



ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Μάθημα 7ο-8ο-9ο

Φωτοεκπέμπουσες
δίοδοι Laser - LD

Αρ. Τσίπουρας, Phd
Email: aris@di.uoa.gr



Περιεχόμενα

Εισαγωγή

- Laser. Βασικές αρχές
- Τύποι Laser
- Ημιαγωγικά Laser
 - Αναστροφή Πληθυσμών - Εκπομπή Σύμφωνης Ακτινοβολίας - Οπτική ενίσχυση
 - Χαρακτηριστική P-I
 - Εξισώσεις Ρυθμών (Rate equations)
 - Τεχνικές Κλειδώματος Τρόπων (Mode Locking)
- Τύποι ημιαγωγικών Laser
 - Laser κατανεμημένης ανάδρασης, DFB
 - Laser Απλής Συχνότητας
 - Laser Εξωτερικής Κοιλότητας
 - Συντονιζόμενες Δίοδοι DBR
 - VCSELs
- Χαρακτηριστικά Laser
 - Λειτουργία CW και παλμική λειτουργία
 - Διαμόρφωση σήματος μικρού και μεγάλου πλάτους
 - RIN
 - Φασματικό εύρος γραμμής
- Εφαρμογές και Ασφάλεια
- Οπτικοί ενισχυτές

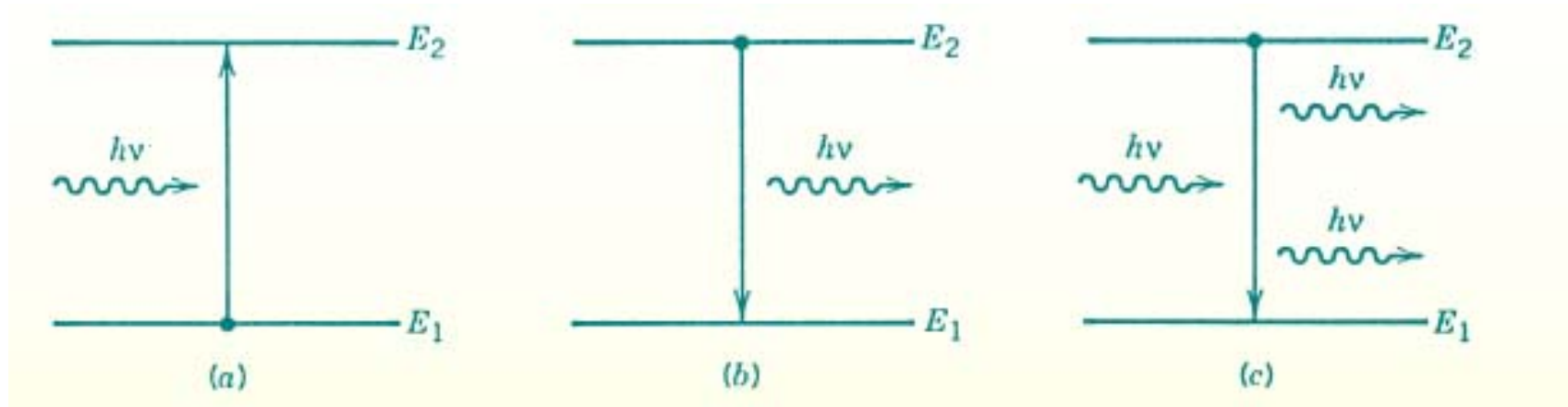


Οπτικές μεταπτώσεις I

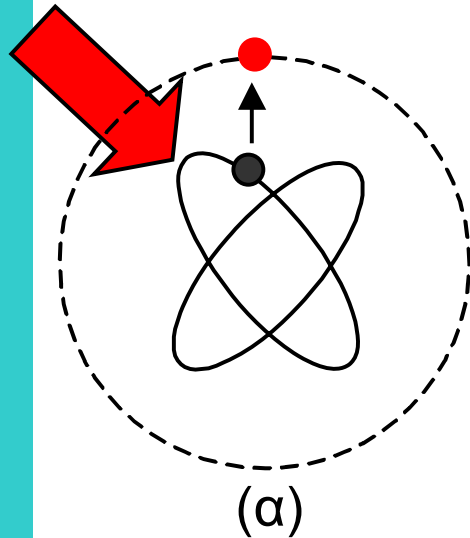
ΑΠΟΡΟΦΗΣΗ

ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗ

ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
ΔΡΑΣΗ LASER

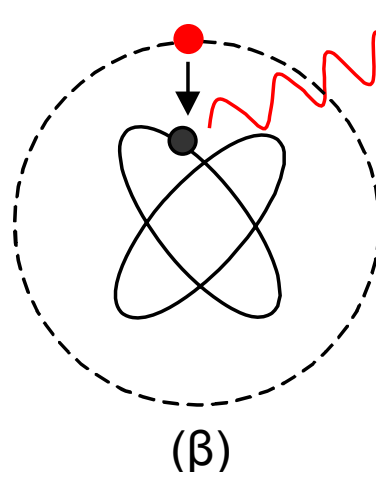


Ενέργεια



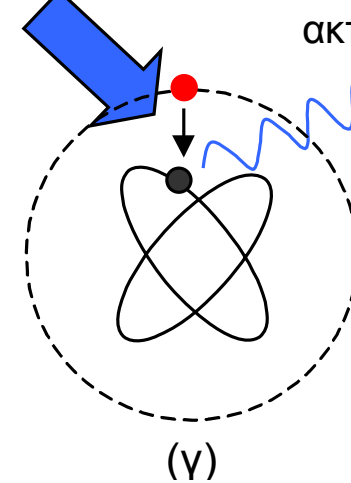
(α)

Φωτεινή
ακτινοβολία



(β)

Ενέργεια



(γ)



Οπτικές μεταπτώσεις I

- Αν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα $f > E_g/h$ προσπέσει στο υλικό επικρατεί ο μηχανισμός της απορρόφησης.
- Αν με οπτική ή ηλεκτρική διέγερση δημιουργηθεί κατάσταση αναστροφής πληθυσμών ($n_\alpha > n_\sigma$), ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής γίνεται μεγαλύτερος από το ρυθμό της απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής.
- Τα παραγόμενα φωτόνια προκαλούν την έναρξη μιας αλυσιδωτής σειράς επανασυνδέσεων που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτεινής ακτινοβολίας μεγάλης ισχύος που προστίθεται στην αρχική διέγερση
- Αυτή είναι ουσιαστικά μια διαδικασία οπτικής ενίσχυσης και αποτελεί τη **δράση LASER**
- **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation** Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας



Απορρόφηση ακτινοβολίας

- Έστω μονοχρωματική δέσμη μοναδιαίας διατομής και έντασης I που διέρχεται από το υποθετικό υλικό (E_1, E_2). Η ένταση συναρτήσει της απόστασης δίνεται από την:

$$I = I_0 \exp(-ax)$$

- Ο ρυθμός απώλειας φωτονίων ανά μονάδα όγκου από τη δέσμη όταν αυτή διέλθει από στοιχείο όγκου Δx και μοναδιαίας διατομής είναι:

$$-\frac{dN_v}{dt} = (N_1 - N_2) \rho B$$

- Επειδή $I = \rho c_0/n$ (n ο δ.δ. του μέσου) προκύπτει:

$$a = (N_1 - N_2) \frac{B h \nu}{c/n}$$



Αντιστροφή πληθυσμών

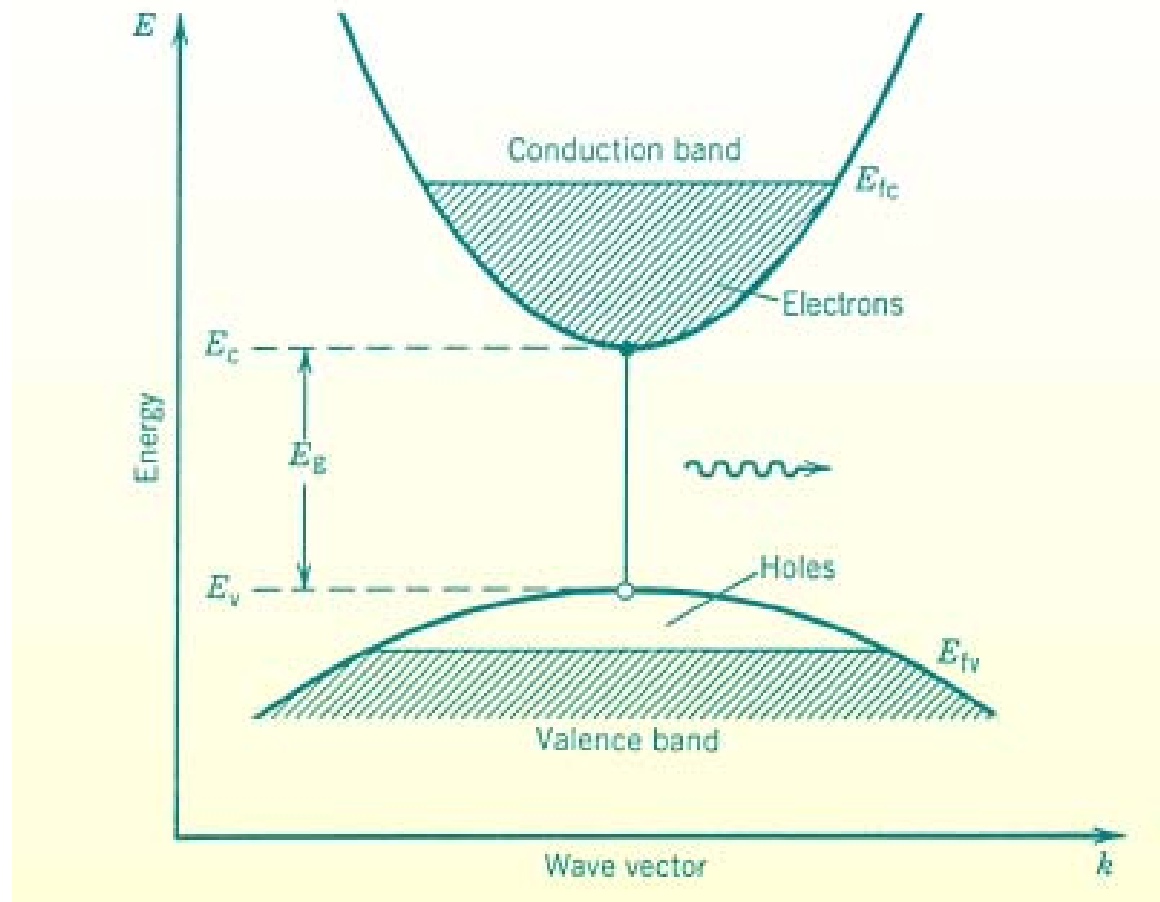
- Επομένως αν επιτευχθεί $N_2 > N_1$ (αντιστροφή πληθυσμών) με προσφορά ενέργειας (άντληση) τότε ο συντελεστής απορρόφησης γίνεται αρνητικός και έχουμε ενίσχυση της δέσμης

$$I = I_0 \exp(\kappa x) \text{ με } \kappa = -\alpha > 0$$

- Ωστόσο σε ένα σύστημα δυο επιπέδων το καλύτερο που θα μπορούσε να επιτευχθεί είναι $N_1 = N_2$
- Συνεπώς στα ατομικά συστήματα, αντιστροφή πληθυσμών επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας υλικά με 3 ή 4 ενεργειακά επίπεδα



Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς ΙΙ





Οπτικές μεταπτώσεις σε ημιαγωγούς III

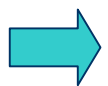
$$R_{spon}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} A(E_1, E_2) F_c(E_2) [1 - F_v(E_1)] Z_{cv}(\nu) dE_2$$

$$Z_{cv} = \frac{(2m_r)^{3/2}}{2\pi^2 \hbar^3} (h\nu - E_g)^{1/2} \quad m_r \text{ η ανηγμένη μάζα e-h}$$

$$R_{stim}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) F_c(E_2) [1 - F_v(E_1)] Z_{cv}(\nu) \rho(\nu) dE_2$$

$$R_{abs}(\nu) = \int_{E_c}^{\infty} B(E_1, E_2) F_c(E_1) [1 - F_v(E_2)] Z_{cv}(\nu) \rho(\nu) dE_2$$

- Όταν έχουμε Αναστροφή πληθυσμών: $R_{stim} > R_{abs}$



$$F_c(E_2) > F_v(E_1)$$



$$E_{Fc} - E_{Fv} > E_2 - E_1 > E_g \quad \text{ή} \quad eV_g < h\nu < eV_a$$



Σταθμοί στην Τεχνολογία του Laser

- 1916 ο Einstein περιγράφει την εξαναγκασμένη εκπομπή
 - 1958 οι Shawlow και Townes για τις αρχές λειτουργίας του laser
 - 1960 ο Maiman κατασκεύασε το πρώτο πρακτικό laser
 - 1961 1ου laser αερίου He-Ne (A. Javan, W. Bennet, D. Harriott)
 - 1962 η κατασκευή του 1ου διοδικού laser από τους R. Hall
 - 1963 Επίδειξη του πρώτου CO₂ laser από τον Patel
 - 1970 η πρώτη επίδειξη υπεριώδους laser μοριακού υδρογόνου από R. Hodgson
 - 1985 κατασκευή του 1ου laser απαλών ακτίνων X από D. Mathews
 - 1986 κατασκευή του 1ου Ti:Sapphire laser από τον Moulton
 - 1994 ο Capasso ανέπτυξαν το 1ο quantum cascade laser
 - 1996 το 1ο διοδικό laser που εκπέμπει στο μπλε από GaN (Nakamura)
- Σχόλιο: Η πρώτη φωτοδίοδος ανακαλύφθηκε τυχαία το 1907 (Henry Joseph Round)



Η πρώτη διάταξη LASER

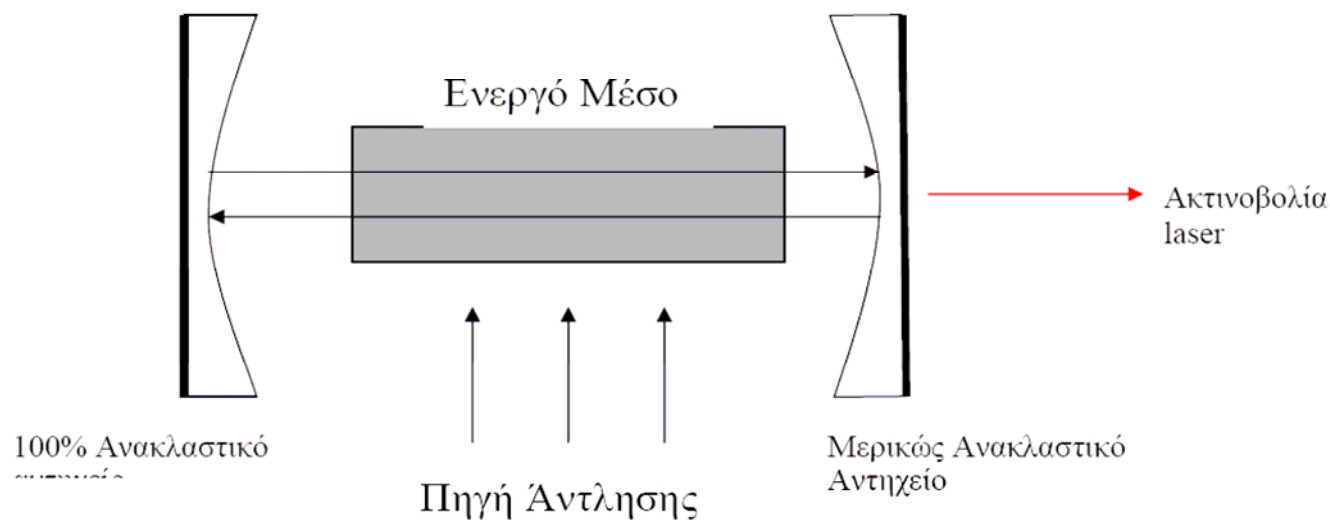


Η πρώτη διάταξη LASER που κατασκευάστηκε ήταν ένα laser Ρουβιδίου (Ruby Laser) από τον Maiman



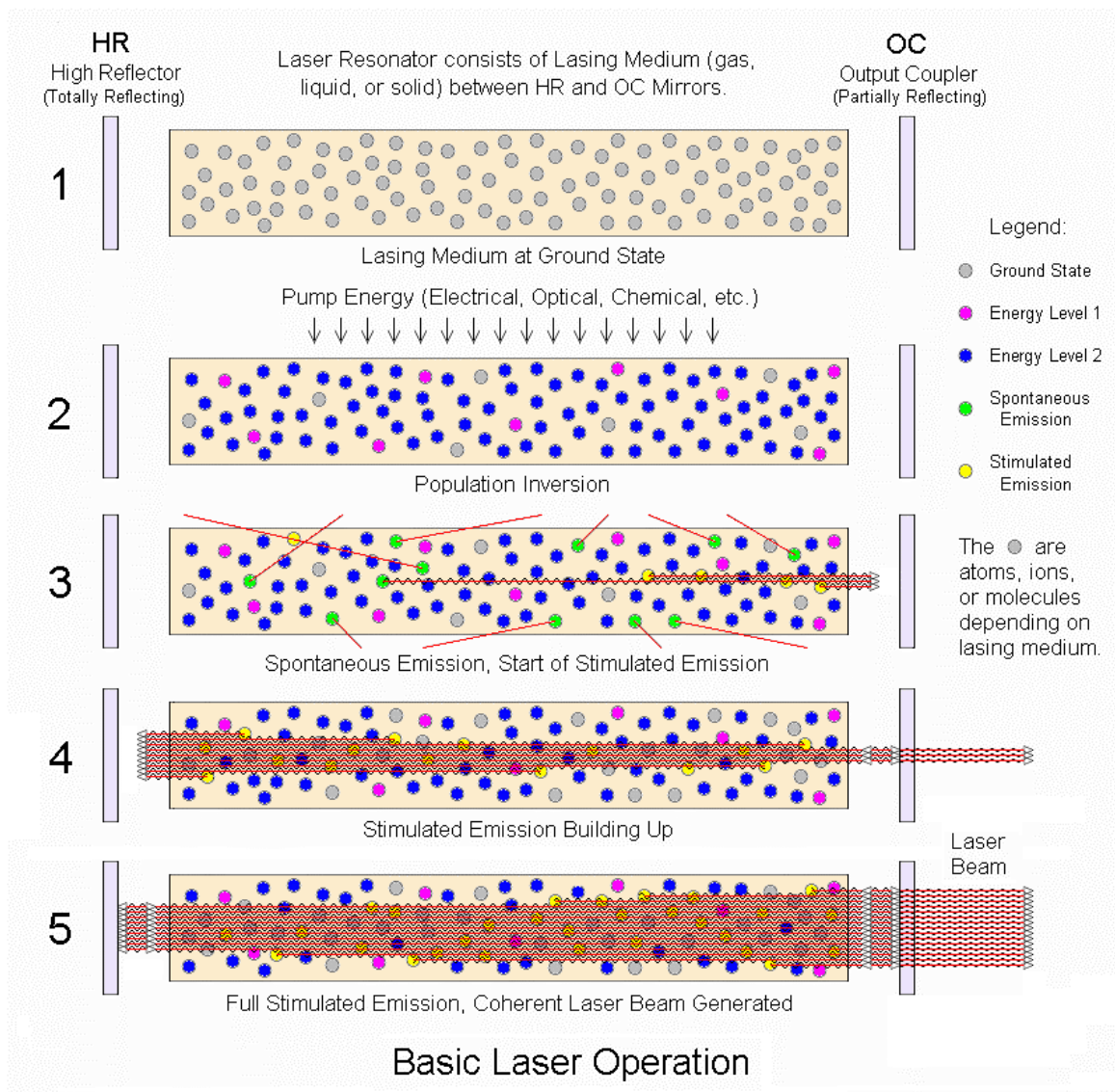
Βασική αρχή λειτουργίας

- Μια τυπική συσκευή laser αποτελείται:
 - από το ενεργό μέσο,
 - την πηγή άντλησης
 - το οπτικό αντηχείο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η ανατροφοδότηση των φωτονίων σε συγκεκριμένες συχνότητες





Βασική αρχή λειτουργίας





Ενεργό μέσο

- ❑ **Άτομα:** όπως στο laser He-Ne, στα laser Ηλίου Καδμίου, στο laser αερίου χαλκού (CVL).
- ❑ **Μόρια:** όπως στο σύστημα laser CO₂, στα excimer laser συστήματα όπως του ArF και KrF, και τα παλμικά N₂ laser
- ❑ **Υγρά:** όπως είναι το ενεργό μέσο των dye laser
- ❑ **Διηλεκτρικά - Μονωτές:** όπως είναι το ενεργό μέσο στα laser συστήματα του NdYAG αλλά και στο σύστημα Nd:glass.
- ❑ **Ημιαγωγός:** κράμματα της ομάδας III-V Ga, As, In, P



Οπτική ενίσχυση

➤ Αν I_0 η ένταση ακτινοβολίας συχνότητας ν , σε μια θέση x μέσα σε ένα υλικό η ακτινοβολία λόγω απορρόφησης και επανεκπομπής θα έχει ένταση:

$$I(x) = I_0 e^{-ax}$$

$$\text{με } a = \frac{nh\nu}{c} B_{ij} (N_i - N_j) \quad \text{και} \quad h\nu = E_j - E_i \quad \text{και} \quad n \text{ ο δ.δ.}$$

όταν $N_j > N_i$ αναστροφή πληθυσμών

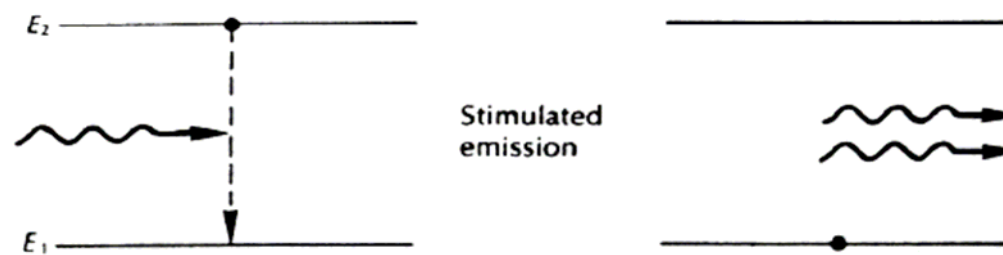
$a < 0$  **ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ** της προσπίπτουσας ακτινοβολίας

□ Η οριακή τιμή της πυκνότητας των φορέων στην οποία συμβαίνει αυτό είναι N_0 : transparency density -πυκνότητα διαφάνειας
for $N < N_0$ the medium absorbs light and is highly wavelength dependent.



Οπτική ενίσχυση - Lasing

- ❑ Η διαδικασία της εξαναγκασμένης εκπομπής συμβάλλει στην ενίσχυση lasing. Για να έχουμε ενίσχυση πρέπει:
- ❑ Το προσπίπτον φωτόνιο έχει ενέργεια ίση με $E_2 - E_1$. Τότε:
 - ❑ Το παραγόμενο φωτόνιο έχει την ίδια συχνότητα με το προσπίπτον
 - ❑ Βρίσκονται εν φάσει και έχουν την ίδια πόλωση
 - ❑ Τελικά έχουμε δύο φωτόνια ίδιας συχνότητας: σύμφωνη ενίσχυση του οπτικού κύματος



- ❑ Για την διέγερση ατόμων από την βασική ζώνη, αντιστροφή πληθυσμών, απαιτείται προσφορά ενέργειας από εξωτερική πηγή ρεύματος: πηγή άντλησης



Άντληση

- Οι παραπάνω μηχανισμοί δεν ενεργοποιούνται σε θερμοκρασία δωματίου και επομένως είναι απαραίτητη η χρήση εξωτερικής πηγής ενέργειας αφού:

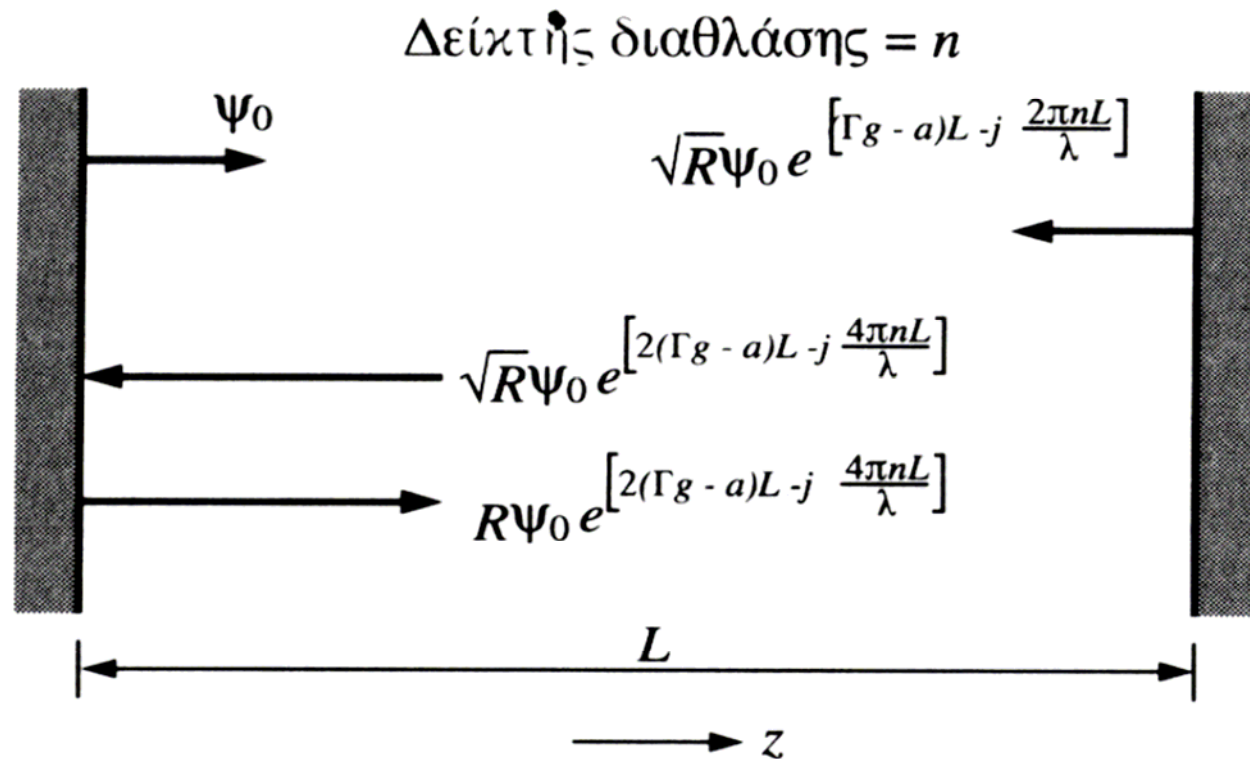
$$\frac{N_1^e}{N_0^e} = \exp\left[-\frac{(E_1 - E_0)}{kT}\right]$$

- Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή σε μια ομοιοεπαφή p-n, διαφοράς δυναμικού κατά την ορθή φορά, δηλαδή ο θετικός ακροδέκτης συνδέεται στην περιοχή τύπου p και ο αρνητικός στην περιοχή τύπου n
- Καθώς μεγάλος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων κινείται υπό την επίδραση του εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, επανασυνδέεται με ελεύθερες οπές και η επαφή ακτινοβολεί



Λειτουργία Laser. Ανάδραση

- Η προσθήκη κατόπτρων λειτουργεί ως ανάδραση προσφέροντας τα αναγκαία προσπίπτοντα φωτόνια, ενώ το ενεργό υλικό, προσφέρει το κέρδος του αναπληρώνοντας τα διεγερμένα ηλεκτρόνια λόγω της εξωτερικής πηγής





Λειτουργία Laser. Ανάδραση

Τελικά μετά από κ ανακλάσεις:

$$\Psi_{\kappa} = (\sqrt{R})^{\kappa} \Psi_0 \exp\left[\kappa(\Gamma g - a)L - j\kappa \frac{2\pi n}{\lambda} L\right]$$

κ: ο αριθμός των ανακλάσεων

Γ: Ο παράγοντας σύμπτυξης (ποσοστό οπτικής ισχύος εντός της ενεργού περιοχής με τυπικές τιμές ~0.4)

g: Το κέρδος του ενεργού υλικού

Typical: $g=200 \text{ cm}^{-1}$,
 $L=0.3 \text{ mm} \rightarrow G=400$
times

a: Οι απώλειες του ενεργού υλικού (απορρόφηση, σκέδαση, ανάκλαση - διαπερατότητα κατόπτρων)

$2\pi L n / \lambda$: η στροφή φάση απλής διαδρομής

n: Ο δείκτης διάθλασης

R: Συντελεστής ανάκλασης **ισχύος** των κατόπτρων:

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2$$

\sqrt{R} : Συντελεστής ανάκλασης **πλάτους** ηλ. πεδίου



Λειτουργία Laser. Ανάδραση

- Η οπτική ισχύς αυξάνει μόνο με την αύξηση της άντλησης
- Η ισχύς μιας σύμφωνης πρόσθεσης αυξάνει με το τετράγωνο του αθροίσματος όλων των ατομικών συνεισφορών.
- Το ένα εκ των δύο κατόπτρων που σχηματίζουν την κοιλότητα μπορεί να είναι εν μέρει διαπερατό.
- Το κέρδος g ανά μονάδα μήκους του ενεργού υλικού ισοσταθμίζει τις εσωτερικές απώλειες a .
- Τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται μέσα στο αντηχείο έχουν διακριτές συχνότητες (τρόποι διάδοσης):

$$f = \mu \frac{c/n}{2L} \quad \mu = 1, 2, \dots$$

- Με απόσταση: $\delta f = \frac{c/n}{2L}$

με τυπικές τιμές $\delta f = 200\text{GHz}$ για $L = 200 - 400\mu\text{m}$



Συνθήκη κατωφλίου

- Η διάταξη «ανάβει» μετά από πολλαπλές διελεύσεις, Όταν:

$$R \exp[2(\Gamma g - a)L] \geq 1 \quad \Rightarrow \quad \Gamma g \geq a - \frac{\ln R}{2L}$$

$$\text{και } \lambda = \frac{2nL}{\mu}, \quad n \text{ ο δ.δ. } \mu = 1, 2, \dots$$

- Καθώς αυξάνει η άντληση, μειώνεται ο δείκτης διάθλασης n στο εσωτερικό της κοιλότητας. Αυτό μειώνει την απόσταση σε μήκος κύματος μεταξύ των συντονισμών της κοιλότητας
- Η απολαβή είναι συνάρτηση της συχνότητας $g = g(\nu)$

- Γενικά:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{T_1 T_2 e^{(\Gamma g - a)L}}{\left(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{(\Gamma g - a)L}\right)^2}$$



Η οπτική απολαβή G

- Η απολαβή G είναι ανάλογη του $R_{stim} - R_{abs}$
- Υπολογίζεται αριθμητικά ή πειραματικά
- Εξαρτάται από την πυκνότητα των εγχεομένων φορέων N και για τη max τιμή της g_p ισχύει:
- $g_p(N) = \sigma_g(N - N_T)$ – Εμπειρική σχέση

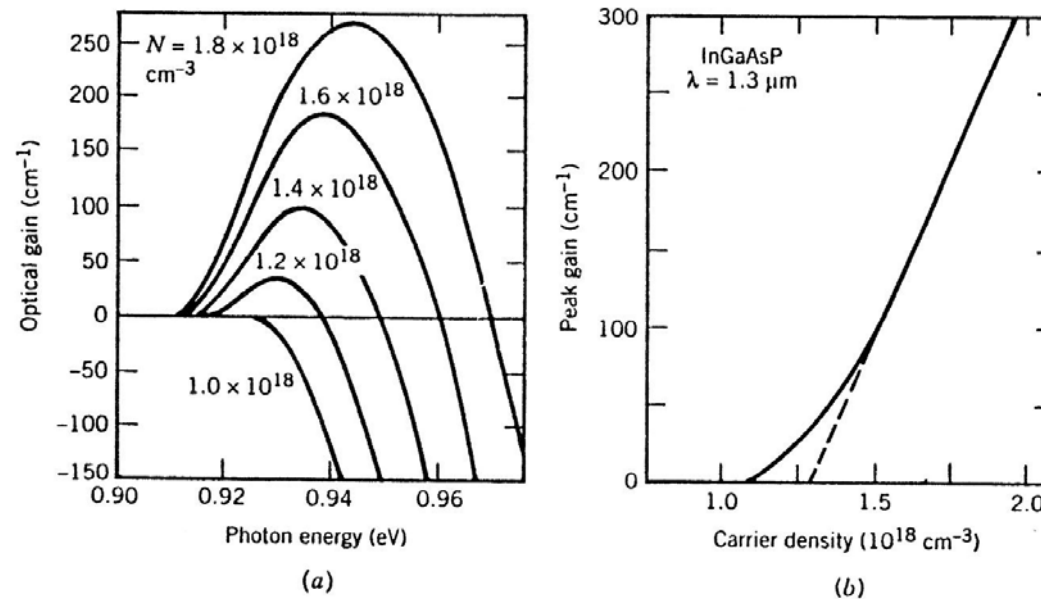
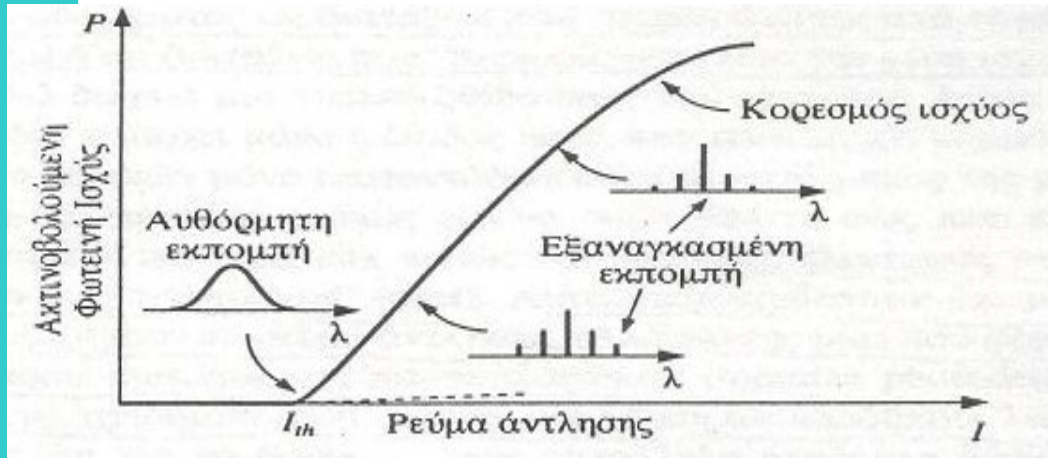


Figure 3.9: (a) Gain spectrum of a 1.3- μm InGaAsP laser at several carrier densities N . (b) Variation of peak gain g_p with N . The dashed line shows the quality of a linear fit in the high gain region. (After Ref. [2]; ©1993 Van Nostrand Reinhold; reprinted with permission.)



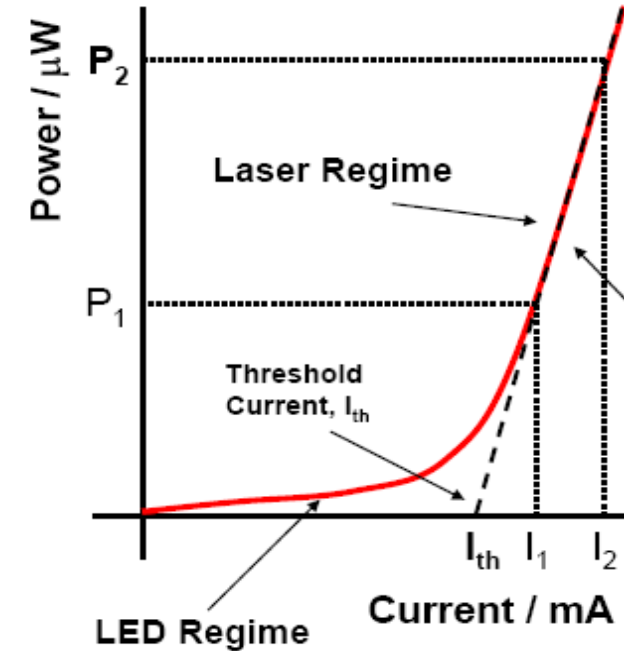
Η καμπύλη P - I



Slope Efficiency:

$$\eta_{se} = (P_2 - P_1) / (I_2 - I_1)$$

$$= \Delta P / \Delta I \text{ } \mu\text{W/mA}$$



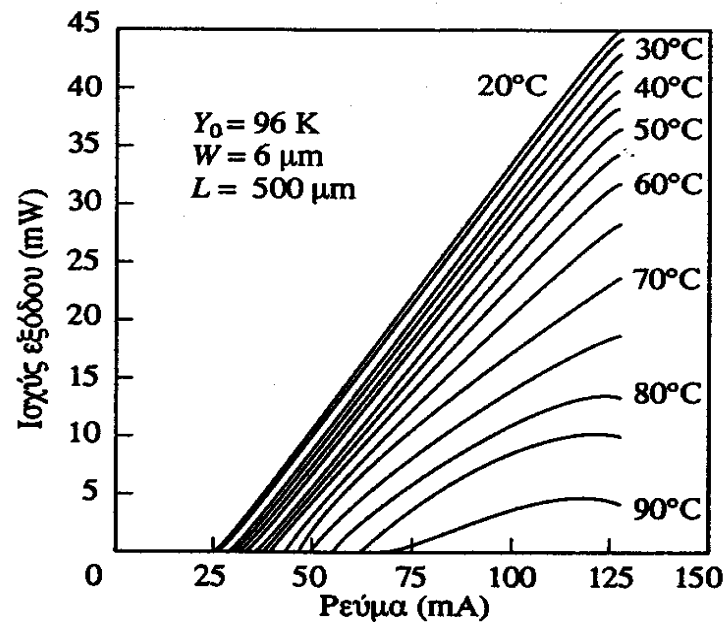
$$\eta_{se \text{ laser}} \sim 100 \times \eta_{se \text{ LED}}$$

- I_{th} είναι η τιμή του ρεύματος “κατωφλίου” πέρα από το οποίο έχουμε “έναυση” της εξαναγκασμένης εκπομπής
- Καθώς το ρεύμα άντλησης αυξάνεται πάνω από I_{th} , η περιβάλλουσα του φάσματος των γραμμών γίνεται όλο και στενότερη
- “καταστολή πλευρικών τρόπων ” (side-mode suppression)
- ο βασικός τρόπος μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος
- Η κλίση της καμπύλης P-I είναι η η_{ext} : Εξωτερική κβαντική απόδοση του Laser



Εξάρτηση από τη θερμοκρασία

- Τα Laser μεγάλου μήκους κύματος εξαρτώνται περισσότερο από τα Laser μικρού μήκους κύματος στην θερμοκρασία



Σχήμα 5-13. Καμπύλες $P-I$, για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας, μιας διόδου laser “κβαντικών-φρεάτων” στην περιοχή μεγάλων μηκών κύματος (Ευγεν. συγκατάθεση Peter Unger, IBM Research Lab., Zurich).



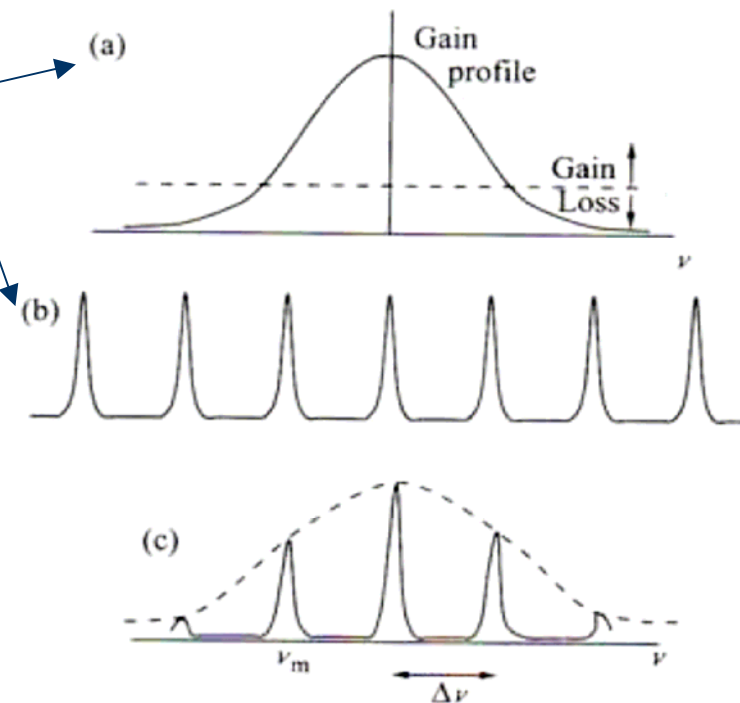
Θόρυβοι στο laser

- **θόρυβος φάσης** : Η σπουδαιότερη αιτία μη μηδενικού εύρους γραμμής είναι η τυχαιότητα της φάσης στην έξοδο του laser , τυχαιότητα που προκαλείται κυρίως από την αυθόρμητη εκπομπή
- **σχετικός θόρυβος έντασης (Relative Intensity Noise – RIN)** : είναι ένα είδος λόγου θορύβου-προς-σήμα , που ορίζεται ως λόγος των διακυμάνσεων πλάτους της οπτικής εξόδου προς τη μέση ισχύ και μετράται σε μονάδες dB/Hz
- Τυπικές τιμές RIN για καλές συσκευές:
 - FP -125 έως -130 dB/Hz
 - Laser DFB έχει τιμές κάτω από -155 dB/Hz
 - Παράδειγμα: αν laser έχει ένα RIN -130dB/Hz και το σύστημα έχει εύρος ζώνης 1 MHz τότε ο λόγος σήμα προς θόρυβο του οπτικού σήματος του laser θα είναι 70dB .



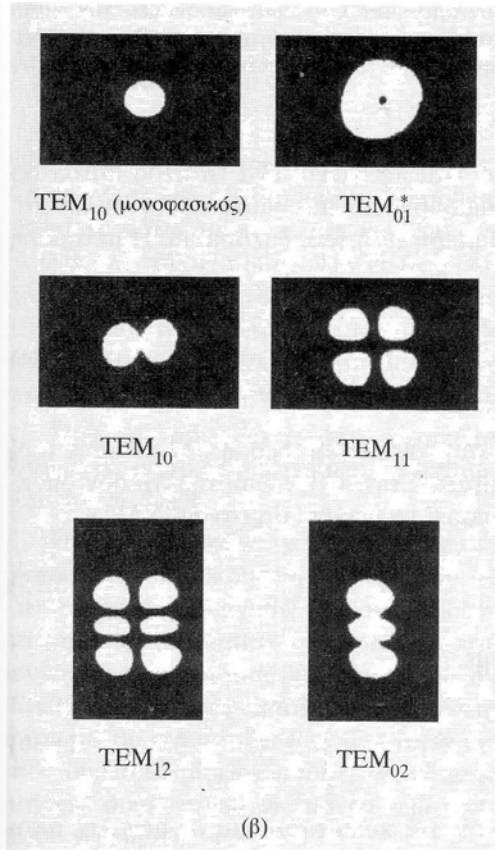
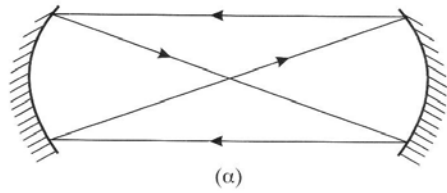
Ρυθμοί –τρόποι ταλάντωσης

- Αξονικοί τρόποι
 - Καθορίζονται από την κοιλότητα: $\kappa\lambda/2=L$, $\kappa=1,2,..$
 - Και από την καμπύλη ενίσχυσης του ενεργού υλικού $G=G(\nu)$
 - Για κάθε κ ορίζεται και ένας αξονικός τρόπος





Ρυθμοί –τρόποι ταλάντωσης



- Εγκάρσιοι ρυθμοί – τρόποι

- Είναι τα επίπεδα κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της κοιλότητας

- Η χωρική κατανομή του ηλ. πεδίου τους είναι:

$$E(x, y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w^2}\right)$$

ΕΙΚ. 5.13 (α) Παράδειγμα μιας μη αξονικής αυτοαναπαράγομενης ακτίνας η οποία δημιουργεί εγκάρσιους ρυθμούς ταλάντωσης. (β) Μερικοί, χαμηλής τάξης, εγκάρσιοι ρυθμοί ταλάντωσης ενός laser. Οι ρυθμοί ταλάντωσης σηματοδοτούνται ως TEM_{qr} , όπου τα q και r είναι ακέραιοι που αναφέρονται στον αριθμό των ελαχίστων της δέσμης laser, όταν αυτή σαρώνεται οριζόντια και κάθετα. Ο ρυθμός TEM_{01}^* είναι ένας συνδυασμός των ρυθμών TEM_{01} και TEM_{10} . (Από το βιβλίο M.J. Beesley, «Lasers and their Applications», 1972 με την άδεια του εκδοτικού οίκου Taylor and Francis Ltd.).



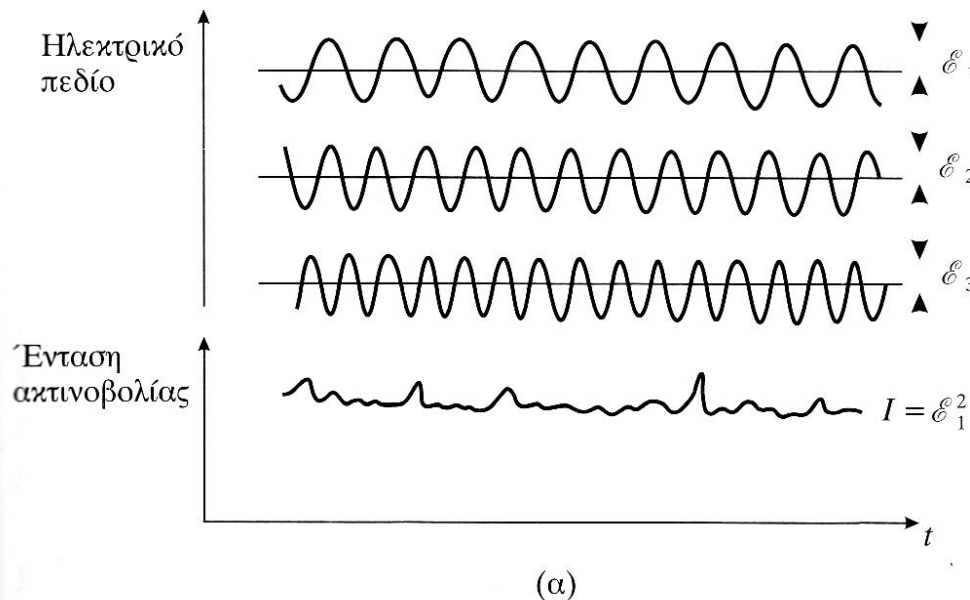
Μονορυθμική λειτουργία

- Όταν απαιτείται από το laser φασματική καθαρότητα
- CW λειτουργία σε ένα μόνο διαμήκη και εγκάρσιο ρυθμό με:
- Μείωση του μήκους L της κοιλότητας
- Τοποθέτηση διαφραγμάτων στη κοιλότητα
- Χρήση QW και ετεροδομών, φίλτρων DFB - DBR (ημιαγωγικά Lasers)



Παλμική λειτουργία- Εγκλείδωση ρυθμών

- Εγκλείδωση ρυθμών: τεχνική για την παραγωγή περιοδικών , υψηλής ισχύος, μικρής χρονικής διάρκειας παλμών laser
- Ένα laser εν γένει μπορεί να υποστηρίξει πολλούς ρυθμούς ταυτόχρονα
- Η έξοδος του θα εξαρτάται από τα πλάτη, τις συχνότητες και τις σχετικές φάσεις δη των ρυθμών



$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} E_{0n} \exp[j(\omega_n t + \delta_n)]$$

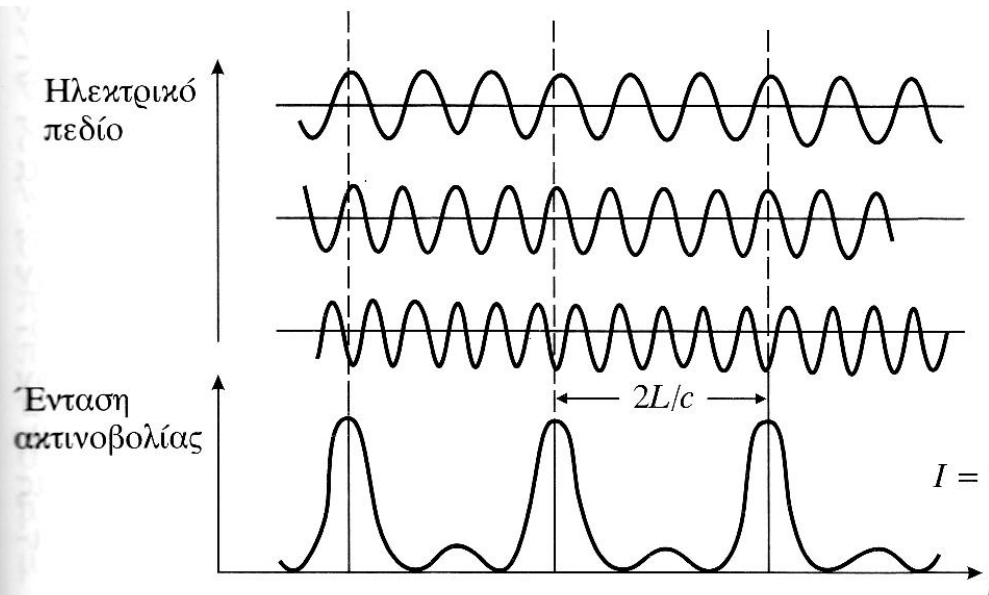
$$I = N E_0^2$$



Παλμική λειτουργία

- εστω ότι αναγκάζουμε τους διάφορους ρυθμούς να διατηρήσουν την ίδια σχετική φάση δηλ. $\delta n = \delta$
- Η ολική ένταση προκύπτει προσθέτοντας τα πεδία:

$$E(t) = E_0 \exp(j\delta) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(j\omega_n t) \quad \omega_n = \omega - n\delta\omega \quad \mu\epsilon \quad \delta\omega = \pi c/L$$



$$I = E_0^2 \frac{\sin^2(N\varphi/2)}{\sin^2(\varphi/2)} \quad \varphi = \frac{\pi c}{L} t$$

$$I = (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3)^2$$



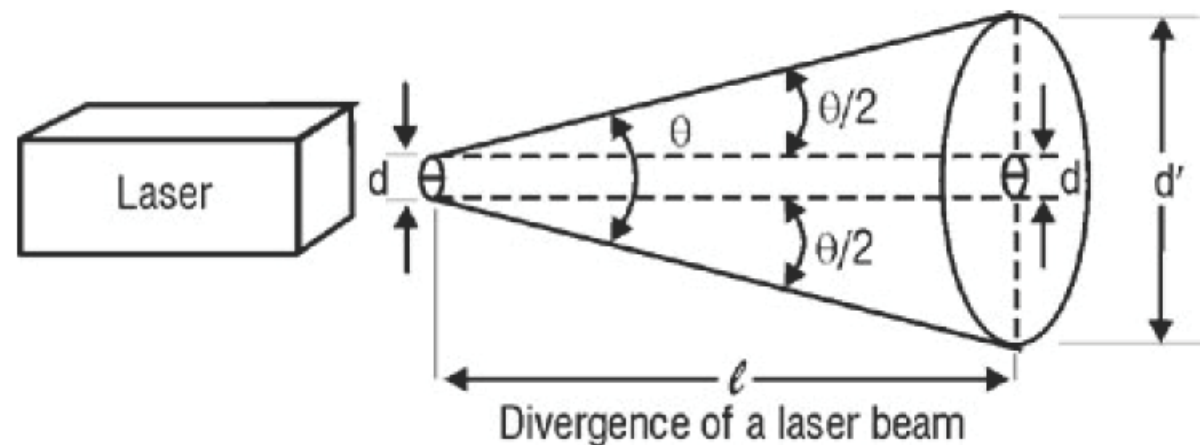
Εγκλείδωση ρυθμών

- Η εγκλείδωση ρυθμών επιτυγχάνεται:
- Ενεργητικά: διαμορφώνοντας την απολαβή της κοιλότητας σε μια συχνότητα ίση με την διαφορά συχνότητας των ρυθμών $\delta f = c/2L$
- Παθητικά: με τη χρήση χρωστικών που απορροφούν ακτινοβολία



Ιδιότητες του φωτός laser

- Κατευθυντικότητα: $\theta = \lambda/D$
- Εύρος γραμμής $\delta\lambda$
- Συμφωνία δέσμης (μήκος συμφωνίας L_c , πχ Laser He – Ne $L_c = 1\text{km}$)
- φωτεινότητα





ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΦΩΤΟΠΗΓΩΝ για τηλεπικοινωνίες

Οι φωτοπηγές που χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα μετατρέπουν το ηλεκτρικό σήμα (τάση ή ρεύμα) σε οπτικό **και πρέπει** να ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Εκπομπή ακτινοβολίας στην περιοχή όπου η οπτική ίνα παρουσιάζει τη μικρότερη απορρόφηση και διασπορά
- Χρήση απλού τρόπου διαμόρφωσης
- Γραμμική Μετατροπή της ηλεκτρικής ισχύος σε οπτικό σήμα και σύζευξη με την οπτική ίνα με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο
- Μονοχρωματικότητα
- Έλεγχος του εκπεμπόμενου μήκους κύματος της πηγής με την επιβολή μιας τάσης ή ενός ρεύματος
- Χαμηλό κόστος



Τα LED ως πηγές φωτός

Στα LED:

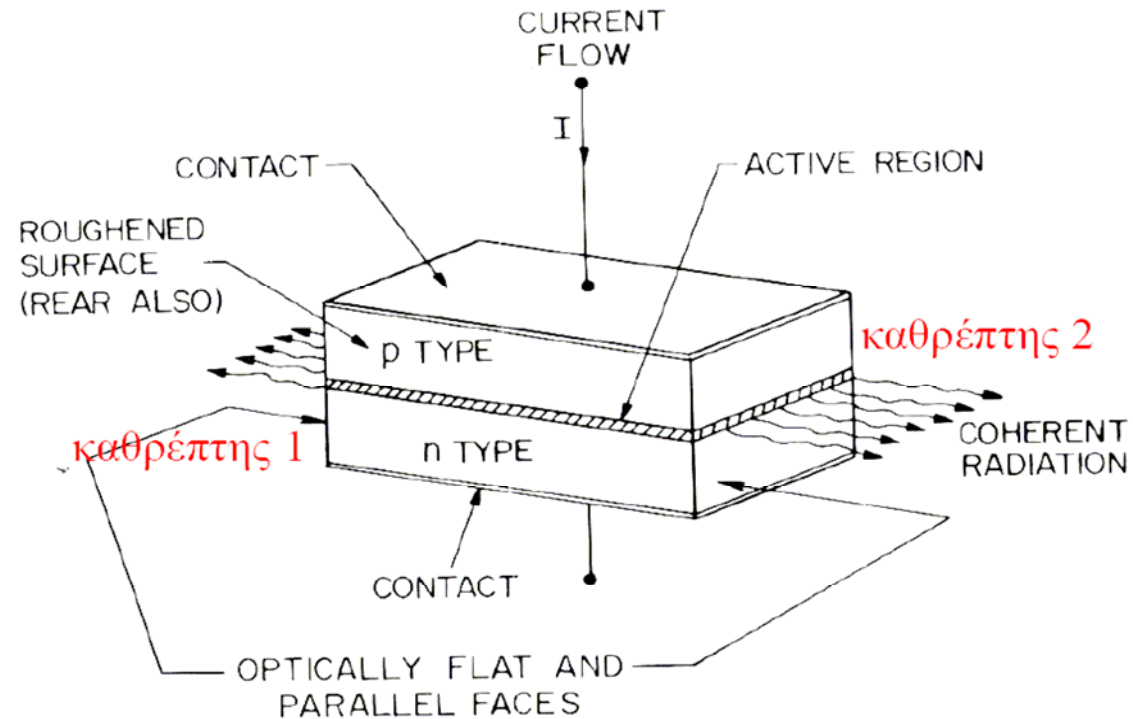
Η φασματική έξοδος είναι διευρυμένη κατά $\sim kT$

Η χρονική απόκριση περιορίζεται από την αυθόρμητη εκπομπή, δηλαδή από το χρόνο επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων με τις οπές

- Έτσι η χρήση των φωτοδιόδων LED περιορίζεται σε εφαρμογές που απαιτούνται χρόνοι διαμόρφωσης μικρότεροι από 1 GHz.
- Κυρίως δηλαδή σε εφαρμογές απεικόνισης



Laser Ημιαγωγού I



- Διατάξεις με εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός ως αποτέλεσμα έγχυσης φορέων σε μία δίοδο p-n.
- Ηλεκτρονικές ζώνες
- Έχει ομοιότητες με το LED αλλά βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός



Δομές laser

- Τα laser είναι συνήθως ετεροδομές

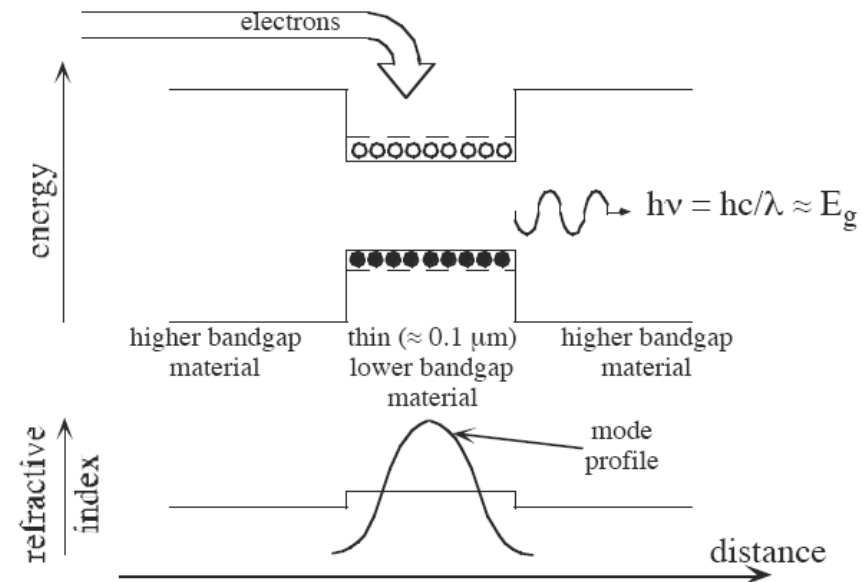
The heterostructure confines

- carriers -> higher carrier density and gain
- light due to higher refractive index

Material:

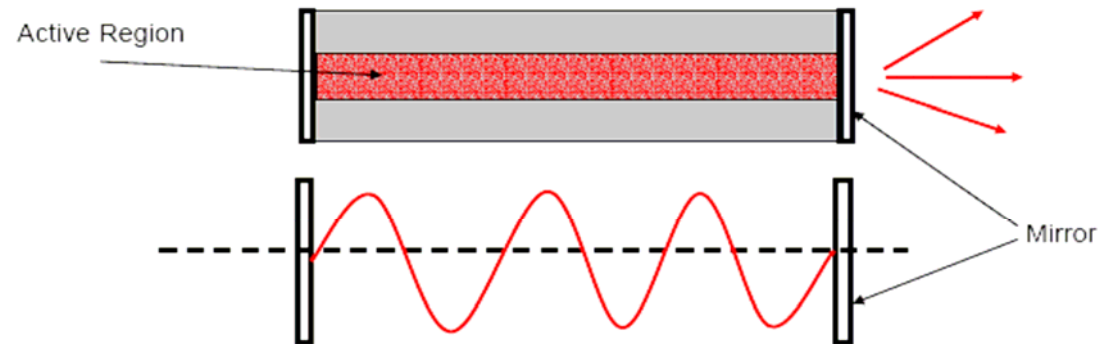
- Direct bandgap required (i.e. not Si)
- AlGaAs ($\lambda=0.81-0.87 \mu\text{m}$), InGaAsP ($\lambda=1-1.65 \mu\text{m}$)

Light emission in a forward biased heterostructure pn-junction





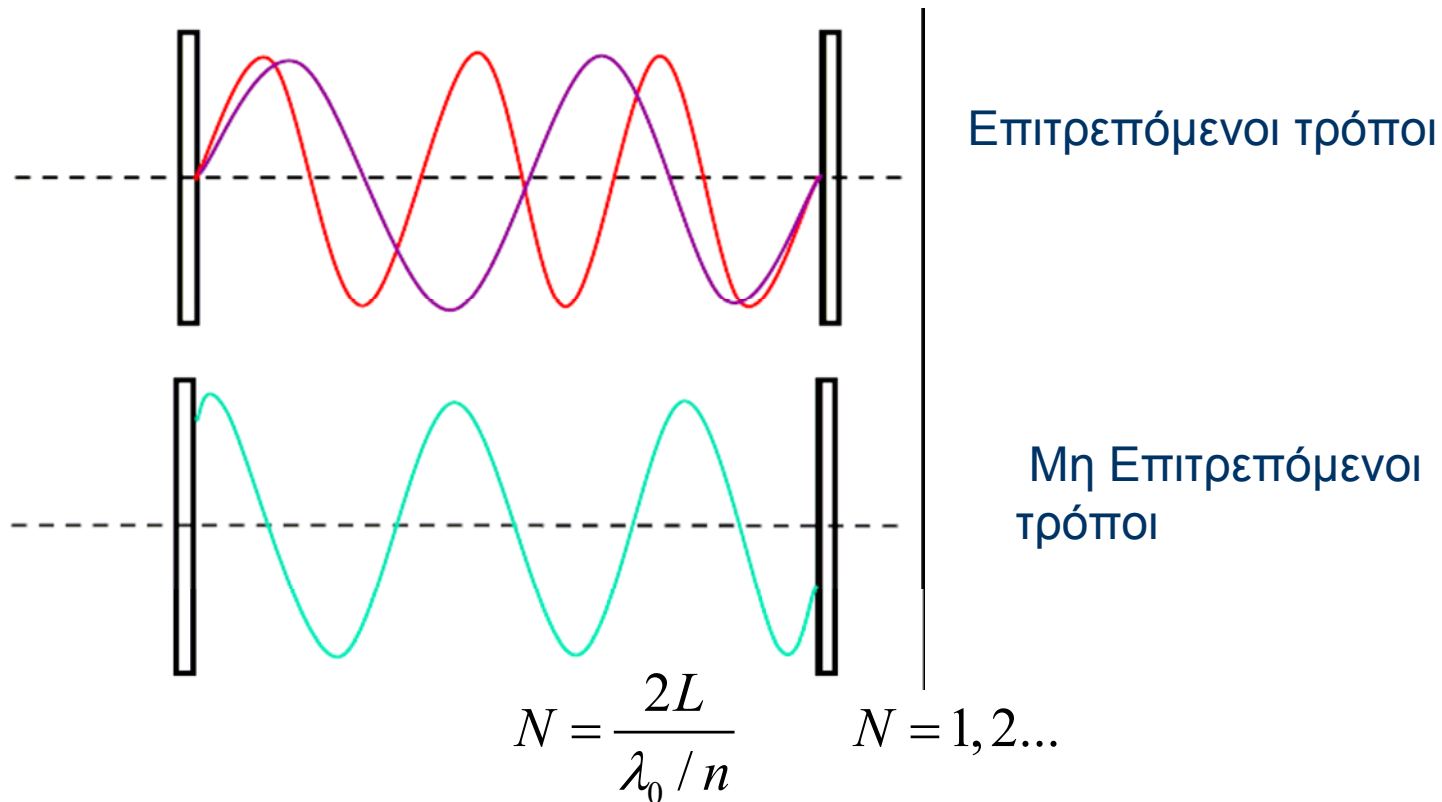
Laser Fabry -Perot



- Οι δομές αυτές λέγονται laser F-P :
- Υποστηρίζονται συγκεκριμένα μήκη κύματος
- Αυτά αποτελούν τους διαμήκεις τρόπους του laser (longditudinal modes)



Longitudinal modes



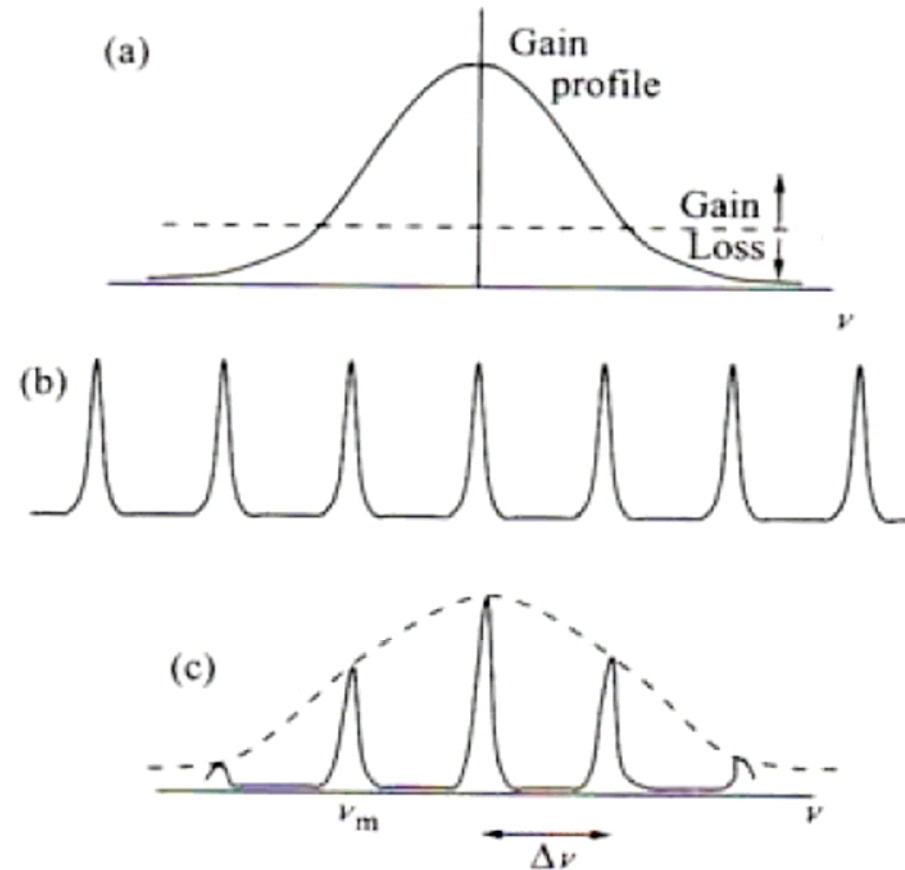
Example: $\lambda=1500\text{nm}$, $L=0.4\text{mm}$ $N=533.333$ – Not allowed !

Allowed mode: $\lambda=2L/N = 0.8\text{mm}/534 = 1498.1\text{nm}$

BUT: $\lambda=0.8\text{mm}/533=1500.9\text{nm}$ is also an allowed mode!



Απολαβή υλικού και τρόποι





Mode spacing

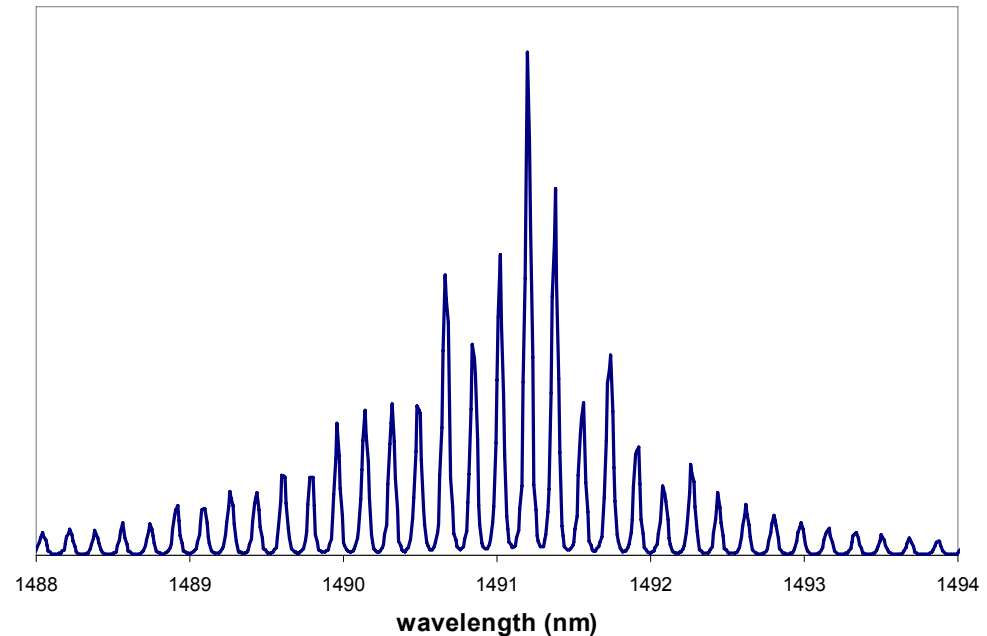
Phase condition for lasing:

$$2\beta L = 2\pi m$$

Using $\beta = 2\pi n/\lambda$ and $\lambda = c/v$:

$$m = \frac{2Ln}{c} v_m$$

$$\Rightarrow \Delta v = \frac{c}{2Ln}$$



Αντικαθιστώντας $\Delta v/v = \Delta\lambda/\lambda$ και $c = \lambda v$:

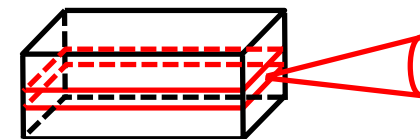
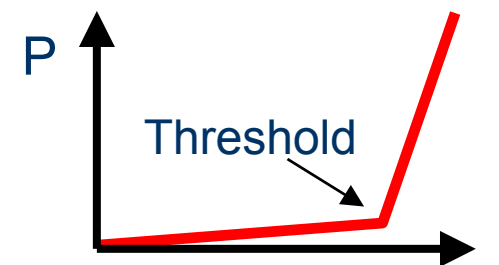
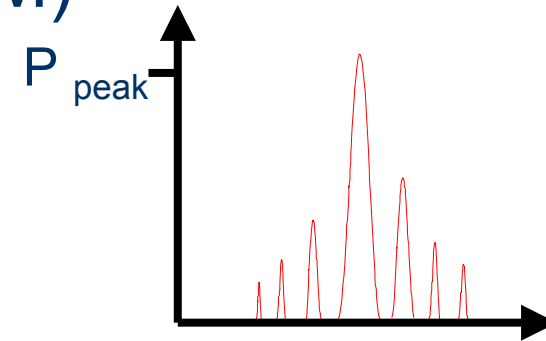
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2Ln}$$

Φασματικό εύρος
γραμμής linewidth



Fabry-Perot (FP) Laser - Σύνοψη

- Multiple longitudinal mode (MLM) spectrum
- “Classic” semiconductor laser
 - First fiberoptic links (850 or 1300 nm)
 - Today: short & medium range links
- Key characteristics
 - Most common for 850 or 1310 nm
 - Total power up to a few mw
 - Spectral width 3 to 20 nm
 - Mode spacing 0.7 to 2 nm
 - Highly polarized
 - Coherence length 1 to 100 mm
 - Small NA (→ good coupling into fiber)





Laser DBR και DFB

- Σε πολλές περιπτώσεις στις τηλεπικοινωνίες θέλουμε $\delta\lambda \rightarrow 0$
- Δηλαδή λειτουργία με ένα μόνο διαμήκη τρόπο
- Χρειαζόμαστε μια κοιλότητα (οπτικό φίλτρο) με μεγαλύτερη επιλεκτικότητα
- Χρησιμοποιούμε οπτικά φίλτρα τύπου:
 - Distributed Bragg Reflector (DBR)
 - Distributed BraggFeedback (DFB)

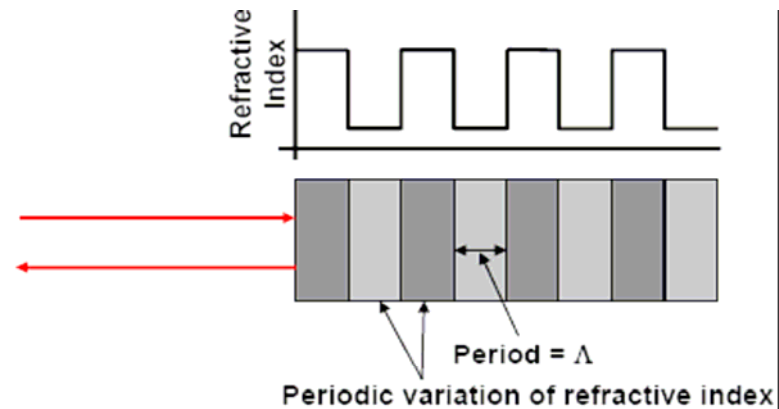


Οπτικά φίλτρα ανάκλασης Bragg

- Portion of the light is reflected at each interface
- Only for one wavelength can a coherent addition be performed
- Wavelength satisfying the Bragg Condition,

$$\lambda_B: 2\Lambda n_{\text{eff}} = \lambda_B$$

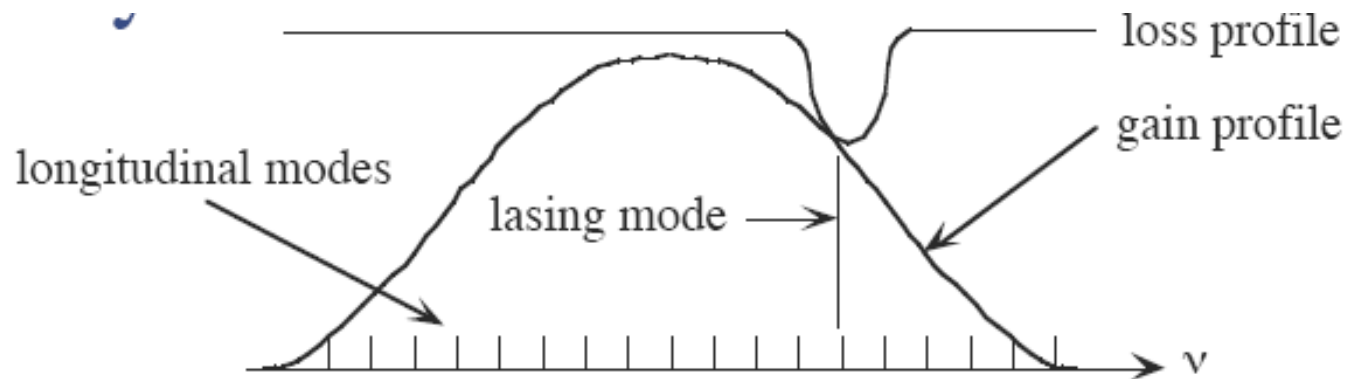
- n_{eff} is the effective index of the waveguide core
- Very narrow bandwidths are possible





Δηλαδή....

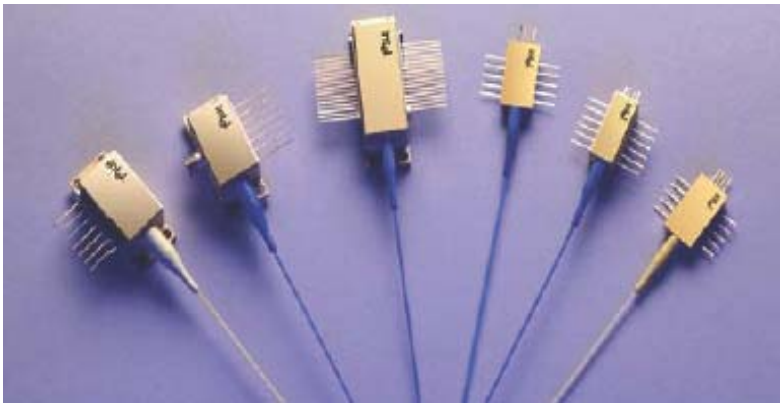
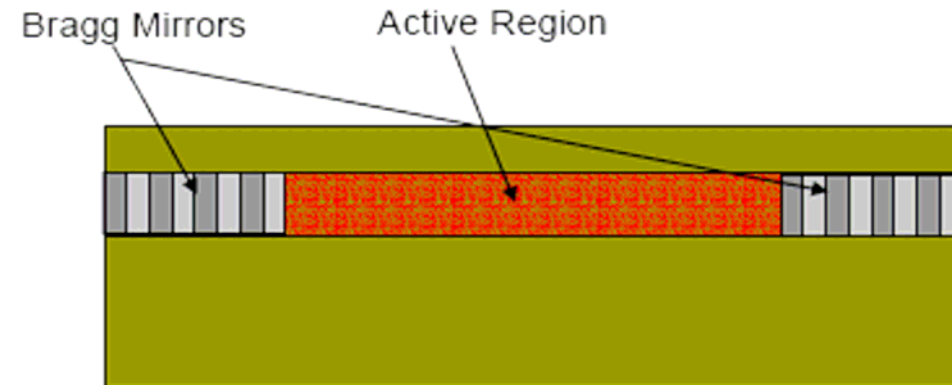
- To force single-mode lasing one introduces a wavelength dependent cavity loss





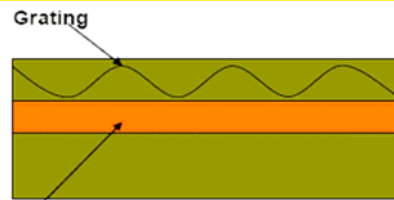
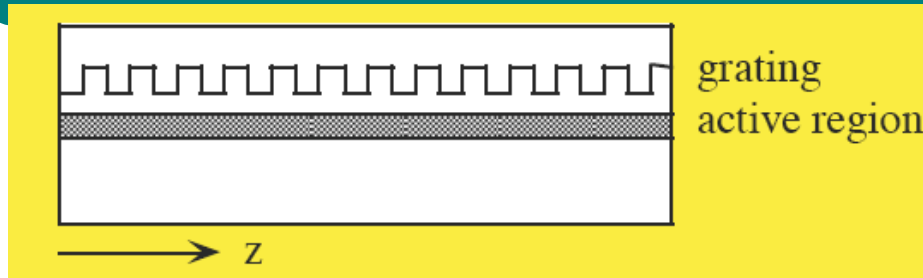
Laser DBR

- Active region is terminated by a Bragg Reflector
- Can use either a single ended grating or have a grating on both ends.
- Can be made tunable





DFB Lasers



- Bragg grating placed in the vicinity of the active region
- Feedback takes place throughout the laser cavity
- Bragg condition must be satisfied
- Narrow linewidth operation
- Wavelength tuning is possible by heating the grating
- Most communication lasers are DFB lasers

Grating period $\approx 240-245 \text{ nm}$

Wavelength $\lambda = 2 n_{\text{eff}} \Lambda$

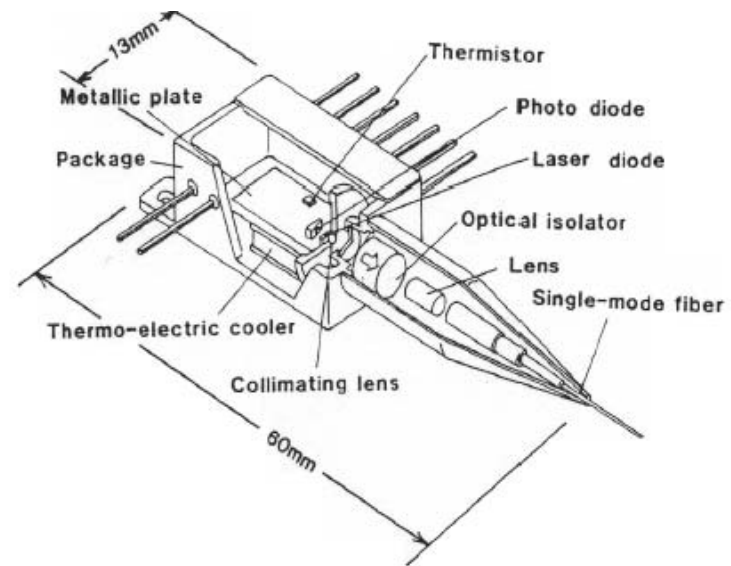
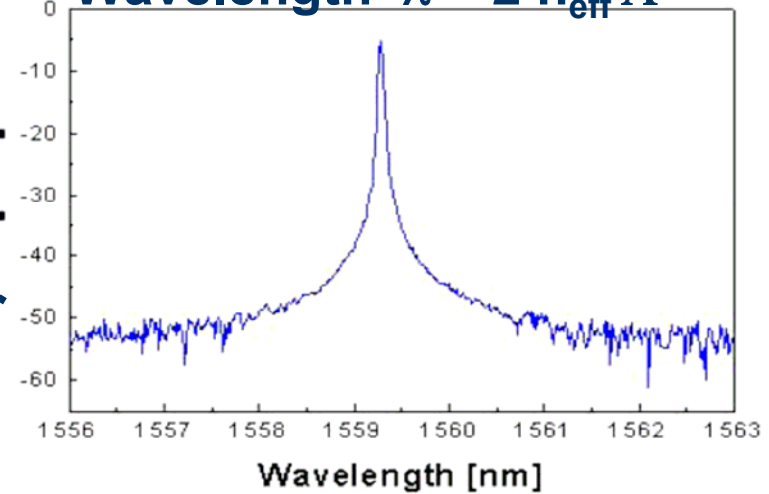
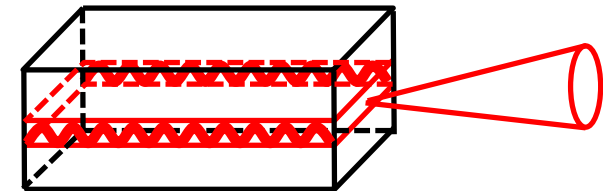
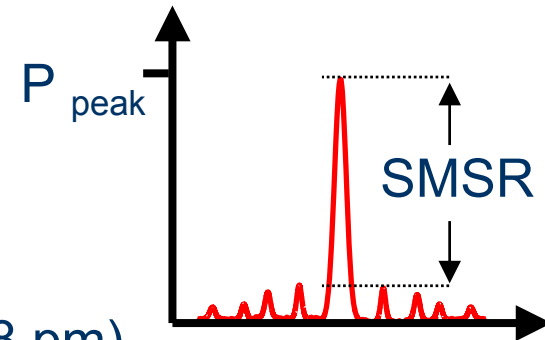


Figure 1: Three-dimensional view of a DFB laser



Distributed Feedback (DFB) Laser- Σύνοψη

- Single longitudinal mode (SLM) spectrum
- High performance telecommunication laser
 - Most expensive (difficult to manufacture)
 - Long-haul links & DWDM systems
- Key characteristics
 - Mostly around 1550 nm
 - Total power 3 to 50 mw
 - Spectral width 10 to 100 MHz (0.08 to 0.8 pm)
 - Sidemode suppression ratio (SMSR): > 50 dB
 - Coherence length 1 to 100 m
 - Small NA (→ good coupling into fiber)





Laser κβαντικού φρέατος I

- Δομή κβαντικού φρέατος: πολύ λεπτό στρώμα ημιαγωγών → αύξηση πυκνότητας καταστάσεων στο χαμηλότερο σημείο της ζώνης αγωγιμότητας και στο ψηλότερο της ζώνης σθένους →
 - Εύκολη αντιστροφή πληθυσμών
 - Χαμηλό ρεύμα κατωφλίου
 - Χαμηλή θερμοκρασιακή ευαισθησία
 - Μικρός ενεργός ενεργός
 - Μικρός περιορισμός του οπτικού mode

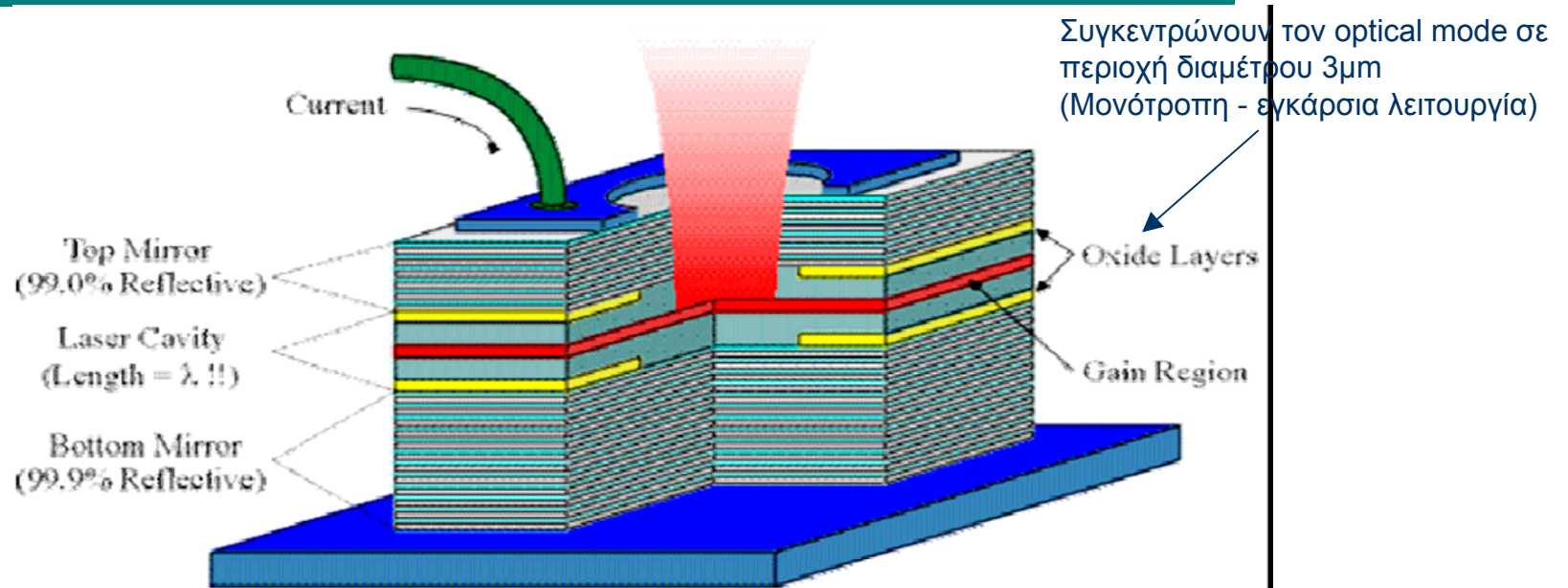


Laser κβαντικού φρέατος II

- Για να αναιρεθούν τα μειονεκτήματα χρησιμοποιούνται δομές πολλαπλών κβαντικών φρεάτων MQW - MultiQuantum Wells
- MQW: πολλα QW αλληλοπαρατίθενται ενώ μεταξύ τους παρεμβάλλονται στρώματα απομόνωσης →
 - Μεγαλύτερη ενεργός περιοχή



VCSELS

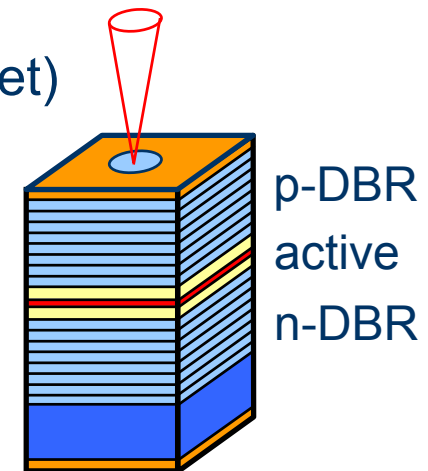


- VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser.
 - Replaces the traditional edge emitting geometry with a surface emitter
 - Gives a VERY short cavity length
 - Widely spaced longitudinal modes – well outside the gain bandwidth.
 - Single mode operation
 - Current injected through a shaped contact
 - Small size gives efficient operation and high switching speeds
 - Circular output well matched to fibre.
 - On-chip testing possible for cheap production.
 - Still difficult to obtain long wavelength operation, but rapidly becoming the most import laser source for datacomms applications.



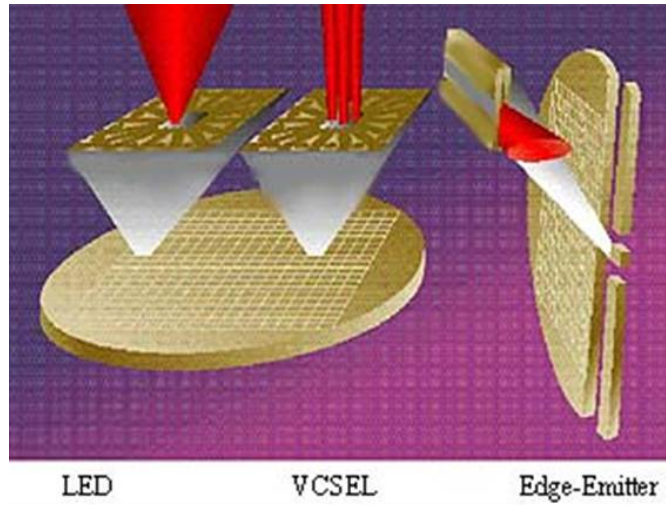
Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)- Σύνοψη

- Distributed Bragg Reflector (DBR) Mirrors
 - Alternating layers of semiconductor material
 - 40 to 60 layers, each $\lambda / 4$ thick
 - Beam matches optical acceptance needs of fibers more closely
- Key properties
 - Wavelength range 780 to 980 nm (gigabit ethernet)
 - Spectral width: $<1\text{nm}$
 - Total power: $>-10\text{ dBm}$
 - threshold current $< 1\text{-mA}$.
 - Coherence length: $10\text{ cm to }10\text{ m}$
 - Numerical aperture: 0.2 to 0.3





EEL και VCSELs



- Edge-emitting laser (EEL). Το μέγεθος ενός EEL είναι 2- μm wide and 500- μm long (laser chip: 500 x 500 x 10 μm). Μειονέκτημα των EEL δεν τεστάρονται μέχρι να κοπούν σε μικρά chips.
 - VCSEL: Οι ανακλαστήρες (cavity mirrors) και η ενεργός περιοχή (gain region) αναπτύσσονται με απλή επιταξία σε ένα διαμέτρου 50-75-mm substrate. Οι ανακλαστήρες είναι ουσιαστικά DBR, και σχηματίζονται με ανάπτυξη $\lambda/4$ layers ημιαγωγών με εναλλασσόμενους $\delta.\delta.$ n_1, n_2 .
 - Στα EEL το μήκος κύματος λειτουργίας ελέγχεται από την απολαβή υλικού (gain peak), στα VCSEL ελέγχεται από το συντονισμό των DBR mirrors
 - This highly wavelength stability makes VCSELs ideal for absorption or transmission sensing of certain chemicals
-
- Compared to EEL, VCSEL has four orders of magnitude shorter gain-path length of approximately ~10-30-nm. A typical value for the single pass gain in a VCSEL is less than 1 %. When creating a VCSEL the most critical part are still the mirrors, which contains up to 60 pairs of semiconductors with different composition and whose thickness precision is required to be within a fraction of a percent.
 - The VCSEL has testing and packing process comparable with the ones for LED, which makes it the lowest cost semiconductor ever manufactured and the technology of choice for LANs.
 - Until today's date there isn't any single-mode VCSEL structure with high repeatability and manufacturability



Long-wavelength VCSELs

- For fiber optical communication purposes VCSELs emitting in the 1.3-1.55 μm region (long-wavelength) are used
- It has been difficult to fabricate a monolithic semiconductor DBR for a long-wavelength VCSEL. The main reason is that the difference in refractive indexes for the fabrication materials are very small, about half the difference of that used for shorter wavelength VCSEL.
- There has been two approaches made to overcome this problem, the use of wafer-fused GaAs/AlAs mirrors and the use of dielectric mirrors. Both approaches lead to very promising results
- Βέβαια μέχρι σήμερα αξεπέραστο παραμένει το πρόβλημα της χαμηλής εκπεμπόμενης ισχύος



Ρυθμιζόμενα lasers

Tuning range:
40-100nm

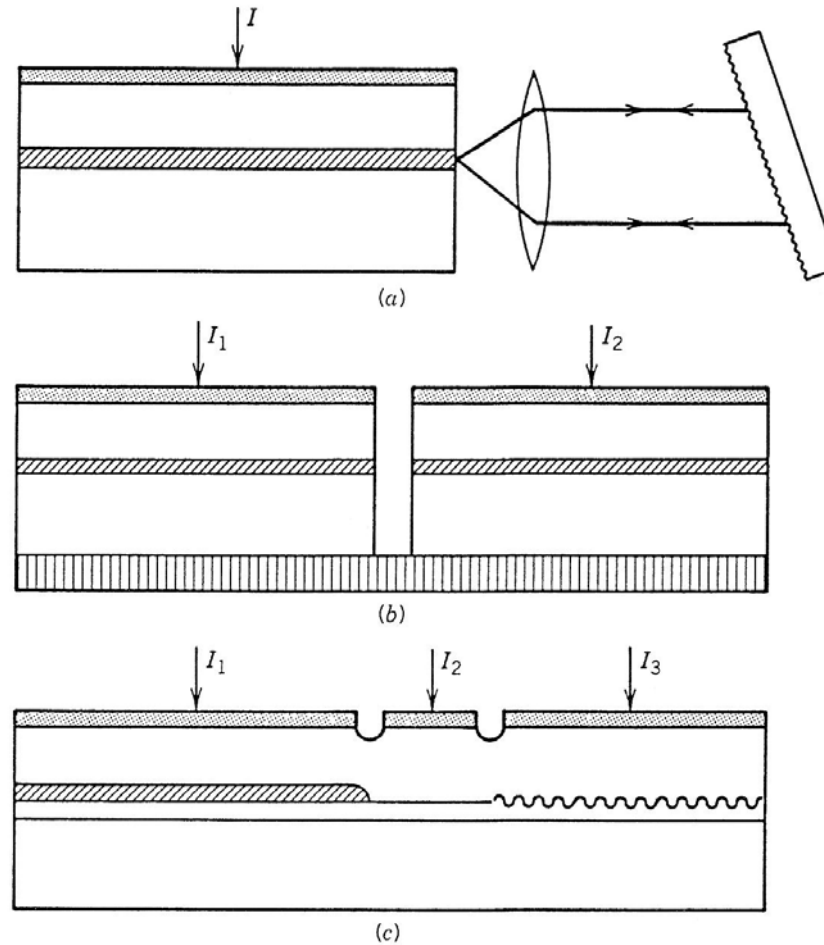
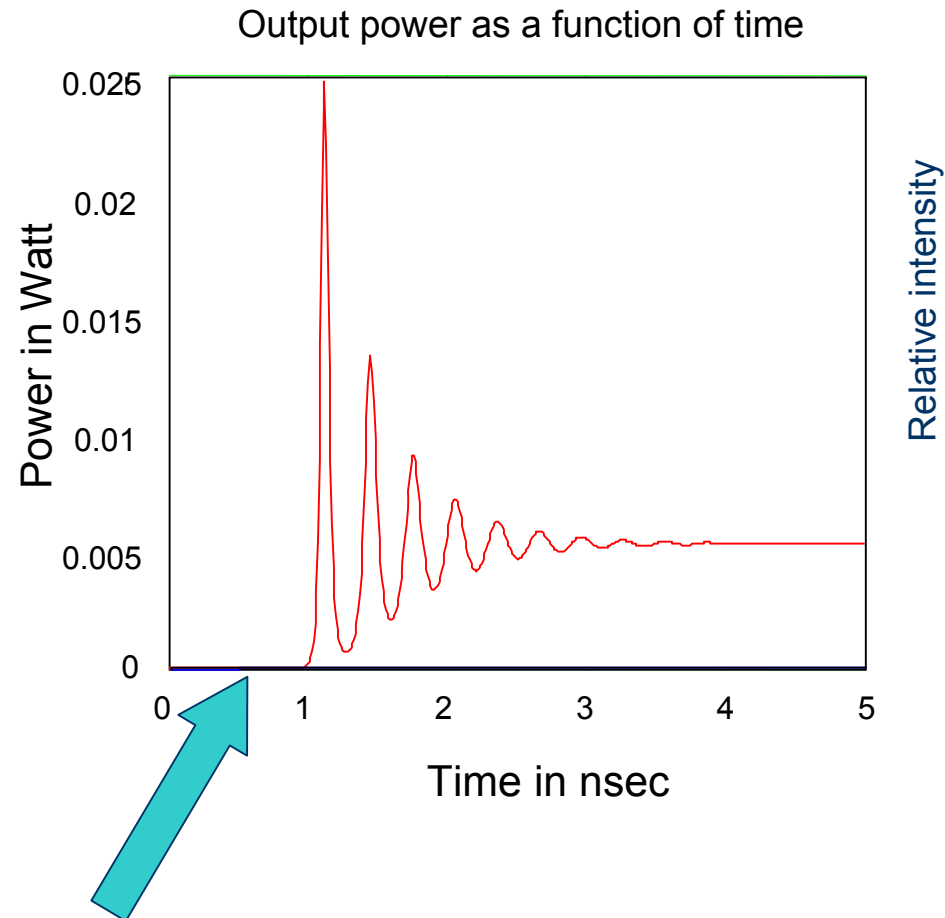


Figure 3.18: Coupled-cavity laser structures: (a) external-cavity laser; (b) cleaved-coupled-cavity laser; (c) multisection DBR laser.



Μεταβατικά Φαινόμενα I



- **Καυστέρηση έναυσης (Turn-on delay):** Το laser χρειάζεται κάποιο χρόνο μέχρι να υπάρξει αρκετά μεγάλη πυκνότητα εγχεόμενων φορέων $N(t)$, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία εξαναγκασμένης εκπομπής



Μεταβατικά Φαινόμενα II

- **Ταλαντώσεις αποκατάστασης (Relaxation oscillations):**
 - Από τη στιγμή που θα ξεκινήσει, η εξαναγκασμένη εκπομπή , “κλέβει” φορείς από τη συνολική πυκνότητα $N(t)$
 - η ένταση του φωτός μειώνεται,
 - οι φορείς αυξάνονται αρκετά ώστε να ξεκινήσει ξανά ισχυρή εκπομπή φωτός κοκ
 - Η ταλάντωση αυτή τελικά εκφυλίζεται και παραμένει η πυκνότητα φορέων αποκαταστημένης κατάστασης ενώ η ακτινοβολία έχει την τάση να εντοπιστεί σ’αυτόν τον τρόπο της κοιλότητας του οποίου η συχνότητα είναι πιο κοντά στο μέγιστο της απολαβής
- **Στιγμιαίο (μεταβατικό) chirp (Instantaneous chirp):** Το στιγμιαίο chirp είναι μια άμεση εκδήλωση των ταλαντώσεων αποκατάστασης. Οι συχνότητες των τρόπων της κοιλότητας Fabry-Perot εξαρτώνται από το δείκτη διάθλασης, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την πυκνότητα φορέων. Η μεταβολή της συχνότητας κατά τη διάρκεια των ταλαντώσεων αποκατάστασης, προξενεί μια αντίστοιχη διαμόρφωση στη συχνότητα της εξόδου του laser εως ότου τελικά αποκτήσει η συχνότητα σταθερή τιμή
- **Αδιαβατικό chirp (Adiabatic chirp):** Η τελική αυτή σταθερή τιμή εξαρτάται από το ρεύμα άντλησης . Με την αύξηση της πυκνότητας φορέων, υπάρχει μια συνολική μετατόπιση συχνότητας λόγω μεταβολής του δείκτη διάθλασης. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά σαν ένας απλός τρόπος για να κάνουμε άμεση διαμόρφωση συχνότητας ή μια μικρή τροποποίηση του συντονισμού

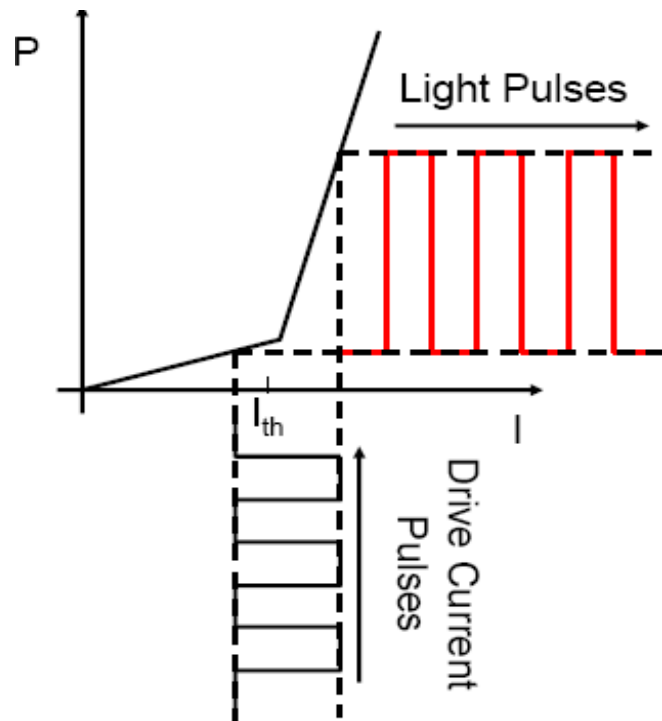


Μεταβατικά Φαινόμενα III

- **Άλμα μεταξύ τρόπων ταλάντωσης (Mode hopping):** “Όταν υπάρχουν περισσότεροι από ένας τρόποι ταλάντωσης της κοιλότητας με συχνότητες που βρίσκονται πολύ κοντά στην κορυφή της καμπύλης απολαβής, τυχαίες διακυμάνσεις διαφόρων ειδών μπορούν να προκαλέσουν τη δέσμευση του μέγιστου της απολαβής από ένα τρόπο για ένα χρονικό διάστημα και μετά την μεταπήδηση σε δέσμευση από έναν άλλο τρόπο.



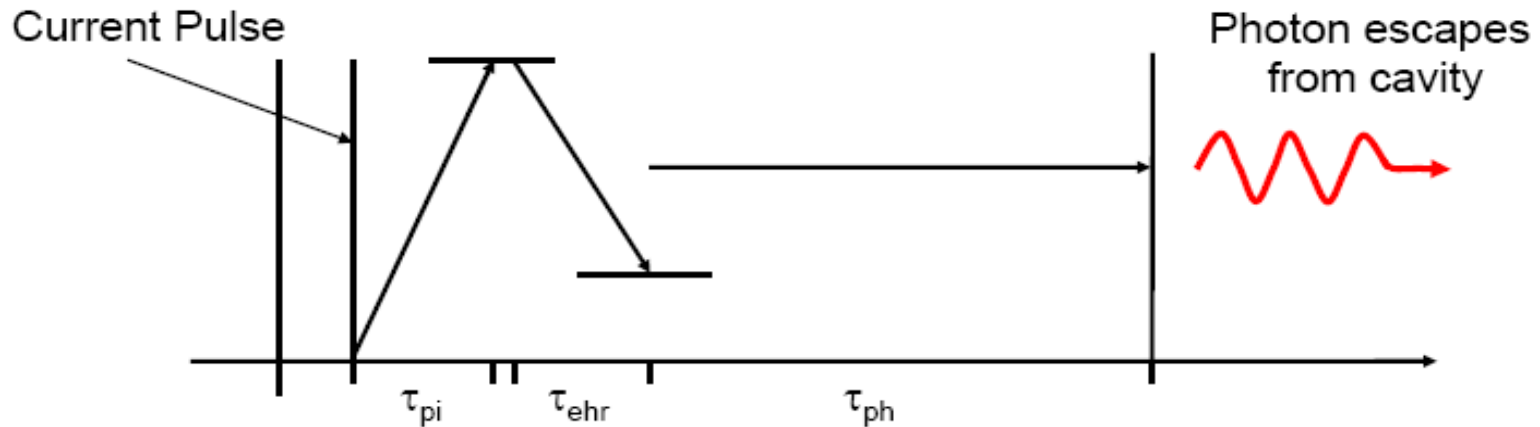
Διαμόρφωση του Laser



- Laser diodes can be modulated by switching the current, I_F .
- Modulation takes place around the threshold current I_{th} .
- This is called **Direct Modulation**.
- Most cases modulation is digital.
- Analogue modulation still used in some cable TV systems.
- How fast can lasers be modulated using this method ?



Απλοποιημένη προσέγγιση

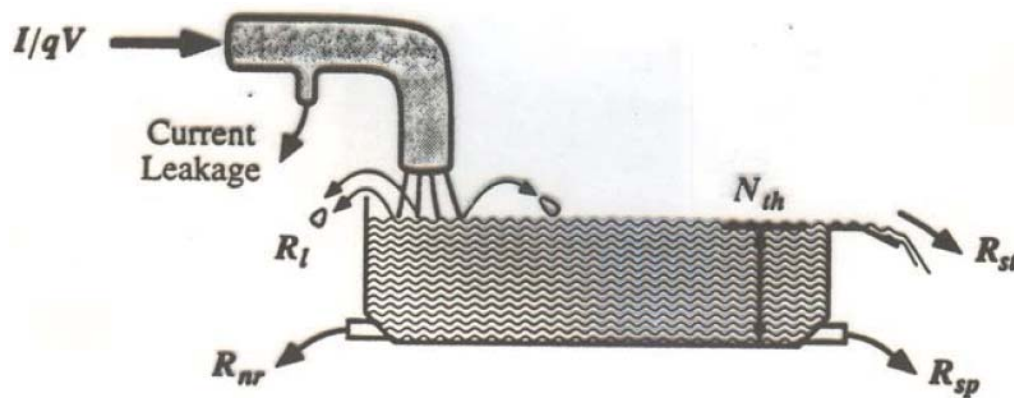
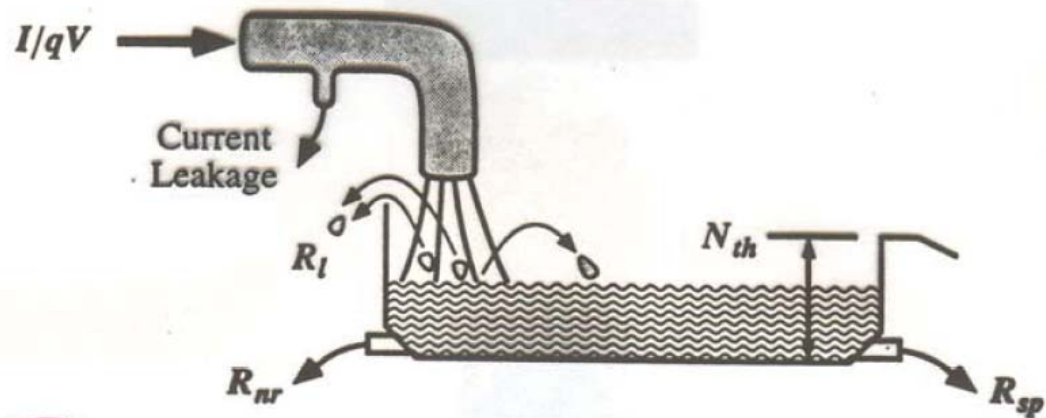


Switching the current above threshold causes a population inversion. (τ_{pi})

Electron hole pair combine to form a photon. (τ_{ehr})

Photon escapes from the laser cavity. (τ_{ph})

- ✓ The photon lifetime, τ_{ph} , is the fundamental limit
- ✓ $\tau_{ph} = 0.12\text{ps} \rightarrow \text{Modulation frequency} = 8.3\text{THz}$
- ✓ However in reality the limit is much less than this – why ?



- t_c : ο χρόνος αυθόρμητης και μη ακτινοβόλου εκπομπής
- t_r : ο χρόνος ζωής των φωτονίων στη κοιλότητα



Εξισώσεις ρυθμού – Rate equations

(A)
$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{eL} - \frac{N}{\tau_c} - GP$$

$\frac{dN}{dt}$: Rate of change of electron density
 $\frac{J}{eL}$: Carriers injected
 $\frac{N}{\tau_c}$: Rate of spontaneous emission
 GP : Rate of stimulated emission
 L: μήκος της κοιλότητας

(B)
$$\frac{dP}{dt} = GP + \frac{\zeta N}{\tau_c} - \frac{P}{\tau_p}$$

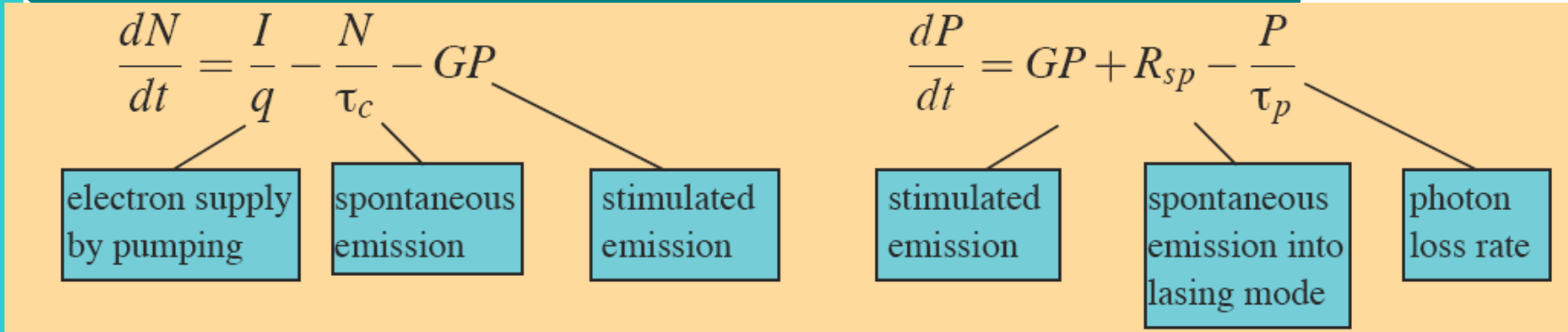
$\frac{dP}{dt}$: Rate of change of Photon Density
 GP : Stimulated emission photons
 $\frac{\zeta N}{\tau_c}$: Spontaneous emission in the right direction
 $\frac{P}{\tau_p}$: Photons lost
 Συνήθως αμελητέος όρος

$$G = \frac{c}{n} \Gamma \alpha [N(t) - N_0]$$

N_0 η πυκνότητα διαφάνειας (πληθυσμός e για να έχουμε αναστροφή), n ο δ.δ., α η σταθερά απολαβής και Γ ο παράγων σύμπτυξης



Ή....



- **N**: the number of electrons,
- **P**: the number of photons, in a single (spatial and longitudinal) mode laser:
- G [1/s] is the modal gain,

The spontaneous emission equals: $R_{sp} = n_{sp}G \approx 2G$

The photon loss equals: $\tau_p^{-1} = v_g(\alpha - \frac{1}{2L} \ln(R_1R_2))$

which is the inverse photon lifetime.

➤ Από τις εξισώσεις ρυθμού προκύπτουν τόσο η στατική όσο και η δυναμική συμπεριφορά της διάταξης



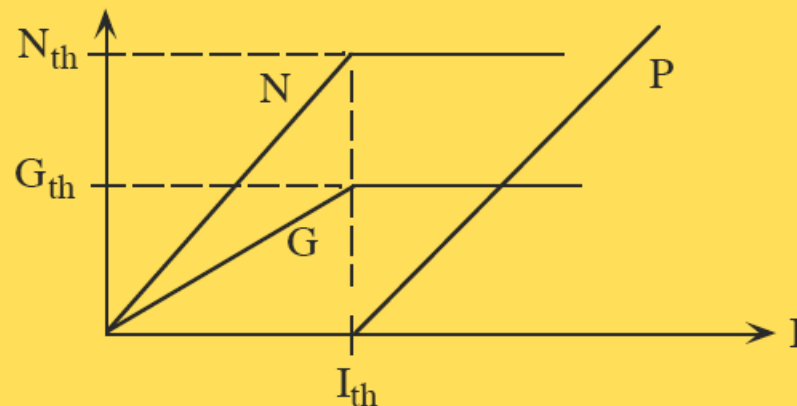
Χαρακτηριστική φωτισχύος - ρεύματος

- Όταν $d/dt=0$ (steady-state) (παραλείποντας τη spontaneous emission):

for small currents: $G\tau_p < 1$ $P = 0, N = \frac{I\tau_c}{q}$

at lasing threshold: $G\tau_p = 1$ $P \approx 0, N = N_{th} = N_0 + \frac{1}{G_N\tau_p}$ $I = I_{th} = \frac{qN_{th}}{\tau_c}$

for currents above threshold: $I > I_{th}$ $P = \frac{\tau_p}{q}(I - I_{th}), N = N_{th} = \text{const}$





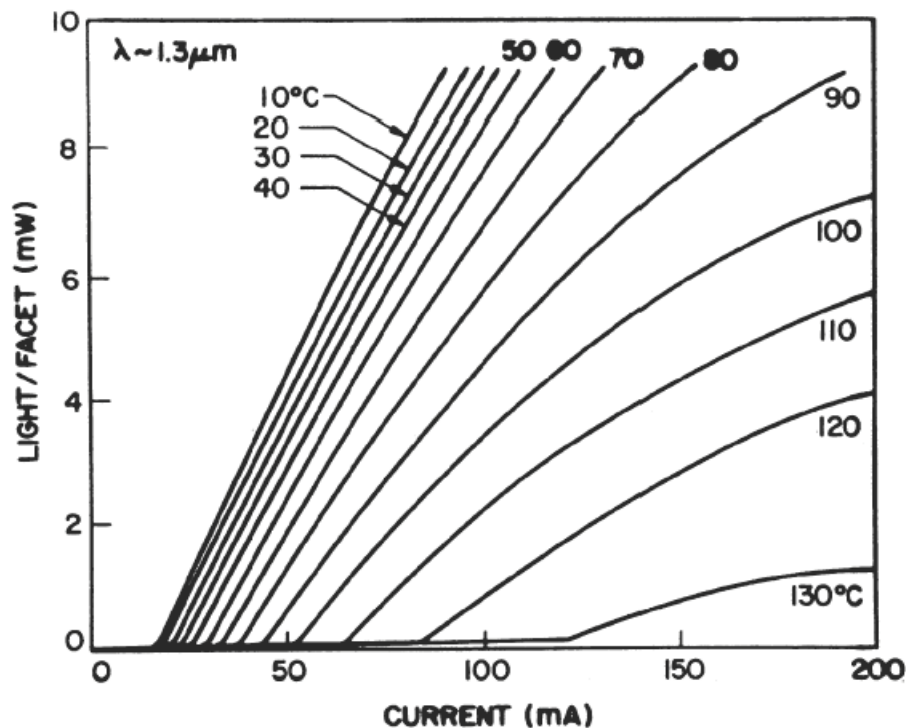
Χαρακτηριστική φωτισχύος - ρεύματος

- The output power from one facet is (assuming equal facet reflectivities R)

$$P_e = \frac{1}{2} h\nu v_g P \underbrace{\frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right)}_{\text{photon escape rate}}$$

photon escape rate

Typical I-P characteristic:



The temperature dependence is due to

- enhanced non-radiative recombination at higher temperatures, and
- temperature dependent gain.



Απόκριση διαμόρφωσης

□ Η απόκριση του laser στη διαμόρφωση του ρεύματος οδήγησης προκύπτει κάνοντας τις κάτωθι τροποποιήσεις:

➤ Η απόλαβή συμπεριλαμβάνει και μη γραμμικό όρο, έτσι:

$$G = G_N(N - N_0)(1 - \epsilon_{NL}P)$$

Όπου ϵ_{NL} is the nonlinear gain parameter (10^{-7})

➤ Συμπεριλαμβάνεται και μια σχέση για την φάση:

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_N(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p})$$

Όπου β_c ο παράγων ενίσχυσης του εύρους γραμής (linewidth enhancement factor, της τάξης του 4-8 in semiconductor lasers)

□ Θεωρώντας ασθενές ρεύμα διαμόρφωσης: $I(t) = I_b + I_m \exp(j\omega_m t)$

η διαμορφούμενη φωτεινή ισχύς και ο αριθμός των φορέων θα είναι:

$$P(t) = P_b + p_m \exp(j\omega_m t)$$

$$N(t) = N_b + N_m \exp(j\omega_m t)$$



Διαμόρφωση μικρού σήματος

- the power and carrier density variations around the steady-state values are assumed to be small: $|N_m| \ll N_b$, $|p_m| \ll P_b$
- Γραμμικοποιώντας τις εξισώσεις ρυθμού βρίσκεται ότι η διαμορφούμενη φωτεινή ισχύς εξαρτάται από τη συχνότητα ως:

$$p_m(\omega_m) = \frac{P_b G_N I_m / q}{(\Omega_R + \omega_m - j\Gamma_R)(\Omega_R - \omega_m + j\Gamma_R)}$$

- Όπου Ω_R και Γ_R είναι η συχνότητα και ο ρυθμός απόσβεσης:

$$\Omega_R = \sqrt{G_n G P_b - \frac{(\Gamma_p - \Gamma_n)^2}{4}}$$
$$\Gamma_R = \frac{\Gamma_p + \Gamma_n}{2}$$

$$\Gamma_p = \frac{R_{sp}}{P_b} + \epsilon_{NL} G P$$
$$\Gamma_n = \frac{1}{\tau_c} + G_n P_b$$

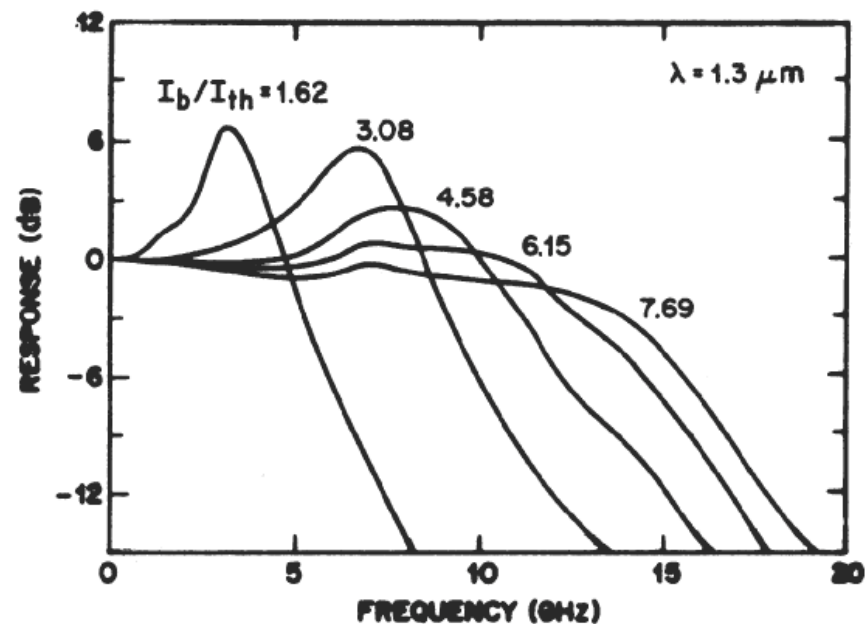
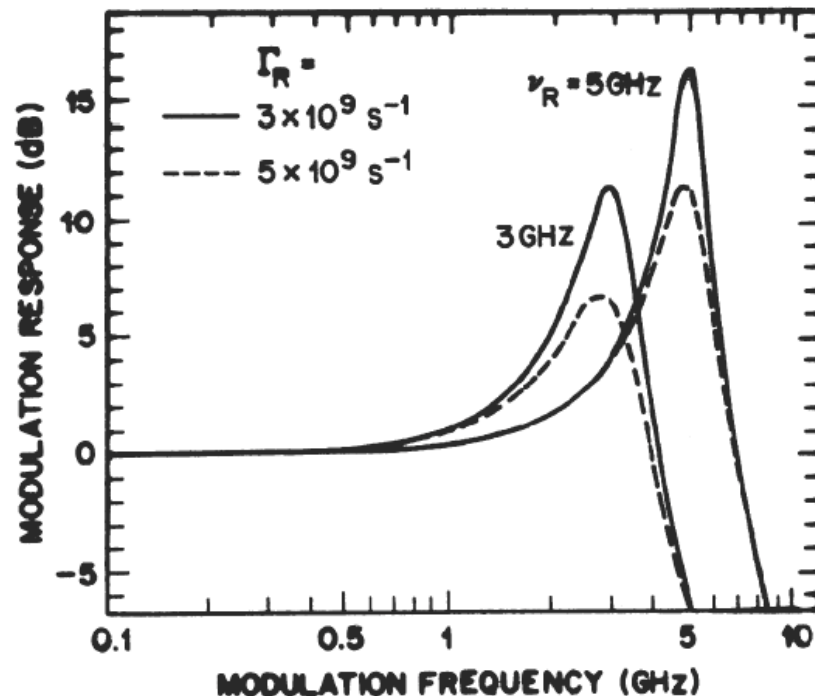


Απόκριση μικρού σήματος

$$\left| \frac{p_m(\omega_m)}{p_m(0)} \right| = \frac{\Omega_R^2 + \Gamma_R^2}{\sqrt{(\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_R^2)^2 + 4\Omega_m^2 \Gamma_R^2}}$$

- Στα περισσότερα ημ/κα laser: $\Gamma_R < 0.1\Omega_R$ οπότε:
 - 3dB bandwidth for the laser:

$$\omega_{3dB} \approx \sqrt{\frac{3G_N(I_b - I_{th})}{q}}$$





Απόκριση μεγάλου σήματος

- For large-signal operation ($I_m \approx I_b$ and $I_b \approx I_{th}$), η γραμμικοποίηση των rate equations δεν ισχύει
 → επιλύονται αριθμητικά.

- The pulse has limited rise and fall times
- The pulse has initial overshoot due to relaxation oscillations

The chirp can be found by noting that:

$$\delta\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \beta_c \left(G_N(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right)$$

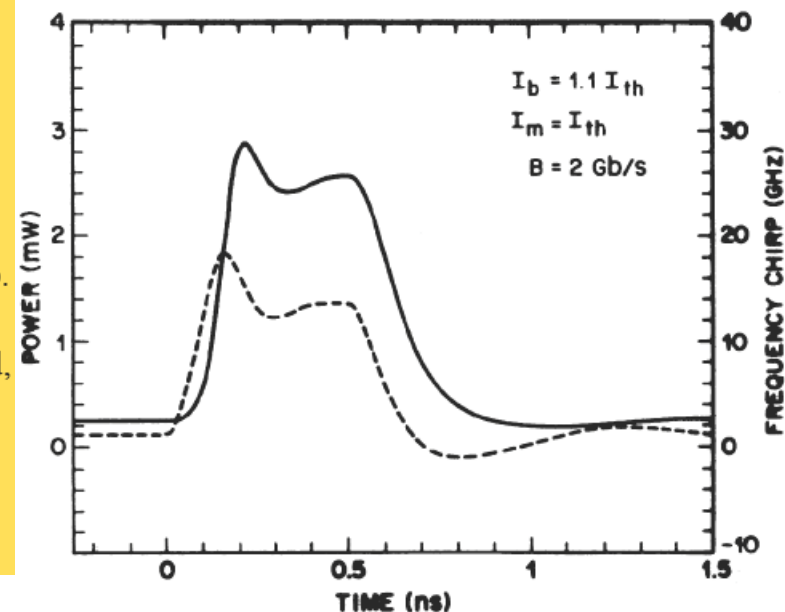
The frequency at the leading edge of the pulse shifts to the blue.
 The frequency at the trailing edge of the pulse shifts to the red.

The pulse spectrum is much broader than in absence of chirp.

1.55 μm systems using standard fiber and directly modulated, single-longitudinal mode lasers will be limited by chirp.

The most effective way to reduce the chirp substantially is to modulate the light in an external optical modulator.

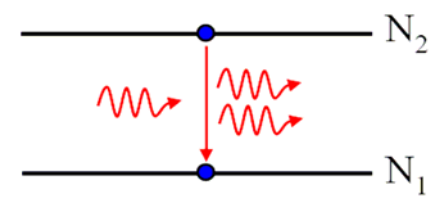
Calculated response with $I_m = I_{th}$, $I_b = 1.1I_{th}$
 Rectangular, 500 ps long pulse
 (_____ = power, - - - - - = chirp with $\beta_c = 5$)



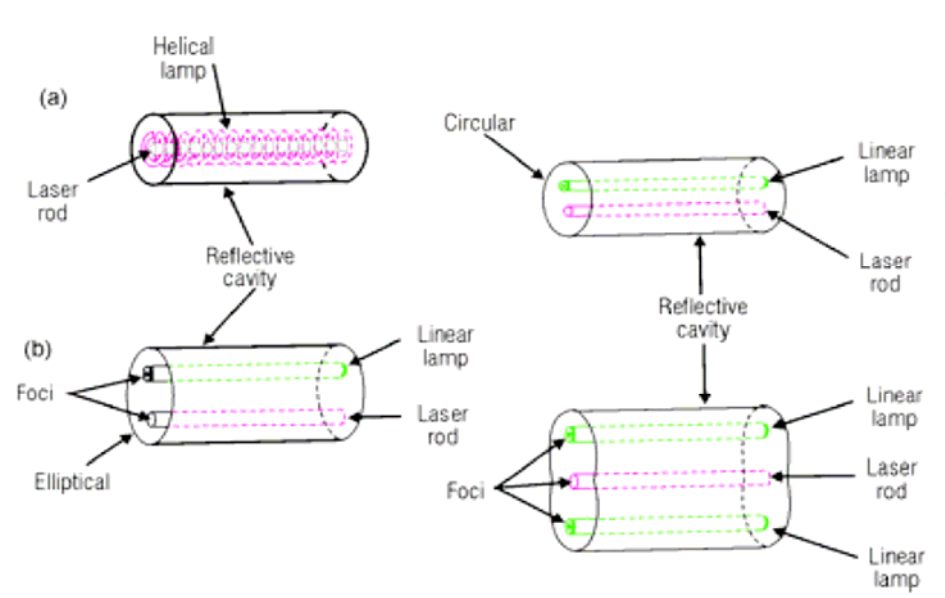


Laser Αερίου

- σύστημα δυο-σταθμών, two-level system
- Οπτική άντληση $N_2 > N_1$



- Οπτικά κάτοπτρα για ανατροφοδότηση





Εφαρμογές

- Η κάθε εφαρμογή απαιτεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά από ένα laser:
 - Μήκος κύματος ακτινοβολίας
 - Ισχύς δέσμης
 - Παλμική ή συνεχής λειτουργία
 - Διάρκεια και μορφή παλμών
- **Εφαρμογές στη Φυσική και Χημεία**
- **Εφαρμογές στη Βιολογία και Ιατρική**
 - διαγνωστικό εργαλείο είτε ως χειρουργικό εργαλείο είτε τέλος για να δημιουργήσει μία μη αντιστρεπτή μεταβολή των βιομορίων.
- **Κατεργασία Υλικών**
- **Οπτικές Επικοινωνίες**
- **Θερμοπυρηνική Σύντηξη**
- **Ολογραφία**
- **Μετρήσεις Αποστάσεων με Laser**
- **Έλεγχος της Μόλυνσης του Περιβάλλοντος με laser**



Εφαρμογές

| Τύπος Laser | Μήκος κύματος (μm) | Κυριότερες χρήσεις |
|---|--------------------------------------|--|
| Ruby | 0,694 | Δορυφορική μέτρηση απόστασης, Ιατρικές χρήσεις, Διατηρητική |
| Neodymium-YAG | 1,064 | Διάφορες επεξεργασίες μετάλλων, Συγκόλληση, Χαρακτική, Ιατρική χρήση (χειρουργική, οφθαλμιατρική), Στρατιωτικές χρήσεις (Μέτρηση απόστασης), LIDAR |
| Carbon Dioxide (CO ₂) | 10,6 | Επεξεργασία μετάλλων, LIDAR, Χειρουργική χρήση, Radar, Σύντηξη |
| Nitrogen (N) | 0,337 | Έρευνα, φασματοσκοπία, Άντληση των Dye Laser |
| Argon Ion Gas | 0,488 – 0,514 0,351 & 0,363 | Χειρουργική Οφθαλμών, Οπτική χαρακτική, Laser Shows, Ιατρικές χρήσεις, Έρευνα |
| Helium Neon (HeNe) | 0,632 | Ευθυγραμμίσεις σε εργαστήρια, σε οικοδομικές εργασίες, Ολογραφία, VideoDisc |
| Helium Cadmium (HeCd) | 0,422 | Εκτυπωτές, Οθόνες, Έρευνα |
| GaAs | 0,840 | Επικοινωνίες, «Φάροι» υπερύθρου, CD-players, Laser Printers |
| Krypton Ion Gas | 0,476 0,528 0,568 0,847 | Διασκέδαση, Ολογραφία, Διαγνωστική, Οθόνες |
| Dye Lasers (Rhodamine 6G) | 0,400-0,600 | Φασματοσκοπία, Οφθαλμολογία, Ειδική Φωτογράφιση |
| Excimer – Xenon chloride (XeCl) Krypton fluoride (KrFl) Xenon fluoride (XeFl) Argon fluoride (ArFl) | 308 nm 248 nm 350 nm 193 nm | Φωτολιθογραφία, Κατεργασία επιφανειών, Άντληση των Dye Laser, Έρευνα, Διαθλαστική χειρουργική |



Τύποι laser και ισχύς εξόδου

| Τύπος | Laser | Μήκος Κύματος | Ισχύς Εξόδου |
|-----------------------|---|--------------------------------------|--|
| Αερίου | Helium Neon (He-Ne) | 632,8 nm | CW μέχρι 100 mW |
| | Helium Cadmium (HeCd) | 422 nm 325 nm | CW μέχρι 100 mW |
| | Argon Ion (Ar ⁺) | 488 και 514 nm plus blue lines | CW μέχρι 20 W |
| | Krypton Ion (Kr ⁺) | 647 nm 476 nm 528 nm | CW μέχρι 10 W |
| | Carbon Dioxide (CO ₂) | 10,6 μm 9,6 μm | CW ή παλμικό, 50kW 200W CW |
| | Hydrogen Fluoride (HF) | 2,70 μm | CW μέχρι 10kW Παλμικό μέχρι MW |
| | Nitrogen (N) | 337,1 nm | Παλμικό μέχρι 1 MW |
| | Excimer – Xenon chloride (XeCl) Krypton fluoride (KrFl) Xen fluoride (XeFl) Argon fluoride (ArFl) | 308 nm 248 nm 350 nm 193 nm | Παλμικό μέχρι 10 MW |
| Στερεάς κατάστασης | Ruby | 694,3 nm | Παλμικό μέχρι 10 GW |
| | Neodymium/YAG (Nd:YAG) | 1064 και 1319 nm | Παλμικό ή CW μέχρι TW, 100W μέσος όρος CW |
| | Neodymium/Glass (Nd:Glas) | 1064 nm | Παλμικό μέχρι GW |
| | Erbium | 1,504 | |
| Ημιαγωγών | Διάφορα υλικά GaAlAs InGaAsP | 750 - 900 nm 100-1600 nm | CW (κάποια παλμικά) μ 50mW |
| Χρωστικής | Χρωστικής – Πάνο από διαφορετικές χρωστικές laser ενεργούν ενεργά μέσα laser | 300 -1800 nm 1100-1600 nm | Παλμικό μέχρι 100 MW |
| | Rhodamine 6G | 570-650 nm | |



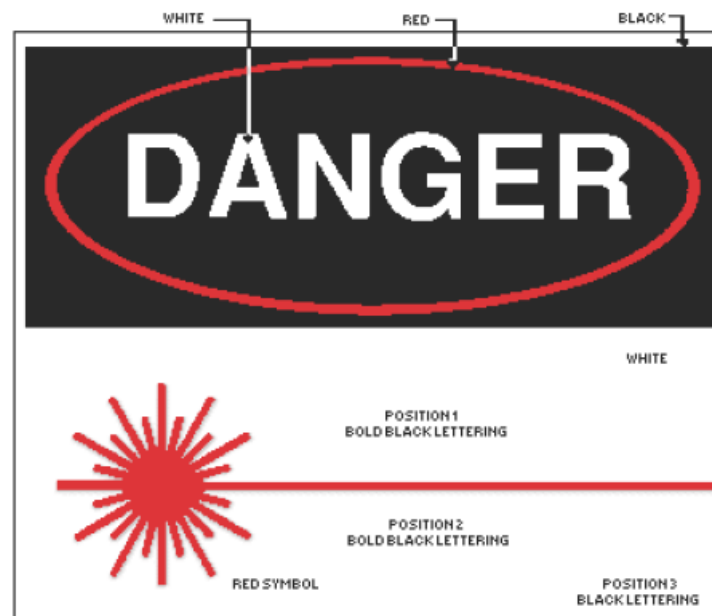
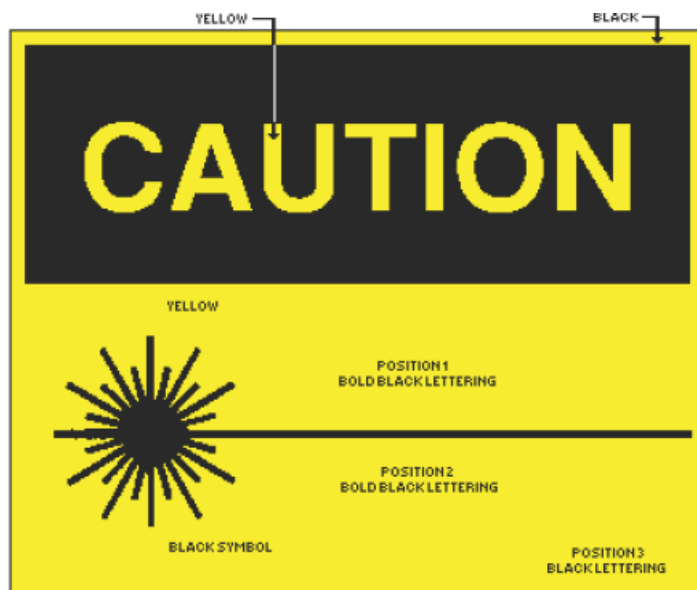
Ασφάλεια

- Όταν η ΗΜ ενέργεια από ένα laser προσπίπτει σε έμβιο στόχο και απορροφάται, μετατρέπεται άλλη μορφή ενέργειας:
 - π.χ. ενέργεια χημικών δεσμών, θερμότητα, μηχανική ενέργεια (κύματα πίεσης), ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου ή ακόμη και σε φωτεινή ενέργεια (φθορισμός – φωσφορισμός)
- Ανάλογα με το μηχανισμό αυτής της ενεργειακής μετατροπής, η ακτινοβολία laser προκαλεί στους ιστούς θερμικές και μη θερμικές διαδικασίες με δύο κύριους τρόπους δράσης:
 - Θερμικές διαδικασίες:
 - πήξη, ατμοποίηση
 - Μη θερμικές διαδικασίες:
 - φωτομηχανική δράση, φωτοχημική δράση



Ταξινόμηση των laser

- **Τάξη I :** περιλαμβάνει συσκευές που δεν εκπέμπουν επιζήμια επίπεδα ακτινοβολίας, για ματια, [εκπεμπόμενη ισχύς $< 0,98\text{mW}$: (CD) player, εκτυπωτές laser και τα CD ROM]
- **Τάξη II:** εκπέμπουν ακτινοβολία στην ορατή περιοχή και έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν βλάβη στα μάτια μετά από χρόνια έκθεση. [εκπεμπόμενη ισχύς της τάξης του 1mW και το μήκος κύματος $400\text{-}700\text{nm}$ σαρωτές των ταμείων των υπερκαταστημάτων, το laser He-Ne].
- **Τάξη IIIα :** τα laser είναι γενικά ακίνδυνα όταν τα κοιτάξουμε στιγμιαία με γυμνό μάτι, αλλά θέτουν μεγάλο κίνδυνο για τα μάτια όταν κοιταχθούν μέσα από οπτικά όργανα όπως μικροσκόπια και κυάλια. [μέγιστη ισχύς εξόδου 5mW , σε χειρουργικές διατάξεις και σε στυλοδείκτες (pointer pens)]
- **Τάξη IIIβ :** Η ακτινοβολία των laser αυτής της τάξης μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό σε απευθείας επαφή με το ανθρώπινο μάτι ή από κατοπτρική ανάκλαση. Αντίθετα, η επαφή με διάχυτα ανακλώμενη σε αντικείμενα ακτινοβολία είναι γενικά ασφαλής, υπό την προϋπόθεση η απόσταση του ματιού από την ανακλώμενη επιφάνεια να είναι μεγαλύτερη από 13cm και η διάρκεια της έκθεσης να είναι μικρότερη από 10s . Τα laser αυτά δίνουν ισχύ 0.5W
- **Τάξη IV:** Η τάξη αυτή συμπεριλαμβάνει όλα τα laser με ισχύ πάνω από 500mW σε συνεχή λειτουργία. Θέτουν κινδύνους για τραυματισμούς στα μάτια και στο δέρμα καθώς και κίνδυνο ανάφλεξης εύφλεκτων υλικών. Το κοίταγμα της δέσμης, ακόμη και ύστερα από διάχυτη ανάκλαση, μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό στα μάτια και στο δέρμα. Όλα τα μέτρα ασφαλείας για αυτήν την τάξη πρέπει να τηρούνται πολύ αυστηρά.





Η ενίσχυση του οπτικού σήματος

- Στα πρώτα οπτικά συστήματα η ενίσχυση του οπτικού σήματος γίνεται με ΟΕ-ΕΟ μετατροπή: εξαιρετικά πολύπλοκες ακριβές διατάξεις, που μπορούσαν να λειτουργήσουν μόνο για αναλογικά ή μόνο για ψηφιακά συστήματα, για ένα μήκος κύματος και ένα ρυθμό (bitrate), με αναπόφευκτο το θόρυβο της ηλεκτρονικής ενίσχυσης - και περιοριστικές για το σύστημα στην περίπτωση αναβαθμίσεων, και υψηλό κόστος συντήρησης.
- Οι αδυναμίες αυτές ξεπερνιούνται με τη διατήρηση του σήματος σε οπτική μορφή σε όλο το μήκος της διαδρομής και επομένως με την απευθείας ενίσχυση του από καθαρά οπτικούς ενισχυτές, αποφεύγοντας τις πολύπλοκες οπτικοηλεκτρικές και ηλεκτροοπτικές μετατροπές. Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν οποιοδήποτε σήμα ανεξαρτήτως σχήματος διαμόρφωσης, μήκους κύματος και ρυθμού μετάδοσης



Πριν την ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Χρήση Αναγεννητών Επαναληπτών
(Regenerative Repeaters)

RR:

Δέκτης-ηλεκτρικός ενισχυτής-ηλεκτρικός συγχρονισμός-
διαμόρφωτές παλμών-πομπός Laser

Μειονεκτήματα:

Πολυπλοκότητα

Κόστος

Ή Ψηφιακή ή Αναλογική λειτουργία

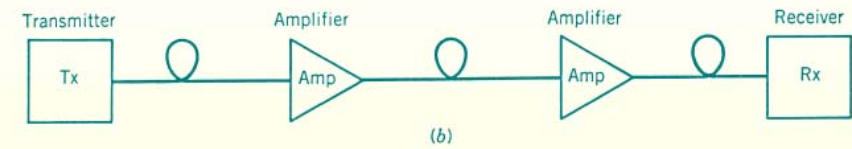
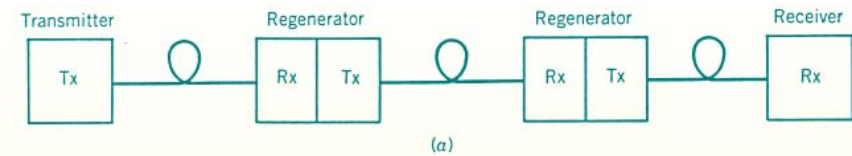
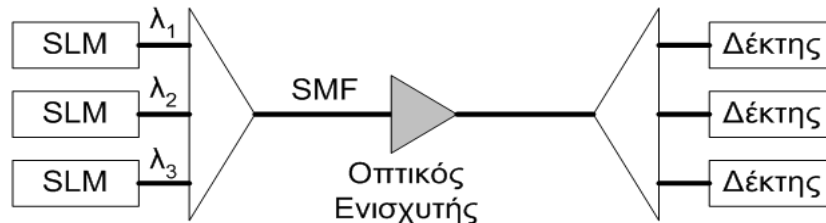
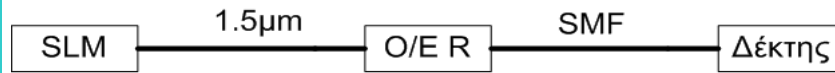
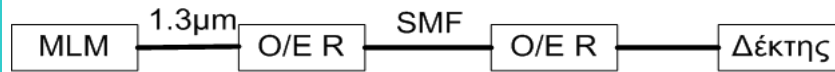
Λειτουργία σε ένα μήκος κύματος και bitrate

Ηλεκτρικός θόρυβος

Περιορισμός αναβαθμίσεων



Εξέλιξη Συστημάτων Σημείο Προς Σημείο (Point to Point)



SMF,MMF: Single Mode Fiber, Multi Mode Fiber

MLM,SLM: Multilongitudinal, Single longitudinal LASER



Οπτική Αναγέννηση 3R - 2R - R

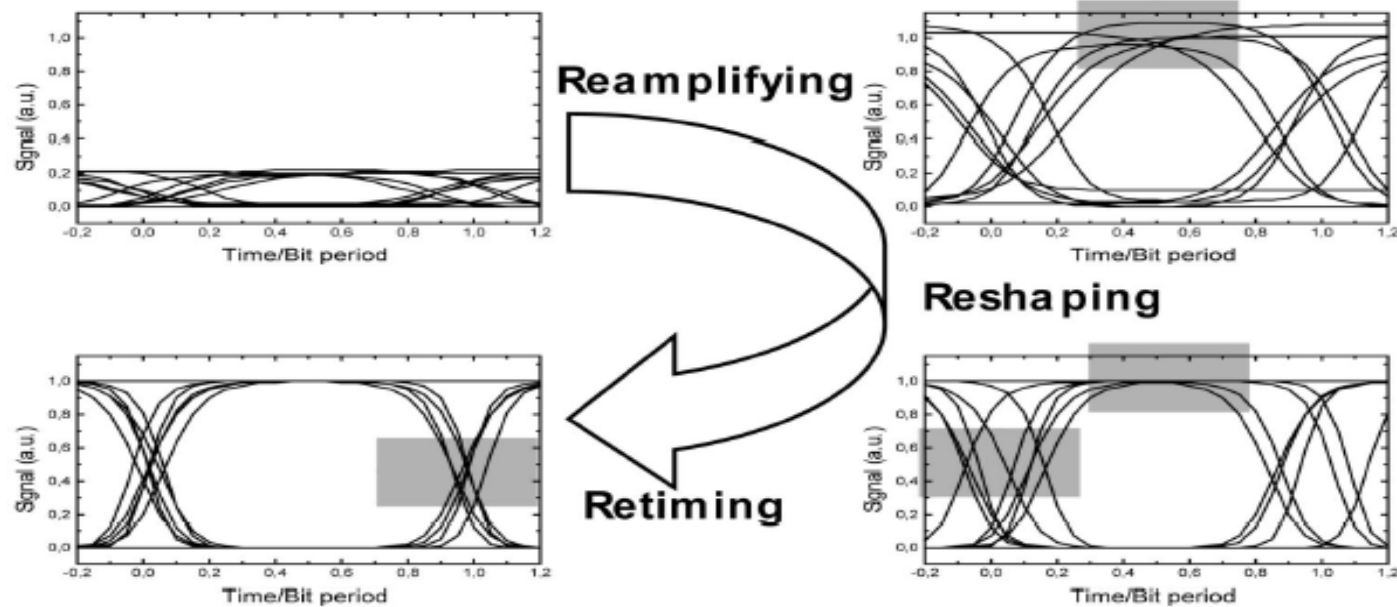


Fig. 1. Principle of 3R regeneration as applied to NRZ signals: 1) reamplifying, 2) reshaping, and 3) retiming.



Fig. 2. Generic layout of a 3R regenerator using nonlinear gates.

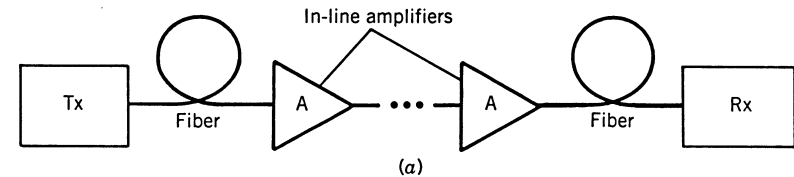


Amplifier Types and Applications

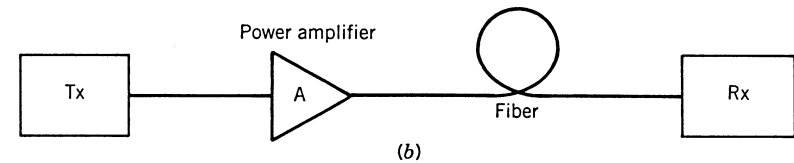
Amplifiers are used to overcome fiber loss

They are used in 4 basic applications:

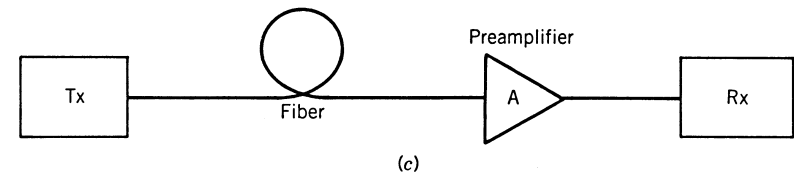
In-line amplifiers for periodic power boosting:



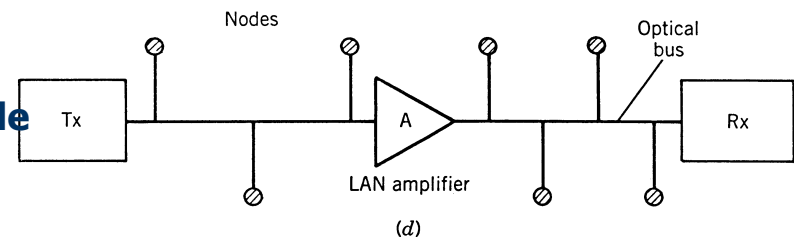
Power Amplifier to increase the power to greater levels than possible from the source:



Pre-amplifier to increase the received power sensitivity:



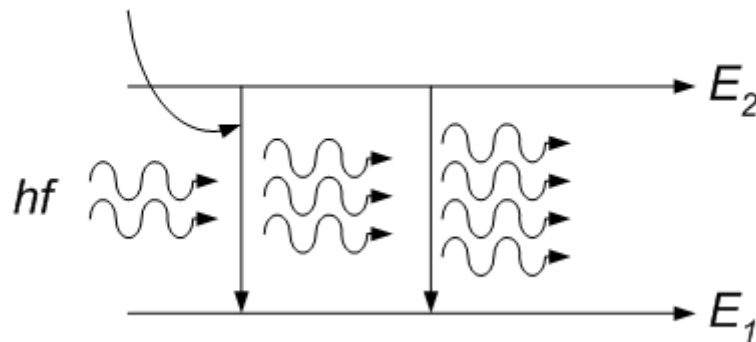
Distribution loss compensation in local area or cable networks:





Αρχή λειτουργίας Οπτικών Ενισχυτών

Εξαναγκασμένη
Εκπομπή Φορέων



$$hf = E_2 - E_1$$

- ✓ Η ενίσχυση του οπτικού σήματος επιτυγχάνεται με την εξαναγκασμένη εκπομπή φορέων από διεγερμένους φορείς
- ✓ οι φορείς μπορεί να είναι ιόντα ή ηλεκτρόνια και διεγείρονται μέσω οπτικής ή ηλεκτρονικής άντλησης



Comparison of Real and Ideal Amplifier

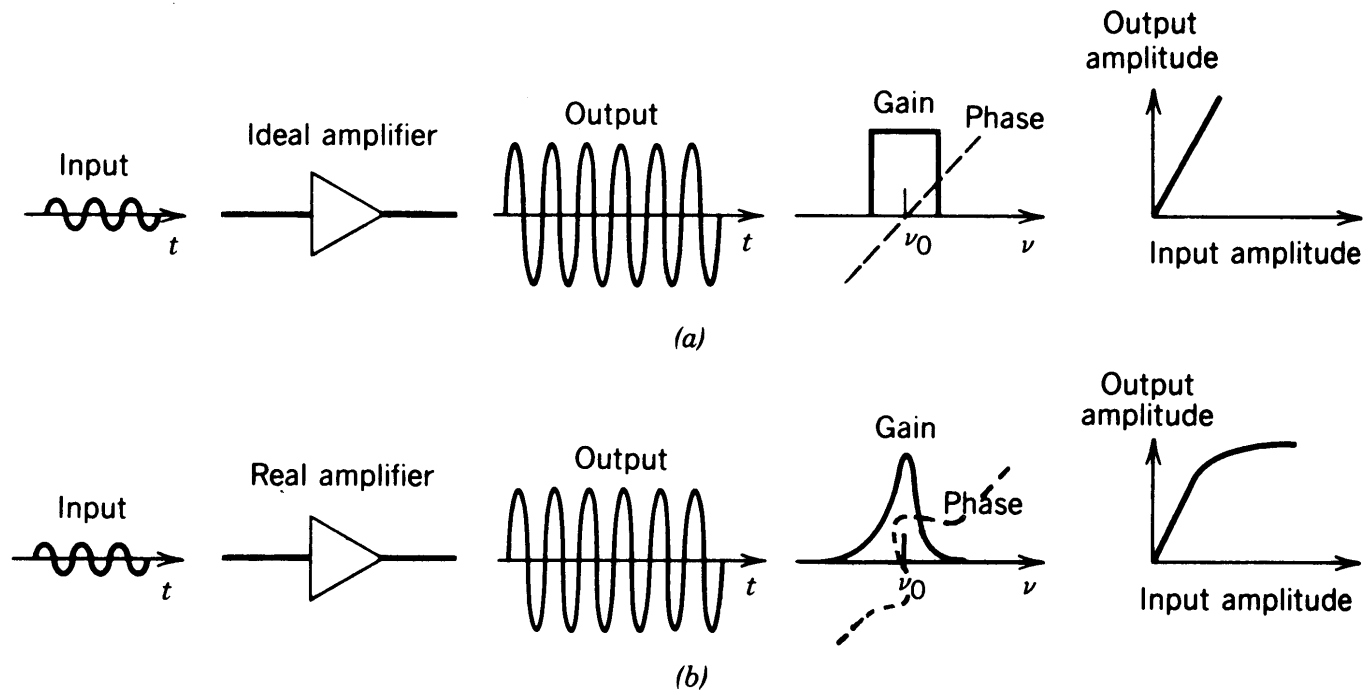
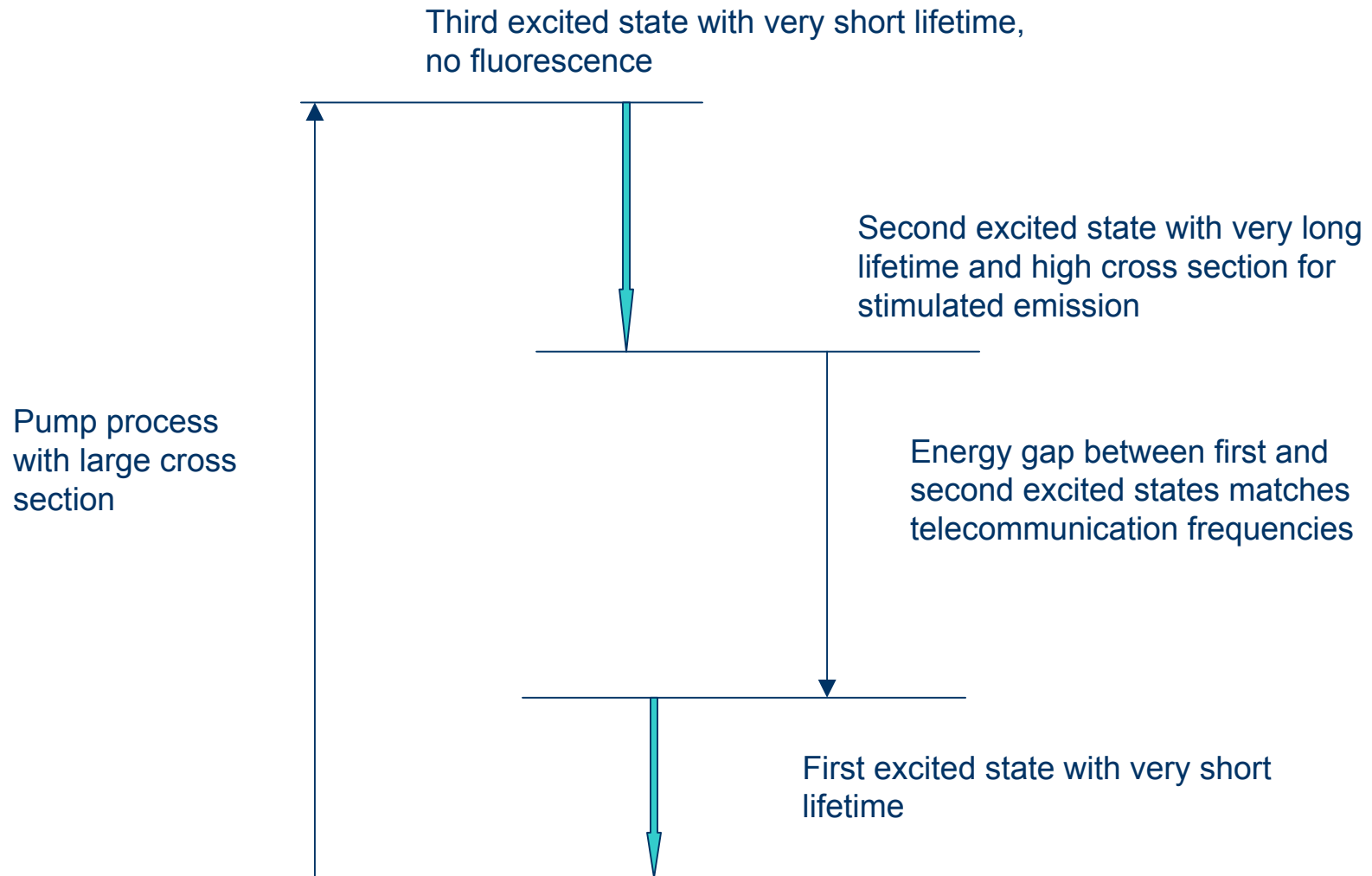


Figure 13.0-2 (a) An ideal amplifier is linear. It increases the amplitude of signals (whose frequencies lie within its bandwidth) by a constant gain factor, possibly introducing a linear phase shift. (b) A real amplifier typically has a gain and phase shift that are functions of frequency, as shown. For large inputs the output signal saturates; the amplifier exhibits nonlinearity.



Ideal Amplifier System





ΤΥΠΟΙ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Οι βασικοί τύποι οπτικών ενισχυτών είναι:

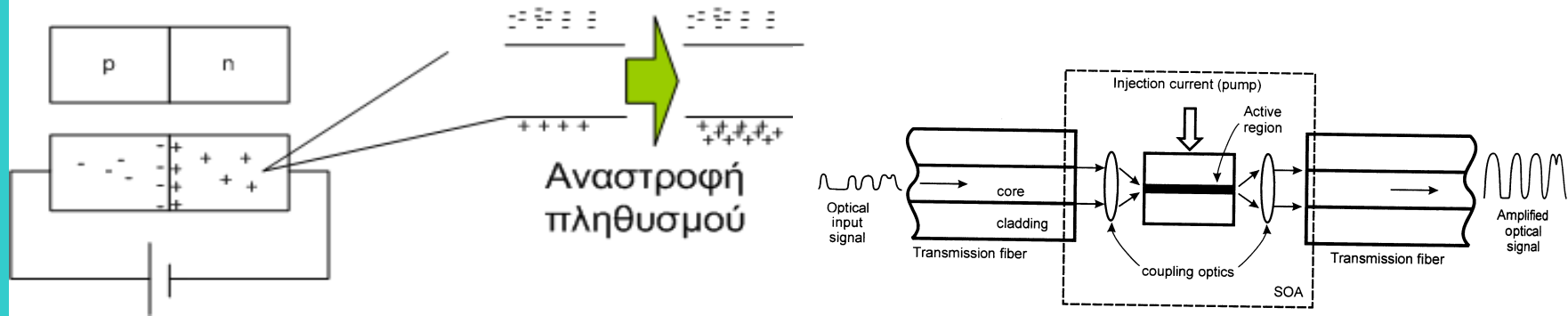
- ✓ Semiconductor amplifiers SOA (lasers that aren't lasing)
- ✓ Doped fiber amplifiers EDFA
- ✓ Raman and Brillouin Amplifiers

Τα κυριώτερα χαρακτηριστικά παράμετροι:

- ✓ Gain and gain bandwidth
- ✓ Gain saturation
- ✓ Noise and noise figure



Οπτικοί Ενισχυτές Ημιαγωγού (SOA)



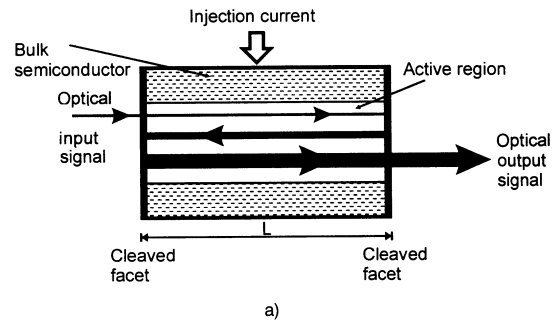
Τον ρόλο των φορέων τον παίζουν τα ηλεκτρόνια και οι οπές

Η άντληση γίνεται με την εφαρμογή τάσης σε μία δίοδο pn

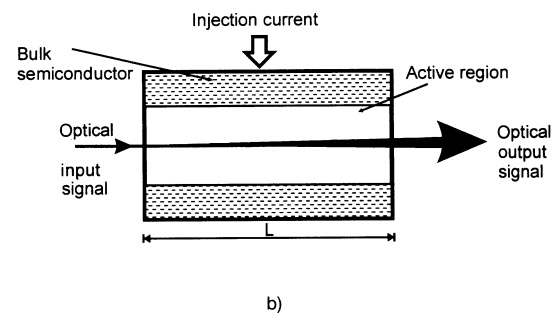
Συνήθως χρησιμοποιούνται ετεροδομές (heterostructures) για καλύτερο περιορισμό των φορέων



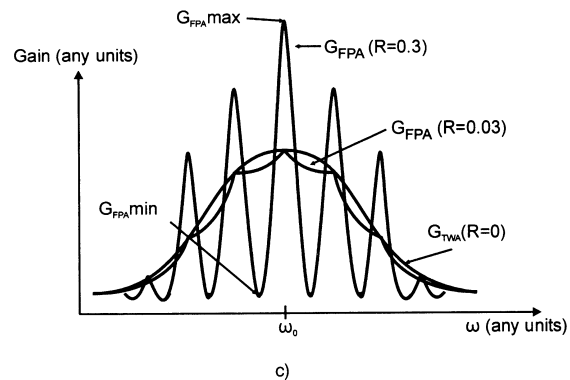
Τύποι Ενισχυτών ημιαγωγού – SOA



Fabry-Perot Amplifier
High gain G but non-uniform gain spectrum



Traveling wave amplifier
Broadband but very low facet reflectivities are needed



$$G=G(f)$$

Ripples are caused by the cavity modes
The overall gain curve is due to the width of the atomic transition in the semi-conductor



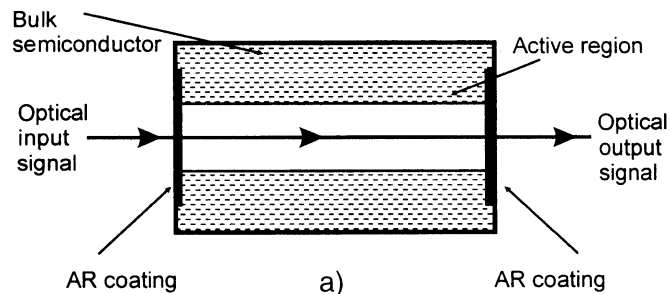
Traveling Wave SOA

□ To make a traveling wave Semiconductor Optical Amplifier the Fabry-Perot cavity resonances must be suppressed

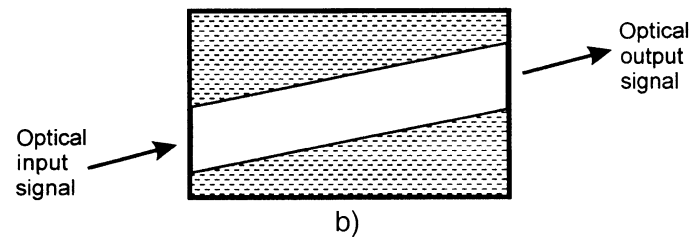


The reflectivity must be reduced!

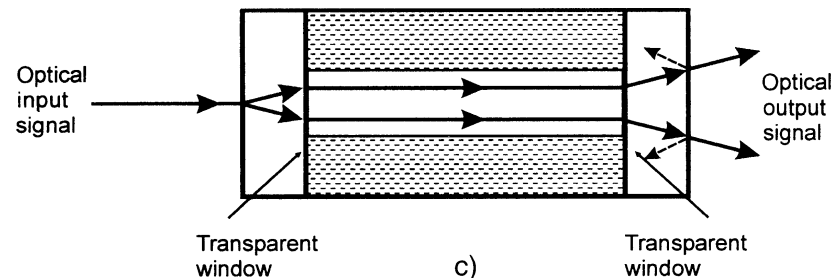
Three approaches are commonly used:



✓ Anti-reflection coating



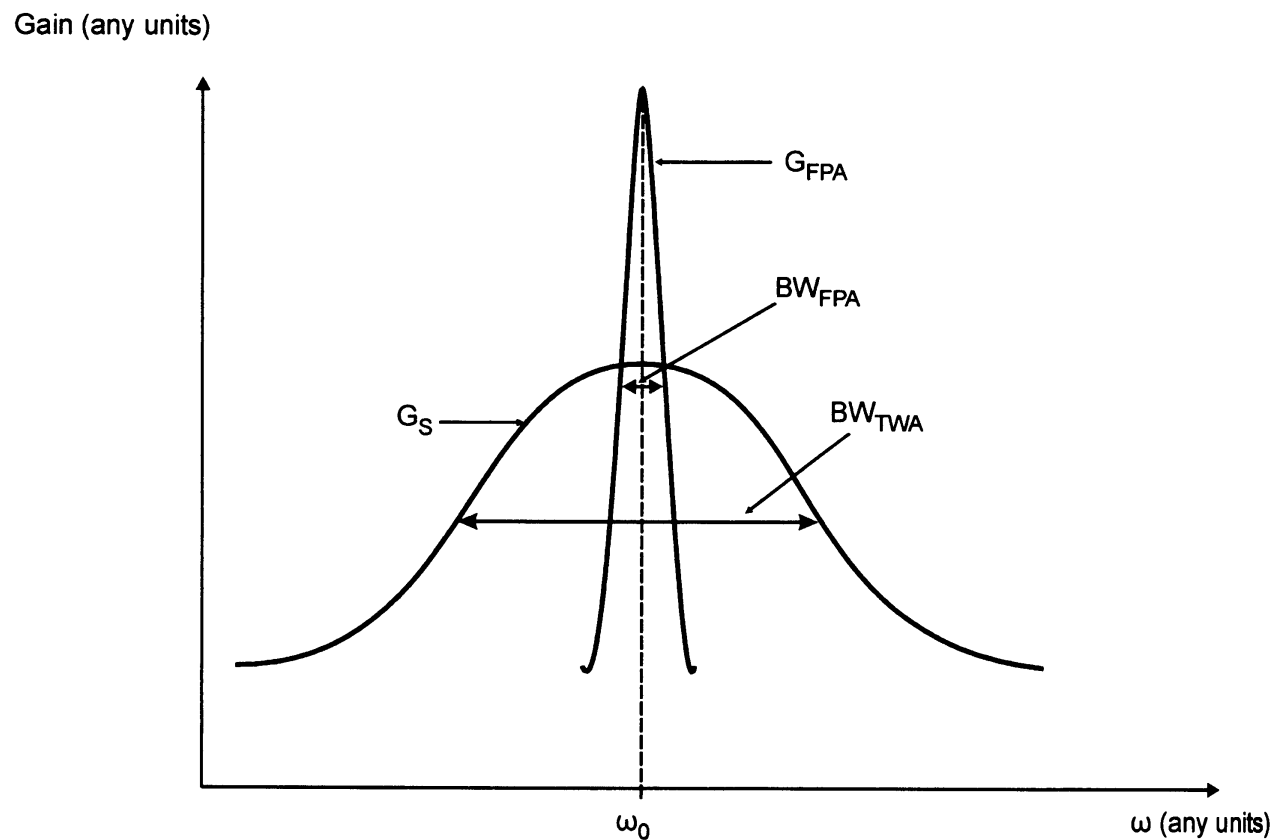
✓ Tilted Active Region



✓ Use of transparent window regions



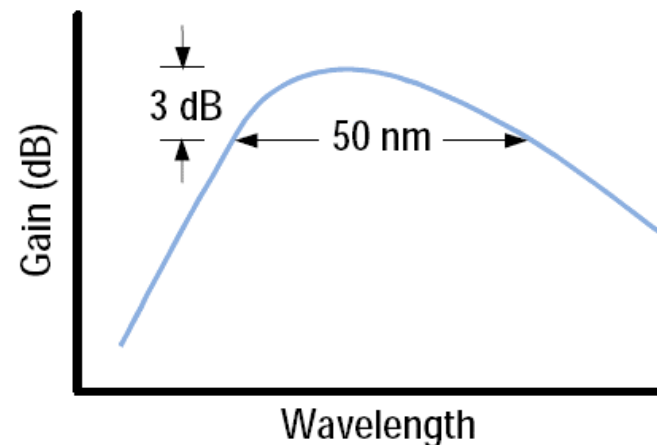
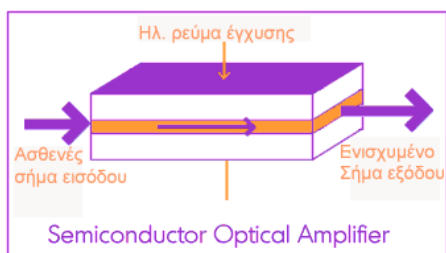
Σύγκριση εύρους ζώνης SOA






Ενισχυτές ημιαγωγού (Semiconductor Optical Amplifiers – SOA)

- Συνεπώς Οι SOA είναι κατασκευαστικά διατάξεις Laser (εξαναγκασμένη εκπομπή χωρίς οπτική ανατροφοδότηση)



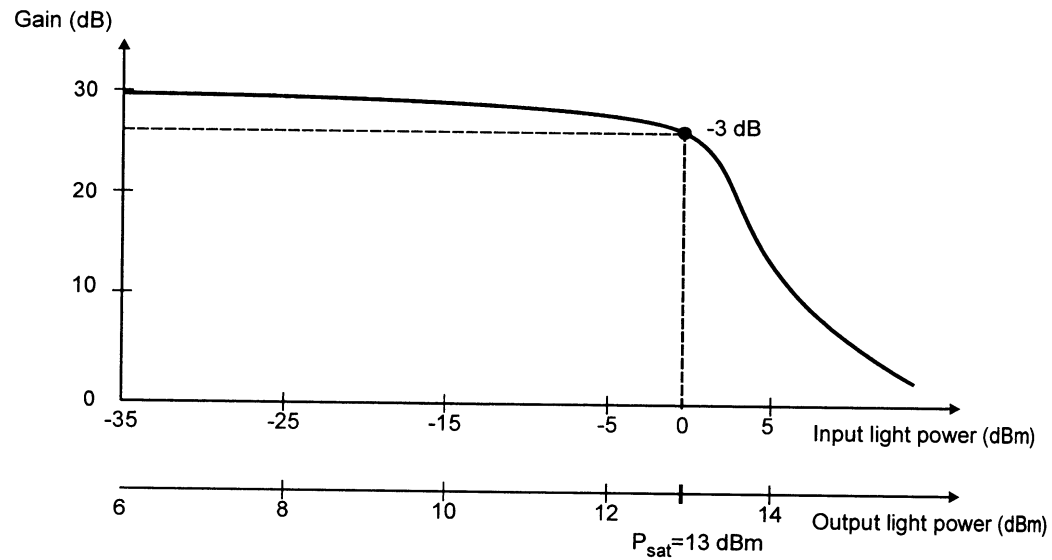
- $BW = 35 - 240\text{nm}$
- Μπορούν να ολοκληρωθούν μονολιθικά με άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα
- Εισάγουν θόρυβο στο οπτικό σήμα και έχουν σχετικά μεγάλο κόστος
- Μικρός χρόνος παραμονής στη διεγερμένη κατάσταση
- Δυσκολία σύνδεσης με οπτική ίνα 

Μικρή ολική απολαβή (~15 dB)



Ισχύς κορεσμού - Saturation Power

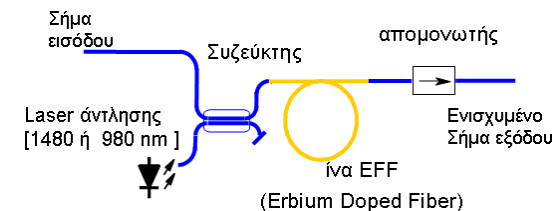
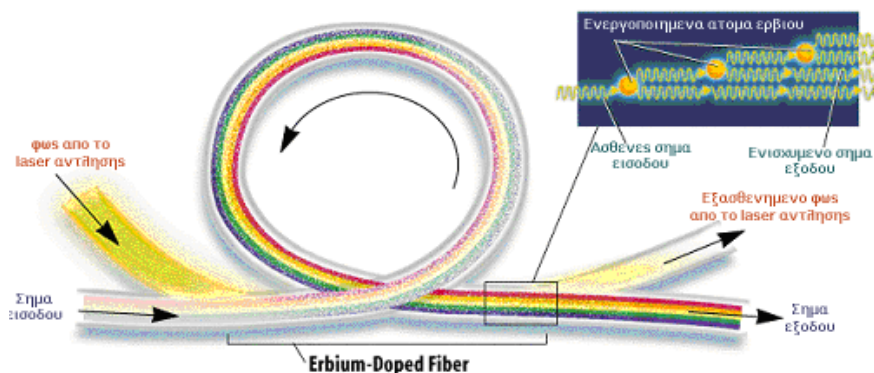
- ❑ Οι SOA παρουσιάζουν κορεσμό ομοιο με ένα άτομικό σύστημα 2 σταθμών
- ❑ The typical saturation output power for SOAs is around 5-10 mW





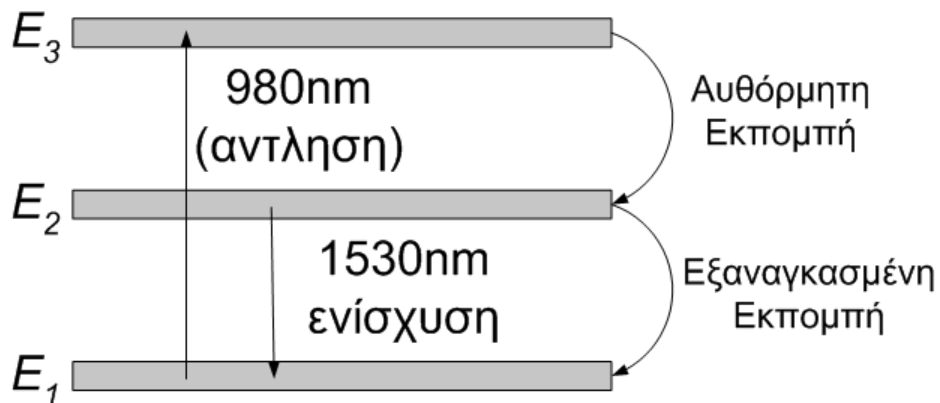
Ενισχυτές Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers - EDFA)

- **EDFA:** μικρού μήκους οπτική ίνα της οποίας ο πυρήνας εμπλουτίζεται με έρβιο (Er^{++}), ένα οπτικά ενεργό χημικό στοιχείο. Τα ιόντα ερβίου διεγείρονται σε μία ανώτερη ενεργειακή στάθμη με την απορρόφηση φωτός από μία πηγή **LASER**, συνήθως στα **1480 nm** ή στα **980 nm (Laser άντλησης)**. Τα διεγερμένα ιόντα ερβίου μεταπίπτουν στη βασική ενεργειακή στάθμη είτε με αυθόρμητη είτε με εξαναγκασμένη εκπομπή φωτονίων (εξαιτίας της αλληλεπίδρασης με τα φωτόνια του προς ενίσχυση σήματος)





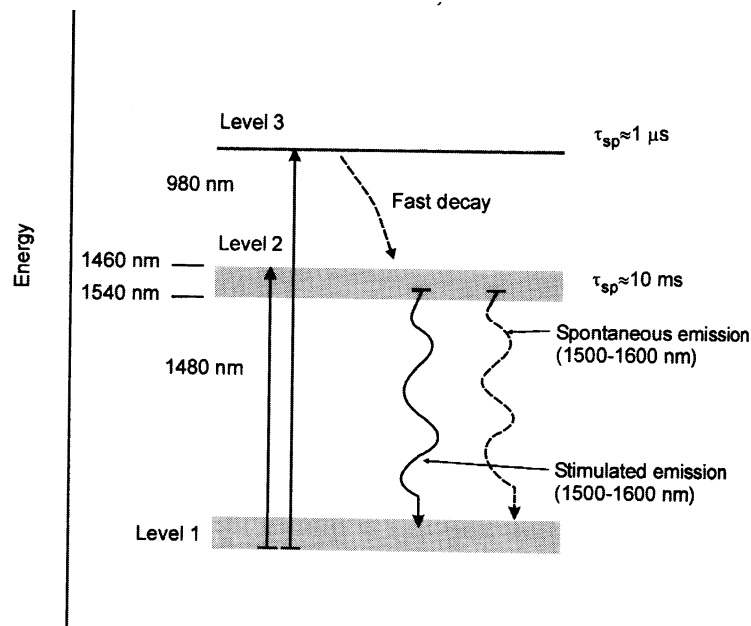
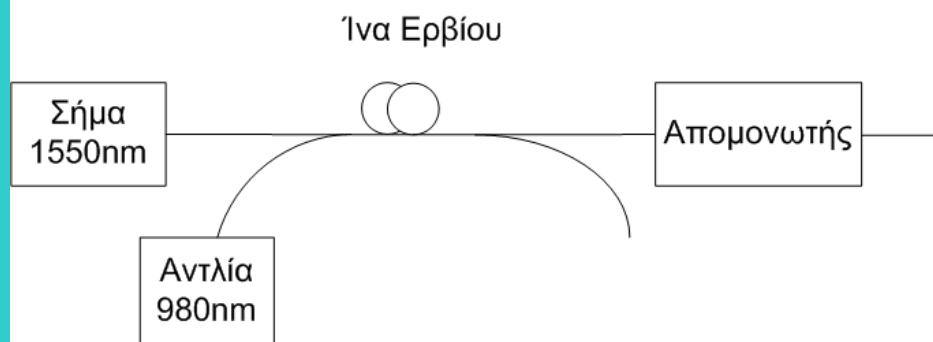
Οπτικοί Ενισχυτές Ίνας Ερβίου (EDFA)



Οι φορείς είναι τα ιόντα Ερβίου

Η άντληση γίνεται με LASER στα 980nm ή στα 1480 nm.

- ✓ 980 nm pumping generates both higher gain and less noise
- ✓ 1480 nm pumping generates higher saturated power and tolerates a broader range of pump wavelengths





Ενισχυτές Ίνας με Πρόσμειξη Ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers – EDFA)

- **BW: 35 nm**
- Οι EDFAs επιβάλλουν τη λειτουργία των οπτικών ζεύξεων μόνο στο οπτικό παράθυρο των **1525-1565nm**
- Απολαβή πάνω από 40 dB και μέγιστη ισχύς εξόδου πάνω από 27 dBm
- Μεγάλος χρόνος ζωής των φωτονίων στη διεγερμένη κατάσταση (περίπου 10 msec)



Απαιτούμενο μήκος Er-doped fiber

- Gain coefficient per length g depends on population inversion and cross section for stimulated emission

$$g = \sigma_s (N_2 - N_1)$$

Overall gain G depends on g and length L : $G = e^{gL}$

Και σε decibels: $G = 10 \log e^{gL}$



Παράδειγμα

$$N_1 = 1.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_2 = 4.8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_s = 7.0 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

$$g = 2.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$$

Ποιο το απαιτούμενο μήκος fiber για $G = 35 \text{ dB}$?

$$L = 38.4 \text{ meters}$$



Χαρακτηριστικά EDFA

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Απλή κατασκευή
- Αποδοτική Άντληση
- Μικρή ευαισθησία στη πόλωση
- Μικρές απώλειες
- Υψηλή ισχύς
- Χαμηλός θόρυβος
- Μικρή διασπορά και ελάχιστη διαφωνία
- Διαφανής λειτουργία ως προς το ρυθμό σηματοδοσίας,
- την διαμόρφωση και τα συστήματα WDM

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- EDFA χωρίς άντληση εξασθενεί το σήμα
- Μη ομαλό διάγραμμα φάσμα απολαβής
- Δύσκολη κατασκευή σε ολοκληρωμένο κύκλωμα

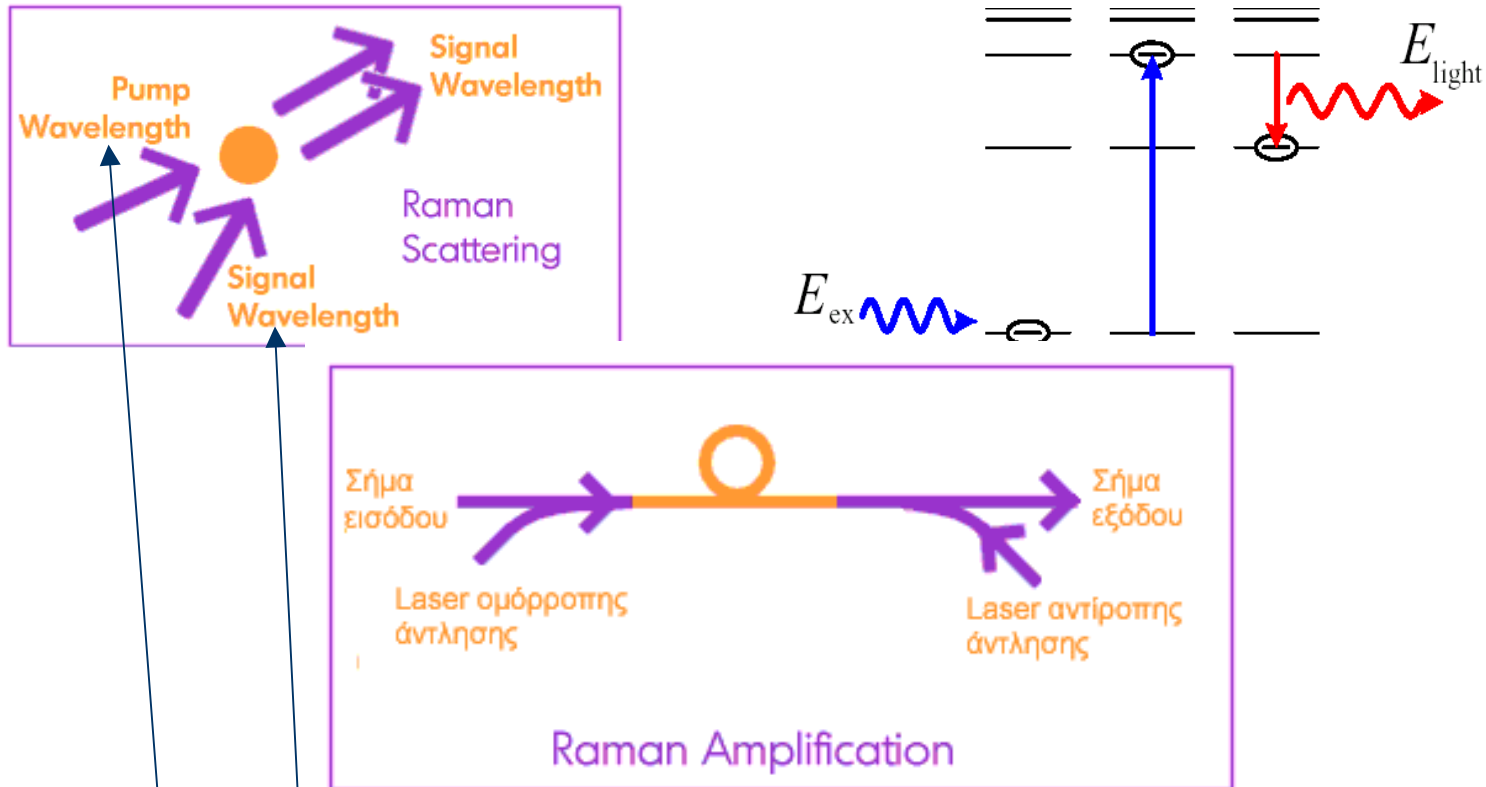


Praseodymium-doped Fiber Amplifier (PDFA)

- Praseodymium-doped Fiber Amplifier (PDFA)
 - Similar to EDFAs but 1310 nm optical window
 - Deployed in CATV (limited situations)
 - Not cost efficient for 1310 telecomm applications
 - Fluoride based fiber needed (water soluble)
 - Much less efficient (1 W pump @ 1017 nm for 50 mW output)



Ενισχυτής Raman

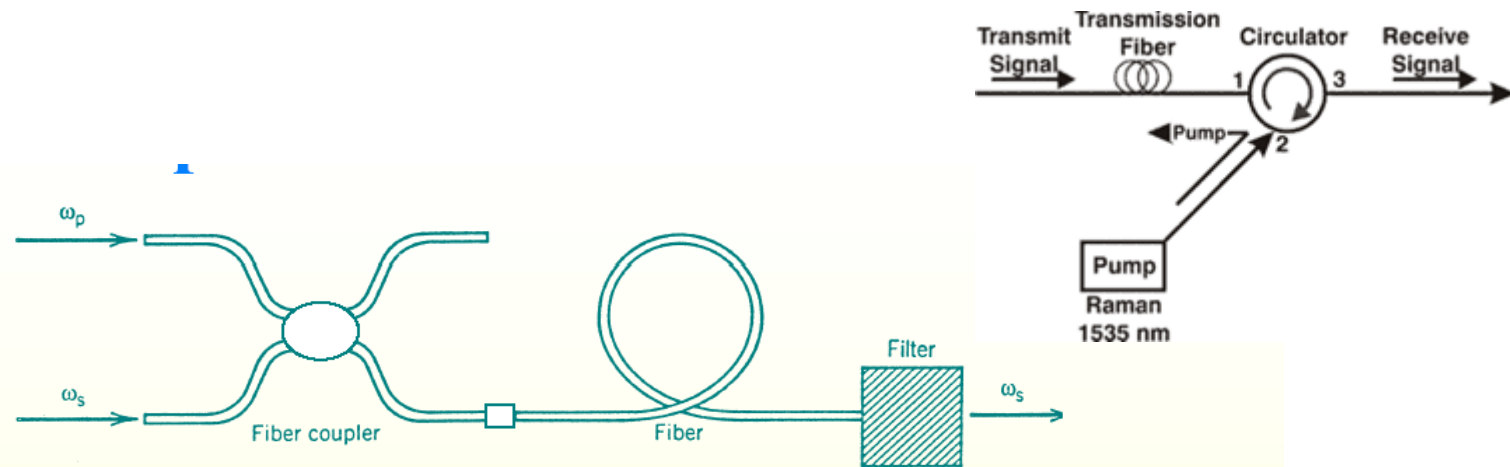


Σκέδαση Raman (SRS): Σκέδαση φωτονίου από τα μόρια του υλικού

$$\Omega_R = \omega_p - \omega_s$$



Ενισχυτής Raman

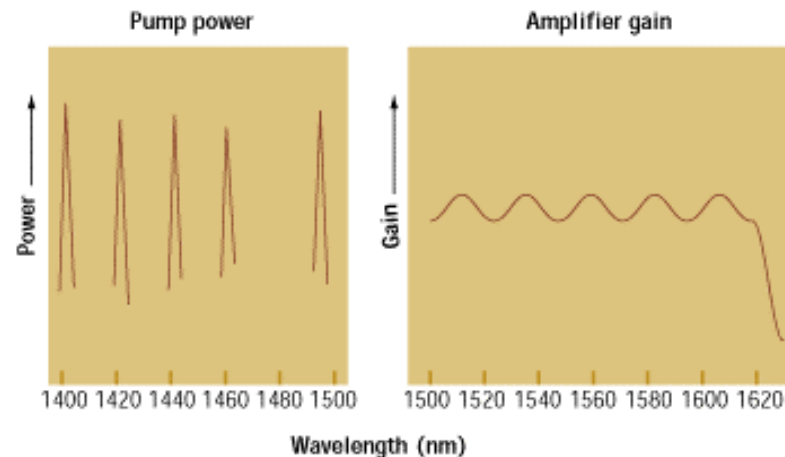


- Pumped optically in the forward or backward direction.
- Use **stimulated Raman scattering** for signal amplification.
- Can work **at any wavelength** with suitable pumping.
- Can provide **large bandwidth using multiple pumps**.
- Fiber used for data transmission can itself be used.
- Gain can be made **polarization independent** using orthogonally polarized pumps at each wavelength.



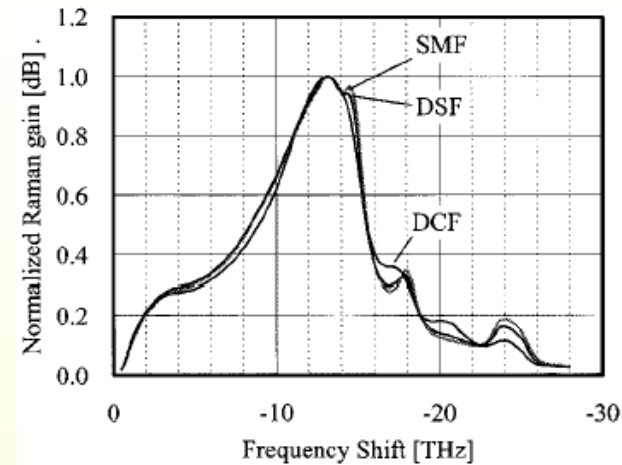
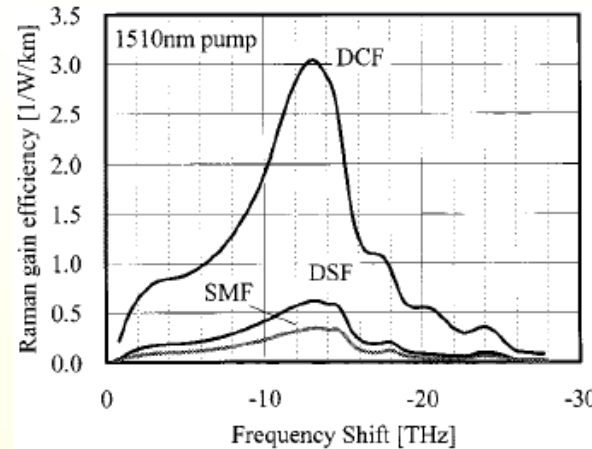
Δηλαδή.....

- Raman amplifiers:
- Use stimulated Raman effect and pump laser whose frequency is equal to signal frequency plus frequency of chemical bond in the material
- **Because it is a nonlinear process, requires very high pump powers (watts)**





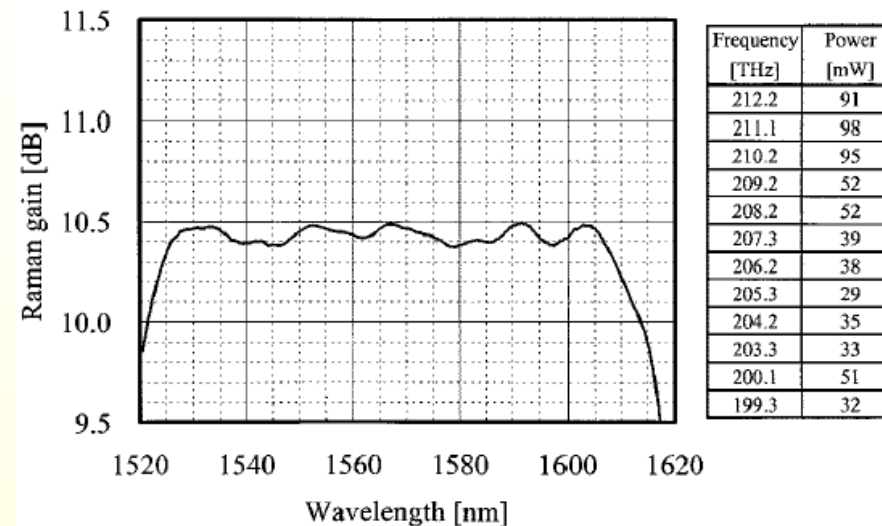
Ενισχυτής Raman Απολαβή & BW ΟΤΙΣ ΟΠΤΙΚΕΣ ΪΝΕΣ



- Main gain peak shifted by 13.2 THz (about 100 nm) from pump wavelength. $\Omega_R = 2\pi \cdot 13.2 \text{ Tc/s}$
- **Raman gain spectrum** extends over >20 THz.
- **Gain coefficient** $g(\omega) = g_R(\omega)(P_p/a_p)$ depends on mode area a_p of the pump.
- Can differ by a factor of 5 or more for SMF, DSF, and DCF.



Ενισχυτής Raman. Σχεδίαση

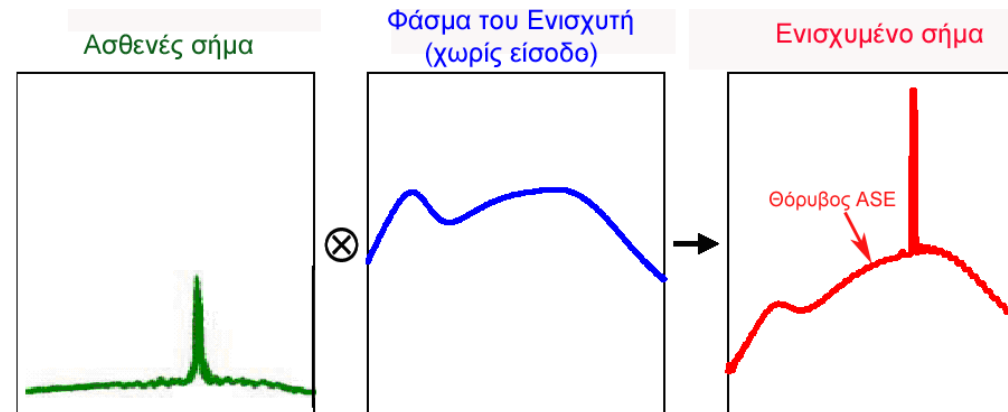


- Multiple pumps can provide **wide and flat gain spectrum**.
- Noise is smaller for Raman amplifiers ($n_{sp} \approx 1$).
- Suffer from **double Rayleigh scattering** and pump-noise transfer.
- Backward pumping provides a better design.



Ο θόρυβος στους οπτικούς ενισχυτές

- Σε έναν οπτικό ενισχυτή, η κύρια πηγή θορύβου είναι η ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (*amplified spontaneous emission – ASE*)



- Εικόνα Θορύβου F
- ΣΤΟΥΣ ΟΠΤΙΚΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ $F \geq 2$

$$F = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}}$$

$$F = \frac{2\rho_o}{Gh\nu} + \frac{1}{G}$$
$$P_{out} = GP_S + 2P_N$$
$$P_N = \rho_o B_o$$
$$\rho_o = n_{sp} h\nu (G - 1)$$

- Στην πράξη η απόσταση που μπορεί να ταξιδέψει το σήμα μεταξύ των ενισχυτών μπορεί να είναι μέχρι τα 120 km. Για αποστάσεις μεγαλύτερες από 600 km έως 1000 km το σήμα πρέπει να αναγεννηθεί !!!



Power and noise outputs

Power out:  amplified power  (ASE) noise

$$P = GP_s + (G - 1)n_{spon} m_t h \nu \Delta \nu_f$$

m_t = number of transverse modes,

$\Delta \nu_f$ = optical filter bandwidth,

n_{spon} = population inversion factor

$$n_{spon} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$$