



Συστήματα Μετάδοσης & Δίκτυα Οπτικών Ινών

www.telecom.ntua.gr/photonics

Ηρακλής Αβραμόπουλος

Photonics Communications Research Laboratory



ΠΕΡΙΓΡΑΜΜΑ 3^{ης} ΕΝΟΤΗΤΑΣ

- 1) Οπτικές πηγές
- 2) Φωτοδίοδος
- 3) Οπτική ενίσχυση
- 4) Ο ενισχυτής ίνας ερβίου
- 5) Συσσώρευση θορύβου σε συστήματα μετάδοσης μεγάλων αποστάσεων (Long-haul systems)



ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

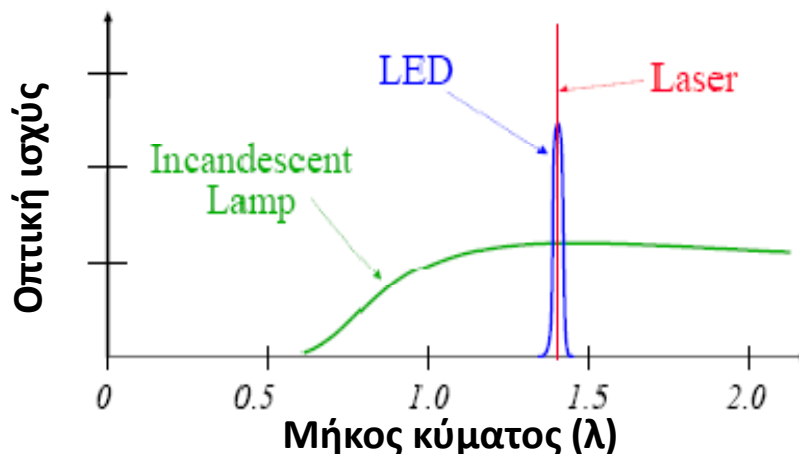
Ως οπτική πηγή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μία δίοδος εκπομπής φωτός (LED) είτε ένα laser ημιαγωγού.

Στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά laser ημιαγωγού λόγω των πλεονεκτημάτων τους:

Στενό φασματικό εύρος, πολύ καλή συμφωνία

Ευκολία σύζευξης του παραγόμενου φωτός σε οπτικές ίνες

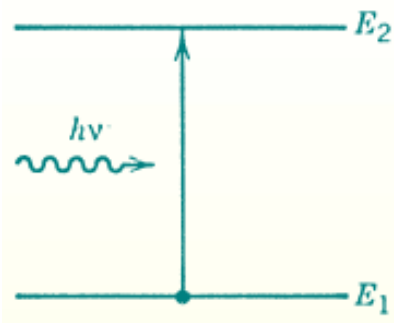
Μικρό μέγεθος, αξιοπιστία και υψηλή απόδοση



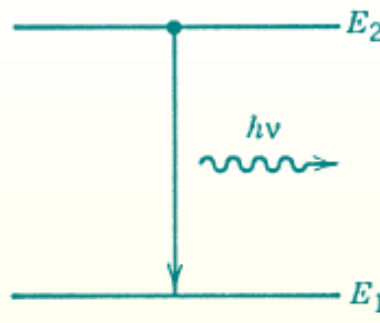


ΟΠΤΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

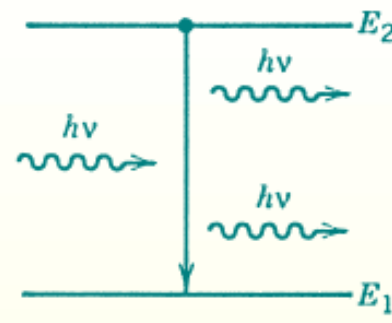
Για την περιγραφή της λειτουργίας των LED και των laser πρέπει να θεωρήσουμε τις τρεις βασικές διαδικασίες:



Απορρόφηση



Αυθόρμητη εκπομπή



Εξαναγκασμένη εκπομπή

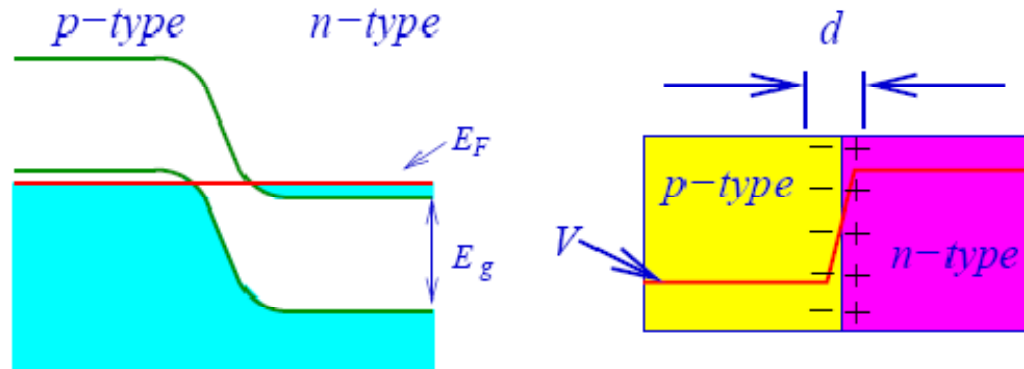
Το LED βασίζεται στην αυθόρμητη εκπομπή και επομένως η έξοδος του έχει χαμηλή ισχύ, χαμηλή συμφωνία και φασματικό εύρος ~ 40 nm.

Το laser βασίζεται στην εξαναγκασμένη εκπομπή. Η έξοδος του έχει υψηλή ισχύ, παρουσιάζει υψηλή συμφωνία και μικρό φασματικό εύρος (μπορεί να είναι μερικές δεκάδες MHz)



LASER ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

Το ενεργό υλικό αποτελείται από μία δίοδο p-n. Σχηματίζεται συνδυάζοντας δύο ημιαγωγούς τύπου p και n σε έναν κρύσταλλο.

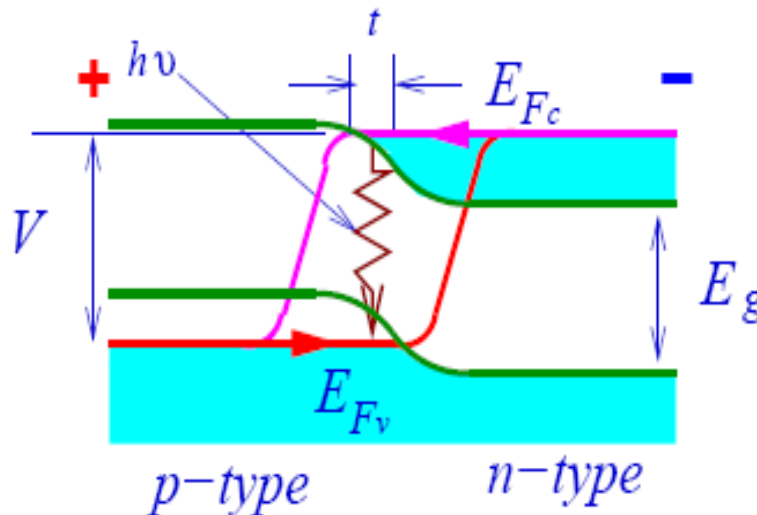


Στην κεντρική περιοχή πλάτους d τα ηλεκτρόνια και οι οπές επανενώνονται και επομένως δεν υπάρχουν φορείς (περιοχή απογύμνωσης). Η κίνηση επιπλέον ηλεκτρονίων προς την περιοχή p και οπών προς την περιοχή n εμποδίζεται από το φράγμα δυναμικού.



LASER ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

Ορθή πόλωση: Ο θετικός πόλος συνδέεται στον ημιαγωγό τύπου p.
Ο αρνητικός πόλος συνδέεται στον ημιαγωγό τύπου n.



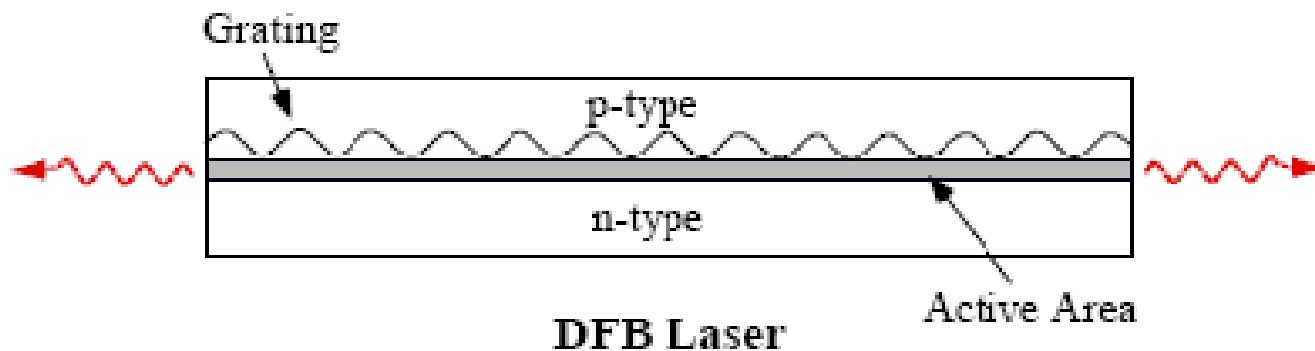
Εφαρμογή ορθής πόλωσης μειώνει το φράγμα δυναμικού, μειώνει την περιοχή απογύμνωσης και οδηγεί σε επανένωση φορέων (ηλεκτρονίων και οπών). Η επανένωση ενός τέτοιου ζεύγους συνοδεύεται από παραγωγή ενός φωτονίου (εκπομπή).



LASER ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

Για να υπάρξει δράση lasing θα πρέπει το ενεργό υλικό να τοποθετηθεί μεταξύ δύο κατόπτρων, έτσι ώστε η οπτική δέσμη να κάνει πολλαπλές διαδρομές μέσα από το ενεργό υλικό.

Για να ξεκινήσει η δράση lasing θα πρέπει το ρεύμα άντλησης να ξεπεράσει ένα κατώφλι. Μετά από αυτό το κατώφλι το καθαρό κέρδος μέσα στην κοιλότητα ξεπερνά τις απώλειες.



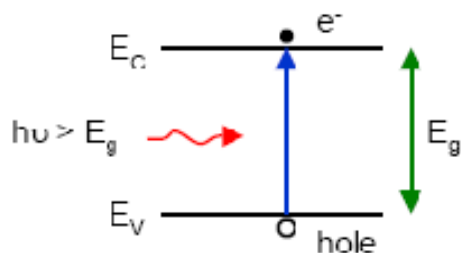
Στην περίπτωση των DFB lasers (Distributed – feedback lasers) τα κάτοπτρα υλοποιούνται με τη βοήθεια φραγμάτων περίθλασης.



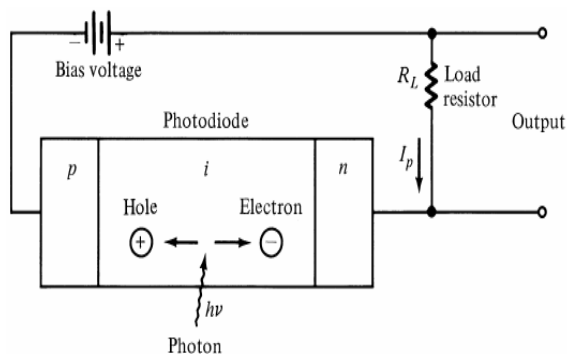
ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ

Όπως μία δίοδος p-n (ή p-i-n) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φωτός αν πολωθεί ορθά, έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την ανίχνευση του φωτός αν πολωθεί ανάστροφα.

Ανάστροφη πόλωση: Ο θετικός πόλος συνδέεται στον ημιαγωγό τύπου n. Ο αρνητικός πόλος συνδέεται στον ημιαγωγό τύπου p.



Αν το προσπίπτον φωτόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο, απορροφάται δημιουργώντας ζεύγος ηλεκτρονίου – οπής.



Η ανάστροφη πόλωση επιτρέπει το διαχωρισμό και τη συλλογή των ηλεκτρονίων και των οπών από εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα.



ΦΩΤΟΔΙΟΔΟΣ

Η φωτοδίοδος μετατρέπει την οπτική ισχύ που προσπίπτει σε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο ενισχύεται και επεξεργάζεται ώστε να ανακτηθεί η πληροφορία.

Η φωτοδίοδος ανιχνεύει μόνο οπτική ισχύ σύμφωνα με τον τετραγωνικό νόμο και δεν μπορεί να ανακτήσει την πλήρη περιγραφή του οπτικού πεδίου.

$$I \propto P = |E \cdot \exp[-j(\omega \cdot t + \varphi)]|^2$$

Η πληροφορία της φάσης χάνεται με δύο σημαντικές συνέπειες:

Σήματα που είναι διαμορφωμένα κατά φάση θα πρέπει πριν ανιχνευθούν να μετατραπούν σε σήματα διαμόρφωσης πλάτους με αμιγώς οπτικό τρόπο (π.χ. συμβολόμετρο)

Ο οπτικός θόρυβος (ο οποίος έχει τυχαία φάση) δεν μπορεί να αναγνωρισθεί και διαχωρισθεί από το σήμα.



Κβαντική απόδοση της φωτοδιόδου

$$\eta = \frac{\text{αριθμός παραγόμενων ηλεκτρονίων}}{\text{αριθμός φωτονίων που προσπίπτουν}} = \frac{r_e (\eta\lambda / \text{sec})}{r_p (\phi\omega\tau / \text{sec})}$$

Για φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (APD) η κβαντική απόδοση ξεπερνά τη μονάδα:

Ένα φωτόνιο παράγει αλυσιδωτά περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια.
Οι APD έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία, αλλά περισσότερο θόρυβο και μικρότερο φασματικό εύρος (bandwidth)

Σε όλες τις φωτοδιόδους το ρεύμα που παράγεται ισούται με:

$$I_p = q \cdot r_e = q \cdot \eta \cdot r_p = q \cdot \eta \cdot \frac{P}{h \cdot \nu} = R \cdot P$$

Η ποσότητα R ονομάζεται αποκρισιμότητα της φωτοδιόδου και ισούται με:

$$R = \frac{q \cdot \eta}{h \cdot \nu} \quad \left(\frac{A}{W} \right)$$



Θόρυβος δέκτη

Η σχέση $I_p = R \cdot P$ περιγράφει τη λειτουργία μίας ιδανικής φωτοδιόδου.

Στην πραγματικότητα, το παραγόμενο ρεύμα είναι της μορφής:

$$I = I_p + I_s + I_T + I_D$$

Θόρυβος βολής (shot-noise): Δίνει τη συνεισφορά I_s . Είναι κβαντικό φαινόμενο και οφείλεται στο ότι τα ηλεκτρόνια δεν παράγονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, αλλά σε τυχαίες στιγμές (όταν προσπίπτουν φωτόνια).

Η φασματική πυκνότητά του μπορεί να θεωρηθεί σταθερή μέσα στο φασματικό εύρος της φωτοδιόδου.

$$S_s(f) = 2 \cdot q \cdot I_p$$

Ως στατιστικό μέγεθος ισχύει: $\langle I_s(t) \rangle = 0$

$$\sigma_s^2 = \langle I_s(t)^2 \rangle = 2 \cdot q \cdot I_p \cdot \Delta f$$

όπου Δf το εύρος ζώνης (bandwidth) της φωτοδιόδου.



Θερμικός θόρυβος (thermal-noise): Δίνει τη συνεισφορά I_T . Περιγράφει το γνωστό θερμικό θόρυβο στις ωμικές αντιστάσεις του φωτοφωρατή.

Η φασματική του πυκνότητα είναι ίση με:

$$S_T(f) = \frac{2 \cdot k_B \cdot T}{R_L}$$

Ως στατιστικό μέγεθος ισχύει:

$$\sigma_T^2 = \langle I_T(t) \rangle^2 = \frac{4 \cdot k_B \cdot T}{R_L} \cdot \Delta f$$

Θόρυβος σκότους (dark-noise): Δίνει τη συνεισφορά I_D . Οφείλεται στο ότι ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δημιουργούνται όχι μόνο από την πρόσπτωση φωτονίων αλλά και με θερμικό τρόπο.



Η ΑΝΑΓΚΗ ΤΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

Οι απώλειες της ισχύος κατά τη διάδοση των σημάτων μέσα σε οπτικά συστήματα επικοινωνιών επιβάλλουν την περιοδική επανενίσχυσή τους.



Οι απώλειες δεν επηρεάζουν τη μορφή των παλμών, αλλά μόνο την ισχύ τους.

Μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '80 η επανενίσχυση ήταν μέρος της αναγέννησης των οπτικών σημάτων που γινόταν με τη βοήθεια οπτο-ηλεκτρο-οπτικών επαναληπτών (O-E-O repeaters)



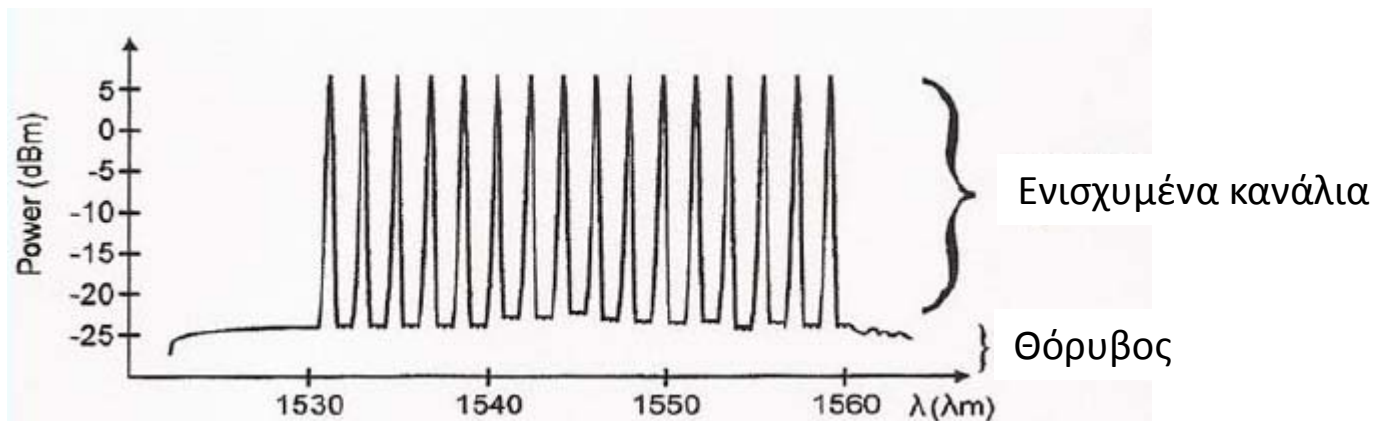
ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ

Από τα μέσα της δεκαετίας του '90, τα σήματα σε οπτικά συστήματα επικοινωνιών ενισχύονται κατά κύριο λόγο με αμιγώς οπτικό τρόπο.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

«Διαφάνεια» στο ρυθμό μετάδοσης και στο σχήμα διαμόρφωσης, εφόσον δεν απαιτείται λήψη και επεξεργασία του οπτικού σήματος.

Πολύ καλές ιδιότητες κλιμάκωσης, καθώς ένας οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει πολλά WDM κανάλια, τα οποία βρίσκονται φασματικά μέσα στο εύρος ζώνης του.



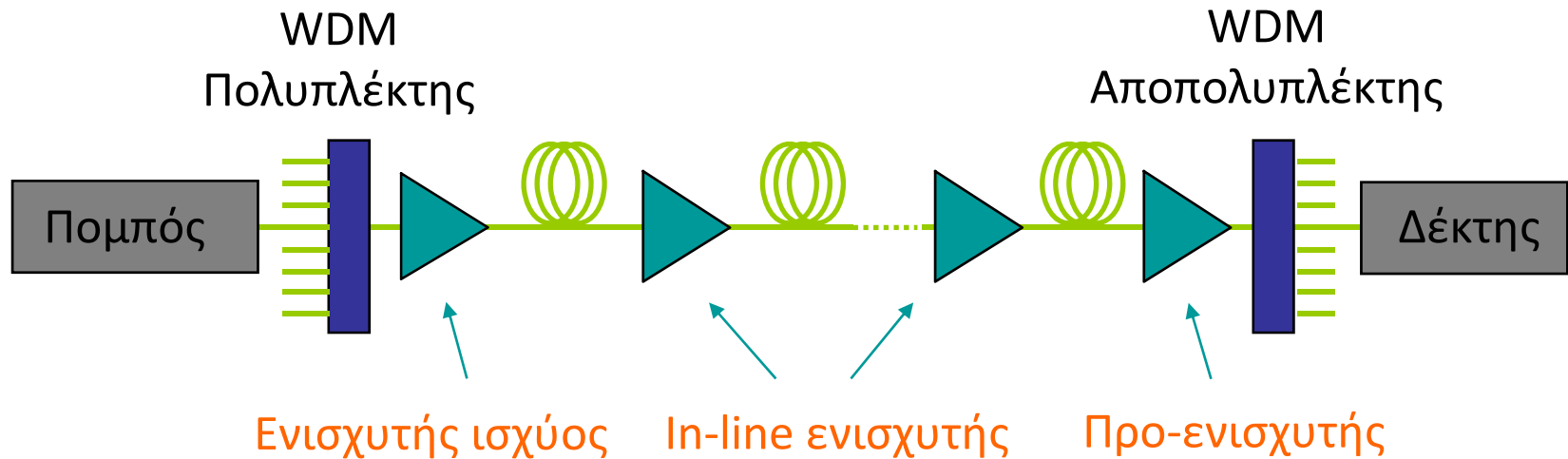


ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΝΙΣΧΥΤΩΝ

Ενισχυτής ισχύος (μεγάλη ισχύς εξόδου)

In-line ενισχυτής (χαμηλός θόρυβος, μικρή εξάρτηση κέρδους από λ)

Προ-ενισχυτής (χαμηλός θόρυβος, υψηλό κέρδος)





ΟΠΤΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ

Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το οπτικό σήμα εισόδου αλλά προσθέτουν (όπως όλοι οι ενισχυτές) θόρυβο.

Τρεις είναι οι σημαντικότεροι τύποι οπτικών ενισχυτών:

Ενισχυτής ίνας ερβίου (EDFA)

Ενισχυτής Raman

Οπτικός ενισχυτής ημιαγωγού (SOA)

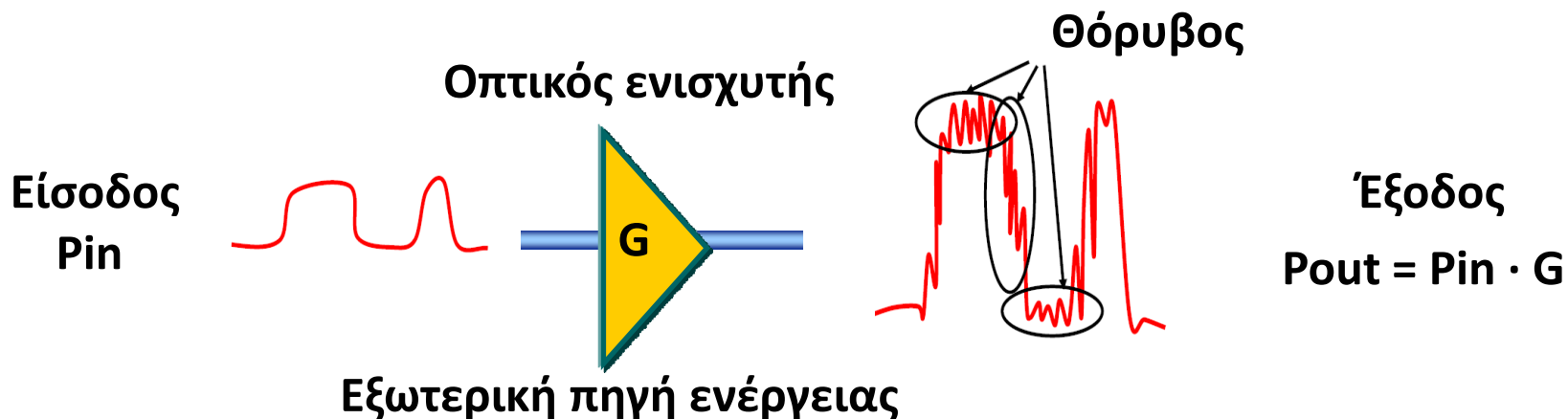
Ο EDFA είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος οπτικού ενισχυτή στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών.

Ο ενισχυτής Raman έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά θορύβου, και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε συστήματα μεγάλων αποστάσεων (long-haul systems) .



ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Ο κάθε οπτικός ενισχυτής περιλαμβάνει ένα ενεργό υλικό το οποίο αντλείται είτε οπτικά είτε ηλεκτρικά, έτσι ώστε να αποδίδει κέρδος.



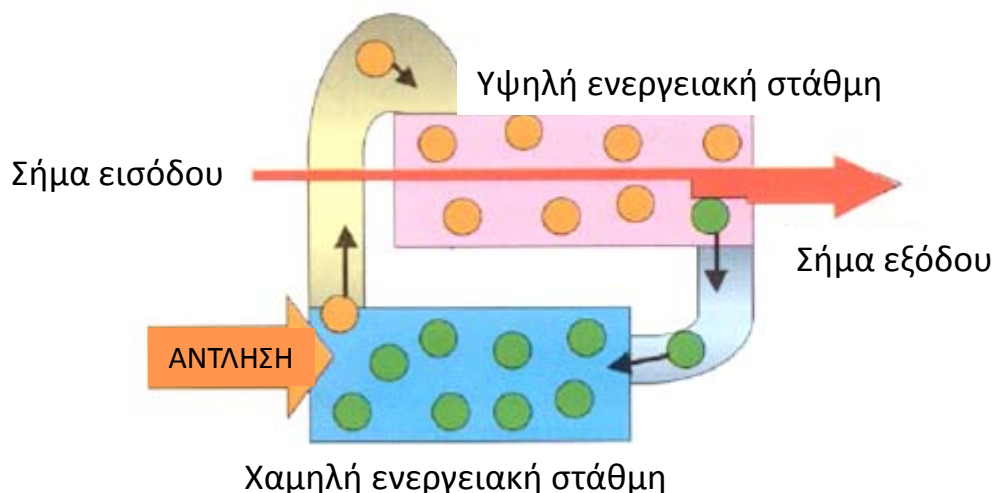
Στην ουσία πρόκειται για την ίδια δομή με αυτή ενός laser, χωρίς όμως να περιλαμβάνει κοιλότητα και επομένως οπτική ανάδραση.



ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Μέσω της άντλησης μεταφέρονται φορείς από χαμηλότερη σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη. Αν N_1 και N_2 ο αριθμός των φορέων στις δύο στάθμες, μετά την άντληση ισχύει $N_2 > N_1$ (**αναστροφή πληθυσμών**)

Αν μέσα στο χρόνο ζωής των φορέων προσπέσει φωτόνιο, θα προξενήσει εξαναγκασμένη εκπομπή, ειδάλλως οι φορείς θα αποδιεγερθούν αυθόρμητα



Για τον κάθε ενισχυτή μπορούμε να ορίσουμε δύο παραμέτρους κέρδους:

G : Συνολικό κέρδος του ενισχυτή

g : Κέρδος ανά μονάδα μήκους του ενισχυτή



ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

Το κέρδος ανά μονάδα μήκους (ή κέρδους υλικού) είναι συνάρτηση της ισχύος P και της συχνότητας ω του οπτικού σήματος.

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

Η παράμετρος ω_0 δηλώνει τη **συχνότητα της χαρακτηριστικής ατομικής μετάβασης** μέσα στο ενεργό υλικό. Το κέρδος γίνεται μέγιστο όταν η συχνότητα του σήματος συμπίπτει με τη συχνότητα αυτής της μετάβασης .

Η παράμετρος T_2 ονομάζεται **χρόνος διπολικής αποδιέγερσης** και καθορίζει το εύρος ζώνης του ενισχυτή.

Η παράμετρος P_s ονομάζεται **ισχύς κορεσμού** και δείχνει ότι το κέρδος μειώνεται (κορένεται) για μεγάλες τιμές οπτικής ισχύος.



ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ

Θεωρώντας ότι η προσπίπτουσα οπτική ισχύς είναι μικρή έχουμε εξάρτηση του κέρδους μόνο από τη συχνότητα:

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

Το εύρος ζώνης του κέρδους υλικού ορίζεται ως το πλήρες εύρος μέσα στο οποίο το κέρδος έχει πέσει κατά το ήμισυ (FWHM):

$$\Delta f_g = \frac{\Delta \omega_g}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{\pi \cdot T_2}$$

Τυπικές τιμές του Δf_g είναι της τάξης των **5 THz (περίπου 40 nm)**



ΣΧΕΣΗ ΚΕΡΔΟΥΣ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΙ ΚΕΡΔΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Χρησιμοποιώντας τον ορισμό του κέρδους υλικού έχουμε:

$$\frac{dP}{dz} = g \cdot P$$

Θεωρώντας τώρα ότι η ισχύς του οπτικού σήματος στην είσοδο είναι P_{in} έχουμε:

$$P_z = P_{in} \cdot e^{g(\omega) \cdot z}$$

και επομένως στην έξοδο του ενισχυτή μήκους L παίρνουμε:

$$P_{out} = P_{in} \cdot e^{g(\omega) \cdot L}$$

Εξ' ορισμού:

$$P_{out} = P_{in} \cdot G$$

και επομένως **το κέρδος ενισχυτή** ορίζεται ως:

$$G(\omega) = e^{g(\omega) \cdot L}$$



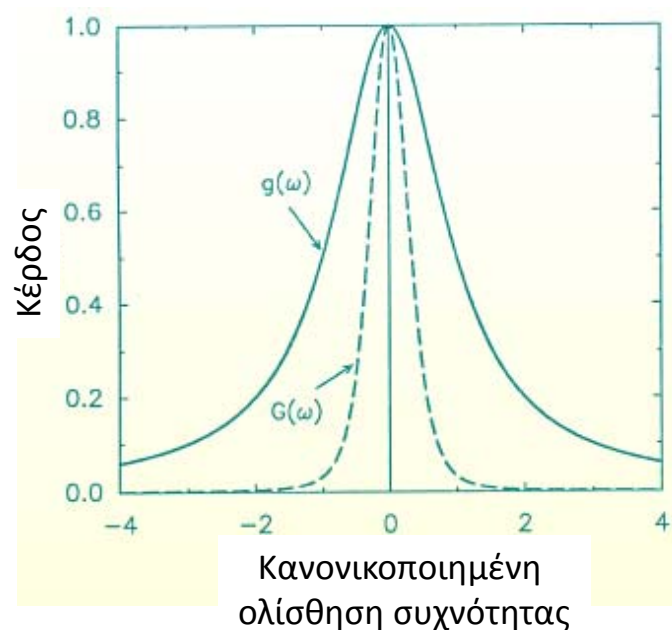
ΕΥΡΟΣ ΖΩΝΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Σε αντιστοιχία με το εύρος ζώνης του κέρδους υλικού, μπορούμε να ορίσουμε το εύρος ζώνης κέρδους του ενισχυτή ως το πλήρες εύρος μέσα στο οποίο η τιμή του $G(\omega)$ έχει πέσει στο μισό της μέγιστης τιμής G_0 :

$$\Delta f_A = \Delta f_g \cdot \left[\frac{\ln 2}{\ln \left(\frac{G_0}{2} \right)} \right]^{1/2}$$

Όπως φαίνεται, το κέρδος του ενισχυτή μεγιστοποιείται για την ίδια συχνότητα συντονισμού, όπως το κέρδος υλικού.

Το εύρος του κέρδους ενισχυτή είναι αρκετά πιο στενό, λόγω της εκθετικής σχέσης μεταξύ των δύο κερδών.





ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Παρατηρώντας τη βασική σχέση του κέρδους υλικού, διαπιστώνουμε ότι το κέρδος μειώνεται όταν η οπτική ισχύς γίνεται συγκρίσιμη με την ισχύ κορεσμού:

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

Ο φυσικός μηχανισμός του κορεσμού συνδέεται με την εξάντληση των διεγερμένων φορέων που θα μπορούσαν να ενισχύσουν μεγάλο πλήθος προσπίπτοντων φωτονίων και θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Μελετώντας τη σχέση για $\omega = \omega_0$ και ξεκινώντας από τη διαφορική σχέση ορισμού του κέρδους υλικού μπορούμε να καταλήξουμε στη σχέση:

$$G = G_0 \cdot \exp\left(-\frac{G}{G-1} \frac{P_{out}}{P_s}\right)$$

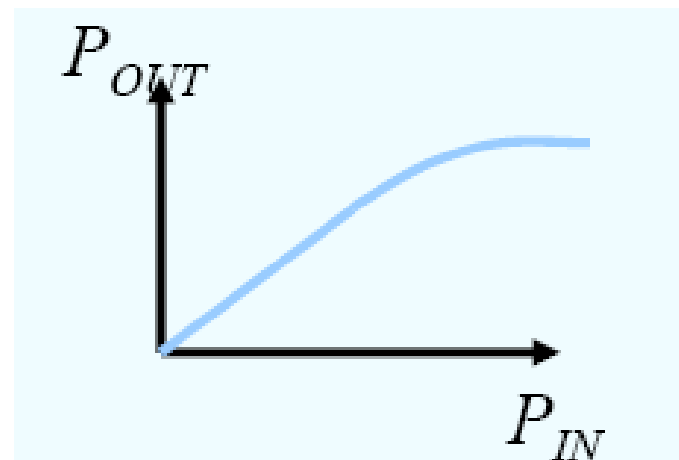
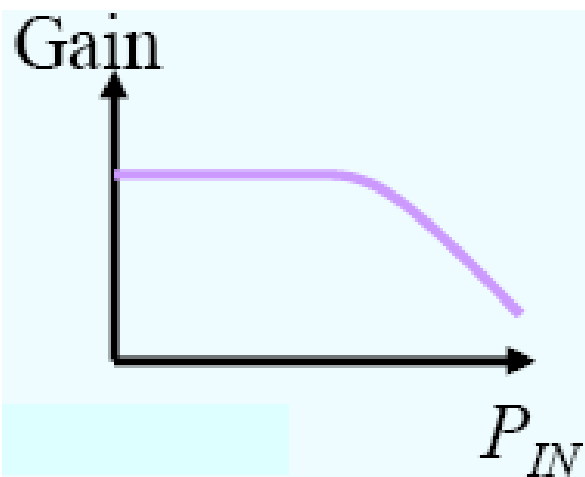


ΚΟΡΕΣΜΟΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Η ισχύς εξόδου κορεσμού P_{out}^s αντιστοιχεί στην ισχύ εξόδου για κέρδος G το οποίο είναι το μισό (μικρότερο κατά 3 dB) από το μέγιστο κέρδος G_0 :

$$P_{out}^s = \frac{G_0 \cdot \ln 2}{G_0 - \ln 2} P_s \approx 0.7 \cdot P_s$$

Στα δύο διαγράμματα φαίνεται η μείωση του κέρδους για υψηλή ισχύ εισόδου και η μη γραμμικότητα της σχέσης $P_{in}-P_{out}$ πάνω από ένα επίπεδο ισχύος.

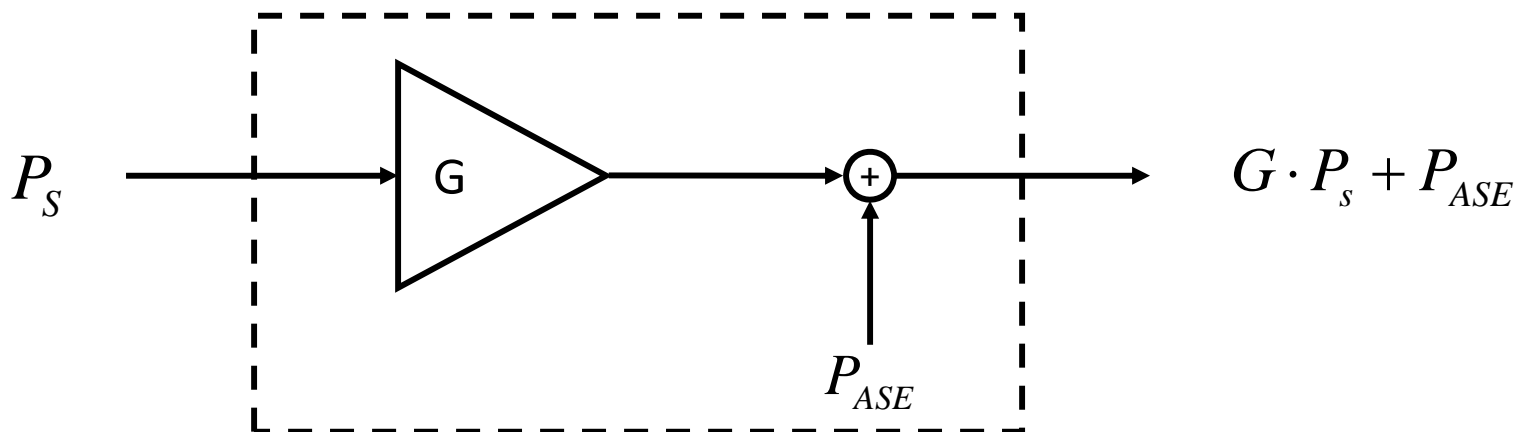




ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Όλοι οι οπτικοί ενισχυτές εισάγουν θόρυβο, ο οποίος οφείλεται στην αυθόρμητη εκπομπή.

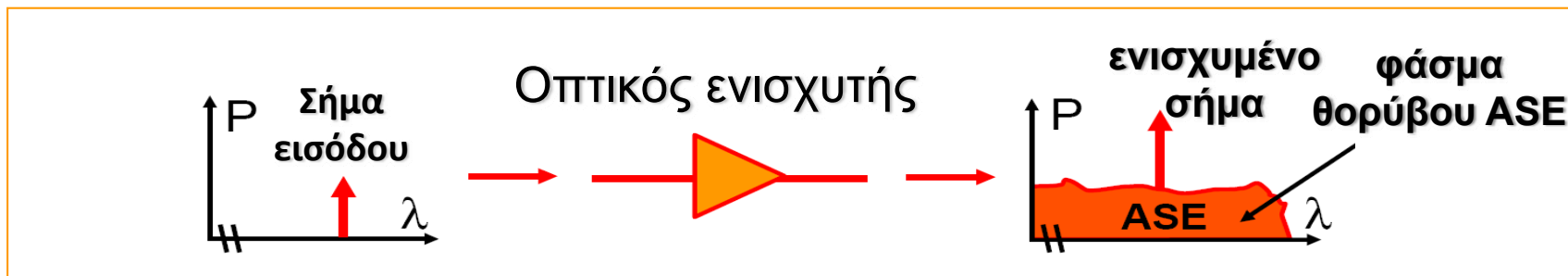
Οι φορείς αποδιεγείρονται από την υψηλή ενεργειακή στάθμη και παράγουν φωτόνια με τυχαία φάση, πόλωση, κατεύθυνση και συχνότητα (μέσα στο φασματικό εύρος του κέρδους).



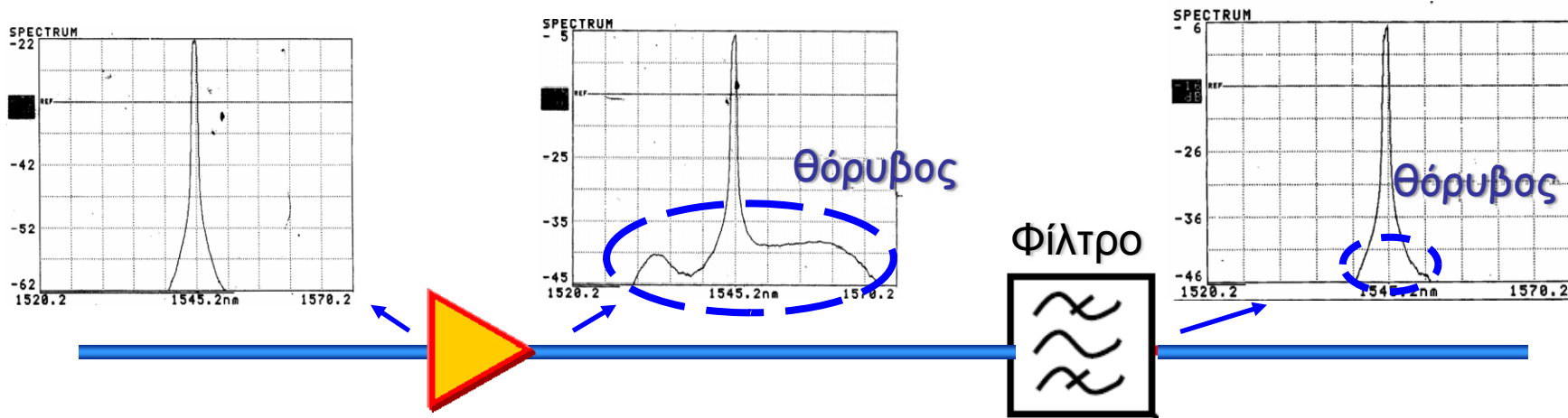


ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Την παρουσία του θορύβου μπορούμε να την αντιληφθούμε μέσω εξέτασης του φάσματος



Με χρήση ζωνοπερατού φίλτρου απορρίπτουμε το θόρυβο εκτός ζώνης (out-band noise). Ο in-band θόρυβος όμως παραμένει...





ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Μέρος του in-band θορύβου αντιστοιχεί σε ένα οπτικό πεδίο το οποίο κυματοδηγείται, συνδιαδίδεται και προστίθεται πεδιακά στο οπτικό πεδίο του σήματος.

Η άθροιση των πεδίων δίνει:

$$E_{Total} = E_S \cdot e^{-j\varphi_s} + E_N \cdot e^{-j\varphi_N}$$

και επομένως η συνολική (στιγμιαία) ισχύς είναι:

$$\begin{aligned} P_{Total} &= |E_{Total}|^2 = |E_S \cdot e^{-j\varphi_s} + E_N \cdot e^{-j\varphi_N}|^2 = E_S^2 + E_N^2 + 2 \cdot E_S \cdot E_N \cdot e^{-j(\varphi_s + \varphi_N)} \\ &= P_s + P_N + 2 \cdot E_s \cdot E_N \cdot e^{-j(\varphi_s + \varphi_N)} \end{aligned}$$

Σε σήματα διαμόρφωσης πλάτους διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

Χρονοθυρίδες λογικών '1'

Χρονοθυρίδες λογικών '0'



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Χρονοθυρίδες λογικών '1'

Αν θεωρήσουμε ότι η στιγμιαία ισχύς του θορύβου είναι περίπου 100 φορές μικρότερη από τη στιγμιαία ισχύ του σήματος (20 dB) τότε η συνεισφορά του P_N μπορεί πρακτικά να αγνοηθεί.

$$P_{Total} = P_s + 2 \cdot E_s \cdot E_N \cdot e^{-j(\varphi_s + \varphi_N)} = P_s + \Delta P$$

Ο διαγώνιος όρος όμως στον οποίο πολλαπλασιάζονται τα πλάτη των δύο πεδίων παραμένει ιδιαίτερα σημαντικός.

Για τη σχέση ισχύων που θεωρήσαμε ισχύει: $E_N = \frac{1}{10} \cdot E_s$

Ανάλογα με τη σχέση των φάσεων των δύο πεδίων (η οποία είναι τυχαία) η παράμετρος ΔP κυμαίνεται στο διάστημα:

$$-0.2 \cdot P_s \leq \Delta P \leq 0.2 \cdot P_s$$

και επομένως: $0.8 \cdot P_s \leq P_{Total} \leq 1.2 \cdot P_s$

Η διακύμανση ισχύος είναι ιδιαίτερα αισθητή στο διάγραμμα ματιού



Χρονοθυρίδες λογικών '0'

Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$E_S \rightarrow 0 \quad \text{και} \quad P_S \rightarrow 0$$

Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι:

$$P_{Total} \approx P_N$$

Η στάθμη του '0' πράγματι θα ανέβει, αλλά λίγο αν αναλογιστούμε ότι

$$P_S = 100 \cdot P_N \quad \text{και} \quad \text{επομένως ο λόγος σβέσης θα είναι 20 dB.}$$

Συμπέρασμα

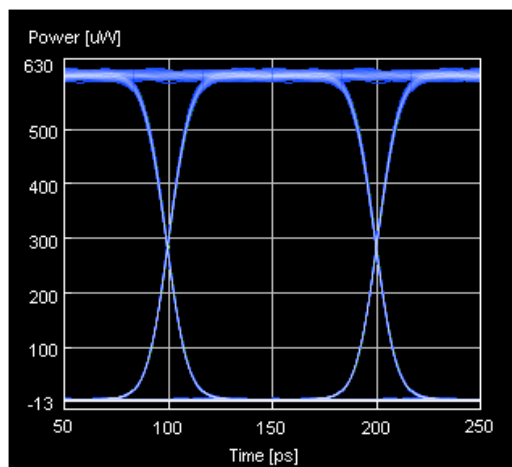
Ο οπτικός θόρυβος επηρεάζει πολύ περισσότερο το σήμα στη στάθμη του '1' εισάγωντας μία έντονη διαμόρφωση ισχύος κορυφής.

Η αλληλεπίδραση του σήματος και του θορύβου με τον τρόπο που περιγράφηκε προκαλεί και timing-jitter (φαινόμενο Gordon-Haus)

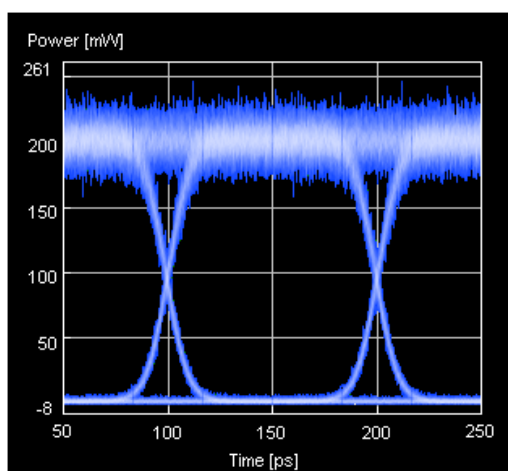


ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

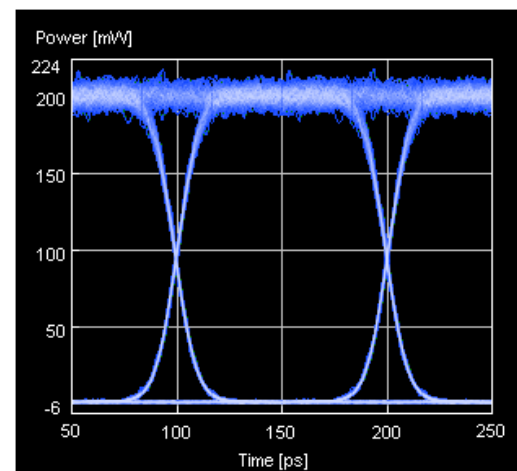
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται το σήμα εισόδου σε ενισχυτή, η έξοδος του ενισχυτή (out-band και in-band θόρυβος) καθώς και η έξοδος του ζωνοπερατού φίλτρου μετά τον ενισχυτή (μόνο in-band θόρυβος).



Σήμα εισόδου



Έξοδος ενισχυτή



Έξοδος φίλτρου



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Η παραγωγή θορύβου από τους οπτικούς ενισχυτές και η συνεπακόλουθη υποβάθμιση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) ποσοτικοποιείται μέσω της εικόνας θορύβου (NF-noise figure):

$$F_n = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}}$$

Η παράμετρος SNR αναφέρεται στις ηλεκτρικές ισχείς που προκύπτουν όταν τα οπτικά σήματα ανιχνευθούν, και επομένως απαιτεί κάποιες παραδοχές για τις φωτοδιόδους.



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Μία απλή έκφραση της F_n προκύπτει αν θεωρηθεί ότι τα σήματα πέφτουν σε ιδανική φωτοδίοδο, όπου κυριαρχεί ο θόρυβος βολής (shot-noise).

Θεωρώντας ότι το σήμα εισόδου έχει ισχύ P_{in} έχουμε:

$$SNR_{in} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma_s^2} = \frac{(R \cdot P_{in})^2}{2 \cdot q \cdot (R \cdot P_{in}) \cdot \Delta f} = \frac{P_{in}}{2 \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta f}$$

όπου $\langle I \rangle = R \cdot P_{in}$ η μέση τιμή του ρεύματος της φωτοδίοδου

$R = \frac{q}{h \cdot \nu}$ η αποκρισιμότητα της φωτοδίοδου για μοναδιαία κβαντική απόδοση

και Δf το ηλεκτρικό εύρος ζώνης του δέκτη.



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Θεωρούμε τώρα ότι το κέρδος που παίρνει το σήμα εξόδου είναι G :

$$P_{out} = P_{in} \cdot G$$

ή αν δουλέψουμε με το ηλεκτρικό πεδίο:

$$E_{out} = \sqrt{G} \cdot E_{in}$$

Στο ενισχυμένο πεδίο του σήματος προστίθεται και το ηλεκτρικό πεδίο του θορύβου αυθόρμητης εκπομπής, έτσι ώστε στην έξοδο έχουμε:

$$E_{Total} = \sqrt{G} \cdot E_{in} + E_{sp}$$

Επομένως το ρεύμα που παράγεται στη φωτοδιόδο δίνεται ως εξής:

$$I = R \cdot \left| \sqrt{G} \cdot E_{in} + E_{sp} \right|^2$$

Αγνοώντας τον τετραγωνικό όρο του πεδίου θορύβου, θεωρούμε ότι η διαταραχή στο ρεύμα της φωτοδιόδου οφείλεται στο beating μεταξύ του πεδίου και του θορύβου.



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Λαμβάνοντας επιπλέον υπόψιν ότι η διαφορά φάσης του σήματος και του θορύβου είναι τυχαία, η θορυβική διαταραχή του ρεύματος γίνεται:

$$\Delta I = 2R \cdot \sqrt{G \cdot P_{in}} \cdot |E_{sp}| \cdot \cos \theta$$

Ολοκληρώνοντας ως προς τη ολόκληρη τη στερεά γωνία προκύπτει τελικά για την διασπορά του ρεύματος της φωτοδιόδου:

$$\sigma^2 = 4(R \cdot G \cdot P_{in}) \cdot (R \cdot S_{sp}) \cdot \Delta f$$

όπου S_{sp} η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου στο εύρος Δf .

Η τελευταία μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν σταθερή (λευκός θόρυβος) και ίση με:

$$S_{sp}(\nu) = (G - 1) \cdot n_{sp} \cdot h \cdot \nu$$

όπου n_{sp} ο παράγοντας αναστροφής πληθυσμού:

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



ΘΟΡΥΒΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗ

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση, ο σηματοθορυβικός λόγος στην έξοδο γίνεται:

$$SNR_{out} = \frac{\langle I \rangle^2}{\sigma^2} = \frac{(R \cdot G \cdot P_{in})^2}{\sigma^2} \approx \frac{G \cdot P_{in}}{4 \cdot S_{sp} \cdot \Delta f}$$

Επομένως η εικόνα θορύβου του ενισχυτή θα δίνεται από την έκφραση:

$$F_n = 2 \cdot n_{sp} \cdot \frac{G-1}{G} \approx 2 \cdot n_{sp}$$

Η παραπάνω έκφραση δείχνει ότι ακόμα και στο όριο της μοναδιαίας τιμής της αναστροφής πληθυσμών ($N_2 \approx N_1$), η εικόνα θορύβου ισούται με 2.

Αυτό σημαίνει ότι το SNR του σήματος μετά από ενίσχυση έχει μειωθεί τουλάχιστον κατά 3 dB. Πρακτικές τιμές της εικόνας θορύβου για EDFA είναι πάνω από 4 dB, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για SOA μπορεί να προσεγγίζουν και τα 10 dB.



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Πλεονεκτήματα

Υψηλό κέρδος

Χαμηλός θόρυβος

Αναισθησία στην πόλωση

Εύκολη σύζευξη με οπτικές ίνες

Μεγάλο εύρος ζώνης

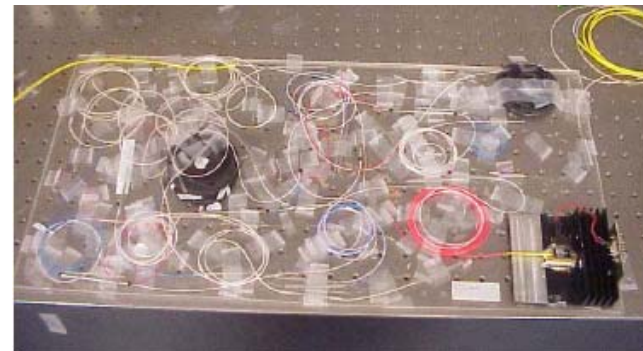
Μικρή παρεμβολή μεταξύ WDM καναλιών

Ανεξαρτησία από την αλληλουχία των bits

Μειονεκτήματα

Λειτουργία αποκλειστικά στα 1.55 μm

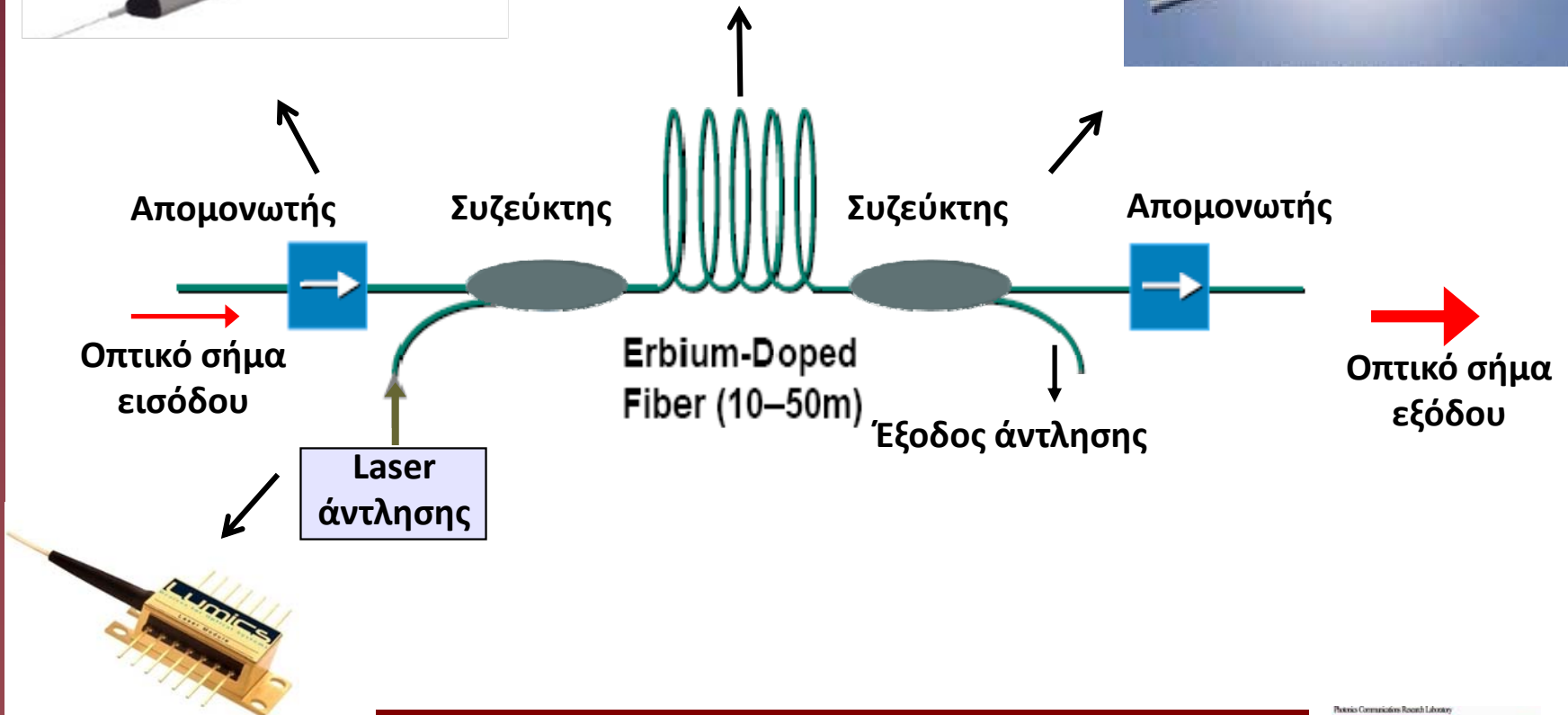
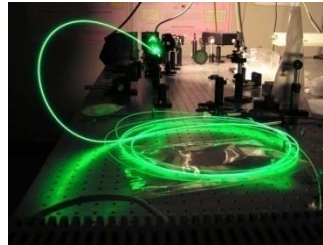
Εξάρτηση κέρδους από τη συχνότητα





ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

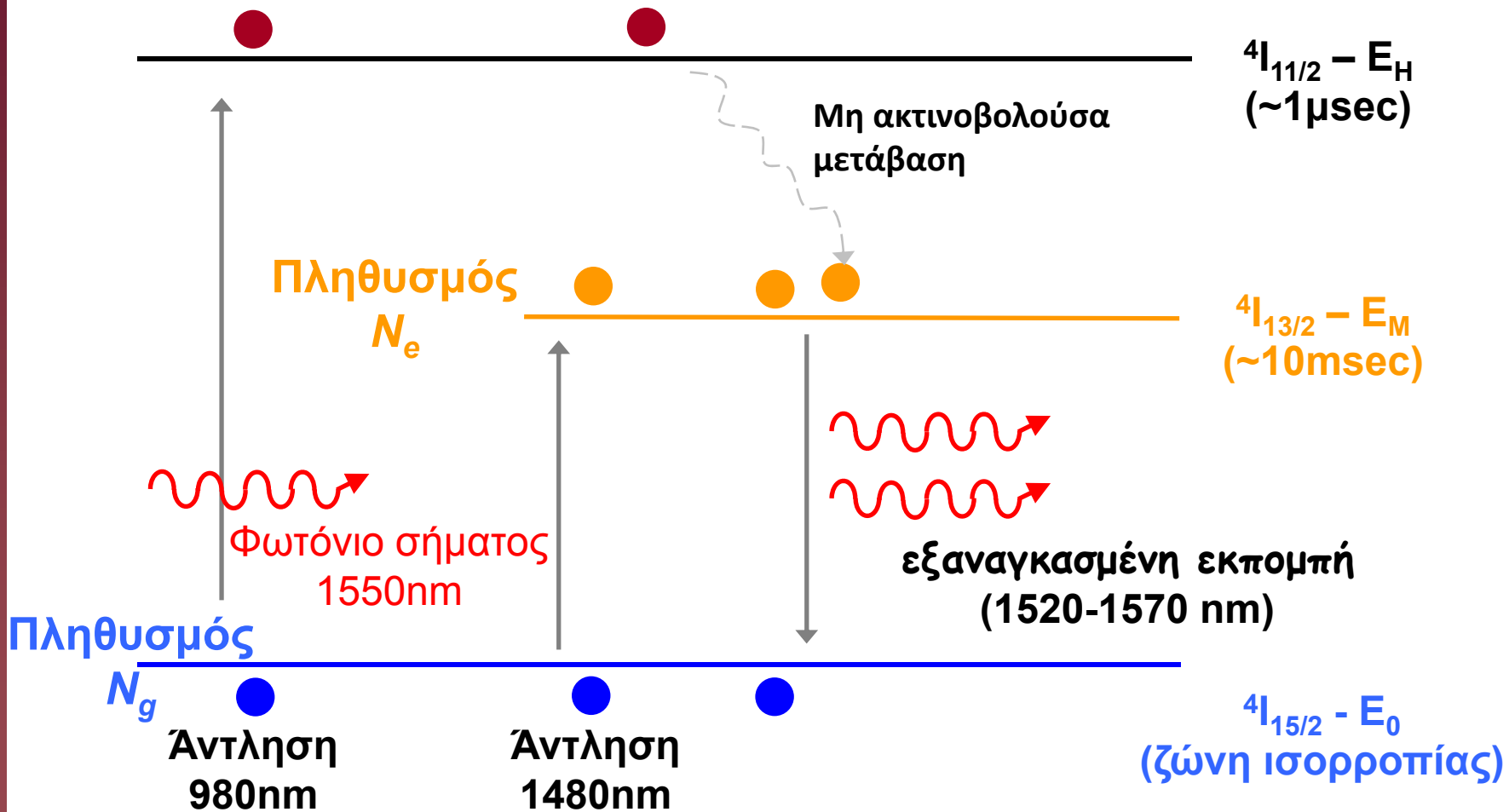
Διάταξη EDFA





ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Κβαντική μοντελοποίηση ίνας ερβίου (Σύστημα 3 επιπέδων)



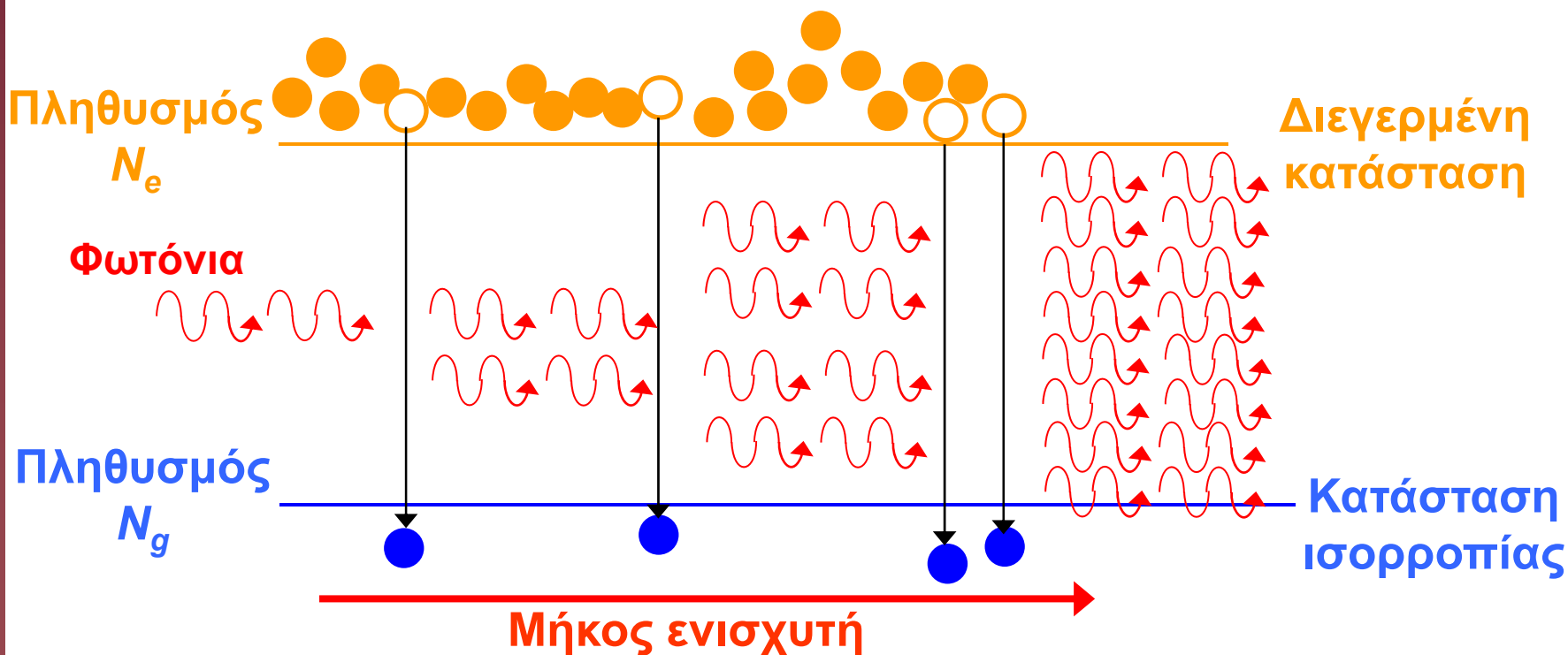


ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Διαδικασία της ενίσχυσης

Φωτόνιο σήματος εισέρχεται στην ίνα και προκαλεί εξαναγκασμένη εκπομπή.

Τα δύο πλέον φωτόνια διαδίδονται περαιτέρω και η διαδικασία επαναλαμβάνεται.



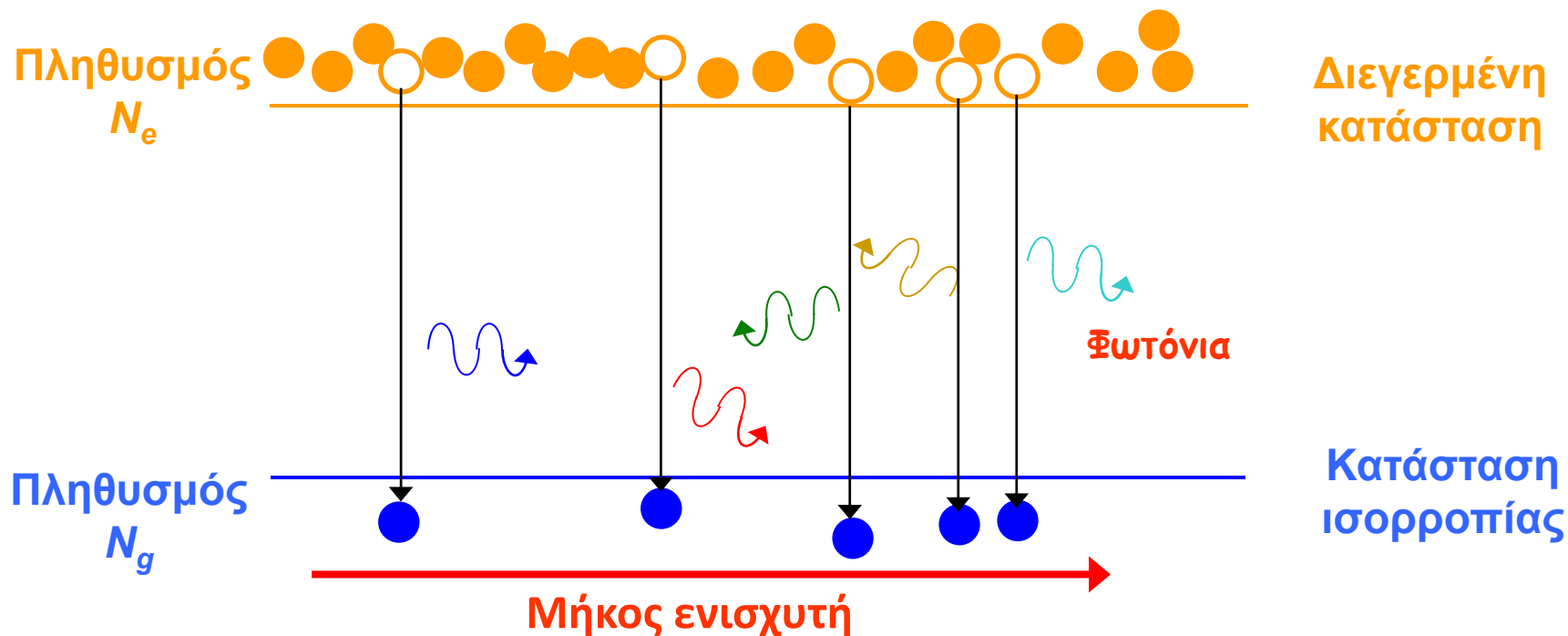


ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Διαδικασία παραγωγής θορύβου

Κάποιοι από τους διεγερμένους φορείς αποδιεγείρονται αυθόρμητα.

Τα εκπεμπόμενα φωτόνια ενισχύονται στο ακόλουθο μήκος της ίνας μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής (**ASE-amplified spontaneous emission**)



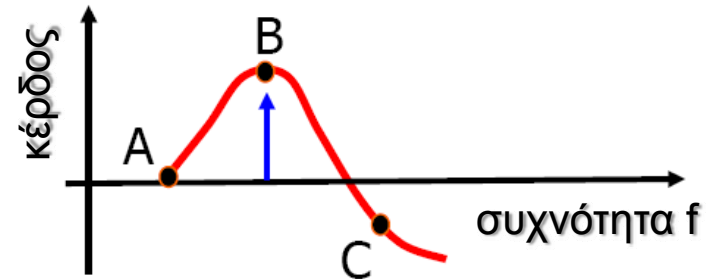
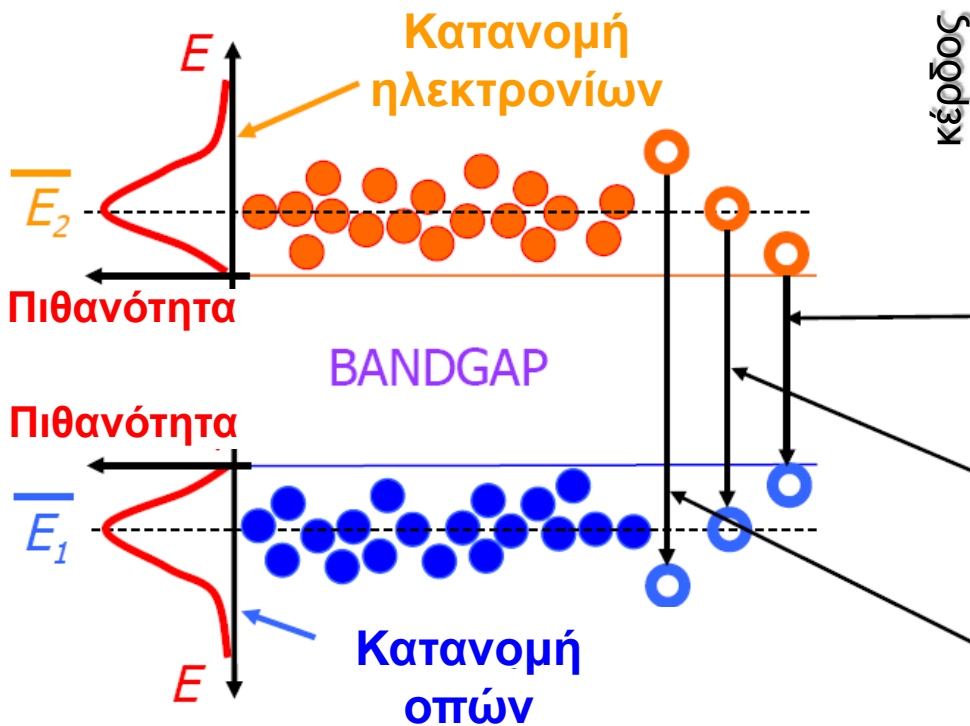


ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Φασματικό εύρος EDFA

Οι φορείς στις δύο ενεργειακές στάθμες έχουν συγκεκριμένες κατανομές. Το μέγιστο κέρδος του EDFA αντιστοιχεί στη μετάβαση μεταξύ των μέσων τιμών

$$\bar{E}_2 - \bar{E}_1$$



Μετάβαση **χαμηλότερης** ενεργειακής μεταβολής (A)

Πιθανότερη ενεργειακή μετάβαση (B)

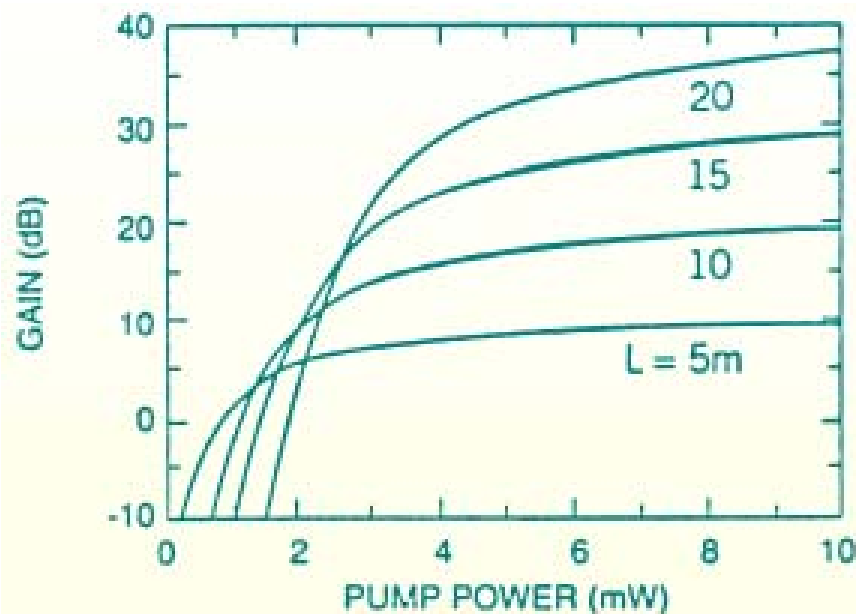
Μετάβαση **υψηλότερης** ενεργειακής μεταβολής (C)



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Η σχεδίαση του EDFA περιλαμβάνει την προσεκτική επιλογή της ισχύος άντλησης P_{pump} και του μήκους της ίνας L .

Για δεδομένο L το κέρδος κορένεται για τιμές άντλησης που ξεπερνούν ένα κατώφλι. Το κατώφλι αυτό γίνεται χαμηλότερο για μικρότερα L , καθώς ο συνολικά διαθέσιμος φορέων είναι μικρότερος.



Άντληση στα 1480 nm

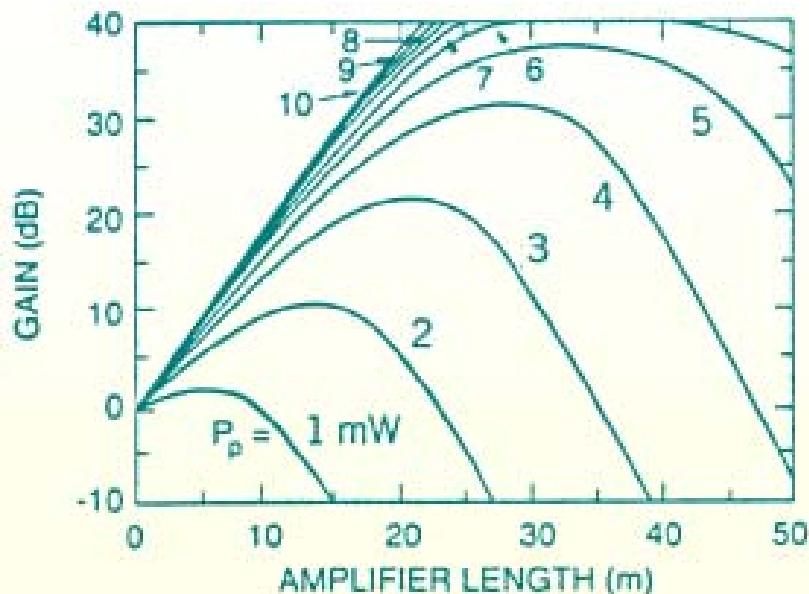


ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Για δεδομένο τώρα επίπεδο άντλησης, το κέρδος πέφτει απότομα μετά από ένα συγκεκριμένο μήκος ίνας.

Το κύμα άντλησης απορροφάται μέσα στην ίνα σταδιακά. Το επίπεδο αναστροφής πληθυσμού είναι ψηλό στην αρχή της ίνας και μειώνεται σταδιακά κατά μήκος της.

Από ένα σημείο και μετά, οι φορείς δεν είναι διεγερμένοι και άρα το οπτικό σήμα απορροφάται αντί να ενισχύεται.



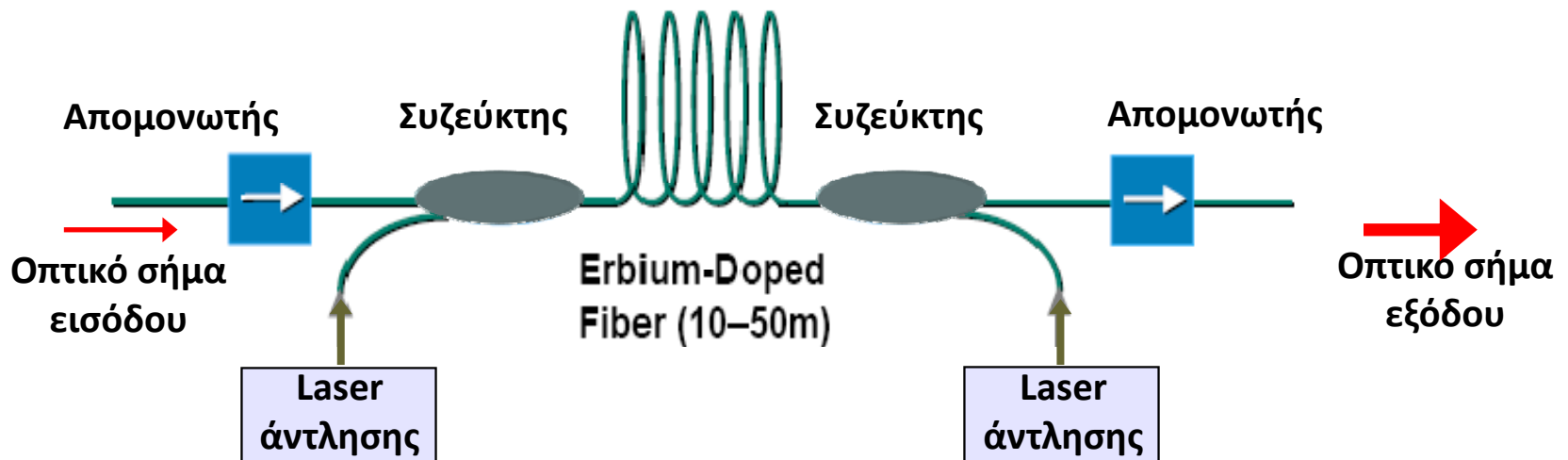
Άντληση στα 1480 nm



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Για τη λύση αυτού του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχήμα διπλής άντλησης, με χρήση δύο κυμάτων που διαδίδονται αντίθετα μέσα στην ίνα.

Με αυτόν τον τρόπο η αναστροφή πληθυσμών είναι πιο ομοιόμορφη κατά μήκος της ίνας.

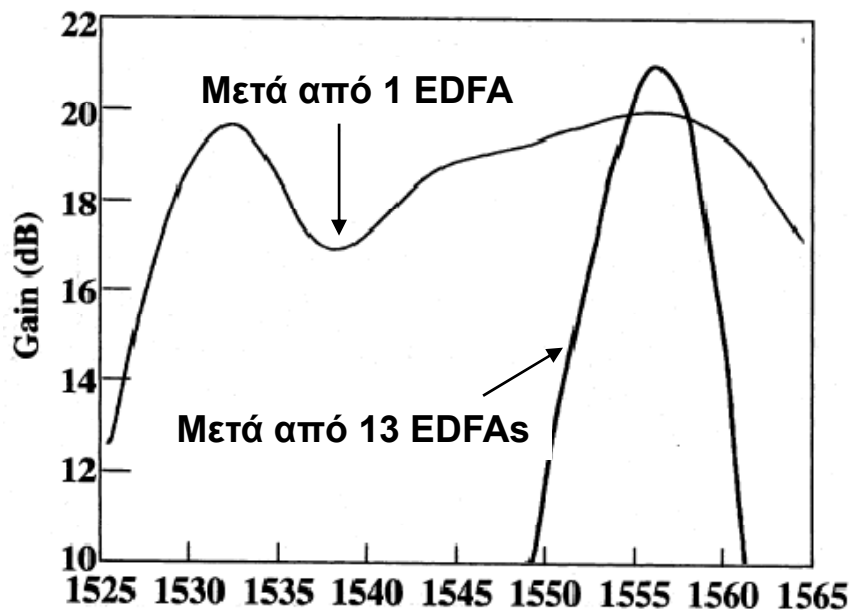




ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Εξομάλυνση κέρδους σε πολυκαναλική ενίσχυση

Η εξάρτηση του κέρδους του EDFA από το μήκος κύματος του σήματος δημιουργεί προβλήματα σε συστήματα WDM, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται αλυσίδες από EDFA

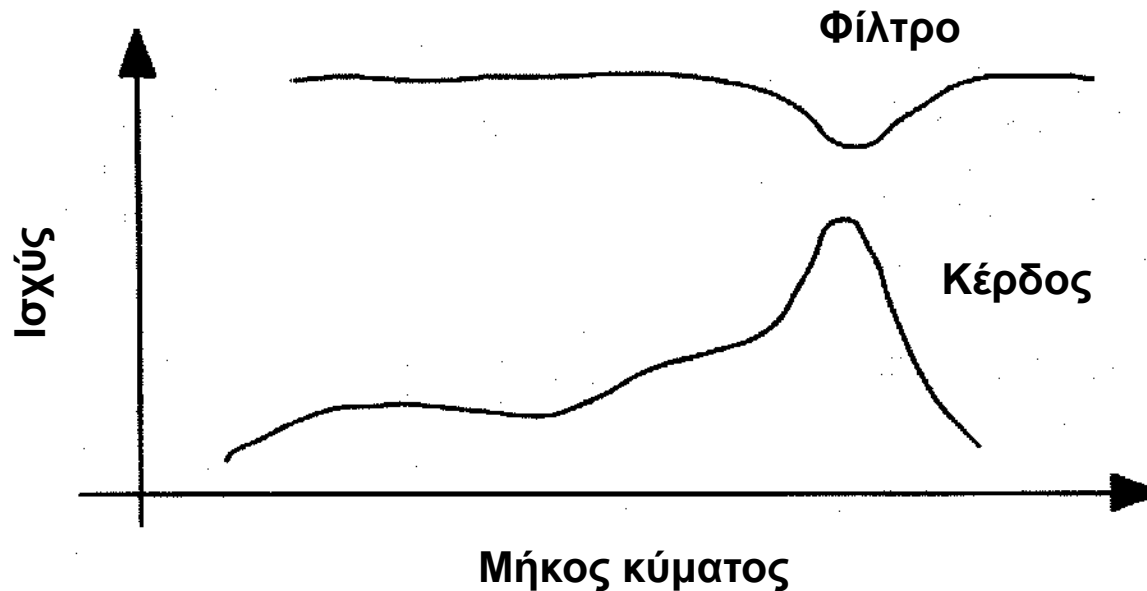


Για αυτόν το λόγο χρησιμοποιούνται ενεργητικοί και παθητικοί μηχανισμοί εξομάλυνσης του κέρδους (gain flattening)



ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΙΝΑΣ ΕΡΒΙΟΥ (EDFA)

Παράδειγμα παθητικής εξομάλυνσης κέρδους



Η ιδέα βασίζεται στην επιβολή απωλειών ανάλογων με το κέρδος που παίρνει κάθε κανάλι. Όποιο κανάλι ενισχύεται περισσότερο εξασθενείται και περισσότερο, και έτσι η φασματική εξάρτηση του κέρδους αναιρείται.

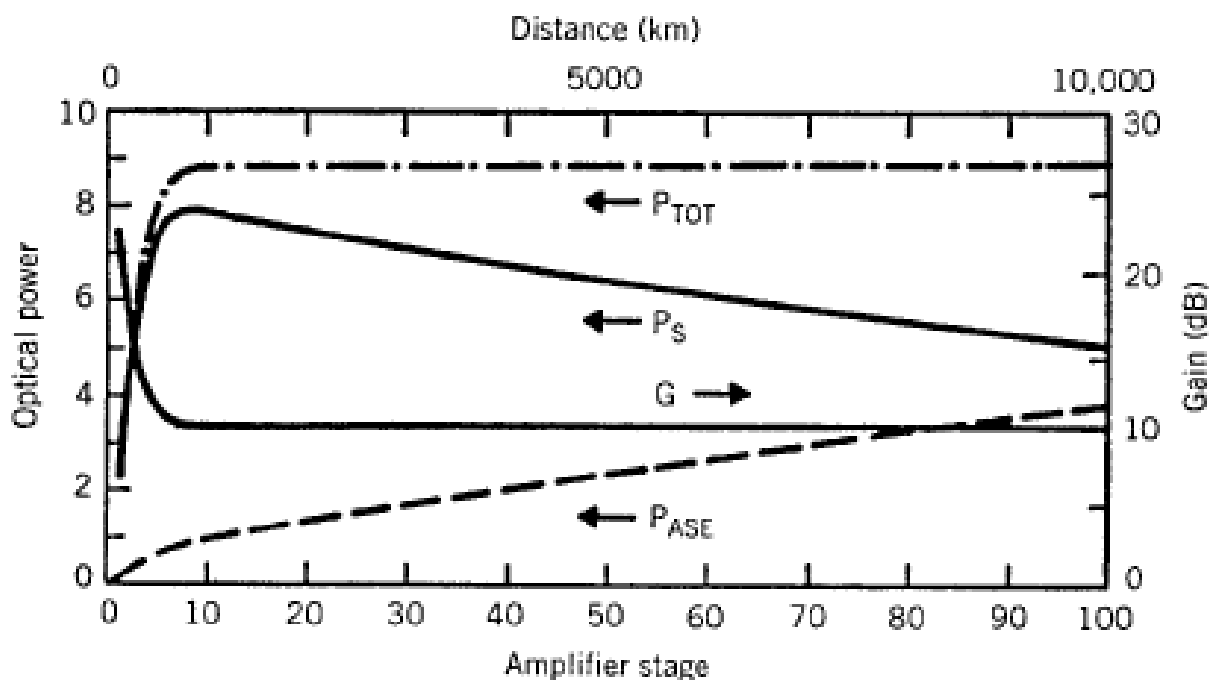


ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ LONG-HAUL ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Σε συστήματα long-haul χρησιμοποιούνται αλυσίδες ενισχυτών. Ο θόρυβος συσσωρεύεται δημιουργώντας δύο κύρια προβλήματα:

Το OSNR 'πέφτει' σταδιακά

Οι επόμενοι ενισχυτές κορένονται από τον ASE των προηγούμενων και έτσι το κέρδος σταδιακά μειώνεται.





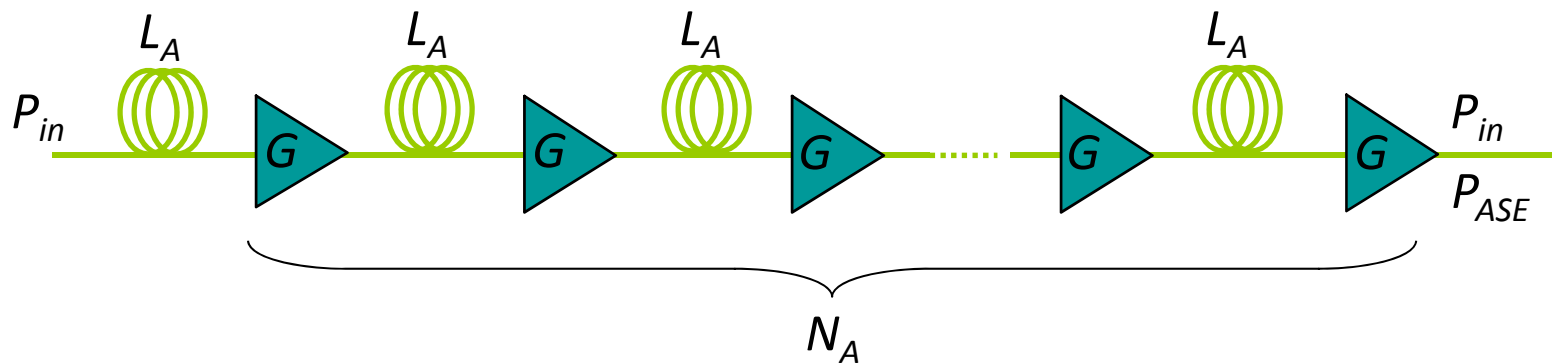
ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ LONG-HAUL ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Για την ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος θεωρούμε ότι έχουμε N_A αριθμό ενισχυτών, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε απόσταση L_A μεταξύ τους.

Θεωρούμε επιπλέον ότι το κέρδος του κάθε ενισχυτή G είναι:

$$G = \exp(a \cdot L_A)$$

έτσι ώστε να αναιρούνται ακριβώς οι απώλειες της διάδοσης.





ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ LONG-HAUL ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Στο τέλος της αλυσίδας η ισχύς του σήματος θα είναι ίση με αυτή που εισήχθη στην αλυσίδα (P_{in}). Η ισχύς του θορύβου θα είναι P_{ASE} :

$$P_{ASE} = N_A \cdot S_{ASE} \cdot \Delta\nu_{opt}$$

όπου S_{ASE} η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου και $\Delta\nu_{opt}$ το εύρος ζώνης στο οποίο θα γίνει η ολοκλήρωση.

Το εύρος ζώνης καθορίζεται από τα ζωνοπερατά φίλτρα του συστήματος, τα οποία αφήνουν να περάσει μόνο ο in-band θόρυβος.

$$P_{ASE} = 2 \cdot n_{sp} \cdot h \cdot \nu \cdot N_A \cdot (G-1) \Delta\nu_{opt}$$

Το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί από το οπτικό SNR (OSNR):

$$OSNR = \frac{P_{IN}}{P_{ASE}} = \frac{P_{IN}}{2 \cdot n_{sp} \cdot h \cdot \nu \cdot N_A \cdot (G-1) \Delta\nu_{opt}}$$



Μοντελοποιούμε το σύστημα θεωρώντας ότι το σήμα στην έξοδο της αλυσίδας των ενισχυτών προσπίπτει σε φωτοδίοδο.

Παρόμοια με την ανάλυση που κάναμε για να βρούμε την εικόνα θορύβου του ενισχυτή, θεωρούμε ότι η κυριότερη διαταραχή προέρχεται από το beating του σήματος και του θορύβου πάνω στη φωτοδίοδο.

$$\sigma^2 = 4 \left(R \cdot P_{signal} \right) \cdot \left(R \cdot S_{Noise} \right) \cdot \Delta f$$

Επειδή όμως το σήμα θα κάνει beating μόνο με το μέρος του θορύβου που έχει την ίδια πόλωση, πρέπει η μισή ισχύς του θορύβου να αγνοηθεί. Έτσι λοιπόν:

$$P_{Signal} = P_{IN} \quad \text{και} \quad S_{Noise} = \frac{S_{ASE}}{2} = n_{sp} \cdot h \cdot \nu \cdot N_A \cdot (G - 1)$$

Επομένως:

$$SNR = \frac{\left(R \cdot P_{IN} \right)^2}{4 \cdot \left(R \cdot P_{IN} \right) \cdot \left(R \cdot \frac{S_{ASE}}{2} \right) \cdot \Delta f} = \frac{\Delta \nu_{opt}}{2 \cdot \Delta f} \cdot OSNR$$



ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ LONG-HAUL ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Οι σχέσεις που δίνουν το OSNR και το SNR δείχνουν ότι οι δύο ποσότητες μπορούν να γίνουν πολύ μικρές για μεγάλες τιμές του αριθμού των ενισχυτών και του κέρδους G .

Όμως για δεδομένο ολικό μήκος του συστήματος L_T έχουμε:

$$L_A = \frac{L_T}{N_A}$$

Επομένως:

$$G = \exp\left(a \cdot \frac{L_T}{N_A}\right) \quad \text{ή} \quad N_A = \frac{a \cdot L_T}{\ln G}$$

Το OSNR και το SNR μεταβάλλονται ανάλογα με την ποσότητα:

$$\frac{\ln G}{(G-1)}$$

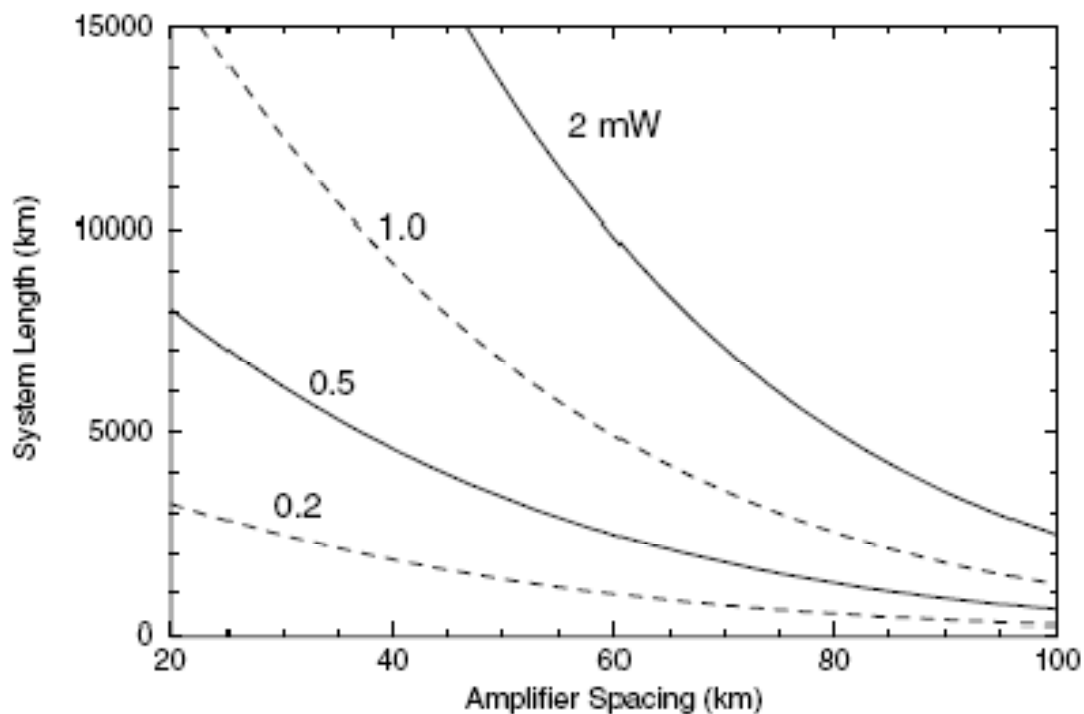
Επομένως διατηρείται υψηλή ποιότητα όταν το G είναι μικρό.



ΘΟΡΥΒΟΣ ΣΕ LONG-HAUL ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Το διάγραμμα δείχνει για διάφορες τιμές P_{IN} ενός σήματος 10 Gbit/s το συνολικό μήκος του συστήματος που αντιστοιχεί σε $SNR = 20$ dB ως συνάρτηση της απόστασης μεταξύ των ενισχυτών.

Για πρακτικούς και οικονομικούς λόγους η απόσταση μεταξύ των ενισχυτών διατηρείται περίπου στα 80-100 km





Φαινόμενο Gordon - Haus

Σε προηγούμενες διαφάνειες περιγράφηκε πώς ο θόρυβος των ενισχυτών αλληλεπιδρά με το πεδίο του σήματος (beating) μεταβάλλοντας στοχαστικά την ισχύ των παλμών.

Με τον ίδιο τρόπο μεταβάλλει στοχαστικά και τη φάση κατά μήκος των παλμών.

Χρονικές μεταβολές της φάσης ισοδυναμούν με μικρο-μετατοπίσεις της στιγμιαίας συχνότητας των παλμών (διαφορετική για τον καθένα)

Καθώς λόγω διασποράς η ομαδική ταχύτητα είναι διαφορετική για παλμούς διαφορετικών συχνοτήτων, οι παλμοί φθάνουν με διαφορετική καθυστέρηση, και άρα το σήμα εμφανίζει timing - jitter.