

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**“AMPLIFICAZIONE OTTICA MEDIANTE FIBRE OTTICHE
DROGATE”**

Relatore: Prof. Andrea Galtarossa

Laureando: Giordano Davide Vittorio

ANNO ACCADEMICO 2022 – 2023

Data di laurea 27/09/2023

A mio padre

A mia madre

A tutte le persone che hanno creduto in me

SOMMARIO

Questo lavoro di tesi mira a esplorare in profondità gli aspetti tecnici, teorici e applicativi degli amplificatori ottici in fibra attiva, con un focus particolare sugli amplificatori drogati all'erbio (EDFA). Il testo si apre con una panoramica sui principi fisici fondamentali che regolano il funzionamento degli amplificatori ottici, tra cui assorbimento, emissione spontanea, emissione stimolata e inversione di popolazione.

Successivamente, la tesi si addentra nelle specifiche degli amplificatori in fibra attiva, esaminando i metodi di produzione delle fibre, le diverse configurazioni degli amplificatori e i meccanismi di amplificazione, con un'analisi particolare dei parametri chiave, quali il guadagno e la cifra di rumore.

Il lavoro prosegue con un'analisi dettagliata del comportamento dell'amplificazione ottica, introducendo modelli matematici e relazioni che governano sia l'emissione stimolata che quella spontanea.

Nell'ambito dei sistemi di comunicazione, la tesi esamina l'importanza degli amplificatori ottici nei sistemi WDM (Wavelength Division Multiplexing) e illustra un caso di studio riguardante un collegamento transatlantico, evidenziando il ruolo cruciale degli EDFA in termini di ridondanza e affidabilità.

INDICE

CAPITOLO – 1 Introduzione	7
CAPITOLO – 2 Principi fisici alla base del funzionamento degli amplificatori ottici	9
2.1 Assorbimento, emissione spontanea e stimolata	9
2.2 Inversione di popolazione.....	12
2.2.1 Fattore di inversione della popolazione	13
CAPITOLO – 3 Amplificatori ottici in fibra attiva	15
3.1 Fibre attive.....	15
3.1.1 Tecnologie di Produzione delle Fibre Attive	15
3.2 Configurazioni degli amplificatori in fibra attiva.....	16
3.3 Amplificatore in fibra drogata all'erbio (EDFA) a pompaggio diretto.....	18
3.3.1 Meccanismo di amplificazione con pompaggio a 980 nm	20
3.4 Parametri fondamentali	22
3.4.1 Guadagno.....	22
3.4.2 Cifra di rumore	24
CAPITOLO – 4 Analisi dell'amplificazione ottica	27
4.1 Relazioni dell'emissione stimolata.....	27
4.2 Relazioni dell'emissione spontanea.....	28
4.3 Modello dell'amplificatore ai valori medi.....	29
4.3.1 Applicazione del modello a sistemi di trasmissione.....	29
4.3.2 Esempio	31
CAPITOLO – 5 Amplificatori ottici in sistemi di comunicazione	33
5.1 Introduzione ai sistemi WDM	33
5.2 Applicazione degli amplificatori ottici nei sistemi WDM.....	34
5.3 Amplificatori Ottici in un Collegamento Transatlantico	35
CAPITOLO 6 – Conclusioni	39
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	41

Capitolo 1

Introduzione

L'introduzione degli amplificatori ottici ha rappresentato un punto di svolta per i sistemi di trasmissione basati su fibra ottica, fornendo un'alternativa sia più economica che efficiente ai tradizionali rigeneratori elettronici. Essi sono in grado di compensare la perdita di segnale su lunghe distanze. Prima dell'arrivo di questi amplificatori, i sistemi di trasmissione erano fortemente vincolati all'uso di rigeneratori elettronici. Come illustrato in Figura 1.1, questi dispositivi funzionavano ricevendo in ingresso il segnale ottico attenuato e convertendolo in un segnale elettronico mediante un fotorivelatore (indicato con l'acronimo PD). Dopo aver amplificato e pulito il segnale da eventuali interferenze di rumore, un diodo laser (indicato come LD) lo riconvertiva in un segnale ottico, identico a quello originale.

Tuttavia, questo metodo di rigenerazione presentava diversi svantaggi: era costoso e limitava la flessibilità del sistema. In particolare, ogni rigeneratore era progettato per operare a un tasso di bit e una lunghezza d'onda specifici, rendendo più complessa qualsiasi modifica o aggiornamento del sistema.

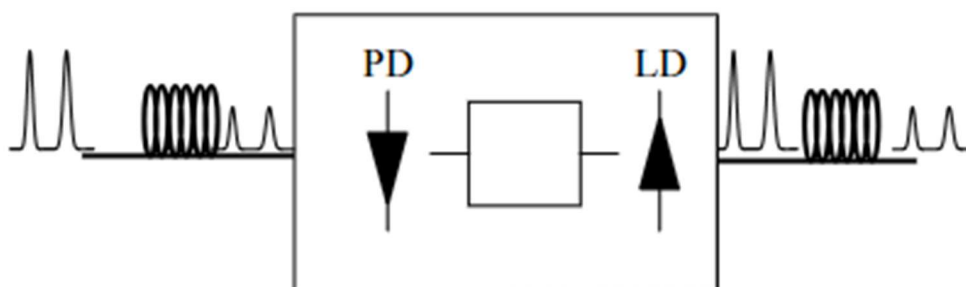


Figura 1.1 - Rigeneratore elettronico utilizzato per trasmettere segnali ottici su lunghe distanze. [1]

Gli amplificatori ottici, invece, offrono numerosi vantaggi. Essi non necessitano di circuiti elettronici ad alta velocità e sono trasparenti al bit rate e al formato del segnale e, cosa più importante, possono amplificare contemporaneamente più segnali ottici a diverse lunghezze d'onda. Questa caratteristica li rende strumenti chiave nella realizzazione di sistemi di comunicazione che utilizzano il Multiplexing a Divisione di Lunghezza d'Onda (WDM).

Oltre ai vantaggi, gli amplificatori ottici presentano anche alcune limitazioni rispetto ai rigeneratori elettronici, come l'incapacità di compensare la dispersione accumulata nel collegamento e l'aggiunta di rumore al segnale ottico. Ciò è dovuto al fatto che amplificano il segnale ottico "così com'è" inclusi eventuali effetti di dispersione e rumore che si sono accumulati. In termini tecnici, un amplificatore ottico può essere visto come un laser senza cavità ottica, o in cui il feedback ottico è stato eliminato. Allo stesso modo dei laser, il processo di amplificazione in questi dispositivi si basa sul principio dell'emissione stimolata. Attualmente, esistono principalmente tre tipi di amplificatori ottici: l'amplificatore in fibra drogata con erbio (EDFA), l'amplificatore in fibra Raman (RFA) e l'amplificatore ottico a semiconduttore (SOA). Tra questi, l'EDFA è il più diffuso nei sistemi di comunicazione in fibra ottica, grazie ai suoi vantaggi quali una larga larghezza di banda, un'elevata potenza di uscita e favorevoli caratteristiche di rumore. In questo documento esamineremo il funzionamento degli amplificatori ottici, con particolare attenzione agli EDFA e alle loro applicazioni nei sistemi di comunicazione WDM.

Capitolo 2

Principi fisici alla base del funzionamento degli amplificatori ottici

2.1 Assorbimento, emissione spontanea e stimolata

Per amplificare una radiazione ottica è necessario realizzare un dispositivo che ricevendo in ingresso un flusso di fotoni alla frequenza del segnale utile, produca in uscita un flusso di fotoni alla stessa frequenza, ma con intensità superiore contenendo al massimo il rumore sovrapposto[2]. Per comprendere a fondo il funzionamento degli amplificatori ottici, è indispensabile esaminare le dinamiche fondamentali che governano l'interazione tra la radiazione elettromagnetica e la materia. Queste interazioni sono principalmente regolate da tre meccanismi chiave: assorbimento, emissione stimolata e emissione spontanea.

La materia è generalmente composta da atomi o ioni, ognuno dei quali possiede specifici livelli energetici che definiscono gli stati in cui possono esistere. Questi stati sono quantificati dal numero N_i di atomi per unità di volume presenti in ciascun livello energetico E_i .

Generalmente a temperature ordinarie, quindi in condizioni normali, la maggior parte degli atomi si trova nel livello energetico inferiore, poiché, in assenza di cause esterne, l'energia termica media degli atomi non è sufficiente per far loro compiere il salto verso i livelli superiori.

La radiazione elettromagnetica, a sua volta, può essere descritta in vari modi.

Ad esempio, in termini ondulatori, è caratterizzata dalla sua frequenza ν o dalla sua lunghezza d'onda λ . In termini di fotoni, ogni fotone è individuato dalla propria energia, dove h è la costante di Planck con un valore di $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ J*s. Per semplicità, consideriamo che un atomo di un mezzo materiale possa assumere solo due stati energetici.

In questo caso, si parla di sistema a due livelli. Sia N_1 , la popolazione del livello con energia E_1 , detto anche livello fondamentale e N_2 quella del livello eccitato, avente energia $E_2 > E_1$.

Si consideri un'onda elettromagnetica avente frequenza ν tale che $E = h \cdot \nu = E_2 - E_1$, cioè ogni fotone associato all'onda elettromagnetica abbia un'energia esattamente uguale al salto di energia tra i due livelli caratteristici del mezzo materiale in esame.

In questo scenario, l'onda elettromagnetica può interagire con il mezzo materiale attraverso tre fenomeni: l'assorbimento, l'emissione stimolata e l'emissione spontanea (Figura 2.1)

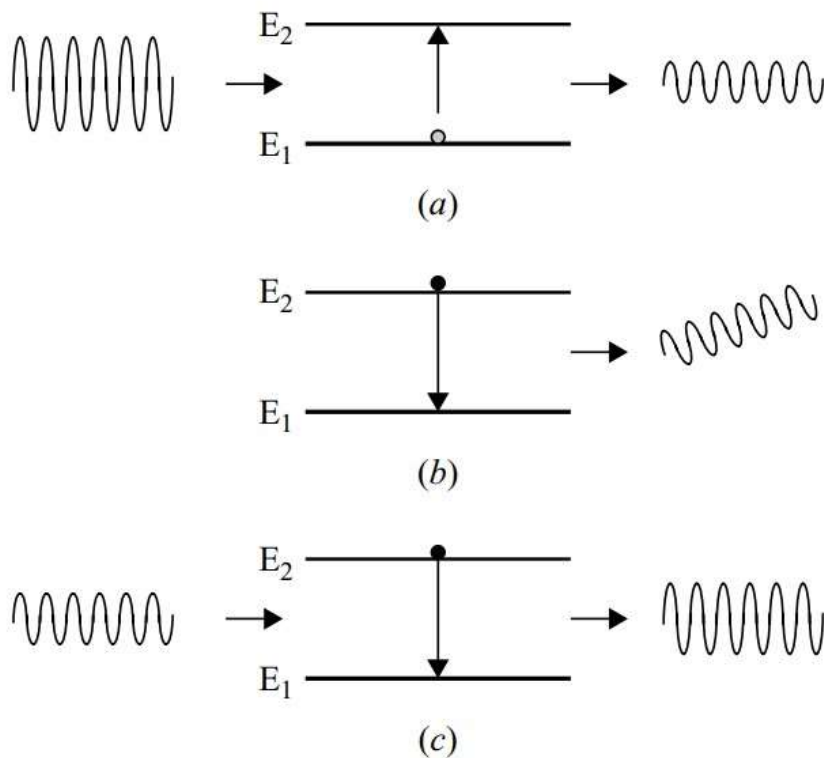


Figura 2.1 - Illustrazione del diagramma del livello di energia (a) assorbimento, (b) emissione spontanea, (c) emissione stimolata. [1]

- a) **Assorbimento.** L'assorbimento si verifica quando il fotone incide su un atomo che si trova nello stato fondamentale e come risultato di tale interazione il fotone viene assorbito dall'atomo che, in virtù di questo assorbimento, passa dallo stato fondamentale allo stato eccitato (Figura 2.1a).

Questo processo contribuisce all'**attenuazione** dell'onda elettromagnetica incidente.

Matematicamente, la densità di probabilità di assorbimento dal livello 1 al livello 2 è data da [3]:

$$W_{12} = B_{12} \cdot u(\nu) \quad (2.1)$$

dove B_{12} è il coefficiente di Einstein per l'assorbimento e $u(\nu)$ è la densità di energia radiante alla frequenza ν che indica l'energia per unità di volume alla frequenza ν .

Il numero di atomi che passano dallo stato E_1 allo stato E_2 per unità di tempo a causa dell'assorbimento è definito come [3]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -W_{12} \cdot N_1 \quad (2.2)$$

b) **Emissione spontanea.** Questo è un fenomeno spontaneo che può avvenire ogniqualvolta un atomo che si trova in uno stato eccitato decade verso uno stato avente energia inferiore e la corrispondente differenza di energia è emessa sotto forma di un fotone. Il fotone emesso ha la stessa energia del segnale ottico incidente, ma polarizzazione, fase e direzione casuali (Figura 2.1b). Negli amplificatori ottici, questo fenomeno può diventare una notevole fonte di **rumore**. Ciò accade perché l'emissione spontanea viene amplificata nel processo di amplificazione, dando origine al processo fisico noto come Emissione Spontanea Amplificate (ASE, dall'inglese Amplified Spontaneous Emission). Quest'ultimo rappresenta un elemento critico che deve essere controllato attentamente per mantenere la fedeltà del segnale in uscita dall'amplificatore. Matematicamente, la densità di probabilità di emissione spontanea dal livello 2 al livello 1 è data da [4]:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}} \quad (2.3)$$

dove A_{21} è anche il coefficiente di Einstein per l'emissione spontanea e τ_{21} è il tempo di vita medio. Il numero di atomi che passano dallo stato E_2 allo stato E_1 per unità di tempo a causa dell'emissione spontanea è definito come [3]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot A_{21} \quad (2.4)$$

c) **Emissione stimolata.** Si supponga ora che l'atomo si trovi nel livello eccitato di energia E_2 e che su di esso incida un fotone. In questo caso, il fotone può stimolare l'emissione di un altro fotone avente la stessa frequenza e fase. Come conseguenza di questa emissione stimolata, l'atomo compie una transizione dal livello eccitato al livello fondamentale (Figura 2.1c). Questo processo è fondamentale per il funzionamento degli amplificatori ottici, poiché contribuisce all'**amplificazione** dell'onda elettromagnetica incidente. Matematicamente, la densità di probabilità di emissione stimolata dal livello 2 al livello 1 è data da [3]:

$$W_{21} = B_{21} \cdot u(\nu) \quad (2.5)$$

dove B_{21} è il coefficiente di Einstein per l'emissione stimolata e $u(\nu)$ è la densità di energia radiante alla frequenza ν .

Il numero di elettroni che passano dallo stadio E_2 allo stadio E_1 per unità di tempo a causa dell'emissione stimolata è definito come [3]:

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_2 \cdot W_{21} \quad (2.6)$$

2.2 Inversione di popolazione

Come detto, in condizioni normali, la popolazione dei livelli eccitati risulta praticamente nulla ($N_2 < N_1$) e ciò significa che il numero di transizioni di assorbimento è superiore al numero di quelle di emissione, col risultato che il fascio incidente viene attenuato mentre si propaga all'interno del materiale (Figura 2.2a). Per avere amplificazione del fascio (Figura 2.2b) è dunque necessario far sì che esso attraversi un materiale nella quale esiste un livello eccitato con popolazione superiore a quella di un livello inferiore ($N_2 > N_1$), in modo che il numero complessivo delle emissioni stimolate ecceda quello degli assorbimenti, ovvero che

$\frac{dN_2}{dt} > \frac{dN_1}{dt}$. Tale situazione è detta **inversione di popolazione** e si ottiene fornendo energia al materiale con un meccanismo detto pompaggio che, nel caso degli amplificatori in fibra, avviene per via ottica. Il pompaggio ottico consiste nell'investire il materiale con un'intensa radiazione (pompa) ad una frequenza tale da consentire la transizione degli atomi verso un livello eccitato [2]. Questo argomento verrà approfondito nel successivo capitolo.

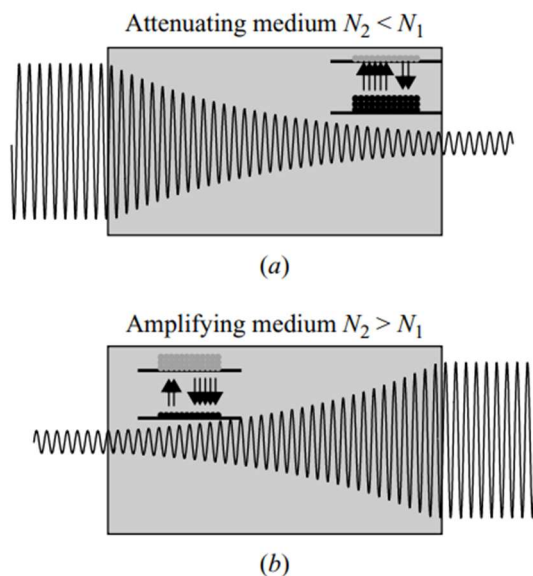


Figura 2.2 - (a) In normali condizioni di equilibrio, ci sono più atomi nel livello di energia fondamentale che in un livello di energia superiore e un'onda luminosa incidente subisce un'attenuazione. (b) Quando c'è un'inversione di popolazione, il fascio luminoso viene amplificato, attraverso il processo di emissione stimolata. [1]

2.2.1 Fattore di inversione di popolazione

Il fattore di inversione di popolazione η_{sp} (anche noto come fattore di emissione spontanea) è un parametro fondamentale negli amplificatori ottici. In un sistema a due livelli energetici, esso è definito dalla formula [1] :

$$\eta_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1} \quad (2.7)$$

Questo fattore serve a quantificare il livello di rumore introdotto dall'emissione spontanea amplificata (ASE) in relazione al segnale amplificato. In particolare, un valore di η_{sp} maggiore di 1 indica che c'è un'inversione di popolazione e, quindi, una effettiva amplificazione del segnale. Tuttavia, un η_{sp} elevato suggerisce anche un aumento significativo del rumore dovuto alla presenza di emissione spontanea, che può compromettere la qualità del segnale amplificato. Pertanto, η_{sp} è un parametro critico che equilibra l'efficienza dell'amplificazione del segnale e la generazione di rumore in un amplificatore ottico.

Capitolo 3

Amplificatori in fibra attiva

3.1 Fibre attive

Le fibre attive, un'evoluzione significativa rispetto alle fibre ottiche tradizionali, hanno un nucleo drogato con elementi della famiglia delle terre rare come neodimio ed erbio.

Questi elementi consentono l'amplificazione di un segnale ottico attraverso un fenomeno noto come emissione stimolata. Il termine "fibra attiva" è stato coniato proprio per differenziarle dalle fibre ottiche standard, che sono essenzialmente passive e non offrono alcun meccanismo di amplificazione.

3.1.1 Tecnologie di Produzione delle Fibre Attive

Le principali tecniche di produzione delle fibre per telecomunicazione si basano sulla deposizione in fase vapore. Questo processo è agevolato dalla relativamente alta tensione di vapore (misura che indica la tendenza di una sostanza a evaporare) degli alogenuri impiegati, che si aggira intorno a decine di millimetri di mercurio (unità di misura della pressione mmHg) a temperatura ambiente. Di conseguenza, è relativamente agevole generare una quantità significativa di vapore per facilitare la reazione. Tuttavia, gli alogenuri di terre rare presentano una tensione di vapore molto più bassa, rendendo necessario l'uso di temperature elevatissime per raggiungere una concentrazione di vapore adeguata. Nonostante queste sfide, sono state ideate soluzioni efficaci, come quella illustrata nella Figura 3.1. In questa variante, una camera di drogaggio è stata integrata all'inizio dell'apparato convenzionale di deposizione in fase vapore. In questa camera, un sale di terra rara viene fuso e aderisce alle pareti. Il processo di deposizione del mantello della preforma prosegue come di consueto. Tuttavia, per la deposizione del nucleo, un bruciatore fisso riscalda la camera di drogaggio, generando così vapori di terre rare necessari per la reazione.

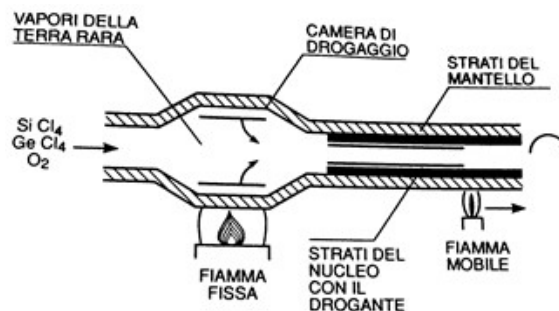


Figura 3.1 – Deposizione in fase vapore [5]

Il metodo più comunemente adottato nei laboratori globali è il drogaggio in soluzione, come mostrato nella Figura 3.2. Si inizia da una preforma sulla quale si deposita il mantello esterno secondo le procedure standard. Poi si aggiunge il nucleo, ma a temperature ridotte, così da ottenere solo una parziale sinterizzazione del particolato. Il tubo viene successivamente riempito con una soluzione, acquosa o alcoolica, contenente un sale di terra rara che impregna i pori. In seguito, il tubo è essiccato e fuso in un'atmosfera di cloro per produrre un materiale vetroso trasparente, prima di procedere al collassamento della preforma. Questo processo può anche essere adattato per includere piccole percentuali di allumina, migliorando così le prestazioni finali dell'amplificatore. Infatti, per ottenere un amplificatore efficiente, in termini di utilizzo della potenza del laser di pompa, è necessario che il drogaggio sia ben confinato nella parte centrale del nucleo. Il drogaggio in soluzione offre un buon controllo della concentrazione e un'alta uniformità, anche se c'è un rischio di contaminazione esterna. Le concentrazioni ideali di erbio variano tra 100 e 1000 parti per milione.

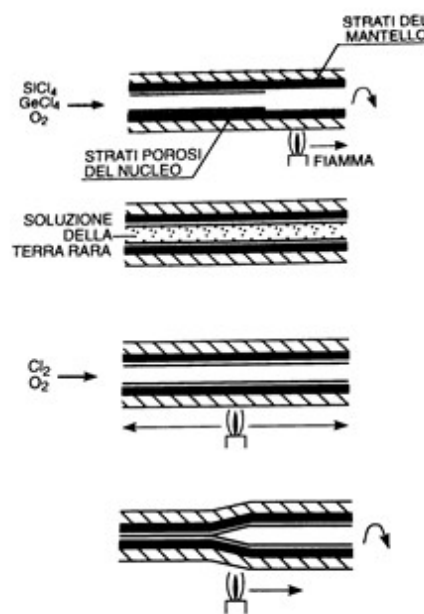


Figura 3.2 – Deposizione con drogaggio in soluzione [5]

3.2 Configurazioni degli amplificatori in fibra attiva

Le configurazioni degli amplificatori in fibra attiva possono differire a seconda della direzione di propagazione della luce di pompa, e se ne possono identificare principalmente tre: pompaggio diretto, pompaggio inverso e pompaggio bidirezionale, come mostrato nella Figura 3.3. Nel pompaggio diretto, la potenza di segnale e quella di pompa viaggiano nella stessa direzione, una configurazione che è generalmente preferita per minimizzare il rumore. Al contrario, nel pompaggio inverso, le due potenze viaggiano in direzioni opposte, una scelta

spesso fatta per massimizzare la potenza del segnale amplificato. Ogni configurazione ha i suoi vantaggi e svantaggi, e la scelta dipenderà da fattori come la lunghezza totale del sistema di trasmissione, la potenza del segnale in ingresso e le esigenze specifiche dell'applicazione in questione.

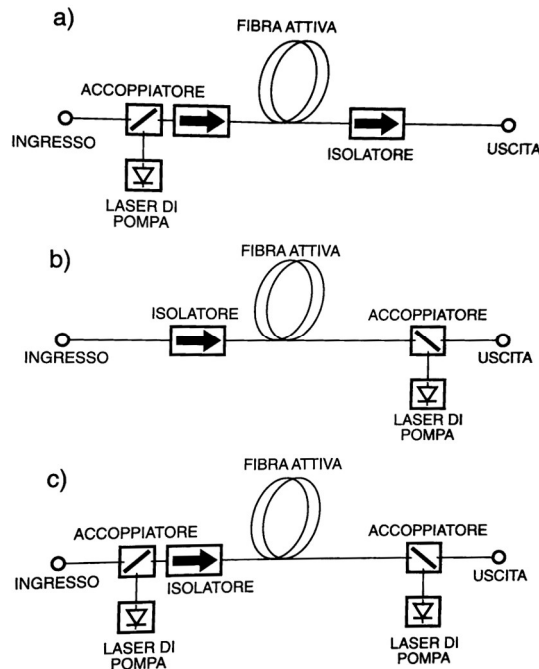


Fig. 3.3 – Schema di principio di un amplificatore a fibra attiva con schema di pompaggio
a) diretto, b) inverso, c) bidirezionale [5]

I risultati più promettenti in campo di telecomunicazioni ottiche sono stati ottenuti operando nella terza finestra spettrale, una regione del dominio delle lunghezze d'onda situata intorno ai 1550 nm (Figura 3.4). Questa finestra spettrale si distingue come un punto chiave nelle moderne reti di comunicazione ottica grazie a una serie di vantaggi unici. Primo tra tutti, la terza finestra spettrale presenta una ridottissima attenuazione del segnale, il che la rende ideale per applicazioni di lunga distanza. Inoltre, offre una larghezza di banda spettrale notevolmente ampia, che consente di accrescere il throughput dei dati, rendendo la trasmissione più efficiente.

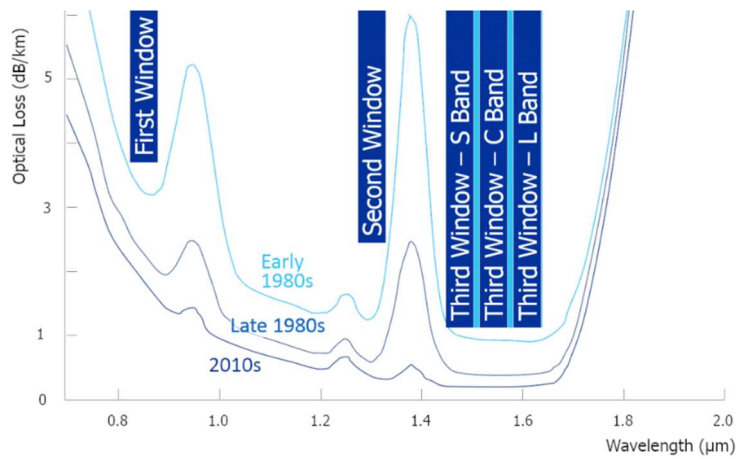


Figura 3.4 – Dipendenza della attenuazione dalla lunghezza d'onda λ [6]

Nell'ottica di ottimizzare le prestazioni nella suddetta finestra spettrale, l'uso di erbio come elemento drogante si è rivelato particolarmente efficace. Con concentrazioni nell'ordine delle cento parti per milione, l'erbio contribuisce a potenziare ulteriormente i benefici già intrinseci della terza finestra. Grazie alle sue eccellenti proprietà spettroscopiche, come i lunghi tempi di vita degli stati eccitati e i numerosi livelli energetici disponibili, è possibile realizzare amplificatori con bassi livelli di rumore e un'alta efficienza nella conversione della potenza di pompaggio. Nel contesto delle diverse configurazioni di amplificazione, quella che merita una particolare attenzione e che sarà esaminata più dettagliatamente è la configurazione a pompaggio diretto nell'amplificatore a fibra ottica drogata in erbio (EDFA).

3.3 Amplificatore a fibra ottica drogata in erbio (EDFA) con pompaggio diretto

Nella sua forma base, un EDFA consiste in uno spezzone di fibra drogata con erbio, un laser di pompa, l'elettronica di controllo e pilotaggio, un accoppiatore WDM e degli isolatori ottici (Figura 3.5) [8].

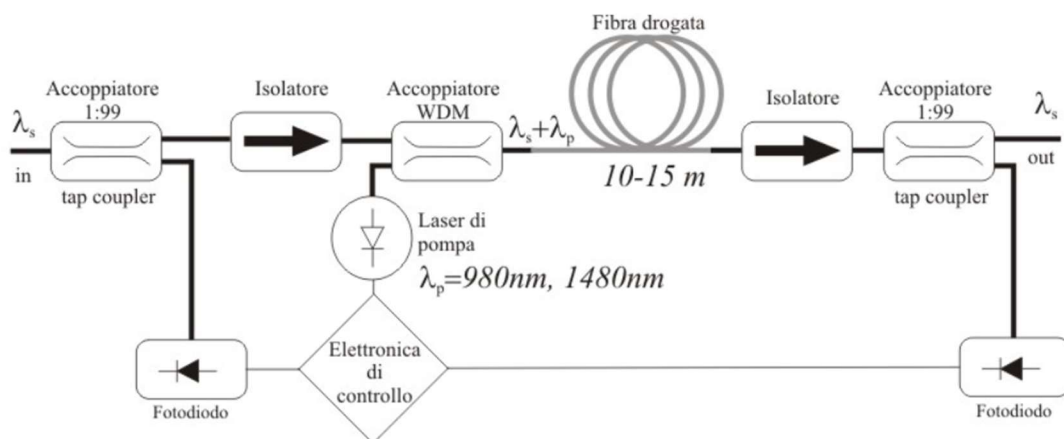


Figura 3.5 – Schema base EDFA [7]

- **Laser di Pompa:** È una fonte di radiazione coerente e rappresenta l'elemento cruciale per l'eccitazione degli ioni Er^{3+} da uno stato energetico fondamentale a stati energetici superiori. I laser di pompa più comunemente utilizzati lavorano a lunghezze d'onda di 980 nm o 1480 nm. La lunghezza d'onda di 980 nm è la più frequentemente utilizzata per la sua efficacia nel processo di pompaggio.
- **Accoppiatore WDM:** Questo componente serve per combinare il segnale ottico da amplificare e la potenza di pompa fornita dal laser in un'unica fibra. Gli accoppiatori WDM sono fondamentali per l'efficienza del sistema, poiché permettono il convogliamento di segnali a differenti lunghezze d'onda senza interferenze reciproche.
- **Isolatore Ottico:** È un dispositivo non reciproco che permette la propagazione della luce in una sola direzione, minimizzando così il ritorno di luce indesiderato e potenziali interferenze nel sistema. Gli isolatori sono essenziali per mantenere l'efficienza e la stabilità dell'amplificatore.
- **Elettronica di Controllo e Pilotaggio:** Questa parte del sistema tipicamente consiste di un generatore di corrente per alimentare il laser di pompa e un controllore di temperatura. Il controllore di temperatura ha il duplice scopo di prevenire danni termici al laser di pompa e di stabilizzare la lunghezza d'onda di emissione, che è sensibile alle variazioni di temperatura.
- **Fibra Drogata con Erblio:** È una fibra ottica che nel suo core contiene tracce di erblio. L'erbio è stato inserito in una matrice vetrosa, come la silice, dove forma legami fortemente polari e si trova nello stato ionico trivalente Er^{3+} . La densità tipica di erblio in questa configurazione è dell'ordine di 10^{25} ioni/m³.

Nella Figura 3.6 è illustrato il diagramma dei livelli energetici per lo ione d'erbio Er^{3+} . In questo diagramma, l'energia dei vari livelli è espressa in termini di lunghezza d'onda piuttosto che di energia assoluta. Il livello fondamentale è indicato come $^4\text{I}_{15/2}$, che è lo stato in cui si trovano solitamente gli atomi in condizioni naturali. Il livello $^4\text{I}_{13/2}$, invece, è noto come livello metastabile dove il tempo di vita medio di uno ione in tale livello è molto elevato rispetto a quello degli altri livelli.

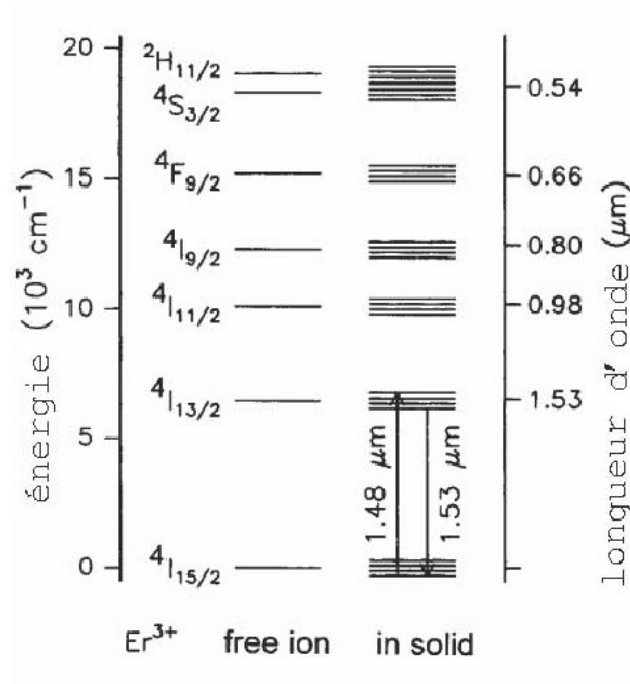


Figura 3.5 – Diagramma dei livelli per lo ione Er^{3+} [19]

Da questo diagramma si deduce che, per trasferire gli atomi dal loro stato fondamentale a uno degli stati energetici superiori, è necessario irradiare la fibra attiva con un segnale ottico la cui lunghezza d'onda corrisponda a quella del livello energetico target. Tale trasferimento è reso possibile dal fenomeno fisico dell'assorbimento, precedentemente citato; questa specifica transizione energetica si ottiene attraverso il pompaggio.

3.3.1 Meccanismo di amplificazione con pompaggio a 980 nm

Esamineremo questo meccanismo facendo riferimento al modello a tre stati rappresentato in Figura 3.6.

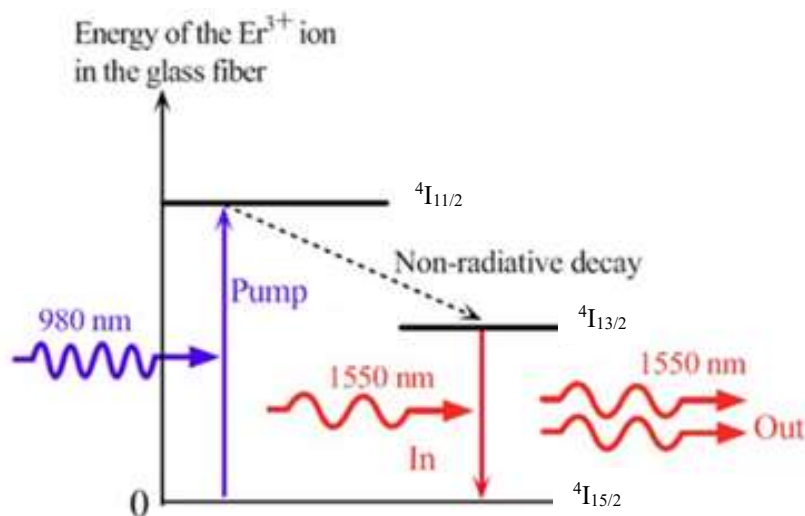


Figura 3.6 – Modello a tre stati con pompaggio a 980 nm [9]

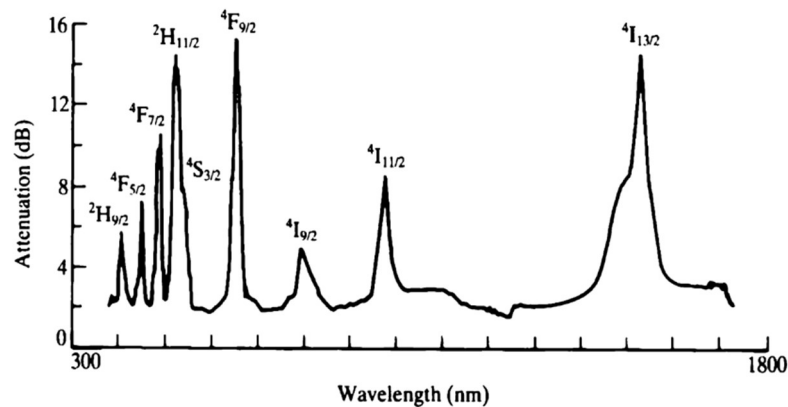


Figura 3.7 – Spettro di assorbimento per fibra al silicio drogata con erbio [10]

- **Pompaggio da $^4I_{15/2}$ a $^4I_{11/2}$ (Pompa a 980 nm):**

Il laser di pompa con lunghezza d'onda di 980 nm viene utilizzato per fornire l'energia necessaria a spostare gli ioni d'erbio dal loro stato fondamentale $^4I_{15/2}$ a un livello energetico superiore $^4I_{11/2}$. Questa transizione è molto efficiente grazie al coefficiente di assorbimento relativamente alto per questa lunghezza d'onda (Figura 3.7).

- **Transizione Non Radiativa da $^4I_{11/2}$ a $^4I_{13/2}$:**

Una volta che gli ioni raggiungono il livello $^4I_{11/2}$, decadono rapidamente al livello $^4I_{13/2}$ attraverso una transizione non radiativa. Questo significa che l'energia viene rilasciata in forma di fononi, cioè vibrazioni del reticolo che riscaldano il materiale, piuttosto che come emissione di fotoni. Questa transizione contribuisce ad una riduzione del guadagno.

- **Stazionamento in $^4I_{13/2}$ (Livello Metastabile):**

Gli ioni d'erbio raggiungono quindi il livello metastabile $^4I_{13/2}$, dove tendono a rimanere per un tempo di vita pari a circa 10 ms. Un tempo di vita così lungo consente di ottenere l'inversione di popolazione, dato che più ioni d'erbio si trovano nel livello $^4I_{13/2}$ rispetto al livello fondamentale $^4I_{15/2}$.

- **Emissione Stimolata da $^4I_{13/2}$ a $^4I_{15/2}$:**

Quando il segnale ottico da amplificare passa attraverso la fibra drogata, i suoi fotoni interagiscono con gli ioni d'erbio nel livello metastabile $^4I_{13/2}$. Questa interazione stimola l'emissione di fotoni aggiuntivi che sono coerenti con il segnale ottico in

ingresso. Gli ioni decadono quindi al livello $^4I_{15/2}$ attraverso l'emissione stimolata, rilasciando energia sotto forma di fotoni che amplificano il segnale originale.

3.4 Parametri fondamentali

I due parametri fondamentali che giocano un ruolo chiave nel determinare le prestazioni degli amplificatori ottici in fibra attiva sono il guadagno (G) e la cifra di rumore (F). Questi parametri influenzano direttamente sia l'efficacia dell'amplificazione del segnale che la qualità della trasmissione dati. Nel contesto di questo studio, andremo a mostrare grafici con pompaggio a 980 nm per esaminare in dettaglio questi aspetti.

3.4.1 Guadagno

Il guadagno è la quantità di amplificazione che un segnale ottico riceve mentre attraversa l'amplificatore e può essere espressa in decibel (dB).

La formula principale per calcolare il guadagno è:

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log_{10}(P_{\text{out}}/P_{\text{in}}) \quad (3.1)$$

La natura del guadagno può variare in base a diversi fattori, tra cui la lunghezza d'onda del segnale in ingresso, la potenza di pompaggio e le proprietà specifiche della fibra attiva utilizzata.

- **Guadagno in funzione della lunghezza d'onda del segnale in ingresso**

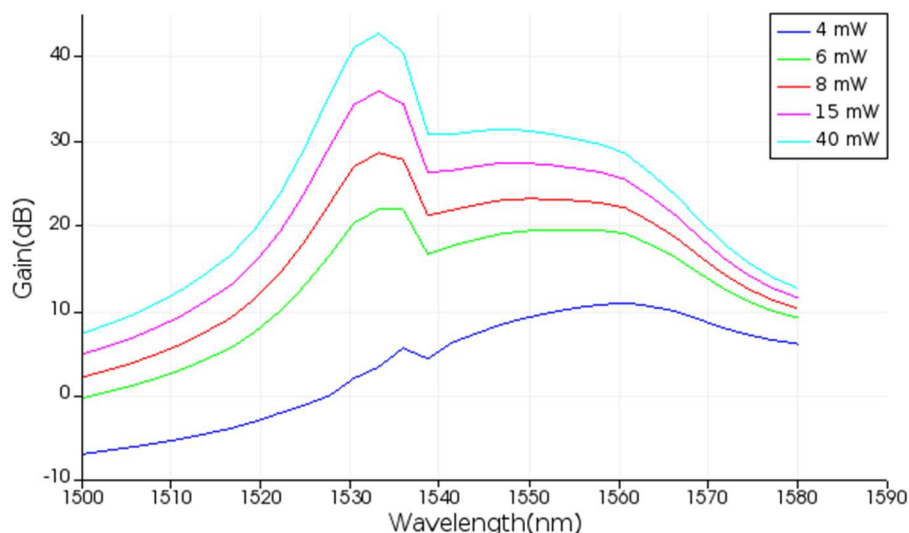


Figura 3.8 - Guadagno in funzione della lunghezza d'onda del segnale in ingresso (potenza del segnale in ingresso -40 dBm), per le potenze di pompa indicate e per una lunghezza di fibra drogata di 14 m [11]

Esaminando in dettaglio il grafico in Figura 3.8, si evidenzia che l'aumento della potenza della pompa porta a un incremento del guadagno complessivo dell'EDFA. È particolarmente rilevante osservare che, con una potenza di pompa di 40 mW, si ottiene non solo il guadagno massimo, ma anche una stabilità del guadagno nel range di lunghezze d'onda tra 1540 e 1550 nm. Questo specifico intervallo fa parte della terza finestra spettrale, che è fondamentale nelle applicazioni di telecomunicazioni ottiche. Questa caratteristica di stabilità del guadagno sarà di grande importanza per i sistemi WDM.

- **Guadagno in funzione della lunghezza della fibra drogata**

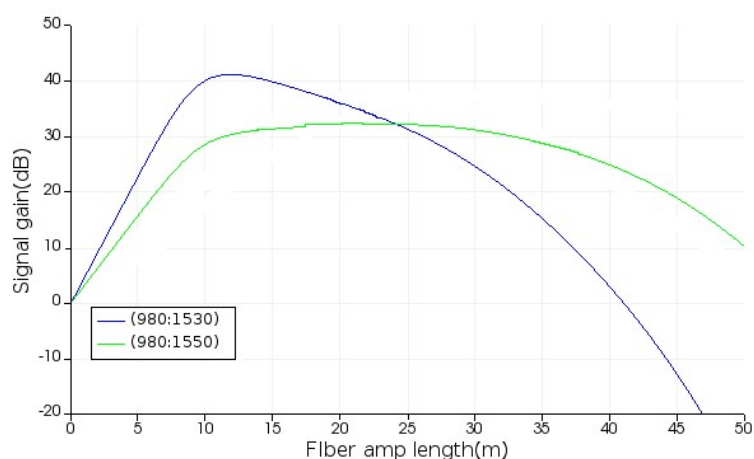


Figura 3.9 – Guadagno in funzione della lunghezza della fibra drogata con pompaggio a 980 nm, lunghezza d'onda del segnale in ingresso sia a 1530nm che a 1550nm. La potenza della pompa è di 40 mW e la potenza del segnale in ingresso è di -40 dBm [11]

Il grafico in Figura 3.9 offre un'analisi dettagliata del comportamento del guadagno, mettendo in luce come esso vari in funzione della lunghezza della fibra drogata. Con una potenza di pompaggio di 40 mW e lunghezze d'onda del segnale in ingresso a 1530 nm e 1550 nm, il grafico mostra un aumento iniziale del guadagno con l'estensione della fibra drogata. Questo è in linea con le aspettative, poiché una maggiore lunghezza di fibra permette una maggiore interazione tra il segnale e il mezzo amplificante, portando a un guadagno maggiore. Tuttavia, il grafico svela un aspetto cruciale: oltre una certa lunghezza della fibra drogata, il guadagno inizia a calare. Questa flessione è un chiaro indicatore della saturazione del guadagno, che si verifica quando la fibra ha assorbito tutta l'energia disponibile dalla pompa.

Questi dati suggeriscono che c'è una lunghezza "ottimale" della fibra drogata per massimizzare il guadagno.

- **Guadagno in funzione della potenza di ingresso**

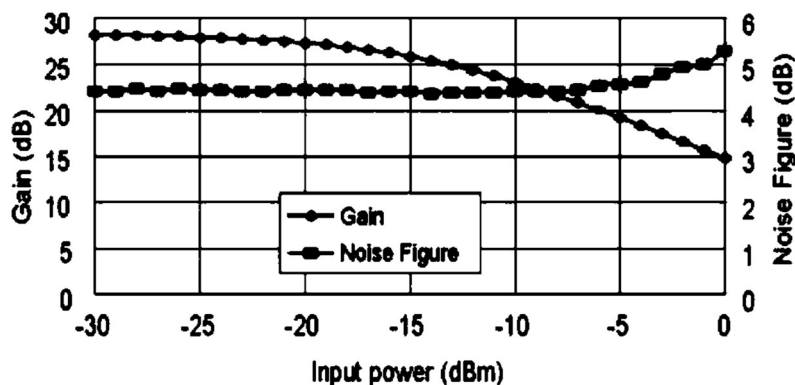


Figura 3.10 – Guadagno e figura di rumore in funzione della potenza di ingresso con pompaggio a 980 nm, lunghezza d’onda del segnale in ingresso a 1550 nm. La potenza della pompa è di 15 mW e la lunghezza di fibra drogata è di 14 m [18]

Analogamente a quanto osservato nel grafico del guadagno in relazione alla lunghezza della fibra drogata, il fenomeno di saturazione del guadagno è evidente anche nel grafico del guadagno in funzione della potenza d’ingresso (Figura 3.10). In questo caso, il guadagno si mantiene costante fino a raggiungere una potenza d’ingresso di -25 dBm. Oltre questo valore, il guadagno inizia a calare, indicando che l’amplificatore ha raggiunto la sua capacità massima di assorbire energia dalla pompa e segnalando, quindi, il punto di saturazione. Questa osservazione fornisce ulteriore conferma della necessità di gestire attentamente i parametri operativi per ottimizzare le prestazioni degli amplificatori EDFA.

3.4.2 Cifra di rumore

Gli amplificatori ottici sono componenti attivi caratterizzati da un intrinseco grado di rumorosità, legato direttamente al processo di pompaggio.

Durante questo processo, il laser di pompa fornisce l’energia necessaria per ottenere l’inversione di popolazione tra il livello fondamentale e quello metastabile dell’elemento drogante. Se da un lato il pompaggio è essenziale per favorire l’emissione stimolata e quindi l’amplificazione del segnale, esso conduce anche all’emissione spontanea. Quest’ultima, una volta amplificata, genera un fenomeno fisico, già citato in precedenza, noto come ASE, che introduce una componente di rumore incoerente nel segnale amplificato. Per quantificare la rumorosità di questi amplificatori, è comune utilizzare un parametro chiamato “cifra di rumore” (F). La definizione di F è particolarmente delicata in questo ambito, poiché il segnale ottico in ingresso, diversamente da quello dei sistemi a radiofrequenza, è tipicamente privo di disturbi.

Pertanto, F viene definito come il rapporto tra i rapporti segnale-rumore all'ingresso (SNR) e all'uscita dell'amplificatore ottico.

La cifra di rumore F può essere definita come [10] :

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} = 2 \cdot \eta_{sp} \quad (3.1)$$

Il minimo valore della cifra di rumore è $F = 3\text{dB}$, valore che si ottiene quando η_{sp} tende all'unità. Ciò avviene aumentando il fattore di inversione della popolazione, vale a dire quando $N_1 \approx 0$. Il valore del fattore di inversione della popolazione η_{sp} dipende ovviamente dal materiale drogante, ma anche dall'intensità e dalla lunghezza d'onda della radiazione di pompa. Nel caso della fibra drogata con erbio il valore di η_{sp} è molto prossimo a uno quando la lunghezza d'onda del laser di pompa è di 980nm, e quindi la cifra di rumore è prossima al valore minore. Una bassa cifra di rumore in un amplificatore indica che viene introdotto meno rumore nel segnale durante il processo di amplificazione. Questo è particolarmente vantaggioso per mantenere una elevata qualità del segnale. Una cifra di rumore bassa non solo migliora la sensibilità del sistema, ma anche rende la trasmissione dei dati più efficiente e affidabile, specialmente su lunghe distanze. In Figura 3.8 è illustrato l'andamento della cifra di rumore in funzione della potenza del laser di pompa, operante a una lunghezza d'onda di 980 nm. Da questo grafico, si evince la necessità di stabilire un limite inferiore alla potenza di pompa per ottimizzare le prestazioni.

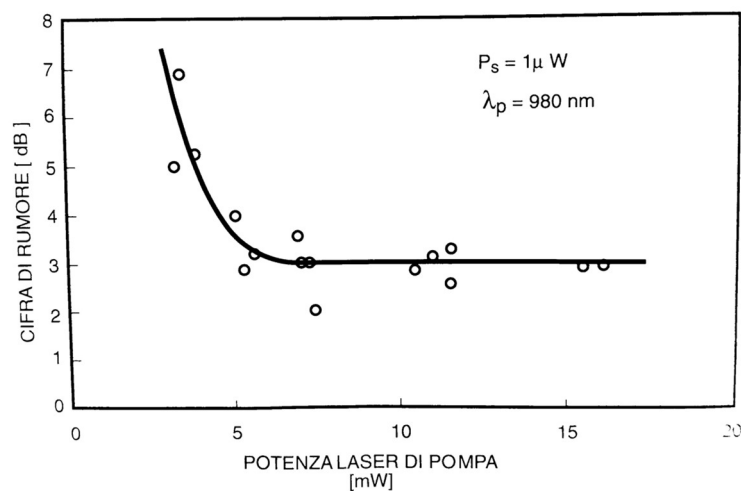


Figura 3.11 – Variazione della cifra di rumore in funzione della potenza del laser di pompa [5]

Capitolo 4

Analisi dell'amplificazione ottica

L'obiettivo principale di questo studio è fornire un'analisi e una previsione semplificata del comportamento di un amplificatore ottico realizzato mediante l'uso di fibra attiva. Le variabili operative chiave esaminate in questo contesto includono il guadagno dell'amplificatore, la potenza in ingresso e la potenza in uscita. Un aspetto critico da sottolineare è che la presente analisi è effettuata sotto l'assunzione di una dispersione temporale ($\sigma_F = 0$) trascurabile all'interno della fibra.

Le teorie e i principi fisici che costituiscono la base del modello in esame sono stati adattati e sviluppati dal materiale contenuto nella referenza bibliografica [2].

4.1 Relazioni dell'emissione stimolata

È noto che in una fibra ottica passiva l'**attenuazione** risulta

$$A_F = e^{-\alpha L} \quad (4.1)$$

dove L è la lunghezza della fibra e α una quantità caratteristica del tipo di fibra (ad una certa frequenza). Il significato di A_F si ottiene scrivendo la relazione fra la potenza di uscita $P_R(t)$ e la potenza incidente $P_T(t)$ in una fibra ottica passiva

$$P_R(t) = A_F \cdot P_T(t) \quad (4.2)$$

Una delle principali cause dell'attenuazione in una fibra ottica è l'assorbimento, che determina una riduzione nel flusso di fotoni propaganti all'interno del mezzo. Per formalizzare questa osservazione, consideriamo un piccolo segmento di fibra di lunghezza Δx . Supponiamo che questo segmento sia responsabile di un assorbimento di potenza pari a $\alpha \cdot \Delta x$, cioè proporzionale alla sua lunghezza secondo un coefficiente α caratteristico della fibra, definito come coefficiente di assorbimento. Indicata con $P(x)$ la potenza ottica alla coordinata x , si ha che

$$P(x + \Delta x) = P(x) - \alpha \cdot \Delta x \cdot P(x) \quad (4.3)$$

da cui, riordinando i termini, si ottiene

$$\frac{dP(x)}{dx} = -\alpha \cdot P(x) \quad (4.4)$$

che porta alla relazione

$$P(x) = P(0) \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad (4.5)$$

che applicata all'intera fibra ($x = L$) è equivalente alla (4.2) con la posizione (4.1). È importante sottolineare che abbiamo assunto α come costante rispetto alla coordinata x . Questa assunzione è generalmente valida nel caso in cui la fibra sia omogenea lungo tale direzione spaziale. In una fibra ottica drogata si hanno contemporaneamente emissione ed assorbimento stimolati. Per quanto riguarda l'assorbimento, l'analisi precedente rimane valida e l'attenuazione associata è ancora descritta dall'Equazione (4.1). Per l'emissione stimolata, invece, si derivano relazioni simili che, tuttavia, implicano un aumento della potenza del segnale. Supponendo che l'emissione in un segmento infinitesimale della fibra sia proporzionale alla sua lunghezza attraverso un coefficiente specifico γ , definito come coefficiente di emissione, si può derivare la seguente relazione:

$$P(x) = P(0) \cdot e^{\gamma \cdot x} \quad (4.6)$$

e quindi per l'intera fibra di lunghezza L si ha un **guadagno** pari a

$$G_F = e^{\gamma \cdot L} \quad (4.7)$$

In realtà i due fenomeni sono sempre combinati, per cui la relazione fra la potenza di ingresso $P(t)$ e la potenza di uscita $P_A(t)$ in una fibra ottica attiva risulta

$$P_A(t) = A_F \cdot G_F \cdot P(t) = G_A \cdot P(t) \quad (4.8)$$

dove

$$G_A = A_F \cdot G_F = e^{(\gamma - \alpha) \cdot L} \quad (4.9)$$

rappresenta il **guadagno netto** della fibra drogata.

4.2 Relazioni dell'emissione spontanea

Come anticipato nei paragrafi precedenti, gli elettroni promossi allo stato eccitato possono ricadere nello stato fondamentale anche in modo spontaneo, ovvero senza l'interazione di fotoni iniettati nella fibra (fotoni di segnale), in maniera indipendente dalle transizioni stimolate appena analizzate. L'emissione spontanea genera quindi fotoni che, dal punto in cui sono emessi, subiscono gli stessi processi dei fotoni di segnale e, di conseguenza, vengono amplificati. I fotoni prodotti dall'emissione spontanea contribuiscono a un rumore che si sovrappone al segnale originale dei fotoni incidenti.

Considerando queste dinamiche, l'equazione (4.9) necessita di una riformulazione come segue:

$$P_A(t) = G_A \cdot P(t) + P_O \quad (4.10)$$

dove P_0 è la potenza dovuta all'emissione spontanea che è sempre intrinsecamente associata all'emissione stimolata.

La determinazione esatta di P_0 implicherebbe un'analisi approfondita dei meccanismi fisici coinvolti, un'indagine che va oltre gli obiettivi di questa tesi; pertanto, in questo lavoro assumeremo P_0 come un dato fornito.

4.3 Modello dell'amplificatore ai valori medi

Si consideri una potenza media $P(t)$ di tipo monocromatico applicata all'ingresso dell'amplificatore. All'uscita si ottiene la seguente potenza media

$$P_u = G_A \cdot P(t - t_0) + P_0 \quad (4.11)$$

dove

- G_A è il guadagno netto dell'amplificatore,
- t_0 è il ritardo dovuto alla velocità finita di propagazione nel tratto della di fibra attiva
- P_0 è la potenza media dovuta all'emissione spontanea.

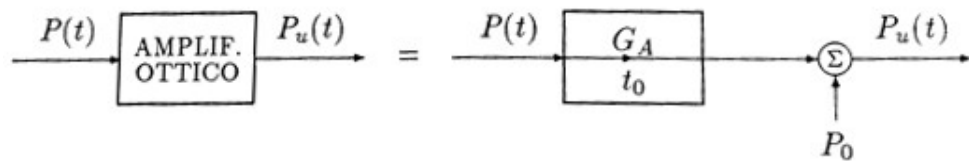


Figura 4.1 – Modello equivalente dell'amplificatore ottico ai valori medi

4.3.1 Applicazione del modello a sistemi di trasmissione

Applichiamo il modello matematico appena citato per esaminare un semplice sistema di comunicazione composto da un laser che alimenta una fibra ottica passiva con un amplificatore ottico alla fine (Figura 4.2). Il segnale di informazione $s(t)$ viene affidato alla potenza ottica media.

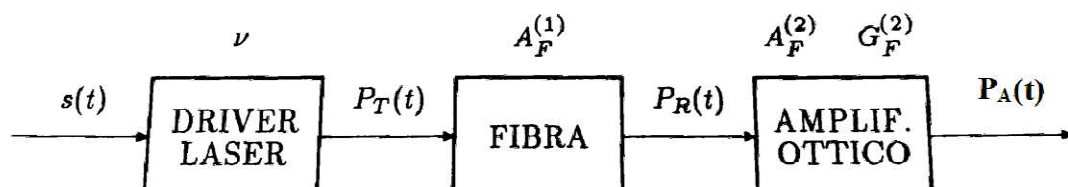


Figura 4.2 – Sistema di trasmissione con amplificazione ottica finale

I parametri essenziali del sistema sono

- la frequenza ν della radiazione emessa dal laser, che specifica anche le prestazioni della fibra e dell'amplificatore;
- l'attenuazione globale della fibra $A_F^{(1)}$;
- l'attenuazione $A_F^{(2)}$ e il guadagno di emissione $G_F^{(2)}$ dell'amplificatore ottico;
- la potenza media dovuta all'emissione P_O .

Sia $P_T(t)$ la potenza ottica media iniettata in fibra del laser. Trascurando la dispersione temporale della fibra, la potenza ottica media alla fine della fibra si calcola in base alla (3.3), cioè

$$P_R(t) = A_F^{(1)} \cdot P_T(t) \quad , \quad A_F^{(1)} = e^{-\alpha_1 D_1} \quad (4.12)$$

dove α_1 è il coefficiente di assorbimento della fibra e D_1 è la lunghezza della fibra.

Per l'amplificatore si può utilizzare la (3.11), che da

$$P_A(t) = G_A^{(2)} \cdot P_R(t) + P_O \quad (4.13)$$

dove $P_A(t)$ è la potenza media all'uscita dell'amplificatore, $G_A^{(2)} = G_F^{(2)} \cdot A_F^{(2)}$ è il guadagno netto dell'amplificatore.

Si ha quindi la relazione globale

$$P_A(t) = G_A^{(2)} \cdot A_F^{(1)} \cdot P_T(t) + P_O \quad (4.14)$$

La condizione ottimale in cui l'**amplificatore compensa esattamente** le perdite introdotte dalla tratta in fibra è che $G_A^{(2)} \cdot A_F^{(1)} = 1$

Questo tipo di sistema è adatto per distanze brevi. Per coprire distanze maggiori, è necessario inserire una successione di blocchi composti da fibra e amplificatori in cascata come in Figura 4.3 (assumiamo che tutti i blocchi siano uguali fra loro).

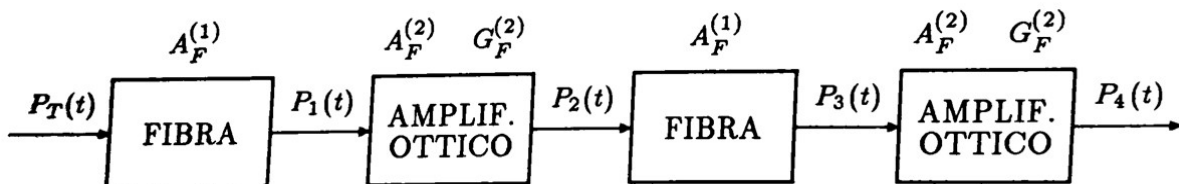


Figura 4.3 – Linea amplificata otticamente con amplificatori e fibre uguali

In questo contesto, ogni amplificatore andrà progettato per compensare esattamente le perdite introdotte dalla tratta in fibra che lo precede.

4.3.2 Esempio

Applichiamo ora la teoria dell'evoluzione del segnale per l'analisi di un collegamento in fibra ottica realizzato per coprire una distanza $D_T = 6000\text{km}$ (collegamento attraverso l'Atlantico) [2]. Si supponga dapprima che il collegamento sia effettuato in terza finestra, ad una $\lambda = 1550\text{ nm}$ con tratte di fibra tutte uguali, con dispersione temporale trascurabile ($\sigma_F = 0$) e attenuazione chilometrica $A_{F1} = 0.2\text{dB/km}$. Gli amplificatori a disposizione sono caratterizzati da un coefficiente di emissione $\gamma = 0.7\text{ m}^{-1}$, un coefficiente di assorbimento $\alpha = 0.47\text{ m}^{-1}$ e da una lunghezza $L = 30\text{m}$.

Si vuole calcolare il numero e la distanza a cui devono essere interposti gli amplificatori da impiegare nel collegamento per compensare esattamente le perdite dei tratti di fibre che li precedono.

Il numero di amplificatori che vengono impiegati nel collegamento è funzione del loro guadagno che vale

$$G_A = e^{(\gamma - \alpha) \cdot L} = 992.275$$

$$(G_A)\text{dB} \cong 30\text{dB}$$

e pertanto, poiché si vuole che ogni amplificatore compensi esattamente le perdite delle fibre interposte, si impone che ogni fibra ha una attenuazione $A_F = 30\text{dB}$ (pari al guadagno dell'amplificatore) e quindi la distanza tra gli amplificatori è

$$D = \frac{A_F}{A_{F1}} = 150\text{ km}$$

E il numero di amplificatori impiegati nel collegamento è quindi

$$K = \frac{D_T}{D} = 40 .$$

Capitolo 5

Amplificatori ottici in sistemi di comunicazione

5.1 Introduzione ai sistemi WDM e DWDM

La tecnologia del Wavelength Division Multiplexing (WDM) ha rivoluzionato il campo delle comunicazioni ottiche. Questa tecnologia consente di trasmettere vari segnali ottici attraverso una singola fibra ottica, sfruttando diverse lunghezze d'onda per ciascun segnale. Questo processo aumenta notevolmente la capacità di trasporto di dati, rendendo le reti più efficienti e facilmente scalabili. In tali sistemi, segnali provenienti da diverse fonti vengono combinati insieme da un dispositivo noto come multiplexer. Una volta combinati, questi segnali percorrono una fibra ottica fino al punto di ricezione, dove un demultiplexer li separa e li dirige verso le rispettive destinazioni (Figura 5.1).

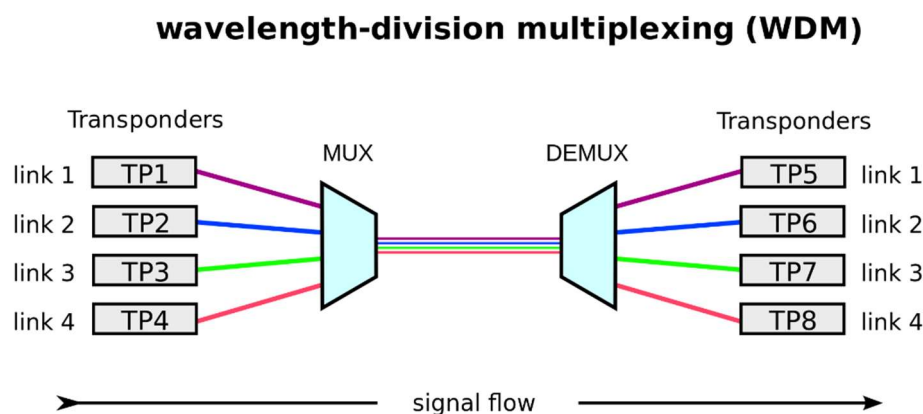


Figura 5.1 – Principio di funzionamento del WDM [12]

Uno degli aspetti più interessanti del WDM è la sua versatilità. Può essere utilizzato in una varietà di applicazioni, dall'accesso alla rete fino ai collegamenti di infrastrutture principali. Inoltre, consente un facile aggiornamento delle infrastrutture di rete esistenti, poiché è possibile aggiungere nuovi canali semplicemente installando ulteriori lunghezze d'onda, senza necessità di posare nuove fibre.

Sebbene il WDM abbia avuto un impatto significativo sulle comunicazioni ottiche, la tecnologia ha continuato a evolversi dando vita al Dense Wavelength Division Multiplexing (DWDM). Il DWDM è essenzialmente una versione "densa" del WDM, con canali più strettamente spazati sulla stessa fibra. Ciò consente un numero maggiore di lunghezze d'onda da utilizzare, aumentando ulteriormente la capacità di trasmissione dei dati.

Un contributo fondamentale all'efficacia e all'adozione del DWDM viene dagli EDFA, i quali, come dettagliato nei capitoli precedenti, operano con efficienza massima intorno alla terza finestra spettrale. Questo range spettrale si allinea perfettamente con le esigenze operative del DWDM. Per questo motivo gli EDFA sono integrati nei sistemi DWDM per amplificare simultaneamente più canali senza degrado del segnale, rendendo questa tecnologia ideale per comunicazioni a lungo raggio.

5.2 Applicazione degli amplificatori ottici ai sistemi DWDM

La Figura 5.2 illustra l'integrazione degli amplificatori ottici in un sistema DWDM per migliorare la trasmissione del segnale attraverso lunghe distanze. Esistono diverse categorie di amplificatori ottici, ognuna con un ruolo specifico all'interno della rete, e tutte condividono l'essenziale necessità di fornire un elevato guadagno e prestazioni ottimali in termini di rumore.

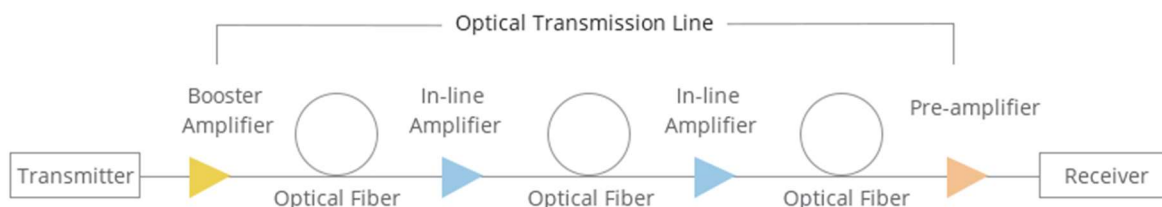


Figura 5.2 – Linea di trasmissione ottica [13]

- **Amplificatore di Booster**

Un amplificatore booster opera sul lato di trasmissione di un collegamento in fibra ottica e ha il compito di intensificare i segnali in uscita dal trasmettitore, portandoli al livello di potenza necessario per essere efficacemente trasmessi attraverso la fibra. Mentre in alcuni collegamenti a canale singolo questo tipo di amplificatore potrebbe non essere strettamente necessario, esso diventa un componente chiave nelle configurazioni DWDM. Questo perché il multiplexer in tali sistemi tende a attenuare i canali di segnale, rendendo quindi indispensabile un potenziamento successivo. L'amplificatore booster si caratterizza per la sua elevata potenza sia in ingresso che in uscita, con un guadagno ottico in una gamma operativa standard. Tra i modelli più diffusi, troviamo gli amplificatori EDFA con una potenza di uscita di 20dBm e un guadagno di 26dB nella terza finestra spettrale a 40 canali, oppure quelli con una potenza di uscita di 16dBm e un guadagno di 14dB, sempre nella terza finestra spettrale a 40 canali.

- **Amplificatore In Linea (In-line Amplifier)**

Un amplificatore in linea viene solitamente inserito in posizioni intermedie lungo un percorso di comunicazione. Questo è particolarmente frequente nelle reti a media e lunga distanza, come quelle sottomarine. L'amplificatore è specificamente progettato per potenziare il segnale ottico tra due nodi di rete e viene collocato a intervalli di 80-100 km per assicurare che il livello del segnale rimanga superiore al rumore di fondo. Le caratteristiche tipiche includono una potenza di ingresso da media a bassa, una potenza di uscita elevata, un guadagno ottico considerevole e una cifra di rumore ridotta.

- **Pre-Amplificatore**

Un pre-amplificatore EDFA viene collocato immediatamente prima del nodo ricevente nel sistema DWDM, il suo compito è quello di incrementare la potenza del segnale prima che questo raggiunga il foto-rivelatore in un impianto di trasmissione a lungo raggio. Ciò contribuisce a migliorare significativamente la sensibilità di ricezione. Tipicamente, il dispositivo presenta una potenza d'ingresso relativamente bassa, una potenza d'uscita di livello intermedio e un guadagno ottico medio.

5.3 Amplificatori Ottici in un Collegamento Transatlantico

I collegamenti transatlantici costituiscono una delle infrastrutture più essenziali e complesse nel settore delle telecomunicazioni globali. Queste reti sottomarine uniscono non solo continenti diversi, facilitando la trasmissione rapida di volumi massicci di dati, ma lo fanno anche in condizioni particolarmente ardue. Affrontano sfide uniche come la profondità abissale dei fondali marini, la necessità di estendere la copertura per migliaia di chilometri e l'obbligo di mantenere un segnale ottico di alta qualità lungo l'intero tragitto.

Contrariamente a un diffuso malinteso, che attribuisce ai satelliti il ruolo di principali conduttori di dati intercontinentali, la realtà è ben diversa. I satelliti, infatti, gestiscono solo una frazione minima del flusso totale di dati. Le vere "autostrade dell'informazione" sono i cavi sottomarini, che operano in silenzio a centinaia o addirittura migliaia di metri sotto la superficie degli oceani mondiali. Senza queste reti, l'internet globale su cui tutti noi contiamo quotidianamente per scopi sia personali che professionali sarebbe semplicemente inesistente [14].

Il primo collegamento transatlantico in fibra ottica è stato il TAT-8, costruito nel 1988 e dismesso nel 2002. Prima di esso, la comunicazione transatlantica avveniva tramite cavi coassiali. Il TAT-8 aveva una lunghezza totale di circa 5.633 km e collegava gli Stati Uniti con il Regno Unito e la Francia. Questo sistema utilizzava la tecnologia rigenerativa, operante a una lunghezza d'onda di 1.310 nm e con una velocità di linea di 240 Mbit/s. Ogni 30 km lungo il

cavo, era posizionato un ripetitore elettronico, composto da un fotorivelatore all'ingresso e tre laser a semiconduttore all'uscita, di cui uno era attivo e due erano di scorta "calda", pronti a subentrare in caso di guasto. Questi componenti erano contenuti in un guscio resistente alla pressione degli abissi oceanici, con un costo finale per ciascun ripetitore di circa un miliardo di lire dell'epoca.

Tuttavia, questa configurazione è stata completamente rivoluzionata nei sistemi successivi, grazie all'introduzione degli amplificatori ottici EDFA. La prima rete transatlantica in fibra ottica a beneficiare di questa tecnologia di amplificazione è stato il TAT-12/13, costruito nel 1996 e dismesso nel 2008. Questa rete, pensata per fornire un sistema di telecomunicazioni tra gli Stati Uniti e l'Europa, era configurata come un sistema ad anello. Funzionando a una singola lunghezza d'onda di 1550 nm, il sistema era in grado di gestire una capacità iniziale di 2×5 Gbit/s. Ciò significava che il sistema aveva due canali separati, ciascuno con una capacità di 5 Gbit/s, e che i dati potevano essere inviati in entrambe le direzioni lungo l'anello. Questa struttura offriva significativi vantaggi in termini di ridondanza e affidabilità. Se un segmento del cavo avesse subito danni o malfunzionamenti, il traffico poteva essere reindirizzato attraverso altre sezioni dell'anello, garantendo così una maggiore resilienza del sistema.

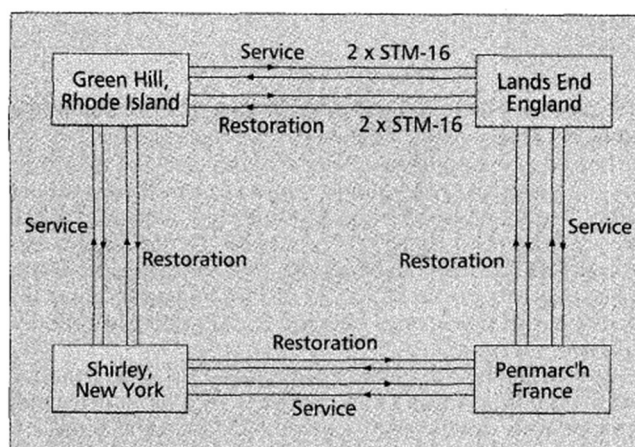


Figura 5.4 – Configurazione di rete TAT-12/13 [15]

Il sistema ad anello del TAT-12/13 era formato da quattro segmenti di cavi sottomarini in fibra ottica come illustrato in Figura 5.4 .

- Segmento 1: tra Green Hill (USA) e Lands End (Inghilterra), con una lunghezza di 5.913 km e 133 amplificatori EDFA spazati di 45 km.
- Segmento 2: tra Lands End e Penmarc'h (Francia), con una lunghezza di 370 km e 4 amplificatori EDFA spazati di 74 km.

- Segmento 3: tra Shirley (New York) e Green Hill, con una lunghezza di 162 km e senza amplificatori.
- Segmento 4: tra Penmarc'h e Shirley, con una lunghezza di 6.321 km e 140 amplificatori

"É evidente che l'introduzione degli amplificatori ottici EDFA ha rappresentato un momento cruciale, trasformando radicalmente il panorama delle telecomunicazioni sottomarine. Si può tranquillamente affermare che senza lo sviluppo dell'amplificatore ottico sarebbe inconcepibile l'architettura odierna dell'infrastruttura planetaria su cui fluisce - a costi modestissimi e senza che l'utente se ne renda conto - tutto il traffico Internet [16].

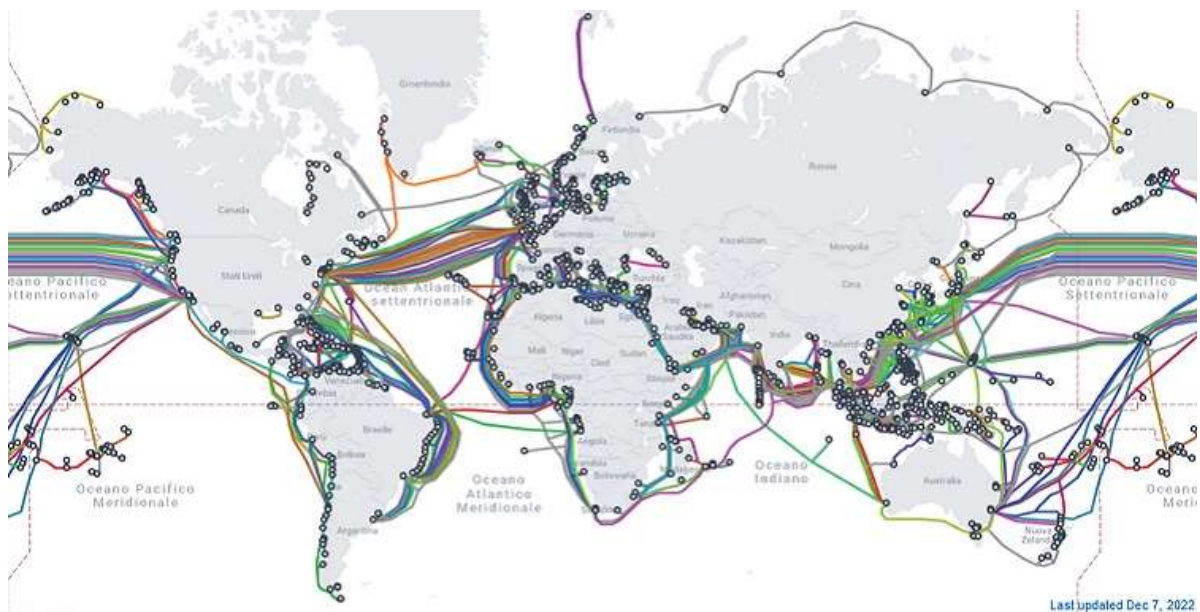


Figura 5.5 Mappa cavi sottomarini rete Internet anno 2022 [17]

La Figura 5.5 mostra la complessità delle attuali reti sottomarine, che si estendono per 1,3 milioni di chilometri sui fondali marini, rappresentando l'ossatura dell'infrastruttura globale di Internet. Grazie all'adozione di tecnologie avanzate come EDFA e DWDM, queste reti hanno raggiunto livelli di efficienza senza precedenti, gestendo flussi di dati ad elevate velocità e grandi volumi. Questi progressi tecnologici evidenziano l'importanza critica di queste "autostrade sottomarine" nel contesto mondiale.

Capitolo 6

Conclusioni

Alla luce degli argomenti trattati sopra, possiamo fissare i seguenti vantaggi degli amplificatori ottici EDFA :

- **Guadagno Elevato:** Offrono un guadagno significativo che varia generalmente tra 30 e 40 dB, superando altri tipi di amplificatori. Inoltre, alcuni modelli avanzati possono raggiungere un guadagno eccezionale superiore a 50 dB.
- **Bassa Figura di Rumore:** Si distinguono per la loro bassa figura di rumore, il che li rende una scelta preferita per applicazioni a lungo raggio. In particolare, abbiamo osservato che un pompaggio a 980 nm combinato con un segnale di ingresso a 1550 nm produce una cifra di rumore estremamente bassa, pari a circa 3 dB.
- **Facilità di Implementazione:** Sono relativamente più semplici da implementare e più economici rispetto ad altre tecnologie di amplificazione.
- **Compatibilità con DWDM:** Operano nella banda di lunghezze d'onda ottimali per la comunicazione in fibra ottica, tra 1500 e 1600 nm, che è anche la regione con le perdite più basse. Questa compatibilità spettrale li rende ideali per l'integrazione nei sistemi DWDM, dove possono amplificare simultaneamente più canali senza degradare la qualità del segnale.
- **Stabilità Operativa:** Sono noti per la loro stabilità a lungo termine, che è cruciale per applicazioni che richiedono un funzionamento continuo e affidabile.

D'altra parte, gli EDFA presentano alcuni svantaggi:

- **Introduzione di Rumore:** Sebbene gli EDFA siano noti per la loro bassa figura di rumore, l'amplificazione del segnale introduce comunque un certo livello di rumore amplificato spontaneo (ASE, Amplified Spontaneous Emission), che può essere problematico in scenari che richiedono un elevato rapporto segnale/rumore.
- **Non Compensa la Dispersione:** A differenza di alcune altre tecnologie di amplificazione o di compensazione, gli EDFA non hanno la capacità di compensare la dispersione cromatica, un fenomeno che può degradare la qualità del segnale su lunghe distanze. Questo significa che in molte applicazioni, dispositivi aggiuntivi di compensazione della dispersione potrebbero essere necessari.
- **Dimensioni:** Tendono ad essere più grandi rispetto ad altri tipi di amplificatori.

n conclusione, sebbene gli amplificatori EDFA abbiano sia vantaggi che limitazioni, il loro ruolo è fondamentale per superare le sfide di distanza e capacità nelle moderne reti di comunicazione ottica. "Guardando al futuro, appare evidente che l'ottimizzazione continua degli EDFA e la loro adattabilità alle nuove tecnologie di rete rappresenteranno campi di ricerca fondamentali per sostenere l'espansione e l'efficienza delle comunicazioni ottiche su scala globale..

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. K. Thyagarajan, Ajoy Ghatak, “Fiber Optic Essentials”, John Wiley & Sons, 2007.
2. G. Cariolaro, G. Pierobon, “L’amplificazione ottica”, Edizioni Libreria Progetto, 1992.
3. Cristiano Alivernini, Titolo : “Trasmissioni ottiche: dalla fibra ottica al «light fidelity»” [Tesi di laurea]. Selinus University of Sciences and Literature, 2019.
4. Emissione spontanea. Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 18 settembre 2023 da https://it.wikipedia.org/wiki/Emissione_spontanea
5. Guido Paladin, Gaetano Vespasiano, “COLLEGAMENTI IN FIBRA OTTICA”, Scuola Superiore G. Reiss Romoli, 1992.
6. Fibre Ottiche. Vincenzo Villa. Tratto il 18 settembre 2023 da <https://www.vincenzov.net/tutorial/elettronica-di-base/Trasmissioni/fibra.htm>
7. EDFA.jpg. Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari. Tratto il 18 settembre 2023 da <https://web.ing.unimo.it/wiki/index.php/File:EDFA.jpg>
8. Macella Andrea, Titolo : “FIBRE OTTICHE” [Tesi di laurea]. Università degli Studi di Lecce, 2002/2003.
9. S. O. Kasap, “Principles of Electronic Materials and Devices”, McGraw-Hill, 2005.
10. Emmanuel Desurvire, “Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications”, Wiley-Interscience, 1° Edizione, 19 Aprile 1994
11. Erbium doped fiber amplifier. Ansys – Lumerical. Tratto il 18 settembre 2023 da <http://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360042819353-Erbium-doped-fiber-amplifier>
12. Wavelength Division Multiplexing. Wikipedia, L'enciclopedia libera. Tratto il 18 settembre 2023 da https://it.wikipedia.org/wiki/Wavelength_Division_Multiplexing#

13. Amplificatore attico-EDFA (Erbium-doped Fiber Amplifier) per sistema WDM. Comunità FS. Tratto il 18 settembre da <https://community.fs.com/it/blog/erbium-doped-fiber-amplifier-edfa.html>
14. What is submarine networking. ciena. Tratto il 18 settembre 2023 da <https://www.ciena.com/insights/what-is/What-is-submarine-networking.html>
15. P. Trischitta, M. Colas, M. Green, G. Wuzniak and J. Arena, "The TAT-12/13 Cable Network," in IEEE Communications Magazine, vol. 34, no. 2, pp. 24-28, Feb. 1996, doi: 10.1109/35.481240.
16. Carlo Giacomo Someda, Marco Santagiustina. Le fibre ottiche nelle telecomunicazioni: le ragioni e i tempi di un successo. Tratto il 18 settembre 2023 da <https://www.ilnuovosaggiatore.sif.it/article/25>
17. Alessandro Rettori. Cavi sottomarini. Big Tech aumenta il controllo su Internet. Tratto il 18 settembre 2023 da <http://rivistapaginauno.it/cavi-sottomarini-big-tech-aumenta-il-controllo-su-internet/>
18. A. Cucinotta. Amplificatori ottici per sistemi WDM. Tratto il 18 settembre 2023 da <http://gaem.tlc.unipr.it/gestione/userfiles/File/Cucinotta/EDFAs.pdf>
19. Emilie Steveler. Figure 1-3. Tratto il 18 settembre 2023 da https://www.researchgate.net/figure/3-Diagramme-denergie-de-lion-Er-3-libre-et-dans-une-matrice-solide-Lorsque-lion_fig2_281602766