



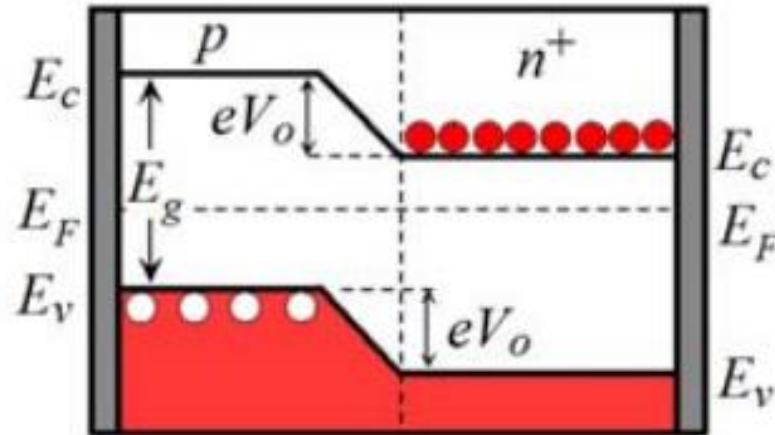
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

(β' μέρος)

Διδάσκων: Τσορμπατζόγλου Ανδρέας

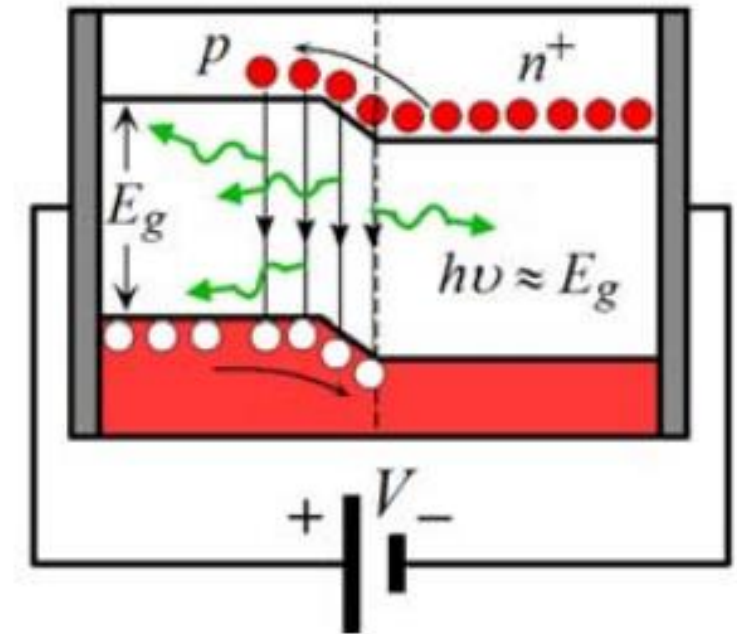
Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών επαφής $p-n^+$

Χωρίς πόλωση



- Ηλεκτρόνιο στη ΖΑ
- Οπή στη ΖΣ

Με ορθή πόλωση



- Η ενέργεια Fermi είναι ίδια σε όλη τη διάταξη.
- Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κυρίως εντός της περιοχής p.

- Τα ηλεκτρόνια που εγχέονται προς την περιοχή p είναι πολύ περισσότερα από τις οπές που εκχέονται προς την περιοχή n.

- Η επανασύνδεση εντός της περιοχής p σε απόσταση L_h παράγει φωτόνια (ηλεκτροφωταύγεια έγχυσης).

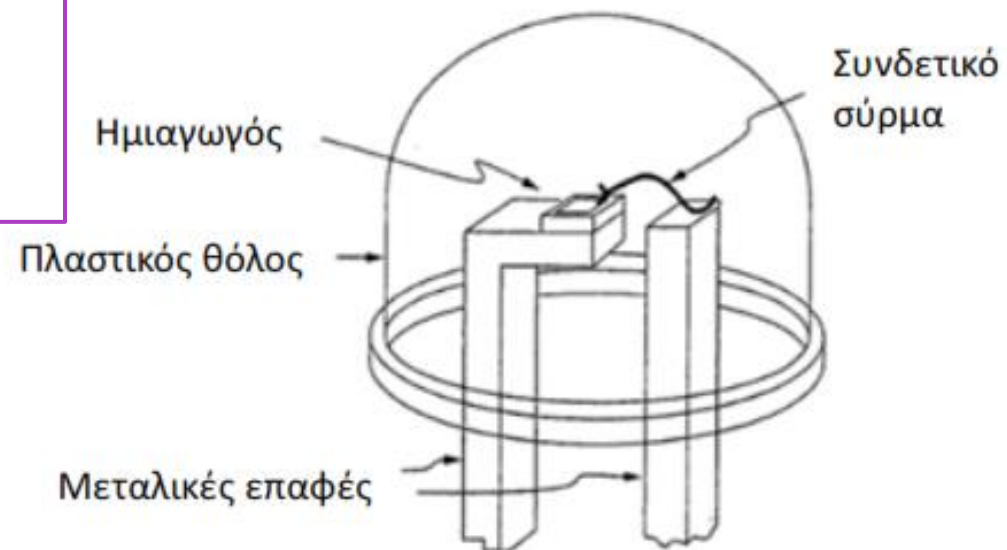
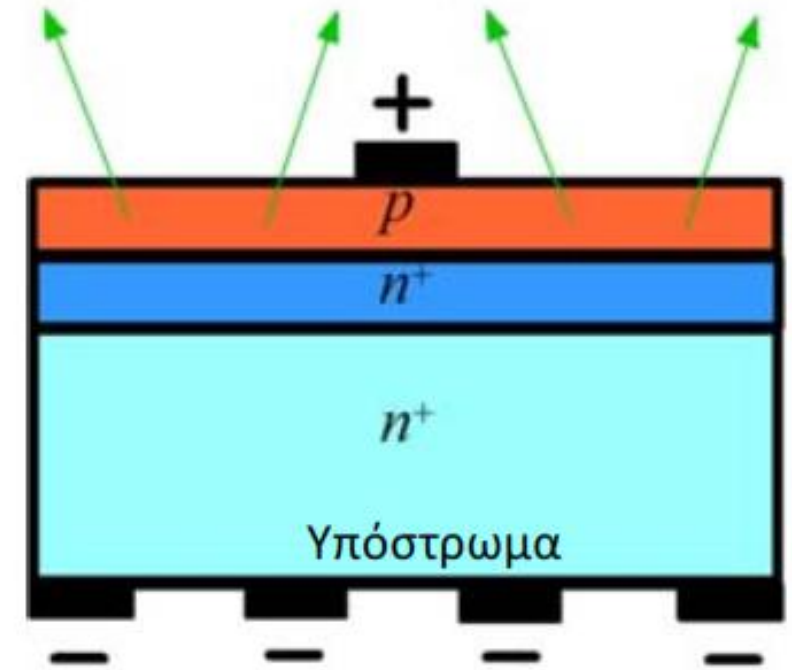
Μηχανισμός παραγωγής φωτονίων

Φωτοдиодοι
Επαφές $p-n$

Δομή ενός LED

- Τα εκπεμπόμενα φωτόνια κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις μέσα στο LED.
- Το LED πρέπει να κατασκευαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε τα φωτόνια να μην απορροφούνται από τους ημιαγωγούς δίνοντας νέα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών, με αποτέλεσμα να προκύπτουν διατάξεις χαμηλής ισχύος.
- Αυτό επιτυγχάνεται με την κατασκευή **διατάξεων ετεροδομών**, στις οποίες χρησιμοποιούνται ημιαγωγοί με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα.

Φωτοдиодοι
Επαφές pn - 2



Διάταξη διπλής ετεροδομής

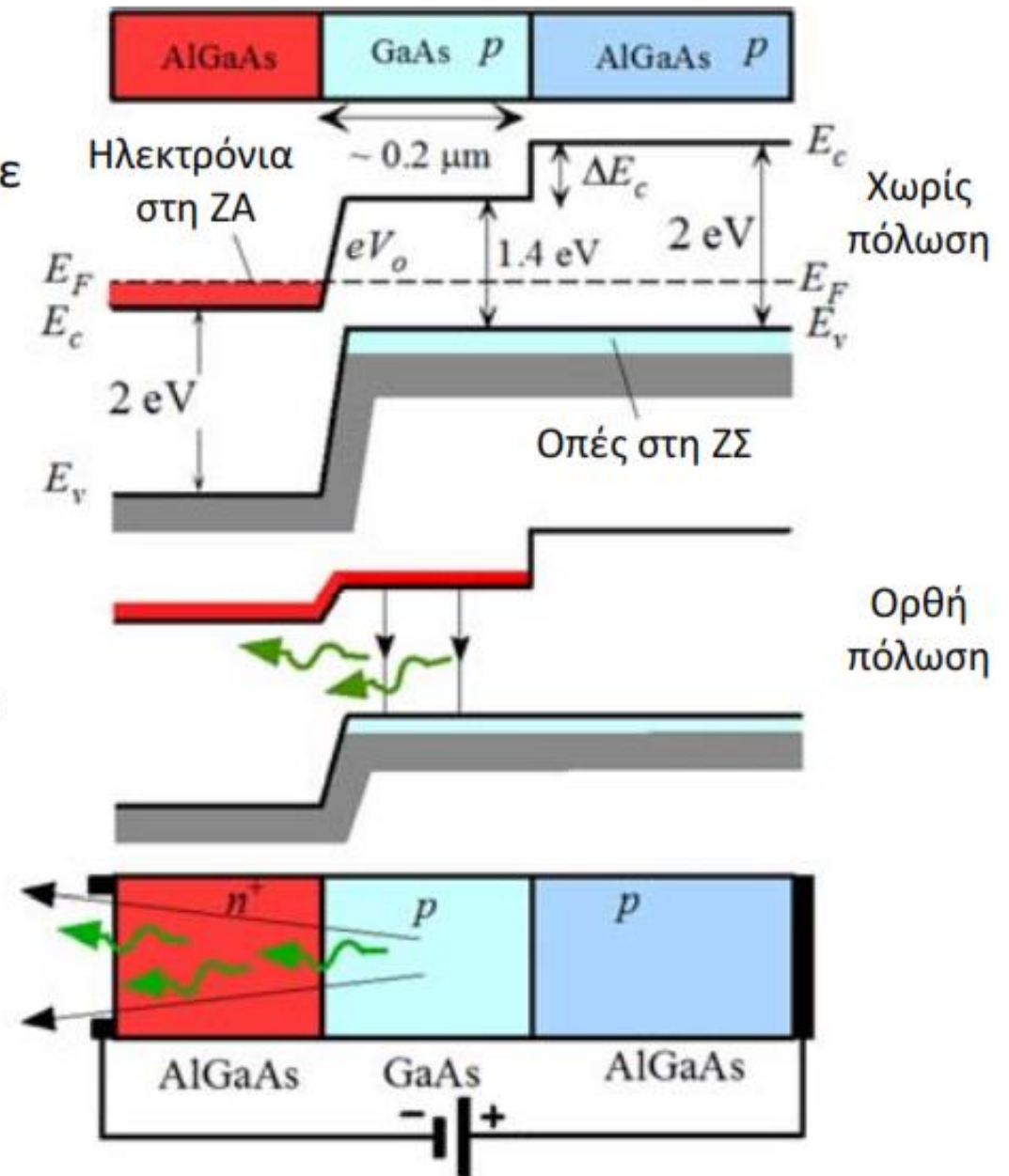
Ομοεπαφή: Επαφή p-n από το ίδιο υλικό με διαφορετικές νοθεύσεις.

Ετεροεπαφή: Επαφή p-n από υλικά με διαφορετικό E_g

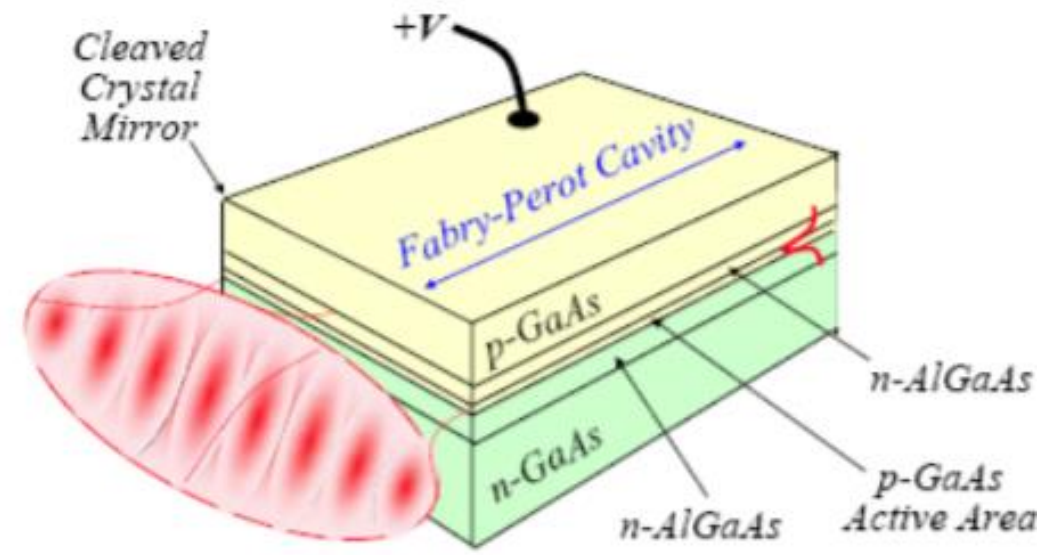
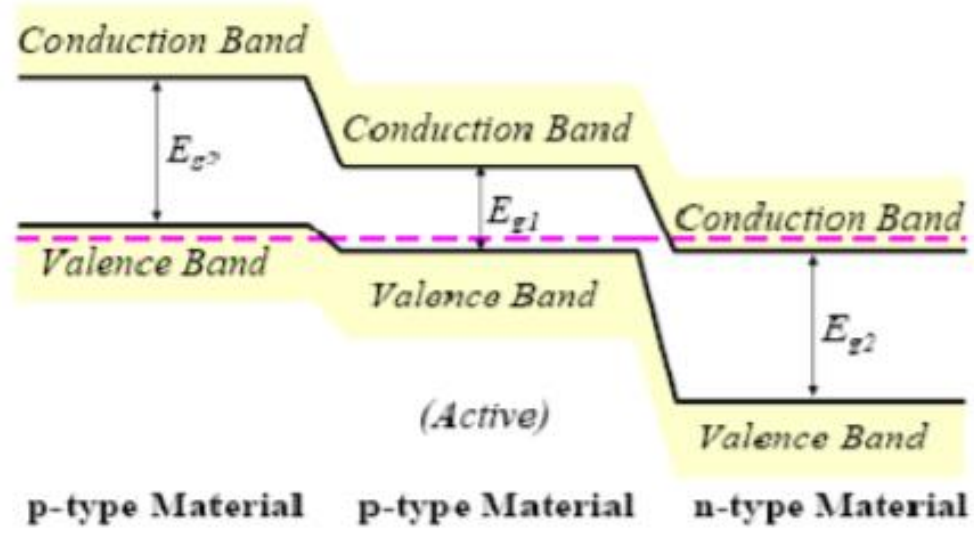
Διάταξη ετεροδομής: Διάταξη που αποτελείται από ημιαγωγούς με διαφορετικό E_g

Διάταξη **διπλής ετεροδομής** για αυξημένη ένταση φωτός.

- Δύο επαφές μεταξύ ημιαγωγών με διαφορετικό E_g
 $E_g(\text{AlGaAs}) = 2\text{eV}$
 $E_g(\text{GaAs}) = 1.4\text{eV}$
- Ισχυρά νοθευμένη περιοχή n^+
- Λεπτό στρώμα p-GaAs με ελαφρά νόθευση.

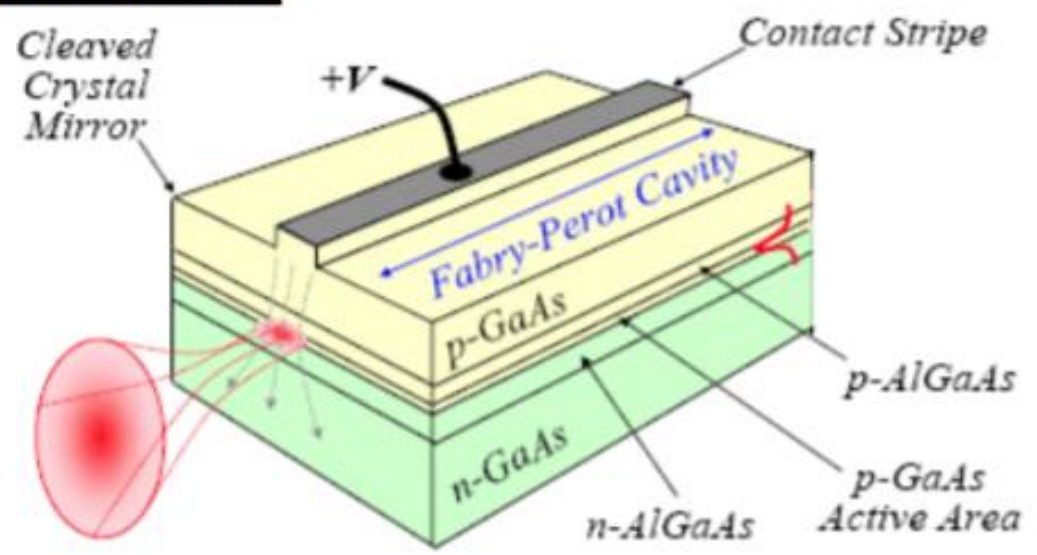
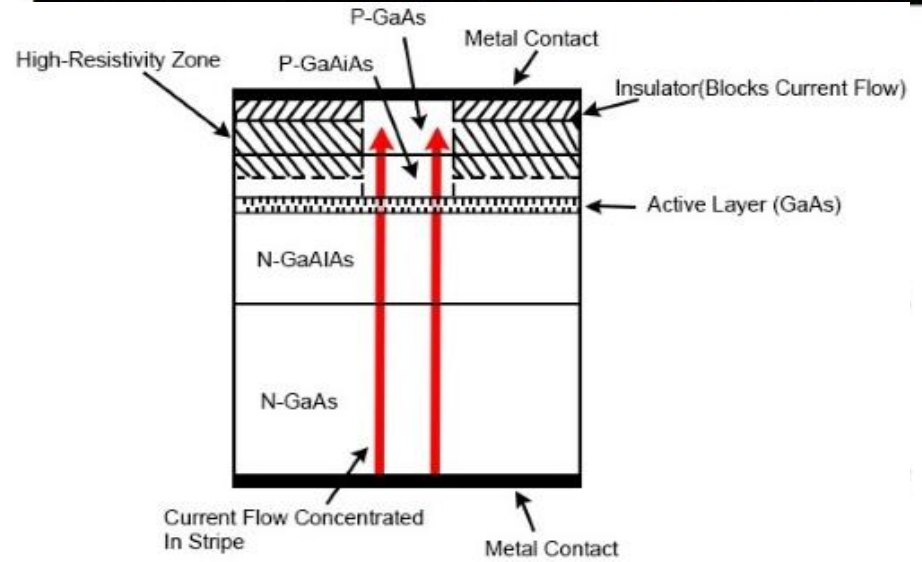


Δύο κρύσταλλοι με διαφορετικά ενεργειακά διακείνα μεταξύ τους περιορίζουν το φάσμα εξόδου στον κάθετο άξονα διάδοσης



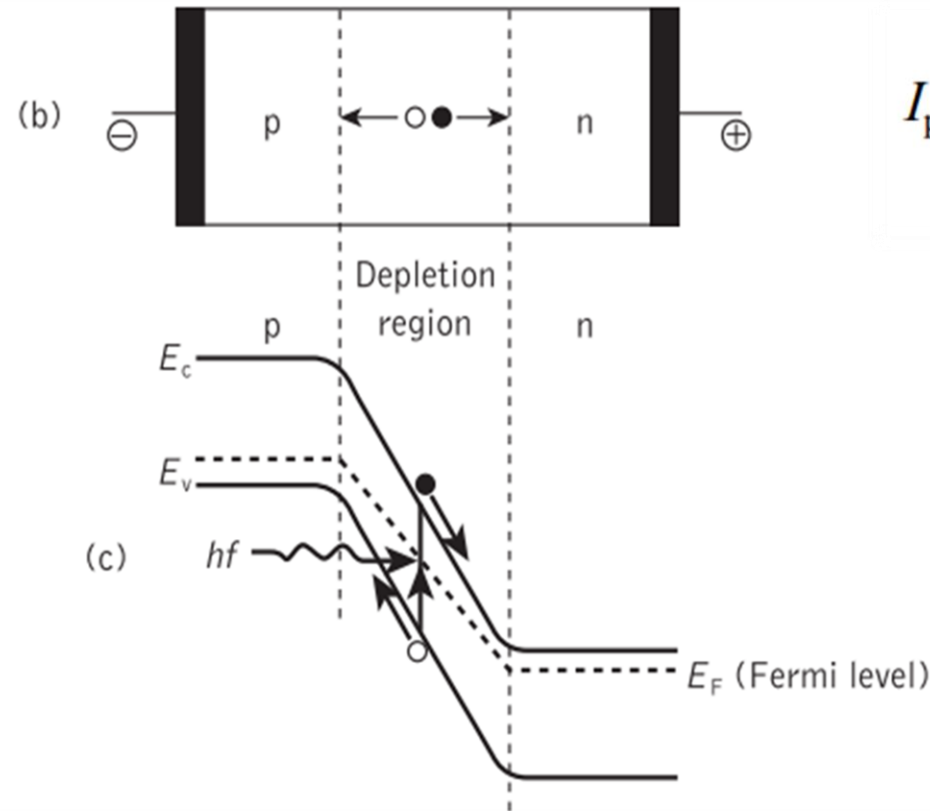
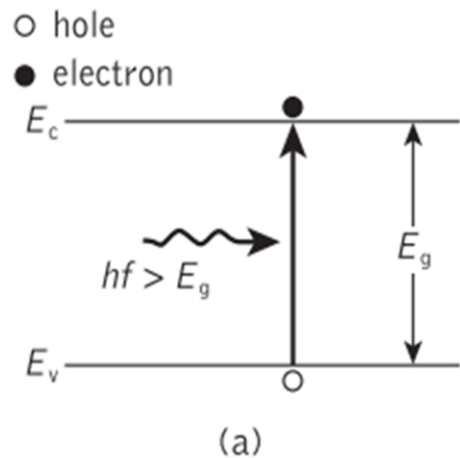
Laser
ετεροδομής

Laser κατευθυνόμενου δείκτη διάθλασης



Οπτικοί ανιχνευτές ή φωτοανιχνευτές

- Ο φωτοανιχνευτής είναι μια διάταξη που ανιχνεύει φως και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό σήμα.
- Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση φωτεινής ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος.
- Οι φωτοανιχνευτές χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, όπως στις οπτικές επικοινωνίες, στα ηλεκτρονικά, στις εφαρμογές ασφαλείας, και σε επιστημονικές έρευνες.



$$I_p = \frac{P_o e (1 - r)}{hf} [1 - \exp(-\alpha_0 d)]$$

P_o : οπτική ισχύς

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

r : Fresnel reflection

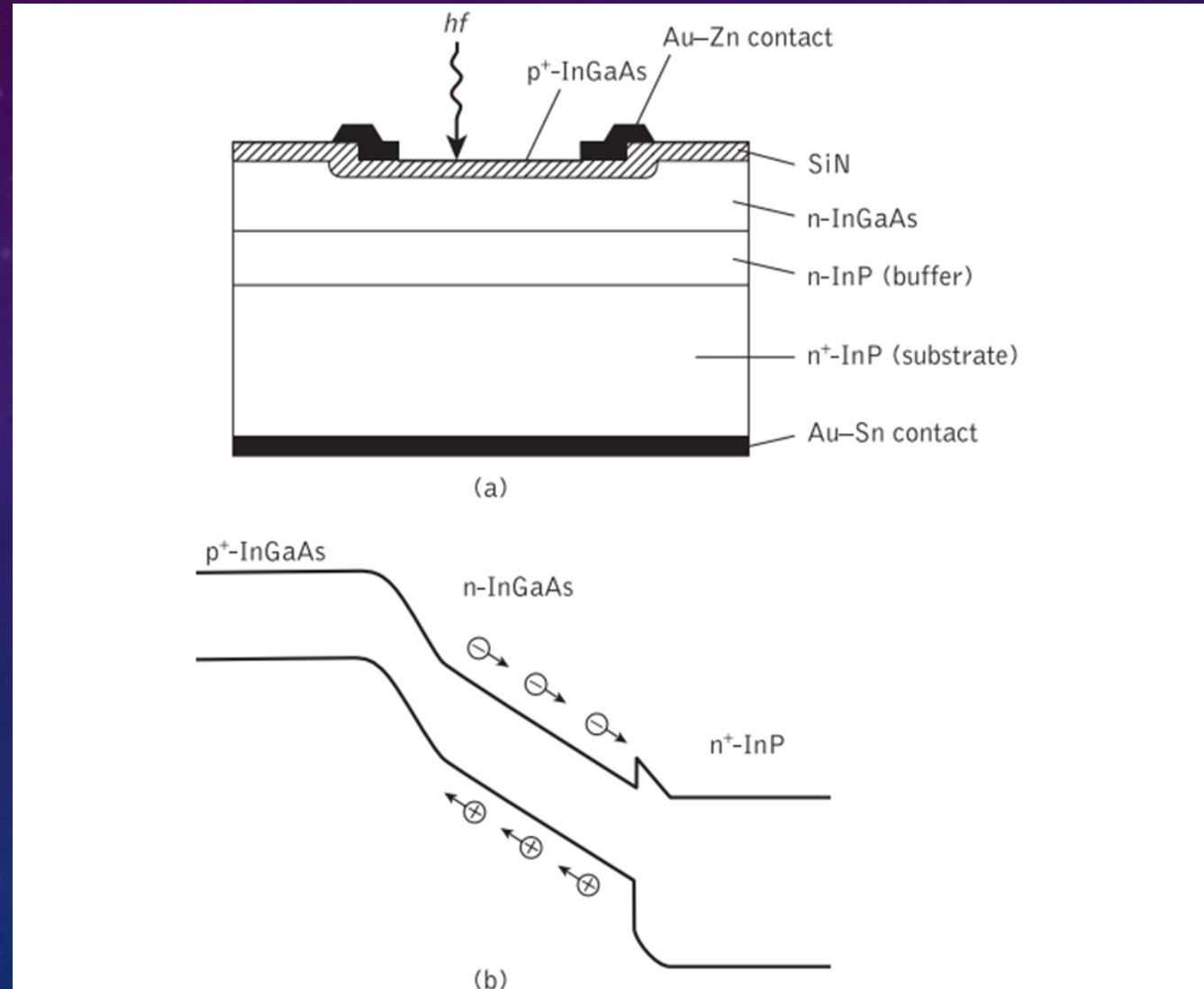
h : σταθερά του Planck

α_0 : ο συντελεστής απορρόφησης

d : το εύρος της περιοχής απορρόφησης

Οπτικοί ανιχνευτές ή φωτοανιχνευτές - 3

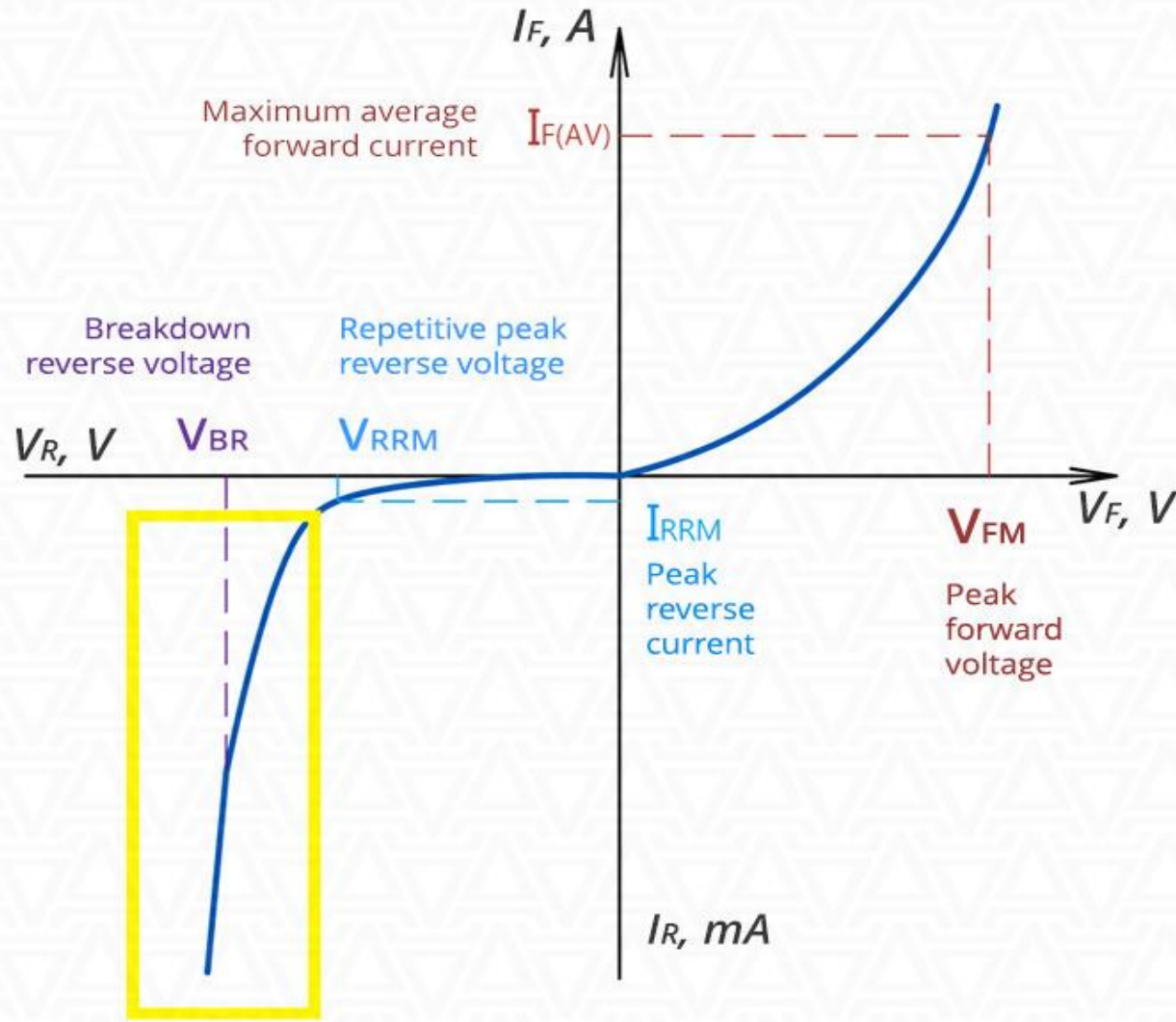
Τρόπος κατασκευής φωτοανιχνευτών



Φωτοδίδος χιονοστιβάδας - 1

- Όταν το φως πέφτει πάνω στη φωτοδίοδο, τα φωτόνια δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών.
- Η φωτοδίοδος λειτουργεί υπό υψηλή αντίστροφη τάση, με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο στο ενεργό της υλικό να είναι πολύ ισχυρό. Αυτό επιταχύνει τα παραγόμενα ηλεκτρόνια, τα οποία αποκτούν αρκετή ενέργεια καθώς κινούνται προς την κάθοδο.
- Φαινόμενο Χιονοστιβάδας: Τα επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του υλικού, απελευθερώνοντας πρόσθετα ηλεκτρόνια μέσω κρούσεων. Αυτά τα νέα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και δημιουργούν περαιτέρω κρούσεις, με αποτέλεσμα έναν πολλαπλασιασμό των φορέων φόρτισης. Αυτό δημιουργεί ένα είδος "χιονοστιβάδας" ηλεκτρονίων που ενισχύει το αρχικό φωτορεύμα.
- Ενίσχυση Σήματος: Το τελικό αποτέλεσμα είναι η σημαντική ενίσχυση του ηλεκτρικού ρεύματος που προκύπτει από την αρχική απορρόφηση των φωτονίων. Η φωτοδίοδος χιονοστιβάδας μπορεί να επιτύχει υψηλά κέρδη, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ευαισθησία, όπως ανίχνευση χαμηλής έντασης φωτός ή τηλεπικοινωνίες. Με αυτό τον τρόπο, οι φωτοδιόδοι χιονοστιβάδας επιτρέπουν την ανίχνευση και την ενίσχυση ασθενών φωτεινών σημάτων με μεγάλη απόδοση.

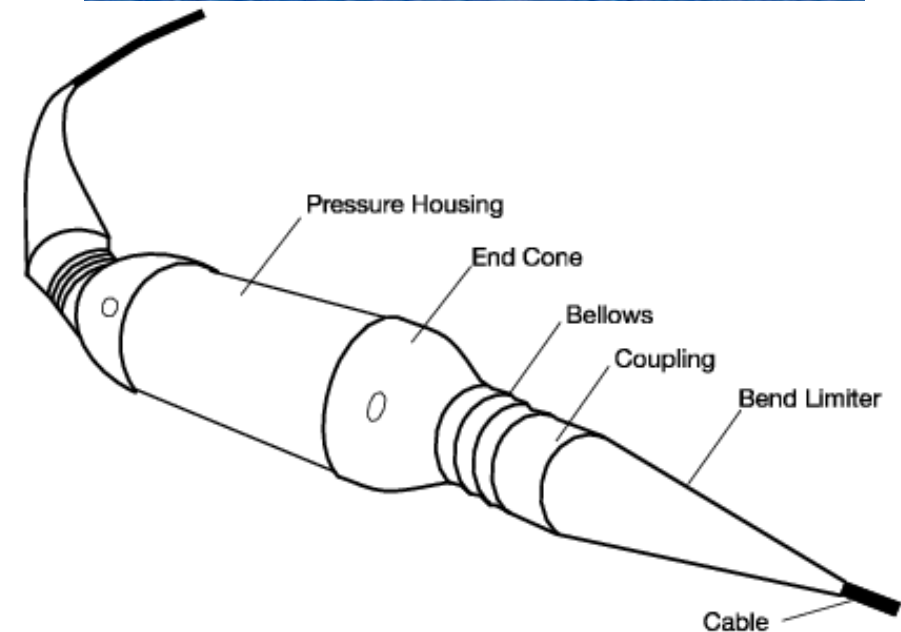
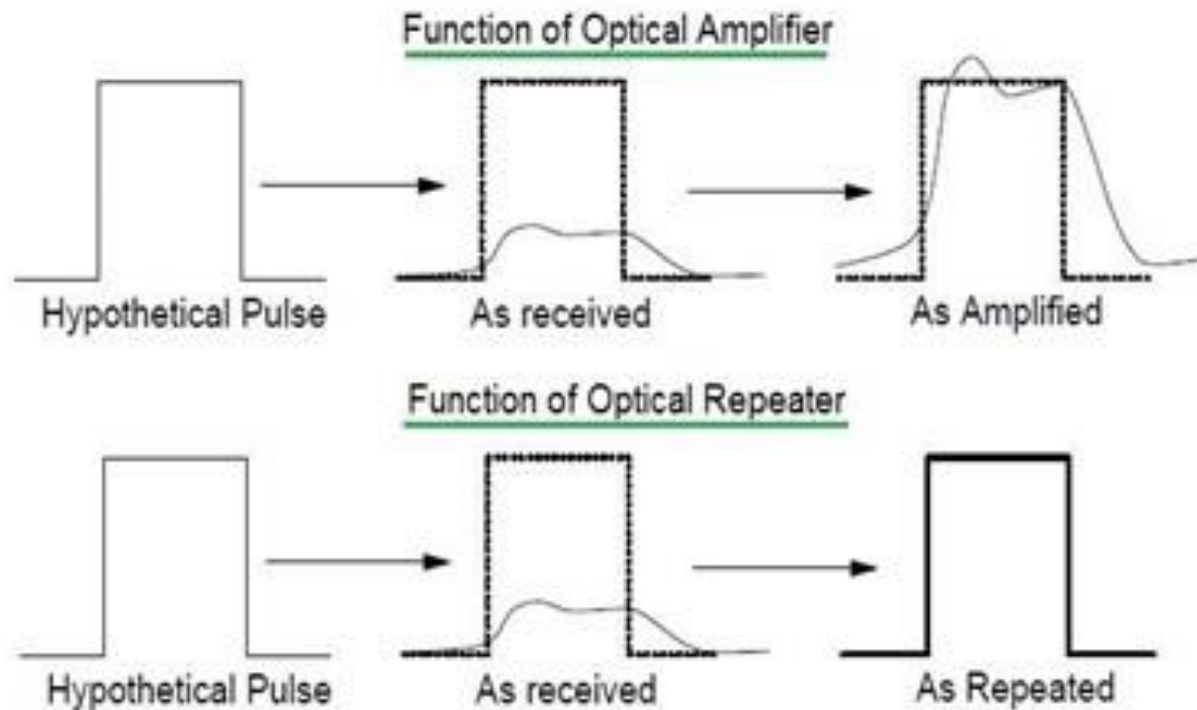
Φωτοдиодος χιονοστιβάδας - 2



Current-voltage curve of an avalanche diode

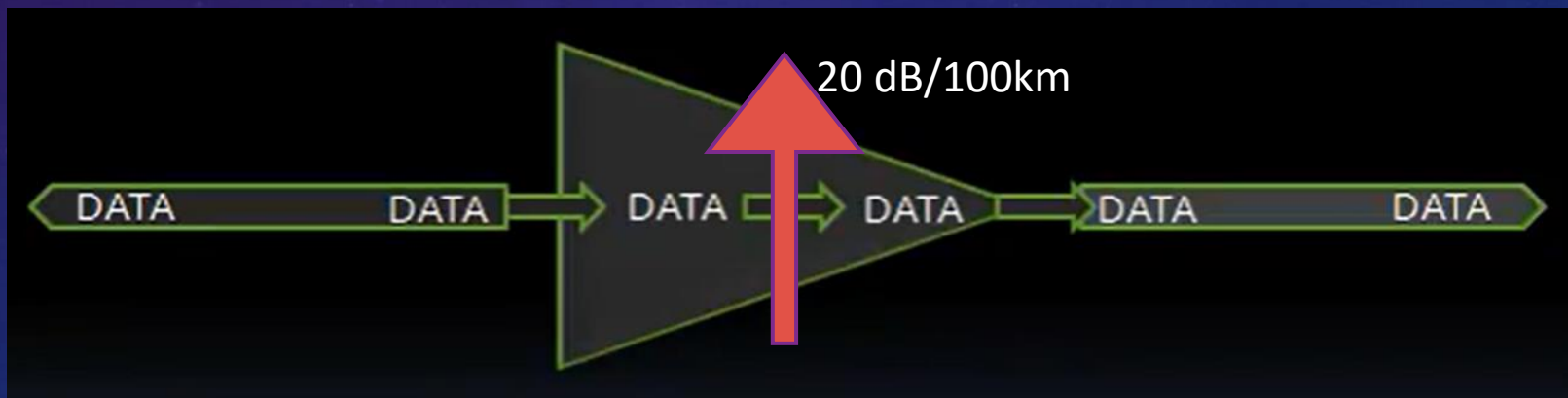
Οπτικοί ενισχυτές και επαναλήπτες

- Ο οπτικός ενισχυτής (amplifier) ενισχύει το οπτικό σήμα παράγοντας έναν ακανόνιστο παλμό
- Ο οπτικός επαναλήπτης (repeater) αναπαράγει με ακρίβεια τον αρχικό παλμό με τη χρήση οπτικών συστημάτων

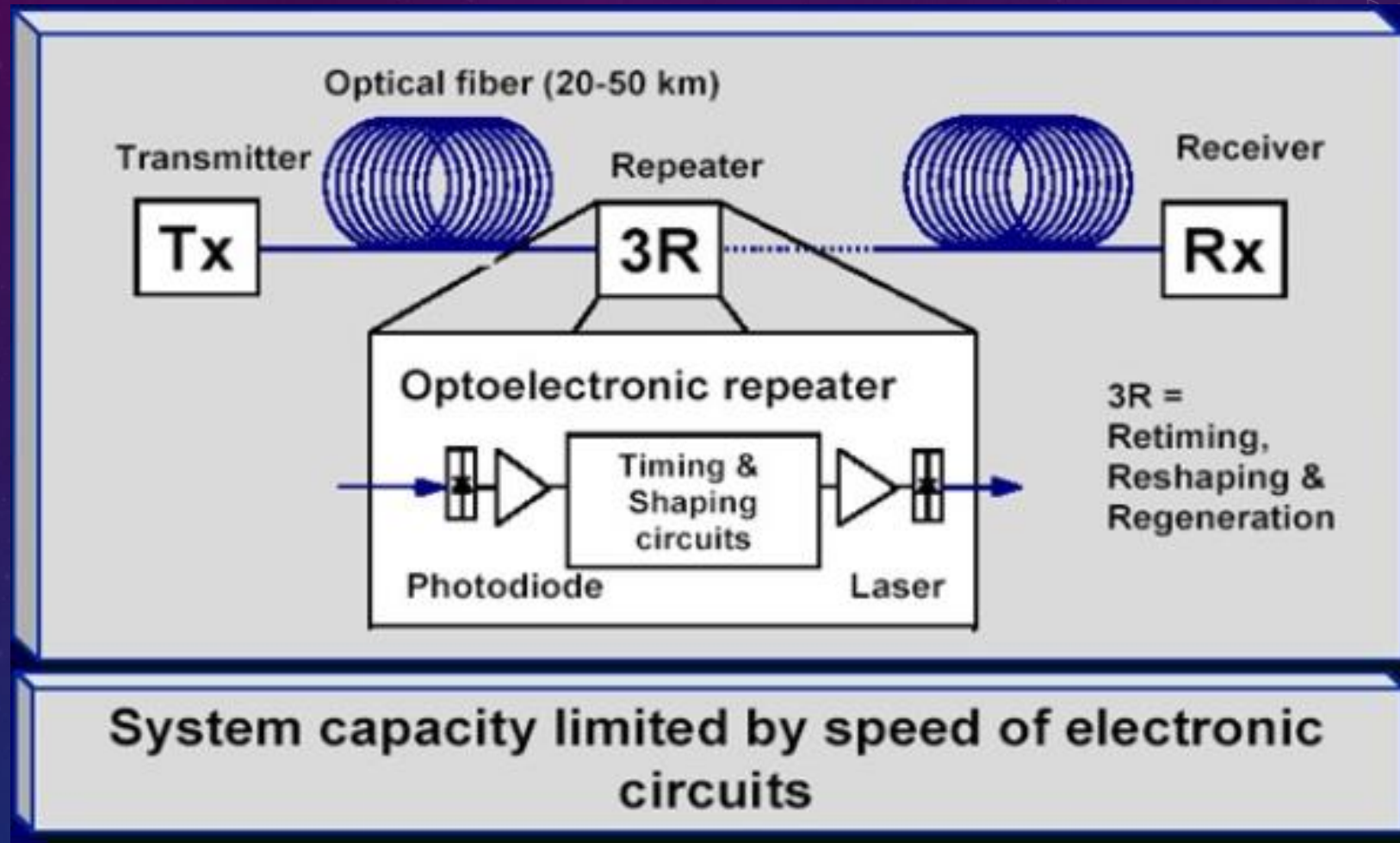


Οπτικοί ενισχυτές

- Ο οπτικός ενισχυτής είναι ένα οπτικό στοιχείο που ενισχύει το οπτικό σήμα χωρίς να το μετατρέψει πρώτα σε ηλεκτρικό.
- Για μεταφορά σήματος σε μεγάλες αποστάσεις είναι υποχρεωτικό να ενισχυθεί το σήμα λόγω της εξασθένησής του.

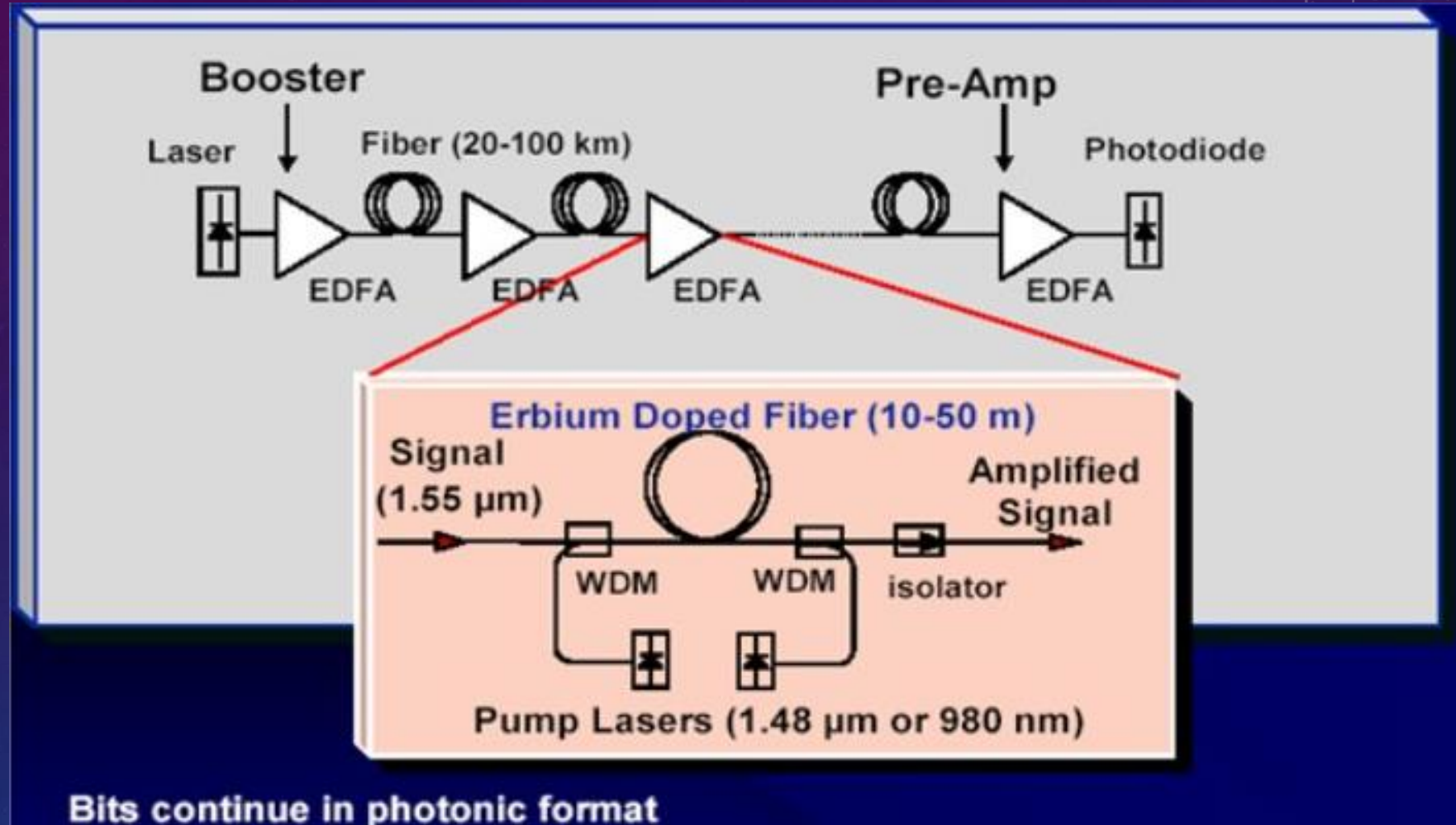


Ένα παραδοσιακό σύστημα ενίσχυσης



Σύστημα ενίσχυσης με ενισχυτές Ερβίου

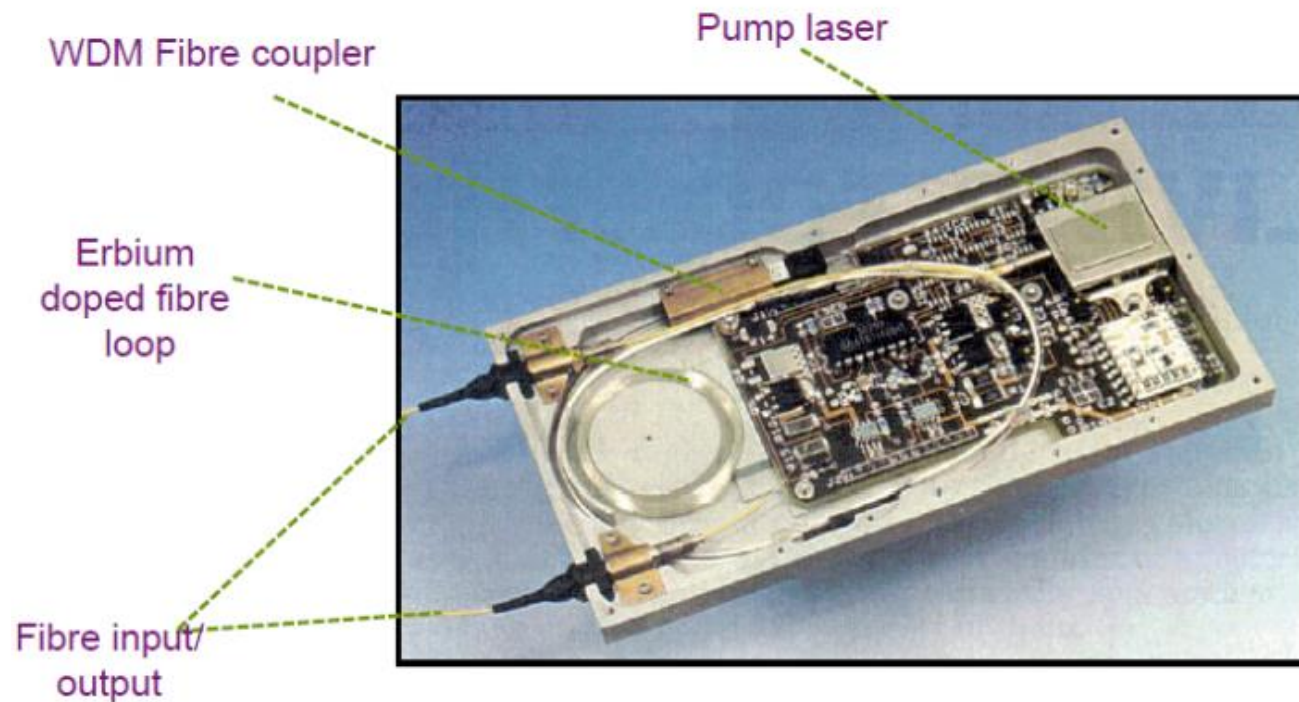
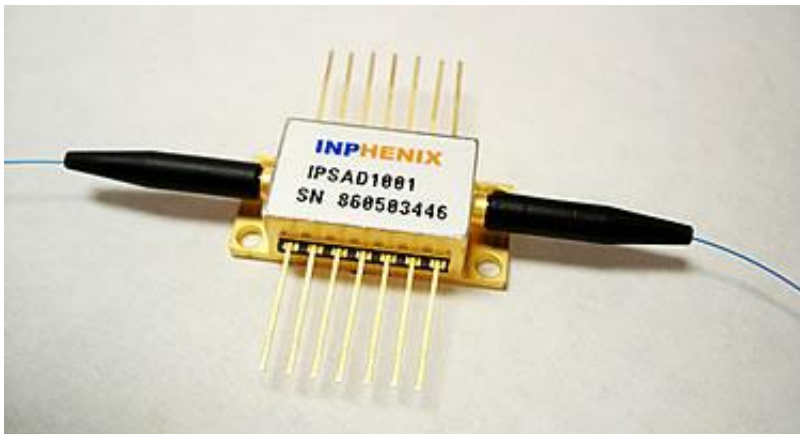
EDFAs



Οπτικοί ενισχυτές 2

Band	Description	Wavelength range
O band	original	1260–1360 nm
E band	extended	1360–1460 nm
S band	short wavelengths	1460–1530 nm
C band	conventional (“erbium window”)	1530–1565 nm
L band	long wavelengths	1565–1625 nm
U band	ultralong wavelengths	1625–1675 nm

Ανάλογα με την επιλογή του μήκους κύματος ορίζω μία ζώνη (O, E, S, C, L, U). Σε κάθε ζώνη χρησιμοποιώ διαφορετικούς οπτικούς ενισχυτές.



Γιατί προτιμώ τους οπτικούς ενισχυτές - 1

❖ Γιατί χρειάζονται οι Οπτικοί Ενισχυτές;

- Τυπικές απώλειες ίνας λόγω εξασθένισης: $\sim 0.2\text{dB/km}$ @ $1.5\ \mu\text{m}$ (C-band).
- Μετά από 100 km μετάδοσης το σήμα εξασθενεί 20dB ($P_{\text{out}} \sim 100$ μικρότερη από P_{in})
- Μικρό signal-to-noise (SNR) @ Rx \rightarrow Δεν μπορούμε να πετύχουμε το απαιτούμενο bit error rate (BER) (typically 10GHz)

Η χρήση επαναληπτών optical-electrical-optical (O-E-O) στη μετάδοση χρειάζεται γρήγορα ηλεκτρονικά κυκλώματα ($>10\text{GHz}$) και εισάγει καθυστέρηση. Ο καλύτερος τρόπος ενίσχυσης σημάτων είναι οι οπτικοί ενισχυτές με ίνα (Optical Fiber Amplifiers): χαμηλότερες απώλειες και μεγαλύτερη σταθερότητα.

Γιατί προτιμώ τους οπτικούς ενισχυτές - 2

- **Αξιοπιστία**. Επειδή χρησιμοποιούν λιγότερα ηλεκτρονικά συστήματα έχουν μικρότερη πιθανότητα βλάβης.
- **Ευελιξία**. Οι οπτικοί ενισχυτές μπορούν να είναι πολύ μικροί και ελαφριοί σε σύγκριση με τους ηλεκτρονικούς ενισχυτές. Αρκεί ένα τύπος οπτικού ενισχυτή για όλα τα μήκη κύματος.
- **Πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (WDM)**: Οι οπτικοί ενισχυτές καταφέρνουν να ενισχύσουν ταυτόχρονα όλα τα διαθέσιμα μήκη κύματος.
- **Χαμηλό κόστος**. Ενώ οι οπτικοί έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, είναι λιγότερο ενεργοβόροι και δεν χρειάζονται ιδιαίτερη συντήρηση.

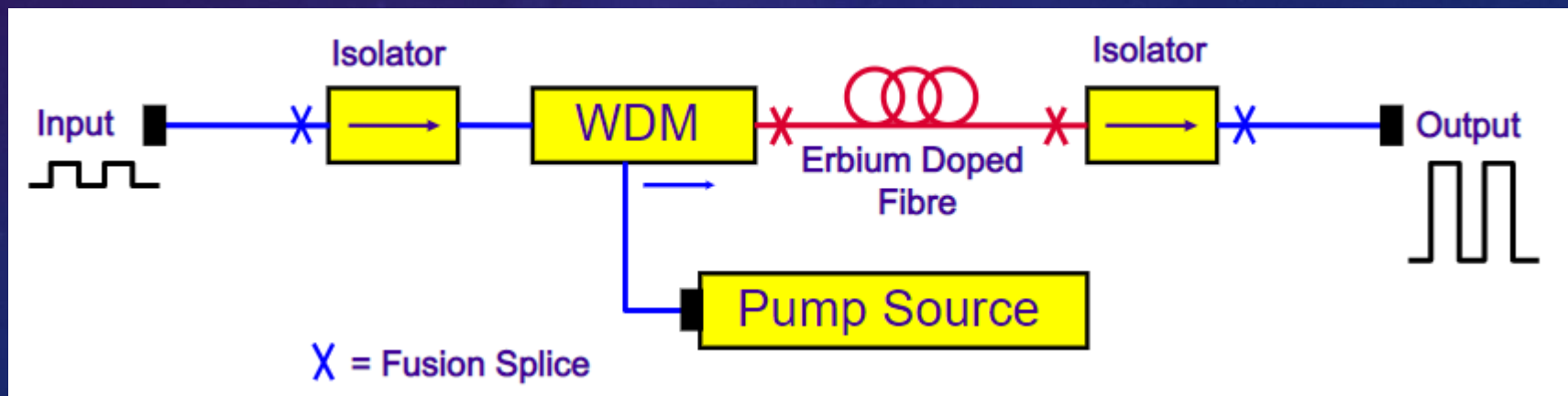
Τύποι Οπτικών Ενισχυτών

Τύποι Οπτικών Ενισχυτών

- ❖ Οπτικοί Ενισχυτές ίνας με προσμίξεις σπάνιων γαιών EDFAs (Erbium doped):
 - C or L μπάντας με συνολικό εύρος από 1500-1600 nm (C+L)
 - PDFAs (Praseodymium doped): Ο μπάντας window (στα 1300nm)
- ❖ Οπτικοί ενισχυτές τύπου RAMAN:
 - Στις O+C+L μπάντες (ανάλογα με τον αριθμό των laser άντλησης)
- ❖ Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγών:
 - Καλύπτουν τις O ή C ή L μπάντες

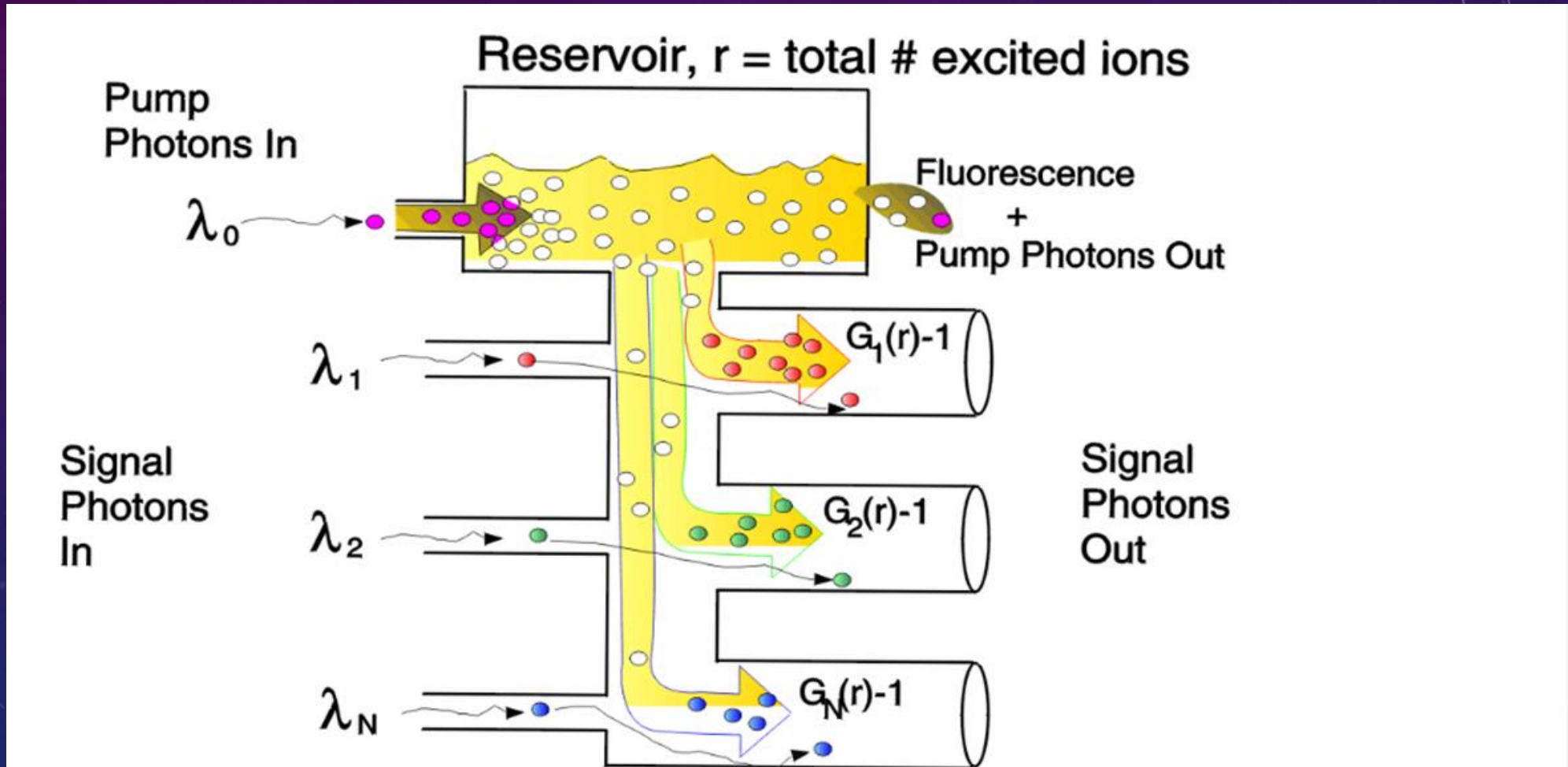
Σύστημα ενίσχυσης με ενισχυτές Ερβίου

1. Ένα οπτικό σήμα αντλίας προστίθεται σε ένα σήμα εισόδου από έναν ζεύκτη WDM
2. Μέσα στη ντοπαρισμένη ίνα, μέρος της ενέργειας της αντλίας laser (pump Source) μεταφέρεται στο σήμα εισόδου μέσω διεγερμένης εκπομπής
3. Για τη συνήθη λειτουργία περίπου στα 1550 nm, η ιδανική πρόσμιξη ινών είναι το Έρβιο
4. Το μήκος κύματος της αντλίας είναι 980 nm ή 1480 nm, η ισχύς της αντλίας είναι περίπου 50 mW
5. Πιθανά κέρδη σε ειδικές περιπτώσεις μέχρι και 30-40 dB



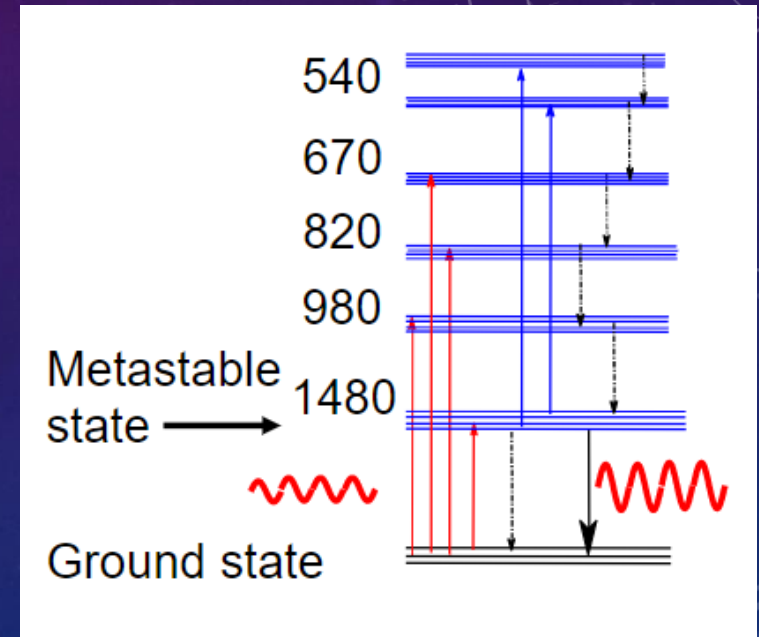
Οπτικοί ενισχυτές Ερβίου - 2

Οπτικοί ενισχυτές Ερβίου



Οπτικοί ενισχυτές Ερβίου - 3

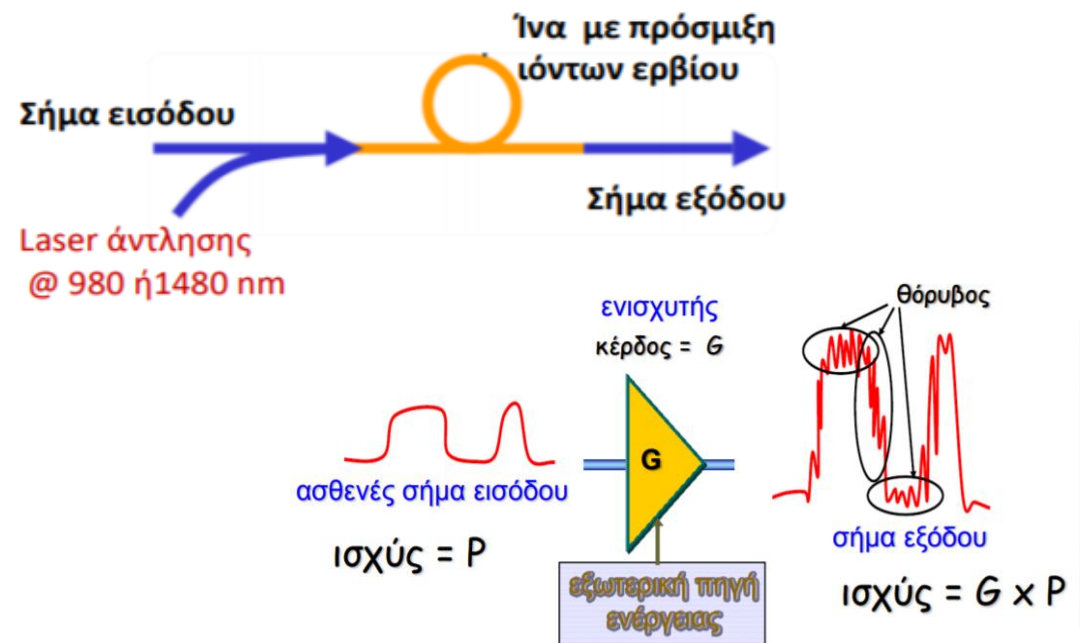
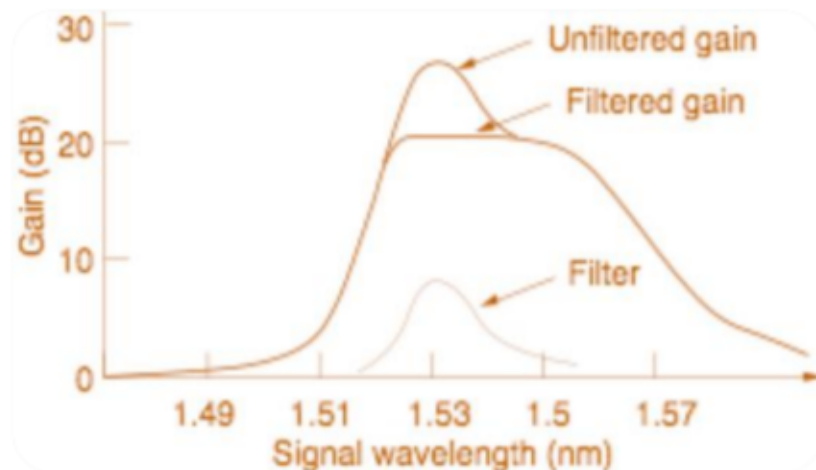
- Τα φωτόνια στα 1480 ή 980 nm ενεργοποιούν τα ηλεκτρόνια σε μια μετασταθερή κατάσταση
- Τα ηλεκτρόνια που πέφτουν πίσω αυθόρμητα εκπέμπουν φως στην περιοχή των 1550 nm
- Η αυθόρμητη εκπομπή εμφανίζεται τυχαία (~1-10 ms)
- Διεγερμένη εκπομπή: Με ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το εκπεμπόμενο μήκος κύματος και η φάση είναι πανομοιότυπα με το προσπίπτον



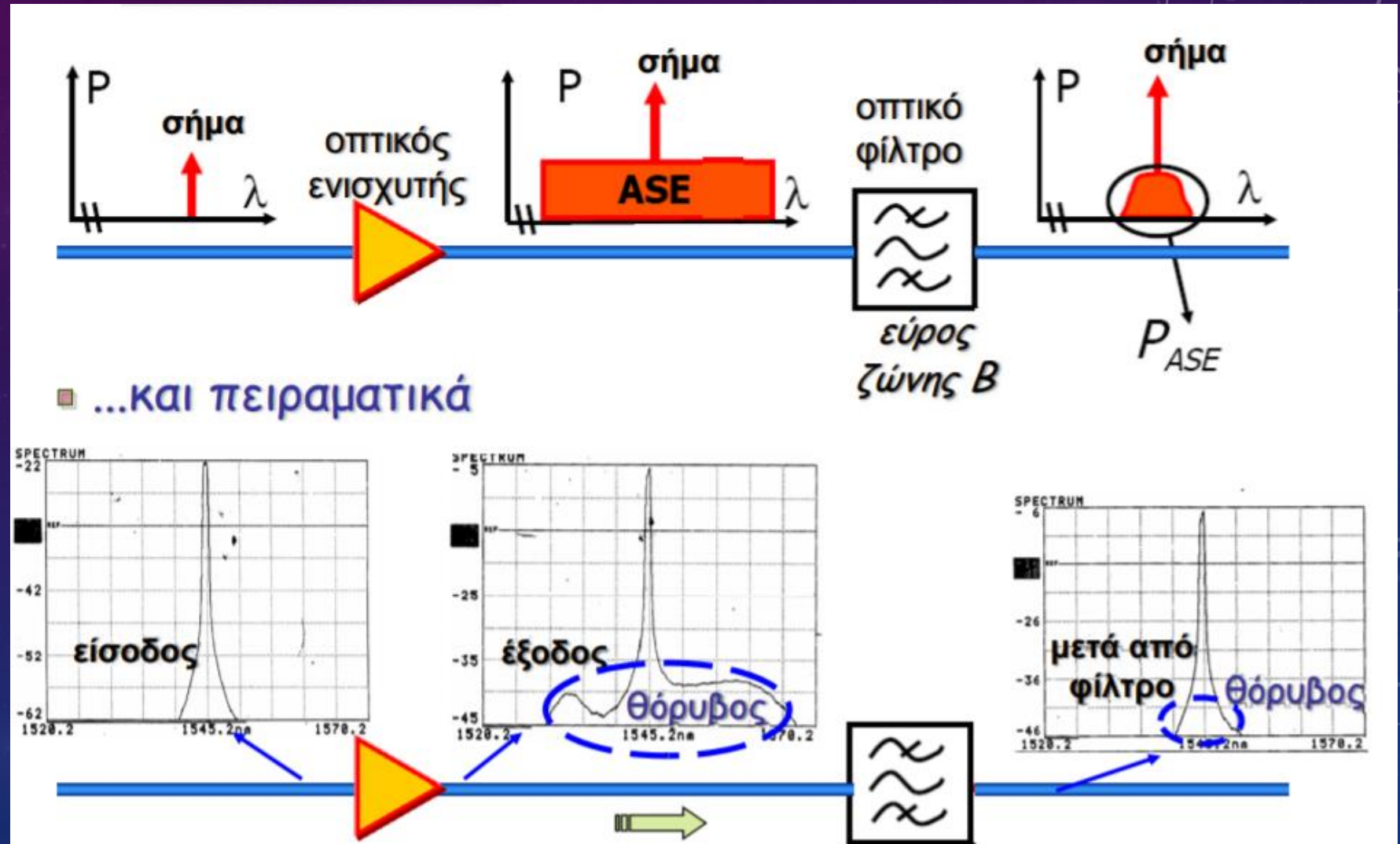
Οπτικοί ενισχυτές Ερβίου - 1

Οπτικοί ενισχυτές Ερβίου

- ✓ Μεγάλο εύρος ενίσχυσης (40nm)
- ✓ Μεγάλο κέρδος ενίσχυσης (30-40dB)
- ✓ Υψηλή ισχύς εξόδου (>20dBm)
- ✓ Χαμηλή εικόνα θορύβου - 4dB (Noise Figure)
- ✗ Δεν έχουν ομοιόμορφο κέρδος σε όλο το παράθυρο λειτουργίας τους
- ✗ Σχετικά μεγάλο μέγεθος
- ✗ Δεν μπορούν να ολοκληρωθούν σε chip



Ζωνοπερατά φίλτρα



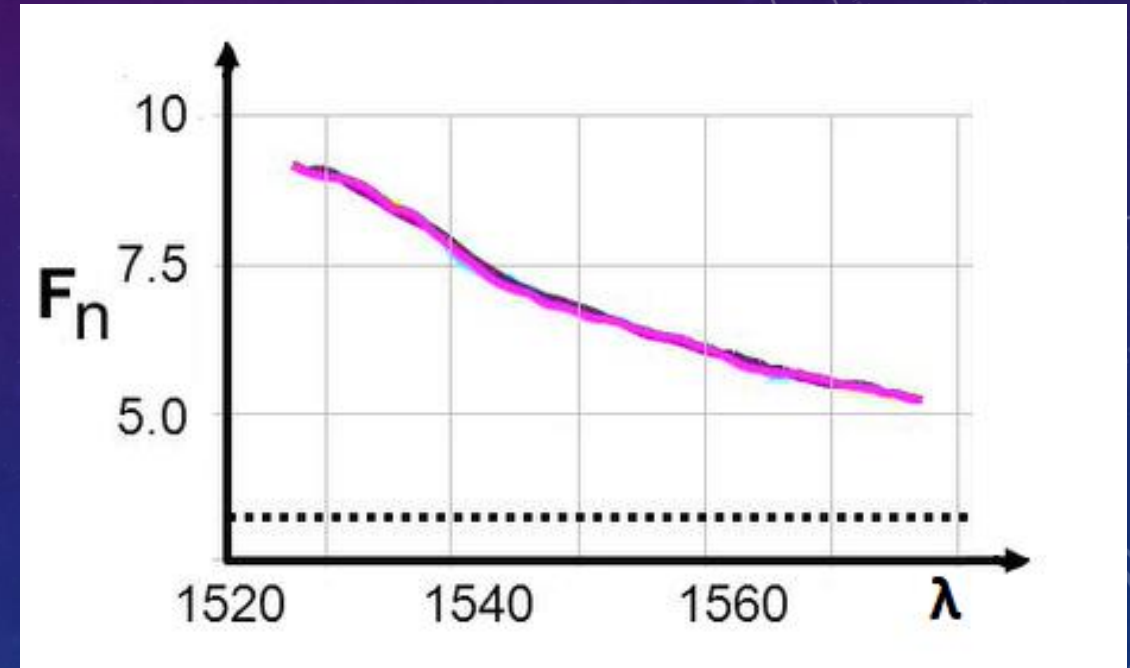
Ζωνοπερατό φίλτρο για μείωση amplified spontaneous emission (ASE) θορύβου

Θόρυβος

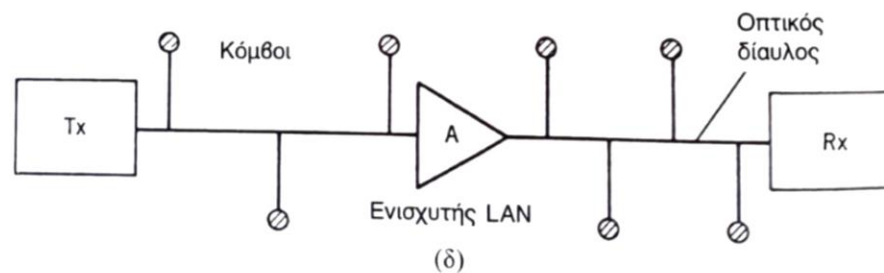
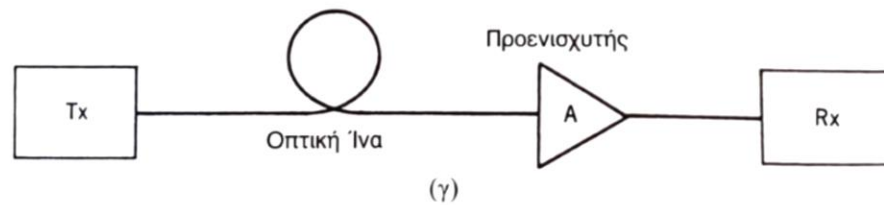
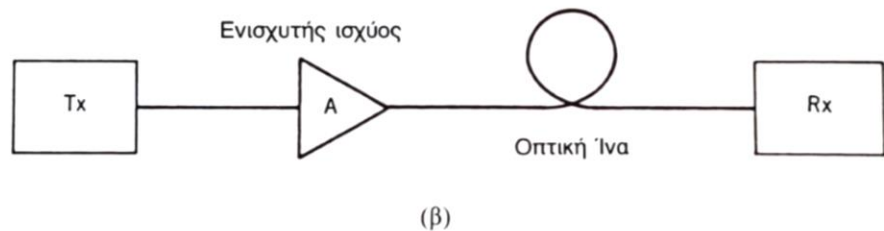
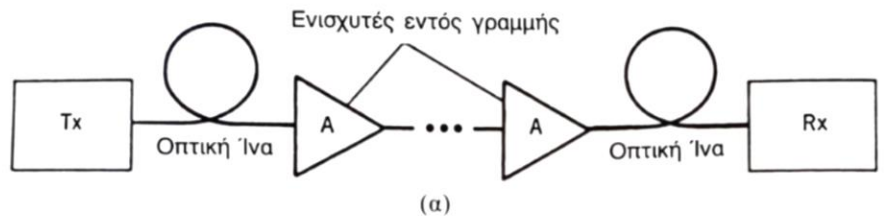
Όλοι οι ενισχυτές υποβαθμίζουν το λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR) λόγω της αυθόρμητης μετάδοσης που προσθέτει θόρυβο στο σήμα. Το μέγεθος που μας δίνει την ποσοτική υποβάθμιση του SNR το προσδιορίζω ως:

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}$$

Η F_n εξαρτάται κυρίως από το μήκος κύματος του ενισχυόμενου σήματος.



Εφαρμογές οπτικών ενισχυτών στο δίκτυο



4 δυνατές εφαρμογές των οπτικών ενισχυτών στα οπτικά συστήματα

- (α) ως ενισχυτές εντός γραμμής
- (β) ως υποστηρικτής της μεταδιδόμενης ισχύος
- (γ) ως προενισχυτής στον δέκτη
- (δ) για αντιστάθμιση της απώλειας κατανομής στα τοπικά δίκτυα

Απολαβή

Απολαβή ενισχυτή:

$$G_P = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$



Απολαβή οπτικού ενισχυτή: $g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + P/P_s}$

Όπου g_0 η μέγιστη τιμή της απολαβής, ω η οπτική συχνότητα, ω_0 η ατομική συχνότητα μετάβασης, P_s η ισχύς κόρου, T_2 ο χρόνος διπολικής χαλάρωσης, και P η οπτική ισχύς του σήματος που ενισχύεται

Απολαβή 2

Για ένα μη κορεσμένο σύστημα στο οποίο $P/P_s \ll 1$

Απολαβή οπτικού ενισχυτή: $g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2}$

Η απολαβή γίνεται μέγιστη όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συμπίπτει με την ατομική συχνότητα μετάβασης ω_0 .

Εύρος ζώνης απολαβής: $\Delta V_g = \frac{\Delta\omega_a}{2\pi} = \frac{1}{\pi T_2}$

Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού

Οπτικοί ενισχυτές ημιαγωγού

Όταν το φως ταξιδεύει μέσα από την ενεργό περιοχή, αναγκάζει τα διεγερμένα ηλεκτρόνια να χάσουν ενέργεια με τη μορφή φωτονίων και να επιστρέψουν στη θεμελιώδη κατάσταση. Αυτά τα διεγερμένα φωτόνια έχουν το ίδιο μήκος κύματος με το οπτικό σήμα, ενισχύοντας έτσι το οπτικό σήμα.

