

Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

TESI DI LAUREA

Analisi sperimentale della dipendenza dalla temperatura del guadagno Brillouin in fibre ottiche monomodali

Laureando
Marco Segato

Relatore
Prof. Luca Palmieri

22 Aprile 2013

Anno Accademico 2012/2013

*Un ringraziamento speciale
alla mia famiglia
e a tutti coloro
che mi sono stati
accanto e mi hanno
sostenuto in questi anni.
Grazie a tutti.*

Elenco delle figure

1.1	Schema di interrogazione in <i>trasmissione</i>	6
1.2	Schema di interrogazione in <i>riflessione</i>	6
1.3	Schema di funzionamento di un FBG.	7
1.4	Esempio di FBG presente in commercio. (<i>fonte</i> : JDS Uniphase)	8
1.5	Esempi di utilizzo dei sensori in fibra ottica in vari ambienti. .	13
1.6	Götaälv Bridge (Svezia), costruito nel 1939.	13
1.7	Sensore di strain posato lungo la struttura portante del ponte.	14
2.1	Schema spettrale dei tre fenomeni descritti: scattering Rayleigh, Raman e Brillouin.	17
2.2	Diagramma che rappresenta l'effetto Rayleigh dal punto di vista microscopico.	18
2.3	SRS (Scattering Raman Stimolato) - schema a bande componente Stokes (a) e anti-Stokes (b).	18
2.4	Diagramma spettrale che riporta le tre frequenze relative rispettivamente all'onda Stokes, di pompa e anti-Stokes.	19
2.5	Rappresentazione grafica dello Scattering Brillouin Stimolato.	20
2.6	Rappresentazione dei vettori d'onda delle tre onde (pompa, Stokes e acustica).	21
2.7	Trasferimento di potenza tra l'onda acustica e l'onda di Stokes nel SBS.	23
2.8	Schema di riferimento per SBS in una fibra ottica di lunghezza L : interazione tra le onde di pompa (I_p) e di Stokes (I_s).	24
2.9	Rappresentazione della dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione in una fibra ottica a bassa birifrangenza (in blu l'onda di pompa e in rosso l'onda Stokes).	26
2.10	Rappresentazione grafica sperimentale della dipendenza di ν_B da temperatura (a) e strain (b).	31
2.11	Configurazione tipica di un sistema BOTDR in cui: FUT (Fiber Under Test) è la fibra sensing (trasduttore distribuito), LO è l'oscillatore locale e CW indica l'onda continua.	32
2.12	Configurazione tipica di un sistema BOTDA.	33

2.13	Parametri di misura in un BOTDA: (a) relazione tra la posizione (in m) e il guadagno Brillouin (in mW), (b) relazione tra la posizione e lo shift Brillouin (in GHz) e (c) grafico in cui si riporta la relazione tra lo shift e il guadagno Brillouin al variare della distanza.	34
2.14	Configurazioni di un sistema BOTDA utilizzando due sorgenti (a) oppure una sorgente (b).	35
3.1	Setup sperimentale iniziale.	38
3.2	Scrambler utilizzato per depolarizzare il segnale.	39
3.3	Foto dello scrambler utilizzato (vista dall'alto).	39
3.4	Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) nel caso di EDFA spento (blu) e acceso (rosso).	40
3.5	Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) nel caso di EDFA spento (blu) e acceso (rosso) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e pompa non svuotata.	41
3.6	Setup sperimentale con scrambler dopo il primo isolatore ottico.	42
3.7	Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e in condizioni di pompa svuotata.	42
3.8	Setup sperimentale con scrambler dopo l'amplificatore ottico (EDFA).	43
3.9	Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e con EDFA acceso in condizioni di pompa svuotata.	44
3.10	Guadagno Brillouin sperimentale misurato in porta 4, dopo il filtraggio attraverso l'FBG.	45
3.11	Setup sperimentale con scrambler dopo l'amplificatore ottico (EDFA) e maggiore potenza di pompa.	46
3.12	Banco di prova: nella parte sinistra è visibile la fibra sensore utilizzata, mentre nella parte destra si possono osservare i vari componenti dello schema finale.	46
3.13	Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e in condizioni di pompa non svuotata.	47
3.14	Potenza in uscita dalla porta 3 (blu) e 4 (rosso) del circolatore rispettivamente prima e dopo il filtraggio con filtro FBG.	47
3.15	Guadagno Brillouin sperimentale misurato in porta 4, dopo il filtraggio attraverso l'FBG.	48

3.16	Guadagno Brillouin misurato in porta 4 (blu) e fitting con una curva Lorentziana (rosso).	50
3.17	Guadagno Brillouin in funzione della frequenza di picco (ν_B) al variare della temperatura.	51
3.18	Relazione tra la temperatura e lo shift Brillouin; in blu i valori ricavati per ogni temperatura (<i>Tabella 3.1</i>) ed in rosso il fitting eseguito con una retta.	52
3.19	Relazione tra la temperatura ed il parametro c_2 ottenuto dall'operazione di fitting; in blu il valore medio.	53
3.20	Grafico 3D che mette in relazione tre parametri: shift Brillouin (ν_B), temperatura (T) e guadagno Brillouin (G_B).	54
3.21	Dettaglio del grafico di <i>Figura 3.20</i> in cui si considera la relazione tra la temperatura e lo shift Brillouin.	54
A.1	Filtro FBG sintonizzabile utilizzato negli esperimenti.	59
A.2	Setup sperimentale per la caratterizzazione del filtro FBG in riflessione: in blu l'onda trasmessa dal laser e in rosso l'onda riflessa dal filtro.	60
A.3	Misura sperimentale della riflessività del filtro FBG utilizzato.	60

Elenco delle tabelle

3.1	Tabella dei parametri ottenuti con il fitting Lorentziano per diverse temperature.	51
-----	--	----

Indice

Introduzione	1
1 Sensori in fibra ottica	4
1.1 Classificazione dei sensori in fibra ottica	4
1.1.1 Sensori concentrati	6
1.1.2 Sensori distribuiti	8
1.1.3 Altri tipi di sensori in fibra	9
1.2 Vantaggi e svantaggi dei sensori in fibra ottica	10
1.2.1 Vantaggi	10
1.2.2 Svantaggi	11
1.3 Applicazioni e stato dell'arte	11
2 Amplificazione Brillouin	16
2.1 Fenomeni di scattering nelle fibre ottiche	17
2.2 Scattering Raman	18
2.3 Scattering Brillouin Stimolato (SBS)	19
2.3.1 Dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione	25
2.4 Amplificazione Brillouin	28
2.5 Applicazioni dello Scattering Brillouin Stimolato	30
2.5.1 Sensori Brillouin Spontanei	31
2.5.2 Sensori Brillouin Stimolati	32
3 Attività sperimentale	37
3.1 Prima configurazione	37
3.2 Seconda configurazione	40
3.3 Terza configurazione	43
3.4 Configurazione finale	44
3.4.1 Fitting Lorentziano	45
3.5 Risultati sperimentali e commenti	49
4 Conclusioni	56

A Caratterizzazione FBG	59
Bibliografia	62

Introduzione

La fibra ottica nelle telecomunicazioni rappresenta da oltre 40 anni il mezzo trasmissivo più performante disponibile sul mercato grazie alla sua enorme banda di trasmissione (nell'ordine dei THz), al suo basso costo, alla bassa attenuazione (che rende possibile la trasmissione su distanze molto più lunghe rispetto, ad esempio, al cavo coassiale) e all'immunità ai disturbi elettromagnetici.

Ma le fibre ottiche non sono “solo” dei mezzi trasmissivi, possono essere configurate infatti per realizzare dei dispositivi in grado di rilevare e misurare una determinata grandezza fisica (ad esempio la temperatura, lo strain, l'umidità ecc ...), ovvero possono essere usate come sensori.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è di studiare il fenomeno dello scattering Brillouin stimolato, misurandone il guadagno e osservando il comportamento che questo ha in relazione alle variazioni di temperatura in una fibra ottica monomodale. In particolare è stato implementato uno schema di misura basato su BOTDA [1].

L'idea nasce dalla necessità di trovare un modo per monitorare l'argine di un fiume: dal punto di vista pratico si vorrebbe installare un sistema di sensing distribuito lungo un argine per capire se vi sono delle infiltrazioni d'acqua ed intervenire di conseguenza. Un possibile schema del sensore potrebbe essere costituito da due fibre ottiche poste una sopra all'altra ad una certa distanza all'interno dell'argine: se l'infiltrazione dell'acqua arriva dal terreno allora si osserverà una variazione di temperatura tra le due fibre, in quanto la presenza di acqua, si dimostra, provoca delle variazioni di temperatura nel terreno. Di conseguenza si può pensare allo sviluppo di un sensore di temperatura distribuito che sia in grado di fornire l'informazione sulla temperatura lungo l'argine.

Il monitoraggio degli argini prevede solitamente un'ispezione diretta sul posto, con tutti i disagi e le limitazioni che ciò comporta, mentre un sensore distribuito in fibra ottica potrebbe essere la soluzione ideale per avere l'informazione in tempo reale e lungo tutto l'argine, permettendo quindi di effettuare ispezioni mirate solo nei punti critici con un notevole risparmio di

tempo e di risorse.

In particolare studiando l'effetto Brillouin in fibra si vuole creare la base per uno sviluppo futuro di un sensore di questo tipo.

Nel primo capitolo vengono presentati i principali tipi di sensori in fibra ottica, con i loro vantaggi e svantaggi, con particolare riferimento ai sensori ottici distribuiti (noti in letteratura come *DOFS - Distributed Optical Fiber Sensors*) e alle applicazioni che tali sensori hanno in vari campi.

Nel secondo capitolo viene riportata la descrizione dettagliata del fenomeno che sta alla base di questo lavoro, ovvero lo scattering Brillouin stimolato ed il calcolo del guadagno Brillouin; viene prestata particolare attenzione alla dipendenza del guadagno dalla temperatura ed alle configurazioni che permettono una tale misura (BOTDA e BOTDR).

Nel terzo capitolo viene presentata l'attività sperimentale iniziando dalla prima configurazione provata ed arrivando alla configurazione ottimale e alla presentazione dei risultati ottenuti, presentando anche i problemi riscontrati e le soluzioni proposte.

Infine nel quarto capitolo vengono riportate le considerazioni finali riguardanti i risultati ottenuti ed i possibili sviluppi futuri dello schema proposto per arrivare alla creazione di un sensore distribuito di temperatura.

Capitolo 1

Sensori in fibra ottica

In un sensore in fibra ottica il misurando (ovvero la grandezza fisica che si vuole misurare) influenza il modo in cui la luce si propaga all'interno del mezzo; la propagazione del campo elettromagnetico a frequenze ottiche è, infatti, influenzata da varie grandezze fisiche, che possono essere quindi misurate.

Questo capitolo contiene una breve panoramica sui principali tipi di sensore in fibra ottica presenti in letteratura, con particolare riferimento ai sensori ottici di umidità.

1.1 Classificazione dei sensori in fibra ottica

Una prima classificazione dei sensori in fibra ottica va fatta distinguendo i sensori di tipo *estrinseco* dai sensori di tipo *intrinseco*.

In entrambi i casi una sorgente ottica genera un fascio di luce costante, che viene immesso nella fibra ottica e trasmesso fino al punto in cui la grandezza che deve essere misurata non interviene modulando una o più proprietà della radiazione ottica. L'uscita è ricevuta in genere da un sistema di rivelazione, che la converte in un segnale elettrico.

Nel caso dei sensori di tipo *estrinseco* la luce può uscire dalla guida d'onda ed essere modulata da un dispositivo separato dalla fibra, prima di essere rilanciata in un'altra (o nella stessa), mentre nel caso dei sensori di tipo *intrinseco* la luce continua ad essere guidata all'interno della stessa guida, lungo la quale interviene la modulazione legata al misurando.

Nei sensori estrinseci la fibra ottica, di fatto, assume “solamente” la funzione di mezzo di trasmissione del segnale di stimolo e del segnale di misura da e verso un elemento sensibile realizzato su un supporto fisico esterno.

Nei sensori intrinseci, invece, i parametri meccanici quali pressione o tempera-

tura interagiscono direttamente con la luce all'interno della fibra causandone la modulazione di alcune proprietà ottiche (ad esempio indice di rifrazione, coefficiente di trasmissione); dal punto di vista pratico in questi sensori la fibra “capta” la grandezza da misurare.

Una seconda classificazione dei sensori in fibra può essere fatta distinguendo sensori *concentrati* in cui la misura viene fatta su una piccola area (sensori puntuali o locali) e sensori *distribuiti* dove invece la misura viene fatta su aree molto più ampie (anche nell'ordine di parecchie decine di km).

In generale la struttura di base di un sensore in fibra ottica è costituita da:

- sorgente luminosa (LASER o LED)
- elemento sensibile (la fibra)
- un fotorivelatore (in grado di rilevare la radiazione luminosa)

La sorgente luminosa può essere costituita da un diodo laser o da un diodo LED. In particolare il diodo LED emette un fascio ottico a bassa coerenza ma di notevole ampiezza spettrale, ed è quindi adatto nei sensori in cui il misurando altera l'intensità della potenza ottica in fibra; è tuttavia poco costoso rispetto al diodo laser che, invece, presenta una elevata coerenza, un'ampiezza spettrale molto più limitata ed una elevata potenza ottica in uscita. Tali requisiti sono particolarmente adatti allo sviluppo di sensori interferometrici o sensori in cui l'informazione legata al misurando dipende dalla fase o dalla lunghezza d'onda del segnale ottico.

I fotorivelatori più utilizzati sono costituiti da fotodiodi che eseguono la conversione del segnale ottico in segnale elettrico; fra gli altri vanno ricordati i fotodiodi a semiconduttore (PD) ed i fotodiodi “a valanga” (APD).

Esistono principalmente due schemi di interrogazione di un sensore ottico:

1. Schema in *trasmissione*
2. Schema in *riflessione*

In entrambi i casi la sorgente luminosa invia un segnale ottico al trasduttore che accoppia il campo elettromagnetico al misurando ¹; il segnale ottico viene poi inviato al sistema di misura.

è importante notare che nel caso del sensore “*in riflessione*” è possibile localizzare sorgente ottica e sistema di misura nello stesso punto, in quanto una

¹I trasduttori presentano una grandezza (o segnale) in entrata e una grandezza (o segnale) in uscita; la grandezza in uscita varia al variare della grandezza in ingresso ed è legata ad essa mediante una funzione matematica più o meno complessa chiamata caratteristica del trasduttore o funzione di trasferimento del trasduttore.

parte del segnale ottico che esce dal trasduttore viene retropropagato verso il sistema di misura; questo comporta l'enorme vantaggio di poter avere nello stesso luogo sia la sorgente che il sistema di misura.

In *Figura 1.1* e *Figura 1.2* sono riportati i due schemi di interrogazione citati.

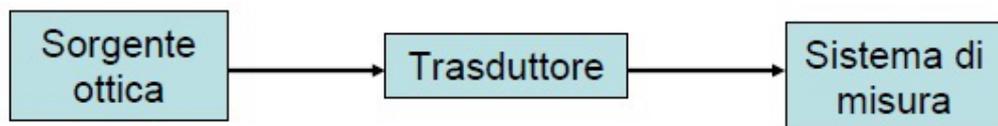


Figura 1.1: Schema di interrogazione in *trasmissione*.

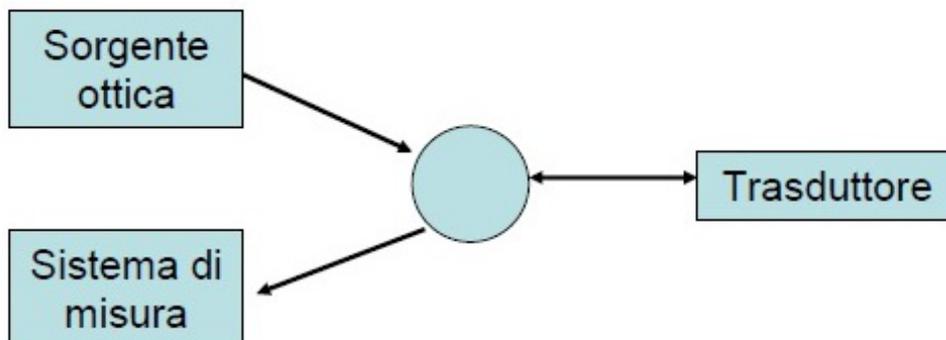


Figura 1.2: Schema di interrogazione in *riflessione*.

1.1.1 Sensori concentrati

Tra i sensori concentrati si distinguono in particolare i sensori che si basano sull'utilizzo di *reticoli* come trasduttori, quali:

- reticoli di Bragg
- reticoli a lungo periodo

I sensori basati su reticoli di Bragg (*FBG - Fiber Bragg Grating*) sono sensori in riflessione, mentre i reticoli a periodo lungo (*LPG - Long Period Grating*) sono sensori in trasmissione e non verranno trattati in questa sede.

Un reticolo di Bragg [2] viene realizzato direttamente nel *core* della fibra ottica attraverso una modulazione periodica dell'indice di rifrazione (con un periodo Λ) del nucleo stesso attraverso una tecnica interferometrica che rende tali sensori fortemente integrabili all'interno della struttura da monitorare.

Il reticolo risultante agisce come un filtro in riflessione; in particolare la lunghezza d'onda riflessa (λ_B), chiamata lunghezza d'onda di Bragg, è definita come:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

dove n_{eff} è l'indice di rifrazione efficace.

In *Figura 1.3* è riportato lo schema di funzionamento di un FBG.

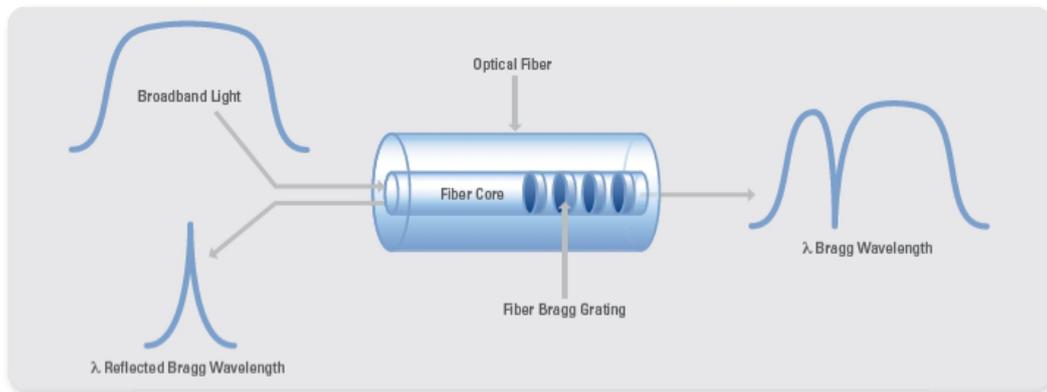


Figura 1.3: Schema di funzionamento di un FBG.

Una tale struttura si comporta come un filtro in lunghezza d'onda in quanto il segnale retropropagato sarà centrato alla lunghezza d'onda λ_B .

In sintesi risulta immediato che, ad una variazione dell'indice efficace (e quindi dell'indice di rifrazione del nucleo) oppure del periodo del reticolo, corrisponde una variazione della lunghezza d'onda di Bragg; se ad esempio si sottopone il reticolo ad una deformazione meccanica (*strain*) si osserverà un cambiamento di λ_B ottenendo quindi un sensore. In particolare questi sensori sono spesso usati, quindi, sia come sensori di temperatura (valori tipici di $d\lambda_B/dT$ sono nell'ordine di 13 pm/°C attorno a 1550 nm) che come sensori di deformazione (con sensibilità nell'ordine di 1.2 pm/ $\mu\epsilon$ attorno a 1550 nm²).

In *Figura 1.4* è riportato un esempio di FBG presente in commercio.

²Una deformazione di 1 μm per ogni metro è pari a 1 $\mu\epsilon$ ("microstrain") = 1 $\mu\epsilon/\text{m}$.



Figura 1.4: Esempio di FBG presente in commercio. (*fonte: JDS Uniphase*)

1.1.2 Sensori distribuiti

I sensori ottici distribuiti rappresentano la maggiore novità introdotta con i sensori in fibra ottica, in quanto con i sensori tradizionali non è possibile eseguire una misura distribuita ottenendo risoluzioni accurate. Basti pensare, ad esempio, alla struttura di un ponte, di una diga, di un grande edificio: è possibile monitorare alcuni parametri dall'esterno, ma le tensioni interne rimangono di fatto quasi impossibili da monitorare; nello specifico individuare eventuali crepe nel calcestruzzo prima che queste diventino visibili potrebbe aiutare a prevenire il collasso dell'intera struttura.

Da esempi come questo si evince quanto diventi importante misurare parametri quali strain, temperatura, umidità ecc... in modo distribuito; in particolare la sfida negli ultimi anni è stata quella di trovare dei modi per determinare il valore di tali parametri lungo tutta la lunghezza della fibra sensing³ con una risoluzione spaziale accettabile.

I principali tipi di sensori ottici distribuiti sfruttano meccanismi lineari e non lineari presenti in fibra ottica, quali l'effetto Rayleigh, Raman e Brillouin (trattato nel dettaglio nel Capitolo 2).

Il funzionamento, in linea di massima, della maggior parte di questi sensori si basa sullo stesso principio di funzionamento dell'OTDR (*Optical Time Domain Reflectometer*), in cui un segnale viene lanciato ad una estremità della fibra ottica e viene successivamente misurata la potenza retroriflessa da cui, in base ad un semplice calcolo, è possibile identificare il punto esatto della riflessione.

I parametri principali di interesse per un sensore ottico distribuito [3] sono elencati di seguito:

- risoluzione spaziale (δl): è il più piccolo tratto di fibra ottica in cui

³In questo documento quando si parla di "fibra sensing" ci si riferisce al tratto di fibra ottica utilizzata come sensore.

può essere rilevata la variazione del misurando (in metri) ⁴; ad esempio se un sensore distribuito di temperatura ha una risoluzione spaziale di due metri, significa che se la variazione della temperatura (misurando) avviene in meno di due metri non è rilevabile.

- Sensitività (S): si definisce come la variazione di potenza ottica, al ricevitore, prodotta da una variazione unitaria del misurando per unità di lunghezza della fibra ottica (in $W \cdot \text{field}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) ⁵.
- Larghezza banda di misura (B): è la banda (in Hz) per la quale la grandezza può essere misurata lungo tutta la lunghezza della fibra (L).
- Larghezza banda di sistema (W): è la banda (in Hz) che deve avere il ricevitore per analizzare il sistema.
- Range dinamico (D): è il rapporto tra il massimo ed il minimo valore del misurando che permette la misurazione con l'accuratezza richiesta (in dB).
- Distance range: è la lunghezza della fibra di sensing su cui è possibile effettuare la misura con un'accuratezza apprezzabile (in metri).
- Proprietà della fibra: il sistema di caratterizzazione deve includere le specifiche della fibra che si sta utilizzando; tale specifiche sono lo *spettro di attenuazione* (ovvero l'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda di lavoro), lo *spettro di dispersione* (ovvero l'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda di lavoro), il *tipo di propagazione modale* (monomodale o multimodale), le *proprietà geometriche* (dimensioni del nucleo, del mantello, apertura numerica ecc...) e le *proprietà del mantello* (ad esempio il materiale di protezione, la resistenza alla rottura ecc...).

1.1.3 Altri tipi di sensori in fibra

Esistono anche sensori che usano fibre ottiche “speciali” quali fibre a cristallo fotonico per rilevare grandezze quali temperatura, campo elettrico, campo magnetico ecc...

⁴si ricorda che in generale la risoluzione viene definita come la minima variazione della grandezza che il sistema di misura è in grado di rilevare.

⁵si ricorda che dal punto di vista pratico la sensibilità è la minima variazione dell'input che genera una variazione rilevabile dell'output; ad esempio se la sensibilità di un sensore di temperatura è $1 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$ significa che per vedere uno spostamento in frequenza dell'output di 1 MHz è necessaria una variazione della temperatura (misurando) pari a $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Inoltre introducendo nel *core* della fibra, tramite drogaggio, ioni di elementi appartenenti alla serie delle terre rare (ad esempio l'*erbio*) è possibile realizzare sensori di temperatura sfruttando la dipendenza da questa dello spettro di assorbimento del vetro drogato con terre rare.

Molti sensori fotonici utilizzano anche il cosiddetto “*meccanismo dell'interazione con l'onda evanescente*”, in cui la fibra ottica viene opportunamente modificata in modo che una parte del campo evanescente (ovvero quella parte di campo elettromagnetico che fuoriesce dal nucleo) possa interagire con l'esterno; si verifica infatti che la presenza di un mezzo, solitamente liquido, a contatto con il *cladding* altera le condizioni di propagazione della radiazione luminosa in fibra, ed in particolare la potenza totale guidata [4].

1.2 Vantaggi e svantaggi dei sensori in fibra ottica

1.2.1 Vantaggi

I sensori in fibra ottica presentano notevoli vantaggi rispetto agli altri tipi di sensori. Innanzitutto l'elevata banda passante della fibra ottica garantisce la possibilità di trasmettere su un'unica fibra le informazioni di misura raccolte da più elementi sensibili localizzati in punti diversi della fibra (*sensori multipunto*) oppure distribuiti lungo essa (*sensori distribuiti*).

È inoltre possibile far coesistere sullo stesso supporto sia informazioni di misura che informazioni di qualunque altro tipo (ad esempio documenti); in questo modo è perciò possibile integrare reti di comunicazioni con sistemi di misura distribuiti lungo la rete stessa, se la banda necessaria alle informazioni di misura è abbastanza piccola rispetto a quella disponibile. Anche per queste ragioni alcuni tipi di sensori in fibra ottica sono molto adatti al monitoraggio (in più punti o distribuito) di grandi strutture quali edifici, ponti, reti ferroviarie, dighe...

Un altro vantaggio dei sensori in fibra sta nel fatto che il segnale ottico può essere trasmesso da e verso il sistema di misura senza la necessità di collegamenti elettrici. Dal momento che un segnale ottico in fibra si propaga in modo indipendente da eventuali campi elettromagnetici stazionari, a radiofrequenza o a microonde, i sensori ottici presentano una elevata **immunità alle interferenze elettromagnetiche**. La fibra ottica quindi, si presta ad essere utilizzata in molti ambienti in cui i componenti elettrici non sarebbero in grado di operare senza subire conseguenze, ad esempio in prossimità di sorgenti di campo di elevata intensità, ed offre grandi vantaggi anche per misurazioni per le quali non sono tollerabili emissioni elettromagnetiche da

parte del sistema di misura (ad esempio, proprio nelle misurazioni di campo elettromagnetico) in quanto essa non è fonte di inquinamento elettromagnetico.

È necessario ricordare, inoltre, che essendo la fibra ottica una guida dielettrica garantisce un perfetto **isolamento elettrico** tra la grandezza da misurare ed i componenti optoelettronici di generazione di potenza e di misura. Tale isolamento risulta molto utile anche quando si vogliono effettuare delle misurazioni in materiali in cui non è possibile introdurre correnti elettriche, come ad esempio materiali infiammabili (gas, liquidi).

Un altro punto di forza della fibra ottica (e di conseguenza dei sensori ottici) è che rispetto ai tradizionali mezzi di trasporto delle informazioni (ad esempio il rame) non è esposta a fenomeni di corrosione ed inoltre, avendo il vetro un minore **peso specifico** rispetto, ad esempio, al rame ($2.6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, contro $8.9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ del rame) è possibile contenere il peso dell'intera rete di sensori: questa caratteristica è particolarmente importante quando si deve posare un sistema di sensori, per esempio, su un velivolo, in cui il peso di ogni singola attrezzatura viene accuratamente analizzato e sussiste il bisogno di monitorare una grande quantità di grandezze fisiche.

1.2.2 Svantaggi

I principali svantaggi dei sensori in fibra ottica sono legati alla loro complessità e difficoltà di utilizzo: in particolare è necessario fornire all'utente finale un prodotto che sia "*pronto all'uso*" che non richieda particolari operazioni che si potrebbero effettuare solo in laboratorio, come allineare le componenti ottiche, controllare il raggio di curvatura della fibra, ecc...; in altre parole sussiste la necessità di semplificare l'utilizzo di questi sensori facendo in modo che le procedure di impiego, di manutenzione e di calibrazione non differiscano molto da quelle usate per i sistemi tradizionali.

Un ulteriore svantaggio dei sensori ottici è costituito dal loro costo, infatti nonostante la fibra ottica sia molto economica, il sistema di misura nel complesso presenta ancora dei costi molto elevati.

1.3 Applicazioni e stato dell'arte

Tra i settori più interessati allo sviluppo dei sensori a fibra ottica si annoverano il controllo e l'automazione dei processi industriali, i settori aerospaziali, del trasporto, le applicazioni di diagnostica medica, l'ingegneria civile ed il monitoraggio ambientale.

Vengono di seguito descritte le principali categorie di applicazioni in cui si stanno affermando i sensori in fibra ottica:

- Monitoraggio integrato di grandezze in velivoli, imbarcazioni, auto da corsa per cui si ha la necessità di ridurre i pesi e le interferenze tra i vari sistemi installati.
- Misure di precisione in ambienti in cui il sensore non deve introdurre alcuna alterazione, come per esempio nella diagnostica medica per gastroscopie, chirurgia laser...; sono molto utilizzati in questo campo i sensori di temperatura e di pressione (ad esempio negli interventi cardiovascolari). Rientrano in questa categoria anche i sensori per il monitoraggio dell'inquinamento elettromagnetico ambientale (solitamente sono sensori di tipo estrinseco).
- Monitoraggio in ambienti in cui è impossibile utilizzare sensori tradizionali come per esempio in prossimità di sorgenti di forti campi elettromagnetici dove i sensori elettrici vengono disturbati e non sono in grado di fornire misurazioni affidabili.
- Monitoraggio di infrastrutture civili, in cui i sensori ottici distribuiti si stanno affermando grazie alla loro capacità di fornire una misura distribuita lungo tutto il sistema: in particolare si stanno affermando in questo campo vari sensori per il monitoraggio di ponti, dighe e gasdotti (*Figura 1.5*).

Un caso di particolare attenzione è costituito dallo sviluppo di un sensore di strain (tensione) applicato su un ponte in Svezia (*Figura 1.6*), in seguito alla presenza di diverse crepe nelle zone sopra le colonne. In questo caso il sensore ottico (distribuito) è stato incollato direttamente lungo la struttura portante del ponte cercando di avere una misura della tensione in più punti possibili con lo scopo di rilevare segni di eventuali cedimenti. In *Figura 1.7* si può notare l'applicazione del sensore sulla struttura in cemento armato.

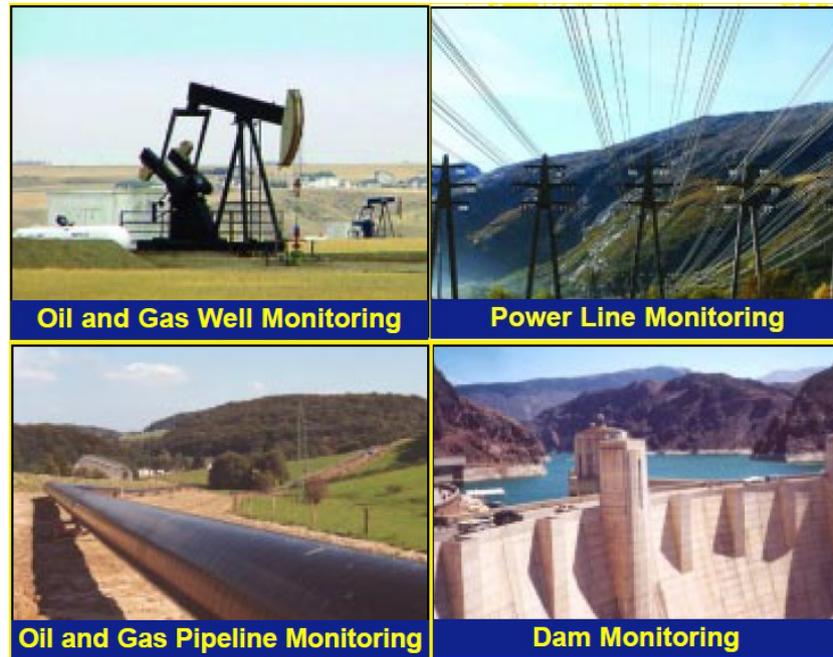


Figura 1.5: Esempi di utilizzo dei sensori in fibra ottica in vari ambienti.



Figura 1.6: Götaälv Bridge (Svezia), costruito nel 1939.



Figura 1.7: Sensore di strain posato lungo la struttura portante del ponte.

Capitolo 2

Amplificazione Brillouin

Quando viene iniettato un campo elettromagnetico sufficientemente elevato all'interno di un mezzo dielettrico non è possibile non considerare la non linearità del mezzo; in particolare in una fibra ottica non si possono trascurare gli effetti della risposta non lineare della silice.

L'esistenza di fenomeni non lineari è storicamente nota già dagli anni '20, anche se solo negli ultimi 40 anni tali effetti si sono potuti osservare in esperimenti sistematici grazie all'invenzione del laser che è in grado di focalizzare un fascio di campo elettromagnetico molto forte all'interno di un mezzo dielettrico, come ad esempio la fibra ottica. La radiazione del laser, quando opportunamente focalizzata, è infatti in grado di produrre campi elettromagnetici la cui intensità assume valori localmente comparabili con quelli delle interazioni che intercorrono all'interno di un atomo, tra nucleo e elettroni; fintanto che questo limite non veniva raggiunto, la risposta della molecola era di tipo lineare rispetto al campo applicato.

Gli effetti non lineari possono essere di tipo *elastico* o di tipo *anelastico*. Il principale effetto non lineare di tipo elastico, ovvero in cui non si ha trasferimento di energia tra il campo elettromagnetico incidente ed il mezzo, è rappresentato dallo scattering di Rayleigh, mentre i principali effetti non lineari di tipo anelastico, in cui si verifica uno scambio di energia tra il campo elettromagnetico incidente ed il mezzo (interazione *fotone - fonone*), sono lo scattering Raman stimolato (SRS) e lo scattering Brillouin stimolato (SBS), trattato nel dettaglio in questo capitolo.

2.1 Fenomeni di scattering nelle fibre ottiche

Quando un'onda luminosa si propaga in una fibra ottica interagisce con le molecole e gli atomi che la costituiscono e, sotto certe condizioni, può dar vita ad un'onda luminosa che si “diffonde” (da cui il termine *scattering*) all'interno della fibra secondo diverse modalità.

I fenomeni di scattering in fibra sono sempre presenti indipendentemente dalla quantità di potenza iniettata; tali fenomeni possono essere **spontanei** o **stimolati**. Si parla di scattering *spontaneo* quando la radiazione luminosa in ingresso non altera le proprietà ottiche del mezzo, mentre quando l'intensità della radiazione ottica aumenta ad un livello tale da modificare tali proprietà allora si parla di scattering *stimolato*, in cui il mezzo si comporta in modo non lineare.

Tra i fenomeni di scattering in fibra ottica più importanti si distinguono lo scattering di Rayleigh, Raman e Brillouin (*Figura 2.1*).

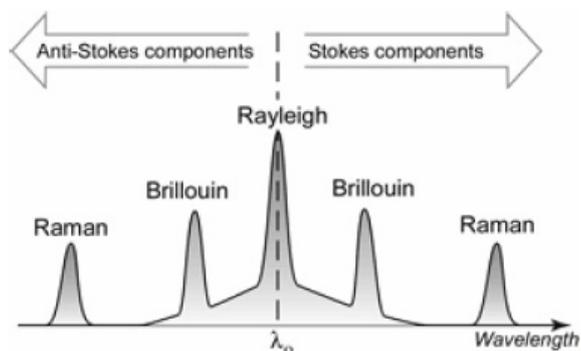


Figura 2.1: Schema spettrale dei tre fenomeni descritti: scattering Rayleigh, Raman e Brillouin.

Lo scattering di Rayleigh è conseguenza del drogaggio a cui sono sottoposte le fibre ottiche, in quanto la presenza di materiali dopanti induce locali variazioni di densità (e quindi di indice di rifrazione) che danno luogo alla diffusione della luce creando un'onda retropropagata proporzionale all'intensità dell'onda incidente (*Figura 2.2*).

Lo scattering Raman si ha in seguito ad una interazione tra la luce ed i modi vibrazionali propri del materiale, mentre lo scattering di Brillouin si ha in seguito all'interazione tra l'onda luminosa incidente e un'onda acustica (fotone-fonone acustico).

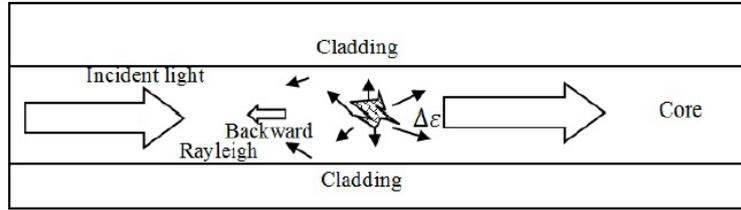


Figura 2.2: Diagramma che rappresenta l'effetto Rayleigh dal punto di vista microscopico.

2.2 Scattering Raman

Quando un campo elettromagnetico interagisce con i modi vibrazionali propri del materiale di cui è composta la fibra ottica, dà luogo ad un campo a frequenza diversa. A livello di interazione luce-materia, quando un fotone avente energia $E = h\nu$ ($h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ J·s - costante di Planck, ν = frequenza ottica) incide su un atomo, può cedere energia al materiale sotto forma di vibrazioni.

Durante l'interazione tra un fotone ed un atomo, un fotone incidente a frequenza ω_S può eccitare una molecola che, per assorbimento stimolato, si porta ad un livello virtuale (così chiamato in quanto non corrisponde ad un livello atomico vero e proprio), da cui poi decade emettendo un nuovo fotone. Si distinguono in particolare due casi (*Figura 2.3*).

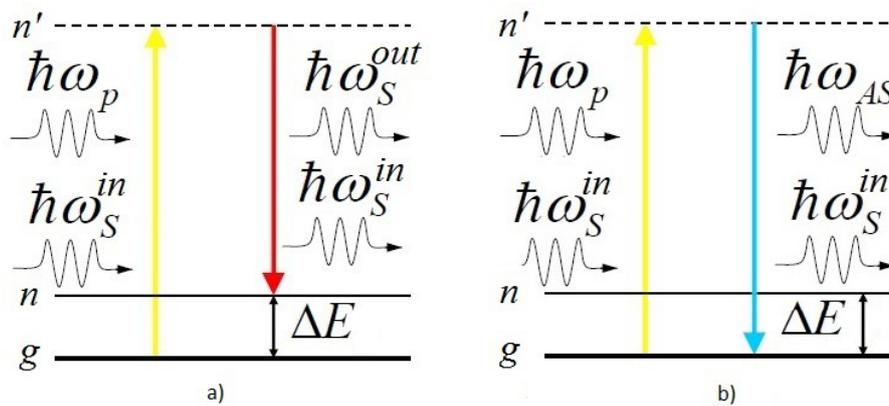


Figura 2.3: SRS (Scattering Raman Stimolato) - schema a bande componente Stokes (a) e anti-Stokes (b).

Nel primo caso (a) le molecole che si trovano al livello di energia più basso (g) vengono eccitate, tramite assorbimento stimolato, al livello virtuale n' ,

da cui decadono emettendo un fotone di energia minore (e quindi frequenza minore) rispetto a quello assorbito (componente **Stokes**): questo perchè la differenza di energia (ΔE) viene ceduta al mezzo sotto forma di onda acustica. Nel secondo caso (b), invece, le molecole che si trovano già ad un livello di energia superiore n vengono eccitate al livello n' , ma stavolta decadono al livello g emettendo un fotone di energia superiore (e quindi frequenza maggiore) rispetto al fotone incidente (componente **anti-stokes**).

Il diagramma spettrale è riportato in *Figura 2.4*.

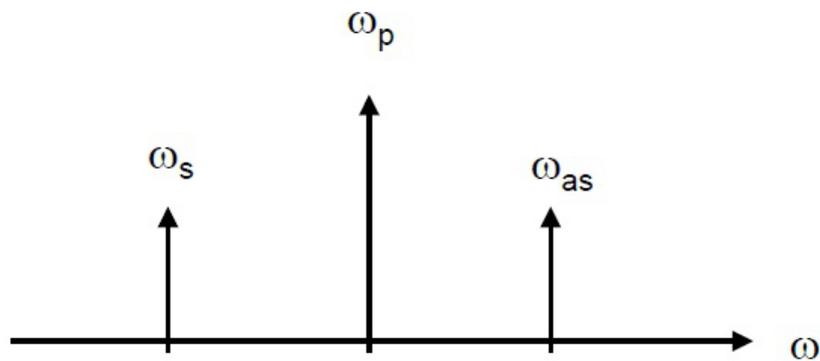


Figura 2.4: Diagramma spettrale che riporta le tre frequenze relative rispettivamente all'onda Stokes, di pompa e anti-Stokes.

2.3 Scattering Brillouin Stimolato (SBS)

L'effetto Brillouin può verificarsi in una fibra ottica per livelli di potenza in fibra (~ 1 mW) inferiori a quelli necessari per innescare altri effetti non lineari, come ad esempio l'effetto Raman (~ 100 mW) e l'effetto Kerr e di conseguenza lo studio di tale fenomeno diventa molto importante in quanto rappresenta una fonte di attenuazione lungo la fibra ottica.

Quando il campo elettromagnetico incidente diventa significativamente elevato ($10^6 < I_s < 10^9$ W/cm²) si parla di scattering Brillouin stimolato.

In particolare il meccanismo interferenziale che si genera tra onda incidente e onda Stokes contribuisce alla generazione di un'onda acustica, che essendo un'onda di pressione, modula l'indice di rifrazione del nucleo tramite *elettrostrizione* (aumento della densità di un materiale quando questo è sottoposto ad un campo elettromagnetico molto intenso con conseguente variazione delle

proprietà ottiche dello stesso, come la *suscettibilità*¹ a cui è legato il termine non lineare n_2 dell'indice di rifrazione) dando luogo ad una struttura che si comporta come un FBG il quale si muove alla velocità dell'onda acustica (*Figura 2.5*).

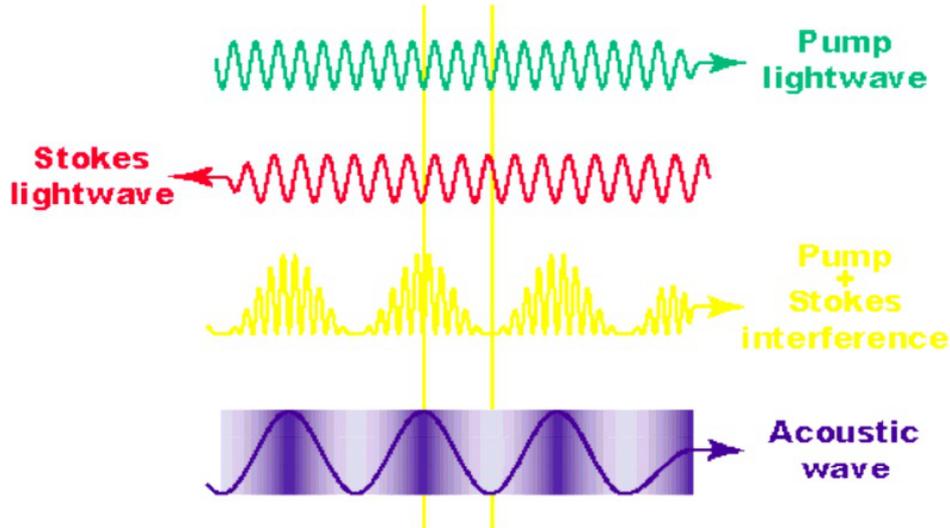


Figura 2.5: Rappresentazione grafica dello Scattering Brillouin Stimolato.

Osservando la *Figura 2.5* si può capire perchè spesso in letteratura l'effetto Brillouin venga descritto come una interazione a tre onde: l'onda luminosa in ingresso alla fibra (pompa), l'onda acustica e l'onda Stokes su cui viene trasferita parte della potenza inizialmente trasmessa.

Se si definisce con ω_P la frequenza di pompa e con Ω_B la frequenza dell'onda acustica (che dipende dalle caratteristiche del mezzo non lineare), la frequenza dell'onda Stokes è data da:

$$\omega_s = \omega_p - \Omega_B$$

con $\Omega_B \ll \omega_p, \omega_s$ definito **shift di Brillouin**.

Dal momento che sia l'energia che la quantità di moto si conservano durante gli eventi di scattering le frequenze ed i vettori d'onda delle tre onde sono dati da:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, k_a = k_p - k_s$$

dove (ω_p, k_p) e (ω_s, k_s) sono le frequenze ottiche ed i vettori d'onda della pompa e dell'onda di Stokes rispettivamente.

¹suscettibilità: è definita come la costante di proporzionalità che lega il campo elettrico E al proprio vettore di polarizzazione P secondo la relazione: $P = \epsilon_0 \chi E$.

è importante ricordare che, nel caso di un'onda luminosa, la velocità di fase è definita come:

$$v_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n}$$

in quanto $k = \frac{\omega \cdot n}{c_0}$ ($c_0 \cong 3 \cdot 10^8$ m/s).

Analogamente per un'onda acustica la velocità di fase in fibra è data da:

$$v_a = \frac{\Omega_B}{k_a} \quad (2.1)$$

Considerando il caso generale rappresentato in *Figura 2.6* e nell'ipotesi che

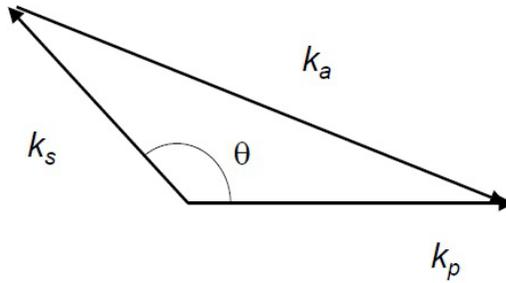


Figura 2.6: Rappresentazione dei vettori d'onda delle tre onde (pompa, Stokes e acustica).

$|k_p| \cong |k_s|$, allora si ha:

$$|k_a| = 2|k_s| \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.2)$$

con θ = angolo compreso tra i vettori d'onda dell'onda Stokes e dell'onda di pompa.

A questo punto, dalle eq. (2.1) e (2.2), è possibile scrivere la relazione di dispersione tra la frequenza Ω_B e il vettore d'onda k_a dell'onda acustica, data da:

$$\Omega_B = k_a v_a = 2 \frac{\omega_s n}{c_0} v_a \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.3)$$

Dalla relazione (2.3) si nota come lo shift frequenziale tra l'onda Stokes e l'onda di pompa (shift Brillouin) coincida con la frequenza dell'onda acustica, ma soprattutto che questa dipende direttamente dall'angolo compreso tra l'onda di pompa e l'onda Stokes (θ); si evince, quindi, che se $\theta = 0$ (ovvero le due onde di pompa e Stokes viaggiano nella stessa direzione) allora $\Omega_B = 0$, mentre se $\theta = \pi$ (ovvero le due onde viaggiano in direzioni opposte) Ω_B assume il suo valore massimo.

In definitiva si ottiene SBS solo se le due onde si propagano con verso opposto ed in questo caso lo shift Brillouin è dato da:

$$\nu_B = \frac{\Omega_B}{2\pi} = \frac{2n\nu_a}{\lambda_p} \quad (2.4)$$

dove λ_p indica la lunghezza d'onda di pompa; è importante notare, quindi, che per avere SBS è necessario lanciare due segnali contropropaganti: l'onda di *pump* (incidente) e l'onda di *probe* (onda di Stokes).

Nelle fibre ottiche monomodali, lo shift Brillouin varia attorno ai 9 - 12 GHz alla lunghezza d'onda di 1550 nm, ben al di sotto dell'analogo fenomeno di SRS (*Scattering Raman Stimolato*) che si aggira attorno ai 13 THz.

In condizioni stazionarie, ovvero in pompa continua (CW) e tenendo conto della natura contropropagante del fenomeno, gli andamenti spaziali delle intensità di pompa e di Stokes sono governati dalle seguenti equazioni:

$$\frac{dI_s}{dz} = -g_B I_p I_s + \alpha I_s \quad (2.5)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B I_p I_s - \alpha I_p \quad (2.6)$$

dove:

- I_s : intensità di segnale
- I_p : intensità di pompa
- α : coefficiente di attenuazione (si è supposto che $\alpha_s = \alpha_p$, ovvero che l'attenuazione sia la stessa in entrambi i versi - fascio di pompa e fascio di Stokes)
- g_B : coefficiente di guadagno Brillouin

Aumentando la potenza del segnale di pompa vi è un progressivo trasferimento di potenza tra l'onda acustica e l'onda Stokes (*Figura 2.7*).

Inoltre le equazioni (2.5) e (2.6) definiscono un modello in cui si suppone che i fasci contropropaganti siano linearmente polarizzati lungo la stessa direzione e mantengano il loro stato di polarizzazione lungo la fibra. Questa ipotesi rimane valida se si considera che la direzione di propagazione avvenga lungo l'asse principale di una fibra ottica a mantenimento di polarizzazione. In fibre standard, l'angolo compreso tra le due polarizzazioni varia casualmente ed il guadagno Brillouin è ridotto di un fattore 1.5 [5].

La crescita dell'onda Stokes è caratterizzata da uno spettro di guadagno

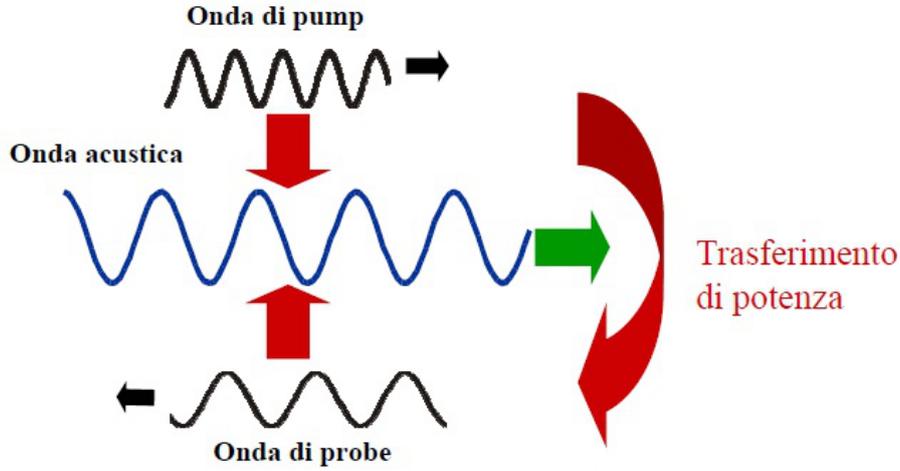


Figura 2.7: Trasferimento di potenza tra l'onda acustica e l'onda di Stokes nel SBS.

$g_B(\omega)$; se si assume che l'onda acustica abbia un andamento $\propto e^{-\Gamma_B t}$ allora il guadagno Brillouin ha uno spettro di tipo Lorentziano:

$$g_B(\omega) = g_B \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2}$$

il cui valore di picco si ha per $\omega = \Omega_B$:

$$g_B = g_B(\Omega_B) = \frac{2\pi^2 n^7 p_{12}^2}{c \lambda_p^2 \rho_0 \nu_A \Gamma_B} \quad (2.7)$$

dove p_{12} è il coefficiente elasto-ottico longitudinale e ρ_0 indica la densità del materiale.

La larghezza spettrale del guadagno Brillouin si aggira attorno ai 10 - 20 MHz, molto più piccola rispetto, ad esempio, alla banda di guadagno Raman (tra i 10 ed i 100 THz) e dipende comunque dal tipo di fibra utilizzato, così come anche la larghezza a metà altezza (FWHM) che si aggira attorno ai 100 MHz per lunghezze d'onda di pompa $\lambda_p = 1550$ nm.

Lo scattering Brillouin stimolato, come anticipato, è un effetto "a soglia", ovvero legato fortemente alla potenza di pompa trasmessa in fibra ottica. Se si indica con $P_{p,soglia}$ la potenza di soglia (la quale dipende dalle caratteristiche del mezzo non lineare), per valori di potenza per cui $P_p \ll P_{p,soglia}$ non si ha scattering Brillouin stimolato, ma se $P_p \gg P_{p,soglia}$ allora si ha una forte componente di Stokes retropropagata e quindi SBS.

Si può quindi definire la **potenza di soglia** come la potenza di pompa che

deve essere iniettata in fibra oltre al quale se aumento P_p non ho un corrispondente aumento della potenza in uscita, ma solo un aumento della componente retropropagata.

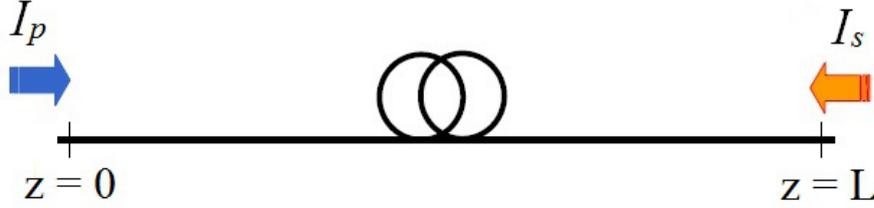


Figura 2.8: Schema di riferimento per SBS in una fibra ottica di lunghezza L : interazione tra le onde di pompa (I_p) e di Stokes (I_s).

Considerando l'ipotesi di pompa non svuotata, se nell'equazione (2.6) (utilizzando il sistema di riferimento di *Figura 2.8*) si considera:

$$I_p(z) = I_p(0)e^{-\alpha z}$$

integrando la (2.5) lungo la lunghezza L della fibra ottica si ottiene:

$$I_s(0) = I_s(L)e^{(g_B I_p(0) L_{eff} - \alpha L)} \quad (2.8)$$

in cui:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{\alpha}$$

è la lunghezza efficace di interazione e il termine αL tiene conto dell'attenuazione subita dal segnale nella propagazione in un tratto pari a L .

Nel caso di luce di pompa continua e monocromatica, la condizione di soglia SBS è data da:

$$\frac{g_B P_{cr} L_{eff}}{A_{eff}} \approx 21$$

da cui risulta:

$$P_{cr} \approx \frac{21 A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (2.9)$$

dove A_{eff} è indica l'area efficace del nucleo (tipicamente tra 50 e $80 \mu m^2$). è facile notare, dalla (2.9), che la soglia Brillouin (P_{cr}) è inversamente proporzionale al guadagno ed alla lunghezza efficace e proporzionale all'area efficace, quindi se si utilizza ad esempio una fibra lunga 20 km e con area efficace $50 \mu m^2$, considerando $g_B = 5 \times 10^{-15}$ m/W si ha una potenza di

soglia di circa 1 mW. Vi sono alcuni fattori che possono influire sulla potenza di soglia: ad esempio la soglia SBS aumenta del 50% quando lo stato di polarizzazione del campo di pompa diventa completamente depolarizzato [5]; inoltre le disomogeneità della fibra possono influire sul guadagno Brillouin, così come il livello di drogaggio ecc. . .

2.3.1 Dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione

Nella sezione precedente è stato presentato il fenomeno dello scattering Brillouin stimolato come una interazione tra due onde contropropaganti (più l'onda acustica); in particolare è stato trovato il guadagno Brillouin in corrispondenza del quale si ha trasferimento di potenza tra l'onda di pompa e l'onda Stokes quando lo shift Brillouin raggiunge un determinato valore (eq. 2.7), da cui si può notare che tale guadagno dipende fortemente da parametri legati al materiale e dalla lunghezza d'onda utilizzata.

In realtà vi è un altro fattore molto importante che influisce sul guadagno e sul SBS in generale: lo stato di polarizzazione (SOP - *State Of Polarization*) delle due onde.

Come ben noto l'evoluzione dello stato di polarizzazione della luce lungo un mezzo privo di perdite dipendenti dalla polarizzazione (come la fibra ottica) può essere descritto matematicamente come una rotazione sulla sfera di Poincaré [5]. Lo stato di polarizzazione di un segnale ottico, utilizzando la rappresentazione vettoriale di Stokes, è data dall'espressione:

$$\bar{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)$$

che, normalizzata rispetto a S_0 , diventa:

$$\hat{s} = (s_1, s_2, s_3)$$

Ciò premesso, due segnali ottici hanno la stessa polarizzazione quando i rispettivi vettori di Stokes sono identici, mentre hanno polarizzazione ortogonale quando i rispettivi vettori di Stokes sono antipodali nella sfera di Poincaré ². In particolare la dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione può essere schematizzata come in *Figura 2.9*, in cui si è considerata una fibra ottica a bassa birifrangenza (si ricorda che in una fibra a bassa birifrangenza tutte le polarizzazioni si verificano con uguale probabilità). Osservando la *Figura 2.9*, in relazione al tipo di polarizzazione, si possono fare le seguenti considerazioni:

²due vettori \hat{x} e \hat{y} si definiscono antipodali se $\hat{x} = (x_1, x_2, x_3)$ e $\hat{y} = (-x_1, -x_2, -x_3)$.

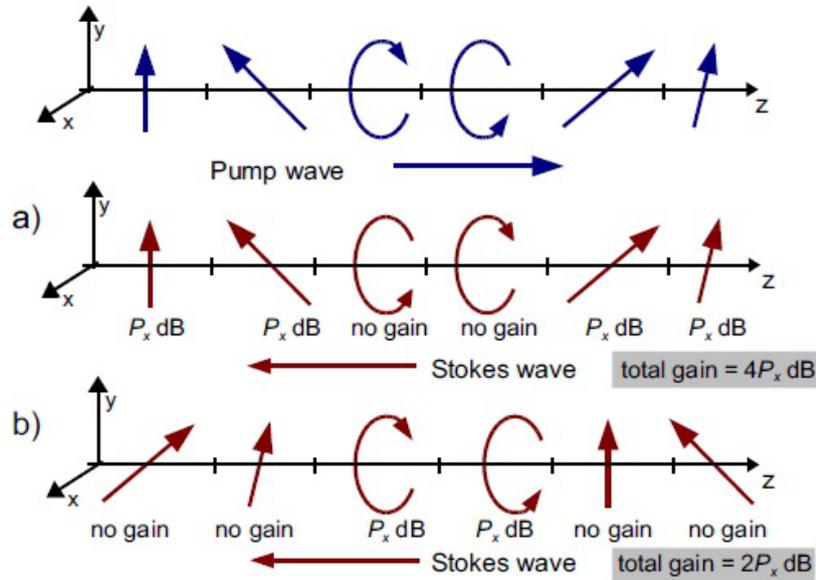


Figura 2.9: Rappresentazione della dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione in una fibra ottica a bassa birifrangenza (in blu l'onda di pompa e in rosso l'onda Stokes).

- Polarizzazione lineare: se le due onde di pompa e Stokes sono linearmente polarizzate si ha guadagno massimo (caso a)) se gli stati di polarizzazione sono paralleli, mentre se hanno polarizzazione ortogonale si avrà guadagno minimo (caso b)).
- Polarizzazione circolare: il guadagno è massimo se il senso di rotazione è lo stesso per entrambe le onde (caso a)), mentre sarà minimo per sensi di rotazione opposti (caso b)).

È quindi evidente che, pur utilizzando fibre a bassa birifrangenza - come ad esempio le fibre ottiche per telecomunicazioni standard - si ha che il guadagno oscillerà lungo la fibra in quanto entrambi i fasci luminosi varieranno i loro SOP lungo il mezzo.

Polarization Attraction - cenni

Come già anticipato nel paragrafo precedente, lo scattering Brillouin stimolato è legato allo stato di polarizzazione (SOP) delle onde di pompa e di Stokes.

Definendo con $\bar{E}_{sig}(z)$ il vettore di Jones ³ di un'onda monocromatica [6], sia z la posizione lungo la fibra ($0 < z < L$, con $L =$ lunghezza della fibra); senza considerare l'onda di pompa, la propagazione del campo $\bar{E}_{sig}(z)$ può essere descritta in questo modo:

$$\bar{E}_{sig}(z) = \mathbf{T}(z)\bar{E}_{sig}(0) \quad (2.10)$$

con $\mathbf{T}(z) =$ matrice unitaria di Jones che rappresenta l'effetto della birifrangenza.

Si consideri ora l'onda di pompa, lanciata in $z = L$ con vettore di Jones $\bar{E}_{pump}(z)$ (si ricorda che si sta utilizzando il sistema di riferimento di *Figura 2.9*, in cui il segnale si propaga nel verso positivo di z e la pompa nel verso opposto): se entrambi i vettori $\bar{E}_{sig}(z)$ e $\bar{E}_{pump}(z)$ sono del tipo $[1 \ j]^T$ (T indica la trasposta), essi rappresentano segnali a polarizzazione circolare rispettivamente destrorsa e sinistrorsa [7] [8]: l'onda di pompa può essere espressa in questo modo (in assenza del segnale di probe):

$$\bar{E}_{pump}(z) = \mathbf{T}^*(z)\bar{E}_{pump}(0) \quad (2.11)$$

in cui $\mathbf{T}^*(z) = inv[\mathbf{T}^T(z)]$.

Di conseguenza quando entrambe le onde sono presenti, l'evoluzione locale di $\bar{E}_{sig}(z)$ e $\bar{E}_{pump}(z)$ è definita dalle seguenti equazioni:

$$\frac{d\bar{E}_{sig}(z)}{dz} = \left[\frac{d\mathbf{T}(z)}{dz} \mathbf{T}^T(z) + \frac{\gamma_0}{2} [\bar{E}_{pump}(z) \bar{E}_{pump}^T(z)] \right] \bar{E}_{sig}(z) \quad (2.12)$$

$$\frac{d\bar{E}_{pump}(z)}{dz} = \left[\frac{d\mathbf{T}^*(z)}{dz} \mathbf{T}^T(z) + \frac{\gamma_0}{2} [\bar{E}_{sig}(z) \bar{E}_{sig}^T(z)] \right] \bar{E}_{pump}(z) \quad (2.13)$$

in cui $\gamma_0 [W \cdot m]^{-1}$ è il guadagno Brillouin per unità di lunghezza e per unità di potenza di pompa.

Per quanto riguarda gli stati di polarizzazione delle due onde, ed in particolare della componente contropropagata, si dimostra [6] che l'evoluzione della polarizzazione di tale componente è data dalla seguente relazione:

$$\frac{d\hat{s}_{sig}(z)}{dz} = \bar{\beta}(z) \times \hat{s}_{sig}(z) + \frac{\gamma_0 P_{pump}(z)}{2} [\hat{s}_{pump}(z) - (\hat{s}_{pump}(z) \cdot \hat{s}_{sig}(z)) \hat{s}_{sig}(z)] \quad (2.14)$$

dove $\hat{s}_{sig} = [s_{1,sig}, s_{2,sig}, s_{3,sig}]$ è il vettore di Stokes normalizzato, P_{pump} è la potenza di pompa e il vettore $\bar{\beta}(z)$ si definisce *vettore di birifrangenza locale*

³Si ricorda che, dati due punti nello spazio \bar{p}_1 e \bar{p}_2 , il legame tra i campi elettrici, rispetto al loro piano di polarizzazione, può essere espresso come: $\bar{E}(\bar{p}_1) = \mathbf{J} \cdot \bar{E}(\bar{p}_2)$ con \mathbf{J} matrice di Jones.

e costituisce un parametro molto importante in quanto da esso è possibile definire la *lunghezza di battimento*, che determina il periodo di evoluzione della polarizzazione.

Osservando l'eq. (2.14) si evince che l'evoluzione dello stato di polarizzazione del segnale (e analogamente della pompa) è governato da due termini: il primo termine è legato alla birifrangenza della fibra ⁴, mentre il secondo termine rappresenta l'effetto dello scattering Brillouin stimolato sullo stato di polarizzazione del segnale. In particolare quest'ultimo rappresenta, nella sfera di Poincarè, un vettore ortogonale a \hat{s}_{sig} e tangente, sulla superficie della sfera, a \hat{s}_{pump} ed è proprio questo termine che definisce la “forza” di attrazione di \hat{s}_{sig} verso \hat{s}_{pump} .

È facile notare che nel caso di pompa debole il contributo del secondo termine sia molto minore rispetto al primo e di conseguenza in assenza di pompa l'evoluzione di \hat{s}_{sig} è governata solo dalla birifrangenza della fibra (primo termine). In altre parole più il segnale di pompa aumenta e più alto è il contributo legato al secondo termine; si consideri il guadagno Brillouin definito in questo modo:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{2} (1 + \langle \hat{s}_{pump} \cdot \hat{s}_{sig} \rangle) \quad (2.15)$$

in cui $\langle \hat{s}_{pump} \cdot \hat{s}_{sig} \rangle$ è il prodotto scalare tra i vettori di Stokes della pompa e del segnale rispettivamente; si nota che γ dipende dal SOP del segnale in ingresso, così come dal SOP del segnale di pompa. Quando il segnale in ingresso è polarizzato, il secondo termine dell'eq. (2.14) non vale zero e di conseguenza \hat{s}_{sig} viene “attirato” gradualmente verso \hat{s}_{pump} e lo stato di polarizzazione del segnale in uscita si avvicina sempre di più a quello del segnale di pompa: si parla, infatti, di **polarization attraction**.

Concludendo, se il segnale viene in qualche modo “ri-polarizzato” si ripresenta il problema della dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione che, come si avrà modo di vedere nel Capitolo 3, costituirà un problema nella misurazione del guadagno Brillouin.

Per ulteriori dettagli e/approfondimenti sull'argomento si vedano i riferimenti [5], [6], [7] e [8].

2.4 Amplificazione Brillouin

Come già accennato si ha effetto Brillouin Stimolato se e solo se le onde di pompa e di Stokes rispettivamente si contropropagano. Dal momento che tale fenomeno comporta un trasferimento di energia tra le onde che interagiscono (*Figura 2.7*) è possibile utilizzarlo per amplificare un segnale in fibra

⁴Si ricorda che in generale vale: $\frac{d\hat{s}}{dz} = \bar{\beta}(z) \times \hat{s}(z)$.

ottica, tenendo ben presente che lo shift in frequenza tra i due fasci deve essere pari allo shift di Brillouin ν_B .

Se la frequenza del segnale coincide con la frequenza di Stokes allora si ha amplificazione Brillouin; in particolare il segnale viene amplificato di un fattore pari a:

$$G_B = \frac{I_s(0)}{I_s(L)} = e^{g_B I_p(0) L_{eff}} \quad (2.16)$$

dove si è ipotizzata valida la condizione $g_B I_p(0) \gg \alpha L$ in regime di piccolo segnale ($I_p \gg I_s$ ovvero pompa non svuotata) [9]. Dalla (2.16) si può notare come l'amplificazione dipenda in modo non lineare dalla lunghezza L del tratto di fibra utilizzato e dalla potenza di pompa trasmessa.

Quando viene superata la soglia SBS, una buona parte della potenza di pompa viene trasferita all'onda di Stokes; utilizzando un modello matematico semplice in cui si considera lo svuotamento della pompa e si assume valida l'ipotesi di perdite nulle in fibra ($\alpha = 0$) si ha, dalle eq. (2.5) e (2.6):

$$\frac{d}{dz}(I_p - I_s) = 0$$

Da questa equazione è possibile ricavare l'espressione relativa all'intensità dell'onda Stokes [10]:

$$I_s(z) = \frac{b_0(1 - b_0)}{G(z) - b_0} I_p(0) \quad (2.17)$$

in cui $G(z) = \exp[(1 - b_0)g_0 z]$ con:

$$b_0 = \frac{I_s(0)}{I_p(0)} \quad g_0 = g_B I_p(0)$$

Il parametro b_0 è una misura dell'efficienza del SBS e da un'indicazione della frazione di potenza in ingresso che viene convertita in potenza di Stokes, mentre il parametro g_0 indica il guadagno di piccolo segnale associato al processo. L'equazione (2.17) mostra come varia l'intensità dell'onda Stokes lungo la fibra durante il processo di amplificazione Brillouin.

Il range spettrale in cui avviene amplificazione Brillouin viene spesso indicato come BGS (*Brillouin Gain Spectrum*) e corrisponde allo span di frequenze attorno a $\nu_p - \nu_B$, a cui si contrappone, però, un range di frequenze indicato come BLS (*Brillouin Loss Spectrum*) con frequenze attorno a $\nu_p + \nu_B$ in cui il segnale non viene amplificato: in altri termini mentre nel BGS il segnale viene amplificato di un fattore pari al guadagno Brillouin, nel BLS il segnale viene invece attenuato di un fattore simile.

2.5 Applicazioni dello Scattering Brillouin Stimolato

Nel paragrafo precedente si è visto come l'SBS sia utilizzabile nell'amplificazione dei segnali, anche se la ristretta banda di guadagno (BGS) ne limita fortemente le prestazioni rispetto, ad esempio, all'amplificatore Raman che presenta una banda di amplificazione molto più elevata.

Lo scattering Brillouin stimolato trova la sua migliore applicazione nel campo dei sensori in fibra ottica, in particolare nei sensori di strain e temperatura. L'idea che sta alla base del sensing con SBS si trova nell'equazione (2.4): osservando tale equazione si nota che lo shift Brillouin dipende dall'indice di rifrazione del nucleo della fibra ottica e dalla velocità dell'onda acustica ν_a ; in particolare si dimostra che lo shift Brillouin dipende linearmente (per valori di tensione e temperatura entro i range di tolleranza) dallo strain ε ed è sensibile alle variazioni di temperatura ΔT (rispetto alla temperatura T_0 di riferimento) e tale dipendenza può essere scritta in questo modo [11, 12]:

$$\nu_B(T, \varepsilon) = C_\varepsilon \Delta\varepsilon + C_T \Delta T + \nu_B(T_0, \varepsilon_0) \quad (2.18)$$

in cui C_ε è il coefficiente di strain (in MHz/ μm), C_T è il coefficiente di temperatura (in MHz/ $^\circ C$) e ε_0 è lo strain di riferimento. Questi valori vengono determinati in base principalmente al tipo di fibra utilizzata, alla lunghezza d'onda di pompa e al rivestimento della fibra: ad esempio per una fibra SMF-28 si ha $C_T = 1.26$ MHz/ $^\circ C$ e $C_\varepsilon = 0.056$ MHz/ μm .

L'utilizzo dello scattering di Brillouin per misurare la temperatura venne introdotto nel 1989 [13] e attualmente è usato ampiamente per eseguire misure distribuite di strain e temperatura. Una rappresentazione grafica della dipendenza dello shift Brillouin dalla temperatura e dallo strain è riportata in *Figura 2.10*.

Considerando la natura distribuita della misura che può essere fatta con un sensore basato su SBS, si ha che la fibra ottica funge sia da mezzo ottico di trasporto delle informazioni e dei dati, che da sensore rendendo possibile la misura di un parametro specifico lungo tutta la fibra ottica.

In generale i sensori Brillouin possono essere classificati in due grandi categorie: sensori Brillouin "spontanei" e sensori Brillouin "stimolati" a seconda del tipo di scattering considerato. In particolare, come citato nel paragrafo 2.1, si parla di effetto *spontaneo* qualora l'unica onda incidente sia quella di pompa, mentre si parla di effetto *stimolato* quando oltre all'onda di pompa è presente anche un'onda stimolata contropropagante alla frequenza di Stokes (ω_s).

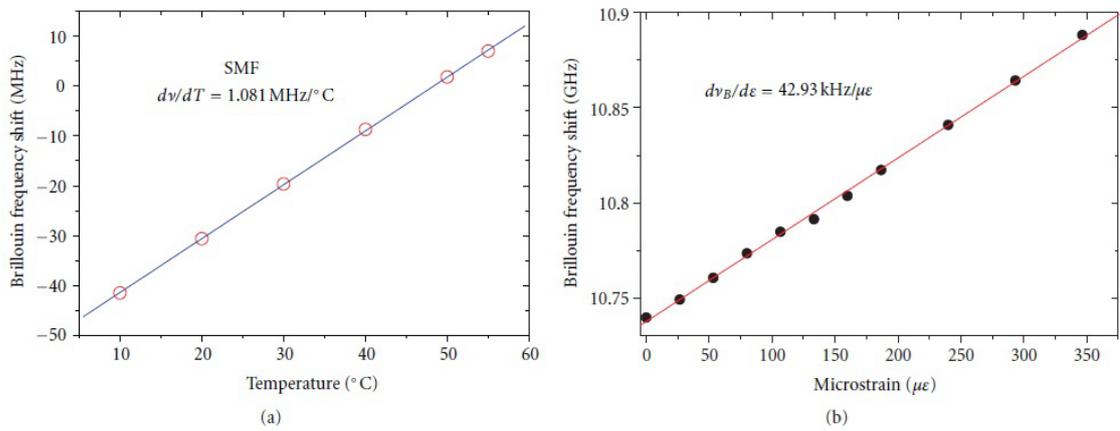


Figura 2.10: Rappresentazione grafica sperimentale della dipendenza di ν_B da temperatura (a) e strain (b).

2.5.1 Sensori Brillouin Spontanei

I sensori basati sullo scattering Brillouin spontaneo presentano un buon range dinamico, tuttavia essendo sensori basati sulla misura della componente retropropagata, ed essendo questa molto debole, è molto difficile ottenere *distance range* considerevoli. Fanno parte di questa categoria il BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) e il BOCDR (Brillouin Optical Correlation Domain Reflectometer).

BOTDR - Brillouin Optical Time Domain Reflectometer

Lo schema di un sistema di sensing basato su BOTDR ricorda il metodo di misura proprio di un OTDR ed è un metodo di rilevazione coerente che utilizza la luce pulsata; in particolare la radiazione ottica viene lanciata in fibra in modo da generare scattering Brillouin spontaneo e viene misurata la componente retropropagata, come illustrato in *Figura 2.11*. Poichè la potenza del segnale riflesso è molto bassa e l'attenuazione della fibra ottica stessa provoca un ulteriore degrado del segnale, si utilizza generalmente un sistema di rilevamento coerente combinando la luce riflessa con un oscillatore locale. Nonostante questo tale sistema presenta alcuni inconvenienti: il range dinamico diminuisce con la lunghezza della fibra, la risoluzione spaziale non può essere inferiore al metro ed è necessario introdurre dei sistemi di filtraggio per eliminare la luce retropropagata dovuta a effetto di Rayleigh.

Il problema legato alla simultanea dipendenza dello shift Brillouin da temperatura e strain può, tuttavia, essere risolto considerando che il rapporto tra

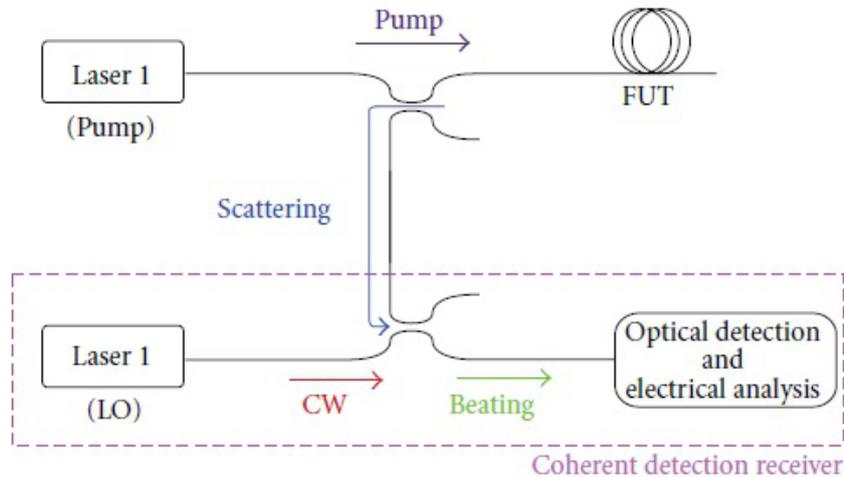


Figura 2.11: Configurazione tipica di un sistema BOTDR in cui: FUT (Fiber Under Test) è la fibra sensing (trasduttore distribuito), LO è l'oscillatore locale e CW indica l'onda continua.

le due componenti retrodiffuse di Brillouin e Raman (*Landau-Placzek ratio - LPR*) dipende solo dalla temperatura e di conseguenza può essere utilizzato per ottenere un profilo di temperatura distribuito indipendentemente dallo strain [14]. Infine per cercare di ridurre il problema legato all'attenuazione del segnale si utilizza la tecnica basata su OTDR per determinare il profilo di attenuazione della fibra ottica in funzione della posizione e questo viene sottratto dalle misure di intensità realizzate con il BOTDR; in questo modo si ottiene una misura indipendente dalla perdite in fibra.

2.5.2 Sensori Brillouin Stimolati

Con i sensori basati su scattering Brillouin stimolato, essendo amplificata la componente Stokes, non si presenta nuovamente il problema di avere un segnale retropropagato debole, ottenendo di conseguenza *distance range* abbastanza alti; i principali sensori che fanno parte di questa categoria sono basati su schemi BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis) e BOFDA (Brillouin Optical Frequency Domain Analysis).

BOTDA - Brillouin Optical Time Domain Analysis

Il principio di funzionamento di un BOTDA è illustrato in *Figura 2.12*.

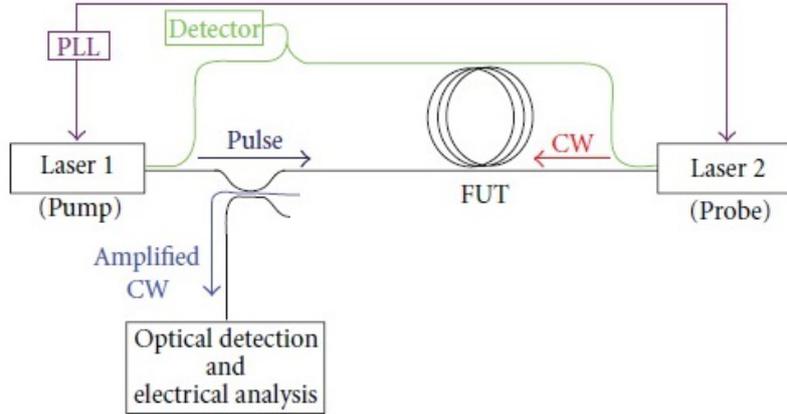


Figura 2.12: Configurazione tipica di un sistema BOTDA.

In particolare vengono iniettati in fibra ottica due flussi luminosi, ovvero l'onda di pompa (pulsata - *pump*) e l'onda contropagata (continua - *probe*) che stimola il processo di diffusione Brillouin stimolata; quando la differenza tra le frequenze delle due onde assume il valore dello shift Brillouin (ν_B), l'onda Stokes viene amplificata per SBS e viene misurato il guadagno Brillouin (eq. 2.7)

Il segnale retropropagato misurato con la tecnica BOTDA è superiore alla componente retrodiffusa di Rayleigh a causa del fatto che, a differenza del BOTDR, l'onda Stokes viene rafforzata dalla componente (*probe*) contropagante; ad esempio lanciando un'onda continua in una fibra standard con potenza ≈ 0.1 mW, l'onda Stokes retrodiffusa può essere fino a cento volte superiore rispetto all'onda di Rayleigh.

Il profilo distribuito dell'onda Stokes ed in particolare il punto esatto, nella fibra ottica, in cui la riflessione ha luogo, può essere ottenuto mediante la semplice relazione:

$$z = \frac{1}{2} \frac{c_0}{n} t \quad (2.19)$$

in cui c_0 è la velocità della luce nel vuoto, n è l'indice di rifrazione del nucleo e t è il tempo che intercorre tra quando l'impulso viene lanciato e quando viene rilevato dal *detector*.

Dal punto di vista pratico se l'impulso viene lanciato al tempo $t = 0$ e viaggia con velocità c_0/n , la distanza percorsa in un arco di tempo pari a t è data dal prodotto tra t e la velocità dell'onda diviso due in quanto in tale

intervallo temporale l'onda è andata e tornata, compiendo una distanza pari a due volte z .

È possibile quindi ottenere la distribuzione del guadagno Brillouin in relazione alla distanza, oltre che la relazione tra questa e lo shift Brillouin, come rappresentato in *Figura 2.13*.

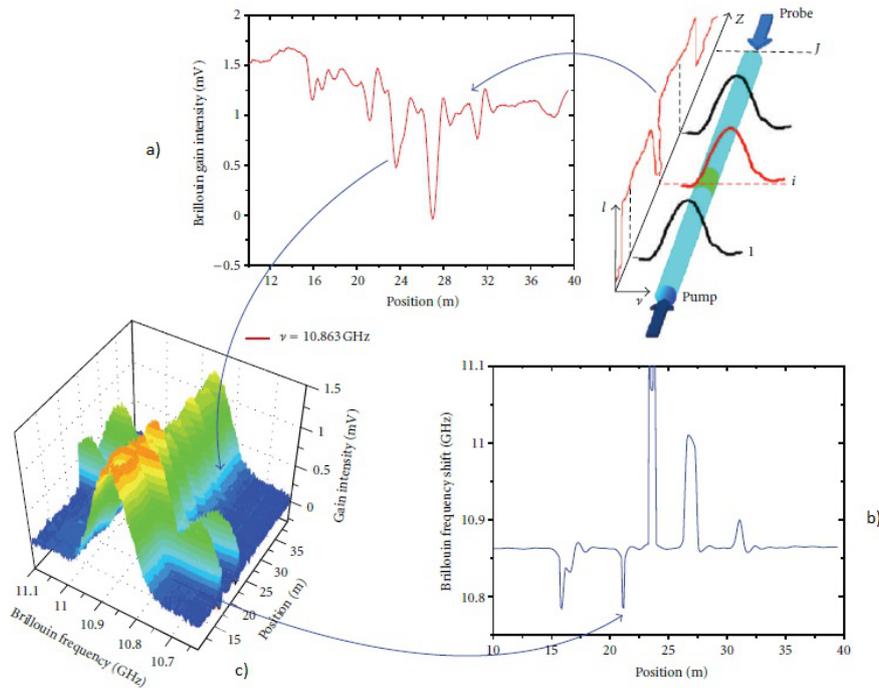


Figura 2.13: Parametri di misura in un BOTDA: (a) relazione tra la posizione (in m) e il guadagno Brillouin (in mW), (b) relazione tra la posizione e lo shift Brillouin (in GHz) e (c) grafico in cui si riporta la relazione tra lo shift e il guadagno Brillouin al variare della distanza.

Il tempo di misura in un sistema BOTDA tradizionale è nell'ordine dei minuti, anche se dipende fortemente dalla lunghezza della fibra di sensing; tuttavia questo costituisce un grave svantaggio soprattutto nel rilevamento dinamico in strutture di monitoraggio della salute.

I sensori basati sulla tecnica BOTDA sono spesso utilizzati per misurare variazioni di temperatura e strain. Il metodo più semplice consiste nella misura diretta dell'intensità del picco di guadagno Brillouin che consente di ridurre i tempi di misura. Esistono principalmente due configurazioni in cui può essere utilizzato un sistema BOTDA (*Figura 2.14*):

1. Nel primo caso (a) vengono utilizzate due sorgenti, una per la pompa e una per l'onda Stokes.

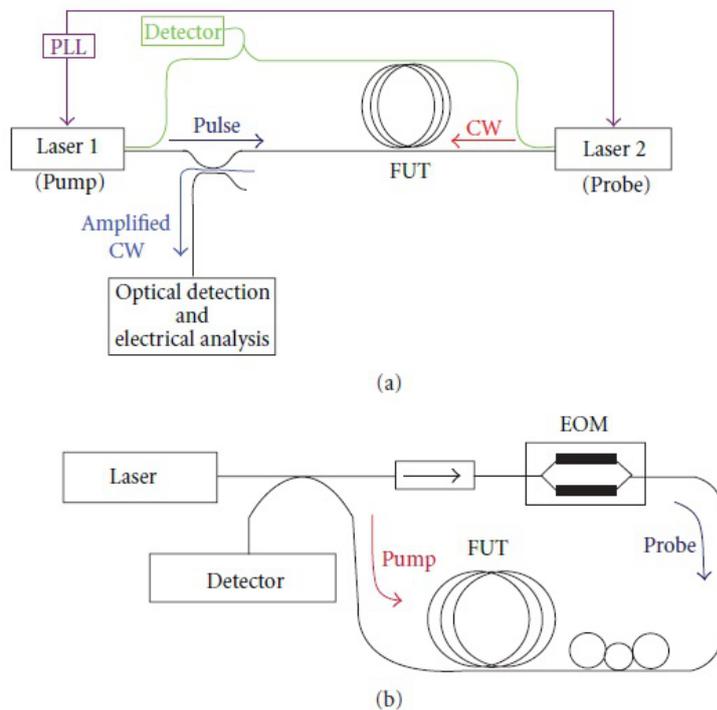


Figura 2.14: Configurazioni di un sistema BOTDA utilizzando due sorgenti (a) oppure una sorgente (b).

2. Nel secondo caso (b) viene utilizzata una sola sorgente sia per la pompa che per l'onda Stokes; mentre l'onda di pompa viene iniettata all'inizio della fibra ottica, l'onda Stokes, che è generata attraverso l'utilizzo di un modulatore elettro-ottico (EOM), viene inviata all'altra estremità della fibra in configurazione contropropagante.

In questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare la seconda configurazione in quanto ha il vantaggio di garantire che sorgente e sistema di misura possano trovarsi nello stesso luogo (*sensore in riflessione*) ed inoltre si utilizza un solo laser. L'unico svantaggio è che la lunghezza della fibra di sensing non potrà essere molto elevata.

Vi sono anche altre configurazioni implementabili con il BOTDA, alcune delle quali sfruttano la dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione [15] e altre in cui si cerca di diminuire il tempo di acquisizione [16].

Capitolo 3

Attività sperimentale

In questo capitolo è riportata l'analisi sperimentale che ha portato allo studio della relazione esistente tra il guadagno Brillouin e la temperatura in una fibra ottica monomodale. È stato realizzato un setup sperimentale avente lo scopo di misurare il guadagno Brillouin utilizzando uno dei metodi visti nel Capitolo 2 relativamente ai sensori distribuiti: in particolare, come già anticipato nella Sezione 2.5.2, si è scelto di utilizzare uno schema BOTDA che utilizzi un solo laser.

Di seguito sono riportate in sezioni separate tutte le configurazioni provate ed i risultati ottenuti, con particolare attenzione alla configurazione ottimale finale, per cui si è provveduto a determinare la relazione guadagno - temperatura - shift Brillouin.

3.1 Prima configurazione

Il setup sperimentale relativo alla prima configurazione provata è rappresentato in *Figura 3.1*.

Avendo scelto di utilizzare uno schema BOTDA con una sola sorgente (*Figura 2.14 (b)*), dopo il laser e l'isolatore ottico è presente un accoppiatore direzionale 90/10 che divide il segnale proveniente dal laser in due fasci luminosi, uno dei quali sarà l'onda di pompa (10% del segnale) mentre l'altro (90%) andrà a costituire il segnale di probe (onda contropropagante) necessario per avere SBS.

Il laser è utilizzato in continua con potenza in uscita di 4 dBm alla lunghezza d'onda $\lambda_p = 1550$ nm; il segnale probe in uscita dall'accoppiatore viene poi inviato tramite un polarizzatore ad un modulatore elettro-ottico (EOM - Electro Optical Modulator) *Pirelli* che ha il compito di modulare il segnale alla frequenza di Stokes e anti-Stokes in modo da generare un segnale che poi

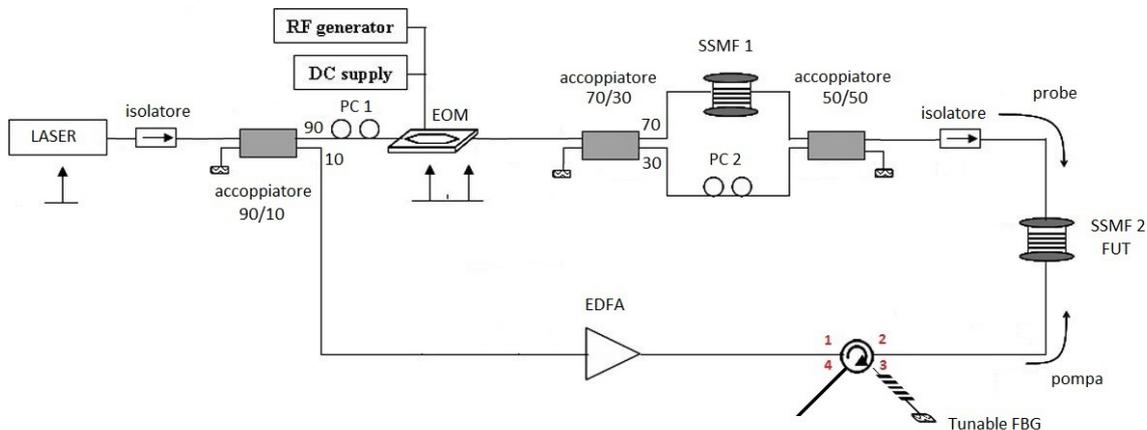


Figura 3.1: Setup sperimentale iniziale.

possa essere utilizzato come onda contropropagante all'interno del sensore. L'EOM riceve in ingresso una tensione di *bias* pari a 5 V e un segnale a frequenza f_{RF} (con tensione nominale $V_{RF} = 20$ dBm) sintonizzabile fino a 12 GHz; questo componente è molto importante in quanto solo se la frequenza di modulazione è uguale allo shift Brillouin ν_B si ha SBS e quindi amplificazione della componente di Stokes.

Il segnale di pompa in uscita dall'accoppiatore viene inviato in ingresso ad un amplificatore EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), modello *PriTel FA-15* per essere amplificato ed inviato, tramite un circolatore, alla fibra di sensing (FUT - *Fiber Under Test*) in cui viene accoppiato al segnale di probe, generando effetto Brillouin stimolato. La fibra sensing è una fibra monomodale lunga 4.6 km con coefficiente di attenuazione pari a $\alpha = 0.186$ dB/km.

Al fine di cercare di evitare che il guadagno Brillouin dipenda fortemente dalla polarizzazione (Sezione 2.3.1) è stato sviluppato uno *scrambler* (Figura 3.2) costituito da un accoppiatore 70/30 che divide il segnale in due rami, uno costituito da una fibra monomodale lunga 2.9 km (SSMF 1) e l'altro costituito da un polarizzatore (PC 2); i segnali vengono poi accoppiati dall'accoppiatore direzionale 50/50 ed inviati all'isolatore. In particolare si è cercato di fare in modo che gli stati di polarizzazione in uscita dai due rami fossero ortogonali tra loro ottenendo quindi un segnale in uscita in linea di massima depolarizzato ¹.

¹Attenzione: il termine "*depolarizzato*" così come viene utilizzato in questa tesi assume il significato di **poco** polarizzato, cioè con un basso grado di polarizzazione.

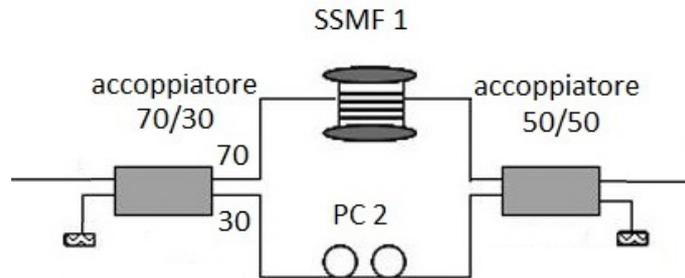


Figura 3.2: Scrambler utilizzato per depolarizzare il segnale.

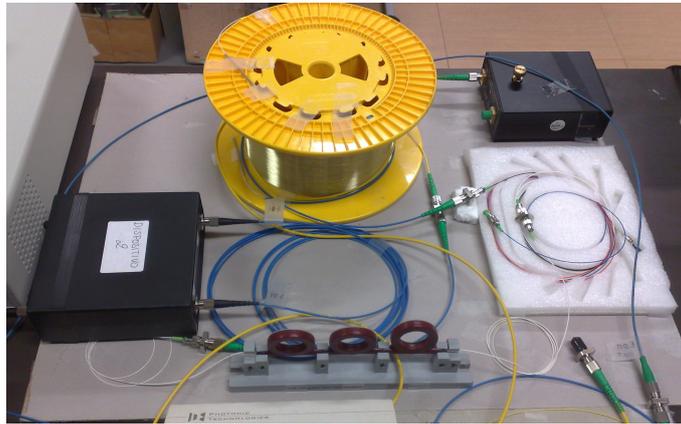


Figura 3.3: Foto dello scrambler utilizzato (vista dall'alto).

Tale dispositivo è posto dopo l'EOM in modo che tutto il segnale (quindi tutte e tre le componenti - pompa, Stokes e anti-Stokes) venga riportato all'ingresso della fibra sensing depolarizzato.

I segnali provenienti dai due rami del circuito (pompa e probe) vengono infine accoppiati nella fibra sensore; alla porta 3 del circolatore il segnale ottenuto è rappresentato in *Figura 3.4*; la rilevazione della potenza è stata effettuata con un wavemeter *Burleigh*. Dal grafico si possono osservare i tre picchi in corrispondenza delle lunghezze d'onda di Stokes (λ_s), pompa (λ_p) e anti-Stokes rispettivamente da destra verso sinistra ².

Inizialmente come frequenza di modulazione è stata scelta $f_{RF} = 12$ GHz, ma

²Si ricorda che la relazione tra frequenza e lunghezza d'onda è data da: $\lambda = c/f$, con c velocità della luce nel mezzo ottico.

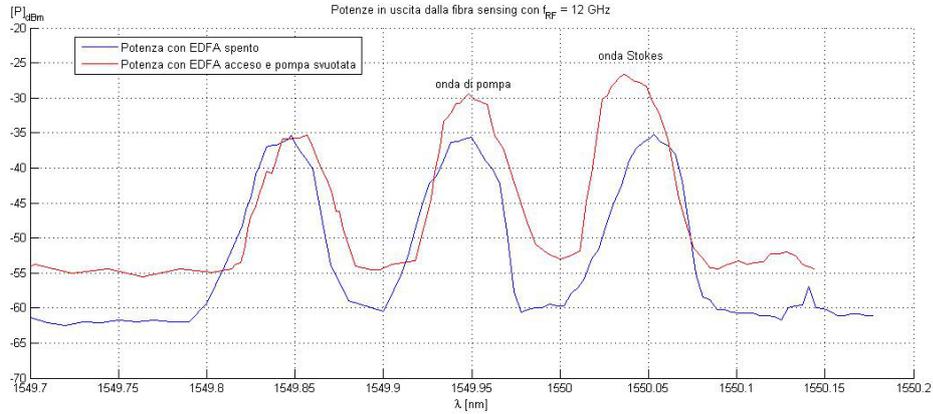


Figura 3.4: Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) nel caso di EDFA spento (blu) e acceso (rosso).

come si può notare osservando la figura la potenza non viene completamente trasferita tra la pompa e la componente Stokes, nonostante in questo caso la pompa sia completamente svuotata. Di conseguenza, agendo sulla frequenza di modulazione dell'EOM, si è cercata la frequenza tale che $f_{RF} = \nu_B$, ottenendo $f_{RF} = 10.86$ GHz per cui si ottiene il grafico riportato in *Figura 3.5*. In questo caso si nota chiaramente il trasferimento della potenza tra l'onda di pompa e l'onda Stokes, anche in condizioni di pompa non svuotata.

Alla porta 3 del circolatore è stato inserito un filtro sintonizzabile (Tunable FBG - utilizzato in riflessione, si veda l'*Appendice A*) per eliminare l'onda di pompa residua in modo che in porta 4 la misura del guadagno Brillouin venga fatta solo sull'onda Stokes, che è di fatto la componente amplificata. Nonostante l'amplificazione Brillouin sia stata raggiunta si presenta tuttavia il problema legato alla **polarization attraction**, letteralmente “*attrazione di polarizzazione*”, trattato brevemente in Sezione 2.3.1; infatti accade che nonostante sia presente lo scrambler, alla porta 3 del circolatore il segnale risulta ancora polarizzato con conseguenti ripercussioni sul guadagno Brillouin (dipendente dalla polarizzazione); in particolare toccando o muovendo leggermente le brettelle che collegano la fibra sensore al resto del circuito si hanno forti fluttuazioni sul guadagno ed è quindi impossibile effettuare una misura accurata.

3.2 Seconda configurazione

Per cercare di risolvere il problema che si presenta con la **Prima Configurazione** si è deciso di spostare lo scrambler, inserendolo dopo il primo isolatore

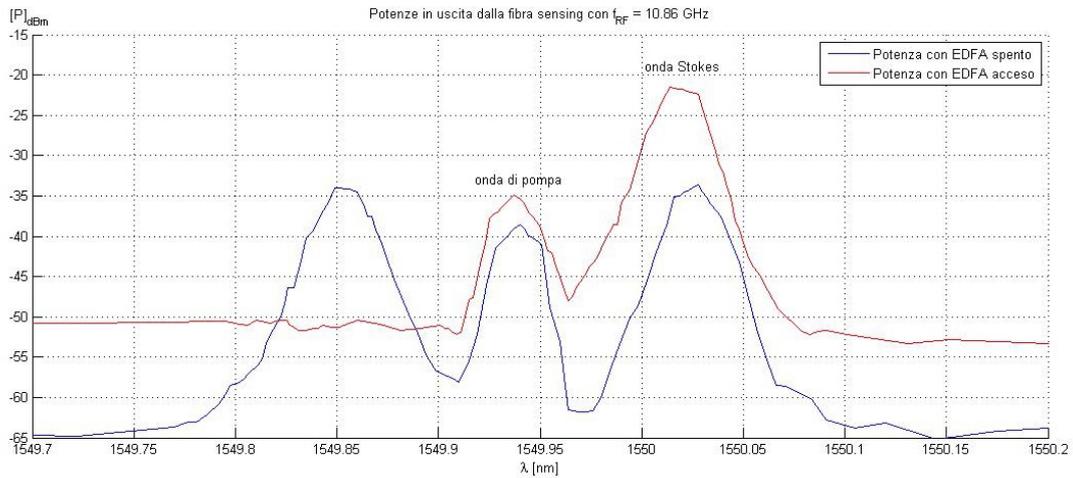


Figura 3.5: Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) nel caso di EDFA spento (blu) e acceso (rosso) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e pompa non svuotata.

come rappresentato in *Figura 3.6*; così facendo si è cercato di fare in modo che entrambi i segnali che arrivano alle estremità della fibra sensing siano il più possibile depolarizzati.

Anche in questo caso i segnali di pompa e di probe vengono accoppiati nella fibra sensore ed in uscita dalla porta 3 del circolatore si ottiene il segnale di *Figura 3.7*.

Confrontando il grafico di *Figura 3.7* con quello di *Figura 3.5* si può notare che sebbene l'effetto Brillouin stimolato sia presente, non si riesce comunque a massimizzare la componente Stokes rispetto all'onda di pompa: basti solo osservare che l'onda Stokes giace addirittura al di sotto della componente di pompa avendo un picco di circa -30 dBm a fronte dei circa -20 dBm riscontrati con il primo setup utilizzato (*Figura 3.1*).

Questo si può spiegare con il fatto che anche se lo scrambler depolarizza il segnale (e quindi dopo l'accoppiatore 90/10 il segnale è effettivamente depolarizzato), essendo il modulatore elettro-ottico un dispositivo sensibile alla polarizzazione, l'effetto della modulazione è che le nuove componenti generate (ed in particolare l'onda Stokes) sono polarizzate, vanificando quindi l'attività dello scrambler. Questo si è dimostrato misurando il grado di polarizzazione (*DOP - Degree Of Polarization*) in uscita dalla fibra sensore e verificando che effettivamente non è pari a zero, ma si aggira attorno al 80 %. In definitiva si ripresenta nuovamente il problema della dipendenza del guadagno Brillouin dalla polarizzazione, legato all'attrazione del SOP del segnale

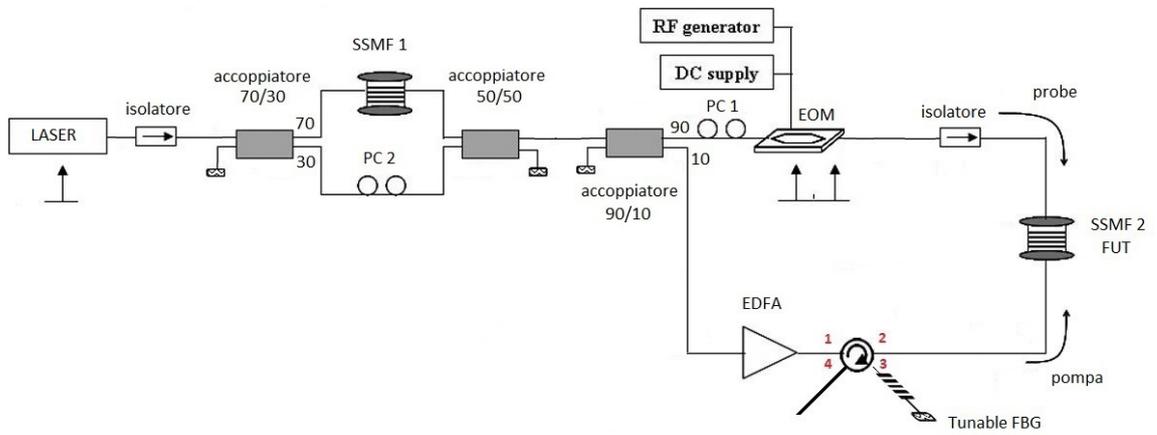


Figura 3.6: Setup sperimentale con scrambler dopo il primo isolatore ottico.

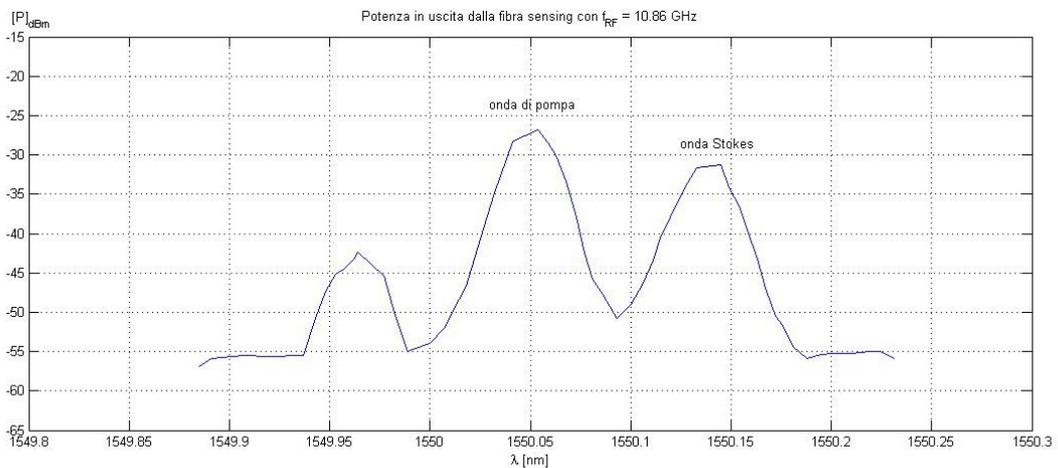


Figura 3.7: Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e in condizioni di pompa svuotata.

di probe verso il SOP della pompa.

3.3 Terza configurazione

Per cercare di risolvere i problemi precedentemente trattati e considerando che il fenomeno di *polarization attraction* rappresenta un ostacolo non trascurabile nella misura del guadagno Brillouin, si è deciso di inserire lo scrambler dopo l'EDFA (Figura 3.8); in questo modo il segnale in ingresso alla porta 1 del circolatore risulta depolarizzato.

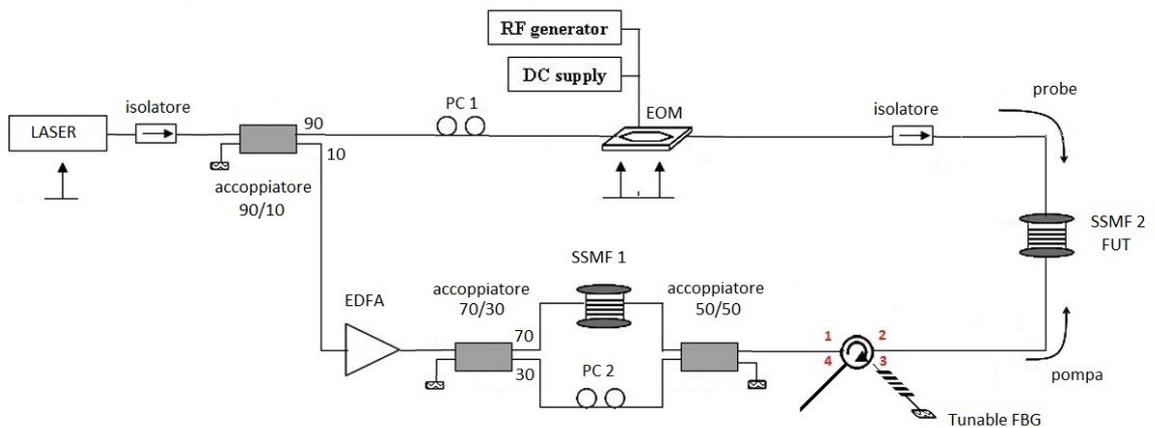


Figura 3.8: Setup sperimentale con scrambler dopo l'amplificatore ottico (EDFA).

In particolare le misure sperimentali dimostrano che anche muovendo le bretelle e agendo sulla fibra sensore con leggere tensioni e/o torsioni il guadagno Brillouin non oscilla più come accadeva nelle prime configurazioni, quindi è possibile effettuare una misura abbastanza accurata della potenza in porta 3; il grado di polarizzazione del segnale in uscita dalla porta 3 si aggira attorno al 10 %, segno che il segnale è in linea di massima depolarizzato e di conseguenza è stata limitata fortemente la dipendenza del guadagno dalla polarizzazione.

Analizzando il segnale in uscita dalla porta 3 (Figura 3.9) si può notare che, però, la componente Stokes non viene sufficientemente amplificata ed è ancora presente fortemente la componente dovuta allo scattering di Rayleigh della pompa stessa (alla lunghezza d'onda λ_p); da una prima analisi si nota un guadagno attorno ai 2 dB, ovvero piuttosto basso, considerando il fatto

che l'EDFA sta operando in regime di pompa quasi svuotata. Tale analisi

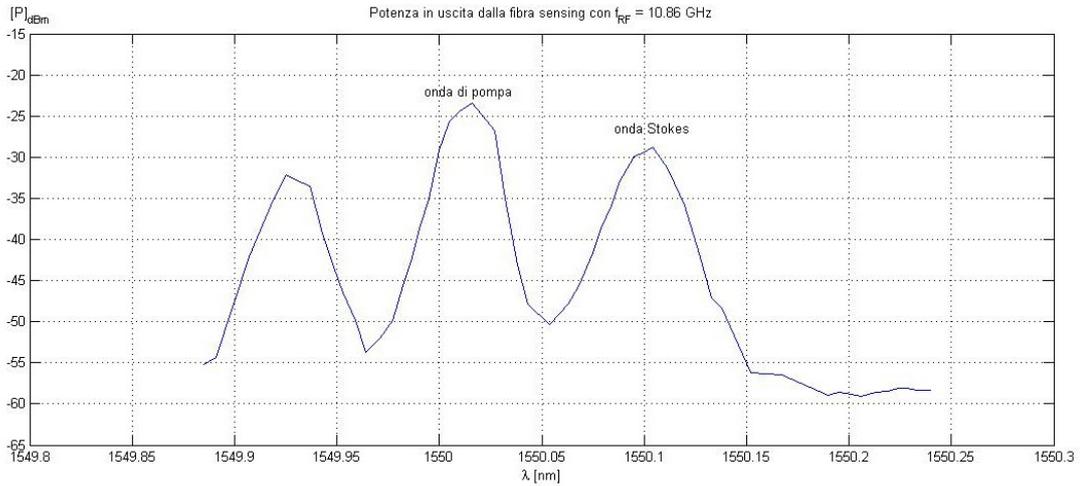


Figura 3.9: Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e con EDFA acceso in condizioni di pompa svuotata.

è confermata anche dal grafico in *Figura 3.10* che riporta l'andamento sperimentale del guadagno Brillouin in funzione della frequenza ν_B , misurato in porta 4 del circolatore dopo che sono state rimosse tutte le componenti tranne quella Stokes attraverso l'FBG.

3.4 Configurazione finale

Riassumendo i problemi sinora riscontrati e le soluzioni adottate si ha che:

- Scrambler in configurazione originale (Prima configurazione): problema *polarization attraction*.
- Scrambler dopo la sorgente (Seconda configurazione): permane il problema della *polarization attraction* ed inoltre non si riesce a massimizzare la componente Stokes a fronte dell'onda di pompa.
- Scrambler dopo EDFA: si risolve il problema della *polarization attraction*, ma il guadagno rimane basso (≈ 2 dB).

Per cercare di incrementare il guadagno si è agito sullo schema sperimentale invertendo le uscite dell'accoppiatore 90/10 in modo che la maggior parte di potenza (90%) andasse ad alimentare l'amplificatore ottico e quindi il segnale

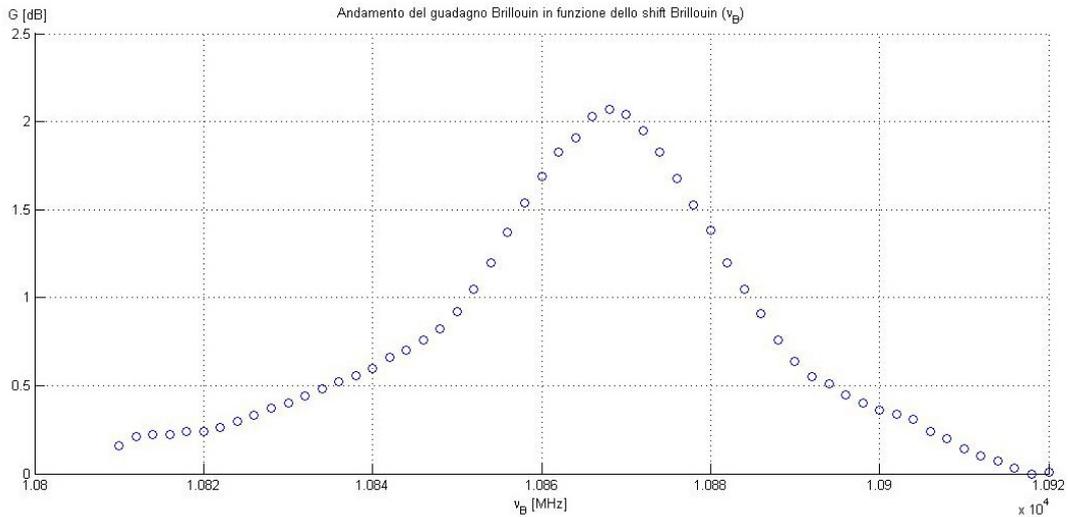


Figura 3.10: Guadagno Brillouin sperimentale misurato in porta 4, dopo il filtraggio attraverso l'FBG.

di pompa. In *Figura 3.11* è riportata la configurazione utilizzata ed in *Figura 3.12* è riportata una foto del banco di lavoro con la nuova configurazione.

Osservando la *Figura 3.13* in cui è riportato il segnale in uscita dalla porta 3 del circolatore, e facendo un confronto con il grafico di *Figura 3.9*, è possibile notare come sia molto più visibile l'effetto Brillouin stimolato: in particolare si nota che la componente di Stokes viene amplificata maggiormente ed è ben visibile il trasferimento di potenza tra l'onda di pompa e l'onda Stokes.

In porta 4 del circolatore, dopo il filtraggio del segnale con FBG e la conseguente rimozione di tutte le componenti tranne quella di Stokes, si ottiene il grafico in *Figura 3.14* e, calcolando il guadagno Brillouin, si ottiene il grafico in *Figura 3.15*.

Dal momento che, come spiegato nel Capitolo 2, lo spettro Brillouin ha un andamento Lorentziano, si è provveduto ad eseguire il fitting Lorentziano dei dati sperimentali.

3.4.1 Fitting Lorentziano

Come noto eseguire il fitting su dei dati significa in sostanza trovare la curva (in questo caso Lorentziana) che meglio approssima l'andamento dei dati sperimentali.

La funzione Lorentziana è data da:

$$f(y_i) = \frac{c_1}{1 + \left(\frac{y_i - y_0}{c_2}\right)^2} + c_3 \quad (3.1)$$

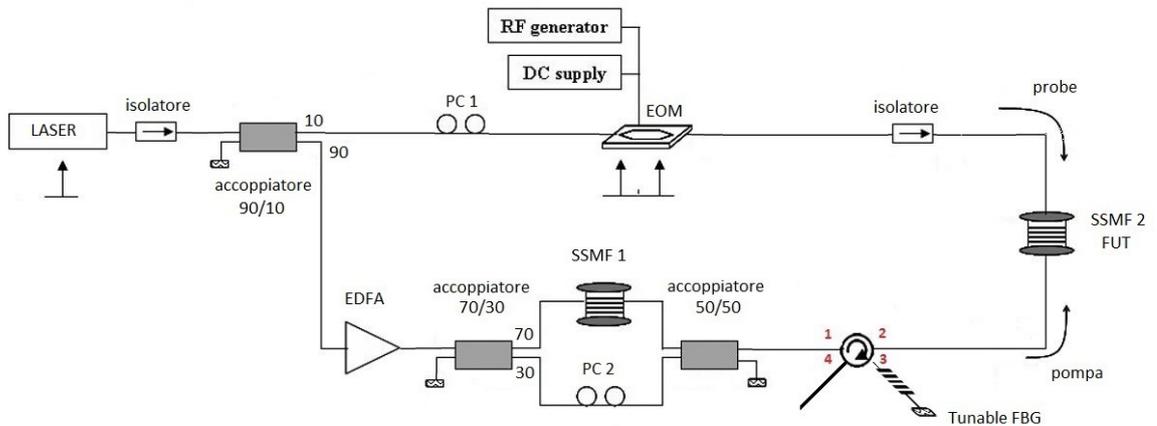


Figura 3.11: Setup sperimentale con scrambler dopo l'amplificatore ottico (EDFA) e maggiore potenza di pompa.



Figura 3.12: Banco di prova: nella parte sinistra è visibile la fibra sensore utilizzata, mentre nella parte destra si possono osservare i vari componenti dello schema finale.

in cui:

- y_i : dato i -esimo (potenza misurata in porta 4 del circolatore) con $i = 1, 2, \dots, n$ ($n =$ numero campioni)

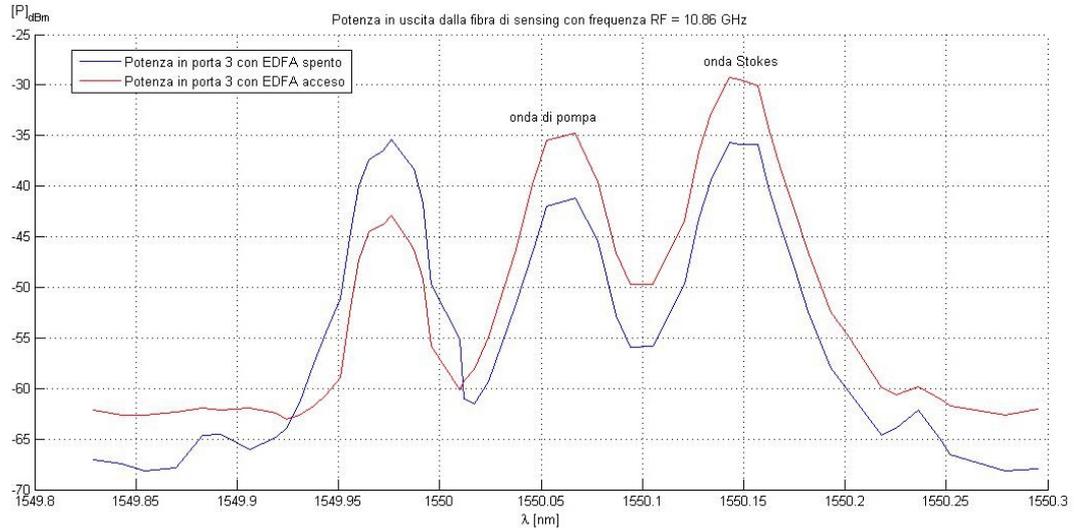


Figura 3.13: Potenza in uscita dalla porta 3 del circolatore (prima di entrare nel FBG) con frequenza di modulazione pari a 10.86 GHz e in condizioni di pompa non svuotata.

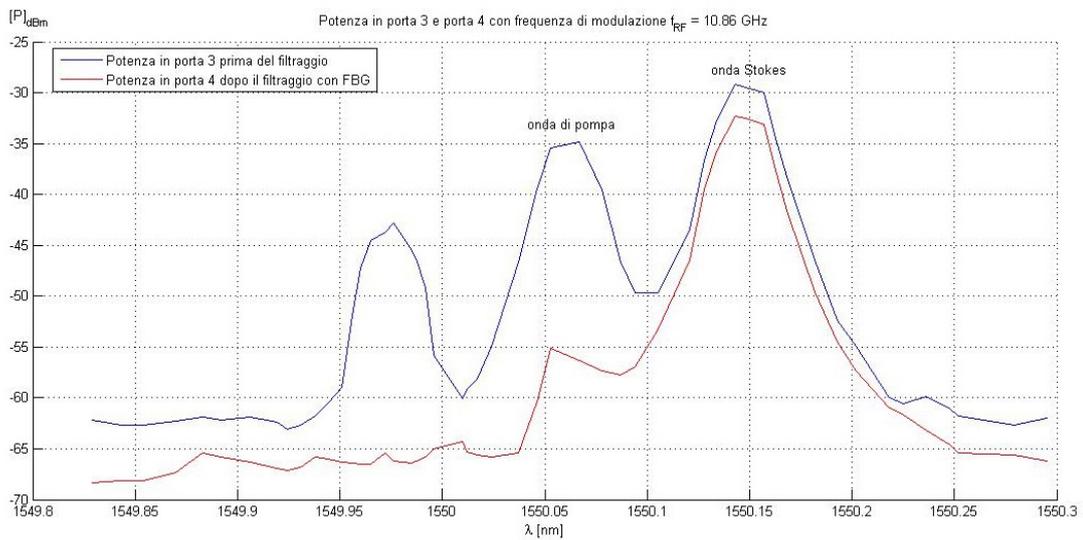


Figura 3.14: Potenza in uscita dalla porta 3 (blu) e 4 (rosso) del circolatore rispettivamente prima e dopo il filtraggio con filtro FBG.

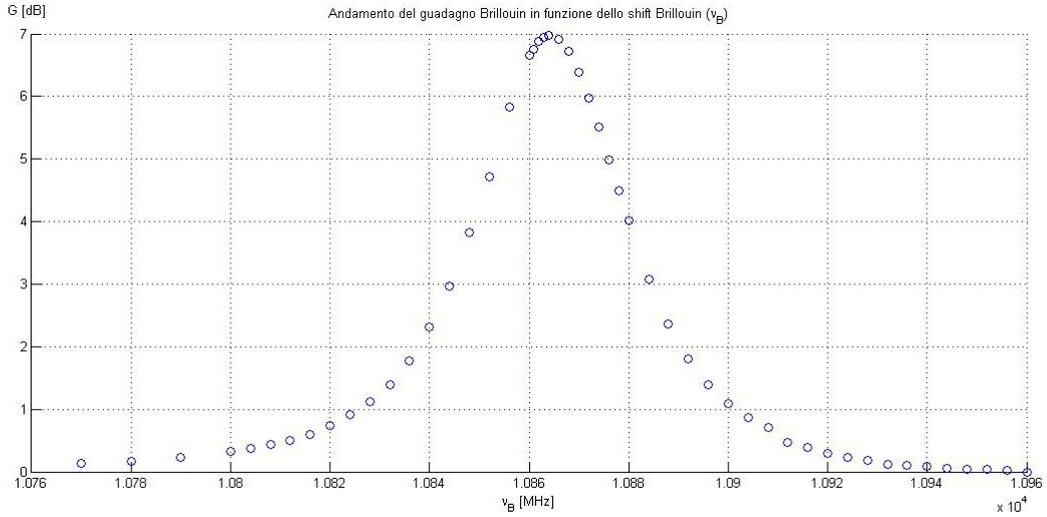


Figura 3.15: Guadagno Brillouin sperimentale misurato in porta 4, dopo il filtraggio attraverso l'FBG.

- y_0 : valore medio (posizione del picco)
- c_1 : ampiezza della curva
- c_2 : larghezza della curva
- c_3 : base della curva³

Nel caso specifico, considerando che i dati da ottenere sono dati di guadagno, la funzione utilizzata è data da:

$$y_i^{FIT} = 10 \lg \left(\frac{c_1}{1 + \left(\frac{y_i - y_0}{c_2}\right)^2} + c_3 \right) \quad (3.2)$$

in modo da ottenere i valori di fitting in dBm.

In particolare i dati sperimentali sono in mW, quindi i parametri della curva hanno le seguenti dimensioni: c_1 e c_3 sono in mW, mentre c_2 e x_0 , essendo delle frequenze, sono dati in MHz e rappresentano rispettivamente la banda di guadagno e la frequenza in cui si ha il picco di guadagno Brillouin (ν_B). Una volta ottenuto il fitting delle letture di potenza (denominato y_i^{FIT}),

³N.B. I parametri elencati sono quelli che vengono inseriti, non quelli restituiti dall'operazione di fitting; questi ultimi, infatti, possono differire, anche se di poco, da quelli inseriti, in quanto i parametri inseriti vengono determinati in seguito ad una prima analisi dei dati sperimentali.

essendo il guadagno di amplificazione dato in generale dal rapporto tra la potenza amplificata (P_1) e la potenza prima dell'amplificazione (P_0), ovvero:

$$G = \frac{P_1}{P_0} \quad (3.3)$$

passando ai logaritmi si ha che il guadagno (in dB) è dato da:

$$[G]_{dB} = 10 \lg(P_1) - 10 \lg(P_0) \quad (3.4)$$

Di conseguenza il guadagno Brillouin è dato da:

$$[G_B]_{dB} = 10 \lg(y_i^{FIT}) - 10 \lg(c_3) \quad (3.5)$$

essendo c_3 la potenza in uscita prima dell'amplificazione Brillouin.

Una volta eseguito il fitting e ottenuta la curva con andamento Lorentziano è stato calcolato l'errore quadratico per capire di quanto si discostano i dati sperimentali rispetto a quelli ottenuti con il fitting; tale errore, chiamato ε , esprime la distanza tra il dato misurato ed il rispettivo fitting ed è dato da:

$$\varepsilon = \sum_{i=0}^n |y_i^{FIT} - y_i|^2 \quad (3.6)$$

Applicando il metodo *RMS* si ottiene l'errore medio:

$$\varepsilon_{medio} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{n}} \quad (3.7)$$

ed infine è possibile calcolare l'errore relativo, dato da:

$$\varepsilon_{rel} = \frac{\varepsilon_{medio}}{y_{max}^{FIT}} \quad (3.8)$$

in cui y_{max}^{FIT} si riferisce al massimo valore di potenza determinato.

In *Figura 3.16* è riportato il fitting Lorentziano ottenuto dai dati di guadagno riportati in *Figura 3.15*; da tale grafico è facile notare la bontà dell'operazione di fitting.

3.5 Risultati sperimentali e commenti

Dal momento che lo scopo di questo lavoro è di analizzare la dipendenza del guadagno Brillouin dalla temperatura, sono state effettuate diverse misurazioni a diverse temperature.

In particolare per ogni temperatura ottenibile con gli strumenti a disposizione sono stati calcolati i parametri c_1 , c_2 e c_3 , il valore della frequenza in

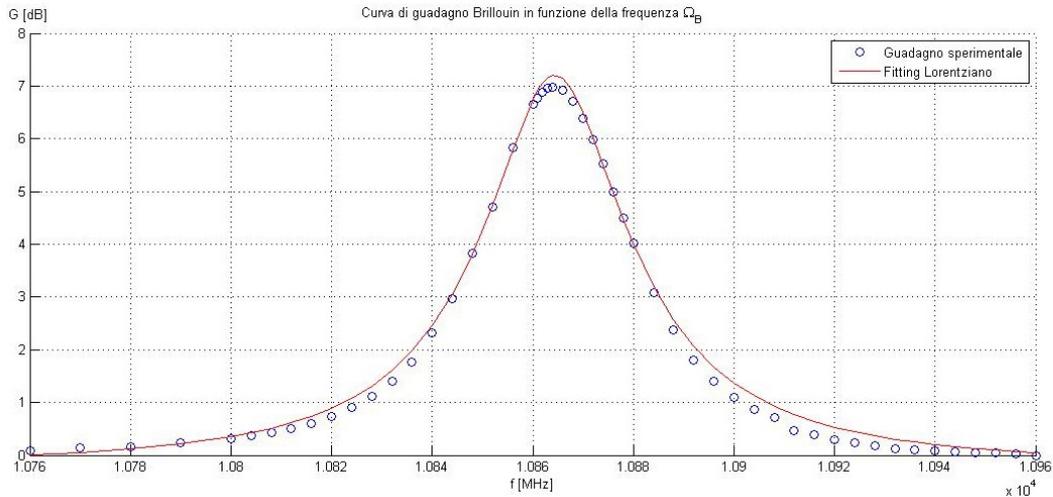


Figura 3.16: Guadagno Brillouin misurato in porta 4 (blu) e fitting con una curva Lorentziana (rosso).

cui il guadagno è massimo (picco Brillouin - ν_B), oltre che il guadagno e l'errore relativo (%) commesso nell'operazione di fitting, il tutto in un range di frequenze attorno a 10.86 GHz; per cercare di stabilizzare i valori di temperatura durante la misura, la fibra sensing è stata inserita all'interno di un contenitore isolante.

Di seguito (*Tabella 3.1*) è riportata una tabella riassuntiva in cui sono riportati i parametri calcolati per ogni temperatura.

Osservando la *Tabella 3.1* si possono fare alcune considerazioni: innanzitutto si nota come al crescere della temperatura cresca anche la frequenza del picco Brillouin (tranne in alcuni casi, imputabili a errori di misura e/o alla difficoltà di eseguire le misurazioni a certe temperature) ed inoltre si può notare come l'errore relativo sia sempre molto basso (non supera mai il 3%).

È necessario prestare molta attenzione nella lettura di questa tabella: in particolare il parametro c_2 definisce in realtà metà della banda di guadagno e va quindi moltiplicato per due per avere la banda di guadagno Brillouin effettiva ⁴.

La dipendenza del guadagno Brillouin dalla temperatura si osserva dal grafico riportato in *Figura 3.17* per tre diverse temperature.

Dall'osservazione del grafico è immediato notare che il guadagno dipende dalla temperatura, in accordo con l'eq. (2.18), in quanto all'aumentare della stessa si nota uno spostamento in frequenza verso destra; questo spostamento

⁴Attenzione: la banda di cui si parla è la banda a 3 dB, ovvero la banda di frequenza misurata a 3 dB dal valore massimo del guadagno.

T (°C)	ν_B (MHz)	c_1 (mW)	c_2 (MHz)	c_3 (mW)	ε (%)
5,5	10.846	0,001436	13,254391	0,000524	1,987657
6,0	10.848	0,001835	11,849429	0,000543	1,059223
6,4	10.847	0,001731	12,643402	0,000520	0,954772
9,0	10.851	0,004787	9,721138	0,000462	2,191350
10,0	10.849	0,001789	12,369014	0,000528	1,132882
11,0	10.852	0,004508	10,022070	0,000469	2,833953
16,7	10.857	0,001787	12,113289	0,000522	0,956626
19,0	10.862	0,002461	11,904583	0,000585	1,311243
20,7	10.864	0,002083	11,763575	0,000497	1,098291
21,7	10.865	0,000976	13,236550	0,000398	0,859064
22,2	10.866	0,002440	11,154078	0,000528	1,201099
22,5	10.866	0,002220	11,764373	0,000490	1,340938
24,6	10.869	0,004589	9,413814	0,000410	2,697975
27,5	10.872	0,007281	8,679590	0,000575	2,270663
29,6	10.875	0,000883	13,082108	0,000372	1,235144
33,2	10.879	0,002871	10,751332	0,000472	1,870494

Tabella 3.1: Tabella dei parametri ottenuti con il fitting Lorentziano per diverse temperature.

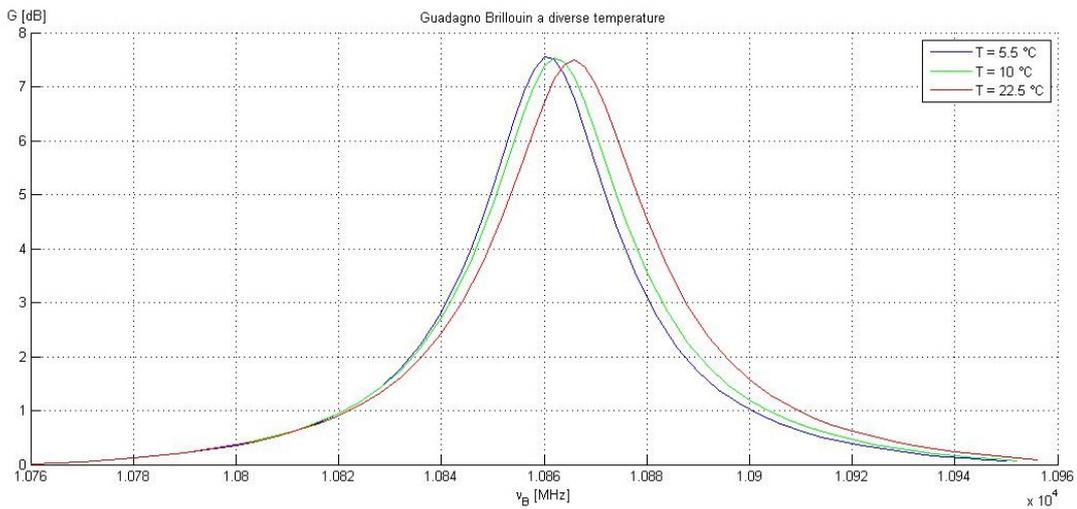


Figura 3.17: Guadagno Brillouin in funzione della frequenza di picco (ν_B) al variare della temperatura.

è confermato anche dai dati in *Tabella 3.1*.

Sempre in accordo con l'eq. (2.18) e con quanto spiegato nel paragrafo 2.5, è possibile tracciare un grafico che metta in relazione la temperatura con lo shift Brillouin, rappresentato in *Figura 3.18*; osservando tale grafico, e considerando il fitting eseguito con una retta, è possibile notare la dipendenza lineare dello shift Brillouin dalla temperatura.

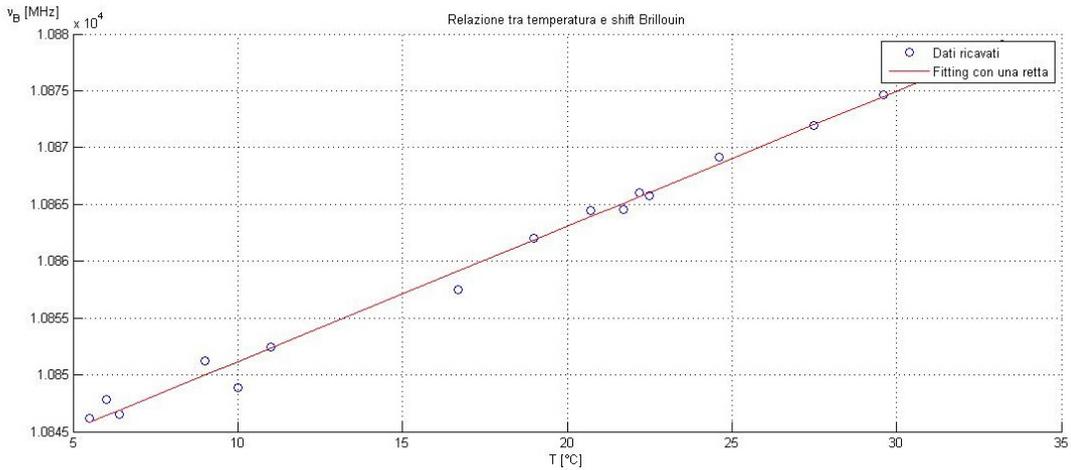


Figura 3.18: Relazione tra la temperatura e lo shift Brillouin; in blu i valori ricavati per ogni temperatura (*Tabella 3.1*) ed in rosso il fitting eseguito con una retta.

Una volta tracciata la retta, calcolandone il coefficiente angolare, è possibile ottenere la sensibilità della fibra sensore (parametro C_T nell'eq. 2.18), quindi:

$$m = \frac{d\nu_B}{dT} \quad (3.9)$$

In particolare dai calcoli effettuati risulta $m = 1.1907 \text{ MHz}/^\circ\text{C}$, dato in linea con i valori presenti in letteratura.

Inoltre è possibile ottenere la relazione tra la temperatura ed il parametro c_2 ottenuto in seguito all'operazione di fitting, che rappresenta la larghezza della banda di guadagno; in *Figura 3.19* è riportato il grafico di c_2 con il valore medio calcolato. Dall'osservazione del grafico si nota che la banda di amplificazione si trova attorno ai 20 MHz, con fluttuazioni dovute probabilmente al cambiamento delle condizioni di misura.

Infine, avendo effettuato misurazioni per sedici valori di temperatura tra $\sim 5^\circ\text{C}$ e $\sim 34^\circ\text{C}$, si è ritenuto opportuno tracciare un grafico che metta in relazione il guadagno Brillouin sia con la temperatura che con lo shift Brillouin, in modo da dimostrare come di fatto il guadagno sia strettamente

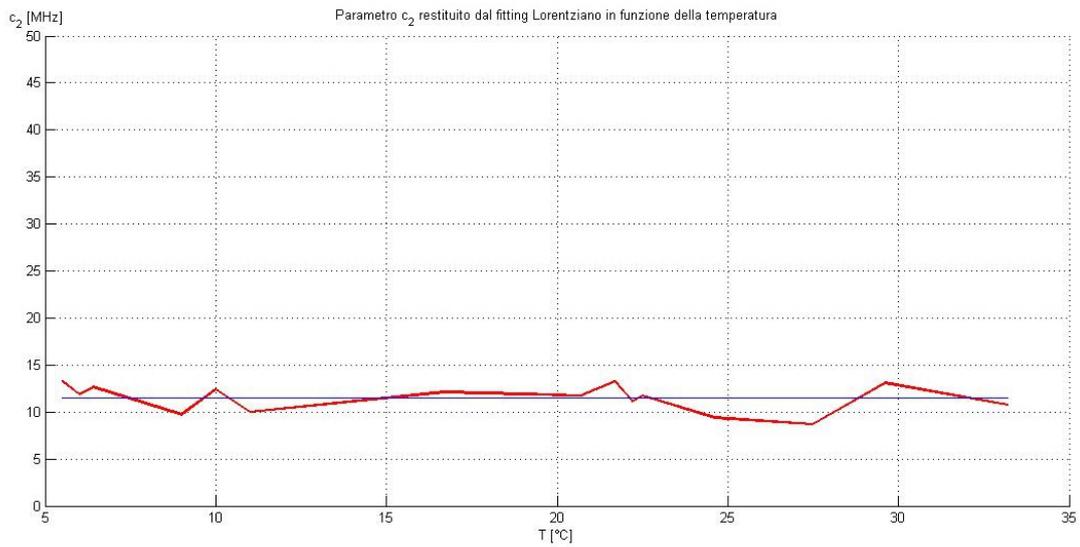


Figura 3.19: Relazione tra la temperatura ed il parametro c_2 ottenuto dall'operazione di fitting; in blu il valore medio.

legato alla temperatura e di conseguenza anche alla frequenza di picco ν_B ; osservando i grafici nelle *Figure* 3.20 e 3.21 è possibile apprezzare tale relazione, notando la crescita lineare tra shift e temperatura, confermando il risultato già trovato in *Figura* 3.18.

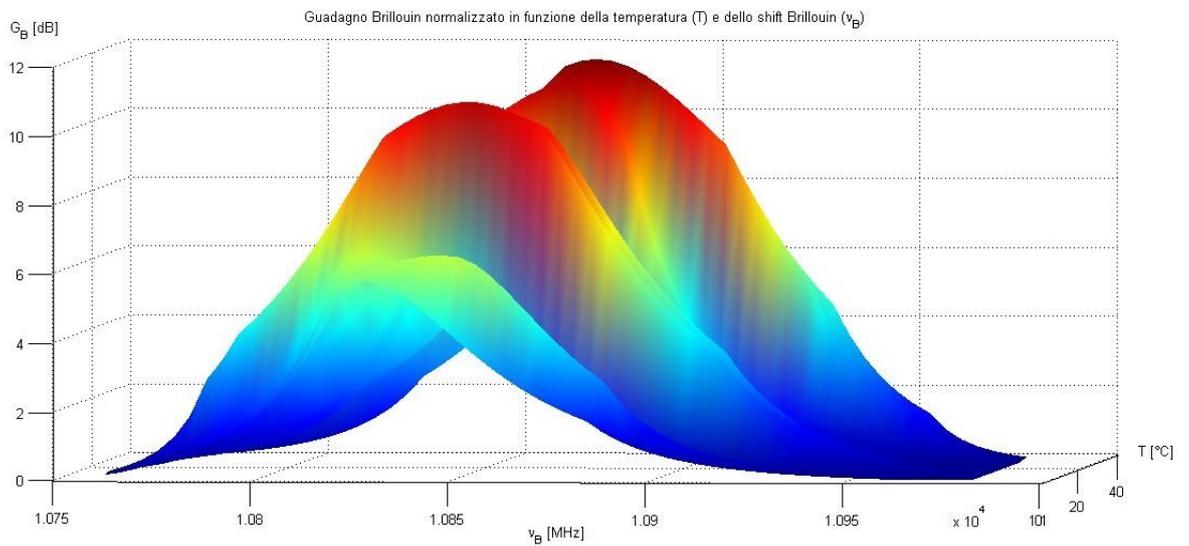


Figura 3.20: Grafico 3D che mette in relazione tre parametri: shift Brillouin (ν_B), temperatura (T) e guadagno Brillouin (G_B).

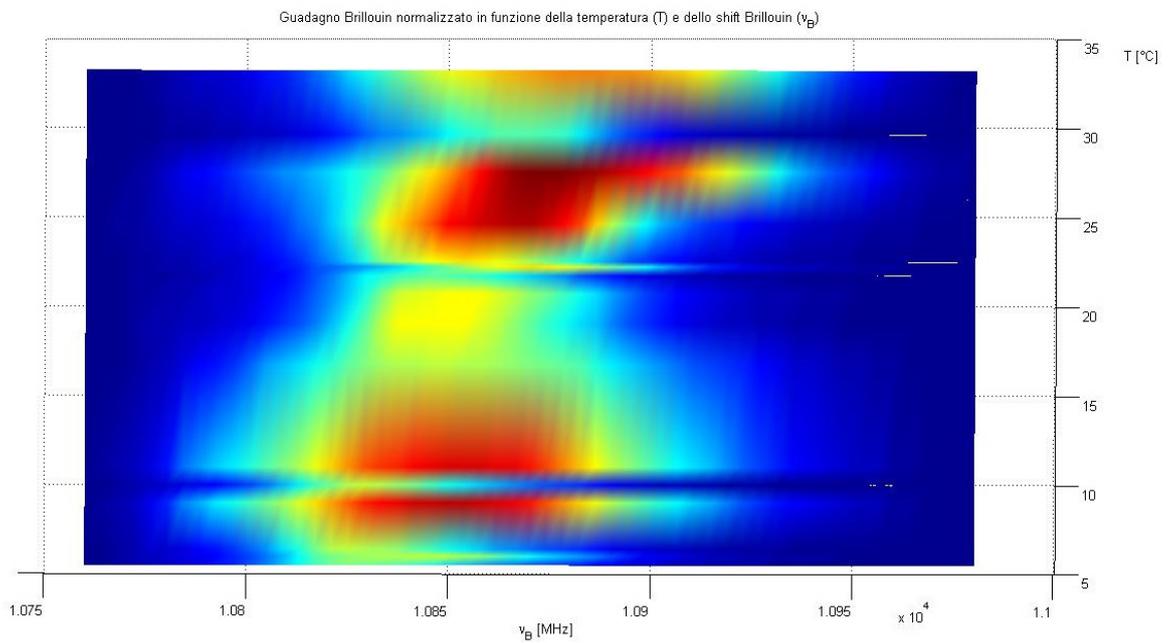


Figura 3.21: Dettaglio del grafico di *Figura 3.20* in cui si considera la relazione tra la temperatura e lo shift Brillouin.

Capitolo 4

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era di verificare la relazione tra la temperatura ed il guadagno Brillouin in fibre ottiche monomodali, sfruttando l'effetto SBS. Dopo avere ricercato lo schema più appropriato per tale scopo, tra le varie soluzioni presentate si è rivolta particolare attenzione ai modelli di sensore basati su BOTDR e BOTDA, scegliendo quest'ultimo (Capitolo 2). Sono state presentate (Capitolo 3) le varie configurazioni testate, con lo scopo di arrivare ad una misura affidabile del guadagno.

Partendo da una configurazione nota ([1]) si è arrivati, affrontando varie problematiche, alla configurazione ottimale che ha permesso di ottenere il guadagno Brillouin e di verificare la relazione che questo ha con la temperatura.

Anche se difficoltà tecniche non hanno consentito di ottenere misure a più temperature, dalle misurazioni effettuate si evince la possibilità di utilizzare la fibra ottica come un sensore: in altri termini, una volta ottenute alcune misure di shift Brillouin in relazione alla temperatura e calcolata la sensibilità, è possibile ottenere la temperatura a partire da una lettura in frequenza, osservando il valore di ν_B . Ovviamente in questo lavoro il sensore è costituito da tutta la fibra, quindi non sarebbe possibile allo stato attuale realizzare un sensore puntuale, ovvero che restituisca l'informazioni della temperatura in un punto specifico della fibra ottica.

I risultati ottenuti offrono comunque la possibilità di continuare l'attività sperimentale cercando di arrivare ad un sistema di sensing distribuito che permetta il monitoraggio dell'umidità nell'argine di un fiume.

In linea di massima, come già accennato, si potrebbe pensare di cablare l'intero argine e misurare la temperatura in "ogni" punto dello stesso, con lo scopo di prevenire smottamenti e/o crolli intervenendo tempestivamente.

In questo lavoro di tesi inoltre si è verificato che la fibra ottica non è "solo" un mezzo trasmissivo, ma offre innumerevoli vantaggi anche se utilizzata come

seniore, offrendo prestazioni in rapida crescita e non ottenibili con i normali sensori elettronici.

Appendice A

Caratterizzazione FBG

Come accennato nel Capitolo 1, un FBG può essere utilizzato anche come un filtro a banda stretta sintonizzabile in frequenza (*pagina 7*).

Il filtro utilizzato in questa tesi è un *AOS*, rappresentato in *Figura A.1*.



Figura A.1: Filtro FBG sintonizzabile utilizzato negli esperimenti.

Nel Capitolo 3 (Sez. 3.1) si è utilizzato questo filtro in riflessione, perciò lo schema utilizzato per caratterizzarlo è rappresentato in *Figura A.2*.

In particolare si è sfruttato il circolatore 4 porte già usato nei vari esperimenti, in cui:

- in porta 1 viene iniettato il segnale (utilizzando la stessa sorgente usata in tutte le configurazioni - laser *Ando*)
- in porta 2 viene collegato l'FBG

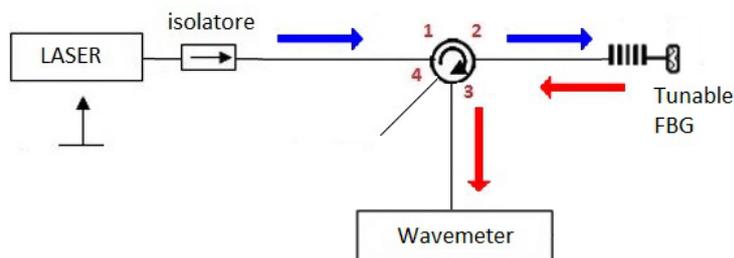


Figura A.2: Setup sperimentale per la caratterizzazione del filtro FBG in riflessione: in blu l'onda trasmessa dal laser e in rosso l'onda riflessa dal filtro.

- in porta 3 viene posto il wavemeter e misurata la potenza riflessa

Lo scopo della misura è di rilevare la curva di riflessività del filtro FBG ed il risultato è riportato in *Figura A.3*.

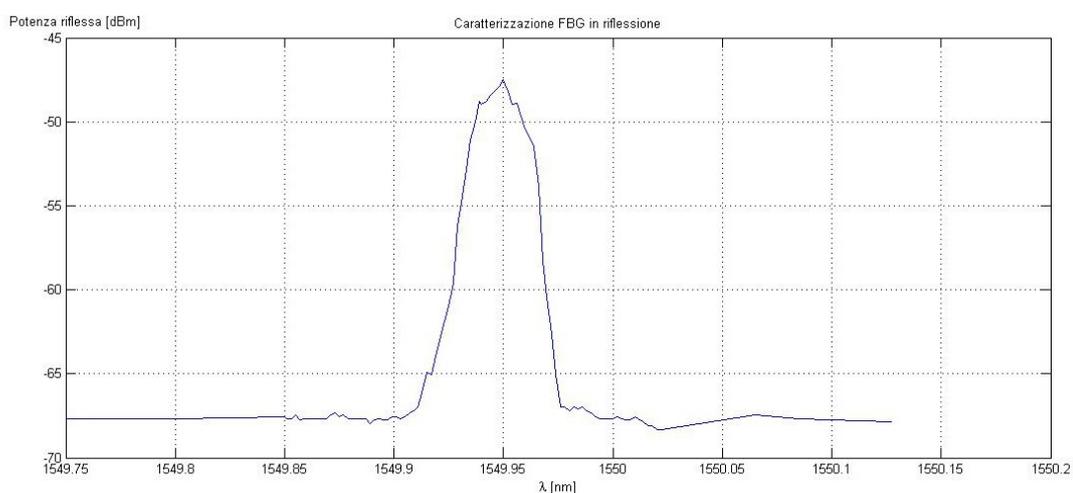


Figura A.3: Misura sperimentale della riflessività del filtro FBG utilizzato.

Osservando il grafico in *Figura A.3* si può notare come in effetti sia presente un picco di riflessività in corrispondenza della lunghezza d'onda selezionata con l'FBG, ovvero in questo caso $\lambda \approx 1549.95$ nm.

Bibliografia

- [1] Silvia Diaz, Stella Foaleng Mafang, Manuel Lopez-Amo, and Luc Thévenaz. A high-performance optical time-domain Brillouin distributed fiber sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2008.
- [2] Turan Erdogan. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 1997.
- [3] A.J. Rogers. Distributed optical-fibre sensors for the measurement of pressure, strain and temperature. *Journal of the Institution of Electronic and Radio Engineers*, 1988.
- [4] A. L.Harmer. *Optical fiber refractometer using attenuation of cladding modes*. The Institution of Electrical Engineering, 1983.
- [5] M. Oskar van Deventer and André J. Boot. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1994.
- [6] Avi Zadok, Elad Zilka, Avishay Eyal, Luc Thévenaz, and Moshe Tur. Vector analysis of stimulated Brillouin scattering amplification in standard single-mode fibers. *OSA: Optical Society of America*, 2008.
- [7] R. C. Jones. A new calculus for the treatment of optical system. *OSA: Optical Society of America*, 1947.
- [8] E. Collett. *Polarized light fundamentals and applications*. Marcel Dekker, 1 edition, 1993.
- [9] M. J. Damzen, V. I. Vlad, V. Babin, and A. Mocofanescu. *Stimulated Brillouin Scattering Fundamentals and Applications*. Institute of Physics Publishing, DiracHouse, Temple Back, BristolBS1 6BE, UK, 2003.
- [10] G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*. Academic Press, 3 edition, 2001.

- [11] T. Horiguchi, K. Shimizu, T. Kurashima, M. Tateda, and Y. Koyamada. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering. *Journal of Lightwave Technology*, 1995.
- [12] T. Kurashima, T. Horiguchi, and M. Tateda. Distributed temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers. *Optics Letters*, 1990.
- [13] D. Culverhouse, F. Farahi, C. N. Pannell, and D. A. Jackson. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors. *Electronics Letters*, 1989.
- [14] *Brillouin optical time-domain reflectometry based on Hadamard sequence probe pulse*, 2010.
- [15] X. Bao, C. Zhang, W. Li, M. Eisa, S. El-Gamal, and B. Benmokrane. Monitoring the distributed impact wave on a concrete slab due to the traffic based on polarization dependence on stimulated Brillouin scattering. *SmartMaterials and Structure*, 2008.
- [16] P. Chaube, B. G. Colpitts, D. Jagannathan, and A. W. Brown. Distributed fiber-optic sensor for dynamic strain measurement. *IEEE Sensors Journal*, 2008.

