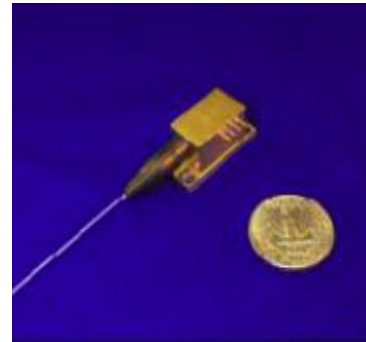


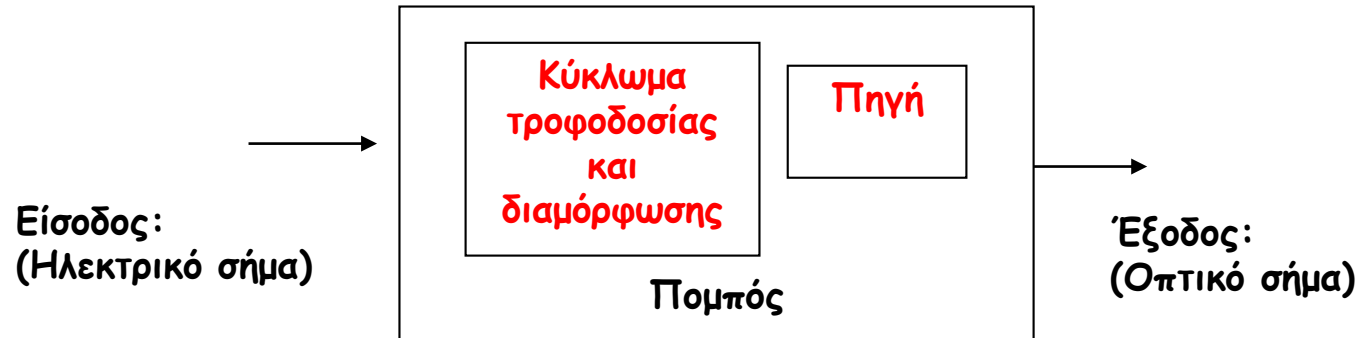
ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ, ΔΙΚΤΥΑ ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ

5^η & 6^η Διάλεξη: Οπτικός πομπός

- Οπτικές μεταπτώσεις
- Οπτικές πηγές ημιαγωγών
- LED
- LASER
- Διαμόρφωση οπτικού σήματος



Οπτικός πομπός

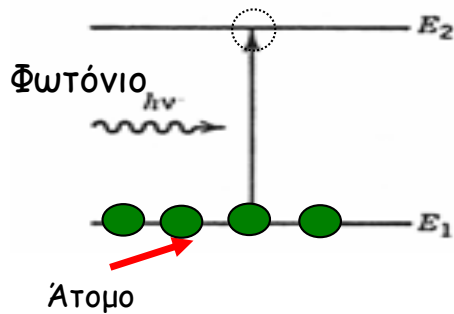


Λειτουργίες πομπού:

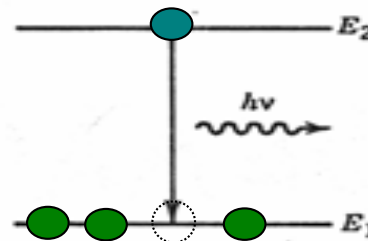
- Εκπομπή φωτός
- Διαμόρφωση του σήματος της οπτική πηγής με το σήμα προς μετάδοση
- Ζεύξη του φωτός στην οπτική ίνα

Οπτικές μεταπτώσεις

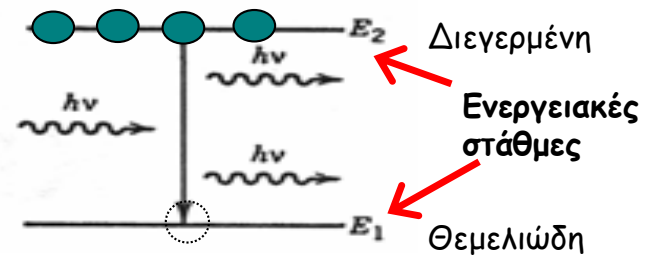
Τα πρώτα θεμέλια της κατανόησης της αλληλεπίδρασης ύλης - ακτινοβολίας μπήκαν από τον Einstein ο οποίος εισήγαγε τρεις διαδικασίες για να περιγράψει την αλληλεπίδραση ύλης-ακτινοβολίας ::



Άτομο
**ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ
ΦΩΤΟΝΙΟΥ**



**ΑΥΘΟΡΜΗΤΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
ΦΩΤΟΝΙΟΥ**



**ΕΞΑΝΑΓΚΑΣΜΕΝΗ ΕΚΠΟΜΠΗ
ΦΩΤΟΝΙΟΥ**



ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ



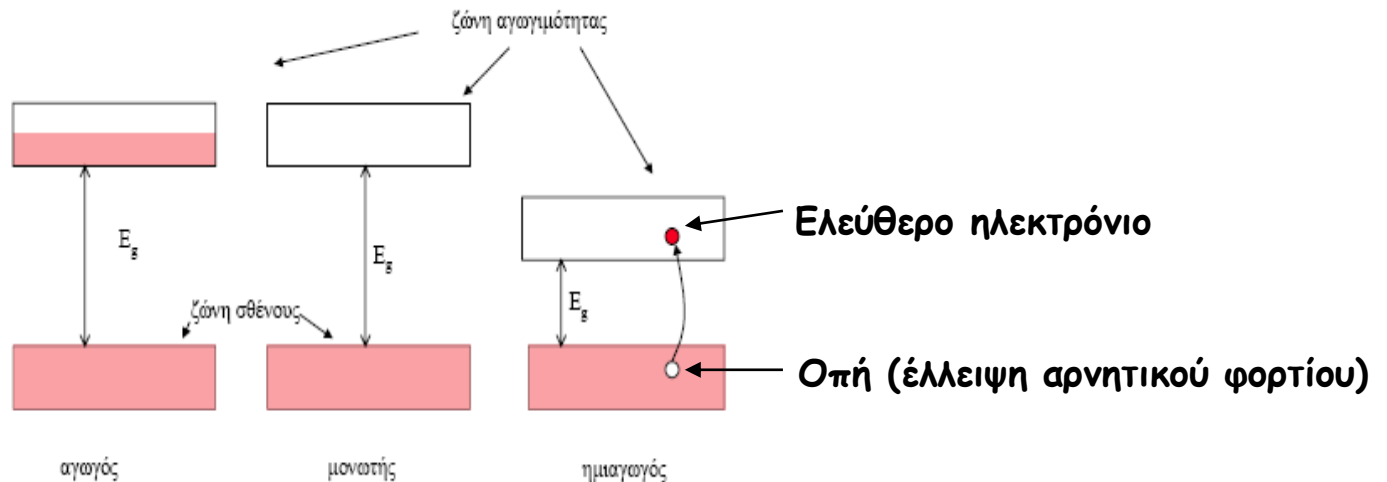
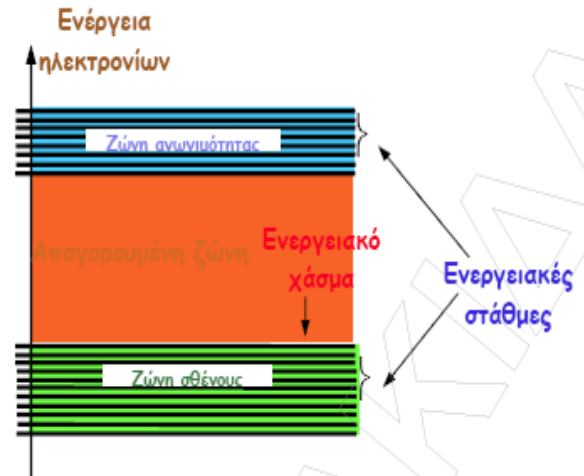
LED
Light Emitting Diode



LASER
Light Amplification through
Stimulated Emission of Radiation

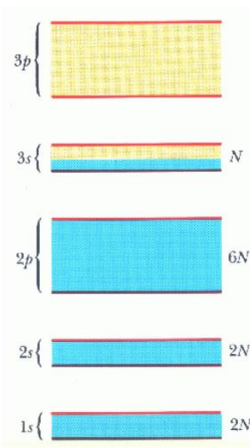
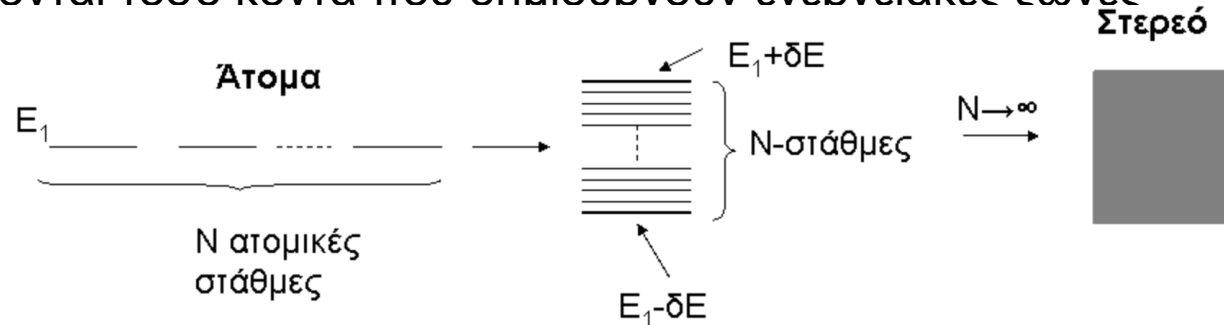
$$E_{\text{ΦΩΤΟΝΙΟΥ}} = E_2 - E_1 = h \nu$$

Ενεργειακές στάθμες

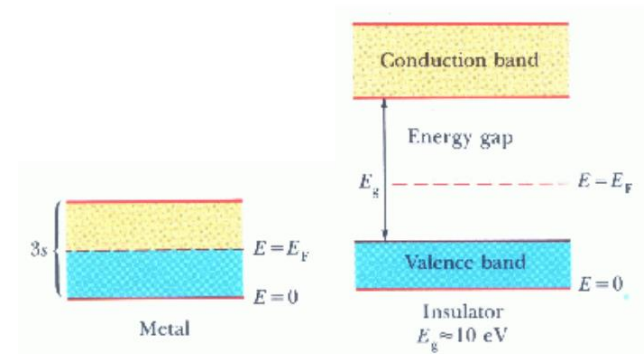


Ενεργειακές στάθμες

- Όταν δύο άτομα έρχονται κοντά για να σχηματίσουν μόριο, οι ατομικές στάθμες τους αναδιατάσσονται και δίδουν τις στάθμες του μορίου όταν περισσότερα από δύο άτομα έρχονται κοντά για να σχηματίσουν το στερεό; Οι ενεργειακές στάθμες έρχονται τόσο κοντά που δημιουργούν ενεργειακές ζώνες



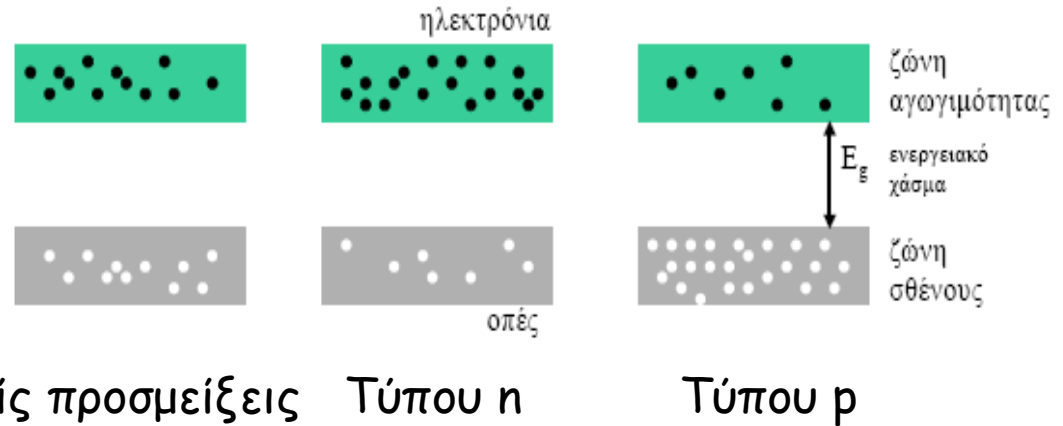
Οι ενεργειακές ζώνες που προκύπτουν από τις στάθμες του Na σε έναν κρύσταλλο Na.



Σχ. 3: Ηλεκτρονική διάταξη μετάλλου (αριστερά) και μονωτή (δεξιά) σε $T=0$ K.

Ημιαγωγοί

Η αγωγιμότητα των ημιαγωγών αυξάνεται με την προσθήκη κατάλληλων προσμείξεων που αυξάνουν τον αριθμό των ηλεκτρονίων ή των οπών του ημιαγωγού.



Ημιαγωγοί, ενεργειακό χάσμα και μήκος κύματος εκπομπής

Material	Formula	Wavelength Range λ (μm)	Bandgap Energy E_g (eV)
Indium Phosphide	InP	0.92	1.35
Indium Arsenide	InAs	3.8	0.34
Gallium Phosphide	GaP	0.55	2.24
Gallium Arsenide	GaAs	0.87	1.42
Aluminium Arsenide	AlAs	0.59	2.09
Gallium Indium Phosphide	GaInP	0.64-0.68	1.82-1.94
Aluminium Gallium Arsenide	AlGaAs	0.8-0.9	1.4-1.55
Indium Gallium Arsenide	InGaAs	1.0-1.3	0.95-1.24
Indium Gallium Arsenide Phosphide	InGaAsP	0.9-1.7	0.73-1.35

Παράδειγμα



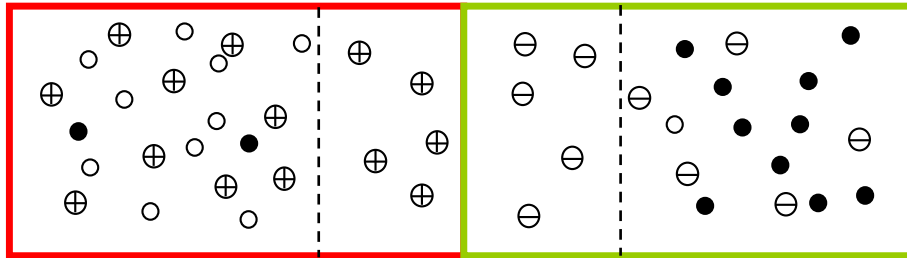
όπου x, y υποδηλώνουν ποσοστιαία στοιχειομετρική αναλογία

$$\lambda(\mu\text{m}) = \frac{1.24}{E_g(\text{eV})}$$

Επαφή p-n

Τύπου p

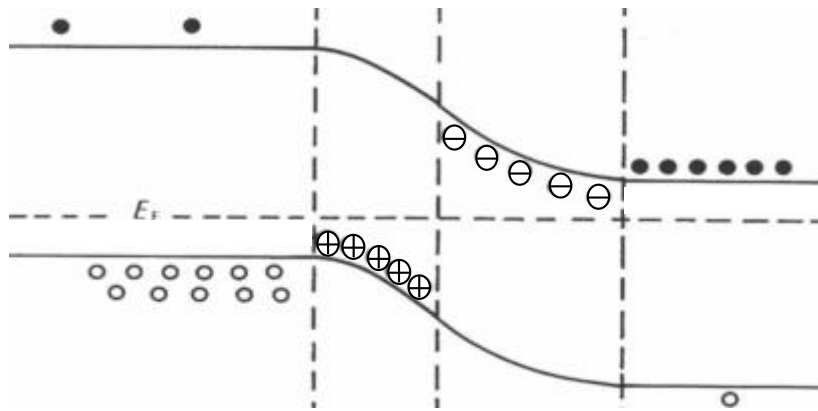
Τύπου n



- Ηλεκτρόνια
- Οπές
- ⊖ Δότες ηλεκτρονίων (Θετικά Φορτισμένοι)
- ⊕ Δέκτες ηλεκτρονίων (Αρνητικά Φορτισμένοι)

Περιοχή αραίωσης

Ενεργειακή στάθμη

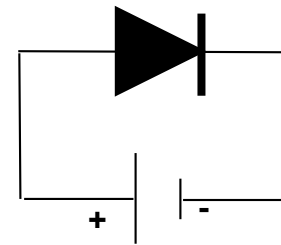
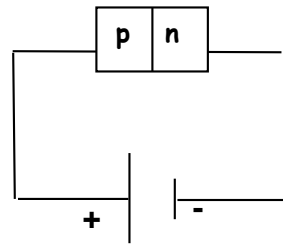


Φράγμα δυναμικού

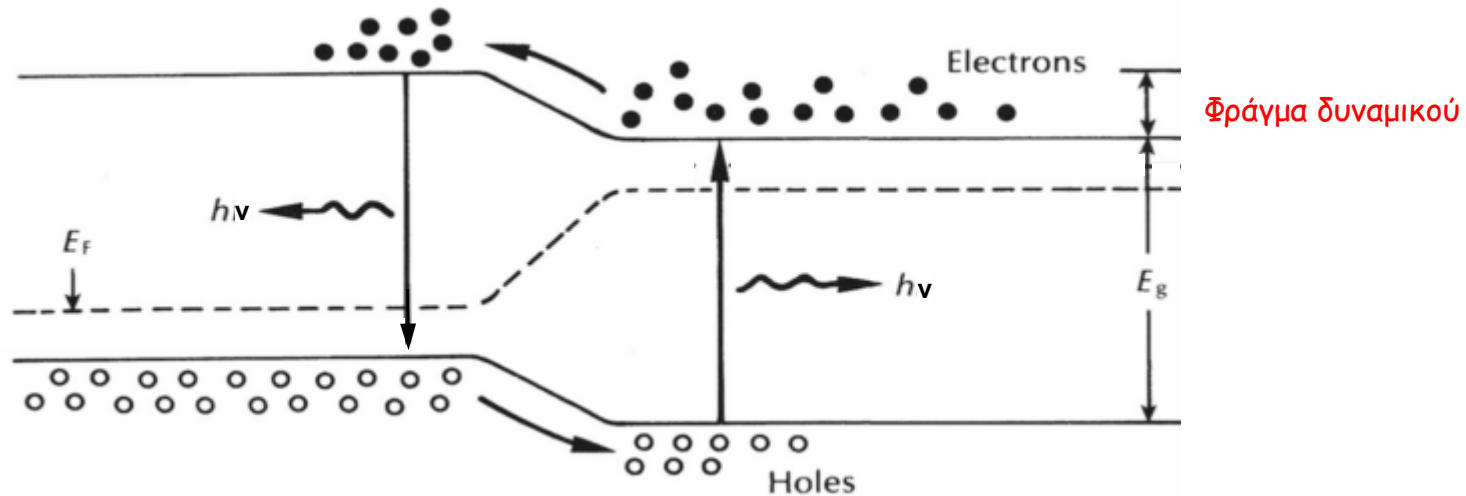
Ενεργειακό διάγραμμα

Το φράγμα δυναμικού εμποδίζει την μετακίνηση και επανασύνδεση των ελεύθερων φορτίων

Ορθή πόλωση επαφής p-n



Ενεργειακό διάγραμμα ορθά πολωμένης ομοιογενούς επαφής p-n

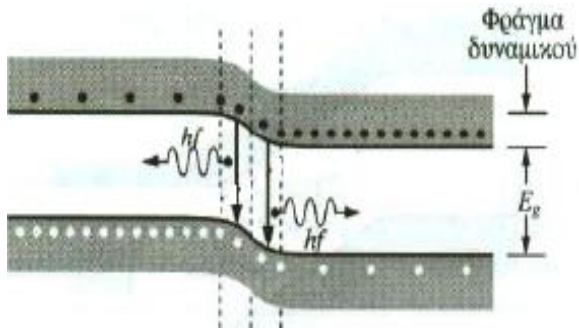


Η εφαρμογή θετικής τάσης στην επαφή pn μειώνει το φράγμα δυναμικού και επιτρέπει την μετακίνηση των ελεύθερων φορτίων, με αποτέλεσμα την επανασύνδεση τους και την εκπομπή ακτινοβολίας

Ετερογενής επαφή p-n

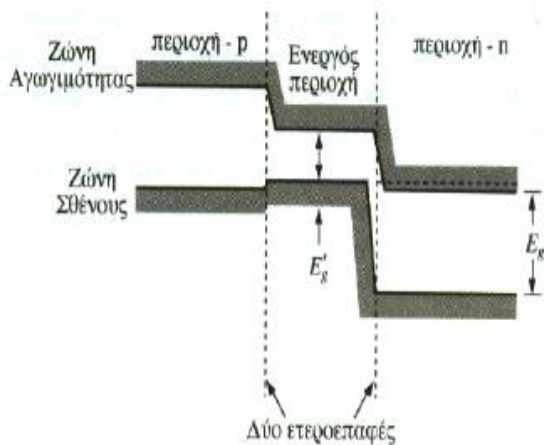
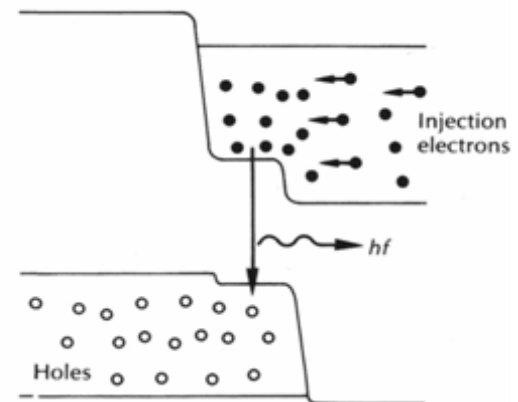
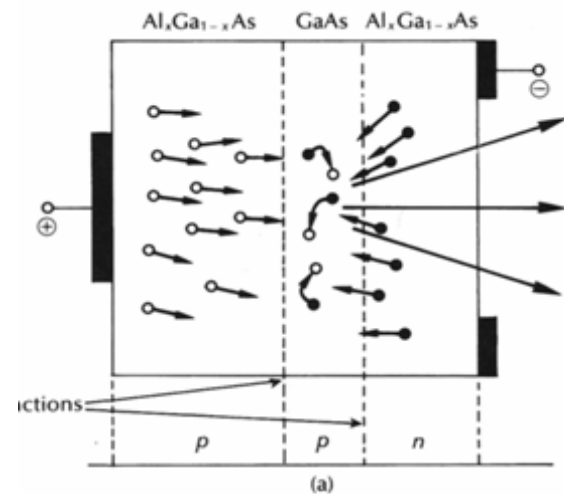
Μειονεκτήματα ομοιογενούς επαφής pn

- Εκπομπή φωτός από όλο το μήκος της επαφής
- Απορρόφηση φωτονίων



Λύση: Ετερογενής επαφή p-n όπου λεπτό στρώμα ημιαγωγού με μικρότερο ενεργειακό χάσμα και υψηλότερο δείκτη διάθλασης παρεμβάλλεται ανάμεσα στα p και n

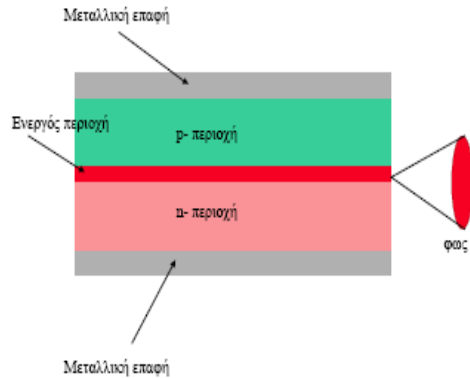
Παράδειγμα:



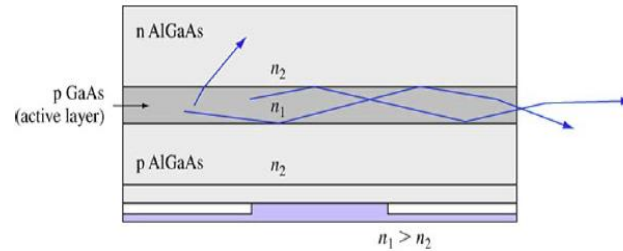
Η εκπομπή του φωτός γίνεται μόνο από την ενεργό περιοχή που δρα και ως κυματοδηγός

LED - Light Emitting Diode

Τυπική δομή LED



Οδήγηση του φωτός

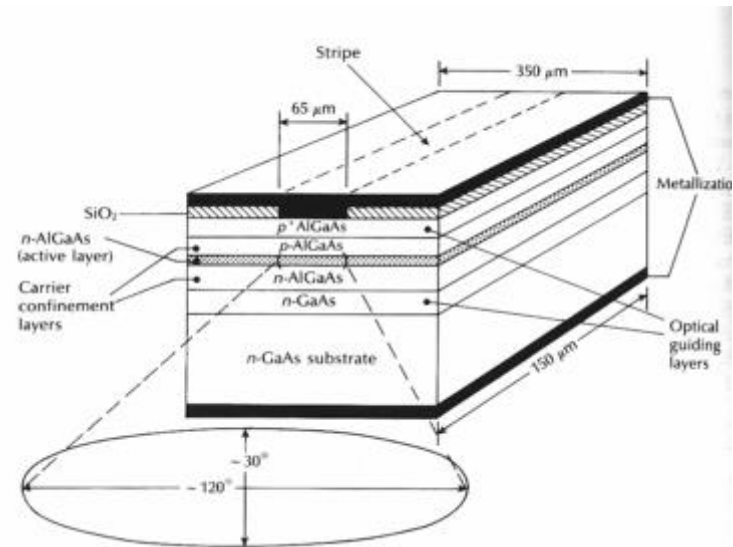


Ακτινοβολία LED

- Διέγερση με ορθή πόλωση
- Αυθόρμητη εκπομπή



LED με γεωμετρία στενής λωρίδας



Ασκήσεις

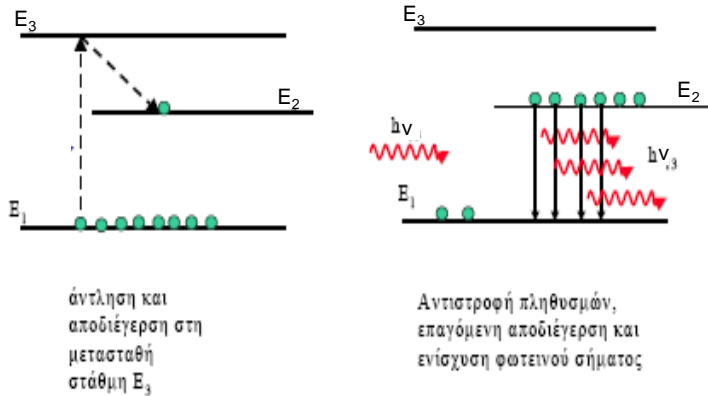
- Led εκπέμπει στα 870 nm. Πόσο το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού το οποίο αντιστοιχεί στο μήκος κύματος αυτό. Εκτιμήστε τη τάση ορθής πόλωσης που πρέπει να ασκήσουμε στον ημιαγωγό αυτό έτσι ώστε να έχουμε αρχίσει η εκπομπή φωτονίων.

Εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός

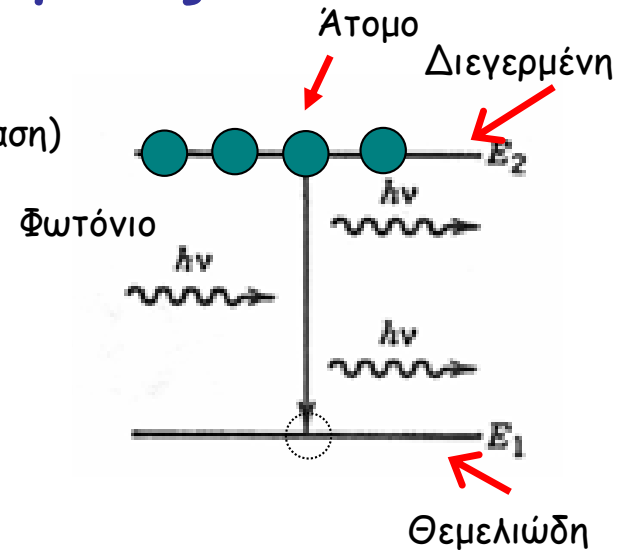
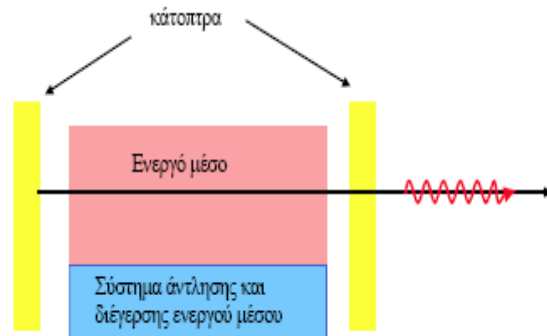
Προϋποθέσεις εξαναγκασμένης εκπομπής

- Αναστροφή πληθυσμών (περισσότερα άτομα σε διεγερμένη κατάσταση)
- Φωτόνια κατάλληλης ενέργειας ($E_{\text{φωτονίου}} = E_2 - E_1$)

Αναστροφή πληθυσμών



Οπτική ανάδραση

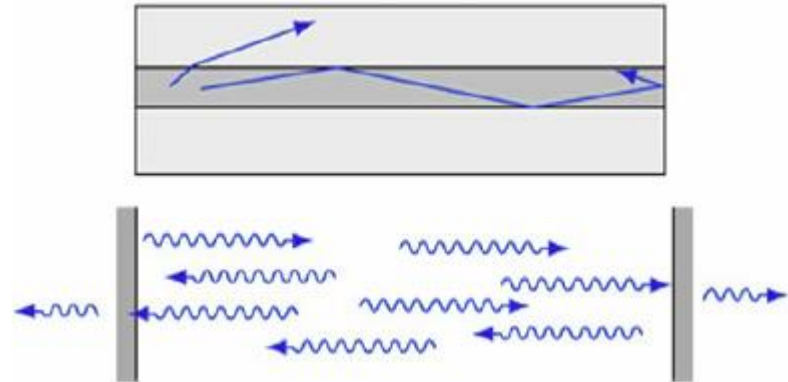
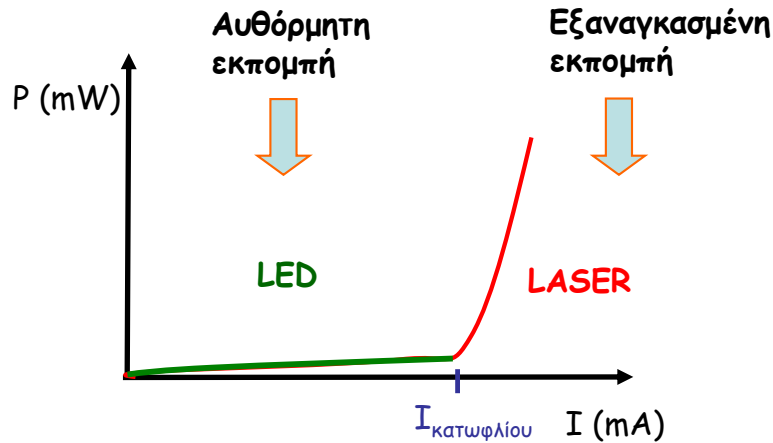


Το φως που εκπέμπεται μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής είναι:

- Υψηλής έντασης
- Μονοχρωματικό
- Σύμφωνο
- Κατευθυντικό

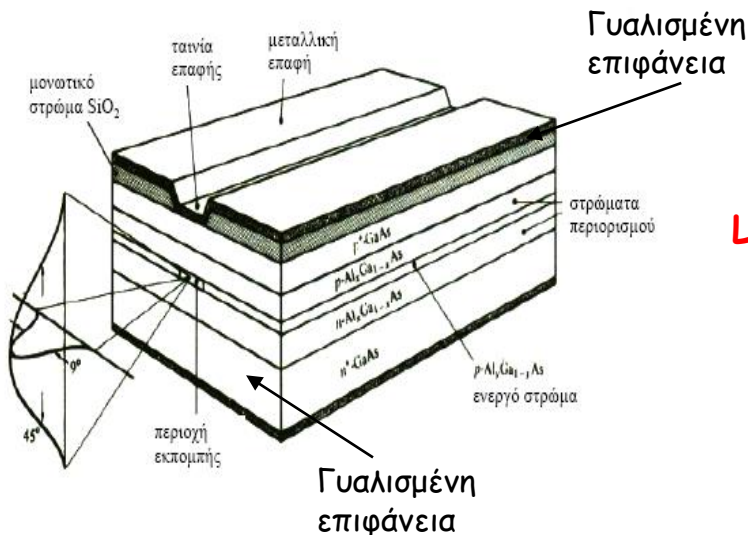
↓
LASER

Εξαναγκασμένη εκπομπή φωτός από επαφή pn



Η αναστροφή πληθυσμών εξασφαλίζεται με τη τροφοδοσία της επαφής με ρεύμα μεγαλύτερο του ρεύματος κατωφλίου

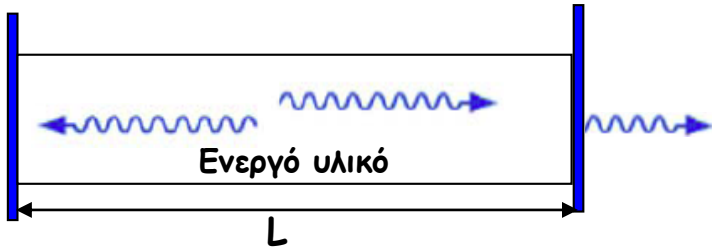
Ο σχηματισμός οπτικής κοιλότητας, μέσω κατάλληλης μορφοποίησης των άκρων της επαφής, εξασφαλίζει την ύπαρξη φωτονίων στην περιοχή του ενεργού υλικού



Laser ημιαγωγού με γεωμετρία στενής λωρίδας

LASER

Fabry Perot laser



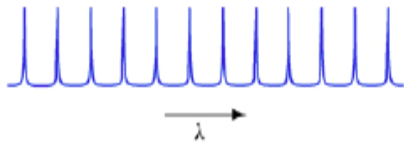
Κοιλότητα συντονισμού

Στο εσωτερικό κοιλότητας μήκους L συντονίζονται μόνο τα φωτόνια με μήκος κύματος λ :

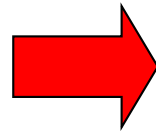
$$L = \frac{\lambda}{2n} m$$

n : ο δείκτης διάθλασης του ενεργού μέσου
 m : τάξη συντονισμού $m= 1,2,3,\dots$

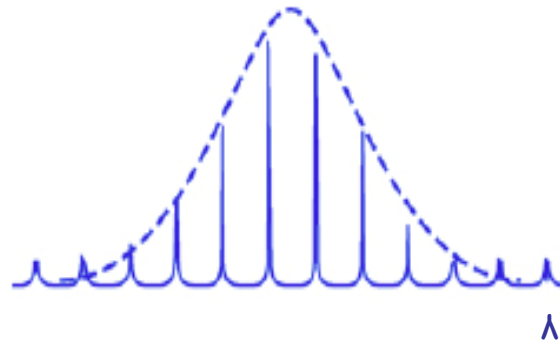
Μήκη κύματος συντονισμού κοιλότητας



+



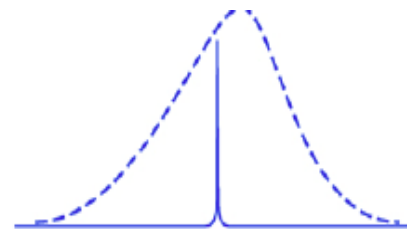
Οπτικό κέρδος ενεργού υλικού



Διαμήκεις τρόποι εκπομπής Laser

Πολύτροπο laser

! Διασπορά !

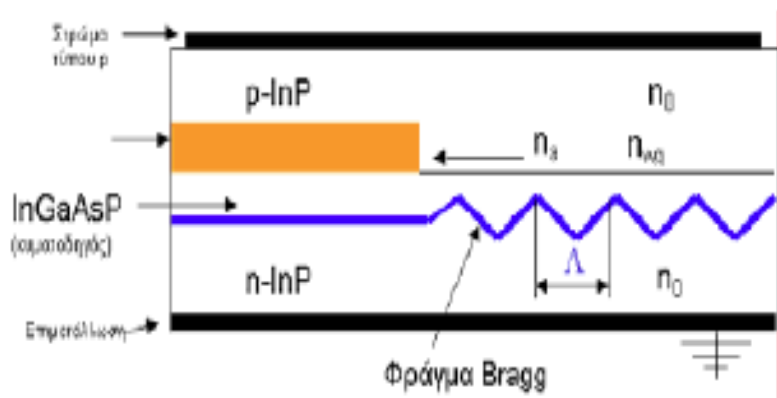
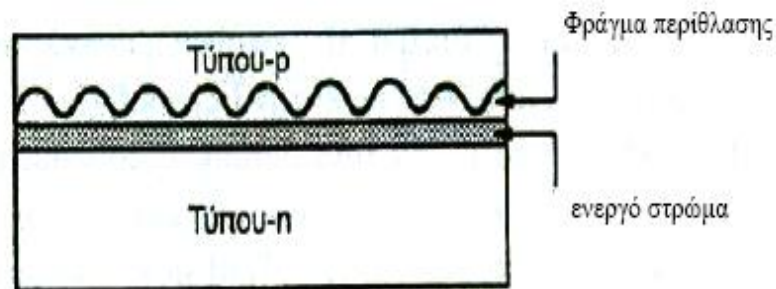


Μονότροπο laser

Μονότροπα laser

Laser κατανεμημένης ανάδρασης (Distributed FeedBack lasers - DFB)

Η ανάκλαση δεν γίνεται από ανακλαστικές επιφάνειες στα άκρα της διόδου αλλά από φράγμα περίθλασης που κατανέμεται σ' όλο το μήκος της κοιλότητας.

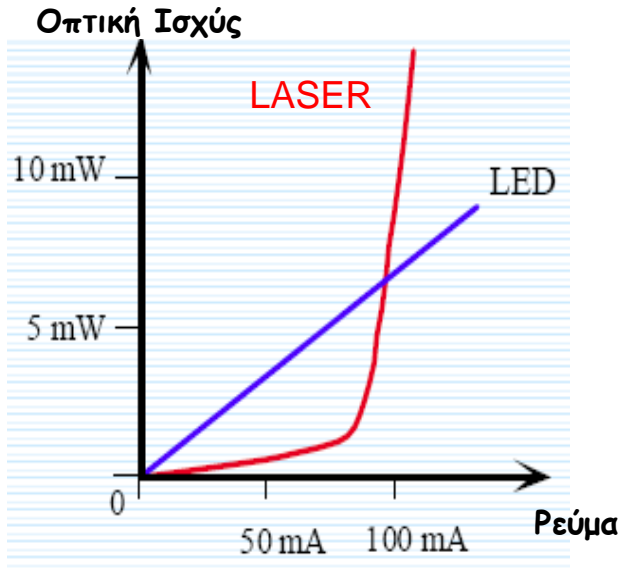


Μόνο ένα μήκος κύματος λ_B επιτυγχάνει ενισχυτική συμβολή

$$\lambda_B = 2 n \Lambda$$

όπου n : ο μέσος δείκτης διάθλασης
 Λ : η περίοδος του φράγματος περίθλασης

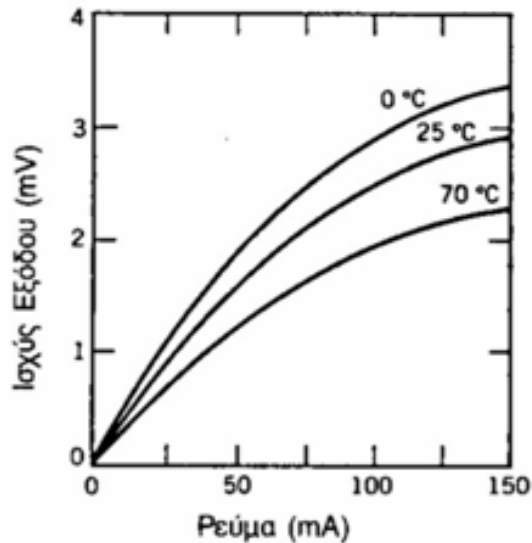
Οπτική ισχύς εκπομπής LED - LASER



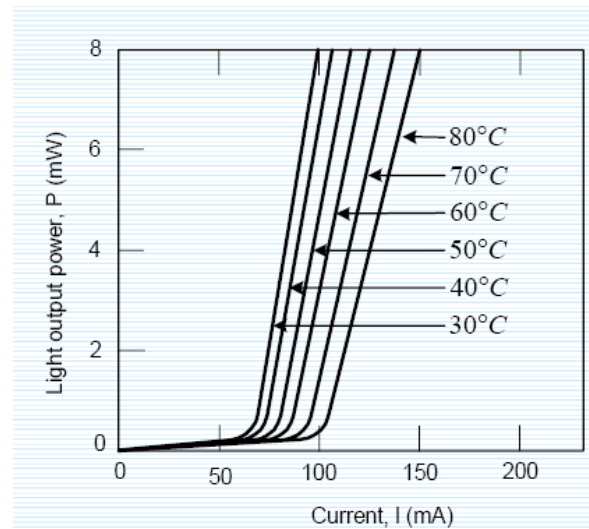
Ρεύμα κατωφλίου Laser

Το ρεύμα τροφοδοσίας για το οποίο το οπτικό κέρδος της διάταξης είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες λόγω απορρόφησης και σκέδασης ακτινοβολίας στο ενεργό υλικό και στους καθρέπτες

Επίδραση θερμοκρασίας



LED



LASER

Το dBm ως μονάδα μέτρηση της οπτικής ισχύς

Το decibel (dB) χρησιμοποιείται ως η λογαριθμική μετατροπή των Watts γιατί διευκολύνει υπολογισμούς οπτικής ισχύος σε ευρεία δυναμική περιοχή

Ορισμός:
$$\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{ΣΗΜΑΤΟΣ}}}{P_{\text{ΑΝΑΦΟΡΑΣ}}}$$

Για $P_{\text{ΑΝΑΦΟΡΑΣ}} = 1 \text{ mW}$

$$\text{dBm} = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{ΣΗΜΑΤΟΣ}}}{1 \text{ mW}}$$

Ενώ:

$$P_{\text{ΣΗΜΑΤΟΣ}} = 10^{\text{dBm} / 10}$$

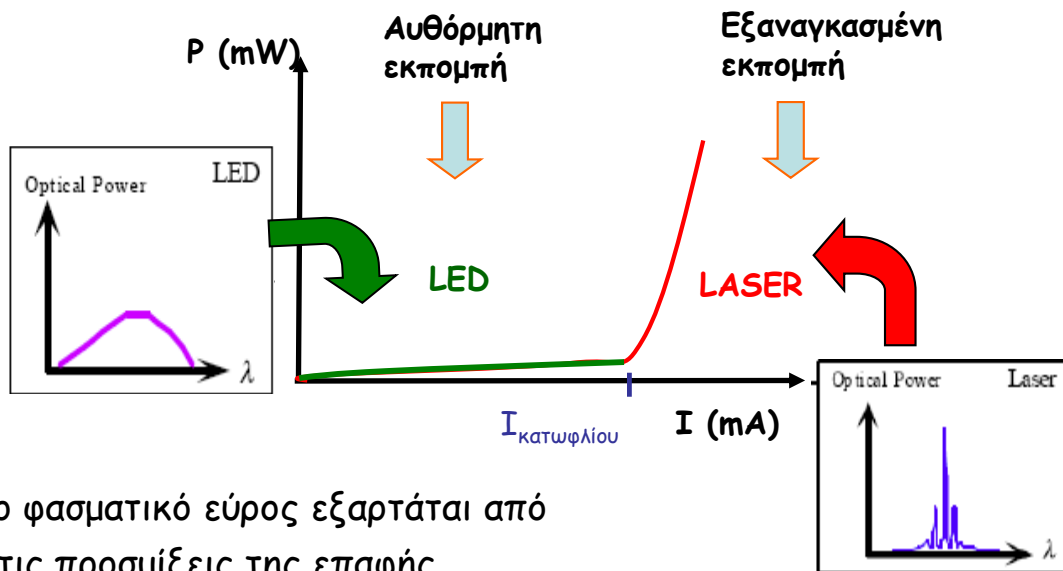
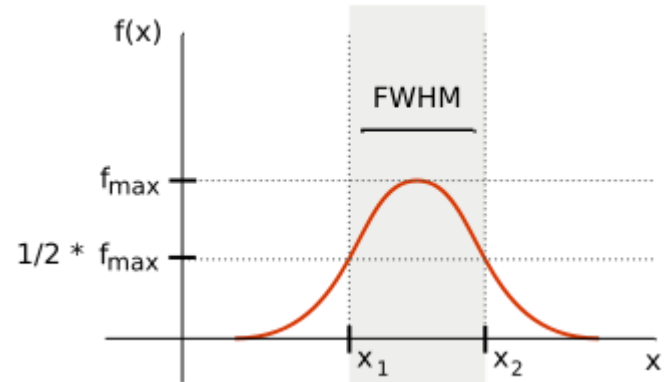
Μετατροπή W ↔ dBm

10mW = +10dBm
5mW = +7dBm
1mW = 0dBm
0.5mW = -3dBm
0.1mW = -10dBm
0.05mW = -13dBm
10μW = -20dBm
5μW = -23dBm
1μW = -30dBm
100nW = -50dBm
10nW = -50dBm
1nW = -60dBm
100pW = -70dBm
10pW = -80dBm
1pW = -90dBm

Φασματικό εύρος ακτινοβολίας LED - LASER

Ορισμός: Φασματικό Εύρος $\Delta\lambda$ FWHM
(Full Width Half Maximum)

Μέγιστο φασματικό εύρος στο μισό της μέγιστης ισχύς



FWHM (ενδεικτικά)

LED: 10 - 50 nm

Laser: 0.1 - 5 nm *

* Μειωμένη χρωματική διασπορά στην οπτική ίνα !

Το φασματικό εύρος εξαρτάται από

- τις προσμίξεις της επαφής
- τη θερμοκρασία λειτουργίας
- το ρεύμα τροφοδοσίας
- το μήκος της κοιλότητας (laser)

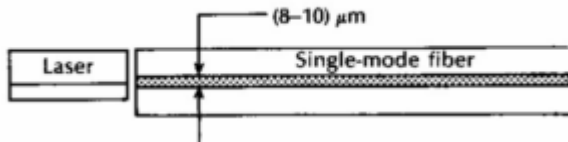
Εισαγωγή φωτός LED - LASER σε οπτική ίνα

Η απόδοση της σύζευξης πηγής -ίνας εξαρτάται από :

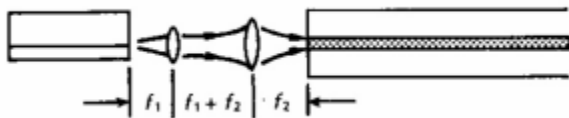
- Την κατευθυντικότητα της οπτικής πηγής
- Τον μέγεθος του πυρήνα της οπτικής ίνας
- Τη μέθοδο σύζευξης

Μέθοδος σύζευξης

Απευθείας:



Μέσω φακών:

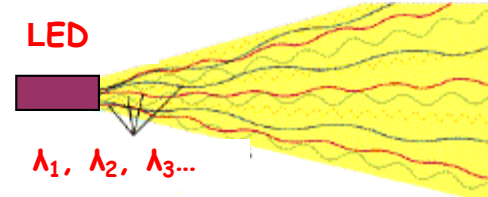


Ποσοστό φωτός που εισάγεται σε μονότροπη οπτική ίνα (ενδεικτικά):

LASER	LED
10%	1-2%

70%	15%
-----	-----

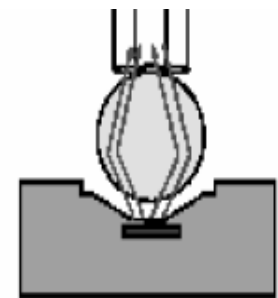
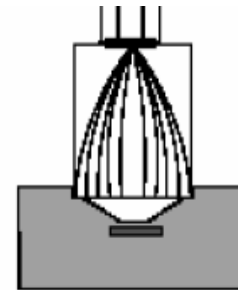
Κατευθυντικότητα δέσμης



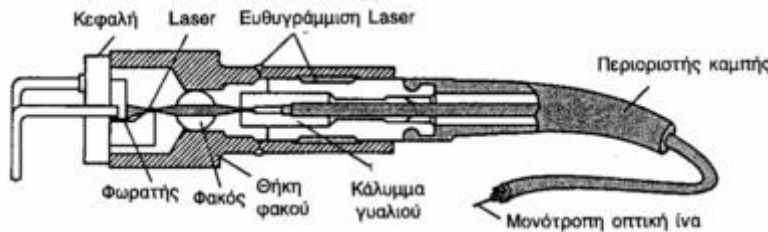
Τεχνικές

Φακός GRIN

Φακός BALL



Μορφοποιημένο άκρο ίνας



Πηγές συνδεδεμένες με οπτική ίνα (Pigtailed)

Διαμόρφωση οπτικού σήματος

Η ενσωμάτωση, της πληροφορίας προς μετάδοση, στο οπτικό σήμα

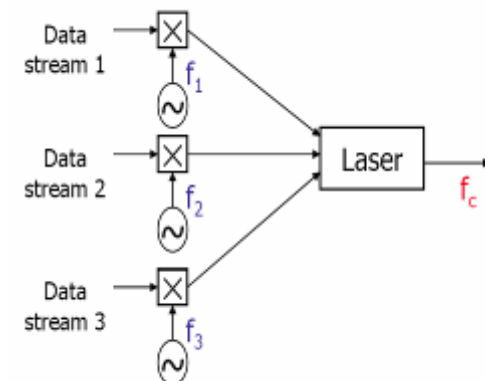
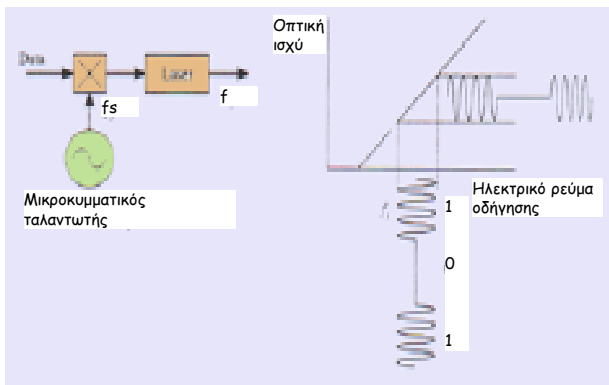
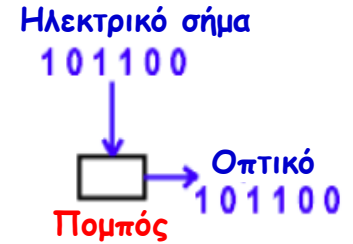
Τεχνικές διαμόρφωσης

➤ Διαμόρφωση On Off Keying (OOK)

Η οπτική πηγή λειτουργεί σε κατάσταση "εντός" (On) ή "εκτός" (Off), δηλαδή αναβοσβήνει, με το ρυθμό της πληροφορίας με αποτέλεσμα την δημιουργία αλληλουχίας οπτικών παλμών σύμφωνα με το προς μετάδοση σήμα.

➤ Διαμόρφωση υποφέρουσας συχνότητας (Subcarrier modulation-SCM)

Αρχικά η πληροφορία διαμορφώνει μία υποφέρουσα μικροκυματική συχνότητα f_s (10 MHz-300 GHz) η οποία στη συνέχεια οδηγεί την οπτική πηγή (Ευνοεί την πολυπλεξία)



Διαμόρφωση On Off Keying (OOK)

Η πιο διαδεδομένη τεχνική για μετάδοση ψηφιακών σημάτων

Κάθε Bit μεταδίδεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με περίοδο T

$$T = 1 / \text{bit rate}$$

$$\text{πχ για } 1 \text{ Gbps } T = 1 / 10^9 = 1 \text{ nsec}$$

Τύποι διαμόρφωσης OOK (ενδεικτικά)

➤ Χωρίς επιστροφή στο μηδέν (Non Return to Zero -NRZ)

Για bit "1" ο παλμός εκπέμπεται σε όλη τη διάρκεια T του bit

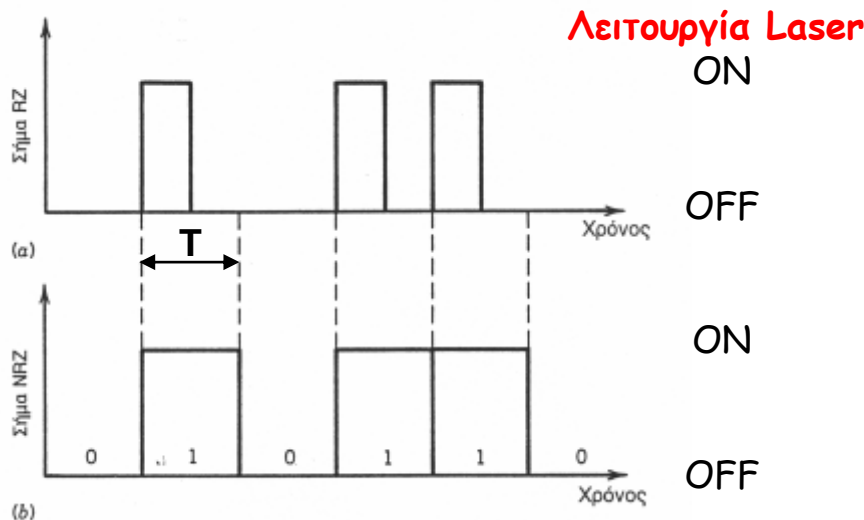
Για bit "0" δεν εκπέμπεται (ιδανικά) φως

Χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα υψηλής ταχύτητας (155 Mb/s to 10 Gb/s)

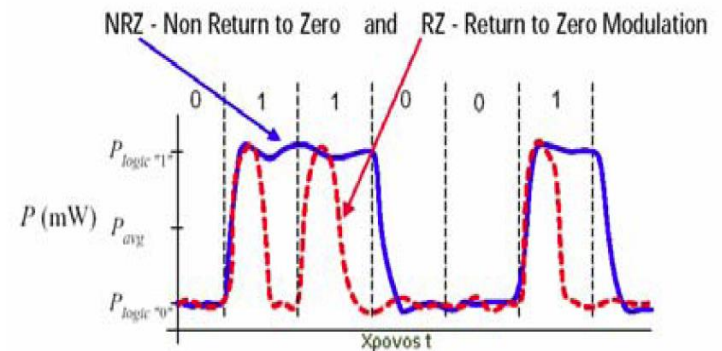
➤ Με επιστροφή στο μηδέν (Return to Zero -RZ)

Για bit "1" ο παλμός εκπέμπεται μόνο σε ένα τμήμα της διάρκειας T του bit

Χρησιμοποιείται στα κάποια συστήματα πολύ υψηλής ταχύτητας (> 10 Gb/s)



Σύγκριση NRZ - RZ

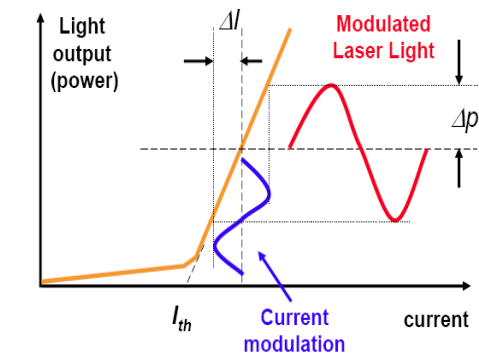


$$B_{max} (NRZ) = 2 B_{max} (RZ)$$

Μέθοδοι διαμόρφωσης

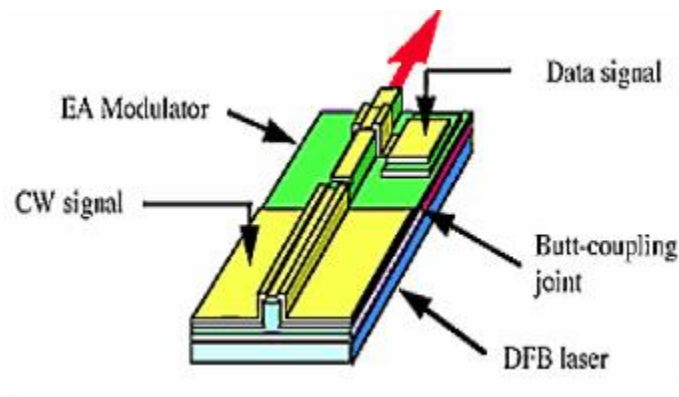
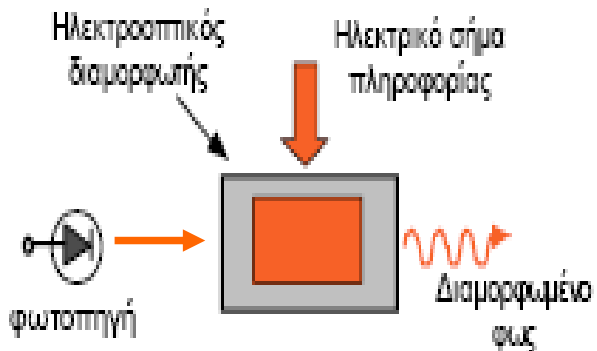
➤ Άμεση διαμόρφωση

Μεταβάλλεται το ρεύμα τροφοδοσίας της οπτικής πηγής με αποτέλεσμα η ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας να μεταβάλλεται στο ρυθμό της πληροφορίας (διαμόρφωση κατά ένταση)



➤ Εξωτερική διαμόρφωση

Η οπτική πηγή εκπέμπει συνεχές φως το οποίο τροφοδοτείται σε ένα εξωτερικό στοιχείο (διαμορφωτής-Modulator) που τροφοδοτείται με την πληροφορία

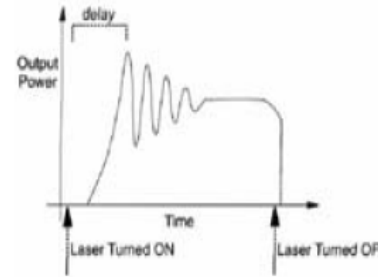


Διαμορφωτής ενσωματωμένος (εξωτερικά) στο laser

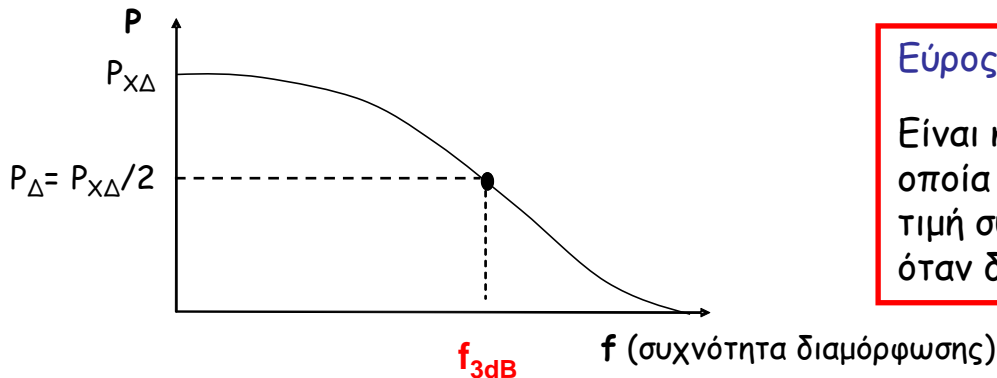
Άμεση διαμόρφωση- Εύρος ζώνης 3dB

Η άμεση διαμόρφωση πηγής laser παρουσιάζει προβλήματα που περιορίζουν τη χρήση της σε ρυθμούς μέχρι 2.5 Gbps

- Καθυστέρηση έναυσης
- Ταλαντώσεις αποκατάστασης
- Τρύλλισμα (Chirping)



Η άμεση διαμόρφωση οπτικής πηγής σε υψηλές συχνότητες μειώνει την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας



Εύρος ζώνης 3dB f_{3dB}

Είναι η συχνότητα f διαμόρφωσης πηγής για την οποία η ισχύ (P_{Δ}) που εκπέμπεται έχει την μισή τιμή συγκριτικά με την ισχύ ($P_{X\Delta}$) που εκπέμπεται όταν δεν υπάρχει διαμόρφωση

Για πηγή LED ισχύει:

$$\frac{P_{\Delta}(\omega)}{P_{X\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$$

Όπου τ ο χρόνος ζωής των ελεύθερων φορτίων στην επαφή p πριν την επανασύνδεση και $\omega = 2\pi f$ με f η συχνότητα διαμόρφωσης

Ασκήσεις εξάσκησης

- Ο χρόνος ζωής των ελεύθερων φορτίων ενός LED είναι 5 nsec. Όταν η συσκευή δεν διαμορφώνεται (συνεχής λειτουργία) η ισχύς εξόδου είναι 300 μ W. Προσδιορίστε την ισχύ εξόδου όταν η πηγή διαμορφώνεται σε συχνότητα α) 20 MHz και β) 100 MHz. Επιπλέον να υπολογίσετε το εύρος ζώνης 3dB της πηγής
- Για οπτική πηγή LED με εύρος ζώνης διαμόρφωσης 3dB ίσο με 110 MHz να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα: (α) Περιγράψτε πως επηρεάζετε η εκπεμπόμενη οπτική ισχύ από τη συχνότητα διαμόρφωσης και γιατί. Τι συμβαίνει όταν αυτή ισούται με 110 MHz; (β) Να υπολογίσετε το χρόνο ζωής των ελεύθερων φορτίων της επαφής pn της LED. (γ) Τι κωδικό διαμόρφωσης πρέπει να χρησιμοποιήσετε και γιατί για να στείλετε δεδομένα με ρυθμό μετάδοσης 200 Mbps; Περιγράψτε τον κωδικό διαμόρφωσης που επιλέξατε.