



ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ

Θωμάς Καμαλάκης, Τμήμα Πληροφορικής
και Τηλεματικής, ΧΠΑ



Πληροφορίες για το μάθημα



Στόχοι του μαθήματος

- Εξοικείωση με βασικές τεχνολογίες των οπτικών επικοινωνιών
- Δομικά Στοιχεία των οπτικών επικοινωνιών: οπτικές ίνες, οπτικοί πομποί, οπτικοί δέκτες, κτλ
- Αρχιτεκτονικές οπτικών δικτύων
- Οικονομικά των οπτικών δικτύων
- Μία Ματιά στο μέλλον...



Τρόπος Αξιολόγησης

- Εξετάσεις στο τέλος του εξαμήνου (θεωρία και ασκήσεις): **100%**
 - Θεωρία (συνήθως με multiple choice): 50%
 - Ασκήσεις: 50%
- Για να περάσει κανείς το μάθημα
 - αρκεί ο μέσος όρος από τις δύο κατηγορίες θεμάτων να είναι ≥ 5



Προτεινόμενη Βιβλιογραφία

- Rajiv Ramaswami , Kumar Sivarajan, Galen Sasaki, *“Optical Networks: A Practical Perspective”* , 3rd Edition, Morgan Kaufmann (2009)
- Govind P. Agrawal, *“Fiber-Optic Communications Systems”* , 3rd Edition, John Wiley and Sons (2002).
- Paul E. Green *“Fiber Optic Networks”* , Prentice Hall (1993)
- Τα δύο τελευταία υπάρχουν και στα ελληνικά!



Συγγράμματα

- Govind P. Agrawal, *“Συστήματα Επικοινωνιών με Οπτικές Ίνες”*, μετάφραση Δημήτριος Κορτσοβίτης, εκδόσεις Τζιόλα, 2011
- Paul E. Green *“Δίκτυα Οπτικών Ινών”* μετάφραση Κωσταντίνος Καρούμπαλος, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 1994





Βοηθήματα

- Για όσους θέλουν να «φρεσκάρουν» τις γνώσεις τους στις τηλεπικοινωνίες, υπάρχει καταγεγραμμένο ηλεκτρονικά, το προπτυχιακό μάθημα, «Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες»
- Βρίσκεται ανεβασμένο στο youtube, <http://www.youtube.com/user/thomaskamalakis>
- Οι διαφάνειες του μαθήματος είναι διαθέσιμες στο <http://galaxy.hua.gr/~thkam/telecomintro.html>



Βοηθήματα

- Στο μάθημα θα ασχοληθούμε (ως ένα σημείο) με την διάδοση σημάτων μέσα σε μία οπτική ίνα.
- Η βασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία στην οποία στηριζόμαστε μπορεί να αναζητηθεί στις σημειώσεις του μαθήματος «Διάδοση Τηλεπικοινωνιακών Σημάτων».
- Βρίσκονται διαθέσιμες στο http://galaxy.hua.gr/~thkam/Courses/simeiwseis_dia_dosi.pdf
- Θα προσπαθήσουμε να κρατήσουμε τις αναφορές μας στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία στο απολύτως απαραίτητο...



Βοηθήματα

- Επίσης θα χρησιμοποιήσουμε κάποια στοιχεία του μαθήματος «Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα».
- Μπορείτε να συμβουλευτείτε και τις σημειώσεις από το μάθημα
- Είναι ήδη διαθέσιμες από το e-class και σύντομα θα ανέβουν και στην προσωπική μου σελίδα.



Καταγραφή Διαλέξεων

- Οι διαλέξεις της θεωρίας είναι καταγεγραμμένες
 - opencourses.hua.gr
 - ιστόσελίδα διδάσκοντα
- Ωστόσο προσοχή!
 - στην καταγραφή δεν φαίνεται ο πίνακας
 - επομένως και οι επεξηγήσεις που μπορεί να δίνει ο διδάσκοντας
 - είναι ένα κίνητρο και αυτό για να παρακολουθείται το μάθημα.



Επικοινωνία με τον διδάσκοντα

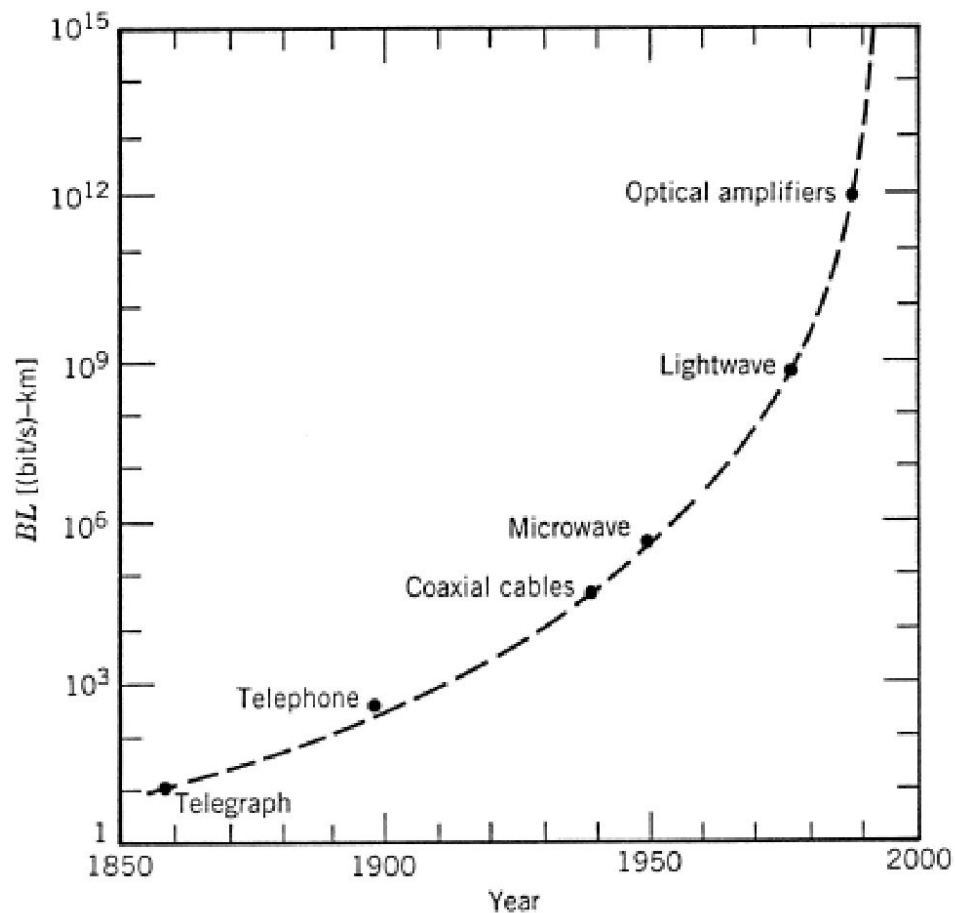
- Δεν υπάρχουν ώρες γραφείου: συνήθως βρίσκομαι στο γραφείο μου όλες τις εργάσιμες μέρες μετά τις 9.30μμ μέχρι... το βράδυ.
- Μέσω e-mail: thkam@hua.gr.



Εισαγωγή στα δίκτυα οπτικών ινών

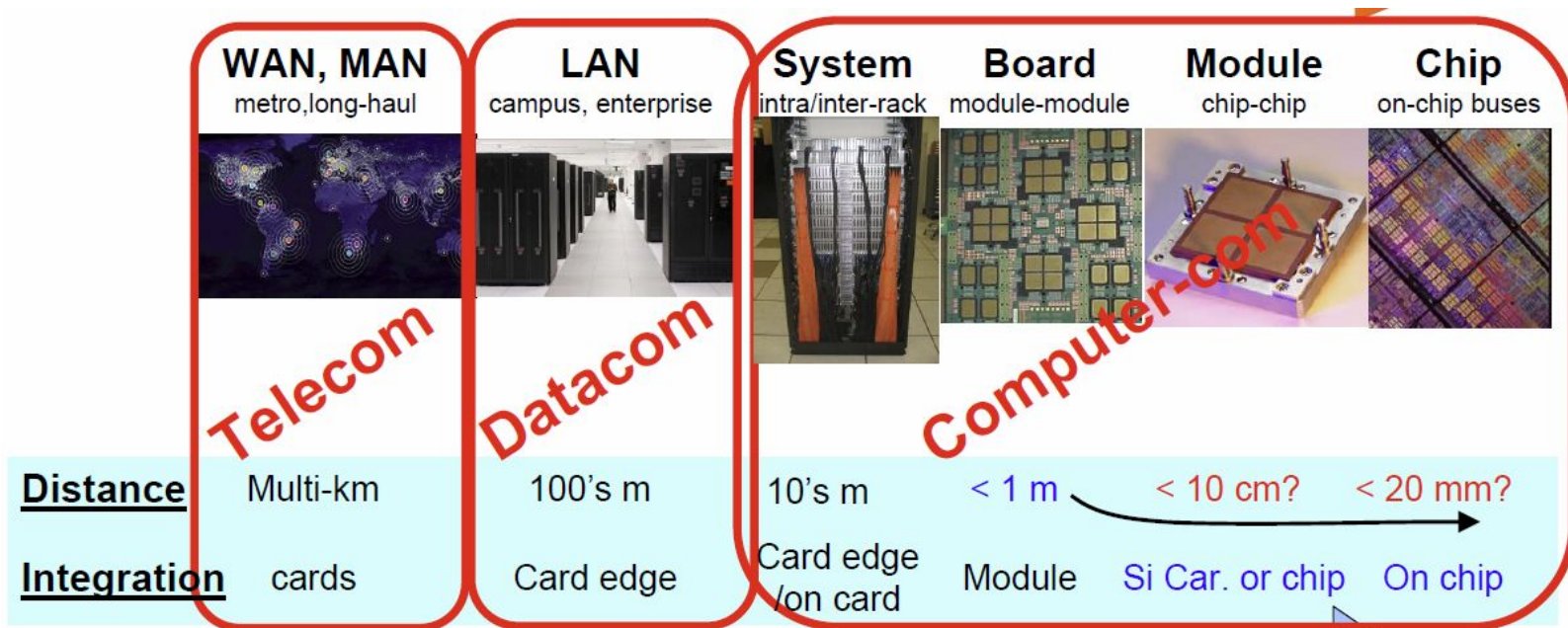


Η εξέλιξη των τεχνολογιών επικοινωνιών





Οπτικά Δίκτυα / Οπτικές Επικοινωνίες

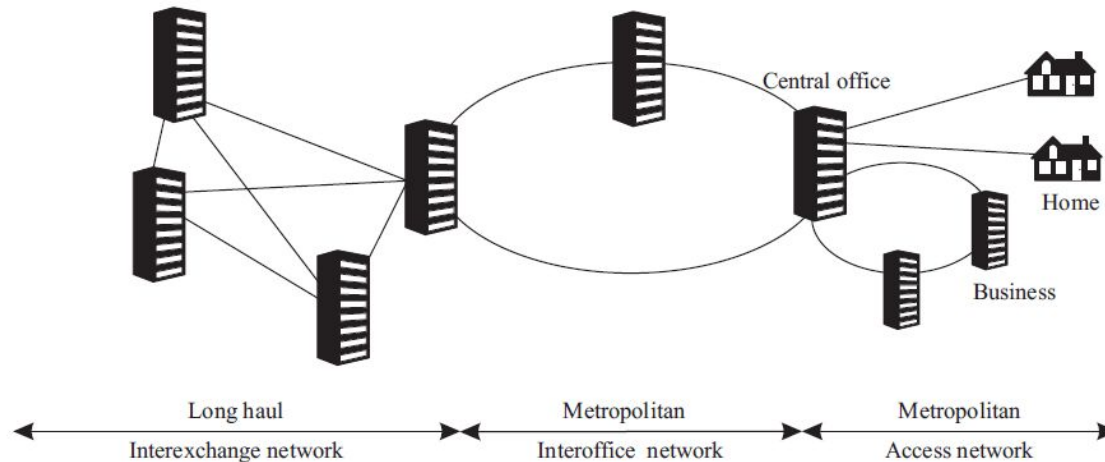


BW * Distance: Optics >> Copper

Increasing integration of Optics with decreasing cost, decreasing power, increasing density



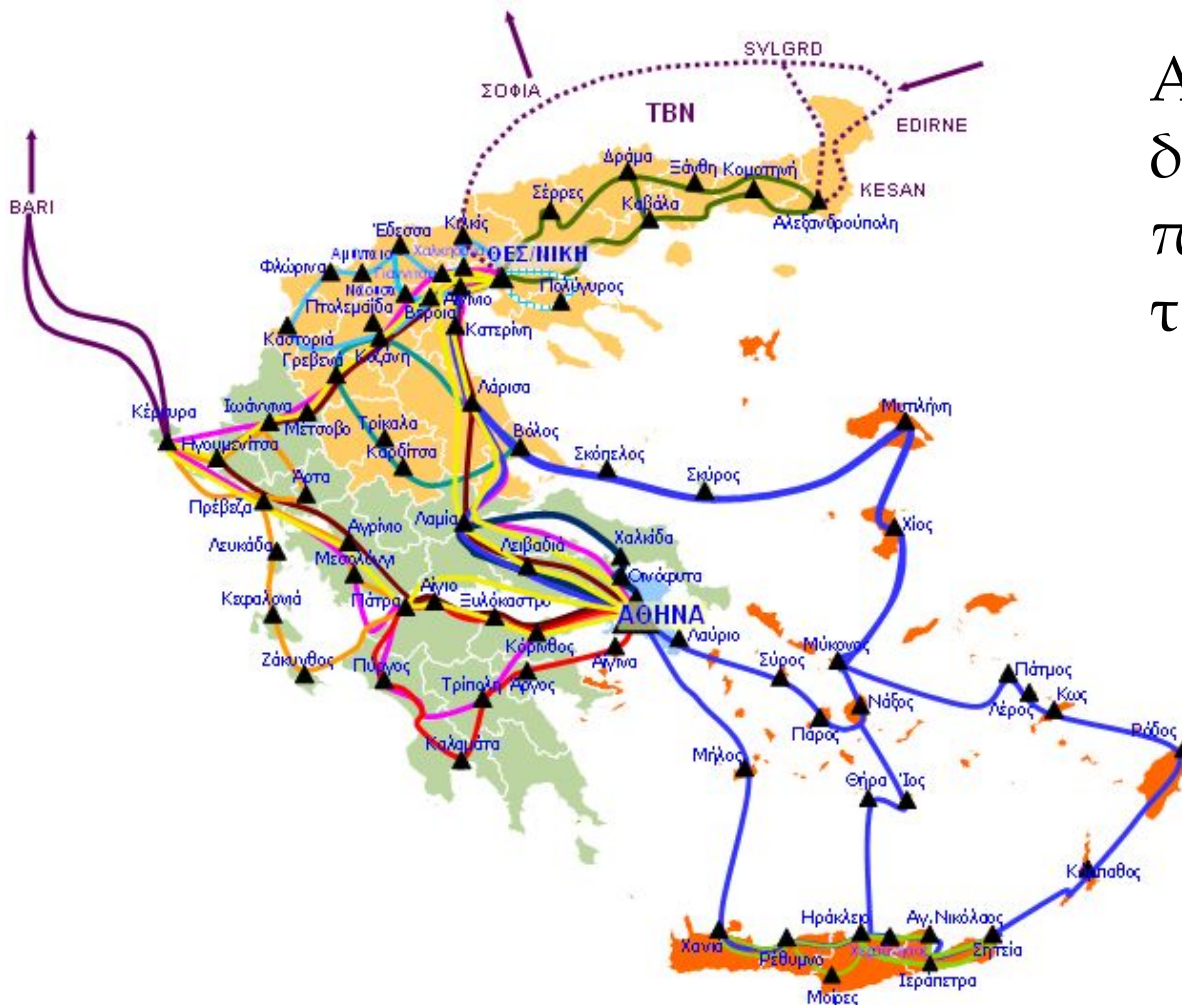
Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα



- Δεν ανήκουν αναγκαστικά στον ίδιο πάροχο
- Οι κόμβοι είναι τα λεγόμενα Points of Presence (PoPs)
- Οι συνδέσεις συνήθως αποτελούνται από μία οπτική ίνα ή από πολλές οπτικές ίνες
- Συνήθως το δίκτυο αποτελείται από πολλούς δακτυλίους ενωμένους σε μία “mesh” αρχιτεκτονική.



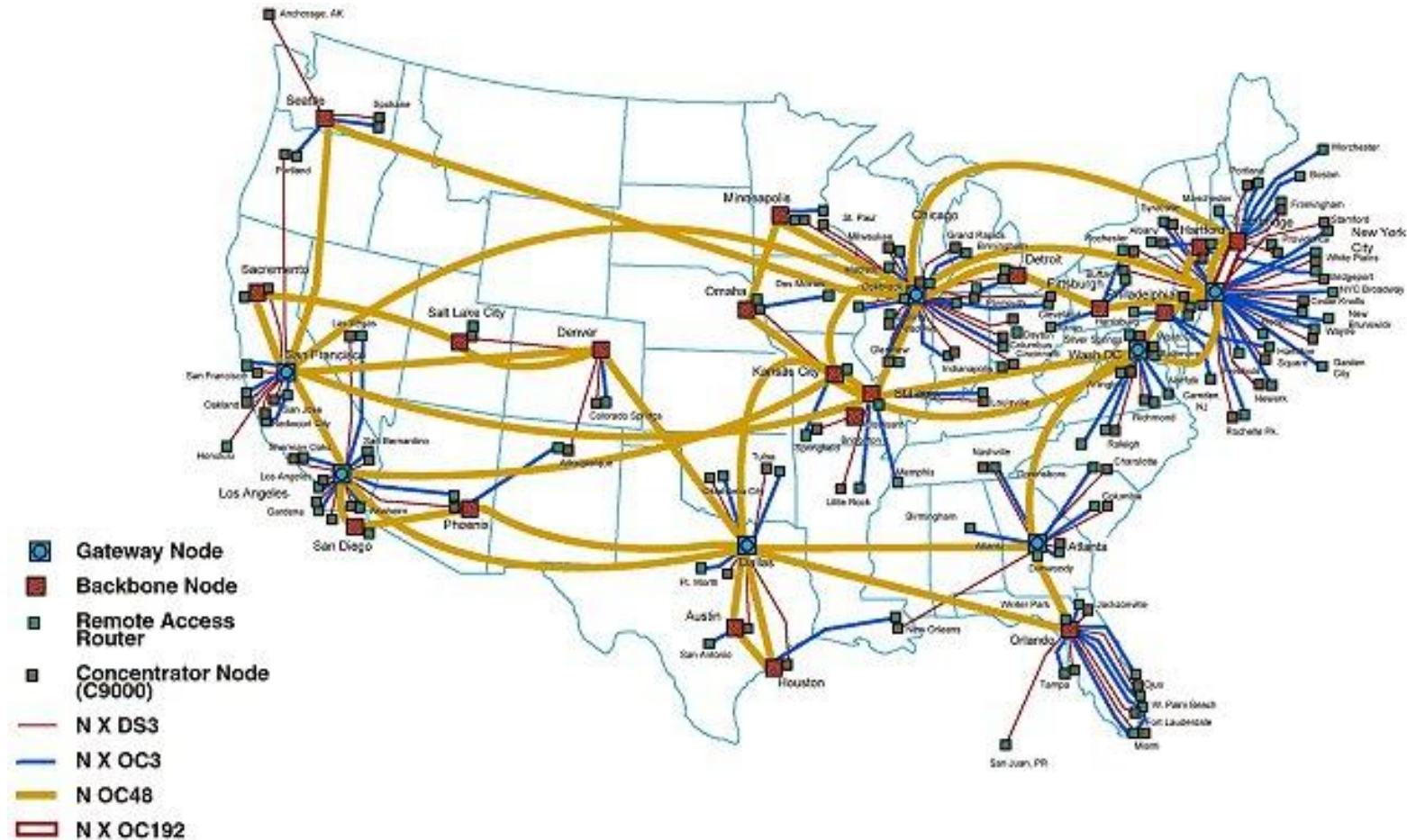
Παράδειγμα: Δίκτυο του ΟΤΕ



Αποτελείται από διάφορους δακτυλίους που συνδέονται μεταξύ τους



Παράδειγμα Δικτύου: AT&T



Note: map is not to scale.

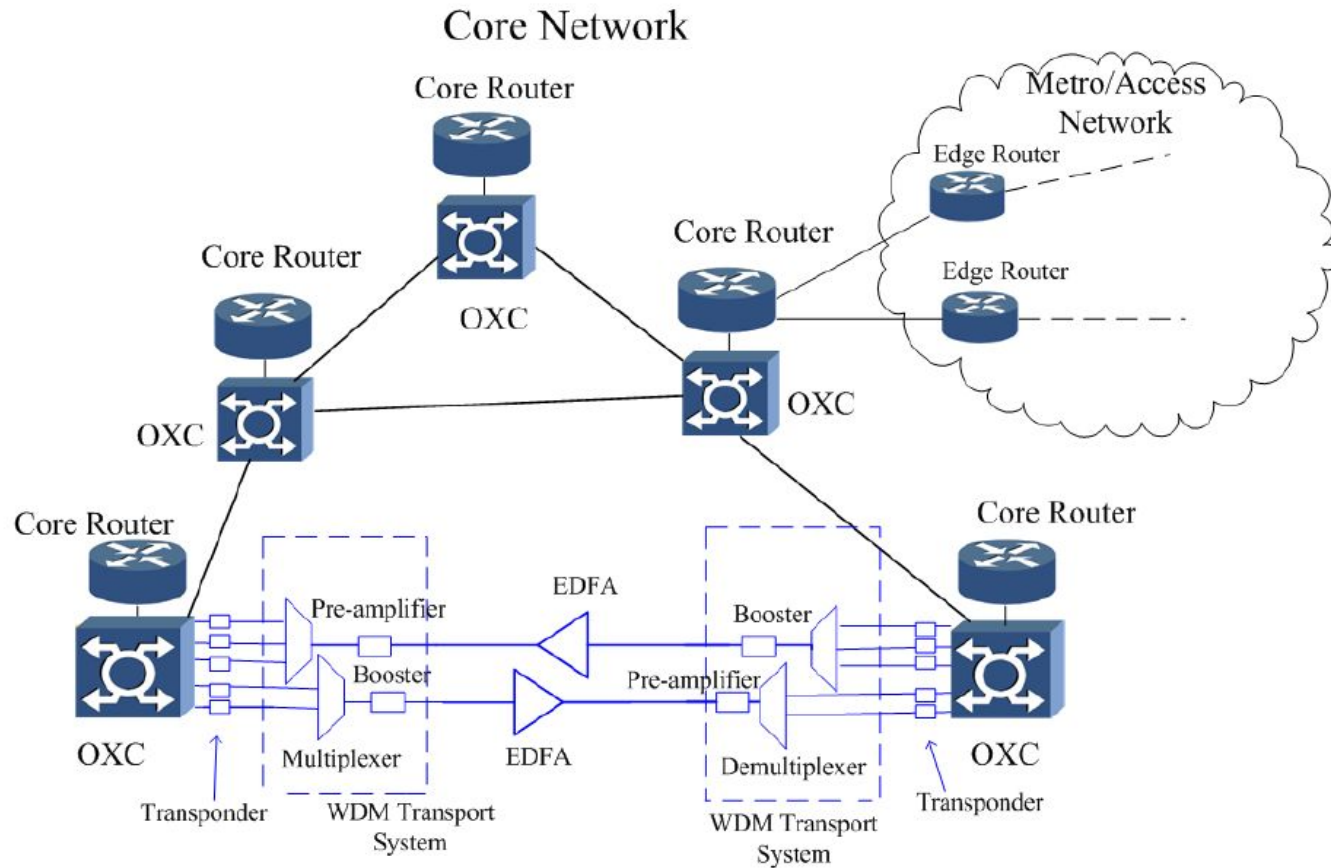


Επίπεδα Δικτύου: Metropolitan (metro), Access και Long-Haul

- **Metro:** Το μέρος του δικτύου που εκτείνεται σε μία μεγάλη πόλη ή μία γεωγραφική περιοχή.
- Το δίκτυο **access** είναι μέρος του metro και συνδέει ένα central office στους πελάτες του δικτύου (οικιακοί χρήστες ή επιχειρήσεις). Καλύπτει μερικά χιλιόμετρα.
- Το δίκτυο interoffice συνδέει τα central offices μέσα στην ίδια γεωγραφική περιοχή. Εκτείνεται σε αποστάσεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων.
- **Long-haul:** Συνδέει τα metro δίκτυα των διαφορετικών πόλεων και γεωγραφικών περιοχών. Εκτείνεται σε αποστάσεις από μερικές εκατοντάδες ως μερικές χιλιάδες(!) χιλιόμετρα.

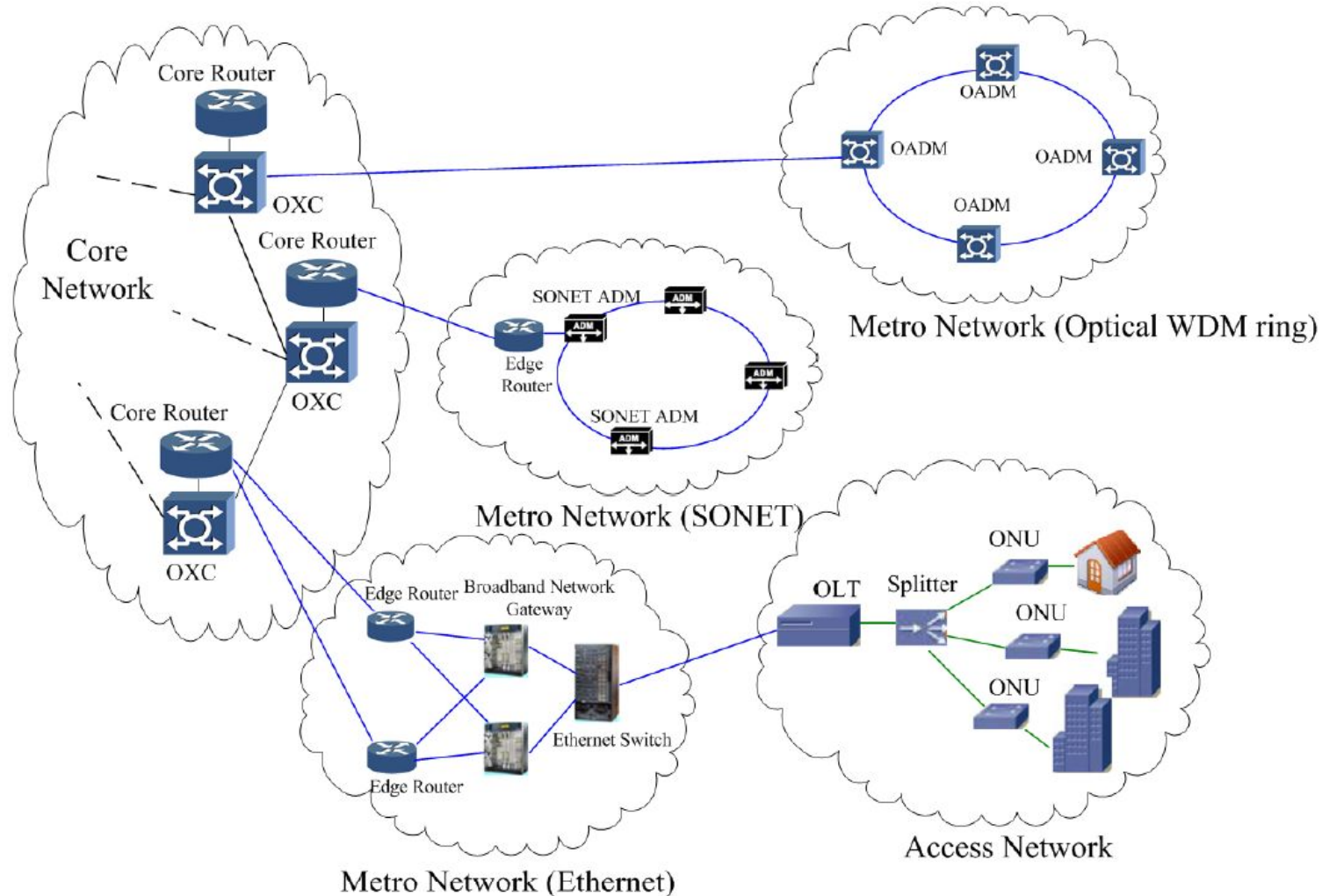


Οπτικά Δίκτυα: WAN





Οπτικά Δίκτυα: MAN





Οι υπηρεσίες των παρόχων

- *Connection-oriented* (με σύνδεση): Υπάρχει η έννοια της (σταθερής) σύνδεσης μεταξύ των μερών που μετέχουν στην επικοινωνία.
- *Circuit-switched*: Σε κάθε σύνδεση παρέχουμε σταθερό εύρος ζώνης.
 - η σύνδεση (κύκλωμα) πρέπει να παραμένει ζωντανή εφόσον αρχικοποιηθεί
 - το άθροισμα του εύρος ζώνης όλων των κυκλωμάτων πρέπει να είναι μικρότερο από τη χωρητικότητα των συνδέσμων που χρησιμοποιούνται.
 - ρυθμοί κυκλωμάτων: από 64kb/s μέχρι μερικά Gb/s
 - παράδειγμα: PSTN (public switched telephone network) και μισθωμένες γραμμές (private lines).

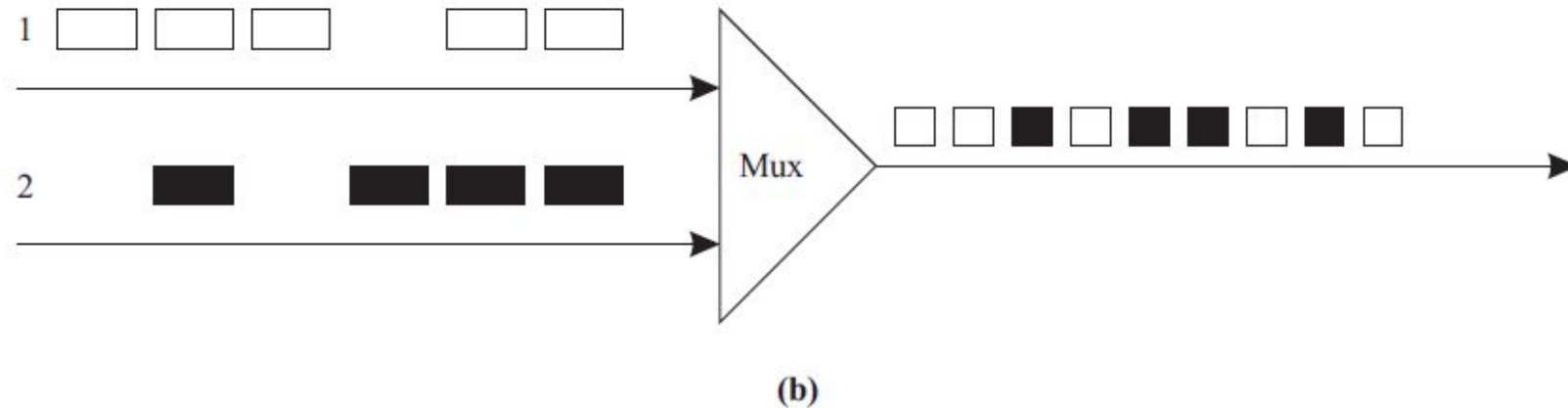
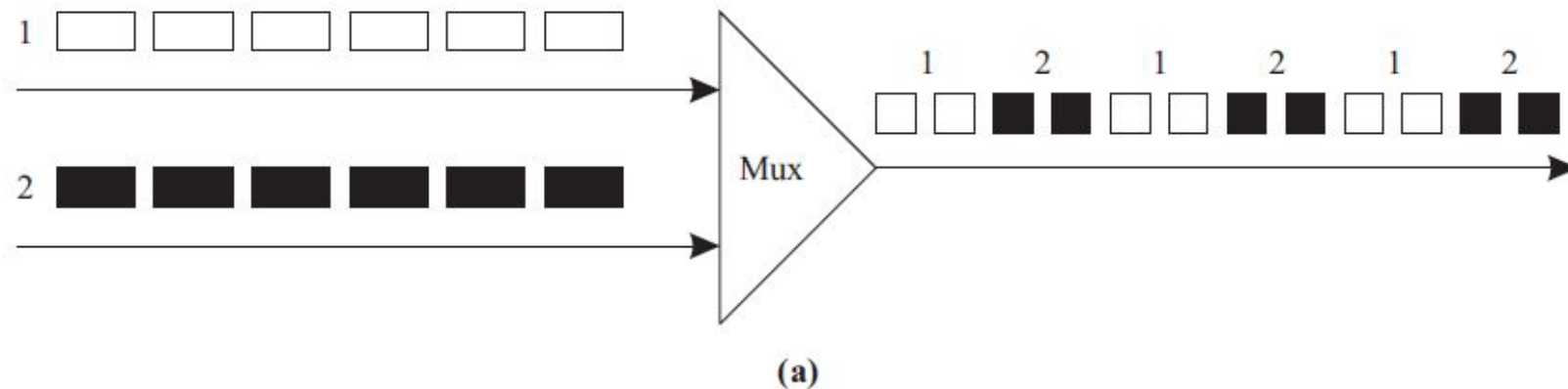


Οι υπηρεσίες των παρόχων (2)

- *Packet Switching*: Χρησιμοποιείται ώστε να βελτιστοποιήσει την χρήση των πόρων (χωρητικότητα) όταν έχουμε bursty κίνηση.
 - Τα δεδομένα χωρίζονται σε πακέτα και κάθε πακέτο μπορεί να πολυπλεχθεί με άλλα πακέτα άλλων δεδομένων.
 - Στατιστική πολυπλεξία (*Statistical Multiplexing*): Όταν μία ζεύξη χρησιμοποιείται από πολλά ζευγάρια επικοινωνίας.
 - *Datagram Service*: Τα πακέτα μπορεί να φτάνουν στον προορισμό τους από διαφορετικούς δρόμους
 - *Frame Relay*: Εγγυόμαστε ένα μέσω bandwidth αλλά ο χρήστης μπορεί να «πιάσει» και παραπάνω από αυτό.



Είδη πολυπλεξίας δεδομένων (στο πεδίο του χρόνου)



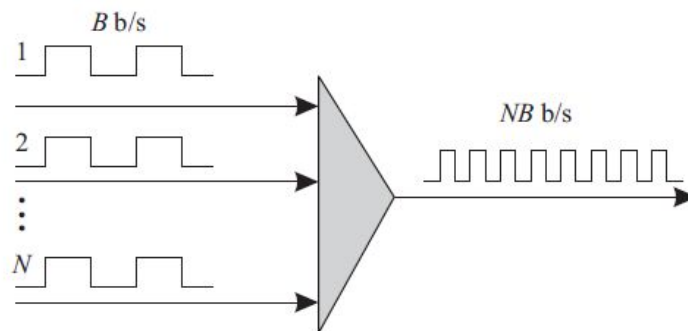


Οπτικά Δίκτυα

- Πρώτης Γενιάς
 - Οι οπτικές τεχνολογίες χρησιμοποιούνται για μετάδοση (οι ίνες απλά αντικαθιστούν το χαλκό).
 - Η επεξεργασία και η μεταγωγή (switching) γίνεται από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα.
 - Παραδείγματα: SONET & SDH
- Δίκτυα Δεύτερης Γενιάς
 - Γίνεται μία προσπάθεια η δρομολόγηση και η μεταγωγή να γίνουν στο οπτικό επίπεδο (optical layer).
 - Στην ουσία προσπαθούμε να κάνουμε τα οπτικά συστήματα... πιο έξυπνα!

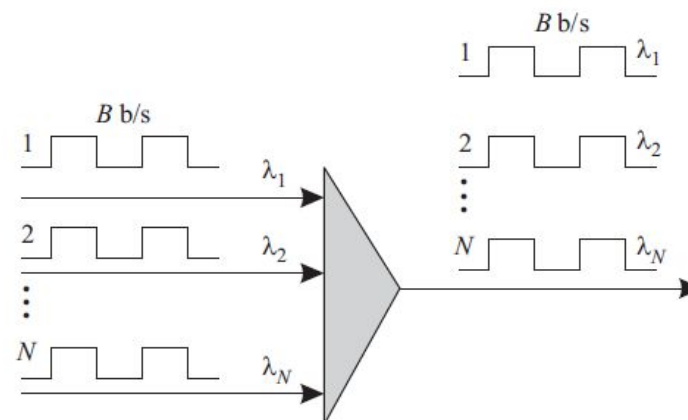


Τρόποι Πολυπλεξίας (σε δίκτυα 2^{ης} γενιάς)



TDM or OTDM mux

(a)



WDM mux

(b)



Time Domain Multiplexing (TDM)

- Η οπτική ίνα έχει τεράστιο εύρος ζώνης που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα
- Ό ένας τρόπος είναι να αυξήσουμε το ρυθμό μετάδοσης πολυπλέκοντας πολλά μικρά «κανάλια».
- Π.χ. $64 \text{ κανάλια} \times 155 \text{ Mb/s} = 10 \text{ Gb/s}$
- Εμπορικά διαθέσιμη ρυθμοί TDM είναι της τάξης των 40 Gb/s .
- Τα ηλεκτρονικά θέτουν ένα όριο στο μέγιστο ρυθμό.
- Οι οπτικές τεχνολογίες για απευθείας TDM στο οπτικό επίπεδο (χωρίς ηλεκτρονικά) είναι ακόμα μακριά.

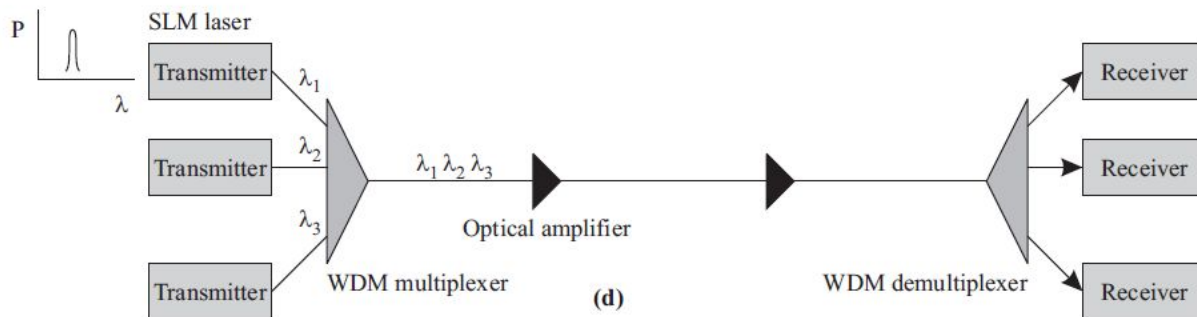
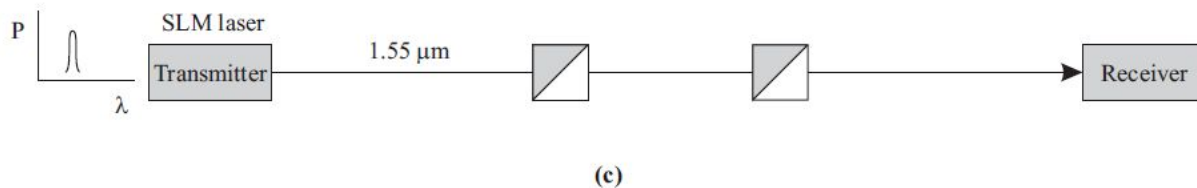
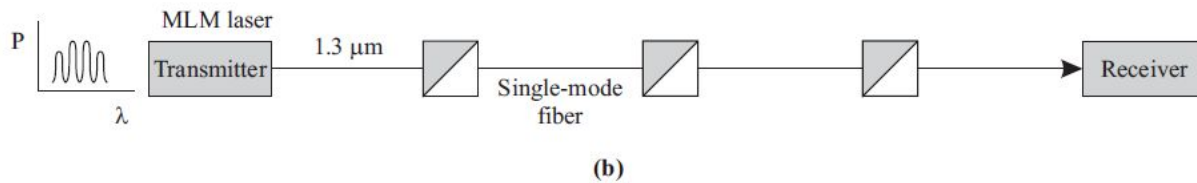
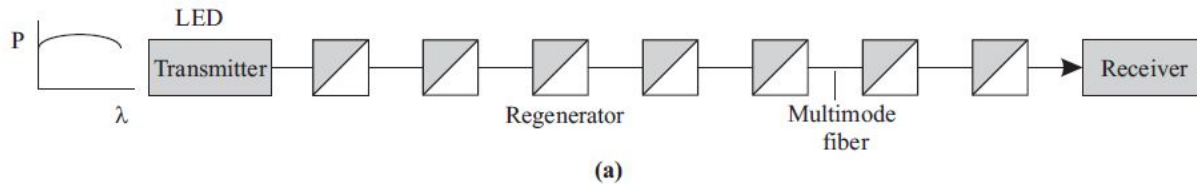


Wavelength Division Multiplexing (WDM)

- Στην ουσία πρόκειται για πολυπλεξία στο πεδίο των συχνοτήτων.
- Μεταδίδουμε πολλά μήκη κύματος στην ίδια ίνα και κάθε μήκος κύματος είναι μία ιδεατή ίνα (virtual fiber)
- Σε μία πρώτη θεώρηση τα μήκη κύματος (χρώματα) δεν παρεμβάλλονται
- Το WDM χρησιμοποιείται πολύ σε δίκτυα long-haul, metro αλλά και υποβρύχιες ζεύξεις.
- Με χρήση TDM + WDM μπορούμε να μεταδώσουμε πληροφορία με ρυθμούς της τάξης του Tb/s (!) = 1.000Gb/s=1.000.000Mb/s



Στάδια Εξέλιξης Οπτικών Δικτύων





Λίγη Ιστορία

- τέλη 1970- αρχές 1980: multimode ίνες και LEDs ή LASERs με πολλούς τρόπους
 - εμβέλεια: μερικά χιλιόμετρα
 - κακή χρήση του φάσματος (πηγές με ευρύ φάσμα)
 - υψηλές απώλειες (μήκη κύματος στα $0.8\mu\text{m}$ ή $1.3\mu\text{m}$)
 - Πολλοί τρόποι διάδοσης σημαίνει διεύρυνση παλμών (ISI)
 - Χρήση αναγεννητών κάθε 10km
 - Ρυθμοί από 32 έως 140Mb/s
- το 1984 άρχισαν να εγκαθίστανται single mode ίνες
 - Πολύτροπα laser στο $1.3\mu\text{m}$ (εξαλείφεται ένα είδος διασποράς όπως θα δούμε παρακάτω).
 - Διάμετρος πυρήνα ίνας $8\mu\text{m}$ - $10\mu\text{m}$.
 - Αναγεννητές κάθε 40km
 - Ρυθμοί: μερικές εκατοντάδες Mb/s



Λίγη Ιστορία

- Τέλη δεκαετίας 1980: Χρήση πηγών με μήκος κύματος εκπομπής στα 1.55 μm .
 - Ελαχιστοποίηση απωλειών
 - Η διασπορά (dispersion) όμως προκαλεί ISI
 - Εγκατάσταση ινών dispersion shifted όπου έχουν μικρή διασπορά στα 1.55 μm (MCI-Verizon, NTT, κτλ)
 - Distributed feedback lasers (DFB): Μικρότερο φάσμα εκπομπής (μονότροπα laser)
 - Ρυθμοί της τάξης του 1Gb/s
- Αρχές της δεκαετίας του 1990: Οπτικοί Ενισχυτές
 - EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier, παρέχουν (αμιγώς) οπτική ενίσχυση στο 1.55 μm .
 - Καταλύτης για την εγκατάσταση συστημάτων WDM
 - Ρυθμοί μετάδοσης (ανά κανάλι): 10Gb/s
 - Απόσταση ενισχυτών: 40-80km
 - Χρήση εξωτερικών διαμορφωτών για περαιτέρω βελτιστοποίηση του φάσματος.

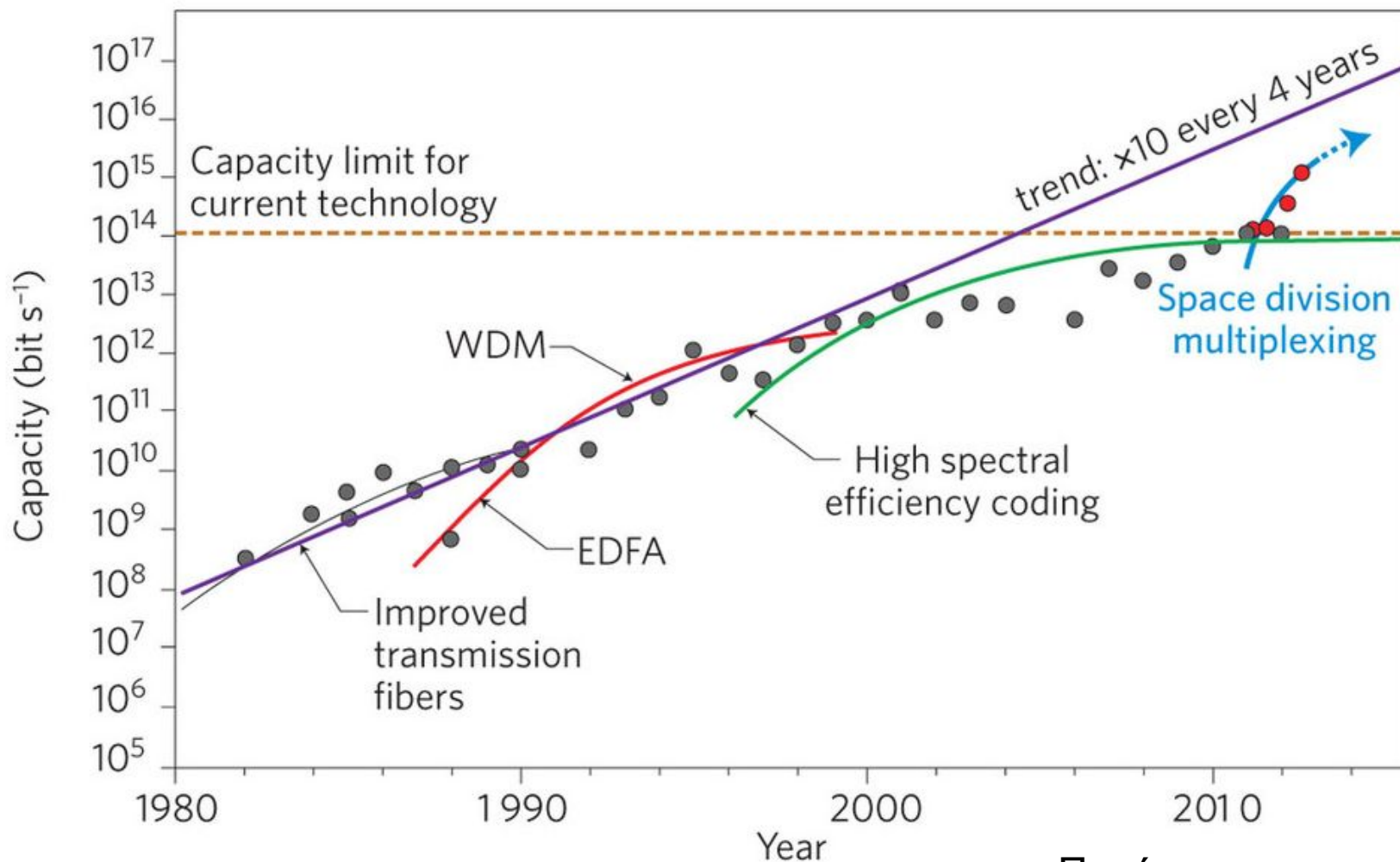


Λίγη Ιστορία

- Η ανάπτυξη τεχνικών αντιστάθμισης διασποράς (dispersion compensation) επέτρεψε την άνετη μετάδοση με ρυθμούς 10Gb/s
- Ωστόσο όσο αυξάνονται οι ρυθμοί μετάδοσης αρχίζουν να παίζουν ρόλο κάποια άλλα φαινόμενα
 - Μη γραμμική παραμόρφωση (π.χ. four wave mixing – FWM)
 - Φαινόμενα πόλωσης
 - Μη ομαλή απόκριση των EDFA ως προς την συχνότητα
- Αναπτύχθηκαν ίνες που είχαν μικρότερη διασπορά από τις συμβατικές και ήταν ειδικά σχεδιασμένες για να προκαλούν μικρότερη μη γραμμική παραμόρφωση.
- Σήμερα
 - ρυθμοί μετάδοσης ανά κανάλι: 10-40Gb/s
 - συνολική χωρητικότητα: 10Tb/s
 - απόσταση καναλιών: 50GHz
 - αποστάσεις μετάδοσης μέχρι και μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα χωρίς ανάγκη ηλεκτροοπτικής αναγέννησης



Εξέλιξη Χωρητικότητας Οπτικών Συστημάτων



Πηγή: nature.com



Βασικές Παράμετροι Οπτικών Σημάτων



Μήκος Κύματος και Συχνότητα

- Το φως που διαδίδεται μέσα σε μία οπτική ίνα χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος του.
- Το μήκος κύματος λ συνδέεται με την συχνότητα του κύματος f .
- Το λ και το f χαρακτηρίζουν το οπτικό φέρον το οποίο είναι το H/M πεδίο που εκπέμπεται από ένα αδιαμόρφωτο laser
- Σε μία πρώτη προσέγγιση (πολύ πρώτη!) το ηλεκτρικό πεδίο του φέροντος έχει το μορφή $A\cos(2\pi ft)$ δηλαδή περιέχει δύο συχνότητες τις $\pm f$
- Στον ελεύθερο χώρο το ηλεκτρικό αυτό πεδίο διαδίδεται ως $A(d)\cos(2\pi ft - kz)$ όπου d είναι η απόσταση που έχει καλύψει
- το $k=2\pi/\lambda$ είναι το κυματάνυσμα του κύματος (θυμηθείτε το μάθημα της Διάδοσης).

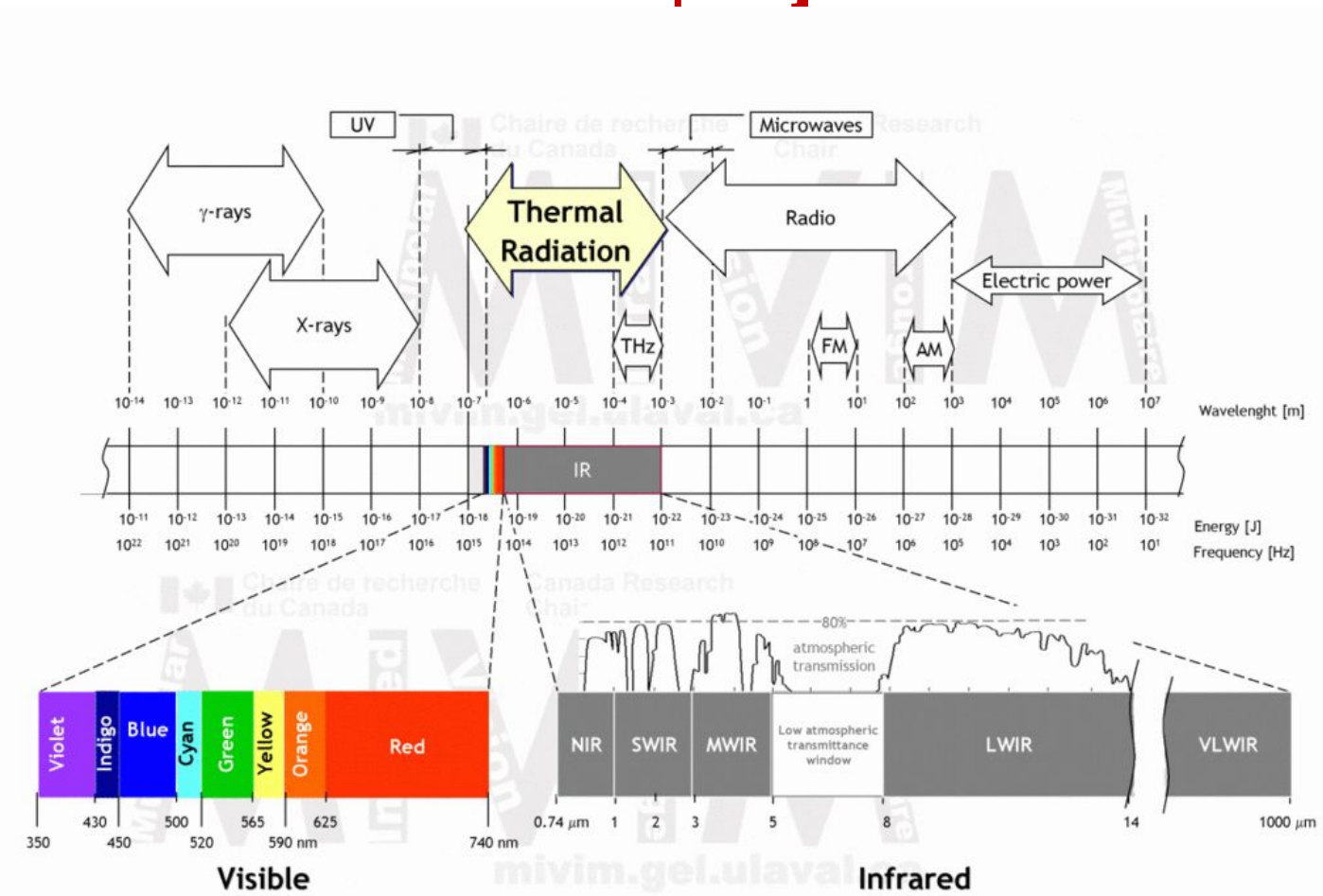


Μήκος Κύματος και Συχνότητα

- Στον ελεύθερο χώρο, το μήκος κύματος συνδέεται με την συχνότητα βάση του τύπου $\lambda=c/f$ όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($\approx 3 \times 10^8$ m/s).
- Ανάλογα με την συχνότητα που εκπέμπει η πηγή μας ανήκει σε διαφορετικά μέρη του Η/Μ φάσματος



Η/Μ φάσμα





Μπάντες (συχνοτικές ζώνες) μετάδοσης

Band	Descriptor	Wavelength range (nm)
O-band	Original	1260 to 1360
E-band	Extended	1360 to 1460
S-band	Short	1460 to 1530
C-band	Conventional	1530 to 1565
L-band	Long	1565 to 1625
U-band	Ultra-long	1625 to 1675

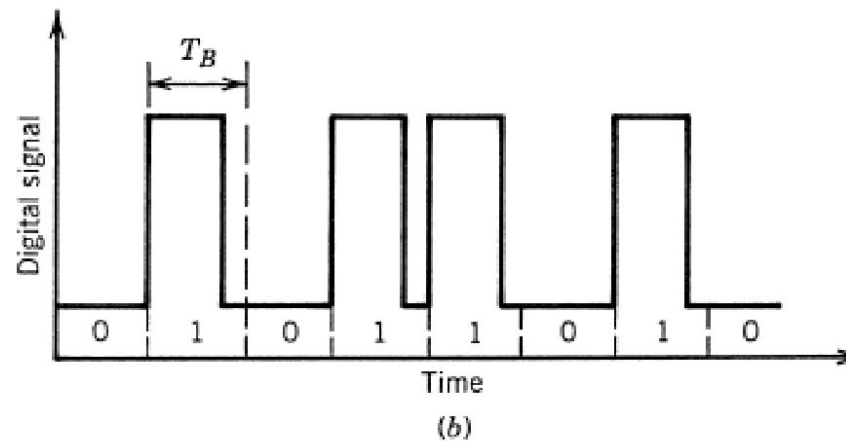
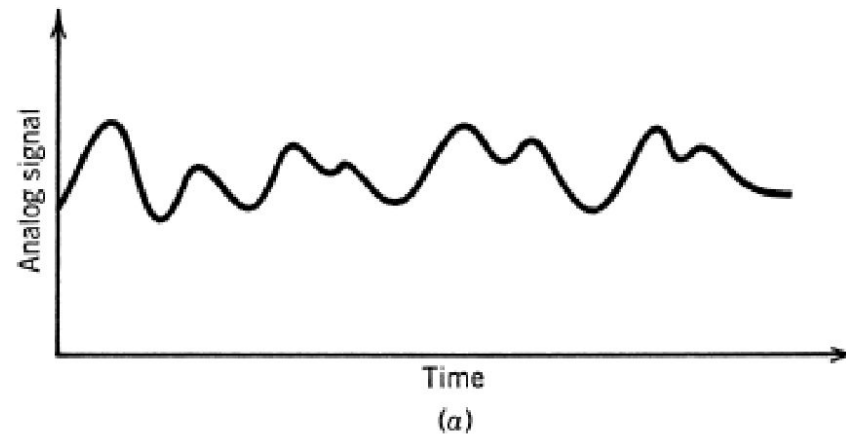


Εύρος Ζώνης

- Στο φέρον αποτυπώνουμε την πληροφορία μας
- Π.χ. αν $x(t)$ είναι το σήμα που θέλουμε να μεταδώσουμε τότε μπορούμε να «αναγκάσουμε» το laser να εκπέμπει το πεδίο $Ax(t)\cos(2\pi ft)$
- Η παραπάνω περίπτωση είναι φυσικά η διαμόρφωση κατά πλάτος
- Ως αποτέλεσμα της διαμόρφωσης του σήμα πλέον καταλαμβάνει πολλές συχνότητες
- Εύρος ζώνης είναι η συχνοτική περιοχή που καταλαμβάνει το σήμα γύρω από την κεντρική συχνότητα f
- Στις οπτικές επικοινωνίες χρησιμοποιούνται σχετικές απλές μέθοδοι διαμόρφωσης με φασματική απόδοση 0.4bit/s/Hz.
- Έτσι ένα σήμα 10Gb/s καταλαμβάνει ένα εύρος ζώνης περίπου 25GHz



Διαμόρφωση Σήματος





Ισχύς Σήματος

- Η ισχύς του σήματος είναι και αυτή μία πολύ βασική παράμετρος
- Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις επιδόσεις ενός συστήματος οπτικών επικοινωνιών
- Η ισχύς υπολογίζεται από το επιφανειακό ολοκλήρωμα του διανύσματος Poynting $\frac{1}{2}\text{Re}\{\mathbf{E}\times\mathbf{H}^*\}$.
- Εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας του κύματος που περνάει από μία σταθερή διατομή
- Μετριέται συνήθως mW ή dBm



Θυμάστε τα dB?

- Οι μονάδες dBm θέλουν μία προσοχή
- Θυμίζω ότι για έναν καθαρό αριθμό A (π.χ. κέρδος ενισχυτή, απώλειες μέσου κτλ), A [dB]= $10\log_{10}(A)$.
 - Π.χ. ένας ενισχυτής με ενίσχυση $A=10^3$ θα έχει ενίσχυση A [dB]=30dB.
 - Ένα μέσο με $L=10^{-6}$ θα έχει απώλειες L [dB]=-60dB.
- Από dB στην γραμμική κλίμακα $A=10^{A[\text{dB}]/10}$.



Θυμάστε τα dB?

- Όταν έχουμε δύο στοιχεία (π.χ. ενισχυτές) σε σειρά τότε το κέρδος τους πολλαπλασιάζεται στην γραμμική κλίμακα.
- Στην λογαριθμική κλίμακα προσθέτουμε!
 - $G=G_1G_2$.
 - $G[\text{dB}]=10\log_{10}(G_1G_2)=10\log_{10}(G_1)+10\log_{10}(G_2)$
 - $G[\text{dB}]=G_1[\text{dB}]+G_2[\text{dB}]$.



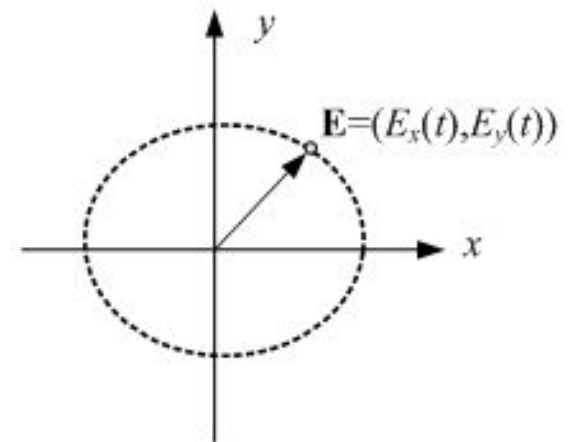
Θυμάστε τα dBm?

- Η ισχύς επίσης μπορεί να μετρηθεί στην λογαριθμική κλίμακα
 - $P[\text{dBm}] = 10 \log_{10}(P[\text{mW}]/1\text{mW})$.
 - $P[\text{mW}] = 10^{P[\text{dBm}]/10}$.
- Αν G το κέρδος ενός στοιχείου τότε η ισχύς εξόδου P_{out} θα συνδέεται με την ισχύ P_{in} βάση της σχέσης: $P_{\text{out}} = GP_{\text{in}}$.
- Στη λογαριθμική κλίμακα
 - $P_{\text{out}}[\text{dBm}] = G[\text{dB}] + P_{\text{in}}[\text{dBm}]$
 - Προσοχή $\text{dBm} + \text{dB} \rightarrow \text{dBm}$.



Πόλωση του Φωτός

- Όταν το φως διαδίδεται κατά τον άξονα z είδαμε στο μάθημα της διάδοσης ότι το ηλεκτρικό πεδίο έχει δύο συνιστώσες: E_x και E_y .
- Ανάλογα με την κίνηση που εκτελεί το άκρο του διανύσματος $\mathbf{E}=(E_x, E_y)$ με την πάροδο του χρόνου ορίζεται η πόλωση του φωτός.
- Η πόλωση μπορεί να είναι:
 - γραμμική
 - κυκλική
 - ελλειπτική





Πόλωση του Φωτός

- Γιατί η πόλωση είναι σημαντική;
- Επειδή διάφορα στοιχεία του δικτύου αντιδρούν διαφορετικά ότι π.χ. το φως είναι πολωμένο γραμμικά ως προς x ($E_y=0$) και διαφορετικά ως προς y ($E_x=0$)
- Το παραπάνω φαινόμενο λέγεται διπλοδιαθλαστικότητα.
- Επομένως έχει σημασία να γνωρίζουμε την κατάσταση της πόλωσης ή να φροντίζουμε ώστε τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούμε να είναι αναίσθητα στην πόλωση.



Κβαντική Φύση του Φωτός

- Το φως είναι κύμα ή σωματίδια;
- Η πιο σωστή περιγραφή είναι ότι είναι σωματίδια που ονομάζονται φωτόνια.
- Τα φωτόνια είναι στην ουσία φορείς του πεδίου που μεταφέρουν τη δράση του.
- Μία οπτική δέσμη αποτελείται από πολλά φωτόνια.
- Η ενέργεια του φωτονίου E συνδέεται με την συχνότητα του κύματος, $E=hf$.
- h είναι η σταθερά του Planck, $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$.



Σύμφωνο και Ασύμφωνο Φως

- Στις περισσότερες περιπτώσεις η ισχύς του σήματος P είναι απλά ανάλογη του μέτρου στο τετράγωνο του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου E , $P \sim |E|^2$.
- Όταν έχουμε παραπάνω από ένα πεδία η συνολική ισχύς είναι $P \sim |E_1 + E_2|^2$.
- Η συνολική ισχύς καθορίζεται από την διαφορά φάσης των δύο πεδίων
 - $P \sim |E_1 + E_2|^2 = |A \exp(j\varphi_1) + A \exp(j\varphi_2)|^2 = 2A^2 + 2A^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$.



Σύμφωνο και Ασύμφωνο Φως

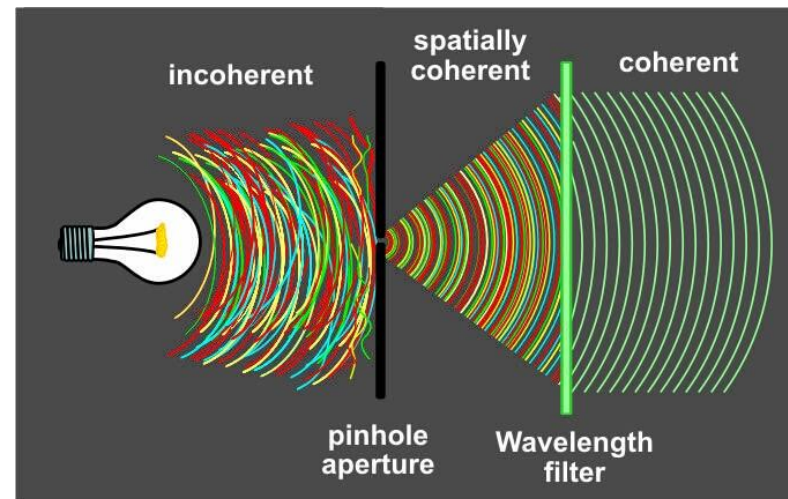
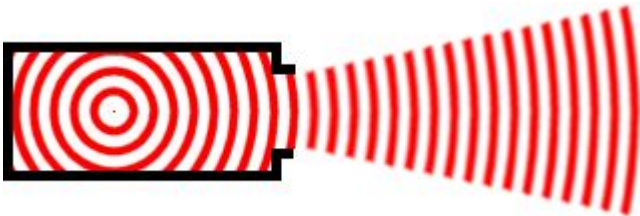
- Σύμφωνο είναι το φως το οποίο αποτελείται από συνιστώσες που έχουν πολύ καλά ορισμένη διαφορά φάσης.
- Ασύμφωνο είναι το φως το οποίο αποτελείται από συνιστώσες που έχουν τυχαία διαφορά φάσης.
- Στο ασύμφωνο φως δεν υπάρχει συμβολή
 - Αν οι συνιστώσες N είναι πολλές
 - $$P \sim \left| \sum_p E_p \right|^2 = \left| \sum_p A \exp(j\varphi_p) \right|^2 = A^2 \sum_{pq} \exp(j(\varphi_p - \varphi_q))$$

$$\cong N^2 A^2 \langle \exp(j(\varphi - \varphi')) \rangle = N A^2 = \sum_p |E_p|^2$$
 - Δηλαδή η συνολική ισχύς είναι απλά το άθροισμα της ισχύος των επιμέρους συνιστωσών.



Σύμφωνο και Ασύμφωνο Φως

- Η συμφωνία μπορεί να είναι επίσης
 - συχνότητας
 - χωρική
- Μπορούμε να σκεφτόμαστε το σύμφωνο φως ως το φως που παράγεται από μία πολύ μικρή (σημειακή πηγή).

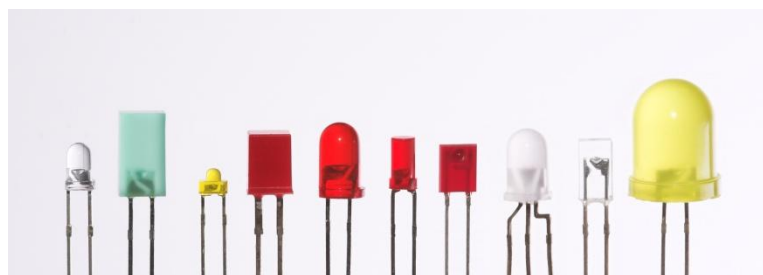
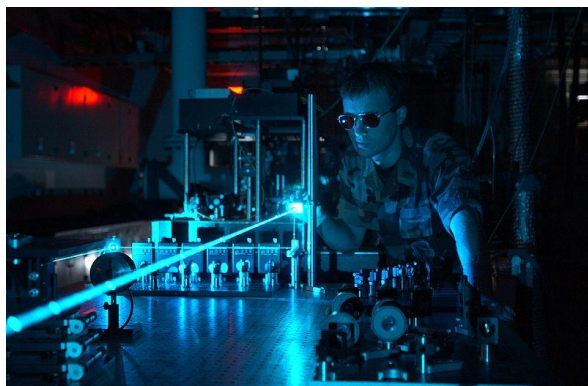


Πηγή: «Lasers: WTF is Coherent Light?»,
<http://amasci.com/miscon/coherenc.html>



Σύμφωνο και Ασύμφωνο Φως

laser: σύμφωνο φως



LED και «κανονικές» λάμπες: ασύμφωνο φως





Μέρος 2^ο: Η οπτική ίνα

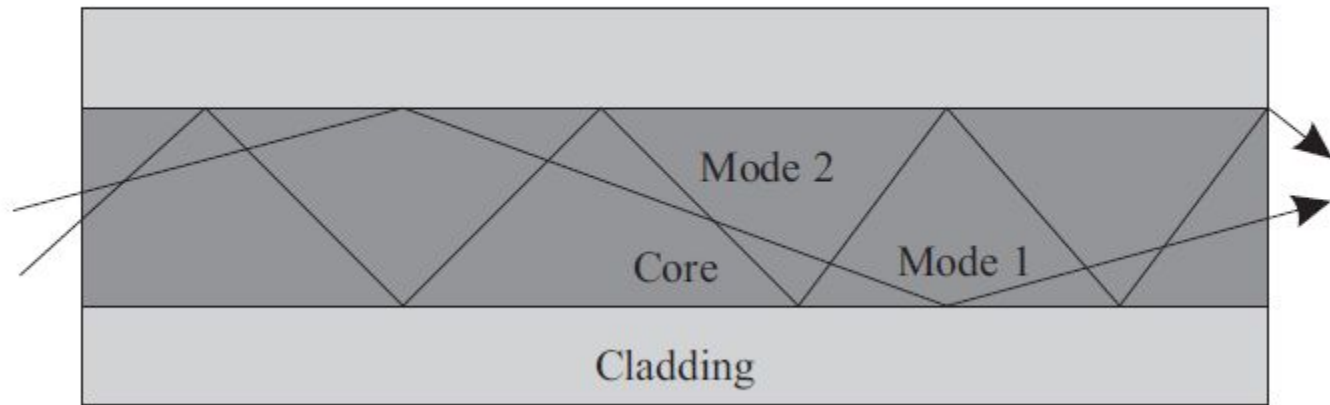
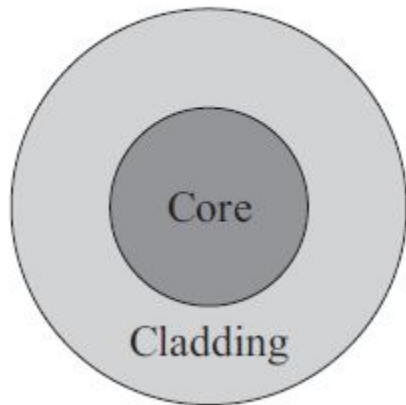


Μετάδοση Σημάτων

- Μετάδοση ελεύθερου χώρου
 - ασύρματες επικοινωνίες
 - υψηλές απώλειες (η δέσμη «ανοίγει»).
 - εμπόδια (κτίρια, κτλ).
 - απορρόφηση από την ατμόσφαιρα.
- Μετάδοση εντός ενός κυματοδηγού
 - οπτικές ίνες, ομοαξονικά καλώδια, κτλ
 - «προστατευμένη» διάδοση
 - μικρότερες απώλειες
 - απουσία εμποδίων



Multi mode και Single mode ίνες



- Σε μία πρώτη προσέγγιση η διάδοση σημάτων στην οπτική ίνα μπορεί να περιγραφεί με την γεωμετρική οπτική.
- Οι οπτικές ακτίνες που ανακλώνται ολικά στα «τοιχώματα» αποτελούν τους τρόπους διάδοσης
- Υπάρχουν ίνες που υποστηρίζουν πολλούς τρόπους διάδοσης (multimode) ή ίνες που υποστηρίζουν έναν τρόπο διάδοσης (single mode).



Ιστορικά Στοιχεία

- Η διάδοση σημάτων στο εσωτερικό τους οφείλεται στο φαινόμενο της ολικής ανάκλασης.
- Οι πρώτες γυάλινες ίνες κατασκευάστηκαν το 1920. Το 1950 εμφανίζονται οι πρώτες ίνες που χρησιμοποιούσανε ένα στρώμα περιβλήματος για καλύτερη απόδοση.
- Πριν το 1970 οι οπτικές ίνες έβρισκαν περισσότερο ιατρικές εφαρμογές εξαιτίας των ισχυρών απωλειών (1000dB/Km).
- Από το 1970, άρχισαν να κατασκευάζονται ίνες με απώλειες 20dB/Km. Ήδη το 1979 κατασκευάστηκε η πρώτη ίνα με πολύ χαμηλές απώλειες 0.2dB/Km.



Οπτικές ίνες

- Η οπτική ίνα μπορεί να υποστηρίξει ένα εύρος ζώνης $\geq 25\text{THz}$ με πολύ χαμηλές απώλειες
 - $\sim 10^8$ τηλεφωνικές συνδιαλέξεις(!)
 - 10^6 κανάλια HDTV
- Ωστόσο η ίνα θέτει διάφορους φυσικούς περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό:
 - απώλειες
 - διασπορά
 - μη γραμμικά φαινόμενα

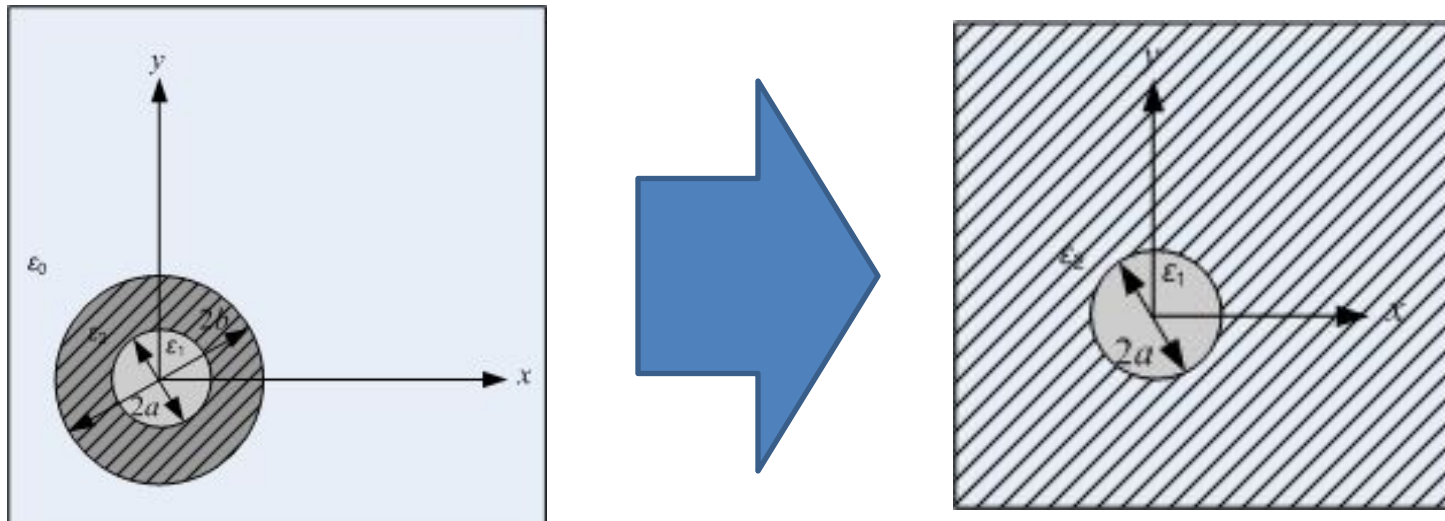


Η οπτική ίνα ως κυματοδηγός

- Η οπτική ίνα είναι κυματοδηγός και επομένως βάσει της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας μπορεί να περιγραφεί από τους τρόπους διάδοσης
- Ο τρόπος διάδοσης είναι μία λύση της κυματικής εξίσωσης της μορφής $\mathbf{E}=\mathbf{E}_0(x,y)e^{j(\omega t-\beta z)}$ και $\mathbf{H}=\mathbf{H}_0(x,y)e^{j(\omega t-\beta z)}$
- Όπως και στο ομοαξονικό καλώδιο και τον μεταλλικό κυματοδηγό μπορούμε να υπολογίσουμε τις συνιστώσες του πεδίου και την σταθερά διάδοσης β αν αντικαταστήσουμε τα πεδία στις εξισώσεις Maxwell.



Η γεωμετρία της οπτικής ίνας



- Κατά την ανάλυση αγνοούμε το εξωτερικό στρώμα της ίνας.



Χαρακτηριστική Εξίσωση

$$F(p, q) = \frac{1}{pa} \frac{J'_m(pa)}{J_m(pa)} + \frac{1}{qa} \frac{K'_m(qa)}{K_m(qa)}$$

$$G(p, q) = \frac{n_1^2}{pa} \frac{J'_m(pa)}{J_m(pa)} + \frac{n_2^2}{qa} \frac{K'_m(qa)}{K_m(qa)}$$

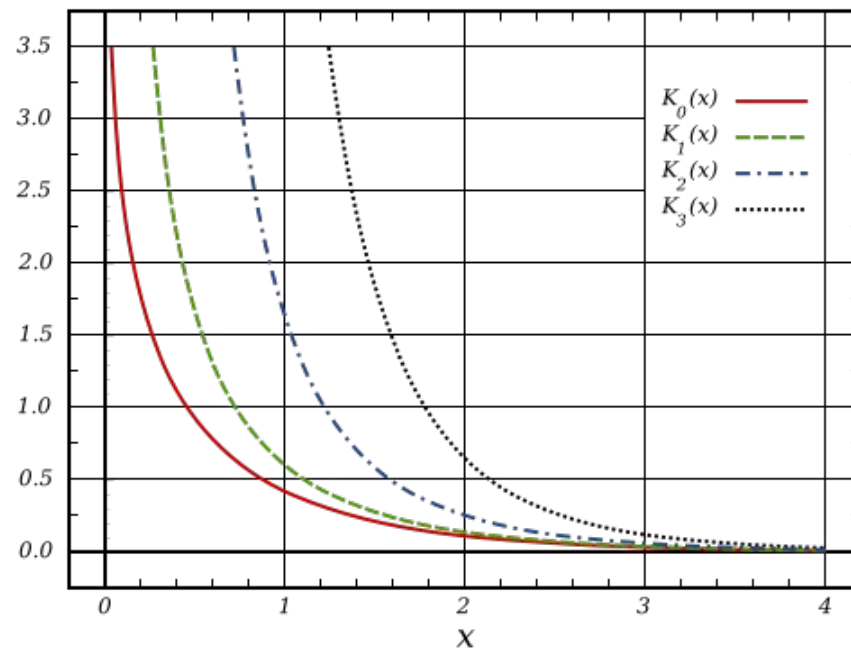
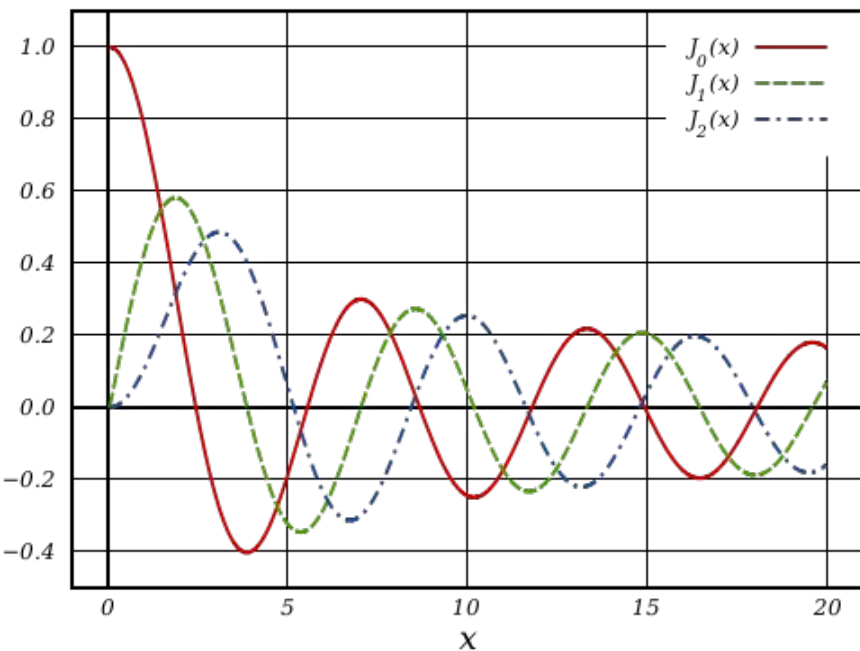
$$m^2 \left\{ \frac{n_1^2}{p^2 a^2} + \frac{n_2^2}{q^2 a^2} \right\} \left\{ \frac{1}{p^2 a^2} + \frac{1}{q^2 a^2} \right\} - F(p, q)G(p, q) = 0$$

$$p^2 a^2 + q^2 a^2 = V^2$$

$$V^2 = k_0^2 a^2 (n_1^2 - n_2^2)$$



Συναρτήσεις Bessel





Ασθενής Κυματοδότηση

- Στην πρακτική περίπτωση, το υλικό του μανδύα και του πυρήνα έχουνε ελάχιστη διαφορά στο δείκτη διάθλασης και επομένως μπορεί κανείς να υποθέσει ότι $n_1 \cong n_2$.

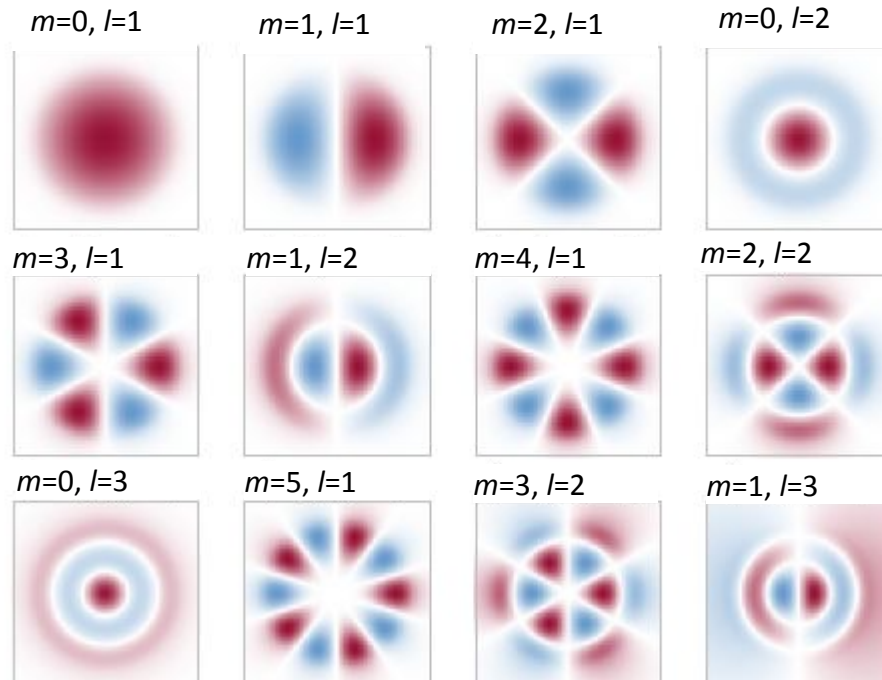
$$\frac{1}{pa} \frac{J'_m(pa)}{J_m(pa)} + \frac{1}{qa} \frac{K'_m(qa)}{K_m(qa)} \cong +m \left\{ \frac{1}{p^2 a^2} + \frac{1}{q^2 a^2} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{Τρόποι} \\ \text{HE} \end{array}$$

$$\frac{1}{pa} \frac{J'_m(pa)}{J_m(pa)} + \frac{1}{qa} \frac{K'_m(qa)}{K_m(qa)} \cong -m \left\{ \frac{1}{p^2 a^2} + \frac{1}{q^2 a^2} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{Τρόποι} \\ \text{EH} \end{array}$$



Ασθενής Κυματοδότηση

- Όταν $n_1 \approx n_2$ τότε το μέσο είναι σχεδόν ομογενές και περιμένουμε οι τρόποι να είναι εγκάρσιοι
- $E_z, H_z \approx 0$





Απώλειες

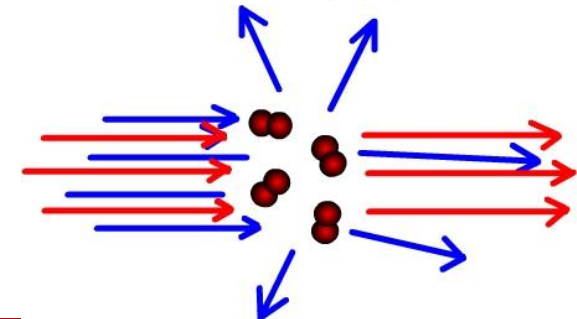
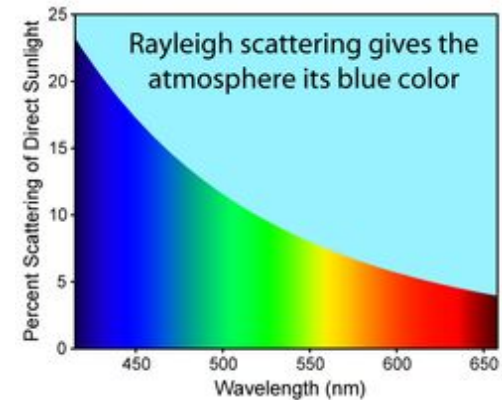
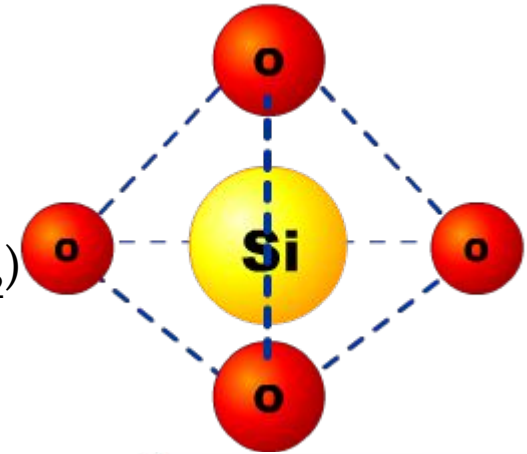
- Ακολουθούν έναν εκθετικό νόμο, $P_{\text{out}} = P_{\text{in}} e^{aL}$
- χαρακτηρίζονται από τον συντελεστή a_{dB} που μετριέται σε dB/Km.

$$\begin{aligned} a(\text{dB} / \text{Km}) &\triangleq 10 \log_{10} (\text{Loss per unit distance}) = \\ &= 10 \log_{10} \left(\frac{1}{L} \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \right) = (10 \log_{10} e) a = 4.343a \end{aligned}$$



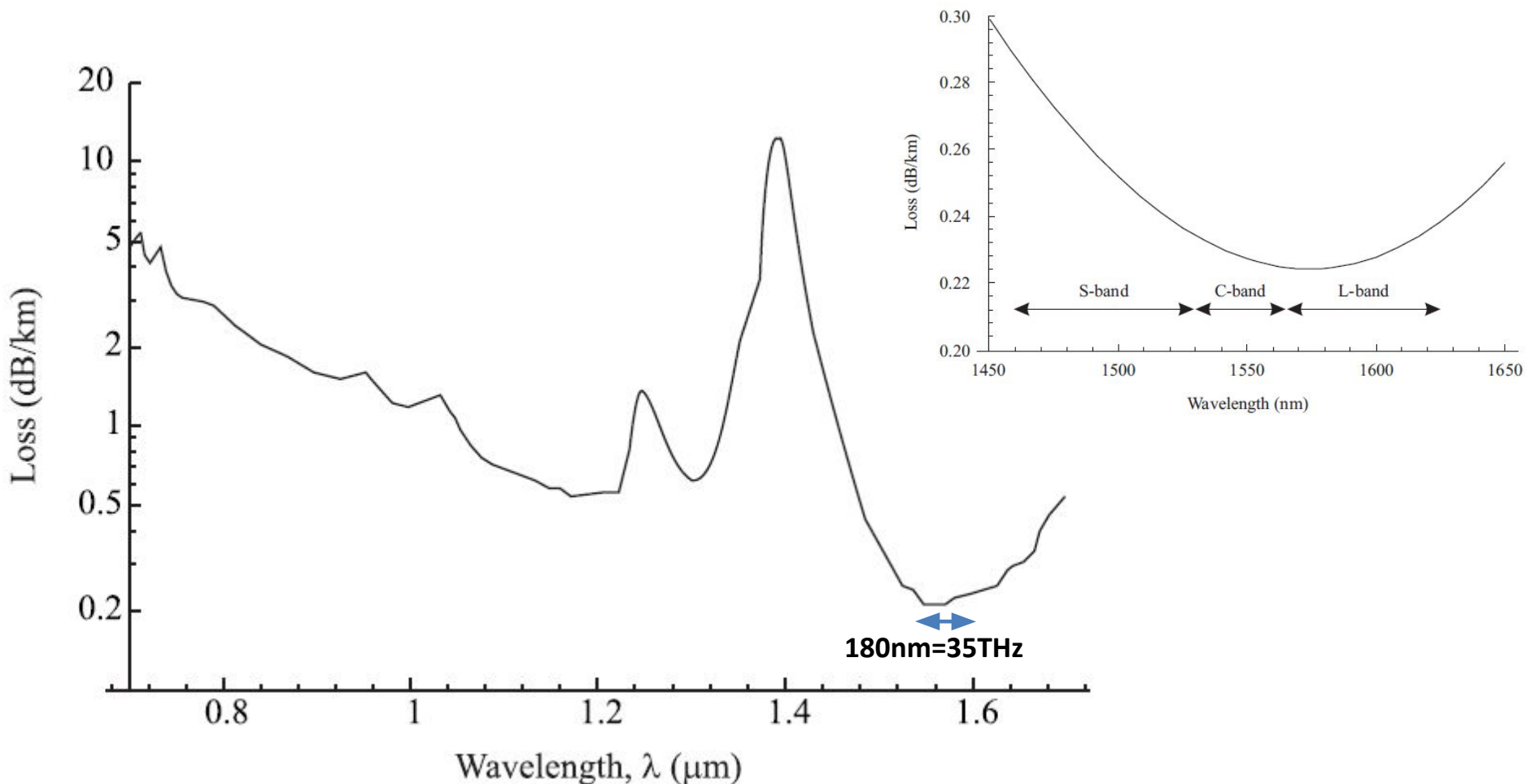
Αιτίες Απωλειών

- Δύο είναι οι κυριότερες αιτίες απωλειών στις οπτικές ίνες
 - Απορρόφηση υλικού (πολύ μικρή για το SiO_2)
 - Απορρόφηση λόγω νοθεύσεων του κρυστάλλου.
 - Σκέδαση Rayleigh (ο κύριος λόγος των απωλειών στις οπτικές ίνες).
 - Η σκέδαση Rayleigh συμβαίνει όταν το μήκος κύματος του φωτός είναι πολύ μεγαλύτερο από την ανομοιογένεια στην οποία σκεδάζεται.
 - 2.5dB/Km στα 0.8 μm
 - 0.4dB/Km στα 1.3 μm
 - 0.25dB/Km στα 1.55 μm
 - Απώλειες κάμψεων (ακτίνα καμπυλότητας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από μερικά cm)



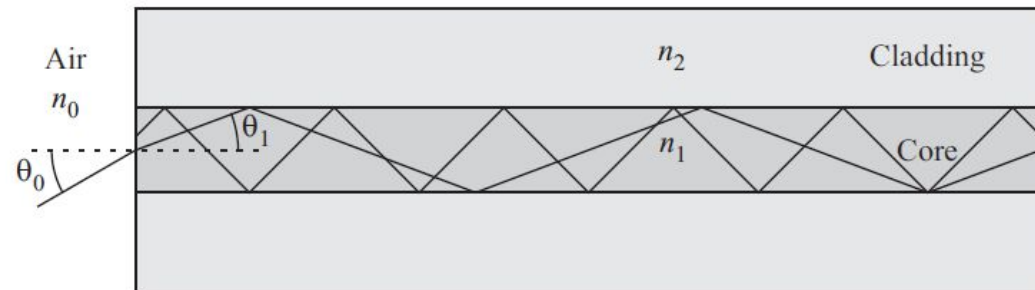
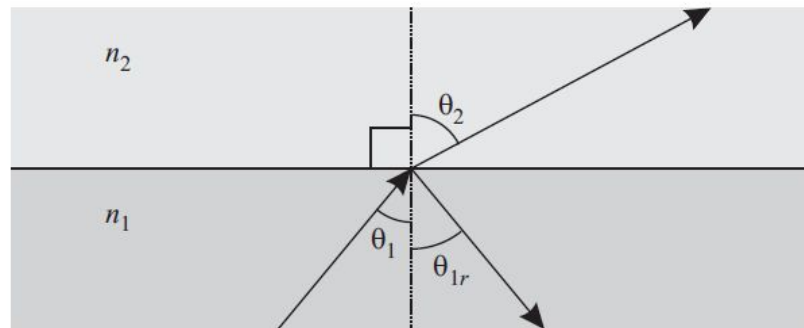


Εξάρτηση Απωλειών από την Συχνότητα





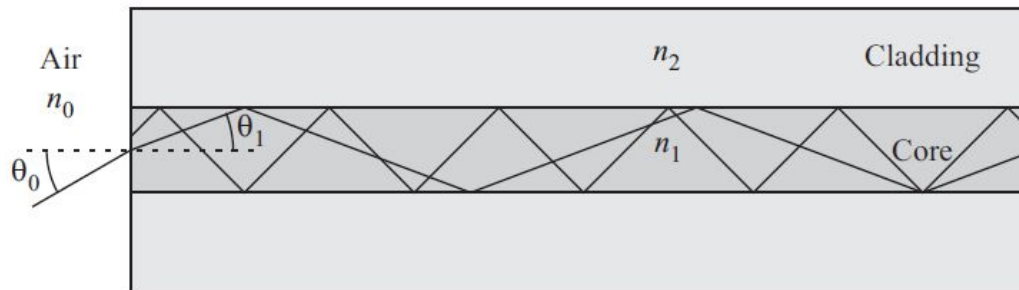
Διασπορά Πολλών Τρόπων (Γεωμετρική Οπτική)



- Θεωρούμε πως η ακτίνα της ίνας a είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος κύματος λ
- Το σήμα αποτυπώνεται πάνω στις ακτίνες του φωτός και ταξιδεύει μέσα στην ίνα μέσω ολικών ανακλάσεων
- Νόμος της ανάκλασης: $\theta_1 = \theta_{1r}$
- Νόμος της διάθλασης: $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- Όταν $n_1 > n_2$ τότε μπορεί να έχουμε $\theta_2 = \pi/2$ αν $\theta_1 = \sin^{-1}(n_2/n_1)$. Αυτό συνεπάγεται ολική ανάκλαση στο μέσο «1»
- Η γωνία $\theta_1 = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ ονομάζεται κρίσιμη γωνία



Διασπορά Πολλών Τρόπων (Γεωμετρική Οπτική)



- Για την παραπάνω γεωμετρία είναι δυνατόν να δείξουμε ότι αν $\theta_0 < \theta_{\max}$ όπου

$$\theta_{\max} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

- τότε οι ακτίνες ανακλώνται ολικά στις διαχωριστικές επιφάνειες πυρήνα (core) και περιβλήματος (cladding)
- Η θ_{\max} ονομάζεται κρίσιμη γωνία (critical angle)



Χρονική Διεύρυνση

- Η πιο γρήγορη ακτίνα χρειάζεται χρόνο $T_f = Ln_1/c$ για να φτάσει στην έξοδο.
- Η πιο αργή ακτίνα εισέρχεται στην ίνα υπό γωνία θ_1 (δείτε προηγούμενο σχήμα)
- Η συνολική απόσταση που πρέπει να καλύψει η αργή ακτίνα είναι $L/\sin\theta_1$.
- Από τον νόμο της διάθλασης έχουμε $n_1 \sin\theta_1 = n_0 \sin\theta_{\max}$ και αν θεωρήσουμε πως $n_0 = 1$ (αέρας) τότε $\sin\theta_1 = 1/n_1$.
- Ο χρόνος επομένως που χρειάζεται η αργή ακτίνα είναι $T_s = Ln_1/c/\sin\theta_1 = Ln_1^2/c/n_2$.
- Η χρονική διεύρυνση είναι επομένως $\delta T = T_s - T_f = L/cn_1^2/n_2 \Delta$ όπου $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$.
- Αν υποθέσουμε ότι ο χρόνος διεύρυνσης δεν πρέπει να γίνει μεγαλύτερος από το ήμισυ της διάρκειας του bit τότε βρίσκουμε ότι το γινόμενο ρυθμού-απόστασης (bit rate-distance product) είναι:

$$BL \leq \frac{1}{2} \frac{n_2}{n_1^2} \frac{c}{\Delta}$$



Πολύτροπες Ύνες

- Χρησιμοποιούνται σε τοπικά δίκτυα (local area networks)
- Με LEDs πετυχαίνουμε ρυθμούς της τάξης των 600Mb/s
- Με LASER μπορούμε να πετύχουμε και ρυθμούς της τάξης των Gb/s.



Μονότροπες Ύνες

- Στην περίπτωση όπου η ακτίνα της ίνας είναι συγκρίσιμη με το μήκος κύματος δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την γεωμετρική προσέγγιση
- Το πεδίο αναπτύσσεται σε μία σειρά τρόπων και υπό κατάλληλες συνθήκες μπορούμε να έχουμε την ύπαρξη ενός και μόνο τρόπου
- Η συνθήκη για μονότροπη διάδοση είναι:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} < 2.405$$

- Όσο πιο μικρό είναι το $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ τόσο πιο μικρό είναι το V και επομένως τόσο πιο εύκολο είναι να πετύχουμε μονότροπη λειτουργία.
- Το γεγονός ότι έχουμε $n_1 \approx n_2$ σημαίνει πως έχουμε ασθενή κυματοδηγηση. Το κύμα εξασθενεί σχετικά αργά όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο της ίνας



Τρόποι Διάδοσης σε μία Οπτική Ύα

Μονότροπη Ύα

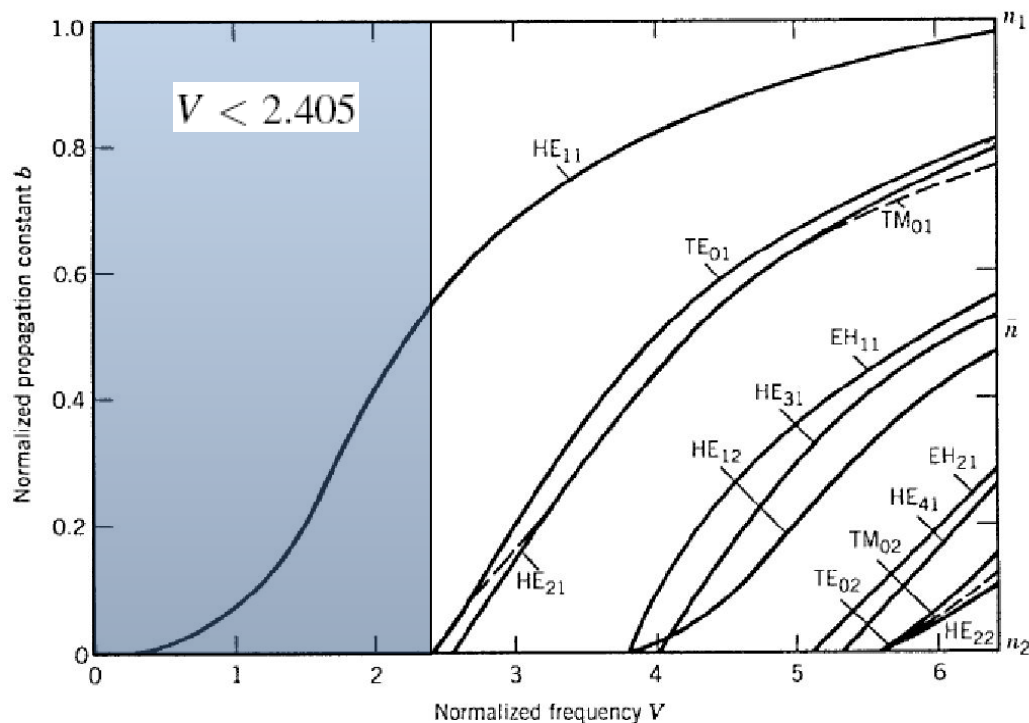


Figure 2.5: Normalized propagation constant b as a function of normalized frequency V for a few low-order fiber modes. The right scale shows the mode index \bar{n} . (After Ref. [34]; ©1981 Academic Press; reprinted with permission.)



Ενεργός δείκτης διάθλασης

- Εξαιτίας της αλλαγής του δείκτη διάθλασης από n_1 σε n_2 , το κύμα δεν διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο αλλά σε ένα ανομοιογενές μέσο διάδοσης
- Τα χαρακτηριστικά του μέσου διάδοσης (γεωμετρία + προφίλ δείκτη διάθλασης) αποτυπώνονται στον τρόπο διάδοσης του οποίου τα χαρακτηριστικά διαφέρουν από αυτά του ελεύθερου χώρου.
- Σε ένα ομοιογενές μέσο με δ.δ. n_1 το κύμα έχει σταθερά διάδοσης ίση με $\beta=(2\pi/\lambda)n_1$. Αυτό σημαίνει πως η φάση του κύματος όταν αυτό διαδίδεται στη διεύθυνση του άξονα z είναι $\exp(-j\beta z)$.
- Στην περίπτωση της ίνας αντί για $\beta=(2\pi/\lambda)n_1$ έχουμε $\beta=(2\pi/\lambda)n_{\text{eff}}$ όπου το n_{eff} είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης.
- οι τιμές του n_{eff} είναι $n_2 \leq n_{\text{eff}} \leq n_1$. Για $1.5 \leq V \leq 2.5$, καθορίζονται προσεγγιστικά από την εξίσωση:

$$\frac{n_{\text{eff}}^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = \left[1.1428 - \frac{0.996}{V^2} \right]^2$$



Χρωματική Διασπορά

- Ας υποθέσουμε πως ένα σήμα $x(t)$ εισέρχεται σε μία οπτική ίνα.
- Κάθε συνιστώσα του φάσματος $X(\omega)$ του $x(t)$ μπορούμε να θεωρήσουμε ότι διαδίδεται ανεξάρτητα.
- Επομένως (αν αγνοήσουμε την εξασθένιση) η συνιστώσα εμφανίζεται στην έξοδο με ολισθημένη φάση $X(\omega)e^{j\beta z}$
- Στην περίπτωση του ελεύθερου χώρου θα είχαμε $\beta(\omega)=2\pi/\lambda=\omega/c$ και επομένως το φάσμα εξόδου θα είναι $Y(\omega)=X(\omega)e^{j(\omega/c)z}$.
- Το αντίστοιχο σήμα στο πεδίο του χρόνου υπολογίζεται ως εξής:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y(\omega)e^{-j\omega t} d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega)e^{j(\omega/c)z-j\omega t} d\omega = x\left(t - \frac{z}{c}\right)$$

- Επομένως στην περίπτωση όπου η οπτική ίνα είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με τον ελεύθερο χώρο, το σήμα θα παρουσιαζότανε με καθυστέρηση z/c
- Αυτό είναι σύμφωνο με το γεγονός πως το φως διαδίδεται με ταχύτητα ίση με c στον ελεύθερο χώρο...



Χρωματική Διασπορά

- Στην περίπτωση της οπτικής ίνας, δεν μπορούμε να υποθέσουμε ότι $\beta(\omega)=\omega/c$. Η σχέση β και ω είναι μη γραμμική.
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ανάπτυγμα του Taylor ώστε να γράψουμε το β ως πολυώνυμο του ω κοντά στην κεντρική συχνότητα του σήματος ω_0 , $\beta(\omega)-\beta(\omega_0)=\beta_1(\omega_0)\Delta\omega+\beta_2(\omega_0)\Delta\omega^2/2+\beta_3(\omega_0)\Delta\omega^3/6+\dots$, όπου $\Delta\omega=\omega-\omega_0$
- Οι συντελεστές β_i καθορίζονται από τις παραγώγους της $\beta(\omega)$ στο $\omega=\omega_0$, $\beta_i=d^i\beta(\omega_0)/d\omega^i$
- Το β_1 είναι το αντίστροφο της ταχύτητας ομάδας v_g , $\beta_1=d\beta/d\omega=(d\omega/d\beta)^{-1}=1/v_g$.
- Η παράμετρος β_2 ονομάζεται συντελεστής διασποράς ταχύτητας ομάδας (Group Velocity Dispersion-GVD). Μετριέται σε ps^2/Km .
- Ο συντελεστής β_3 ονομάζεται συντελεστής διασποράς ανώτερης τάξης.



Διεύρυνση Παλμών εξαιτίας GVD

- Χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό Fourier μπορούμε να υπολογίσουμε την διεύρυνση των παλμών εξαιτίας του β_2 (θεωρώντας ότι $\beta_3=0$)

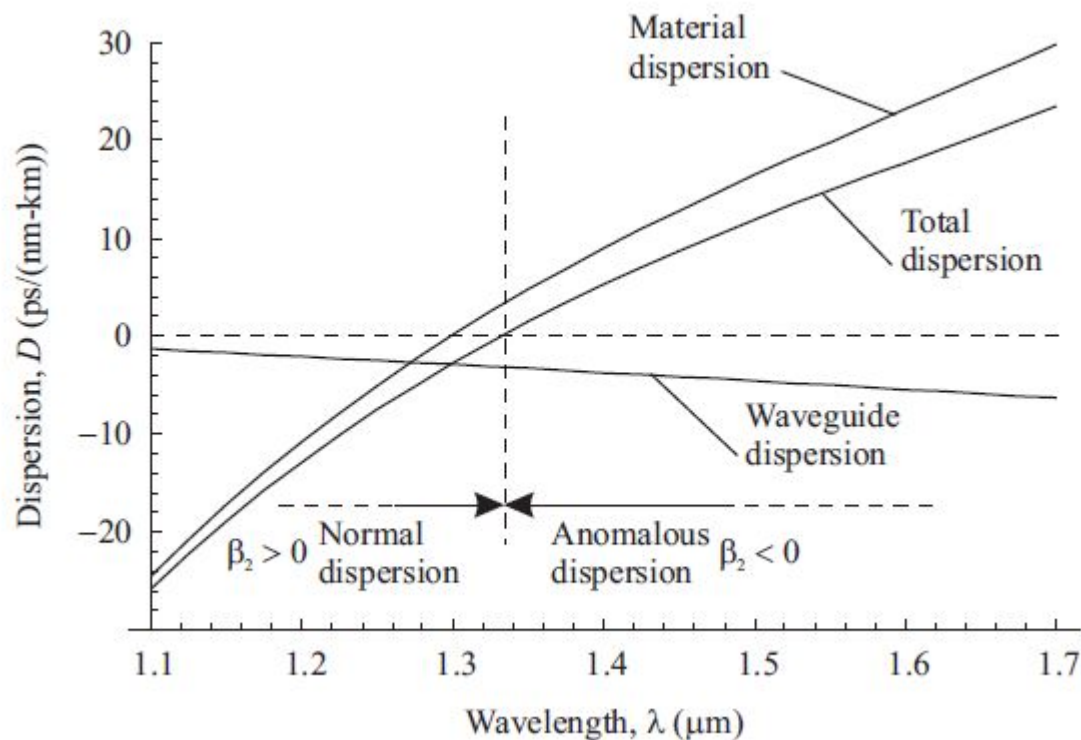
$$\frac{T_z}{T_0} = \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_2 z}{T_0^2}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{z}{L_D}\right)^2}$$

- Το μήκος L_D είναι το χαρακτηριστικό μήκος της GVD το οποίο δίνεται από την σχέση $L_D = T_0^2 / |\beta_2|$
- Στην παραπάνω σχέση, T_z είναι το εύρος του παλμού σε απόσταση z , T_0 το αρχικό εύρος του παλμού, z η απόσταση που έχει διαδοθεί το σήμα.



Συντελεστής διασποράς D

- Συνήθως αντί του β_2 χρησιμοποιούμε την παράμετρο $D = -(2\pi c/\lambda^2)\beta_2$.
- Στις οπτικές ίνες έχουμε $D = D_M + D_W$ όπου το D_M οφείλεται στη διασπορά του μέσου ενώ το D_W οφείλεται στη κυματοδότηση.



Συντελεστής
διασποράς D
μίας οπτικής
ίνας



Συντελεστής διασποράς D

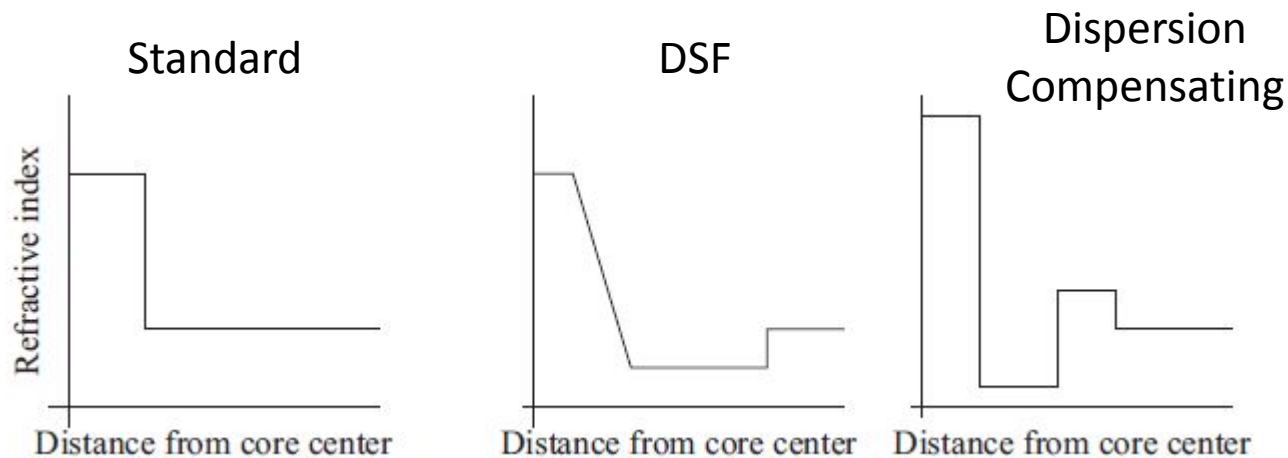
Table 2.1 Characteristics of several commercial fibers

Fiber Type and Trade Name	A_{eff} (μm^2)	λ_{ZD} (nm)	D (C band) [ps/(km-nm)]	Slope S [ps/(km-nm ²)]
Corning SMF-28	80	1302–1322	16 to 19	0.090
Lucent AllWave	80	1300–1322	17 to 20	0.088
Alcatel ColorLock	80	1300–1320	16 to 19	0.090
Corning Vascade	101	1300–1310	18 to 20	0.060
Lucent TrueWave-RS	50	1470–1490	2.6 to 6	0.050
Corning LEAF	72	1490–1500	2 to 6	0.060
Lucent TrueWave-XL	72	1570–1580	–1.4 to –4.6	0.112
Alcatel TeraLight	65	1440–1450	5.5 to 10	0.058



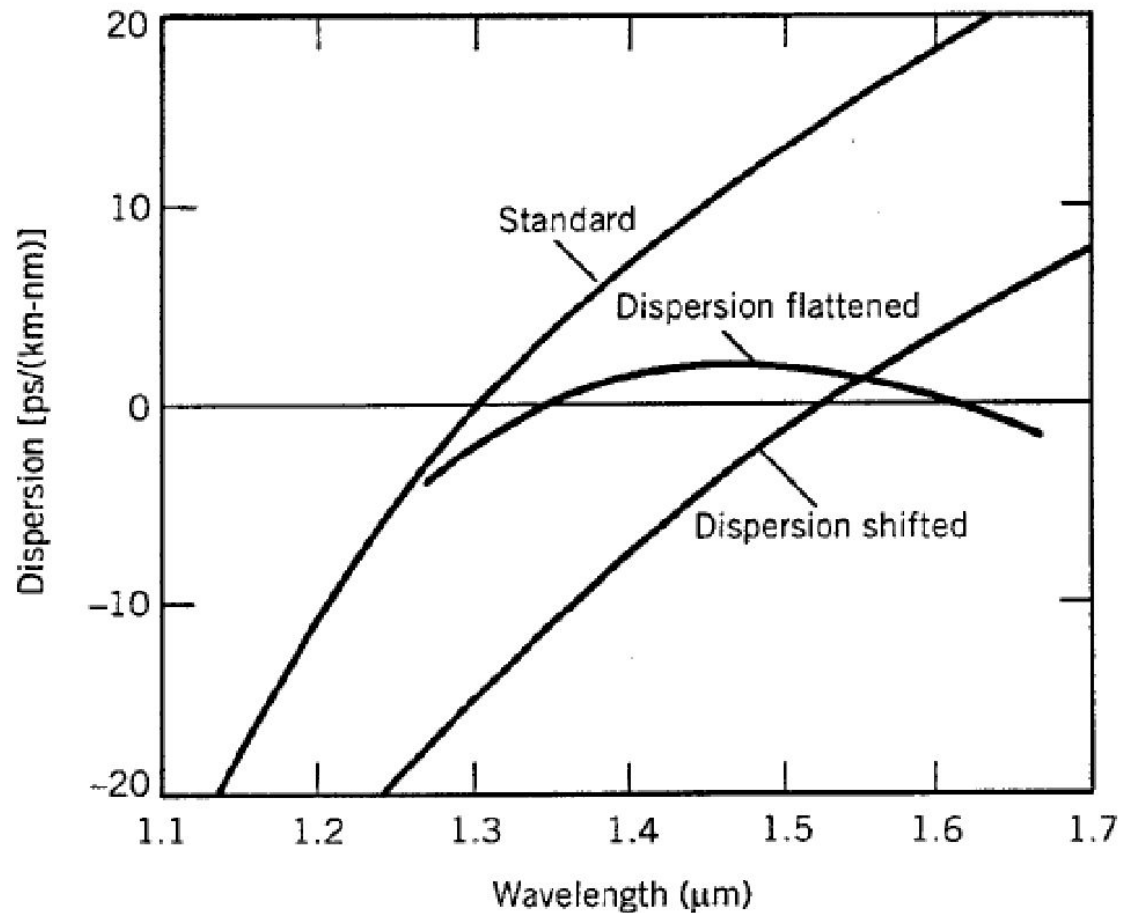
Έλεγχος της GVD

- Δεν μπορούμε να αλλάξουμε εύκολα τις τιμές του DM αλλά ωστόσο μπορούμε να επεμβούμε στην DW
- Αυτό το κάνουμε μεταβάλλοντας το προφίλ του δείκτη διάθλασης. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να έχουμε διαφορετική συμπεριφορά ως προς την διασπορά στο $\lambda=1.55\mu\text{m}$





Παραδείγματα





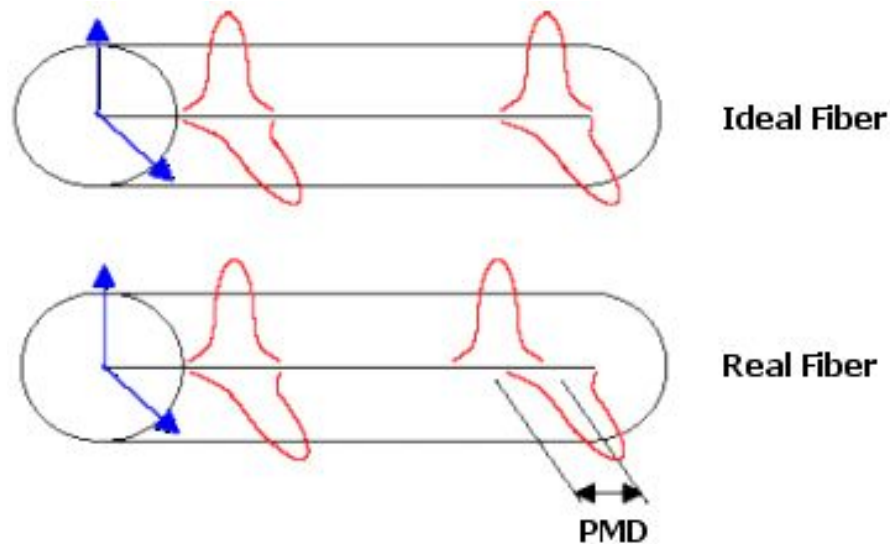
Φαινόμενα Πόλωσης (Polarization)

- Η προηγούμενη ανάλυση τρόπων έδειξε πως σε μία ιδανική (τελείως κυκλικής διατομής) μονότροπη οπτική ίνα υπάρχει μόνο ένας τρόπος διάδοσης (HE₁₁)
- Στην πράξη όμως οι οπτικές ίνες δεν είναι τέλεια κυκλικές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο HE₁₁ να χωρίζεται σε δύο τρόπους των οποίων το ηλεκτρικό πεδίο είναι πολωμένο σε διαφορετικό άξονα.
- Επίσης επειδή η διατομή μεταβάλλεται κατά μήκος της ίνας, οι άξονες αυτοί δεν είναι σταθεροί αλλά περιστρέφονται τυχαία!
- Οι δύο τρόποι διάδοσης έχουν ελαφρώς διαφορετικής σταθερά διάδοσης και επομένως έχουμε ένα είδος διασποράς δύο τρόπων.
- Σε κάθε περίπτωση μιλάμε για διασπορά τρόπου πόλωσης (polarization mode dispersion – PMD).



Φαινόμενα Πόλωσης (Polarization)

- Η διασπορά πόλωσης χαρακτηρίζεται από το συντελεστή differential group delay (DGD) D_p
- Η διεύρυνση του παλμού δίνεται από τη σχέση $\Delta\tau = D_p L^{1/2}$.





Μη γραμμικά φαινόμενα

- Η ίνα είναι ένα μη γραμμικό μέσο: η συμπεριφορά της εξαρτάται από την ισχύ του σήματος.
- Για ισχύ μερικών mW και ρυθμούς της τάξης των 2.5Gb/s τα μη γραμμικά φαινόμενα μπορούν να αγνοηθούν.
- Για ρυθμούς τις τάξης των 10Gb/s και υψηλότερη ισχύ η επίδραση των μη γραμμικών φαινομένων γίνεται πιο σημαντική.
- Στην περίπτωση WDM η ίνα μεταφέρει πολλά κανάλια και επομένως η συνολική ισχύς είναι ακόμα μεγαλύτερη.
- Υπάρχουν δύο είδη μη γραμμικών φαινομένων:
 - Αλληλεπίδραση οπτικών κυμάτων και φωνονίων (μοριακές δονήσεις) στο μέσο διάδοσης: Εξαναγκασμένη σκέδαση Raman και Brillouin.
 - Μη γραμμική εξάρτηση του δείκτη διάθλασης του μέσου από την οπτική ισχύ: Self Phase Modulation (SPM), Cross Phase Modulation (XPM) και μίξη τεσσάρων κυμάτων (FWM).



Μεγέθη που επηρεάζουν την ένταση των φαινομένων

- Υπάρχουν δύο μεγέθη που καθορίζουν την ένταση των μη γραμμικών φαινομένων.
 - Ενεργό μήκος διάδοσης L_e : Το μήκος το οποίο πολλαπλασιαζόμενο με την ισχύ κορυφής εισόδου μας δίνει το ολοκλήρωμα της ισχύος κατά μήκος της διάδοσης. Μεγάλο L_e σημαίνει πως το σήμα δεν εξασθενεί γρήγορα λόγω απωλειών άρα τα μη γραμμικά φαινόμενα θα είναι ενισχυμένα.
 - Ενεργή επιφάνεια A_e . Υπολογίζεται από το ολοκλήρωμα της πυκνότητας ισχύος (ένταση) του κύματος. Μετράει πόσο συγκεντρωμένη είναι η πυκνότητα ισχύος πάνω στην διατομή της ίνας. Μικρή A_e σημαίνει μεγάλη ένταση και επομένως ισχυρότερα μη γραμμικά φαινόμενα.

$$P_0 L_e = \int_0^z \underbrace{P_0}_{P(z)} e^{-az} dz \rightarrow L_e = \frac{1 - e^{-az}}{a}$$

$$A_e = \frac{\left(\int_S dx dy |F(x, y)|^2 \right)^2}{\int_S dx dy |F(x, y)|^4}$$



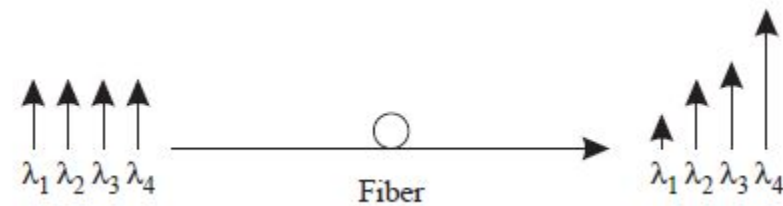
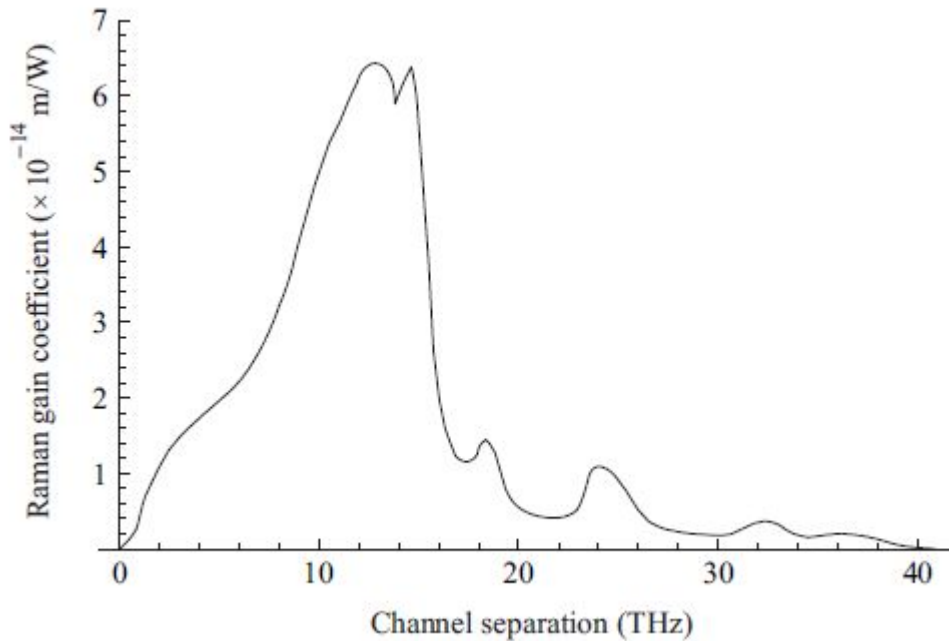
Εξαναγκασμένη Σκέδαση Brillouin

- Στην σκέδαση Brillouin:
 - Έχουμε οπισθοσκέδαση (το κύμα που σκεδάζεται κινείται προς τα πίσω).
 - Είναι φαινόμενο στενού εύρους ζώνης ($\leq 100\text{MHz}$). Επομένως ένα κανάλι δεν επηρεάζει άλλα κανάλια που απέχουν 50-100GHz.
 - Προκαλείται όμως παραμόρφωση στο ίδιο το κανάλι.
 - Πρέπει να προστατέψουμε τον πομπό από την οπισθοσκέδαση με χρήση απομονωτή (isolator).
 - Το φαινόμενο εξαρτάται από την τιμή του κέρδους συντελεστή Brillouin $g_B \cong 4 \times 10^{-11} \text{m/W}$.



Εξαναγκασμένη Σκέδαση Raman

- Πρόκειται για φαινόμενο ευρείας ζώνης (15THz)
- Μέσω της σκέδασης Raman μεταφέρεται ισχύς από τα κανάλια σε μικρότερο μήκος κύματος σε κανάλια με μεγαλύτερο μήκος κύματος.





Φαινόμενο Kerr

- Τα υπόλοιπα μη γραμμικά φαινόμενα πηγάζουν από το γεγονός ότι ο δείκτης $n(E)$ διάθλασης του μέσου εξαρτάται από την ένταση του πεδίου (Φαινόμενο Kerr)
- $n(E)=n_0+n_2I$ όπου n_0 είναι ο γραμμικός δείκτης διάθλασης και n_2 είναι ο μη γραμμικός συντελεστής
- Ο συντελεστής n_2 μετριέται σε $\mu\text{m}^2/\text{W}$ και στην περίπτωση μίας SiO_2 ίνας είναι ίσος με $2.2-3.4 \times 10^{-8} \mu\text{m}^2/\text{W}$.
- Η ένταση I σχετίζεται με το πεδίο E βάσης της σχέσης $I=\frac{1}{2}c\epsilon_0 n_0 |E|^2$
- Η μη γραμμικότητα θεωρείται στιγμιαία (χωρίς μνήμη)
- Μη γραμμικός δείκτης διάθλασης σημαίνει πως ένα σήμα υπόκειται σε διαφορά φάσης ανάλογη της έντασης του πεδίου.



Φαινόμενο Kerr

- Ας θεωρήσουμε την διάδοση του σήματος σε ένα πολύ μικρό κομμάτι ίνας μήκους Δz .
- Η κυματομορφή στο σημείο z θα είναι $x(t)$, ενώ στο σημείο $z+\Delta z$ θα είναι $y(t)=x(t)\exp(j\gamma |x(t)|^2\Delta z) \approx x(t)+j\gamma\Delta z |x(t)|^2x(t)$
- Εφόσον $y(t)=x(t)\exp(j\gamma |x(t)|^2\Delta z)$ συνεπάγεται ότι $|x(t)|=|y(t)|$.
- Η παραπάνω εξίσωση υποδεικνύει πως το φαινόμενο Kerr είναι μία μη-γραμμικότητα τρίτης τάξεως.
- Το γ είναι ο συντελεστής αυτοδιαμόρφωσης φάσης (SPM).



Άλλα μη γραμμικά φαινόμενα

- Τι συμβαίνει όταν δύο (ή περισσότερα) κανάλια σε διαφορετικά μήκη κύματος διαδίδονται μέσα σε μία οπτική ίνα;
- Τότε οι φάσεις του αρχίζουν να μπλέκουνε.
- Για απλοποίηση θεωρούμε πως δεν διαμορφώνουμε τα σήματα, δηλαδή $s_m(z,t) = x_m(z) \exp(j\beta_m z - j\omega_m t)$
- Σε ένα μικρό κομμάτι ίνας το σήμα μεταβάλλεται ως εξής:

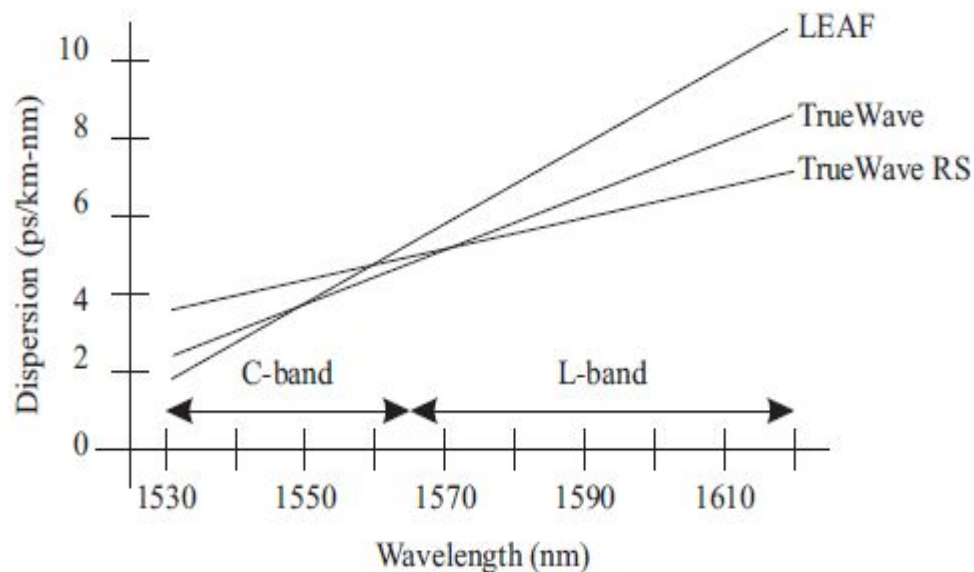
$$\Delta x(z) = j\gamma \Delta z \left| \sum_{m=1}^M s_m \right|^2 \sum_{m=1}^M s_m$$

- Στο παραπάνω άθροισμα περιέχονται όροι:
 - $|s_\nu|^2 s_\nu$ στην ίδια συχνότητα με τα σήματα s_m . Πρόκειται για όρους SPM
 - $|s_\nu|^2 s_\mu$ όπου $\nu \neq \mu$. Πρόκειται για όρους που βρίσκονται στην ίδια συχνότητα με το s_ν και αντιστοιχεί σε ετεροδιαφύλαξη φάσης.
 - $s_\nu^* s_\xi$ που βρίσκονται είτε στις ίδιες είτε σε διαφορετικές συχνότητες με τα s_m και αντιστοιχούν σε μίξη τεσσάρων κυμάτων (3 κύματα στις συχνότητες ω_μ, ω_ν και ω_ξ συνδυάζονται με ένα κύμα στην συχνότητα $\omega_\mu + \omega_\nu + \omega_\xi$) - four wave mixing.



Ύνες με χαμηλή μη γραμμικότητα

- Για να μειώσουμε την ένταση του FWM προσπαθούμε να μην έχουμε μηδενική διασπορά στα 1.55 μm .
- Πρόκειται για τις ίνες non-zero dispersion shifted fibers.
- Επίσης χρησιμοποιούμε ίνες με σχετικά μεγάλο A_e





Μοντελοποίηση

- Ενδιαφερόμαστε για την μοντελοποίηση της διάδοσης του σήματος μέσα σε μία οπτική ίνα
- Λύση της εξίσωσης διάδοσης

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = i\gamma |A|^2 A.$$

- $\beta_1 = d\beta/d\omega = 1/v_g$
- $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2 \rightarrow \text{GVD}$
- $\gamma \rightarrow \text{SPM}$



Γραμμική Περίπτωση

- $B(z, \omega) = F\{A(z, t)\}$

$$B(z, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(z, t) e^{-j\omega t} dt$$

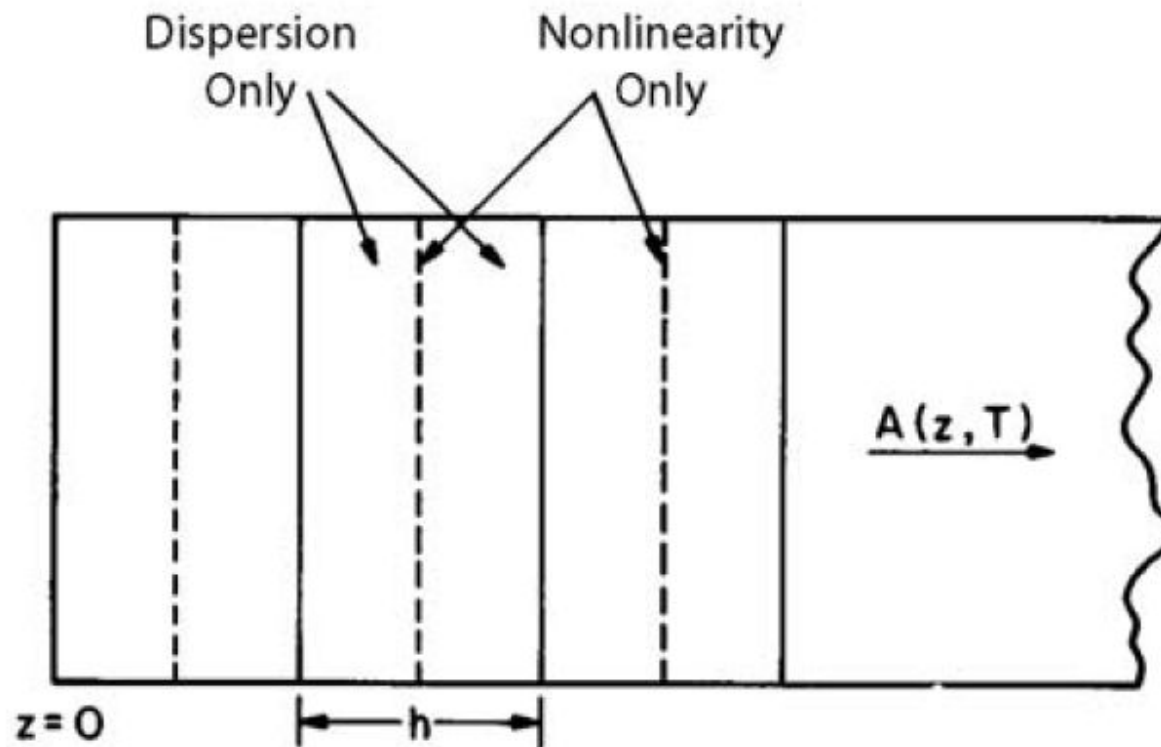
$$\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -j\omega$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} - j \left(\omega \beta_1 + \frac{1}{2} \beta_2 \omega^2 \right) B = 0$$

$$B(L, t) = B(L, 0) \exp \left(j\omega \beta_1 + \frac{j}{2} \beta_2 \omega^2 \right)$$



Μη γραμμική περίπτωση



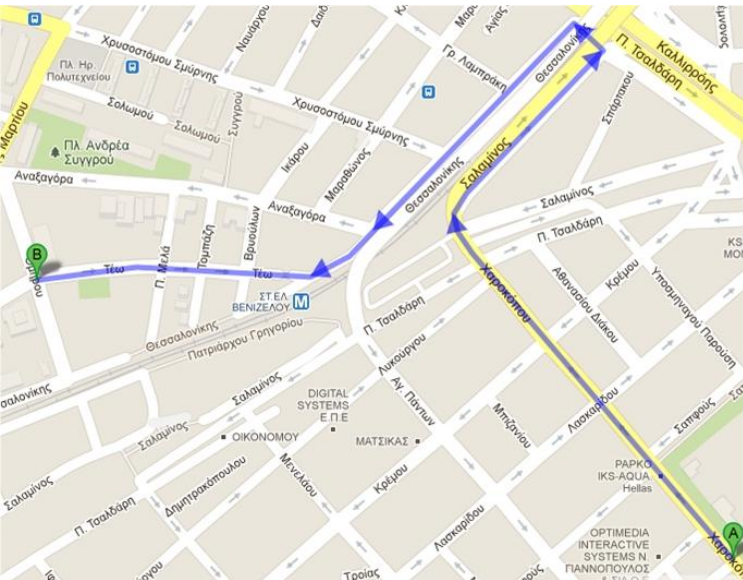


Εγκατάσταση Οπτικών Ινών

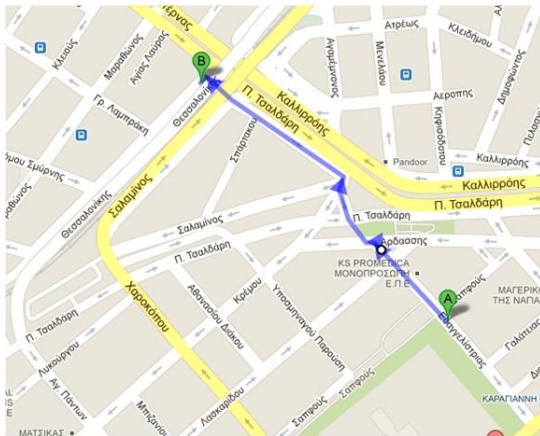
- Η εγκατάσταση των οπτικών καλωδίων είναι αρκετά χρονοβόρα διαδικασία
 - Σχεδιασμός (όδευση)
 - Προγραμματισμός και Π/Υ
 - Εγκρίσεις από Δήμο και ΕΕΤΤ
 - Δημόσια Έργα (σκάψιμο)
 - Τοποθέτηση καλωδίων (Φύσημα)
 - Τερματισμός καλωδίων
 - Δοκιμή Ζεύξης
 - Συντήρηση!



Σχεδιασμός (Οδευση)



- Ο πιο φθηνός τρόπος δεν είναι ο συντομότερος!
- Π.χ. ενώ η ευθεία απόσταση μεταξύ των κτιρίων του Χαροκοπείου είναι $\sim 700\mu$ το συνολικό μήκος ίνας είναι 1500μ .
 - Δεν μπορούμε εύκολα να περάσουμε από τις γραμμές του τρένου
 - Δεν μπορούμε να περάσουμε πάνω από γέφυρες
 - Αποφεύγουμε πεζόδρομους
 - Προτιμούμε να σκάψουμε σε άσφαλο
 - Οι δήμοι μπορεί να έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για αποκατάσταση του οδοστρώματος (φρεζάρισμα, κτλ).





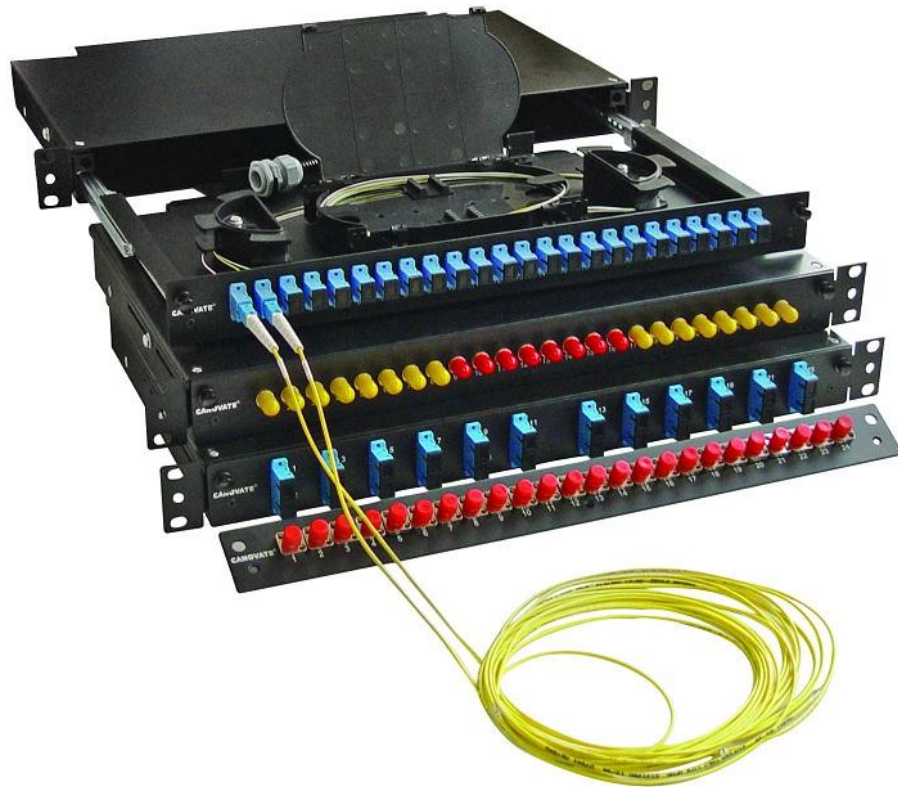
Σκάψιμο



- Σε αστική περιοχή ο ρυθμός σκαψίματος είναι περίπου 700μ την ημέρα
- Χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή διότι μπορεί να υπάρχουν και άλλα δίκτυα στην περιοχή: νερού, ηλεκτρικού και οπτικής ίνας.
- Συνήθως δεν υπάρχουν ακριβή σχέδια...



Τερματισμός



- Ο τερματισμός της ίνας γίνεται με τους οπτικούς κατανεμητές (optical patch panel)
- Στην ουσία «ξεχωρίζουμε» τις ίνες οι οποίες υπάρχουν μέσα στο καλώδιο οπτικής ίνας.
- Στο patch panel μπορούμε να συνδέσουμε μικρές ίνες (patch cords) και από εκεί και πέρα να συνδέσουμε το switch.



Οπτικοί Connectors

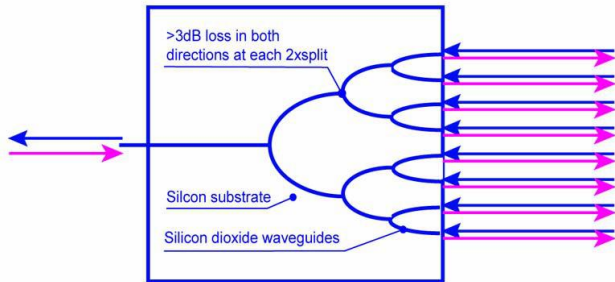




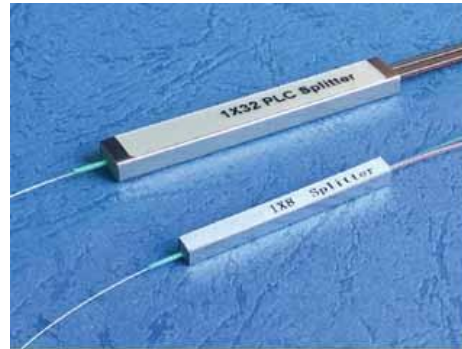
Δομικά οπτικά στοιχεία



Διαχωριστές (Splitters)



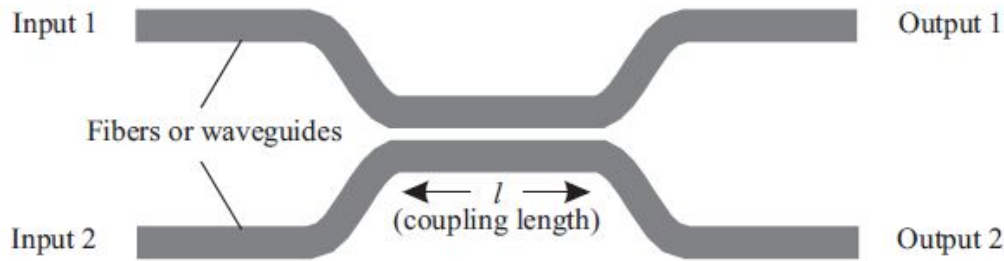
Schematic drawing for PLC splitter



- Στο εμπόριο υπάρχουν μεγάλοι ολοκληρωμένοι splitters που διαχωρίζουν την ισχύ σε $N=2^v$ εξόδους ($2 \leq N \leq 128$)
- Πρόκειται για παθητικό στοιχείο! Δεν απαιτεί ηλεκτρική ισχύ.
- Αποτελείται από έναν μεγάλο αριθμό διαχωριστών τύπου Υ
- Σχετικά φθηνό οπτικό στοιχείο.
- Χαρακτηρίζονται από:
 - Πλεονάζουσες απώλειες εισαγωγής ($\leq 2\text{dB}$)
 - Απώλειες λόγω πόλωσης ($\leq 0.5\text{dB}$)
 - Ομοιομορφία ($\leq 2\text{dB}$)
 - Εύρος μηκών κύματος



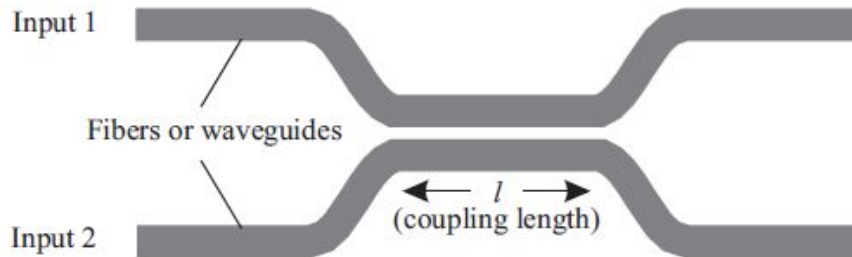
Συζεύκτες (Couplers)



- Χρησιμοποιείται για να μεταφέρει ένα μέρος της ισχύος από τις θύρες εισόδου στις θύρες εξόδου.
 - Οι συζεύκτες μπορούν να σχεδιαστούν ώστε να έχουν και εξάρτηση από το μήκος κύματος
-
- Για παράδειγμα μπορούν να συνδυάσουν δύο σήματα, ένα στα 1550nm και ένα στα 1310nm τα οποία εισάγονται στις δύο θύρες εισόδου
 - Τα σήματα αυτά μπορούν να παρουσιαστούν σε μία έξοδο του συζεύκτη μαζί και να εισέρθουν σε μία οπτική ίνα (πολυπλεξία).
 - Χρησιμοποιούνται (όπως θα δούμε) για την κατασκευή συμβολομέτρων.
 - Επίσης χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση “tap” όπου ένα μικρό μέρος της ισχύος που βρίσκεται σε μία θύρα εισόδου οδηγείται στην δεύτερη θύρα εξόδου ενώ το υπόλοιπο παρουσιάζεται στην πρώτη.
 - Επειδή ο συζεύκτης δεν είναι ιδανικός μπορεί να έχουμε απώλειες εισαγωγής (insertion loss) και απώλειες πόλωσης (polarization dependent loss).



Περιγραφή της λειτουργία του συζεύκτη



Output 1

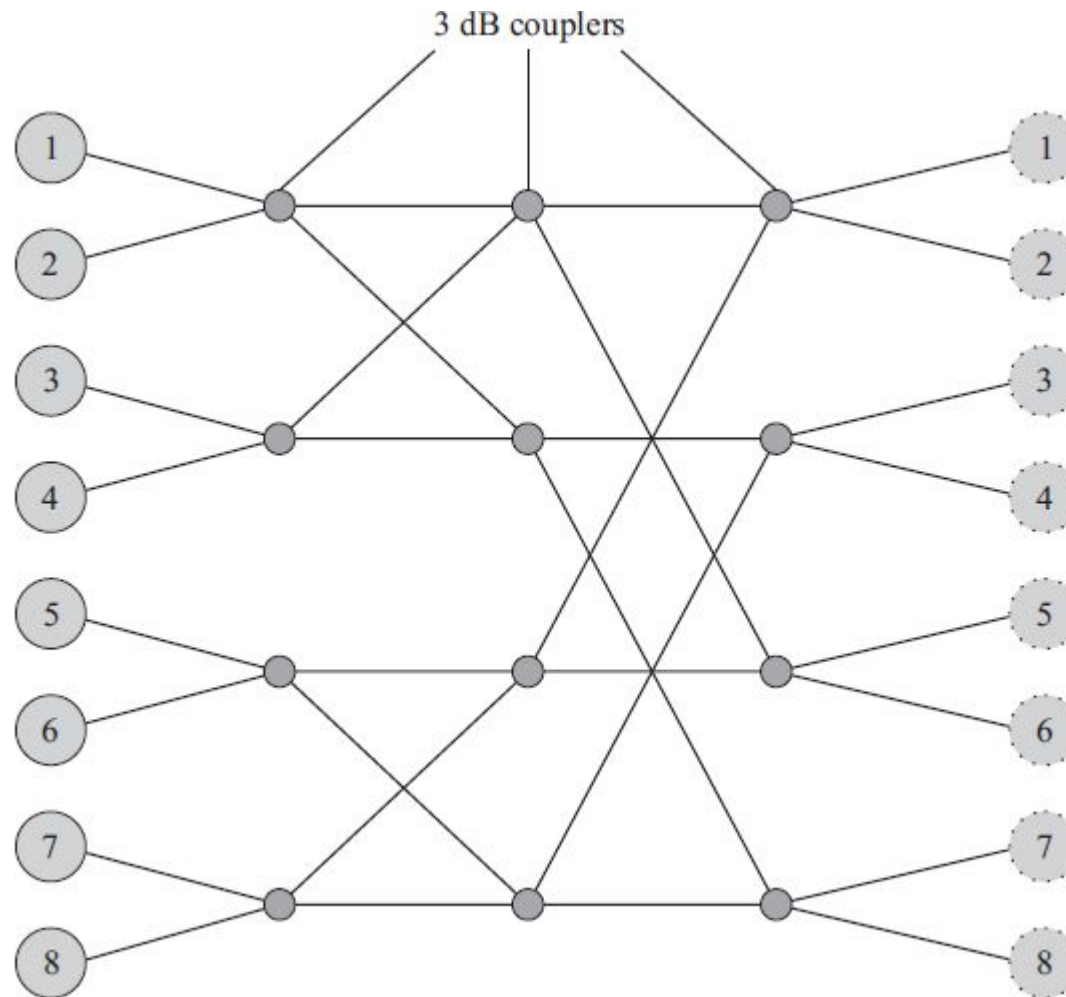
$$\begin{bmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{bmatrix} = e^{-j\beta l} \begin{bmatrix} \cos(\kappa l) & j \sin(\kappa l) \\ j \sin(\kappa l) & \cos(\kappa l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{bmatrix}$$

Output 2

- Κάθε κυματοδηγός (απουσία του άλλου) υποστηρίζει έναν τρόπο διάδοσης με σταθερά διάδοσης β
- Παρουσία του άλλου κυματοδηγού έχουμε σύζευξη (coupling) τρόπων.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος του πεδίου να μεταφέρεται από τον ένα κυματοδηγό στον άλλο.
- Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή σύζευξης κ . Όσο πιο κοντά είναι κυματοδηγοί τόσο μεγαλύτερο είναι το κ και τόσο πιο ισχυρή είναι η σύζευξη.
- Ανάλογα με το μήκος l μπορεί να μεταφέρεται:
 - όλη η ισχύς από την θύρα εισόδου «1» στη θύρα εξόδου «2»
 - μηδενική ισχύς από την θύρα εισόδου «1» στη θύρα εξόδου «2»
 - μισή ισχύς από την θύρα «1» στη θύρα «2» (η άλλη μισή εμφανίζεται στην «1»)

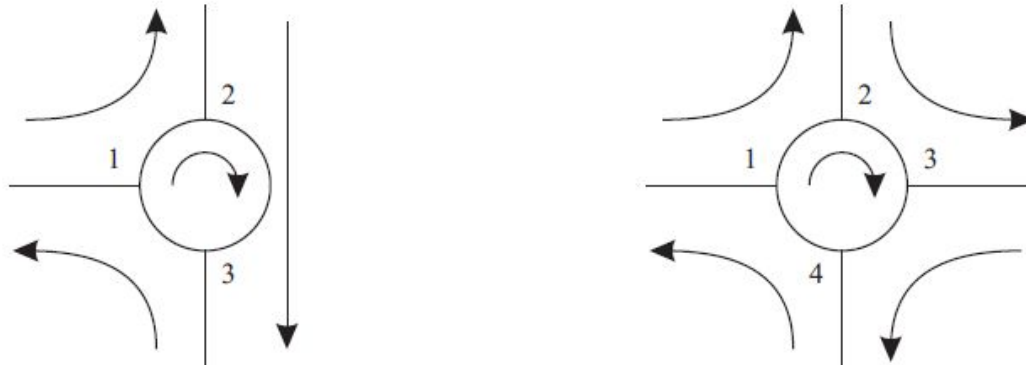


Μεγαλύτεροι Συζεύκτες





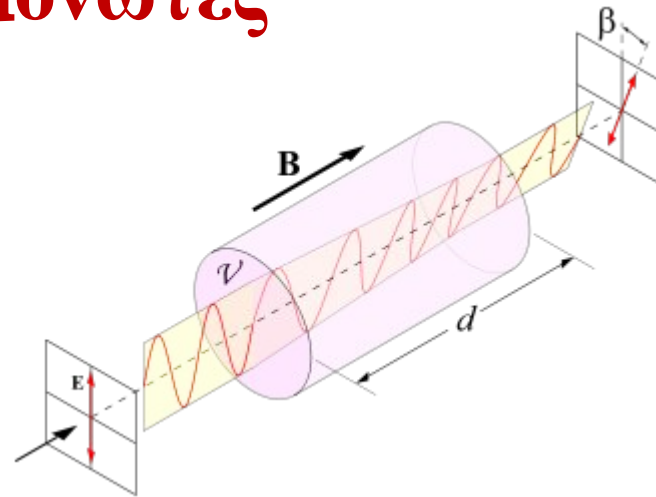
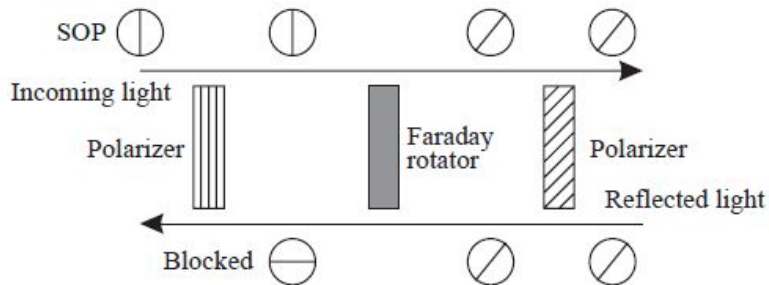
Κυκλοφορητές (Circulators)



- Επιτρέπουν την διάδοση προς μία μονάχα διεύθυνση.
- Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε τις ανακλάσεις.
- Βασίζονται σε απομονωτές (isolators)



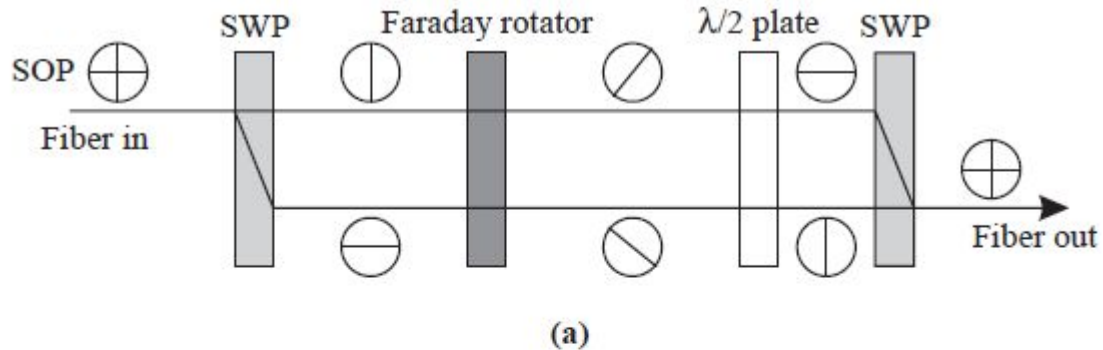
Απομονωτές



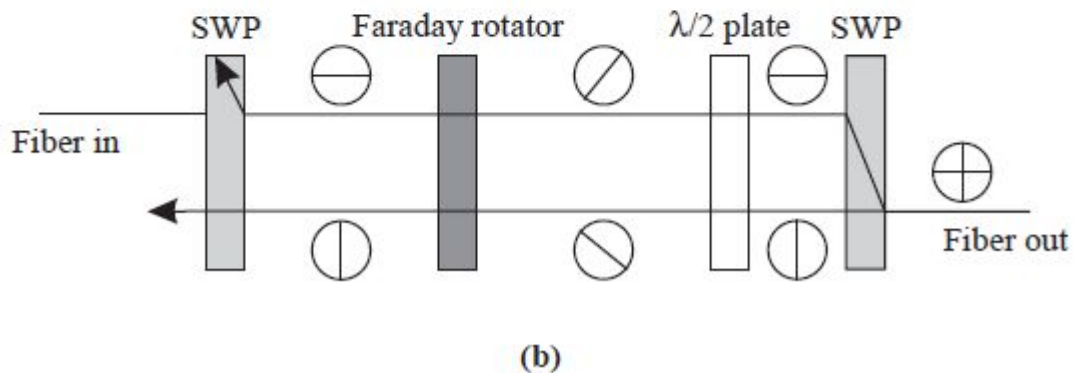
- Οι απομονωτές βασίζονται στους στροφείς Faraday.
- Οι στροφείς Faraday περιστρέφουν τον επίπεδο πόλωσης του φωτός κατά μία γωνία θ .
- Η γωνία θ όμως είναι ανεξάρτητη από το αν το φως εισέρχεται στη διάταξη από αριστερά προς δεξιά ή από δεξιά προς τα αριστερά.
- Με αυτό τον τρόπο το φως που εισέρχεται στην δεξιά θύρα του απομονωτή περνάει από τον πρώτο ελεγκτή πόλωσης.
- Στη συνέχεια στρέφεται κατά $\pi/4$ και περνάει από τον δεύτερο ελεγκτή πόλωσης.
- Το φως που ανακλάται από την έξοδο περνάει πάλι από τον δεύτερο ελεγκτή και στη συνέχεια ξαναπερνάει από τον στροφέα Faraday.
- Η πόλωση του έχει τώρα γυρίσει σε γωνία $\pi/2$ και επομένως δεν μπορεί να περάσει από τον πρώτο ελεγκτή πόλωσης.
- Υπάρχει τρόπος να σχεδιαστεί ο απομονωτής ώστε να λειτουργεί με αυθαίρετη πόλωση εισόδου.



Απομονωτής ανεξάρτητος από πόλωση (*)



Διάδοση από
τα αριστερά
στα δεξιά

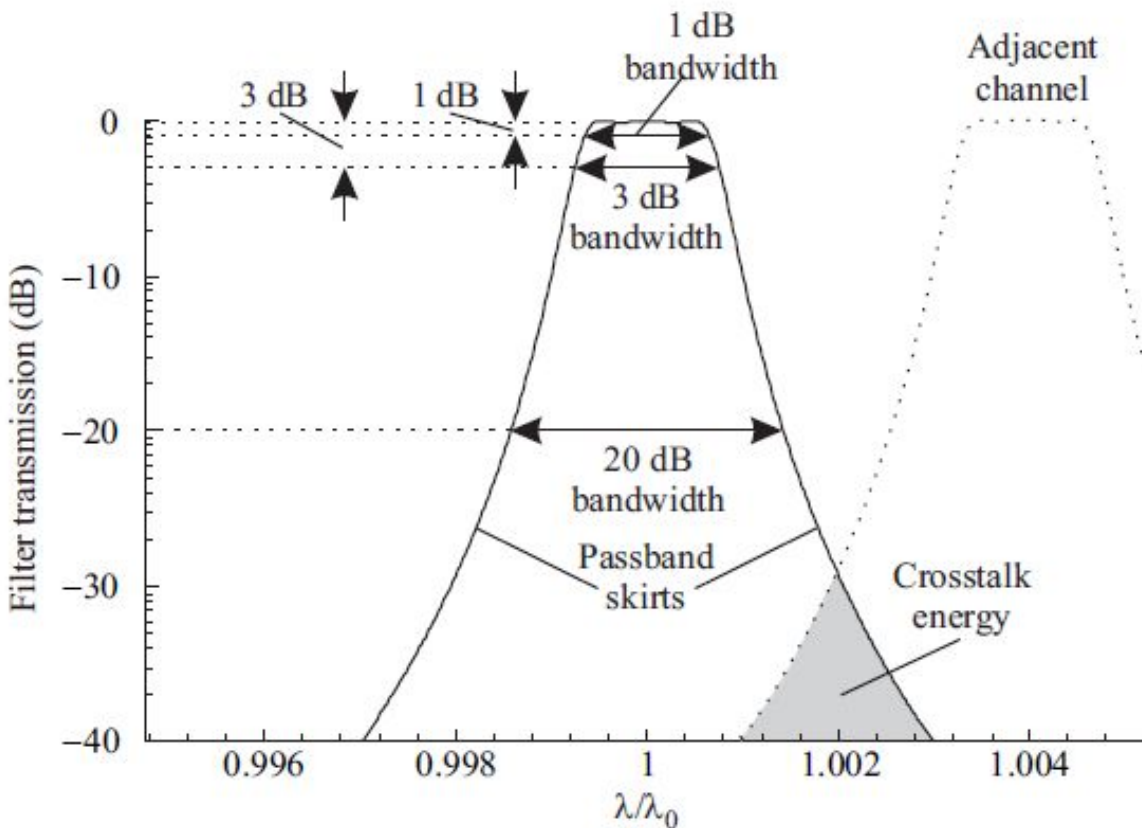


Διάδοση από
τα δεξιά στα
αριστερά.

- SWP=Spatial walk off polarizer. Χωρίζει το φως σε δύο ορθογώνιες γραμμικές πολώσεις.



Οπτικά Φίλτρα



- Απαιτήσεις:
 - Μικρές απώλειες εισαγωγής
 - Ανεξαρτησία από πόλωση
 - Ανεξαρτησία από θερμοκρασία
 - Ομαλή (flat) απόκριση γύρω από την κεντρική συχνότητα
 - Μικρό επίπεδο διαφωνίας (crosstalk)
 - Κόστος!!!



Χαρακτηριστικά Τεχνολογιών

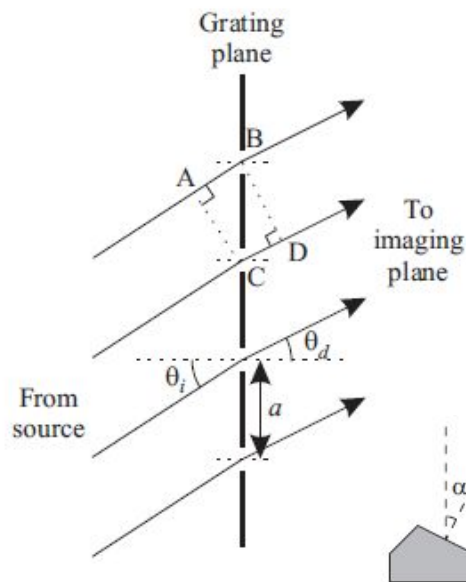
Filter Property	Fiber Bragg Grating	TFMF	AWG	Stimax Grating
1 dB BW (nm)	0.3	0.4	0.22	0.1
Isolation (dB)	25	25	25	30
Loss (dB)	0.2	7	5.5	6
PDL (dB)	0	0.2	0.5	0.1
Temp. coeff. (nm/°C)	0.01	0.0005	0.01	0.01

- AWG = Arrayed waveguide grating
- TFMF= Thin film multi-cavity filter



Τεχνολογίες Φίλτρων: Φράγματα

- Με τον όρο φράγμα εννοούμε οποιαδήποτε δομή επιτρέπει την υπέρθεση κυμάτων που έχουν προκύψει από το ίδιο αρχικό κύμα με κάποια διαφορά φάσης.
- Παρακάτω βλέπουμε φράγματα που αποτελούνται από σχισμές.
- Κάθε σχισμή δρα ως μία δευτερεύουσα πηγή και τα κύματα που γεννιούνται μπορεί να συμβάλουν καταστροφικά ή προσθετικά.



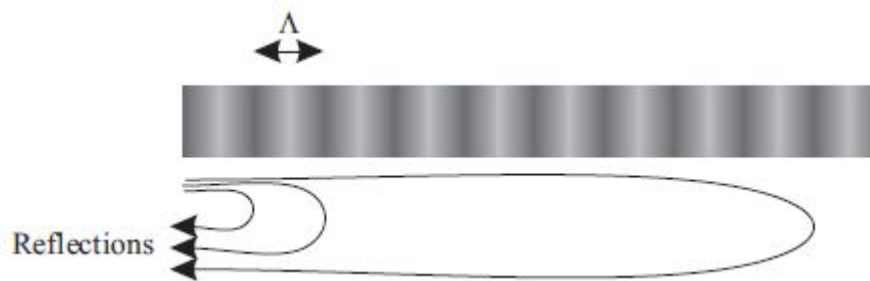
- Μπορεί κανείς να δείξει ότι αν $a(\sin\theta_i - \sin\theta_d) = m\lambda$ τότε τα δευτερεύοντα κύματα συμβάλλουν προσθετικά (με διαφορά φάσης πολλαπλάσια του 2π).
- Το m είναι ένας ακέραιος που ονομάζεται η τάξη του φράγματος.
- Για $m > 0$ βλέπουμε πως η γωνία θ_d εξαρτάται από το μήκος κύματος.
- Ωστόσο για $m = 0$ αυτό δεν συμβαίνει (έχουμε $\theta_i = \theta_d$) και για το λόγο αυτό κατασκευάζουμε κατάλληλα το φράγμα με την τεχνική του blazing.





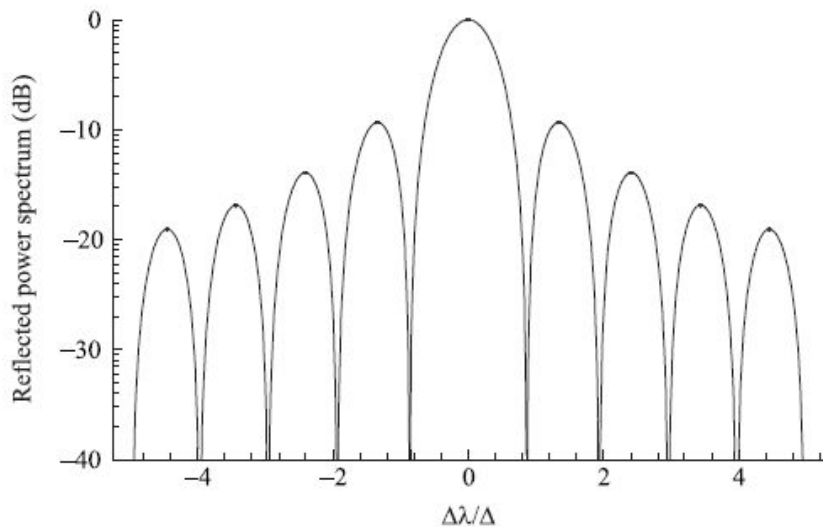
Φράγματα Bragg

- Χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά στα οπτικά συστήματα.
- Ας υποθέσουμε πως σε ένα κυματοδηγό έχουμε «γράψει» ένα φράγμα με περίοδο Λ .
- Το φράγμα προκαλεί σύζευξη μεταξύ των τρόπων του κυματοδηγού
- Η σύζευξη μεγιστοποιείται όταν ισχύει η συνθήκη Bragg, $2\pi/\Lambda = |\beta_0 - \beta_1|$ όπου β_0 και β_1 είναι οι σταθερές διάδοσης των τρόπων.
- Σε έναν κυματοδηγό, για κάθε τρόπο με σταθερά διάδοσης $\beta_0 = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ υπάρχει και ένας τρόπος με σταθερά διάδοσης $-\beta_0$ που διαδίδεται προς τα πίσω.
- Στην περίπτωση αυτή η συνθήκη Bragg γράφεται: $\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda$
- Το μήκος κύματος αυτό ονομάζεται μήκος κύματος Bragg



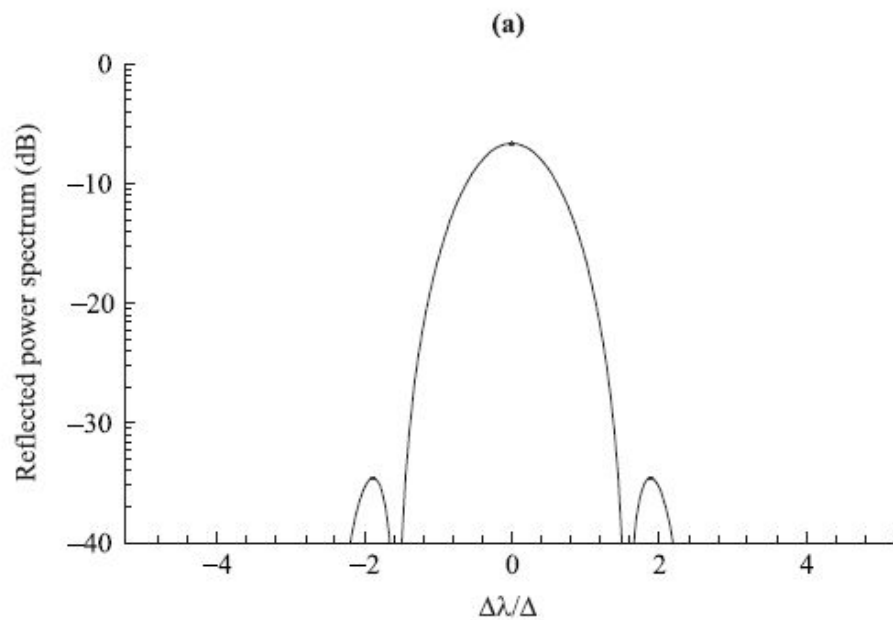


Φράγματα Bragg: Συνάρτηση Μεταφοράς



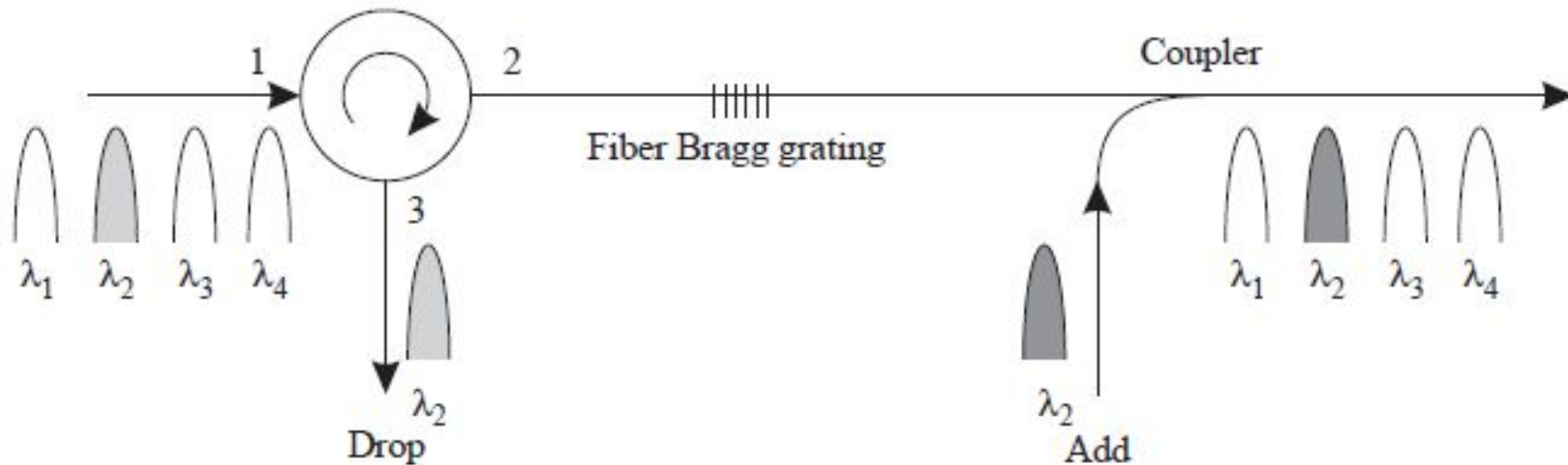
Κανονικό
Φράγμα

Apodized
Φράγμα





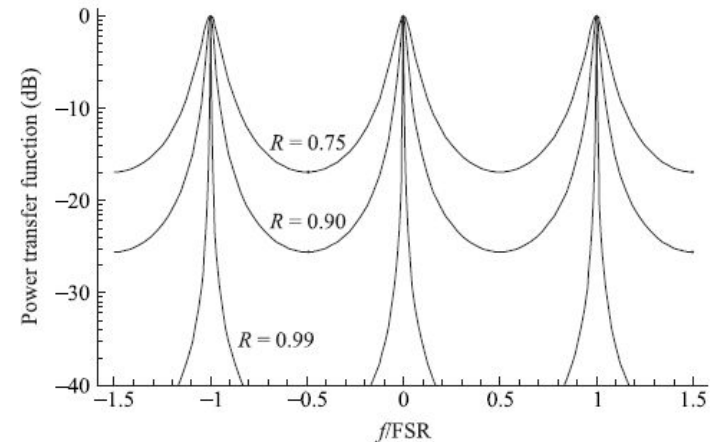
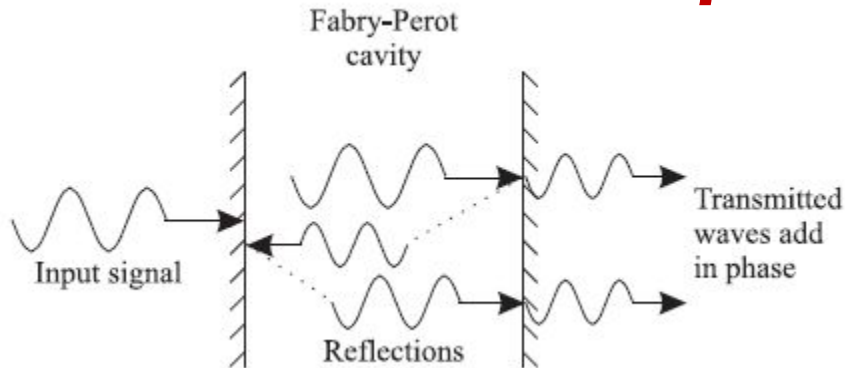
Φράγματα Bragg σε οπτικές ίνες



- Μπορούμε να γράψουμε φράγματα Bragg σε οπτικές ίνες.
- Τα φίλτρα αυτά έχουν χαμηλές απώλειες (0.1dB) χαμηλή διαφωνία (-40dB), καλή θερμοκή σταθερότητα (με ειδικές τεχνικές πετυχαίνουμε $0.07 \times 10^{-2} \text{nm}/^\circ\text{C}$)
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για add/drop multiplexers όπως δείχνει και η παραπάνω εικόνα.



Φίλτρα Fabry-Perot



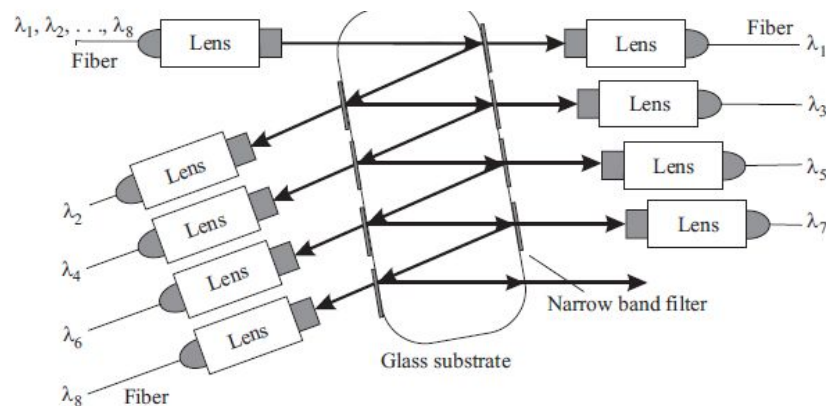
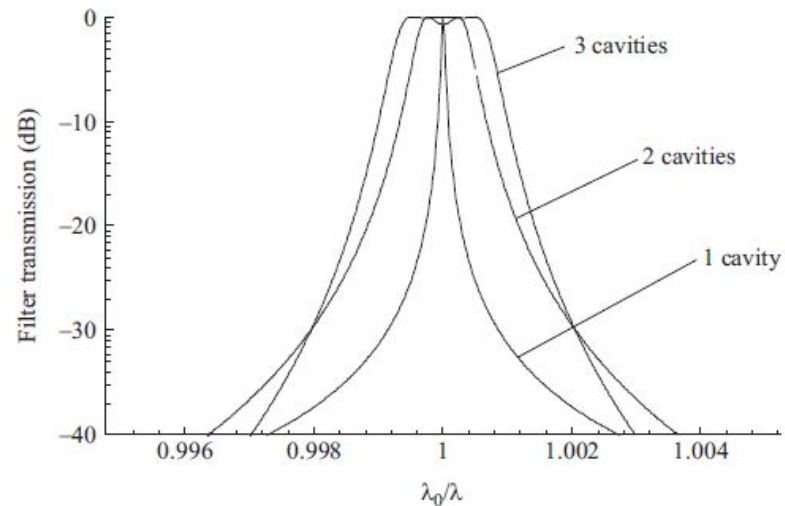
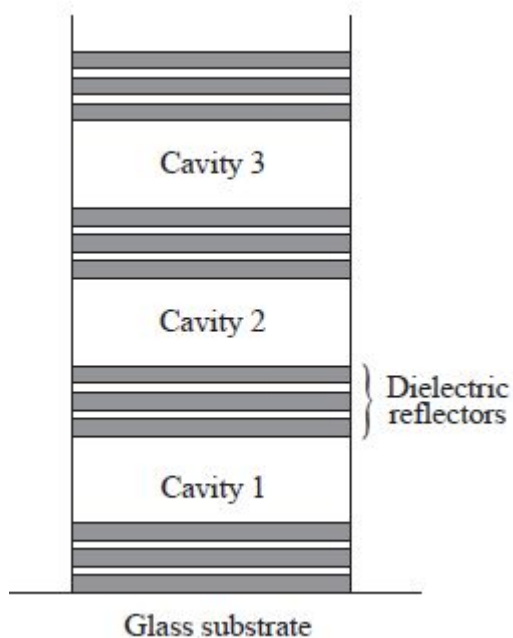
- Αποτελούνται από δύο υψηλής ανακλαστικότητας R κάτοπτρα.
- Εντός της κοιλότητας Fabry Perot συμβάλλουν κύματα που προέρχονται από διαδοχικές ανακλάσεις στα κάτοπτρα.
- Η απόκριση του φίλτρου δίνεται από την εξίσωση:

$$T_{FP}(f) = \frac{\left[1 - \frac{A}{1-R}\right]^2}{1 + \left[\frac{2\sqrt{R}}{1-R} \sin(2\pi f\tau)\right]^2}$$

- Στην παραπάνω σχέση A είναι οι απώλειες του κάθε καθρέφτη, R η ανακλαστικότητα τους, $\tau = nl/c$ όπου n είναι ο δείκτης διάθλασης της κοιλότητας και l το μήκος της.
- Η συνάρτηση μεταφοράς είναι περιοδική με περίοδο $FSR = 1/2\tau$
- Τα αρχικά FSR σημαίνουν free spectral range.

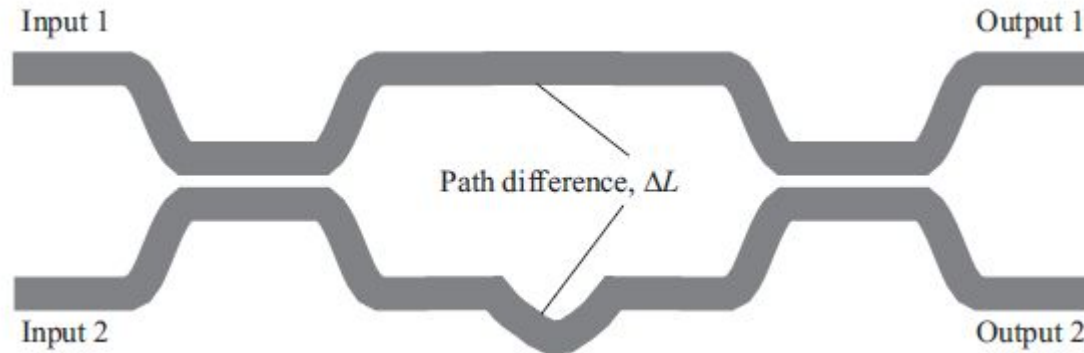


Φίλτρα διηλεκτρικών κοιλοτήτων





Φίλτρο Mach-Zehnder (Συμβολόμετρο)



$$\begin{bmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{bmatrix} = e^{-j\beta(2l+L)} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & j/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{j\beta\Delta L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & j/\sqrt{2} \\ j/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{bmatrix}$$

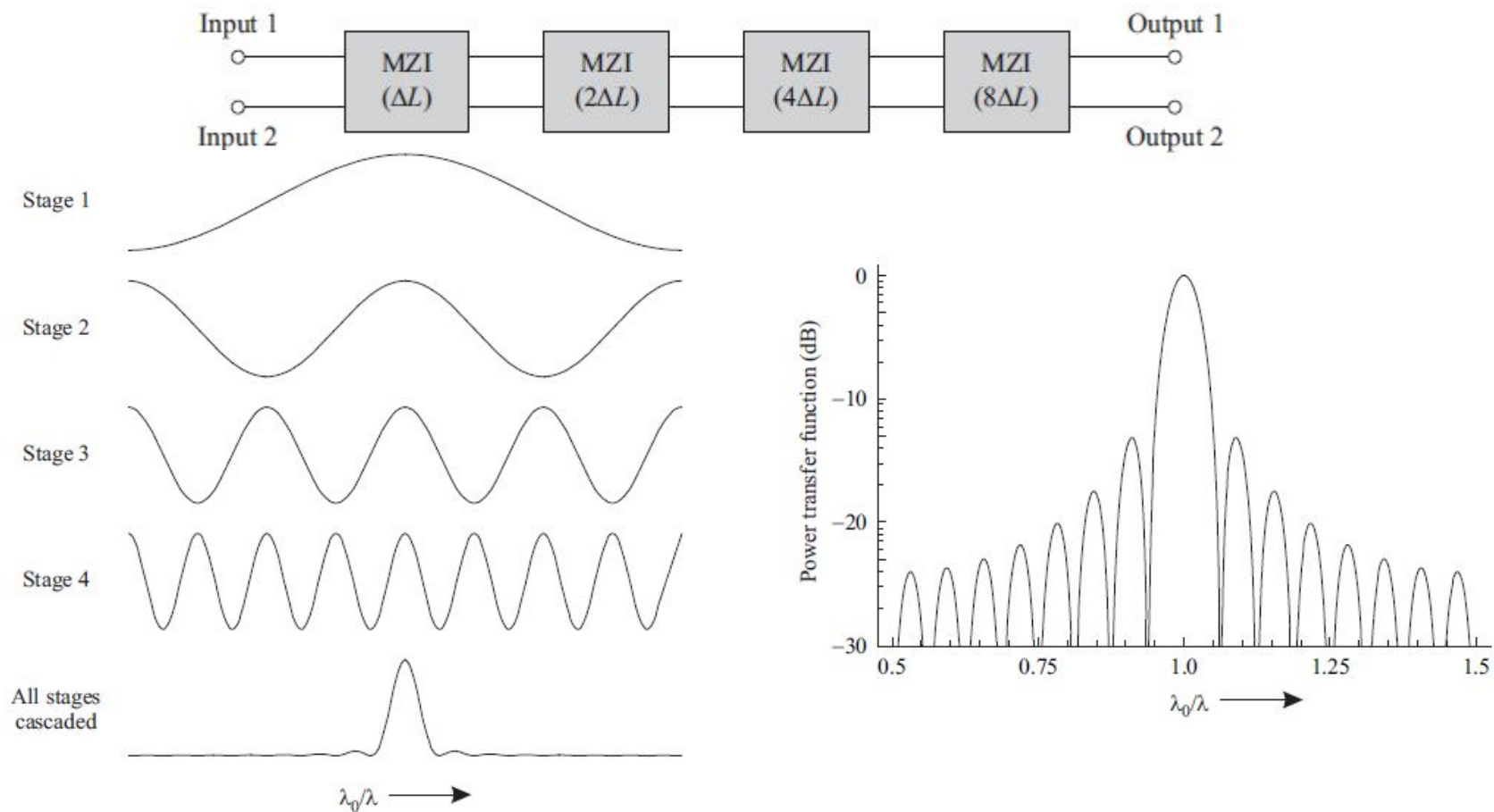
$1^{\text{ος}}$ Διαφορά
 συζεύκτης Δρόμου

- Στην περίπτωση που έχουμε μία είσοδο:

$$\begin{bmatrix} T_1(f) \\ T_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_{o1}(f) / E_{i1}(f)|^2 \\ |E_{o2}(f) / E_{i1}(f)|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2(\beta\Delta L / 2) \\ \cos^2(\beta\Delta L / 2) \end{bmatrix}$$

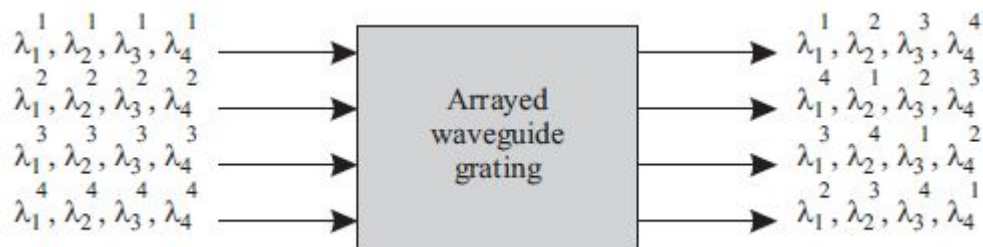
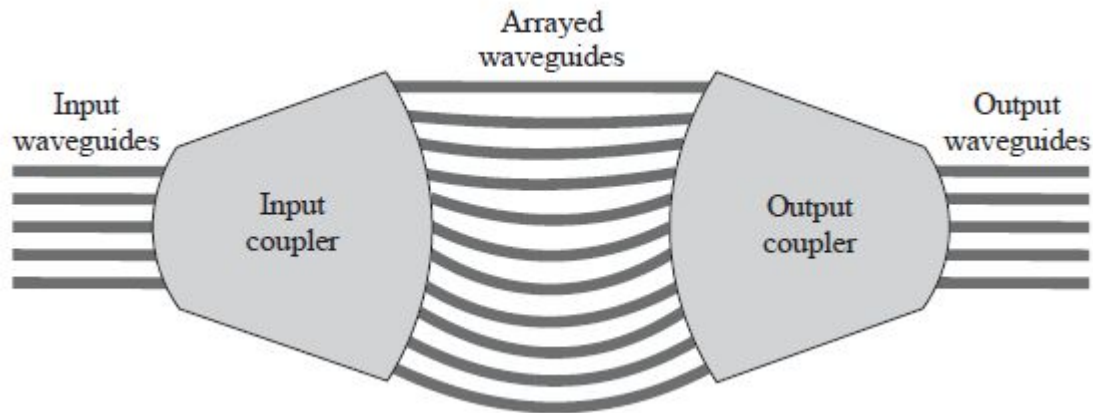


Mach-Zehnder πολλαπλών σταδίων





Arrayed Waveguide Grating (AWG)





Αποπολυπλέκτες με πολλά μήκη κύματος

- Για την υλοποίηση μεγαλύτερων αποπολυπλεκτών μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε AWG.
- Εμπορικά διαθέσιμα είναι AWG 40×40 και ίσως και λίγο μεγαλύτεροι.
- Εναλλακτικά μπορούμε να συνδυάσουμε μικρότερους αποπολυπλέκτες.
 - multistage banding (αποπολυπλέκτες πολλαπλών σταδίων, κάθε στάδιο αποπολυπλέκει μία ομάδα γειτονικών μηκών κύματος).
 - multistage interleaving (αποπολυπλέκτες πολλαπλών σταδίων, κάθε στάδιο αποπολυπλέκει μία ομάδα μηκών κύματος που απέχει μεγαλύτερη απόσταση).



Οπτικοί Ενισχυτές

- Οι οπτικές απώλειες (ίνας + δομικών στοιχείων) μειώνουν την ισχύ του σήματος
- Αν οι απώλειες είναι πολύ μεγάλες τότε ο δέκτης δεν μπορεί να ξεχωρίσει το σήμα από το θόρυβο.
- Στα παλιότερα συστήματα, το πρόβλημα λυνότανε τοποθετώντας αναγεννητές ενδιάμεσα του πομπού και του δέκτη.
- Ο αναγεννητής μετατρέπει το οπτικό σήμα σε ηλεκτρονικό και το ξαναεκπέμπει σε οπτική μορφή αναγεννημένο.
- Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το σήμα σε καθαρά οπτική μορφή. Επομένως ένας ενισχυτής:
 - μπορεί να ενισχύσει πολλά κανάλια WDM
 - μπορεί να ενισχύσει σήματα ανεξάρτητα του ρυθμού
 - μπορεί να ενισχύσει ένα σήμα ανεξαρτήτως σχήματος διαμόρφωσης
- Φυσικά οι οπτικοί ενισχυτές δεν είναι ιδανικοί:
 - εισάγουν θόρυβο
 - δεν έχουν ομαλή φασματική απόκριση
 - το κέρδος εξαρτάται και από την ισχύ εισόδου



Αλληλεπίδραση Ύλης-Φωτός

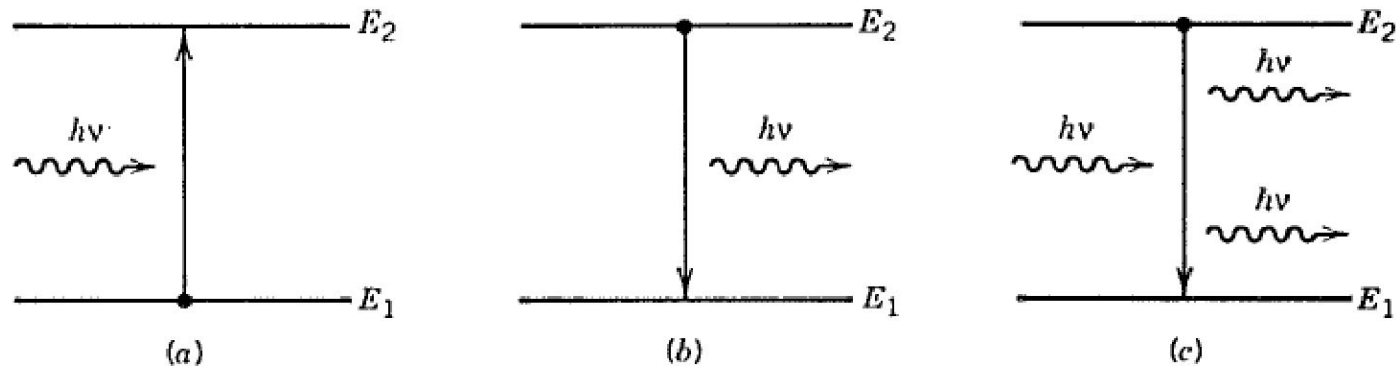


Figure 3.1: Three fundamental processes occurring between the two energy states of an atom: (a) absorption; (b) spontaneous emission; and (c) stimulated emission.

- Αυθόρμητη εκπομπή (*spontaneous emission*): Ένα φωτόνιο εκπέμπεται (τυχαία) εξαιτίας της αποδιέγερσης ενός ηλεκτρονίου από μία κατάσταση υψηλής ενέργειας (E_2) σε μία κατάσταση χαμηλής ενέργειας (E_1).
- Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής (*stimulated emission*) η μετάβαση αυτή υποβοηθείται από ένα αρχικό φωτόνιο. Το φωτόνιο που γεννάται είναι όμοιο με το αρχικό.
- Σε κάθε περίπτωση η ενέργεια του φωτονίου είναι $hf = E_2 - E_1$



Εξαναγκασμένη και Αυθόρμητη Εκπομπή

- Ρυθμοί απορρόφησης και εκπομπής
 - Αυθόρμητη εκπομπή: $R_{\text{spont}} = AN_2$ όπου N_2 η πυκνότητα των φορέων στη στάθμη E_2 .
 - Εξαναγκασμένη εκπομπή: $R_{\text{stim}} = B\rho N_2$ όπου ρ είναι η πυκνότητα φωτονίων.
 - Απορρόφηση: $R_{\text{abs}} = C\rho N_1$ όπου N_1 η πυκνότητα των φορέων στη στάθμη E_1 .
- Θεωρούμε πως βρισκόμαστε σε κατάσταση θερμοικής ισορροπίας, οπότε
 - $dN_1/dt = dN_2/dt = 0$.
 - $AN_2 + B\rho N_2 = C\rho N_1$
 - $N_2/N_1 = \exp(-hf/k_B T)$.
- Από τις παραπάνω εξισώσεις συνάγουμε ότι:
 $\rho = (A/B)(C/B \exp(-hf/k_B T) - 1)^{-1}$ το οποίο πρέπει να συμφωνεί με την εξίσωση του Planck $\rho = (8\pi hf^3)/c^3 (\exp(-hf/k_B T) - 1)^{-1}$.
- Αυτό συμβαίνει όταν:
 - $A = (8\pi hf^3)/c^3 B$.
 - $C = B$
 - Οι σχέσεις αυτές είναι γνωστές ως σχέσεις Einstein.



Εξαναγκασμένη και Αυθόρμητη Εκπομπή

- Σε κατάσταση θερμοτικής ισορροπίας $R_{\text{stim}}/R_{\text{spont}} = (\exp(-hf/k_B T)-1)^{-1}$. Για τιμές του f στο υπέρυθρο ή το ορατό φάσμα, $R_{\text{stim}}/R_{\text{spont}} \ll 1$, οπότε η αυθόρμητη εκπομπή υπερισχύει.
- Πότε η εξαναγκασμένη εκπομπή γίνεται σημαντική;
- Καταρχήν θα πρέπει να υπερνικήσει την απορρόφηση, δηλαδή $R_{\text{stim}} > R_{\text{abs}}$.
- Αυτό μεταφράζεται σε $N_2 > N_1$ κάτι που σίγουρα δεν ισχύει σε κατάσταση θερμοτικής ισορροπίας.
- Η παραπάνω συνθήκη ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών (population inversion).
- Είναι η βασική προϋπόθεση για να έχουμε οπτική ενίσχυση και δράση LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).
- Σε ατομικά συστήματα (π.χ. αέρια) επιτυγχάνεται με οπτικό τρόπο (μέσω άλλων μεταβάσεων).
- Στην περίπτωση των ημιαγωγών, πάλι έχουμε εξαναγκασμένη και αυθόρμητη εκπομπή αλλά η περιγραφή είναι ελαφρώς διαφορετική. Τα βασικά όμως συμπεράσματα ισχύουν.



Εξαναγκασμένη και Αυθόρμητη Εκπομπή

- Στην περίπτωση της εξαναγκασμένης εκπομπής όλα τα φωτόνια που παράγονται έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά και επομένως την ίδια φάση.
- Πρόκειται για σύμφωνο φως. Το πεδίο χαρακτηρίζεται από το πλάτος του και την φάση του.
- Στη περίπτωση της αυθόρμητης εκπομπής έχουμε ασύμφωνο φως.

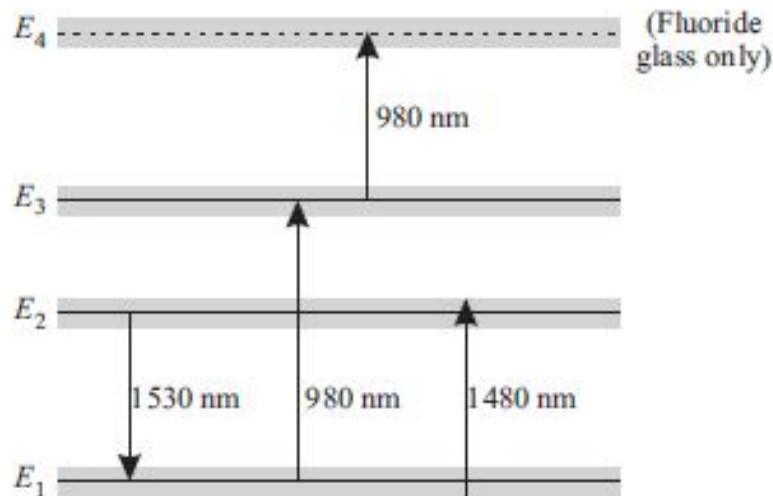


Οι οπτικοί ενισχυτές ίνας Ερβίου

- EDFA = Erbium Doped Fiber Amplifier, ενισχυτής ίνας ντοπαρισμένης με ιόντα Ερβίου.
- Δηλαδή πρόκειται για μία οπτική ίνα στην οποία έχουμε τοποθετήσει ιόντα ρβίου (Er^{3+}).
- Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνουμε μία πολύ καλή συμφωνία: χρησιμοποιούμε ένα laser (pump) στα 980nm ή στα 1480nm για να προκαλέσουμε αναστροφή πληθυσμών.
- Μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής μπορούμε να ενισχύσουμε ένα σήμα στα 1550nm.
- Ο EDFA έχει κυριαρχήσει στα οπτικά συστήματα εξαιτίας:
 - της διαθεσιμότητας pump lasers στις συχνότητες αυτές με υψηλή ισχύ.
 - πρόκειται για μία διάταξη με οπτική ίνα → ανεξαρτησία από πόλωση και εύκολη σύζευξη με ίνα.
 - δεν απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό, είναι σχετικά απλή διάταξη.
 - δεν εισάγει διαφωνία όταν ενισχύει κανάλια WDM.



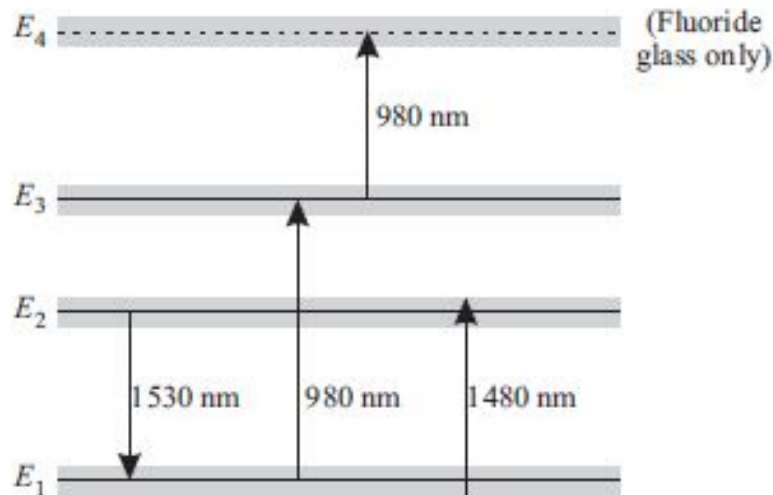
Ενεργειακές Καταστάσεις του Ερβίου



- Όταν το ιόν του Ερβίου δεν αλληλεπιδρά με άλλα άτομα τότε υπάρχουν τέσσερις διακριτές στάθμες που μας ενδιαφέρουν (E_1, \dots, E_4).
- Παρουσία του γυαλιού (SiO_2), οι ενεργειακές στάθμες διασπώνται σε πολλές επιμέρους στάθμες γύρω από τις αρχικές.
- Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διάσπαση Stark.
- Επειδή το γυαλί είναι άμορφο, οι στάθμες αυτές διαφέρουν από ιόν σε ιόν και επομένως παρουσιάζονται σαν συνεχείς ενεργειακές ζώνες.
- Στην περίπτωση του EDFA μας ενδιαφέρει πολύ η μετάβαση από το E_2 στο E_1 που παράγει φωτόνια στα 1525-1570nm που συμπίπτει με την περιοχή όπου οι απώλειες των ινών είναι πολύ μικρές.



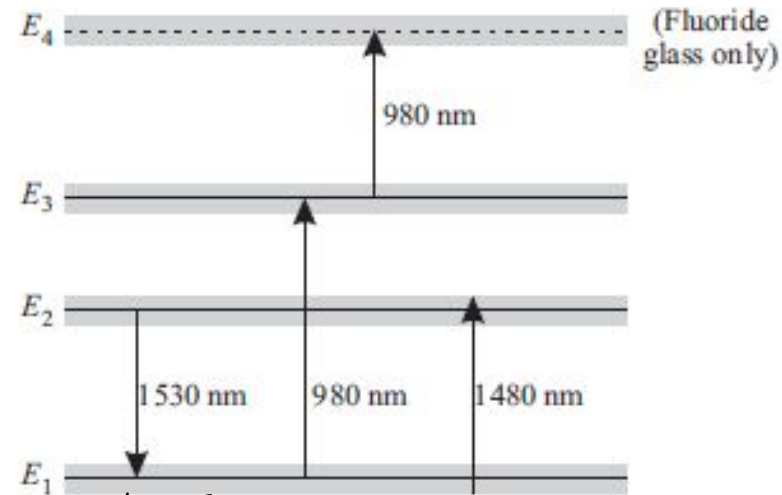
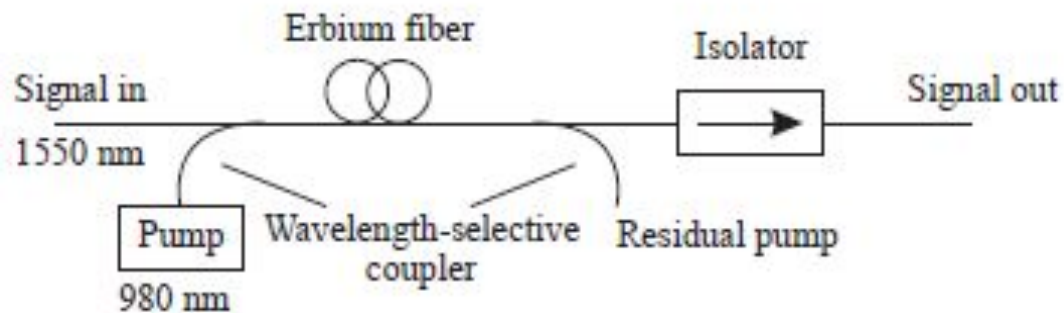
Ενεργειακές Καταστάσεις του Ερβίου



- Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας έχουμε $N_1 > N_2 > N_3$.
- Για να ενισχύσουμε το σήμα θα πρέπει η εξαναγκασμένη εκπομπή να υπερσχύει της απορρόφησης γύρω στα $1.55\mu\text{m}$.
- οπότε θα πρέπει $N_2 > N_1$ (αναστροφή πληθυσμών).
- Για να επιτύχουμε την παραπάνω συνθήκη χρησιμοποιούμε ένα laser στα 980nm που διεγείρει τα ιόντα από την E_1 στην E_3 μέσω της απορρόφησης.
- Η διαδικασία αυτή ονομάζεται *άντληση* (pumping).
- Τα ιόντα που βρίσκονται στην E_3 έχουν την τάση να αποδιεγείρονται στην E_2 σε σύντομο χρονικό διάστημα ($\tau_{32} \approx 1\mu\text{s}$).
- Ωστόσο τα ιόντα που βρίσκονται στο E_2 αργούν να αποδιεγερθούν και να πέσουν στην E_1 ($\tau_{21} = 10\text{ms}$). Άλλωστε και να συμβεί αυτό θα διεγερθούν εξαιτίας της άντλησης ξανά στην E_3 .



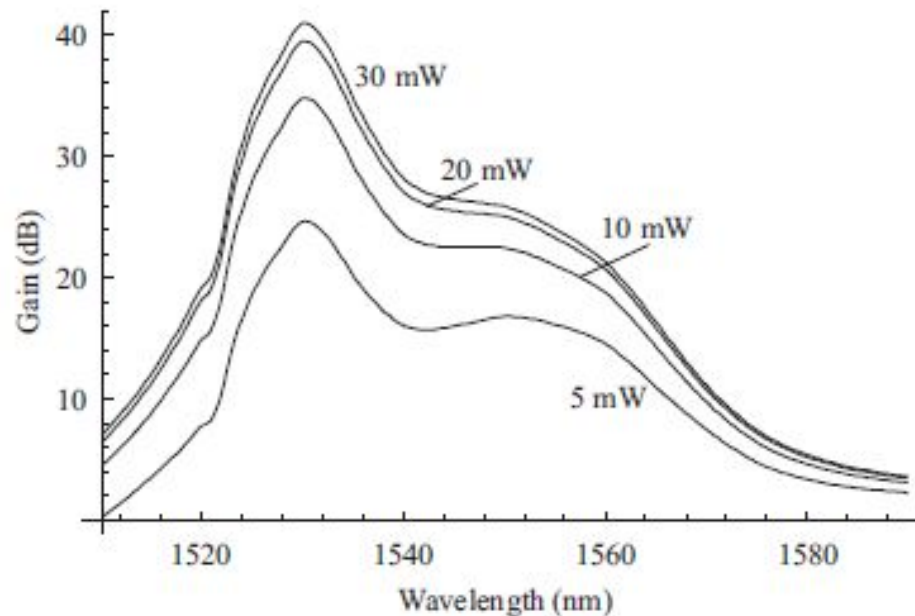
Η δομή ενός EDFA



- Εναλλακτικά θα μπορούσαμε να κάνουμε άντληση και στα 1480nm (κάτω άκρο της στάθμης γύρω από το E1).
 - Ωστόσο η άντληση δεν είναι τόσο αποδοτική όσο στα 980nm (μικρότερη αναστροφή πληθυσμών).
 - Μεγαλύτερος θόρυβος (μικρότερη αναστροφή πληθυσμών).
 - Όμως μπορούμε να υλοποιήσουμε πηγές με περισσότερη ισχύ στα 1480nm.
 - Επίσης στα 1480nm η ίνα έχει σχετικά χαμηλές απώλειες οπότε το σήμα άντλησης μπορεί να έρχεται από μακριά (remote pumping).



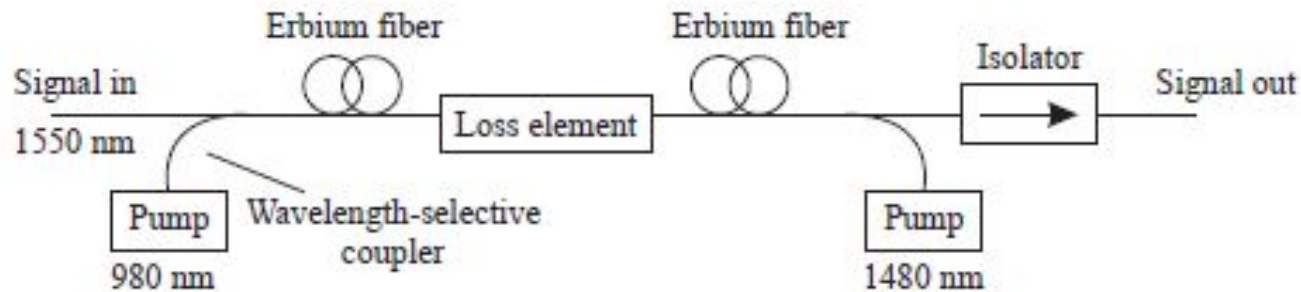
Το κέρδος του ενισχυτή EDFA



- Τα ιόντα δεν αποικούν ομοιόμορφα τις ενεργειακές ζώνες και επομένως το κέρδος του ενισχυτή παρουσιάζει εξάρτηση από την συχνότητα.
- Αυτό σημαίνει πως σε ένα σύστημα WDM κάποια κανάλια θα ενισχύονται παραπάνω από κάποια άλλα.
- Αυτό δεν είναι συχνά αποδεκτό και υπάρχουνε διάφορες τεχνικές για την ισοστάθμιση του κέρδους (φίλτρα ή χρήση ειδικού γυαλιού fluoride glass)



EDFA δύο σταδίων



- Το πρώτο στάδιο είναι σχεδιασμένο ώστε να εισάγει λιγότερο θόρυβο
- Το δεύτερο είναι σχεδιασμένο ώστε να παρέχει υψηλή ισχύ εξόδου.
- Χρησιμοποιώντας δύο laser άντλησης μπορούμε να πετύχουμε (ως ένα βαθμό) ασφάλεια από τις βλάβες των laser άντλησης
- Επίσης εισάγουμε κάποιο φίλτρο ώστε να πετύχουμε ομαλή απόκριση σε ευρεία συχνοτική περιοχή.



Η περίπτωση των ημιαγωγών

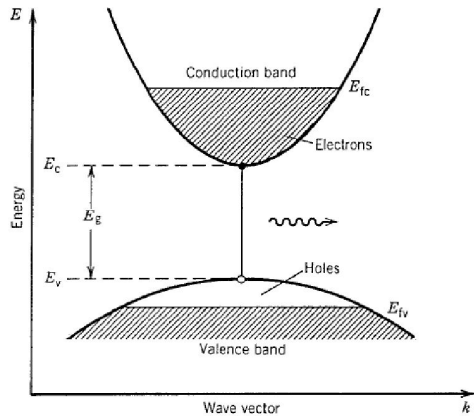


Figure 3.2: Conduction and valence bands of a semiconductor. Electrons in the conduction band and holes in the valence band can recombine and emit a photon through spontaneous emission as well as through stimulated emission.

- Στην περίπτωση αυτή, οι ενεργειακές καταστάσεις είναι πιο πολύπλοκες.
- Για να συμβεί αυθόρμητη εκπομπή θα πρέπει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο βρίσκεται στην ζώνη αγωγιμότητας (με ενέργεια E_2) να επανασυνδεθεί με μία οπή που βρίσκεται στην ζώνη σθένους (με ενέργεια E_1).
- Η πυκνότητα πιθανότητας για να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας με ενέργεια E_2 είναι $f_c(E_2) = \{1 + \exp[(E_2 - E_{fc})/k_B/T]\}^{-1}$.
- Η πυκνότητα πιθανότητας για να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη σθένους με ενέργεια E_1 είναι $f_v(E_1) = \{1 + \exp[(E_1 - E_{fv})/k_B/T]\}^{-1}$.

- Τα E_{fc} και E_{fv} ονομάζονται στάθμες Fermi.
- Ο συνολικός ρυθμός αυθόρμητης εκπομπής φωτονίων με συχνότητα f βρίσκεται αν αθροίσουμε όλες τις δυνατές μεταβάσεις με $E_2 - E_1 = hf$.

$$R_{\text{spont}}(f) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{cv} dE_2 \quad \rho_{cv} = 4\pi \frac{(2m_r)^{3/2}}{h^3} (hf - E_g)^{1/2}$$

- Στις παραπάνω εξισώσεις E_g είναι η ελάχιστη τιμή που μπορεί να λάβει το $E_2 - E_1$, ρ_{cv} είναι αριθμός των διαφορετικών διαθέσιμων καταστάσεων ανά μονάδα όγκου σε μία συχνότητα, $m_r = m_c m_v / (m_c + m_v)$ όπου m_c και m_v είναι η μάζα των ηλεκτρονίων και των οπών



Η περίπτωση των ημιαγωγών

Πιθανότητα να μην υπάρχει ηλεκτρόνιο με ενέργεια E_1 (δηλαδή να υπάρχει οπή!)

$$R_{\text{spont}}(f) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{cv} dE_2$$

Πιθανότητα να βρεθεί ηλεκτρόνιο με ενέργεια E_1

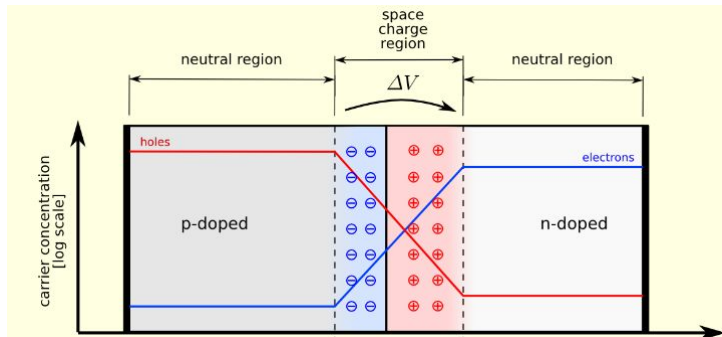
$$R_{\text{stim}}(f) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_c(E_2) [1 - f_v(E_1)] \rho_{cv} \rho dE_2$$

$$R_{\text{abs}}(f) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) f_v(E_1) [1 - f_c(E_2)] \rho_{cv} \rho dE_2$$

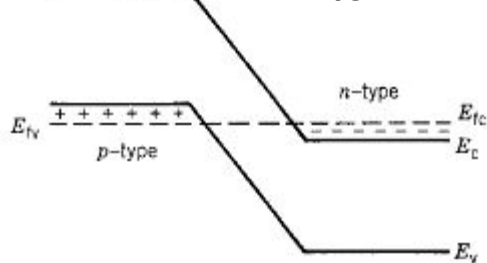
- Για να έχουμε $R_{\text{stim}} > R_{\text{abs}}$ θα πρέπει $f_c(E_2) > f_v(E_1)$ ή $E_{fc} - E_{fv} > E_2 - E_1 > E_g$.
- Επομένως για να υπερισχύει η εξαναγκασμένη εκπομπή θα πρέπει η διαφορά μεταξύ των δύο επιπέδων Fermi να είναι μεγαλύτερη από το E_g .
- Στη θερμοκή ισορροπία έχουμε $E_{fc} = E_{fv}$ και επομένως η εξαναγκασμένη εκπομπή... δεν επιβιώνει.
- Χρησιμοποιώντας ωστόσο επαφές pn και εξωτερική τάση μπορούμε να ικανοποιήσουμε την συνθήκη για να επικρατήσει η εξαναγκασμένη εκπομπή.



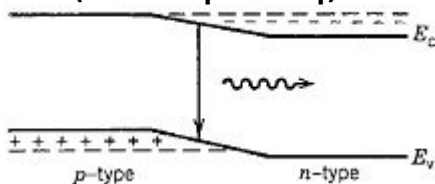
Η περίπτωση της επαφής pn



Χωρίς τάση στα
άκρα της



Με ορθή πόλωση
(θετική τάση)



- Οι επαφές pn σχηματίζονται από συνένωση (ημιαγωγικών) υλικών με διαφορετικών ειδών προσμίξεις
 - τύπου-p: οι προσμίξεις δημιουργούν πολλές σπές στην ζώνη σθένους
 - τύπου-n: πολλά ηλεκτρόνια στην ζώνη αγωγιμότητας.
- Χωρίς εξωτερική διέγερση η στάθμη Fermi πρέπει να είναι κοινή κατά μήκος του υλικού.
- Όταν έρχονται σε επαφή τα δύο υλικά, σπές από το p κινούνται προς το n και ηλεκτρόνια από το n κινούνται προς το p.
- Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα έλλειμμα θετικού φορτίου (δλδ αρνητικό φορτίο) στην περιοχή p και θετικό φορτίο στην περιοχή n που απαγορεύει την περαιτέρω κίνηση φορέων εξαιτίας της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού.
- Όταν όμως εφαρμόζουμε τάση θετική (ορθή) τάση, τότε το δυναμικό μειώνεται.
- Επίσης οι στάθμες Fermi απομακρύνονται και υπάρχει μία περιοχή κοντά στην επαφή όπου υπάρχουν και σπές και ηλεκτρόνια τα οποία μπορούν να συνδυαστούν και μέσω αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης εκπομπής να παράγουν φωτόνια



Ενισχυτής ημιαγωγού (semiconductor optical amplifier –SOA).

- προϋπάρχουν των EDFAs αλλά δεν είναι εξίσου καλοί.
- Βρίσκουν εφαρμογές ως μεταγωγείς (switches) ή μετατροπείς μήκος κύματος.
- Στην ουσία πρόκειται για μία επαφή pn όπου όμως έχει δοθεί ιδιαίτερη σημασία στο να μην λαμβάνουν χώρα ανακλάσεις στα άκρα της διάταξης.
- Στην πράξη δεν χρησιμοποιείται μία απλή επαφή αλλά μία ετεροέπαφη (heterostructure).
- Οι SOAs έχουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (100nm) από τους EDFA αλλά:
 - εισάγουν διαφωνία μεταξύ των καναλιών.
 - Η σύζευξη με την ίνα θέλει προσοχή.
 - Το κέρδος και η ισχύς εξόδου είναι μικρότερες των EDFA.
 - υπάρχει υψηλότερη απώλεια λόγω πόλωσης.
 - εισάγουν περισσότερο θόρυβο.
 - είναι δύσκολο να επιτύχουμε τις μικρές ανακλαστικότητες που απαιτούνται (10^{-4}).



Οπτικοί Πομποί - Απαιτήσεις

- Στην περίπτωση των συστημάτων WDM χρειάζεται ο οπτικός πομπός να έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
 - υψηλή ισχύ εκπομπής (τυπικές τιμές για laser είναι 0-10dBm) με μικρό κατώφλι ρεύματος και καλή απόδοση (=οπτική ισχύς προς ρεύμα οδήγησης)
 - μικρό φασματικό εύρος ώστε το σήμα να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο εύρος ζώνης
 - σταθερότητα μήκους κύματος εκπομπής
- Στην περίπτωση πηγών άντλησης χρειαζόμαστε:
 - ισχύ εκπομπής 100-200mW για τους ενισχυτές EDFA
 - μερικά W για τους ενισχυτές Raman

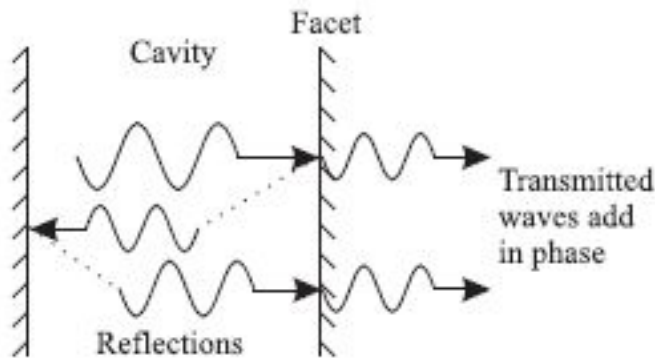


Πηγές laser

- Πρόκειται για ενισχυτές που τοποθετούνται εντός ενός οπτικού αντηχείου (οπτική κοιλότητα) και μέσω της ανάδρασης αρχίζουν να ταλαντώνονται.
 - Ημιαγωγικά laser όπου το οπτικό κέρδος παρέχεται από ημιαγωγούς
 - Laser ίνας όπου χρησιμοποιείται ίνα ντοπαρισμένη με έρβιο για να παρέχει το οπτικό κέρδος.
- Τα ημιαγωγικά laser είναι ιδιαίτερα δημοφιλή καθώς:
 - έχουν μικρές διαστάσεις (~100μm).
 - δεν απαιτούν οπτική άντληση.
 - πρόκειται για επαφές pn οπότε κατασκευάζονται εύκολα.
 - είναι αρκετά αποδοτικά
- Η κύρια εφαρμογή των fiber laser είναι για την γέννηση περιοδικών παλμών με πολύ μικρό εύρος



Laser – αρχή λειτουργίας



- Υποθέτουμε πως ένα υλικό με οπτικό κέρδος τοποθετείται μέσα σε μία κοιλότητα Fabry-Perot.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουμε υψηλό κέρδος μόνο στα μήκη κύματος συντονισμού της κοιλότητας FP.
- Η λογική είναι ίδια με την ανάλυση του φίλτρου FP. Σε κάθε διέλευση τα κύματα που συμβάλλουν θετικά ενισχύονται. Τα κύματα αυτά αντιστοιχούν σε μήκη κύματος συντονισμού.
- Τα αρχικά κύματα γεννιούνται εξαιτίας αυθόρμητης εκπομπής.
- Η εξαναγκασμένη εκπομπής ενισχύει το αρχικό φως και τελικά υπερσχύει της αυθόρμητης η οποία καταστέλλεται.
- Για να συμβεί αυτό, το ηλεκτρικό ρεύμα που παρέχουμε στο μέσο ενίσχυσης (επαφή pn) πρέπει να ξεπεράσει μία τιμή κατωφλίου.
- Κάτω από το κατώφλι αυτό, η διάταξη απλά δρα ως ενισχυτής (στα μήκη κύματος συντονισμού).

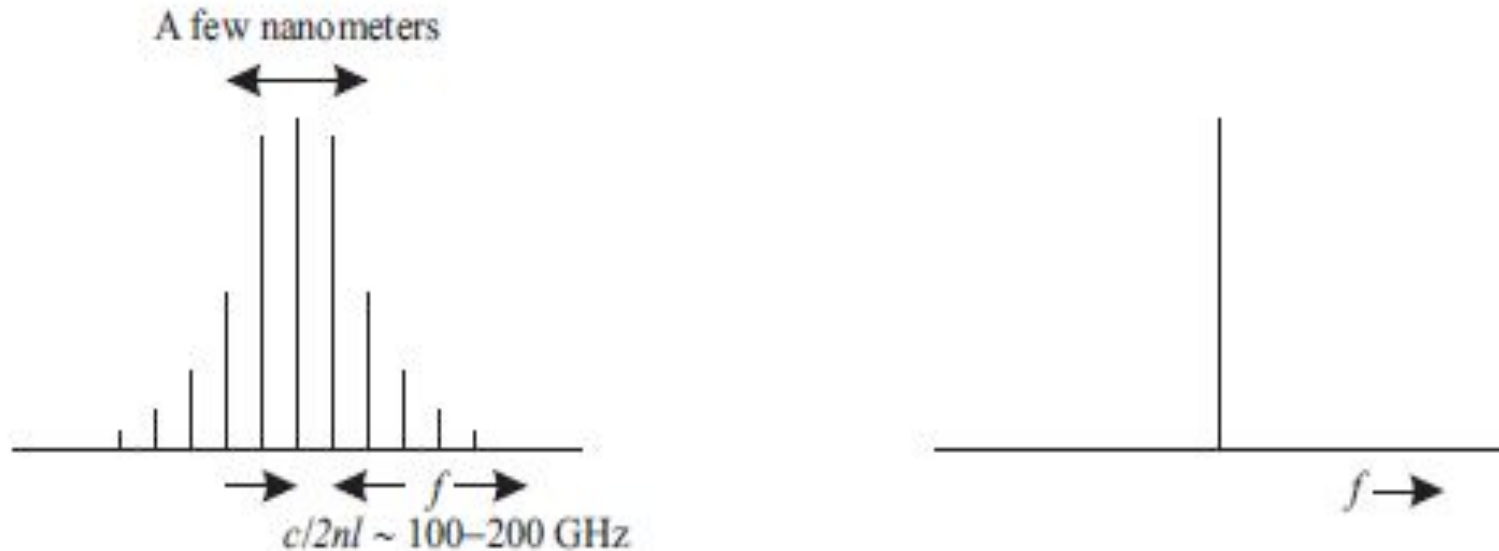


Έναρξη των ταλαντώσεων

- Δύο συνθήκες θα πρέπει να ισχύουν ώστε το laser να αρχίσει να ταλαντώνεται σε ένα δεδομένο μήκος κύματος:
 - Το μήκος κύματος να είναι εντός της φασματικής περιοχής που έχουμε οπτικό κέρδος.
 - Το μήκος κύματος να είναι κοντά στο μήκος κύματος συντονισμού της κοιλότητας.
- Η παραπάνω συνθήκες ενδεχομένως να πληρούνται για περισσότερα του ενός μήκη κύματος.
- Επομένως το laser θα εκπέμπει πολλά μήκη κύματος ή όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία, «θα υποστηρίζει πολλούς τρόπους».
- Στην περίπτωση αυτή ονομάζουμε το laser πολλαπλών τρόπων (multimode).
- Για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές θα θέλαμε το laser να είναι singlemode.



Φάσματα Εκπομπής

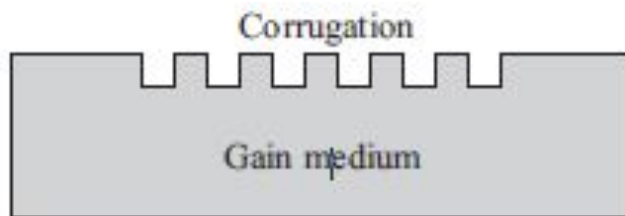


- Στην πράξη όλα τα laser είναι πολύτροπα αλλά σε ορισμένα το πλάτος ενός τρόπου είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με τους άλλους.
- Single mode laser έχουμε όταν το πλάτος των πλευρικών τρόπων είναι $\geq 30\text{dB}$ κάτω από το πλάτος του κύριου τρόπου.
- Για να επιτύχουμε single mode λειτουργία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε έναν επιπλέον μηχανισμό συντονισμού.



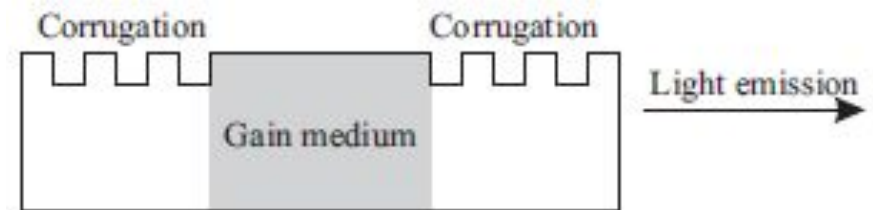
Laser κατανεμημένης ανάδρασης

- Στην περίπτωση των laser Fabry Perot η ανάδραση λαμβάνει χώρα στις ακριανές επιφάνειες – τοπική ανάδραση
- Μπορούμε ωστόσο να υποβοηθήσουμε την ανάδραση κατανεμημένα αν τοποθετήσουμε ανακλαστές κατά μήκος της κοιλότητας.



Distributed Feedback (DFB)
laser

Light emission



Distributed Bragg Reflector
(DBR) laser

Light emission

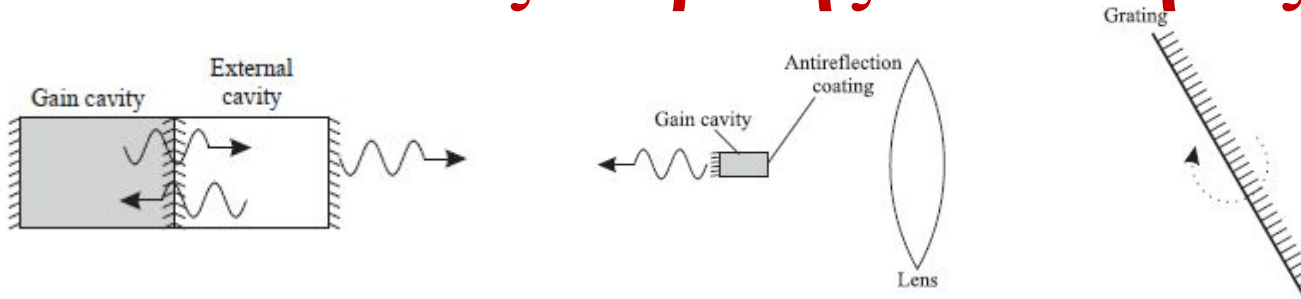


DBR και DFB

- Και στις δύο περιπτώσεις (DFB+DBR) το μήκος κύματος που προκύπτει από την συνθήκη Bragg είναι ο κύριος τρόπος και οι υπόλοιποι τρόποι του laser καταστέλλονται.
- Στην περίπτωση του DBR η ανάδραση βρίσκεται εκτός της ενεργού περιοχής και επομένως είναι δυνατόν να ελέγξουμε πιο αποδοτικά
- Για παράδειγμα αλλάζοντας το δείκτη διάθλασης του φράγματος Bragg μπορούμε να αλλάξουμε το μήκος κύματος εκπομπής (συντονισμός).
- Τα laser αυτά χρειάζονται έναν απομόνωση ο οποίος απαγορεύει σε ακτινοβολία από το υπόλοιπο σύστημα να γυρίσει στο laser και να μεταβάλει την ισχύ εκπομπής και το μήκος κύματος.
- Επίσης χρειάζεται και ένα μηχανισμό ψύξης (thermoelectric cooler) ο οποίος έχει ως σκοπό την διατήρηση των χαρακτηριστικών του laser σταθερά.
- Μπορούμε να έχουμε πολλά laser σε ένα chip – πηγές WDM. Ωστόσο αυτό δεν συναντάται πολύ συχνά στην πράξη.



Laser εξωτερικής κοιλότητας

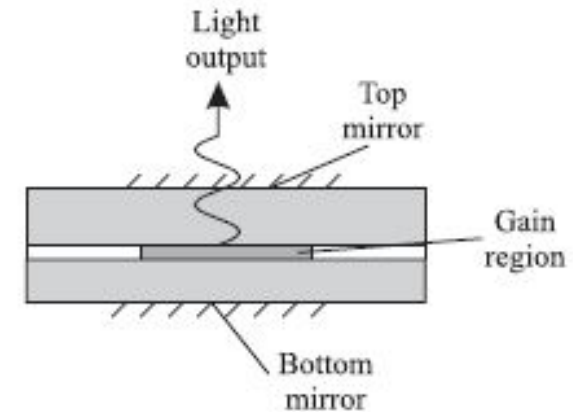


- Η καταστολή των τρόπων του laser μπορεί να λάβει χώρα και με μία δεύτερη κοιλότητα.
- Με τον τρόπο αυτό επιβιώνουν μόνο τα μήκη κύματος που υποστηρίζονται και στις δύο κοιλότητες.
- Αντί μίας κοιλότητας FB μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα περιστρεφόμενο φράγμα. Στην περίπτωση αυτή τοποθετούμε μία αντανάκλαστική επίστρωση στην μία άκρη της ενεργού περιοχής.
- Περιστρέφοντας το φράγμα πετυχαίνουμε συντονισμό (αλλαγή μήκους κύματος εκπομπής).
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλου είδους εξωτερικά φίλτρα.
- Τα laser εξωτερικής κοιλότητας χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές οπτικών οργάνων μέτρησης και όχι σε καθαρά τηλεπικοινωνιακά συστήματα λόγω του υψηλότερου κόστους.
- Δεν διαμορφώνονται τόσο εύκολα όσο τα DFB (μεγάλο μήκος κοιλότητας).



VCSELs

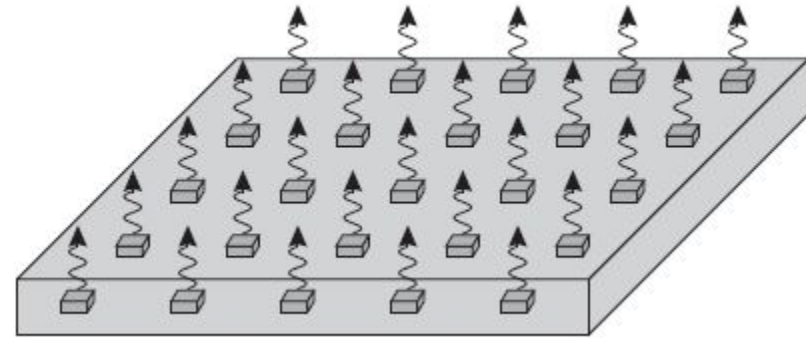
- Οι τρόποι σε μία κοιλότητα FB απέχουν συχνοτικά κατά $FSR=1/2\tau=c/(2nl)$ όπου l το μήκος της κοιλότητας.
- Άρα αν είχαμε αρκετά μικρή κοιλότητα (μικρό l) τότε οι τρόποι του laser θα ήτανε μεγάλο και επομένως θα είχαμε μόνο ένα μήκος κύματος μέσα στο εύρος ζώνης οπτικής ενίσχυσης.
- Είναι πολύ πιο εύκολο αν η κοιλότητα «γραφτεί» κάθετα στο υπόστρωμα του ολοκληρωμένου.
- Αυτά τα laser ονομάζονται για αυτό το λόγω vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs).
- Ωστόσο χρειάζονται καλής ποιότητας καθρέφτες στις άκρες για να λάβει αρχίσουνε οι ταλαντώσεις (εξαιτίας της μικρής ενεργού περιοχής έχουμε μικρό κέρδος).
- Συνήθως αυτό επιτυγχάνεται με ένα sandwich από διηλεκτρικά υλικά τα οποία δρουν ως (επιλεκτικοί ως προς το μήκος κύματος βέβαια) καθρέφτες.





VCSELs στην πράξη:

- Προβλήματα
 - Αρκετά μεγάλη αντίσταση εισόδου για το ρεύμα έγχυσης → ανάγκη για καλό θερμοκρασιακό έλεγχο
 - Ενώ τα VCSELs ήτανε γνωστά από το 1979 για αυτό το λόγω δεν υλοποιήθηκαν πριν το 2000.
- Πλεονεκτήματα:
 - πιο εύκολη σύζευξη με ίνα
 - πιο εύκολο packaging
 - ολοκλήρωση σε συστάδες (arrays)
 - 1.3 μm και 0.85 μm VCSELs υπάρχουν ήδη εμπορικά διαθέσιμα.



- VCSELs σε συστάδες: ιδανική λύση για WDM
- Όλες οι πηγές των καναλιών σε ένα chip!
- Εναλλακτικά έχουμε φτιάξει ένα πολύ καλό tunable laser!
- Ωστόσο δεν υπάρχει εύκολος τρόπος (ακόμα) να συζεύξουμε αποδοτικά όλα τα μήκη κύματος στην ίνα.
- Επίσης αν δεν λειτουργεί ένα laser... πετάμε όλο το chip!



LEDs: Light Emitting Diodes

- Τα laser ενδεχομένως να είναι αρκετά ακριβοί πομποί στην περίπτωση όπου οι ρυθμοί μετάδοσης είναι χαμηλοί και οι αποστάσεις μικρές.
- Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε LEDs.
- Στην ουσία οι LEDs είναι επαφές pn όπως και τα LASER χωρίς όμως καθρέφτες στα άκρα τους.
- Εδώ δεν έχουμε εξαναγκασμένη εκπομπή αλλά αυθόρμητη εκπομπή.
- Το φάσμα εκπομπής είναι πολύ μεγάλο ενώ η ισχύς εκπομπής δεν ξεπερνά εύκολα τα -20dBm.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετάδοση δεδομένων με ρυθμούς μερικών εκατοντάδων Mb/s.



Συντονισμός των πηγών laser

- Ο συντονισμός είναι μια ιδιαίτερη επιθυμητή ιδιότητα ειδικά σε συστήματα WDM.
- Ωστόσο δεν επιτυγχάνεται και τόσο εύκολα. Μερικοί τρόποι συντονισμού:
 - ηλεκτρονικός: όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει έναν ημιαγωγό αλλάζει το δείκτη διάθλασης (n) κατά 0.5%-2% και επιφέρει μία ανάλογη μεταβολή στο μήκος κύματος εκπομπής (10-15nm στα 1.55 μ m)
 - θερμικός: Το μήκος κύματος αλλάζει κατά 0.1nm/°C. Ωστόσο δεν είναι καλή ιδέα, τα θερμά laser καταπονούνται.
 - μηχανικός (με εξωτερική κοιλότητα): συνήθως έχουνε ως αποτέλεσμα ογκώδεις διατάξεις.
- Ιδανικά θα θέλαμε δυνατότητα συντονισμού 100nm και σταθερότητα στη λειτουργία.
- Οι μέθοδοι συντονισμού υπάρχουνε εδώ και πολλά χρόνια αλλά μόλις τώρα εμφανίζονται στο εμπόριο συντονιζόμενες πηγές (λόγω της πολυπλοκότητας κατασκευής και ελέγχου του συντονισμού).



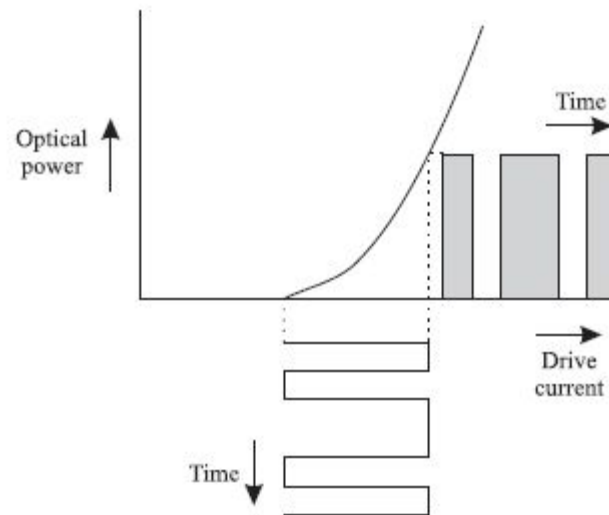
Διαμόρφωση των οπτικών πηγών.

- Δεν αρκεί μία πηγή απλά να παράγει φως. Θα πρέπει αυτό το φως να διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να μεταφέρει πληροφορία.
- Ο πιο απλός (και συχνός στις οπτικές επικοινωνίες τρόπος) είναι το on-off keying (ΟΟΚ) το οποίο θα το δούμε και παρακάτω.
 - «0» αντιστοιχεί σε μη εκπομπή φωτός (πηγή σβηστή)
 - «1» αντιστοιχεί σε εκπομπή φωτός (παλμός, πηγή αναμμένη).
- Πως αναβοσβήνουμε επομένως τις πηγές μας;
 - άμεσα: απλά στέλνουμε ή δεν στέλνουμε ρεύμα στο laser. Χωρίς ρεύμα το laser δεν παράγει φωτόνια και «σβήνει».
 - εξωτερικά: χρησιμοποιούμε κάποιο άλλο στοιχείο εξωτερικά του laser για να συνθέσουμε τους παλμούς μας.



Άμεση διαμόρφωση

- Αρκετά φθηνή μέθοδος για την επίτευξη διαμόρφωσης σε ένα ημιαγωγικό laser
- δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε fiber laser (εξαιτίας του μεγάλου χρόνου απόκρισης των κβαντικών μεταβάσεων)





Απόκριση laser σε άμεση διαμόρφωση

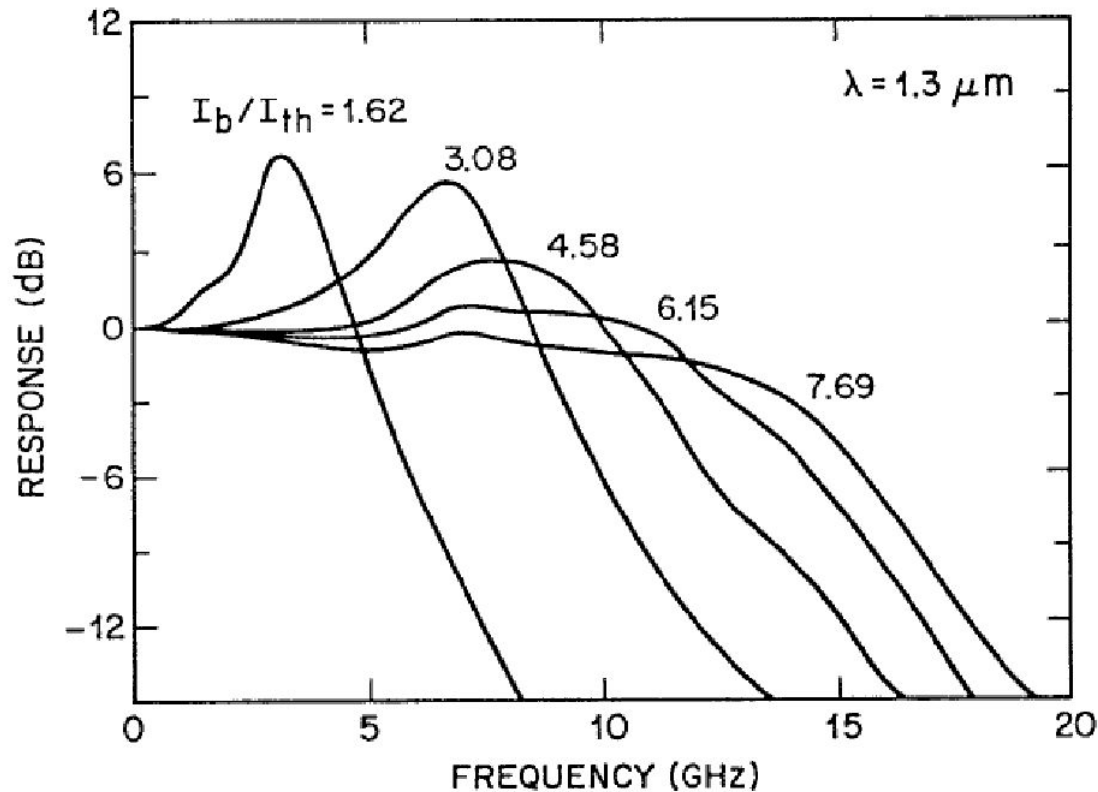


Figure 3.21: Measured (solid curves) and fitted (dashed curves) modulation response of a 1.55- μm DFB laser as a function of modulation frequency at several bias levels. (After Ref. [70]; ©1997 IEEE; reprinted with permission.)

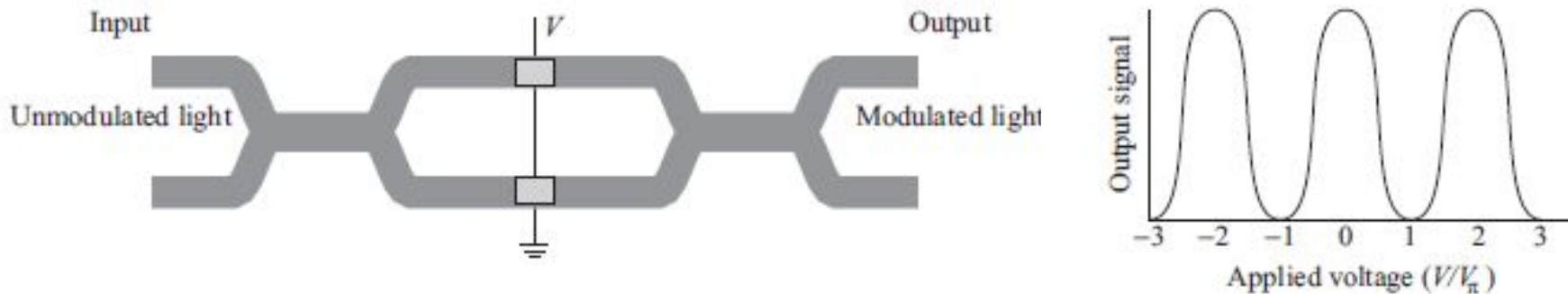


Έμμεση διαμόρφωση

- Το να ανοιγοκλείνει κανείς το laser δεν είναι πάντα καλή ιδέα.
- Εισάγεται chirp → αυξάνει το εύρος ζώνης του σήματος.
- Θα μπορούσε κανείς βέβαια να μην σβήνει τελείως το laser και να μεταδίδει μικρή ισχύ στο «0».
- Ωστόσο αυτό σημαίνει πως μειώνεται ο λόγος σβέσης = $P_{\langle 1 \rangle} / P_{\langle 0 \rangle}$ (~7dB).
- Το σύστημα έτσι γίνεται πιο ευαίσθητο στο θόρυβο.
- Επομένως σε συστήματα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης χρησιμοποιούμε την εξωτερική διαμόρφωση.
- Δύο είδη εξωτερικών διαμορφωτών χρησιμοποιούνται στην πράξη:
 - διαμορφωτές βασισμένοι σε LiNbO_3 (νιοβικό λίθιο).
 - διαμορφωτές ηλεκτρο- απορρόφησης (electroabsorption –EA).



Διαμορφωτής MZI



- Το LiNbO_3 επιτρέπει να ελέγξουμε τη διαφορά δρόμου στο MZI χρησιμοποιώντας τάση.
- Για μηδενική τάση τα δύο άκρα του MZI έχουν μηδενική διαφορά δρόμου (θετική συμβολή φως «περνάει»).
- Για τάση $V=V_\pi$ σχηματίζεται διαφορά φάσης π (καταστροφική συμβολή φως «δεν περνάει»)
- Γενικά πετυχαίνουμε καλούς λόγους σβέσης (15-20dB) και καλό έλεγχο του chirp
- Ωστόσο χρειάζεται έλεγχο της πόλωσης επειδή η διάταξη είναι ευαίσθητη στην πόλωση.



Ηλεκτρόαπορροφηση (Electroabsorption)

- Αποτελούν μία χαμηλού κόστους εναλλακτική στους διαμορφωτές LiNbO_3
- Στην ουσία βασίζονται στο γεγονός ότι σε ορισμένα υλικά η απαγορευμένη περιοχή όπου λαμβάνει χώρα η απορρόφηση του φωτός (δείτε τα περί ημιαγωγών).
- Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου η περιοχή αυτή μικραίνει και επομένως μπορεί να απορροφήσει φωτόνια.
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Franz-Keldysh.
- Οι διαμορφωτές EA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ρυθμούς 2.5Gb/s-10Gb/s αλλά δεν είναι τόσο καλοί όσο οι MZI.
- Μπορούν να συνδυαστούν στο ίδιο chip με την δίοδο laser.



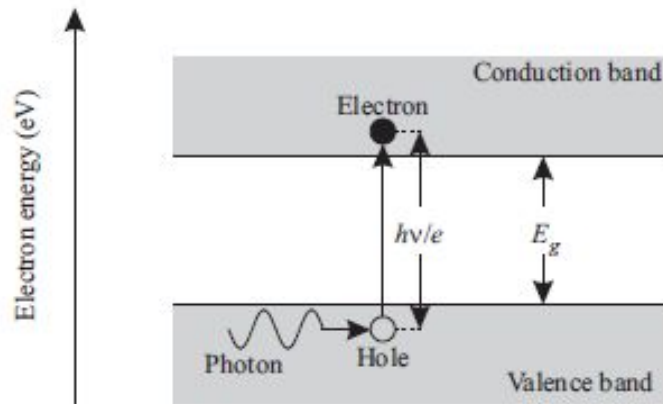
Οπτικοί Δέκτες

- Μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό ρεύμα.
- Στοιχεία ενός δέκτη:
 - οπτικός προενισχυτής: ενισχύει το σήμα πριν την φώραση.
 - Φωτοδέκτης: μετατρέπει το ρεύμα φωτονίων σε ρεύμα ηλεκτρονίων (φως→ηλεκτρικό ρεύμα).
 - Ηλεκτρονικός ενισχυτής: ενισχύει το ηλεκτρικό ρεύμα
 - Κύκλωμα απόφασης. Αποφασίζει για το σύμβολο που μεταδόθηκε.





Φωτοδέκτης



Material	E_g (eV)	λ_{cutoff} (μm)
Si	1.17	1.06
Ge	0.775	1.6
GaAs	1.424	0.87
InP	1.35	0.92
$\text{In}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{As}$	0.75	1.65
$\text{In}_{1-0.45y}\text{Ga}_{0.45y}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0.75–1.35	1.65–0.92

- Αποτελούνται από ημιαγωγικά υλικά
- Τα φωτόνια απορροφούνται από το υλικό και μετατρέπονται σε ηλεκτρικό ρεύμα.
- Στην ουσία τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους απορροφώντας φωτόνια μεταφέρονται στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Τα ηλεκτρόνια αυτά αφήνουν πίσω τους μία οπή στην ζώνη σθένους.
- Με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου, τα ζεύγη αυτά δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα.
- Θα πρέπει βέβαια $hf > E_g$, δηλαδή υπάρχει μία συχνότητα κάτω από την οποία το υλικό δεν απορροφά.

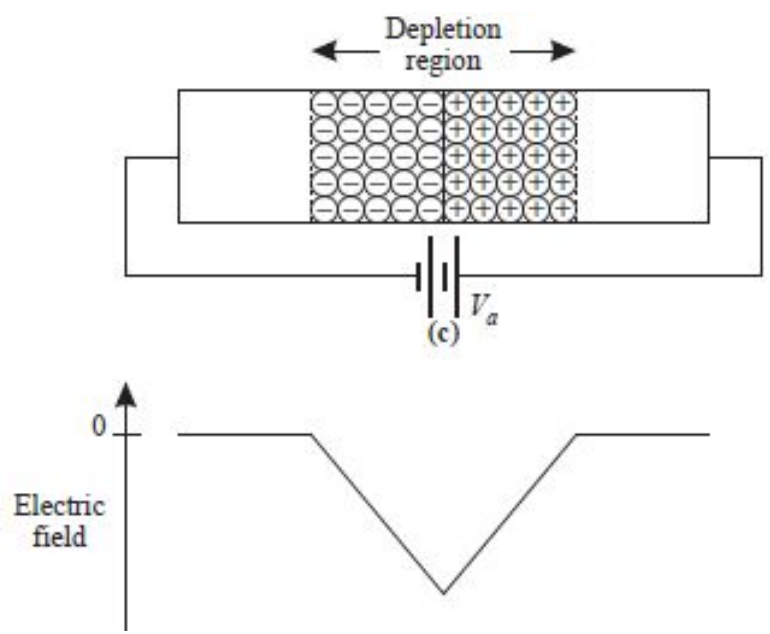
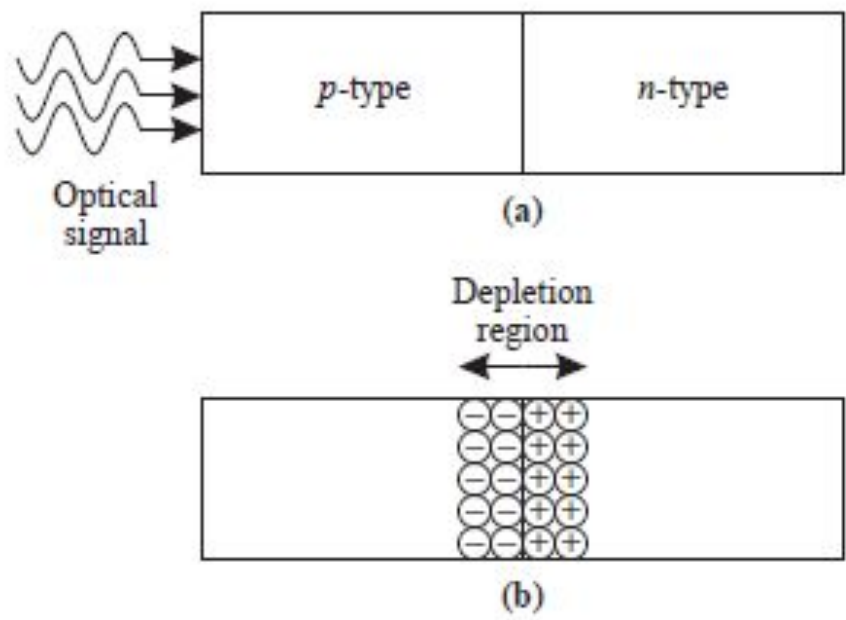


Η απορρόφηση είναι καλό πράγμα...

- Πόσα φωτόνια όμως απορροφούνται; Αυτό εξαρτάται από το συντελεστή απορρόφησης a του υλικού.
- $P_{\text{out}} = P_{\text{in}} \exp(-aL)$ επομένως η ισχύς που απορροφάται είναι $P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = (1 - \exp(-aL))P_{\text{in}}$.
- Η απόδοση η του φωτοδέκτη είναι $\eta = P_{\text{abs}}/P_{\text{in}} = 1 - \exp(-aL)$.
- Τυπικές τιμές για το a είναι $10^4/\text{cm}$ και επομένως με μήκος $L=10\mu\text{m}$.
- Αποκρισιμότητα R ορίζεται ως $R = I_p/P_{\text{in}}$ όπου I_p το φωτόρρευμα.
- Είναι εύκολο να δούμε ότι $R = e\eta/(hf) = e\eta\lambda/(hc) = \eta\lambda/1.24$ (A/W) όπου το λ μετριέται σε μm .
- Ωστόσο σε έναν ομογενή ημιαγωγό είναι δύσκολο να πετύχουμε μεγάλο η επειδή τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τις οπές.
- Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε μία επαφή pn όπου εφαρμόζουμε (σχετικά μεγάλη) ανάστροφη τάση και επομένως τα ζεύγη οπών ηλεκτρονίων φτάνουνε γρήγορα στο εξωτερικό κύκλωμα.
- Το πεδίο είναι ιδιαίτερα ισχυρό στην επαφή των δύο υλικών pn.
- Ωστόσο μακριά από την επαφή, δημιουργείται ένα ρεύμα διάχυσης το οποίο δεν μπορεί να ανταποκριθεί γρήγορα στις αλλαγές της οπτικής ισχύος και επομένως επιβαρύνει άσκοπα την φασματική απόκριση της φωτοδιόδου.



Δημιουργία Φωτορεύματος στην επαφή pn





Φωτοδιόδοι pn

- Μπορούμε να βελτιώσουμε και άλλο την απόδοση αν χρησιμοποιήσουμε ένα στρώμα ανόθευτου (intrinsic) ημιαγωγού ανάμεσα στα στρώματα p και n .
- Σε αυτή τη δομή η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κατά μήκος και του ανόθευτου στρώματα.
- Γενικά το μήκος των περιοχών p και n είναι πολύ μικρότερο της περιοχής i και επομένως το μεγαλύτερο μέρος της απορρόφησης θα λάβει χώρα στο i .
- Μία καλύτερη τακτική είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα υλικό στις περιοχές p και n που να είναι διαφανές (να μην απορροφά) στο μήκος κύματος που μας ενδιαφέρει.
- Π.χ. InP είναι διαφανές για $\lambda > 0.92 \mu\text{m}$ ενώ για το InGaAs αυτό συμβαίνει για $\lambda > 1.65 \mu\text{m}$.
- Με τέτοιες δομές αποφεύγεται και το ρεύμα διάχυσης που είδαμε στις επαφές pn .

p InP	i InGaAs	n InP
------------	---------------	------------



Φωτοδιόδοι APD

- Στις φωτοδιόδους pin υπάρχει μία βασική αρχή: ένα φωτόνιο παράγει (το πολύ) ένα ηλεκτρόνιο.
- Ωστόσο υπάρχουνε φωτοδιόδοι που αψηφούν αυτό τον απλό κανόνα.
- Σε αυτές τις φωτοδιόδους υπάρχει ένας μηχανισμός εσωτερικού ηλεκτρονικού κέρδους.
- Ο μηχανισμός αυτός οφείλεται στο φαινόμενο της χιονοστοιβάδας (avalanche)
- Υπό υψηλό ηλεκτρικό πεδίο, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να «κλωτσήσει» ένα ηλεκτρόνιο από την ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Αυτό το ηλεκτρόνιο είναι πλέον φορέας του ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί εκ νέου να κλωτσήσει και άλλα ηλεκτρόνια με τον ίδιο τρόπο.
- Η διαδικασία αυτή ονομάζεται πολλαπλασιασμός χιονοστοιβάδας (avalanche multiplication).
- Οι δέκτες ονομάζονται avalanche photodiodes (APD).



Οπτικοί μεταγωγείς (switches)

- Υπάρχουν ορισμένες κρίσιμες λειτουργίες στις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οπτικούς μεταγωγείς:
 - Δημιουργία και υποστήριξη των lightpaths (provisioning): αποφυγή χειροκίνητων αλλαγών στο τρόπο διαρρύθμισης των οπτικών ινών.
 - Προστασία: δρομολόγηση της κίνησης σε μία δευτερεύουσα ίνα σε περίπτωση αστοχίας υλικού (protection switching).
 - Δρομολόγηση πακέτων (packet switching)
 - Εξωτερική διαμόρφωση.



Χαρακτηριστικά των switch

- Χρόνος μεταγωγής (χρόνος αλλαγής της κατάστασης του switch).
- Αριθμός θυρών εισόδου και εξόδου.
- Λόγος σβέσης (λόγος της ισχύος που ανιχνεύεται όταν το switch αφήνει να περάσει το σήμα προς την ισχύ που ανιχνεύεται όταν αυτό δεν περνάει).
- Απώλειες εισαγωγής (επιπλέον απώλειες που εισάγονται από το δομικό στοιχείο. Είναι ίδιες για κάθε θύρα του?).
- Επίπεδο διαφωνίας (πόση ανεπιθύμητη ισχύ ανιχνεύεται στην έξοδο του switch).
- Ευαισθησία στην πόλωση (απώλειες που εξαρτώνται από την πόλωση).
- *Latching*: το switch μπορεί να διατηρεί την κατάσταση του ακόμα και όταν δεν τροφοδοτείται με ρεύμα.
- Εξακρίβωση κατάστασης του switch (για να επιβεβαιώνετε η ορθή λειτουργία του δικτύου).
- Αντοχή – μεγάλος χρόνος λειτουργίας χωρίς σφάλματα.



Φτιάχνοντας μεγάλα switch

- Αριθμός μεταγωγικών στοιχείων (switching elements) που πρέπει να συνδυαστούν. Μας ενδιαφέρει το κόστος των στοιχείων που εξαρτάται από:
 - το πλήθος των στοιχείων τους
 - τη δυνατότητα εύκολης συσκευασίας (packaging)
 - την ευκολία κατασκευής των στοιχείων
- Πρέπει οι απώλειες να είναι ομοιόμορφες και ένας συνδυασμός θυρών να μην έχει πολύ μεγαλύτερες απώλειες από τους υπολοίπους
- Αριθμός διασυνδέσεων που τέμνονται
 - στα ολοκληρωμένα οπτικά στοιχεία η διασύνδεση πρέπει να γίνεται στο ίδιο επίπεδο σε αντίθεση με τα ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά.
 - Αν δύο διασυνδέσεις τέμνονται έχουμε απώλειες ισχύος και διαφωνία
- Χαρακτηριστικά blocking:
 - non-blocking: κάθε είσοδος μπορεί να διασυνδεθεί με κάθε έξοδο.
 - blocking: υπάρχουν περιπτώσεις όπου δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί μία διασύνδεση.
 - wide sense non-blocking: Χρησιμοποιείται κάποιος αλγόριθμος για να υποστηριχθούν οι υπάρχουσες συνδέσεις ώστε οι μελλοντικές συνδέσεις να μπορούν να ικανοποιηθούν.
 - strict sense non-blocking: Οι υπάρχουσες συνδέσεις δεν επηρεάζουνε την εξυπηρέτηση νέων συνδέσεων.
 - rearrangeably non-blocking: χρειάζεται μία αναδιάθρωση των υπαρχόντων συνδέσεων για να εξυπηρετηθούν οι νέες συνδέσεις



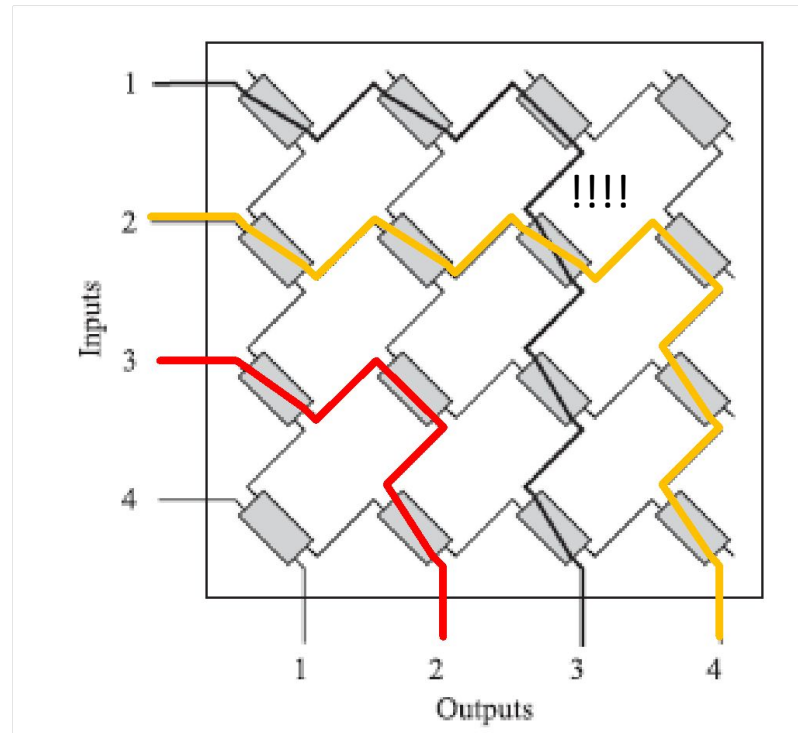
Αρχιτεκτονικές μεγάλων switch

Table 3.4 Comparison of different switch architectures. The switch count for the Spanke architecture is made in terms of $1 \times n$ switches, whereas 2×2 switches are used for the other architectures.

	Nonblocking Type	No. Switches	Max. Loss	Min. Loss
Crossbar	Wide sense	n^2	$2n - 1$	1
Clos	Strict sense	$4\sqrt{2}n^{1.5}$	$5\sqrt{2n} - 5$	3
Spanke	Strict sense	$2n$	2	2
Beneš	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(2 \log_2 n - 1)$	$2 \log_2 n - 1$	$2 \log_2 n - 1$
Spanke-Beneš	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(n - 1)$	n	$\frac{n}{2}$



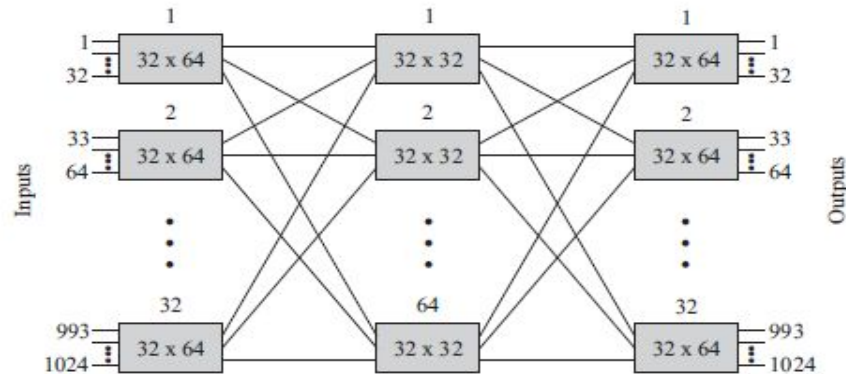
Αρχιτεκτονική Crossbar



- Μία σύνδεση μπορεί να χρειάζονται από 1 μέχρι $2n-1$ switch για να ικανοποιηθεί.
- Οι συνδέσεις μεταξύ των switch δεν χρειάζεται να τέμνονται.
- wide sense non-blocking.
- πρώτα διατρέχουμε ως προς γραμμές και μετά ως προς στήλες!



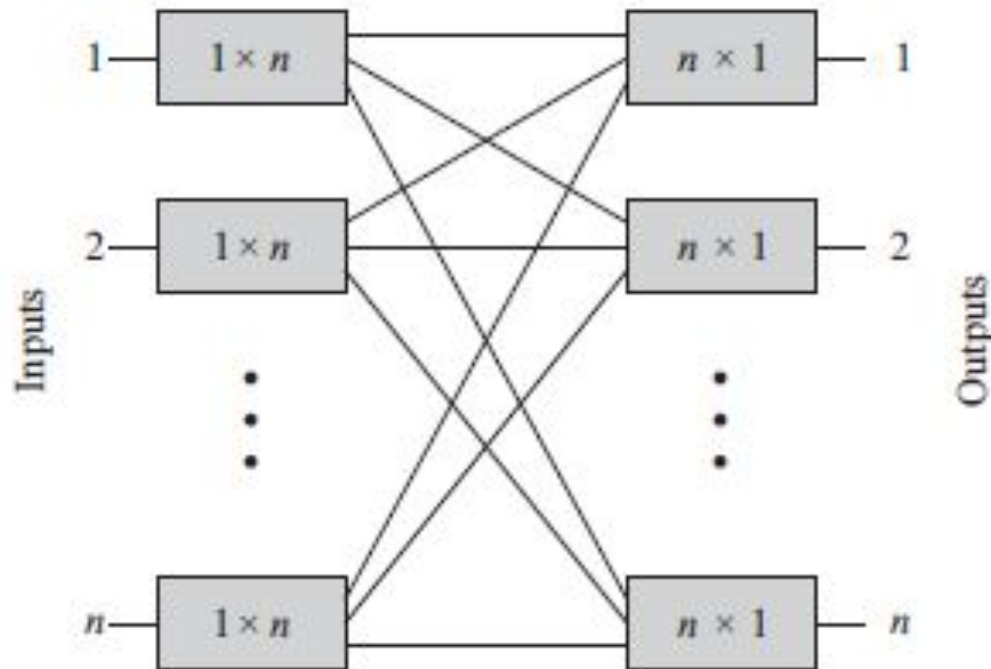
Αρχιτεκτονική Clos



- στο πρώτο στάδιο χρησιμοποιούμε k switch $m \times p$ θυρών το καθένα.
- στο δεύτερο στάδιο χρησιμοποιούμε p switch διαστάσεων $k \times k$.
- το τρίτο στάδιο είναι το ίδιο με το πρώτο.
- Αν $p \geq 2m-1$ τότε ο μεταγωγέας είναι *strictly non-blocking*.
- Για $p=2m-1$ χρειαζόμαστε
 - $m \times (2m-1)$ μεταγωγείς 2×2 για κάθε έναν από τους $m \times p$ μεταγωγείς.
 - k^2 μεταγωγείς 2×2 για κάθε έναν από τους μεταγωγείς $k \times k$.
 - Σύνολο: $2km(2m-1) + (2m-1)k^2$ μεταγωγείς 2×2 .
 - Αριθμός εισόδων και εξόδων $n=km$.
 - Ελάχιστος αριθμός 2×2 μεταγωγών όταν $m \cong (n/2)^{1/2}$ οπότε έχουμε $4 \times (2)^{1/2} n^{3/2} - 4n$ μεταγωγείς



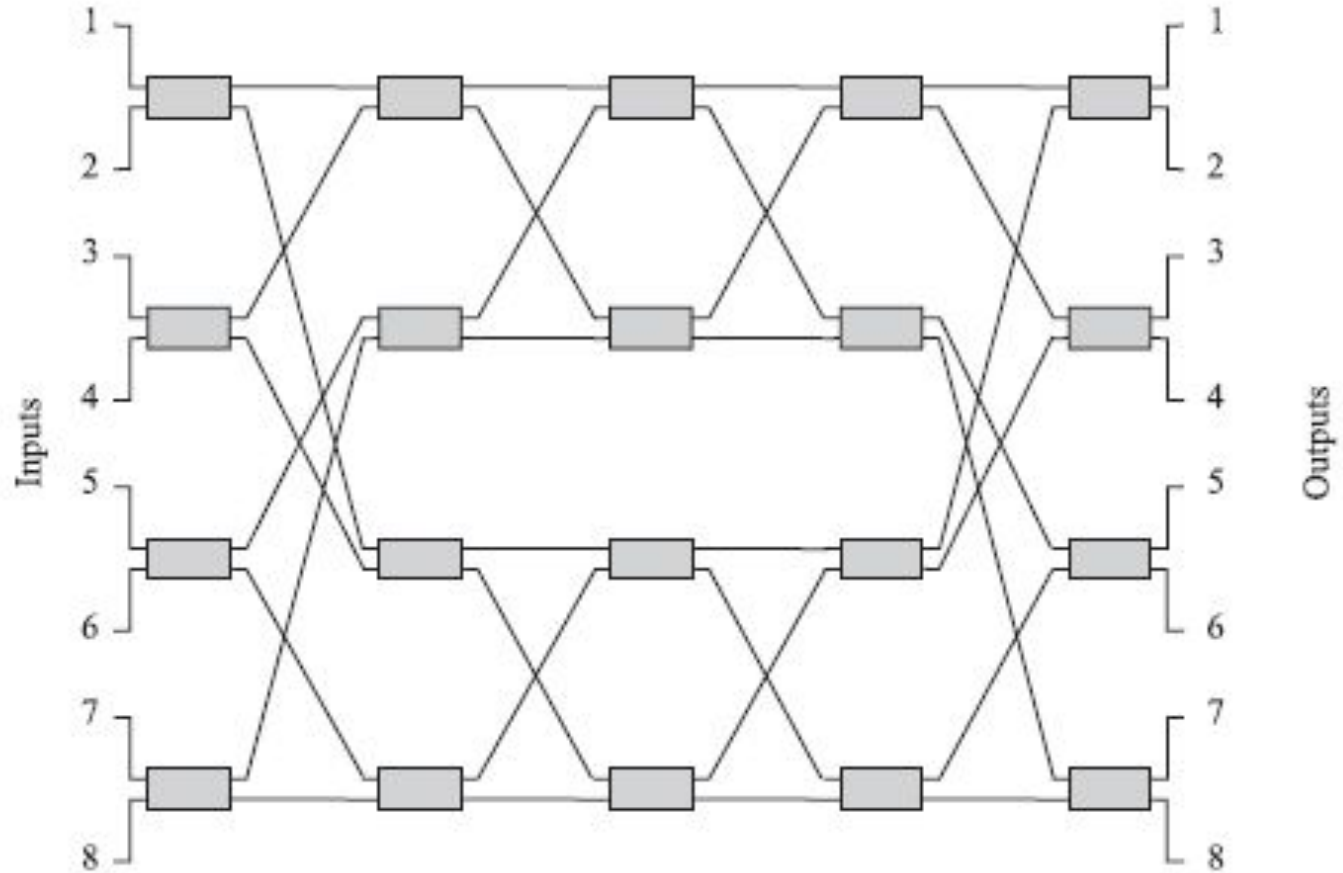
Spanke



- ιδανική όταν χρησιμοποιούμε τεχνολογίες που μας δίνουν απευθείας $1 \times n$ switch.



Beneš





Απαιτήσεις

Application	Switching Time Required	Number of Ports
Provisioning	1–10 ms	> 1000
Protection switching	1–10 ms	2–1000
Packet switching	1 ns	> 100
External modulation	10 ps	1



Τεχνολογίες Μεταγωγών

Type	Size	Loss (dB)	Crosstalk (dB)	PDL (dB)	Switching Time
Bulk mechanical	8×8	3	55	0.2	10 ms
2D MEMS	32×32	5	55	0.2	10 ms
3D MEMS	1000×1000	5	55	0.5	10 ms
Thermo-optic silica	8×8	8	40	Low	3 ms
Liquid crystal	2×2	1	35	0.1	4 ms
Polymer	8×8	10	30	Low	2 ms
Electro-optic LiNbO ₃	4×4	8	35	1	10 ps
SOA	4×4	0	40	Low	1 ns



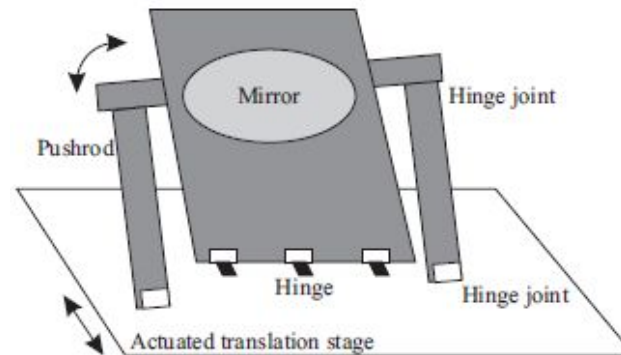
Μηχανικοί Μεταγωγείς

- Μηχανικοί διακόπτες σε διακριτή μορφή (bulk mechanical switches).
 - ένας καθρέφτης κινείται μηχανικά εντός ή εκτός του οπτικού μονοπατιού.
 - εναλλακτικά μία ίνα κάμπτεται ή πιέζεται μηχανικά αλλάζοντας το συντελεστή σύζευξης κ σε έναν συζεύκτη.
 - γενικά χαμηλές απώλειες εισαγωγής, χαμηλές απώλειες λόγω πόλωσης, χαμηλή διαφωνία και χαμηλό κόστος.
 - χρησιμοποιούν την crossbar αρχιτεκτονική → πρόβλημα με την ομοιομορφία των απωλειών.
 - χρόνος μεταγωγής: μερικά ms.
 - μηχανική διάταξη → προβλήματα αντοχής στο χρόνο.



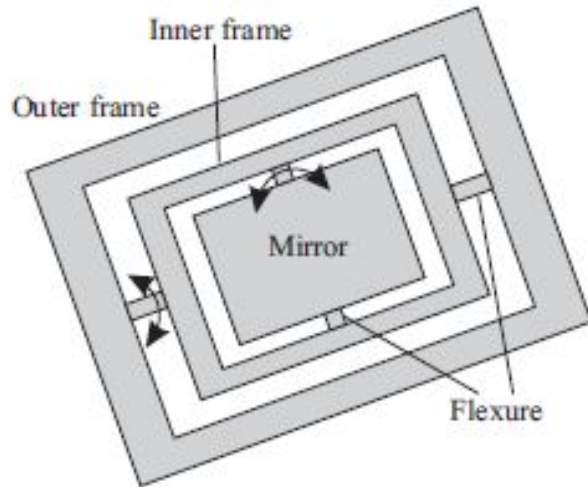
Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)

- Πρόκειται για διατάξεις με πολύ μικρές διαστάσεις που κατασκευάζονται πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου.
- συνήθως είναι μικροί καθρέφτες από πυρίτιο με διαστάσεις (~100 μm έως mm).
- Στο ίδιο υπόστρωμα μπορούμε να αναπτύξουμε πολλούς καθρέφτες με σχετικά απλές τεχνικές.
- Επίσης με ηλεκτρονικό τρόπο μπορούμε να αλλάξουμε την θέση των καθρεφτών (ηλεκτρομαγνητικά, ηλεκτροστατικά, πιεζοηλεκτρικά).
- two-state pop-up mirror (ή 2D mirror):
 - οριζόντια θέση (το φως περνάει).
 - κάθετη θέση (το φως ανακλάται).
 - χρησιμοποιείται για την σύνθεση μέχρι και 32 \times 32 μεταγωγέων.
 - ψηφιακός έλεγχος (on/off)

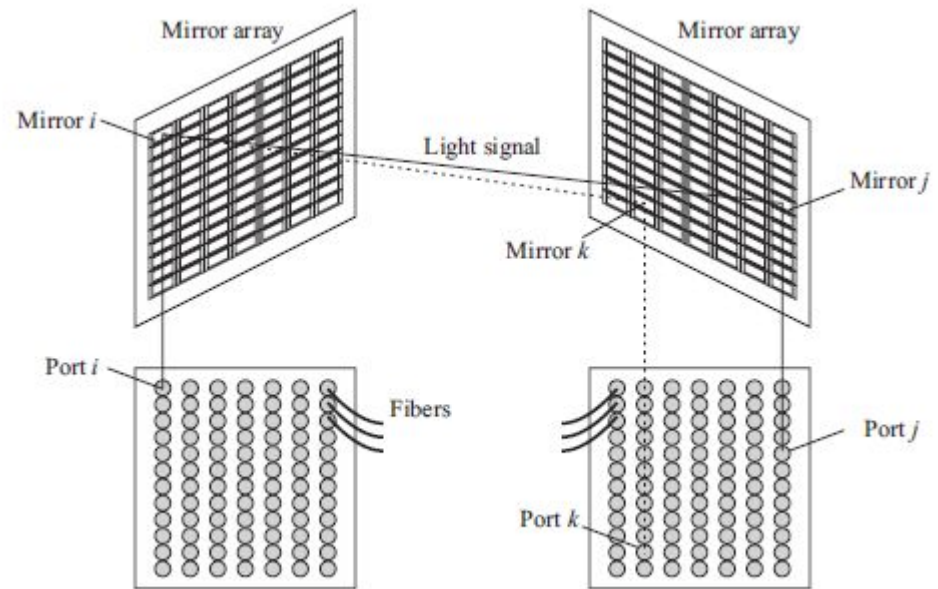




Micro-Electro-Mechanical System (MEMS)



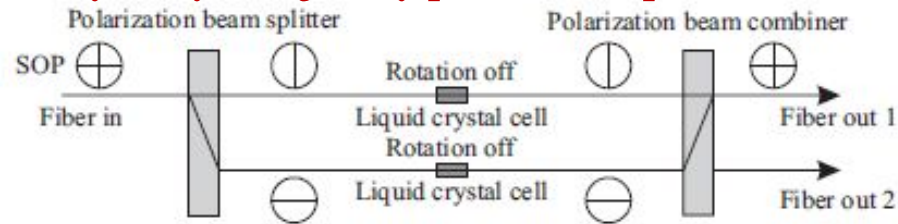
- Analog beam steering mirror
 - Δυσκολότερος έλεγχος (αναλογικός)
 - Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην υλοποίηση μεταγωγών $1 \times n$.



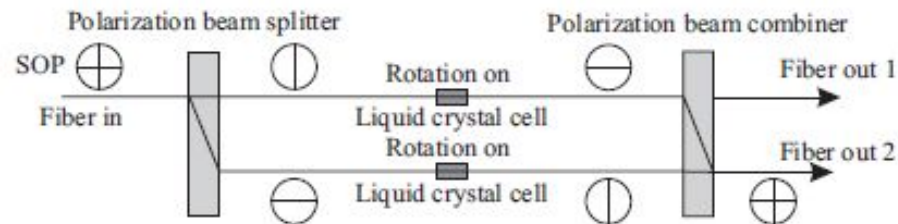
- Οι τρισδιάστατες τεχνολογίες MEMS επιτρέπουν την υλοποίηση μεγάλων οπτικών μεταγωγών με 256 ακόμα και 1000 θύρες



Μεταγωγείς υγρών κρυστάλλων



(a)



(b)

- Υγροί κρύσταλλοι:
 - Ανάλογα με το αν εφαρμόζεται ή όχι ηλεκτρικό πεδίο ο υγρός κρύσταλλος μπορεί ή όχι να στρέψει την πόλωση του φωτός.
 - Η αρχή λειτουργίας του μεταγωγέα υγρού κρυστάλλου είναι παρόμοια με του απομονωτή.
 - Ο έλεγχος δεν χρειάζεται να είναι ψηφιακός. Αν είναι αναλογικός τότε μπορούμε να υλοποιήσουμε με την ίδια διάταξη έναν μεταβλητό εξασθενητή (variable optical attenuator – VOA).
 - Χρόνος μεταγωγής: μερικά ms.
 - Δυνατότητα ολοκλήρωσης → μικρό κόστος και μεγάλος όγκος παραγωγής



Ηλεκτροοπτικοί μεταγωγείς

- Στην ουσία είναι ένας εξωτερικός διαμορφωτής που χρησιμοποιεί LiNbO_3
- Μπορεί επομένως να χρησιμοποιεί διάταξη συζεύκτη ή διάταξη MZI.
- Πλεονεκτήματα:
 - Πολύ γρήγοροι, χρόνος μεταγωγής: ns
 - Μπορούν να ολοκληρωθούν πολλοί μεταγωγείς σε ένα υπόστρωμα.
- Μειονεκτήματα:
 - Σχετικά υψηλές απώλειες εισαγωγής
 - Σχετικά υψηλή PDL – polarization dependent loss
 - Κόστος: γενικά πιο ακριβοί από μηχανικά switch.



Θερμοοπτικοί Μεταγωγείς

- Είναι ΜΖΙ τα οποία αποτελούνται από υλικό του οποίου ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται ισχύρα από την θερμοκρασία.
- Επομένως αλλάζοντας την θερμοκρασία, αλλάζουμε το δ.δ. και επομένως την διαφορά δρόμου των δύο δρόμων του ΜΖΙ.
- Μπορούν να φτιαχτούν σε Si αλλά και από οργανικά υλικά.
- Ωστόσο έχουνε υψηλή διαφωνία και σχετικά αργούς τρόπους μεταγωγής.



Ενισχυτές ημιαγωγού (ως μεταγωγείς)

- Ο SOA μπορεί να παίξει το ρόλο ενός μεταγωγέα:
 - όταν τροφοδοτείται με τάση αφήνει το σήμα να περνάει και μάλιστα το ενισχύει.
 - όταν δεν τροφοδοτείται με τάση τότε απλά απορροφά την οπτική ισχύ του σήματος.
- Πλεονεκτήματα:
 - γενικά παρέχει πολύ μεγάλους λόγους σβέσης.
 - χρόνος μεταγωγής: μερικά ns.
 - δυνατότητα ολοκλήρωσης με συζεύκτες, κτλ ώστε να υλοποιηθούν μεγαλύτερα switch.
- Μειονεκτήματα:
 - είναι ακριβό component.
 - έχει δυσκολίες στον έλεγχο της πόλωσης.



Ηλεκτρονικοί μεταγωγείς

- Μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε με καθαρά οπτικούς (all-optical) μεταγωγείς.
- Στην πράξη όμως πολύ συχνά με τον όρο «οπτικό» μεταγωγέα εννοούμε έναν μεταγωγέα που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά για την δρομολόγηση των σημάτων.
- Ένας μεγάλος ηλεκτρονικός μεταγωγέας χρησιμοποιεί συνήθως την αρχιτεκτονική Clos και έναν αριθμό μικρότερων μεταγωγέων.
- Υπάρχουν δύο τρόποι να γίνει η μεταγωγή:
 - χωρίζουμε τα σήματα των 2.5Gb/s και 10Gb/s σε μικρότερα (π.χ. 51Mb/s). Αυτό έχει νόημα όταν θέλουμε να δρομολογήσουμε απευθείας αυτά τα μικρότερα σήματα.
 - η άλλη προσέγγιση είναι να κάνουμε απευθείας την μεταγωγή με ένα ηλεκτρονικό crossbar το οποίο υλοποιείται με ένα ολοκληρωμένο οπτικό κύκλωμα (IC).
- Πρόβλημα ισχύος:
 - ένα 64×64 IC καταναλώνει μέχρι και 25W και χρειάζονται περίπου 100 τέτοια IC για να υλοποιήσουμε ένα 1024×1024 switch→25kW.
 - Σε αντίθεση ένα 3D MEM switch 1024×1024 χρειάζεται 3kW.
 - Οι ηλεκτρονικοί μεταγωγείς χρειάζονται ψύξη.
- Όταν πρέπει να συνδεθούν μεταξύ τους πολλά ICs αυτό γίνεται συνήθως πάνω σε μία πλακέτα ή από πλακέτα σε πλακέτα.
 - Είναι δύσκολο να βρεθούν ηλεκτρονικά interconnects που να υποστηρίζουν >2.5Gb/s σε αποστάσεις 5-6m.
 - Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οπτικά interconnects που καταλαμβάνουν μικρότερη ισχύ και έχουν εμβέλεια >100m.

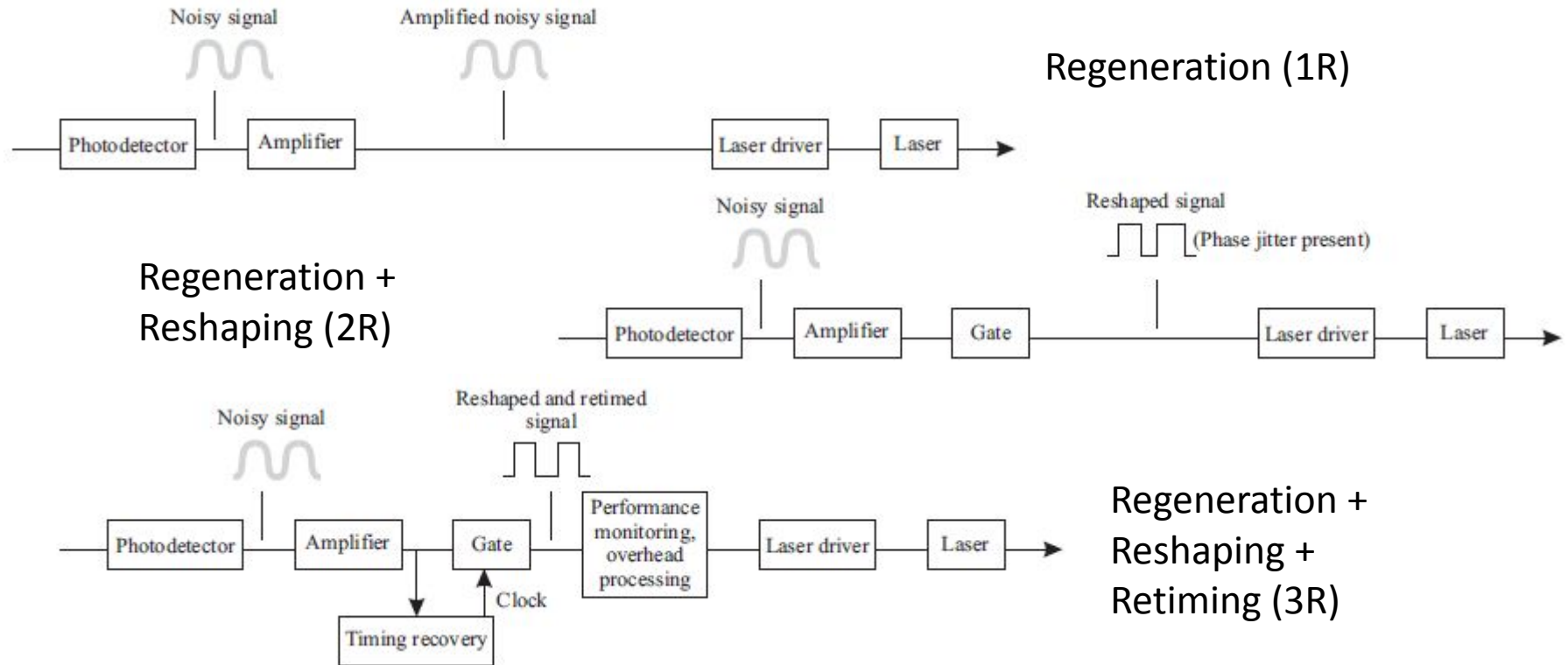


Μετατροπείς μήκους κύματος

- Ο μετατροπέας μήκους κύματος αλλάζει το μήκος κύματος ενός σήματος.
- Χρειάζεται σε ένα δίκτυο WDM επειδή
 - τα δεδομένα μπορεί να βρίσκονται σε ένα μήκος κύματος ακατάλληλο για μετάδοση (π.χ. αν εκπέμπονται αρχικά στο 1310nm τότε για να τα μεταφέρουμε σε ένα σύγχρονο δίκτυο θα πρέπει να τα φέρουμε στο 1550nm). Στην περίπτωση αυτή ο μετατροπέας μήκους κύματος ονομάζεται *transponder*.
 - θέλουμε να βελτιώσουμε την χρήση των πόρων του δικτύου (δηλαδή των *lightpaths*).
 - στα όρια διαφορετικών δικτύων ενδεχομένως να χρειάζεται μετατροπή μήκους κύματος αν αυτά είναι διαχειρίσιμα μέσω διαφορετικών οντοτήτων που δεν συντονίζονται μεταξύ τους την κατανομή των μηκών κύματος.
- Κατηγοριοποίηση μετατροπέων μήκους κύματος:
 - fixed input, fixed output.
 - fixed input, variable output.
 - variable input, fixed output.
 - variable input, variable output.



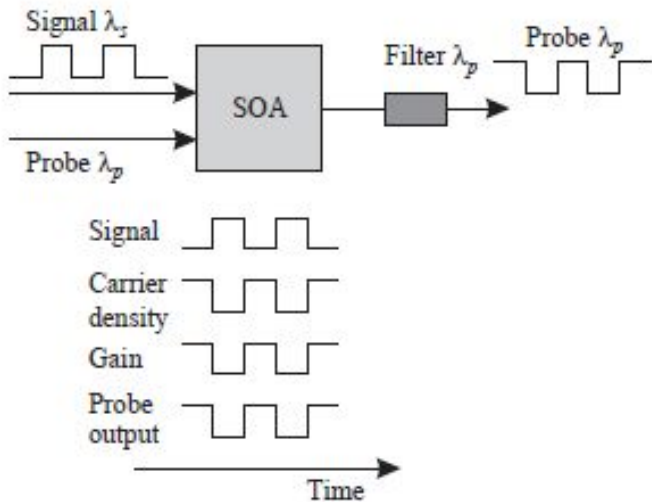
Οπτικοηλεκτρονική Προσέγγιση



- Το σήμα ανιχνεύεται και ως ένα σημείο αναγεννιέται (regeneration) εκπεμπόμενο σε ένα νέο μήκος κύματος.
- Συνήθως είναι variable input, fixed output.



Οπτικές Προσεγγίσεις: Gating (*)



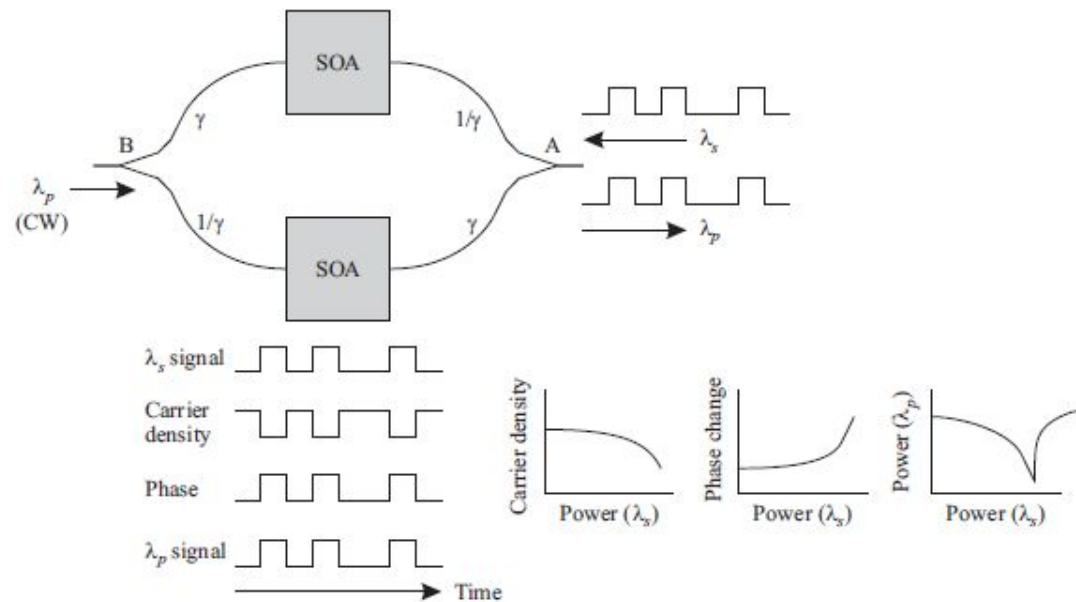
- Βασίζεται σε Cross Gain Modulation (CGM) μέσα σε SOA.
- υψηλό σήμα (bit «1») στο $\lambda_s \rightarrow$ χαμηλό κέρδος \rightarrow δεν ενισχύεται πολύ το σήμα στο λ_p .
- ρυθμοί μέχρι 10Gb/s (το CGM είναι γρήγορο φαινόμενο)

• Μειονεκτήματα:

- ❖ υψηλή ισχύ εισόδου για να συμβεί ικανοποιητικό CGM ($\sim 0\text{dBm}$).
- ❖ μικρός λόγος σβέσης εισόδου ($\leq 10\text{dB}$)
- ❖ εκτός του cross gain υπάρχει και το cross phase που μπορεί να προκαλέσει σημαντική παραμόρφωση σήματος εξόδου.
- ❖ Χρειάζεται φίλτρο για να «κόψει» το λ_p στην έξοδο.



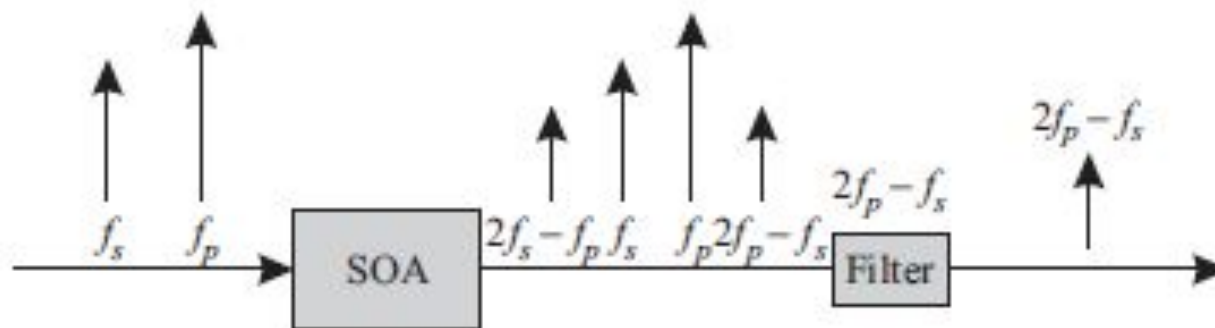
Οπτικές Προσεγγίσεις: Συμβολόμετρο (*)



- Οι διαφορές φάσεις στον κάθε SOA λόγω XPM μετατρέπονται σε διαφορές πλάτους στο συμβολόμετρο.
- Μικρότερη ισχύ, καλύτερος λόγος σβέσης



Οπτικές Προσεγγίσεις: FWM (*)

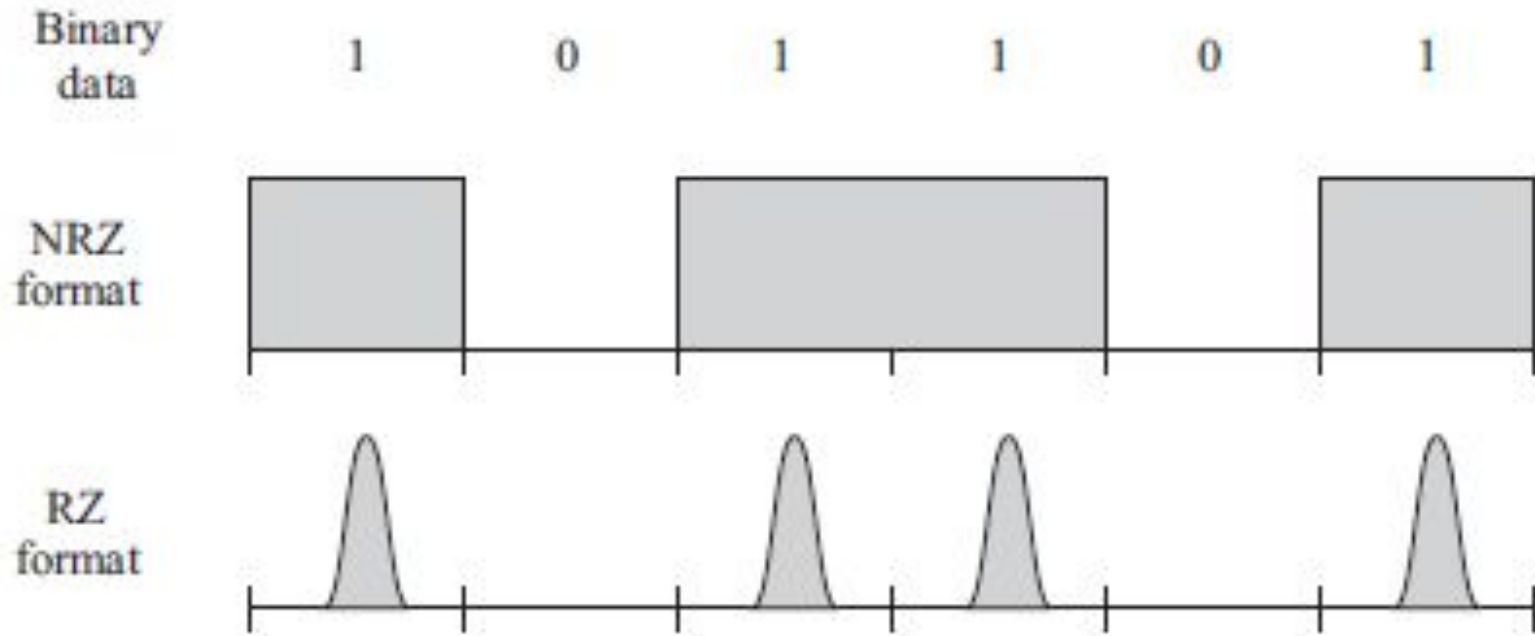




Μέρος 3^ο: Διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση οπτικών σημάτων



Διαμόρφωση On/Off (OOK).





RZ και NRZ

- Non-return to zero (NRZ): ο παλμός του «1» καταλαμβάνει **ολόκληρη** την διάρκεια του bit.
 - αποδοτικότερη χρήση του φάσματος από το RZ.
 - μικρότερη ισχύ κορυφής σε σχέση με το RZ για να έχουμε την ίδια *ενέργεια ανά bit*.
 - Πρόβλημα στην περίπτωση διαδοχικών «1» → Χάνεται ο συγχρονισμός.
- DC ισορροπία: όλες οι ακολουθίες bit που μπορούν να μεταδοθούν πρέπει να αντιστοιχούν στην ίδια μέση ισχύ.
 - πιο εύκολη στρατηγική για το κατώφλι απόφασης στο δέκτη
 - *line coding*: είναι ένας γραμμικός κώδικας που μετατρέπει k bit μηνύματος σε κωδικές λέξεις των n bits έτσι ώστε να έχουν DC ισορροπία και αρκετές μεταβάσεις. Παράδειγμα ο κώδικας (8,10) του Fibre Channel.
 - *scrambling*: μετατρέπουμε απλά τα bit εισόδου (XOR με μία άλλη ακολουθία bit). Αποδοτικότερη χρήση φάσματος αλλά δεν είναι εγγυημένη η DC ισορροπία.
- Στην πράξη:
 - NRZ με ταχύτητες 155Mb/s έως 10Gb/s.
 - Line coding στο Gigabit Ethernet και στο Fibre Channel.
 - Το Scrambling είναι απλό και πολύ διαδεδομένο.



Διαμόρφωση σε υποφέρουσες

- Η φέρουσα συχνότητα ενός σήματος στο $\lambda=1550\text{nm}$ είναι η $f=c/\lambda\cong 2\times 10^{14}\text{Hz}$.
- Η πληροφορία αποτυπώνεται πάνω σε αυτή την συχνότητα, δηλαδή το σήμα είναι $y(t)=x(t)\cos(2\pi ft)$.
- Γιατί να μην διαμορφώσουμε το $x(t)$ με παρόμοιο τρόπο; $x(t)=x_1(t)\cos(2\pi f_1 t)+\dots+x_N(t)\cos(2\pi f_N t)$.
- Τα f_1, \dots, f_N ονομάζονται υποφέρουσες συχνότητες.
- Είναι ένας εύκολος τρόπος να πολυπλέκουμε (ηλεκτρονικά) πολλά μικρού ρυθμού σήματα $x_1(t), \dots, x_N(t)$ σε ένα σήμα.
- Χρησιμοποιείται:
 - για μετάδοση αναλογικής τηλεόρασης και δεδομένων
 - στο μητροπολιτικό δίκτυο για την μετάδοση των δεδομένων πολλών χρηστών
 - για την παράλληλη μετάδοση καναλιών ελέγχου.



Φασματική Απόδοση

- Φασματική απόδοση είναι ο λόγος του ρυθμού μετάδοσης προς το εύρος ζώνης του σήματος.
- Μετριέται σε bit/s/Hz.
- Θεωρητικά, χρησιμοποιώντας on/off keying (OOK), μπορούμε να μεταδώσουμε με φασματική απόδοση 1b/s/Hz.
- Ωστόσο στην πράξη πετυχαίνουμε αποδόσεις τις τάξης 0.4b/s/Hz.
- Μπορούμε να βελτιώσουμε την απόδοση χρησιμοποιώντας πιο εξελιγμένα συστήματα διαμόρφωσης από το OOK.
- Παράδειγμα είναι η διαμόρφωση duobinary που αυξάνει την απόδοση κατά 50%, δηλαδή 0.6b/s/Hz.



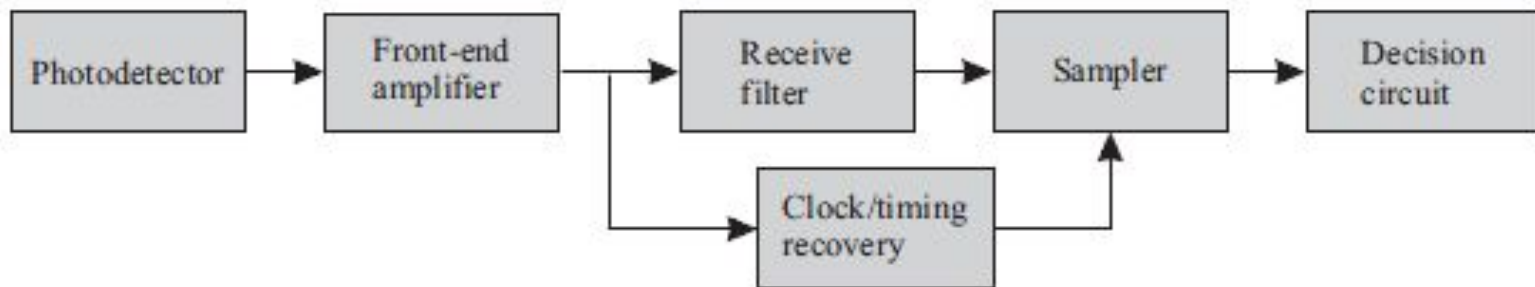
Διαμόρφωση πολλαπλών επιπέδων

- Ένα πιο απλός τρόπος για την αύξηση της φασματικής απόδοσης είναι η χρήση περισσότερων επιπέδων.
- Το ΟΟΚ έχει $M=2$ στάθμες, μία για το 0 και μία για το 1.
- Θα μπορούσαμε (στο ίδιο εύρος ζώνης) να κωδικοποιήσουμε το μήνυμα σε $M=4$ στάθμες θεωρώντας δύο διαδοχικά bit.
- Έτσι, «00» \rightarrow 0, «01» \rightarrow 1, «10» \rightarrow 2, «11» \rightarrow 3.
- Η απόδοση πολλαπλασιάζεται επί $\log_2 M$.
- Ωστόσο, η εφαρμογή τέτοιων σχημάτων είναι σχετικά περιορισμένη επειδή είναι δυσκολότερη η υλοποίηση του δέκτη.



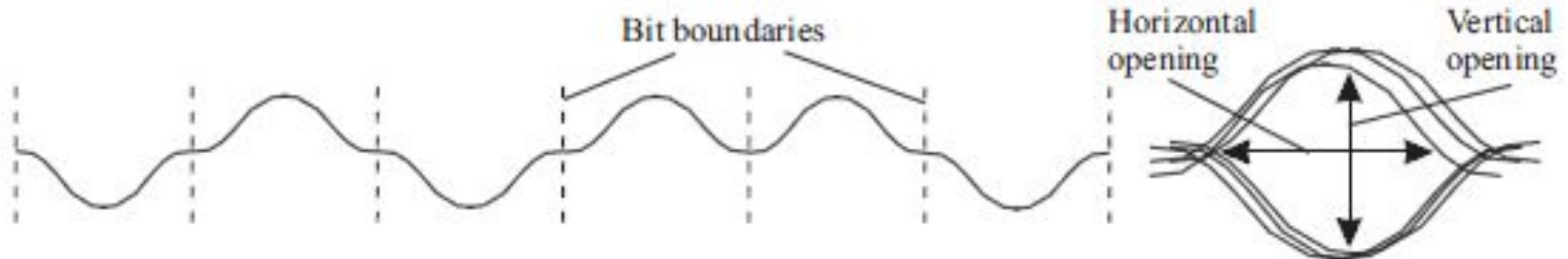
Φώραση σημάτων

- Η ποιότητα της ανίχνευσης των bit στο δέκτη χαρακτηρίζεται από το Bit Error Rate (Ρυθμός Σφάλματος Bit).
- Στα οπτικά συστήματα μπορούμε να πετύχουμε τιμές του BER από 10^{-9} έως 10^{-15} .

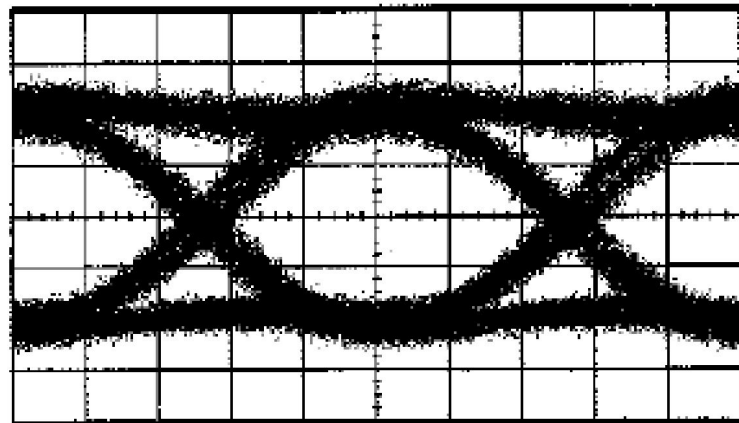




Διάγραμμα Ματιού



- Το διάγραμμα ματιού συντίθεται από την υπέρθεση των κυματομορφών που λαμβάνουμε στα διαδοχικά bit.
- Κάθετο άνοιγμα → δείχνει την επίδραση του θορύβου.
- Οριζόντιο άνοιγμα → σφάλματα χρονισμού (ατελής ανάκτηση ρολογιού).





Ιδανικός Δέκτης

- Ο ιδανικός δέκτης στην ουσία μετράει τα φωτόνια που λαμβάνει και αποφασίζει για το bit που λαμβάνει.
- Καθόλου φωτεινή ισχύ→bit “0”
- Ύπαρξη φωτεινή ισχύος→bit “1”
- Πρόκειται για άμεση φάραση (αποφασίζουμε για τα bit βασισμένοι σε πληροφορία της ισχύος του σήματος λήψης).
- Ακόμα και απουσία άλλων θορύβων υπάρχει μία εγγενής τυχειότητα στην κίνηση των φωτονίων.
- Όταν η ισχύς του σήματος είναι ίση με P έχουμε P/hf φωτόνια που ακολουθούν κατανομή Poisson (πιο σωστά οι αφίξεις ακολουθούν στατιστική Poisson).
- Δηλαδή σε μία διάρκεια $T=1/B$ όπου B ο ρυθμός των bit η πιθανότητα να φτάσουν n φωτόνια είναι, $\exp(-PT/hf)(PT/hf)^n/n!$
- Στην περίπτωση όπου έχουμε bit 1 ο δέκτης μπορεί να αποφασίσει ότι πρόκειται για bit 0 με πιθανότητα ($n=0$), $\exp(-PT/hf)$.
- Οπότε αν τα bit είναι ισοπίθανα (δηλαδή εμφανίζονται με πιθανότητα $1/2$), έχουμε $BER=1/2\exp(-PT/hf)=1/2\exp(-M)$ όπου M είναι ο αριθμός των φωτονίων.
- Κβαντικό όριο. Για $BER=10^{-12}$, έχουμε $M=27$ φωτόνια ανά bit.



Θερμικός θόρυβος

- Οφείλεται στην τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων που υπάρχει πάντα σε μη μηδενικές θερμοκρασίες ($T > 0^\circ\text{K}$).
- Σε μία αντίσταση R και σε θερμοκρασία T η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του θορύβου είναι $R_{nn}(\tau) = \langle n(t)n(t+\tau) \rangle = 4k_B T/R_L \delta(\tau)$ όπου $\delta(\tau)$ είναι η συνάρτηση του Dirac.
- Σε ένα εύρος ζώνης B_e έχουμε διακύμανση (variance) εξαιτίας του θερμικού θορύβου, $\sigma_{\text{th}}^2 = (4k_B T/R_L) B_e$.
- Ορίζουμε την παράμετρο I_t έτσι ώστε $I_t^2 = 4k_B T/R$, οπότε $\sigma_{\text{th}}^2 = I_t^2 B_e$. Τυπικές τιμές είναι $I_t = 1 \text{ pA}/\text{Hz}^{1/2}$.
- Το ηλεκτρικό εύρος ζώνης B_e συνήθως κυμαίνεται μεταξύ $1/(2T)$ και $1/T$.
- Πέρα από το ηλεκτρικό εύρος ζώνης, υπάρχει και το οπτικό εύρος ζώνης του δέκτη B_o . Συνήθως θέτουμε $B_o = 2B_e$.
- Στην περίπτωση που ο δέκτης χρησιμοποιεί ηλεκτρονικό ενισχυτή, $\sigma_{\text{th}}^2 = (4k_B T/R_L) B_e F$, όπου F είναι η εικόνα θορύβου του ενισχυτή (3-5dB).



Θόρυβος βολής (shot)

- Εξαιτίας της τυχαίας άφιξης των φωτονίων, τα ηλεκτρόνια έχουνε και αυτά μία τυχειότητα.
- Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το φωτόρευμα δίνεται από την σχέση $I = \bar{I} + i_s$.
- Το i_s μπορούμε να θεωρήσουμε πως είναι τυχαία Gaussian διαδικασία με μηδενική μέση τιμή και αυτοσυσχέτιση $R(\tau) = \sigma_{\text{shot}}^2 \delta(\tau)$.
- Στην περίπτωση των δεκτών pin έχουμε
 - $\bar{I} = RP$
 - $\sigma_{\text{shot}}^2 = 2e\bar{I}B_e$.
- Στην περίπτωση των δεκτών APD,
 - $\bar{I} = R_{\text{APD}} P = G_m RP$.
 - $\sigma_{\text{shot}}^2 = 2eG_m^2 F_A(G_m) RPB_e$.
 - $F_A(G_m) = k_A G_m + (1 - k_A)(2 - 1/G_m)$, όπου ο συντελεστής k_A είναι ο λόγος ιονισμού ($k_A < 1$ για το Si στα $0.8\mu\text{m}$ ενώ $k_A = 0.7$ για το InGaAs στο $1.3\mu\text{m}$ και $1.55\mu\text{m}$).
- Η συνολική διακύμανση θορύβου είναι $\sigma^2 = \sigma_{\text{shot}}^2 + \sigma_{\text{th}}^2$.



Δέκτης με οπτική προενίσχυση

- Οι δέκτες με οπτική προενίσχυση προσπαθούν να αυξήσουν την ισχύ του σήματος ως προς την ισχύ του θερμικού θορύβου και του θορύβου shot.
- Δυστυχώς όμως υπάρχει και ο θόρυβος ενισχυμένης αυθόρμητης εκπομπής (amplified spontaneous emission – ASE).
- Είναι οπτικός θόρυβος που παρουσιάζεται στην έξοδο του ενισχυτή. Εμφανίζεται και στις δύο πολώσεις του φωτός και
- Σε κάθε συνιστώσα πόλωσης η ισχύς του θορύβου είναι $P_N = n_{sp} hf(G-1)B_o = P_n B_o$. Η συνολική ισχύς θορύβου είναι $2P_N$.
- Η παράμετρος n_{sp} είναι μία παράμετρος που καθορίζει πόσο ισχυρή είναι η αναστροφή πληθυσμών στον ενισχυτή.
 - Ιδανικά $n_{sp} = 1$ (πλήρης αναστροφή).
 - Στην πράξη $n_{sp} = 3$ έως 5.



Δέκτης με οπτική προενίσχυση

- Στην περίπτωση του δέκτη με προενίσχυση ο δέκτης βλέπει το πεδίο $E_s(t) + E_n(t)$ και το φωτόρρευμα είναι ανάλογο του $|E_s + E_n|^2 = |E_s|^2 + 2\text{Re}\{E_s E_n^*\} + |E_n|^2$.
- Έχουμε δηλαδή μίξη σήματος με θόρυβο και μίξη θορύβου με θόρυβο.
 - $I = RGP$, όπου G είναι το κέρδος του ενισχυτή.
 - $\sigma_{\text{th}}^2 = I^2 B_e$.
 - $\sigma_{\text{shot}}^2 = 2eR(GP + P_n(G-1)B_o)B_e$.
 - $\sigma_{\text{sig-sp}}^2 = 4R^2GPP_n(G-1)B_e$.
 - $\sigma_{\text{sp-sp}}^2 = 2R^2[P_n(G-1)]^2(2B_o - B_e)B_e$.
- Πηλίκιο σήμα προς θόρυβο:
 - πριν τον ενισχυτή, $\text{SNR}_i = (RP)^2 / (2\text{Re}PB_e)$.
 - μετά τον ενισχυτή (θεωρώντας ότι ο sig-sp είναι ο ισχυρότερος) $\text{SNR}_o = (RGP)^2 / (4R^2PG(G-1)n_{\text{sp}}hfB_e)$.
 - εικόνα θορύβου $F_n = \text{SNR}_i / \text{SNR}_o \approx 2n_{\text{sp}}$.

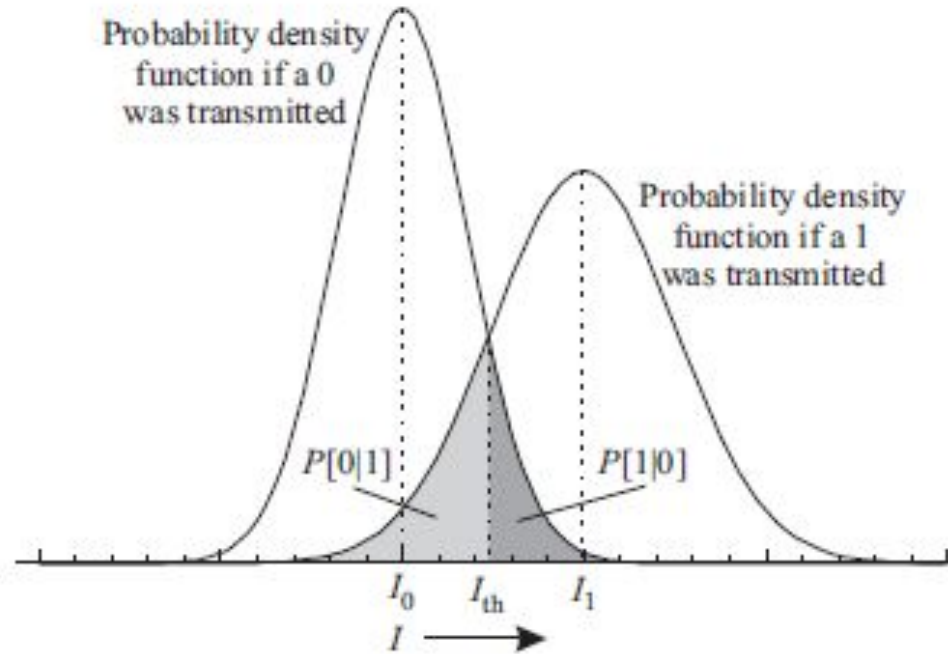


Υπολογισμός του BER

- Πως αποφασίζει ένας δέκτης; Συγκρίνει το ρεύμα που λαμβάνεται I με μία τιμή κατωφλίου I_{th} .
 - Αν $I \geq I_{th}$, τότε θεωρεί ότι μεταδόθηκε «1».
 - Αν $I < I_{th}$, τότε θεωρεί ότι μεταδόθηκε «0».
- Παρουσία θορύβου, ο δέκτης μπορεί να κάνει σφάλμα.
- Θεωρούμε πως ο θόρυβος είναι Gaussian, δηλαδή ακολουθεί κατανομή $f(i_n) = 1/[\sigma(2\pi)^{1/2}] \exp(-i_n^2/2\sigma^2)$.
- $P[i|j]$ = πιθανότητα ο δέκτης να αποκωδικοποιήσει i ενώ ο πομπός έχει στείλει j .
- Η πιθανότητα σφάλματος (δηλαδή το BER) είναι $BER = P[1]P[0|1] + P[0]P[1|0]$.
- Στην περίπτωση ισοπίθανων bit έχουμε $P[0] = P[1] = 1/2$, επομένως $BER = 1/2(P[0|1] + P[1|0])$.



Υπολογισμός του BER



$$P[0|1] = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{I_{th}} dx e^{-(x-I_1)^2/(2\sigma_1^2)} = Q\left(\frac{I_1 - I_{th}}{\sigma_1}\right)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} dy e^{-y^2/2}$$

$$P[1|0] = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \int_{I_{th}}^{+\infty} dx e^{-(x-I_0)^2/(2\sigma_0^2)} = Q\left(\frac{I_{th} - I_0}{\sigma_0}\right)$$



Βέλτιστο Κατώφλι

- Βέλτιστο κατώφλι \rightarrow ελάχιστο BER
- Θα πρέπει η παράγωγος του BER ως προς το I_{th} να είναι μηδέν, $dBER/dI_{th}=0$.
- Μπορούμε να δείξουμε ότι το βέλτιστο κατώφλι και η αντίστοιχη ελάχιστη πιθανότητα σφάλματος είναι:

$$I_{opt} = \frac{\sigma_0 I_1 + \sigma_1 I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

$$BER_{opt} = Q\left(\frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0}\right)$$



Ευαισθησία του δέκτη

- Πόση ισχύς χρειάζεται ώστε να πετύχουμε μία ορισμένη πιθανότητα σφάλματος BER_t ?
- Έστω ότι $BER_t = Q(\gamma)$. Π.χ.
 - για $BER_t = 10^{-12}$ έχουμε $\gamma \approx 7$.
 - για $BER_t = 10^{-9}$ έχουμε $\gamma \approx 6$.
- Αν θεωρήσουμε πως $P_0 = 0$ (δηλαδή η ισχύς που λαμβάνεται όταν μεταδίδουμε «0» είναι ίση με 0), τότε
 - $I_0 = RP_0 = 0$.
 - $I_1 = RP_1$.
 - $\gamma = (I_1 - I_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) = I_1 / (\sigma_1 + \sigma_0)$.
 - Η μέση ισχύς είναι $P_{avg} = P_1 / 2$.
 - $P_{avg} = (\sigma_0 + \sigma_1) \gamma / (2R)$.
- Αυτή είναι η ευαισθησία του δέκτη, δηλαδή η μέση ισχύς ανά bit που πρέπει να λάβει ώστε να πετύχει πιθανότητα σφάλματος BER_t .
- Ο αριθμός των φωτονίων M είναι $M = 2P_{avg} / (hfB)$ όπου B είναι ο ρυθμός των bit.

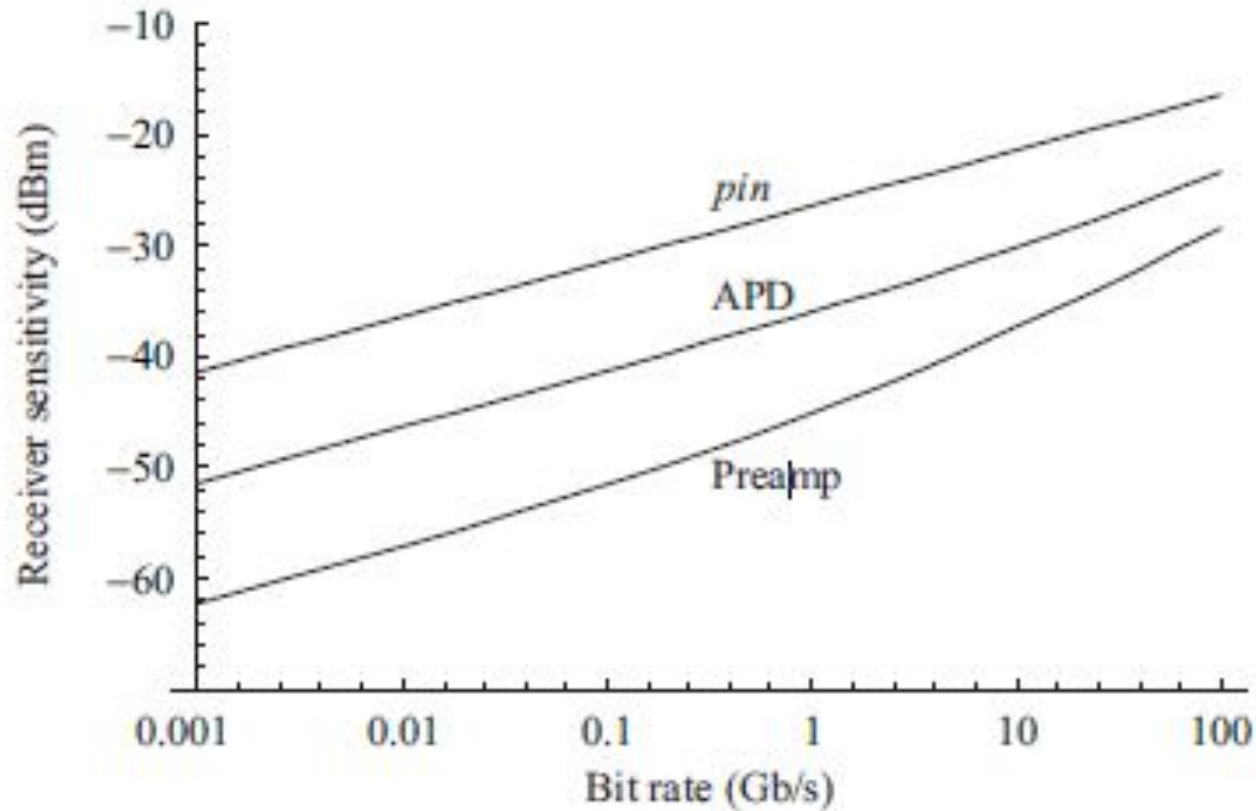


Ευαισθησία του δέκτη

- Σε κάθε περίπτωση υπολογίζουμε την ισχύ θορύβου του «1» και την ισχύ θορύβου του «0».
 - Δέκτης PIN, $\sigma_1^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh}^2$, $\sigma_0^2 = \sigma_{th}^2$, $\sigma_{th}^2 = (4k_B T/R)FB_e$,
 $\sigma_{sh}^2 = 4eRP_{avg} B_e$.
 - Δέκτης APD, $\sigma_1^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{sh}^2$, $\sigma_0^2 = \sigma_{th}^2$, $\sigma_{th}^2 = (4k_B T/R)FB_e$,
 $4eG_m^2 F_A (G_m) RP_{avg} B_e$.
 - Προενισχυμένος δέκτης:
 - $\sigma_{sig-sp}^2 = 8R^2 G P_{avg} n_{sp} (G-1) h f B_e$.
 - $I_1 = 2G R P_{avg}$.
 - Θεωρούμε $\sigma_0 \ll \sigma_1$, $n_{sp} = 1$, $B_e = B/2$ μεγάλο κέρδος, $G(G-1) \cong G^2$,
 άρα $\gamma = 2G R P_{avg} / (\sigma_1 + \sigma_0) \cong P_{avg} / 2 / h f / B = M/2$.
 - επομένως BER = Q([M/2]^{1/2}), 98 φωτόνια για 10⁻¹².

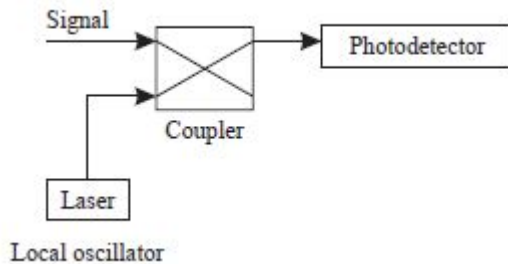


Ευαισθησία δέκτη





Σύμφωνη Φώραση



$$P_r(t) = \left[\sqrt{bP} \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{P_{LO}} \cos(2\pi f_{LO} t) \right]^2$$

$$= bP + P_{LO} + 2\sqrt{bPP_{LO}} \cos(2\pi(f_c - f_{LO})t)$$

- Στα παραπάνω το b είναι 0 ή 1 ανάλογα με το ποιο bit μεταδώσαμε.
- Στην περίπτωση ομόδυνης φώρασης ($f_c = f_{LO}$):
 - $I_1 = R[P + P_{LO} + 2(P_{LO}P)^{1/2}]$.
 - $I_0 = RP_{LO}$.
 - Στην περίπτωση μεγάλης PLO επιβιώνει μόνο ο θόρυβος shot, $\sigma_1^2 = 2eI_1B_e$, $\sigma_0^2 = 2eI_0B_e$.
 - $BER = Q([RP/2/e/B_e]^{1/2}) = Q(M^{1/2})$ αν θεωρήσουμε ότι $B_e = B/2$.
 - 49 φωτόνια (τα μισά σε σχέση με τον προενισχυμένο δέκτη) για $BER = 10^{-12}$.



Σύμφωνη Φώραση

- Πλεονεκτήματα:
 - Καλύτερη ευαισθησία σε σχέση με ένα προενισχυμένο δέκτη άμεσης φώρασης (3dB).
 - Δυνατότητα αποπολυπλεξίας καναλιών WDM αλλάζοντας την f_{LO} και χρησιμοποιώντας ένα ηλεκτρονικό φίλτρο.
- Μειονεκτήματα:
 - Ευαισθησία στην πόλωση. Υπάρχουν πιο πολύπλοκοι ωστόσο δέκτες οι οποίοι προσφέρουν αναισθησί από την πόλωση.
 - Ευαισθησία στο θόρυβο φάσης του τοπικού ταλανωτή αλλά και του σήματος.
 - Γενικά πιο πολύπλοκη δομή από τους προενισχυμένους δέκτες.



Κώδικες Διόρθωσης και Ανίχνευσης Σφαλμάτων

- Με την χρήση πλεονασμού (επιπλέον bit) προστατεύουμε τα bit του μηνύματος και μάλιστα μπορούμε να διορθώσουμε και λάθη.
- *Forward Error Correction* (FEC): διόρθωση σφαλμάτων στο δέκτη.
- Στην περίπτωση του SONET/SDH αλλά και άλλων δικτύων επικοινωνιών κάνουμε ανίχνευση και όχι διόρθωση σφαλμάτων.
- Στην περίπτωση αυτή στέλνουμε μία αίτηση για επανάληψη του μηνύματος (Automatic repeat request – ARQ).



Forward Error Correction - FEC

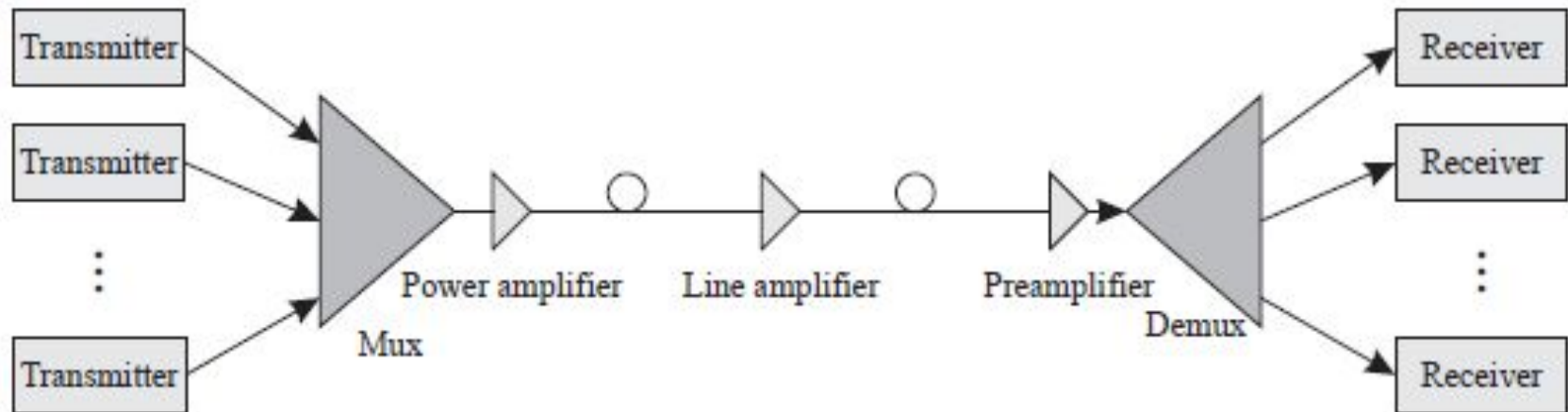
- Χρησιμοποιούνται για μείωση του BER, κάτι που είναι σημαντικό για τα οπτικά συστήματα που πρέπει να λειτουργούν με πιθανότητες σφάλματος 10^{-12} .
- Το FEC συνήθως δεν χρειάζεται σε απλά συστήματα ή σε συστήματα WDM με μεγάλη φασματική απόσταση.
- Ωστόσο σε συστήματα WDM η χρήση FEC είναι επιτακτική πολλές φορές επειδή εξαιτίας της μη γραμμικότητας δεν μπορούμε να αυξήσουμε την ισχύ εκπομπής για να μειώσουμε το BER.
- Υπόβαθρο του BER (*BER floor*): Πολλές φορές, η ελάχιστη τιμή του BER περιορίζεται από θορύβους όπως η διαφωνία.
- Το SNR της διαφωνίας θα δούμε ότι δεν εξαρτάται από την ισχύ των καναλιών και επομένως δεν μπορεί να μειωθεί εύκολα.
- Οι κώδικες FEC μπορούν ωστόσο να μειώσουν το BER περισσότερο.



Σχεδιασμός Συστημάτων Μετάδοσης



Μοντέλο ενός συστήματος WDM



- Μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε
 - Την πιθανότητα σφάλματος (BER).
 - Το περιθώριο ισχύος (σε dB) για να πέσει το BER σε μία συγκεκριμένη τιμή (π.χ. 10^{-9} ή 10^{-15}).



Μεγέθη που μας ενδιαφέρουν

Parameter	Symbol	Typical Value/Units
Effective area	A_e	$50 \mu\text{m}^2$
Pulse envelope	$A(z, t)$	
Fiber core radius	a	$4 \mu\text{m}$ (SMF)
Bit rate	B	Mb/s or Gb/s
Electrical bandwidth	B_e	GHz
Optical bandwidth	B_o	GHz
Bit error rate	BER	$10^9 - 10^{-15}$
Normalized effective index	b	
Capacitance	C	μF (microfarad)
Speed of light in vacuum	c	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
Dispersion parameter	D	ps/nm-km
Electric flux density	D	coulombs/m ²
Material dispersion	D_M	ps/nm-km
Polarization-mode dispersion	D_{PMD}	ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Waveguide dispersion	D_W	ps/nm-km
Dispersion-shifted fiber	DSF	$D = 0$ ($1.55 \mu\text{m}$)
Electric field	E	V/m
Energy level	E	differences, ΔE , expressed in nm using $\Delta E = hc/\lambda$
Electronic charge	e	1.6×10^{-19} coulombs
Amplifier noise figure	F	dB
Finesse	F	
Optical carrier frequency	f_c	THz
Pump frequency	f_p	THz



Μεγέθη που μας ενδιαφέρουν

Parameter	Symbol	Typical Value/Units			
Signal frequency	f_s	THz	Effective index	n_{eff}	
Amplifier gain	G		Refractive index	n	
Amplifier unsaturated gain	G_{max}		Spontaneous emission factor	n_{sp}	
Brillouin gain coefficient	g_B	4×10^{-11} m/W	Core refractive index	n_1	
Raman gain coefficient	g_R	6×10^{-14} m/W	Cladding refractive index	n_2	
Magnetic field	H	A/m	Nonlinear index coefficient	\tilde{n}	$2.2-3.4 \times 10^{-8}$ $\mu\text{m}^2/\text{W}$
Planck's constant	h	6.63×10^{-34} J/Hz	Amplifier output saturation power	P_{out}^{sat}	mW
Photocurrent	I_p	μA or nA	Amplifier saturation power	P^{sat}	mW
Thermal noise current	I_{th}	$3 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$	Electric polarization	P	coulombs/m ²
Boltzmann's constant	k_B	1.38×10^{-23} J/°K	Linear polarization	P_L	coulombs/m ²
Dispersion length	L_D	km	Local-oscillator power	P_{LO}	dBm
Effective length	L_e	km	Nonlinear polarization	P_{NL}	coulombs/m ²
Link length	L	km	Power	P	W or mW
Nonlinear length	L_{NL}	km	Power penalty	PP	dB
Coupling length	l	μm	Penalty (signal-dependent noise)	PP _{sig-dep}	dB
Distance between amplifiers	l	km	Penalty (signal-independent noise)	PP _{sig-indep}	dB
Average number of photons per 1 bit	M		Receiver sensitivity	\bar{P}_{sens}	dBm
Nonzero-dispersion-shifted-fiber	NZ-DSF	$-6 \leq D \leq 6$ ps/nm-km (1.55 μm)	Load resistance	R_L	Ω or k Ω
			Photodetector responsivity	\mathcal{R}	A/W
			Reflectivity	R	
			Real part of x	SR[x]	
			Extinction ratio	r	



Power penalty (Ποινή ισχύος)

- Μπορούμε να χαρακτηρίσουμε την σημασία κάθε ενός παράγοντα με το power penalty.
- Το power penalty (PP) είναι η επιπλέον ισχύς εκπομπής που πρέπει να εκπέμψουμε ώστε λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα αυτό να πετύχουμε μία τιμή στόχο για το BER.
- Εναλλακτικά μπορούμε να ορίσουμε το power penalty ως την επιβάρυνση που φέρνει ο παράγοντας στο όρισμα γ που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό του BER.
- Έστω δηλαδή ότι απουσία του παράγοντα έχουμε ισχύ λήψης P_1, P_0 για τα bit "1" και "0" αντίστοιχα και ισχύ θορύβου σ_1 και σ_0 .
- Επίσης, παρουσία του παράγοντα έχουμε ισχύ λήψης P'_1, P'_0 για τα bit "1" και "0" αντίστοιχα και ισχύ θορύβου σ'_1 και σ'_0 .
- Αν $\gamma = R(P_1 - P_0) / (\sigma_1 + \sigma_0)$ και $\gamma' = R(P'_1 - P'_0) / (\sigma'_1 + \sigma'_0)$, τότε $PP = -10 \log_{10}(\gamma' / \gamma)$.



Πομπός

- Υπάρχουν διάφορες παράμετροι που καθορίζουν τον πομπό:
 - Ισχύ εκπομπής, λόγος σβέσης, χρόνος ανόδου και καθόδου για τους παλμούς που παράγονται, είδος διαμόρφωσης, επίπεδο καταστολής τρόπων, σταθερότητα μήκος κύματος και ακρίβεια.
- Ισχύ εκπομπής:
 - για DFB η ισχύς είναι περίπου από 1mW έως 10mW.
 - Με χρήση οπτικής ενίσχυσης μπορεί να έχουμε και 50mW ισχύ εκπομπής.
 - Το άνω όριο τίθεται από τα μη γραμμικά φαινόμενα και διάφορες οδηγίες προστασίας.
- Λόγος σβέσης:
 - $P_{\text{avg}} = (P_1 + P_0)/2 = (P_1 + P_1/r)/2 \rightarrow P_1 = 2rP_{\text{avg}}/(r+1)$ και $P_0 = 2P_{\text{avg}}/(r+1)$.
 - $P_1 - P_0 = 2(r-1)P_{\text{avg}}/(r+1)$.
 - Στην περίπτωση θορύβου που δεν εξαρτάται από την ισχύ του σήματος (π.χ. θερμικός) έχουμε $PP = -10 \log_{10}([r-1]/[r+1])$.
 - Στα παραπάνω θεωρήσαμε ότι τα δύο συστήματα, (ιδανικό $r = \infty$) και (μη ιδανικό r πεπερασμένο) έχουν την ίδια μέση ισχύ εκπομπής.



Δέκτης

- Η πιο σημαντική παράμετρος είναι η ευαισθησία, δηλαδή η οπτική ισχύς που χρειάζεται για να πετύχουμε μία τιμή-στόχο BER.
- Συνήθως την υπολογίζουμε (ή την μετρούμε πειραματικά) για ένα $BER=10^{-12}$.
- Επίσης μας ενδιαφέρει πόση είναι η ανώτερη ισχύ που μπορεί να προσπέσει στην είσοδο του δέκτη (overload parameter).

Bit Rate	Type	Sensitivity	Overload Parameter
155 Mb/s	pinFET	-36 dBm	-7 dBm
622 Mb/s	pinFET	-32 dBm	-7 dBm
2.5 Gb/s	pinFET	-23 dBm	-3 dBm
2.5 Gb/s	APD	-34 dBm	-8 dBm
10 Gb/s	pinFET	-18 dBm	-1 dBm
10 Gb/s	APD	-24 dBm	-6 dBm
40 Gb/s	pinFET	-7 dBm	3 dBm



Οπτικοί ενισχυτές: Κόρος ισχύος

- Οι EDFA προσφέρουν σημαντική ενίσχυση σε ένα εύρος ζώνης 35nm. Ωστόσο:
 - Εισάγεται θόρυβος (ASE).
 - Το κέρδος εξαρτάται από την ισχύ εκπομπής.
 - Το κέρδος εξαρτάται από την συχνότητα.
- Ο κόρος του κέρδους περιγράφεται από την εξίσωση $G=1+P_{\text{sat}}/P_{\text{in}} \ln(G_{\text{max}}/G)$.
- P_{sat} είναι η ισχύς κόρου εισόδου.
- Ισχύς κόρου εξόδου P_{sout} είναι η ισχύς εξόδου που λαμβάνουμε όταν το κέρδος έχει πέσει κατά 3dB.
- $G_{\text{max}}/2=1+P_{\text{sat}}/P_{\text{in}} \ln 2 \rightarrow P_{\text{in}} \cong (G_{\text{max}}/2)^{-1}(\ln 2)P_{\text{sat}} \rightarrow P_{\text{sout}}=P_{\text{sat}}(\ln 2)$.
- Σε πρακτικά συστήματα έχουμε P_{sout} από 10dBm μέχρι 20dBm.

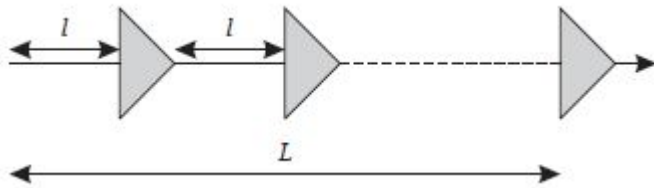


Εξίσωση συχνοτικής απόκρισης ενός EDFA

- Είναι σημαντική στην περίπτωση συστημάτων WDM που αποτελούνται από διαδοχικούς ενισχυτές.
- Οφείλεται στο ότι το κέρδος του ενισχυτή εξαρτάται από το μήκος κύματος, $G=G(\lambda)$.
- Έτσι μικρόμεταβολές (π.χ. κατά 1dB/στάδιο) παρουσιάζονται ενισχυμένες (π.χ. 10dB μετά από δέκα στάδια).
- Οι EDFA έχουν σχετικά ομαλό κέρδος στην περιοχή των 1545nm-1560nm. Ωστόσο δεν συμβαίνει το ίδιο στην περιοχή 1530nm-1545nm.
- Εξίσωση (ομαλοποίηση) φασματικής απόκρισης.
 - Χρήση αρχικής παραμόρφωσης (κάθε κανάλι με διαφορετική ισχύ).
 - Εξίσωση σε κάθε στάδιο (π.χ. με χρήση φίλτρων διηλεκτρικών στρωμάτων και φράγματα Bragg).



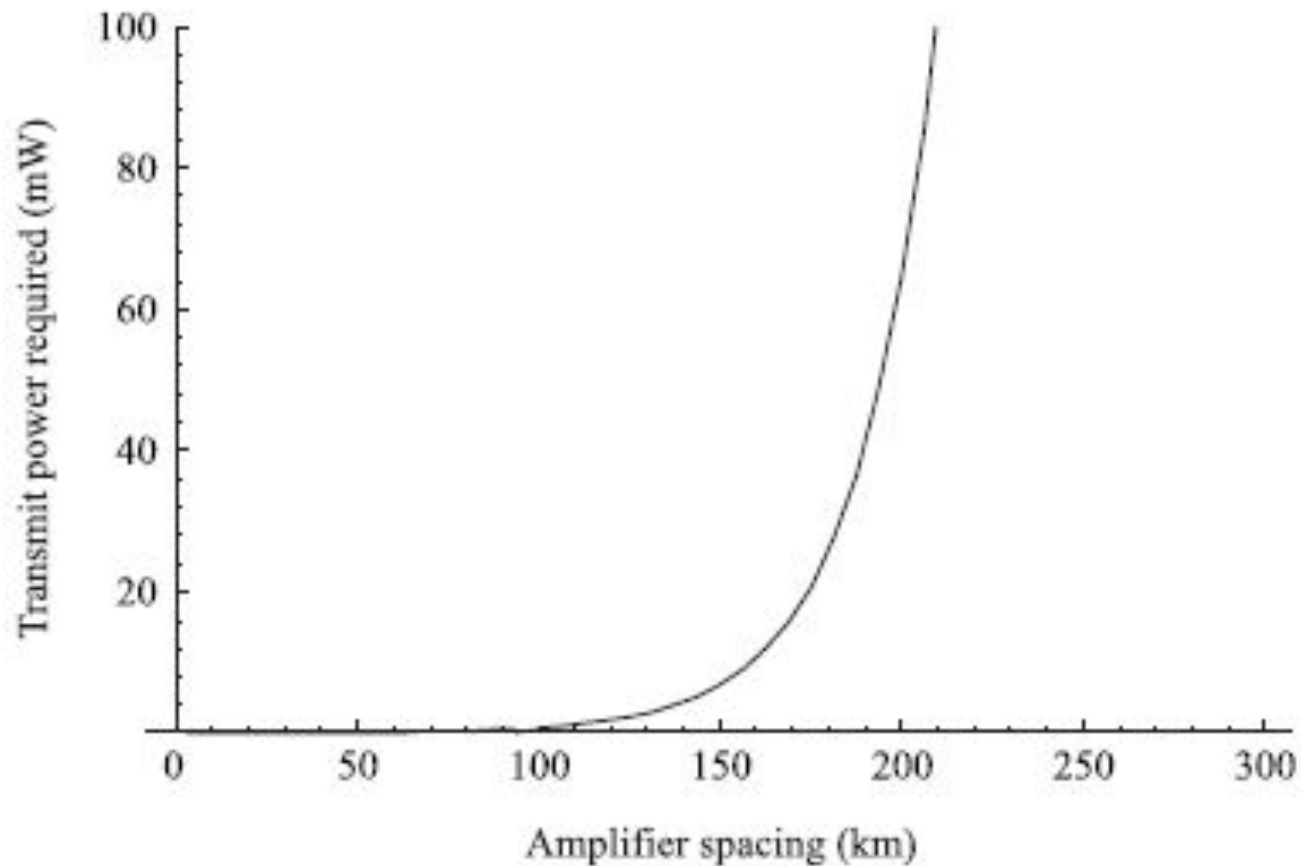
Ενισχυτές σε σειρά



- Θεωρούμε πως για κάθε στάδιο το κέρδος είναι κοινό όπως και η ισχύς εξόδου.
- Ισχύς στην έξοδο σε κάθε στάδιο: $P_{out} = P_{out} \exp(-al)G + 2P_n B_0 (G-1)$ = ισχύς στην είσοδο εξασθενημένη εξαιτίας των απωλειών και ενισχυμένη εξαιτίας του ενισχυτή + θόρυβος ASE.
- Κέρδος ενισχυτή: $G = 1 + P_{sat} / [P_{out} \exp(-al)] \ln[G_{max} / G]$.
- Δύο εξισώσεις με δύο αγνώστους (G, P_{out}).
- Σε μία πιο απλή προσέγγιση ας απαιτήσουμε $G = \exp(-al)$.
- Τότε η ισχύς του οπτικού θορύβου θα είναι $P_{noise} = 2P_n B_0 (G-1)L/l = 2P_n B_0 (e^{-al} - 1)L/l$.
- Δεδομένου του OSNR (οπτικό SNR) που θέλουμε να πετύχουμε, απαιτούμε η ισχύς με την οποία εκπέμπεται το σήμα (και επομένως με την οποία λαμβάνεται αφού $G = \exp(-al)$) να είναι: $P \geq (\text{OSNR}) P_{noise}$.



Απόσταση ενισχυτών και ισχύς εκπομπής





Ποινή ισχύος στην περίπτωση τοπικής ενίσχυσης

- Από το προηγούμενο διάγραμμα: μικρή ισχύ εκπομπής \rightarrow μικρό spacing ενισχυτών.
- Ισχύς θορύβου: $l = \ln G / a$ άρα: $P_{\text{noise}} = 2LP_n B_0 a (G-1) / \ln G$.
- Ελάχιστη τιμή θορύβου όταν $G \rightarrow 1$ οπότε $(G-1) / \ln G \rightarrow 1$.
- Επομένως ο θόρυβος ενισχύεται κατά $(G-1) / \ln G$ σε σχέση με την κατανεμημένη ενίσχυση ($G \rightarrow 1, l \rightarrow 0$).
- Αν θεωρήσουμε πως έχουμε την ίδια ισχύ εκπομπής P ενώ μεταβάλλουμε το l τότε βλέπουμε πως το OSNR μεταβάλλεται σύμφωνα με το $(G-1) / \ln G$.
- Άρα έχουμε ποινή ισχύος $(G-1) / \ln G$.
- Οι ενισχυτές Raman επομένως μπορούν να μειώσουν τον συνολικό θόρυβο.



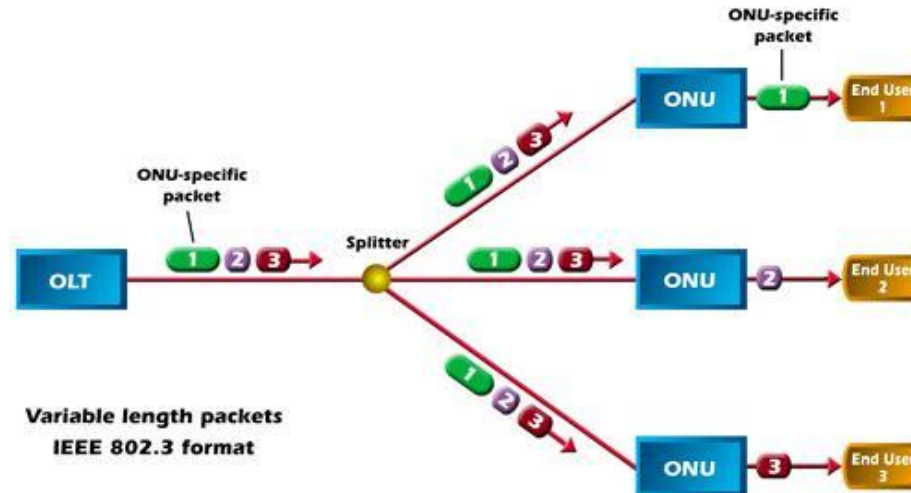
Ασκήσεις: Παθητικό δίκτυο

- Σχεδιασμός ζεύξης: Ο πιο κάτω πίνακας δίνει τις τιμές των κυρίων παραμέτρων που διαθέτει ένας μηχανικός που πρόκειται να σχεδιάσει μια οπτική ζεύξη με PON για $\lambda=1,3\mu\text{m}$ και ρυθμό $R=140\text{Mb/s}$. Η ίνα που χρησιμοποιείται έχει απώλειες $\alpha=0,5\text{dB/Km}$. Οι συνδρομητές δεν απέχουν περισσότερο από 10Km από το κεντρικό κόμβο. Πόσους συνδρομητές μπορεί να εξυπηρετήσει;

	LASER	LASER - PIN	LED - APD	LED - PIN
	πομπός- APD δέκτης			
Ισχύς πομπού σε dBm	0	0	-10	-10
Ευαισθησία δέκτη για $R=140\text{Mb/s}$ και για $\text{BER}=10^{-9}$	-45	-30	-45	-30
Απώλειες συζεύξης σε dB	1,2	1,2	1,2	1,2
Ανοχές σε dB	6	6	6	6



Ασκήσεις: Παθητικό δίκτυο



- $P_T - aL - L_{\text{splitter}} - P_{\text{tol}} \geq P_R$
- $L_{\text{splitter}} \text{ (dB)} = 10 \log_{10}(N)$
- $L = 10 \text{ Km.}$
- $L_{\text{splitter}} \leq P_T - aL - P_{\text{tol}} - P_R$
- $10 \log_{10}(N) \leq P_T - aL - P_{\text{tol}} - P_R$



Ασκήσεις: Παθητικό δίκτυο

- $10\log_{10}(N) \leq P_T - aL - P_{\text{tol}} - P_R$.
 - LASER/APD, $N_{\text{max}} = 1905$.
 - LASER/PIN, $N_{\text{max}} = 60$.
 - LED/APD, $N_{\text{max}} = 190$.
 - LED/PIN, $N_{\text{max}} = 6$.
- Αλλά: σε ένα ρεαλιστικό σενάριο θα πρέπει να είναι δύναμη του 2.
 - LASER/APD, $N_{\text{max}} = 1024$.
 - LASER/PIN, $N_{\text{max}} = 32$.
 - LED/APD, $N_{\text{max}} = 128$.
 - LED/PIN, $N_{\text{max}} = 4$.



Ασκήσεις: Υπολογισμός BER

- Θεωρήστε ένα δέκτη με $\lambda=0.8\mu\text{m}$ με μία φωτοδίοδο πυριτίου p-i-n. Υποθέστε εύρος ζώνης $\Delta f=1\text{GHz}$, κβαντική απόδοση $\eta=60\%$, αντίσταση φορτίου $R_L=50\Omega$, ρεύμα σκότους $I_d=1\text{nA}$ και εικόνα θορύβου ενισχυτή $F_{ndB}=3\text{dB}$. Ο δέκτης φωτίζεται με οπτική ισχύ $P_{in0}=0.5\mu\text{W}$ για bit «0» και $P_{in1}=20\mu\text{W}$ για bit «1» (27C).
- Να βρεθεί το BER στο δέκτη.



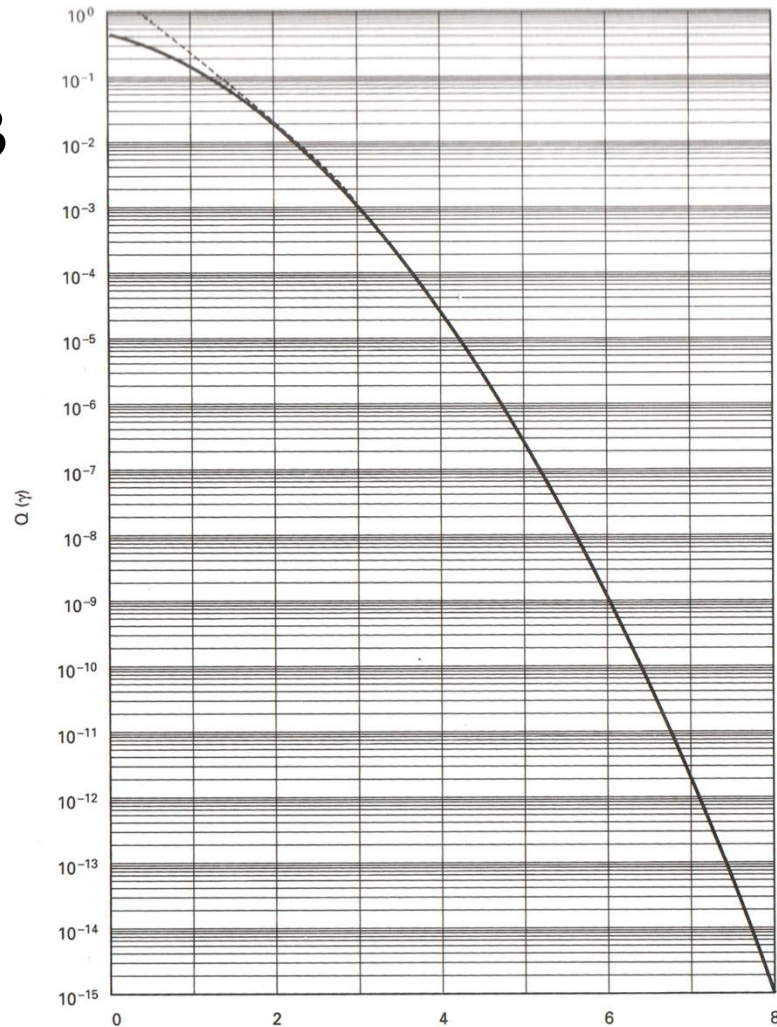
Ασκήσεις: Υπολογισμός BER

- Η βασική σχέση που χρησιμοποιούμε είναι η $BER=Q(\gamma)$ όπου $\gamma=(m_1-m_0)/(\sigma_1+\sigma_0)$.
- Έχουμε $m_1=RP_{in1}$ όπου $R\cong(n\lambda)/1.24=0.3871A/W$ οπότε $m_1=7.74\times 10^{-6} A$.
- $m_0=RP_{in0}=1.93\times 10^{-7} A$.
- Θόρυβος στο «1», $\sigma_1^2=2q(m_1+I_d)$
 $\Delta f+4k_B TF_n \Delta f/R_L=6.64\times 10^{-13} A^2$.
- Θόρυβος στο «0», $\sigma_0^2=2q(m_0+I_d)$
 $\Delta f+4k_B TF_n \Delta f/R_L=6.62\times 10^{-13} A^2$.



Ασκήσεις: Υπολογισμός BER

- $\gamma = (m_1 - m_0) / (\sigma_1 + \sigma_0) = 4.63$
- $BER = Q(\gamma) \approx 1.8 \times 10^{-6}$.





Ασκήσεις: Υπολογισμός Ευαισθησίας

- Θεωρήστε ένα δέκτη με $\lambda=0.8\mu\text{m}$ με μία φωτοδίοδο πυριτίου p-i-n. Υποθέστε κβαντική απόδοση $\eta=60\%$, αντίσταση φορτίου $R_L=50\Omega$, αγνοούμε το ρεύμα σκότους ($I_d=0$), άπειρο λόγο σβέσης και εικόνα θορύβου ενισχυτή $F_{ndB}=3\text{dB}$.
- Να υπολογιστεί η ευαισθησία του δέκτη για ρυθμό $R_b=10\text{Gb/s}$ θεωρώντας φασματική απόδοση $\varepsilon_f=0.4\text{b/s/Hz}$ και $\text{BER}=10^{-9}$.



Ασκήσεις: Υπολογισμός Ευαισθησίας

- Ευαισθησία: η μέση οπτική ισχύς P που πρέπει να λάβουμε στο δέκτη ώστε να έχουμε $\text{BER}=10^{-9}$.
- $P_0=0$ άρα $P=(P_1+P_0)/2=P_1/2$.
- Για ευκολία θέτω $P_1=x$.
- Έχουμε $\Delta f=R_b/\varepsilon_f=25\text{GHz}$.
- $R\approx(n\lambda)/1.24=0.3871\text{A/W}$
- $m_1=Rx=0.387x$
- $m_0=0$.
- $\sigma_1^2=2qRx\Delta f+4k_BTF_n\Delta f/R_L=Ax+B$, $A=3.1\times 10^{-9}\text{A}^2\text{W}^{-1}$ και $B=1.65\times 10^{-11}\text{A}^2$.
- $\sigma_0^2=B$.



Ασκήσεις: Υπολογισμός Ευαισθησίας

- Για $\text{BER}=10^{-9}$, $\gamma \cong 6$.
- $\gamma = Rx / (\sigma_1 + \sigma_0) = Rx / ([Ax+B]^{1/2} + B^{1/2})$
- $Rx = \gamma [Ax+B]^{1/2} + \gamma B^{1/2}$
- $(Rx - \gamma B^{1/2})^2 = \gamma^2 [Ax+B]$
- $R^2 x^2 - 2\gamma B^{1/2} x - \gamma^2 Ax = 0$
- $x = (2\gamma B^{1/2} + \gamma^2 A) / R^2 = 3.26 \times 10^{-4} \text{W}$.
- $P = x/2 = 1.633 \times 10^{-4} \text{W} = -7.8 \text{dBm}$.

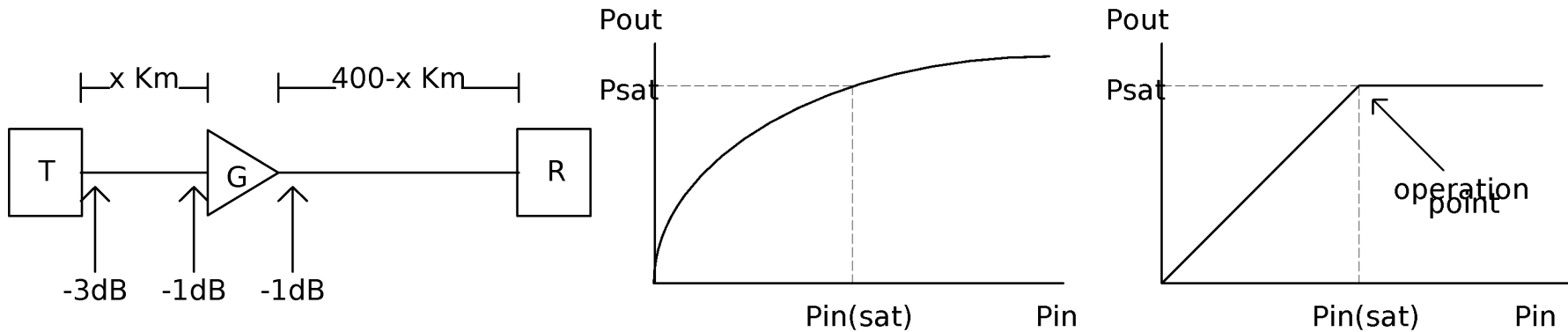


Ασκήσεις: Οπτικοί Ενισχυτές

- Σε μια ζεύξη χρησιμοποιείται οπτικός ενισχυτής με μέγιστη απολαβή 40dB και ισχύ κόρου στην έξοδο του 100mW. Η ευαισθησία του δέκτη στο ρυθμό της ζεύξης είναι -40dBm. Η απώλεια της ίνας είναι $\alpha=0,2\text{dB/Km}$ ενώ οι άλλες απώλειες είναι:
 - ποσοστό σύζευξης πομπού-ίνας 50%
 - απώλεια σύνδεσης ίνας-ενισχυτή 1dB
 - απώλεια σύνδεσης ενισχυτή-ίνας 1dB
- Ποια η απαιτούμενη ισχύς πομπού για ζεύξη 400Km;
- Σε ποιά θέση πρέπει να τοποθετήσουμε τον ενισχυτή;
- η διασπορά αγνοείται.



Ασκήσεις: Οπτικοί Ενισχυτές



- Προσεγγίζουμε την καμπύλη του ενισχυτή με δύο ευθείες.
- Για $P_{\text{in}} < P_{\text{sat}} - G_{\text{max}}$ θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δουλεύει με σταθερό κέρδος G_{max} (ενεργός περιοχή).
- Για $P_{\text{in}} > P_{\text{sat}} - G_{\text{max}}$ θεωρούμε ότι ο ενισχυτής δουλεύει με σταθερή ισχύ εξόδου P_{max} (περιοχή κορεσμού).
- Προφανώς εμείς θέλουμε ο ενισχυτής να δίνει την μέγιστη ισχύ εξόδου αλλά και το κέρδος του να είναι μέγιστο!
- Επομένως θέλουμε $P_{\text{in}} = P_{\text{sat}} - G_{\text{max}}$.
- $P_{\text{out}} - L - \alpha(400-x) = P_{\text{R}}$, $20 - 1 - 0,2(400-x) = -40$, $x = 105\text{Km}$
- $P_{\text{T}} - L' - \alpha x - L = P_{\text{in}}$, $P_{\text{T}} - 3 - 0,2 \times 105 - 1 = -20$, $P_{\text{T}} = 5\text{dBm}$