμορφώσιμος ανεξάρτητος από το μήκος κύματος μεταγωγέας:* Αυτού του είδους οι μεταγωγείς έχουν μια σχέση εισόδου-εξόδου που μπορεί να αλλάξει δυναμικά.

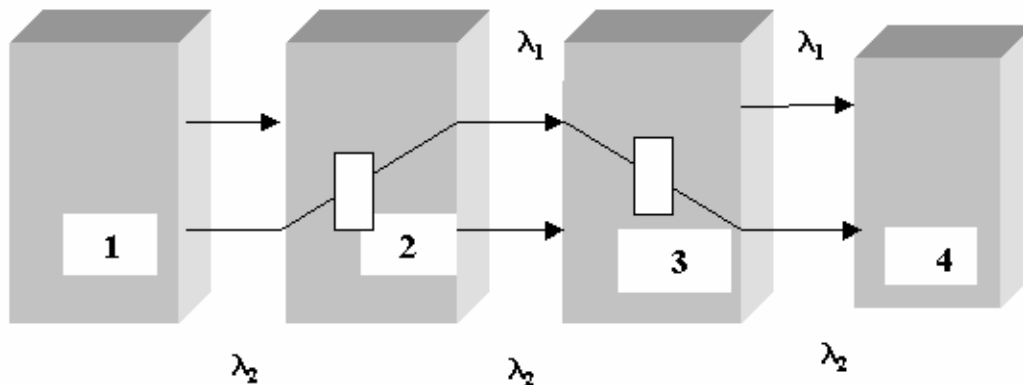
Αυτή η σχέση δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος του σήματος, δηλαδή υπάρχουν καθορισμένα σύνολα θυρών εξόδου όπου μπορεί να μεταδοθεί ένα εισερχόμενο σήμα.

- *Επαναδιαμορφώσιμος εξαρτώμενος από το μήκος κύματος μεταγωγέας:* Αυτού του είδους οι μεταγωγείς συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο πρώτων κατηγοριών. Είναι επίσης γνωστά ως γενικευμένοι (generalized) μεταγωγείς, και εκτός από το ότι μπορούν να αλλάξουν δυναμικά, η σχέση εισόδου-εξόδου είναι συνάρτηση του μήκους κύματος του εισερχόμενου σήματος.

Οι επαναδιαμορφώσιμοι μεταγωγείς είναι πεπερασμένου βαθμού, ενώ οι μη-επαναδιαμορφώσιμοι μπορεί και να μην είναι. Αυτό σημαίνει ότι η πολυπλοκότητα ενός μη-επαναδιαμορφώσιμου δικτύου μπορεί να αγνοηθεί, καθώς δεν είναι σταθερού βαθμού. Αντίθετα, η πολυπλοκότητα ενός διαμορφώσιμου δικτύου είναι ισχυρά εξαρτημένη από το βαθμό περιορισμού.

4.7.2 Μετατροπή Μήκους Κύματος

Έστω ότι το δίκτυο παρουσιάζει η **Εικόνα 4.18**. Τα μήκη κύματος λ_1 και λ_2 που φαίνονται είναι ελεύθερα μεταξύ των κόμβων 1,2 και 3 αντίστοιχα. Υπάρχουν δύο μετατροπείς μήκους κύματος, ένας στον κόμβο 2 και ο άλλος στον κόμβο 3. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι δυνατή η δημιουργία διαδρομής από τον κόμβο 1 στον κόμβο 4 χωρίς μετατροπή, επειδή τα διαθέσιμα μήκη κύματος είναι διαφορετικά για κάθε σύνδεση.



Εικ. 4.18
Μετατροπή Μήκους Κύματος

Θα μπορούσαμε λοιπόν να επιλύσουμε αυτό το πρόβλημα μετατρέποντας το μήκος κύματος, τους που χρησιμοποιούν τα δεδομένα που φτάνουν από τον κόμβο 1 στον κόμβο 2, από το λ_1 στο λ_2 , στη σύνδεση των κόμβων 2 και 3. Αυτή η τεχνική καλείται μετατροπή μήκους κύματος. Λειτουργικά, ένα τέτοιο δίκτυο μοιάζει με δίκτυο μεταγωγής κυκλωμάτων. Για οποιοδήποτε μοντέλο οπτικής δρομολόγησης, πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου εύρους ζώνης. Οι μετατροπείς μήκους κύματος προτάθηκαν ως λύση για αυτό το πρόβλημα, και παρέχουν βελτίωση της τάξης του 10% - 40% στην αξιοποίηση μέσω επαναχρησιμοποίησης, όταν υπάρχουν λίγα διαθέσιμα μήκη κύματος.

Υπάρχουν οι ακόλουθες δυνατότητες μετατροπής μήκους κύματος:

- Καμία μετατροπή : δεν γίνεται μετατροπή μήκους κύματος.
- Πλήρης μετατροπή : Κάθε αλλαγή μήκους κύματος είναι δυνατή και επομένως τα κανάλια μπορούν να συνδεθούν ανεξάρτητα από τα διαθέσιμα μήκη κύματος.
- Μερική μετατροπή : η αλλαγή μήκους κύματος είναι περιορισμένη και δεν είναι δυνατός ο συνδυασμός όλων των καναλιών.
- Σταθερή μετατροπή: είναι προκαθορισμένες οι αλλαγές μήκους κύματος, που μπορούν να γίνουν μεταξύ των καναλιών.
- Αραιή μετατροπή : το δίκτυο περιέχει τόσο κόμβους που υποστηρίζουν πλήρη μετατροπή όσο και κόμβους που δεν υποστηρίζουν μετατροπή.

Ωστόσο, η μετατροπή *μήκους κύματος*³ έχει πολύ υψηλό κόστος ως τεχνολογία και δεν είναι ρεαλιστική η θεώρηση, ότι όλοι οι κόμβοι του δικτύου θα έχουν τη δυνατότητα μετατροπής του μήκους κύματος. Επομένως, εξετάζεται περισσότερο η περίπτωση που δεν υφίσταται πλήρης μετατροπή. Οι συχνότερες περιπτώσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία είναι η αραιή και η περιορισμένη.

5. Τεχνολογία WDM

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά θα αναφερθούμε στην τεχνολογία **SONET/SDH** που καθορίζει την τυποποίηση για τους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων πάνω από οπτικά δίκτυα. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα είδη πολυπλεξίας. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές όσον αφορά την πολυπλεξία, τα τρία βασικά είδη πολυπλεξίας είναι η **Πολυπλεξία με Διαίρεση Χρόνου** (Time Division Multiplexing – **TDM**), **Πολυπλεξία με Διαίρεση Συχνότητα** (Frequency Division Multiplexing – **FDM**), **Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος** (Wavelength Division Multiplexing – **WDM**), καθώς και με δύο μορφές της τεχνολογίας **WDM**, την **Πυκνή** (Dense) και **Χονδροειδή** (Coarse) Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος (**Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM**, **Coarse Wavelength Division Multiplexing – CWDM**).

5.1 Τεχνολογία SONET/SDH

Οι όροι **SONET** (Σύγχρονο Οπτικό Δίκτυο – Synchronous Optical Network) και **SDH** (Σύγχρονη Ψηφιακή Ιεραρχία – Synchronous Digital Hierarchy) αναφέρονται σε ένα σύνολο καθορισμένων προτύπων που περιγράφουν την εκπομπή δεδομένων με τη μέθοδο της **Πολυπλεξίας με Διαίρεση Χρόνου** (Time Division Multiplexing – TDM) σε δίκτυα οπτικών ινών (fiber optical networks). Ουσιαστικά, πρόκειται για την αμερικάνικη και την διεθνή έκδοση της ίδιας σειράς προτύπων. Έτσι, το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Εθνικών Προτύπων (ANSI) είναι υπεύθυνο για το συντονισμό και την έκδοση των προτύπων SONET , ενώ η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) είναι υπεύθυνη για τη σειρά SDH.

Το **βασικό πρόβλημα** το οποίο επιλύει επιτυχώς η τεχνολογία **SONET/SDH** είναι οι πολύπλοκες διαδικασίες μετατροπών (πολύπλεξης – αποπολύπλεξης κωδικοποίησης-αποκωδικοποίησης) που θα απαιτούνταν για την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών τύπων ρυθμών μεταφοράς και των τρόπων με τον οποίο είναι οργανωμένα τα δεδομένα. Έτσι, είναι

³ Ο όρος *μήκος κύματος* (wavelength) χρησιμοποιείται αντί του όρου *συχνότητα* (frequency) για αποφυγή συγχύσεων με άλλες χρήσεις του όρου αυτού. Ο όρος *μήκος κύματος* (wavelength) πολλές φορές εμφανίζεται και ως Lambda ή channel.

δυνατή η μεταφορά πολλών διαφορετικών τύπων δεδομένων μέσω μια κοινής γραμμής. Ειδικότερα, άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα που εξασφαλίζει η τεχνολογία SONET/SDH είναι τα εξής :

- Σχεδιάστηκε για συμφέρουσα, από πλευράς κόστους, και ευέλικτη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση. Τα πρότυπα του **SONET/SDH** βασίζονται στις αρχές της άμεσης σύγχρονης πολυπλεξίας, που είναι το κλειδί για οικονομική και ευέλικτη τηλεπικοινωνιακή δικτύωση. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι συγκεκριμένα σήματα εισόδου μπορεί να πολυπλεχθούν κατ' ευθείαν σε ένα **SONET/SDH** σήμα υψηλότερης ταχύτητας, χωρίς ενδιάμεσα στάδια πολυπλεξίας. Στη συνέχεια τα στοιχεία του **SONET/SDH** δικτύου (network elements) μπορούν να διασυνδεθούν κατ' ευθείαν στο υπάρχον δίκτυο, με προφανή οφέλη από πλευράς κόστους και οικονομίας συσκευών.
- Εξασφαλίζει ενσωματωμένη χωρητικότητα σήματος, για προηγούμενη διαχείριση και συντήρηση δικτύου. Ικανότητες για προηγμένη διαχείριση και συντήρηση δικτύου έτσι ώστε να είναι δραστικά διαχειρίσιμη η ευελιξία του. Περίπου 5% της δομής **SONET/SDH** σήματος χρησιμοποιείται για υποστήριξη διαδικασιών και πρακτικών προηγμένης διαχείρισης και συντήρησης δικτύου.
- Εξασφαλίζει ευέλικτη μεταφορά σήματος. Το **SONET/SDH** σήμα είναι ικανό να μεταφέρει όλα τα συνηθισμένα σήματα, που υπάρχουν στα σημερινά τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Αυτό σημαίνει ότι το **SONET/SDH** μπορεί να αναπτυχθεί σαν ένα πλαίσιο επικάλυψης στο υπάρχον δίκτυο και όπου χρειαστεί, εξασφαλίζει βελτιωμένη ευελιξία δικτύου, μεταφέροντας διαφόρους τύπους σημάτων. Επιπρόσθετα, το **SONET/SDH** έχει τη δυνατότητα να ενσωματώσει εύκολα νέους τύπους σημάτων, που εξυπηρετούν πελάτες, και τα οποία θα ζητηθούν στο μέλλον από τους χρήστες δικτύων.
- Οδηγεί σε μία απλή και ενιαία δομή τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Το SONET/SDH μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα παραδοσιακά πεδία εφαρμογής των τηλεπικοινωνιών. Συνεπώς, το SONET/SDH καθιστά δυνατή την ύπαρξη ενοποιημένης δομής δικτύου τηλεπικοινωνιών. Το γεγονός ότι το SONET/SDH βασίζεται σε κοινά δικτυακά πρότυπα, σημαίνει ότι μπορούν να διασυνδεθούν χωρίς προβλήματα συσκευές από διαφορετικούς κατασκευαστές.

Το βασικό δομικό στοιχείο των οπτικών διεπαφών (optical interfaces) της τεχνολογίας SONET είναι το Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς (**Synchronous Transport Signal-STS⁴**). Το αντίστοιχο για το **πρότυπο SDH** είναι η Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς (Synchronous Transfer Module-**STM**). Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται οι προτυποποιημένοι ρυθμοί για τις πλατφόρμες SONET/SDH, με τους αντίστοιχους συμβολισμούς για το οπτικό και το ηλεκτρικό επίπεδο.

⁴ STS-1 (**Synchronous Transport Signal-Level 1**). Σήμα 51,840 Mbps γνωστό και ως Σήμα Σύγχρονης Μεταφοράς 1^{ου} επιπέδου. (SONET), OC-1 (**Optical Carrier-Level 1**). Οπτικός Φορέας 1^{ου} Επιπέδου, είναι το σήμα που λαμβάνεται στην έξοδο ενός ηλεκτροοπτικού μετατροπέα, όταν στην είσοδο εισάγεται στο σήμα STS-1. (SONET), STM-1 (**Synchronous Transport Module-Level 1**). Μονάδα Σύγχρονης Μεταφοράς 1^{ου} επιπέδου 155,520 Mbps. (SDH).

Οπτικό Επίπεδο (OC ⁵)	Ισοδύναμο SDH block	Ηλεκτρικό Επίπεδο	Ρυθμός (Line Rate Kbps)	Payload Rate	Overhead Rate
OC-1	-	STS-1	51,840	50,112	1,728
OC-3	STM-1	STS-3	155,520	150,336	5,184
OC-9	STM-3	STS-9	466,560	451,008	15,552
OC-12	STM-4	STS-12	622,080	601,344	20,736
OC-18	STM-6	STS-18	933,120	902,016	31,104
OC-24	STM-8	STS-24	1244,160	1202,688	41,472
OC-36	STM-12	STS-36	1866,240	1804,032	62,208
OC-48	STM-16	STS-48	2488,320	2405,376	82,944
OC-96	STM-32	STS-96	4976,640	4810,752	165,888
OC-192	STM-64	STS-192	9953,280	6921,504	331,776
OC-768	STM-256	STS-768	39,813,120	38,486,016	

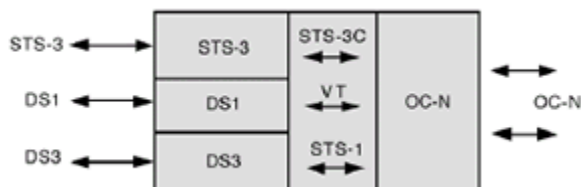
Πίνακας 5.1

Η ψηφιακή ιεραρχία SONET/SDH – Ρυθμοί μετάδοσης

5.1.1 Δομικά Στοιχεία της Τεχνολογίας SONET/SDH

Τα βασικά δομικά στοιχεία ενός δικτύου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία SONET/SDH περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Τερματικοί Πολυπλέκτες (Terminal Multiplexers – PTEs):** Επιπλέον το σημαντικότερο έργο της συγκέντρωσης όλων των ψηφιακών (ηλεκτρικών ή οπτικών) σημάτων. Τα σήματα πολυπλέκονται και μεταδίδονται σε οπτικό επίπεδο, μέσω μιας κοινής OC-N γραμμής.

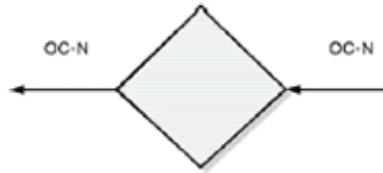


Εικ. 5.1

Παράδειγμα λειτουργίας Τερματικού Πολυπλέκτη

⁵ OC: Optical Carrier

- **Συσκευές Αναγέννησης Σήματος (Regenerators):** Αυτές οι συσκευές είναι απαραίτητες στις περιπτώσεις κατά τις οποίες, λόγω των μεγάλων αποστάσεων μεταξύ των πολυπλεκτών, το σήμα εξασθενεί σημαντικά.

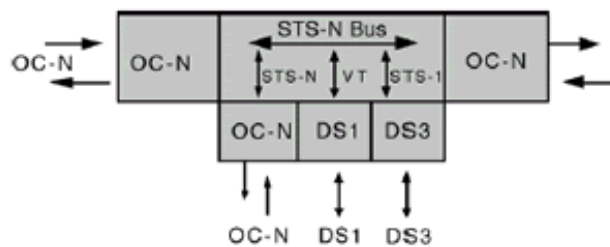


Εικ. 5.2

Αναγεννητής Σήματος

- **Πολυπλέκτες Προσθαφαίρεσης (Add/Drop Multiplexers – ADMs):**

Οι συγκεκριμένες συσκευές αναλαμβάνουν να αποπολυπλέξουν μόνο τα σήματα που είναι απαραίτητο να προσπελάσουν στο δεδομένο σημείο του δικτύου, ενώ τα υπόλοιπα περνούν διαβατικά δίχως να υποστούν οποιαδήποτε επεξεργασία. Οι πολυπλέκτες αυτοί επιτρέπουν αυτοί επιτρέπουν τη διασύνδεση μεταξύ των σημάτων SONET/SDH και των διαφορετικών τύπου σημάτων στο δίκτυο.

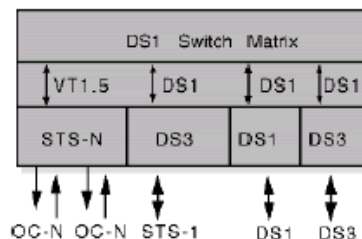


Εικ. 5.3

Πολυπλέκτης Προσθαφαίρεσης

- **Ψηφιακές Διατάξεις Ευρωζωνικής Διασύνδεσης (Wideband Digital Cross – Connects):**

Ο ρόλος τους έγκειται στο να δέχονται πολλαπλά οπτικά σήματα, προσπελάζοντας τα στοιχειώδη σήματα STS-1 και επιτρέποντας τη μεταγωγή τους στο επίπεδο αυτό. Τα στοιχεία αυτά καθιστούν δυνατή τη διασύνδεση πολύ μεγαλύτερου αριθμού STS-1 σημάτων, σε σχέση με τους πολυπλέκτες αποπολύπλεξης, λόγω του ότι γίνεται προσπέλαση και μεταγωγή μόνο των απαιτούμενων σημάτων. Τα χαρακτηριστικά αυτών των συσκευών, τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές διαχείρισης δικτύων.

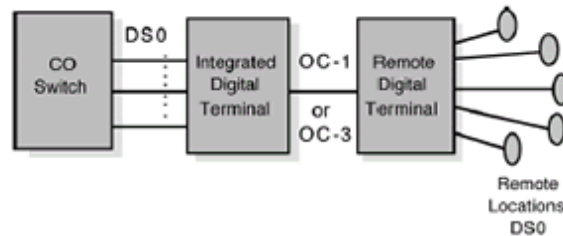


Εικ. 5.4

Ψηφιακές Διατάξεις Ευρωζωνικής Διασύνδεσης

- **Μεταφορείς Ψηφιακού Βρόγχου (Digital Loop Carriers- DLCs):** Η συσκευή αυτή περιλαμβάνει ένα σύνολο πολυπλεκτών και διακοπών και μπορεί να θεωρηθεί ως ένα

είδος συγκεντρωτικών υπηρεσιών χαμηλών ταχυτήτων, προτού αυτές εισέλθουν στο Τηλεπικοινωνιακό Κέντρο (CO). Με αυτόν τον τρόπο, ο αριθμός των συνδρομητών που μπορεί να εξυπηρετηθούν δεν περιορίζεται από τον αριθμό των γραμμών που εξυπηρετούνται από το CO.



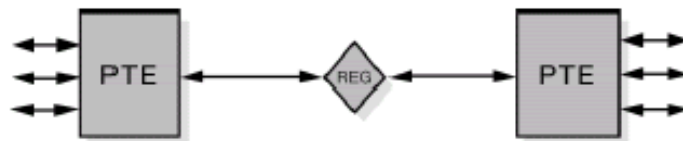
Εικ. 5.5

Μεταφοράς ψηφιακού Βρόγχου

5.1.2 Αρχιτεκτονικές Δικτύων SONET/SDH

Μετά την εξέταση των δομοστοιχείων του δικτύου Sonet/SDH , κρίνεται σκόπιμη η παράθεση των δυνατών αρχιτεκτονικών ενός τέτοιου δικτύου :

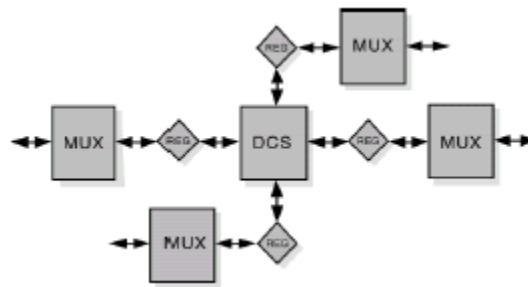
- Σημείο-σημειακή (point-to-point) Αρχιτεκτονική: Στην απλούστερη έκδοση του περιλαμβάνει δύο τερματικούς πολυπλέκτες (PTE), οι οποίοι συνδέονται μέσω οπτικής ίνας, με ή χωρίς συσκευή αναγέννηση σήματος (regenerator). Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελεί ταυτόχρονα και την απλούστερη υλοποίηση δικτύων SONET/SDH.



Εικ. 5.6

Αρχιτεκτονική Σημείου-πολυσημειακή

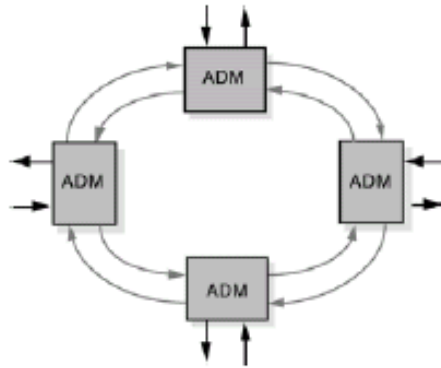
- Δίκτυο κομβικού σημείου (Hub Network) : Ένα “Hub” αποτελεί το κομβικό σημείο εκκίνησης στο δίκτυο , επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την επανατροφοδότηση (reprovisioning) των κυκλωμάτων.



Εικ. 5.7

Αρχιτεκτονική Κομβικού Σημείου (Hub)

- Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture): Τα βασικά δομικά στοιχεία αυτής της διαμόρφωσης είναι τα ADMs, τα οποία και τοποθετούνται σε τοπολογία δακτυλίου επιτρέποντας την κατεύθυνση της πληροφορίας προς μία ή και προς τις δύο κατευθύνσεις. Το κύριο πλεονέκτημα της αρχιτεκτονικής δακτυλίου είναι η ύπαρξη εναλλακτικής διαδρομής για αναδρομολόγηση σε περίπτωση βλάβης.



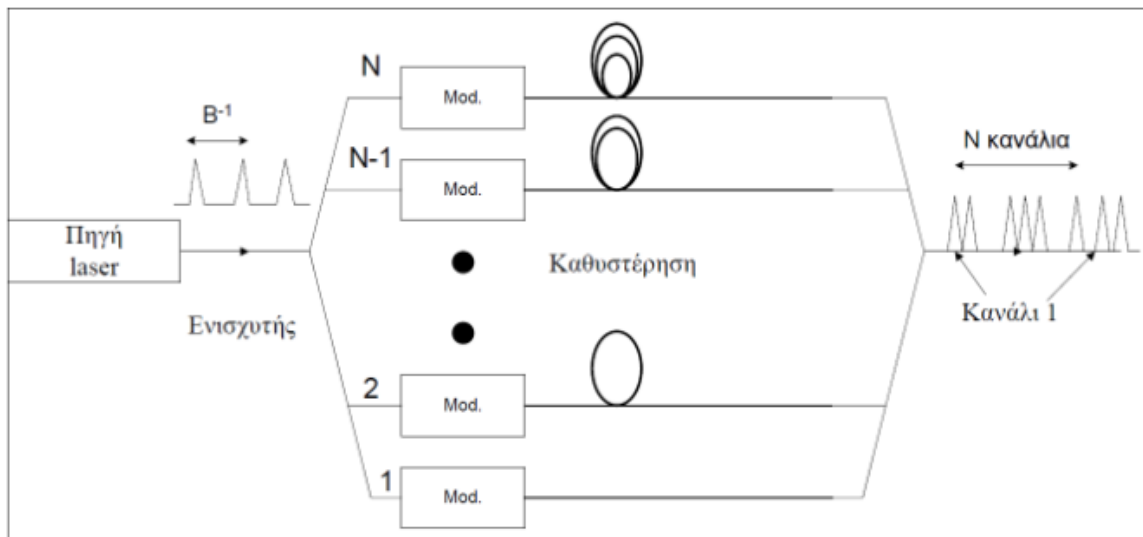
Εικ. 5.8

Αρχιτεκτονική Δακτυλίου (Ring Architecture)

5.2 Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (TDM)

Η πολυπλεξία (multiplexing) είναι μία τεχνική στην οποία ένας αριθμός ανεξάρτητων σημάτων μπορεί να συνδυαστεί σε σύνθετο σήμα κατάλληλο για μετάδοση σε ένα κοινό δίαυλο επικοινωνίας. Για να μεταδώσουμε ένα αριθμό τέτοιων σημάτων στον ίδιο φορέα, πρέπει τα σήματα να κρατηθούν απομακρυσμένα, να μην επηρεάζονται μεταξύ τους και έτσι ώστε να μπορούν να διαχωριστούν εύκολα στη λήψη. Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στο χρόνο ονομάζεται Πολυπλεξία Διαίρεσης Χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM).

Με χρήση της O-TDM, N οπτικά σήματα με ρυθμό μετάδοσης B χρησιμοποιούν την ίδια φέρουσα συχνότητα (μήκους κύματος) και πολυπλέκονται σχηματίζοντας ένα οπτικό σήμα με ρυθμό μετάδοσης NB . Στο σχήμα που ακολουθεί , παρουσιάζεται ένας πομπός OTDM, οποίος χρησιμοποιεί αμιγώς οπτικές τεχνικές πολυπλεξίας.



Εικόνα 5.14

Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος OTDM πομπού, ικανού να πολυπλέξει N κανάλια.

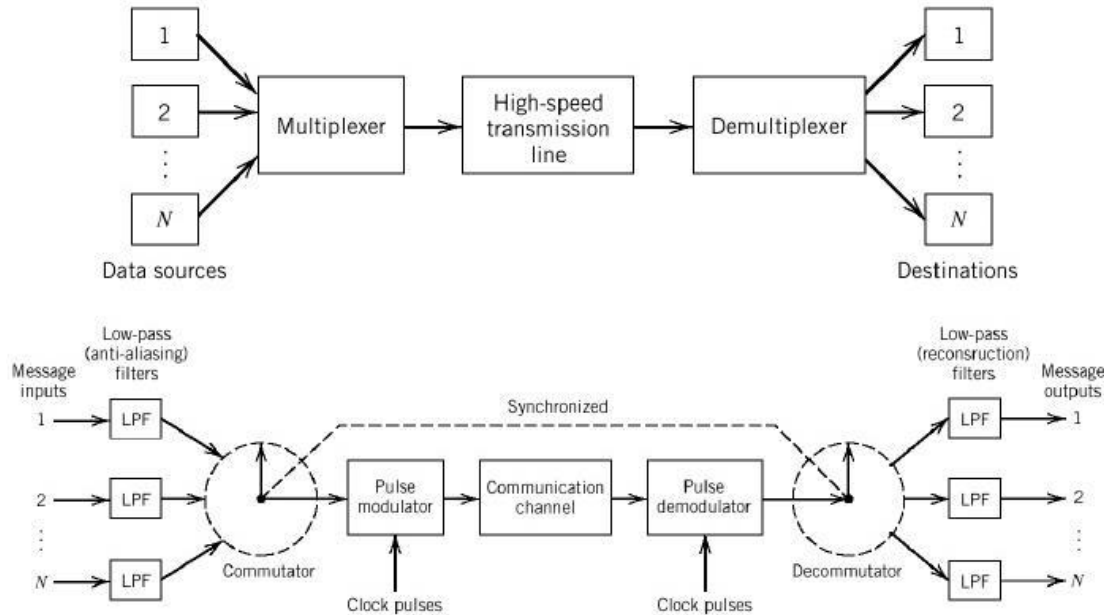
Ένα **laser** παράγει περιοδικούς παλμούς με ρυθμό επανάληψης ίσο προς τον ρυθμό μετάδοσης bit του κάθε καναλιού, B . Το πλάτος κάθε παλμού ισούται με T_p , όπου $T_p < (NB)^{-1}$ και N ο αριθμός των πολυπλεγμένων καναλιών, με αποτέλεσμα κάθε παλμός της εξόδου του laser να ταιριάζει στη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η έξοδος του laser διαιρείται εξίσου σε N βραχίονες (προηγείται η ενίσχυση, όπου χρειάζεται) και ένας διαμορφωτής παρεμποδίζει τον αντίστοιχο παλμό για κάθε bit 0 (κατάσταση off), οπότε τελικά παράγονται N ανεξάρτητες ηλεκτρικές ροές bit με ρυθμό μετάδοσης B , που πολυπλέκονται και δίνουν το σύνθετο οπτικό σήμα με ρυθμό μετάδοσης NB .

Η πολυπλεξία επιτυγχάνεται με μία τεχνική καθυστέρησης, όπου η διαμορφωμένη ροή bit στον n βραχίονα ($n=1,2,\dots,N$) καθυστερεί κατά $(n-1)/(NB)$, και το σύνθετο οπτικό σήμα δημιουργείται από τον συνδυασμό των εξόδων των N βραχιόνων έχει διάρκεια χρονοθυρίδας bit ίση με $T_B = (NB)^{-1}$.

Απαραίτητη για τη χρησιμοποίηση συστημάτων που χρησιμοποιούν την OTDM τεχνική είναι και η ανάπτυξη οπτικών δεκτών νέου τύπου, όπου η αποπολυπλεξία πραγματοποιείται ηλεκτρο-οπτικά ή καθαρά οπτικά. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των τεχνικών αποπολυπλεξίας αποτελεί η ύπαρξη ενός σήματος χρονισμού, δηλαδή μιας σειράς περιοδικών παλμών (ηλεκτρικών ή οπτικών) με ρυθμό μετάδοσης ίσο προς αυτόν ενός απλού καναλιού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω, αιτία ανάπτυξης της τεχνικής **OTDM** αποτέλεσε η ανάγκη για αντιμετώπιση των προβλημάτων της WDM τεχνικής. Πράγματι, η **OTDM** τεχνική παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τη δυνατότητα απλούστερης διαχείρισης του δικτύου και τη μεγαλύτερη προσφορά χωρητικότητας, δηλαδή την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση του εύρους ζώνης της οπτικής ίνας.

Επιπρόσθετα, επιτυγχάνεται μείωση των προβλημάτων που προκαλούνται εξαιτίας των μη γραμμικών φαινομένων, καθώς πλέον γίνεται χρήση ενός μόνο μήκους κύματος από τα πολυπλεγμένα οπτικά σήματα, ενώ παράλληλα η απαίτηση για μία μόνο ζεύξη μεταξύ πομπού και δέκτη καθιστά την τεχνική OTDM πιο συμφέρουσα από οικονομικής απόψεως.



Εικ. 5.9

Δομικό Διάγραμμα του Συστήματος TDM

Όπως περιγράφεται και στο δομικό διάγραμμα TDM, στην είσοδο του πολυπλέκτη κάθε σήμα πληροφορίας περιορίζεται αρχικά σε εύρος ζώνης από ένα βαθυπερατό φίλτρο που χρησιμοποιείται για να αφαιρέσει τις συχνότητες που δεν είναι σημαντικές για την ικανοποιητική αναπαράσταση του σήματος. Οι έξοδοι των βαθυπερατών φίλτρων στη συνέχεια εφαρμόζονται σε ένα μεταγωγέα (commutator) που υλοποιείται συνήθως με χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η λειτουργία του μεταγωγέα είναι διπλή:

i) να πάρει ένα στενού εύρους δείγμα καθεμιάς από τις N πληροφορίες εισόδου με ρυθμό δειγματοληψίας $1/T$, που είναι μεγαλύτερος από το $2W$, όπου το W είναι η συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου εισόδου και

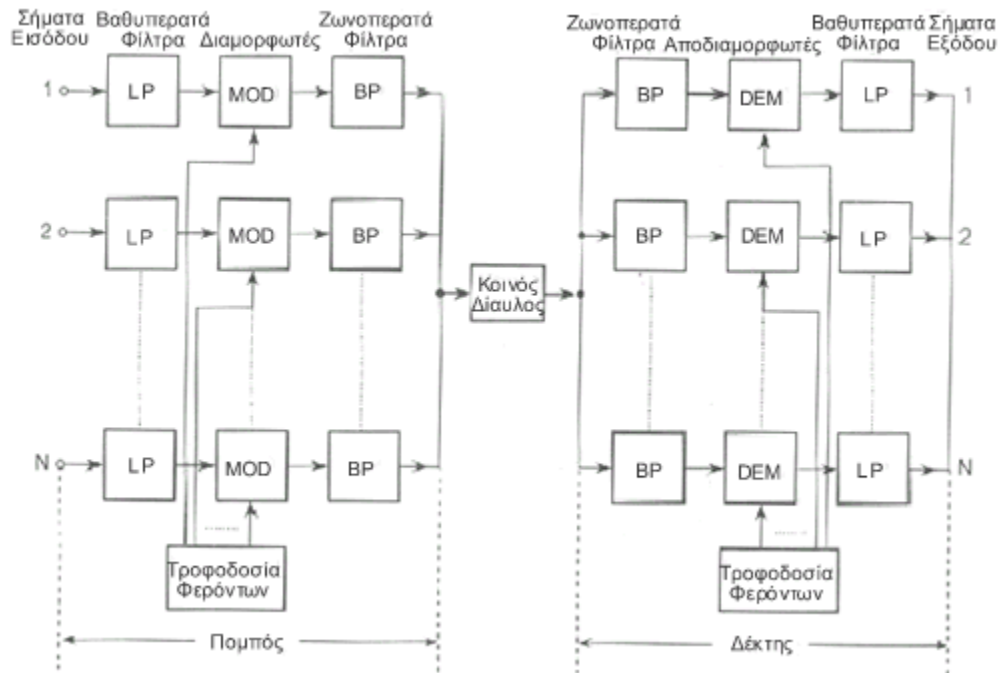
ii) να ενοποιήσει αυτά τα N δείγματα μέσα σε ένα διάστημα μετάδοσης. Στην πραγματικότητα, η τελευταία λειτουργία είναι η ουσία της λειτουργίας πολύπλεξης με διαίρεση του χρόνου. Μετά τη διαδικασία μεταγωγής, το πολυπλεγμένο σήμα εισέρχεται σε ένα διαμορφωτή παλμών (pulse modulator), ο σκοπός του οποίου είναι να μετασχηματίσει το πολυπλεγμένο σήμα σε μια μορφή πιο κατάλληλη για μετάδοση μέσω του κοινού διαύλου. Είναι φανερό ότι η χρήση της πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου αυξάνει σημαντικά το εύρος ζώνης, επειδή η διάταξη πρέπει να διαχειριστεί N δείγματα που προέρχονται από N ανεξάρτητες πηγές πληροφορίας σε χρονική περίοδο ίση με το διάστημα δειγματοληψίας. Στην πλευρά λήψης του συστήματος, το λαμβανόμενο σήμα οδηγείται σε έναν αποδιαμορφωτή παλμών (pulse demodulator) που εκτελεί την αντίστροφη λειτουργία από το διαμορφωτή παλμών. Τα στενού πλάτους δείγματα που παράγονται στην έξοδο του αποδιαμορφωτή, διανέμονται στα κατάλληλα φίλτρα ανακατασκευής μέσω ενός μεταγωγέα (decommutator), που λειτουργεί σε συγχρονισμό με τον μεταγωγέα του πομπού.

Η πολυπλεξία με **διαίρεση χρόνου** και η πολυπλεξία με **διαίρεση συχνότητας** (που περιγράφεται στην ενότητα 5.3) αποτελούν τις **δύο βασικές μορφές πολυπλεξίας** που χρησιμοποιούνται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται στην μεταγωγή κυκλώματος.

Στο σημείο χρειάζεται να τονισθεί πως οι τεχνικές WDM & OTDM αποτελούν δύο συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά είδη πολυπλεξίας, που ο συνδυασμός τους αποτελεί τη βέλτιστη λύση των σύγχρονων οπτικών συστημάτων επικοινωνίας για αύξηση της απόδοσης τους μέσα από τη χρήση οπτικών καναλιών με υψηλές ταχύτητες μετάδοσης.

5.3 Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (FDM)

Η τεχνική διαχωρισμού των σημάτων στη συχνότητα αναφέρεται σαν Πολυπλεξία Διαίρεσης Συχνότητας (Frequency Division Multiplexing - FDM). Η αρχή της FDM απεικονίζεται στο διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10

Δομικό Διάγραμμα του Συστήματος FDM

Τα εισερχόμενα σήματα πληροφορίας θεωρούνται βαθυπερατά, αλλά τα φάσματά τους δεν έχουν απαραίτητα μη μηδενικές τιμές όσο πλησιάζουμε τη μηδενική συχνότητα. Μετά το κάθε σήμα εισόδου φαίνεται ένα βαθυπερατό φίλτρο, το οποίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να αποκόπτει συνιστώσες υψηλής συχνότητας που δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην αναπαράσταση του σήματος, αλλά είναι δυνατόν να παρενοχλούν άλλα σήματα πληροφορίας που μοιράζονται τον κοινό δίαυλο.

Αυτά τα βαθυπερατά φίλτρα μπορούν να παραλειφθούν μόνο αν τα σήματα εισόδου είναι επαρκώς περιορισμένα σε εύρος ζώνης από την αρχή. Τα φιλτραρισμένα σήματα

εφαρμόζονται σε διαμορφωτές που μετατοπίζουν τις περιοχές συχνοτήτων των σημάτων, έτσι ώστε να καταλαμβάνουν διαφορετικά μεταξύ τους περιοχές συχνοτήτων. Οι απαραίτητες φέρουσες συχνότητες για αυτές τις μετατοπίσεις συχνοτήτων, λαμβάνονται μέσω μιας γεννήτριας φέρουσων συχνοτήτων. Για τη διαμόρφωση χρησιμοποιούμε τη διαμόρφωση απλής πλευρικής ζώνης. Τα ζωνοπερατά φίλτρα που ακολουθούν τους διαμορφωτές χρησιμοποιούνται για να περιορίσουν τη ζώνη ή κάθε διαμορφωμένης κυματομορφής στο προδιαγεγραμμένο της εύρος. Οι προκύπτουσες έξοδοι των

ζωνοπερατών φίλτρων, στη συνέχεια συνενώνονται, έτσι ώστε να σχηματίσουν την έξοδο στον κοινό δίαυλο. Στην πλευρά της λήψης χρησιμοποιείται μια σειρά ζωνοπερατών φίλτρων, με τις εισόδους τους συνδεδεμένες παράλληλα, για να διαχωρίσει τα σήματα πληροφορίας με βάση τη ζώνη ή συχνοτήτων που καταλαμβάνουν. Τελικά τα αρχικά σήματα πληροφορίας επανακτώνται και οδηγούνται σε ξεχωριστούς αποδιαμορφωτές.

Παρατηρείστε ότι το παραπάνω σύστημα FDM λειτουργεί μόνο κατά τη μία κατεύθυνση. Για να εξασφαλίσουμε μετάδοση δύο κατευθύνσεων, όπως στην τηλεφωνία, θα πρέπει να διπλασιάσουμε πλήρως όλη τη διάταξη πολυπλεξίας, με τα στοιχεία της συνδεδεμένα με αντίθετη φορά και με τα σήματα να προχωρούν από τα δεξιά προς τ' αριστερά.

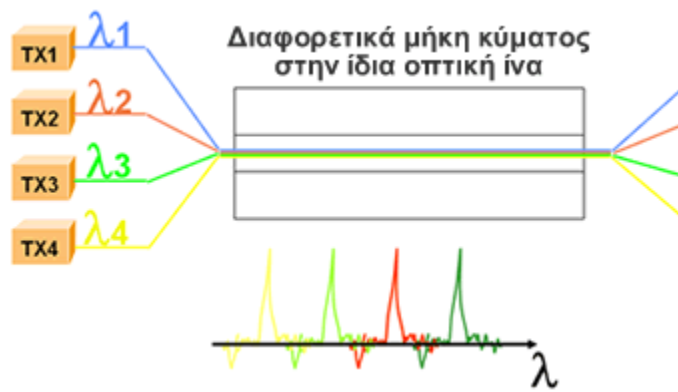
5.3.1 Πολυπλεξία Orthogonal FDM

Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μετάδοσης με πολυπλεξία FDM (frequency Division Modulation) ήταν ότι παρόλο που τα σήματα-σύμβολα ήταν μεγάλης χρονικής διάρκειας, η παράλληλη μετάδοση τους δεν μπορούσε να γίνει χωρίς να υπάρχει κάποια , έστω και μικρή, φασματική επικάλυψη τους στο πεδίο της συχνότητας. Για να υπάρξει λύση στο φαινόμενο αυτό που θα είχε ως επακόλουθο την απώλεια χρήσιμης πληροφορίας και την υποβάθμιση της ποιότητας επικοινωνίας, έπρεπε να διατηρούνται μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών υποκαναλιών. Οι αποστάσεις αυτές ήταν αρκετά μεγάλες και είχα ως αποτέλεσμα τη δέσμευση μεγάλου εύρους ζώνης σε σχέση με την μεταδιδόμενη πληροφορία. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε με την , OFDM (Orthogonal FDM) η οποία κρίθηκε ως η καταλληλότερη μέθοδος για μετάδοση υψηλού ρυθμού δεδομένων. Όπως και στην απλή OFDM η βασική ιδέα της OFDM διαμόρφωσης ήταν η φασματική διαίρεση του προς μετάδοση σήματος ευρείας ζώνης σε μεγάλο βαθμό υποκαναλιών στενής ζώνης.

5.4 Πολυπλεξία με Διάρθρωση Μήκους Κύματος (WDM)

Για την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των οπτικών ινών και την μεγιστοποίηση του μεταφερόμενου όγκου δεδομένων μέσα από μια ίνα, έχει εφαρμοσθεί τα τελευταία χρόνια μια νέα τεχνολογία, η τεχνολογία της Πολυπλεξίας με Διάρθρωση Μήκους Κύματος (Wavelength Division Multiplexing - WDM). [6]

Η τεχνολογία αυτή συνίσταται στην πολυπλεξία [6] οπτικών σημάτων με διαφορετικά μήκη κύματος και την μετάδοσή τους μέσα από μια μόνο οπτική ίνα. Η βασική ιδέα πάνω στην οποία στηρίχτηκε η νέα τεχνολογία ήταν η εξής: σε κάθε οπτική ίνα το οπτικό σήμα που διαδίδεται έχει μια συγκεκριμένη φέρουσα συχνότητα. Είναι δυνατόν από την ίδια ίνα να περάσουν περισσότερα του ενός διαφορετικά σήματα διαφορετικής συχνότητας ή αλλιώς διαφορετικού μήκους κύματος μιας και μιλάμε για οπτικά σήματα, που το καθένα να μεταφέρει διαφορετικά δεδομένα. Τα παραπάνω φαίνονται πολύ παραστατικά στο Σχήμα 5.11:



Σχήμα 5.11
Πολυπλεξία με Διαίρεση Μήκους Κύματος

Έτσι, σε ένα σύστημα **WDM**, ένα πλήθος διαφορετικών σημάτων μεταφέρονται υπό τη μορφή διακριτών μηκών κύματος ή καναλιών μέσω της οπτικής ίνας και αποπολυπλέκονται στο σημείο λήψης. Όπως και με τη μέθοδο **TDM**, που χρησιμοποιείται από την τεχνολογία SONET/SDH, η ολική χωρητικότητα του μέσου είναι το άθροισμα της χωρητικότητας των εισερχόμενων σημάτων, με τη διαφορά ότι καθένα από τα σήματα αυτά μεταφέρεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι κάθε κανάλι έχει το δικό του, αποκλειστικό, εύρος ζώνης.

Το προφανέστερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας WDM εντοπίζεται στη δυνατότητά της να παρέχει τεράστια αύξηση (πρακτικά απεριόριστη) της χωρητικότητας μετάδοσης. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα της WDM συνοψίζονται στα παρακάτω:

- **Διαφάνεια (Transparency):** Δεδομένου ότι η WDM αποτελεί μια αρχιτεκτονική στο φυσικό επίπεδο, είναι δυνατή η διαφανής υποστήριξη τόσο της TDM τεχνολογίας όσο και δεδομένων τυποποιήσεων όπως ATM, Gigabit Ethernet, ESCON και Fibre Channel, επιτυγχάνοντας τη διασύνδεση διαφόρων υπηρεσιών μέσω του κοινού φυσικού μέσου.
- **Κλιμάκωση Μεγέθους (Scalability):** Επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της οπτικής ίνας, ειδικότερα σε επίπεδο, μητροπολιτικών και επιχειρησιακών δικτύων.
- **Δυναμική Παροχή Εύρους Ζώνης (Dynamic Provisioning):** Η ταχύτατη, απλή και με δυναμικό τρόπο παροχή των δικτυακών συνδέσεων, δίνουν τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλών ταχυτήτων για ικανοποίηση αναγκών των χρηστών μέσα σε διάστημα ολίγων ημερών παρά μηνών.

21

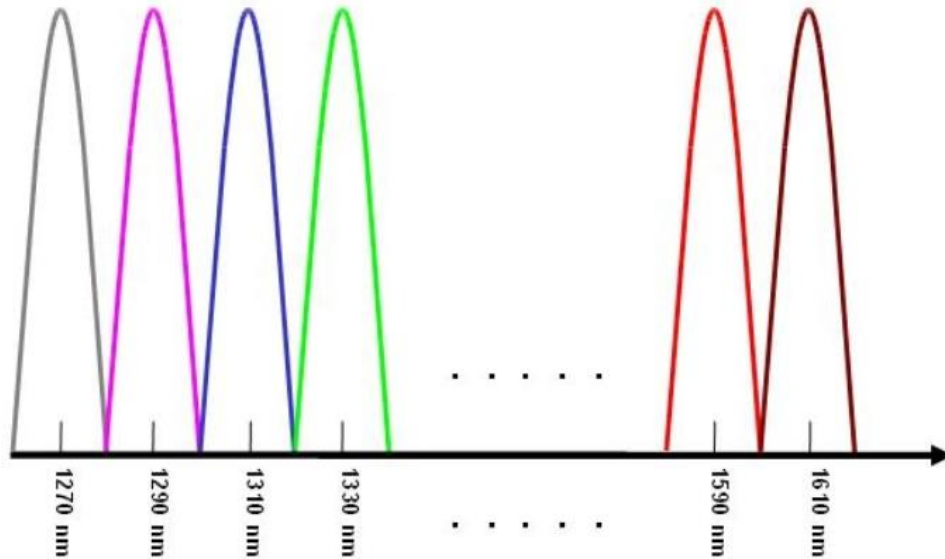
Συμπληρωματικά θα αναφέρουμε ότι η μεταφορά πολλαπλών WDM καναλιών πάνω από μία οπτική ίνα επιτυγχάνει πλήρως αξιοποίηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, ενώ παράλληλα τα δομικά στοιχεία των δικτύων WDM μπορούν ευκολότερα να υλοποιηθούν ρυθμούς μετάδοσης ανά κανάλι ίσο με αυτό των ηλεκτρονικών πομποδεκτών.

Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες όσων αφορά την πολυπλεξία μήκους κύματος στα σημερινά συστήματα WDM. Η διάκριση μεταξύ τους έχει να κάνει με τον αριθμό καναλιών καθώς και την

απόσταση μεταξύ τους, για το λόγο αυτό διακρίνονται σε Coarse-WDM και Dense-WDM. Ακολουθεί μία αναλυτικότερη περιγραφή των παραπάνω κατηγοριών. [6]

5.4.1 Πολυπλεξία Coarse WDM (CWDM)

Στην τεχνική Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM) χρησιμοποιούνται λίγα κανάλια για να καλύψουν το οπτικό εύρος της οπτικής ίνας, με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Τα σύγχρονα CWDM συστήματα χρησιμοποιούν μόλις 18 κανάλια τα οποία βρίσκονται μεταξύ 270nm και 1610nm με απόσταση μεταξύ καναλιών 0nm. Σαν απόσταση μεταξύ δύο καναλιών ορίζεται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12

Coarse WDM πολυπλεξία

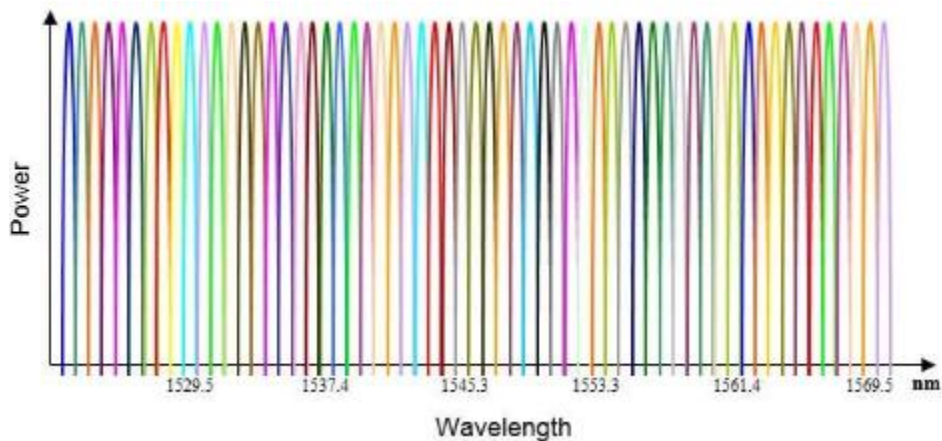
Η τεχνική **Coarse Wavelength Division Multiplexing (CWDM)** χρησιμοποιείται κυρίως για να καλυφθεί το οπτικό εύρος της οπτικής ίνας για μεγάλες αποστάσεις μεταξύ λίγων καναλιών, για την ακρίβεια χρησιμοποιούνται 18 κανάλια που τοποθετούνται σε αποστάσεις μεταξύ 1270nm ανάμεσα σε κανάλια 20nm.

Επί προσθέτως κάθε κανάλι διακρίνεται από εύρος 13nm κατά προσέγγιση που δύναται να προσφέρει ανεξαρτησία σε κάθε κανάλι συνδυαστικά με την μεγάλη τους απόσταση. Εξαιτίας της απόστασης τα κανάλια δεν ασκούν μεγάλη επιρροή στα γειτονικά κανάλια, κάτι που βοηθάει και από οικονομικής πλευράς αφού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε φθηνά οπτικά στοιχεία. Η προαναφερθείσα τεχνολογία υστερεί στη μαζική ενίσχυση λόγω μεγάλης απόστασης των καναλιών, συνεπώς είτε δεν γίνεται ενίσχυση με αποτέλεσμα η απόσταση να περιορίζεται σε μερικές δεκάδες χιλιόμετρα είτε τα κανάλια ενισχύονται χωριστά με αποτέλεσμα την επιβάρυνση κόστους στο διαδίκτυο. [6]

5.4.2 Πολυπλεξία Dense WDM (DWDM)

Στην τεχνική **Dense WDM** χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερα κανάλια με σκοπό να καλύψουν το οπτικό εύρος της ίνας. Η τεχνική αυτή καλύπτει την περιοχή συχνοτήτων 1550nm και όπως μπορούμε να διακρίνουμε στην παρακάτω Εικόνα(5.13) τα κανάλια βρίσκονται σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα η απόσταση δεν ξεπερνά τα 100 GHz. Βέβαια οι νεότερες τεχνολογίες χρησιμοποιούν εξοπλισμό αποστάσεων 50 και 25 GHz.

Το **πλεονέκτημα** αυτής της τεχνικής είναι ο μεγάλος αριθμός των διαθέσιμων καναλιών, σε μικρό σε μικρό εύρος ζώνης οπτικής ίνας. Επίσης μπορούν να αξιοποιήσουν τους οπτικούς ενισχυτές, αφού βρίσκονται πολύ κοντά τα κανάλια μεταξύ τους και μπορούν να ενισχυθούν μαζικά. Το μειονέκτημα είναι ότι λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ τους, τα κανάλια επηρεάζουν όλα τα άλλα DWDM κανάλια του συστήματος και τα γραμμικά (εξασθένηση, διασπορά) και μη γραμμικά φαινόμενα , περιορίζουν κατά πολύ την απόσταση μετάδοσης.

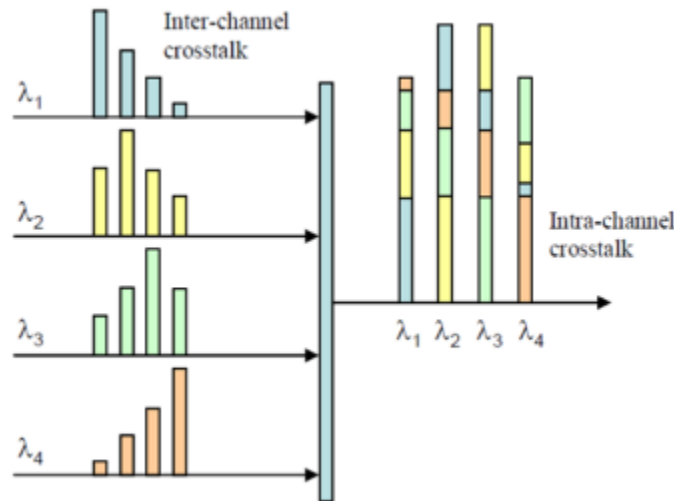


Εικόνα 5.13
Dense WDM Πολυπλεξία

Ένα άλλο φαινόμενο που επηρεάζει την μετάδοση σε ένα DWDM σύστημα είναι το **crosstalk** [7] , το οποίο είναι η επίδραση που έχει το κάθε κανάλι στα γειτονικά και μη του κανάλια. Χωρίζεται σε δύο κατηγορίες :

- To inter-channel crosstalk και
- To intra-channel crosstalk

ανάλογα με το τι το προκαλεί. Αυτό φαίνεται στη επόμενη εικόνα :



Εικόνα 5.14
Crosstalk μεταξύ DWDM Καναλιών

Το **inter-channel crosstalk** [7] προκαλείται από μη καλό φιλτράρισμα των καναλιών, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα να μην φιλτράρονται καλά κάποιες συχνότητες που χρησιμοποιούνται από άλλα κανάλια όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα. Το φίλτρο του καναλιού λ_1 δεν κόβει τελείως τις γειτονικές συχνότητες με αποτέλεσμα τα λ_2, λ_3 και λ_4 να επηρεάζονται.

Το **intra-channel crosstalk** [7] προκαλείται από ατελή πολυπλεξία και αποπολυπλεξία καναλιών κατά την διάρκεια μιας μετάδοσης. Όταν δεν γίνεται σωστή πολυπλεξία ή αποπολυπλεξία, τα intra-channel στοιχεία προστίθενται στην κεντρική συχνότητα, όπως φαίνονται με διαφορετικό χρώμα στην εικόνα παραπάνω. Και καθώς είναι στο ίδιο μήκος κύματος με την κεντρική συχνότητα που καναλιού και δεν μπορούν να αφαιρεθούν, είναι απαραίτητα να μειώνονται πάντοτε στο ελάχιστο.

6. Τεχνολογία Φωτονικής Πυριτίου

Οι διασυνδέσεις στα δίκτυα , τόσο ως ένα συμβατικό δίκτυο δεδομένων ή όσο intrachip ή interchip συνδέσεις δεδομένων, συνεχίζουν και αναβαθμίζουν την πολυπλοκότητα και το εύρος ζώνης. Οι περιορισμοί του χαλκού ως μέσο διασύνδεσης όσον αφορά τις απώλειες, την διασπορά, το crosstalk και την θεμελιώδη ταχύτητα είναι όλο και πιο εμφανείς , όσο η πυκνότητα διασύνδεσης αυξάνεται. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της οπτικής διασύνδεσης, ειδικότερα της Φωτονικής Πυριτίου, η οποία έχει αναδειχθεί ως η κορυφαία υποψήφια τεχνολογία λόγω του μοναδικού συνδυασμού του δυνητικού χαμηλού κόστους, των βελτιώσεων στην απόδοση λόγω της προοπτικής της φωτονικής και ηλεκτρονικής/φωτονικής ολοκλήρωσης, καθώς και της συμβατότητας με την πιο επιτυχημένη ηλεκτρονική τεχνολογία παραγωγής, CMOS.

Σε βάθος χρόνου , η μετάβαση από την **ηλεκτρική** στην **οπτική** τεχνολογία θα εισέλθει στην αγορά διασυνδέσεων (interconnect market) όπου οι μεγαλύτερου μήκους συνδέσεις από τις συνδέσεις μικρών αποστάσεων , οι οποίες χρειάζονται μεγαλύτερο εύρος ζώνης , θα είναι πιο εφικτό να τις εκτοπίσουν. Στη συνέχεια η διείσδυση των οπτικών συνδέσεων σε πολύ μικρές αποστάσεις θα έρθει εν καιρώ, όσο η τεχνολογία γίνεται περισσότερο αποδοτική από πλευράς κόστους και έχει αυξανόμενες απαιτήσεις εύρους ζώνης. Οι διασυνδέσεις βρίσκουν εφαρμογή σε Desktop διασυνδέσεις , από mobile σε server διασυνδέσεις καθώς και σε data centers με υψηλές υπολογιστικές επιδόσεις.

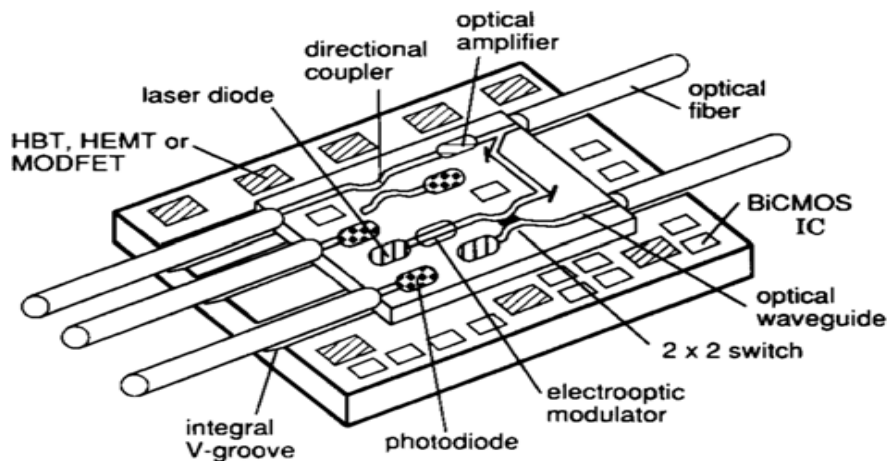
Ενώ η εφαρμογή διασύνδεσης είναι κυρίαρχη, με ενεργά οπτικά καλώδια να έχουν ήδη φθάσει στην αγορά , ένα πολύπλοκο intrachip διασυνδέει το αντικείμενο της προηγμένης έρευνας για υπολογιστές υψηλών επιδόσεων ενώ υπάρχει και μια πληθώρα άλλων περιοχών εφαρμογής που θα επωφεληθούν από την επιτυχία των Silicon photonics. Αυτές περιλαμβάνουν οπτικές ίνες έως στο σπίτι (FTTH) ή ίνες στις εγκαταστάσεις (FFTP), την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, βιολογικούς και χημικούς αισθητήρες, ιατρικές και στρατιωτικές εφαρμογές, αστρονομία κλπ. Ωστόσο , η οπτική διασύνδεση είναι το πιο σημαντικό θέμα αυτή την στιγμή εξαιτίας της επείγουσας ανάγκης για εφαρμογή. Οι πρόσφατες βελτιώσεις στο **εύρος ζώνης** σε ηλεκτρονικές διασυνδέσεις έγιναν λόγω της αυξημένης latency και της κατανάλωσης ενέργειας. Η οπτική διασύνδεση θα μπορούσε να αποφέρει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την ηλεκτρονική διασύνδεση αντίστοιχα δηλαδή θα μπορούν να επιτρέπουν το διαχωρισμό των ηλεκτρικών συσκευών, και τον επαναδιαχωρισμό της πλατφόρμας διατηρώντας τους υψηλούς ρυθμούς δεδομένων. Μπορούν επίσης να εισάγουν πιο συμβατικά πλεονεκτήματα της οπτικής τεχνολογίας, όπως η μείωση της EMI , τα καλώδια και το βάρος , καθώς και πιο σύνθετο σχέδιο παρουσιάζοντας enabling modules και βελτιστοποιημένη ψύξη. Τέλος μπορούν να «χαλαρώσουν» την πυκνότητα διασύνδεσης, την εξοικονόμηση ενέργειας, και να διατηρούν την ακρίβεια του ρολογιού και το σήμα χρονισμού [8]. Η πιθανή εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική, καθώς το προβλεπόμενο θερμικό φορτίο που μπορεί να αφαιρεθεί από ένα chip, με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, παραμένει αμετάβλητο στο άμεσο μέλλον [9]. Δεδομένου ότι η διασύνδεση θα καταναλώνει το 80% της ενέργειας του επεξεργαστή [9], και η ενέργειας της διασύνδεσης διακομιστή υπερβαίνει τη συνολική ενέργεια που παράγεται από την ηλιακή ενέργεια [10], η οπτική διασύνδεση μπορεί δυνητικά να προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας [11][12].

Για κάθε διασύνδεση (interconnection), η οπτική διαμόρφωση είναι μία από τις κύριες λειτουργίες που απαιτείται σε ένα φωτονικό κύκλωμα. Μια οπτική πηγή μπορεί είτε άμεσα είτε έμμεσα να διαμορφωθεί. Η έμμεση/εξωτερική διαμόρφωση προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα συγκρινόμενη με την άμεση/απευθείας διαμόρφωση. Η οπτική πηγή μπορεί να είναι οικονομικά σχετικά και η λειτουργία της δεν μπορεί να «παραβιαστεί» από την απευθείας/άμεση διαμόρφωση, η ταχύτητα της διαμόρφωσης μπορεί να είναι υψηλότερη, η άμεση φάση διαμόρφωσής είναι δυνατή [13] και η οπτική απομόνωση καθώς και η σταθεροποίηση του μήκους κύματος χρειάζεται να γίνει μία φορά για ολόκληρο το σύστημα.

Όσον αφορά το IC σήμερα, από τότε που εφευρέθηκε από την Texas Instruments το 1958, έχει γίνει ευρέως διαδεδομένο και μπορεί να βρεθεί σχεδόν σε κάθε σύγχρονη συσκευή. Η βιομηχανία των IC στηρίζεται στην προμήθεια των μη δαπανηρών, υψηλής ποιότητας δισκίων πυριτίου. Στις αρχές του 1980 και στα μέσα της δεκαετίας του 1990, παρασκευάστηκε ένα νέου τύπου δισκίο, Silicon-on-Insulator, από τρεις προσεγγίσεις: Μικρομηχανική πυριτίου σε μονωτή (διαχωρισμός με την εμφύτευση οξυγόνου – SIMOX) [12], συγκόλληση και οπίσθια εγχάραξη της επιφάνειας του πυριτίου σε μονωτή (BESOI) [13], smart cut (έξυπνη κοπή) [14], προσφέροντας πλεονεκτήματα για να μειωθούν οι παρασιτικές χωρητικότητες για τα ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τα υποστρώματα SOI είναι ιδανικές επιλογές για τα συστήματα κυματοδότησης [63] λόγω της ικανότητας τους να περιορίζουν το φως σε μεγάλο βαθμό μέσα στο ανώτερο στρώμα του πυριτίου, καθώς επίσης και οι εξαιρετικές θερμικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες.

Ακολουθώντας την πρωτοποριακή εργασία από τον Soref et al. [16,20], στα μέσα της δεκαετίας του 80', οι νεότερες και περισσότερες έρευνες για την φωτονική πυριτίου επικεντρώθηκαν σε παθητικούς κυματοδηγούς και σε ενεργές συσκευές όπως οι διακόπτες (switches) και οι διαμορφωτές (modulator), η οποία πρόσφερε τις θεμελιώδεις μελέτες για τα βασικά δομικά στοιχεία της τεχνολογίας του πυριτίου. Από τότε που η κεντροσυμμετρική κρυσταλλική δομή του πυριτίου εμποδίζει το γραμμικό ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο, οι Soref και Lorenzo [20] παρουσίασαν την οπτικό-ακουστική περίθλαση στο πυρίτιο και πρότειναν την επίδραση πλάσματος ελεύθερου φορέα στην εργασία τους το 1986. Επιπλέον, τα εξασθενημένα **φαινόμενα** πυριτίου **Kerr** και **Franz-keldysh** που αναφέρθηκαν [20] ως πιθανοί μηχανισμοί για ενεργό έλεγχο των συσκευών πυριτίου. Δεν ήταν μέχρι το 2004 ότι αυτές οι έννοιες υλοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν σε ενεργά switches και διαμορφωτές.

Το όραμα ενός ολοκληρωμένου οπτο-ηλεκτρονικού κυκλώματος πυριτίου (OEIC) δημιουργήθηκε από τον Abstreiter [177] το 1993. Αργότερα εκείνο το έτος, ο Soref [16,19] διεύρυνε την έννοια παρουσιάζοντας ένα OEIC superchip πυριτίου χρησιμοποιώντας οπτικούς κυματοδηγούς πυριτίου όπως φαίνεται κ στην **Εικόνα 6**.



Εικόνα 6 Οπτο-ηλεκτρονικό ολοκληρωμένο κύκλωμα superchip βασισμένο στο πυριτίου παρουσιάζεται από τον Soref

Η ολοκλήρωση (Integration) της **Φωτονικής** με την **Ηλεκτρονική** προήχθη σε μια προσπάθεια να παρέχει περισσότερες λειτουργίες και βελτιωμένη απόδοση σε χαμηλό κόστος. Ωστόσο η αναποτελεσματικότητα στην εκπομπή δέσμης φωτός του πυριτίου αποθαρρύνονται οι εξελίξεις στην ΟΕΙC. Κατά την περίοδο 1993-2003, υπήρξε πολύ λίγο πρόοδος στο γενικό πεδίο της φωτονικής πυριτίου. Το σημείο καμπής ήρθε το 2004, λόγω των μεγάλων επενδύσεων σε SOI CMOS χυτήρια από την βιομηχανία και την κυβέρνηση. Οι ερευνητικές προσπάθειες τείνουν προς i) διακριτές φωτονικές συσκευές και ii) τεχνικές υβριδικής ολοκλήρωσης. Οι επόμενες υπο-ενότητες δείχνουν την πρόοδο της έρευνας σχετικά με παθητικές, ενεργές και ενσωματωμένες καθώς και τις εφαρμογές τους.

6.1 Διαμόρφωση σε Si

6.1.1 Υπόβαθρο Διαμορφωτών

Η **Φωτονική διαμόρφωση** παραδοσιακά συνδέεται με το **Φαινόμενο Pockels [14]** σε σιδηροηλεκτρικά υλικά όπως το Νιοβικό λίθιο (LiNbO_3) και τις ομάδες III-V ημιαγωγών με την προηγούμενη να επαίρεται έναν μεγαλύτερο ηλεκτρο-οπτικό συντελεστή **[15]**. Το πυρίτιο εγγενώς περιορίζεται ως υλικό οπτικής διαμόρφωσης εξαιτίας της κεντροσυμμετρικής κρυσταλλικής δομής του που σημαίνει ότι δεν παρουσιάζει ένα **γραμμικό ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο** (Pockels effect). Αυτό αφήνει το φαινόμενο της διασποράς πλάσματος και την θερμική διαμόρφωση ως τους μόνους βιώσιμους μηχανισμούς **[16]**. Η Θερμική διαμόρφωση είναι εκ φύσεως αργή, έτσι το φαινόμενο της διασποράς πλάσματος ευνοείται για τις περισσότερες εφαρμογές. Το Φαινόμενο διασποράς πλάσματος σχετίζεται με την πυκνότητα των ελεύθερων φορέων ενός ημιαγωγού, η οποία αλλάζει τόσο τα πραγματικά μέρη όσο και τα φανταστικά μέρη του δείκτη διάθλασης.

Ξεκινώντας από το μοντέλο **Drude-Lorenz [17]**, **Soref** και **Bennett [16]** παρήγαγαν τους ακόλουθους εξαιρετικά χρήσιμους εμπειρικούς όρους, που χρησιμοποιούνται τώρα σχεδόν παγκοσμίως για να αξιολογούν τις μεταβολές που οφείλονται στην εμφύτευση ή στην αφαίρεση των φορέων σε πυρίτιο. Σε ένα οπτικό μήκος κύματος $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$,

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}], \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h, \quad (2)$$

Όπου Δn_e = μεταβολή του δείκτη διάθλασης που προκύπτει από την μεταβολή των συγκεντρώσεων φορέων ελεύθερων ηλεκτρονίων; Δn_h = μεταβολή του δείκτη διάθλασης που προκύπτει από την μεταβολή των συγκεντρώσεων φορέων ελεύθερων οπών; $\Delta \alpha_e$ = μεταβολή στην απορρόφηση που προκύπτει από την μεταβολή στις συγκεντρώσεις φορέα ηλεκτρονίου; $\Delta \alpha_h$ = μεταβολή στην απορρόφηση που προκύπτει από την μεταβολή συγκεντρώσεων φορέων ελεύθερης οπής.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό του διαμορφωτή πυριτίου ηλεκτρο-απορρόφησης που είναι βασικής σημασίας για τα συστήματα μικροκυμάτων, είναι η εκ φύσεως γραμμικότητα η οποία φαίνεται στον όρο (2). Η απορρόφηση είναι άμεσα ανάλογη με τις πυκνότητες ηλεκτρονίου και οπών, οι οποίες είναι γραμμικά ανάλογες με το ρεύμα της συσκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μία εγγενή γραμμική στατική ηλεκτροοπτική συνάρτηση μεταφοράς, μια θετική συμπεριφορά σε αναλογικές εφαρμογές. Ωστόσο, μια θα πρέπει να είναι γνώστης της διαμόρφωσης φάσης, που περιγράφεται από τον όρο (1), η οποία συνοδεύει την διαμόρφωση πλάτους. Στις οπτικές διασυνδέσεις όπου η διασπορά οπτικών ινών είναι σημαντική, η μετατροπή επαγόμενης διασποράς μεταξύ φάσης και πλάτους, μια εγγενής μη γραμμική διαδικασία, θα είναι πηγή δυναμικής μη-γραμμικότητας.

6.1.2 Πρόοδος σε Διαμορφωτές Πυριτίου (Si modulator)

Οι διαμορφωτές (**modulators**) και οι διακόπτες (**switches**) πυριτίου ήταν μεταξύ των πρώτων φωτονικών διατάξεων πυριτίου που πρέπει να μελετηθεί και έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης έρευνας από τότε. Ενώ είναι αδύνατο να παράσχει πλήρη κάλυψη των διαμορφωτών εδώ, θα συζητηθούν αρκετά παραδείγματα στη συνέχεια. Μια πιο αναλυτική επισκόπηση των διαμορφωτών μπορεί να βρεθεί [18].

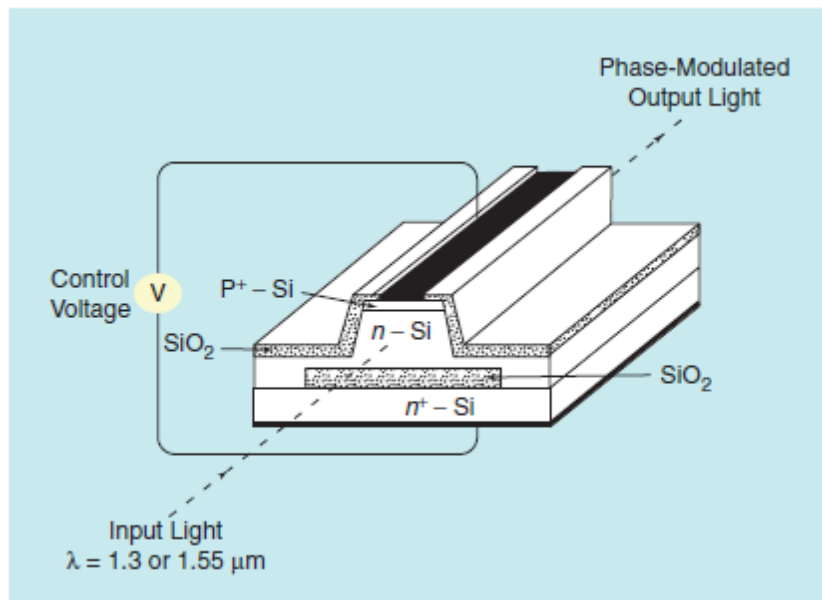
Ο πρώτος **διαμορφωτής διασποράς πλάσματος** σε πυρίτιο προτάθηκε από τον Soref et. al. [19]. Αυτός ο $p^+ - n - n^+$ διαμορφωτής βασίζεται σε έναν κυματοδηγό single-mode κομματιού πυριτίου. Διαπιστώθηκε με την μοντελοποίηση ότι το μήκος αλληλεπίδρασης του διαμορφωτή που απαιτείται για μετατόπιση φάσης π -ακτίνια ήταν λιγότερο από 1mm. Η αντίστοιχη απώλεια ήταν λιγότερη από 1dB σε $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ και για τους δύο τρόπους ορθογώνιας πόλωσης.

Το 1987 ο **Lorenzo et. Al.** [20] ανέφερε τον πρώτο 2X2 ηλεκτρο-οπτικό διακόπτη σε πυρίτιο. Ο διακόπτης κατασκευάστηκε ως κάθετη $p^+ - n$ δίοδος. Η έγχυση οπών στο σημείο τομής των κυματοδηγών διέλευσης προκάλεσε μια αλλαγή στον δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα μια περιορισμένη μεταγωγή. Για την πυκνότητα ρεύματος εισόδου $J = 1,26 \text{ kA/cm}^2$, που εφαρμόζεται στον $p^+ n$ κόμβο, η συσκευή αντιμετώπισε μια κατάσταση όπου υπήρχε μεταβολή του 50% της οπτικής ισχύς από την έξοδο απευθείας μέσω της θύρας του καναλιού 3 προς την έξοδο του καναλιού διασύνδεσης στην θύρα 4. Αν και η συσκευή δεν βελτιστοποιήθηκε, επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα να εφαρμοστεί το φαινόμενο διασποράς πλάσματος.

Στα τέλη της δεκαετίας του '80, ο **Friedman et al.** [21][22] πρότειναν και ανέλυσαν θεωρητικά διαμορφωτές φάσης σε σειρές από δομές τρανζίστορ ενσωματωμένες στις πλευρές των κυματοδηγών. Οι συσκευές βασίστηκαν στα MOSFETs, χρησιμοποιώντας διάχυση τύπων απλού φορέα (οπές ή ηλεκτρόνια) ή τρανζίστορ επίδρασης πεδίου διπλής διάχυσης (DIFET).

Το εγχεόμενο φορτίο στα DIFET έπρεπε να ελέγχεται από το Φαινόμενο πεδίου επαφής στο οποίο μια μεταβλητή τάσης *εξάντλησης/αραίωσης* πλάτους ελέγχει την αποτελεσματικότητα της περιοχής ενεργούς διατομής του αγώγιμου καναλιού. Οι συγγραφείς προέβλεψαν αποτελεσματικές αλλαγές της τάσης του 1×10^{-3} για εφαρμοζόμενες τάσεις πύλης 10 έως 20 V. Επίσης πρότειναν συσκευές διπλής πύλης, οι οποίες προσφέρουν καλύτερη επικάλυψη του ελλειπτικού πεδίου με διάχυση φορέων, αν και η κατασκευή των δύο πυλών είναι ανέφικτη για τις πιθανές δομές SOI (Silicon on Insulator). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, επειδή σημειώθηκαν μεταβολές του δείκτη διάθλασης πάνω στα λεπτά στρώματα, οι συσκευές θα είναι βέλτιστες σε μικρούς κυματοδηγούς, σε ύψος της τάξεως των 0,1μm. Την εποχή εκείνη, αυτό θεωρήθηκε υπερβολικά μικρό, αλλά καθώς η πρόσφατη τάση για μικρότερες διαστάσεις διατομής συνεχίζεται, και οι νανοφωτονικές συσκευές λαμβάνονται πιο σοβαρά υπόψη, μερικές από τις πρώιμες/αρχικές συσκευές επανεξετάζονται. Κατά την δεκαετία του 1990, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος στην βελτιστοποίηση των οπτικών διαμορφωτών, που ως επί το πλείστον βασίζονται στην εξέλιξη των κυματοδηγών Silicon-on-Insulator, παρά στο πυρίτιο σε ένα ντοπαρισμένο υπόστρωμα πυριτίου.

Η εργασία των Tang et. al. το 1994 για την υποστήριξη ενός προγενέστερου άρθρου προσομοίωσης το 1993 [23] – [25], έδειξε ότι ήταν δυνατόν να ληφθεί μία αύξηση 30% στην συγκέντρωση διάχυσης φορέων στην περιοχή κυματοδήγησης ενός διαμορφωτή φάσης αλλάζοντας την πλευρική γωνία της πλευράς από κάθετη στην εκ φύσεως 54.7° (**Εικόνα 6.1**).



Εικόνα 6.1

Μια πρόσφατη πρόταση ενός ηλεκτρο-οπτικού διαμορφωτή φάσης σε πυρίτιο.[24]

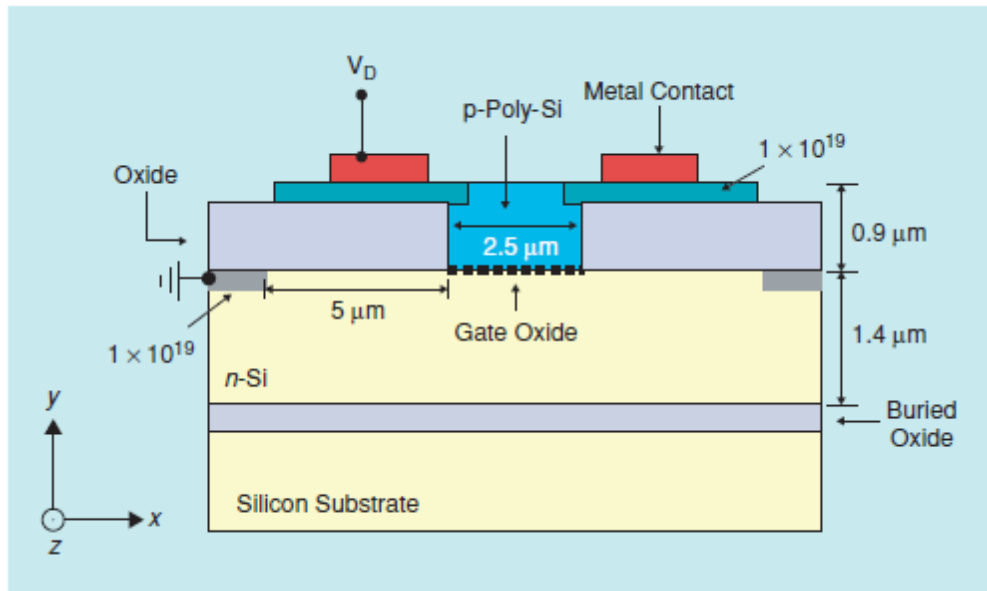
Επίσης, μειώνοντας τις διαστάσεις [26] της συσκευής και παρουσιάζοντας διατάξεις απομόνωσης τάφρου (trench isolation) [27] διαπιστώθηκε ότι είναι τα βασικά στοιχεία για την αύξηση της απόδοσης. Το 2000, **Dainesi et al.** ανέφερε ένα πλήρως ολοκληρωμένο Mach-Zehnder (MZI) CMOS-Compatible με τεχνολογία Silicon-On-Insulator (SOI) [28]. Ένα τύπο εγκάρσιας λωρίδας p- και n-doping περιοχές χρησιμοποιήθηκε για να διαμορφώσει την οπτική φάση διαμέσου των φαινομένων διασποράς πλάσματος.

Το ασθενές ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο σε πυρίτιο απαιτεί μακρόστενες συσκευές και παρεμποδίζει τα υψηλά επίπεδα ολοκλήρωσης, αυξάνοντας το κόστος. Ενίσχυση της κουλότητας

του φαινομένου μπορεί, καταρχήν, να οδηγήσει σε αποτελεσματική διαμόρφωση [29]. Η μικροκοιλότητα διευκολύνει την συγκράτηση του οπτικού πεδίου σε μια μικρή περιοχή, και η εκπομπή της συσκευής κοντά στον συντονισμό της είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις αλλαγές μικρού δείκτη στην κοιλότητα. **Barrios et al. [30]** μοντελοποίησε ένα διαμορφωτή που βασίζεται σε ένα αντηχείο Fabry-Perot με Bragg ανακλαστήρες. Η συσκευή απαιτεί μια χαμηλή συγκέντρωση διάχυσης φορέων για μετάβαση σε μια θέση μη αντήχησης/συντονισμού. Η συσκευή μήκους 20μm είχε προβλεφθεί να απαιτεί συνεχές ρεύμα της τάξης των 25μW σε λειτουργία με μήκος κύματος 1,55μm για να επιτευχθεί 31-MHz εύρος ζώνης λειτουργίας με διαπερατότητα 86% και βάθος διαμόρφωσης 80%.

Μια παρόμοια συσκευή αλλά χρησιμοποιώντας ένα RR (10 μm διάμετρος) έχει παρουσιαστεί πρόσφατα [31]. Οι συσκευές υψηλής κλίμακας χρησιμοποιούν κυματοδηγούς πλάτους 450 nm και ύψους 250 nm. Αντί της ηλεκτρικής διάχυσης, ελεύθεροι φορείς εισήχθησαν οπτικά δια της απορρόφησης δύο-φωτονίων χρησιμοποιώντας ultrashort παλμούς. Η ενίσχυση της ισχύος δομή αντηχήσεως μειώνει την απαίτηση ισχύος για την μεταγωγή. Τα βάθη διαμόρφωσης έως και 94% μετρήθηκαν με χρόνους μεταγωγής/διακοπής μικρότερους από 500ps, γεγονός που υποδηλώνει ρυθμό επανάληψης ~700MHz. Σε γενικές γραμμές, οι συσκευές που βασίζονται σε αντηχείο κάνουν χρήση υψηλών Q factors για να ενισχύσουν την απόδοση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ελεύθερων φορέων και του οπτικού πεδίου. Βασικά, αυτό έρχεται να επιβαρύνει το εύρος ζώνης και στις περισσότερες περιπτώσεις, οδηγεί επίσης σε συμπεριφορά εξαρτημένης πόλωσης. Περαιτέρω βελτιώσεις παρήχθησαν από την ίδια ομάδα σε μεταγενέστερο άρθρο [32].

Πρόσφατα, οι ερευνητές από την **Intel Corporation** παρουσίασε σαν πείραμα έναν οπτικό διαμορφωτή που βασίζεται στο πυρίτιο με εύρος ζώνης που υπερβαίνει το 1 GHz [33]. Ένα σχέδιο της αναφερόμενης συσκευής, η οποία λειτουργεί μέσω του φαινομένου διασποράς πλάσματος, φαίνεται στην **Εικόνα 6.2** και παρουσιάζει ομοιότητα με ένα CMOS τρανζίστορ. Η δομή της συσκευής αποτελείται από κρυσταλλικό πυρίτιο n-type με ένα ανώτερο τοίχωμα πολυπυριτίου p-τύπου. Οι n-τύπου και p-τύπου περιοχές διαχωρίζονται από ένα λεπτό μονωτικό στρώμα οξειδίου. Κατά την εφαρμογή μιας θετικής τάσης στο πολυπυρίτιο p-τύπου, φορτισμένοι φορείς συσσωρεύονται στην διαχωριστική επιφάνεια οξειδίου, αλλάζοντας την κατανομή του δείκτη διάθλασης στην συσκευή. Αυτό με την σειρά του προκαλεί μια μετατόπιση φάσης στο οπτικό κύμα το οποίο μεταδίδεται μέσω της συσκευής.



Εικόνα 6.2

Διάγραμμα ενός οπτικού διαμορφωτή βασιζόμενο στο πυρίτιο Si που παρουσιάζετε πειραματικά να υπερβαίνει το 1GHz εύρος ζώνης [33].

Το εύρος ζώνης της συσκευής (ένας μονός διαμορφωτής φάσης μήκους 2.5mm) χαρακτηρίστηκε με δύο τρόπους σε ένα ολοκληρωμένο ασύμμετρο MZI. Η πρώτη τεχνική ήταν να οδηγηθεί η συσκευή με μια τάση 0.18 V_{rms} ημιτονοειδής πηγή στα 1,558 μm, χρησιμοποιώντας lensed ίνες για την σύζευξη εντός και εκτός της συσκευής. Η δεύτερη δοκιμή ήταν η εφαρμογή ενός πρότυπου ψηφιακού παλμού 3.5-V με μια συνεχή τάση πόλωσης 3V. Μια ακολουθία 1 Gbit/s ψευδοτυχαίων bit εφαρμόστηκε στη συσκευή, και ένας φωτοδέκτης υψηλού εύρους ζώνης χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση του μεταδιδόμενου οπτικού σήματος. Ωστόσο, η απώλεια on-chip για την συσκευή αυτήν ήταν υψηλή, στα ~6.7 dB, και είναι επίσης εξαρτώμενη και υψηλά πολωμένη λόγω της οριζόντιας πύλης οξειδίου. Η απόδοση της διαμόρφωσης φάσης για *TE* πόλωση είναι μεγαλύτερο από την *TM* πόλωση με συντελεστή 7. Όλες οι μετρήσεις που αναφέρθηκαν, έγιναν για πόλωση *TE* (*Transverse Electric*). Οι συγγραφείς εν συνεχεία βελτίωσαν την συσκευή αντικαθιστώντας το χαμένο/με απώλειες στρώμα πολυπυριτίου (polysilicon) με κρυσταλλικό πυρίτιο, βελτιστοποιώντας έτσι την πρόσμιξη και συρρικνώνοντας τις διαστάσεις της συσκευής, με αποτέλεσμα μια ταχύτερη συσκευή [34]. Αυτό παρουσιάστηκε υλοποιώντας μετάδοση δεδομένων στα 6 Gb/s (4.5 dB λόγος απόσβεσης) και στα 10 Gb/s (3.8 dB λόγος απόσβεσης). Επίσης πρότειναν ότι με την περαιτέρω βελτιστοποίηση μπορούσαν να επιτύχουν απόσβεση πάνω από 12 dB και chip loss μόνο 2 dB.

Μία άλλη πρόσφατη μελέτη υπέδειξε ότι οι διαμορφωτές πυριτίου είναι έτοιμοι να προωθηθούν ακόμα πιο γρήγορα. Ο **Gan et al.** παρείχε μοντελοποίηση μιας μικρής συσκευής p-i-n προτείνοντας εγγενές εύρος ζώνης πέραν των 20 GHz [35]. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα μονωτικό στρώμα και λεπτές επαφές για να παρέχουν περιορισμό φορέα. Είναι χρήσιμο να συγκρίνουμε τους πρόσφατα αναφερόμενους διαμορφωτές (**Πίνακας 6.1**) για να δούμε την τάση βελτίωσης της ταχύτητας της συσκευής. Αυτό ακολουθείτε από την

μοντελοποίηση των Png et al. [36] , η οποία επίσης προτείνει διαμορφωτές p-i-n που θα μπορούσαν να είναι σχετικά γρήγοροι.

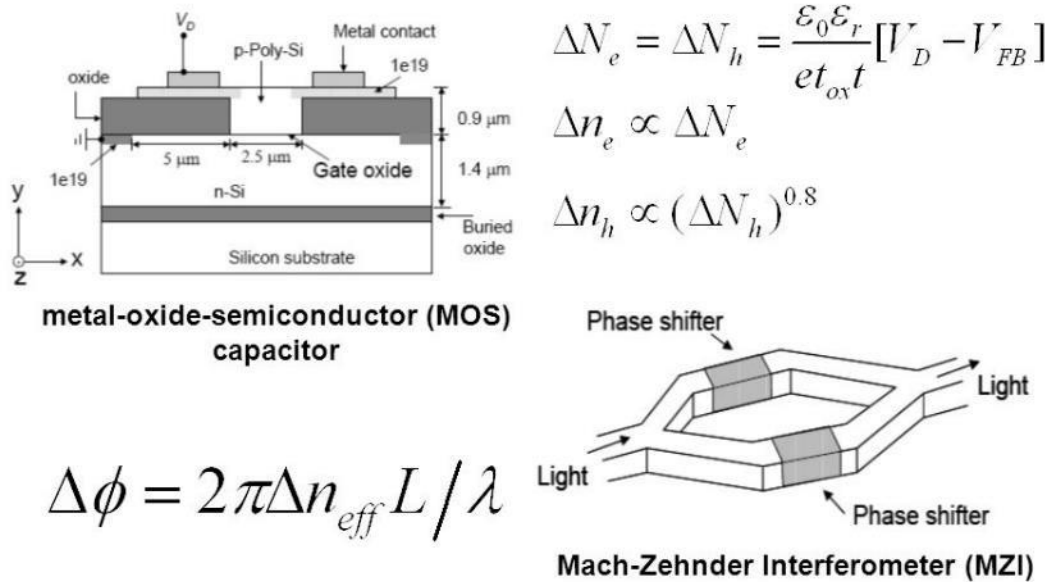
TABLE 1. Silicon plasma dispersion modulators recently reported in the literature.						
Year	Author	Electrical structure	Optical structure	Dc power (mW)	Switching time (ns)	Length (μm)
2003	Png et al. [51]	p-i-n	MZI	~0.56	0.51	>500
2004	Liu et al. [48]	MOS	MZI	~0	~0.6	10,000
2005	Liao et al. [49]	MOS	MZI	~0	~0.1	3,500
2005	Xu et al. [47]	p-i-n	RR	~0	~0.35	14
2005	Gan et al. [50]	p-i-n	MZI	~500	~0.042	1,000

Πίνακα 6.1

Η **Luxtera Inc.** μια νεοσύστατη εταιρία , πρόσφατα ανακοίνωσε έναν διαμορφωτή πυριτίου ικανό να λειτουργεί στα 10 Gb/s , αν και μερικές λεπτομέρειες της συσκευής έχουν ανακοινωθεί [37].

Τέλος, ένας ενδιαφέρον διαμορφωτής αναφέρθηκε πρόσφατα από τον Boyraz et al. [39]. Το laser Raman που θα αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, συνδυάστηκε με έναν διαμορφωτή πυριτίου p-i-n, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την διάχυση ελεύθερων φορέων για να καταστείλει το lasing στην συσκευή , και ως εκ τούτου, να εισάγει την διαμόρφωση. Έναν σχετικά μεγάλο διαχωρισμό p και n περιοχών 8 μm χρησιμοποιήθηκε για να εκτελεί την λειτουργία, με αποτέλεσμα ένα εύρος ζώνης διαμόρφωσης να είναι μόνο 1 MHz , αν και η νέα παρουσίαση ενός διαμορφωμένου λέιζερ πυριτίου ήταν σημαντική. Το laser **Continuous Wave (CW)** αναφέρθηκε από τον Rong et al. [38] και όπως συζητήθηκε προηγουμένως, περιλαμβάνει μια δομή p-i-n , αυτή την φορά σε αντίστροφη πόλωση για να καταστείλει φορείς. Αυτή η συσκευή έχει χρησιμοποιηθεί για να παρουσιάσει έναν διαμορφωτή χωρίς απώλειες συνδυάζοντας ενίσχυση Raman με απομάκρυνση ελεύθερων φορέων.

Γενικά, ο **οπτικός διαμορφωτής** είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει μία δέσμη φωτός που διαδίδεται είτε σε ελεύθερο χώρο είτε σε οπτικό κυματοδηγό. Η συσκευή μπορεί να αλλάζει διάφορες παραμέτρους της δέσμης και επομένως οι οπτικοί διαμορφωτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως διαμορφωτές πλάτους, φάσης ή πόλωσης. Επιπλέον, οι διαμορφωτές μπορούν να ταξινομηθούν σε **δύο λειτουργικές κατηγορίες** : ηλεκτρο-διαθλαστικοί και ηλεκτρο-απορροφητικοί.



Εικόνα 6.3

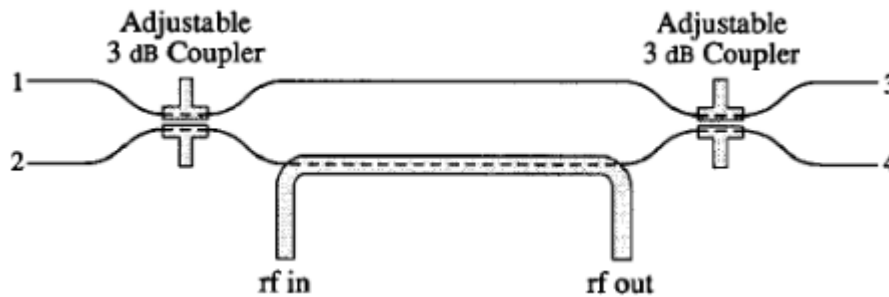
Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα υλικό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των πραγματικών και των φανταστικών δεικτών διάθλασης. Μια αλλαγή ενός πραγματικού διαθλαστικού δείκτη n με ένα εφαρμοσμένο ηλεκτρικό πεδίο που είναι γνωστό ως electro-refraction και μια αλλαγή στο φανταστικό μέρος ενός δείκτη διάθλασης k με εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο γνωστό ως electroabsorption. Τα πρωτεύοντα φαινόμενα ηλεκτρικού πεδίου που είναι χρήσιμα σε υλικά ημιαγωγών για να προκαλέσουν είτε ηλεκτρο-απορρόφηση είτε ηλεκτρο-διάθλαση είναι το **Pockels effect**, **Kerr effect** και το **Franz-Keldysh effect**. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί ότι αυτά τα φαινόμενα αυτά είναι αδύναμα στα μήκη κύματος $1.3 \mu\text{m}$ και $1.55 \mu\text{m}$ [16],[17] που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες. Ως εκ τούτου πρέπει να βρεθεί εναλλακτική διαμόρφωση για το πυρίτιο.

Μία επιλογή είναι η χρήση **θερμικής διαμόρφωσης (thermal modulation)**, όπου το πυρίτιο παρουσιάζει μεγάλο θερμο-οπτικό συντελεστή, αν και παρουσιάζετε μεγάλη καθυστέρηση στις υψηλές συχνότητες στις νέες εφαρμογές επικοινωνιών. [42]

6.1.3 Συμβολόμετρο Mach-Zehnder (MZI)

Τα συμβολόμετρα **Mach-Zehnder (Mach-Zehnder Interferometer (MZI))** είναι γενικά οπτικές συσκευές που βασίζονται στο φαινόμενο της συμβολής. Τυπικά ενεργοποιούνται με κάποιο σήμα εισόδου ενώ στη συνέχεια χωρίζουν το σήμα αυτό σε δύο υποσήματα χρησιμοποιώντας κάποιο διαχωριστή (συνήθως κάτοπτρα μερικής εκπομπής), και εν συνεχεία

υποβάλλοντας την ακτίνα σε κάποιες εξωτερικές επιδράσεις, (πχ. αλλαγή μήκους κύματος ή χρονική ολίσθηση) και τελικά ενώνοντας τα δύο υποσήματα σε ένα μοναδικό. Η ισχύς ή η μορφή του σήματος εξόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές όπως για παράδειγμα μετρήσεις. Λειτουργεί με συμβολή διαίρεσης πλάτους. Το συμβολόμετρο Mach-Zehnder αναπτύχθηκε από τους φυσικούς Ludwig Mach και Ludwig Zehnder. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 6.4** χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς διαχωριστές σήματος για να διαχωρίσει και να συνδυάσει τα σήματα, και έχει δύο εξόδους που μπορεί να συνδέονται σε φωτοανιχνευτές ή άλλες διατάξεις.



Εικόνα 6.4

Σχηματική αναπαράσταση συμβολόμετρων Mach-Zehnder

Τα μήκη που διανύουν τα σήματα στα δύο σκέλη της διάταξης αυτής μπορεί να είναι είτε ίσα είτε διαφορετικά (χρησιμοποιώντας οπτικές γραμμές καθυστέρησης). Η κατανομή της οπτικής ισχύος στα δύο σκέλη καθορίζεται από τη διαφορά των μηκών των κλάδων της διάταξης και τη συχνότητα του οπτικού σήματος. Αν το συμβολόμετρο είναι καλά ευθυγραμμισμένο η διαφορά των μηκών των κλάδων του μπορεί να προσαρμοστεί (πχ. κινώντας ένα από τα κάτοπτρα ή τοποθετώντας διαφορετικού μήκους ίνα) με τέτοιο τρόπο ώστε για συγκεκριμένη οπτική συχνότητα το σύνολο της ισχύος να εξάγεται σε μία μόνο έξοδο. Για μη σωστά ευθυγραμμισμένες ακτίνες θα υπάρχουν σχηματισμοί κροσσών και στις δύο εξόδους, ενώ αυτές οι διακυμάνσεις στην διαφορά των μηκών στα σκέλη της εφαρμογής επηρεάζου ιδιαίτερα τη μορφή των κροσσών παρότι η κατανομή της ισχύος δεν αλλάζει ιδιαίτερα. [40][41]

6.2 Raman Σκέδαση

Σε αντίθεση με την **σκέδαση Rayleigh** όπου ένα φωτόνιο σκεδάζεται ελαστικά πάνω σε ένα άτομο ή μόριο και δεν μεταβάλλει το κυματάριθμό του και τη συχνότητά του. Έτσι προτάθηκε το 2002, η χρήση της **σκέδασης Raman** για να ξεπεραστεί η δομή έμμεσης ζώνης του πυριτίου, ως εναλλακτική προσέγγιση σε αυτά που περιγράψαμε παραπάνω [43]. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η ικανότητα να χρησιμοποιεί καθαρό πυρίτιο χωρίς την χρήση **νανοκρυστάλλων (NCs)** ή πρόσμιξη Ερβίου. Επομένως, είναι πλήρως συμβατό με την κατασκευή μικροηλεκτρονικών πυριτίου. Ο **παραδοσιακός** περιορισμός της προσέγγισης Raman είναι ότι δεν μπορεί να διεγερθεί ηλεκτρικά και απαιτεί αντλία off-chip. Από την άλλη πλευρά, με δεδομένο το γεγονός ότι το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα chips πολύ μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης (VLSI) είναι η κατανάλωση ισχύος, η χρήση laser off-chip αποτελεί πλεονέκτημα, δεδομένου ότι η δίοδος laser και τα κυκλώματα οδήγησης είναι κύρια πηγή

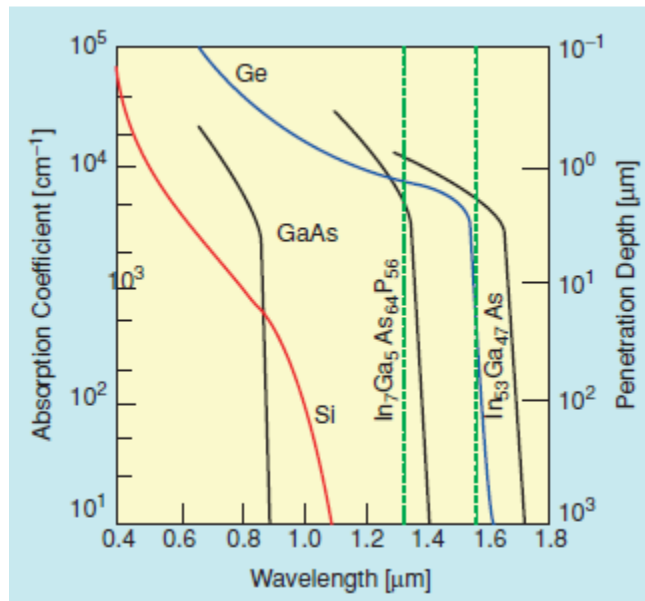
απώλειας ισχύος σε έναν οπτικός πομπό. Ένα άλλο πλεονέκτημα των συσκευών Raman είναι ότι αν και αντλούν οπτικά, μπορούν να διαμορφώνονται άμεσα χρησιμοποιώντας μια δίοδο ολοκλήρωσης. Ο μηχανισμός της διαμόρφωσης είναι παρόμοιος με εκείνους των οπτικών διαμορφωτών πυριτίου όπου γίνεται έκχυση φορέων που διαμορφώνουν την οπτική απορρόφηση του πυριτίου. Η σκέδαση Raman στους ημιαγωγούς είναι φαινόμενο καθαρά κβαντικής μηχανικής και η εξήγηση της είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής του παρόντος άρθρου. Ευτυχώς, υπάρχει ένα πολύ απλούστερο μακροσκοπικό μοντέλο που παρέχει μια ευκολονόητη εικόνα της σκέδασης Raman. Στην **αυθόρμητη σκέδαση**, θερμικές δονήσεις πλέγματος σε συχνότητα ω_p (15,6 THz σε πυρίτιο) παράγουν ημιτονοειδή διαμόρφωση της οπτικής ευαισθησίας. Η αντλία προσπίπτοντος πεδίου προκαλεί μία ηλεκτρική πόλωση που δίνεται από το γινόμενο της ευαισθησίας και του προσπίπτοντος πεδίου. Η ταλάντωση του προσπίπτοντος πεδίου (ω_p) με την ταλάντωση της ευαισθησίας παράγει επαγόμενες πολώσεις με το άθροισμα της συχνότητας $\omega_p + \Omega_N$ και με την διαφορά της συχνότητας $\omega_p - \Omega_N$. Στην **εξανασκασμένη σκέδαση** που είναι υπεύθυνη για την ενίσχυση και το lasing, η αλληλεπίδραση της αντλίας και των κυμάτων/γραμμών Stokes παράγει μια κατευθυντήρια δύναμη για ατομικές δονήσεις που ενισχύει την μεταφορά ενέργειας από την αντλία στο κύμα Stokes. Σε έναν ενισχυτή η προσπίπτουσα δέσμη ενισχύεται επιβαρύνοντας την δέσμη φωτός της αντλίας. Σε ένα laser, η εξανασκασμένη παραγωγή Stokes φωτονίων είναι σημαντικά ενισχυμένη μέσα σε μία κοιλότητα και παράγει μία ισχυρή δέσμη φωτός, όταν το κέρδος ισούται ή υπερβαίνει την απώλεια επιστροφής.

6.3 Ανιχνευτές Οπτικού Φωτός Si και Επόμενης Γενιάς Συσκευές

Λόγω της έντονης αντίθεσης του δείκτη μεταξύ ενός κυματοδηγού πυριτίου και του μέσου που τον περιβάλλει (αέρας ή διοξείδιο του πυριτίου), κάθε πεπερασμένη τραχύτητα της επιφάνειας οδηγεί σε σημαντικές απώλειες σκέδασης. Κατά συνέπεια, οι κυματοδηγοί πυριτίου χαρακτηρίζονται από απώλειες της τάξης του 0.1 έως 3 dB/cm ανάλογα με τις διαστάσεις και τις συνθήκες επεξεργασίας. Αυτά, μαζί τις απώλειες ίνας σε κυματοδηγό, έχουν περιορίσει την έκταση on-chip ολοκλήρωσης που μπορεί να επιτευχθεί. Έχοντας την δυνατότητα να ενισχύουν το φως, πολλές οπτικές συσκευές θα μπορούσαν να συμπίπτουν, φέρνοντας πιο κοντά τον τομέα κυκλωμάτων φωτονικής τα οποία διαθέτουν ένα σημαντικό επίπεδο πολυπλοκότητας.

6.3.1 Ανιχνευτές Οπτικού Φωτός (Si)

Οι **Ανιχνευτές Οπτικού Φωτός (PDs)**, που βασίζονται στο **πυρίτιο (Si)** χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές που λειτουργούν στο ορατό φάσμα (I.S., 0.4 – 0.7 μm) λόγω της σχεδόν τέλει απόδοσης τους σε αυτά τα ορατά μήκη κύματος. Ωστόσο, τα περισσότερα μήκη κύματος επικοινωνίας επικεντρώνονται στο εγγύς υπέρυθρο με μήκη κύματος 1.31 και 1.55 μm , μία περιοχή όπου το πυρίτιο είναι «κακός» ανιχνευτής.



Εικόνα 6.5

Συντελεστής απορρόφησης και βάθος διείσδυσης ποικίλων χύδην υλικών ως λειτουργία μήκους κύματος. Οι πράσινες διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τα μήκη κύματος για τα τηλεπικοινωνιακά όρια 1.310 μm και 1.550 μm .

Η **Εικόνα 6.5** δείχνει πειραματικά προσδιορισμένους συντελεστές απορρόφησης για διάφορα χύδην υλικά [44][45]. Από τότε που το πυρίτιο δεν απορροφά καλά κοντά στην περιοχή IR (δηλαδή, 1.1 – 1.6 μm), τυπικά οι συσκευές που βασίζονται στο Indium GaAs (InGaAs – Ίνδιο Αρσενικούχο Γάλλιο) προτιμώνται σε εφαρμογές επικοινωνιών Για να βελτιωθεί η απόδοση των silicon-based ανιχνευτών, η πιο κοινή προσέγγιση είναι να εισαχθεί (Ge) Γερμάνιο προς το σύστημα υλικού για να μειωθεί το ενεργειακό κενό. Η επίδραση του συντελεστή απόδοσης και του βάθους διείσδυσης, που ορίζεται ως η απόσταση που ταξιδεύει το φώς πριν η ένταση του μειωθεί σε 36% (1/e) φαίνεται στην **Εικόνα 6.5**. Σημειώστε δε ότι τα δεδομένα στην **Εικόνα 6.5** αντιπροσωπεύουν unstrained bulk υλικά χωρίς την εφαρμογή τάσης. Αυτό είναι πολύ σημαντικό για την ανίχνευση στα 1.550 μm , όπου ακόμα και μία ανόθευτη μεμβράνη Ge με την κατάλληλη ένταση ή τάση θα μπορούσε δυνητικά να μετατοπιστεί για να μειώσει το βάθος διείσδυσης σε αποδεκτές τιμές.

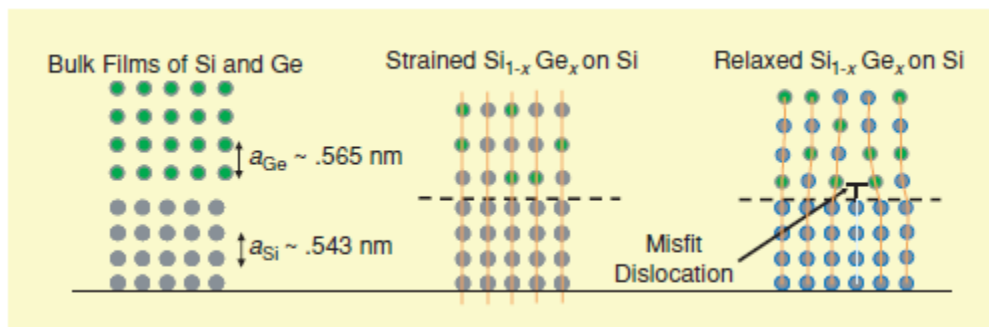
Υπάρχουν πολλοί τύποι Photo Detectors , συμπεριλαμβανομένων Pin-based συσκευών και Schottky MSM ανιχνευτές (Metal – Semiconductor – Metal) [45]. Και οι δύο προσφέρουν διάφορους συμβιβασμούς επιδόσεων και απαιτήσεις επεξεργασίας που ανάλογα με την εφαρμογή, θα καθοριστεί ο τύπος της συσκευής που θα πρέπει να χρησιμοποιείται. MSM-based συσκευές, λόγω της επιμετάλλωσης προσφέρουν έναν πιο επίπεδο σχεδιασμό, οποίος θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερη επίδοση.

Επιπλέον μια MSM-based συσκευή , λόγω της απόστασης της μεταλλικής ταινίας είναι μικρότερο από μία κάθετη p-i-n συσκευή , επιτρέποντας πολύ μικρότερους χρόνους διέλευσης και ως εκ τούτου υψηλότερο εύρος ζώνης. Ωστόσο , οι μεταλλικές ταινίες – λωρίδες μιας MSM συσκευής καταλαμβάνουν το 25-50% της επιφάνειας , η οποία οδηγεί σε λιγότερο αποτελεσματική ευαισθησία.

Υπάρχουν τρεις παράμετροι κλειδιά για το Ge σε Φωτοανιχνευτές Πυριτίου. Είναι παράμετροι αντιστάθμισης μεταξύ «σκοτεινού» ρεύματος, εύρους ζώνης και ευαισθησίας. [46]-[48]

6.3.2 Σκοτεινό Ρεύμα

Πυρίτιο (Si) , λόγω της πραγματικής ποιότητας του κρυσταλλικού υλικού και τις εξαιρετικές ιδιότητες passivation έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή υψηλής ποιότητας και πολύ χαμηλού σκοτεινού ρεύματος συσκευές. Ωστόσο η εισαγωγή Γερμανίου (Ge) με το πυρίτιο θα προσθέσει μερικές σημαντικές επιπλοκές. Δεδομένου ότι η σταθερά πλέγματος του Γερμανίου (Ge) είναι 4% μεγαλύτερη από αυτήν του Πυριτίου (Si), αυτή η ανομοιότητα του πλέγματος θα οδηγήσει σε καταπόνηση του λεπτού στρώματος Γερμανίου (Ge) όταν αυτό αναπτύσσεται στο πυρίτιο. Αυτή η καταπόνηση όταν χαλαρώσει θα οδηγήσει σε απροσάρμοστες μετατοπίσεις που με την σειρά τους θα οδηγήσουν σε μετατοπίσεις σπειρώματος οι οποίες μπορούν να υποβαθμίσουν την απόδοση της συσκευής. Αυτό παρουσιάζεται ως το σκοτεινό ρεύμα (θόρυβος) στους PhotoDetectors. Στην **Εικόνα 6.6** παρουσιάζετε ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει πως η ασυμφωνία πλέγματος μεταξύ Ge και Si , οδηγεί σε απροσάρμοστες μετατοπίσεις.



Εικόνα 6.6

Το διάγραμμα δείχνει την ασυμφωνία πλέγματος 4% μεταξύ Ge και Si που οδηγεί σε απροσάρμοστες μετατοπίσεις που υποβαθμίζουν την απόδοση ενός PD.

Εκτός από την πίεση/καταπόνηση, δεν υπάρχει ικανοποιητικό υλικό αδρανοποίησης, το οποίο δημιουργεί περαιτέρω αύξηση του «σκοτεινού» ρεύματος. Σημαντικές τεχνικές επεξεργασίας που συνδυάζουν **θερμοκρασία ανόπτησης** και διαδικασίες αδρανοποίησης θα χρειαστούν για την παραγωγή υψηλής ποιότητας, low-dark-current συσκευές.

6.3.3 Εύρος Ζώνης

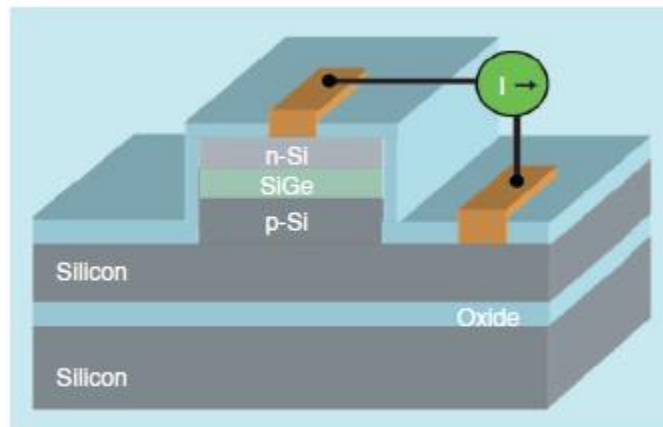
Το **εύρος ζώνης (Bandwidth)** ενός PD μπορεί να περιοριστεί από τον χρόνο διέλευσης που απαιτείται για τους φωτοδιεγερμένους φορείς (*photocarriers*) στο να ταξιδέψουν από την περιοχή διασταύρωσης με τις επαφές ή την σταθερά χρόνου RC της συσκευής. Τυπικά οι PDs δεν έχουν βαθύ εκτεταμένο ηλεκτρονικό πεδίο, έτσι οι μεταφορείς θα διαχέονται αργά , προκαλώντας μια σημαντική συνιστώσα χαμηλής συχνότητας με την απόκριση. Το κλειδί για τον σχεδιασμό του ανιχνευτή είναι να εξαλειφθεί το «αργό» ρεύμα διάχυσης (*diffusion current*)⁶ χρησιμοποιώντας πολύ λεπτά στρώματα που μπορούν να είναι πλήρως απεμπλουτισμένα για να αποφευχθεί η δημιουργία του ρεύματος διάχυσης ή μειώνοντας αποτελεσματικά το μήκος

⁶ Diffusion Current: Είναι το ρεύμα σε έναν ημιαγωγό που προκαλείται από την διάχυση των φορτισμένων φορέων (οπές και/ή ηλεκτρόνια).

διάχυσης στην μειοψηφία των carriers. Αυτό γίνεται συχνά με την χρήση μιας δεύτερης (και βαθύτερης) p-n επαφής ώστε να απορροφήσει τους αργούς φορείς , πριν φτάσουν στην επαφή ή να εξαλειφθούν οι αργοί φορείς με την εισαγωγή θέσεων επανασυνδυασμού κοντά στην περιοχή απεμπλουτισμού. Η συλλογή του ταχύτερου ρεύματος ολίσθησης βελτιστοποιείται διατηρώντας το πλάτος εξάντλησης όσο τον δυνατόν πιο λεπτό , όπως καθορίζεται από το βάθος διείσδυσης. Εάν το βάθος διείσδυσης μπορεί να διατηρηθεί κάτω από 2 μm , ο χρόνος διέλευσης μόνο θα μπορούσε να υποστηρίξει εύρος ζώνης 10GB/s ή υψηλότερο.[49]

6.3.4 Ευαισθησία R

Η **Ευαισθησία-R** είναι ο λόγος συλλογής του «φωτορεύματος» προς την προσπίπτουσα οπτική ισχύ στον ανιχνευτή. Οι ευαισθησίες για τους εμπορικούς III-V οπτικούς ανιχνευτές φωτός είναι τυπικά κοντά σε 0.80 έως 0.95 A/W. Η ευαισθησία τυπικά αυξάνεται όσο αυξάνετε και ο συντελεστής απορρόφησης. Οι οπτικοί ανιχνευτές φωτός Ge μπορούν να έχουν ευαισθησία τόσο υψηλή όσο και οι III-V PDs αλλά συνήθως εις βάρος του **εύρους ζώνης** και της απόδοσης του σκοτεινού ρεύματος. Για οπτικούς ανιχνευτές φωτός κανονικής συχνότητας, οι ηλεκτρικές και οπτικές παράμετροι συνδέονται μεταξύ τους. Βελτιστοποιώντας την απορρόφηση κάνοντας τα στρώματα παχύτερα , αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μείωση του εύρους ζώνης εξαιτίας του χρόνου διέλευσης που απαιτείται για να ταξιδέψει διαμέσου του υλικού απορρόφησης. Εάν παραχθεί ένας **οπτικός ανιχνευτής φωτός (PDs) waveguide-based** (Εικόνα 6.7), μπορεί να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διέλευσης αλλά αυτό θα επηρεάσει την μήκος του ανιχνευτή για να αυξηθεί η ευαισθησία του. Αυτό οδηγεί στο να δημιουργηθεί μια συσκευή με μεγαλύτερη χωρητικότητα, η οποία θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί προσεκτικά όσον αφορά το εύρος ζώνης. Ωστόσο, το μεγάλο πλεονέκτημα της προσέγγισης waveguide-based είναι ότι πρόκειται για μια επίπεδη συσκευή, κατάλληλη για ολοκλήρωση με άλλες συσκευές φωτονικών διατάξεων σε πλατφόρμα Silicon-on-Insulator (SOI).

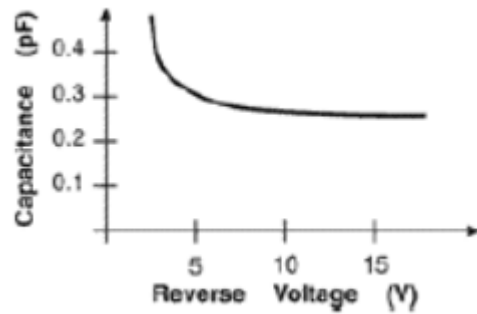


Εικόνα 6.7

Διατομή ενός waveguide-based SiGe p-i-n PD

6.3.5 Χωρητικότητα

Εξαρτάται από την ενεργό περιοχή της συσκευής και την ανάστροφη τάση διαμέσου της συσκευής. Αυτή η σχέση απεικονίζεται στην **Εικόνα 6.8** . Για επαφές p-n , επειδή το πλάτος της ζώνης κατάρρευσης μειώνεται με εφαρμογή ορθής πόλωσης αλλά αυξάνεται με εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης, η χωρητικότητα της επαφής αυξάνεται όταν αυτή υπόκειται σε ορθά πολωμένη τάση αλλά μειώνεται όταν υπόκειται σε ανάστροφα πολωμένη τάση.



Εικόνα 6.8

Γραφική παράσταση χωρητικότητας και ανάστροφης τάσης

6.4 Ολοκλήρωση Γερμανίου (Ge) σε Πυρίτιο (Si)

Η ποσότητα Ge που απαιτείται για αποτελεσματική φωτοανίχνευση εξαρτάται από το μήκος κύματος. Αν είναι επιθυμητή η ανίχνευση στα 1.31 ή 1.55 μm , τότε χρειάζεται πολύ υψηλή συγκέντρωση Ge (>50%). Η συγκέντρωση είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή που βρέθηκε σε SiGe heterojunction bipolar τρανζίστορς (HBTs), και ως εκ τούτου τα θέματα που ανακύπτουν όσον αφορά την ολοκλήρωση πρέπει να ξεπεραστούν στο εσωτερικό της κατασκευής.

Ένα θέμα είναι η χημική ευστάθεια για τα films με υψηλή συγκέντρωση Ge. Δεδομένου ότι το Ge δεν σχηματίζει ένα σταθερό οξείδιο όπως το Si όταν εκτίθεται σε οξειδωτικές χημικές ουσίες, τα **films Si-Ge** τείνουν να είναι ευαίσθητα στην διάβρωση κατά την διάρκεια καθαρισμού και στίλβωσης **δισκίων Si (wafer)**. Έτσι θα πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά modules επεξεργασίας για να προσαρμόσουν την διαφορά και να διατηρήσουν την ακεραιότητα των films SiGe.

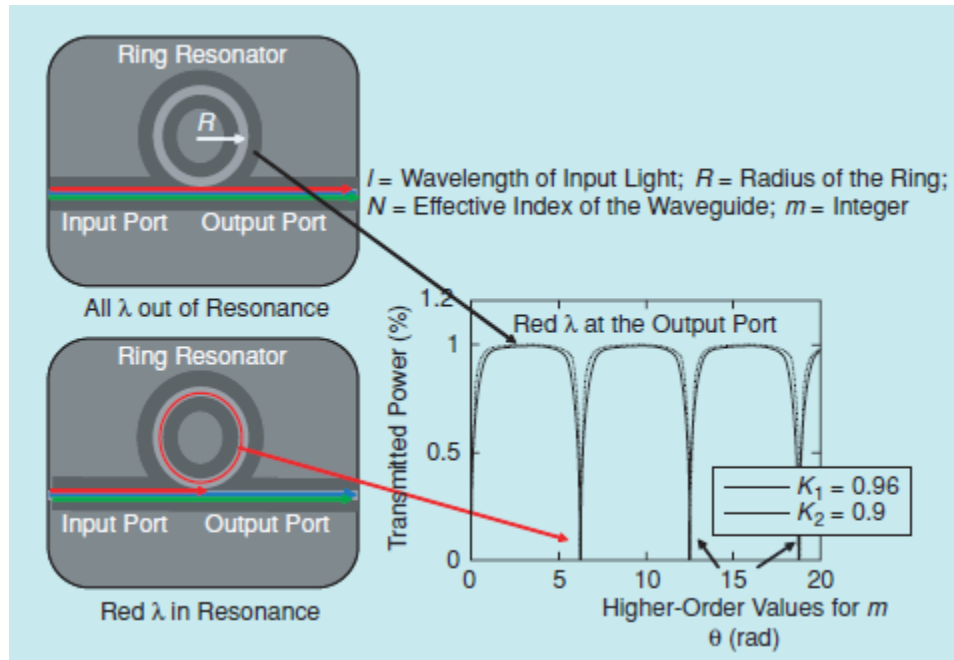
Επιπλέον, δεδομένου ότι τα περισσότερα χρήσιμα καταπονημένα films $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ είναι μετασταθή σε σχέση με το ελάττωμα σχηματισμού, εκθέτοντας το δισκίο πυριτίου (wafer) σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να υπάρξει πρόβλημα μετά την ανάπτυξη του. Βέβαια, οι υψηλοί χρόνοι σε θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία ανάπτυξης (550-650 $^{\circ}\text{C}$) πρέπει να αποφευχθούν. Σε σύντομους χρόνους μπορεί να υπάρξουν υψηλότερες θερμοκρασίες, όπως μια ταχεία θερμική ανόπτηση αλλά αυτό εξαρτάται από την ποιότητα του λεπτού στρώματος (film). Άμορφα, πολυκρυσταλλικά ή relaxed μονοκρυσταλλικά films δεν θα έχουν ως περιορισμό την θερμοκρασία.

Μία έρευνα της πρόσφατης βιβλιογραφίας υπογραμμίζει το γεγονός ότι «πιέζει» την επίδοση μιας παραμέτρου εις βάρος των χαμηλών επιδόσεων των άλλων παραμέτρων. **Jutzi et al.** έχουν δείξει πολύ υψηλό εύρος ζώνης B/W πάνω από 39GHz αλλά με χαμηλή ευαισθησία [48]. Υψηλή ευαισθησία μπορεί να επιτευχθεί αλλά εις βάρους του εύρους ζώνης. Για να είναι οι ανιχνευτές SiGe ανταγωνιστικοί, πρέπει να επιτευχθεί εύρος ζώνης BW πάνω από 10GHz ή υψηλότερο, ευαισθησία κοντά στο 0.5 A/W και σκοτεινό ρεύμα αρχικά κάτω από το ~100 nA. Επιτυγχάνοντας όλες αυτές τις απαιτήσεις επίδοσης ταυτόχρονα, θα είναι μια σημαντική πρόκληση για την εμπορική βιωσιμότητα των **Ανιχνευτών Οπτικού Φωτός SiGe-based**.

6.5 Επόμενης Γενιάς Συσσκευές

Μπορούμε να κοιτάξουμε μπροστά και να δούμε δύο οπτικές συσκευές επόμενης γενιάς, που εστιάζουν στην μείωση του μεγέθους αλλά και σε πιθανές νέες λειτουργίες: Ring Resonator (RRs) και φωτονικές συσκευές ενεργειακού κενού (PBG). Τα οπτικά κυκλικά αντηχεία (Optical

RRs) είναι χρήσιμα στοιχεία για πολύπλεξη, μεταγωγή, φιλτράρισμα μήκους κύματος και διαμόρφωση. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των επιδόσεων ενός **δακτύλιος συντονισμού (Ring Resonator)** περιλαμβάνουν την **ελεύθερη-φασματική περιοχή (FSR)**, το **Q factor**, τη **μετάδοση αντήχησης**, τον **λόγο εξασθένισης (Extinction Ratio r_e)** και την **βελτιστοποίηση-απόδοση πόλωσης**. Η **Εικόνα 6.9** εξηγεί με απλό τρόπο, πώς λειτουργεί η RR.



Εικόνα 6.9

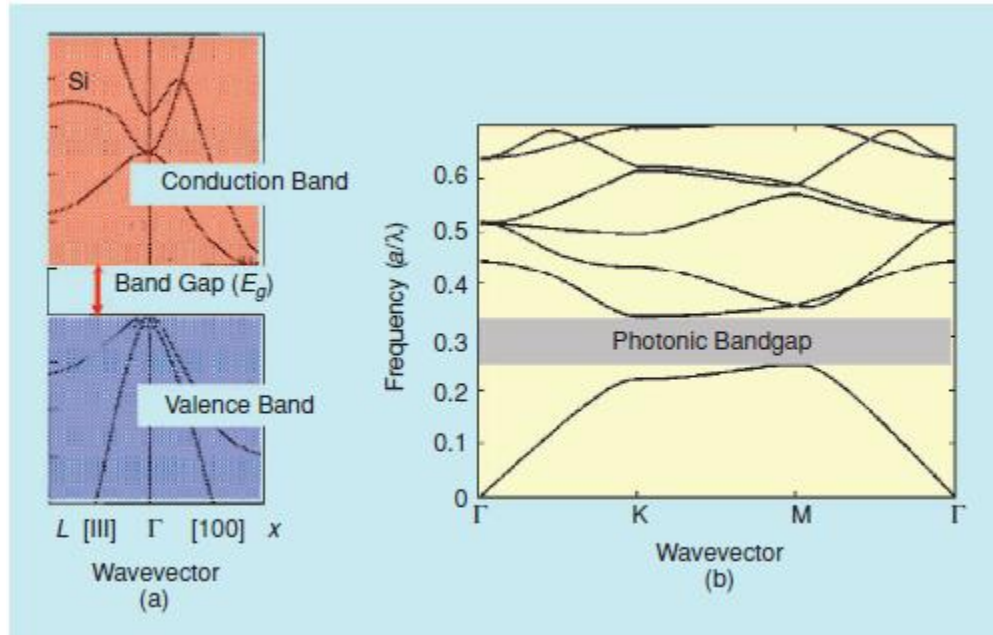
Απλή περιγραφή του πώς λειτουργεί ένας Ring Resonator.

Για τέτοια σχέδια, η ανάλυση και ο έλεγχος οπτικής λιθογραφικής κρίσιμης διάστασης (CD) είναι όλα σημαντικά για την επιτυχία των συσκευών. Στην περίπτωση των Si-based RRs, μία από τις κρίσιμες παραμέτρους ελέγχου, είναι η ικανότητα σύζευξης μεταξύ του RR και του κυματοδηγού I/O. Όπως ένας μικρός κυματοδηγός (για παράδειγμα, $220 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$ λωρίδα κυματοδηγού) χρησιμοποιείται συνήθως σε κυκλικό αντηχείο (Ring Resonator) για να αποκτήσει μεγάλο FSR, το κενό ανάμεσα στον δακτύλιο και στον δίαυλο είναι 100-200 nm. Δεδομένου ότι η συσκευή λειτουργεί μέσω παροδικής σύζευξης, εξαρτάται εκθετικά από το μέγεθος του κενού διαχωρισμού. Έτσι, προκειμένου να επεξεργαστούν αξιόπιστα οι συσκευές RR υψηλού Q-Factor, η διαστατική ανοχή λίγων nm απαιτεί έλεγχο κρίσιμης διάστασης CD. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με σύγχρονες διαδικασίες $0.13 \mu\text{m}$ ή $0.09 \mu\text{m}$ στο στάδιο της παραγωγής.

Μεταβαίνοντας σε ακόμα μικρότερες συσκευές, μπαίνουμε σε νέο σύστημα. Για παράδειγμα, οι φωτονικοί κρύσταλλοι είναι οπτική αναλογική σε κρυστάλλους ηλεκτρονικής ημιαγωγών. Οι **φωτονικοί κρύσταλλοι** έχουν κερδίσει την προσοχή μετά από εκθέσεις ερευνητών που εργάζονται σε πυρίτιο. Οι ιδιότητες διασποράς και μη γραμμικών οπτικών φαινομένων, σε συνδυασμό με το να μειωθούν δραματικά οι διαστάσεις των κοινών οπτικών σχεδίων, τροφοδοτούν πολλές ενεργές ερευνητικές προσπάθειες, όπως αυτές που αναφέρονται σε super prism συσκευές [50]-[52].

Μέσω της περιοδικής διάταξης των δύο υλικών με ανόμοιες διηλεκτρικές σταθερές, ένας φωτονικός κρύσταλλος θα παρουσιάσει μια ζώνη απαγορευμένων συχνοτήτων κατά την διάδοση. Το PBG είναι ανάλογο με το απαγορευμένο ενεργειακό χάσμα των ημιαγωγών, όπως

ακριβώς απαγορεύονται οι ηλεκτρονικές καταστάσεις που οφείλονται στην περιοδική διάταξη των ατόμων σε ένα κρυσταλλικό πλέγμα. Η περιοδική διάταξη των διηλεκτρικών σε ότι αφορά το μήκος κύματος του φωτός δημιουργεί ένα οπτικό κενό (**βλέπε Εικόνα 6.10**). Το πιο κοινό παράδειγμα ενός φωτονικού κρύσταλλου είναι ένα μονοδιάστατο **Φράγμα Bragg** για το οποίο επιτυγχάνεται ένα απαγορευμένο οπτικό κενό ή ένα stop-band. Για του περισσότερους δισδιάστατους επίπεδους SOI-based PBG κυματοδηγούς, χρησιμοποιείται ένα τριγωνικό πλέγμα οπών σε πυρίτιο [53].



Εικόνα 6.10

Παραδείγματα **(a)** ενός ενεργειακού διάκενου ζώνης για έναν ημιαγωγό πυριτίου (Si) και **(b)** ενός φωτονικού διάκενου ζώνης για έναν φωτονικό κρύσταλλο όπου **a** είναι το κρυσταλλικό πλέγμα.

Σε σύγκριση με πρωτότυπες συσκευές βασιζόμενες σε κυματοδηγό, τα οφέλη της PBG είναι ότι η φυσική της λειτουργίας επιτρέπει πολύ μικρότερες **ακτίνες κάμψης** με αμελητέα απώλεια. Αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε φωτονικές συσκευές με αρκετά μικρό συντελεστή μορφής. Οι μικρότεροι συντελεστές μορφής μπορούν να οδηγήσουν σε αρκετά υψηλά επίπεδα ολοκλήρωσης σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο Chip. Ωστόσο, όλα αυτά συνοδεύονται με αυξημένη απώλεια σύζευξης μέσα και έξω αυτών των πολύ μικρών συσκευών. Ένας συμβατικός οπτικός κυματοδηγός δεν μπορεί να έχει απότομη κάμψη/καμπύλη χωρίς απώλεια ισχύος. Οι κυματοδηγοί που βασίζονται σε PBG μπορούν να έχουν 120° κάμψη με ακτίνες κοντά στο 1 μm [54]. Ωστόσο, οι PBGs (Photonic Band-gap Devices) απαιτούν καλύτερη επεξεργασία και έλεγχο CD (Critical Dimensions). Μια άλλη πρόκληση των συσκευών PBG-based είναι οι σχετικά υψηλές οπτικές απώλειες μετάδοσης. Η απόδοση της συσκευής φωτονικών κρυσταλλικών κυματοδηγών έχει βελτιωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, όπως δείχνουν οι απώλειες διάδοσης των 3dB/mm σε έναν κυματοδηγό [55]. Μια από τις βασικές εξελίξεις στον τομέα αυτό είναι η χρήση τεχνικών αριθμητικής βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό μικροκυκλωμάτων, όπως αποδεικνύεται από τον συνδυασμό injector, κυματοδηγού, Y-κόμβου και Καμπών που ταιριάζουν ακριβώς με τα προβλεπόμενα αποτελέσματα [56]. Όσον αφορά την λειτουργικότητα, ο έλεγχος των ιδιοτήτων διασποράς ενός κυματοδηγού, όπως η ομάδα διασποράς ταχύτητας

καθώς και η ταχύτητα από μόνη της, είναι ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των φωτονικών κρυστάλλων, όπως πρόσφατα επισημάνθηκε από την άμεση παρατήρηση του εξαιρετικά αργού φωτός σε φωτονικούς κρυσταλλικούς κυματοδηγούς [57].

6.6 Passive Συσκευές

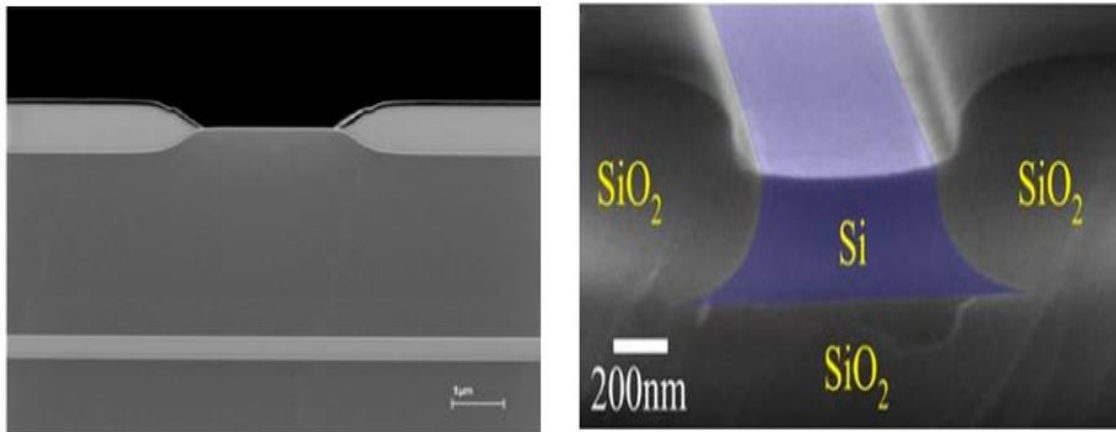
Τα βασικά μέρη των PICs πυριτίου είναι παθητικές συσκευές στα οποία δεν απαιτείται πηγή ενέργειας για να λειτουργήσουν. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί στην ανάπτυξη διακριτών παθητικών συσκευών, όπως κυματοδηγούς, κατευθυντικοί συζευκτές, πολύτροποι συζευκτές παρεμβολών, συμβολόμετρα **Mach-Zehnder**, Φράγματα Bragg, Συντονιστής Δακτυλίου (Ring Resonator) και ούτω καθεξής. Στην ενότητα αυτή, περιγράφουμε τις λεπτομέρειες σχετικά με τις εξελίξεις στους κυματοδηγούς, στους διαχωριστές πόλωσης (polarization splitters) και στους περιστροφείς (rotators).

6.6.1 Κυματοδηγοί Si

Οι κυματοδηγοί είναι ένα από τα θεμελιώδη δομικά στοιχεία σε φωτονικά κυκλώματα πυριτίου. Ο πρώτος κυματοδηγός πυριτίου αναφέρθηκε το 1980 [58-59]. Οι κυματοδηγοί τοιχώματος καθορίζονται σε ένα μονοκρυσταλλικό στρώμα πυριτίου το οποίο αναπτύχθηκε σε ένα μεγάλου βαθμού ντοπαρισμένο μονοκρυσταλλικό υπόστρωμα πυριτίου. Ο κυματοδηγός Silicon-On-Silicon είχε μικρό βήμα δείκτη διάθλασης ανάμεσα στο υπόστρωμα και το στρώμα οδήγησης πυριτίου, το οποίο είναι 0.01. Εξαιτίας χαμηλού περιορισμού φωτός στον πυρήνα του κυματοδηγού και λόγω της μεγάλης απώλειας διαρροής στο υπόστρωμα, αναφέρθηκε ότι ο κυματοδηγός είχε μια απώλεια διάδοσης περίπου 15dB/cm στα 1.3 μm [58-59]. Οι κυματοδηγοί πυριτίου σε ζαφείρι [60] και πυριτίου σε γερμάνιο [61] έχουν επίσης αναφερθεί την δεκαετία του 1980. Όπως αναφέρθηκε και στο τμήμα 2, η πλατφόρμα SOI παρουσιάστηκε στα τέλη του 1980, και ήταν απαιτούμενη για τις εφαρμογές κυματοδηγού στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου μήκους κύματος. Τα οπτικά κυκλώματα που βασίζονται σε SOI μπορούν να υιοθετήσουν άμεσα τις ώριμες τεχνολογίες κατασκευής μικροηλεκτρονικής πυριτίου, προσφέροντας τη δυνατότητα για μονολιθική ολοκλήρωση των οπτικο-ηλεκτρονικών συσκευών με χαμηλό κόστος. Επιπλέον η υψηλή αντίθεση δείκτη SOI μεταξύ του πυριτίου ($n_{\text{Si}} = 3.476$) και του εσωτερικού/θαμμένου στρώματος οξειδίου ($n_{\text{SiO}_2} = 1,444$) διευκολύνει την συρρίκνωση του χαρακτηριστικού μεγέθους της συσκευής. Ο Πρώτος SOI κυματοδηγός πλακίδιο SOI σε πάχος micron προτάθηκε και αναλύθηκε το 1988 [62]. Σε σύγκριση με άλλους τύπους πλατφόρμας κυματοδηγών, ένα ενθαρρυντικό στοιχείο των κυματοδηγών SOI είναι η χαμηλή διαρροή απώλειας ακτινοβολίας στο υπόστρωμα. Τα θεωρητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η απώλεια διαρροής στο υπόστρωμα μπορεί να μειωθεί σε λιγότερο από 1 dB/cm όταν το θαμμένο στρώμα οξειδίου είναι μερικά δέκατα πάχους του Micron. Αργότερα, ο Cortesi et al. παρείχε την πειραματική απόδειξη ότι το θαμμένο οξείδιο παρείχε την απομόνωση για την καθοδηγούμενη κατάσταση [63]. Η πρώτη αναφορά μονότροπου κυματοδηγού τοιχώματος σε SOI είχε πλάτος και ύψος πολλών micron, και απώλειες διάδοσης λιγότερο από 0.5 dB/cm σε μήκη κύματος της τάξης του 1.3 και 1.5 μm [64].

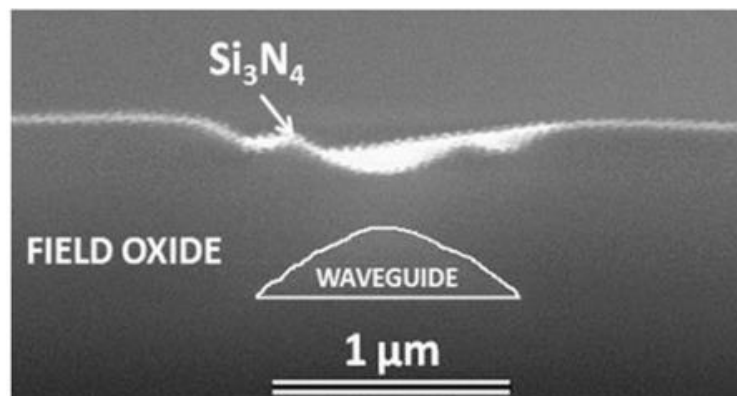
Για την περαιτέρω μείωση των διαστάσεων κυματοδηγού, κυματοδηγοί λωρίδας/ταινίας ή διαύλου προτάθηκαν και διερευνήθηκαν [65]. Καθώς οι κυματοδηγοί φθάνουν στην κλίμακα micron/submicron, η διάδοση του φωτός επηρεάζεται έντονα από την απώλεια σκέδασης λόγω της τραχύτητας πλευρικού τοιχώματος. Η διαδικασία της οξείδωσης μπορεί να εξομαλύνει την τραχύτητα του πλευρικού τοιχώματος του κυματοδηγού πυριτίου [66].

Εκτός από την επεξεργασία του πλευρικού τοιχώματος, διάφορες διαδικασίες οξείδωσης έχουν προταθεί για να καθορίσει του κυματοδηγούς πυριτίου, όπως η υγρή χημική οξείδωση [26] και η διαδικασία επιλεκτικής οξείδωσης [67,68]. Το Πανεπιστήμιο Carleton αναφέρθηκε για πρώτη φορά στην χρήση της τοπικής οξείδωσης του πυριτίου (LOCOS) για να κατασκευάσει τους κυματοδηγούς τοιχώματος [69], όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.11(α)**. Η τεχνική LOCOS είναι συμβατή με την διαδικασία κατασκευής CMOS, όπου οι κυματοδηγοί καθορίζονται οξειδώνοντας επιλεγμένες περιοχές του στρώματος πυριτίου αντί απευθείας χάραξη του στρώματος πυριτίου. Αργότερα, ο *Desiaton et al.* [70] και η ομάδα του [71,72] επιχείρησε την κατασκευή κυματοδηγών αγωγού πυριτίου χρησιμοποιώντας την διαδικασία LOCOS (**βλ. Εικόνα 6.11(β)**) και **Εικόνα 6.11γ**. Λόγω της φύσης της διαδικασίας οξείδωσης, η αναφερόμενη απώλεια διάδοσης των κυματοδηγών LOCOS αναμένεται να είναι λιγότερο από 2dB/cm [69-72].



α) Εγκάρσια τομή ενός ραβδωτού κυματοδηγού κατασκευής LOCOS [29].

β) Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωση ενός square-like κυματοδηγού LOCOS [30].



γ) Εγκάρσια τομή ενός wire κυματοδηγού

Εικόνα 6.11

Η ιδιότητα του υψηλού δείκτη αντίθεσης στις πλατφόρμες SOI προσφέρει το πλεονέκτημα του υψηλού περιορισμού διάδοσης φωτός σε ultra-compact διαστάσεις. Ωστόσο, το ελάττωμα της ιδιότητας αυτής είναι η εμφάνιση υψηλής διπλής διάθλασης, η οποία είναι μια πρόκληση για εμπορικές εφαρμογές [73]. Ο κυματοδηγός διπλής διάθλασης, εξ ορισμού, είναι η ενεργός διαφορά δείκτη μεταξύ εγκάρσιας ηλεκτρικής πεδίου (TE) και εγκάρσιας μαγνητικής

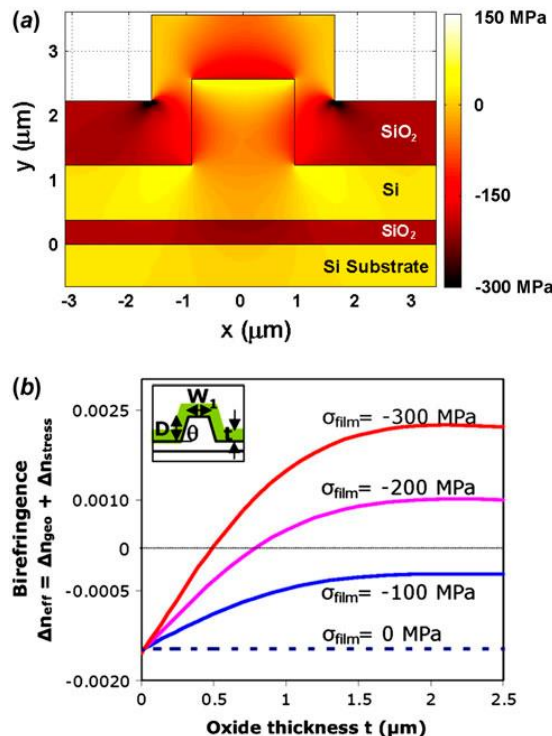
πόλωσης που προκαλούνται είτε από την εγκάρσια διατομή γεωμετρία ή από το επίπεδο της έντασης.

Σε μια ιδανικά συμμετρική δομή κυματοδηγού, η γεωμετρική διπλή διάθλαση είναι μηδενική. Ωστόσο, η ιδανική συμμετρία είναι σχεδόν αδύνατον να επιτευχθεί εξαιτίας των περιορισμών κατασκευής και της φύσης του σχεδιασμού των επίπεδων κυματοδηγών. Για κυματοδηγούς υψηλού δείκτη αντίθεσης η γεωμετρική διπλή διάθλαση μπορεί να είναι σημαντική. Υπήρξαν πολυάριθμες προσεγγίσεις που προτάθηκαν για την αντιστάθμιση της μη μηδενικής γεωμετρικής διπλής διάθλασης. Το 2003, η ομάδα μας πρότεινε για πρώτη φορά να χρησιμοποιηθεί αντοχή/πίεση επικάλυψης για να ελέγχει και να εξαλειφθεί η διπλή διάθλαση κυματοδηγού μέσω φωτοελαστικού φαινομένου [74,75]. Σε έναν Ραχιαίο SOI ή με τοίχωμα κυματοδηγού, η καταπόνηση λεπτού στρώματος επίστρωσης προκαλεί μια μη ομοιόμορφη κατανομή καταπόνησης/τάσης εντός της κοντινής περιοχής του ενσωματωμένου ραχιαίου κυματοδηγού (βλ. Εικόνα 6.12(α)), με αποτέλεσμα μια αλλαγή του ενεργού δείκτη του κυματοδηγού [75]. Η Τάση που προκαλείται από τις αλλαγές του δείκτη διάθλασης των υλικών δίδεται από: [76,77] :

$$\Delta n_x = n_x - n_0 = -C_1 \sigma_x - C_2 (\sigma_y + \sigma_z), (1)$$

$$\Delta n_y = n_y - n_0 = -C_1 \sigma_y - C_2 (\sigma_x + \sigma_z), (2)$$

όπου $\sigma_{x,y,z}$ είναι x- y- και z- στοιχεία του σχετικού τανυστή τάσεων, $n_{x,y}$ είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού μαζί με χ και γ κατευθύνσεις, n_0 είναι ο δείκτης διάθλασης χωρίς τάση και C_1 και C_2 τα εξαρτημένα υλικά φωτοελαστικών σταθερών. Είναι σαφές η διπλή διάθλαση κυματοδηγού μπορεί να αλλάξει αποτελεσματικά με την τροποποίηση της καταπόνησης στο ανώτερο στρώμα επίστρωσης/επικάλυψης. Εικόνα 6.12(β) απεικονίζει την εξάλειψη της διπλής διάθλασης κυματοδηγού χρησιμοποιώντας την πίεση επίστρωσης (cladding stress) [75].

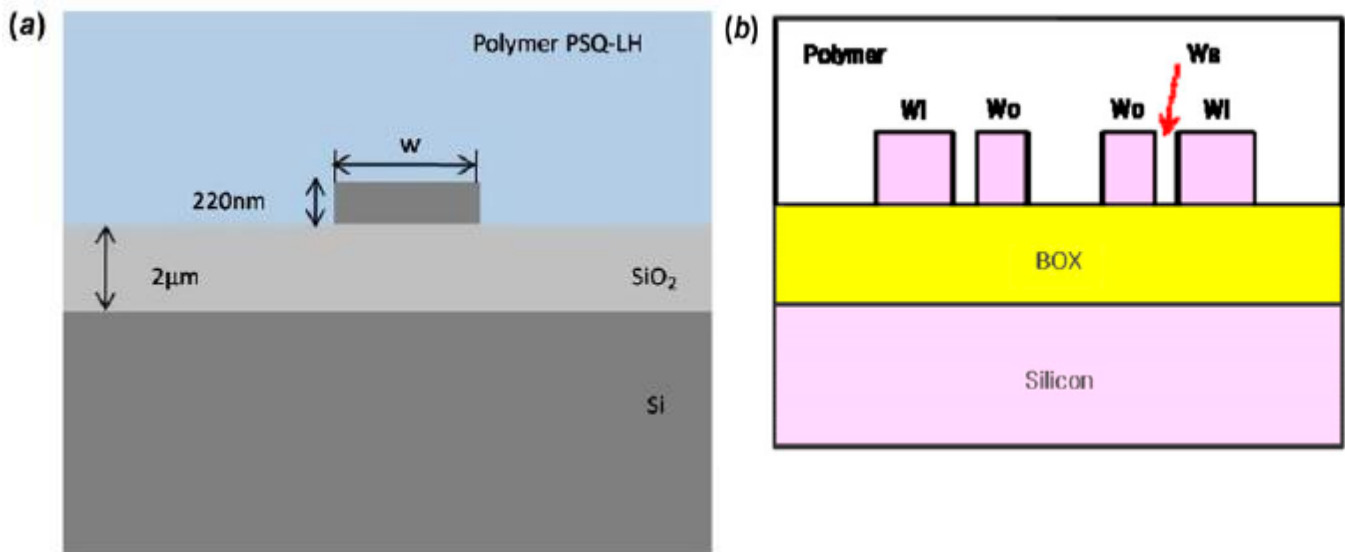


Εικόνα 6.12

α) Κατανομή τάσεων κατά μήκος της X-κατεύθυνσης (σ_x) σε έναν κυματοδηγό SOI με επίστρωση οξειδίου.

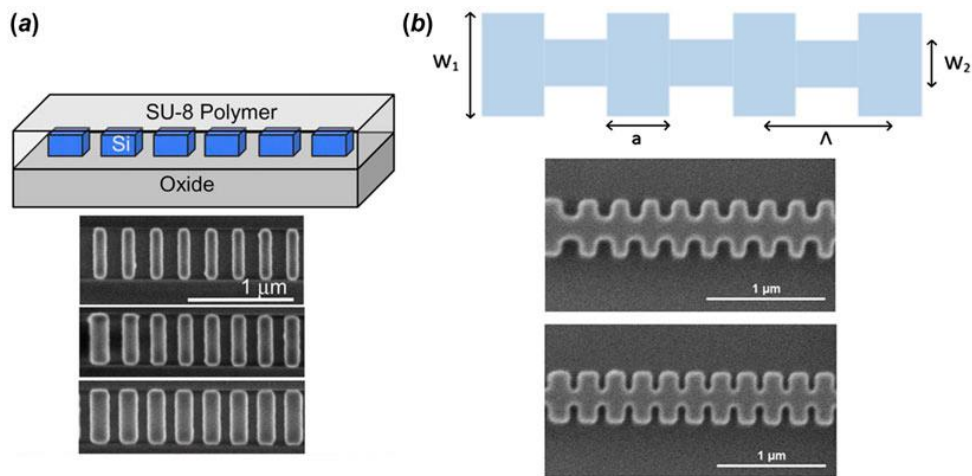
β) Η επήρεια του πάχους της ανώτερης επίστρωσης και η τάσης/πίεση που προκαλείται στην επίστρωση σε κυματοδηγό διπλής διάθλασης. Ο κυματοδηγός έχει $W=1.5 \mu m$, $D=1.5 \mu m$, $H=2.2 \mu m$, $\theta=0^\circ$. Το πάχος της επίστρωσης οξειδίου είναι $t=0.7 \mu m$ [75].

Η ευαισθησία θερμοκρασίας σε κυματοδηγούς πυριτίου είναι ένα άλλο εμπόδιο για την ανάπτυξη βιώσιμων εμπορικών ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων. Η εξάρτηση της θερμοκρασίας προκαλείται από τον σχετικά μεγάλο θετικό θερμο-οπτικό συντελεστή κυματοδηγού πυριτίου. Τα θετικά θερμο-οπτικά φαινόμενα μπορούν να αντισταθμιστούν χρησιμοποιώντας επικάλυψη πολυμερούς του οποίου ο συντελεστής είναι αρνητικός [78,79]. Το 2008, παρουσιάσαμε την μη θερμική κατευθυντήρια γραμμή σχεδιασμού χρησιμοποιώντας μία επικάλυψη/επίστρωση πολυμερούς κ για τις δύο συμμετρικές κ ασύμμετρες γεωμετρίες waveguide-cladding [78]; ήτοι, ο ενεργός θερμο-οπτικός συντελεστής, $dn_{eff}/dT \sim 0$. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επικαλύπτοντας με επίστρωση πολυμερούς ένα στενό αγωγό/σύρμα πυριτίου (Εικόνα 6.13(α)) [80]. ή χρησιμοποιώντας μία δομή κυματοδηγού γεμίζοντας την με πολυμερές υλικό (Εικόνα 6.13(β)) [81].



Εικόνα 6.13 (α) Εγκάρσια διατομή ενός κυματοδηγού SOI επικαλυμμένο από ένα πολυμερές [80]. **(β)** Κυματοδηγός Υποδοχής πυριτίου με επίστρωση πολυμερούς [81].

Παρουσιάστηκαν επίσης μη θερμική κυματοδηγοί στα φράγματα μεγάλου μήκους κύματος (subwavelength) [82]. Η ομάδα μας έδειξε ότι ο κυματοδηγός φράγματος μεγάλου μήκους κύματος (SWG) (Εικόνα 6.14(α)) [83] και το bridged φράγμα μεγάλου μήκους κύματος (BSWG) (Εικόνα 6.14(β)) [84] μπορεί να επιτύχει ανεξαρτησία θερμοκρασίας συμπληρώνοντας το κενό διάστημα με μια επίστρωση πολυμερούς με κατάλληλους λόγους λειτουργίας φράγματος.

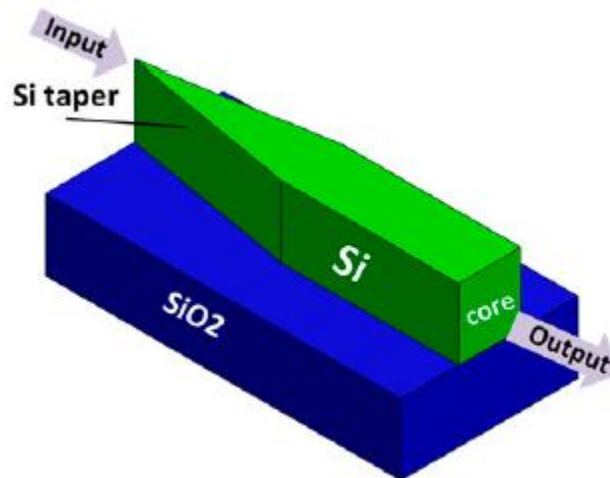


Εικόνα 6.14

(α) Κυματοδηγός πυριτίου φράγματος υπο-μήκους κύματος με επίστρωση SU-8 (SWGs) [83] **(β)** Μη-θερμικός κυματοδηγός γεφυρωμένου subwavelength φράγματος [84] , όπου τα τμήματα subwavelength φράγματος είναι συνδεδεμένα (ή γεφυρωμένα).

6.6.2 Couplers –Συζευκτές

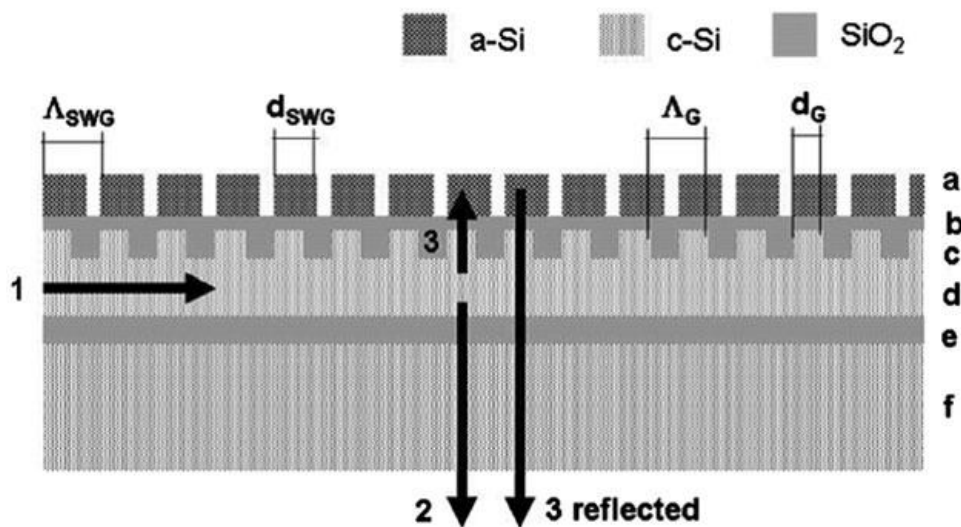
Η ενεργή ζεύξη ίνας-κυματοδηγού είναι σημαντικό θέμα στην ανάπτυξη SOI-based εμπορικών μικροφωτονικών προϊόντων. Εξαιτίας των διαστάσεων submicron των κυματοδηγών πυριτίου, υπάρχει μια σημαντική κατάσταση αναντιστοιχίας μεταξύ των κυματοδηγών και ινών εισόδου/εξόδου. Μια αποδοτική λύση είναι να χρησιμοποιηθεί ένα ανεστραμμένο κώνο με επικάλυψη πολυμερούς ή οξειδίου του πυριτίου [85-87]. Ο ανεστραμμένος κώνος μετατοπίζει το προφίλ κατάστασης του πυρήνα, όπου το στενό άκρο του κώνου επεκτείνει την οπτική λειτουργία για να ταιριάζει το ελλειπτικό μέγεθος της ίνας (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.15**). Επιπλέον, οι back-reflections μπορούν να ελαχιστοποιηθούν διότι ο ενεργός δείκτης του κωνικού άκρου είναι κοντά σε εκείνον της ίνας. Η αναφερόμενη απώλεια ζεύξης για τον ανεστραμμένο κώνο είναι κάτω από 1dB [87]. Ωστόσο, το μειονέκτημα είναι ότι μπορεί να τοποθετηθεί μόνο στις άκρες ενός chip.



Εικόνα 6.15

Σχηματικό διάγραμμα ενός ανεστραμμένου-κωνικού συζευκτη.

Η εναλλακτική επιλογή είναι ένας συζευκτής φράγματος , όπου το περιοδικό χαρακτηριστικό βοηθά την ζεύξη φωτός ανάμεσα στην ίνα και τον κυματοδηγό. Όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 6.16** , ένας συζευκτής φράγματος αλλάζει την διάδοση του φωτός από τον κυματοδηγό πυριτίου σε μια σχετικά φυσιολογική προσαρμογή σε σχέση με την επιφάνεια του chip, ή αντίστροφα. Καθώς το φως μπορεί να διαχυθεί ή να εξαχθεί σε οποιαδήποτε θέση σε ένα Chip, ο συζευκτής φράγματος δεν έχει καμία απαίτηση στην λείανση έδρας [88,89] και μπορεί να ελαχιστοποιήσει τις back-αντανakλάσεις. Αυτό το ελκυστικό πλεονέκτημα προώθησε τεράστιες ερευνητικές προσπάθειες στην κατασκευή αποδοτικών και ευρυζωνικών συζευκτών φράγματος. Οι βασικές τεχνικές κατασκευής για την ενίσχυση της κατευθυντικότητας του φράγματος περιλαμβάνουν την χρήση κατόπτρων Bragg [88] και μία επίστρωση υψηλού δείκτη διάθλασης [90]. Πολύ πρόσφατα, οι δομές μεγάλου μήκους κύματος (SWG) που παρουσιάζονται στην **Εικόνα 6.16** , αναφέρθηκαν για να πραγματοποιηθεί μιας ευρείας ζώνης και υψηλής απόδοσης ίνα-σε-κυματοδηγό σύζευξη [91].



Εικόνα 6.16

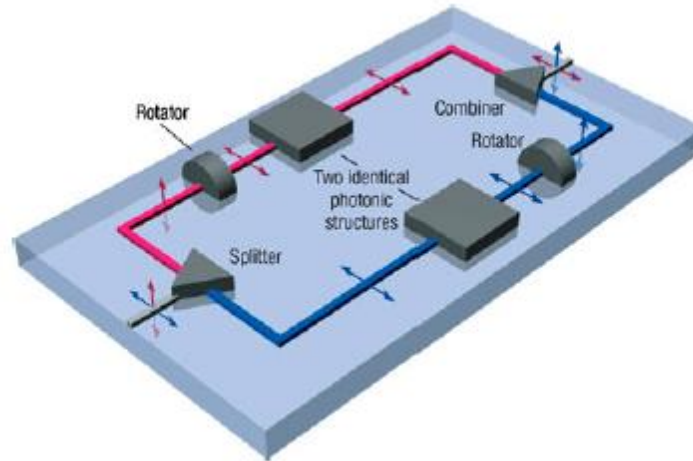
Σχεδιάγραμμα ενός κυματοδηγού συζευκτή φράγματος με καθρέφτη φράγματος υπο-μήκος κύματος. Το Πρώτης τάξης υπο-μήκος κύματος καθρέφτη φράγματος είναι χαραγμένο σε άμορφο στρώμα πυριτίου; Το δεύτερης τάξης φράγμα είναι χαραγμένο σε στρώμα μονό-κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) στον πυρήνα κυματοδηγού. Στρώμα a: a-Si SWG mirror, b: αποστάτης SiO₂, c: φράγμα κυματοδηγού, d: Si πυρήνας κυματοδηγού, e: κάτω περίβλημα SiO₂, f: υπόστρωμα Si [91].

6.6.3 Διαχωριστής-Περιστροφέας Πόλωσης (Splitter/Rotator)

Όπως αναφέρθηκε στο **τμήμα 6.6.1** , οι καθοδηγούμενες καταστάσεις TE και TM εκτελούνται διαφορετικά λόγω της ανισotropίας στην εγκάρσια γεωμετρία ή στην κατανομή καταπόνησης. Ως εκ τούτου, η διαχείριση πόλωσης είναι σημαντική για PICs πυριτίου [92]. Εκτός από τον σχεδιασμό στοιχείων κυματοδηγού ανεξάρτητης πόλωσης, η τεχνική ποικιλομορφική-πόλωση είναι μία άλλη λύση για την εξάλειψη της ευαισθησίας πόλωσης σε κυματοδηγούς νανονήματος φωτονικής πυριτίου [93].

Όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 6.17** ένα κύκλωμα ποικιλομορφικής πόλωσης προσφέρει στο να διαχωρίσει οποιαδήποτε αυθαίρετη είσοδο πολωμένου φωτός στις δυο ορθογώνιες πολώσεις. (TE και TM) χρησιμοποιώντας διαχωριστή δέσμης πόλωσης (PBS) , οποίος ακολουθείται από την περιστροφή ενός πολωμένου στοιχείου (TM) κατά 90 μοίρες με έναν περιστροφέα πόλωσης (PR).

Τα δύο ξεχωριστά στοιχεία στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία από δύο πανομοιότυπα PICs. Μετά από αυτό, ένα από τα στοιχεία περιστρέφεται κατά 90 μοίρες από έναν άλλον PR. Τέλος, τα δυο ορθογώνια στοιχεία συνδυάζονται με ένα δεύτερο PBS. Σε αυτό το κύκλωμα, τα δύο πιο σημαντικά στοιχεία είναι το PBS και PR.



Εικόνα 6.17

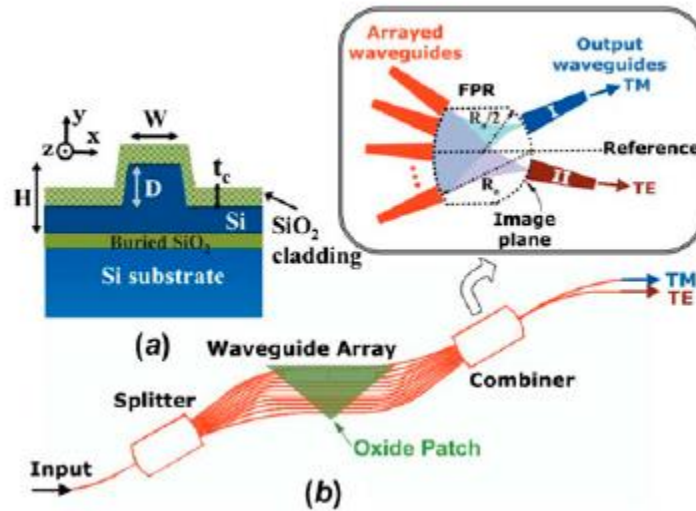
Σχεδιάγραμμα εκτροπής πόλωσης. Τα βέλη δείχνουν τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου [93]

Για ολοκληρωμένους περιστροφείς και διαχωριστές πόλωσης, υπάρχουν δύο τύποι βασικών αρχών διαχωρισμού πόλωσης και περιστροφής : 1. λειτουργία-σύζευξης [94] 2. λειτουργία-εξέλιξης [95,96]. Οι δομές που βασίζονται στην λειτουργία-σύζευξης απαιτούν αντιστοίχιση φάσης και ακριβής σύζευξη, τα οποία είναι εγγενώς ευαίσθητα στο μήκος κύματος και στη κατασκευή. Απο την άλλη , οι συσκευές που βασίζονται στην λειτουργία-εξέλιξης λειτουργούν τόσο όσο η λειτουργία-σύζευξης καταστέλλεται , η οποία επιτρέπει χαλαρές ανοχές κατασκευής και μεγάλο εύρος ζώνης.

6.6.4 Διαχωριστής Δέσμης Πόλωσης (Polarization Beam Splitter)

Οι PBS (Polarization Beam Splitter) που βασίζονται στην κυματοδότηση έχουν αναφερθεί βασιζόμενα σε διάφορες ρυθμίσεις, όπως πολύτροπα συμβολόμετρα (MMIs) [97],[98], κατευθυντικοί συζευκτές (AX) [99,100], Mach-Zehnder συμβολόμετρα (MZIs)[101], και φωτονικά κρύσταλλα (PhCs) [102]. Το 2007, αναφερθήκαμε σε ένα ευρυζωνικό διαχωριστή πόλωσης που επάγει τάση χρησιμοποιώντας μηδενικής τάξης συστοιχίες φράγματος κυματοδηγών (AWG) [103]. Το σχηματικό διάγραμμα της μηδενικής τάξεως AWG διαχωριστή πόλωσης φαίνεται στο **Εικόνα 6.18** , όπου ένας κυματοδηγός εισόδου συνδέεται σε μια συστοιχία κυματοδηγού μέσω ενός κυματοδηγού πλάκας διάδοσης ελεύθερης περιοχής. Η συστοιχία συνδέεται στην έξοδο κυματοδηγών μίας δεύτερης FPR. Σε αντίθεση με ένα συμβατικό AWG, όλες οι συστοιχίες κυματοδηγών έχουν τα ίδια μήκη διαδρομής. Μόνο δύο έξοδοι κυματοδηγών χρησιμοποιούνται , η μία για να καταγράψει TE πολωμένο φώς και η άλλη για να καταγράψει TM πολωμένο φώς. Η πίεση στην επιστροφή του κυματοδηγού (**Η τριγωνική κάλυψη στην εικόνα 6.18(β)**) προκαλεί διαφορά φάσης εξαρτημένης πόλωσης στις δέσμες φωτός που διαδίδονται στο τμήμα του κυματοδηγού φράγματος/πλέγματος. Στην έξοδο ενός FPR συνδιαστή, το φώς που διαδίδεται στην συστοιχία κυματοδηγού επανασυνδυάζεται και συγκλίνει προς ένα κεντρικό σημείο στο φανταστικό επίπεδο. Κάθε πόλωση αντιμετωπίζει μια διαφορετική πίεση μετατόπισης φάσης, ένα χωρικό διαχωρισμό ανάμεσα στα σημεία επαφής των εξερχόμενων TE και των πολωμένων

TM δεσμών φωτός. Το PBS είναι εντελώς παθητικό και χρησιμοποιεί πανομοιότυπους κυματοδηγούς. Τα περισσότερα από τα άλλα PBS είτε χρησιμοποιούν εξωτερικές πηγές ενέργειας ή επιλεκτική γεωμετρική μεταβολή για την επίτευξη της διάσπασης πόλωσης.



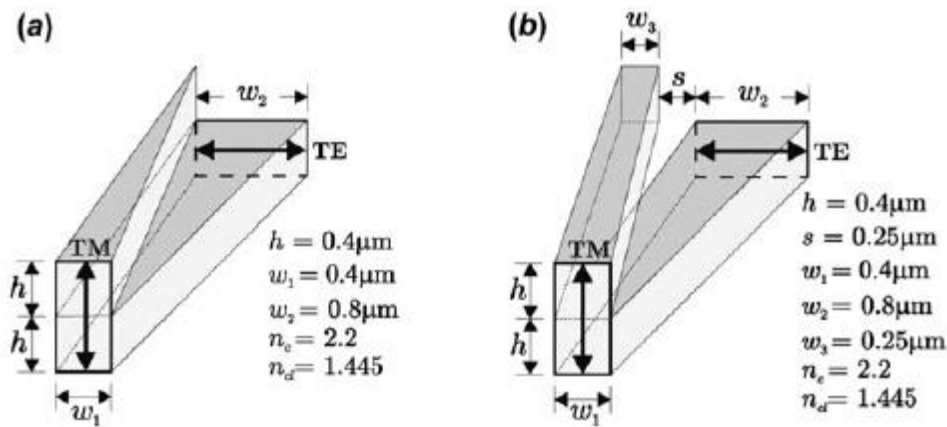
Εικόνα 6.18

α) Εγκάρσια τομή ενός τυπικού SOI κυματοδηγού **β)** Διάγραμμα του σχεδίου ενός ευρυζωνικού μηδενικής τάξης AWG διαχωριστή πόλωσης [103]

6.6.5 Περιστροφέας Πόλωσης (Polarization Rotator)

Ένας περιστροφέας πόλωσης είναι μια συσκευή ικανή να μπορεί να περιστρέφει τον οπτικό άξονα των κυματοδηγών. Οι αναφερόμενες μέθοδοι για την πραγματοποίηση της περιστροφής πόλωσης προσανατολίζονται κυρίως εισαγωγή της ανισοτροπίας στη δομή του κυματοδηγού. Για παράδειγμα ένας PR που βασίζεται στην λειτουργία-εξέλιξης [95] σχεδιάστηκε από δύο στρώματα πυρήνα κυματοδηγών, όπου τα δύο κωνικά/λεπτά στρώματα στοιβάζονται ασύμμετρα και αντίθετα (**Εικόνα 6.19**). Ο αρχικός άξονα της δομής και η κατάσταση πόλωσης της θεμελιώδους λειτουργίας περιστρέφεται ομοιόμορφα κατά μήκος της ελλειπτικής μεταβολής από το στρώμα του ενός πυρήνα στο άλλο.

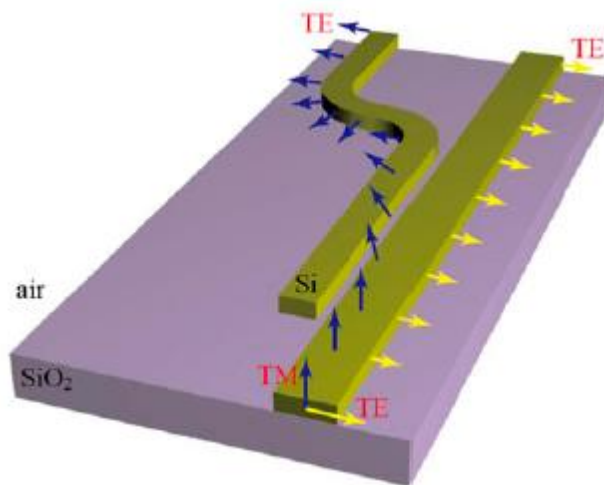
Σε σύγκριση με ένα κανονικό PR, ένας διαχωριστής πόλωσης/περιστροφέας πόλωσης επιτρέπει τον διαχωρισμό πόλωσης και περιστροφής ταυτόχρονα. Πρόσφατα, ένα προτεινόμενο PSR απέδειξε τις πολλά υποσχόμενες δυνατότητες του για Ultra compact κυκλώματα διαφορισμού πόλωσης. Το PSR βασισμένο σε Silicon-On-Insulator χρησιμοποιεί ένα μη συμμετρικό κατευθυντικό συζευκτή, του οποίου οι λειτουργίες διαχωρίστηκαν μεταξύ των ασύμμετρων διατομών των νανοημάτων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.20**. Προκειμένου να επιτευχθεί μια αποτελεσματική σύζευξη διαφορισμού πόλωσης, τα πλάτη των 2 κυματοδηγών προσαρμόστηκαν, έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάσταση αντιστοίχισης φάσης ανάμεσα στους δύο ανόμοιους κυματοδηγούς. Επιπλέον, η μέγιστη απόδοση σύζευξης επήλθε σε ένα συγκεκριμένο βέλτιστο μήκος σύζευξης.



Εικόνα 6.19

α) Περιστροφέας πόλωσης με κωνικά τα ανώτερα και κατώτερα στρώματα πυρήνα β) Περιστροφέας πόλωσης με κωνικά και διαχωρισμένα τα ανώτερα και κατώτερα στρώματα του πυρήνα

Η ομάδα μας, έχει ασχοληθεί με τα φαινόμενα που προκαλούνται από την επικάλυψη (Cladding Effects) για να επιτευχθεί ο διαχωρισμός πόλωσης και περιστροφή. Πρόσφατα επιτύχαμε πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα περιστροφή πόλωσης χρησιμοποιώντας stress effects που προκαλούνται από μία λεπτή ταινία άμορφου πυριτίου στην κορυφή του κυματοδηγού πυριτίου. Τα αρχικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το PSR μπορεί δυναμικά να επιτύχει περιστροφή πόλωσης με απόδοση πάνω από 97% σε εύρος ζώνης 100nm. Αυτή η προσέγγιση είναι εντελώς παθητική με χαλαρή ανοχή κατασκευής.



Εικόνα 6.20

Μικρών διαστάσεων συσκευή διαχωριστή/περιστροφέα πόλωσης που χρησιμοποιεί την λειτουργία σύζευξης ανάμεσα σε δύο SOI κυματοδηγούς με ασύμμετρη εγκάρσια τομή[94].

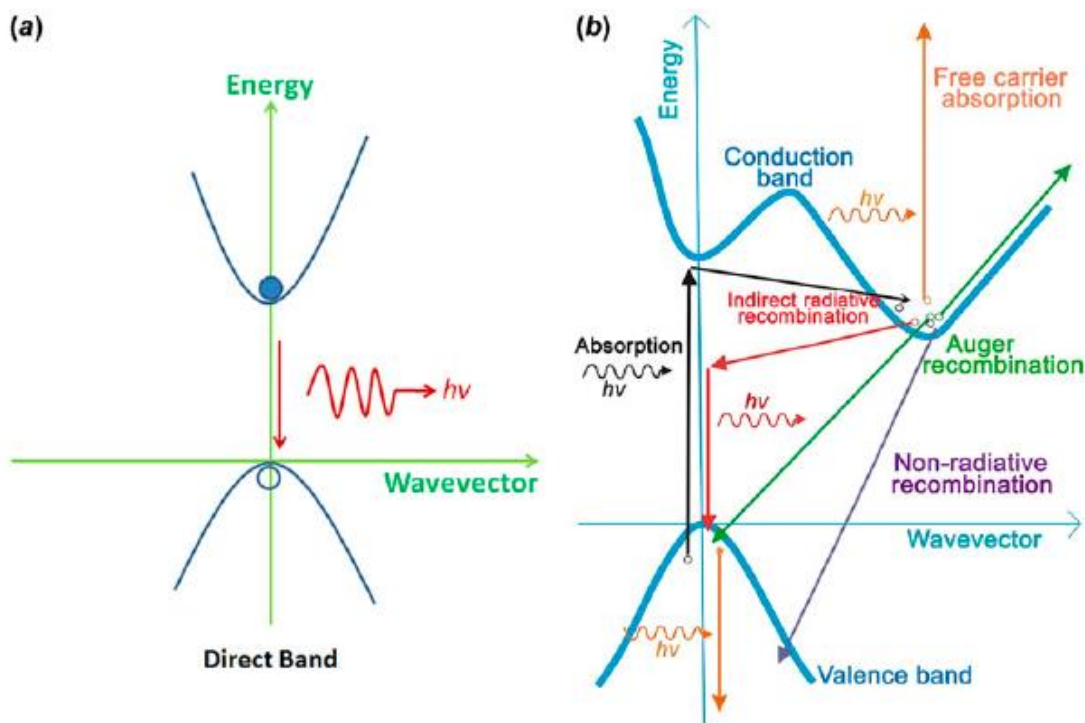
6.7 Ενεργές Συσκευές (Active Devices)

Μια ενεργή συσκευή απαιτεί μια εξωτερική πηγή ενέργειας για την λειτουργία της και έχει μια έξοδο που συνδέεται με το σήμα ή τα σήματα εισόδου. Ενεργές συσκευές, όπως τα lasers που βασίζονται στο πυρίτιο, διαμορφωτές πυριτίου και ανιχνευτές όπως έχουμε αναφέρει κ σε προηγούμενη παράγραφο, είναι τα βασικά στοιχεία των PICs πυριτίου.

6.7.1 Lasers

Εξαιτίας του έμμεσου διάκενου ζώνης στην δομή του πυριτίου, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τείνουν να επανασυνδυαστούν με τις σπές εκπέμποντας Phonons (θερμότητα) αντί φωτόνια, με αποτέλεσμα την εξαιρετικά κακή εσωτερική κβαντική απόδοση για την εκπομπή φωτός σε πυρίτιο (της τάξεως του ενός φωτονίου ανά εκατ. Ηλεκτρόνια [104]). Μέχρι σήμερα, η υλοποίηση ενός Laser πυριτίου παραμένει ένα δύσκολο θέμα στην φωτονική πυριτίου.

Για να αντιληφθούμε την εξαναγκασμένη εκπομπή, οι οπτικές εναλλαγές πρέπει να συμμορφώνονται με την διατήρηση της ενέργειας και της δυναμικής. Σε υλικά άμεσου διάκενου ζώνης, ο ανασυνδυασμός ζευγών ηλεκτρονίων-οπών μπορεί να εκπέμψει φωτόνια γρήγορα και αποτελεσματικά, όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 6.21(α)**. Τα ακρότατα σημεία ενέργειας της αγωγιμότητας και των ζωνών σθένους μοιράζονται την ίδια κρυσταλλική ορμή με παράταξη κάθετα κατά μήκος του άξονα wavevector.



Εικόνα 6.21

Σχεδιάγραμμα διαγράμματος ενεργειακής μπάντας **(α)** ενός υλικού άμεσου διάκενου ζώνης όπως το GaAs; **(β)** έμμεσο διάκενο ζώνης σε πυρίτιο. Στο **(β)** η απορρόφηση ενός φωτονίου προωθεί ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας;

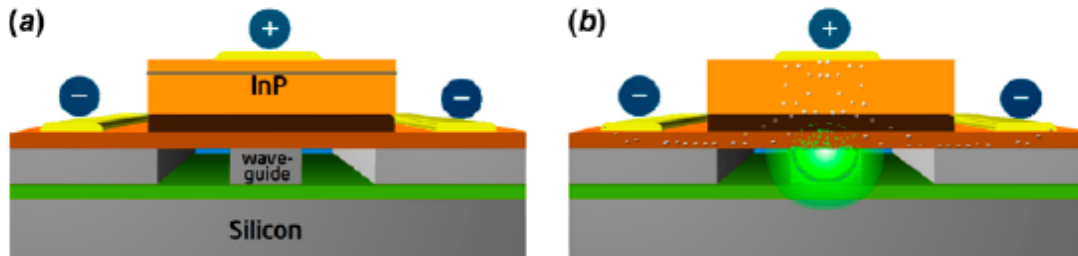
Αυτός είναι και ο λόγος που η σύνθεση III-V , όπως **GaAs-(Αρσενικούχο Γάλλιο)**, **InP-(Φωσφορούχο Ίνδιο)** και υλικά με βάση **GaN (Νιτρίδιο Γάλλιο)**, είναι τα κυρίαρχα laser ημιαγωγών. Σε ένα υλικό έμμεσου διάκενου ζώνης όπως το πυρίτιο ή γερμάνιο (**Εικόνα 6.21 (β)**) , τα ελεύθερα ηλεκτρόνια διανέμονται στην χαμηλότερη στοιβάδα της ζώνης αγωγιμότητας , η οποία δεν είναι ευθυγραμμισμένη πάνω από τις ελεύθερες σπές στην ζώνη σθένους. Οι εξαναγκασμένες εκπομπές επιτυγχάνονται συνήθως με διεργασίες μεσολάβησης φωνονίων , όπου απαιτούνται ηλεκτρόνια για να απορροφήσουν τα φωτόνια , προκειμένου να πληρούν τις προϋποθέσεις διατήρησης της ορμής και να εκπέμπουν φωτόνια. Η πιθανότητα μιας διαδικασίας

μεσολάβησης φωνονίων είναι πολύ μικρότερη από εκείνη ενός απλού βήματος ανασυνδυασμού σε υλικά άμεσου διάκενου ζώνης. Συνήθως, υπάρχουν δύο είδη μη-ακτινοβολικών διαδικασιών που σχετίζονται με τον ανασυνδυασμό ηλεκτρονίων-οπών σε υλικό πυριτίου: i) Ανασυνδυασμός Auger, στον οποίο ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο διεγείρεται σε ένα υψηλότερο επίπεδο ενέργειας απορροφώντας την απελευθερωμένη ενέργεια από ανασυνδυασμό ηλεκτρονίου-οπής; ii) απορρόφηση ελεύθερων φορέων (FCA), στην οποία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας μεταπηδούν σε υψηλότερο επίπεδο ενέργειας από την απορρόφηση φωτονίων. Ο ανασυνδυασμός Auger και FCA έχουν πολύ μικρότερη διάρκεια ζωής από αυτές σε διαδικασία μη-ακτινοβολικής, με αποτέλεσμα την κακή εσωτερική κβαντική απόδοση για την εκπομπή φωτός.

Προκειμένου, να υλοποιηθεί μια πηγή φωτός με βάσει το πυρίτιο, διάφορες μέθοδοι έχουν παρουσιαστεί για να ξεπεραστεί ο περιορισμός υλικού του πυριτίου. Μια μέθοδος χρησιμοποιεί κβαντικό περιορισμό για να ενισχυθεί η απόδοση εκπομπής φωτός και το οπτικό κέρδος σε χαμηλή θερμοκρασία [105]. Τα τελευταία χρόνια, το ντοπαρισμένο πυρίτιο σπάνιων γαιών ή/ και οι δομές διοξειδίου του πυριτίου έχουν σημαντικές δυνατότητες lasing σε μήκη κύματος τηλεπικοινωνιών [106]. Αντί να επικεντρωθούμε με lasing σε πυρίτιο, έχουν αναφερθεί πολλά υβριδικά laser πυριτίου από συγκόλληση wafer (**wafer-bonding**) ή Επιταξία (**Epitaxial Growth**) σε υλικά III-V άμεσου διάκενου ζώνης και γερμανίου σε πλατφόρμα πυριτίου [107,108]. Στην πραγματικότητα, μια καλά τεκμηριωμένη λύση III-V lasers ολοκληρωμένα σε SOI πλατφόρμα είναι η πιο πρακτική επιλογή για εμπορικές εφαρμογές στο εγγύς μέλλον [109]. Αυτό που θεωρείται συχνά ως το μόνο «πραγματικό» laser αποδεικνύοντας με επιτυχία την χρήση του πυριτίου ως υλικό κέρδους είναι το laser πυριτίου Raman [3,110]. Ωστόσο, τα Raman laser βασίζονται σε φωτοφωταύγεια (photoluminescence). Ως εκ τούτου, ο μηχανισμός του laser πυριτίου Raman λειτουργεί ως η καλύτερη επιλογή για την ενίσχυση του φωτός από ότι για εκπομπή φωτός. Επί του παρόντος, εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση να επιτευχθεί ηλεκτρικά η άντληση σε θερμοκρασία δωματίου συνεχούς κύματος (CW) lasing σε πυρίτιο. Οι ακόλουθες υποενότητες περιγράφουν τις λεπτομέρειες των προόδων στα Lasers πυριτίου.

6.7.1.1 Υβριδικό Laser σε πυρίτιο

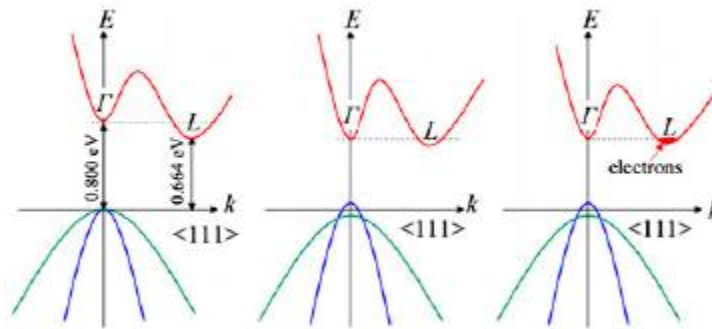
Η ιδέα της υβριδικής ολοκλήρωσης με στοιχεία των ομάδων III-V ημιαγωγών [107] ή υλικά κέρδους Γερμανίου [108] με μία πλατφόρμα πυριτίου για lasing έχει αποκτήσει δημοτικότητα αυτά τα χρόνια. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την υβριδική ολοκλήρωση: i) συγκόλληση πλήρους ή μερικού wafer δομής ημιαγωγών εκπομπής φωτός; Και ii) επιταξία (epitaxially growing) κρυσταλλικών ημιαγωγών πάνω στο υπόστρωμα πυριτίου. Τα υβριδικά σε πυρίτιο laser συνδέονται με λεπτά στρώματα III-V ημιαγωγών σε πυρίτιο, όπου το φως που εκπέμπεται από τα στρώματα III-V συνδέεται σε on-chip κυματοδηγό πυριτίου, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.22 [111]**.



Εικόνα 6.22 Σχ. Υβριδικού Laser α) Η τομή δείχνει InP-based υλικό κέρδους που παράγει η δέσμη laser συνδεδεμένο στο πάνω μέρος ενός κυματ. Πυριτίου.

β) Όταν εφαρμόζεται τάση στην επαφή, διαρρέεται από ρεύμα, και τα ηλεκτρόνια (-) και οι οπές (+) επανασυνδέονται στο κέντρο και παράγουν δέσμη φωτός.

Από την άλλη, η επιταξιακή εναπόθεση γερμανίου σε πυρίτιο για lasing χρησιμοποιεί γερμάνιο ως υλικό κέρδους. Το ενδογενές γερμάνιο είναι ένα υλικό έμμεσου διάκενου ζώνης, με ένα ενεργειακό κενό 136mV μεταξύ άμεσων και έμμεσων διάκενων ζώνης. Το διάκενο ζώνης του γερμανίου μπορεί να κατασκευαστεί είτε με την εισαγωγή **ενός υλικού όταν πάνω του υποβάλλεται κάποια τάση** (tensile strain) ή με σημαντικό ντοπάρισμα N-type για να γεμίσει με ηλεκτρόνια την έμμεση ζώνη μέχρι το επίπεδο της άμεσης ζώνης (βλέπε Εικόνα 6.23) [108].



Εικόνα 6.23

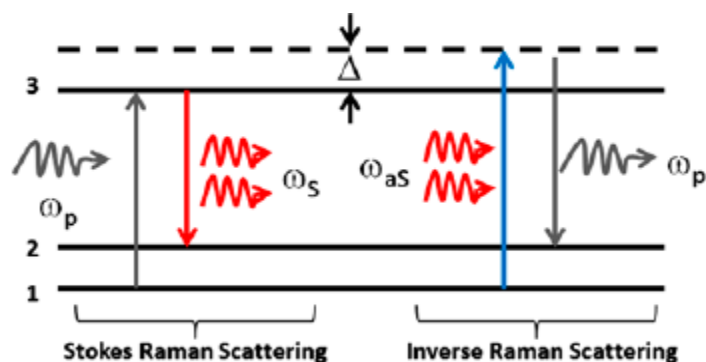
Σχεδιάγραμμα δομής ζώνης από bulk Ge(αριστερά): μια διαφορά 136eV ανάμεσα σε άμεσο και έμμεσο κενό; (κέντρο) ένταση ελαστικότητας i-Ge, η διαφορά ανάμεσα στα άμεσα και έμμεσα κενά μπορεί να μειωθεί από την εφελκυστική ένταση (tensile strain); (δεξιά) tensile strain n+ Ge ; δομή ζώνης ολίσθησης

Αυτές οι τεχνικές επέτρεψαν την επιτυχή παρουσίαση ηλεκτρικής [112] και οπτικής [113] λειτουργίας άντλησης του γερμανίου σε lasers πυριτίου.

6.7.1.2 Laser Raman Πυριτίου

Το 2002, η ομάδα Jalali [114] πρότεινε Lasers και Ενισχυτές πυριτίου κάνοντας χρήση την Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman. Το 2004 , ολοκλήρωσαν το πρώτο laser Raman Πυριτίου [100]. Λίγο μετά από αυτό, ο Rong et. Al από την Inter Corporation [3] παρουσίασε το πρώτο Συνεχούς Κύματος (Continuous Wave) Raman laser πυριτίου.

Σε Laser πυριτίου Raman , το πυρίτιο είναι το υλικό κέρδους που χρησιμοποιεί Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman για να ενισχύσει το φως. Όταν ένα συγκεκριμένο προσπίπτον φως (π.χ. φως άντλησης) ακτινοβολεί το υλικό πυριτίου, δύο Σκεδάσεις Raman , ειδικότερα δημιουργούνται η σκέδαση **Anti-Stokes** (+) και **Stokes**(-). Όταν η αντλία και οι δέσμες φωτός **Stokes** βρίσκονται στο υλικό πυριτίου, η **δέσμη Stokes** θα ενισχυθεί και θα πραγματοποιηθεί Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman όπως φαίνεται στην **Εικόνα 6.24** .



Εικόνα 6.24

Σχεδιάγραμμα Raman και διεργασία Raman Stokes. Οι συνεχόμενες και διακεκομμένες γραμμές δείχνουν τις πραγματικές και εικονικές καταστάσεις ενέργειας, αντίστοιχα. Η θεμελιώδης διέγερση, ή η άντληση (ω_p), μετατρέπεται σε μία χαμηλής ενέργειας ακτινοβολία (ω_s). Το Δ είναι ο αποσυντονισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας από την 1^η στην 3^η μετάβαση συντονισμού.

Το **Laser Raman πυριτίου** είναι οπτικής άντλησης, όπου η συχνότητα του αντλούμενου φωτός είναι υψηλότερη από την επιθυμητή συχνότητα Stokes κατά 15,6 THz (δηλαδή τη συχνότητα μετατόπισης/ολίσθησης Raman) [114]. Η Υψηλή ισχύς άντλησης θα προκαλέσει επίσης μη-γραμμική απορρόφηση, συμπεριλαμβανομένης της απορρόφησης δύο φωτονίων (TPA) και την μετέπειτα (FCA). Για να ξεπεραστεί ο ανταγωνισμός μεταξύ του κέρδους Raman και της TPA-συμπεριλαμβανομένης της FCA, μία αντεστραμμένη P-i-n δίοδος δομής κυματοδηγού πυριτίου προτείνεται [114] για να μειωθεί η διάρκεια ζωής του ελεύθερου φορέα. Η p-i-n δίοδος έχει μια ευρεία περιοχή εξάντλησης καθώς η ελαφρώς ντοπαρισμένη κοντινή ενδογενή i- περιοχή παρεμβάλλεται μεταξύ ενός p-type και ενός n-type πυριτίου. Εναλλακτικά, οι σύντομοι παλμοί άντλησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειωθεί η διάρκεια ζωής ελεύθερου φορέα. Προς το παρόν, το laser πυριτίου Raman είναι το μόνο Laser πυριτίου που με επιτυχία χρησιμοποιεί υλικό πυριτίου ως υλικό κέρδους πυριτίου. Εκτός από το lasing, το laser πυριτίου Raman είναι πολλά υποσχόμενο για τους μετατροπείς μήκους κύματος και τους ενισχυτές [3]. Ωστόσο, η αναγκαιότητα του μηχανισμού οπτικής άντλησης καθιστά το laser πυριτίου Raman πρακτικό για CMOS συμβατικά εμπορικά προϊόντα.

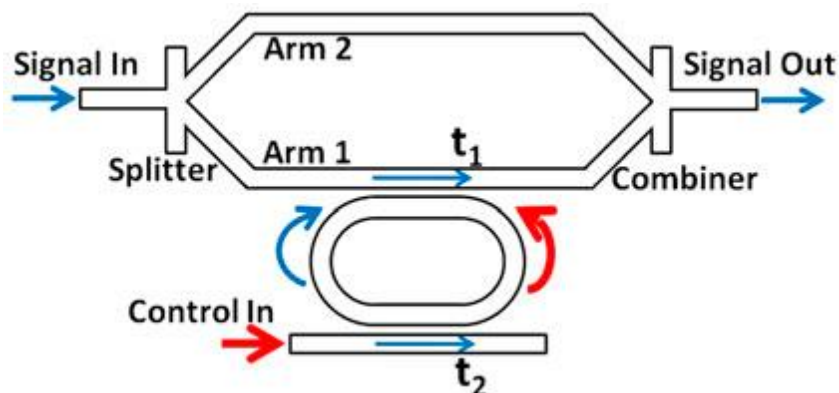
6.7.2 Ring-Assisted Mach–Zehnder συμβολόμετρο (RAMZI)

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενη ενότητα, οι διαμορφωτές (modulators) και οι διακόπτες (switches) πυριτίου είναι σημαντικά στοιχεία των PICs (photonic integrated circuits) πυριτίου. Ένας διαμορφωτής είναι μια συσκευή η οποία μπορεί να μεταβάλλει μία ή περισσότερες ιδιότητες μίας μεταδιδόμενης εκπομπής φωτός. (οπτικός φορέας). Απο την άλλη πλευρά ένας διακόπτης πυριτίου επιτρέπει σε έναν οπτικό φορέα ενός PIC πυριτίου να μπορεί να μεταβαίνει επιλεκτικά από το ένα κύκλωμα σε ένα άλλο. Ένας διαμορφωτής/διακόπτης συνήθως χαρακτηρίζεται από παραμέτρους όπως η ταχύτητα και ο λόγος εξάλειψης (Extinction Ratio) [115]. Η ταχύτητα διαμόρφωσης/μεταγωγής μετράει το μέγιστο ρυθμό δεδομένων που διαμορφώνονται σε έναν οπτικό μεταφορέα πριν η ενίσχυση διαμόρφωσης/ μεταγωγής μειωθεί κάτω από τα 3dB. Ο λόγος εξάλειψης (ER), ή το βάθος διαμόρφωσης/μεταγωγής, ορίζει το λόγο ανάμεσα στην μέγιστη κ ελάχιστη μετάδοση οπτικής ισχύος. Ένας ER > 7 dB είναι επιθυμητός; ωστόσο ένας ER των 4 - 5 dB είναι συνήθως επαρκής, υπό την προϋπόθεση ότι τα επιμέρους στοιχεία του οπτικού συστήματος είναι βελτιστοποιημένα [10]. Πρόσθετες παράμετροι

απόδοσης συμπεριλαμβανομένης της απώλειας παρεμβολής, κατανάλωσης ισχύος, και το ίχνος συχνά λαμβάνονται υπόψη για τον σχεδιασμό ενός διαμορφωτή/διακόπτη.

Οι Διαμορφωτές και/ή Διακόπτες ελέγχουν τους οπτικούς φορείς από μή-οπτικά ή οπτικά σήματα. Η εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου σε ένα υλικό μπορεί να αλλάξει πραγματικά και φανταστικά τους δείκτες διάθλασης. Εξαιτίας της κεντροσυμμετρικής κρυσταλλικής δομής του πυριτίου, το παραδοσιακό γραμμικό ηλεκτρο-οπτικό φαινόμενο ή Pockels effect , απαγορεύεται στο καθαρό πυρίτιο. Πρόσφατα , ο Jacobsen και άλλοι [116] παρουσίασαν το φαινόμενο Pockels επιβαλλόμενο από την παραμόρφωση , διακόπτοντας την κρυσταλλική συμμετρία του πυριτίου διαμέσου μίας ασύμμετρης παραμόρφωσης. Το 2011 , παρουσιάστηκε ένας πλήρως ολοκληρωμένος ηλεκτρο-οπτικός διαμορφωτής χρησιμοποιώντας κυματοδηγούς παραμορφωμένου πυριτίου [117]. Παρά το γεγονός ότι η υψηλότερη δεύτερης τάξης ευαισθησία παραμορφωμένου φέρεται να είναι $\chi_{Si} = 120 \text{ pm/V}$ από τον Chmielak et al. (πολύ χαμηλότερο από $\chi_{LiNbO_3}^{(2)} = 360 \text{ pm/V}$ σε συμβατικές πλατφόρμες χ_{LiNbO_3}), η ομάδα μας μαζί με επιστήμονες από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας του Καναδά (NFC) πρόσφατα, κατέληξαν ότι είναι πιθανή η περαιτέρω ενίσχυση της τιμής $\chi_{Si}^{(2)}$ βελτιστοποιώντας τις παραμέτρους γεωμετρικού σχεδιασμού [118]. Επί του παρόντος, ωστόσο , η ενίσχυση ή εξάλειψη φορέα μέσω του φαινομένου της διασποράς πλάσματος είναι το πιο αποτελεσματικό μέσο διαμόρφωσης και μεταγωγής σε πυρίτιο χρησιμοποιώντας ελεγχόμενα ηλεκτρικά σήματα [119].

Όταν οι οπτικοί φορείς ελέγχονται από οπτικά σήματα οι αμιγώς οπτικούς διαμορφωτές/μεταγωγείς έχουν υλοποιηθεί. Μέχρι τώρα, η αμιγώς οπτική διαμόρφωση/μεταγωγή μπορεί να υλοποιηθεί είτε από την απορρόφηση δύο φωτονίων [120], είτε από το φαινόμενο Kerr [121]. Η ομάδα μας, πρόσφατα πρότεινε ένα συμβολόμετρο MZI ring assisted (υποβοηθούμενο από το δακτύλιο) για αμιγώς οπτική μεταγωγή ενός μεμονωμένου μήκους κύματος χρησιμοποιώντας τις απώλειες προκαλούνται από Raman. Οι απώλειες που προκαλούνται λόγω Raman αλλάζουν την κατάσταση σύζευξης του MRR από το να είναι, over-coupled σε under-coupled στο μήκος κύματος Anti-Stokes. Επομένως η αντίστοιχη εκπομπή του RAMZI αυξάνεται από το ελάχιστο στο μέγιστο. Η προτεινόμενη συσκευή επιτρέπει άκρως επιλεκτική μονού μήκους κύματος μεταγωγή (highly selective single-wavelength switching), η οποία είναι χρήσιμη για εφαρμογές οπτικής επεξεργασίας σήματος.



Εικόνα 6.25

Σχεδιάγραμμα ενός αμιγώς οπτικού διακόπτη που βασίζεται σε Ring-Assisted MZI συμβολόμετρο (RAMZI) με έλεγχο φωτός σε μήκη κύματος Anti-Stokes [122].

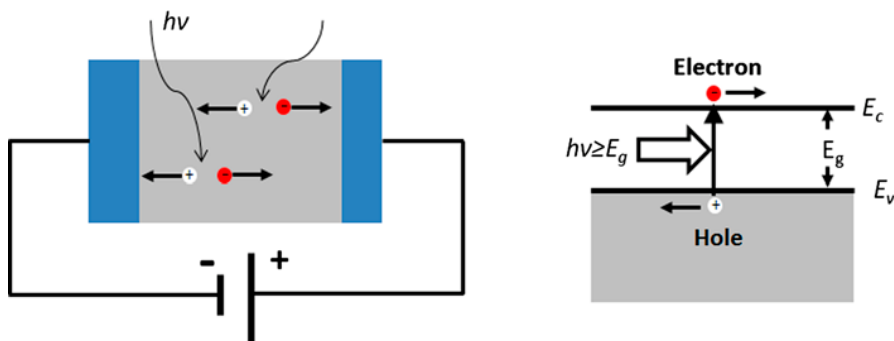
6.7.3 Ανιχνευτές Πυριτίου

Τοποθετούνται στο τέλος μιας διασύνδεσης ενός **PIC** (Photonic Integrated Circuit), όπου ένας φωτοανιχνευτής μετατρέπει ένα οπτικό σήμα σε ηλεκτρονική μορφή. Η διαδικασία λειτουργίας μπορεί να απεικονιστεί όπως στο **Σχήμα 6.26**. Ο φωτοανιχνευτής απορροφά τα φωτόνια που προσπίπτουν, δημιουργώντας ζεύγη ελεύθερων ηλεκτρονικών – οπών τα οποία στη συνέχεια κινούνται προς τα ηλεκτρόδια από ένα ηλεκτρικό πεδίο. Στην έξοδο υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα ή φωτορεύμα. Για να δημιουργηθούν τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, η ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από εκείνη του ενεργειακού κενού, δηλαδή :

$$E_{\text{photon}} = h \times \nu \geq E_g \text{ (Ενεργειακό Κενό)}$$

h : Σταθερά Plank , **ν** : συχνότητα ακτίνας φωτός

Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός φωτοανιχνευτή περιλαμβάνουν *κβαντική απόδοση*, *αποκρισιμότητα*, *χρόνος απόκρισης* και *θόρυβο ανιχνευτή*. Η κβαντική απόδοση μετρά την ηλεκτρική ευαισθησία ενός φωτοανιχνευτή στο φως, η οποία αναφέρεται στο λόγο του αριθμού των παραγόμενων ζευγών ηλεκτρονίων – οπών προς τον αριθμό των φωτονίων που προσπίπτουν.



Εικόνα 6.26

Φυσική αρχή ενός φωτοανιχνευτή : (αριστερά) απορρόφηση φωτονίου και γένεση φωτονίου ενός κινούμενου ζευγαριού ηλεκτρονίου-οπής; (δεξιά) Σχεδιάγραμμα μετάβασης επιπέδου ενέργειας ενός ηλεκτρονίου που προκαλείται από ένα φωτόνιο.

Η αποκρισιμότητα εξαρτάται από το μήκος κύματος και μπορεί να υπολογιστεί από τον λόγο , του παραγόμενου φωτο-ρεύματος , προς την συνολική προσπίπτουσα οπτική ισχύ. Ο χρόνος απόκρισης είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας φωτο-ανιχνευτής για να αντιδράσει σε μία προσπίπτουσα ακτίνα φωτός. Ο χρόνος απόκρισης του φωτοανιχνευτή περιορίζεται τόσο από τον χρόνο διέλευσης των ελεύθερων φορέων όσο και από την σταθερά χρόνου RC που συνδέεται με τον ανιχνευτή και το κύκλωμα του. Σε γενικές γραμμές, ένας ταχύτερος χρόνος απόκρισης συνεπάγεται ότι ο φωτοανιχνευτής έχει ένα ευρύτερο εύρος ζώνης λειτουργίας (**BW**). Ο θόρυβος ανιχνευτή περιλαμβάνει τον *θόρυβο βολής* από την στατιστική φύση της παραγωγής, καθώς και θόρυβος σκοτεινού ρεύματος από τους θερμικά παραγόμενους ελεύθερους φορείς.

Βασιζόμενοι στις φυσικές τους κατασκευές, οι φωτοανιχνευτές κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες: **Schottky metal-semiconductor-metal**, **p-i-n** και **φωτοδίοδους χιονοστιβάδας**. Ένας φωτοανιχνευτής MSM αποτελείται από 2 φωτοδίοδους Schottky back-to-back με δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια σε υλικό ημιαγωγού. Όταν το φως ακτινοβολεί στον ημιαγωγό μεταξύ των μεταλλικών ηλεκτροδίων, δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, οι οποίες στην συνέχεια παρασύρονται από το ηλεκτρικό πεδίο και δημιουργούν ένα φωτορεύμα. Τα φράγματα Schottky

στις διεπαφές metal-semiconductor-metal των ηλεκτρονίων περιορίζουν το σκοτεινό ρεύμα [123]. Αν και οι φωτοανιχνευτές MSM θα μπορούσαν ενδεχομένως να έχουν έναν εξαιρετικό γρήγορο χρόνο απόκρισης, το κύριο μειονέκτημα αυτών των φωτοανιχνευτών είναι η χαμηλή κβαντική απόδοση τους, λόγω της διαρροής ροής φωτονίων στο μεταλλικό στρώμα/τα. Όπως περιγράφεται εν συντομία στο τμήμα 8.7.1.2, μια PIN φωτοδίοδο αποτελείται από μία περιοχή ενδογενούς πυριτίου, που παρεμβάλλεται ανάμεσα σε μία -n και μία -p ντοπαρισμένη περιοχή. Τα περισσότερα φωτόνια απορροφούνται στην ενδογενή περιοχή, και φορείς που δημιουργούνται εντός αυτής μπορούν να συμβάλουν αποτελεσματικά στο φωτορεύμα [124]. Σε σύγκριση με τις φωτοδιόδους p-i-n, οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας (APDs) έχουν μία PN επαφή με εσωτερική περιοχή απογύμνωσης-αραιώσης όπου ο πολλαπλασιασμός ηλεκτρονίου παρατηρείται με μια σχετικά υψηλή εξωτερική τάση αναστροφής [125]. Η διαδικασία πολλαπλασιασμού του ηλεκτρονίου έχει ως αποτέλεσμα ένα ενισχυμένο σήμα εξόδου, καθιστώντας τα APDs κατάλληλα για την ανίχνευση χαμηλών επιπέδων φωτισμού σε υψηλή ταχύτητα. Λόγω του διαφανούς υλικού στο φάσμα μήκους κύματος επικοινωνιών, η οπτική ανίχνευση στην πλατφόρμα πυριτίου απαιτεί την ενσωμάτωση άλλων δραστικών υλικών. Τα υλικά της ομάδας III-V και το Γερμάνιο (Ge) έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά για να βοηθήσουν την πλατφόρμα πυριτίου στην ανίχνευση σε μήκη κύματος που κυμαίνονται από 1300-1500nm. Στις παρακάτω υποενότητες, θα συζητήσουμε τα δύο είδη φωτο-ανιχνευτών, τους υβριδικούς III-V ανιχνευτές και τους Ανιχνευτές Ge-on-Si.

6.7.3.1 Ανιχνευτές III-V

Στην οπτοηλεκτρονική, οι III-V ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για την παραγωγή και συλλογή φωτός εξαιτίας των απευθείας κενών στην μπάντα τους [126]. Η απλούστερη προσέγγιση για την ολοκλήρωση της οπτοηλεκτρονικής είναι η υβριδοποίηση ενώ ετερογενούς στοιχείων σε μια πολλαπλών λειτουργιών μονάδα. Οι **III-V ημιαγωγοί** όπως Φωσφορούχο Ίνδιο (InP) /InGaAs ή GaAs/AlGaAs (*Αρσενικούχο Γάλλιο/Αλουμίνιο Αρσενικούχο Γάλλιο*) παρέχουν άριστη εκπομπή φωτός και λειτουργίες ανίχνευσης. Επιπλέον, τα III-V υλικά (πχ InGaAs) προσφέρουν γενικά χαμηλό σκοτεινό ρεύμα «Dark Current», υψηλή ταχύτητα και υψηλή ευαισθησία για φωτοανίχνευση [124]. Στην πραγματικότητα, το χαμηλό σκοτεινό ρεύμα είναι ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα που έχουν οι III-V φωτοανιχνευτές από άλλους τύπους [127]. Ωστόσο, τα υλικά III-V έχουν υψηλή **απορροφητικότητα μόνο μέχρι 1.7μm**, περιορίζοντας την αποκρισμότητα των ανιχνευτών από μήκη κύματος μεγαλύτερα από 1.7μm.

Ο μικρότερος αναφερθείς PIN φωτοανιχνευτής σε SOI χρησιμοποιεί InP μεμβράνες και έχει ένα αποτύπωμα συσκευής 50 μm² [128]. Τέτοιος φωτοανιχνευτής είναι κατάλληλος για υψηλής ολοκλήρωσης πυκνότητα και χαμηλής δυναμικής κατανάλωσης ισχύος με πολύ μικρή χωρητικότητα επαφής κάτω από 10 FemtoFarads (fF). Η Αποκρισμότητα και τα 3-dB εύρος ζώνης γι' αυτόν τον ανιχνευτή είναι 0.45 Amps/Watt και 33 GHz, αντίστοιχα. Το σκοτεινό ρεύμα είναι 1.6 nA με -4V τάση πόλωσης. Επί του παρόντος, ένας άλλος τύπος PIN φωτοανιχνευτή έχει το μικρότερο σκοτεινό ρεύμα των 10 pA στα πλαίσια μια τάσης πόλωσης των -0.5V [129].

Ακόμα και σε μια αντίστροφη πόλωση των -10V, το σκοτεινό ρεύμα εξακολουθεί να είναι μικρότερο από 150 pA, το οποίο είναι αρκετές τάξεις μεγέθους χαμηλότερο από οποιουδήποτε αναφερθέντα φωτοανιχνευτή Ge. Για φωτοανιχνευτές με δομή MSM αναφέρθηκαν μικροί και αποδοτικοί InAlAs-InGaAs MSM φωτοανιχνευτές ολοκληρωμένοι σε SOI κυματοδηγούς που έχουν αποκρισμότητα 1.0 A/W για έναν ανιχνευτή μήκους 30 μm σε μήκος κύματος των 1550nm [124]. Το σκοτεινό ρεύμα είναι 4.5 nA σε μία τάση πόλωσης -5V [124]. Επιπλέον, οι δομές

κβαντικού πηγαδιού και κβαντικής τελείας εφαρμόζονται σε ανιχνευτές III-V για αυξημένη απόδοση σε μεγάλα μήκους κύματος για ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, σ έναν φωτοανιχνευτή κβαντικού πηγαδιού (Quantum Well) AlGaInAs συνδεδεμένο με έναν κυματοδηγό πυριτίου [127] έχει αναφερθεί ότι έχει αποκρισιμότητα σύζευξης-ίνας στα 0.31 Amps/Watt με εσωτερική αποκρισιμότητα chip στο 1.1 Amps/Watt. Η εσωτερική κβαντική απόδοση φαίνεται να είναι 90% στην περιοχή μήκους κύματος των 1.5μm .

6.7.3.2 Ανιχνευτές Ge-on-Si

Αν και οι ανιχνευτές III-V είναι αποτελεσματικοί στην ανίχνευση στο φάσμα του μήκος κύματος των επικοινωνιών, η ολοκλήρωση χαμηλών απωλειών στην πλατφόρμα πυριτίου παραμένει μια πρόκληση λόγω της εγγενούς αναντιστοιχίας πλέγματος μεταξύ των υλικών. Ένα τεράστιο ποσό της έρευνας έχει κατευθυνθεί προς την υλοποίηση μονολιθικής υλοποίησης φωτοανιχνευτών πυριτίου. Το Γερμάνιο (**Ge**) ένα στοιχείο της ομάδας III-V, έχει παρόμοιες ιδιότητες με το πυρίτιο (Si) αλλά με μικρό ενεργειακό κενό (0.7 eV έναντι του πυριτίου με 1.1 eV). Το Ge και κράματα SiGe εμφανίζουν ισχυρή απορρόφηση φωτονίων σε ολόκληρο το φάσμα του μήκος κύματος επικοινωνιών μέχρι 1.7 μm [125]. Ένα άλλο όφελος από την χρήση του Γερμανίου είναι ότι είναι ιδιαίτερα συμβατό με τις διεργασίες CMOS Si, επιτρέποντας έτσι την μονολιθική ολοκλήρωση φωτοανιχνευτών Ge/SiGe σε PICs Si [130]. Ωστόσο η χρήση Ge σε Si έχει και τα μειονεκτήματά της. Για παράδειγμα, υπάρχει αναντιστοιχία πλέγματος (περίπου 4.2%) μεταξύ Ge και Si , η οποία δημιουργεί τάση εφελκυσμού , προκαλώντας απομάκρυνση ατελειών(εξαρθρώση ελαττωμάτων) με ένα αυξημένο σκοτεινό ρεύμα. Το κρίσιμο πάχος στο οποίο τα στρώματα Γερμανίου (Ge) αρχίζουν να αντιμετωπίζουν έναν μεγάλο αριθμό από αυτές τις εξαρθρώσεις/απομακρύνσεις είναι υπερβολικά λεπτό για να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική απορρόφηση των φωτονίων στο εύρος των 1550 nm. Προκειμένου να μειωθούν οι εξαρθρώσεις, ορισμένες μέθοδοι πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να αυξηθεί το Ge στο Si [9]. Υπάρχουν δύο τεχνικές σχεδιασμού για τους φωτοανιχνευτές πυριτίου-Γερμανίου: φωτίζουσα επιφάνεια (γνωστή και ως κανονική-πρόσπτωση) και κυματοδηγούς ολοκληρωμένους φωτοανιχνευτές. Και για τις δύο μεθόδους, η απόθεση Ge σε Si γίνεται με παρόμοιο τρόπο. Πρώτον, ένα λεπτό στρώμα Ge (30-60 nm) αναπτύσσεται στην κορυφή του Si σε χαμηλή θερμοκρασία (320-400c) χρησιμοποιώντας μια χημική διεργασία εναπόθεσης ατμών(CVD). Η χαμηλή θερμοκρασία περιορίζει τον σχηματισμό "νησίδων" στο λεπτό στρώμα Ge. Αυτό ακολουθείται από την ανάπτυξη ενός παχύτερο (300-500nm) και με υψηλότερη ποιότητα κρυσταλλικού στρώματος Ge στους 600-800c. Χρησιμοποιώντας ένα λεπτό στρώμα ως buffer στρώμα , το παχύτερο στρώμα Ge εμφανίζει αποτελέσματα ανάπτυξης όμοια με εκείνα της Homoepitaxy⁷ (από την στιγμή που εφόσον οι εξαρθρώσεις εντοπίζονται στο λεπτό στρώμα). Διαπιστώθηκε επίσης ότι μία μετα-ανάπτυξη (post-growth) διαδικασία **θερμικής ανόπτησης** στους 700 με 900c, μπορεί να μειώσει περαιτέρω εξαρθρώσεις για περίπου δύο τάξεις μεγέθους, και έτσι να μειωθεί δραστικά το μέγεθος του σκοτεινού ρεύματος. Λόγω των απαιτήσεων μεγέθους της συσκευής για το πάχους του Γερμανίου , απόδοση της φωτεινής επιφάνειας φωτοανιχνευτών είναι ένας συμβιβασμός ανάμεσα στο εύρος ζώνης και την ευαισθησία-αποκρισιμότητα. Ο μόνος φωτοανιχνευτής φωτεινής επιφάνειας που έχει αποδεκτά χαρακτηριστικά για μοντέρνα οπτικά κυκλώματα (για παράδειγμα με υψηλό εύρος ζώνης και ωφέλιμη ευαισθησία) αναπτύχθηκε απο τον Ινστιτούτο Θεμελιωδών Ηλεκτρονικών το 2009 με 0.1 A/W ευαισθησία και 49 GHz BW [131]. Πρόσφατα, υπήρξαν οι πιο συναρπαστικές εξελίξεις σε κυματοδηγό ολοκληρωμένων φωτοανιχνευτών. Ο καλύτερος Ge-Si ολοκληρωμένος φωτοανιχνευτής σε κυματοδηγό κατασκευάστηκε από IEF το 2008; είχε εύρος ζώνης 42 GHz με

⁷ **Homoepitaxy** είναι η εναπόθεση επιταξιακού στρώματος σε υπόστρωμα από το ίδιο είδος υλικού.

ευαισθησία 1 A/W και σκοτεινό ρεύμα στα 18 nA [123]. Το 2012 , το IEF έφτιαξε έναν κυματοδηγό με BW 120 GHz με ευαισθησία 0.8 A/W και σκοτεινό ρεύμα με τιμή στα 4 nA [132]. Αυτός ο φωτοανιχνευτής έχει το μεγαλύτερο εύρος ζώνης μέχρι στιγμής. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τους state of the art φωτοανιχνευτές Si που αναφέρονται στην βιβλιογραφία.

Device Type	Group/ Institution	Year	Responsivity γ (A/W) @155nm	3dB Bandwidth (Ghz)	I_{dark} Density (mA/cm ²)	I_{dark} (μ A)	Structure	Reference
Surface illuminated photodetectors	MIT	2005	0.56	8.5	10	0.79*	PIN	[133]
	Stuttgart	2006	----	39@2V	375*	0.075	PIN	[134]
	U. of Texas	2006	0.28	17@10V	180*	0.57	PIN	[135]
	IOM	2007	0.037	15	27	0.035	PIN	[136]
	IEF	2009	0.1@5v	49	1500	0.225	PIN	[131]
Waveguide Coupled photodetectors	IEF	2007	1	25@6V	650.000 *	130	MSM	[137]
	IEF	2008	1	42@4V	60	0.018	PIN	[123]
	KOTURA	2009	1.1	32.6	16.000	1.3	PIN	[138]
	Stuttgart	2009	0.05@2V	49@2V	0.13	---	PIN	[139]
	Kotura	2010	0.56	23@0.5V	125	0.02@0.5V	PIN	[140]
	ETR1	2010	0.8	50	---	0.035	PIN	[141]
	IEF	2012	0.8	120	80.000	4@1V	PIN	[132]

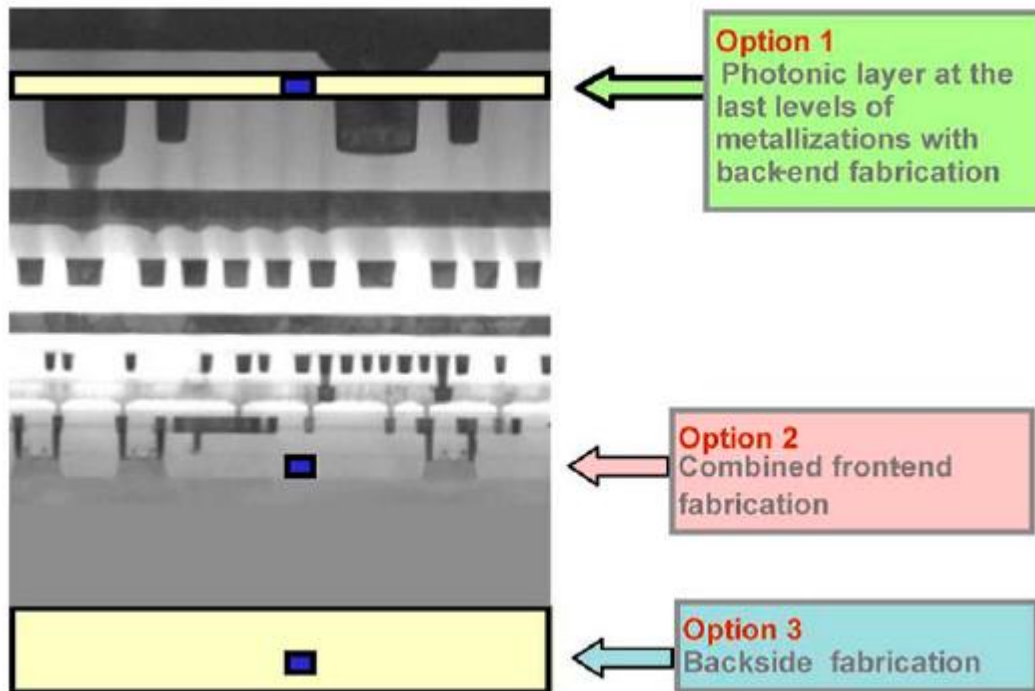
Πίνακας 1 – Φωτοανιχνευτές βασιζόμενοι στο πυρίτιο (Silicon-based photodetectors)

6.8 Ολοκλήρωση και Πακετοποίηση (packaging)

Ο απώτερος σκοπός της φωτονικής πυριτίου είναι η ολοκλήρωση των επιμέρους φωτονικών συσκευών πάνω σε ένα μονό υπόστρωμα. Τα βασικά στοιχεία υιοθέτησης της αγοράς και η εμπορική επιτυχία των PICs πυριτίου είναι CMOS συμβατές διαδικασίες για τεχνικές ολοκλήρωσης και συσκευασίας.

Απο πλευράς φωτονικών κατασκευαστικών στοιχείων , τα περισσότερα απο τα δομικά-βασικά κομμάτια πυριτίου όπως παθητικές συσκευές, διαμορφωτές και ανιχνευτές έχουν ήδη κατασκευαστεί με επιτυχία χρησιμοποιώντας τις πρότυπες διαδικασίες επιπέδου-wafer. Το μόνο κομμάτι που λείπει και είναι να αποδειχθεί είναι τα lasers ως ένα πρακτικό μονολιθικό Laser πυριτίου. Όπως συζητήθηκε στην **Ενότητα 6.7.1** οι τρέχουσες λύσεις περιλαμβάνουν την χρήση είτε ενός εξωτερικού laser ή ενός ολοκληρωμένου υβριδικού III-V ή laser Γερμανίου (Ge). Justic και άλλοι παρουσίασαν ολοκλήρωση κλίμακας-wafer III-V laser πυριτίου χρησιμοποιώντας την εκτύπωση μεταφοράς επιταξιακών στρωμάτων [142]. Αν και η μέθοδος ολοκλήρωσης εξακολουθεί να χρησιμοποιεί επιταξιακού III-V υλικό το υλικό προφέρει μια επίπεδη διαδικασία κλίμακας μετά την μεταφορά λιθογραφιαφικής ευθυγράμμισης με χαμηλό θερμικό προϋπολογισμό.

Για να ολοκληρώσεις μονολιθικά οπτικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα πάνω σε πυρίτιο υπάρχουν 3 μέθοδοι που έχουν αναφερθεί : 1) τοποθετώντας φωτονικά κυκλώματα στο τελευταίο επίπεδο επιμετάλλωσης 2) συνδυαζόμενη front κατασκευή 3) και backside κατασκευή όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 6.27** [143].



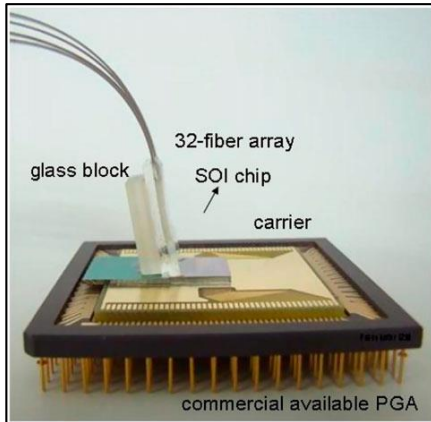
Εικόνα 6.27

Επιλογές ολοκλήρωσής του φωτονικού επιπέδου/στρώματος με το ηλεκτρονικό επίπεδο/στρώμα [145].

Σύμφωνα με την **πρώτη προσέγγιση** γίνεται κατασκευή φωτονικών συσκευών με τεχνολογία back-end στο τελευταίο επίπεδο επιμετάλλωσης. Σε αυτήν την προσέγγιση , τα φωτονικά στοιχεία είναι πλήρως ενσωματωμένα στο επιμεταλλωμένο στρώμα πάνω από τα στρώματα της CMOS ηλεκτρονικής συσκευής. Η **δεύτερη προσέγγιση** είναι μια πλήρης μονολιθική ολοκλήρωση που επεξεργάζεται ταυτόχρονα τόσο ηλεκτρονική CMOS όσο και την φωτονική στο front-end επίπεδο [144]. Τα φωτονικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα μοιράζονται το αποτύπωμα chip , που οδηγεί σε μια μέτρια πυκνότητα ολοκλήρωσης. Σημειώνεται ότι το packaging απαιτεί ειδικές εκτιμήσεις , όπως το laser **εποξειδικά-συνδεδεμένο** πάνω στο chip. Η **τρίτη προσέγγιση** συχνά καλείται ως τριών διαστάσεων ολοκλήρωση η οποία εκμεταλλεύεται την backside του wafer ηλεκτρονικής και βασίζεται στην σύνδεση του wafer όπου ένα πλήρως ή μερικώς επεξεργασμένο wafer φωτονικής είναι συνδεδεμένο με το backside του wafer ηλεκτρονικής [143]. Η ηλεκτρικές διασυνδέσεις μεταξύ των ηλεκτρονικών και φωτονικών στρωμάτων επιτυγχάνεται με διαύλους πυριτίου (TSV). Στην πρώτη και την τρίτη τεχνική ολοκλήρωσης, η ανεξαρτησία των φωτονικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων αποφεύγει κομψά της αλλαγές στον ηλεκτρονικό σχεδιασμό του υλικού.

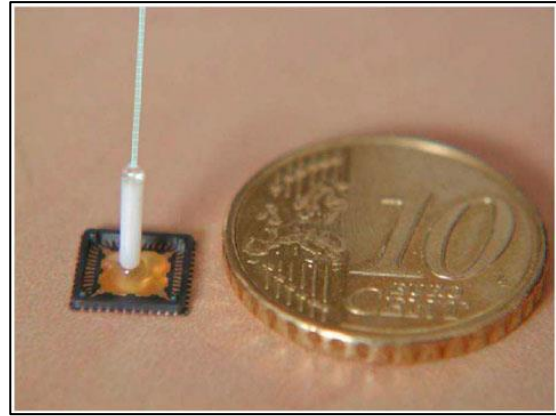
Στοχεύοντας σε μαζική παραγωγή , οι αρχιτεκτονικές CMOS φωτονικής πακετοποίησης (photonics packaging) θα διατηρήσουν το χαμηλό κόστος π.χ. περίπου το 20% του συνολικού κόστους για την πακετοποίηση (packaging) [145]. Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ο μεγάλος αριθμός εισόδων/εξόδων, η εξαιρετική θερμική αντοχή, το μικρό αποτύπωμα και η αποτελεσματική οπτική σύζευξη. Η αρχιτεκτονική οπτοηλεκτρονικής πακετοποίησης υιοθετεί

δημοφιλή είδη μικροηλεκτρονικής που αναπτύχθηκαν από την JEDEC Solid State Technology Association. Οι αρχιτεκτονικές που παρουσιάστηκαν περιλαμβάνουν κεραμικές ακίδες g-pack διάταξης πλέγματος πακέτου (*g-pack ceramic pin grid array package*, land grid array, βλέπε **Εικόνα 6.28**) [146] και (QFN) Quad flat no-leads air cavity package (φορέας chip άνευ αγωγού, βλέπε **Εικόνα 6.29**) [147]. Τελικά, η αρχιτεκτονική οπτικής σύζευξης και η συναρμολόγηση είναι βασικά στοιχεία για να επιτευχθεί υψηλής απόδοσης και χαμηλού κόστους packaging-πακετοποίηση [148].



Εικόνα 6.28

A g-Pack pin grid array package [145]



Εικόνα 6.29

Quad flat no leads με κοιλότητα αέρα

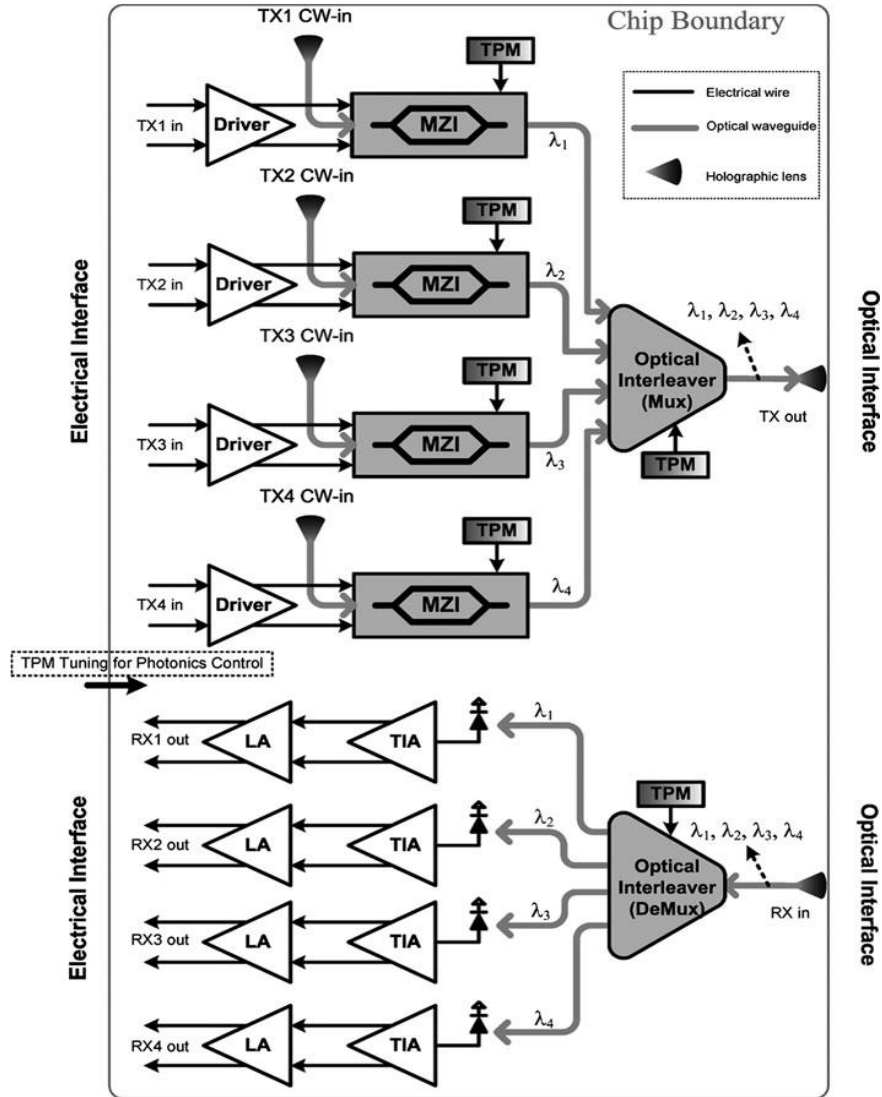
6.9 Εφαρμογές

Κατά την διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών, η επιτυχής ανάπτυξη των εμπορικών φωτονικών συσκευών και συστημάτων έχει πραγματοποιηθεί, αποδεικνύοντας πιθανές πρακτικές εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα τομέων.

6.9.1 Οπτική Διασύνδεση

Ένα βασικό κίνητρο των Silicon Photonics είναι να βελτίωση την μετάδοση δεδομένων για εφαρμογές μικρής-προσβασιμότητας σε Board to Board ή chip to chip συνδέσεις. Η οπτικές συνδέσεις πυριτίου χρησιμοποιούν πυρίτιο ως υλικό για επικοινωνία μεταξύ ή στο εσωτερικό ενός chip όπου ένας ολοκληρωμένος φωτονικός πομπός και ένας δέκτης είναι ολοκληρωμένοι-ενσωματωμένοι σε ένα chip ή εγκάρσια σε multi-chips. Οι παραδοσιακές χάλκινες διασυνδέσεις στην βιομηχανία CMOS ολοκληρωμένων κυκλωμάτων υποφέρει από υψηλή κατανάλωση ενέργειας και ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς και καθυστέρηση που σχετίζεται με την υποβάθμιση των επιδόσεων [149,150]. Κατά συνέπεια οι οπτικές συνδέσεις πυριτίου υπόσχονται την παροχή διασύνδεση μειωμένης καθυστέρησης και την παροχή ευρύτερου

εύρους ζώνης σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον, η οπτική εναλλακτική λύση έχει την δυνατότητα να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να αποφευχθούν οι EMI.



Εικόνα 6.31

Αρχιτεκτονική Συστήματος ενός chip πομποδέκτη 4X10 Gb/s της Luxtera [112].



Εικόνα 6.30

Ολοκληρωμένη Σύνδεση της Intel που αποτελείται από έναν πλήρως ολοκληρωμένο φωτονικό πομπό πυριτίου με υβριδικά Laser πυριτίου (αριστερά) και ένα πλήρως ολοκληρωμένο δέκτη που βασίζεται σε φωτοανιχνευτές γερμανίου Ge [151].

Το 2010, η Intel έχει παρουσιάσει την πρώτη *end-to-end Silicon Photonics* ολοκληρωμένη διασύνδεση με on-chip ολοκληρωμένα υβριδικά Silicon lasers, τα οποία λειτουργούν στα 50GB/s πάνω σε μία μονότροπή ίνα (Εικόνα 6.30) [151]. Το 2007, Luxtera ανέφερε το πρώτη εμπορικό chip πομπός πυριτίου [152], όπου το ολοκληρωμένο chip περιέχει έναν οπτικό πομπό και έναν οπτικό δέκτη, καθώς και ηλεκτρικούς οδηγούς, δέκτη και κυκλώματα ελέγχου (Εικόνα 6.31). Μετά την αρχική παρουσίαση ενός 4x10 Gb/s πομποδέκτη [152], η Luxtera πρόσφατα ανέφερε έναν 4x28 Gb/s πομποδέκτη [154]. Στο chip του πομποδέκτη κάθε πομπός λαμβάνει έναν συνεχόμενο κύμα φωτός από ένα ερμητικό micro-package DFB laser, το οποίο είναι συνδεδεμένο εποξικά πάνω στο chip. Οι διαμορφωτές που χρησιμοποιούνται μέσα στο chip πομποδέκτη είναι διαμορφωτές πλάτους που βασίζονται στις ρυθμίσεις MZI, εξοπλισμένοι με p-n επαφή (p-n junction) σε κάθε κλάδο για διαμόρφωση ενεργούς φάσης. Οι διαμορφωμένες έξοδοι των 4 τεσσάρων MZIs συνδυάζονται σε έναν μονό οπτικό κυματοδηγό με την χρήση 4 καναλιών interleaver οπτικού πολυπλέκτη. Το πολυπλεγμένο οπτικό σήμα στη συνέχεια συνδέεται εξωτερικά από το chip μέσω ενός συζευκτή φράγματος (grating coupler) μονής πόλωσης, πριν διαβιβαστεί σε ίνα εξόδου. Στο τέλος του δέκτη, το φως συνδέεται σε έναν διεμπλοκέα (interleaver) οπτικό αποπλέκτη που διαχωρίζει το οπτικό σήμα σε τέσσερα συνιστάμενα μήκη κύματος μέσω διαχωρισμού πόλωσης συζευκτή φράγματος. Κάθε έξοδος του διεμπλοκέα (interleaver) αποπλέκτη οδηγείται σε έναν φωτοανιχνευτή γερμανίου υψηλής ταχύτητας, όπου το οπτικό σήμα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα στη συνέχεια ενισχύεται από τον παρακείμενο ενισχυτή διαντίστασης (transimpedance TIA) και έναν περιοριστή ενισχυτή (LA), πριν μεταδοθεί ηλεκτρικά off-chip.

6.9.2 Βελτιστοποίηση Grating Couplers

Οι Συζευκτές φράγματος που δημιουργήθηκαν σε μια πλατφόρμα πυριτίου πάνω σε μονωτή, είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος σύζευξης του φωτός από μια οπτική ίνα single-mode σε φωτονικούς κυματοδηγούς πυριτίου. Οι συζευκτές φράγματος μπορούν να είναι μίας διάστασης, με φως ζεύξης και σταθερή πόλωση σε μονό οδηγό, ή 2 διαστάσεων, προκειμένου να γίνει ζεύξη φωτός με άγνωστη πόλωση σε ζεύγος κυματοδηγών πυριτίου. Στην παράγραφο αυτή γίνεται επανεξέταση υπολογιστικών προσεγγίσεων, με βάσει την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD), που επιτρέπουν την βελτιστοποίηση 1D και 2D συζευκτών φράγματος, ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα της σύζευξης σε σχέση

με τις διάφορες δομικές παραμέτρους. Σε γενικές γραμμές διαπιστώνουμε ότι το χάσμα μεταξύ των επιδόσεων των 1D και 2D συζευκτών φράγματος μπορεί να μειωθεί με την κατάλληλη βελτιστοποίηση. Οι σχετικοί παράγοντες θα ληφθούν υπόψη όπως ο πόλωση που εξαρτάται από την απώλεια (για συζευκτή 2D) , το εύρος ζώνης , οι ανοχές και οι περιορισμοί κατασκευής .

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που βασίζονται σε φωτονική πυριτίου αναπτύσσονται τάχιστα για να αντιμετωπίσουν τις νέες προκλήσεις των Τεχνολογιών και Πληροφορικής (ICT) [162-164]. Μια κατάλληλη πλατφόρμα για την υλοποίηση ολοκληρωμένων φωτονικών κυκλωμάτων είναι το πυρίτιο σε μονωτή (SOI) , το οποίο προσφέρεται για βιομηχανική επεξεργασία και ολοκλήρωση με ηλεκτρονικά κυκλώματα μέσω της τεχνολογίας CMOS. Αρκετά παθητικά και ενεργητικά στοιχεία αναπτύσσονται έτσι ώστε τα ολοκληρωμένα φωτονικά κυκλώματα να μπορούν να επιτύχουν ένα πλήρες φάσμα λειτουργιών για τις ευρέως διαδεδομένες εφαρμογές ΤΠΕ.

Μεταξύ άλλων, μια βασική λειτουργία είναι η αποδοτική σύζευξη του φωτός από μια μονότροπη οπτική ίνα σε έναν κυματοδηγό πυριτίου. Η επιφάνεια του συζευκτή φράγματος έχει αναδειχθεί ως η κατάλληλη λύση για το πρόβλημα σύζευξης φωτός [165-168]. Υπάρχουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα όπως το ότι η κατασκευή είναι συμβατή με την CMOS τεχνολογία , είναι κατάλληλοι για δοκιμές wafer-scale και επιτρέπουν μεγάλη ευελιξία στον σχεδιασμό. Οι συζευκτές φράγματος μπορούν να είναι 1D και ευαίσθητοι στην πόλωση, κάνοντας σύζευξη με TE-πολωμένο φως της οπτικής ίνας σε TE-πολωμένο μέσον ενός μονού κυματοδηγού πυριτίου ή 2D , κάνοντας σύζευξη το φωτός με αυθαίρετη πόλωση σε TE-πολωμένα μέσα δύο κυματοδηγών. Τα κύρια χαρακτηριστικά της αξίας ενός **Grating Coupler** είναι η συνολική απόδοση σύζευξης (CE) στο στοχευόμενο μήκος κύματος, το εύρος ζώνης και οι απώλειες λόγω πόλωσης (PDL), δηλαδή την μεταβολή της απόδοσης σύζευξης με την γωνία πόλωσης του τρόπου λειτουργίας της ίνας. Άλλες σημαντικές παράμετροι περιλαμβάνουν πχ η κατευθυντικότητα (η οποία καθορίζει την βέλτιστη γωνία κλίσης της ίνας) και η ανοχή ευθυγράμμισης , η οποία εξαρτάται με την σειρά της από την Mode - Field Diameter (MFD) της λειτουργίας της ίνας (συνήθως ~10μm για μια μονότροπη ίνα). Επίσης , η σύζευξη φωτός μέσα σε μονότροπους κυματοδηγούς πυριτίου απαιτεί κωνικά τμήματα ή την χρήση συζευκτών εστίασης.

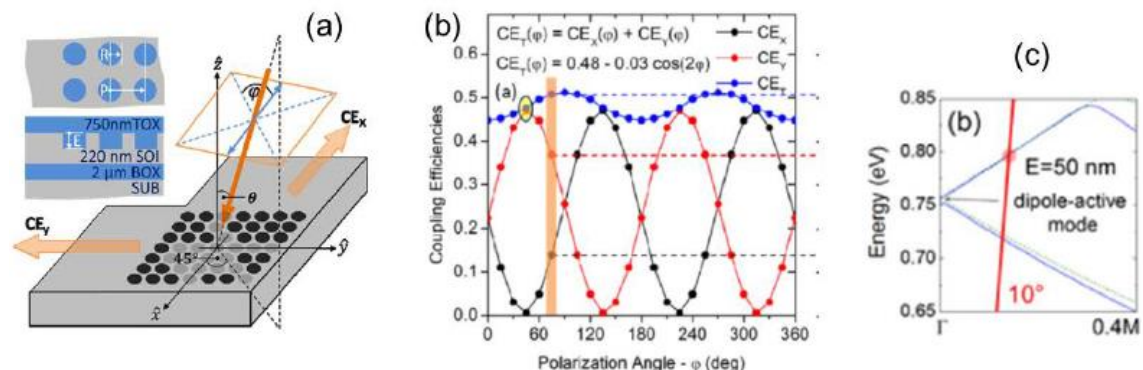
Η οπτική απόδοση ενός **συζευκτή φράγματος** εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένου του πάχους του στρώματος πυριτίου και το βάθος χάραξης (με πιθανή ύπαρξη επιστρώσεων) , το πάχος του κάτω (BOX) και πάνω στρώματος (TOX) οξειδίου και φυσικά το μοτίβο φράγματος. Αυτό είναι συνήθως ένας φωτονικός κρύσταλλος (PHC) , είτε 2D ή 1D. Ωστόσο η αποτελεσματικότητα της σύζευξης καθώς και η αξία των υπόλοιπων χαρακτηριστικών μπορεί να βελτιωθεί με την **απόδυση** (arodization), δηλαδή από μία λεπτομερή ρύθμιση των παραμέτρων φωτονικού πλέγματος όπως τις θέσεις και τα μεγέθη των μεμονωμένων οπών (σε 2D) ή τάφρων (σε 1D). Η απόδυση ή αποδισμός βελτιώνει σημαντικά την σύζευξη του φωτός που συλλέγεται από την φωτονική δομή σε ολοκληρωμένους κυματοδηγούς πυριτίου, μειώνοντας τις ανακλάσεις μέσω της σύνθετης αντίστασης. Θα πρέπει να προσθέσουμε ότι η κάθετη δομή ενός συζευκτή φράγματος μπορεί να βασίζεται σε στρώματα απλού Si και SiO₂ (τη πιο τυποποιημένη πλατφόρμα CMOS) , ενδεχομένως με επίστρωση πυριτίου [169], ή μπορεί να είναι της μορφής φραγμάτων διπλού επιπέδου (κατασκευασμένο π.χ. από κρυσταλλικό πυρίτιο και πολυ-κρυσταλλικό πυρίτιο [170] ή από c-Si (crystalline-Si) και Νιτρίδιο του πυριτίου SiN [171]) σε διαφορετικά επίπεδα συμβατότητας CMOS, ή αλλιώς μπορεί να περιλαμβάνει λύσεις όπως η παρουσία διηλεκτρικών [172] ή μεταλλικών [173] εφεδρικών ανακλαστήρων. Επίσης τα φράγματα υπό-μήκους κύματος έχουν αναπτυχθεί επιτυχώς [174].

Ως εκ τούτου, είναι σαφές ότι η σωστή σχεδίαση ενός **GC** απαιτεί βελτιστοποίηση ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων, η οποία απαιτεί με την σειρά της σημαντικές αριθμητικές προσομοιώσεις οι οποίες συνήθως πραγματοποιούνται με την μέθοδο Finite-Difference Time Domain (FDTD). Οι Αλγόριθμοι όπως η γενετική βελτιστοποίηση [169,173] ή Particle-Swarm Optimization (PSO) [172,175] έχουν υλοποιηθεί για την απλοποίηση της βελτιστοποίησης αναζητώντας σε ένα μεγάλο όγκο από παραμέτρους. Επίσης έχουν υλοποιηθεί και προσεγγίσεις που βασίζονται σε πιο αποτελεσματικούς επιλυτές των εξισώσεων Maxwell [176]. Σε αυτήν την έρευνα εστιάζουμε στην απλή δομή Silicon on Insulator με διαφορετικές τιμές του πάχους του πυριτίου και του βάθους χάραξης, οι οποίες θεωρούνται ζωτικής σημασίας παράμετροι σχεδιασμού. Πρώτα πρέπει να επανεξετάσουμε την βελτιστοποίηση των ομοιόμορφων 2D συζευκτών φράγματος για τυπικό SOI (220nm Si σε SiO₂) και να συζητήσουμε την φυσική του μηχανισμού σύζευξης, η οποία βασίζεται στην επίτευξη συντονισμού με φωτονική λειτουργία του αντίστοιχου επίπεδου φωτονικού κρυστάλλου. Στην συνέχεια επανεξετάζουμε την βελτιστοποίηση των 2D και 1D συζευκτών.

6.9.2.1 Πόλωση ανενεργού 2D συζευκτής φράγματος

Ένα σχέδιο της διάταξης που εξετάζουμε φαίνεται στην **Εικόνα 6.32**. Το φώς από μία μονότροπη ίνα προσπίπτει σε 2D φράγμα με γωνία πρόσπτωσης θ της τάξης μερικών μοιρών, και με αζιμουθιακή γωνία 45 μοιρών, προκειμένου να είναι βέλτιστη η σύζευξη φωτός στους ορθογώνιους κυματοδηγούς πυριτίου. Το προσπίπτον φώς προσομοιώνεται με μια Gaussian-ή πηγή κεντραρισμένη στα 1550nm, με MFD στα 10.4μm. Η δομή του φράγματος παρουσιάζεται στο ένθετο: αποτελείται από ένα τετράγωνο πλέγμα φωτονικού κρυστάλλου με οπές ακτίνας R και σταθερά πλέγματος P. Ο Φωτονικός κρύσταλλος είναι χαραγμένος σε στρώμα πυριτίου 220nm με βάθος χάραξης E. Η δομή πυριτίου είναι απόλυτα ενσωματωμένη στο οξείδιο.

Η βελτιστοποίηση ενός 2D συζευκτής φράγματος απαιτεί 3D FDTD αριθμητικές προσομοιώσεις που είναι ιδιαίτερα απαιτητικές. Η απόδοση της σύζευξης αποδεικνύεται ότι είναι πάρα πολύ ευαίσθητη στο βάθος χάραξης και με τα πάχη BOX & TOX, και αυτό είναι αποτέλεσμα της κάθετης παρεμβολής μεταξύ της προσπίπτουσας (**Incident**) και της ανακλώμενης δέσμης. Επιπλέον η ακτίνα R και το βήμα P πρέπει να προσαρμοστούν ως να βελτιστοποιηθεί το CE και να διατηρηθεί η μέγιστη δυνατή ζεύξη στο επιδιωκόμενο μήκος κύματος $\lambda=1550\text{nm}$. Στην πράξη, οι 4 από τις 5 παραμέτρους μπορούν να μεταβληθούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Αποδεικνύεται [15] ότι το βέλτιστο πάχος για BOX και TOX είναι 2000nm και 750nm αντίστοιχα, ενώ το βέλτιστο βάθος χάραξης είναι 120nm. Αυτή η τιμή είναι διαφορετική από το βέλτιστο βάθος χάραξης για 1D GCs, το οποίο είχε καθοριστεί σε 70 nm [4,5]. Αυτό δείχνει ότι η βελτιστοποίηση των 2D GCs δεν μπορεί να εξαχθεί από τις παραμέτρους των 1D συζευκτών, και ότι η πλήρης 3D προσομοίωση είναι απαραίτητη.



Εικόνα 6.33 α) Σχεδιάγραμμα ενός 2D συζευκτής φράγματος; Συμπεριλαμβάνεται και η εισερχόμενη δέσμη από την οπτική ίνα με κλίση υπο γωνία θ . Στο ένθετο (πάνω αριστερά) φαίνονται οι παράμετροι της κύριας κατασκευής.

Η Επίδραση της γωνίας πόλωσης φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα 6.33β όπου η βελτίωση της απόδοσης σύζευξης σε δύο ξεχωριστούς κυματοδηγούς οι οποίες ταλαντώνονται από το μηδέν έως το μέσον της Coupling Efficiency CE συναρτήσει το ϕ , ενώ η συνολική CE (δηλαδή το άθροισμα CE_x και CE_y) είναι μόνο ασθενής ταλάντωση γύρω από την μέση τιμή, που μεταβάλλεται μόνο μεταξύ 45% (-3.5dB) και 51% (-2.9dB). Επόμενος οι απώλειες Polarization-Independent είναι ± 0.3 dB : το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι βελτιστοποιημένη σύζευξη 2D είναι πράγματι, κατά ένα μεγάλο μέρος, polarization-independent (ανενεργή πόλωση). Το 1 dB εύρος ζώνης είναι 40nm, το οποίο είναι μια τυπική τιμή για τέτοιους συζευκτές φράγματος.

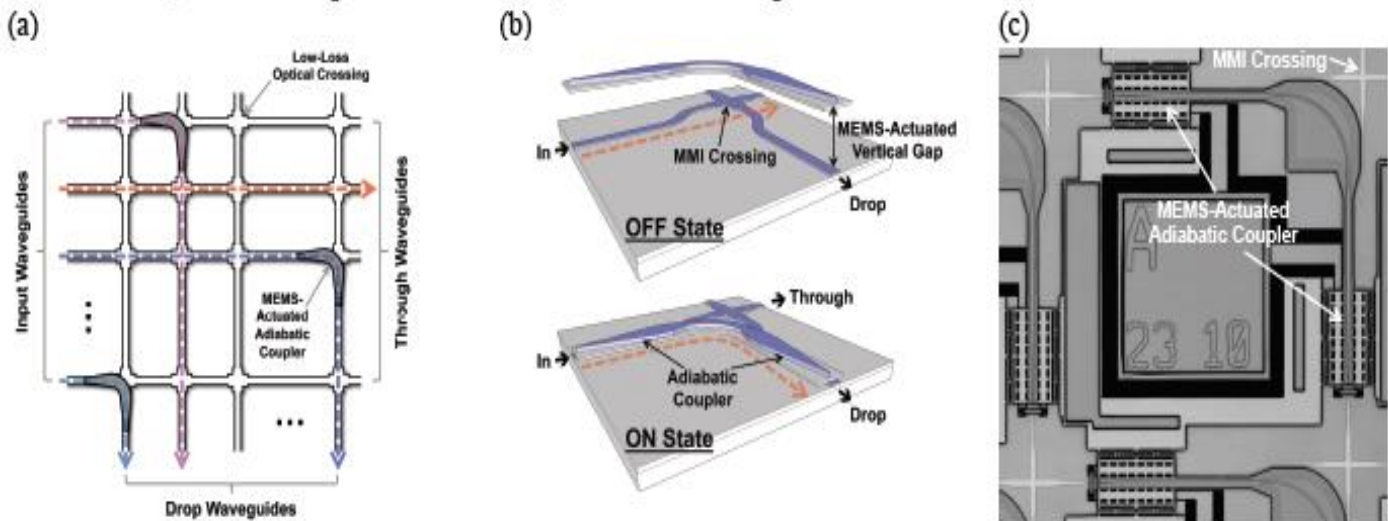
7. Silicon Switching 50x50 with MEMs actuated Adiabatic Coupler

Εφαρμογές διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων έχουν δημιουργήσει την ανάγκη για ενέργεια και κόστος αποτελεσματικών δικτύων διασύνδεσης για τη στήριξη της ζήτησης της κυκλοφορίας στα κέντρα δεδομένων. Οι διακόπτες/μεταγωγείς οπτικού κυκλώματος (OCS) έχουν προταθεί από διάφορες ομάδες για να αυξήσει ηλεκτρικοί διακόπτες πακέτων [156,157]. Ωστόσο, το τρέχον διαθέσιμο 3D MEMS (μικρο-ηλεκτρο-μηχανικό σύστημα) OCS έχει μεγάλης διάρκειας χρόνο μεταγωγής (αρκετά χιλιοστά του δευτερολέπτου), περιορίζοντας τη χρήση της σε περισσότερα μοτίβα στατικής κίνησης [157]. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι το γρήγορο OCS με χρόνο μεταγωγής microsecond μπορεί να αυξήσει σημαντικά την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των δικτύων στα Data Centers [158]. Η Φωτονική πυριτίου είναι μια ισχυρή πλατφόρμα για την ενσωμάτωση OCS μεγάλου αριθμού θυρών σε ένα τσιπ, ενδεχομένως με ολοκληρωμένους CMOS ηλεκτρονικούς οδηγούς [159]. Ωστόσο, το μέγεθος των μεγαλύτερων μεταγωγέων φωτονικής πυριτίου έχει περιοριστεί σε 8x8, λόγω των σωρευτικών απωλειών συνδυαζόμενων μεταγωγέων 2x2 (ή 1x2).

Θα αναφερθούμε σε ένα ψηφιακό φωτονικό switch 50X50 με χαμηλές οπτικές απώλειες και χρόνους μεταγωγής 0.85μs. Το switch χρησιμοποιεί 2500 MEMs-actuated κάθετους αδιαβατικούς συζευκτές (adiabatic couplers) και είναι μονολιθικά ολοκληρωμένο σε ένα 7.6X7.6 μm² τσίπ. Οι απώλειες on-chip στο μακρύτερο μονοπάτι που μετρήθηκαν είναι 9.6 dB. Από όσο γνωρίζουμε, αυτό είναι το μεγαλύτερο switch φωτονικού πυριτίου με τις λιγότερες απώλειες παρεμβολής που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα.

Αυτό το switch έχει αρκετά νέα χαρακτηριστικά σε σύγκριση με το «Monolithic 50x50 MEMS Silicon Photonic Switches with Microsecond Response Time» που αναφέρθηκε το 2014 [160] :

1). χρησιμοποιεί κυματοδηγούς 2 στρωμάτων και κάθετους αδιαβατικούς συζευκτές ([160] αυτό χρησιμοποιεί μονού στρώματος πλάγιους κατευθυντικούς συζευκτές), 2). είναι ένα ψηφιακό switch με τάση ανεξάρτητων απωλειών παρεμβολής. Απο την άποψη της απόδοσης το τρέχον switch έχει 2.5x χαμηλότερες απώλειες παρεμβολής , 15x ευρύτερο φασματικό εύρος ζώνης και 3x χρόνο απόκρισης.



Εικόνα 7.1

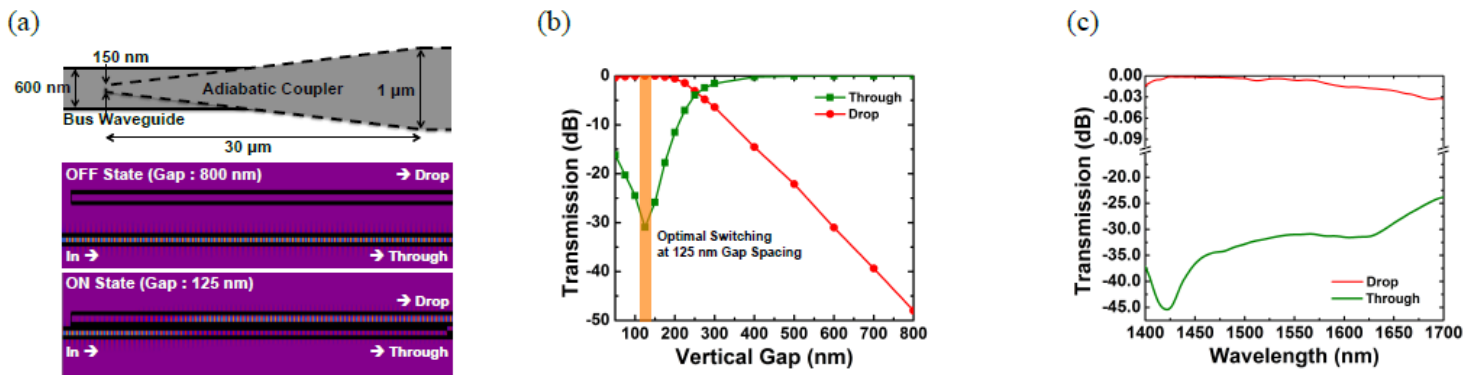
α) Αρχιτεκτονική matrix ενός μεταγωγέα φωτονικής πυριτίου **β)** Σχεδιάγραμμα κάθετα ενεργοποιημένους Adiabatic Couplers των οποίων η θέση τους ελέγχεται από MEMs actuators **γ)** Μικροσκοπική Εικόνα μίας μονάδας switching στοιχείου

7.1 Σχεδιασμός

Στην **Εικόνα 7.1(α)** δείχνει την αρχιτεκτονική του switch φωτονικής πυριτίου. Οι διασταυρώσεις του κυματοδηγού έχουν πολύ χαμηλές απώλειες παρεμβολής (0.01dB) και crosstalk (< -50dB). Σε κάθε ένα απο τα 2500 switching cell , ένα ζεύγος απο κάθετους αδιαβατικούς συζευκτές είναι ολοκληρωμένο με MEMS ενεργοποιητές στο δεύτερο στρώμα κυματοδηγών. Σε κατάσταση **off** , οι αδιαβατικοί συζευκτές είναι πολύ πάνω (> 1μm) από την είσοδο των κυματοδηγών και έχουν ελάχιστο αποτέλεσμα στην διάδοση φωτός. Σε κατάσταση **on** , οι αδιαβατικοί συζευκτές έλκονται προς τα κάτω σε κοντινή απόσταση (~125nm) των κυματοδηγών εισόδου / εξόδου. Το φώς συζευγνύεται στο πάνω επίπεδο του κυματοδηγού διαμέσου του πρώτου αδιαβατικού συζευκτή. Μετά απο στροφή 90 μοιρών, συζευγνύεται πάλι στο χαμηλότερο επίπεδο της εισόδου του κυματοδηγού διαμέσου του δεύτερου συζευκτή (Εικόνα 7.2β) .

Οι κυματοδηγοί δίαυλοι (εισόδου και εξόδου κυματοδηγοί) είναι κατασκευασμένοι σε 220nm παχύ SOI με 3μm πυκνό στρώμα buried oxide. Οι πλευρικοί κυματοδηγοί με πλευρικό ύψος 60nm επελέγησαν για την χαμηλή απώλεια διάδοσης. Τα πλάτη των κυματοδηγών διαύλων είναι 600nm. Επίσης στενεύουν σε 2.5μm πλάτος κατά την πολλαπλή λειτουργία διέλευσης παρεμβολών (Multi-mode Interference). Το μήκος του MMI crossing βελτιστοποιείται για χαμηλές απώλειες παρεμβολής. Αριθμητικές προσομοιώσεις στο πεδίο του χρόνου υπολογίζονται οπτικές απώλειες παρεμβολής τόσο χαμηλά όσο 0.01dB.

Οι **αδιαβατικοί συζευκτές (adiabatic couplers)** είναι κατασκευασμένοι σε ένα δεύτερο στρώμα κυματοδηγού από Polysilicon. Οι πλευρικοί κυματοδηγοί με 300nm πάχος και 200nm πλευρικό ύψος επιλέγονται για καλύτερη απόδοση σύζευξης. Τα πλάτος του κυματοδηγού στενεύει από 150nm σε 1μm για πάνω από 30μm μήκος ενός αδιαβατικού συζευκτή. Στην **Εικόνα 7.2(α)** φαίνεται η προσομοίωση της οπτικής λειτουργίας των καταστάσεων on και off. Το χαρακτηριστικό μεταφοράς ως συνάρτηση της απόστασης του κάθετου κενού ανάμεσα στους κυματοδηγούς διαύλους – bus waveguides – και τον αδιαβατικό συζευκτή φαίνεται στην **Εικόνα 7.2 (β)**. Οι απώλειες παρεμβολής στην drop port υπολογίστηκε ότι είναι 0.01 dB στο μέγιστο διάκενο (125nm). Ο σχεδιασμένος αδιαβατικός συζευκτής δείχνει μία ευρυζωνική φασματική απόκριση (1400-1700nm) με ελάχιστα κατάλοιπα/υπολείμματα εκπομπής στην through port (<-20dB) (**Εικόνα 7.2(γ)**)

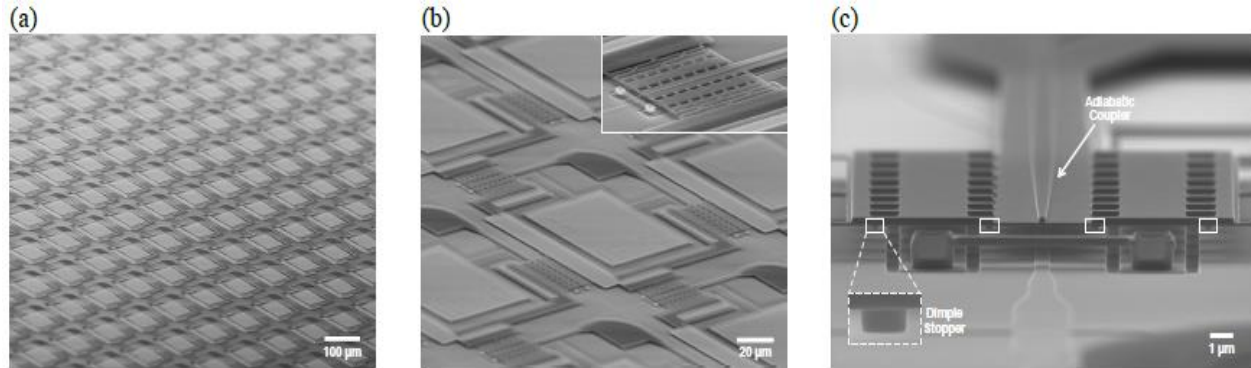


Εικόνα 7.2 α) Σχεδιάγραμμα προσομοίωσης δομής αδιαβατικού συζευκτή (adiabatic coupler top view) και profile οπτικής λειτουργίας για τις καταστάσεις on – off (side view). **β)** Προσομοίωση χαρακτηριστικής μεταφοράς ως συνάρτηση της απόστασης του κάθετου διάκενου ανάμεσα στον διάυλο κυματοδηγό **γ)** Υπολογιζόμενη φασματική απόκριση του αδιαβατικού συζευκτή δείχνει χαμηλές απώλειες παρεμβολής (< 0.01 dB) και χαμηλά κατάλοιπα/υπολείμματα μετάδοσης (<-20dB) πάνω από 300nm φασματικού πλάτους.

7.3 Κατασκευή & Πειραματικά αποτελέσματα

Τα Switch (διακόπτες) έχουν κατασκευαστεί σε 220nm SOI wafers στο Berkeley Marvell **Nanolab**. Οι κυματοδηγοί διάυλοι και οι συζευκτές φράγματος σχηματίστηκαν με 2 στάδια χάραξης : μία μερική βαθιά χάραξη 60nm και μία βαθιά πλήρης χάραξη των 220nm. Ένα στρώμα οξειδίου πάχους 1.5μm σε χαμηλή θερμοκρασία εναποτίθεται ακολουθούμενο από μία διαδικασία χημικής μηχανικής στίλβωσης για να επιτεδοποιηθεί η επιφάνεια και να μειωθεί το πάχος του οξειδίου σε 1μm. Στην συνέχεια κυκλικές οπές με 400nm διαμέτρους χαραχτήκαν στο στρώμα οξειδίου για τον σχηματισμό κοιλωμάτων, τα οποία λειτουργούν ως μηχανικά stoppers για τους MEMs ενεργοποιητές – actuators. Το βάθος εγχάραξης σε αυτό το βήμα καθορίζει την απόσταση του διάκενου ανάμεσα στους διαύλους κυματοδηγούς και του αδιαβατικού συζευκτή σε κατάσταση ON. Ένα στρώμα πάχους 300nm undoped πολυπυριτίου εναποτέθηκε με χρήση **LPCVD (Low Pressure Chemical Vapour Deposition/Χημική εναπόθεση ατμού χαμηλής πίεσης)** στους 570°C, ακολουθούμενη από 2 βήματα ανόπτησης (annealing) για 12 ώρες και 1 ώρα στους 600°C και 900°C, αντιστοίχως, για την μείωση των οπτικών απωλειών. Ο αδιαβατικός συζευκτής κυματοδηγών ήταν διαμορφωμένος με μια 200nm βαθιά μερική χάραξη και μια 300nm βαθιά πλήρη χάραξη. Τα ηλεκτρόδια MEMs καθορίζονται από την επιλεκτική εμφύτευση βορίου σε

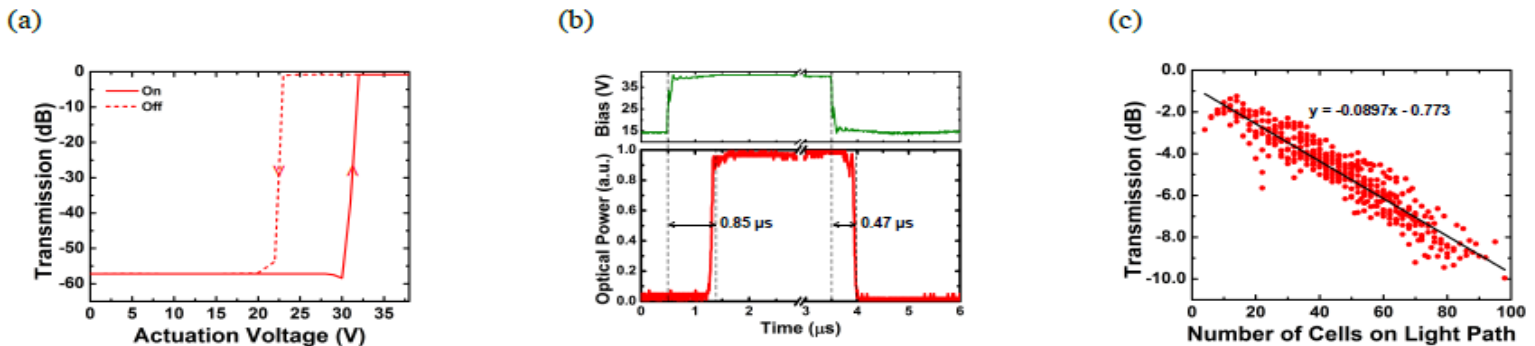
πολυπυρίτιο (polysilicon). Τα μεταλλικά pads επαφής (Cr 30nm/Au 150nm) σχηματίστηκαν με εξάτμιση και διαδικασία ανυψώσεως. Τέλος η συσκευή κυκλοφόρησε με HF ατμού.



Εικόνα 7.3 α) Προοπτική SEM Εικόνα του κατασκευασμένου matrix switch. **β)** Εστίαση SEM ενός στοιχείου της μονάδας **γ)** Πλάγια όψη ενός MEMS-actuator τονίζοντας κοιλώματα stoppers.

Στην **Εικόνα 7.3 (α)** φαίνεται εικόνα σάρωσης ηλεκτρονικής μικροσκοπίας (SEM) ενός κατασκευασμένου switch το οποίο αποτελείται από 2500 (50x50) switching cells (**Εικόνα 7.3β**). Στην **Εικόνα 7.3(γ)** έχουμε μια κοντινή όψη ενός MEMS – actuated αδιαβατικού συζευκτή με το ένθετο να δείχνει τους stoppers dimple. Όταν οι ενεργοποιητές είναι πολωμένοι πάνω από την τάση που έλκονται, οι αδιαβατικοί συζευκτές έλκονται προς τα κάτω προς τον κυματοδηγό δίαυλο (**bus waveguide**) σε απόσταση που ορίζεται με ακρίβεια από το ύψος των dimple stoppers. Αυτό ο μηχανισμός ενεργοποίησης ενεργοποιεί το **ψηφιακό switching**.

Χαρακτηρίζοντας την απόδοση ενός μεταγωγέα (Switch), το φως συζευγνύεται στους κυματοδηγούς δίαυλος χρησιμοποιώντας 1x64 συστοιχία οπτικής ίνας διαμέσου του συζευκτή φράγματος. Οι τρέχουσες απώλειες σύζευξης του δικούς μας συζευκτή φράγματος μετρήθηκαν και είναι στα 6dB. Η απόδοση του Switching χαρακτηρίζεται εφαρμόζοντας μια **τάση πόλωσης (bias voltage)** ανάμεσα στο κάτω μέρος του στρώματος πυριτίου και στο πάνω μέρος του polysilicon. Η **Εικόνα 7.4(α)** δείχνει την μετάδοση της drop port συναρτήσει της τάσης πόλωσης. Η τάση turn-on μετρήθηκε στα 32V και η μετάδοση παρέμεινε σταθερή με περαιτέρω αύξηση της τάσης, δείγμα ύπαρξης ψηφιακού switching. Η τάση turn-off είναι χαμηλότερη (από 22V) εξαιτίας της υστέρησης σε ηλεκτροστατικών actuators (ενεργοποιητών). Ο λόγος εξασθένησης είναι μεγαλύτερος από 50 dB. Οι χρόνοι μεταγωγής μετρήθηκαν σε 0.85 μ s και 0.47 μ s, όταν έχουμε κατάσταση ON και OFF αντίστοιχα, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7.4β**.



Εικόνα 7.4 (α) Χαρακτηριστική μεταφοράς σαν συνάρτηση της ενεργοποιημένης τάσης πόλωσης **(β)** Χρόνος απόκρισης Switching **(γ)** On-chip οπτικές απώλειες με διάφορες διαδρομές φωτός.

Για να εξαχθούν οι απώλειες μονάδας στοιχείου και απώλειες μεταγωγής, περισσότερα από 400 στοιχεία μεταγωγής με διαφορετικές διαδρομές δέσμης φωτός δοκιμάστηκαν και οι απώλειες on-chip (εκτός από τις απώλειες συζευκτή φράγματος) απεικονίστηκε γραφικά έναντι του αριθμού των στοιχείων μονάδας κατά μήκος της δέσμης φωτός όπως φαίνεται στην **Εικόνα 7.4(γ)**. Από την γραμμική προσαρμογή των μετρούμενων σημείων δεδομένων, οι απώλειες ανα στοιχείο υπολογίστηκε ότι είναι 0.090dB και οι απώλειες μεταγωγής 0.77dB. Οι απώλειες μεταγωγής αποδίδεται στα κατάλοιπα των οπτικών απωλειών του πολυπυριτίου (polysilicon), οι οποίες μπορούν να βελτιωθούν περαιτέρω[161]. Η μέγιστη απώλεια οπτικής παρεμβολής για την μεγαλύτερη διαδρομή του switch(διακόπτη) είναι τα 9.6 dB.

Παρουσιάσαμε με επιτυχία το μονολιθικό 50x50 ψηφιακό switch σε πλατφόρμα πυριτίου. Ο μεταγωγέας υπόσχεται 50 εισόδους, 50 drop και 50 through ports και 2500 στοιχεία μεταγωγής. Ο **Αδιαβατικός συζευκτή** εξασφαλίζει ευρυζωνική λειτουργία (1400 – 1700nm) με χαμηλές απώλειες παρεμβολής και υψηλό δείκτη εξάλειψης (**Extinction Ratio > 50dB**). Οι απώλειες παρεμβολής είναι ανεξάρτητες από την τάση πόλωσης, χάριν στο ψηφιακό switching που επιτυγχάνεται με τον συνδυασμό MEMs-gap closing ενεργοποιητές και με ακρίβεια καθορισμένη απόσταση σύζευξης. Το switching έχει χρόνους απόκρισης sub-Microsecond 0,85 sub-microsecond (ON) και 0,47 microsecond (OFF). Η μέγιστη απώλεια παρεμβολής είναι 9,6 dB (8,8 απώλεια dB για τη μετάδοση μέσω 98 cells + 0,8 απώλεια dB για το switching). Ακόμη χαμηλότερη απώλεια εισαγωγής (<2 dB) μπορεί να επιτευχθεί με τη βελτίωση της διαδικασίας κατασκευής. Η αρχιτεκτονική του switch είναι εξαιρετικά επεκτάσιμη όπως το φως περνά μόνο μέσα από ένα ζευγάρι των αδιαβατικών ζευκτών, ανεξάρτητα από το μέγεθος του switch. Είναι εφικτό να ενσωματωθούν μεγαλύτεροι διακόπτες (> 100x100) σε ένα chip.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. Silicon Photonics – An Introduction (**Graham T. Reed**, *Advanced Technology Institute, Uni. Of Surrey, Guildford, UK* – **Andrew P. Knights**, *McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada*)
- [2]. Govind P. Agrawal 4th
- [3]. Semiconductor optical amplifier-based all-optical gates for high-speed optical processing (*Stubkjaer, K.E. Res. Center COM, Tech. Univ. Denmark, Lyngby, Denmark*)
- [4]. Silicon Photonics (*Bahram Jalali, Los Angeles, CA, USA. Mario Paniccia, Santa Clara, CA, USA, Graham Reed Surrey, U.K.*)
- [5] R. Claps, D. Dimitropoulos, Y. Han, and B. Jalali, "Observation of Raman emission in silicon waveguides at 1.54 μm ," *Opt. Exp.*, vol. 10, no. 22, pp. 1305–13, Nov. 2002.
- [6] Modulation and multiplexing in optical communication systems, Peter J. Winzer Feb 2009 IEEE
- [7] Optical Networks: A Practical Perspective 3rd Edition , Rajiv Ramaswami, Kumar Sivarajan, Galen Sasaki
- [8] D. A. B. Miller, "Rationale and challenges for optical interconnects to electronic chips," *Proceedings of the IEEE*, vol.88, pp. 728 - 749, 2000 (fulltext.pdf)
- [9] ITRS, " www.itrs.net/links/2007itrs/execsum2007.pdf," 2007. (Nature FINAL VERSION.pdf)
- [10] D. Miller, "Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, pp. 1166-1185, 2009
- [11] P. Pepeljugoski, J. Kash, F. Doany, D. Kuchta, L. Schares, C. Schow, M. Taubenblatt, B. J. Offrein, and A. Benner, "Low power and high density optical interconnects for future supercomputers," *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*, San Diego, California, 21 March 2010, paper OThX2
- [12] B. G. Lee, A. Biberman , J. Chan, and K. Bergman, "High-Performance Modulators and Switches for Silicon Photonic Networks-on-Chip," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, pp. 6-22, 2010
- [13] C. Pollock and M. Lipson, *Integrated Photonics*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/Pockels_effect
- [15] G.T. Reed and B.L. Weiss, "Electro-optic effect in He⁺ implanted optical waveguides in LiNbO₃," *Elect. Lett.*, vol. 23, pp. 424, 1987.
- [16] R. A. Soref, and B.R. Bennett, "Electrooptical Effects in Silicon," *IEEE J. Quantum Elect.*, vol. QE - 23, pp. 123 – 129 , January 1987.

- [17] G. T. Reed and A. P. Knights, *Silicon Photonics: An Introduction*: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [18] G.T. Reed and C.E.J. Png, "Silicon optical modulators," *Materials Today*, vol. 8, pp. 40–50, 2005.
- [19] R.A. Soref and B.R. Bennett, "Kramers-Kronig analysis of E-O switching in silicon," *SPIE Integr. Opt. Circuit Eng.*, vol. 704, pp. 32–37, 1986.
- [20] J.P. Lorenzo and R.A. Soref, "1.3 μm electro-optic silicon switch," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 1, pp. 6–8, 1987.
- [21] L. Friedman, R.A. Soref, and J.P. Lorenzo, "Silicon double-injection electro-optic modulator with junction gate control," *J. Appl. Phys.*, vol. 63, no. 6, pp. 1831–1839, 1988.
- [22] S.R. Giguere, L. Friedman, R.A. Soref, and J.P. Lorenzo, "Simulation studies of silicon electro-optic waveguide devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 68, pp. 4964–4970, 1990.
- [23] C.K. Tang, G.T. Reed, A.J. Walton, and A.G. Rickman, "Simulation of a low loss optical modulator for fabrication in SIMOX material," in *Proc. Mat. Res. Soc. Symp.*, 1993, vol. 298, pp. 247–252.
- [24] C.K. Tang, G.T. Reed, A.J. Walton, and A.G. Rickman, "Low-loss, single-mode, optical phase modulator in SIMOX material," *J. Lightwave Technol.*, vol. 12, pp. 1394–1400, 1994.
- [25] C.K. Tang, and G.T. Reed, "Highly efficient optical phase modulator in SOI waveguides," *Elect. Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 451–452, 1995.
- [26] T.W. Ang, P.D. Hewitt, A. Vonsovici, G.T. Reed, A.G.R. Evans, P.R. Routley, T. Blackburn, and M.R. Josey, "Integrated optics in UNIBOND for greater flexibility," in *Proc. Silicon Insulator Technology Devices IX*, 1999, pp. 225–227.
- [27] P.D. Hewitt and G.T. Reed, "Improved modulation performance of a silicon p-i-n device by trench isolation," *J. Lightwave Technol.*, vol. 19, pp. 387–390, 2001.
- [28] Dainesi et al., "CMOS compatible fully integrated Mach-Zehnder interferometer in SOI technology," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 660–662, 2000.
- [29] G. Cocorullo, A. Cutolo, F.G. Della Corte, and I. Rendina, "New possibilities for efficient silicon integrated electro-optical modulators," *Opt. Commun.*, vol. 86, no. 2, pp. 228–235, 1991.
- [30] C.A. Barrios, V.R. Almeida, and M. Lipson, "Low-power-consumption short-length and high-modulation-depth silicon electro-optic modulator," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 1089–1098, 2003.
- [31] V.R. Almeida, C.A. Barrios, R. Panepucci, and M. Lipson, "All-optical control of light on a silicon chip," *Nature*, vol. 431, pp. 1081–1084, 2004.
- [32] Q. Xu, B. Shmidt, S. Pradhan, and M. Lipson, "Micrometre-scale silicon electro-optic modulator," *Nature*, vol. 435, pp. 325–327, 2005.
- [33] A. Liu, R. Jones, L. Liao, D. Samara-Rubio, D. Rubin, O. Cohen, R. Nicolaescu, and M. Paniccia, "A high-speed silicon optical modulator based on a metal-oxide-semiconductor capacitor," *Nature*, vol. 427, pp. 615–618, 2004.
- [34] L. Liao, D. Samara-Rubio, M. Morse, A. Liu, D. Hodge, D. Rubin, U. Keil, and T. Franck, "High speed silicon Mach-Zehnder modulator," *Opt. Exp.*, vol. 13, pp. 3129–3135, 2005.

- [35] F. Gan and F.X. Kartner, "High-speed silicon electro-optic Modulator design," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 1007–1009, 2005.
- [36] C.E. Png, S.P. Chan, S.T. Lim, and G.T. Reed, "Optical phase modulators for MHz and GHz modulation in silicon-on-insulator (SOI)," *J. Lightwave Technol.*, vol. 22, pp. 1573–1582, 2004.
- [37] A. Huang, C. Gunn, G. Li, Y. Liang, S. Mirsaidi, A. Narasimha, and T. Pinguet, "A 10Gb/s photonic modulator and WDM MUX/DEMUX integrated with electronics in 0.13 μ m SOI CMOS," in *Proc. IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC 2006)*, Feb. 2006, pp. 245–246.
- [38] R. Jones, A. Liu, H. Rong, M. Paniccia, O. Cohen, and D. Hak, "Lossless optical modulation in a silicon waveguide using stimulated raman scattering," *Opt. Exp.*, vol. 13, pp. 1716–1723, 2005.
- [39] O. Boyraz and B. Jalali, "Demonstration of a silicon Raman laser," *Opt. Exp.* vol. 12, pp. 5269–5273, 2004.
- [40] E. J. e. al., 40 Gbit/s all - optical demultiplexing using a monolithically integrated Mach-Zehnder interferometer with semiconductor laser amplifiers, *Electron. Lett.*, vol. 31, No. 21, pp. 1857–1858, 1995.
- [41] Δ. Αποστολόπουλος, Αμιγώς οπτικός 3R διακόπτης, Διδακτορική διατριβή Ε.Μ.Π, Αθήνα , 2004.
- [42] G. Cocorullo and I. Rendina, "Thermo-optical modulation at 1.5 microns in silicon etalon," *Electronics Letters*, vol.28, pp. 83–85, 1992.
- [43] R. Claps, D. Dimitropoulos, Y. Han, and B. Jalali, "Observation of Raman emission in silicon waveguides at 1.54 μ m," *Opt. Exp.*, vol. 10, no. 22, pp. 1305–13, Nov. 2002.
- [44] E.D. Palik, Ed., *Handbook of Optical Constants of Solids*. San Diego: Academic, 1998.
- [45] D. Wood, *Optoelectronic Semiconductor Devices*. Trowbridge: Prentice Hill, 1994, p. 250.
- [46] H. Temkin, J.C. Bean, T.P. Pearsall, N.A. Olsson, and D.V. Lang, "High photoconductive gain in GeSi_{1-x}/Si strained-layer superlattice detectors operating at 1.3 μ m," *Appl. Phys. Lett.*, vol 49, pp. 155–157, July 1986. [fulltext.pdf]
- [47] L. Colace, G. Masini, and G. Assanto, "Ge-on-Si approach to the detection of near-infrared light," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-35, pp. 1843–1852, Dec. 1999.
- [48] M. Jutzi, M. Berroth, G. Wohl, M. Oehme, and E. Kasper, "Ge-on-Si vertical incidence photodiodes with 39-GHz bandwidth," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, pp. 1510–1512, July 2005.
- [49] W. Wu, A.R. Hawkins, and J. Bowers, "Design of silicon heterointerface photodetectors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 1608–1615, Aug. 1997.
- [50] Wu et al, "Superprism phenomena in planar photonic crystals," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 915–918, July 2002.
- [51] H. Kosaka et al., "Superprism phenomena in photonic crystals: toward microscale lightwave circuits," *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, pp. 2032–2038, Nov. 1999.
- [52] T. Baba and M. Nakamura, "Photonic crystal light deflection devices using the superprism effect," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 909–914, July 2002.

- [53] M. Loncar, D. Nedeljkovic, T. Doll, J. Vuckovic, and A. Scherer, "Waveguiding in planar photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol.77, pp. 1937–1939, 2000.
- [54] M. Tokushima, H. Kosaka, A. Tomita, and H. Yamada, "Lightwave propagation through a 120° sharply bent single-line-defect photonic crystal waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, pp. 952–954, 2000.
- [55] E. Kuramochi et al., in *Proc. Photonic and Electromagnetic Crystal structures (PECS)*, Greece, June 2005.
- [56] M. Ayre, T.J. Karle, L. Wu, T. Davies, and T.F. Krauss, "Experimental verification of numerically optimized photonic crystal injector, y-splitter and bend," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 7, pp. 1390–1395, 2005.
- [57] H. Gersen, T.J. Karle, R.J.P. Engelen, W. Bogaerts, N.v.d. Hulst, T.F.Krauss, and L. Kuipers, "Real-space observation of ultraslow light in photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, 073903, 2005. [fulltext.pdf]
- [58] Soref, R.A.; Lorenzo, J.P. *Electron. Lett.* 1985, 21,953–954.
- [59] Soref, R.A.; Lorenzo, J.P. *IEEE J. Quantum Electron.* 1986, 22, 873–879.
- [60] Albares, D.J.; Soref, R.A. *Proc. SPIE* 1986, 704, 24–25.
- [61] Soref, R.A.; Namavar, F.; Lorenzo, J.P. *Opt. Lett.* 1990,15, 270–272.
- [62] Kurdi, B.N.; Hall, D.G. *Opt. Lett.* 1988, 13, 175–177.
- [63] Cortesi, E.; Namavar, F.; Soref, R.A. Presented at the IEEE SOS/SOI Technology Conference, Stateline, NV, October 3–5, 1989.
- [64] Schmidtchen, J.; Splett, A.; Schuppert, B.; Petermann, K. *Electron. Lett.* 1991, 27, 1486–1488.
- [65] Foresi, J.S.; Black, M.R.; Agarwal, A.M.; Kimerling, L.C. *Appl. Phys. Lett.* 1996, 68, 2052–2054.
- [66] Lee, K.K.; Lim, D.R.; Kimerling, L.C. *Opt. Lett.* 2001,26, 1888–1890.
- [67] Cardenas, J.; Poitras, C.B.; Robinson, J.T.; Preston, K.; Chen, L.; Lipson, M. *Opt. Express* 2009, 17,4752–4757.
- [68] Sherwood-Droz, N.; Gondarenko, A.; Lipson, M. *Opt. Express* 2010, 18, 5785–5790.
- [69] Rowe, L.K.; Elsey, M.; Tarr, N.G.; Knights, A.P.; Post, E. *Electron. Lett.* 2007, 43, 392–???
- [70] Desiatov, B.; Goykhman, I.; Levy, U. *Opt. Express* 2010, 18, 18592–18597.
- [71] Xiong, Y.; Ibrahim, M.; Ye, W.N. *Proc. SPIE* 2010, 8265, 82650D.
- [72] Xiong, Y.; Ibrahim, M.; Ye, W.N. *Appl. Opt.* 2012, 51, 7089–7093.
- [73] Vivien, L.; Laval, S.; Dumont, B.; Lardenois, S.; Koster, A.; Cassan, E. *Opt. Commun.* 2002, 210, 43–49.
- [74] Xu, D.-X.; Cheben, P.; Dalacu, D.; Delage, A.; Janz, S.; Lamontagne, B.; Picard, M.-J.; Ye, W.N. *Opt. Lett.* 2004, 29, 2384–2386.
- [75] Ye, W.N.; Xu, D.-X.; Janz, S.; Cheben, P.; Pichard, M.-J.; Lamontagne, B.; Tarr, N.G. *J. Lightwave Technol.* 2005, 23, 1308–1318.

- [76] Huang, M. *Int. J. Solids Struct.* 2003, 40, 1615–1632.
- [77] Ye, W.N. *Stress Engineering for Polarization Control in SOI Waveguides and Its Applications in Novel Passive Polarization Splitters/Filters*. Ph.D. Dissertation, Carleton University, Ottawa, Canada, 2006.
- [78] Ye, W.N.; Michel, J.; Kimerling, L.C. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2008, 20, 885–887.
- [79] Xiong, Y.; Ye, W.N. *Proc. SPIE* 2012, 8266, 826603.
- [80] Teng, J.; Dumon, P.; Bogaerts, W.; Zhang, H.; Jiang, X.; Han, X.; Zhao, M.; Morthier, G.; Baets, R. *Opt. Express* 2009, 17, 14627–14633.
- [81] Lee, J.-M.; Kim, D.-J.; Kim, G.-H.; Kwon, O.-K.; Kim, K.-J.; Kim, G. *Opt. Express* 2008, 16, 1645–1652.
- [82] Bock, P.J.; Cheben, P.; Schmid, J.H.; Lapointe, J.; Delage, A.; Janz, S.; Aers, G.C.; Xu, D.-X.; Densmore, A.; Hall, T.J. *Opt. Express* 2010, 18, 20251–20262.
- [83] Schmid, J.H.; Ibrahim, M.; Cheben, P.; Lapointe, J.; Janz, S.; Bock, P.J.; Densmore, A.; Lamontagne, B.; Ma, R.; Ye, W.N.; Xu, D.-X. *Opt. Lett.* 2011, 36, 2110–2112.
- [84] Ibrahim, M.; Schmid, J.H.; Aleali, A.; Cheben, P.; Lapointe, J.; Janz, S.; Bock, P.J.; Densmore, A.; Lamontagne, B.; Ma, R.; Xu, D.-X.; Ye, W.N. *Opt. Express* 2012, 20, 18356–18361.
- [85] Shoji, T.; Tsuchizawa, T.; Watanabe, T.; Yamada, K.; Morita, H. *Electron. Lett.* 2002, 38, 1669–1670.
- [86] Almeida, V.R.; Panepucci, R.R.; Lipson, M. *Opt. Lett.* 2003, 28, 1302–1304.
- [87] Pu, M.; Liu, L.; Ou, H.; Yvind, K.; Hvam, J.M. *Opt. Commun.* 2010, 283, 3678–3683.
- [88] Taillaert, D.; Bienstman, P.; Baets, R. *Opt. Lett.* 2004, 29, 2749–2751.
- [89] Alonso-Ramos, C.; Ortega-Monux, A.; Molina-Fernandez, I.; Cheben, P.; Zavargo-Peche, L.; Halir, R. *Opt. Express* 2010, 18, 15189–15200.
- [90] Roelkens, G.; Van Thourhout, D.; Baets, R. *Opt. Express* 2006, 14, 11622–11630.
- [91] Cheben, P.; Janz, S.; Xu, D.-X.; Lamontagne, B.; Delage, A.; Tanev, S. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2006, 18, 13–15.
- [92] Dai, D.; Liu, L.; Gao, S.; Xu, D.-X.; He, S. *Laser Photonics Rev.* 2013, 7 (3), 303–328.
- [93] Barwicz, T.; Watts, M.R.; Popovic, M.A.; Rakich, P.T.; Socci, L.; Kartner, F.X.; Ippen, E.P.; Smith, H.I. *Nat. Photonics* 2007, 1, 57–60.
- [94] Liu, L.; Ding, Y.; Yvind, K.; Hvam, J.M. *Opt. Express* 2011, 19, 12646–12651.
- [95] Watts, M.R.; Haus, H.A. *Opt. Lett.* 2005, 30, 138–140.
- [96] Velasco, A.V.; Calvo, M.L.; Cheben, P.; Ortega-Monux, A.; Schmid, J.H.; Ramos, C.A.; Fernandez, I.M.; Lapointe, J.; Vachon, M.; Janz, S.; Xu, D.-X. *Opt. Lett.* 2012, 37, 365–367.
- [97] Rahman, B.M.A.; Somasiri, N.; Themistos, C.; Grattan, K.T.V. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.* 2001, 73, 613–618.
- [98] Yang, B.K.; Shin, S.Y.; Zhang, D.M. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2009, 21, 432–434.

- [99] Kiyat, I.; Aydinli, A.; Dagli, N. IEEE Photonics Tech. Lett. 2005, 17, 100–102.
- [100] Dai, D. J. Lightwave Technol. 2012, 30, 3281–3287.
- [101] Liang, T.K.; Tsang, H.K. IEEE Photonics Tech. Lett. 2005, 17, 393–395.
- [102] Kim, S.; Nordin, G.P.; Cai, J.; Jiang, J. Opt. Lett. 2003, 28, 2384–2387.
- [103] Ye, W.N.; Xu, D.-X.; Janz, S.; Waldron, P.; Cheben, P.; Tarr, N.G. Opt. Lett. 2007, 32, 1492–1494.
- [104] Pavesi, L. Mater. Today 2005, 8, 18–25.
- [105] Yuan, Z.; Anopchenko, A.; Daldosso, N.; Guider, R.; Navarro-Urrios, D.; Pitanti, A.; Spano, R.; Pavesi, L. Proc. IEEE 2009, 97, 1250–1268.
- [106] Han, H.; Seo, S.; Shin, J.H. Appl. Phys. Lett. 2001, 79, 4568–4570.
- [107] Park, H.; Fang, A.W.; Kodama, S.; Bowers, J.E. Opt. Express 2005, 13, 9460–9464. 1318 W.N. Ye and Y. Xiong Downloaded by [Harokopio University] at 09:01 23 May 2016
- [108] Liu, J.; Sun, X.; Pan, D.; Wang, X.; Kimerling, L.C.; Koch, T.L.; Michel, J. Opt. Express 2007, 15, 11272–11277.
- [109] Bowers, J.E.; Liang, D.; Fang, A.W.; Park, H.; Jones, R.; Paniccia, M.J. Opt. Photonics News 2010, 21, 28–33.
- [110] Boyraz, O.; Jalali, B. Opt. Express 2004, 12, 5269–5273.
- [111] Paniccia, M.; Krutul, V.; Jones, R.; Cohen, O.; Bowers, J.; Fang, A.; Park, H. A Hybrid Silicon Laser. White Paper, Intel Corporation, 2006.
- [112] Liu, J.; Sun, X.; Camacho-Aguilera, R.; Kimerling, L.C.; Michel, J. Opt. Lett. 2010, 35, 679–681.
- [113] Camacho-Aguilera, R.E.; Cai, Y.; Patel, N.; Bessette, J.T.; Romagnoli, M.; Kimerling, L.C.; Michel, J. Opt. Express 2012, 20, 11316–11320.
- [114] Claps, R.; Dimitropoulos, D.; Han, Y.; Jalali, B. Opt. Express 2002, 10, 1305–1313.
- [115] Reed, G.T. Silicon Photonics: The State of the Art; Wiley: Chichester, 2008; pp 191–225.
- [116] Jacobsen, R.S.; Andersen, K.N.; Borel, P.I.; Fage-Pedersen, .; Frandsen, L.H.; Hansen, O.; Kristensen, M.; Lavrinenko, A.V.; Moulin, G.; Ou, H.; Peucheret, C.; Zsigri, B.; Bjarklev, A. Nat. Lett. 2006, 441, 199–202.
- [117] Chmielak, B.; Waldow, M.; Matheisen, C.; Ripperda, C.; Bolten, J.; Wahlbrink, T.; Nagel, M.; Merget, F.; Kurz, H. Opt. Express. 2011, 19, 17212–17219.
- [118] Aleali, A.; Xu, D.-X.; Schmid, J.H.; Cheben, P.; Ye, W.N. Presented at SPIE Photonics North, Ottawa, June 3–5, 2013.
- [119] Soref, R.A.; Bennett, B.R. IEEE J. Quantum Electron. 1987, 23, 123–129.
- [120] Preble, S.F.; Xu, Q.; Schmidt, B.S.; Lipson, M. Opt. Lett. 2005, 30, 2891–2893.
- [121] Martínez, A.; Blasco, J.; Sanchis, P.; Galán, J.V.; García-Rupérez, J.; Jordana, E.; Gautier, P.; Lebour, Y.; Hernández, S.; Spano, R.; Guider, R.; Daldosso, N.; Garrido, B.; Fedeli, J.M.; Pavesi, L.; Martí, J. Nano Lett. 2010, 10, 1506–1511.

- [122] Xiong, Y.; Ye, W.N. *Appl. Opt.* 2012, 51, 7788–7793.
- [123] Brouckaert, J.; Roelkens, G.; Van Thourhout, D.; Baets, R. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2007, 19, 1484–1486.
- [124] Vivien, L.; Osmond, J.; Fedeli, J.-M.; Marris-Morini, D.; Crozat, P.; Damlencourt, J.-F.; Cassan, E.; Lecunff, Y.; Laval, S. *Opt. Express*. 2009, 17, 6252–6257.
- [125] Kang, Y.; Liu, H.-D.; Morse, M.; Panicia, M.J.; Zadka, M.; Litski, S.; Sarid, G.; Pauchard, A.; Kuo, Y.-H.; Chen, H.-W.; Zaoui, W.S.; Bowers, J.E.; Beling, A.; McIntosh, C.; Zheng, X.; Campbell, J.C. *Nat. Photonics* 2009, 3, 59–63.
- [126] Brouckaert, J.; Roelkens, G.; Van Thourhout, D.; Baets, R. *J. Lightwave Technol.* 2007, 25, 1053–1060.
- [127] Roelkens, G. *Heterogeneous III-V/Silicon Photonics: Bonding Technology and Integrated Devices*. Ph.D. Dissertation, Ghent University, Ghent, 2007.
- [128] Park, H.; Fang, A.W.; Jones, R.; Cohen, O.; Raday, O.; Sysak, M.N.; Panicia, M.J.; Bowers, J.E. *Opt. Express*. 2007, 15, 6044–6052.
- [129] Binetti, P.R.A.; Leijtens, X.J.M.; de Vries, T.; Oei, Y.S.; Di Cioccio, L.; Fedeli, J.-M.; Lagahe, C.; Van Campenhout, J.; Van Thourhout, D.; van Veldhoven, P.J.; Notzel, R.; Smit, M.K. *IEEE Photonics J.* 2010, 2, 299–305.
- [130] Sun, X.; Liu, J.; Kimerling, L.C.; Michel, J. *Opt. Lett.* 2009, 34, 1198–1200.
- [131] Osmond, J.; Vivien, L.; Fedeli, J.-M.; Marris-Morini, D.; Crozat, P.; Damlencourt, J.-F.; Cassan, E.; Lecunff, Y. *Appl. Phys. Lett.* 2009, 95, 151116.
- [132] Vivien, L.; Polzer, A.; Marris-Morini, D.; Osmond, J.; Hartmann, J.M.; Crozat, P.; Cassan, E.; Kopp, C.; Zimmermann, H.; Fédéli, J.M. *Opt. Express*. 2012, 20, 1096–1101.
- [133] Liu, J.; Michel, J.; Giziewicz, W.; Pan, D.; Wada, K.; Cannon, D.D.; Jongthammanurak, S.; Danielson, D.T.; Kimerling, L.C.; Chen, J.; Ömer Ilday, F.; Kärtner, F.X.; Yasaitis, J. *Appl. Phys. Lett.* 2005, 87, 103501.
- [134] Oehme, M.; Werner, J.; Kasper, E.; Jutzi, M.; Berroth, M. *Appl. Phys. Lett.* 2006, 89, 071117.
- [135] Huang, Z.; Kong, N.; Guo, X.; Liu, M.; Duan, N.; Beck, A.L.; Banerjee, S.K.; Campbell, J.C. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2006, 12, 1450–1454.
- [136] Loh, T.H.; Nguyen, H.S.; Murthy, R.; Yu, M.B.; Loh, W. Y.; Lo, G.Q.; Balasubramanian, N.; Kwong, D.L.; Wang, J.; Lee, S.J. *Appl. Phys. Lett.* 2007, 91, 073503.
- [137] Vivien, L.; Rouvière, M.; Fédéli, J.-M.; Marris-Morini, D.; Damlencourt, J.F.; Mangeney, J.; Crozat, P.; El Melhaoui, L.; Cassan, E.; Le Roux, X.; Pascal, D.; Laval, S. *Opt. Express*. 2007, 15, 9843–9848.
- [138] Feng, D.; Liao S.; Dong P.; Feng N.-N.; Zheng D.; Liang H.; Shafiiha, R.; Li G.; Cunningham, J.; Raj, K.; Krishnamoorthy, A.V.; Asghari, M. Presented at the Optical Fiber Communication (OFC) Conference, San Diego, CA, March 21–25, 2010.
- [139] Klinger, S.; Berroth, M.; Kaschel, M.; Oehme, M.; Kasper, E. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2009, 21, 920–922.

- [140] Feng, N.-N.; Liao, S.; Dong, P.; Zheng, D.; Liang, H.; Kung, C.-C.; Shafiiha, R.; Feng, D.; Li, G.; Cunningham, J.E.; Krishnamoorthy, A.V.; Asghari, M. Proc. SPIE 2010, 7607, 760704.
- [141] Suh, D.; Joo, J.; Kim S.; Kim, G. Presented at the IEEE Conference on Group IV Photonics, San Francisco, CA, September 9–11, 2009.
- [142] Justic, J.; Bower, C.; Meitl, M.; Mooney, M.B.; Gubbins, M.A.; Corbett, B. Nat. Photonics 2012, 6, 610–614.
- [143] Fedeli, J.-M. Presented at the 35th European Conference on Optical Communication, Vienna, Austria, September 20–24, 2009.
- [144] Mekis, A.; Abdalla, S.; De Dobbelaere, P.M.; Foltz, D.; Gloeckner, S.; Hovey, S.; Jackson, S.; Liang, Y.; Mack, M.; Masini, G.; Novais, R.; Peterson, M.; Pinguet, T.; Sahni, S.; Schramm, J.; Sharp, M.; Song, D.; Welch, B. P.; Yokoyama, K.; Yu, S. Proc. SPIE 2012, 8265, 82650A.
- [145] Kopp, C.; Bernabé, S.; Bakir, B.B.; Fedeli, J.-M.; Orobitchouk, R.; Schrank, F.; Porte, H.; Zimmermann, L.; Tekin, T. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2011, 17, 498–509.
- [146] Zimmermann, L.; Tekin, T.; Bogaerts, W.; Dumon, P. Presented at the IEEE Conference on Group IV Photonics, Sorrento, Italy, September 17–19, 2008.
- [147] Kopp, C.; Volpert, M.; Routin, J.; Bernabé, S.; Rossat, C.; Tournaire, M.; Hamelin, R. Proc. SPIE 2008, 6899, 68990Y.
- [148] Lee, S.H.; Lee, Y.C. Opt. Photonics News 2006, 17, 40–45.
- [149] Haurylau, M.; Chen, G.; Chen, H.; Zhang, J.; Nelson, N. A.; Albonesi, D.H.; Friedman, E.G.; Fauchet, P.M. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006, 12, 1699–1705.
- [150] Ohashi, K.; Nishi, K.; Shimizu, T.; Nakada, M.; Fujikata, J.; Ushida, J.; Torii, S.; Nose, K.; Mizuno, M.; Yukawa, H.; Kinoshita, M.; Suzuki, N.; Gomyo, A.; Ishi, T.; Journal of Modern Optics 1319 Downloaded by [Harokopio University] at 09:01 23 May 2016 Okamoto, D.; Furue, K.; Ueno, T.; Tsuchizawa, T.; Watanabe, T.; Yamada, K.; Itabashi, S.-I.; Akedo, J. Proc. IEEE 2009, 97, 1186–1198.
- [151] Won, R. Nat. Photonics 2010, 4, 498–499.
- [152] Narasimha, A.; Analui, B.; Liang, Y.; Sleboda, T.J.; Abdalla, S.; Balmater, E.; Gloeckner, S.; Guckenberger, D.; Harrison, M.; Koumans, R.G.M.P.; Kucharski, D.; Mekis, A.; Mirsaidi, S.; Song, Dan; Pinguet, T. IEEE J. Solid-State Circuits 2007, 42, 2736–2744.
- [153] Densmore, A.; Xu, D.-X.; Waldron, P.; Janz, S.; Cheben, P.; Lapointe, J.; Delage, A.; Lamontagne, B.; Schmid, J. H.; Post, E. IEEE Photonics Technol. Lett. 2006, 18, 2520–2522.
- [154] De Vos, K.; Bartolozzi, I.; Schacht, E.; Bienstman, P.; Baets, R. Opt. Express 2007, 15, 7610–7615.
- [155] Αξιολόγηση Τμήματος Μητροπολιτικού Δικτύου Οπτικών Ινών Πελοποννήσου , Μοντελοποίηση και Προτάσεις για Τυχόν Βελτιώσεις του, Gotsis.pdf
- [156] G. Porter, et al., “Integrating microsecond circuit switching into the data center,” in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM*, New York, NY, USA, 2013, pp. 447–458.

- [157] L. Schares, et al., "A reconfigurable interconnect fabric with optical circuit switch and software optimizer for stream computing systems," in *Conference on Optical Fiber Communication - includes post deadline papers, 2009. OFC 2009*, 2009, pp. 1–3.
- [158] H. Liu, et al., "Circuit switching under the radar with REACTor," proc. USENIX/NSDI, Seattle, WA, April 2014.
- [159] B. G. Lee, et al., "Four- and Eight-Port Photonic Switches Monolithically Integrated with Digital CMOS Logic and Driver Circuits," in *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, 2013, p. PDP5C.3.
- [160] S. Han, T. J. Seok, N. Quack, B.-W. Yoo, and M. C. Wu, "Monolithic 50x50 MEMS Silicon Photonic Switches with Microsecond Response Time," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2014, p. M2K.2.
- [161] D. Kwong, J. Covey, A. Hosseini, Y. Zhang, X. Xu, and R. T. Chen, "Ultralow-loss polycrystalline silicon waveguides and high uniformity 1x12 MMI fanout for 3D photonic integration," *Opt. Express* 20, 21722-21728 (2012).
- [162] P. Dong et al.: Silicon photonic devices and integrated circuits, *Nanophotonics*, vol. 3, pp. 215–228, 2014.
- [163] D.-X. Xu et al.: Silicon photonic integration platform – Have we found the sweet spot?, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 20, art. no. 8100217, 2014.
- [164] C. Sun et al.: Single-chip microprocessor that communicates directly using light, *Nature* 528, p.534, 2015.
- [165] D. Taillaert et al.: An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 38, pp. 949–955, 2002.
- [166] D. Taillaert et al.: Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides, *Japanese J. Appl. Phys.*, vol. 45, pp. 6071–6077 (2006).
- [167] A. Mekis et al.: A grating-coupler-enabled CMOS photonics platform, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 17, pp. 597-608, 2010.
- [168] G. Roelkens, D. Van Thourhout, R. Baets: High efficiency silicon-on-insulator grating coupler based on a poly-silicon overlay, *Optics Express*, vol. 14, pp. 11622–11630, 2006.
- [169] J. Notaros et al.: Ultra-efficient CMOS fiber-to-chip grating couplers, in *Optical Fiber Communication Conference*, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2016), paper M21.5.
- [170] W. D. Sacher et al.: Wide bandwidth and high coupling efficiency Si₃N₄-on-SOI dual-level grating coupler, *Optics Express*, vol. 22, pp. 10938-10947, 2014.
- [171] S. K. Selvaraja et al.: Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit, in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, OSA Technical Digest, 2009, paper CTuC69.
- [172] W. S. Zaoui et al.: Bridging the gap between optical fibers and silicon photonic integrated circuits," *Optics Express*, vol. 22, 1277–1286, 2014.
- [173] D. Benedikovic et al.: Subwavelength index engineered surface grating coupler with sub-decibel efficiency for 220-nm silicon-on-insulator waveguides, *Optics Express*, vol. 23, pp. 22628-22635, 2015.
- [174] Q. Zhong et al.: Focusing-curved subwavelength grating couplers for ultra-broadband silicon photonics optical interfaces, *Optics Express*, vol. 22, 18224-18231, 2014.
- [175] J. Notaros, M.A. Popović: Finite-difference complex-wavevector band structure solver for analysis and design of periodic radiative microphotonic structures, *Optics Letters*, vol. 40, 1053-1056, 2015.

- [176] L. Carroll *et al.*: Broad parameter optimization of polarization-diversity 2D grating couplers for silicon
- [177] Abstreiter, G. Phys. World 1992, 5 (3), 36–39.
- [178] K. M. Sivalingam and S. Subramaniam, «Optical WDM Networks Principles and Practice», Kluwer Academic Publishers, NY, 2000.
- [179] https://en.wikipedia.org/wiki/Silicon_photonics