



# UNIVERSITÀ DI PARMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA ELETTRONICA  
E DELLE TELECOMUNICAZIONI

## ANALISI DEL GUADAGNO DI AMPLIFICATORI OTTICI IN FIBRA DROGATA CON ERBIO

GAIN ANALYSIS OF ERBIUM DOPED  
FIBER AMPLIFIERS

**Relatrice:**

**Chiar.ma Prof.ssa Annamaria Cucinotta**

**Laureando:**

**Francesco Carpanini**

ANNO ACCADEMICO 2021/2022



*Dedica*



**ANALISI DEL GUADAGNO DI  
AMPLIFICATORI OTTICI IN FIBRA  
DROGATA CON ERBIO**

# Tabella dei Contenuti

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 Amplificatori ottici</b>	<b>3</b>
1.1 Amplificatori di segnale . . . . .	3
1.2 Amplificatori ottici . . . . .	6
1.3 EDFA . . . . .	7
1.4 Funzionamento di un EDFA . . . . .	11
1.5 Caratteristiche di un EDFA . . . . .	12
<b>2 Analisi EDFA</b>	<b>15</b>
2.1 Funzionamento generale del toolbox . . . . .	15
2.1.1 Le equazioni differenziali di un EDFA . . . . .	15
2.1.2 Risoluzione delle equazioni differenziali . . . . .	18
2.1.3 Grandezze in ingresso e grandezze in uscita . . . . .	18
2.2 Nurfen EDFC-980-HP . . . . .	20
2.2.1 Laser di pompa a 980 [nm] . . . . .	20
2.2.1.1 Analisi del guadagno con 10 [m] di EDF . . . . .	20
2.2.1.2 Analisi del guadagno con 20 [m] di EDF . . . . .	23
2.2.1.3 Analisi ASE con 10 [m] di EDF . . . . .	28
2.2.1.4 Analisi ASE con 20 [m] di EDF . . . . .	30
2.2.2 Laser di pompa a 1480 [nm] . . . . .	32
2.2.2.1 Analisi del guadagno con 10 [m] di EDF . . . . .	33
2.2.2.2 Analisi del guadagno con 20 [m] di EDF . . . . .	34
2.2.3 Confronto . . . . .	35

2.2.4	Caso ideale . . . . .	39
2.3	Fibra non commerciale . . . . .	40
2.3.1	Pompaggio a 1460 [nm] . . . . .	41
2.3.2	Pompaggio backward . . . . .	44
2.4	Fibra ad alto drogaggio . . . . .	47
2.4.1	Pompaggio a 980 [nm] . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Esperienza in laboratorio</b>	<b>52</b>
	<b>Conclusione</b>	<b>56</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>57</b>
	<b>Ringraziamenti</b>	<b>59</b>

# Elenco delle figure

1.1	Coefficiente di attenuazione ( $\alpha$ ) di una fibra ottica in ossido di silicio in funzione della lunghezza d'onda di segnale $\lambda$ . . . . .	4
1.2	Distribuzione delle dorsali oceaniche: cavi sottomarini in fibra ottica che permettono lo scambio di dati tra i diversi continenti.	5
1.3	Schema di un amplificatore optoelettronico. . . . .	5
1.4	Atomo di erbio. . . . .	8
1.5	Livelli energetici dello ione $Er^{3+}$ . . . . .	9
1.6	Diagramma dei livelli energetici corrispondenti ai primi 3 livelli dello ione erbio $Er^{3+}$ in un <i>glass host</i> . Vengono rappresentate anche tutte le possibili transizioni. . . . .	10
1.7	Schema di un <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> . . . . .	11
1.8	Funzionamento di un <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> . . . . .	13
2.1	<i>Cross-section</i> di emissione e di assorbimento di una fibra ottica drogata con erbio. . . . .	17
2.2	<i>Data-sheet</i> di una <i>C-Band Erbium Doped, Single Mode, Fiber</i> della <i>Nurfen</i> . . . . .	21
2.3	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m]. . . . .	23
2.4	Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra: $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m]. . . . .	24
2.5	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 20$ [m]. . . . .	25

2.6	Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra: $P_p = 100$ [mW] e $L = 20$ [m]. . . . .	26
2.7	Guadagno con tratti di fibra di diverse lunghezze. $L = 10$ [m] e $L = 20$ [m]. . . . .	26
2.8	Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa. $P_s =$ 0.03 [mW] e $L = 20$ [m]. . . . .	27
2.9	Analisi spettrale di una fibra drogata con erbio in cui viaggiano: $P_p$ a 1480 [nm] e $P_s$ a 1550 [nm]. . . . .	29
2.10	Emissione spontanea amplificata sia in direzione <i>forward</i> sia in direzione <i>backward</i> al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m.] . . . . .	30
2.11	Emissione spontanea amplificata sia in direzione <i>forward</i> sia in direzione <i>backward</i> al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 20$ [m.] . . . . .	31
2.12	Emissione spontanea amplificata sia in direzione <i>forward</i> sia in direzione <i>backward</i> al variare della potenza di pompa. $P_s = 0.03$ [mW] e $L = 20$ [m.] . . . . .	31
2.13	<i>Cross-section</i> di emissione e di assorbimento complete. . . . .	32
2.14	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in in- gresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m]. . . . .	33
2.15	Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra. $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m]. . . . .	34
2.16	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in in- gresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 20$ [m]. . . . .	34
2.17	Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa. $P_s =$ 0.03 [mW] e $L = 20$ [m]. . . . .	35
2.18	<i>Inversion Ratio</i> a 980 [nm] e a 1480 [nm]. . . . .	38
2.19	Guadagno di segnale con diverse lunghezze d'onda di pompa: 980 [nm] 1460 [nm] e 1480 [nm]. $P_s = 0.03$ [mW], $P_p = 100$ [mW], $L = 10$ [m] (a sinistra), $L = 20$ [m] (a destra). . . . .	42

2.20 Potenza di pompa in funzione della lunghezza della fibra alle tre lunghezze d'onda di pompa: 980 [nm] 1460 [nm] e 1480 [nm]. $P_s = 0.03$ [mW], $P_p = 100$ [mW], $L = 10$ [m]. . . . .	43
2.21 Schema di un EDFA con pompaggio <i>backward</i> . . . . .	44
2.22 <i>Inversion ratio</i> in configurazione standard e con pompaggio <i>backward</i> . . . . .	46
2.23 <i>Data-sheet</i> di una <i>C-Band Erbium Doped, Large Mode, Fiber</i> della <i>LIEKKI</i> . . . . .	48
2.24 Guadagno di segnale in funzione di diverse lunghezze del tratto di fibra. $P_p = 100$ [mW] e $P_s = 0.03$ [mW]. . . . .	50
3.1 Package di un <i>laser-diode</i> con il suo collegamento in fibra ottica.	53
3.2 Esempio di <i>Laser-mount</i> (a sinistra) con ingressi per i collegamenti con il <i>controller</i> (a destra). . . . .	54
3.3 <i>Laser-controller</i> e valori di temperatura e di corrente. . . . .	54
3.4 <i>Spectrum-analizer</i> . . . . .	55

# Elenco delle tabelle

2.1	<i>Optical Specification</i> della fibra EDFC-980-HP.	20
2.2	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 10$ [m].	23
2.3	Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso. $P_p = 100$ [mW] e $L = 20$ [m].	25
2.4	Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa. $P_s = 0.03$ [mW] e $L = 20$ [m].	27
2.5	Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] con diverse potenze di pompa e con diverse potenze di segnale in ingresso. Lunghezza del tratto di fibra: 20 [m].	36
2.6	Analisi del guadagno e dell'ASE a 1480 [nm] con diverse potenze di pompa e con diverse potenze di segnale in ingresso. Lunghezza del tratto di fibra: 20 [m].	37
2.7	Analisi del guadagno e dell'ASE al variare di tutti gli altri parametri di ingresso. $P_p = 980$ [nm].	39
2.8	<i>Optical Specification</i> della fibra modellizzata dal <i>toobox</i> .	41
2.9	Analisi del guadagno e dell'ASE al variare della lunghezza d'onda della potenza di pompa. $L = 10$ [m].	42
2.10	Analisi del guadagno e dell'ASE al variare della lunghezza d'onda della potenza di pompa. $L = 20$ [m].	43
2.11	Analisi del guadagno e picchi di potenza di ASE con un tratto di fibra di 10 m con P.D. (Pump Direction) sia forward che backward.	44

---

2.12 Analisi del guadagno e picchi di potenza di ASE con un tratto di fibra di 20 m con P.D. (Pump Direction) sia forward che backward.	45
2.13 <i>Optical Specification</i> della fibra LIEKKI Er80-8/125.	47
2.14 Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della lunghezza del tratto di fibra.	49
2.15 Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della potenza del segnale in ingresso.	50
2.16 Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della potenza di pompa.	51
2.17 Caso ideale con una fibra ad alta concentrazione di ioni erbio.	51

# Introduzione

L'argomento principe di questa tesi sono gli amplificatori ottici in fibra drogata con erbio.

L'utilizzo delle terre rare come droganti delle fibre permette di ottenere amplificazione in diverse porzioni dello spettro. L'utilizzo particolare di erbio (Er) e itterbio (Yb) consente di sviluppare un dispositivo, in grado di operare a lunghezze d'onda intorno ai 1550 [nm], nella cosiddetta *terza finestra delle telecomunicazioni* (o *banda C*), che non preveda nessuna conversione optoelettronica del segnale.

Per questo motivo hanno rivoluzionato il mondo delle telecomunicazioni.

Essi consentono di sopperire alle perdite di potenza dovute all'attenuazione del mezzo materiale di trasmissione: la fibra ottica. La realizzazione del primo *Erbium Doped Fiber Amplifier* risale al 1987, ma gli EDFA rivestono tutt'oggi un importantissimo ruolo.

Fornire un alto guadagno, un'ampia larghezza di banda, indipendenza dalla polarizzazione oltre a una bassa figura di rumore sono solo alcune delle caratteristiche che ne hanno agevolato la diffusione.

In generale, il funzionamento di un EDFA si basa sul processo di emissione stimolata di fotoni, lo stesso principio sfruttato dai laser, e si serve, oltre a componentistica fotonica (isolatori e WDM *coupler*), di un laser di pompa e di un tratto di fibra attiva.

Questa tesi si pone come obiettivo quello di studiare diverse configurazioni di EDFA sfruttando un *toolbox MATLAB* pre-esistente al quale sono state effettuate le dovute modifiche in modo da renderlo pienamente funzionante e

adatto allo scopo.

Lo studio ha visto utilizzare diverse fibre drogata con erbio sia commerciali sia sperimentali, ognuna di esse con caratteristiche uniche, in modo tale da comprenderne i vantaggi e gli svantaggi.

Grazie al *toolbox* è stato possibile testare diverse configurazioni che hanno visto la variazione della potenza del segnale d'ingresso e quella della pompa, oltre alla lunghezza d'onda di quest'ultima. (1480 [nm] o 980 [nm]).

Parte dell'analisi ha previsto lo studio dell'emissione spontanea amplificata (*Amplified Spontaneous Emission*), principale causa di rumore che affligge questa tipologia di amplificatori.

La tesi è organizzata come segue: dopo brevi cenni di teoria sugli amplificatori ottici e dopo aver esplicato il funzionamento del *toolbox*, nel secondo capitolo si trovano i commenti alle diverse configurazioni analizzate al fine di trovare il giusto *trade-off*. La tesi si conclude con la descrizione della realizzazione fisica di un EDFA in laboratorio.

# Capitolo 1

## Amplificatori ottici

### 1.1 Amplificatori di segnale

Ogni buon sistema di telecomunicazione necessita di un canale di comunicazione in grado di fornire una buona banda, un'altissima velocità di trasmissione e la minor attenuazione possibile.

La *fibra ottica*<sup>1</sup> è una guida d'onda che rispetta tutte le caratteristiche sopra riportate. Si tratta, infatti, di un mezzo materiale con un'ampia banda passante, una velocità di trasmissione prossima alla velocità della luce nel vuoto<sup>2</sup> ed è in grado di fornire un coefficiente di attenuazione<sup>3</sup> molto basso. Le fibre ottiche utilizzate nelle telecomunicazioni sono fibre in silice ( $SiO_2$ ), il cui coefficiente di attenuazione ( $\alpha$ ) in funzione della lunghezza d'onda del segnale<sup>4</sup> ( $\lambda$ ) è rappresentato in Fig. 1.1.

---

<sup>1</sup>Fisicamente una fibra ottica è un filamento di materiale vetroso (silice) realizzato in modo da poter condurre al suo interno la luce (propagazione guidata) sfruttando il fenomeno fisico della *riflessione totale interna*.

<sup>2</sup>Velocità della luce nel vuoto:  $c = 3 * 10^8$  m/s

<sup>3</sup>L'attenuazione di un segnale è la riduzione in potenza del segnale durante la sua propagazione. Nelle telecomunicazioni l'attenuazione si esprime in decibel [dB] per unità di distanza [dB/Km].

<sup>4</sup>Un segnale è un'informazione trasmessa a distanza, mediante un mezzo di trasmissione, da un punto trasmettitore a un punto ricevitore. Una descrizione standard prevede specificare: frequenza  $\nu$ , lunghezza d'onda  $\lambda$  e velocità di propagazione  $v_p$ .

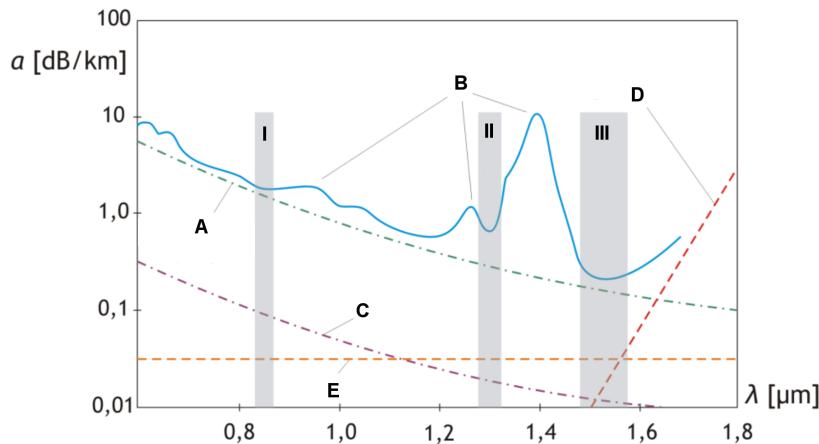


Figura 1.1: Coefficiente di attenuazione ( $\alpha$ ) di una fibra ottica in ossido di silicio in funzione della lunghezza d'onda di segnale  $\lambda$ .

La banda di lunghezze d'onda in cui il coefficiente di attenuazione raggiunge il proprio minimo prende il nome di *banda C* o *terza finestra delle telecomunicazioni*, assumendo il valore più basso ad una lunghezza d'onda di 1550 [nm]. In questa banda di frequenze [lunghezze d'onda] si riescono ad ottenere, con una buona fibra ottica, coefficienti di attenuazione minori di 0.20 [dB/Km].

Come conseguenza delle ottime caratteristiche sopra riportate, le fibre ottiche vengono sfruttate per comunicazioni ad ampio raggio. Si pensi che esse vengono sfruttate anche nelle dorsali oceaniche, collegamenti sottomarini lunghi migliaia di chilometri che, come mostrato in Fig. 1.2, permettono lo scambio di dati tra i diversi continenti del pianeta Terra, rendendo possibile l'esistenza di *internet*.

Quando le distanze superano le centinaia di chilometri, come nel caso sopra riportato, sebbene la fibra goda di coefficienti di attenuazione molto bassi, è inimmaginabile che il segnale possa propagarsi dalla sorgente fino a destinazione. Per questo motivo sono necessari gli *amplificatori di segnale*.

Nella storia inizialmente si optò per utilizzare amplificatori optoelettronici.

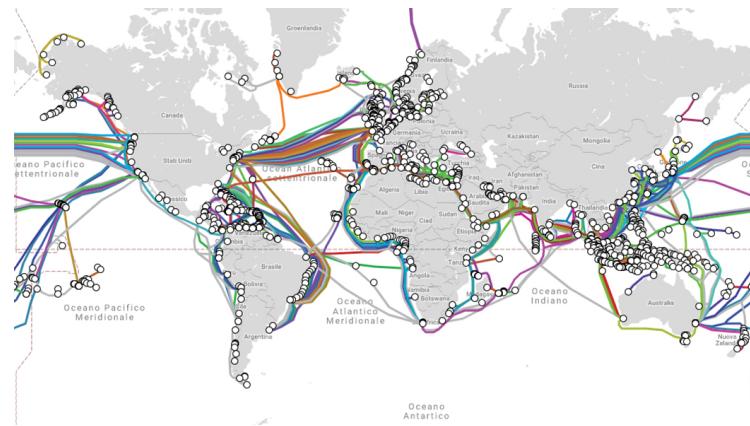


Figura 1.2: Distribuzione delle dorsali oceaniche: cavi sottomarini in fibra ottica che permettono lo scambio di dati tra i diversi continenti.

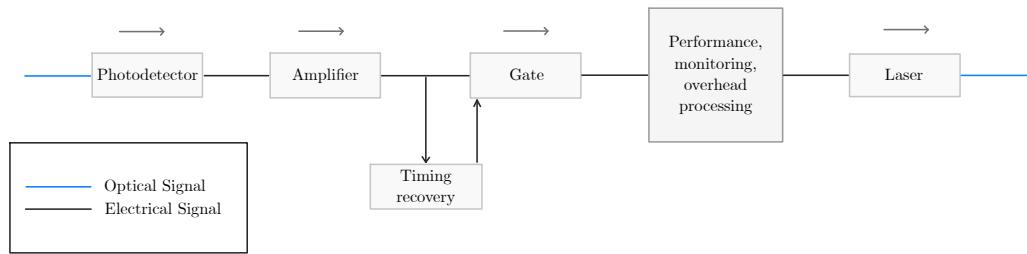


Figura 1.3: Schema di un amplificatore optoelettronico.

ci<sup>5</sup>. Si parla di una amplificazione 3R (*Regeneration, Reshaping e Reclocking*); la fibra ottica è impiegata solo come mezzo materiale poiché i segnali ottici vengono amplificati a livello elettrico. Questi amplificatori, come illustrato in Fig. 1.3, prevedono, quindi, una doppia conversione: dapprima convertendo il segnale ottico in segnale elettrico e poi, di nuovo, da segnale elettrico a segnale ottico.

In un secondo momento, l'avvento degli *amplificatori ottici* ha rivoluzionato

<sup>5</sup>Un amplificatore optoelettronico è comunemente composto da: un fotoricevitore che converte gli impulsi luminosi in un segnale elettrico, un amplificatore per aumentare la potenza del segnale, un filtro che rimodella gli impulsi e un laser che converte nuovamente il segnale elettrico in segnale ottico.

il mondo delle fibre ottiche e delle telecomunicazioni. Questi, infatti, differiscono totalmente dagli amplificatori optoelettronici in quanto promettono di innalzare la potenza del segnale ottico senza necessità di alcuna conversione. Ciò permette non solo di aumentare l'efficienza dell'amplificazione, ma anche di risparmiare sui costi di realizzazione di un intero sistema di telecomunicazione. Grazie agli elevati guadagni di cui godono questi amplificatori è possibile amplificare il segnale utilizzando un terzo dei dispositivi.

## 1.2 Amplificatori ottici

Una descrizione approssimativa di un amplificatore ottico lo accomuna ad un laser senza la cavità ottica: l'emissione stimolata nel mezzo attivo dell'amplificatore, generata da un segnale di pompa, causa l'amplificazione della luce che lo attraversa. Dal punto di vista costruttivo, gli amplificatori ottici si possono distinguere in tre grandi classi:

1. amplificatori ad effetto Raman;
2. amplificatori a semiconduttore;
3. amplificatori in fibra drogata con terre rare.

Il principale svantaggio degli *amplificatori ottici che sfruttano l'effetto Raman* è costituito dalla estrema potenza necessaria al pompaggio; per questo motivo essi vengono ritenuti inadatti, in generale, all'impiego nei sistemi ottici di trasmissione. Il principale vantaggio risiede invece nella larghezza di banda del guadagno. Selezionando opportunamente la lunghezza d'onda della potenza di pompa si è in grado di scegliere la zona di amplificazione del segnale.

Per quanto riguarda gli *amplificatori ottici a semiconduttore*, essi ricordano molto, nella loro struttura, i laser a semiconduttore, pur mostrando differenze per quanto riguarda la cavità risonante.

Gli amplificatori ottici in fibra drogata sono costituiti, come suggerisce il nome stesso, da un tratto di fibra ottica drogata con un elemento appartenente

al gruppo delle *terre rare*. L'elemento chimico con il quale si effettua il drogaggio dipende dalla banda in cui si vuole ottenere il guadagno. Per quanto riguarda la banda C si utilizza l'erbio.

Come è facile intuire, gli amplificatori ottici non offrono solamente vantaggi, ma possiedono anche dei limiti. Per esempio essi sono in grado di distinguere il rumore dal segnale da amplificare, andando a incrementare indistintamente la potenza di entrambe le componenti. Questo porta alla necessità di dovere gestire la degradazione del rapporto segnale-rumore dovuta all'accumulo sia del rumore degli amplificatori, sia della distorsione. Un altro limite risiede nel fatto che, sebbene siano in grado di amplificare una certa banda di lunghezze d'onda, esse non vengano amplificate tutte nello stesso modo: il guadagno dipende infatti dalla lunghezza d'onda.

### 1.3 EDFA

Gli amplificatori ottici in fibra drogata con erbio, chiamati comunemente EDFA (da *Erbium Doped Fiber Amplifier*), sono la tipologia più diffusa, in quanto utilizzati, nelle telecomunicazioni su lunghe distanze, ogni circa 100 [Km] di fibra ottica. La realizzazione del primo *Erbium Doped Fiber Amplifier* risale al 1987 e, grazie alla crescente richiesta, in soli cinque anni si passò dalle prime dimostrazioni in laboratorio alla commercializzazione. Essi hanno reso possibile un drammatico incremento della capacità di trasmissione dei sistemi ottici e contemporaneamente una notevole riduzione dei costi.

Gli EDFA permettono di avere guadagno nella regione dove le fibre in silice raggiungono il minimo di attenuazione, ovvero sia in *banda C* (1530 – 1565 [nm]) che in *banda L* (1565 – 1625 [nm]).

L'*erbio* è un elemento chimico facente parte del gruppo delle cosiddette terre rare<sup>6</sup>. Sebbene il nome suggerisca tutt'altro, esse non sono realmente rare:

---

<sup>6</sup>Secondo la definizione della IUPAC, le terre rare sono un gruppo di 17 elementi chimici

infatti, gli elementi di questo gruppo si trovano in concentrazioni relativamente elevate nella crosta terrestre.

L'erbio ha numero atomico 68, fa parte del gruppo dei lantanidi e la sua struttura è riportata in Fig. 1.4. È impossibile trovarlo in natura come elemento libero, lo si estraе sempre da altri minerali. Quest'ultima è una caratteristica non solo dell'erbio, ma di tutte le terre rare. Le aree estrattive principali sono la Cina e gli Stati Uniti.

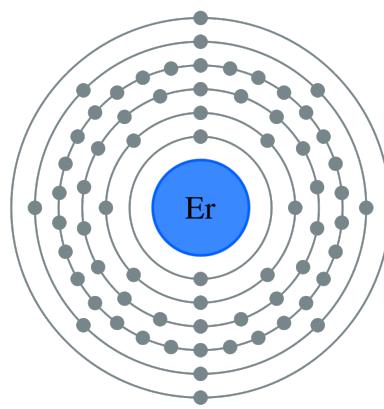


Figura 1.4: Atomo di erbio.

Quando è inserito in una matrice vetrosa, come ad esempio nella silice, esso forma dei legami fortemente polari e assume lo stato di ione trivalente  $Er^{3+}$ . Il diagramma di tutti i livelli energetici dello ione  $Er^{3+}$  è riportato in Fig. 1.5. Nel processo di amplificazione acquistano importanza solamente gli ultimi tre livelli energetici.

I livelli energetici del singolo ione erbio sono ben diversi dai livelli energetici visibili una volta inserito come drogante all'interno di una fibra ottica. In essa, non solo interagisce con la silice, ma anche con  $GeO_2$  e  $Al_2O_3$ . Questo fa sì che si osservi lo *splitting* dei livelli energetici, che avviene per la presenza del campo cristallino che circonda lo ione all'interno della matrice vetrosa.

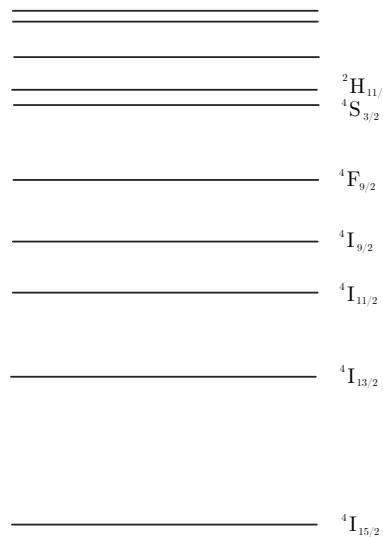


Figura 1.5: Livelli energetici dello ione  $\text{Er}^{3+}$ .

I livelli energetici del singolo ione erbio sono ben diversi dai livelli energetici visualizzabili una volta inserito come drogante all'interno di una fibra ottica. In essa l'erbio deve interagire non solo con la silice, ma anche con  $\text{GeO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : elementi presenti all'interno di questa tipologia di fibre. L'interazione con altri elementi fa sì che si osservi lo *splittaggio* dei diversi livelli energetici, causato dalla presenza del campo cristallino che circonda lo ione all'interno della matrice vetrosa. Questo effetto prende il nome di *effetto Stark*<sup>7</sup> e comporta che i 3 livelli energetici di interesse siano *spartiti* rispettivamente in 6, 7, 8 sottolivelli energetici, come è possibile osservare in Fig. 1.6. Senza l'effetto Stark l'amplificazione potrebbe avvenire solamente per una determinata lunghezza d'onda, la sua presenza consente invece l'amplificazione di una banda, seppur

---

<sup>7</sup>Ponendo un atomo in un campo elettrico, gli elettroni  $e$ , dotati di carica negativa, risentiranno della forza elettrostatica di Coulomb, passando in media più tempo nella regione a potenziale più alto e meno a quella a potenziale più basso. Gli orbitali atomici risultano distorti e la loro energia modificata a seconda dell'orientamento del campo elettrico e della loro forma originale. Perciò, quella che era una riga spettrale unica, viene divisa in varie righe a frequenza diversa. Maggiore l'intensità del campo elettrico e maggiore sarà la separazione delle righe spettrali.

relativamente ristretta, di lunghezze d'onda.

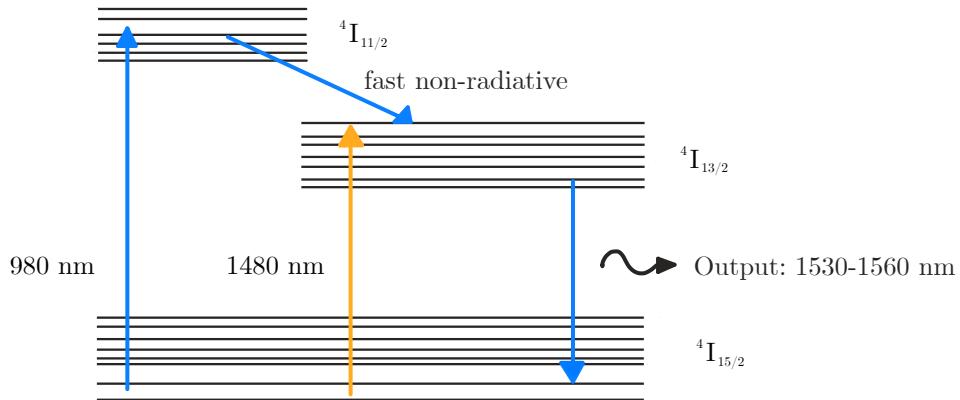


Figura 1.6: Diagramma dei livelli energetici corrispondenti ai primi 3 livelli dello ione erbio  $\text{Er}^{3+}$  in un *glass host*. Vengono rappresentate anche tutte le possibili transizioni.

La distribuzione della popolazione, all'interno di ciascun livello, segue la distribuzione di Boltzmann.

Nella sua forma più comune, come mostrato in Fig. 1.7, un EDFA consiste in un tratto di fibra drogata con erbio, un laser di pompa, l'elettronica di controllo e un accoppiatore WDM per combinare il segnale con la potenza di pompa.

La fibra drogata con erbio è una fibra ottica nel cui *core*<sup>8</sup> sono state aggiunte alcune centinaia di parti per milione di erbio. La densità di atomi di erbio può variare da fibra a fibra in base agli utilizzi e alle necessità.

L'elettronica di controllo consiste, tipicamente, in un generatore di corrente e in un controllore di temperatura per il laser di pompa. Questi dispositivi hanno il duplice compito di evitare che il laser di pompa si danneggi e di controllare la lunghezza di emissione del laser, la quale dipende dalla temperatura.

---

<sup>8</sup>Una fibra ottica consiste in: nucleo (core), rivestimento (cladding) e copertura (coating).

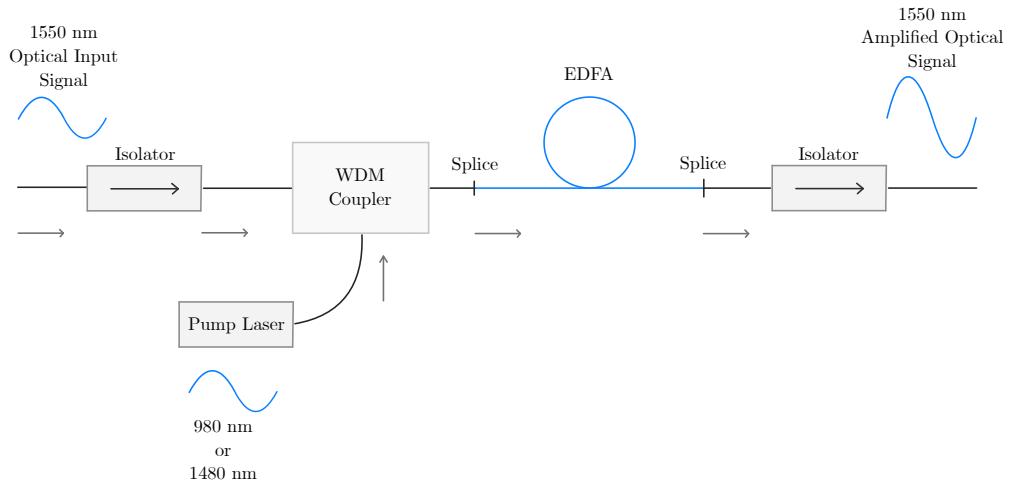


Figura 1.7: Schema di un *Erbium Doped Fiber Amplifier*.

È necessaria anche la presenza di altri componenti come isolatori ottici e WDM *coupler*. Gli isolatori ottici sono dispositivi non reciproci, che presentano basse perdite per segnali che si propagano in una direzione e perdite molto elevate per segnali che si propagano in direzione opposta<sup>9</sup>. Sono quindi usati per sopprimere le onde riflesse. I WDM *coupler*, anche chiamati *accoppiatori ottici*, sono dispositivi utilizzati per accoppiare, su un tratto unico di fibra ottica, sia la lunghezza d'onda uscente dal sistema di pompaggio, sia quella del segnale da amplificare.

## 1.4 Funzionamento di un EDFA

Consideriamo i tre livelli energetici  $E_1 < E_2 < E_3$  dell'erbio (Fig. 1.5.), per assistere ad amplificazione la densità di atomi del secondo livello energetico deve essere maggiore della densità di atomi del primo livello, detto fondamentale.

---

<sup>9</sup>Sono dispositivi che hanno un funzionamento molto simile a quello che hanno i diodi in elettrotecnica.

L'inversione di popolazione<sup>10</sup> può essere raggiunta grazie alla presenza di un terzo livello, detto livello di pompa.

Mediante l'assorbimento della potenza di pompa, la quale viene fornita a determinate lunghezze d'onda (980 [nm] o 1480 [nm]), gli atomi al livello fondamentale con un'energia  $E_1$  vengono innalzati al livello di pompa con energia  $E_3$ . Il tempo di vita medio di questo livello è molto breve, per cui gli atomi decadono rapidamente sul secondo livello; tale decadimento avviene senza emissione luminosa, ma con una cessione di energia al reticolo cristallino. Il secondo livello, detto *metastabile*, inizia a popolarsi ed il suo tempo di svuotamento per emissione spontanea è molto inferiore rispetto al tempo di riempimento. In questo modo si osserva l'*inversione di popolazione* (livello metastabile maggiormente popolato del livello fondamentale) la quale, in presenza di un segnale stimolante (in questo caso il segnale in ingresso, nonché il segnale da amplificare), può produrre amplificazione.

## 1.5 Caratteristiche di un EDFA

I parametri di fondamentale interesse per un amplificatore ottico sono: il guadagno, la sua banda e il suo punto di saturazione, la lunghezza d'onda di pompa, la sensibilità alla polarizzazione e il rumore.

La *banda di guadagno* di un amplificatore si riferisce all'intervallo di frequenze o di lunghezze d'onda su cui l'amplificatore è efficace. La banda di guadagno, una volta fissata la spaziatura tra i canali, limita il numero di lunghezze d'onda disponibili.

Il *punto di saturazione* del guadagno di un amplificatore è il valore di potenza di uscita per cui questa non aumenta ulteriormente aumentando la potenza

---

<sup>10</sup>Si definisce inversione di popolazione la condizione per cui in un sistema ci sono più elementi in stato eccitato che in quello di minore energia. Questa particolare condizione è la chiave per ottenere l'emissione laser.

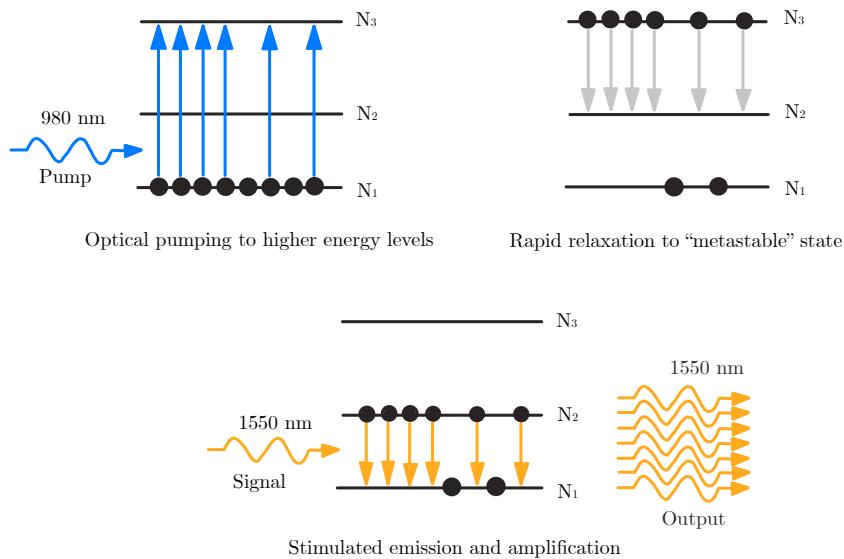


Figura 1.8: Funzionamento di un *Erbium Doped Fiber Amplifier*.

in ingresso. Tipicamente, la potenza di saturazione è definita come la potenza di uscita per cui si ha una riduzione di 3 [dB],rispetto al massimo, nel rapporto potenza in uscita-potenza in ingresso (*small-signal gain*).

La *sensibilità alla polarizzazione* si riferisce alla dipendenza del guadagno dalla polarizzazione del segnale. La sensibilità è misurata in [dB] e rappresenta la differenza di guadagno tra la polarizzazione *TE* e quella *TM*.

Negli amplificatori ottici la principale sorgente di rumore è l'*emissione spontanea amplificata (ASE)* che deriva dall'emissione spontanea nella regione attiva dell'amplificatore. La quantità di rumore generata dall'amplificatore dipende da fattori come lo spettro di guadagno, la banda di rumore e il grado di inversione di popolazione tra due livelli. Il rumore dell'amplificatore può costituire un problema, specialmente quando più amplificatori sono disposti in cascata.

Il *guadagno* di un EDFA è in funzione della lunghezza d'onda e della poten-

za del segnale di ingresso. Il guadagno<sup>11</sup> diminuisce all'aumentare della potenza in ingresso.

$$G = 10 \log_{10} \frac{P_{s,in}}{P_{s,out}} \quad (1.1)$$

Il guadagno dipende anche dalla *lunghezza della fibra ottica drogata*, o meglio, dal numero di ioni erbio presenti nel tratto e dalla *lunghezza d'onda di pompa*.

Per progettare un EDFA la fase di ingegnerizzazione inizia con l'utilizzo di preziosi *toolbox* che permettono di effettuare simulazioni di funzionamento. In questo modo non solo si risparmia tempo, evitando le prove di centinaia di combinazioni diverse a seconda dei parametri di ingresso, ma anche denaro, evitando la prova fisica di tutte le combinazioni, ricordando che le fibre drogata non hanno gli stessi costi delle "normali" fibre ottiche.

Modificando le grandezze in ingresso e i parametri fisici della fibra oggetto di studio, il *toolbox* è in grado, andando a risolvere le equazioni differenziali che ne costituiscono il modello matematico, di fornire i valore delle grandezze in uscita dall'amplificatore.

Nei prossimi capitoli, tramite l'utilizzo di un *toolbox MATLAB* preesistente, opportunamente modificato per renderlo funzionante, verrà studiata la risposta di un EDFA al variare delle grandezze in ingresso.

---

<sup>11</sup>Si definisce guadagno il rapporto tra la potenza di segnale in uscita e la potenza di segnale in ingresso. Spesso si preferisce riportarlo in [dB].

# Capitolo 2

## Analisi EDFA

Dopo aver analizzato il modo di funzionamento del *toolbox*, in questo capitolo vengono analizzate diverse configurazioni di amplificatori ottici in fibra drogata con erbio.

### 2.1 Funzionamento generale del toolbox

#### 2.1.1 Le equazioni differenziali di un EDFA

Le caratteristiche di guadagno e rumore di un EDFA possono essere descritte mediante un sistema di *equazioni differenziali* accoppiate, che descrivono l'inversione della popolazione nella fibra drogata e la propagazione della potenza ottica nell'amplificatore. Da qui in avanti si effettuerà una semplificazione: considerare l'amplificatore come un sistema a due livelli, il livello fondamentale e il livello metastabile<sup>1</sup>.

La densità di ioni erbio nello stato fondamentale,  $N_1$ , e quella nello stato metastabile,  $N_2$ , sono legate tra loro mediante l'equazione di conservazione del numero di ioni (2.1), dove  $N_1$  rappresenta la densità di ioni del livello

---

<sup>1</sup>Si dice metastabile un particolare stato eccitato, di un atomo o di uno ione, che ha un tempo di vita più lungo di quello degli stati eccitati ordinari e che, in genere, ha un tempo di vita più corto di quello dello stato fondamentale. Uno stato metastabile può essere visto come uno stato temporaneamente stabile.

fondamentale,  $N_2$  la densità di ioni del livello metastabile e  $N_T$  la densità totale nel punto di coordinate  $(r, \phi, z)$ .

$$N_1(r, \phi, z) + N_2(r, \phi, z) = N_T(r, \phi, z) \quad (2.1)$$

Assumendo che lo spettro ottico sia discretizzato in  $N$  intervalli di ampiezza  $\Delta\nu_k$  e intensità  $I_k(r, \phi, z)$ , le *population rate equation* possono essere scritte come segue:

$$\frac{dN_2}{dt} = \sum_{k=1}^N N_1(r, \phi, z) \sigma_{ak} \frac{I_k}{h\nu_k} - \sum_{k=1}^N N_2(r, \phi, z) \sigma_{ek} \frac{I_k}{h\nu_k} - \frac{N_2(r, \phi, z)}{\tau} \quad (2.2)$$

Il termine a primo membro rappresenta la variazione nel tempo nella popolazione del livello metastabile. A secondo membro, il primo termine descrive l'assorbimento di fotoni a frequenza  $\nu_k$  ed è proporzionale all'intensità  $I_k$  e alla sezione d'urto di assorbimento  $\sigma_{ak}$ ; il secondo termine rappresenta lo svuotamento del livello metastabile dovuto all'emissione stimolata ed è proporzionale all'intensità  $I_k$  e alla sezione d'urto di emissione  $\sigma_{ek}$ . Infine, l'ultimo termine descrive l'emissione spontanea di fotoni proporzionale al tempo di vita  $\tau$ .

Per quanto riguarda le potenze, la variazione della potenza ottica alla lunghezza d'onda  $\lambda_k$  su un tratto  $dz$  di fibra drogata soddisfa l'equazione differenziale:

$$\begin{aligned} \frac{dP_k}{dz} = & \pm \sigma_{ek} P_k(z) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) N_2(r, \phi, z) r dr d\phi \\ & \mp \sigma_{ak} P_k(z) \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) N_1(r, \phi, z) r dr d\phi \\ & \pm \sigma_{ek} 2h\nu_k \Delta\nu_k \int_0^{2\pi} \int_0^\infty i_k(r, \phi) N_2(r, \phi, z) r dr d\phi \end{aligned} \quad (2.3)$$

Il primo termine a secondo membro descrive il guadagno che si ha per emissione stimolata, il secondo termine descrive l'assorbimento, mentre l'ultimo descrive l'emissione spontanea che si ha sulla sezione  $z$  della fibra e che verrà amplificata nel tratto  $z + dz$  con la conseguente generazione di emissione spontanea amplificata (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*).

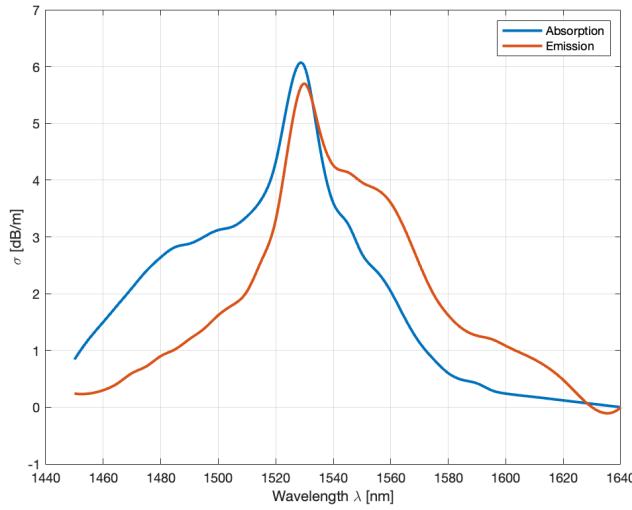


Figura 2.1: *Cross-section* di emissione e di assorbimento di una fibra ottica drogata con erbio.

Sia nella (2.2), sia nella (2.3) si possono visualizzare i termini  $\sigma_{ek}$  e  $\sigma_{ak}$  che corrispondono rispettivamente alla *sezione d'urto di emissione* e alla *sezione d'urto di assorbimento*, che prendono anche il nome di *cross-section*.

Le sezioni d'urto o *cross-section* sono grandezze fenomenologiche in grado di descrivere l'interazione di un'onda elettromagnetica con la materia. Esse dipendono dalla lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica (in questo caso il segnale da amplificare e la pompa amplificatrice). In Fig. 2.1 sono visibili le sezioni d'urto di assorbimento e di emissione di una fibra ottica drogata con erbio.

Rivestono un importante ruolo anche il coefficiente di assorbimento e il coefficiente di guadagno, rispettivamente definiti come:

$$\alpha_k = \Gamma_k \sigma_{ak} N_T \quad (2.4)$$

$$g_k = \Gamma_k \sigma_{ek} N_T \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Risoluzione delle equazioni differenziali

Le equazioni che descrivono il comportamento di un amplificatore ottico in fibra drogata con  $Er^{3+}$  costituiscono un sistema di  $N$  equazioni differenziali non lineari accoppiate tra loro.

Al sistema di equazioni sono associate le condizioni al contorno:

$$P_k^+(z = 0) = P_k^{+0} \quad (2.6)$$

$$P_k^-(z = L) = P_k^{-L} \quad (2.7)$$

Il sistema di equazioni non può essere risolto analiticamente, pertanto bisogna ricorrere a metodi numerici. Il metodo utilizzato dal *toolbox* in analisi è un metodo numerico. Esso comporta due principali difficoltà: la valutazione delle condizioni al contorno e l'integrazione su tutta la lunghezza della fibra drogata. Le condizioni al contorno non sono di facile valutazione in quanto bisogna considerare, sia i segnali copropaganti sia quelli contropropaganti. Per trovare queste ultime ci si affida ad un *metodo iterativo*, mediante integrazioni successive verso  $z$  crescenti e  $z$  decrescenti.

Il processo iterativo si arresta quando è soddisfatta una condizione di convergenza fissata a priori. In questo caso specifico, il *toolbox* si "accontenta" quando la massima differenza percentuale tra il modello e le condizioni al contorno è inferiore a  $10^{-4}$ .

Il numero di iterazioni necessarie per soddisfare il criterio di convergenza sopra descritto varia in funzione della concentrazione del drogante, della lunghezza della fibra, della potenza di segnale e della potenza di pompa. Il *toolbox* pone un limite di 1000, se entro questo numero di iterazioni non si riuscisse a ottenere una condizione di convergenza, verrebbe restituito un errore. La situazione si mostra particolarmente critica in condizioni di pompa contropropagante e al crescere della lunghezza della fibra attiva.

### 2.1.3 Grandezze in ingresso e grandezze in uscita

Il *toolbox*, per effettuare le simulazioni, richiede i seguenti parametri in ingresso:

1. lunghezza d'onda della pompa ( $\lambda_p$ );
2. lunghezza d'onda del segnale in ingresso ( $\lambda_s$ );
3. potenza della pompa ( $P_p$ );
4. potenza del segnale in ingresso ( $P_s$ );
5. lunghezza del tratto di fibra drogata con erbio ( $L$ );
6. diametro del *core* della fibra drogata ( $D$ );
7. concentrazione di ioni erbio o coefficiente di assorbimento della fibra;<sup>2</sup>
8. direzione della pompa.

Tramite questi, vengono restituiti:

1. potenza del segnale in funzione della lunghezza della fibra;
2. potenza della pompa in funzione della lunghezza della fibra;
3. *inversion ratio*;
4. ASE, sia *forward* che *backward*.

Da cui, tramite semplici calcoli, è possibile ricavare le seguenti grandezze:

1. guadagno del segnale, sia *forward* che *backward*;
2. guadagno (*attenuazione*) della pompa, sia *forward* che *backward*.

Andando ad analizzare le grandezze in uscita è possibile fare confronti in modo da capire, a seconda delle esigenze, quale possa essere la migliore configurazione dell'amplificatore.

---

<sup>2</sup>Dalla (2.4), conoscendo il valore della *cross-section* di assorbimento e il valore dell'integrale di *over-lap* è possibile ricavare la concentrazione di ioni erbio. Pertanto, comunicare al *toolbox* la concentrazione o il coefficiente di assorbimento risulta equivalente.

## 2.2 Nurfen EDFC-980-HP

Le prime simulazioni con il *toolbox MATLAB*<sup>3</sup> sono state eseguite modellizzando un EDFA che sfrutta una fibra ottica commerciale. In questo specifico caso si è deciso di implementare una *C-Band Erbium Doped, Single Mode, Fiber* della *Nurfen* il cui *data-sheet* è visibile in Fig. 2.2.

Si tratta di una fibra con una media concentrazione di ioni erbio<sup>4</sup> ( $6.9078 \cdot 10^{24}$ ). Questa fibra, così come tutte le altre fibre cosiddette speciali, ha un costo completamente diverso dalle classiche fibre in silice destinate alla trasmissione del segnale.

Nella Tabella 2.1 vengono riportate tutte le grandezze utili alle simulazioni.

Core diameter	5.8 [ $\mu\text{m}$ ]
Core E-field overlap with dopant	75%
Doping concentration	$6.9078 \cdot 10^{24}$ [ $1/\text{m}^3$ ]
Fiber absorption at 1530 [nm]	6.0 [dB/m]

Tabella 2.1: *Optical Specification* della fibra EDFC-980-HP.

### 2.2.1 Laser di pompa a 980 [nm]

Le prime configurazioni analizzate prevedevano un segnale in ingresso alla lunghezza d'onda di 1550 [nm] e un segnale di pompa alla lunghezza d'onda di 980 [nm]. Gli altri parametri necessari al *toolbox* per produrre i risultati richiesti sono stati estrapolati dal *data-sheet*.

#### 2.2.1.1 Analisi del guadagno con 10 [m] di EDF

Inizialmente si è deciso di sfruttare un tratto di fibra attiva lungo 10 [m].

---

<sup>3</sup>Luke Rumbaugh (2022). Fiber Lasers and Amplifiers Design Toolbox (<https://tinyurl.com/toolboxEDFA>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 25, 2022.

<sup>4</sup>Questo valore è stato ottenuto direttamente dal *toolbox* in quanto nel *data-sheet* della fibra viene indicato solamente il coefficiente di assorbimento  $\sigma_a$  a 1530 [nm].



## C-Band Erbium Doped Fiber Single-Mode Fiber

Nufern's high performance C-Band Erbium-Doped 980-HP Fibers (EDFC-980-HP and EDFC-980C-HP-80) are designed for use in single and multi-channel C-band amplifiers and ASE sources. The 80  $\mu\text{m}$  version is suitable for small form-factor amplifiers and metro amps. Both types can be powered with 980 nm or 1480 nm pumps. All Nufern erbium-doped fibers are fabricated with a proprietary technology and have highly consistent and reproducible spectroscopy.

### Typical Applications

- Single and multi-channel C-band amplifiers
- ASE sources
- Small form factor amps
- Metro amps

### Features & Benefits

- Highly consistent and reproducible spectroscopy — high manufacturing yields when matching to a GFF
- Excellent core concentricity — low splice loss to single-mode fibers
- High aluminum concentration — inherent gain flatness

### Optical Specifications

	<b>EDFC-980-HP</b>
Operating Wavelength (nominal)	C-Band
Mode Field Diameter @ 1550 nm	$5.8 \pm 0.5 \mu\text{m}$
Peak Absorption near 1530 nm	$6.0 \pm 1.0 \text{ dB/m}$
Peak Absorption near 980 nm	$\geq 3 \text{ dB/m}$
Loss @ 1200 nm	$\leq 10 \text{ dB/km}$
Second Mode Cut-Off	$920 \pm 50 \text{ nm}$
Saturation Power @ 1530 nm (nominal)	0.18 mW
Numerical Aperture (nominal)	0.23

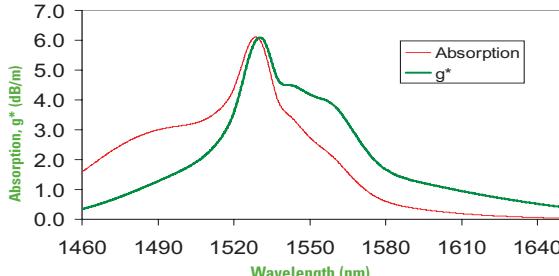
### EDFC-980-HP-80

Clad Diameter	$125.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$	$80.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$
Coating Diameter	$245 \pm 10 \mu\text{m}$	$165 \pm 10 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$< 0.3 \mu\text{m}$	$< 0.3 \mu\text{m}$
Coating/Clad Offset	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 5 \mu\text{m}$
Coating Material	UV Cured, Dual Acrylate	UV Cured, Dual Acrylate
Operating Temperature	-40 to +85°C	-40 to +85°C
Proof Test Level	$\geq 200 \text{ kpsi (1.4 GN/m}^2)$	$\geq 200 \text{ kpsi (1.4 GN/m}^2)$

### Geometrical & Mechanical Specifications

Clad Diameter	$125.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$	$80.0 \pm 1.0 \mu\text{m}$
Coating Diameter	$245 \pm 10 \mu\text{m}$	$165 \pm 10 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$< 0.3 \mu\text{m}$	$< 0.3 \mu\text{m}$
Coating/Clad Offset	$\leq 5 \mu\text{m}$	$\leq 5 \mu\text{m}$
Coating Material	UV Cured, Dual Acrylate	UV Cured, Dual Acrylate
Operating Temperature	-40 to +85°C	-40 to +85°C
Proof Test Level	$\geq 200 \text{ kpsi (1.4 GN/m}^2)$	$\geq 200 \text{ kpsi (1.4 GN/m}^2)$

### Typical Absorption and g\* for EDFC-980-HP



7 Airport Park Road, East Granby, CT 06026 • 860.408.5000 • Toll-free 866.466.0214 • Fax 860.844.0210 E-mail info @ nufern.com • [www.nufern.com](http://www.nufern.com)

Standard specifications and design parameters are listed above. Specifications are subject to change without notice. Other configurations such as alternative form factors, optimized cut-off and UV cured color coating may be available. Let us know how Nufern can assist with your requirements.

RoHS

NU0026-10/06

Figura 2.2: Data-sheet di una C-Band Erbium Doped, Single Mode, Fiber della Nurfen.

Lo scopo di queste prime simulazioni è quello di verificare come, all'aumentare della potenza del segnale in ingresso, il guadagno dell'amplificatore diminuisca. Inoltre, tenendo presente che nel *data-sheet* è indicata la potenza di segnale di saturazione<sup>5</sup> a 1530 [nm], si vuole trovare un valore di saturazione nelle condizioni sopra descritte.

Supponendo che il guadagno vari in funzione della potenza del segnale, in questa analisi verrà preso come guadagno massimo quello in corrispondenza di un segnale in ingresso con potenza di 0.03 [nm]. Non verranno presi in considerazione segnali con una potenza in ingresso più bassa, in quanto, si potrebbero confondere con il rumore di fondo. Amplificando segnali di questo tipo si andrebbero a perdere tutte le informazioni contenute in essi.

In Fig. 2.3 viene riportato il guadagno al variare della potenza di segnale in ingresso  $P_s$  (vedi 2.8), con potenza di pompa  $P_p$  (vedi 2.9).

$$\begin{aligned} 0.03 \text{ [mW]} &= -15 \text{ [dBm]; } 0.08 \text{ [mW]} = -10 \text{ [dBm]} \\ 0.13 \text{ [mW]} &= -8 \text{ [dBm]; } 0.18 \text{ [mW]} = -7 \text{ [dBm]} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$100 \text{ [mW]} = 20 \text{ [dBm]} \quad (2.9)$$

Dall'analisi della Fig. 2.3 e della Tabella 2.2 si osserva il comportamento aspettato. Al crescere della potenza in ingresso diminuisce il guadagno dell'amplificatore. Aumentando la potenza del segnale di ingresso del 600% (4 [dBm]) si assiste ad una variazione del guadagno di quasi 4 [dB].

Partendo dalle ipotesi fatte sopra, si può quindi affermare che a 1550 [nm], nella configurazione analizzata, il valore di potenza di ingresso che va a "saturare" il guadagno è 0.13 [mW].

A questo punto ci si può soffermare sulla potenza di pompa. Andando a effettuare un'analisi spettrale alle diverse lunghezze d'onda, si può vedere come

---

<sup>5</sup>La potenza di saturazione è definita come quel valore di potenza di segnale per cui il guadagno ottico è ridotto di 3 [dB] rispetto al valore massimo e dipende dai parametri fisici della fibra drogata con erbio.

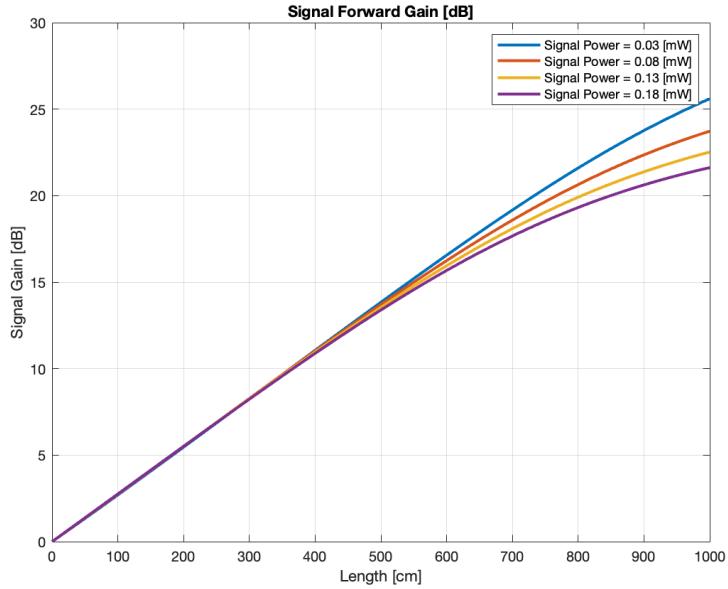


Figura 2.3: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$\Delta G$
-15	0.03	20	100	980	25.59	0
-10	0.08	20	100	980	23.72	1.87
-8	0.13	20	100	980	22.51	3.08
-7	0.18	20	100	980	21.61	3.98

Tabella 2.2: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m].

a 980 [nm] ci sia ancora della potenza residua: la potenza di pompa non è stata completamente assorbita dalla fibra. Circa il 35% della potenza, come visibile in Fig. 2.4, risulta ancora disponibile.

### 2.2.1.2 Analisi del guadagno con 20 [m] di EDF

Dato che, come visto, la potenza di pompa, nel caso precedente, non risulta pienamente assorbita, si può pensare di allungare il tratto di fibra attiva.

Portando a 20 [m] la sua lunghezza ed effettuando nuovamente le simulazioni con le stesse ipotesi, si ottengono guadagni più elevati (vedi Fig. 2.5). Dalla

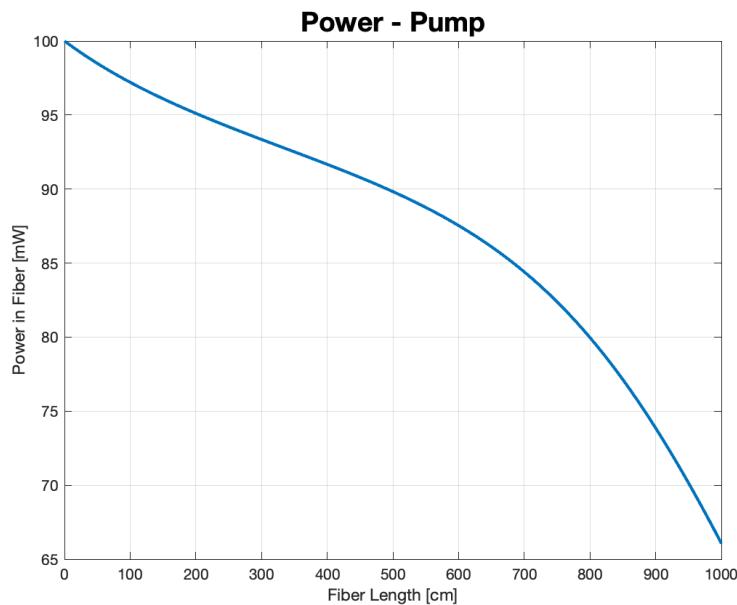


Figura 2.4: Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra:  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m].

figura appare evidente come, sebbene il guadagno risulti essere più elevato, oltre una certa lunghezza (intorno ai 14 – 15 [m]) esso non aumenta più: si assiste a una "saturazione". Questa condizione non è efficiente né da un punto di vista economico (la fibra attiva ha, come visto, un costo non indifferente), né dal punto di vista del rumore.

Nella Tabella 2.3 vengono riportati i valori massimi di guadagno nelle varie configurazioni analizzate. In questo caso si rende più visibile la differenza già notata prima. Andando ad incrementare la potenza del segnale in ingresso il guadagno ha una netta diminuzione. Considerando, come prima, il guadagno massimo quello ottenuto con una potenza di segnale in ingresso di 0.03 [mW], si riduce anche la potenza con la quale si ottiene la condizione di saturazione: 0.08 [mW].

Si può effettuare, anche in queste circostanze, un controllo sulla componente spettrale in corrispondenza della lunghezza d'onda di pompa. Come si può osservare in Fig. 2.6, rispetto al caso precedente, la potenza di pompa risulta pressoché esaurita: ne rimane meno del 10%. Essa decresce quasi linearmente

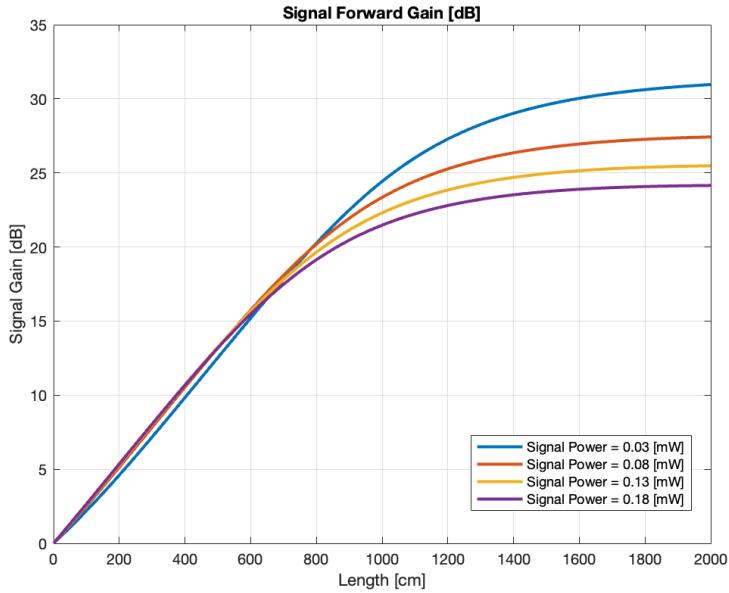


Figura 2.5: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 20$  [m].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$\Delta G$
-15	0.03	20	100	980	30.95	0
-10	0.08	20	100	980	27.42	3.53
-8	0.13	20	100	980	25.47	5.48
-7	0.18	20	100	980	24.15	6.8

Tabella 2.3: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 20$  [m].

spostandosi lungo il tratto di fibra drogata con erbio.

È bene sottolineare che, sebbene il guadagno sia in funzione della lunghezza, per lunghezze di fibra differenti è necessario ripetere la simulazione. Questo è dovuto al metodo risolutivo delle equazioni differenziali che modellizzano un amplificatore. In Fig. 2.7 è visibile una dimostrazione di quanto detto.

A questo punto, le successive simulazioni si sono eseguite andando a variare la potenza di pompa, mantenendo una potenza di segnale di ingresso di (vedi 2.10).

$$0.03 \text{ [mW]} = -15 \text{ [dBm]} \quad (2.10)$$

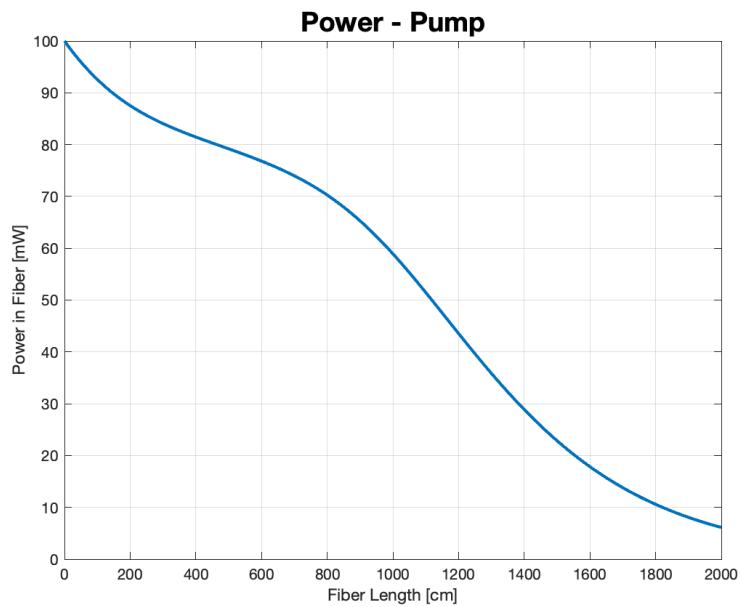


Figura 2.6: Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra:  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 20$  [m].

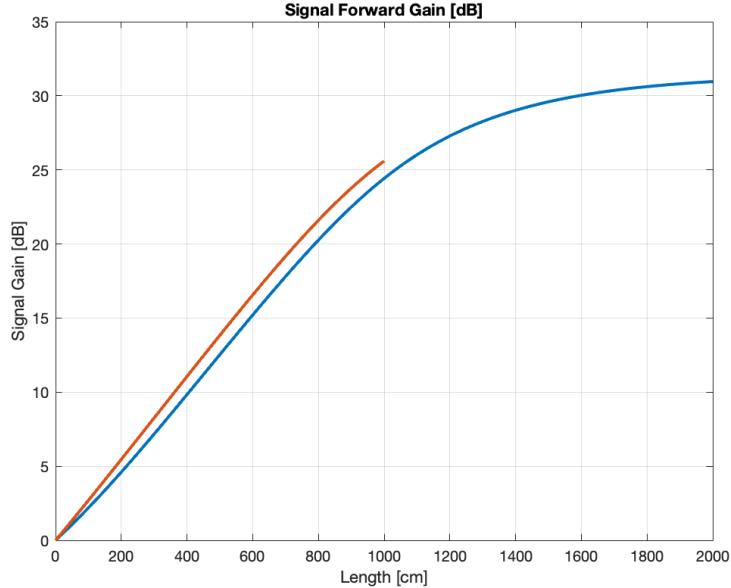


Figura 2.7: Guadagno con tratti di fibra di diverse lunghezze.  $L = 10$  [m] e  $L = 20$  [m].

Esaminando la Fig. 2.8 si nota come, aumentando la potenza di pompa, aumenti anche il guadagno. Utilizzando potenza di pompa più elevate viene

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$\Delta G$
-15	0.03	20	100	980	30.95	4.05
-15	0.03	22	150	980	32.81	2.19
-15	0.03	23	200	980	34.06	0.94
-15	0.03	24	250	980	35.00	0

Tabella 2.4: Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa.  $P_s = 0.03$  [mW] e  $L = 20$  [m].

meno quanto detto in precedenza: al suo aumentare, aumenta anche la lunghezza del tratto di fibra necessario affinché essa venga esaurita. Questo è dovuto al coefficiente di assorbimento, il cui valore dipende solamente dal valore della lunghezza d'onda di pompa. Se con una pompa di 100 [mW] 20 [m] risultavano essere troppi, con il doppio della potenza, per esempio, questo non succede.

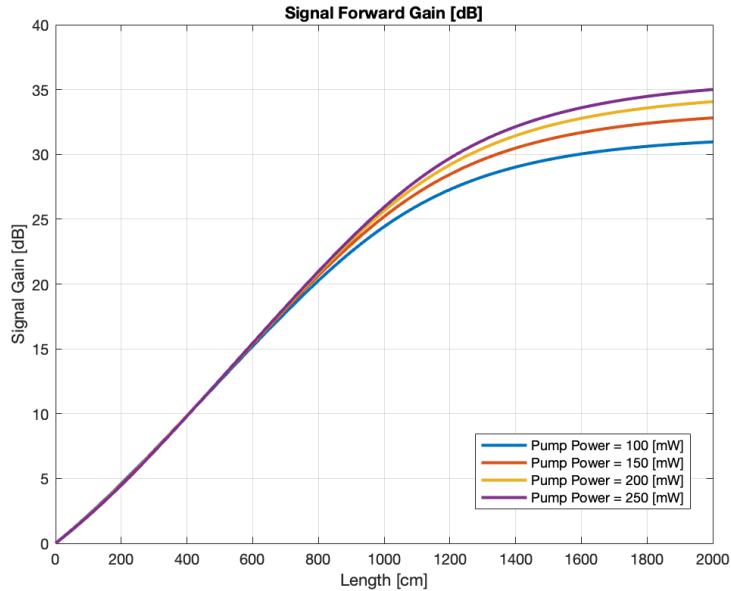


Figura 2.8: Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa.  $P_s = 0.03$  [mW] e  $L = 20$  [m].

In Tabella 2.4 appare evidente che ad un aumento di 4 [dBm] della potenza di pompa consegue un corrispondente aumento di 4 [dB] per il segnale.

Considerando che, incrementare la potenza di pompa ha un costo notevole in termini economici, poiché questa viene generata da un laser controllato in

corrente e in temperatura, non è detto che aumentarla sia la soluzione ideale. A supporto di quest'ultima affermazione giocano anche le figure di rumore che verranno analizzate successivamente.

### 2.2.1.3 Analisi ASE con 10 [m] di EDF

Alcuni processi secondari tendono a degradare le prestazioni dell'amplificatore: tra questi troviamo l'ASE (*Amplified Spontaneous Emissions*), nonché l'emissione spontanea emessa direttamente dalla fibra ottica, causata dal tempo di vita medio finito di un elettrone nel livello metastabile. Di conseguenza un elettrone, raggiunto il livello superiore, tende, dopo un certo tempo, a ricadere nel livello inferiore. Questo fenomeno svuota il livello superiore, e crea rumore in ricezione. Infatti, la transizione dell'elettrone verso il livello inferiore libera un fotone di energia, il quale possiederà una lunghezza d'onda prossima a quella di segnale, ma con direzione casuale. La transizione libera un elettrone con energia:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.11)$$

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.12)$$

Poiché si tratta della stessa transizione effettuata anche per mano dell'emissione stimolata, si può facilmente intuire come la lunghezza d'onda del fotone rilasciato sia prossima, se non identica, a quella del segnale da amplificare. Il fotone rilasciato, interesserà altri ioni di erbio lungo il suo percorso, provocando una radiazione che si andrà a sommare al segnale.

Lo spettro dell'ASE, vista la configurazione a bande per *effetto Stark* non si concentra ad una sola lunghezza d'onda, come si può ben vedere in Fig. 2.9.

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. L'emissione spontanea che viaggia in direzione  $z$  crescenti sarà descritta da un segno  $+$ , quella che viaggia in direzione  $z$  decrescenti sarà descritta da un segno  $-$ . Poiché sono necessarie due equazioni, possiamo vedere

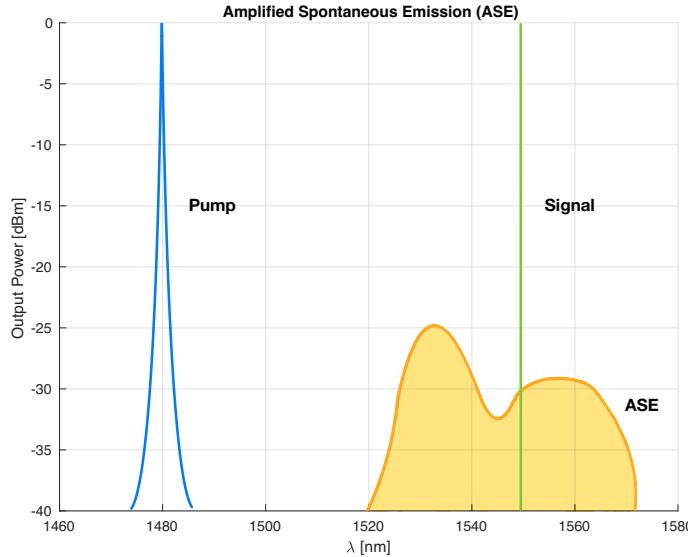


Figura 2.9: Analisi spettrale di una fibra drogata con erbio in cui viaggiano:  $P_p$  a 1480 [nm] e  $P_s$  a 1550 [nm].

in Fig. 2.10 come siano necessari due grafici differenti: uno per l'ASE *forward* e uno per l'ASE *backward*.

Poiché l'ASE non si trova ad un'unica lunghezza d'onda, il *toolbox* restituisce un integrale. Esso, infatti, integra la potenza lungo lo spettro in modo da ottenere la potenza totale relativa all'ASE in una EDF.

In Fig. 2.10 è riportato un integrale, in cui si possono visualizzare le potenze di ASE *forward* e *backward* in funzione della lunghezza del tratto di fibra. Si può notare come, aumentando la potenza del segnale in ingresso, la potenza dell'ASE diminuisca. Si può inoltre osservare come, intorno a metà della fibra la potenza dell'ASE, in entrambe le direzioni, risulti al minimo. Questo è dovuto all'altissimo *inversion-ratio* che si ha in quella precisa posizione: i fotoni, che non appartengono al segnale, popolano il livello metastabile. L'ASE appare più alta alle estremità dove, per forza di cose, l'*inversion-ratio* è più basso.

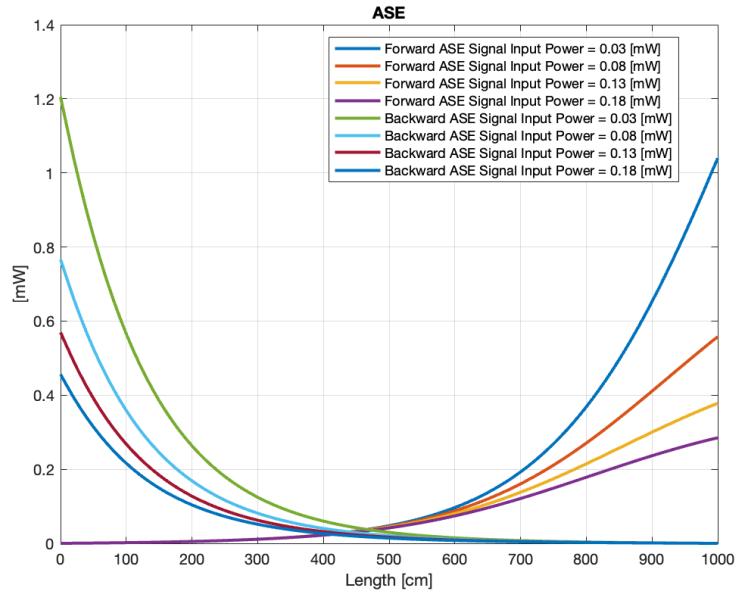


Figura 2.10: Emissione spontanea amplificata sia in direzione *forward* sia in direzione *backward* al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m.]

#### 2.2.1.4 Analisi ASE con 20 [m] di EDF

In Fig. 2.11 viene mostrato come, andando ad aumentare la lunghezza del tratto di fibra attiva, aumenti anche la potenza dell'ASE. Sebbene la configurazione di segnali e di pompa sia la stessa analizzata in precedenza, possiamo notare potenze più alte.

Ciò avviene perchè gli elettroni emessi spontaneamente viaggiano lungo la fibra e vengono amplificati dalla stessa, andando a stimolare l'emissione di altri elettroni a lunghezze d'onda diverse da quella di segnale. Più la fibra è lunga, più ci sono probabilità che questo fenomeno avvenga.

L'aumento dell'ASE appare ancora più prepotentemente andando ad analizzare il suo comportamento all'aumentare della potenza di pompa.

La Fig. 2.12 sottolinea come l'ASE dipenda molto dalla potenza di pompa: soffermandosi sui dati relativi ad una pompa con potenza di 250 [mW], si può notare livelli di ASE molto più elevati rispetto a quanto visto in precedenza.

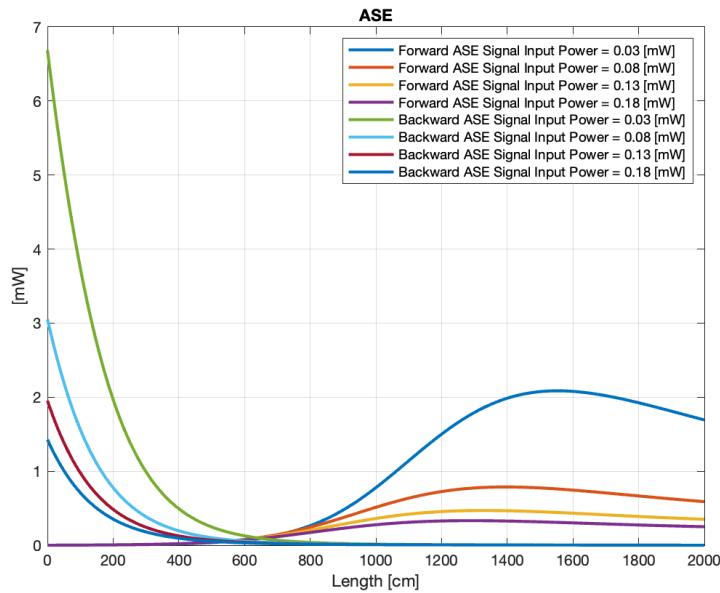


Figura 2.11: Emissione spontanea amplificata sia in direzione *forward* sia in direzione *backward* al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 20$  [m.]

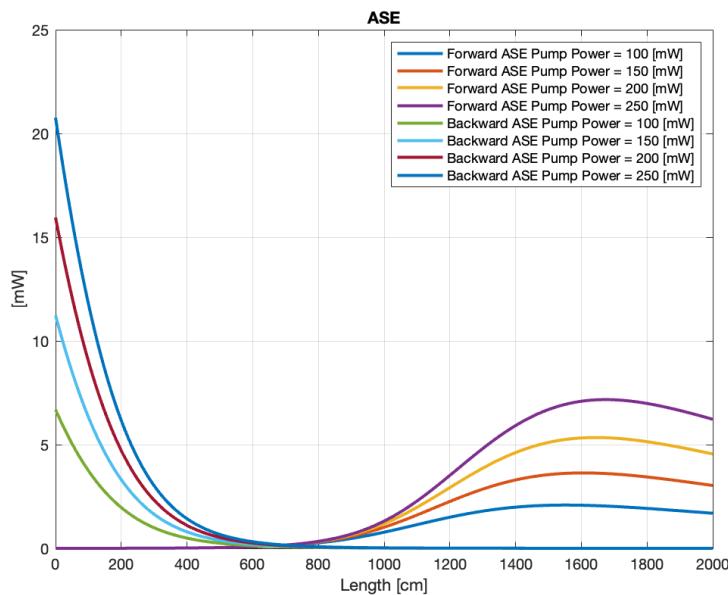


Figura 2.12: Emissione spontanea amplificata sia in direzione *forward* sia in direzione *backward* al variare della potenza di pompa.  $P_s = 0.03$  [mW] e  $L = 20$  [m.]

La dipendenza dell'ASE, nonché del rumore, dalla potenza di pompa fa sì che si preferiscano potenze non troppo elevate, sebbene possano garantire guadagni di segnale maggiori.

### 2.2.2 Laser di pompa a 1480 [nm]

In un secondo momento si è optato per provare ad utilizzare una pompa diversa, che avesse una lunghezza d'onda di 1480 [nm]. Sebbene questa lunghezza d'onda sia maggiormente usata quando il segnale da amplificare appartiene alla *banda L*, può essere utilizzata anche per amplificazione della *banda C*.

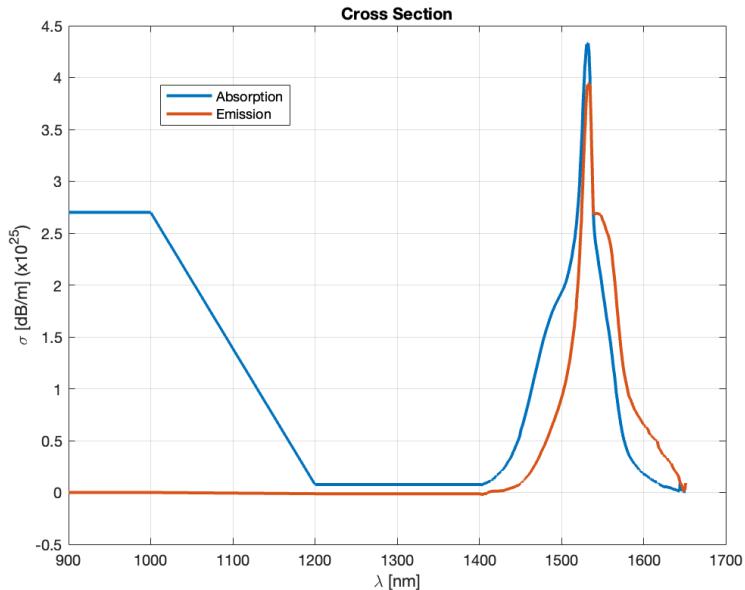


Figura 2.13: *Cross-section* di emissione e di assorbimento complete.

Tornando ad analizzare la Fig. 2.13 si può vedere come il comportamento diverso alle due lunghezze d'onda di pompa sia dovuto ai diversi valori di *cross-section*. A 980 [nm] la *cross-section* di assorbimento risulta essere molto più alta rispetto a quella in corrispondenza di 1480 [nm]. Sono differenti anche le *cross-section* di emissione: a 980 [nm] questa risulta essere nulla, a 1480 [nm], invece, assume un valore non trascurabile.

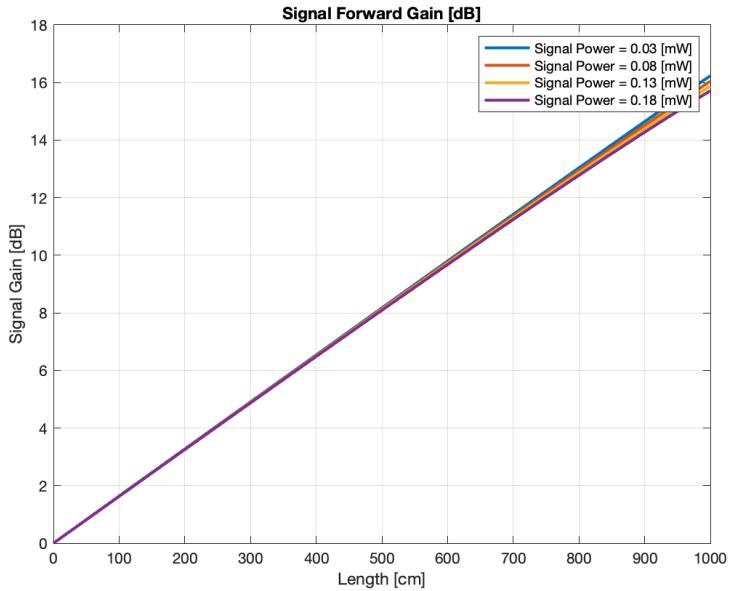


Figura 2.14: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m].

### 2.2.2.1 Analisi del guadagno con 10 [m] di EDF

Utilizzando gli stessi dati utilizzati durante le analisi a 980 [nm], si è deciso di concentrarsi inizialmente sullo studio del guadagno.

Come evidenzia la Fig. 2.14, con un tratto di fibra lungo solamente 10 [m] si ottengono guadagni molto più bassi rispetto alla lunghezza d'onda di pompa precedente. La differenza di guadagno al variare della potenza di segnale in ingresso è addirittura trascurabile.

Soffermandosi sulla sola potenza di pompa, come si rende noto in Fig. 2.15, quasi il 90% della pompa non è stato assorbito dal tratto di fibra. Questo ultimo dato rende chiaro che, con questa determinata pompa, servono lunghezze di fibra attiva molto più lunghe, cosa che, come detto precedentemente, comporta un costo maggiore.

Per questo motivo si sono ripetute le stesse analisi anche allungando il tratto di fibra, portandolo ad una lunghezza totale di 20 [m].

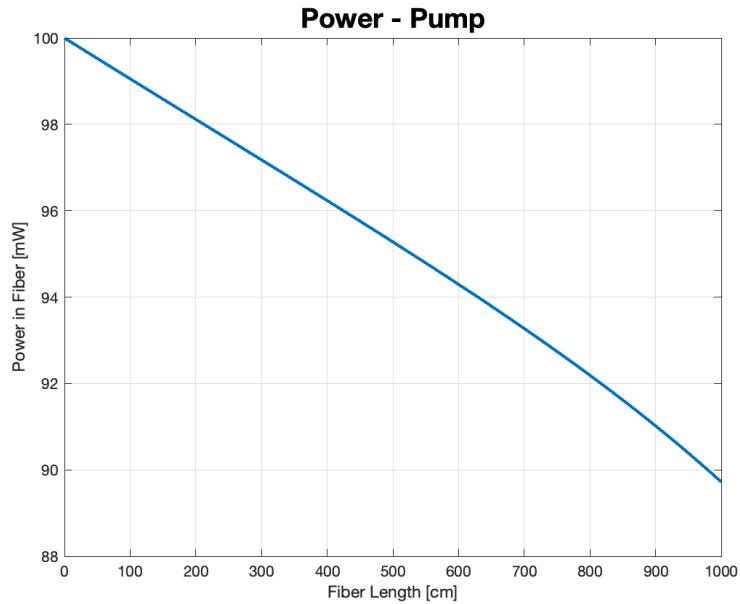


Figura 2.15: Potenza di pompa in funzione della lunghezza del tratto di fibra.  
 $P_p = 100$  [mW] e  $L = 10$  [m].

#### 2.2.2.2 Analisi del guadagno con 20 [m] di EDF

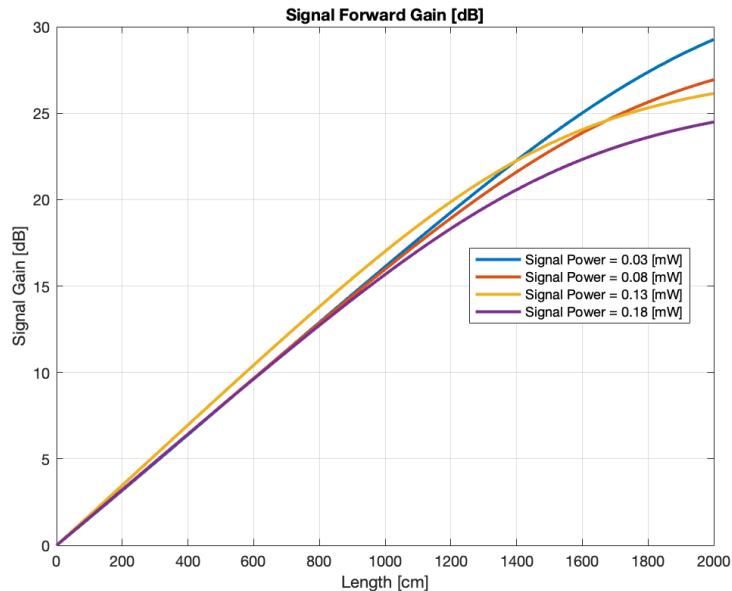


Figura 2.16: Guadagno di segnale al variare della potenza di segnale in ingresso.  
 $P_p = 100$  [mW] e  $L = 20$  [m].

Andando ad aumentare il tratto di fibra attiva si può notare un incremento del guadagno di segnale. Il guadagno è tutt'altro che in zona di saturazione, in quanto sembra avere un comportamento lineare in funzione della lunghezza del tratto di fibra. Andando ad aumentare la potenza del segnale in ingresso, come nei casi analizzati precedentemente, il guadagno diminuisce.

Incrementando la potenza di pompa, il comportamento che si osserva è identico a quello osservato precedentemente.

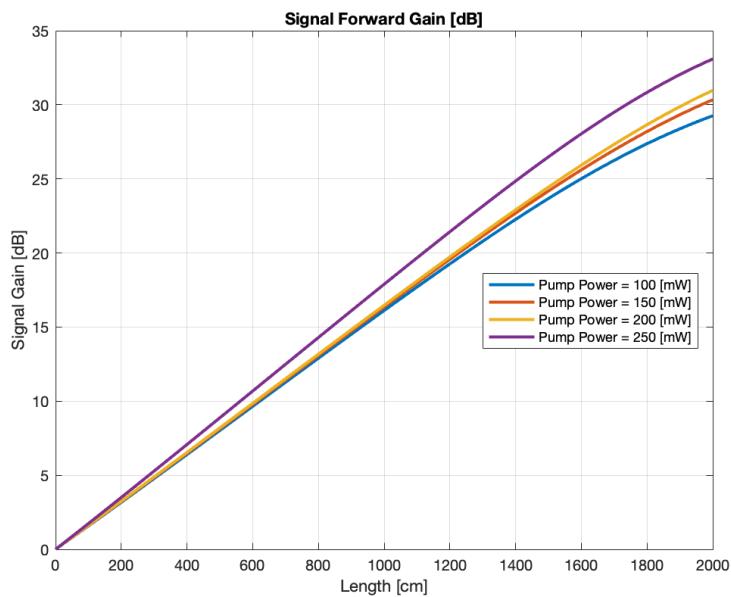


Figura 2.17: Guadagno di segnale al variare della potenza di pompa.  $P_s = 0.03$  [mW] e  $L = 20$  [m].

### 2.2.3 Confronto

In questa sezione sono stati confrontati ottenuti sfruttando le due diverse lunghezze d'onda di pompa. Come si può vedere nelle due tabelle (Tab. 2.5 e Tab. 2.6), utilizzando la stessa lunghezza di fibra, si ottengono guadagni maggiori con la lunghezza d'onda di pompa minore, questo, in tutte le configurazioni analizzate.

Per quanto riguarda l'ASE, al contrario, si può constatare come essa sia minore con una lunghezza d'onda di pompa di 1480 [nm]. Bisogna ricordare che, come visto precedentemente, la potenza dell'ASE è direttamente proporzionale alla lunghezza del tratto di fibra. Per quanto riguarda la pompa a 980 [nm], si è precedentemente osservato come si possa utilizzare un tratto di fibra attiva più corto ottenendo un guadagno di segnale pressoché identico. In questo modo, senza dubbio, anche la potenza relativa all'ASE diminuirà e sarà confrontabile con quella ottenuta a 1480 [nm].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	30.95	2.08	6.68	20
-10	0.08	20	100	980	27.42	0.79	3.05	20
-8	0.13	20	100	980	25.47	0.47	1.95	20
-7	0.18	20	100	980	24.15	0.33	1.42	20
-15	0.03	22	150	980	30.95	2.08	6.68	20
-15	0.03	23	200	980	32.81	3.65	11.23	20
-15	0.03	24	250	980	34.06	5.34	15.94	20
-15	0.03	20	100	980	35.00	7.17	20.76	20

Tabella 2.5: Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] con diverse potenze di pompa e con diverse potenze di segnale in ingresso. Lunghezza del tratto di fibra: 20 [m].

Pensando allo spettro e pensando di utilizzare questi amplificatori in *banda C*, è facile capire come una pompa a 980 [nm] permetta una separazione maggiore rispetto alla banda di segnale. In questo modo la componente della pompa può essere isolata più facilmente; tramite dei filtri ottici può essere definitivamente esclusa, non andando a contribuire alla distorsione totale.

Come precedentemente affermato l'utilizzo di una pompa a 980 [nm] permette un guadagno di segnale più alto: il coefficiente massimo di guadagno per una pompa a 980 è di 11 [dB/mW] contro un coefficiente di guadagno di 6.3 [dB/mW] per una pompa a 1480 [nm].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	1480	29.25	1.37	1.79	20
-10	0.08	20	100	1480	26.63	0.69	1.13	20
-8	0.13	20	100	1480	26.13	0.50	1.05	20
-7	0.18	20	100	1480	24.48	0.36	0.70	20
-15	0.03	20	100	1480	29.25	1.37	1.79	20
-15	0.03	22	150	1480	30.33	1.87	2.33	20
-15	0.03	23	200	1480	30.97	2.27	2.72	20
-15	0.03	24	250	1480	33.09	3.61	4.63	20

Tabella 2.6: Analisi del guadagno e dell’ASE a 1480 [nm] con diverse potenze di pompa e con diverse potenze di segnale in ingresso. Lunghezza del tratto di fibra: 20 [m].

La ragione per cui il pompaggio con una lunghezza d’onda più bassa riesce a performare meglio è da ricercare nei valori di *cross-section* dello ione erbio. A 980 [nm], infatti, la *cross-section* di assorbimento è più molto alta di quanto non sia a 1480 [nm].

Una grossa differenza è visibile andando a confrontare l’*inversion-ratio* alle due lunghezze d’onda. Come visibile in Fig. 2.18, il coefficiente di inversione nel primo caso riesce ad essere molto vicino a 1, ovvero il massimo, ma allo stesso tempo questo crolla molto più velocemente. Superata una determinata lunghezza di fibra (in questo caso 14 [m])<sup>6</sup> non si assiste più ad una vera inversione di popolazione. Con un pompaggio ad una lunghezza d’onda più alta, invece, vediamo come l’inversione di popolazione sia meno consistente ma più costante.

Riassumendo, per ottenere lo stesso guadagno utilizzando servono:

- un tratto di fibra più lungo;

---

<sup>6</sup>Come visibile in Fig. 2.18, oltre i 14 [m] l’*inversion-ration* è minore di 0.5: ciò significa che il livello inferiore inizia ad essere più popolato del livello metastabile.

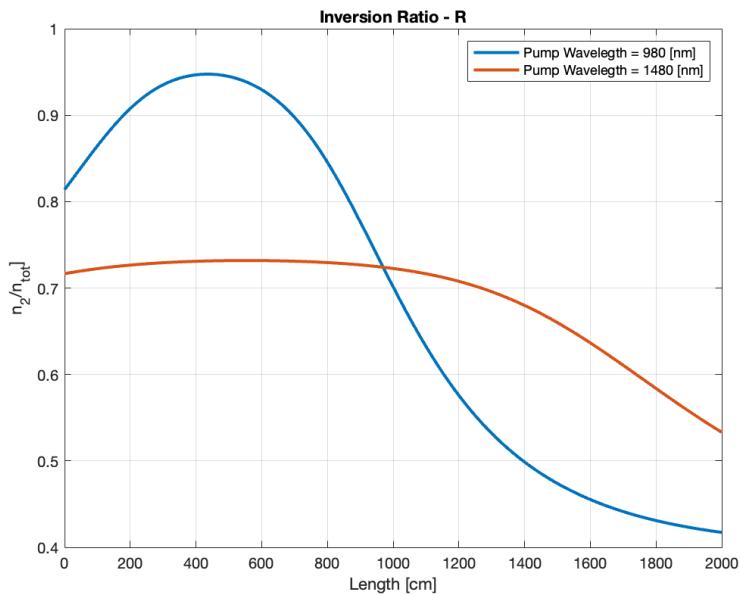


Figura 2.18: *Inversion Ratio* a 980 [nm] e a 1480 [nm].

- (o) maggiore potenza da parte della pompa;
- (o) minore potenza di segnale in ingresso.

Sebbene un amplificatore ottico con una pompa con lunghezza d'onda di 1480 [nm] risulti avere un'efficienza, per quanto riguarda il rumore, maggiore di quella che possiede lo stesso amplificatore con una pompa con lunghezza d'onda di 980 [nm], quest'ultima rimane comunque quella preferita e più utilizzata: infatti, per ottenere un guadagno simile, l'utilizzo della pompa a 1480 [nm] rende l'amplificatore più costoso.

### Minimizzare l'ASE

Ci sono diverse strategie che possono essere messe in pratica per riuscire a minimizzare la potenza relativa all'ASE all'interno di una fibra attiva, tra cui:

- limitare il guadagno massimo di segnale;
- utilizzare una fibra singolo-modo anziché una multi-modo;

- se il segnale da amplificare ha una certa polarizzazione, utilizzare una fibra che mantiene la polarizzazione;
- mantenere l'inversione di popolazione alta alle estremità della fibra attiva;
- utilizzare un pompaggio in direzione opposta.<sup>7</sup>

#### 2.2.4 Caso ideale

Utilizzando questa specifica fibra attiva, si è deciso di provare a cercare quale fosse la miglior configurazione che garantisse un *trade-off* tra: massimo guadagno, minimi costi (minor potenza di pompa e tratto di fibra più corto possibile), senza scordare le figure di rumore (ASE *forward* e ASE *backward*).

Memore di quanto analizzato in precedenza, verranno analizzate solamente configurazioni che prevedono l'utilizzo di una pompa ad una lunghezza d'onda di 980 [nm].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	ASE <sup>+</sup> [mW]	ASE <sup>-</sup> [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	30.95	2.08	6.68	20
-15	0.03	20	100	980	30.80	2.28	5.39	17
-15	0.03	20	100	980	30.16	2.33	4.41	15
-10	0.08	20	100	980	27.23	0.80	2.55	17
-10	0.08	22	150	980	29.14	1.39	4.23	17
-10	0.08	24	250	980	31.40	2.75	7.77	17
-10	0.08	22	150	980	28.68	1.41	3.48	15

Tabella 2.7: Analisi del guadagno e dell'ASE al variare di tutti gli altri parametri di ingresso.  $P_p = 980$  [nm].

I risultati di queste simulazioni vengono tutti riportati nella Tabella 2.7. Si può infatti osservare come il guadagno dipenda dalla potenza di segnale in

---

<sup>7</sup>Come si vedrà successivamente questo accorgimento vede una diminuzione della potenza dell'ASE ma non per questo è da preferire nella trasmissione di segnali.

ingresso: a potenze minori corrispondono guadagni maggiori. Bisogna, però, sottolineare come, utilizzando potenze minori in ingresso, le figure di rumore hanno potenze maggiori, sia in una direzione, sia in quella opposta. Rimane possibile lavorare sulla lunghezza del tratto di fibra attiva: andando a diminuire, qualora possibile, la sua lunghezza, si riescono a ottenere potenze di ASE minori senza rinunciare al guadagno. Anche la potenza di pompa gioca un ruolo molto importante, ma, come sostenuto più volte, è bene non esagerare, sebbene possa garantire guadagni più elevati.

Una configurazione ideale che permette il giusto compromesso tra un ottimo guadagno, una relativamente piccola potenza di ASE in entrambe le direzioni, che utilizza solamente 15 [m] di fibra attiva è quella che vede una potenza di segnale di ingresso di (vedi 2.13) e una potenza di pompa di (vedi 2.14).

Il giusto *trade-off* lo si ottiene utilizzando solamente 15 [m] di fibra attiva, una potenza di segnale di ingresso di (vedi 2.13) e una potenza di pompa di (vedi 2.14). Questa configurazione garantisce un ottimo guadagno, senza tuttavia mostrare livelli di ASE troppo elevati.

$$0.08 \text{ [mW]} = -10 \text{ [dBm]} \quad (2.13)$$

$$150 \text{ [mW]} = 22 \text{ [dBm]} \quad (2.14)$$

## 2.3 Fibra non commerciale

Per le successive simulazioni è stata utilizzata una fibra modellizzata e fornita direttamente dal *toolbox MATLAB*. Non si tratta di una fibra commerciale, tuttavia presenta caratteristiche molto simili, a partire dal coefficiente di assorbimento e quindi alla densità di ioni erbio, alla fibra precedentemente analizzata.

In Tabella 2.8 vengono riportato un *data-sheet* di questa fibra.

Core diameter	5.5 [ $\mu\text{m}$ ]
Core E-field overlap with dopant	75%
Doping concentration	$2.4945 \cdot 10^{24} [\text{l/m}^3]$
Fiber absorption at 1530 [nm]	6.5 [dB/m]

Tabella 2.8: *Optical Specification* della fibra modellizzata dal *toolbox*.

### 2.3.1 Pompaggio a 1460 [nm]

Secondo un *paper* pubblicato dal *Department of Applied Physics* della *Zhejiang University of Technology*<sup>8</sup> con queste concentrazioni di ioni erbio ( $2.4945 \cdot 10^{24} [\text{l/m}^3]$ ), utilizzare un sistema di pompaggio con lunghezza d'onda di 1480 [nm] non è la scelta migliore.

Grazie all'*effetto Stark*, già nominato più volte, si possiede una banda di lunghezze d'onda a cui è possibile effettuare il pompaggio. Per questo motivo viene consigliato di effettuare un pompaggio a 1460[nm] soprattutto se il diametro del *core* della fibra è compreso tra 4 – 5 – 5.8 [ $\mu\text{m}$ ] e utilizzando una potenza di pompa compresa tra 50 – 200 [mW].

Per questo motivo sono state svolte diverse simulazione sia a 980 [nm], sia a 1480 [nm] e ora anche a 1460 [nm] in modo da capire i reali vantaggi del pompaggio a questa lunghezza d'onda. Le differenze sono sempre derivanti dai diversi valori di *cross-section* che si ottengono a questi valori.

Come si evince dai grafici riportati in Fig. 2.19, a questa lunghezza d'onda il comportamento dell'amplificatore si pone a metà tra il suo comportamento a 980 [nm] e il suo comportamento a 1480 [nm]. Inoltre, si nota come, pur cambiando la lunghezza del tratto di fibra, il comportamento sia pressochè il medesimo.

---

<sup>8</sup>A global design of an erbium-doped fiber and an erbium-doped fiber amplifier - Cheng Cheng\* - Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China - 1 October 2003.

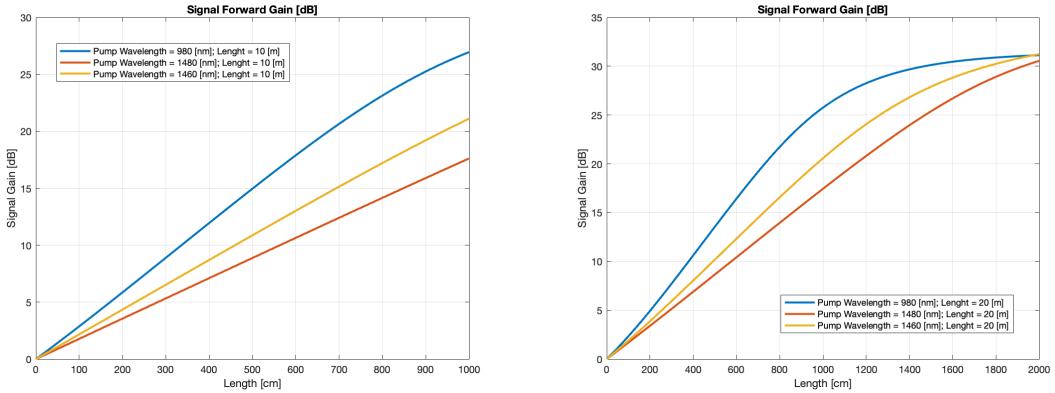


Figura 2.19: Guadagno di segnale con diverse lunghezze d'onda di pompa: 980 [nm] 1460 [nm] e 1480 [nm].  $P_s = 0.03$  [mW],  $P_p = 100$  [mW],  $L = 10$  [m] (a sinistra),  $L = 20$  [m] (a destra).

Utilizzando solo 10 [m] di fibra, nella Tabella 2.9 possiamo ritrovare quanto detto. Sia il guadagno sia le potenze relative all'ASE si pongono nel mezzo tra le due configurazioni classiche. Il guadagno a 1460 [nm] appare minore di quanto si possa ottenere con un diverso pompaggio, ma la qualità dell'amplificazione è sensibilmente incrementata.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	26.94	1.44	1.77	10
-15	0.03	20	100	1480	17.61	0.11	0.12	10
-15	0.03	20	100	1460	21.13	0.26	0.28	10

Tabella 2.9: Analisi del guadagno e dell'ASE al variare della lunghezza d'onda della potenza di pompa.  $L = 10$  [m].

Come abbiamo già detto, sia a 1480 [nm] e anche a 1460 [nm], i guadagni non elevati sono conseguenza del non esaurimento della potenza di pompa. Avendo *cross-section* di assorbimento minori, sono necessarie fibre più lunghe affinchè si possa vedere un assorbimento completo. Facendo un confronto, in Fig. 2.20 si osserva come le potenze di pompa vengano assorbite in 3 modi differenti.

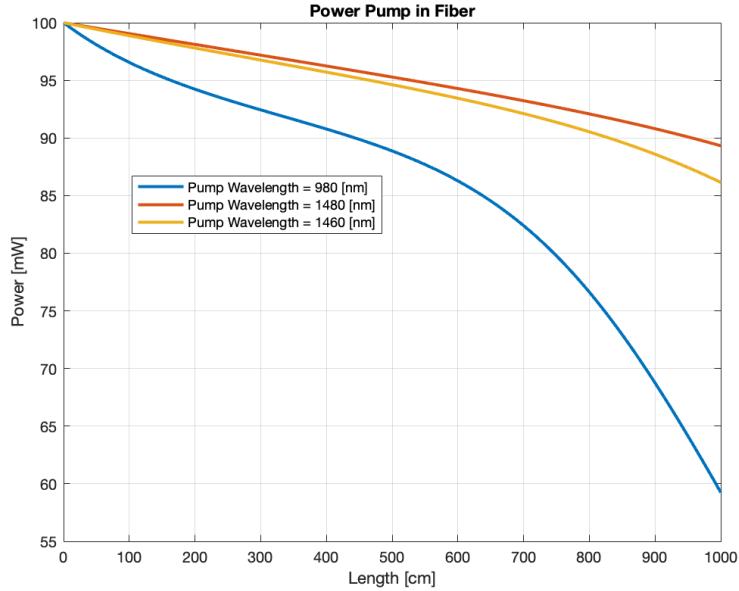


Figura 2.20: Potenza di pompa in funzione della lunghezza della fibra alle tre lunghezze d'onda di pompa: 980 [nm] 1460 [nm] e 1480 [nm].  $P_s = 0.03$  [mW],  $P_p = 100$  [mW],  $L = 10$  [m].

Anche andando a studiare il comportamento utilizzando una fibra più lunga, come riportato in Tabella 2.10, si può osservare un comportamento simile: ora la potenza di pompa è stata pienamente assorbita anche alle altre lunghezze d'onda di pompa, non solo a 980 [nm].

Con questa configurazione, come visibile in Tabella 2.10, ma anche in Fig. 2.19, con 1460 [nm] si riesce ad ottenere un guadagno superiore, senza andare ad incrementare la potenza dell'ASE. In queste condizioni risulta davvero la miglior lunghezza d'onda di pompa da utilizzare.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	31.13	2.11	7.41	20
-15	0.03	22	150	1480	30.55	1.70	2.52	20
-15	0.03	23	200	1460	31.23	1.81	3.64	20

Tabella 2.10: Analisi del guadagno e dell'ASE al variare della lunghezza d'onda della potenza di pompa.  $L = 20$  [m].

### 2.3.2 Pompaggio backward

Non esiste un unico schema costruttivo di un EDFA. Come si può esaminare in Fig. 2.21, esiste anche un'altra configurazione di amplificatore ottico in fibra drogata con erbio. A differenza di quanto visto fino ad ora, il laser generatore della potenza di pompa, viene posto al termine del tratto di fibra attiva e non più all'inizio. Come in tutte le cose, ci sono sia vantaggi sia svantaggi nell'utilizzare questa diversa configurazione.

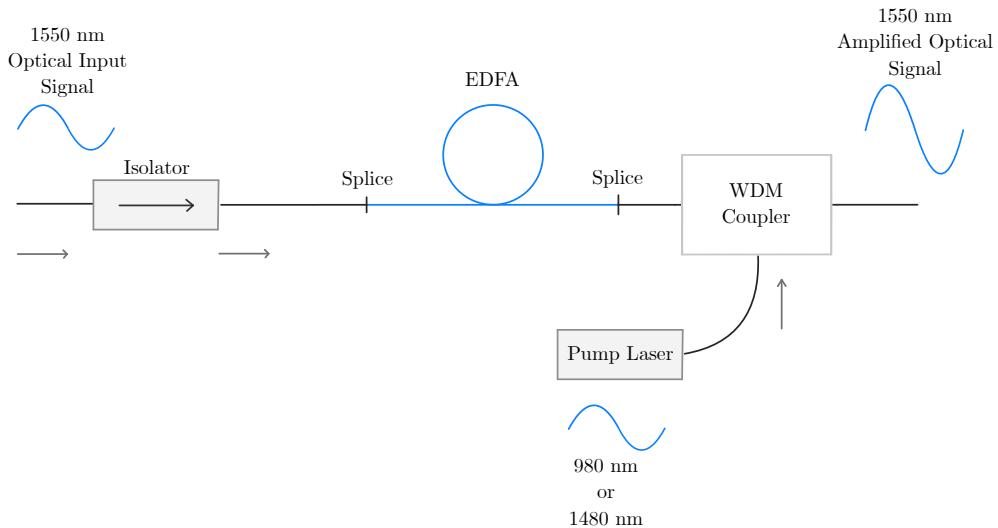


Figura 2.21: Schema di un EDFA con pompaggio *backward*.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	G [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	P.D. f/b
-15	0.03	20	100	980	26.94	1.44	1.77	f
-15	0.03	22	150	980	26.68	1.42	1.68	b
-15	0.03	23	200	1480	17.61	0.11	0.11	f
-15	0.03	23	200	1480	17.58	0.10	0.11	b

Tabella 2.11: Analisi del guadagno e picchi di potenza di ASE con un tratto di fibra di 10 m con P.D. (Pump Direction) sia forward che backward.

Come si può vedere in Tabella 2.11, quando le lunghezze del tratto di fibra sono corte e quindi i guadagni restano bassi, non appaiono particolari differenze

tra le due configurazioni, non mostrando alcun beneficio. Quando invece utilizziamo un tratto di fibra più lungo, oltre ad un guadagno leggerissimamente minore, vediamo delle potenze di ASE molto più basse.

Quando invece si aumenta la lunghezza della fibra attiva, anche il guadagno torna ad aumentare, come già visto in tutte le analisi precedenti. In questo caso le due configurazioni mostrano delle differenze: l'amplificatore che utilizza un pompaggio *backward* mostra, oltre ad un guadagno leggerissimamente minore, potenze di ASE più esigue. Questo avviene perchè, nel tratto finale di fibra, oltre ad alti livelli di potenza di segnale, è presente anche un'alta potenza di pompa: essa deve ancora intraprendere il suo viaggio per essere assorbita. Viceversa, all'inizio della fibra troviamo bassi livelli di potenza di segnale, in quanto questo deve ancora essere amplificato, e bassi livelli di potenza di pompa, in quanto dovrebbe essere già stata completamente assorbita durante il tragitto.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	G [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	P.D. f/b
-15	0.03	20	100	980	31.13	2.11	7.41	f
-15	0.03	22	150	1480	31.31	3.36	2.93	b

Tabella 2.12: Analisi del guadagno e picchi di potenza di ASE con un tratto di fibra di 20 m con P.D. (Pump Direction) sia forward che backward.

Questo fa sì che la distribuzione dell'*inversion-ratio* sia differente. Possiamo vedere in Fig. 2.22 i due casi.

Dalla Figura è possibile vedere come alle estremità, con un pompaggio backward, per i motivi sopra elencati, l'*inversion-ratio* sia più elevato; in questo modo la pompa è maggiormente assorbita prima che essa possa dare vita a fenomeni non desiderati.

In alcuni casi, addirittura, un pompaggio bidirezionale potrebbe aumentarne ancora l'efficienza.

In generale, gli amplificatori basati su un sistema a quasi tre livelli mostrano potenze di ASE più basse quando vedono la pompa in direzione *backward*, oltre

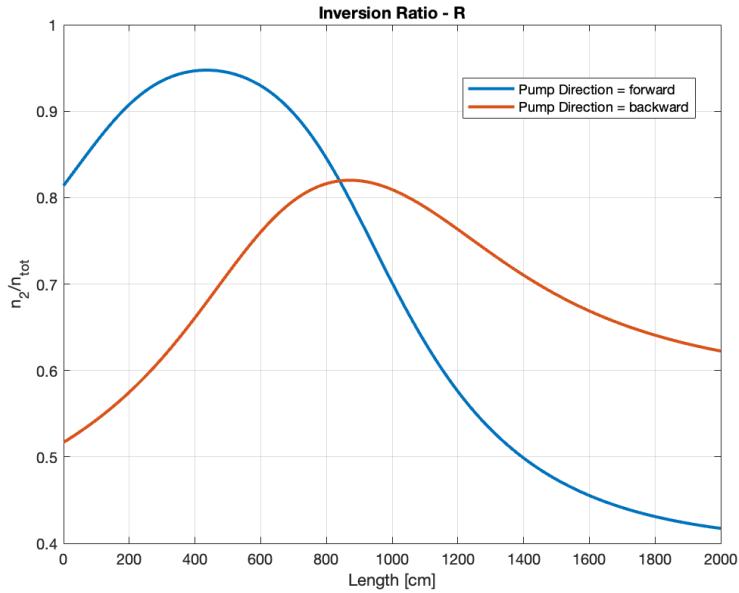


Figura 2.22: *Inversion ratio* in configurazione standard e con pompaggio *backward*.

ad avere una migliore efficienza. Quando si ha a che fare con segnali con una grossa potenza, o quando, per altri motivi il guadagno non è portato al proprio massimo, le differenze tra le due configurazioni si assottigliano sempre di più.

Un esempio lampante lo si può trovare nella prima simulazione svolta dove il guadagno non raggiunge il proprio massimo a causa del tratto troppo corto di fibra.

Un altro aspetto che bisogna considerare, questa volta non a favore di questa configurazione, è che l'ASE che si propaga nella stessa direzione del segnale è quella componente che dà più fastidio, soprattutto quando si vuole un basso rapporto segnale rumore. Come è visibile anche in Tabella, con questa configurazione la potenza di ASE trasmessa nella stessa direzione del segnale è più alta, sebbene il totale sia estremamente minore.

Quindi, riassumendo, quando si vogliono rapporti segnale rumore molto bassi o quando non si possono gestire rumori elevati, un pompaggio in direzione *forward* è da preferirsi.

## 2.4 Fibra ad alto drogaggio

Per queste simulazioni si è deciso di utilizzare una fibra drogata con erbio diversa da quelle viste precedentemente. Si tratta di una fibra ad alto drogaggio, il cui *data-sheet* è visibile in Fig. 2.23. Ad oggi, gli amplificatori in fibra drogata con erbio sono comunemente utilizzati nei sistemi di telecomunicazione. Ad oggi, tutti i gli amplificatori di questo tipo utilizzano diversi metri di fibra drogata, tipicamente intorno ai 15 – 20 [m].

Le alte lunghezze del tratto di fibra sono necessarie in quanto si utilizzano delle fibre con una concentrazione di ioni erbio relativamente basse. Si possono anche utilizzare delle fibre molto più corte ma con una concentrazione di ioni molto più elevata.

Negli ultimi anni la ricerca e lo sviluppo si sono spostati verso il *design* di amplificatori ad alta efficienza con brevi tratti di fibra drogata con erbio. Fino ad ora gli amplificatori che utilizzano alte concentrazioni di ioni erbio hanno performance peggiori rispetto a quelli con drogaggio più basso: difatti questi vanno ad attivare processi non voluti di emissione spontanea che vanno a degradare le sue prestazioni.

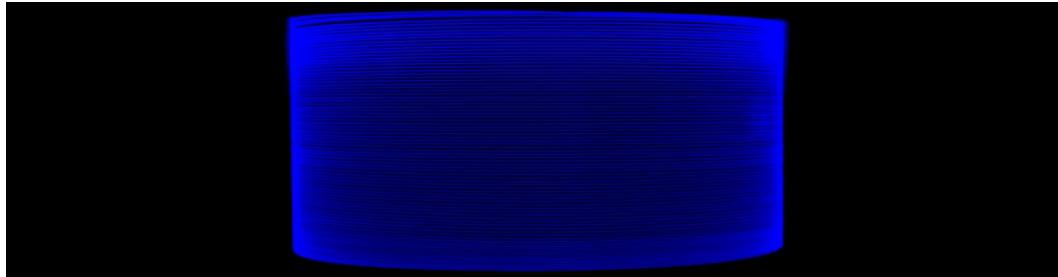
Il *data-sheet* della fibra, come nel caso della fibra numero 1, presenta solamente il coefficiente di attenuazione a 1530 [nm]. Dal coefficiente di attenuazione, tramite il *toolbox* è possibile ottenere una stima della concentrazione di ioni erbio:  $N_T = 9.0701 \cdot 10^{25}$ . Si tratta di almeno un ordine di grandezza superiore rispetto alla concentrazione di ioni nella fibra utilizzata in precedenza.

Nella Tabella 2.13 vengono riportate tutte le grandezze utili alle simulazioni.

Core diameter	9.5 [ $\mu\text{m}$ ]
Core E-field overlap with dopant	75%
Doping concentration	$9.0701 \cdot 10^{25}$ [ $1/\text{m}^3$ ]
Fiber absorption at 1530 [nm]	80.0 [dB/m]

Tabella 2.13: *Optical Specification* della fibra LIEKKI Er80-8/125.

**LIEKKI®** **Er80-8/125(-PM)**  
Large Mode Area Single Clad Erbium Doped Fiber



<b>Features</b>		<b>Applications</b>	
• <b>Direct Nanoparticle Deposition:</b> Industry leading fiber deposition process		• Short pulsed amplifiers and lasers	
• <b>Performance:</b> Very high Erbium doping for short application length and low nonlinearities Suitable for both 980nm and 1480nm pumping Polarization maintaining version available		• Medium power, low nonlinearity applications	
• <b>Reliability:</b> Telecom grade dual layer UV-cured acrylate coating		• Pre-amplifier for LIDAR	
• <b>Compatibility:</b> Telecom-like geometry with good spliceability to standard SM fibers (SMF-28)			

**Typical Fiber Specifications**

Fiber	LIEKKI® Er80-8/125	LIEKKI® Er80-8/125-PM
<b>Optical</b>	<b>Units</b>	
Mode Field Diameter at 1550 nm <sup>(1)</sup>	µm	9.5 ± 0.8
Peak Core Absorption at 1530 nm	dB/m	80.0 ± 8.0
Core Numerical Aperture (nominal)		0.13
Cut-off wavelength <sup>(2)</sup>	nm	1250 ± 150
Birefringence, ≥	1E-04	-
		1.0
<b>Geometrical and mechanical</b>		
Core Concentricity Error, ≤	µm	0.7
Core Ellipticity Error, ≤	%	5.0
Cladding Diameter	µm	125 ± 2
Cladding Geometry		Round
Coating Diameter		245 ± 15
Coating Material		Dual coated high index acrylate
Proof Test, ≥	kpsi	100
		100

<sup>(1)</sup> Near-field Mode Field Diameter  
<sup>(2)</sup> Calculated value

nLIGHT continually improves its products to provide outstanding quality and reliability. The information contained herein is subject to change without notice. nLIGHT, Inc. shall not be liable for technical or editorial errors or omissions contained herein. Warranties are set forth in express warranty statements accompanying products. Nothing herein should be construed as constituting an additional warranty. For details, please contact your nLIGHT sales representative.

+358 19 357391 | [fibers@nlight.net](mailto:fibers@nlight.net) | [www.nlight.net](http://www.nlight.net)

**nLIGHT**

Figura 2.23: *Data-sheet* di una *C-Band Erbium Doped, Large Mode, Fiber* della **LIEKKI**

### 2.4.1 Pompaggio a 980 [nm]

Sebbene alcuni risultati sotto riportati siano in funzione della lunghezza del tratto di fibra, essi sono sempre stati ottenuti tramite differenti simulazioni, in modo da ottenere una certa validità e precisione.

In un primo momento si è deciso di effettuare le stesse prove fatte anche con la fibra precedentemente analizzata. Andando a cambiare la lunghezza del tratto di fibra cambia anche il guadagno e il livello di ASE. Ovviamente, come già osservato in precedenza, un tratto di fibra più lungo permette dei guadagni più elevati e livelli di ASE più alti. Tutto questo è vero fino a un certo punto: quando si vanno ad utilizzare fibre troppo lunghe, si assiste a una discesa del guadagno e anche a uno strano comportamento dell'ASE.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	17.08	0.10	0.11	0.5
-15	0.03	20	100	980	27.49	1.26	2.09	1
-15	0.03	20	100	980	29.04	1.23	4.36	1.5
-10	0.08	20	100	980	28.38	1.16	5.39	2

Tabella 2.14: Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della lunghezza del tratto di fibra.

Questo lo si può osservare sia dai dati riportati in Tabella, sia dal grafico visibile in Fig. 2.24.

Andando, invece, a variare la potenza di segnale in ingresso, come ci si aspetta, si può notare un miglioramento nei confronti della potenza dell'ASE e un peggioramento del guadagno. Infatti, come con le fibre analizzate precedentemente, andando ad incrementare la potenza di segnale in ingresso, osserviamo una diminuzione del guadagno. Con una differenza di 8 [dBm] in ingresso, il guadagno presenta una differenza di oltre 5 [dB].

Andando, invece, a variare solamente la potenza di pompa, mantenendo gli altri parametri costanti, si può osservare, sempre come previsto ad un aumento

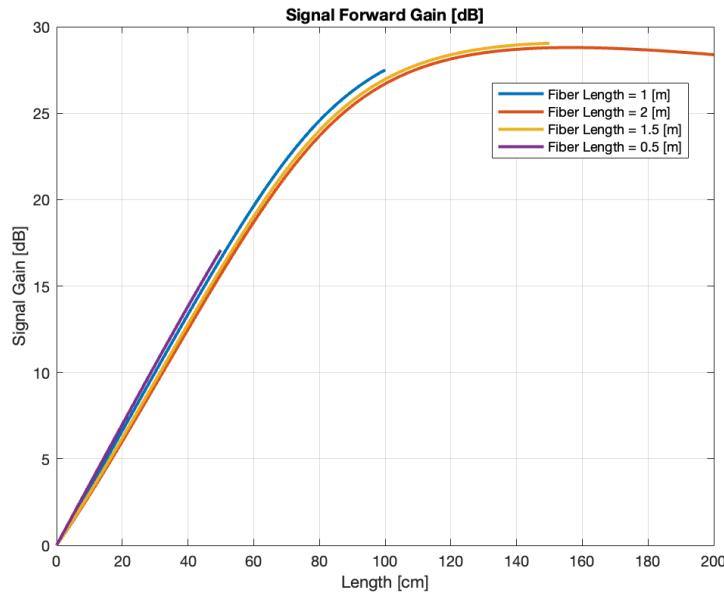


Figura 2.24: Guadagno di segnale in funzione di diverse lunghezze del tratto di fibra.  $P_p = 100$  [mW] e  $P_s = 0.03$  [mW].

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	27.49	1.26	2.09	1
-10	0.08	20	100	980	24.92	0.54	1.12	1
-8	0.13	20	100	980	23.35	0.33	0.78	1
-7	0.18	20	100	980	22.24	0.24	0.60	1

Tabella 2.15: Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della potenza del segnale in ingresso.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-15	0.03	20	100	980	27.49	1.26	2.09	1
-15	0.03	22	150	980	29.58	2.49	3.86	1
-15	0.03	23	200	980	30.82	3.79	5.58	1
-15	0.03	24	250	980	31.68	5.10	7.72	1

Tabella 2.16: Analisi del guadagno e dell'ASE a 980 [nm] al variare della potenza di pompa.

$P_s$ [dBm]	$P_s$ [mW]	$P_p$ [dBm]	$P_p$ [mW]	$\lambda_p$ [nm]	Gain [dB]	$ASE^+$ [mW]	$ASE^-$ [mW]	L [m]
-10	0.08	22	150	980	28.58	1.21	2.06	1

Tabella 2.17: Caso ideale con una fibra ad alta concentrazione di ioni erbio.

sia del guadagno, sia della potenza relativa all'ASE. Soprattutto per quanto riguarda quest'ultima componente si osserva un netto peggioramento, specie considerando la potenza molto piccola del segnale in ingresso.

La configurazione migliore, per quanto riportato sopra, appare essere quella che vede come segnale in ingresso 0.08 [mW], come potenza di pompa 150 [mW] utilizzando un solo metro di fibra ottica.

# Capitolo 3

## Esperienza in laboratorio

Come si è ampiamente visto sopra, un *toolbox*, in questo caso *MATLAB*, permette risparmiare tantissimo tempo in fase di progettazione e ingegnerizzazione di un amplificatore ottico in fibra drogata con erbio.

Il simulatore permette di non configurare ogni volta un *set-up* da laboratorio. Quest'ultima fase innalzerebbe i tempi e i costi relativi alla fase di progettazione. Le fibre attive sono, infatti, molto costose e allo stesso tempo molto fragili: non è detto che uno stesso tratto possa essere utilizzato più volte, in particolar modo se diverse simulazioni prevedono lunghezze diverse di fibra attiva.

In laboratorio si vanno a testare solamente le configurazioni che appaiono adatte alle esigenze di progetto, in modo da valutarne anche il reale comportamento. I *toolbox* hanno raggiunto una precisione molto alta e permettono di fare simulazioni coerenti e difficilmente si discostano da quanto si può testare nella realtà.

È stato possibile fare un'esperienza di laboratorio, andando a toccare con mano i diversi componenti che insieme formano un amplificatore ottico. Come illustrato nello schema presente in Fig. 1.7, i componenti strettamente necessari sono: un generatore di segnale da amplificare, un laser di pompa, un WDM *coupler* e un tratto di fibra drogata con erbio. Nello schema appaiono anche gli isolatori ottici, componenti non essenziali alla costruzione di un amplificatore

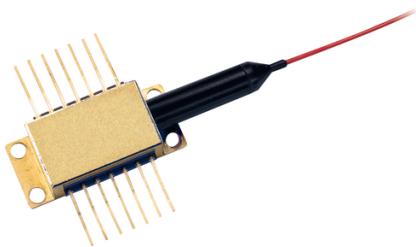


Figura 3.1: Package di un *laser-diode* con il suo collegamento in fibra ottica.

ma in grado di migliorarne le prestazioni.

Per quanto riguarda il laser di pompa è stato utilizzato un laser controllabile sia in temperatura sia in corrente. In questo modo si riesce a impostare con precisione la potenza di emissione e a mantenerla stabile nel tempo. In laboratorio è stato utilizzato un diodo laser, ovvero un laser a semiconduttore che utilizza come mezzo attivo la regione attiva del semiconduttore.

Il laser trasmette la propria potenza di emissione tramite un tratto di fibra ottica, come visibile in Fig. 3.1.

I laser sono molto sensibili alle temperature, specialmente se, come questo, sono laser ad alta potenza. Una piccola variazione potrebbe cambiare radicalmente il suo comportamento o modificarne la zona di emissione. Soprattutto quando vengono utilizzati per lunghi intervalli di tempo, come si può ben immaginare, sono sottoposti a diversa energia da dissipare sotto forma di calore.

Per questo motivo si rende necessaria la presenza di un *laser-mount* il quale, non solo ha il compito di dissipare il calore generato dal dispositivo, ma è proprio questo dispositivo che permette di eseguire i controlli in temperatura e in corrente. Collegandosi ai *PIN* del laser, esso riesce a controllare la corrente<sup>1</sup> entrante nel laser.

---

<sup>1</sup>La corrente, in un laser, è direttamente proporzionale alla potenza emessa e quindi anche alla temperatura dello stesso.



Figura 3.2: Esempio di *Laser-mount* (a sinistra) con ingressi per i collegamenti con il *controller* (a destra).

Oltre al *package* e al *laser-mount* è indispensabile anche un *controller*, tramite il quale è possibile andare ad impostare i parametri di riferimento.

Successivamente, per poter accoppiare il segnale in ingresso da amplificare con il segnale di pompa generato dal laser, è fondamentale la presenza di un WDM (*Wavelength Division Multiplexer*) *coupler*, il quale trasmette entrambi i segnali su un unico tratto di fibra. Si tratta, quindi, di un dispositivo con due ingressi, ai quali andranno avvitati, tramiti appositi connettori, o tramite giunzioni a fusione<sup>2</sup>, le due fibre ottiche e una sola uscita che andrà poi connessa, con le stesse modalità, alla fibra attiva.

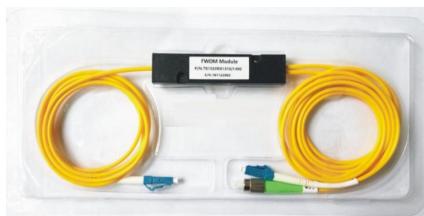


Figura 3.3: *Laser-controller* e valori di temperatura e di corrente.

<sup>2</sup>Una giunzione a fusione è realizzata in laboratorio tramite una *fusion splicer*. Si tratta di un dispositivo in grado di fondere due tratti di fibra ottica, andando successivamente a valutarne le perdite dovute alla saldatura. Se quest'ultima non rispetta certi *standard* viene suggerito dalla macchina stessa di rifare il procedimento. Per effettuare la fusione di due tratti è necessario andare a rimuovere il *cladding* dalle due fibre, per questo motivo, una volta effettuato il procedimento, il tratto unico di fibra viene ricoperto con una guaina isolante per garantirne la resistenza agli urti e donare nuovamente flessibilità

All'altro capo della fibra in uscita dal WDM sono stati collegati circa 10 metri di una fibra attiva drogata con ioni di erbio. Questa è stata tagliata a misura in quanto giunge nei laboratori arrotolata in matasse molto lunghe. All'altro capo della fibra attiva, per permettere un'analisi dell'amplificatore, è stato collegato una *spectrum analyzer* il quale, come suggerisce il nome, ha il compito di analizzare lo spettro d'uscita in tutte le sue componenti.



Figura 3.4: *Spectrum-analyzer*.

Dai risultati è stato possibile osservare un picco di potenza in corrispondenza della lunghezza d'onda del segnale in ingresso (nonché segnale che necessitava di amplificazione). Come visto anche nelle simulazioni, ci sono anche altre componenti di potenza, come quelle dell'ASE. Focalizzandosi sulla lunghezza d'onda di pompa, viene osservato come, gran parte della potenza emessa dal laser sia stata assorbita direttamente dalla fibra, questo è ben visibile dallo studio dello spettro.

# Conclusione

L'iniziale studio teorico seguito dall'analisi di diverse simulazioni con codice *MATLAB* ha permesso di capire a fondo il comportamento degli amplificatori ottici in fibra drogata con erbio. Il codice del *toolbox*, sebbene fosse in parte funzionante, è stato modificato in modo da rendere possibile la raccolta di dati e le configurazioni desiderate.

Nel secondo capitolo sono state studiate diverse configurazioni, sia con fibre commerciali, sia con fibre sperimentali. Il tutto è stato svolto in modo da trovare quale potesse essere una configurazione ideale che permettesse di avere un alto guadagno di segnale senza andare a rinunciare ad una bassa figura di rumore e senza scordare il costo in termini economici dell'amplificatore.

Nel terzo capitolo viene descritta la realizzazione fisica di un amplificatore ottico di questo tipo e quanto sia importante e utile avere *toolbox* come quello utilizzato per sapere già in partenza quale potrebbe essere il suo comportamento. Un buon codice permette non solo di risparmiare tempo, andando a sperimentare solamente la configurazione ideale, ma anche di risparmiare sui costi di progettazione e ingegnerizzazione.

In questa tesi si è voluto dimostrare perchè, ancora oggi, vengono utilizzati gli EDFA e perchè siano stati in grado di rivoluzionare il mondo delle comunicazioni in fibra ottica.

# Bibliografia

- [1] Delta.it *Attenuazione della fibra ottica*. Consultato il 13/10/2022. [https://shopdelta.eu/attenuazione-della-fibra-ottica\\_15\\_aid811.html](https://shopdelta.eu/attenuazione-della-fibra-ottica_15_aid811.html).
- [2] F. Sarcina, *I cavi sottomarini: la «spina dorsale» di Internet*, 28 maggio 2016, Il Sole 24 Ore. Consultato il 29/09/2022. <https://st.ilsole24ore.com/art/tecnologie/2016-05-27/i-cavi-sottomarini-spina-dorsale-internet-145231.shtml?uuid=ADaWJzQ>.
- [3] C.R. Giles, E. Desurvire, *Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, J. Lightwave Technol., Vol. 9, No.2, febbraio 1991.
- [4] B. Pedersen, A. Bjarklev, J.H. Povlsen, K. Dybdal, C.C. Larsen *The Design of Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, J. Lightwave Technol., Vol. 9, No.9, settembre 1991.
- [5] G. Robson, *Electron shell diagram for Erbium, the 68th element in the periodic table of elements.*, 22 agosto 2005. Consultato il 29/09/2022. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron\\_shell\\_068\\_erbium.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electron_shell_068_erbium.png).
- [6] Y. Liu, X. Liu, L. Liu, Y. Zhang, M. Cai, L. Yi, W. Hu, Q. Zhuge, *Modeling EDFA Gain: Approaches and Challenges*. Photonics 2021, 8, 417.
- [7] Nurfen, *C-Band Erbium Doped Fiber, Single Mode Fiber*, Consultato il 2/10/2022. <https://www.coherent.com/resources/datasheet/components-and-accessories/edfc-980-hp-ds.pdf>.

- [8] Ansys Lumerical, *Erbium doped fiber amplifier*, Consultato il 4/10/2022. <https://optics.ansys.com/hc/en-us/articles/360042819353-Erbium-doped-fiber-amplifier>.
- [9] Dr. Paschotta, *Fiber Amplifiers*, Consultato il 5/10/2022. [https://www.rp-photonics.com/tutorial\\_fiber\\_amplifiers.html](https://www.rp-photonics.com/tutorial_fiber_amplifiers.html).
- [10] Alberto Bononi, Paolo Serena, Jean-Christophe Antona, *A State-Variable Approach to Submarine Links Capacity Optimization*.
- [11] M. Brenci, *Appunti di optoelettronica*.
- [12] C. Cheng, *A global design of an erbium-doped fiber and an erbium-doped fiber amplifier*, Department of Applied Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China, 1 October 2003, IEEE Explorer.

# Ringraziamenti

...