

# OTTICA QUARTA PARTE

SISTEMI COERENTI e ad AMPLIFICAZIONE OTTICA

Prof. Elvio Valentinuzzi

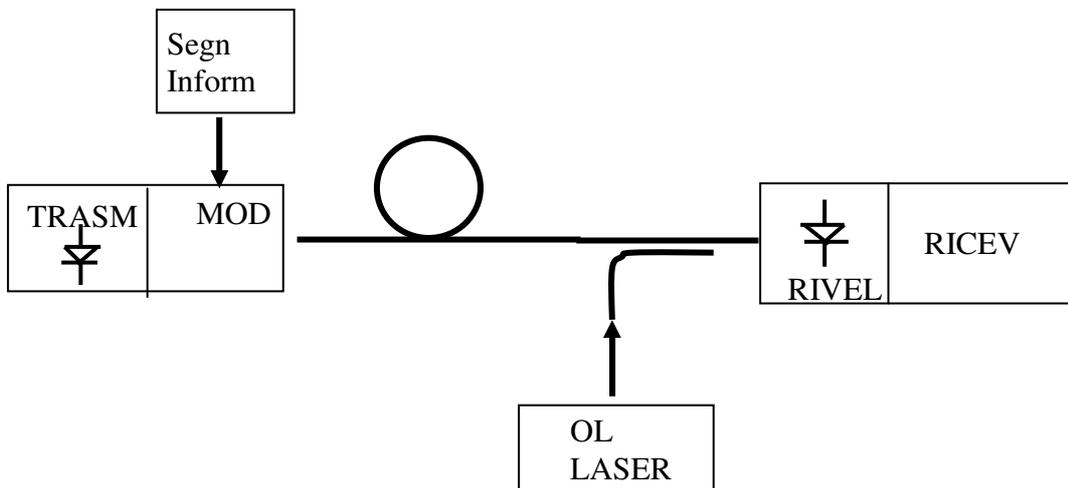
## SISTEMI COERENTI

Diversamente dal caso di applicazioni a radiofrequenza il termine coerente applicato ai sistemi ottici significa:

Battimento del segnale ottico ricevuto e di quello di un oscillatore locale ottico (Laser a semiconduttore) avente la stessa frequenza della portante (sistemi omodina) o frequenza diversa (sistemi eterodina)

Il segnale ottico si ottiene modulando con il segnale di informazione la frequenza emessa da un laser monocromatico (a riga stretta) talvolta direttamente, ma più spesso mediante modulatore esterno.

I formati di modulazioni adottati sono quelli tradizionali visti per i sistemi radio: ASK, PSK, FSK e in più una tipicamente ottica la POLSK o modulazione di polarizzazione della radiazione ottica emessa.



Dopo il battimento fra OL e segnale la corrente del fotodiolo contiene le informazioni di ampiezza fase e frequenza relativa al segnale ricevuto. L'ampiezza è il prodotto dell'ampiezza del segnale ottico ricevuto e di quella dell'OL per cui può permettere di trascurare il rumore termico del ricevitore

Resta il rumore quantico (o shot) che essendo proporzionale all'intensità dell'OL fa raggiungere al rapporto segnale rumore un limite detto limite quantico del ricevitore

Il limite quantico  $F$  si misura in fotoni per bit (fot/bit) necessari ad assicurare una prestabilita probabilità di errore

Il limite quantico non dipende dalla velocità di trasmissione  $R$  (bit/s) mentre dipende da questa la sensibilità  $S$  del ricevitore espressa in dBm

$$S = 10 \log_{10}(hf_0 F R) + 30 \quad \text{con } h \text{ costante di Planck e } f_0 \text{ frequenza portante}$$

Questi sistemi garantiscono

- una maggior sensibilità del ricevitore (minor potenza ottica in ingresso a parità di tasso di errore e quindi tratte più lunghe)
- una maggiore selettività in frequenza( sistemi FDM).

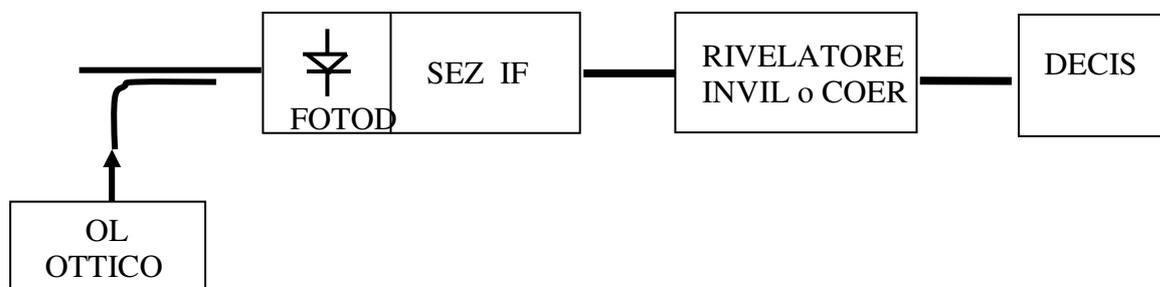
ma richiedono elevate prestazioni tecnologiche di alcuni componenti fondamentali:  
Laser, modulatori , rivelatori

Gli amplificatori ottici hanno consentito di aumentare il segnale in ingresso ottenendo gli stessi vantaggi che derivavano dall'aumento di sensibilità del ricevitore coerente che è dovuta alla potenza fornita dal segnale di pompa .

## FORMATI di MODULAZIONE E LIMITI QUANTICI

### ASK (Amplitude Shift Keying)

Il laser di trasmissione può essere modulato direttamente ( frequenza di emissione sensibile alla modulazione di ampiezza ) o mediante modulatore esterno



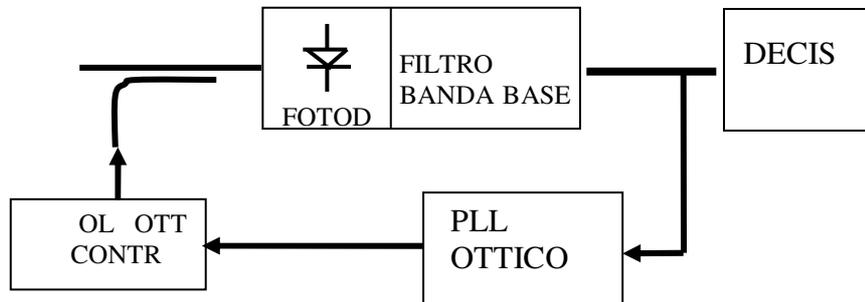
La demodulazione di tipo elettrico può essere ad involucro o coerente

$$Pe = \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{4}\eta F} \quad \text{per} \quad Pe = 10^{-9} \quad F = 80Fot/bit$$

In cui  $\eta$  è l'efficienza quantica del fotodiodo,  $F$  il numero di fotoni per bit

## PSK (Phase Shift Keying) con Rivelazione ottica omodina

La modulazione PSK si ottiene mediante modulatore elettro ottico posto dopo il laser



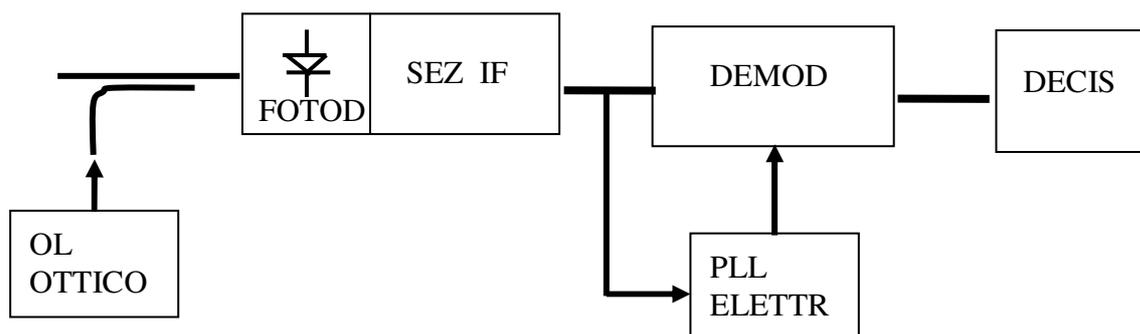
In ricezione un PLL ottico insegue la fase del segnale ricevuto e pilota un oscillatore locale che fornisce la portante, Considerando il solo rumore quantico

$$Pe = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{2\eta F}) \text{ o anche } Pe = \frac{e^{-2\eta F}}{\sqrt{2\pi\eta F}} \text{ dacui } F = 9 \text{ Fot/bit}$$

Questo è il limite quantico più basso che può essere realizzato

## PSK con rivelazione eterodina

Questo ricevitore è l'equivalente di un ricevitore coerente eterodina a radiofrequenza



$$Pe = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\eta F}) \text{ o anche } Pe = \frac{e^{-\eta F}}{\sqrt{\pi\eta F}} \text{ dacui } F = 18 \text{ Fot/bit}$$

Uno dei principali fattori che influenzano le prestazioni dei sistemi coerenti impedendo loro di raggiungere in pratica i limiti quantici è la non idealità degli oscillatori ottici che non emettono portanti monocromatiche ma aventi una larghezza di riga finita

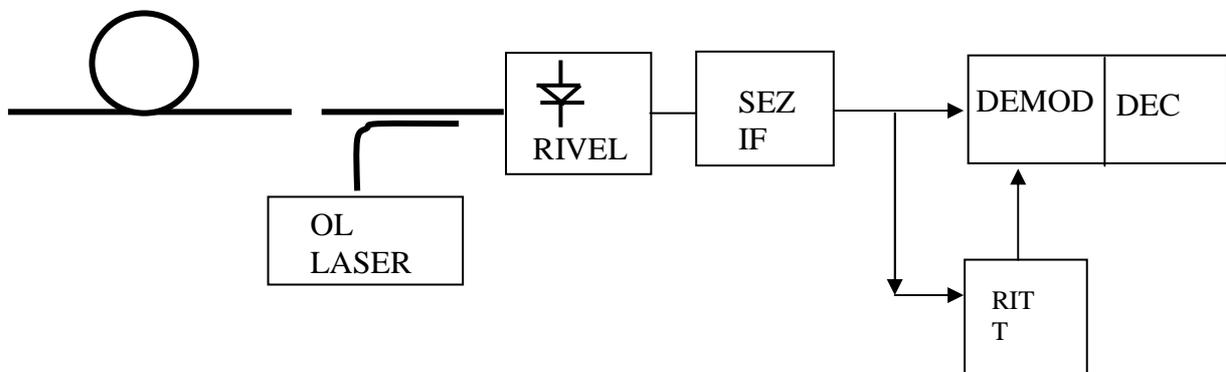
Il campo elettromagnetico emesso presenta fluttuazioni di intensità e di fase

## MODULAZIONE COERENTE DPSK

Semplice ed attualmente utilizzato il sistema DPSK che utilizza una modulazione e una demodulazione differenziale

La fase del simbolo trasmesso è la stessa di quella del simbolo precedente se il simbolo di sorgente ha il valore "1", cambia se ha il valore "0"

Un modulatore esterno in LiNbO3 effettua la modulazione di fase di 180°. Applicando una opportuna tensione a degli elettrodi di controllo il segnale ottico nella guida viene sfasato (effetto Pockel)



La linea di ritardo consente il confronto di un simbolo con il successivo. La differenza di fase di 180 gradi consente di ottenere un livello alto o basso del segnale in uscita e di effettuare quindi la decisione

La probabilità di errore è

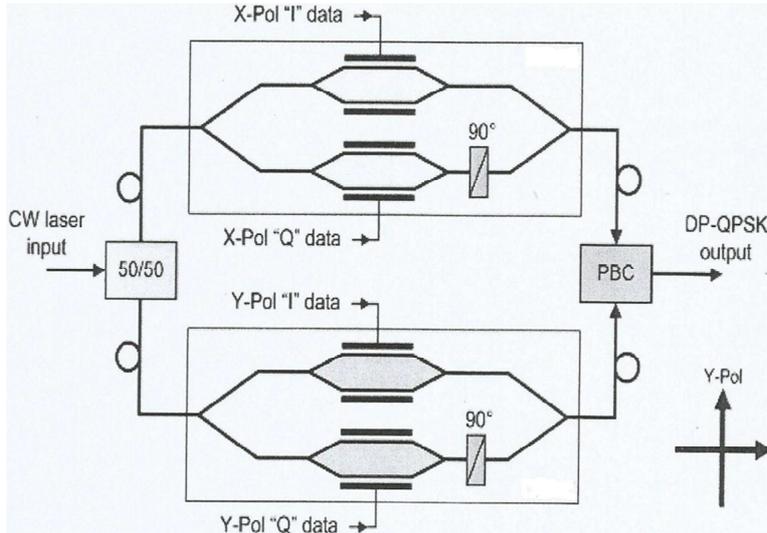
$$Pe = \frac{1}{2} e^{-\eta F}$$

e fornisce un limite quantico  $F = 20$  fot/bit per  $Pe = 10^{-9}$

Si è iniziato l'uso delle tecniche del tipo POLSK o a modulazione di polarizzazione abbinata a modulazioni PSK

## MODULAZIONI DP-BPSK e DP-QPSK

Sono una "combinazione" tra una modulazione di polarizzazione e una normale BPSK o QPSK. Ad esempio si fa una semplice modulazione BPSK (cioè con due singoli stati, 0 o 1) su ognuna delle due componenti con polarizzazione ortogonale. Per modulazioni QPSK in generale



Viene attuata innanzitutto un multiplexing di polarizzazione per poi venire attuata la vera e propria modulazione QPSK. Quindi, innanzitutto tramite un normale beam splitter di polarizzazione (PBS), si va a dividere la portante nelle sue due componenti di polarizzazione ortogonali, attuando quindi il multiplexing di polarizzazione dopodiché, si svolge una normale QPSK su entrambi i rami. Un processore di trasmissione comanda le tensioni di guida sui Mach-Zehnder.

In ricezione un Optical Hybrid 90° mescola il segnale di ingresso con i 4 stati in quadratura di un segnale di riferimento (OL) ottenendo  $S+R$ ,  $S-R$ ,  $S+jR$ ,  $S-jR$ , che vanno a un algoritmo di decisione.

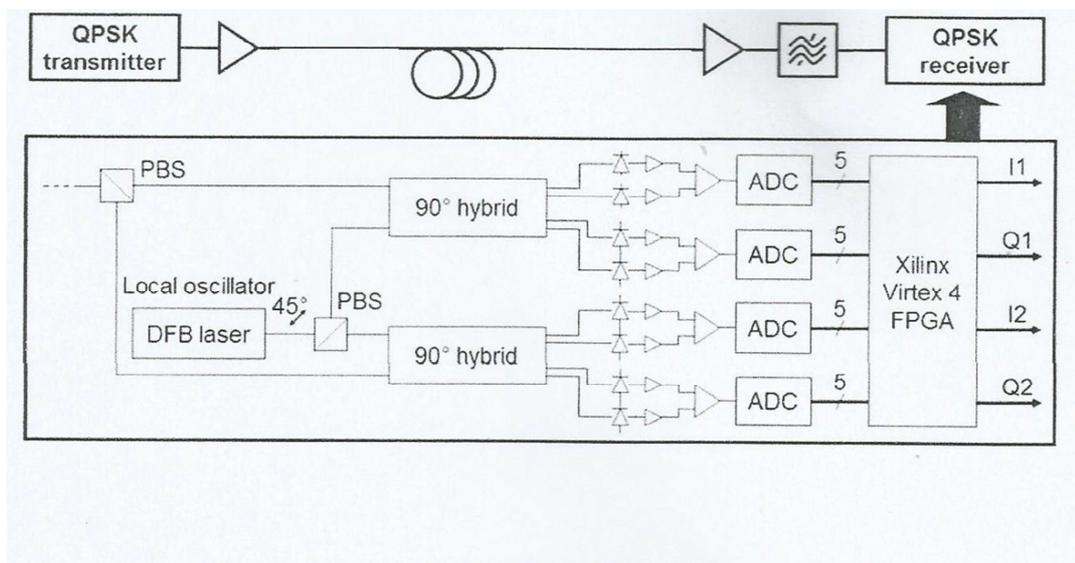
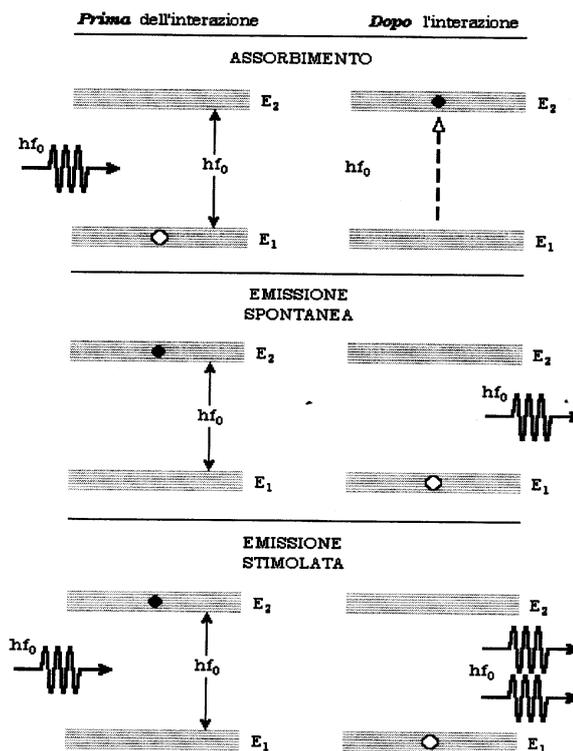


FIGURA 4.10

## Amplificazione nelle fibre drogate con ERBIO

All'interno dell'atomo, un elettrone può assumere solo determinati valori di energia in corrispondenza dei quali si individuano i cosiddetti livelli energetici (struttura elettronica dell'atomo).

L'interazione della radiazione elettromagnetica con la materia avviene mediante tre fenomeni fondamentali: **assorbimento**, **emissione spontanea** ed **emissione stimolata**, di fotoni da parte di un atomo



Fenomeni di interazione materia/radiazione.

La transizione di un elettrone da un livello ad un altro produce un **assorbimento** di energia nel caso in cui il salto avvenga verso livelli ad energia superiore, un'**emissione** nel caso opposto. La quantità assorbita o liberata è naturalmente pari alla differenza di energia fra i due livelli.

Se un fotone a frequenza  $f_0$  e quindi energia  $hf_0$  interagisce con un atomo può essere assorbito provocando la transizione di un elettrone dal livello  $E_1$  al livello  $E_2$

Gli elettroni eccitati, a partire da questo stato, possono tornare allo stato originario attraverso l'emissione spontanea di un fotone con energia  $hf_0$  oppure, se un fotone interagisce con un atomo con un elettrone sul livello  $E_2$ , per mezzo dell'emissione stimolata di un ulteriore fotone secondario che ha la stessa energia e la stessa direzione (quantità di moto) del fotone primario.

Al campo elettromagnetico, dovuto ai fotoni primari, si aggiungono i contributi dei fotoni secondari (in fase con i fotoni primari) dando luogo all'emissione coerente, caratterizzata da un'unica frequenza di emissione.

L'emissione stimolata viene convogliata all'esterno, ottenendo (teoricamente) un alto grado di coerenza temporale ovvero un raggio monocromatico.

I fotoni che si creano per emissione spontanea hanno direzioni di propagazione aleatorie e si ricombinano con relazioni arbitrarie fornendo una emissione incoerente ovvero caratterizzata da uno spettro di emissione ampio.

Nella condizione d'equilibrio termico, le densità degli atomi nello stato fondamentale  $E_1$  ed eccitato  $E_2$ , indicate rispettivamente con  $N_1$  e  $N_2$ , sono regolate dalla distribuzione di Boltzmann

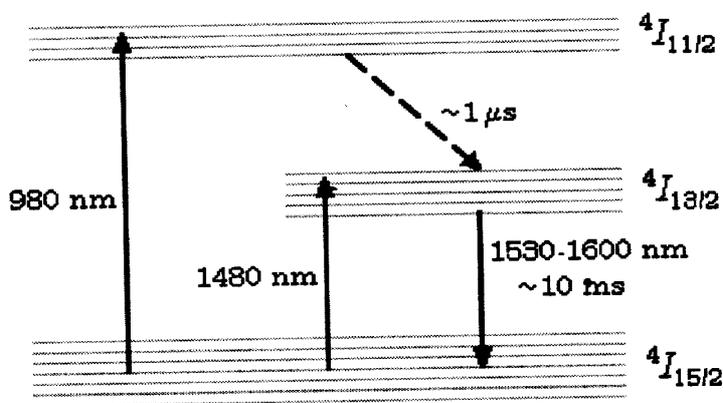
$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-\frac{E_1}{kT}}}{e^{-\frac{E_2}{kT}}} = e^{\frac{(E_2 - E_1)}{kT}} = e^{\frac{hf_0}{kT}}$$

dove  $T$  è la temperatura assoluta e  $k$  è la costante di Boltzmann.

Generalmente il livello base è molto più popolato del livello eccitato. Per avere una considerevole emissione stimolata si deve avere che  $N_2 \gg N_1$  ovvero si deve verificare il fenomeno dell'**inversione di popolazione**.

Quest'ultima condizione può ottenersi eccitando il materiale con una sorgente di energia esterna ed effettuando il cosiddetto **pompaggio**.

Si definiscono livello laser inferiore e livello laser superiore i livelli energetici tra i quali avviene la transizione radiativa di interesse. Per gli ioni di Erblio sono rispettivamente  $I_{15/2}$  e  $I_{13/2}$ .



Sistema laser a tre livelli.

## IL MECCANISMO DI AMPLIFICAZIONE

Il fenomeno di amplificazione prende inizio portando gli ioni  $\text{Er}^{3+}$ , mediante la radiazione di pompa, ad un livello eccitato più alto di quello laser superiore (**livello di pompa**).

Attraverso transizioni non irradianti, lo ione si porta molto velocemente al livello laser superiore ( $I 13/2$ ), che viene anche chiamato **metastabile** dove il tempo di vita medio di uno ione in tale livello è molto elevato rispetto a quello degli altri livelli per cui si arriva a una **inversione di popolazione**. In queste condizioni è molto probabile che avvenga una interazione ione-fotone che porta all'amplificazione del segnale.

Il modello appena descritto prende il nome di **sistema laser a tre livelli**.

La lunghezza d'onda della radiazione di pompa che permettono un salto al livello superiore superiore sono 980 e 800 nm. Un'altra lunghezza d'onda di pompa molto usata è quella in corrispondenza a 1480 nm. In tal caso il livello di pompa coincide con il livello laser superiore (**sistema a due livelli**).

La lunghezza d'onda di segnale, invece, è legata al salto energetico tra i due livelli laser che varia attorno ai 1550 nm corrispondente a quella utilizzata nei sistemi di telecomunicazione in terza finestra.

### Processi secondari

Alcuni processi secondari tendono a degradare le prestazioni dell'amplificatore **Processo ASE (Amplified Spontaneous Emissions)** è causata dal tempo di vita medio finito di un elettrone nel livello metastabile.

Di conseguenza un elettrone, raggiunto il livello laser superiore, tende, dopo un certo tempo, a ricadere nel livello inferiore. Questo fenomeno svuota il livello laser superiore, e crea rumore in ricezione. Infatti, la transizione dell'elettrone verso il livello laser inferiore libera un fotone di energia, il quale possiederà una lunghezza d'onda prossima a quella di segnale ma una direzione casuale; interesserà altri ioni di Erblio lungo il suo percorso provocando una radiazione che si somma al segnale e il cui spettro sarà concentrato attorno alla frequenza di segnale .

### Processo ESA

Uno ione nello stato  $I 13/2$  può assorbire un fotone della lunghezza d'onda della radiazione di pompa; questo si verifica solo quando esiste un livello più alto che si trova esattamente alla distanza energetica corrispondente a quella frequenza. Sebbene lo ione ritorni quasi istantaneamente al livello laser superiore si ha comunque un assorbimento di un fotone di pompa .

### Processo Upconversion

Può accadere che due ioni di Erblio si trovino eccitati al livello laser superiore e vi sia uno scambio di energia non radiativa da un atomo (donatore) all'altro (accettore) che poi si diseccita dopo aver provocato una diminuzione di atomi eccitati al livello laser superiore.

### Popolazione dei livelli

Le principali variabili che determinano l'entità dei fenomeni descritti in precedenza sono le popolazioni dei vari livelli energetici. Quindi le equazioni che permettono di descrivere il comportamento dell'amplificatore ottico sono le equazioni di bilancio (**Rate Equations**); esse modellizzano l'interazione della radiazione (potenza inviata in fibra) con un sistema atomico di cui sono note le densità di popolazione iniziali dei vari livelli. Le equazioni di bilancio per un sistema a tre livelli in cui non si considerano i fenomeni di ESA e upconversion sono :

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -(W_{12} + R)N_1 + (W_{21} + A_{21})N_2 + (R' + A_{31})N_3$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = W_{12}N_1 - (W_{21} + A_{21})N_2 + A_{32}N_3$$

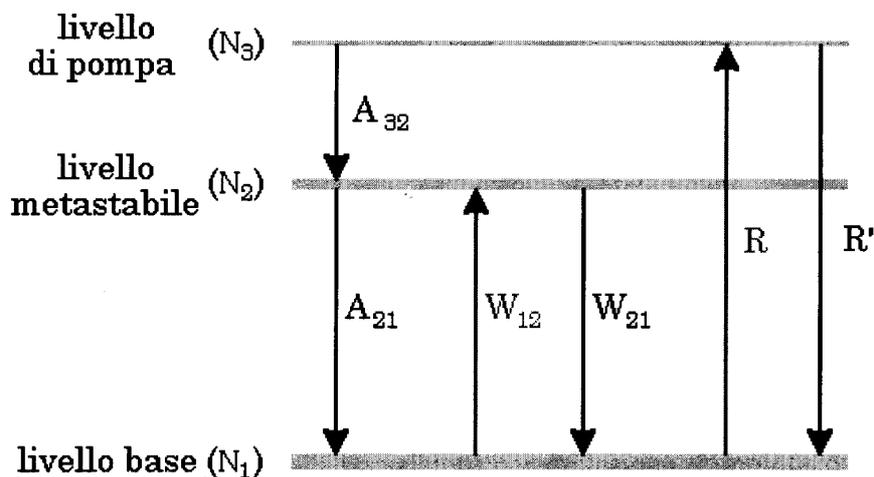
$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = RN_1 - (R' + A_{32} + A_{31})N_3$$

In aggiunta a queste equazioni si deve considerare anche la legge di conservazione:

$$N_1(x, y, z) + N_2(x, y, z) + N_3(x, y, z) = N_t(x, y)$$

dove  $N_t(x, y)$  è il profilo di concentrazione sulla generica sezione considerando la distribuzione indipendente da  $z$ .

La definizione dei coefficienti presenti nelle equazioni richiedono l'introduzione delle sezioni d'urto di assorbimento ( $\sigma_a$ ) e di emissione ( $\sigma_e$ ). Esse sono fisicamente delle superfici ed indicano la probabilità di assorbimento ed emissione per unità di area; dipendono dal tipo di materiale e dalla temperatura



Transizioni considerate nelle equazioni di bilancio.

R è il tasso di transizioni dovuto all'assorbimento della generica radiazione di pompa (ovviamente porta ad un incremento della popolazione nel livello di pompa a scapito di quella del livello laser inferiore). Il suo valore è dato dalla relazione:

$$R(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} I_p(x, y, z, \nu) \frac{\sigma_{a13}(\nu)}{h\nu} d\nu$$

in cui  $\sigma_{a13}$  è la sezione d'urto di assorbimento corrispondente ai livelli laser inferiore e di pompa;  $\nu$  è la frequenza;  $h$  è la costante di Plank e  $I_p$  è la densità di potenza di pompa nella posizione  $(x, y, z)$ .

R' è il tasso di transizioni di emissione dovuto alla radiazione di pompa. Il suo valore è:

$$R'(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} I_p(x, y, z, \nu) \frac{\sigma_{e13}(\nu)}{h\nu} d\nu$$

dove  $\sigma_{e13}$ , è la sezione d'urto di emissione dal livello 3 al livello 1.

$W_{21}$  è il tasso di transizioni per emissione stimolata dal livello laser superiore a quello inferiore. Il suo valore è:

$$W_{21}(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} I_s(x, y, z, \nu) \frac{\sigma_{e21}(\nu)}{h\nu} d\nu \quad (2.5)$$

in cui  $\sigma_{e21}$  è la sezione d'urto di emissione tra i livelli laser superiore ed inferiore;  $h\nu$  è l'energia di un fotone a quella lunghezza d'onda;  $I_s$  è la densità di potenza di segnale confinata nell'involuppo  $\psi_s(x, y)$ . In realtà il tasso è influenzato anche dalla potenza ASE; il termine  $I_s$  va quindi sostituito con  $I_s(\nu) + I_{ASE}(\nu)$ .

$W_{12}$  è il tasso di assorbimento dei fotoni di segnale:

$$W_{12}(x, y, z, t) = \int_0^{\infty} I_s(x, y, z, \nu) \frac{\sigma_{a12}(\nu)}{h\nu} d\nu$$

dove  $\sigma_{a12}$  è la sezione d'urto di assorbimento spontanea tra i livelli laser. Anche in questo caso si può ripetere il discorso per l'ASE.

$A_{ij}$  è il tasso di emissione spontanea tra i livelli  $i$  e  $j$ . Il valore sarà l'inverso del tempo di vita medio di uno ione in tale livello energetico.

Spesso in letteratura si trova un modello semplificato chiamato a due livelli. In tale modello si considera trascurabile la popolazione del livello di pompa dato il suo bassissimo tempo di vita medio. In tal caso le equazioni di bilancio diventano:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -(W_{12} + R)N_1 + (W_{21} + A_{21})N_2 + (R' + A_{31})N_3$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (W_{12} + R)N_1 - (W_{21} + A_{21})N_2 + A_{32}N_3$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = RN_1 - (R' + A_{32} + A_{31})N_3$$

con la condizione di conservazione:

$$N_1 + N_2 = N_t$$

## Leggi di propagazione

Gli andamenti della potenza di segnale, della potenza di pompa e l'evoluzione dell'ASE lungo la fibra in entrambe le direzioni, possono essere espressi con le equazioni propagative (Propagation Equation)

$$\frac{dP_s(z, \nu_s)}{dt} = [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu_s)] P_s(z, \nu_s)$$

$$\frac{dP_{p\pm}(z, \nu_p)}{dz} = \pm \gamma_p(z) P_{p\pm}(z, \nu_p)$$

$$\frac{dS_{ASE\pm}(z, \nu)}{dz} = \pm [\gamma_{21}(z, \nu_s) - \gamma_{12}(z, \nu)] S_{ASE\pm}(z, \nu) \pm 2h\nu\gamma_{21}(z, \nu)$$

nelle quali il segnale e la pompa hanno rispettivamente frequenza  $\nu_s$  e  $\nu_p$ .

Per descrivere l'evoluzione dell'ASE sono necessarie due equazioni, in quanto i fotoni generati dal decadimento degli elettroni possono viaggiare in entrambe le direzioni (segno più se si studia l' ASE nella direzione di  $z$  crescente, viceversa segno meno).

Nella seconda equazione il segnale di pompa può essere co-propagante o contro-propagante, cioè il pompaggio può essere applicato all'estremità della fibra drogata in cui entra il segnale oppure all'estremità opposta.

I coefficienti di assorbimento e di emissione per il segnale e la pompa sono legate alle popolazioni dei livelli dalle seguenti relazioni

$$\gamma_p(z) = \iint_A \psi_p(x, y) [\sigma_{a13} N_1(x, y, z) - \sigma_{a13} N_3(x, y, z)] dx dy$$

$$\gamma_{12}(z, \nu) = \iint_A \psi(x, y) \sigma_{a21}(\nu) N_1(x, y, z) dx dy$$

$$\gamma_{21}(z) = \iint_A \psi(x, y, \nu) \sigma_{e21}(\nu) N_2(x, y, z) dx dy$$

dove  $A$  è l'area della regione attiva e  $\psi(x, y, \nu)$  è l'intensità normalizzata di potenza alla generica frequenza  $\nu$ . Per  $\nu = \nu_s$  e  $\nu = \nu_p$  ho, rispettivamente, le intensità normalizzate di potenza di segnale ( $\psi_s(x, y)$ ) e di pompa ( $\psi_p(x, y)$ ) che legano la potenza presente nella sezione  $z$  della fibra all'intensità di potenza:

$$I_{p,s}(x, y, z) = \psi_{p,s}(x, y) P_{p,s}(z) \quad (2.13)$$

in quanto verificano la seguente legge:

$$\iint_A \psi_{p,s}(x, y) dx dy = 1 \quad (2.14)$$

La differenza tra il coefficiente di emissione e quello di assorbimento determina dunque il **guadagno** alla specifica frequenza a cui si riferiscono

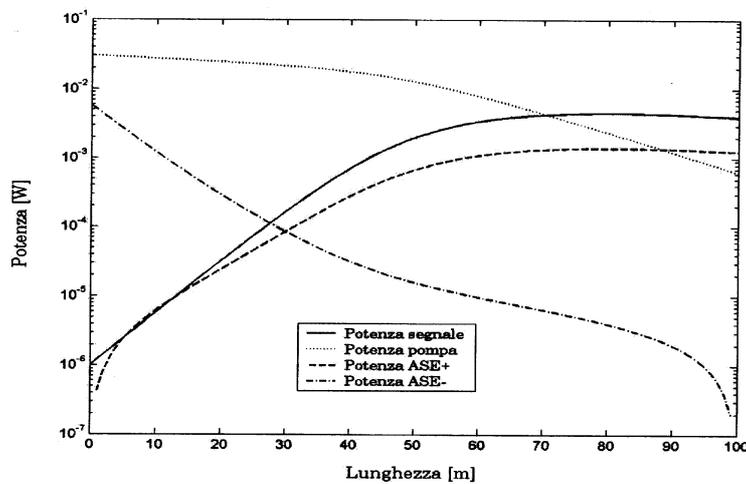
Il termine  $2h\nu\gamma_{21}(x, \nu)$ , che compare nell'equazione della potenza ASE, rappresenta il numero di fotoni che si genera nella sezione posizionata in  $x$  alla frequenza  $\nu$  per effetto dell'emissione spontanea.

## Comportamento degli EDFA

Si faccia riferimento a un amplificatore avente il nucleo di raggio  $a = 2,5 \mu\text{m}$  e l'apertura numerica vale  $0,19$ . Gli ioni  $\text{Er}^{3+}$  sono distribuiti uniformemente nel core con una densità di  $6 \cdot 10^{24}$  per  $\text{m}^3$ . Se  $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ , si deve descrivere il comportamento degli ioni di Erblio con un modello a tre livelli energetici.

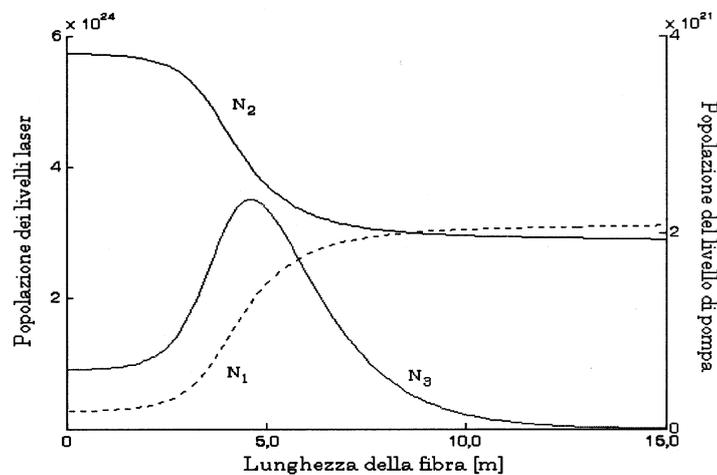
La potenza lungo la fibra raggiunge un punto di massimo e dopo inizia a diminuire. La lunghezza dell'amplificatore in corrispondenza del massimo valore di potenza, che corrisponde al massimo valore di guadagno, è detta ottima.

$P_{\text{ASE}+}$  ha un comportamento analogo alla potenza segnale, mentre la potenza  $P_{\text{ASE}-}$  aumenta sempre lungo la fibra. La potenza del segnale di pompa diminuisce cedendo la sua energia agli altri segnali che si propagano.



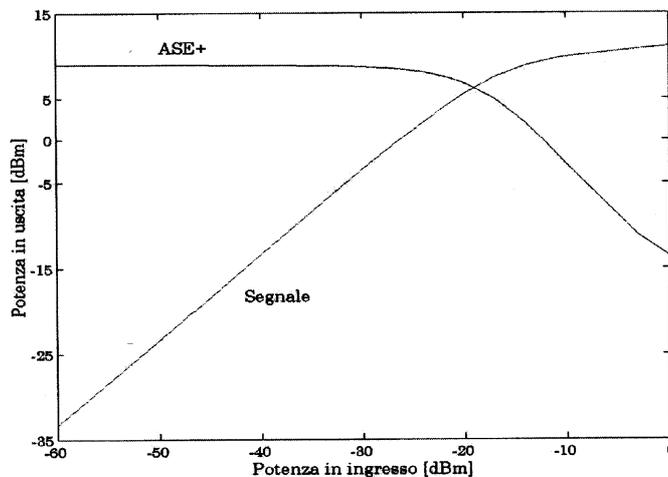
Andamento della potenza totale dei segnali propaganti nell'amplificatore ottico.

L'inversione di popolazione diminuisca man mano che si avvanza nella fibra in concomitanza della diminuzione della potenza di pompa. Inoltre, visto il bassissimo tempo di vita medio nel livello di pompa, la popolazione di tale livello è molto inferiore alle popolazioni dei livelli laser.



Andamento delle popolazioni dei livelli energetici interessati dal fenomeno dell'amplificazione.

## Guadagno e potenza di rumore



Potenza totale di segnale e potenza ASE+ in uscita dell'amplificatore ottico.

Il guadagno assume il massimo valore per piccoli valori della potenza di ingresso, per questo motivo si indica la prima parte della curva con il nome di Small Signal Region. Aumentando il segnale di ingresso il guadagno inizia a diminuire, si passa dunque alla Saturated Region.

Si deve, però, sottolineare il fatto che il massimo guadagno è accompagnato ad un elevato valore della potenza ASE che si propaga con il segnale. È quindi necessario far lavorare l'EDFA nella zona di saturazione, trovando un compromesso tra potenza di segnale (ossia guadagno) e potenza ASE in funzione delle caratteristiche del collegamento ottico.

Se  $G$  è il guadagno dell'amplificatore la densità spettrale di potenza del Rumore ASE è

$$S_A(f) = \frac{(G-1)n_{sp} hf_0}{2} \quad ns_p \cong \frac{N_2}{N_2 - N_1} \geq 1$$

(rumore bianco passa-banda)  $n_{sp}$  è il fattore di emissione spontanea che è molto vicino ad 1 quando l'inversione di popolazione è spiccata.,

Il segnale all'uscita del fotorivelatore è composto, oltre al rumore shot di fotorivelazione  $i_{sh}(t)$ , da tre termini derivanti dalla rivelazione del segnale: il termine utile di segnale, il termine di interazione segnale-rumore ed il termine dovuto alla rivelazione del solo rumore di amplificazione

$$I(t) = i_{sh}(t) + R \left[ P_{out} + 2\sqrt{2P_{out}} n_{ASE}(t) \cos(2\pi f_0 t) + n_{ASE}^2(t) \right]$$

Se il segnale all'ingresso dell'amplificatore non è estremamente piccolo, si trova che il termine  $n_{ASE}^2(t)$  dovuto al solo rumore d'amplificazione è trascurabile nel calcolo del rapporto  $(SNR)_{out}$ , nei confronti del termine di interazione segnale-rumore

I termini notevoli sono dunque quelli relativi al rumore shot ed al rumore di amplificazione convertito dal segnale nella banda del fotorivelatore.

Il processo di conversione che si attua nella fotorivelazione è simile a quello realizzato intenzionalmente nei ricevitori coerenti tramite la combinazione tra il segnale ricevuto ed il LASER locale.

La componente del segnale ASE convertita in banda base, "rinforzata" dall'interazione col segnale utile si rivela dominante anche nei confronti del rumore shot, che viene così ulteriormente trascurato nel calcolo dello  $(SNR)_{out}$ .

La densità spettrale di potenza del disturbo  $i(t)$  dovuto al rumore di amplificazione convertito dal segnale è dunque :

$$S_i(f) = R^2 \left[ 2P_{out} \frac{(G-1)n_{sp} hf_0}{2} \right] = 2R^2 (G-1)G P_{in} n_{sp} hf_0$$

$$(SNR)_{out} = \frac{(RG P_{in})^2}{2B \cdot 2R^2 (G-1)G P_{in} n_{sp} hf_0} = \frac{G P_{in}}{4B (G-1)n_{sp} hf_0}$$

Per rapporto  $(SNR)_{in}$  convenzionalmente si definisce il rapporto della potenza di segnale e del solo rumore shot di fotorivelazione

$$(SNR)_{in} = \frac{(R P_{in})^2}{2B qR P_{in}} = \frac{P_{in}}{2B hf_0}$$

Eseguendo il rapporto  $(SNR)_{in}$  e  $(SNR)_{out}$  si ha la cifra di rumore  $F_A$

$$F_A = \frac{P_{in}}{2B hf_0} \frac{4B (G-1)n_{sp} hf_0}{G P_{in}} = 2 n_{sp} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \cong 2 n_{sp}$$

Quindi per un amplificatore ideale con conversione totale  $F_A=3$  dB (circa 6dB per quelli reali)

## AMPLIFICATORI OTTICI EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifiers)

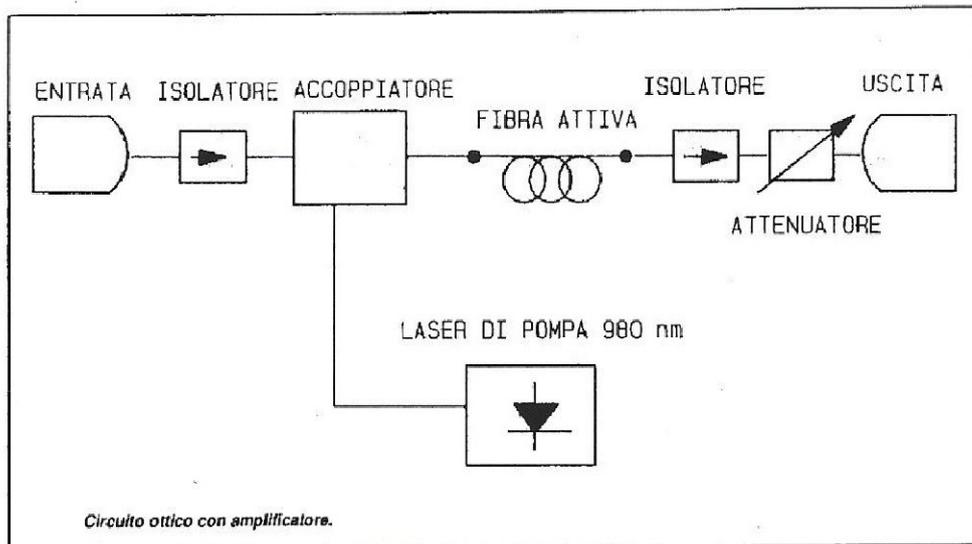
Detti anche amplificatori in **fibra attiva** : il core di un tratto di alcune decine di metri di fibra viene drogato con atomi di Erblio (terra rara)

“Illuminati da una luce di pompaggio”, cioè accoppiando in fibra l’energia fornita da un Laser di pompa a semiconduttore di opportuna lunghezza d’onda, gli atomi di Erblio assorbono energia passando allo stato “eccitato”.

La differenza di energia  $\Delta E$  fra il livello fondamentale e quello eccitato corrisponde all’energia di un fotone a lunghezza d’onda,  $\lambda$ .

Quando un fotone del segnale a questa  $\lambda$  attraversa il mezzo viene ceduto un fotone alla stessa lunghezza d’onda in base a un meccanismo di **emissione stimolata** ottenendo amplificazione che, con potenze di pompa di 10 mW, può arrivare a 30 dB

Usando un laser di pompa a 980 nm si ottengono  $\Delta E$  a cui corrisponde l’emissione di fotoni a 1535 nm.



Accanto all’emissione stimolata c’è una emissione spontanea ASE ( Amplified Spontaneous Emission) che genera nel fotodiodo un rumore che costituisce una delle principale causa di rumore nel sistema