



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

TESI DI LAUREA

Sviluppo e caratterizzazione di un sensore di temperatura in fibra ottica microstrutturata

Development and characterization of a
microstructured optical fiber temperature sensor

23 Aprile 2012

Candidato

Filippo Bergamin

Matricola 603541-TC

Relatore

Prof. Luca Palmieri

Correlatore

Dott.ssa Elena Autizi

Alla mia famiglia

Indice

| | |
|---|-----------|
| Introduzione | 1 |
| 1 Sensori in fibra ottica | 3 |
| 1.1 Introduzione ai sensori in fibra ottica | 3 |
| 1.2 Tipologie di sensori di temperatura in fibra ottica | 4 |
| 2 Analisi teorica | 11 |
| 2.1 Interferometria | 11 |
| 2.1.1 Effetto della temperatura | 13 |
| 2.2 Fibra ottica microstrutturata ellittica a doppio nucleo | 14 |
| 2.2.1 Produzione | 15 |
| 2.2.2 Proprietà | 16 |
| 2.3 Sensore basato su schema interferometrico | 17 |
| 3 Costruzione del sensore | 19 |
| 3.1 Realizzazione del primo tipo di sensore | 19 |
| 3.1.1 Allineamento e giunzione | 19 |
| 3.1.2 Taglio e metallizzazione | 25 |
| 3.1.3 Involucro | 28 |
| 3.2 Realizzazione del secondo tipo di sensore | 31 |
| 4 Misure | 33 |
| 4.1 Misure relative al primo tipo di sensore | 33 |
| 4.2 Misure relative al secondo tipo di sensore | 51 |
| 5 Conclusioni | 57 |
| A Caratterizzazione dell'EDFA | 59 |
| A.1 EDFA PriTel FA-18 | 59 |
| A.2 EDFA TPA/S 17 | 60 |
| B Caratterizzazione del WDFG | 61 |
| Bibliografia | 61 |

Elenco delle figure

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Spettro di interferenza di una cavità FP | 5 |
| 1.2 | Setup del sistema di interrogazione di un sensore FP in riflessione | 6 |
| 1.3 | Cavità FP realizzata giuntando: (a) una MMF tra due SMF; (b) una SMF con una PCF; | 6 |
| 1.4 | Realizzazione di un FBG tramite radiazioni UV interferenti | 7 |
| 1.5 | Esempio di FBG ricoperto da un tubo di rame, utilizzabile come sensore di temperatura | 7 |
| 1.6 | Interferometro MZ realizzato giuntando una fibra forata con disallineamento | 8 |
| 1.7 | Interferometro realizzato giuntando una fibra microstrutturata tra due fibre monomodali | 8 |
| 1.8 | Shift di Brillouin al variare della temperatura | 9 |
| 1.9 | Esempio di sensore combinato FP + FBG | 9 |
| | | |
| 2.1 | Figura di interferenza | 12 |
| 2.2 | Fasi di produzione della preforma della EHOF | 15 |
| 2.3 | EHOF: (a) sezione visualizzata al microscopio elettronico; (b) particolare della zona drogata lanceolata; | 15 |
| 2.4 | Setup del banco per la caratterizzazione della EHOF | 16 |
| 2.5 | Trasmittività dei due nuclei della EHOF | 17 |
| | | |
| 3.1 | Giuntatrice Fujikura FSM-20 PMII | 19 |
| 3.2 | Setup del banco per l'allineamento | 20 |
| 3.3 | HOF 2/125 | 20 |
| 3.4 | HOF 6/125 | 20 |
| 3.5 | Sezione della PCF esagonale multiforo | 21 |
| 3.6 | Setup del banco per la visualizzazione di interferenze a banda larga | 22 |
| 3.7 | Foto del banco per la visualizzazione di interferenze a banda larga | 22 |
| 3.8 | Spettro della riflessione generata dalla cavità FP | 22 |
| 3.9 | Distribuzione di potenza nella sezione della EHOF dopo l'allineamento automatico | 23 |
| 3.10 | Setup del banco per l'allineamento e la giunzione della EHOF | 24 |
| 3.11 | Sezione terminale della EHOF visualizzata con videocamera IR dopo la giunzione | 24 |
| 3.12 | Setup del banco per la valutazione delle frange d'interferenza | 25 |
| 3.13 | Spettro dell'interferenza della EHOF iniziale | 25 |
| 3.14 | Interferenza della EHOF: (a) FFT; (b) particolare della fig. 3.14a | 26 |
| 3.15 | Metallizzazione della testa del sensore | 27 |
| 3.16 | Setup del banco per la caratterizzazione della metallizzazione | 28 |
| 3.17 | Rivestimento in silicone della metallizzazione | 29 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.18 | Realizzazione dell'involucro: (a) fissaggio della EHOFF sulle lamine; (b) applicazione pasta termo-conduttiva; (c) involucro finito | 30 |
| 3.19 | Sensore corto: (a) prima dell'applicazione del coprigiunto; (b) dopo l'applicazione del coprigiunto. | 31 |
| 4.1 | Spettro dell'ASE al variare della temperatura | 34 |
| 4.2 | Primo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza | 34 |
| 4.3 | Secondo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza | 35 |
| 4.4 | Terzo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza | 35 |
| 4.5 | Utilizzo del fornello elettrico per il riscaldamento della EHOFF | 36 |
| 4.6 | Spettro della riflessione al variare della temperatura | 37 |
| 4.7 | Campionamento della potenza riflessa in 10 secondi | 38 |
| 4.8 | Test del sensore con involucro: (a) prova con ghiaccio; (b) prova a temperatura ambiente; (c) prova con fornello elettrico | 39 |
| 4.9 | Posizionamento del sensore sul fondo del lavandino | 39 |
| 4.10 | Spettro della riflessione del sensore in acqua calda: (a) visualizzazione 2D; (b) visualizzazione 3D; (c) <i>contour plot</i> della visualizzazione 3D | 41 |
| 4.11 | Setup del banco per la misura della potenza riflessa con laser a 1550nm | 42 |
| 4.12 | Acquisizione della potenza riflessa al <i>power meter</i> in modalità <i>fast e medium</i> | 42 |
| 4.13 | Setup del banco per la misura della potenza riflessa con EDFA | 43 |
| 4.14 | Acquisizione della potenza riflessa al <i>power meter</i> utilizzando una sorgente a banda larga | 43 |
| 4.15 | Setup del banco per la misura della potenza riflessa con sorgente depolarizzata | 44 |
| 4.16 | Foto del banco utilizzato per ottenere la sorgente depolarizzata | 45 |
| 4.17 | Ciclo di misura 75°C-15°C con sorgente depolarizzata | 47 |
| 4.18 | Nuova sistemazione per il sensore all'interno del lavandino: (a) paratia; (b) base rigida | 48 |
| 4.19 | Ciclo di misura 75°C-15°C con sorgente depolarizzata | 49 |
| 4.20 | Misure in camera climatica con sorgente depolarizzata | 50 |
| 4.21 | Misure con fonte di calore e sorgente depolarizzata | 51 |
| 4.22 | Sovrapposizione delle curve di fig. 4.21: (a) dei massimi; (b) dei minimi; | 52 |
| 4.23 | Misure con fornello e sorgente depolarizzata prima dell'applicazione del coprigiunto | 53 |
| 4.24 | Misure con fornello e sorgente depolarizzata prima dell'applicazione del coprigiunto | 53 |
| 4.25 | Potenza: (a) potenza media; (b) derivata della potenza media. | 54 |
| 4.26 | Misura di stabilità in potenza | 55 |
| A.1 | Spettro dell'ASE dell'EDFA PriTel FA-18 | 59 |
| A.2 | Spettro dell'ASE dell'EDFA TPA/S 17 | 60 |
| B.1 | Spettro del WDFG JDS Uniphase WDFG-1504D5-MI1B | 61 |

Introduzione

Lo scopo di questo lavoro di tesi è la realizzazione di un sensore ottico ad interferometro sensibile alla temperatura, basato sull'uso di una fibra ottica microstrutturata.

Attraverso un particolare processo produttivo è possibile ottenere una fibra *dual core*; si studieranno quindi i fenomeni di interferometria ottica che hanno luogo quando la luce percorre questi due nuclei separatamente, sotto l'effetto di una variazione di temperatura che ne causa una alterazione della geometria e dei parametri di propagazione. Verranno realizzate e caratterizzate due diverse tipologie di sensore per valutarne la sensibilità alla temperatura.

Il primo capitolo consiste in una panoramica sulla sensoristica in fibra ottica, in particolare sulle varie tipologie di sensori ottici di temperatura.

Nel secondo capitolo verranno illustrati alcuni cenni teorici propedeutici per la comprensione del lavoro svolto, in particolare si parlerà dell'effetto della temperatura sull'interferometria ottica.

Il terzo capitolo riguarda la realizzazione pratica delle due tipologie di sensore analizzate.

Nel quarto capitolo infine verranno elencate e commentate tutte le misure effettuate nella fase di caratterizzazione dei dispositivi.

Abstract

The aim of this thesis is the realization of an interferometric optical sensor which is sensitive to temperature and based on the use of a microstructured fiber.

Trough a specific manufacturing process a dual core fiber has been produced. Then

the optical interferometry phenomenon has been analyzed: this takes place when light passes through the two cores separately, under a variation of temperature which causes a thermic dilatation and therefore a change in geometry and in propagation parameters. Two different kinds of sensor have been produced and characterized in order to evaluate their temperature sensitivity.

Chapter 1 provides an overview on the optical fiber sensors and in particular on the various kinds of the temperature optical ones.

In chapter 2 the theoretical framework of the research has been described in order to easily understand it: in particular, the temperature effects on optical interferometry have been analyzed.

In chapter 3 the production of the two kinds of sensor mentioned above is presented.

Chapter 4 contains the list and comments of all the measuring provided during the devices characterization operations.

Capitolo 1

Sensori in fibra ottica

Al giorno d'oggi lo sviluppo del settore della sensoristica è fortemente indirizzato verso la fibra ottica, poiché essa presenta molteplici vantaggi rispetto ai sensori elettrici ed elettronici tradizionali, che verranno di seguito illustrati.

1.1 Introduzione ai sensori in fibra ottica

Il sensore: attraverso l'ingegnerizzazione dei processi produttivi è possibile ottenere un'ampia varietà di fibre ottiche le quali, sfruttando alcune loro caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche, si prestano ad essere utilizzate per la realizzazione di sensori ottici. Esistono infatti sensori ottici in grado di misurare parametri meccanici (forza, accelerazione, velocità lineare ed angolare, vibrazione, curvatura), parametri chimici (concentrazione, PH) oppure parametri fisici (temperatura, intensità e frequenza del suono) [1].

Gran parte dei sensori in fibra ottica vengono considerati sensori integrati (o intrinseci) poiché costituiscono parte del mezzo trasmissivo; la fibra stessa, infatti, sottoposta a determinate sollecitazioni o condizioni ambientali, modula la propagazione della luce che la attraversa, senza necessità di altri trasduttori od elementi sensibili; la sola fibra dunque costituisce già di per sé un sensore. In fase di produzione è altresì facile ottenere una serie di sensori nello stesso filamento, controllando puntualmente ed opportunamente le proprietà della fibra (per esempio la concentrazione dei droganti, il diametro del nucleo ecc.). In conclusione, una fibra ottica può fungere contemporaneamente sia da mezzo trasmissivo, sia da rete di sensori distribuiti perciò con una sola fibra possono essere misurate grandezze fisiche diverse (eventualmente in punti diversi e su lunghe distanze) contemporaneamente.

Proprietà fisiche: le fibre ottiche sono generalmente immuni a buona parte dei disturbi che affliggono i dispositivi elettrici: sono infatti insensibili alle inter-

ferenze elettromagnetiche ed al rumore termico.

Oltre a ciò offrono un elevato range di operabilità: una stessa fibra può funzionare sia con potenze infinitesime, dell'ordine dei piconWatt, sia con potenze dell'ordine dei Watt.

I segnali luminosi possono essere amplificati direttamente per via ottica, con ottime prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore.

Altro aspetto, fondamentale nell'ambito della sensoristica (soprattutto industriale) è la resistenza alle alte temperature, agli agenti chimici, alle radiazioni nucleari ed alle alte tensioni elettriche, pertanto questo tipo di sensori può essere impiegato anche in ambienti ostili, ove invece l'impiego di sensori elettrici risulterebbe problematico.

Versatilità e facilità d'impiego: la maneggevolezza, la resistenza e l'ingombro della fibra ottica ne facilitano l'installazione e la posa (per esempio su edifici, ponti, tubazioni ecc.) anche su lunghe tratte.

L'attenuazione della silice, generalmente molto bassa, permette di coprire grandi distanze con potenze contenute o con ridotte sedi di amplificazione.

Uno dei vantaggi più importanti è però la bidirezionalità del mezzo trasmissivo, pertanto il sensore (o una sua rete) può essere interrogato da un capo soltanto del mezzo, sfruttandone le proprietà riflesse anziché quelle trasmissive. Dunque la strumentazione di misura può essere posta a grande distanza e in ambiente sicuro e controllato rispetto al sensore ottico.

E' possibile inoltre sfruttare la moltiplicazione del mezzo (utilizzando lunghezze d'onda diverse) e della strumentazione (collegando più sensori ad un unico banco di misura).

Sensibilità e precisione: le variazioni delle proprietà fisiche della fibra sono qualche ordine di grandezza superiori rispetto alle lunghezze d'onda dei segnali che le attraversano, pertanto si possono ottenere alta sensibilità e istantaneità della risposta alle perturbazioni che interessano la fibra. Da questi segnali è possibile ricavare tutte le grandezze analitiche come potenza, frequenza, ampiezza, fase e polarizzazione quindi, con l'ausilio dell'elaborazione numerica, si possono ottenere contemporaneamente un buon livello di sensibilità e un buon grado di precisione nella valutazione dei parametri oggetto della misura.

1.2 Tipologie di sensori di temperatura in fibra ottica

La letteratura scientifica attuale presenta una moltitudine di configurazioni e tipologie di fibra ottica per realizzare sensori di temperatura.

Il modo più naturale per misurare le variazioni di temperatura è quello di studiare il comportamento della fibra ottica sottoposta ad un gradiente termico: l'interfero-

metria ottica è lo strumento più semplice per osservare questa fenomenologia (per un'analisi più approfondita dell'interferometria ottica si rimanda al cap. 2).

Di seguito si vedranno le configurazioni più comuni di sensore.

Interferometro Fabry-Pérot: l'interferometro di Fabry-Pérot è costituito da una cavità delimitata da due superfici piane sufficientemente riflettenti. La distanza tra queste due superfici, detta lunghezza della cavità, determina a quali lunghezze d'onda, a seguito delle riflessioni multiple, i segnali escono dalla cavità sommandosi in fase (interferenza costruttiva) e quali invece escono sommandosi in opposizione di fase (interferenza distruttiva). La lunghezza della cavità è un multiplo intero delle lunghezze d'onda che risuonano al proprio interno, dunque esiste una stretta correlazione tra la dimensione geometrica della cavità e la risposta spettrale della stessa.

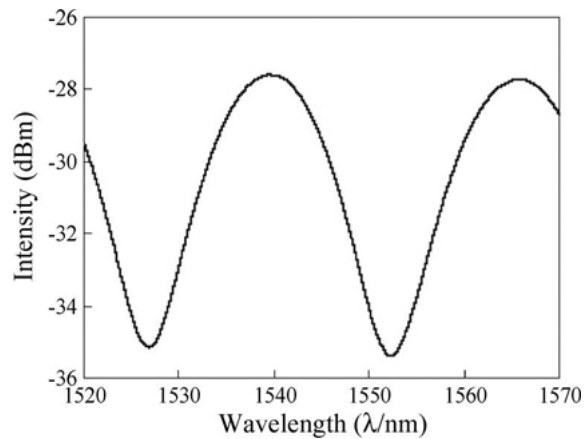


Figura 1.1: Spettro di interferenza di una cavità FP

Come tutti i materiali, anche la silice che costituisce la fibra ottica è soggetta a dilatazione termica, pertanto la distanza tra le due superfici riflettenti cambia con la temperatura, risultando in una variazione della risposta spettrale. Dimensionando opportunamente la lunghezza della cavità Fabry-Pérot e variando il materiale contenuto al proprio interno è dunque possibile realizzare un elemento sensibile alla temperatura.

Affinché esso diventi un sensore necessita di un sistema di misurazione a monte o a valle. La configurazione più semplice prevede l'interrogazione del sensore attraverso una sorgente a banda larga; lo spettro della riflessione viene catturato da un analizzatore di spettro ottico (*Optical Spectrum Analyzer - OSA*) tramite un circolatore (od un accoppiatore) ed è quindi disponibile per essere elaborato numericamente allo scopo di fornire una misura di temperatura (assoluta o relativa), una volta note le caratteristiche dell'elemento sensibile (in particolare il coefficiente di dilatazione termica).

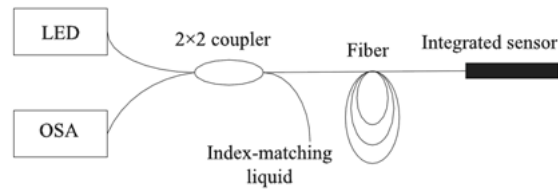


Figura 1.2: Setup del sistema di interrogazione di un sensore FP in riflessione

La letteratura scientifica propone diverse soluzioni per la realizzazione di cavità Fabry-Pérot in fibra ottica: la semplice giunzione di una fibra multimodo (oppure una fibra microstrutturata) tra due fibre a singolo modo [2], la giunzione di fibra microstrutturata alla testa di una fibra monomodale [3]-[4], la creazione di una cavità d'aria tra due fibre monomodali mediante avvicinamento delle stesse tramite un connettore di tipo meccanico, la creazione di una cavità tramite un femtolaser ecc.

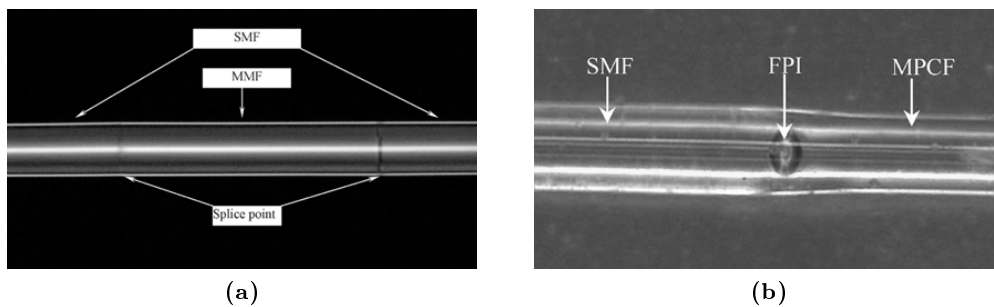


Figura 1.3: Cavità FP realizzata giuntando: (a) una MMF tra due SMF; (b) una SMF con una PCF;

E' sufficiente dunque modificare l'indice di rifrazione in una zona del mezzo trasmissivo, in modo tale da formare due discontinuità sul materiale, generando così due interfacce di riflessione (il coefficiente di riflessione può essere aumentato scegliendo opportunamente i materiali).

Quella degli interferometri di Fabry-Pérot è la categoria di sensori maggiormente utilizzata, grazie alla semplicità di realizzazione.

Poiché anche la tensione meccanica a cui è sottoposta la fibra ottica si ripercuote sulla lunghezza della cavità, spesso questi sensori vengono utilizzati per misurare simultaneamente temperatura e forza/allungamento.

Fiber Bragg Grating: secondo la legge di Bragg, quando un'onda elettromagnetica attraversa una struttura periodica (reticolo), si generano fenomeni di interferenza costruttiva e distruttiva. Tali interferenze sono legate alla lun-

ghezza d'onda del segnale incidente e alla periodicità del reticolo, il quale, come tutti i materiali è soggetto a dilatazione termica, pertanto è possibile utilizzare strutture periodiche per quantificare delle variazioni di temperatura.

I reticoli di Bragg vengono realizzati variando l'indice di rifrazione del nucleo della fibra ottica tramite fotoesposizione ai raggi ultravioletti [5].

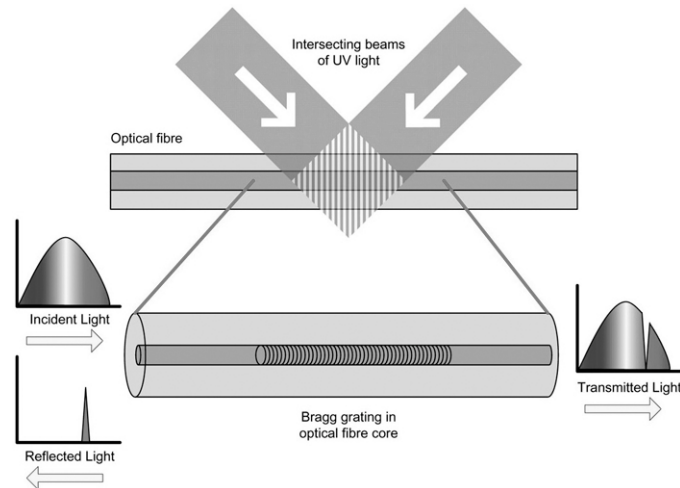


Figura 1.4: Realizzazione di un FBG tramite radiazioni UV interferenti

Per aumentare la sensibilità dei sensori a reticolo può essere utile ricoprire la fibra con materiali che presentano un coefficiente di dilatazione termica più elevato rispetto a quello della silice [6].

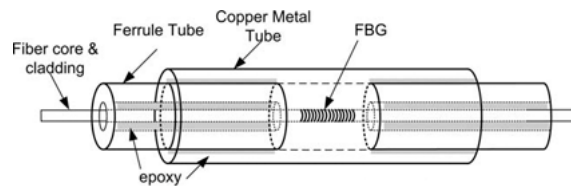


Figura 1.5: Esempio di FBG ricoperto da un tubo di rame, utilizzabile come sensore di temperatura

Come i sensori Fabry-Pérot, anche i reticoli di Bragg possono essere interrogati attraverso una sorgente a banda larga, misurandone la trasmittività o riflettività alle varie lunghezze d'onda.

Interferometri di Mach-Zehnder e Michelson: tali interferometri si basano sulla differenza di cammino ottico (*Optical Path Difference - OPD*), solitamente dovuta alla propagazione dei modi nel nucleo e nel mantello che, avendo indici di rifrazione diversi, inducono una differenza nelle costanti di propagazione e quindi generano battimento [7].

I sensori ad interferometro Mach-Zehnder e Michelson sono realizzati tipicamente giuntando fibre diverse (per esempio una fibra a singolo modo ed una fibra bucata [8], [9]) con un disallineamento tra i nuclei, in modo da eccitare contemporaneamente i modi del nucleo e del mantello. In alternativa possono essere utilizzate fibre a doppio *core*, dove la differenza nella costante di propagazione nei due nuclei è dovuta alla naturale produzione della fibra stessa.

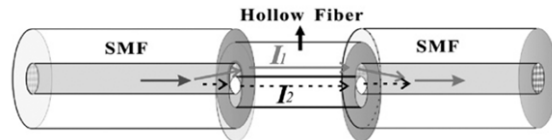


Figura 1.6: Interferometro MZ realizzato giuntando una fibra forata con disallineamento

Anche in questo caso il modo più comune presentato dalla letteratura scientifica per l'interrogazione dei sensori è la rilevazione della figura d'interferenza tramite analizzatore di spettro ottico e sorgente a banda larga.

Fibre a cristallo fotonico e microstrutturate: combinazioni di queste particolari fibre con fibre comuni (a singolo modo) generano delle situazioni di interferenza modale strettamente dipendenti dalla dilatazione termica e quindi dalla temperatura [10].

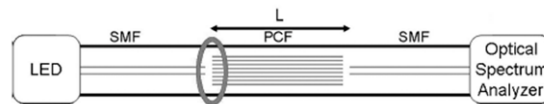


Figura 1.7: Interferometro realizzato giuntando una fibra microstrutturata tra due fibre monomodali

Scattering di Brillouin: lo scattering Brillouin è costituito da un fascio che si propaga in una direzione diversa rispetto al segnale di pompa e ad una frequenza differente da esso. Tale differenza di frequenza, nota come *shift* di Brillouin, è direttamente proporzionale all'indice di rifrazione del mezzo trasmissivo, il quale è a sua volta dipendente dalla temperatura.

Di conseguenza è possibile realizzare un sensore di temperatura misurando lo *shift* di Brillouin dal fascio retroriflesso generato dall'invio di un impulso in fibra tramite un laser [11], [12], [13], [14].

Questa è la panoramica generale dei sensori di temperatura in fibra ottica, anche se ogni sensore si differenzia dagli altri per costruzione, dimensione, sensibilità, range

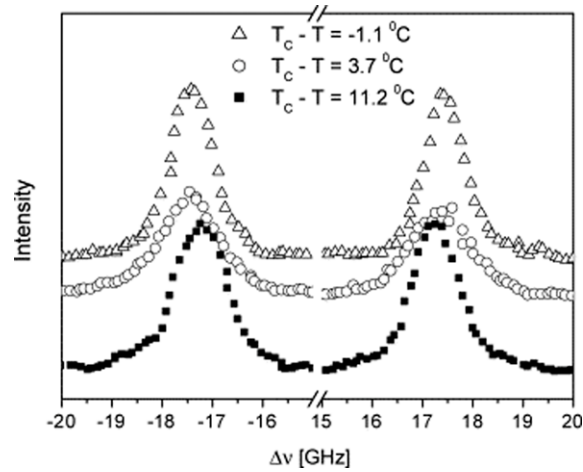


Figura 1.8: Shift di Brillouin al variare della temperatura

di funzionamento ecc. In letteratura sono presentati anche sensori ottici di temperatura realizzati con la combinazione di due o più delle sopraelencate tipologie [8], [15], [16].

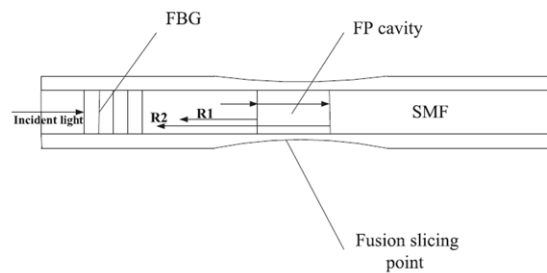


Figura 1.9: Esempio di sensore combinato FP + FBG

In analogia ai fenomeni legati alla dilatazione termica, si possono analizzare tramite interferometria ottica anche fenomeni legati alle variazioni meccaniche.

Come risulta evidente, l'interferometria gioca un ruolo fondamentale nella sensoristica ottica e, in particolare, nel *temperature sensing*, perciò nel cap. 2 di questa tesi verrà fatta un'analisi dettagliata di tale fenomeno.

Capitolo 2

Analisi teorica

In questo capitolo verranno trattati gli aspetti teorici principali, utili a comprendere il lavoro sviluppato nel seguito.

2.1 Interferometria

L'interferometria è un metodo di misura che sfrutta le interferenze generate dalla sovrapposizione di due o più onde elettromagnetiche. Tramite l'interferometria è possibile misurare lunghezze d'onda, variazioni di fase, spostamenti ed allungamenti dello stesso ordine della lunghezza d'onda.

Quando due segnali isofrequenziali si combinano vettorialmente, il risultato è strettamente dipendente dalla loro differenza di fase. Si avrà interferenza costruttiva quando essi si sommano in fase oppure interferenza distruttiva quando si sommano in opposizione di fase.

In ottica, per misurare alcune grandezze fisiche come l'indice di rifrazione, la lunghezza d'onda o la distanza è necessario introdurre una differenza di fase nota. Ciò è possibile attraverso l'uso dell'interferometro: un segnale viene suddiviso in due componenti, a ciascuna delle quali viene fatto percorrere un cammino ottico; se i due cammini sono identici, le onde si ricombinano per ricreare il segnale originale, se invece i due cammini sono differenti, cioè se esiste una differenza di cammino ottico, i due segnali accumulano uno sfasamento relativo dipendente appunto dai parametri della propagazione (tipicamente lunghezza del percorso ed indice di rifrazione). E' dunque possibile relazionare questo sfasamento con la differenza di cammino nota; dualmente, conoscendo la differenza di cammino, è possibile misurare lo sfasamento tra i segnali.

Esistono due tipi di interferometro: omodino ed eterodino. Quest'ultimo utilizza una modulazione della frequenza di uno dei due segnali interferenti per generare un battimento; non verrà però utilizzato in questo lavoro e quindi se ne omette la descrizione.

Nell'interferometro omodino si misura l'intensità luminosa dopo la ricombinazione dei segnali. Detti I_1 ed I_2 le intensità dei due fasci, λ la loro lunghezza d'onda (in aria), L la lunghezza del percorso ottico e $\Delta n = n_1 - n_2$ la differenza dell'indice di rifrazione dei due bracci dell'interferometro, si ottiene:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

L'equazione 2.1 è costituita da un termine continuo, dipendente dalle singole intensità, e da un termine cosinusoidale, il cui argomento rappresenta lo sfasamento introdotto dall'interferometro.

L'intensità totale ha dunque un andamento periodico, dipendente dalla differenza di fase, di periodo $\Lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n L}$, con massimi in corrispondenza delle λ_M per le quali $\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda_M} = 2k\pi$, e minimi in corrispondenza delle λ_m per le quali $\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda_m} = (2k + 1)\pi$, con $k \in N$.

In fig. 2.1 è rappresentata una figura di interferenza ottenuta combinando due segnali sfasati. Detta L la lunghezza interferometrica, quanto appena illustrato vale se

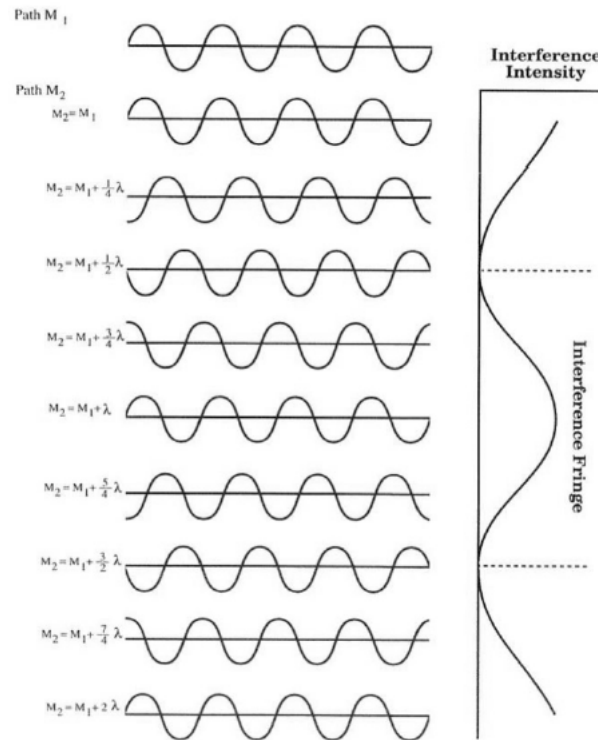


Figura 2.1: Figura di interferenza

l'interferometro è utilizzato in trasmissione, ovvero quando la sorgente ottica viene suddivisa in due fasci che percorrono i due bracci dell'interferometro per poi essere ricombinati alla fine dello stesso (per esempio nella configurazione Mach-Zehnder). Nel caso in cui invece l'interferometro fosse utilizzato in riflessione, cioè ricombi-

nando i due fasci nella stessa zona dove precedentemente avevano avuto origine e dopo una riflessione sulla terminazione dei bracci (per esempio nella configurazione Michelson), poiché i fasci ottici percorrono due volte i bracci (in andata e in ritorno) lo sfasamento sarà doppio rispetto alla configurazione in trasmissione. Ciò comporta l'introduzione di un ulteriore fattore 2 nell'argomento del coseno nell'eq. 2.1 e quindi un dimezzamento del periodo d'interferenza Λ .

2.1.1 Effetto della temperatura

La temperatura gioca un ruolo fondamentale nell'interferometria ottica. L'applicazione di un gradiente termico provoca sostanzialmente due conseguenze all'interferometro: l'espansione termica e l'effetto termo-ottico.

Il primo fenomeno, l'espansione termica, non è altro che la naturale dilatazione del mezzo, la quale provoca una variazione della lunghezza L dell'interferometro (supposta quindi uguale per entrambi i bracci). L'equazione che regola tale dilatazione in funzione della temperatura istantanea T e della temperatura iniziale T_0 è, per via approssimata:

$$L(T) \approx L(T_0)(1 + \alpha_s \Delta T) \quad (2.2)$$

dove $\Delta T = T - T_0$ e $\alpha_s = 5.5 \cdot 10^{-7} K^{-1}$ è il coefficiente di espansione termica della silice.

L'effetto termo-ottico invece è causa della variazione degli indici di rifrazione n_1 ed n_2 dei due bracci, in particolare:

$$\Delta n(T) \approx \Delta n(T_0) + \left. \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \right|_{T=T_0} \Delta T \quad (2.3)$$

Se $\Delta n(T_0)$ e $\left. \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \right|_{T=T_0}$ sono sufficientemente piccoli, per $\Delta T \leq 1000^\circ C$, l'effetto termo-ottico è dominante rispetto all'espansione termica ed essa può essere trascurata (come avverrà in questa trattazione).

Quindi:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(T_0) L(T_0) + \frac{2\pi}{\lambda} L(T_0) \left. \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \right|_{T=T_0} \Delta T \right) \quad (2.4)$$

Assumendo ragionevolmente che la banda della sorgente sia molto inferiore alla sua portante, cioè $\Delta \lambda \ll \lambda_0$, si può scrivere:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \left(\frac{2\pi \lambda}{\Lambda} + \Delta \phi \right) \quad (2.5)$$

dove:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0^2}{\Delta n(T_0) L(T_0)} \quad (2.6)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L(T_0) \frac{\partial\Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \Delta T \quad (2.7)$$

Λ è il periodo della figura d'interferenza alla temperatura iniziale T_0 ed è costante al variare della temperatura, mentre $\Delta\phi$ è il fattore di fase della funzione cosinusoidale d'intensità che tiene conto della variazione di temperatura; tale fattore comporta una traslazione della funzione d'intensità e lo si può vedere riscrivendo così le lunghezze d'onda di massimo:

$$\Delta\lambda_M = -\frac{\Lambda}{2\pi} \Delta\phi = -\frac{\Lambda}{\lambda_0} \frac{\partial\Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} L(T_0) \Delta T \quad (2.8)$$

Esistono dunque due possibilità per quantificare la variazione di temperatura, nota la risposta dell'interferometro.

La prima consiste nel calcolare lo spostamento sopra descritto: secondo l'equazione 2.8 esso ha un andamento lineare e la pendenza della retta risultante rappresenta la sensibilità del sensore, ovvero indica quanto varia la posizione delle lunghezze d'onda di massimo rispetto alla variazione di temperatura, ed è una caratteristica intrinseca del dispositivo. Per evitare ambiguità nella misura è però necessario tener conto della periodicità della funzione d'intensità, limitando lo spostamento (ovvero la variazione di temperatura) oppure distinguendo i punti di massimo.

La seconda possibilità per rilevare una variazione di temperatura consiste invece nel misurare, ad una lunghezza d'onda fissata, l'intensità luminosa. Ciò equivale a far scorrere un cursore/misuratore, che rappresenta la lunghezza d'onda di lavoro, lungo la figura cosinusoidale d'interferenza. Di conseguenza, anche l'andamento dell'intensità luminosa misurata tratterà la stessa sinusoide. Anche questa soluzione è soggetta ad ambiguità: per determinare univocamente la variazione di temperatura è necessario limitare lo spostamento relativo del cursore sullo spettro in modo tale che la lunghezza d'onda di riferimento si sposti lungo la zona pressoché lineare del fronte di salita (o discesa) di un periodo della sinusoide.

2.2 Fibra ottica microstrutturata ellittica a doppio nucleo

L'elemento sensibile del sensore di temperatura sviluppato in questo lavoro di tesi è costituito da un tratto di fibra ottica microstrutturata. Si tratta di una fibra bucata a sezione ellittica (*Elliptical Hollow Optical Fiber - EHO*F) all'interno della quale si trova una zona drogata a geometria particolare, che di fatto la rende una fibra ottica a doppio nucleo.

2.2.1 Produzione

Questa fibra innovativa è stata prodotta nei laboratori della Yonsei University di Seoul, in Corea del Sud. La sua produzione avviene a partire da una preforma cilindrica di silice forata al centro. Tale preforma viene levigata longitudinalmente su due piani paralleli e diametralmente opposti rispetto al proprio asse principale. La formazione del nucleo avviene per deposizione di silice drogata al biossido di Germanio (GeO_2) tramite tecnica *Modified Chemical Vapour Deposition (MCVD)* (fig. 2.2).

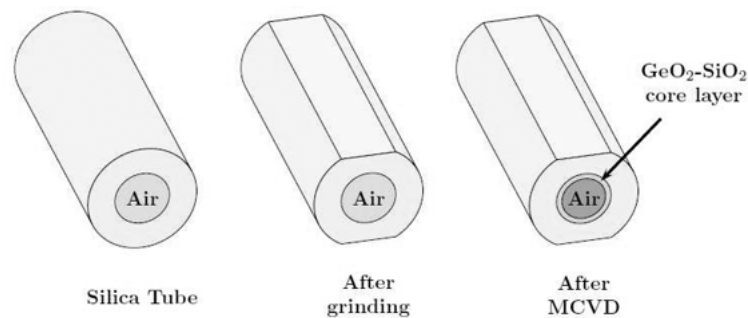


Figura 2.2: Fasi di produzione della preforma della EHOFF

Durante la fusione si creano delle tensioni superficiali sulla preforma che tendono a sagomare la sezione levigata verso la forma circolare originaria, rendendola quindi ellittica. Tali deformazioni interessano anche il nucleo e il foro centrale; quest'ultimo diventa ellittico a sua volta, mentre il nucleo assume una forma lanceolata verso i punti di levigatura.

Infine la preforma viene filata, mantenendo in pressione il foro centrale per evitarne il collasso. In figura 2.3 la sezione della EHOFF visualizzata al microscopio elettronico.

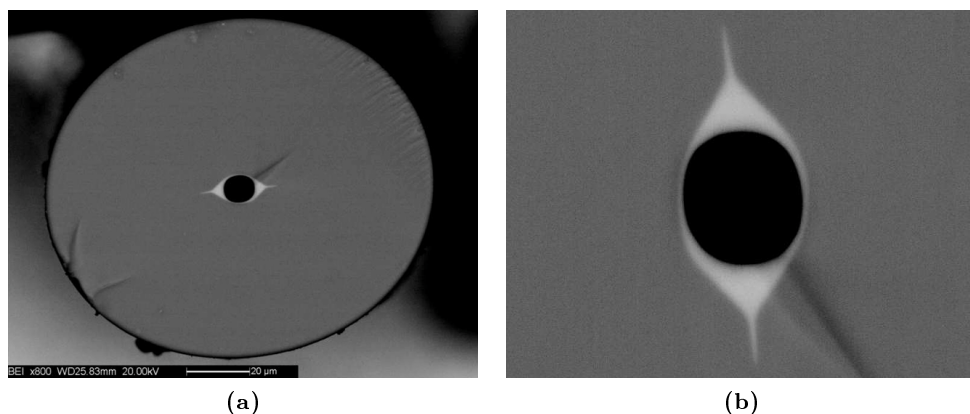


Figura 2.3: EHOFF: (a) sezione visualizzata al microscopio elettronico; (b) particolare della zona drogata lanceolata;

Il foro centrale ellittico ha assi maggiore e minore di $9.2 \mu\text{m}$ e $8.1 \mu\text{m}$ rispettivamente, mentre la sezione esterna, anch'essa ellittica, ha l'asse maggiore di $125 \mu\text{m}$ e quello minore di $110 \mu\text{m}$. Il nucleo lanceolato lungo l'asse minore è circa $0.2 \mu\text{m}$ più largo rispetto al foro centrale, mentre lungo l'asse maggiore è quasi 3 volte più lungo.

2.2.2 Proprietà

La caratterizzazione delle proprietà guidanti di questa fibra microstrutturata è stata effettuata accoppiando in aria il segnale ottico di un laser a cavità esterna ad un capo della fibra ellittica per mezzo di una fibra monomodale e di un traslatore XY ad alta precisione, secondo lo schema di fig. 2.4. Tramite una telecamera ad infrarossi si è provveduto poi a visualizzare la distribuzione di campo elettromagnetico all'altro capo della fibra sotto esame.

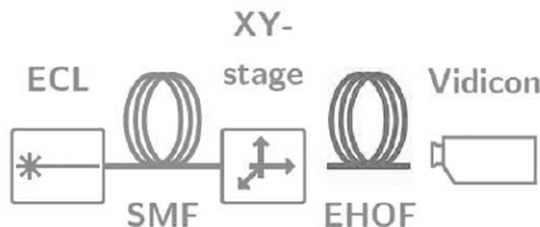


Figura 2.4: Setup del banco per la caratterizzazione della EHO

Per verificare l'accoppiamento ottico tra le due zone lanceolate di accumulo del drogante, il traslatore è stato posizionato in modo tale da accoppiare il segnale laser in uscita dal nucleo della fibra monomodale con una sola di queste due regioni. Variando la lunghezza d'onda della sorgente laser tra i 1500 nm e i 1600 nm non è stato osservato alcun trasferimento di potenza tra le due zone di concentrazione del drogante, pertanto, in questa banda, la fibra in esame ha un comportamento del tutto analogo a quello di una fibra *dual core*; d'ora in avanti queste due zone di forma lanceolata verranno più propriamente chiamate nuclei e saranno considerate del tutto indipendenti. Questo è dovuto al fatto che le tensioni superficiali che vengono a crearsi durante la fusione sono frutto di un processo naturale di stabilizzazione non controllato.

E' naturale aspettarsi dunque che la fibra non sia uniforme né simmetrica, pertanto i due nuclei saranno simili ma non identici, a partire dall'indice di rifrazione; le imprecisioni introdotte nella fase iniziale di levigazione della preforma incidono su questo aspetto. Inoltre la stessa asimmetria di ciascun nucleo, per via della forma lanceolata, induce una forte birifrangenza. Le conseguenze di tutto ciò sono fondamentalmente due: la dispersione dei modi di polarizzazione (*Polarization Mode Dispersion - PMD*) dovuta al ritardo di gruppo differenziale (*Differential*

Group Delay - DGD) all'interno di uno stesso nucleo e il battimento generato dalla propagazione del segnale sui due nuclei caratterizzati da costanti di propagazione leggermente diverse. Questi fenomeni sono stati analizzati per via numerica e sperimentalmente in [18]. In fig. 2.5 si vede che la trasmittività dei nuclei è funzione della frequenza (a causa della birifrangenza) ed è diversa tra di essi, come ci si attendeva.

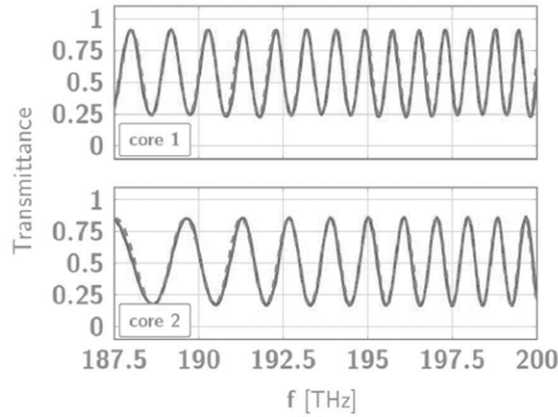


Figura 2.5: Trasmittività dei due nuclei della EHOF

2.3 Sensore basato su schema interferometrico

Dopo aver compreso l'effetto termo-ottico che si manifesta su un interferometro sottoposto a gradiente di temperatura e dopo aver studiato la EHOF, viene naturale pensare di realizzare un sensore di temperatura ad interferometro i cui bracci sono costituiti dai nuclei della fibra microstrutturata: come già detto, essendo leggermente diversi tra loro, hanno anche indici di rifrazione diversi, quindi un Δn non nullo e dipendente dalla temperatura.

L'idea è quindi di illuminare un tratto di fibra microstrutturata con una sorgente ed analizzare l'intensità luminosa (potenza ottica) all'uscita. Ciò avviene giuntando una fibra monomodale direttamente alla fibra di *sensing*: l'unico modo che si propaga nella fibra standard, nel punto di giunzione viene suddiviso nei due nuclei della fibra microstrutturata.

Come anticipato nel capitolo introduttivo, un sensore in fibra ottica può funzionare in trasmissione o in riflessione. Nel primo caso è necessaria una nuova giunzione in modo da ricombinare nuovamente i fasci ottici dei due nuclei in una fibra monomodale standard (configurazione tipo Mach-Zehnder); nel secondo caso invece si sfrutta la riflessione dell'interfaccia vetro-aria (eventualmente potenziata) e i due fasci retropropaganti vengono ricombinati nella stessa giunzione, verso la sorgente (configurazione Michelson).

Indipendentemente da ciò, come già anticipato, ci sono due modalità per valutare

la risposta del sensore: l'acquisizione dello spettro ottico trasmesso o riflesso dal dispositivo illuminato da una sorgente a larga banda oppure la misurazione della potenza ottica trasmessa o riflessa dal dispositivo illuminato da una sorgente a banda stretta (tipicamente un laser).

Nel capitolo seguente verranno illustrati i risultati ottenuti combinando queste modalità di interrogazione del sensore.

Capitolo 3

Costruzione del sensore

3.1 Realizzazione del primo tipo di sensore

3.1.1 Allineamento e giunzione

Il primo passo per la costruzione del sensore è la giunzione tra la fibra ellittica e la fibra a singolo modo standard (*Single Mode Fiber - SMF*); tale operazione risulta problematica in quanto le sezioni delle due fibre sono nettamente diverse tra loro. Inoltre la giunzione deve permettere alla luce proveniente dalla fibra standard di suddividersi in maniera equa tra i due nuclei della fibra microstrutturata.

Per le operazioni di giunzione è stata utilizzata la giuntatrice Fujikura FSM-20 PMII (in fig. 3.1) la quale permette, in fase di allineamento, di ruotare le fibre sul proprio asse longitudinale. Tale giuntatrice, grazie alle diverse modalità di allineamento di cui dispone, è in grado di giuntare diversi tipi di fibra: con le fibre a singolo modo l'allineamento avviene secondo il profilo d'indice del nucleo mentre con le fibre multimodo avviene secondo il profilo d'indice del mantello; per le fibre a mantenimento di polarizzazione l'allineamento invece richiede l'utilizzo di un misuratore di potenza (*Power Meter - PM*) collegato all'interfaccia *GPIB* (*General Purpose Bus Interface*) della giuntatrice in modo da massimizzare la potenza trasmessa (per esempio con fibre di tipo *PANDA*).

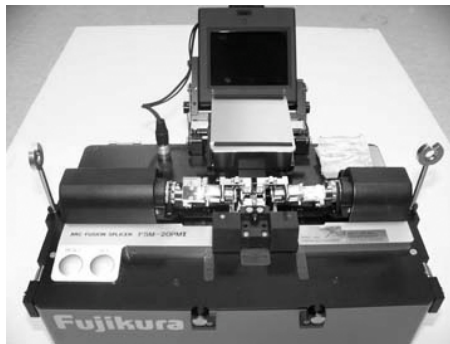


Figura 3.1: Giuntatrice Fujikura FSM-20 PMII

La giuntatrice utilizzata permette all'operatore di eseguire, oltre alla rotazione, anche un allineamento manuale sui tre assi X-Y-Z, al termine dell'allineamento automatico.

Prove di allineamento manuale sono state eseguite utilizzando una semibretella di SMF e delle fibre bucate (*Hollow Optical Fiber*) HOF 2/125 e HOF 6/125 (il primo numero indica il diametro del foro in μm , mentre il secondo indica il diametro esterno della fibra, sempre in μm). Con tali fibre, l'allineamento automatico è stato possibile solamente in modalità multimodo (MM).

Per controllare l'allineamento effettuato, un laser nello spettro visibile del rosso è stato accoppiato in aria alla semibretella per mezzo di un connettore meccanico. Un terminale della fibra bucata è stato accoppiato in aria al terminale in fibra della semibretella tramite la giuntatrice, mentre l'altro capo è stato posto nel microscopio (Zeiss Axio Imager.A1m). Lo schema appena descritto è illustrato in fig. 3.2, mentre in fig. 3.3 e fig. 3.4 sono mostrati i nuclei illuminati dal laser delle HOF 2/125 e 6/125 rispettivamente.

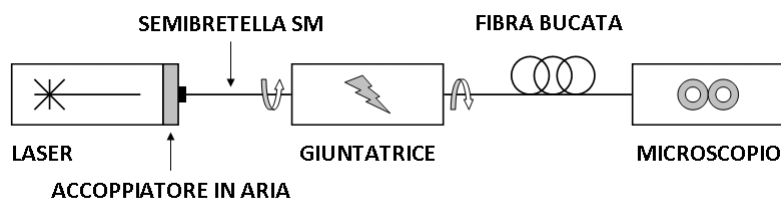


Figura 3.2: Setup del banco per l'allineamento

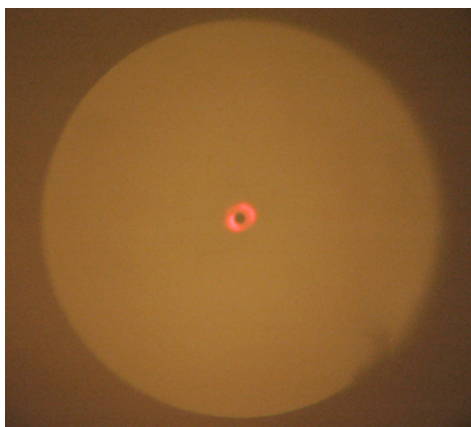


Figura 3.3: HOF 2/125

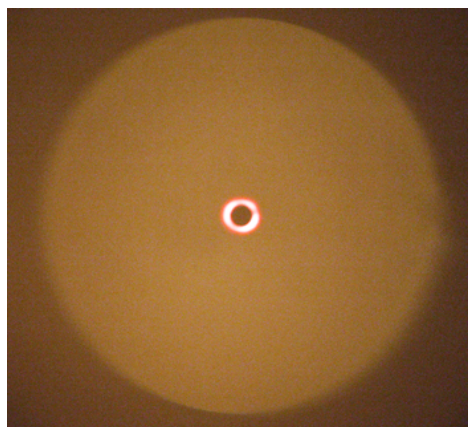


Figura 3.4: HOF 6/125

Si è verificato che, perturbando meccanicamente la fibra, la distribuzione di campo varia poiché la fibra bucata alla frequenza del rosso non è monomodale. Toccando la fibra infatti, al microscopio si notano delle piccole variazioni spaziali dell'intensità luminosa, ovvero dei minimi e dei massimi che si spostano.

Sono state fatte anche delle prove di giunzione con un'altra fibra microstrutturata,

per la precisione una fibra a cristallo fotonico (*Photonic Crystal Fiber - PCF*) multiforo a sezione esagonale (la sezione vista al microscopio è riportata in fig. 3.5). In questo caso, vista la particolare sezione esagonale, la giuntatrice non è stata in grado di eseguire l'allineamento automatico in nessuna delle proprie modalità di funzionamento.

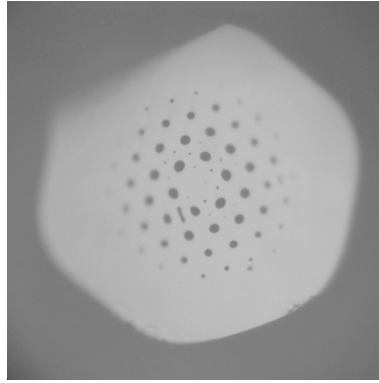


Figura 3.5: Sezione della PCF esagonale multiforo

Mantenendo lo schema di fig. 3.2 ed osservando l'immagine al microscopio durante i vari tentativi di allineamento, non è mai stato notato passaggio di radiazione luminosa dalla sorgente alla PCF. Questo è probabilmente dovuto alla banda di funzionamento della PCF, solitamente ben diversa dalle fibre standard e fuori dallo spettro del visibile.

Con tale tipo di fibra inoltre, sempre a causa della particolare sezione di tipo esagonale, sono stati riscontrati problemi durante il taglio, che non è mai risultato netto (come si può vedere in fig. 3.5).

Ripresa in considerazione la fibra HOF 6/125, sono state eseguite anche delle prove di giunzione per assicurarsi che non ci fossero fenomeni di interferenza tra la fibra standard e la fibra bucata, come ipotizzato dalle conoscenze teoriche. Per verificare ciò si è utilizzato il setup proposto in fig. 3.6: come sorgente a banda larga si è sfruttata l'emissione spontanea amplificata (*Amplified Spontaneous Emission - ASE*) dell'amplificatore ottico (*Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA*) PriTel FA-18 tra i 1510 nm e i 1560 nm, inviata alle fibre nella giuntatrice tramite un circolatore a 3 porte OptoLink OLCIR-I-3-CL-300-90-FA (lo spettro dell'ASE è stato caratterizzato e riportato in appendice). La riflessione infine è stata catturata dall'OSA ANDO AQ-6315A alla porta 3 del circolatore.

Terminato l'allineamento automatico si è notato che allo spettro originario dell'EDFA si è sommato un segnale periodico pressoché sinusoidale; allontanando le fibre all'interno della giuntatrice si è osservato che la periodicità di questa componente cambiava, nello specifico il periodo diminuiva. Dualmente, avvicinando le fibre, tale periodo aumentava. Il *gap* d'aria tra le due teste delle fibre costituisce infatti una cavità Fabry-Peròt. Uno spettro in riflessione di codesta cavità è riportato in fig.

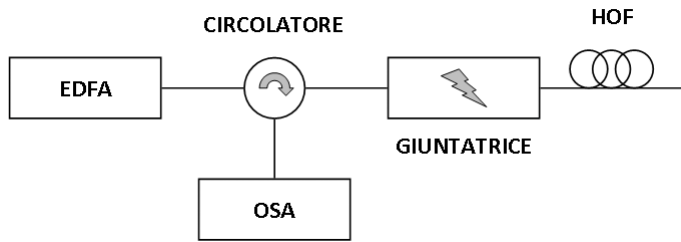


Figura 3.6: Setup del banco per la visualizzazione di interferenze a banda larga



Figura 3.7: Foto del banco per la visualizzazione di interferenze a banda larga

3.8: come si può osservare, la *finesse* di questo spettro non è marcata, in quanto il coefficiente di riflessione alle due interfacce vetro-aria non è molto elevato.

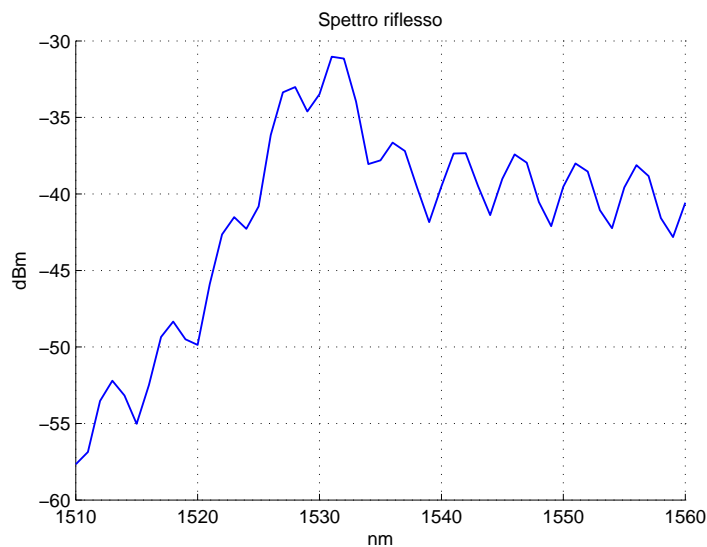


Figura 3.8: Spettro della riflessione generata dalla cavità FP

Noto il periodo della figura d'interferenza (eventualmente utilizzando la trasformata di Fourier) è possibile stimare con buona precisione la lunghezza della cavità.

Una prima prova di allineamento tra la SMF e la EHOF è stata eseguita in modalità MM utilizzando come sorgente (secondo lo schema di fig. 3.6) il laser rosso a 650 nm.

Come risulta evidente dalla fig. 3.9, nonostante i due nuclei siano entrambi illumi-

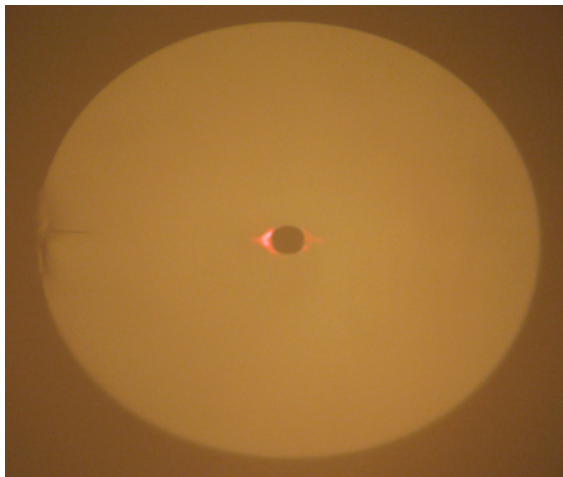


Figura 3.9: Distribuzione di potenza nella sezione della EHF dopo l'allineamento automatico

nati, l'intensità luminosa non è equamente suddivisa tra di essi; questo però non è necessariamente indice di disallineamento in quanto è necessario tenere conto due fattori:

- perturbando la fibra, anche con piccolissimi movimenti, si osserva che la distribuzione di potenza nei due nuclei varia in maniera significativa; ciò indica che la EHF è sensibile alla polarizzazione e quello che si osserva al microscopio non è altro che il risultato di tutte le perturbazioni accumulate lungo il percorso ottico nella fibra ma potrebbe non rappresentare quello che accade nel punto di giunzione;
- la sorgente utilizzata per verificare l'allineamento ha una lunghezza d'onda di circa 650 nm, molto diversa rispetto a quella che verrà poi utilizzata per il sensore (attorno ai 1550 nm); si tenga inoltre presente che i due nuclei della EHF sono indipendenti tra loro ed hanno trasmissività diverse ma dipendenti dalla lunghezza d'onda, come già illustrato in figura 2.5;

Tenuto conto di queste considerazioni, si è deciso di procedere con l'allineamento tramite illuminazione con un segnale alla lunghezza d'onda di lavoro effettiva del sensore, $\lambda = 1550$ nm, generato con un laser a cavità esterna (Photonetics Tunics-PR 1550). Per poter visualizzare l'intensità luminosa sui due nuclei della EHF è stata montata sul microscopio una videocamera ad infrarosso (Appscintech CamIR 1550), collegata ad un PC tramite un video grabber (Belkin F5U228 USB), come nello schema di fig. 3.10.

Al termine dell'allineamento automatico prodotto dalla giuntatrice si è proceduto con l'allineamento manuale, minimizzando la *mismatch* di potenza tra i due nuclei e, soprattutto, facendo in modo di massimizzare l'intensità totale visualizzata; infine si è avviata la procedura di fusione. In fig. 3.11 uno *screenshot* catturato dalla

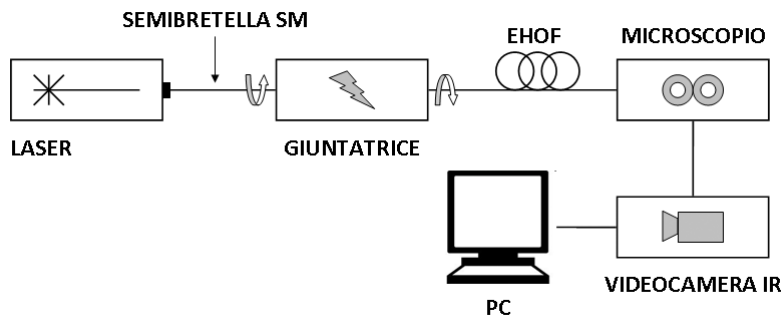


Figura 3.10: Setup del banco per l'allineamento e la giunzione della EHO

videocamera IR dopo la giunzione: come si può vedere, la distribuzione di potenza ottica nei due nuclei è molto simile.

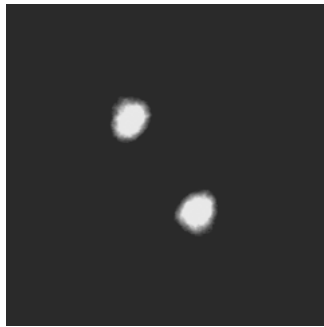


Figura 3.11: Sezione terminale della EHO visualizzata con videocamera IR dopo la giunzione

Per verificare l'equa distribuzione di campo nei due nuclei è stata eseguita una prova illuminando la nuova fibra di *sensing* tra i 1500 nm e i 1600 nm a passi di 0.5 nm: tramite il cursore rotante del laser in breve tempo si è "spazzolata" tutta la banda in questione, arrivando ad escludere visivamente lo spegnimento di uno o entrambi i nuclei. Ciò che si è osservato invece, al variare della lunghezza d'onda, è stata la diversità del periodo dell'intensità luminosa su ciascuno dei nuclei della EHO, in accordo con quanto presentato nel cap. 2.1.2 (vedi fig. 2.5).

Prima di procedere oltre con la costruzione del sensore, è stata eseguita una verifica preliminare per assicurarsi dell'esistenza di un pattern d'interferenza come previsto dalla teoria vista nel cap. 2, ossia che i due nuclei della EHO possano fungere da bracci di un interferometro. Questa prova è stata effettuata utilizzando lo schema di fig. 3.12: non avendo un'idea sulla forma dell'eventuale spettro che si sarebbe ottenuto, è stato utilizzato un EDFA (TPA/S 17) come sorgente a banda larga e lo spettro della riflessione è stato rilevato dall'OSA con una risoluzione di 0.2 nm tra i 1520 nm e i 1570 nm.

La figura d'interferenza ottenuta sottraendo allo spettro riflesso lo spettro della sorgente (quindi rappresenta un'attenuazione) è mostrata in fig. 3.13, dove si è dovuto

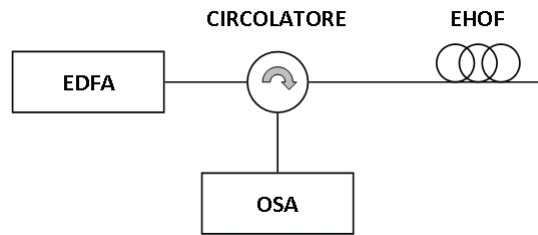


Figura 3.12: Setup del banco per la valutazione delle frange d'interferenza

limitare lo *span* poiché la troppa poca potenza disponibile ai limiti della banda dell'EDFA è stata completamente attenuata nel percorso ottico prima di arrivare al fotodiodo dell'OSA.

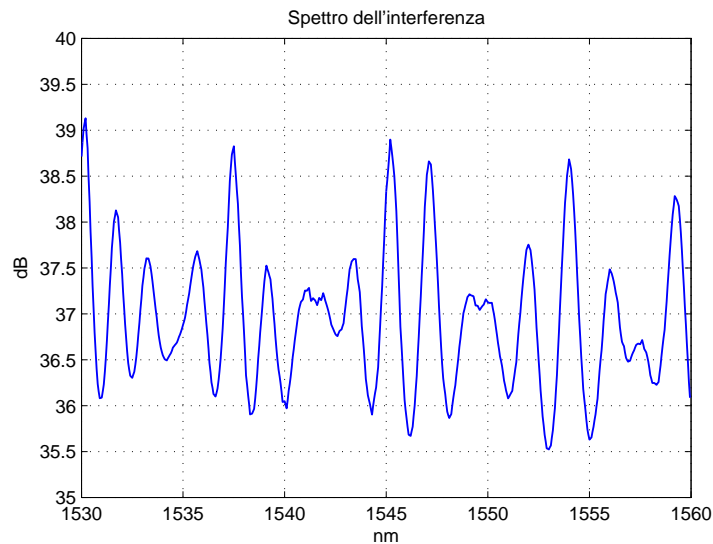


Figura 3.13: Spettro dell'interferenza della EHOFF iniziale

Lo spettro ottenuto non è molto regolare e somiglia ad una sinusoide modulata in ampiezza, con una componente continua (attenuazione) di 37 dB. Per analizzare la periodicità dell'interferenza conviene calcolarne la trasformata di Fourier (FFT a 1024 punti), dopo aver eliminato la componente continua sottraendo alla figura d'interferenza la media della stessa (fig. 3.14).

Attraverso la FFT è possibile calcolare molto approssimativamente il periodo dell'interferenza:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{0.54 \text{ nm}^{-1}} \simeq 1.85 \text{ nm} \quad (3.1)$$

3.1.2 Taglio e metallizzazione

Per ottenere una buona precisione del sensore è necessario che questo abbia il suo punto di lavoro in una zona dove lo spettro d'interferenza sia sufficientemente lineare; ciò accade se il periodo delle frange dello spettro è abbastanza ampio, in

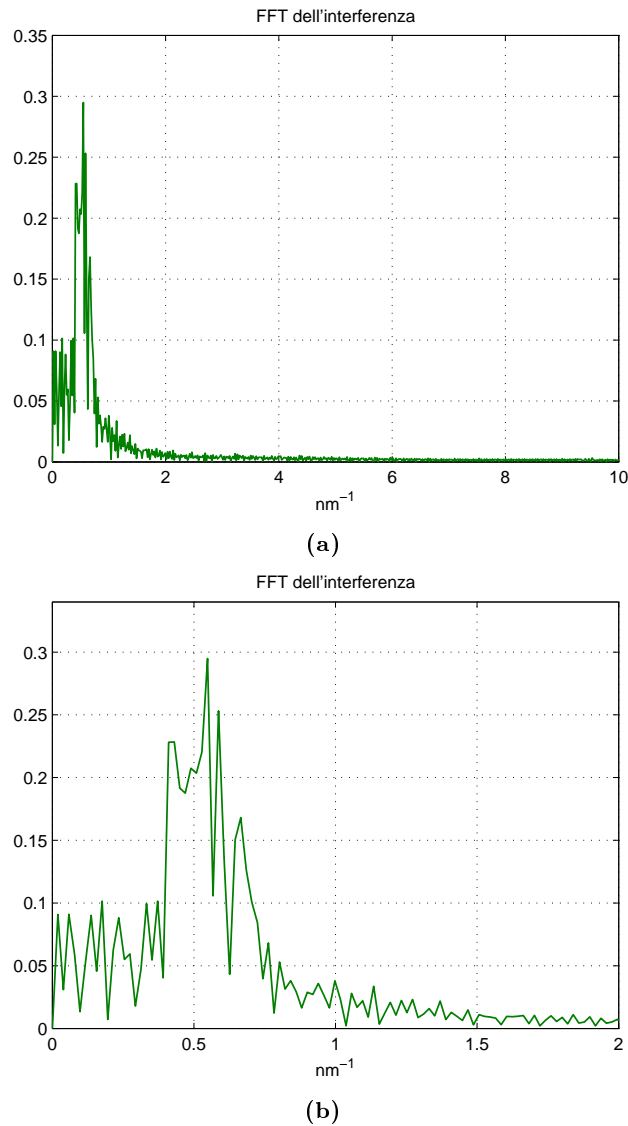


Figura 3.14: Interferenza della EHO: (a) FFT; (b) particolare della fig. 3.14a

modo che il fronte di salita o di discesa della frangia in esame sia approssimabile con una retta poco pendente, e la frequenza di lavoro è posizionata al centro di questo intervallo.

Sapendo che il periodo dell'interferenza è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'interferometro, con una semplice proporzione si può ottenere la lunghezza della fibra di *sensing* necessaria. Avendo a disposizione una sorgente con una banda di circa 50 nm (EDFA) e una bobina di EHO di circa 8 m (con uno spettro a periodicità di 1.85 nm, calcolata sopra) si può determinare così la lunghezza L desiderata:

$$\frac{1}{1.85 \cdot 10^{-9} \text{ m}} : 8 \text{ m} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-9} \text{ m}} : L \quad (3.2)$$

da cui

$$L \approx 15 \text{ cm} \quad (3.3)$$

Nella proporzione precedente sono stati richiesti 100 nm di periodo, nonostante la sorgente abbia una banda utile di 50 nm circa, perché è necessario e sufficiente considerare solo mezzo periodo della funzione d'interferenza, onde evitare ambiguità sulla determinazione della temperatura.

Per poter realizzare l'interferometro ottico in configurazione Michelson, si è dedicata particolare attenzione alla terminazione della EHOF, la quale deve fungere da specchio per i segnali che si propagano nei due nuclei. Effettuato il taglio a regola d'arte e verificatane la qualità tramite la giuntatrice, si è ritenuto interessante studiare un sistema per aumentare la riflettività dell'interfaccia. Lo schema infatti è caratterizzato da un'attenuazione complessiva di oltre 30 dB: tipicamente un'interfaccia vetro-aria perde oltre 10 dB; si considerino inoltre le perdite dovute ai vari connettori meccanici, al circolatore e, soprattutto, alla giunzione di fibre molto diverse, sommate al fatto che il segnale le subisce due volte (in andata e in ritorno nell'interferometro). E' dunque ragionevole pensare di migliorare la terminazione dell'interferometro.

L'idealità consiste nell'aver un taglio della fibra netto e perfetto (lappato), perpendicolare all'asse longitudinale, sul quale applicare uno strato (*coating*) di materiale altamente riflettente (per esempio un metallo come l'oro o l'argento).

Non disponendo di strumentazione specifica allo scopo, si è pensato di realizzare una metallizzazione grossolana sciogliendo dello stagno all'estremità della fibra subito dopo il taglio (fig. 3.15). Il risultato è stato soddisfacente in quanto si è ottenuto un guadagno medio di circa 8 dB su tutta lo spettro della sorgente (EDFA), rilevato con l'OSA. Un'altra prova più accurata è stata eseguita tenendo conto

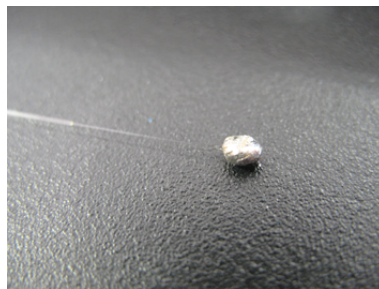


Figura 3.15: Metallizzazione della testa del sensore

della polarizzazione: aggiungendo un controllore di polarizzazione manuale si può controllare lo stato di polarizzazione della luce che interessa il sensore, in modo da massimizzarne la risposta in potenza. Per far ciò si è allestito il banco di prova secondo lo schema di fig. 3.16.

Fissata la sorgente (laser ECL a 1550 nm, potenza in uscita +5 dBm), la prima misura è stata eseguita rompendo meccanicamente per curvatura la testa della EHOF. Dopo aver massimizzato la potenza, la lettura della potenza riflessa al *power meter* è stata di -48.95 dBm. Successivamente al taglio e alla nuova massimizzazione della

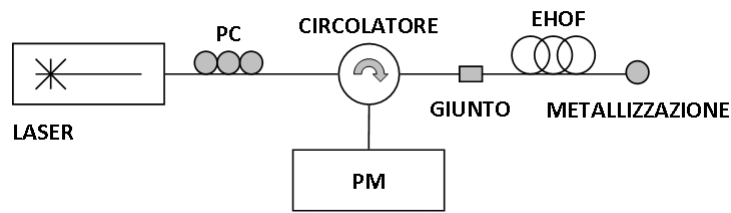


Figura 3.16: Setup del banco per la caratterizzazione della metallizzazione

potenza, la nuova lettura ha mostrato un guadagno con il taglio di circa 18 dB (lettura al PM: -30.89 dBm). Infine, dopo la metallizzazione e l'ultima massimizzazione della potenza, la lettura al PM è stata di -16.81 dBm, ovvero sono stati guadagnati circa 14 dB con questo tipo di metallizzazione nelle migliori condizioni di polarizzazione.

3.1.3 Involucro

L'ultima fase della costruzione del sensore vero e proprio consiste nella realizzazione di un involucro adatto allo scopo per il quale il sensore verrà utilizzato. Tale *case* deve conferire alla fibra una buona rigidità e una buona robustezza, senza però influire sul naturale funzionamento dell'interferometro. Deve cioè condurre bene il calore, evitando però che la sua dilatazione si propaghi alla fibra contenuta al proprio interno. Inoltre deve avere una certa resistenza, per esempio alla corrosione e alle alte temperature, a seconda dell'utilizzo che se ne vuole fare. Non è dunque banale realizzare un involucro che abbia tutte queste caratteristiche contemporaneamente.

In questo paragrafo verrà presentata una prima versione del *package*, salvo poi illustrarne l'evoluzione nel par. 3.2.

La prima operazione che è necessario eseguire (possibilmente ancor prima della metallizzazione) è la copertura del giunto. In questo caso si è provveduto all'applicazione di un coprigiunto termorestringente da 6 cm tra la semibretella di fibra monomodale e la EHOFF per mezzo della piastra riscaldante della giuntatrice Sumitomo 35SE. Fatto questo, tutta la semibretella è stata rivestita con guaina termorestringente fino al termine del coprigiunto.

Supponendo di dover poi testare il sensore in acqua, è necessario evitare che l'acqua penetri all'interno della fibra bucata di *sensing*, in quanto verrebbe risucchiata per capillarità dal foro centrale, diffondendo ioni ossidrilici nella fibra (che provocherebbero grossi problemi di attenuazione) e cambiandone le caratteristiche di propagazione in quanto l'acqua ha un indice di rifrazione diverso rispetto all'aria (1.33 contro 1.00). Per evitare questo inconveniente e preservare il sensore durante

i suoi più svariati utilizzi si è pensato di ricoprire con del silicone la metallizzazione, che è l'unico punto da dove l'acqua potrebbe penetrare nella EHOF. In fig. 3.17 il rivestimento in silicone applicato alla metallizzazione.



Figura 3.17: Rivestimento in silicone della metallizzazione

Il passo successivo consiste nella realizzazione del *case* vero e proprio. Avendo precedentemente osservato che la EHOF è estremamente sensibile alla polarizzazione e quindi alle perturbazioni meccaniche, è necessario predisporre un involucro sufficientemente rigido che conferisca stabilità meccanica al sensore, mantenendo la fibra ben distesa. Si è pensato dunque di utilizzare un foglio di rame di spessore 0.5 mm, dal quale sono state ricavate due lamine delle dimensioni di 200 mm x 10 mm, che andranno a costituire le pareti superiore ed inferiore dell'involucro, tipo *sandwich*. Queste due lamine sono state unite tra loro sul lato lungo tramite del nastro adesivo conduttivo in rame da 12 mm (3M 1181). Si è provveduto poi a stendere il sensore su una di queste lamine, predisponendo anche tre pezzi di nastro adesivo in rame come punti di ancoraggio tra la fibra e la lamina (uno al centro e uno per ogni estremità) allo scopo di mantenere in tensione la EHOF (fig. 3.18a). Dovendo infine richiudere le lamine l'una sull'altra, per eliminare l'aria (che è un buon isolante termico) dall'intercapedine venutasi a creare, la fibra è stata ricoperta di pasta ad alta conducibilità termica (RS 554-311). Tale pasta, composta al 70% circa di ossido di zinco, presenta una conducibilità termica di 0.65 W/m°C, 25 volte maggiore di quella dell'aria (0.026 W/m°C). Il rame invece ha una conducibilità termica di circa 390 W/m°C, quindi si può presumere che buona parte del calore che circonda il *case* del sensore venga trasmesso alla EHOF contenuta al suo interno, generando un effetto termo-ottico significativo. Una volta terminata l'applicazione della pasta conduttiva (fig. 3.18b), le due lamine sono state riposte l'una sull'altra e, dopo aver rimosso la pasta in eccesso fuoriuscita, bloccate con un'altra striscia di nastro conduttivo sul lato lungo libero. Infine si è provveduto a tagliare il rame oltre la testa metallizzata del sensore e chiudere l'apertura con del nastro conduttivo, oltre che a bloccare l'altra estremità delle lamine sul coprigiunto con del nastro isolante (fig. 3.18c).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.18: Realizzazione dell'involucro: (a) fissaggio della EHO sulle lamine; (b) applicazione pasta termo-conduttiva; (c) involucro finito

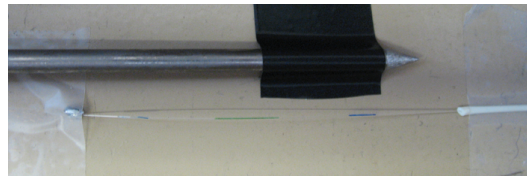
3.2 Realizzazione del secondo tipo di sensore

Note le problematiche emerse nel cap. 4 durante le misure per la caratterizzazione del sensore precedentemente sviluppato, si è pensato di realizzare un sensore con un *package* diverso.

Dovendo proteggere la giunzione tra la SMF e la EHOF, si è pensato di sfruttare il coprigiunto anche come involucro del sensore: esso contiene una barretta metallica, la quale ha una dilatazione sufficientemente uniforme nella sola direzione longitudinale (nelle altre direzioni, date le dimensioni, la dilatazione è trascurabile).

Avendo a disposizione coprigiunti della lunghezza massima di 6 cm e dovendovi inserire all'interno sia la SMF sia la EHOF, la lunghezza di quest'ultima è stata dimensionata in 3 cm. Essendo il periodo della figura d'interferenza (eq. 2.6) inversamente proporzionale alla lunghezza dell'interferometro ed avendo scalato di un fattore 5 la lunghezza della EHOF, il periodo ne risulta quintuplicato.

Le fasi di allineamento, giunzione, taglio e metallizzazione sono le medesime del paragrafo precedente (fig. 3.19a). Ciò che cambia è la sola costruzione dell'involucro, qui ottenuta racchiudendo tutta la fibra precedentemente giuntata all'interno di un unico coprigiunto (fig. 3.19b).



(a)



(b)

Figura 3.19: Sensore corto: (a) prima dell'applicazione del coprigiunto; (b) dopo l'applicazione del coprigiunto.

Capitolo 4

Misure

In questo capitolo verranno illustrate tutte le fasi di caratterizzazione dei due sensori realizzati, nonché tutti i problemi emersi durante questa fase sperimentale e le soluzioni adottate allo scopo di ingegnerizzare il dispositivo.

4.1 Misure relative al primo tipo di sensore

Prima di costruire l'involucro del sensore sono state eseguite delle prove qualitative per verificare che il dispositivo fosse effettivamente sensibile alla temperatura. Dopo aver chiuso il tratto di EHOE su se stesso (per ridurre l'ingombro), mantenendo lo schema di fig. 3.12 si è avvicinata una mano al sensore. Eseguendo scansioni ripetute all'OSA si è notata una variazione continua dello spettro dell'EDFA, caratterizzato sostanzialmente da due gobbe diverse e ravvicinate (ASE, vedere appendice): in particolare si è verificato uno "scambio di potenza" continuo tra queste due gobbe, rilevabile con la redistribuzione della densità spettrale alle varie lunghezze d'onda, come mostrato in fig. 4.1 per tre acquisizioni successive. Lasciando invece a riposo la fibra, lo spettro tornava alla situazione originale entro qualche secondo; ciò è un primo indice di sensibilità alla temperatura della fibra di *sensing*.

Il risultato appena ottenuto in maniera empirica rivela fluttuazioni relativamente ampie dello spettro dell'ASE a fronte di un gradiente di temperatura non molto significativo (si riscalda infatti l'elemento sensibile, a temperatura ambiente, con il solo calore irradiato dalla mano, senza contatto).

Un fattore di instabilità rilevato fin da subito è sicuramente la polarizzazione: anche in questa situazione infatti la fibra risulta sensibile alle perturbazioni meccaniche. Toccando la fibra con un oggetto (senza quindi apportare una variazione di temperatura), lo spettro visualizzato varia di 5-6 dB la sua potenza di picco, cioè variano le perdite accumulate. Facendo oscillare o vibrare la fibra si nota la comparsa di

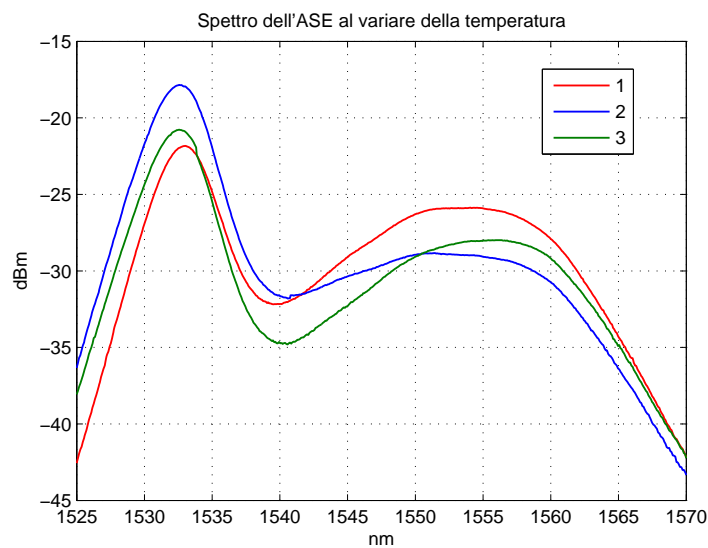


Figura 4.1: Spettro dell'ASE al variare della temperatura

un termine ondulatorio sopra lo spettro originale, a conferma di quanto detto poco sopra.

Si è ritenuto necessario escludere anche fluttuazioni veloci della potenza, che potrebbero falsare le misure; per far questo si è predisposto lo schema di fig. 4.2.

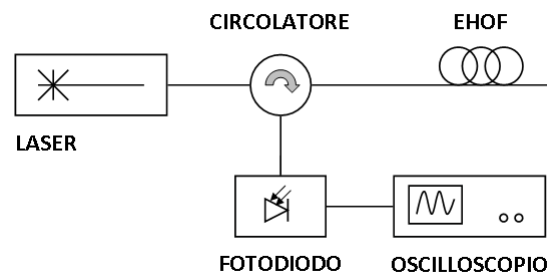


Figura 4.2: Primo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza

In questo *setup* è stato utilizzato il laser Ando AQ 8201-13B a 1550 nm, l'oscilloscopio LeCroy 9450 e un fotodiodo PIN. Nonostante l'output del laser fosse impostato al massimo livello di potenza possibile (+8 dBm), il fotodiodo non ha rilevato alcuna potenza ottica, pertanto la traccia dell'oscilloscopio rappresentava solamente il rumore di fondo. Ciò è imputabile alle perdite accumulate durante il percorso ottico (molto elevate, come visto nel cap. 2) e alla bassa sensibilità del fotodiodo utilizzato.

Per ovviare a questo problema si è provato ad amplificare la sorgente con l'EDFA TPA/S 17 precedentemente utilizzato, inserendolo tra il laser ed il circolatore, come in fig. 4.3.

La traccia visualizzata all'oscilloscopio presentava però una certa instabilità in am-

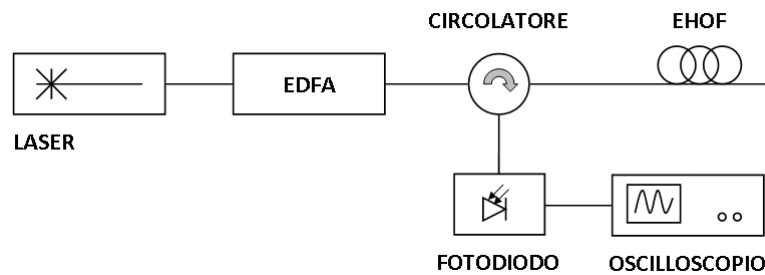


Figura 4.3: Secondo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza

piezza. Si è dunque ipotizzato che tale instabilità fosse dovuta all'ASE introdotto dall'EDFA e, per escludere anche questo disturbo, si è utilizzato il canale 4 (a 1550 nm) del filtro *Wavelength Division Fiber Grating* (WDFG) JDS Uniphase WDFG-1504D5-MI1B, in cascata all'EDFA, come mostrato in fig. 4.4.

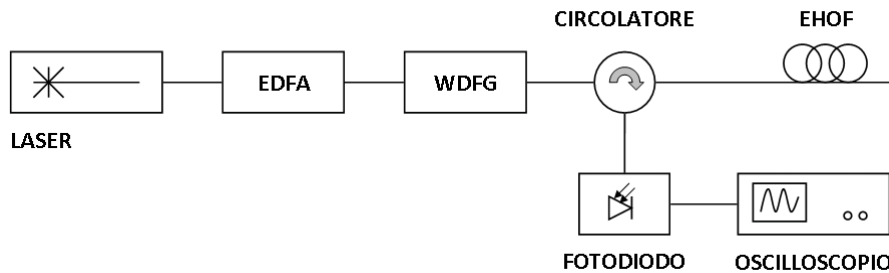


Figura 4.4: Terzo setup del banco per l'esclusione delle fluttuazioni di potenza

Con questa configurazione la stabilità della traccia è sensibilmente migliorata in quanto l'ampiezza picco-picco del segnale visualizzato si è mantenuta costante. La traccia inoltre è rimasta stabile fintanto che la fibra ha mantenuto il suo stato di quiete; come in precedenza, all'avvicinare della mano all'elemento sensibile il segnale ha cambiato le sue caratteristiche di potenza. Sono state così escluse fluttuazioni della potenza non dovute all'effetto termo-ottico.

Mantenendo questo *setup* della sorgente e sostituendo il fotodiodo con un *power meter* (ILX Lightwave FPM-8210), è stata eseguita una prima prova per valutare l'andamento della potenza riflessa dal sensore sottoposto ad una escursione termica sufficientemente ampia. Il sensore è stato inserito in un recipiente con circa 5 litri di acqua a 60°C (misurati con termometro digitale Hanna Instruments HI 98509); col passare del tempo e il conseguente raffreddamento dell'acqua si è registrata una diminuzione della potenza rilevata di 15 dB (da -18 dBm a -33 dBm) tra i 50°C e i 40°C. Per aumentare la velocità di raffreddamento dell'acqua, si è aggiunta ulteriore acqua prelevata dal rubinetto (a circa 15°C); a seguito di questa operazione la potenza misurata dal PM ha assunto un comportamento instabile ed aleatorio, probabilmente dovuto al movimento della EHO all'interno del recipiente causato

dall'aggiunta di fluido.

Una prova analoga è stata eseguita scaldando circa 0.25 litri di acqua ad 80°C ed inserendovi successivamente il sensore; anche in questo caso l'andamento della potenza al PM non è stato oscillatorio, come ci si sarebbe aspettato, bensì instabile e casuale. Si è dunque ipotizzato che la presenza di moti convettivi all'interno del fluido possa influire sul comportamento della EHO, in particolare destabilizzandone la risposta in termini di potenza riflessa.

Si è poi optato per riscaldare la fibra tramite un fornello elettrico da 800 W con piastra da 140 mm di diametro (la caratterizzazione di questo dispositivo è riportata in appendice). Al posto del PM, nello schema di fig. 4.4 è stato inserito l'OSA, in modo da poter salvare lo spettro acquisito. L'elemento sensibile è stato posto su un supporto regolabile a 5 mm di distanza circa dalla piastra del riscaldatore, assieme alla sonda del termometro (fig. 4.5). Sono state eseguite poi misure a temperatura ambiente, durante il riscaldamento a 30°C - 50°C - 70°C - 120°C e alle stesse temperature durante il raffreddamento (per un totale di 9 misure), tra i 1549.75 nm e i 1550.25 nm (0.5 nm di span) alla massima risoluzione dell'OSA (0.05 nm).

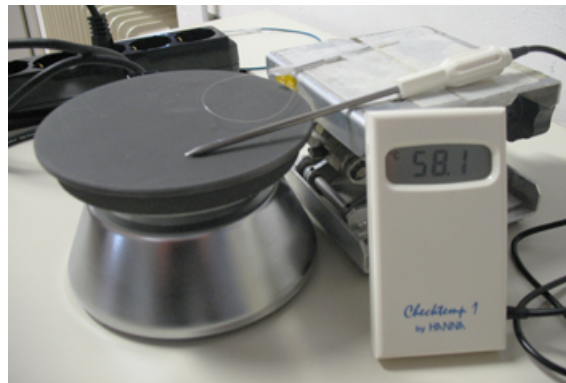


Figura 4.5: Utilizzo del fornello elettrico per il riscaldamento della EHO

Dal grafico di fig. 4.6 si nota che la lunghezza d'onda centrale della sorgente è di 1549.90 nm, nonostante essa sia impostata a 1550.11 nm per lavorare esattamente al centro della banda del filtro, anche se ciò non crea problemi poiché la banda del filtro è sufficientemente più larga di quella del laser. Come appare dal grafico, a temperatura ambiente la potenza del picco della riflessione è di circa -6.5 dBm; durante la fase di riscaldamento, nel giro di qualche grado centigrado scende di 6-7 dB, per poi risalire al valore originario; lo stesso comportamento è tenuto nella fase di raffreddamento. Si può presumere quindi che tra i 25°C e i 50°C vi sia una frangia dello spettro d'interferenza, anche se ciò non risulta evidente oltre i 50°C , probabilmente per il fatto che la riflessione è "campionata" ad intervalli di temperatura molto ampi e non si conosce ancora la periodicità effettiva dello spettro dell'interferenza. Inoltre al di sopra dei 90°C si è notato che anche l'aria riscaldata dal fornello genera dei moti convettivi che spostano la fibra.

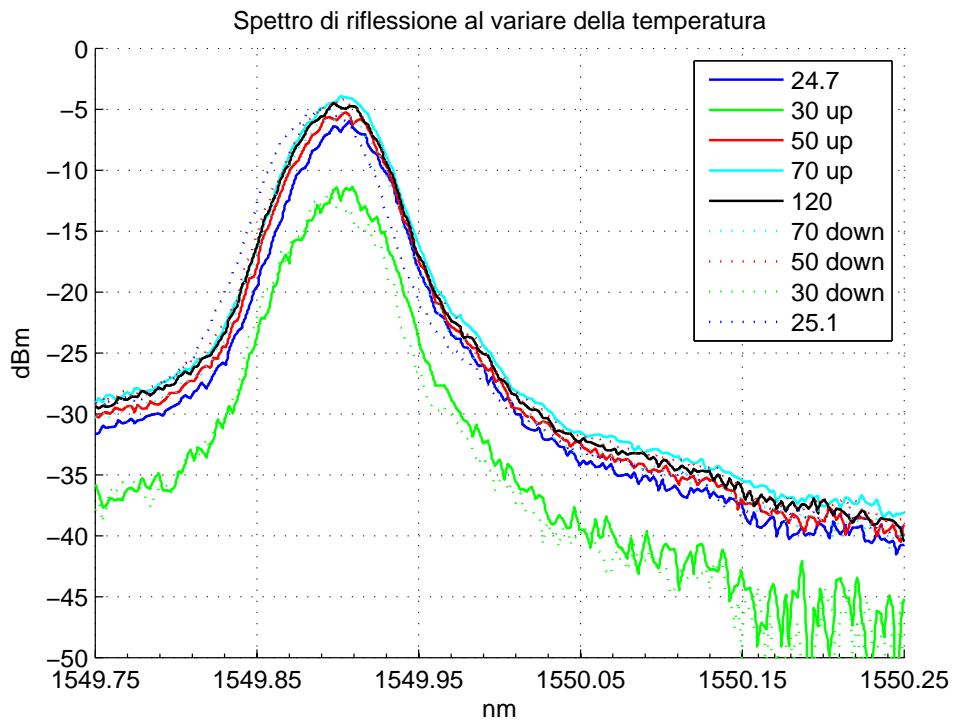


Figura 4.6: Spettro della riflessione al variare della temperatura

Si è dunque pensato di automatizzare le misure (via GPIB) in modo da acquisire la potenza riflessa dalla fibra al PM con campionamento in modalità *fast* ad intervalli regolari di 0.2 s (5 Hz) per 10 s. In fig. 4.7 sono riportati due dei risultati ottenuti.

Ancora una volta appare evidente la dipendenza dalla temperatura della potenza riflessa: a temperatura ambiente infatti si misurano -8.5 dBm; avvicinando la mano, la potenza aumenta per qualche istante, per poi innescare un andamento altalenante con frange di diversi dB di contrasto. In fig. 4.7(b) si nota come togliendo la mano la potenza tenda a tornare velocemente al valore di quiete.

Tutte le misure descritte dall'inizio del capitolo sono state eseguite prima della costruzione dell'involucro, operazione che si è resa necessaria principalmente per evitare effetti dovuti a moti convettivi di aria ed acqua, oltre che per conferire una certa rigidità all'elemento sensibile ed evitarne perturbazioni meccaniche dovute ai fluidi.

Dopo la realizzazione del *packaging*, la prima verifica effettuata è stata una prova qualitativa con lo schema di fig. 3.12 per ricercare eventuali periodicità dello spettro. Sono state eseguite tre misure: una mantenendo il sensore a contatto con del ghiaccio, una a temperatura ambiente e l'ultima riscaldandolo con il fornello elettrico (fig. 4.8). I risultati ottenuti sono del tutto analoghi a quelli di fig. 4.1 e non hanno rivelato altri comportamenti particolari, se non una leggera diminuzione

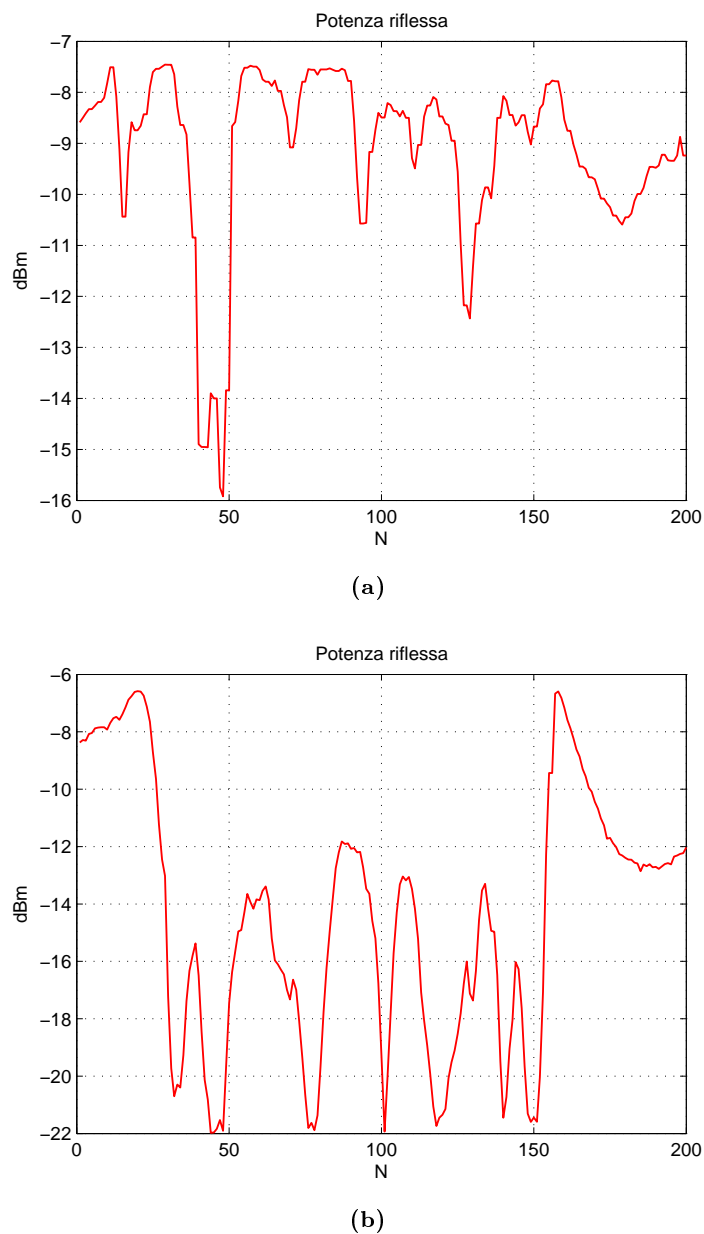


Figura 4.7: Campionamento della potenza riflessa in 10 secondi

del *range* di variazione della potenza. E' dunque ancora abbastanza visibile la deformazione dello spettro della riflessione dell'ASE dovuta alla redistribuzione della potenza a causa della variazione della temperatura.

Questo fenomeno è stato accuratamente analizzato misurando in maniera automatizzata (via GPIB) lo spettro in riflessione rilevato dall'OSA ad intervalli di temperatura regolari (0.5°C), utilizzando come sorgente l'ASE emesso dall'EDFA TPA/S 17. Alla fine di ogni ciclo di misura il programma messo a punto effettua la differenza tra gli spettri rilevati al sensore e lo spettro d'emissione dell'EDFA, in modo che la traccia visualizzata rappresenti effettivamente l'andamento dell'attenuazione nel *range* d'interesse al variare della temperatura.

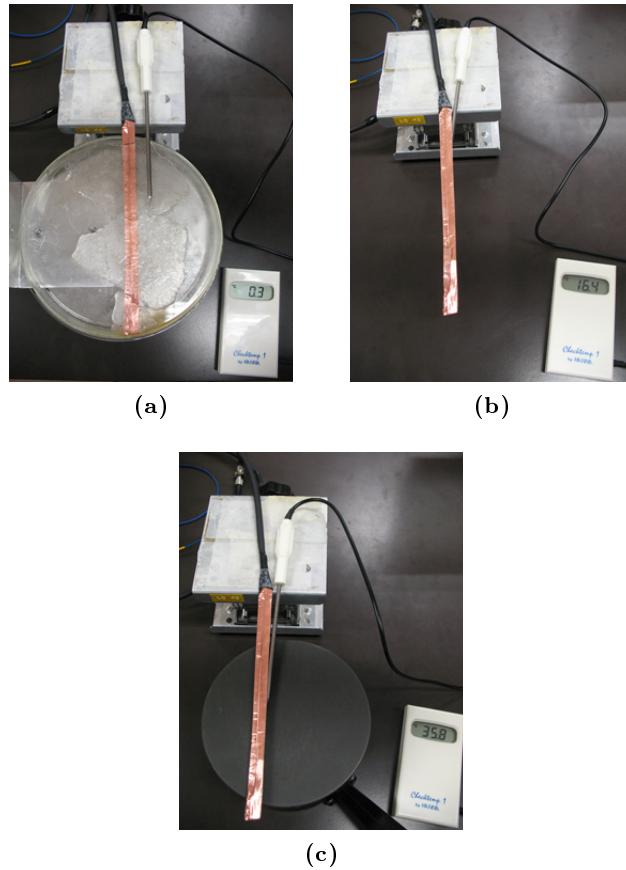


Figura 4.8: Test del sensore con involucro: (a) prova con ghiaccio; (b) prova a temperatura ambiente; (c) prova con fornello elettrico

Il sensore è stato adagiato su tre supporti in polistirolo posti sul fondo di un lavandino, in maniera tale che l'acqua immessa fosse a contatto con entrambe le pareti dell'involucro (fig. 4.9) così da trasmettere uniformemente il calore. La sonda del termometro è stata posta in posizione ravvicinata rispetto al sensore, in modo da percepire la stessa temperatura.



Figura 4.9: Posizionamento del sensore sul fondo del lavandino

Sono state effettuate diverse misure dai 75°C ai 40°C e in fig. 4.10 si evidenzia il risultato più rappresentativo.

In fig. 4.10 sono riportate tre rappresentazioni diverse dello stesso risultato:

- in fig. 4.10a sono riportati gli spettri ottenuti per differenza tra la potenza riflessa e la potenza emessa dalla sorgente; ad ogni traccia è associata una diversa gradazione di colore (dal rosso al blu) per indicare la temperatura alla quale è stata rilevata;
- la fig. 4.10b è la rappresentazione 3D del contenuto della figura 4.10a, dove la scala colori corrisponde al livello di potenza;
- la fig. 4.10c è il *contour plot* della fig. 4.10b.

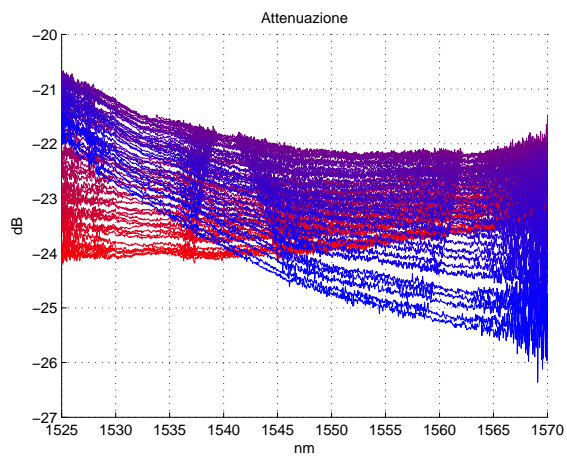
La sequenza degli spettri mostra l'evoluzione della figura d'interferenza, ovvero la traslazione delle frange con la temperatura, come ci si aspettava per quanto visto nel cap. 2 (lo *span* corrente mostra solamente una piccola porzione del periodo d'interferenza). Questa conseguenza dell'effetto termo-ottico è responsabile della deformazione dello spettro dell'ASE catturato dopo la riflessione, di cui si è parlato in precedenza. Infatti, al variare della temperatura la figura d'interferenza si muove, variando quindi l'attenuazione subita da ogni lunghezza d'onda.

Supponendo di intersecare con un piano verticale la superficie di fig. 4.10b in corrispondenza della lunghezza d'onda di 1550 nm, ciò che si ottiene dall'intersezione non è altro che l'andamento della potenza che si rileverebbe con un PM utilizzando una sorgente a banda stretta attorno ai 1550 nm (per esempio un laser). Questo è un metodo alternativo, già presentato nel cap. 2, per stimare la variazione di temperatura a partire dalla variazione di potenza riflessa ad una determinata lunghezza d'onda. A 75°C si misurano -24 dB, mentre a 40°C si misurano -24.75 dB; tra questi due punti si trova il massimo (-22.25 dB a 55°C circa).

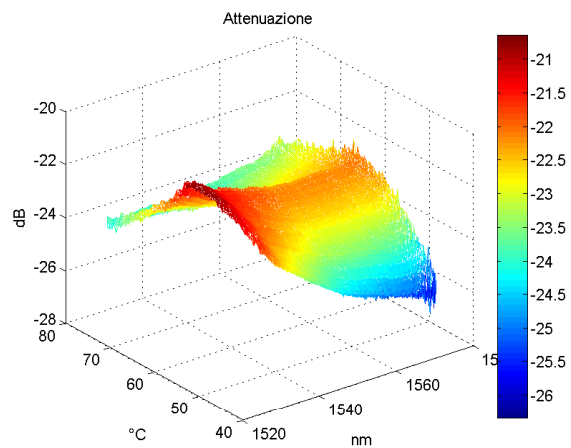
Oltre a quello appena illustrato, sono stati eseguiti altri due cicli di misura che hanno mostrato ancora risultati concordi con la teoria, ma sufficientemente diversi tra loro e dal primo. Si suppone dunque esista anche un problema di ripetibilità delle misure.

Si è successivamente preparato il banco come in fig. 4.11.

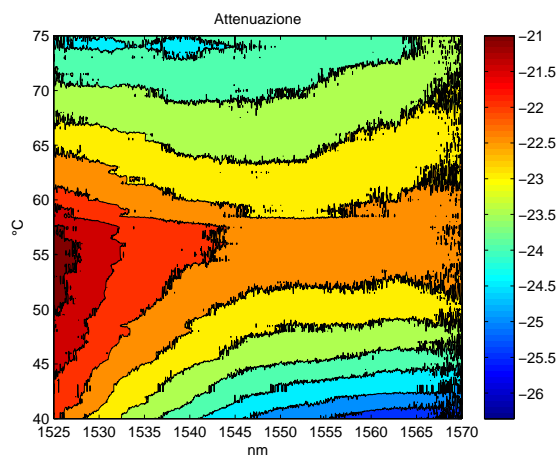
Si sono notati fin da subito due problemi, ancora prima di immettere l'acqua all'interno del lavandino: la dipendenza della potenza riflessa dalla posizione del sensore (e delle bretelle di collegamento) e l'ampia variabilità della potenza rilevata dal PM già a temperatura ambiente. Il primo di questi due problemi, sicuramente dovuto alla polarizzazione, interessava soprattutto la zona di giunzione tra la EHOE e la fibra SM: toccando o spostando il giunto la potenza variava anche di 4-5 dB. Si è dunque provveduto a bloccare perfettamente il sensore e tutta la fibra di collegamento. Per limitare invece la fluttuazione della potenza rilevata sono state fatte



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10: Spettro della riflessione del sensore in acqua calda: (a) visualizzazione 2D; (b) visualizzazione 3D; (c) *contour plot* della visualizzazione 3D

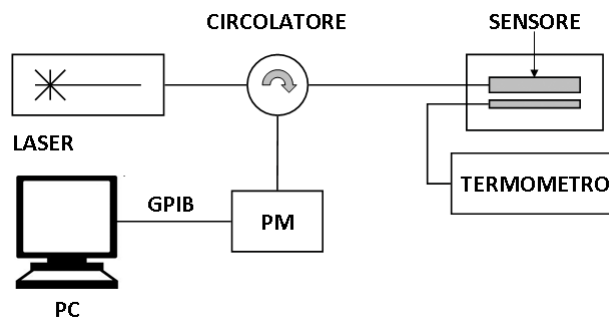


Figura 4.11: Setup del banco per la misura della potenza riflessa con laser a 1550nm

delle prove con le tre modalità di acquisizione del PM ILX Lightwave FPM-8210 (*fast*, *medium* e *slow*); l'acquisizione in modalità *slow* è stata subito scartata perché troppo lenta rispetto alla variazione di temperatura (media di 100 acquisizioni ogni 5 s). La modalità *fast* esegue una misura non mediata ogni 0.05 s, mentre la modalità *medium* esegue una media su 10 acquisizioni ogni 0.5 s.

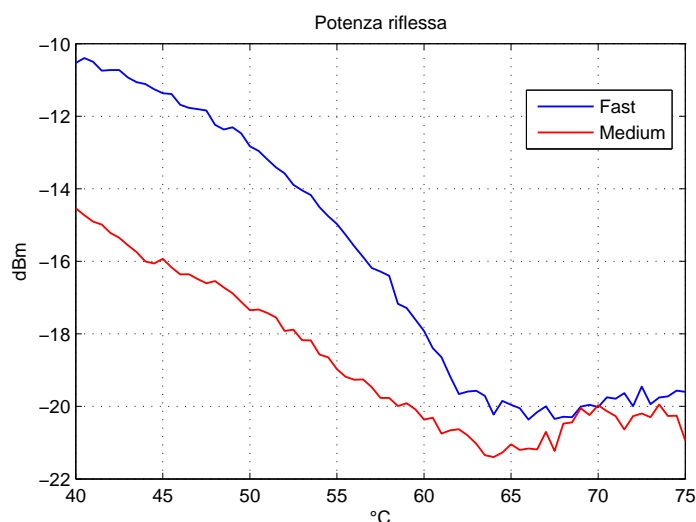


Figura 4.12: Acquisizione della potenza riflessa al *power meter* in modalità *fast* e *medium*

I risultati di queste due configurazioni (fig. 4.12), sempre tra i 75°C e i 40°C, sono molto frastagliati ma rivelano qualche analogia: dai 40°C ai 65°C circa la potenza riflessa tende a diminuire, dai 65°C ai 75°C si assesta intorno ai -20 dBm. Comunque non c'è corrispondenza tra i grafici, basti vedere che a 40°C le due curve hanno un *gap* di oltre 4 dB.

Si è poi provato ad utilizzare una sorgente a banda larga (EDFA) al posto del laser, come in fig. 4.13, e ad acquisire la potenza al PM in modalità *fast*. In fig. 4.14 il risultato ottenuto.

Dalla fig. 4.14 possono essere immediatamente ricavate due conclusioni:

- il range di variazione della potenza è di 7.5 dB, abbastanza differente rispetto

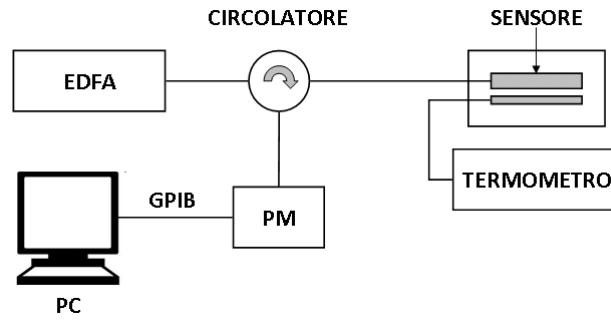


Figura 4.13: Setup del banco per la misura della potenza riflessa con EDFA

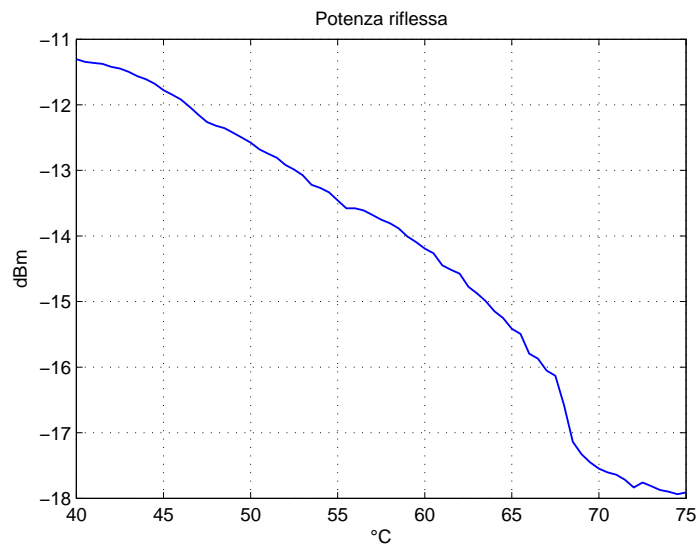


Figura 4.14: Acquisizione della potenza riflessa al *power meter* utilizzando una sorgente a banda larga

ai 9.5 dB rilevati utilizzando la sorgente laser; questo risultato può essere spiegato con l'equazione 2.1, poiché cambiando la potenza della sorgente variano anche le componenti continua e cosinusoidale della figura d'interferenza;

- il grafico ottenuto utilizzando l'EDFA è meno frastagliato; trascurando il valore di potenza in ingresso, esistono due sostanziali differenze tra l'utilizzo del laser e l'utilizzo dell'EDFA come sorgente:
 - il laser ha una banda stretta e può essere considerato monocromatico, per cui la potenza rilevata al PM è riferita alla sola componente spettrale del laser; utilizzando l'EDFA, il segnale che viene inviato al sensore è a larga banda, per cui ciò che si misura al PM è l'integrale della densità spettrale su tutta la banda della riflessione, che contiene i contributi di ciascuna singola lunghezza d'onda;
 - la radiazione emessa dal laser è altamente polarizzata, con un grado di

polarizzazione (*Degree Of Polarization - DOP*) del 99,98% circa, mentre quella dell'EDFA è solo parzialmente polarizzata.

Per dar credito alle precedenti affermazioni è stata effettuata una prima prova con il sensore in quiete sfruttando le due modalità di funzionamento del laser (*narrow* e *wide*): in modalità stretta l'oscillazione della potenza al PM risulta di 0.05-0.06 dBm, mentre ampliando la banda si arriva a limitare questo effetto alla sola terza cifra decimale, migliorando di un fattore 10 questa instabilità, pertanto tutte le prove successive sono state eseguite utilizzando la modalità *wide*.

Inoltre, toccando le bretelle dalla sorgente al circolatore oppure quelle dal circolatore al sensore la potenza varia di qualche dB al PM, sempre a causa della dipendenza dalla polarizzazione e dalle perturbazioni meccaniche.

Per avere una misura stabile ed accurata bisogna dunque interrogare il sensore con un segnale che sia il più possibile depolarizzato: a questo scopo è stato predisposto il banco di misura come in fig. 4.15.

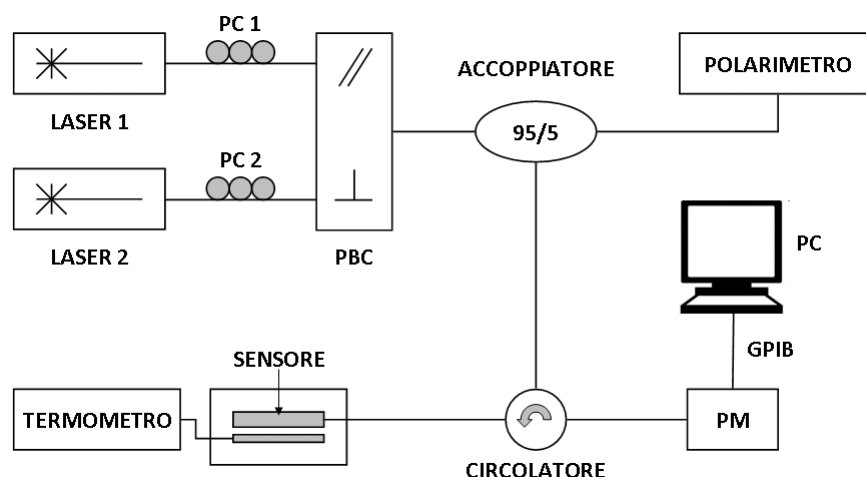


Figura 4.15: Setup del banco per la misura della potenza riflessa con sorgente depolarizzata

L'illuminazione del sensore è ottenuta combinando due sorgenti polarizzate ma tra loro incoerenti (due laser aventi la stessa potenza nominale d'uscita ma lunghezza d'onda differente) attraverso i due ingressi a polarizzazione ortogonale di un *Polarization Beam Combiner (PBC)*. Sapendo che i due ingressi del PBC sono caratterizzati da due polarizzazioni ortogonali tra loro (s e p), si ha che i due segnali in *input* al PBC avranno vettori di Stokes pari a:

$$S_s = \begin{pmatrix} |E_s|^2 + |E_p|^2 \\ |E_s|^2 - |E_p|^2 \\ 2|E_s||E_p|\cos(\delta_s - \delta_p) \\ 2|E_s||E_p|\sin(\delta_s - \delta_p) \end{pmatrix} = (E_p = 0) = \begin{pmatrix} |E_s|^2 \\ |E_s|^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$S_p = (E_s = 0) = \begin{pmatrix} |E_p|^2 \\ -|E_p|^2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Grazie all'incoerenza esistente tra le due sorgenti in ingresso, il vettore di Stokes che rappresenta la polarizzazione all'uscita del PBC può essere ottenuto come somma algebrica dei due vettori relativi agli ingressi ortogonali:

$$S = S_s + S_p = \left(|E_s|^2 + |E_p|^2, |E_s|^2 - |E_p|^2, 0, 0 \right)^T$$

da cui si ottiene immediatamente il DOP (calcolato come rapporto tra la radice della somma dei quadrati delle ultime tre componenti di S e la prima componente):

$$DOP = \frac{|E_s|^2 - |E_p|^2}{|E_s|^2 + |E_p|^2}$$

Se $|E_s|^2 = |E_p|^2$, ovvero se i due segnali ortogonali hanno la stessa intensità, si avrà un DOP nullo.

Non conoscendo a priori lo stato di polarizzazione in uscita da ciascuno dei due laser né la loro potenza effettiva, tra essi ed il PBC sono stati posti due controllori di polarizzazione (PC1 e PC2 di fig. 4.15). Accendendo alternativamente uno dei due laser ed agendo sul controllore corrispondente è stato possibile eguagliare la potenza tra i due rami del PBC. Le misure di potenza e di DOP sono state eseguite con il polarimetro Profile PAT 9000B, valutando una porzione di potenza in uscita dal PBC prelevata tramite un accoppiatore 95/5.

In tutte le prove illustrate il DOP è sempre stato minimizzato prima di ogni *set* di misura mantenendone il valore attorno allo 0.5%.

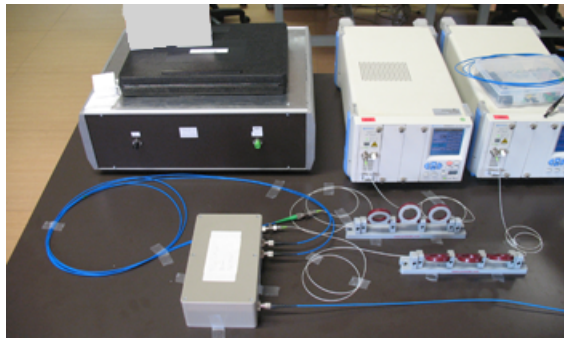


Figura 4.16: Foto del banco utilizzato per ottenere la sorgente depolarizzata

Con il nuovo *setup* sono stati eseguiti ulteriori *test* sul sensore in quiete per osservare la variabilità della potenza misurata al PM: come in precedenza, con la modalità di funzionamento *wide* dei laser si limita al massimo la variabilità della potenza,

ottenendo un'oscillazione media di 0.002 dBm (tale variazione potrebbe comunque essere dovuta all'effetto termo-ottico istantaneo). Perturbando le bretelle di collegamento tra la sorgente e il sensore la potenza varia di qualche centesimo di dBm, a dimostrazione del fatto che il segnale che viaggia al loro interno ha un DOP molto basso.

Effettuate queste prove preliminari, si è tornati ad eseguire delle misure per caratterizzare il sensore utilizzando dell'acqua riscaldata. Per ampliare l'intervallo di temperatura scendendo sotto la temperatura ambiente, una volta raggiunti i 30°C si è aggiunta acqua alla temperatura di circa 13°C.

Il primo obiettivo è stato quello di individuare un massimo ed un minimo successivi della figura d'interferenza, in modo da identificare la zona di lavoro del sensore, ovvero quel *range* di temperatura dove la potenza riflessa ha un andamento approssimabile con una funzione lineare. In fig. 4.17 due dei risultati ottenuti.

Osservando i risultati è evidente innanzitutto che i grafici sono sfasati l'uno rispetto all'altro (in fig. 4.17a il massimo si trova a circa 35°C, esattamente in corrispondenza del minimo di fig. 4.17b, dualmente il minimo di fig. 4.17a si trova quasi alla stessa temperatura del massimo di fig. 4.17b) e che l'intervallo di funzionamento lineare del sensore è di circa 20°C. Si può altresì osservare che tra i due grafici esiste una piccola differenza (<1 dB) nel *range* di potenza; come detto precedentemente, tale differenza potrebbe essere dovuta alla potenza fornita dalla sorgente in quanto, per mantenere un basso DOP, sono necessarie diverse ricalibrizioni della sorgente. Quelli appena mostrati sono solamente due dei risultati ottenuti in svariate prove, i più esemplificativi. Durante le varie misure però si sono presentati diversi risultati molto diversi tra loro (in potenza e periodicità). Non c'è dunque ripetibilità tra misure successive, nemmeno mantenendo inalterata la sorgente. Le probabili cause sono sostanzialmente due:

- perturbazioni meccaniche dovute al fluido che circonda il sensore: ad ogni ciclo di misura il contenitore nel quale è immerso il sensore viene svuotato e riempito nuovamente; inoltre ad ogni ciclo viene aggiunta dell'acqua fredda; queste due operazioni potrebbero determinare spostamenti del sensore e quindi modificarne la figura d'interferenza;
- isteresi meccaniche dovute alla dilatazione dell'involucro del sensore: il rame che circonda la EHOFF e l'acciaio contenuto nel coprigiunto tra la EHOFF e la fibra standard, come tutti i materiali, si dilatano al variare della temperatura; la EHOFF è fissata al rame in soli tre punti, ma questo tipo di ancoraggio potrebbe essere sufficiente a creare problemi, in quanto ad ogni ciclo di temperatura non è garantito che la fibra torni nella posizione assunta in precedenza, anche per via della presenza della pasta conduttiva molto viscosa; la dilatazione del metallo contenuto nel coprigiunto invece potrebbe avere effetti locali,

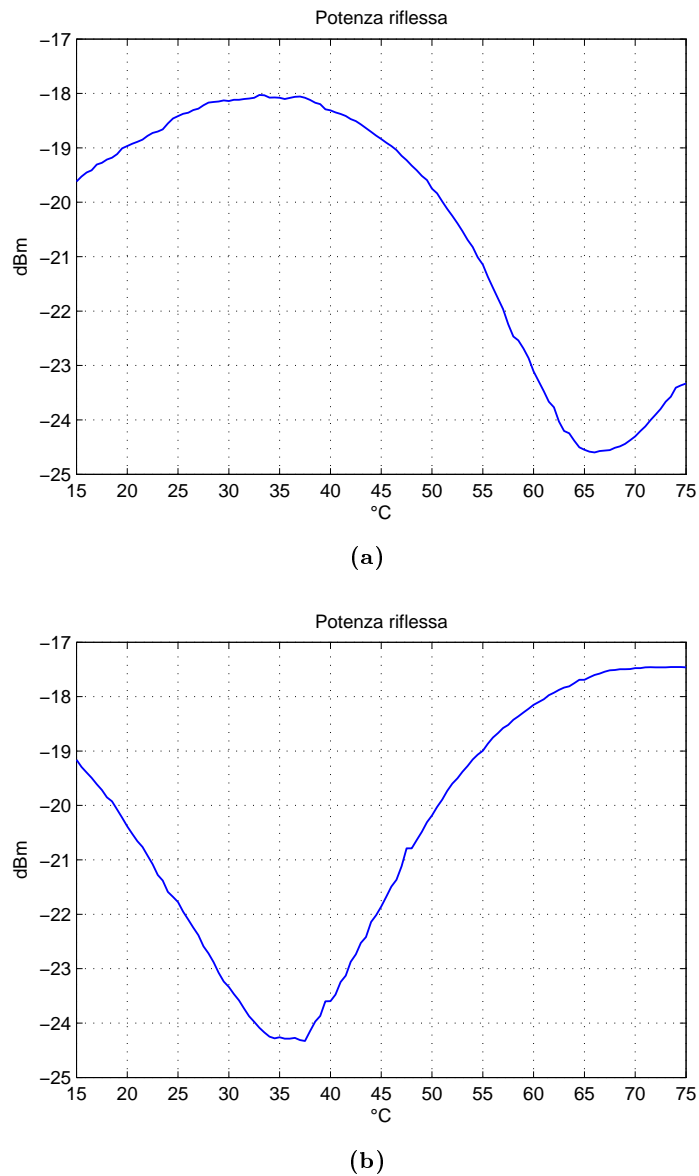


Figura 4.17: Ciclo di misura 75°C-15°C con sorgente depolarizzata

andando a modificare la distribuzione di segnale sui due nuclei della EHOF; questi due fenomeni potrebbero essere causa di *stress* meccanici residui sulla fibra;

Per ovviare al primo problema è stata installata all'interno del contenitore una paratia in modo da limitare il flusso d'acqua e lo scambio termico (e quindi i moti convettivi) nel momento dell'aggiunta dell'acqua fredda (fig. 4.18a). Il sensore inoltre è stato adagiato su una struttura più rigida per limitarne i movimenti (fig. 4.18b), infine sono stati testati diversi modi per immettere l'acqua fredda all'interno dell'acqua calda, con l'intento di generare il minor spostamento di fluido possibile. Con tutti gli accorgimenti presi, i risultati sono leggermente migliorati (fig. 4.19, ma non si è ottenuta la ripetibilità desiderata, cosa fondamentale per la caratteriz-

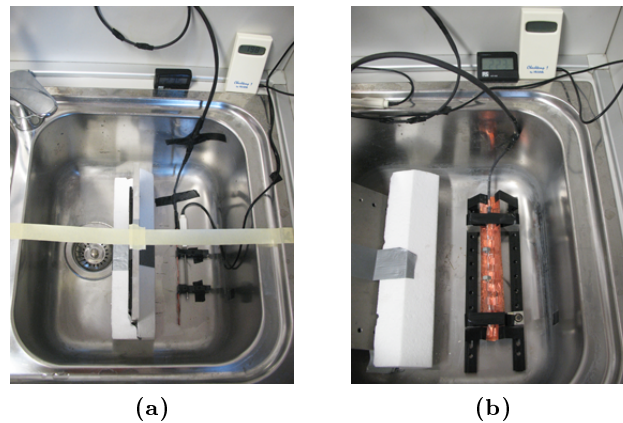


Figura 4.18: Nuova sistemazione per il sensore all'interno del lavandino: (a) paratia; (b) base rigida

zazione di un sensore.

Sono state quindi eseguite delle misure in camera climatica (Vötsch VCL7003). I primi due cicli sono stati eseguiti portando la temperatura interna da 10°C a 120°C (misurati con il termometro a disposizione, non con quello della camera climatica perché caratterizzato da un periodo di campionamento della temperatura troppo lungo). Gli altri tre cicli invece sono stati eseguiti dai 30°C ai 150°C .

All'apertura della camera climatica, alla fine delle misure, il sensore è stato trovato con la guaina termorestringente molto ristretta rispetto a quando è stato inserito: le temperature relativamente alte già dal primo ciclo (10°C - 120°C) hanno deformato la guaina a protezione della fibra standard (in fig. 4.20a si vedono gli effetti della deformazione della guaina). Gli altri cicli di misura sono stati eseguiti dai 30°C ai 150°C e in fig. 4.20b sono riportati i risultati di due di queste misure: ci sono delle evidenti analogie nell'andamento della potenza in funzione della temperatura, anche se non c'è corrispondenza tra i livelli di potenza nelle due misure.

Da segnalare che al di sotto dei 50°C il compressore di raffreddamento della camera climatica è attivo e produce delle vibrazioni meccaniche non trascurabili il cui effetto risulta evidente nell'irregolarità della traccia al di sotto dei 50°C nel grafico del terzo ciclo. Tutto ciò a riprova del fatto che la EHOFF è sensibile alle perturbazioni meccaniche.

Per verificare la ripetibilità della risposta alla temperatura in misure successive, si è provato a disporre il sensore con il suo *case* in prossimità della sorgente di calore, ma non a diretto contatto con la stessa: ciò dovrebbe garantire una distribuzione uniforme del calore ed evitare gli effetti meccanici causati dai moti di aria calda. Le misure sono state effettuate nella fase di raffreddamento ed utilizzando lo schema di fig. 4.15, con entrambi i laser a $+5\text{ dBm}$ e modalità *wide*.

Sono state effettuate tre misure con questa configurazione ed i risultati sono riportati in fig. 4.21, dove risultano evidenti le analogie tra le risposte ottenute.

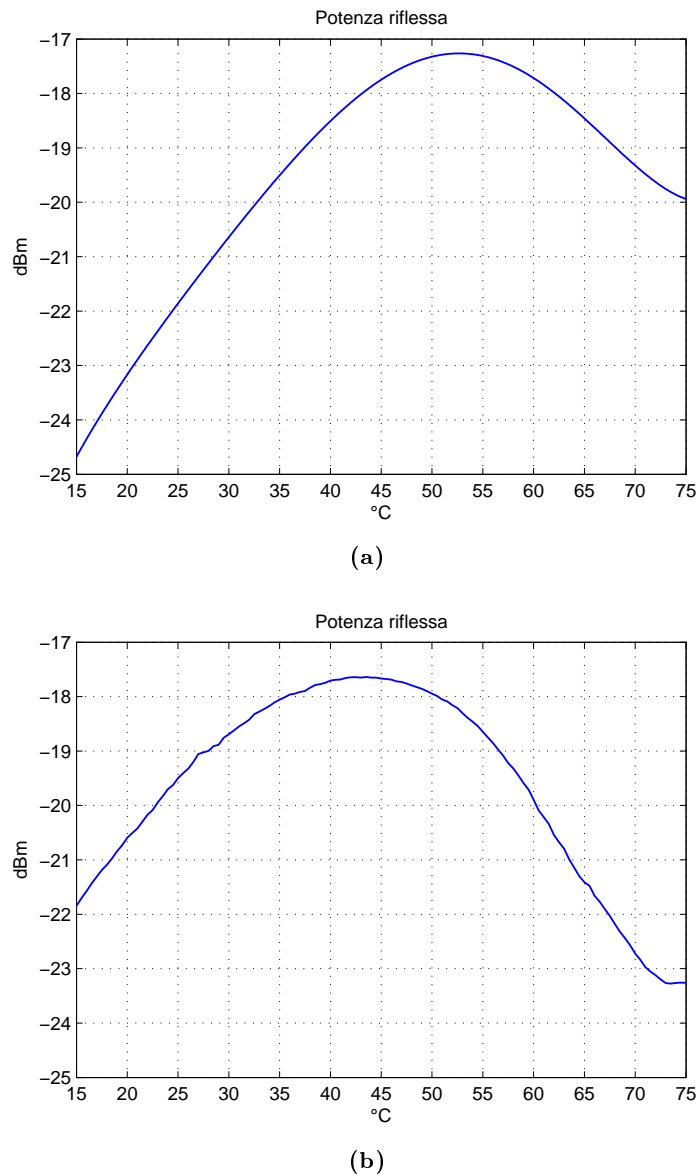


Figura 4.19: Ciclo di misura 75°C-15°C con sorgente depolarizzata

Anche in questo caso manca la ripetibilità in temperatura, ma i minimi e massimi rilevati nei tre cicli si trovano pressoché allo stesso livello di potenza; inoltre, osservando l'andamento dei fronti di salita e discesa delle curve, si può presumere che essi abbiano la stessa pendenza. Per verificare ciò conviene traslare le curve in modo da sovrapporre in temperatura i punti di massimo (fig 4.22a) e minimo (fig. 4.22b). L'asse delle ascisse fornisce una scala graduata (in gradi °C) per quantificare gli scostamenti tra le curve.

In fig. 4.22a, dove vengono sovrapposti i massimi, tra la curva rossa e la curva blu si ha uno scostamento massimo di 4°C a -22.80 dBm, mentre tra la curva blu e quella verde lo scostamento è di 6°C in corrispondenza a -26 dBm (dove peraltro termina la zona lineare delle curve).

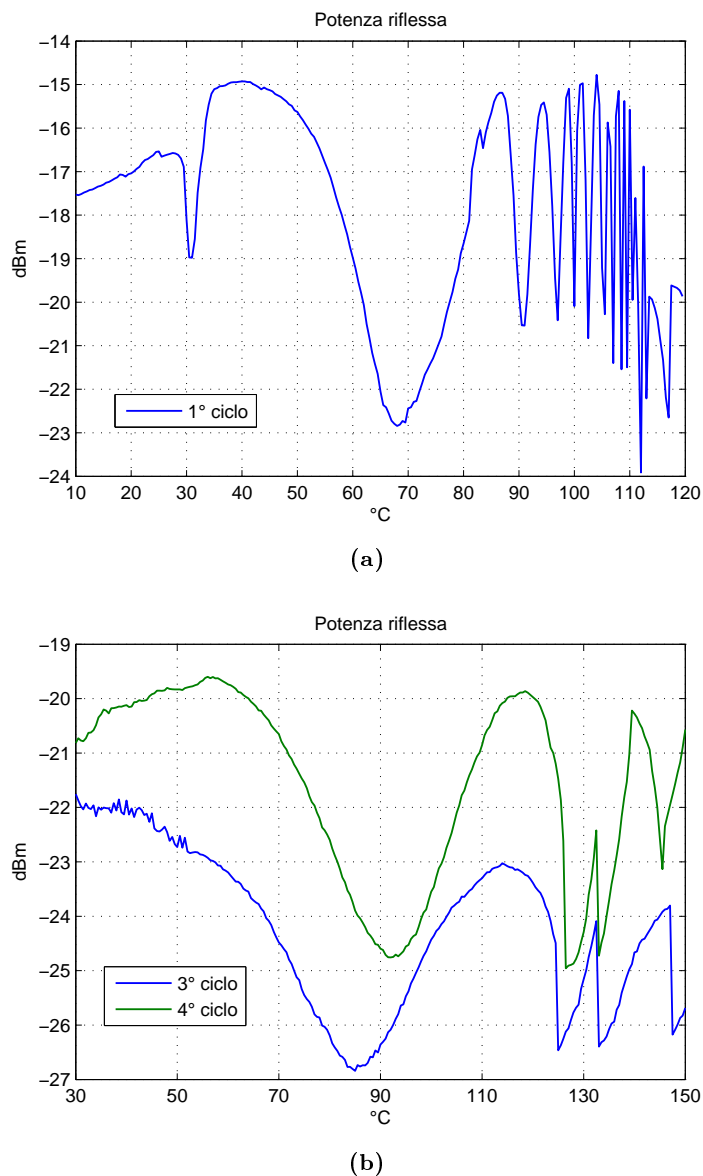


Figura 4.20: Misure in camera climatica con sorgente depolarizzata

In fig. 4.22b invece tra la curva rossa e la curva verde si misura uno scostamento di 1.5°C a -22.70 dBm, mentre lo scostamento massimo tra la curva verde e quella blu si trova a -22.85 dBm ed è ancora di 1.5°C .

Le valutazioni appena fatte possono far ipotizzare, con buona approssimazione, che le varie curve ricavate siano effettivamente tre finestrate della stessa figura d'interferenza traslata. E' da notare che le differenze più ampie si trovano in corrispondenza delle temperature più elevate, perciò è lecito supporre che tale divario sia dovuto alla bassa precisione con cui vengono effettuate le misure alle alte temperature, in quanto sia la potenza, sia la temperatura variano istantaneamente in maniera molto rapida, amplificando così l'errore che si commette campionandole. Si vede facilmente che tra i -22 dBm ed i -26 dBm la risposta in potenza è pra-

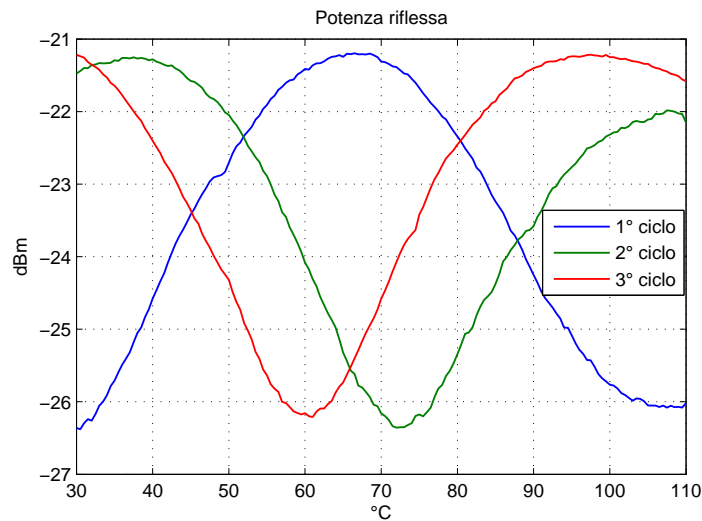


Figura 4.21: Misure con fonte di calore e sorgente depolarizzata

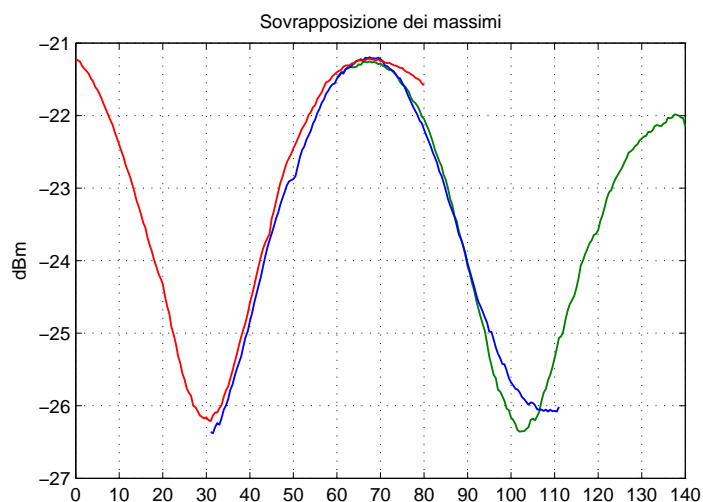
ticamente lineare; a meno della traslazione della figura d'interferenza, i 4 dB di variazione in potenza (corrispondenti ad una variazione di 20°C) fornirebbero la sensibilità del dispositivo, pari a 0.2 dB/°C. Tale parametro però dipende strettamente dalle condizioni di illuminazione della EHOF poiché, per quanto visto nella eq. 2.1, il contrasto della frangia d'interferenza (e quindi la zona di linearità) varia con l'intensità della potenza ottica che percorre i due nuclei della fibra bucata.

4.2 Misure relative al secondo tipo di sensore

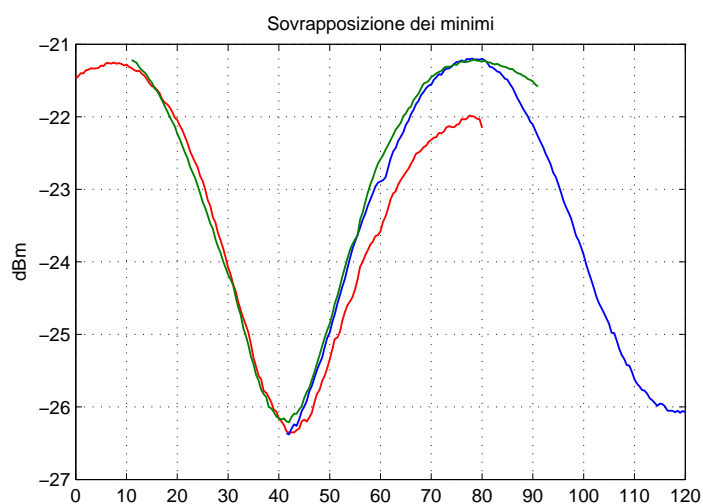
Riscontrati diversi problemi di ripetibilità dei risultati con il primo tipo di sensore, si è optato per realizzare un altro tipo di sensore, molto diverso per costruzione ma con lo stesso principio di funzionamento. La sua costruzione è descritta nel par. 3.2.

Per la caratterizzazione del sensore corto si è deciso di mantenere la configurazione di misura di fig. 4.15. Avendo ridotto di un fattore 5 la lunghezza del sensore, ci si attende dunque la zona lineare della figura d'interferenza corrisponda ad un intervallo di temperature 5 volte maggiore, passando dai 20°C del sensore di 15 cm ai 100°C del nuovo sensore da 3 cm. Prima di applicare il coprigiunto sono state eseguite delle misure per verificare l'effettivo allungamento del periodo della figura d'interferenza.

La fig. 4.23 mostra i risultati di due misurazioni successive; come si può notare è aumentata l'instabilità sulla potenza misurata, probabilmente perché la fibra nuda risente molto dei microspostamenti che avvengono durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento. Per ovviare in via teorica a questo problema, in fig. 4.23 sono state



(a)



(b)

Figura 4.22: Sovrapposizione delle curve di fig. 4.21: (a) dei massimi; (b) dei minimi;

riportate anche le due curve (cubiche) di *fitting*, ottenute con CFTool di MATLAB. Confrontando le fig. 4.21 e 4.23 si può affermare che il periodo della figura d'interferenza è più che raddoppiato: mentre nella figura relativa al sensore lungo tra i 30°C e i 110°C è rappresentato praticamente un periodo intero, in quella relativa al sensore corto ne è rappresentato meno di metà e si può concludere che, in accordo con quanto visto nella teoria, il periodo si è allungato.

A questo punto è stato applicato il coprigiunto e sono stati eseguiti quattro cicli di misura con lo stesso *setup* del banco delle misure precedenti (vedi fig. 4.15): sorgente non polarizzata (due laser Ando AQ 8201-13B, modalità *wide* a 1550 nm e 1551 nm rispettivamente, *output* +5 dBm ciascuno, combinati assieme con PBC), sensore adagiato su contenitore metallico e riscaldato senza contatto diretto con la

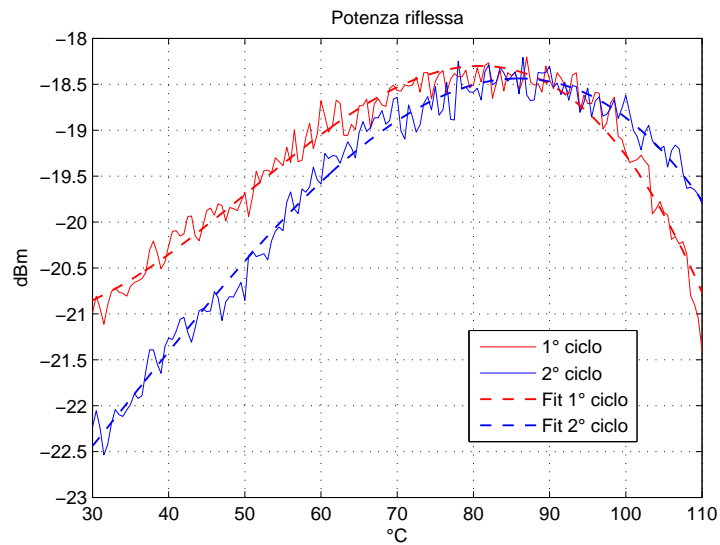


Figura 4.23: Misure con fornello e sorgente depolarizzata prima dell'applicazione del coprigiunto

fonte di calore. I risultati di queste misure sono riportati in fig. 4.24.

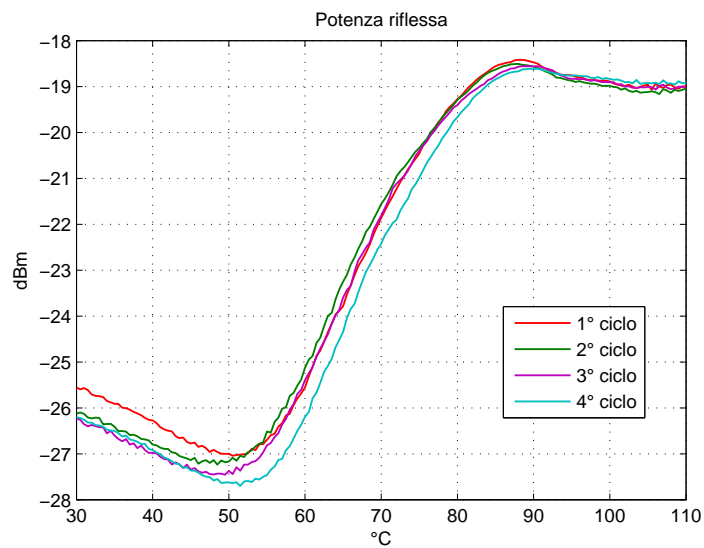
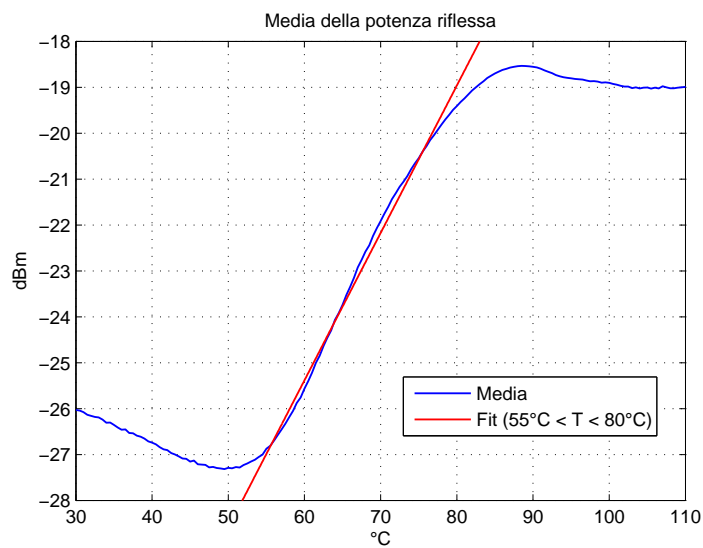


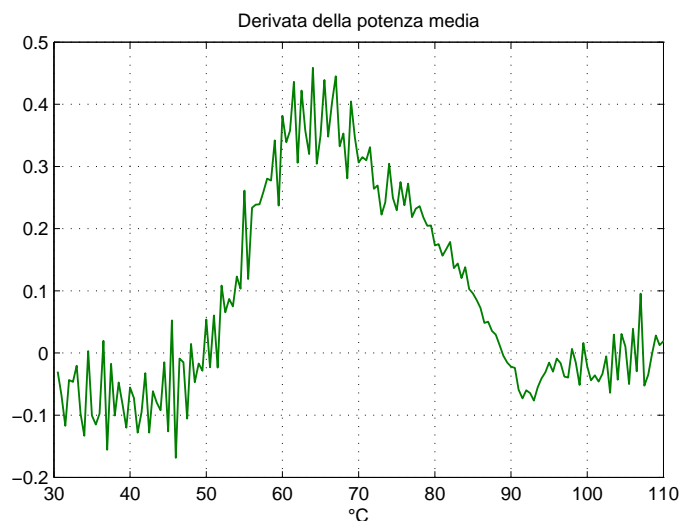
Figura 4.24: Misure con fornello e sorgente depolarizzata prima dell'applicazione del coprigiunto

Questi risultati mostrano come la ripetibilità delle risposte in temperatura sia notevolmente migliorata; tuttavia risulta più problematica l'interpretazione della figura di interferenza (ciò può essere dovuto a *stress* conseguenti all'applicazione del coprigiunto o ad effetti di dilatazione termica del coprigiunto stesso). Per caratterizzare il sensore conviene calcolarne la risposta in potenza media e la sua derivata (riportate rispettivamente in fig. 4.25a e fig. 4.25b).

In fig. 4.25a è riportata anche la retta di *fitting*, calcolata a partire dai campioni



(a)



(b)

Figura 4.25: Potenza: (a) potenza media; (b) derivata della potenza media.

della potenza media tra i 55°C e gli 80°C . Il suo coefficiente angolare fornisce direttamente la sensibilità del dispositivo in questo intervallo di temperatura, pari a circa $0.32 \text{ dB}/^{\circ}\text{C}$. Tale valore è stato calcolato a partire dalla risposta media, ma poiché i tratti lineari delle curve di fig. 4.24 sono pressoché tutti paralleli, è lecito pensare che esso sia costante; tramite questo parametro è possibile dunque misurare differenze di temperatura a partire da differenze di potenza (se si rimane comunque all'interno del range di funzionamento). Ciò che invece non è possibile ottenere è una misura assoluta di temperatura, poiché le rette ai minimi quadrati che passano per i tratti lineari delle varie curve hanno intercetta diversa. Si vedano ad esempio le rette che approssimano il 2° e il 4° ciclo di fig. 4.24: la differenza tra le loro

intercette (che è legata alla precisione del dispositivo) è di circa 5°C .

L'ultima prova effettuata con lo scopo di caratterizzare il sensore è stata una prova di stabilità: il sensore è stato lasciato a riposo per oltre 24 ore. Dopodiché, mantenendo monitorata la temperatura dell'ambiente, sono state eseguite 180 misure della potenza riflessa in 30 minuti (una ogni 10 secondi). In fig. 4.26 l'andamento temporale della potenza.

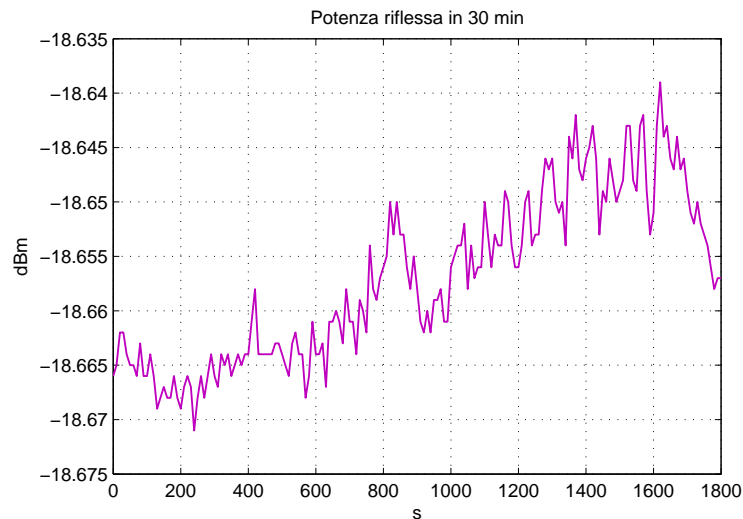


Figura 4.26: Misura di stabilità in potenza

Durante la prova la temperatura ambiente è rimasta costante a 24.6°C ; nonostante ciò la potenza in fig. 4.26 ha un andamento crescente. Non conoscendo la risposta del sensore in un intorno della temperatura ambiente, si può solamente supporre ci sia stata una infinitesima variazione di temperatura nell'arco dei 30 minuti di misura (solo 0.032 dB tra il minimo e il massimo). Considerando intervalli temporali più piccoli (dell'ordine del minuto) si può notare che la potenza varia di qualche millesimo di dBm soltanto, in accordo con quanto visto a seguito dell'utilizzo della sorgente non polarizzata, dunque il sensore può essere considerato sufficientemente stabile. Osservando la fig. 4.25a si presume che tra i 20°C e i 30°C l'andamento della potenza riflessa sia decrescente con l'aumentare della temperatura dunque l'aumento rilevato durante la prova di stabilità può essere dovuto ad una piccola diminuzione della temperatura. Analizzando più in dettaglio la fig. 4.25a si stima una sensibilità di $0.075\text{ dB}/^{\circ}\text{C}$ (in modulo) tra i 20°C e i 30°C .

Capitolo 5

Conclusioni

Nel lavoro svolto si è verificata la possibilità di realizzare un sensore interferometrico integrato sfruttando le caratteristiche della fibra microstrutturata EHOF, in particolare utilizzando i suoi due nuclei come bracci dell'interferometro. È stato quindi constatato che, al variare della temperatura, l'interferenza prodotta dal dispositivo è regolata dalla differenza tra gli indici di rifrazione dei due rami, a causa dell'effetto termo-ottico.

Durante la fase di realizzazione pratica del sensore è stato possibile aumentare la potenza riflessa dal sensore applicando una metallizzazione con dello stagno fuso sulla terminazione della fibra che costituisce l'interferometro.

Per ovviare al problema della sensibilità alla polarizzazione della EHOF, risulta conveniente utilizzare una sorgente depolarizzata per interrogare il sensore, ottenuta combinando due laser (alla stessa potenza ma tra loro incoerenti) su due polarizzazioni tra di esse ortogonali.

I risultati ottenuti in termini di risposta alla temperatura rispettano quanto previsto dalla teoria. La non ripetibilità dei risultati ricavati con il primo tipo di sensore è imputabile all'isteresi meccanica dell'involucro. Nonostante questo, dalle varie risposte è stato possibile ricavare una sensibilità del dispositivo pari a $0.2 \text{ dB}/^\circ\text{C}$.

Il secondo tipo di sensore presenta invece buona ripetibilità dei risultati: il dispositivo ha una sensibilità di $0.32 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ tra i 55°C e gli 80°C ed è quindi adatto alla misurazione differenziale di temperature, ma potrebbe trovare altre applicazioni pratiche. Osservando la fig. 4.25b si vede che la derivata della curva della potenza media (calcolata come rapporto incrementale tra punti adiacenti), nel *range* di funzionamento è positiva. Questo aspetto potrebbe essere utilizzato, per esempio, per assicurarsi che la temperatura si mantenga all'interno di un determinato intervallo o, al contrario, per generare un allarme se si verifica tale condizione. Calcolando istantaneamente la derivata della risposta, a partire da misure consecutive di potenza, è possibile determinare il gradiente di temperatura a cui il sensore è sottoposto. Anche questa è una funzionalità del sensore presentato che potrebbe trovare appli-

cazione in ambito industriale o per scopi di sicurezza.

I possibili sviluppi futuri invece riguardano tutte le fasi che portano alla caratterizzazione e all'ingegnerizzazione del sensore, con lo scopo di mettere a punto un dispositivo che sia riproducibile, sufficientemente sensibile e preciso, stabile ed immune alle problematiche riscontrate. Il tutto allo scopo di industrializzare la produzione di questo sensore per poi poterlo commercializzare.

In particolare sono necessari:

- una misura del Δn tra i nuclei della EHOF per poter eseguire una verifica più precisa sull'effetto termo-ottico;
- uno studio sul processo di allineamento tra le fibre prima della giunzione;
- uno studio sull'illuminazione dei due nuclei della EHOF e quindi sul contrasto delle frange d'interferenza;
- uno studio sulle problematiche relative al *packaging* del sensore;
- una verifica sulla risposta in potenza del sensore in un *range* di temperature molto più ampio;
- uno studio sulla possibilità di sfruttare il sensore in trasmissione anziché in riflessione, con configurazione Mach-Zehnder, utilizzando un *fiber loop mirror*;
- uno studio per escludere eventuali comportamenti isteretici del sensore;
- una caratterizzazione statistica, supportata da un elevato numero di misure, delle proprietà del dispositivo (sensibilità, precisione, ecc.);
- una misura a lungo termine della stabilità della risposta del dispositivo;
- una prova distruttiva per testare i limiti di funzionamento del sensore.

Appendice A

Caratterizzazione dell'EDFA

Di seguito vengono riportati gli spettri dell'emissione spontanea amplificata (ASE) dei due amplificatori ottici utilizzati.

A.1 EDFA PriTel FA-18

Questo spettro è stato rilevato con l'OSA Ando AQ-6315A (risoluzione 1 nm, media su 10 campioni) a 0 dBm di ASE misurati con PM ILX Lightwave FPM-8210.

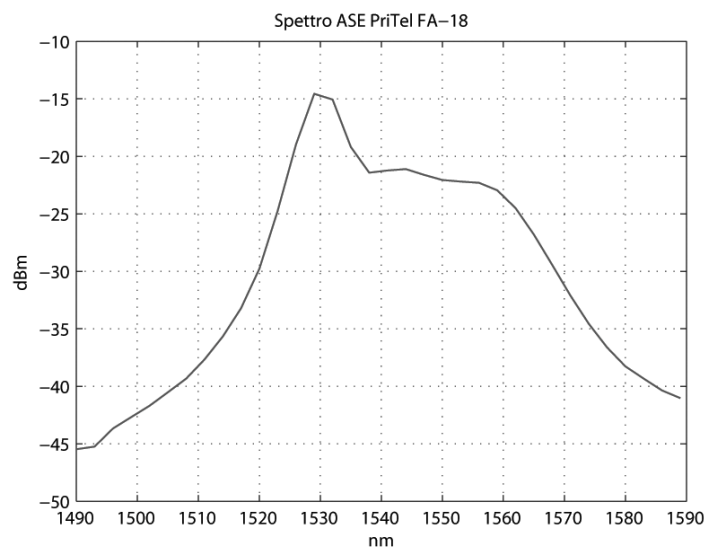


Figura A.1: Spettro dell'ASE dell'EDFA PriTel FA-18

A.2 EDFA TPA/S 17

Questo spettro è stato rilevato con l'OSA Ando AQ-6315A (risoluzione 0.5 nm, media su 10 campioni).

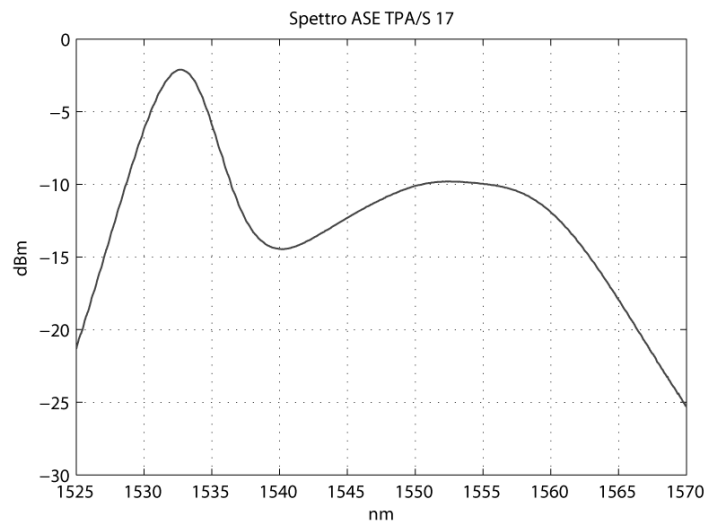


Figura A.2: Spettro dell'ASE dell'EDFA TPA/S 17

Appendice B

Caratterizzazione del WDFG

Di seguito viene riportata la risposta in lunghezza d'onda del WDFG JDS Uniphase WDFG-1504D5-MI1B, la quale è stata ricavata utilizzando come sorgente il laser a cavità esterna Photonetics Tunics-PR 1550 con potenza d'uscita a 0 dBm. Le misure di potenza sono state effettuate con ILX Lightwave FPM-8210 in modalità *fast*.

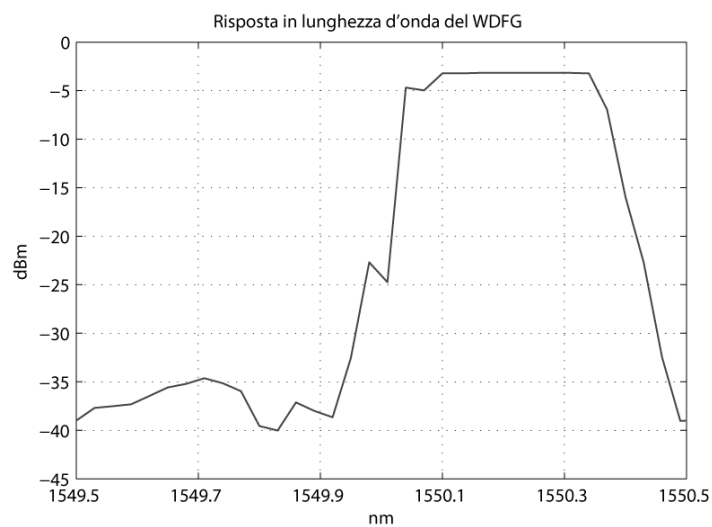


Figura B.1: Spettro del WDFG JDS Uniphase WDFG-1504D5-MI1B

La banda a 3 dB misurata è di 0.33 nm, in accordo con le specifiche dichiarate dal produttore.

Bibliografia

- [1] O. Strobel, D. Seibl, J. Lubkoll, R. Rejeb, *Fiber-Optic Sensors - An Overview*, 2009
- [2] Z. Huang, Y. Zhu, X. Chen, A. Wang, *Intrinsic Fabry–Pérot Fiber Sensor for Temperature and Strain Measurements*, IEEE Photonics Technology Letters, n. 11, vol. 17, 2005
- [3] M. Deng, C. Tang, T. Zhu, Y. Rao, *PCF-Based Fabry–Pérot Interferometric Sensor for Strain Measurement at High Temperatures*, IEEE Photonics Technology Letters, n. 11, vol. 23, 2011
- [4] A.M.R. Pinto, O. Frazão, J.L. Santos, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, K. Schuster, *Interrogation of a Suspended-Core Fabry–Pérot Temperature Sensor Through a Dual Wavelength Raman Fiber Laser*, Journal of lightwave technology, n. 21, vol. 28, 2010
- [5] T. Wei, X. Lan, H. Xiao, Y. Han, H. Tsai, *Optical Fiber Sensors for High Temperature Harsh Environment Sensing*, IEEE Photonics Technology Letters
- [6] C. Lee, M. Kim, K.T. Kim, J. Lee, *Enhanced temperature sensitivity of fiber Bragg grating temperature sensor using thermal expansion of copper tube*, Microwave and optical technology letters, n. 7, vol. 53, 2011
- [7] Y. Li, L. Chen, E. Harris, X. Bao, *Double-Pass In-Line Fiber Taper Mach–Zehnder Interferometer Sensor*, IEEE Photonics Technology Letters, n. 23, vol. 22, 2010
- [8] D. Duan, Y. Rao, L. Xu, T. Zhu, M. Deng, D. Wu, J. Yao, *In-Fiber Fabry–Pérot and Mach–Zehnder interferometers based on hollow optical fiber fabricated by arc fusion splicing with small lateral offsets*, Optics Communications, n. 284, 2011
- [9] B. Dong, J. Hao, C. Liaw, Z. Xu, *Cladding-Mode Resonance in Polarization-Maintaining Photonic-Crystal-Fiber-Based Sagnac Interferometer and Its Application for Fiber Sensor*, Journal of lightwave technology, n. 12, vol. 28, 2011

-
- [10] G. Coviello, V. Finazzi, J. Villatoro, V. Pruneri, *Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000°C*, Optics Express, n. 24, vol. 17, 2009
- [11] C. Galindez, F. Madruga, A. Ullan, M. Lopez-Amo, J. Lopez-Higuera, *Temperature sensing in multiple zones based on Brillouin fiber ring laser*, Journal of Physics: Conference series, n. 178, 2009
- [12] O. Frazão, J.M. Marques, J.L. Santos, M.B. Marques, J.M. Baptista, *Brillouin fibre laser discrete sensor for simultaneous strain and temperature measurement*, 2006
- [13] F. Rodríguez-Barrios, S. Martín-López, A. Carrasco-Sanz, P. Corredera, J.D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, M. González-Herráez, *Distributed Brillouin Fiber Sensor Assisted by First-Order Raman Amplification*, Journal of lightwave technology, n. 15, vol. 28, 2010
- [14] T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno, H. Izumita, *Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques*, 1998
- [15] L. Li, X.L. Tong, C.M. Zhou, H.Q. Wen, D.J. Lv, K. Ling, C.S. Wen, *Integration of miniature Fabry–Perot fiber optic sensor with FBG for the measurement of temperature and strain*, n. 284, 2011
- [16] W. Liu, W. Li, J. Yao, *Real-Time Interrogation of a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating Sensor for Simultaneous Measurement of Strain and Temperature*, IEEE Photonics Technology Letters, n. 18, vol. 23, 2011
- [17] C.R. Liao, Y. Wang, D.N. Wang, M.W. Yang, *Fiber In-Line Mach–Zehnder Interferometer Embedded in FBG for Simultaneous Refractive Index and Temperature Measurement*, IEEE Photonics Technology Letters, n. 22, vol. 22, 2010
- [18] L. Schenato, M. Park, L. Palmieri, S. Lee, R. Sassi, A. Galtarossa, K. Oh, *Characterization of a novel dual-core elliptical hollow optical fiber with wavelength decreasing differential group delay*, Optics Express, n. 19, vol. 18, 2010