



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Tesi di Laurea Specialistica in

INGEGNERIA DELLE TELECOMUNICAZIONI

SENSORI IN FIBRA OTTICA:  
UN INTERFEROMETRO MODALE  
PER MISURA DI ALTE  
TEMPERATURE

Relatore: Ch.mo Prof. Marco Santagiustina

Candidato: David Benedetti

Padova, 20 Aprile 2010



# Indice

<b>Indice</b>	<b>I</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>IV</b>
<b>Introduzione</b>	<b>V</b>
<b>1 Analisi teorica del dispositivo</b>	<b>1</b>
1.1 Sensoristica in fibra ottica . . . . .	1
1.1.1 Sensori ottici di temperatura . . . . .	2
1.2 Un interferometro modale per alte temperature . . . . .	2
1.3 Principio di funzionamento: Analisi teorica . . . . .	3
1.4 Fibre a cristallo fotonico . . . . .	4
1.4.1 Hollow-core PCF . . . . .	5
1.4.2 Index-guiding PCF . . . . .	5
1.4.3 Cenni di teoria della propagazione nelle index-guiding PCF	6
<b>2 Descrizione della strumentazione</b>	<b>11</b>
<b>3 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi</b>	<b>13</b>
3.1 Collassamento dei buchi e diffrazione del campo . . . . .	14
3.1.1 Massimizzazione della potenza trasmessa . . . . .	14
3.1.2 Analisi teorica . . . . .	16
3.2 Controllo della zona di collasso tramite i parametri della giuntatrice	18
3.3 Dispositivi con interferenza tra primo e secondo modo: risposta a temperatura ambiente . . . . .	21
3.3.1 Interferenza tra modo a simmetria pari e dispari . . . . .	21
3.3.2 Modi del mantello . . . . .	24
3.4 Dispositivi con interferenza tra primo e terzo modo: risposta a temperatura ambiente . . . . .	25
3.4.1 Interferenza tra modi a simmetria dispari . . . . .	25
3.4.2 Dispositivi a basse perdite . . . . .	26
3.5 Controllo del periodo . . . . .	29
3.6 Conclusioni . . . . .	30
<b>4 Risposta in temperatura</b>	<b>33</b>
4.1 Descrizione dell'apparecchiatura . . . . .	33
4.2 Primo sensore . . . . .	35
4.3 Secondo sensore . . . . .	37

---

4.4	Terzo sensore . . . . .	39
4.5	Quarto sensore . . . . .	41
4.6	Conclusioni . . . . .	43
<b>5</b>	<b>PCF hole inflection: analisi teorica e risultati sperimentali</b>	<b>45</b>
5.1	PCF Hole Inflection . . . . .	45
5.1.1	Dal taper alla PCF Hole Inflection . . . . .	45
5.1.2	Analisi teorica della PCF Hole Inflection . . . . .	47
5.2	Strumentazione, processo e primi risultati . . . . .	47
5.2.1	Descrizione della strumentazione . . . . .	47
5.2.2	Parametri del processo . . . . .	49
5.2.3	Primi risultati sperimentali . . . . .	49
5.3	Temperatura della fiamma . . . . .	50
5.3.1	Reazione chimica alla base della combustione . . . . .	50
5.3.2	Temperatura della fiamma . . . . .	52
5.3.3	Hole inflection con differenti fiamme . . . . .	52
5.4	Hole inflection a pressione variabile . . . . .	54
5.4.1	Esperimenti con fibra LMA-10 . . . . .	54
5.4.2	Esperimenti con fibra LMA-8 . . . . .	57
5.5	Ripetibilità e uniformità del processo . . . . .	59
5.5.1	Apparente irripetibilità del processo . . . . .	59
5.5.2	Calo di pressione . . . . .	60
5.5.3	Disuniformità del processo . . . . .	61
5.5.4	Condizioni di lavoro finali: processo uniforme e ripetibile .	62
5.6	Conclusioni . . . . .	65
	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>

# Elenco delle figure

1.1	Struttura di una hollow-core PCF . . . . .	5
1.2	Struttura di una index-guiding PCF . . . . .	6
1.3	Struttura di una index-guiding PCF a reticolo triangolare. Dia- metro dei buchi e pitch . . . . .	6
1.4	Indice efficace del modo fondamentale al variare della lunghezza d'onda per $\Lambda = 1\mu m$ (a) e $\Lambda = 2\mu m$ (b) . . . . .	7
1.5	Confinamento del campo elettromagnetico per $d/\Lambda = 0.5$ (a) e $d/\Lambda = 0.9$ (b) . . . . .	8
1.6	Regimi di funzionamento della fibra al variare dell'air-filling frac- tion e relative frequenze di taglio . . . . .	9
2.1	Circuito utilizzato in trasmissione . . . . .	11
2.2	Analizzatore di spettro e sorgente Ase . . . . .	11
2.3	Spettro della sorgente ASE utilizzata . . . . .	12
2.4	Forno in cui si inserisce il sensore per valutarne la risposta termica	12
3.1	Sezione della fibra francese B . . . . .	13
3.2	Sezione della fibra francese I . . . . .	14
3.3	Giunzione tra fibra standard e fibra a cristallo fotonico . . . . .	15
3.4	Risposta del dispositivo . . . . .	15
3.5	Visione tridimensionale dell'intensità dei primi due modi di una PCF . . . . .	16
3.6	Diffrazione del campo nella zona di pura silice . . . . .	17
3.8	Giuntatrice Ericsson FSU-975 . . . . .	19
3.9	Allontanando la fibra a cristallo fotonico dagli elettrodi della giuntatrice, i suoi buchi collasano di meno perchè sono sottoposti a meno calore . . . . .	20
3.10	Taglierina Fujikura . . . . .	20
3.12	Risposta del dispositivo . . . . .	22
3.13	Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo . . . . .	22
3.14	Risposta del dispositivo . . . . .	23
3.15	Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo . . . . .	23
3.16	Risposta del dispositivo senza adattamento d'indice . . . . .	24
3.17	Terzo modo di una PCF . . . . .	25
3.18	Risposta del dispositivo a temperatura ambiente . . . . .	26
3.19	Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo . . . . .	26
3.20	Risposta del dispositivo a temperatura ambiente . . . . .	27
3.21	Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo . . . . .	27

3.22	Risposta del dispositivo a temperatura ambiente . . . . .	28
3.23	Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo . . . . .	28
3.24	Valori sperimentali per la differenza tra indici di rifrazione e valore medio . . . . .	29
3.25	Valori teorici e sperimentali del periodo in funzione della lunghez- za della zona sensibile . . . . .	30
4.1	Circuito utilizzato per interrogare i sensori . . . . .	33
4.2	Risposta del primo sensore al primo ciclo di temperatura . . . . .	35
4.3	Risposta del primo sensore al secondo ciclo di temperatura . . . . .	36
4.4	Risposta del primo sensore al terzo ciclo di temperatura . . . . .	36
4.5	Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura . . . . .	37
4.6	Risposta del secondo sensore al primo ciclo di temperatura . . . . .	37
4.7	Risposta del secondo sensore al secondo ciclo di temperatura . . . . .	38
4.8	Risposta del secondo sensore al terzo ciclo di temperatura . . . . .	38
4.9	Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura . . . . .	39
4.10	Risposta del terzo sensore al primo ciclo di temperatura . . . . .	39
4.11	Risposta del terzo sensore al secondo ciclo di temperatura . . . . .	40
4.12	Risposta del terzo sensore al terzo ciclo di temperatura . . . . .	40
4.13	Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura . . . . .	41
4.14	Risposta del quarto sensore al primo ciclo di temperatura . . . . .	41
4.15	Risposta del quarto sensore al secondo ciclo di temperatura . . . . .	42
4.16	Risposta del quarto sensore al terzo ciclo di temperatura . . . . .	42
4.17	Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura . . . . .	43
5.1	Schema del taper . . . . .	46
5.2	Profilo finale di una fibra dopo il taper . . . . .	46
5.3	Attrezzatura per l'hole inflation . . . . .	48
5.5	Temperatura della fiamma al variare del parametro $\Phi$ . . . . .	51
5.6	Temperatura della fiamma al variare del flusso totale di gas . . . . .	53
5.7	Air-filling-fraction al variare del flusso totale di gas . . . . .	54
5.8	Espansione di diametro e Pitch al variare della pressione . . . . .	55
5.9	Air-filling-fraction al variare della pressione . . . . .	55
5.11	Espansione di diametro e Pitch al variare della pressione . . . . .	57
5.12	Air-filling-fraction al variare della pressione . . . . .	58
5.14	Espansioni differenti su LMA 10 ottenute con lo stesso processo . . . . .	59
5.15	Espansioni differenti su LMA 8 ottenute con lo stesso processo . . . . .	60
5.16	Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 10 . . . . .	62
5.17	Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 10 . . . . .	62
5.18	Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 8 . . . . .	63
5.19	Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 8 . . . . .	63
5.20	Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 10 . . . . .	64
5.21	Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 10 . . . . .	64
5.22	Fibra LMA 10 espansa, Air-filling fraction di circa 0,66 . . . . .	65
5.23	Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 8 . . . . .	66
5.24	Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 8 . . . . .	66
5.25	Fibra LMA 8 espansa, Air-filling fraction di circa 0,55 . . . . .	67

# Introduzione

Questo lavoro di tesi è stato realizzato nell'ambito del programma erasmus tra l'Università di Padova e l'Universitat Politècnica de Catalunya, presso l'ICFO (Istituto di Scienze Fotoniche) di Barcellona.

Il progetto è nato dall'esigenza dell'ESA, Agenzia Spaziale Europea, di disporre di un sensore per la misura di alte temperature al fine di monitorare la temperatura dello scudo esterno di una navicella spaziale in fase di atterraggio, momento in cui la temperatura cambia molto velocemente. La richiesta era quindi quella di un dispositivo affidabile, compatto, isolato e la cui risposta fosse istantanea.

In generale un sensore in fibra ottica soddisfa tutte queste specifiche, motivo per cui l'ICFO ha pensato di realizzare un interferometro modale in fibra ottica in grado di misurare temperature fino a 1000 gradi.

Questa tesi è suddivisa in due parti strettamente legate ma distinte.

La prima parte è costituita dalla realizzazione dell'interferometro utilizzando delle fibre a cristallo fotonico apposite, e dalla valutazione delle sue prestazioni come sensore.

La seconda parte invece consiste nello sviluppo di una tecnica sperimentale che permette di modificare una fibra a cristallo fotonico commerciale al fine di renderla adatta alla realizzazione del sensore stesso.

Nell'*primo capitolo* si elencano i vantaggi di un sensore ottico e si presenta la teoria di funzionamento di un interferometro modale come sensore di temperatura. Infine si espone per cenni la teoria propagativa in una fibra a cristallo fotonico, che costituisce la parte sensibile del dispositivo.

Nel *secondo capitolo* si presenta la strumentazione utilizzata per la realizzazione del sensore e la verifica delle sue prestazioni.

Nell'*terzo capitolo* si descrive come si è ottenuta un'interferenza tra due modi della fibra a cristallo fotonico. La risposta del dispositivo era sinusoidale, stabile e con un periodo principale ben definito.

Il *quarto capitolo* consiste nell'analisi dei dati e presenta le prestazioni di alcuni dispositivi al variare della temperatura.

Il *quinto capitolo* infine riguarda l'hole inflation, ovvero la tecnica per modificare una fibra a cristallo fotonico commerciale. Mediante lo sviluppo di tale tecnica è possibile ottenere delle fibre a cristallo fotonico con geometria e quindi caratteristiche propagative a piacere.

Un ringraziamento speciale va alla dottoressa Vittoria Finazzi e all'ingegner Valerio Pruneri dell'ICFO, che hanno supervisionato questa tesi.



# Capitolo 1

## Analisi teorica del dispositivo

### 1.1 Sensoristica in fibra ottica

Negli ultimi anni l'impiego delle fibre ottiche nell'ambito di applicazioni di sensoristica si sta sviluppando sempre più, in quanto i sensori ottici presentano notevoli vantaggi rispetto ai tradizionali sensori elettrici.

Il principio di funzionamento di un sensore ottico è relativamente semplice: la maniera in cui una struttura guidante, come una fibra ottica, conduce la luce al suo interno può essere modificata da agenti esterni quali pressione, presenza di liquidi e gas, tensione applicata e temperatura. Interrogando la fibra si possono quindi misurare tali grandezze ottenendo così un sensore.

I vantaggi di un sensore ottico rispetto a un tradizionale sensore elettrico sono molteplici:

**velocità e compattezza** : essendo in fibra il sensore è integrato direttamente nel mezzo di trasmissione. La velocità con cui viaggia l'informazione (velocità della luce in fibra) è molto maggiore rispetto alla velocità con cui varia la grandezza da misurare e la risposta del sensore è quindi istantanea.

**accuratezza** : in generale la sensibilità di un materiale ottico agli agenti esterni è molto alta.

**isolamento** : essendo integrato in una struttura guidante, il sensore è immune a qualsiasi tipo di interferenza elettromagnetica.

**adattabilità ad ambienti ostili** : un sensore ottico può essere utilizzato in ambienti dove si richiede il funzionamento ad alte temperature, ad esempio come sensore di incendi, esplosioni, eruzioni vulcaniche, temperature di veicoli spaziali e pozzi petroliferi, dove un sensore elettrico, proprio per questa sua natura, non può essere collocato.

### 1.1.1 Sensori ottici di temperatura

Alcuni sensori ottici in fibre di silice presentano problemi quando la temperatura raggiunge valori di circa  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Ad esempio i sensori basati su fibre drogate, ad alte temperature subiscono la diffusione dei droganti. Un altro fenomeno dannoso che avviene ad alte temperature è la devetrificazione della fibra, ovvero la crescita indesiderata della struttura cristallina che va a sostituirsi alla natura amorfa del vetro. Questi fenomeni modificano le proprietà meccaniche e guidanti della fibra rendendo inaffidabili questi sensori a temperature elevate [1].

Per evitare questi inconvenienti, spesso i sensori per alte temperature sono fatti con fibre particolari, come fibre con un adeguato trattamento termico, fibre a cristallo fotonico e fibre con vetri speciali [2].

In generale è possibile dividere questi sensori termici in due categorie:

**sensori a reticolo** : a periodo largo, reticoli di Bragg rigenerati [2], [3]. Presentano il problema di una fabbricazione piuttosto complessa in quanto la scrittura del reticolo necessita di tecniche molto precise (laser a femto-secondi o specifici trattamenti termici).

**sensori a interferometro modale** : consistono nella composizione di spezzoni di fibre differenti [4]. Nonostante la maggior semplicità di costruzione presentano sensibilità paragonabili ai sensori a reticolo.

## 1.2 Un interferometro modale per alte temperature

Il progetto che ci si propone di sviluppare è un sensore per alte temperature (fino a  $1000^{\circ}\text{C}$ ) basato su un interferometro modale [5].

Il dispositivo consiste in uno spezzone di fibra a cristallo fotonico (PCF), progettata per funzionare in regime bimodale, collegata a due fibre singolo modo standard (SMF), una di ingresso connessa alla sorgente e una di uscita connessa ad un analizzatore di spettro.

La fonte consiste in una sorgente ASE (Amplified Stimulated Emission) con banda tra 1500 nm e 1600 nm ( $\lambda_0 = 1550$  nm,  $\Delta\lambda = 50$  nm) e lancia nella SMF di ingresso un campo elettromagnetico nel modo fondamentale. Nelle zone di giunzione tra le fibre i buchi d'aria della PCF sono completamente collassati in una zona di transizione. In tale zona il campo diffrange determinando l'eccitazione dei primi due modi della PCF nel primo giunto, e la ricombinazione di questi due modi nel modo della SMF nel secondo giunto [6], [7], [9], [10]. Questi due modi si propagano lungo la PCF con indici efficaci diversi e quindi con velocità di fase diverse fino al secondo giunto, dove si ricombinano nel modo fondamentale della SMF dando vita a un pattern di interferenza.

La risposta del dispositivo visualizzata con un analizzatore di spettro ottico (OSA) presenta uno spettro con andamento quasi sinusoidale, dove i massimi si avranno per le lunghezze d'onda tali per cui i due modi della PCF si ricombinano in fase dando un'interferenza costruttiva.

Il sensore di temperatura si basa sull'effetto termo-ottico, ovvero il fatto che il valore dell'indice di rifrazione efficace di un modo cambia al variare della temperatura del materiale in cui il modo si propaga.

In questo modo ad una variazione della temperatura corrisponde un relativo spostamento delle lunghezze d'onda in cui si trovano i massimi. Valutando tale spostamento è quindi possibile risalire alla temperatura della silice.

Nonostante la silice sia un isolante, la capacità termica di una fibra ottica è molto bassa in quanto le sue dimensioni sono micrometriche, e ciò fa sì che la sua temperatura vari istantaneamente al cambiare della temperatura esterna.

In questo modo è possibile relazionare lo spostamento delle lunghezze d'onda direttamente alla variazione della temperatura esterna.

### 1.3 Principio di funzionamento: Analisi teorica

Supponendo che si propagano due modi nella PCF, l'intensità totale alla fine della PCF sarà [5], [6]:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda}\right) \quad (1.1)$$

dove  $I_1$  e  $I_2$  sono le intensità dei due modi,  $L$  è la lunghezza della PCF e  $\Delta n = n_1 - n_2$  è la differenza tra gli indici di rifrazione efficaci dei due modi. Lo spettro presenta quindi un periodo  $\Lambda$  pari a:

$$\Lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n L} \quad (1.2)$$

Le lunghezze d'onda di massimo  $\lambda_m$  sono quindi quelle tali per cui  $\frac{2\pi\Delta n L}{\lambda} = 2m\pi$  essendo  $m = 1, 2, 3, \dots$  un contatore, ottenendo:

$$\lambda_m = \frac{\Delta n L}{m} \quad (1.3)$$

Il pattern d'interferenza cambia con la temperatura secondo due fenomeni:

**effetto termo-ottico** : la variazione di  $n_1$  e  $n_2$ , e quindi di  $\Delta n$  in funzione della temperatura, Eq. 1.4

**espansione termica** : la variazione della lunghezza della fibra  $L$  in funzione della temperatura, Eq. 1.5

$$\Delta n(T) \approx \Delta n(T_0) + \left. \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \right|_{T=T_0} \Delta T \quad (1.4)$$

$$L(T) \approx L(T_0)(1 + \alpha_s \Delta T) \quad (1.5)$$

dove  $\alpha_s = 5.5 \times 10^{-7} K^{-1}$  è il coefficiente di espansione termica della silice.

Sostituendo le Eq. 1.4 e 1.5 nella (1.1) si ottiene:

$$I(T) \approx I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(T_0) L(T_0) + \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(T_0) \alpha_s L(T_0) \Delta T + \frac{2\pi}{\lambda} L(T_0) \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \Delta T + \frac{2\pi}{\lambda} \alpha_s L(T_0) \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \Delta T^2 \right) \quad (1.6)$$

Assumendo che il range di variazione della temperatura non superi i 1000°C è ragionevole supporre che l'effetto termo-ottico sia dominante rispetto all'espansione termica della silice, cosicchè nell'Eq. 1.6 il secondo e il quarto termine dentro la parentesi sono trascurabili.

Ciò semplifica l'Eq. 1.6 in:

$$I(T) \approx I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(T_0) L(T_0) + \frac{2\pi}{\lambda} L(T_0) \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \Delta T \right) \quad (1.7)$$

Inoltre, se si considera che la banda della sorgente è molto inferiore alla sua portante ( $\Delta\lambda \ll \lambda_0$ ), è possibile procedere con la seguente approssimazione:

$$I(T) \approx I_1 + I_2 + \sqrt{I_1 I_2} \cos \left( \frac{2\pi\lambda}{\Lambda} + \Delta\phi \right) \quad (1.8)$$

dove  $\Lambda$  è il periodo dello spettro secondo l'Eq. 1.2 alla temperatura ambiente, e  $\Delta\phi$  la sua fase:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0^2}{\Delta n(T_0) L(T_0)} \quad (1.9)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} L(T_0) \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} \Delta T \quad (1.10)$$

L'Eq. 1.10 stabilisce una relazione tra la fase del coseno e la variazione della temperatura rispetto alla temperatura iniziale  $T_0$ . La variazione della fase del coseno implica quindi uno spostamento del pattern con la temperatura che può essere calcolato scrivendo le lunghezze d'onda di massimo in funzione della fase:

$$\Delta\lambda_m = -\frac{\Lambda}{2\pi} \Delta\phi = -\frac{\Lambda}{\lambda_0} \frac{\partial \Delta n}{\partial T} \Big|_{T=T_0} L(T_0) \Delta T \quad (1.11)$$

Ciò determina uno spostamento in lunghezza d'onda del pattern di interferenza con la temperatura che secondo questa teoria ci si aspetta essere lineare. Il coefficiente angolare di questa retta rappresenta la sensibilità del sensore e tipicamente la sua unità di misura è pm/grado.

## 1.4 Fibre a cristallo fotonico

Come detto in precedenza la parte sensibile del dispositivo è costituita da uno spezzone di fibra a cristallo fotonico le cui proprietà siano tali da eccitare due e solo due modi, ovvero il modo fondamentale e un modo superiore (tipicamente il primo).

Una fibra a cristallo fotonico (PCF) è una struttura guidante che presenta caratteristiche strutturali, e quindi proprietà propagative, diverse rispetto alle

tradizionali SMF.

La sezione trasversale di una PCF in generale presenta sempre un reticolo periodico di buchi d'aria con un difetto al centro, ed è quindi ancora possibile riconoscere un nucleo e un mantello. Il principio con cui la luce viene guidata è differente ed in generale le proprietà propagative della luce dipendono dalla geometria e dalla dimensione del reticolo.

In particolare si possono distinguere due tipi di PCF: le hollow-core PCF e le index-guiding PCF.

#### 1.4.1 Hollow-core PCF

Una hollow-core PCF è una fibra che nella sua sezione trasversale presenta un reticolo periodico di buchi d'aria che corrono lungo la direzione trasversale, e al centro un buco d'aria più grande, Fig.1.1.

Il buco centrale, dove si concentra in campo elettromagnetico, gioca il ruolo di nucleo mentre il reticolo esterno funge da mantello.

Il principio di conduzione della luce si basa sulla teoria delle bande proibite. Per un'analisi dettagliata si rimanda a testi specifici [11], [12].

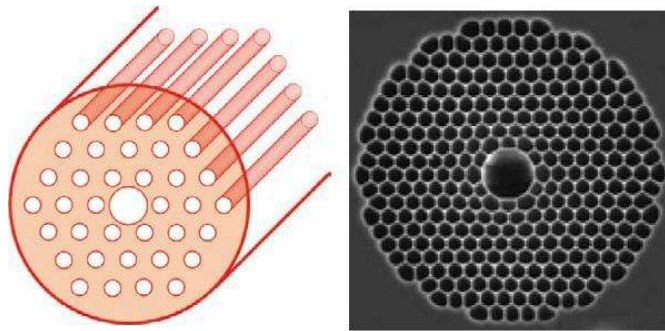


Figura 1.1: Struttura di una hollow-core PCF

#### 1.4.2 Index-guiding PCF

Una index guiding PCF presenta invece nella sua sezione trasversale un reticolo periodico di buchi d'aria con uno, o più, buchi mancanti al centro, Fig. 1.2. In questo modo in mezzo c'è una zona di pura silice che funge da nucleo.

Questo tipo di fibra conduce la luce secondo un principio chiamato riflessione interna totale modificata. In prima approssimazione ciò si può spiegare sulla base del fatto che l'indice di rifrazione della parte centrale, costituita da pura silice, è mediamente più alto di quello della parte esterna, il cui indice si può assumere che sia una sorta di media tra l'indice della silice e quello dell'aria. In questo modo si crea una struttura a salto d'indice capace di guidare la luce.

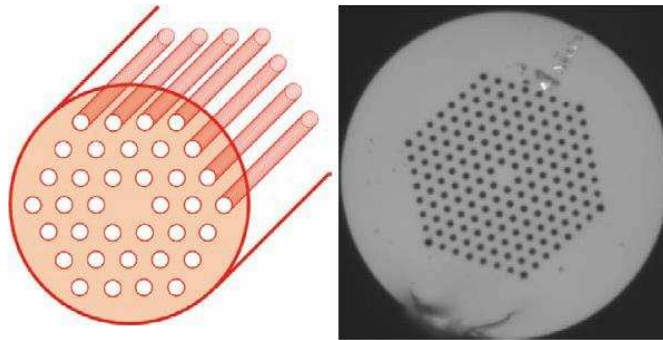


Figura 1.2: Struttura di una index-guiding PCF

Dal momento che per questo lavoro di tesi si disponeva di index-guiding PCF, in seguito sono forniti dei cenni sulla teoria di questo tipo di fibre. In particolare quello che interessa è determinare il legame tra le dimensioni della fibra e il suo regime di funzionamento, in quanto questa fibra deve essere bimodale per lunghezze d'onda intorno ai 1550 nm.

### 1.4.3 Cenni di teoria della propagazione nelle index-guiding PCF

Come detto in precedenza, le proprietà propagative di una PCF dipendono dalle sue dimensioni.

In Fig. 1.3 è mostrata la struttura di una index-guiding PCF con reticolo a periodo triangolare. In particolare sia  $d$  il diametro dei buchi d'aria e  $\Lambda$  il suo periodo (pitch), ovvero la distanza tra due buchi consecutivi.

La mancanza del buco centrale crea un difetto nella struttura cristallina della sezione, ottenendo così il nucleo della fibra.

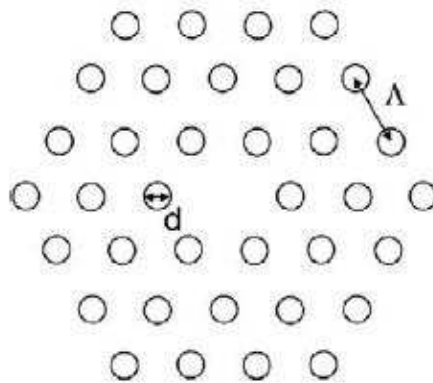


Figura 1.3: Struttura di una index-guiding PCF a reticolo triangolare. Diametro dei buchi e pitch

L'influenza dei parametri geometrici  $d$  e  $\Lambda$  e del rapporto  $d/\Lambda$  o air-filling

fraction sulle proprietà propagative della fibra è accuratamente studiato in [11] tramite il metodo FEM full-vector modal solver in prima istanza considerando il regime di monomodalità.

Si ipotizza cioè che nella PCF si propaghi solo il modo fondamentale con costante di propagazione  $\beta$  data da:

$$\beta = \kappa_0 n_{eff}$$

con

$$\kappa_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$$

e  $n_{eff}$  indice efficace del modo fondamentale, ottenendo la relazione di dispersione della fibra, ovvero la dipendenza dell'indice efficace dalla lunghezza d'onda.

La Fig. 1.4 mostra i risultati di queste simulazioni per due differenti valori di pitch.

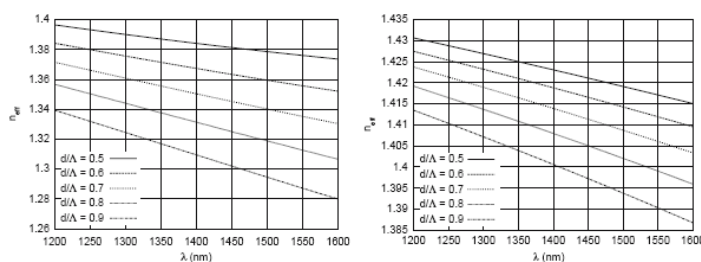


Figura 1.4: Indice efficace del modo fondamentale al variare della lunghezza d'onda per  $\Lambda = 1\mu m$  (a) e  $\Lambda = 2\mu m$  (b)

Quello che si nota è che:

- per un air-filling fraction costante l'indice efficace decresce all'aumentare della lunghezza d'onda
- per una lunghezza d'onda costante l'indice efficace decresce all'aumentare dell'air-filling fraction

Un altro risultato di queste simulazioni è presentato in Fig. 1.5 dove si può vedere il differente confinamento del campo elettromagnetico in fibra al variare del rapporto  $d/\Lambda$ .

In particolare il campo risulta più confinato per air-filling fraction maggiori (dove la fibra è 'più vuota').

In [13] invece è analizzato il regime di funzionamento della fibra il relazione alla sua geometria.

Per rapporti di  $d/\Lambda < 0.45$  la fibra è monomodale praticamente a tutte le lunghezze d'onda, [14], mentre per valutare le proprietà modali al variare dell'air-filling fraction e delle frequenze di taglio normalizzate  $\Lambda/\lambda_c$  si è utilizzato una

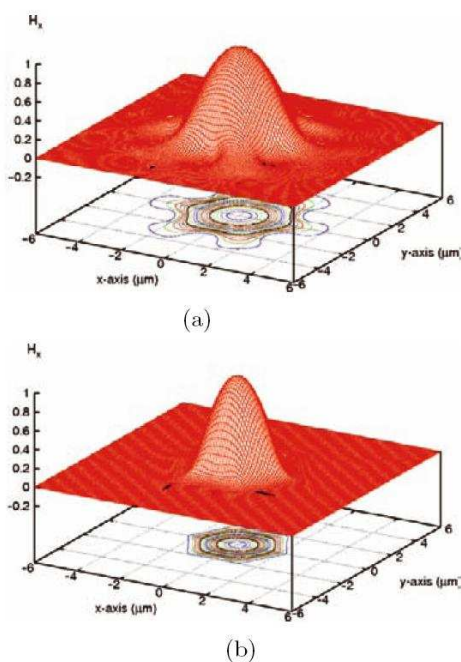


Figura 1.5: Confinamento del campo elettromagnetico per  $d/\Lambda = 0.5$  (a) e  $d/\Lambda = 0.9$  (b)

simulazione numerica [15].

I grafici sono riportati in Fig. 1.6.

Le frequenze di taglio  $\Lambda/\lambda_c$  sono indipendenti dal valore di  $\Lambda$  grazie alla scalabilità delle equazioni di Maxwell.

In particolare si trova che:

- per  $d/\Lambda < 0.4$  la fibra è sempre monomodale indipendentemente dalla frequenza, con una degenerazione di ordine due ( $HE_{11x}$  e  $HE_{11y}$ ).
- esiste un regime in cui la fibra supporta anche il secondo modo con una degenerazione di ordine quattro ( $TM_{01}$ ,  $TE_{01}$ ,  $HE_{21}$  e  $EH_{21}$ ). I limiti di questo regime dipendono dalla frequenza per frequenze relativamente basse.
- per  $d/\Lambda > 0.7$  la fibra supporta anche il terzo modo praticamente a tutte le frequenze.

Per avere una fibra bimodale alle lunghezze d'onda della sorgente si deve ottenere la condizione:

$$\lambda_c^{III} < 1550 \text{ nm} < \lambda_c^{II}$$

dove  $\lambda_c^{II}$  e  $\lambda_c^{III}$  sono le lunghezze d'onda di taglio del secondo e del terzo modo rispettivamente.



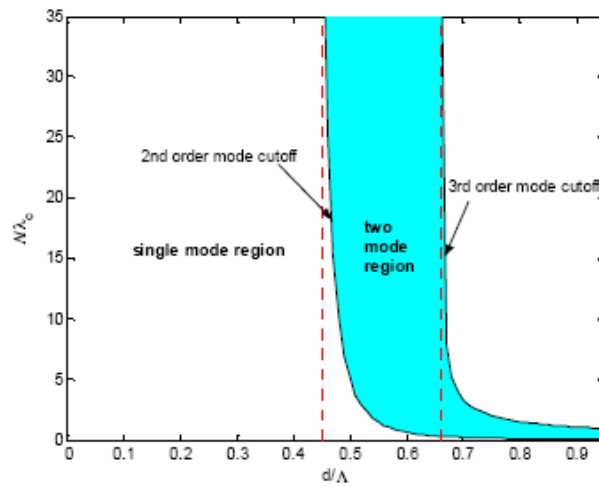


Figura 1.6: Regimi di funzionamento della fibra al variare dell'air-filling fraction e relative frequenze di taglio

Dalla Fig. 1.6 si vede che se si riesce ad ottenere un rapporto  $d/\Lambda$  compreso tra 0.55 e 0.65 la fibra è bimodale praticamente a qualsiasi frequenza. Infatti per tali valori di air-filling fraction la frequenza di taglio normalizzata del secondo modo è molto bassa e quella del terzo modo è alta. È quindi necessario realizzare il sensore con una fibra a cristallo fotonico di questo tipo.



## Capitolo 2

# Descrizione della strumentazione

In questo capitolo si descrive il circuito e la strumentazione utilizzata per interrogare il sensore, una volta costruito.

Il sensore è utilizzato in trasmissione: è quindi connesso in ingresso a una sorgente di luce e in uscita direttamente ad un analizzatore di spettro (OSA), Fig. 2.1.

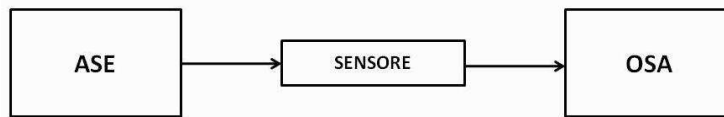


Figura 2.1: Circuito utilizzato in trasmissione

La sorgente di luce utilizzata è visibile in Fig. 2.2 e consiste in un generatore di emissione spontanea amplificata (ASE, Amplified Stimulated Emission). Lo spettro di tale sorgente tra 1500 nm e 1600 nm è mostrato in Fig. 2.3.

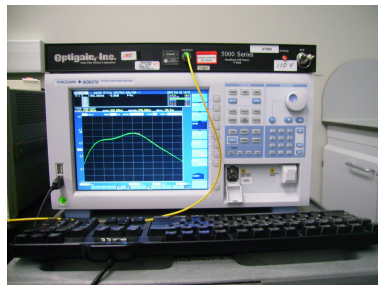


Figura 2.2: Analizzatore di spettro e sorgente Ase

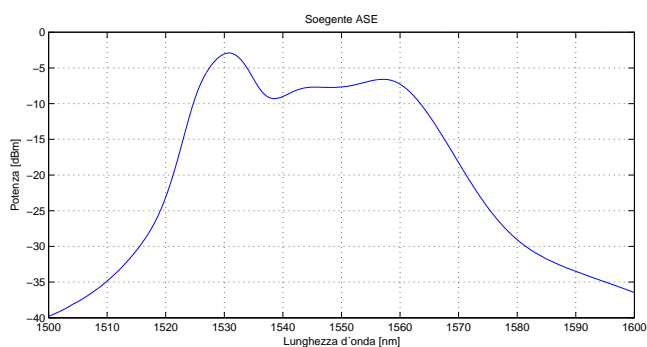


Figura 2.3: Spettro della sorgente ASE utilizzata

L'analizzatore di spettro utilizzato, prodotto dalla Yokogawa, è sempre mostrato in Fig. 2.2.

Per valutare la risposta di un dispositivo, viene prima salvata nella memoria dell'OSA la traccia ASE di Fig. 2.3, connettendo direttamente sorgente e analizzatore di spettro.

Dopodichè si crea il circuito descritto in Fig. 2.1 e lo spettro che si ottiene è la risposta del sensore.

Per visualizzare la risposta del dispositivo è sufficiente fare la sottrazione tra la traccia appena ottenuta e quella della sorgente originale.

Infine per valutare il comportamento del sensore a differenti temperature si ha a disposizione un forno, visibile in Fig. 2.4, con un regolamento in temperatura tra 0 e 1200 gradi. Si inserisce il sensore in fibra dentro il forno, lo si porta alla temperatura desiderata e si osserva lo spettro a tale temperatura.



Figura 2.4: Forno in cui si inserisce il sensore per valutarne la risposta termica

## Capitolo 3

# Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

La parte sensibile del dispositivo, come osservato in precedenza, è costituita da una fibra a cristallo fotonico che supporta la propagazione di due modi. Per realizzare questo progetto si avevano a disposizione due fibre multimodo, ordinate da una ditta francese. Le sezioni trasverse di queste due fibre sono visibili in Fig. 3.1 e in Fig. 3.2 , e i loro parametri sono:

### **FIBRA FRANCESE B**

**Diametro esterno** :  $135 \mu m$

**Nucleo** :  $10,39 \mu m$

**Diametro dei buchi** :  $4,69 \mu m$

**Pitch** :  $7,43 \mu m$

**Air-Filling fraction** : 0,63

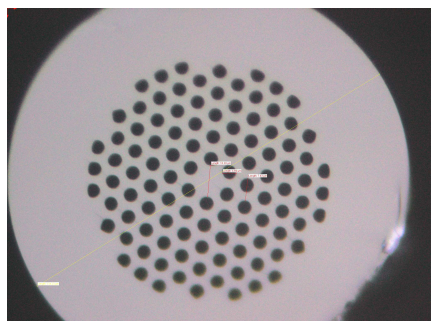


Figura 3.1: Sezione della fibra francese B

## 14 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

### FIBRA FRANCESE I

Diametro esterno :  $135 \mu m$

Nucleo :  $9,77 \mu m$

Diametro dei buchi :  $5,45 \mu m$

Pitch :  $7,52 \mu m$

Air-Filling fraction : 0,72

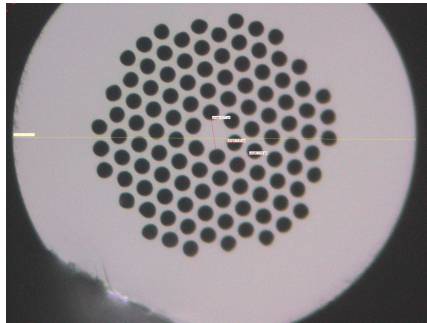


Figura 3.2: Sezione della fibra francese I

In particolare, la fibra B è rigorosamente bimodale mentre la fibra I ha il terzo modo al taglio.

L'obiettivo è di trovare una giunzione tra la fibra standard e quella a cristallo fotonico tale da massimizzare le prestazioni del sensore.

## 3.1 Collassamento dei buchi e diffrazione del campo

### 3.1.1 Massimizzazione della potenza trasmessa

I primi esperimenti sono stati effettuati cercando di massimizzare la potenza trasmessa, come mostrato in [16].

In tale articolo viene ottimizzata la giunzione tra fibre standard e fibre a cristallo fotonico in modo da minimizzare le perdite. Infatti dal momento che le PCF sono comunemente utilizzate per circuiti ottici, è importante trovare una maniera per integrarle con fibre standard perdendo minor potenza possibile.

In questo articolo i diametri modali della fibra standard e della PCF sono praticamente uguali, perciò la configurazione del campo all'interno delle due fibre è grossomodo la stessa.

Effettuando una giunzione con una PCF, i suoi buchi tendono a collassare per l'effetto del calore. In questo modo viene a crearsi una zona in cui manca la struttura guidante e quindi il campo elettromagnetico non è più confinato. Questa è la maggiore causa di perdite di potenza in giunzioni tra questo tipo di fibre.

Si è provato quindi a ripetere questo esperimento eseguendo una giunzione tra SMF e fibra francese B. Il risultato ottenuto è mostrato in Fig. 3.3. Come si può vedere sembra che sia stato raggiunto l'obiettivo prefissato: i buchi della PCF non collassano e c'è una transizione diretta tra le due fibre.

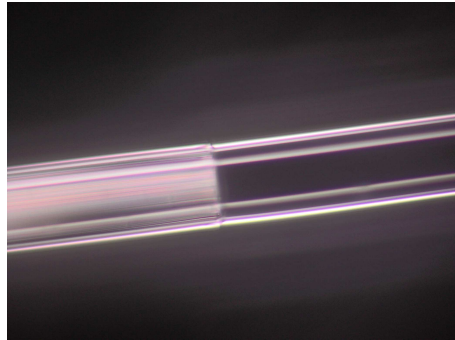


Figura 3.3: Giunzione tra fibra standard e fibra a cristallo fotonico

Si è provato quindi a costruire un dispositivo con questo tipo di giunzione, la cui risposta è visibile in Fig. 3.4.



Figura 3.4: Risposta del dispositivo

Si può chiaramente notare che, benchè le perdite di inserzione siano molto basse (attorno ai 0,8 dB), non esiste un pattern d'interferenza sinusoidale. Ciò è dovuto al fatto che questo tipo di giunzione è finalizzata a ridurre le perdite, accoppiando tutta la potenza della fibra standard sul modo fondamentale della fibra a cristallo fotonico, in quanto ha una configurazione di campo molto simile. Il secondo modo invece non viene eccitato.

### 3.1.2 Analisi teorica

Per spiegare il risultato precedente è necessario considerare la distribuzione di campo dei primi due modi di una fibra a cristallo fotonico.

In Fig. 3.5(a) e in Fig. 3.5(b) è mostrata l'intensità di campo rispettivamente del primo e del secondo modo di una PCF. Tali immagini sono state ottenute con una simulazione numerica.

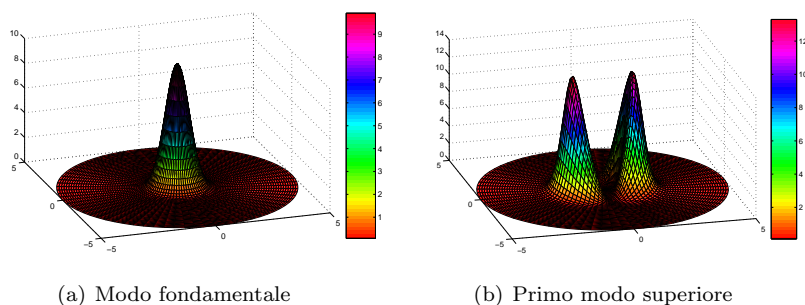


Figura 3.5: Visione tridimensionale dell'intensità dei primi due modi di una PCF

Come si può vedere il modo fondamentale della PCF è a simmetria dispari e ha una distribuzione di campo grossomodo gaussiana. Quindi è molto simile al campo che proviene dalla fibra singolo modo. Il secondo modo della PCF invece è a simmetria pari con uno zero nel suo centro.

In generale l'accoppiamento di potenza dipende dall'integrale di sovrapposizione tra i due modi (quello da cui proviene la luce e quello in cui viene trasmessa). Tuttavia è ragionevole pensare che illuminando la PCF con un campo gaussiano (quello della fibra standard), verrà eccitato meglio il modo dispari che ha un massimo nel centro, piuttosto che il modo pario che nel centro ha uno zero.

Per riuscire ad eccitare anche il secondo modo è quindi necessaria una zona di transizione in cui i buchi della PCF siano collassati. Si crea così una regione costituita da pura silice in cui manca la struttura guidante. In tale regione il campo elettromagnetico, non essendo più confinato, è soggetto a diffrazione e aumenta il suo diametro modale riuscendo così ad illuminare anche le zone dove il primo modo superiore presenta i suoi massimi e trasferendo una parte di potenza anche su di esso.

Quando un campo gaussiano è soggetto a diffrazione, il suo diametro modale aumenta lungo la coordinata longitudinale  $z$  secondo:

$$MFD(z) = MFD_{(z=0)} \sqrt{1 + \left(\frac{z\lambda}{n\pi\omega_0^2}\right)^2} \quad (3.1)$$

essendo  $\lambda = 1550$  nm la lunghezza d'onda,  $n = 1,47$  l'indice di rifrazione della silice,  $\omega_0$  il diametro sul piano della cintura pari a  $MFD_{(z=0)}/2$  e  $MFD_{(z=0)} = 10,4 \mu m$  il diametro modale di una SMF28 a 1550 nm.

Dalla Fig. 3.6 si può vedere che l'aumento del Mode Field Diameter diventa grossomodo lineare dopo circa  $50 \mu m$ .



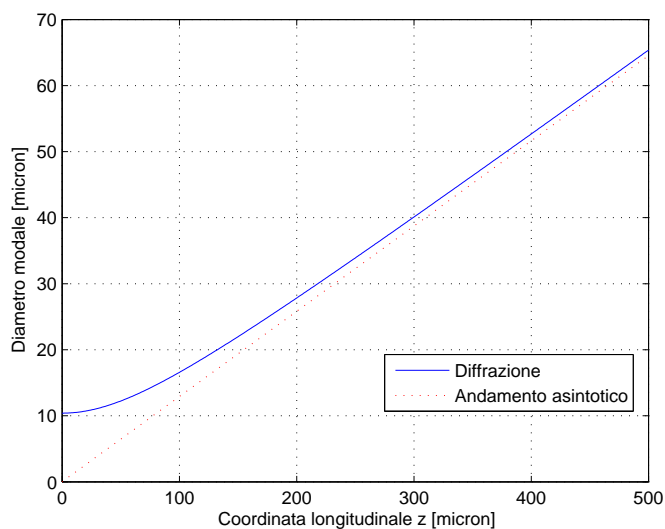


Figura 3.6: Diffrazione del campo nella zona di pura silice

Inoltre maggiore è la potenza accoppiata sul secondo modo, maggiore è il contrasto tra massimi e minimi del pattern d'interferenza. Infatti dall'Eq. 1.1, massimi e minimi (in scala lineare) si hanno rispettivamente per:

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3.2)$$

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \quad (3.3)$$

e quindi il contrasto tra massimi e minimi, in decibel, diventa:

$$contrasto_{[dB]} = 10\log_{10}\left(\frac{I_{max}}{I_{min}}\right) \quad (3.4)$$

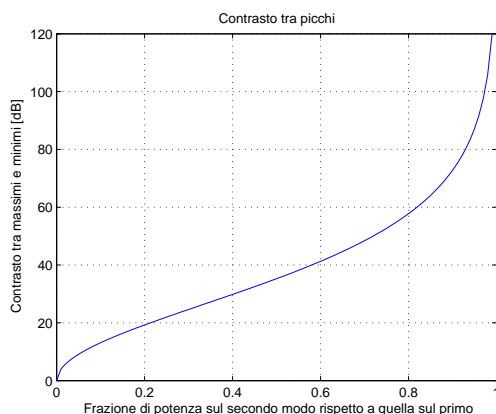
Ipoteticamente se si riuscisse ad accoppiare uguale potenza sui due modi si avrebbe un contrasto infinito.

In Fig. 3.7 è mostrato l'andamento del contrasto tra massimi e minimi al variare del rapporto tra la potenza sul secondo modo e quella sul primo. Quando questo rapporto è zero non si ha potenza sul secondo modo e quindi non si ha interferenza, mentre quando questo rapporto è unitario si ha uguale potenza sui due modi e contrasto infinito.

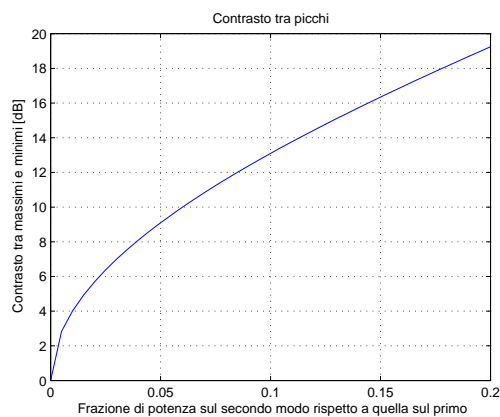
Ha quindi interesse effettuare una giunzione tra le due fibre in cui ci sia una regione in cui i buchi della PCF collassano. In questa zona il campo diffrange e riesce ad accoppiare della potenza anche sul secondo modo. Inoltre tale regione garantisce alla giunzione una maggior resistenza meccanica.

Ovviamente però, maggiore è la regione in cui il campo non è guidato, maggiore sarà la potenza che verrà persa nella giunzione, maggiori saranno quindi le

## 18 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi



(a) Contrasto al variare del rapporto  $\frac{I_2}{I_1}$



(b) Zoom

Figura 3.7

perdite di inserzione del dispositivo.

L'obiettivo è quindi quello di controllare la lunghezza della zona dove i buchi della PCF collassano in modo da ottenere un compromesso tra contrasto e perdite di inserzione.

### 3.2 Controllo della zona di collasso tramite i parametri della giuntatrice

In laboratorio si ha a disposizione una giuntatrice Ericsson FSU-975 mostrata in Fig. 3.8, dotata di due elettrodi che forniscono tre scariche controllate una volta opportunamente allineate le fibre. Tali scariche fondono la silice effettuando la giunzione.

Questa giuntatrice, oltre ad avere dei programmi predefiniti (giunzione tra fibre standard, giunzione con attenuazioni controllate..) permette di controllare



Figura 3.8: Giuntatrice Ericsson FSU-975

i parametri con cui viene effettuata la fusione tra le fibre.

I parametri più significativi sono:

**Prefusione** : durata e corrente con cui viene effettuata la prefusione

**Sovrapposizione** : lunghezza della zona di sovrapposizione tra le fibre mentre subiscono la scarica

**Fusione 1** : durata e corrente della prima scarica di fusione, mentre i nuclei si stanno avvicinando

**Fusione 2** : durata e corrente della seconda scarica di fusione, mentre i nuclei si stanno sovrapponendo

**Fusione 3** : durata e corrente della terza scarica di fusione, quando i nuclei sono già sovrapposti

**Posizione del centro** : posizione della zona dove avviene sovrapposizione dei nuclei. Il centro perfetto è a 255 pixel (il display della splicer ha 510 pixel) e corrisponde alla posizione degli elettrodi.

Si è pensato quindi di controllare la giunzione in questo modo: una volta trovati dei valori di tempi e correnti delle tre scariche che permettessero un collasso dei buchi significativo (dell'ordine dei  $300 \mu m$ ), ridurre o aumentare la lunghezza di questa regione spostando il centro, ovvero allontanando o avvicinando la fibra a cristallo fotonico dalla zona dove avviene la scarica, come mostrato in Fig. 3.9.

La qualità di una giunzione dipende molto da come vengono tagliate le fibre; basta anche solo una piccola irregolarità nel taglio per determinare perdite, disallineamenti o discontinuità nella giunzione. Inoltre la giuntatrice nell'allineare i nuclei delle fibre, se riconosce che un taglio è stato effettuato con un angolo differente ai  $90^\circ$  ottimali rispetto alla direzione longitudinale, non esegue la giunzione (presenta una tolleranza di  $1,5^\circ$ ). Perciò per il taglio delle fibre si è utilizzato una taglierina Fujikura ad alta precisione, visibile in Fig. 3.10.

Per verificare che questo modo di controllare la lunghezza della zona di collasso fosse corretto, si sono effettuate delle prove di giunzione tra fibra standard

## 20 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

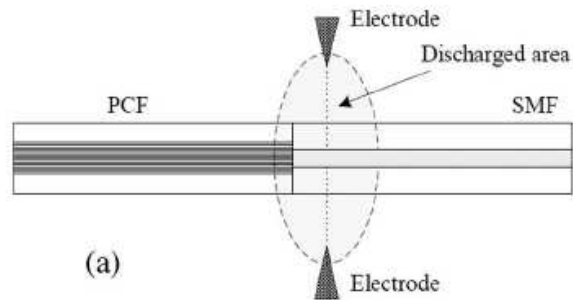


Figura 3.9: Allontanando la fibra a cristallo fotonico dagli elettrodi della giuntatrice, i suoi buchi collasano di meno perchè sono sottoposti a meno calore

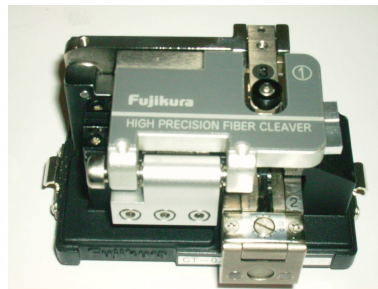


Figura 3.10: Taglierina Fujikura

e fibra francese B, variando la posizione del centro e mantenendo fissi gli altri parametri.

In particolare si è impostato:

**Prefusione** : tempo: 0,2 s, corrente: 5 mA

**Sovrapposizione** : 10  $\mu m$

**Fusione 1** : tempo: 0,3 s, corrente: 10 mA

**Fusione 2** : tempo: 2 s, corrente: 12 mA

**Fusione 3** : tempo: 2 s, corrente: 12 mA

**Posizione del centro** : variabile

I risultati di queste prove sono espressi in Tab. 3.1, dove ad ogni posizione del centro è associata la corrispondente lunghezza della regione di collasso. Come detto sopra, porre il centro a 255 significa effettuare la scarica esattamente nell'interfaccia tra le due fibre, aumentare questo valore significa spostare la scarica nella zona della PCF che quindi subirà un collasso maggiore, mentre diminuirlo equivale a spostare la scarica nella zona della fibra standard e far

Posizione del centro [pixel]	Lunghezza della zona collassata [ $\mu m$ ]
295	340
275	300
255	245
235	185
215	85

Tabella 3.1: Posizione del centro e relativa lunghezza della zona di collasso ottenuta

collassare meno la PCF.

In Fig. 3.11 sono riportate alcune immagini della zona di collasso, ottenute con il microscopio.

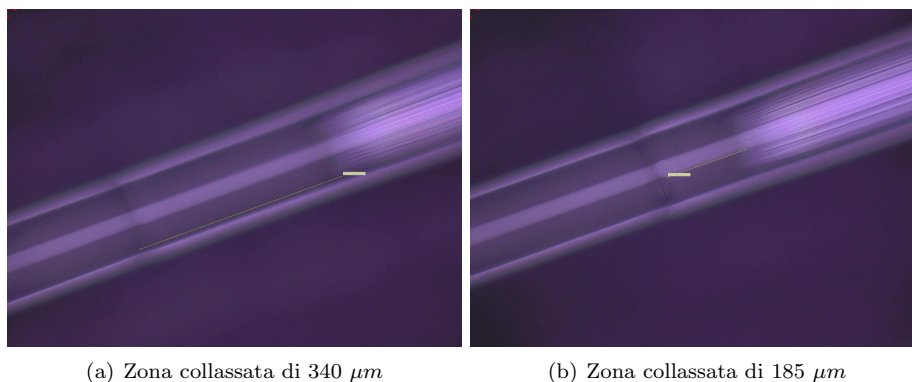


Figura 3.11

### 3.3 Dispositivi con interferenza tra primo e secondo modo: risposta a temperatura ambiente

#### 3.3.1 Interferenza tra modo a simmetria pari e dispari

Sono stati quindi costruiti dei sensori con la fibra francese B, rigorosamente bimodale. I parametri della giuntatrice impostati erano tali da creare una zona di collasso dei buchi di circa 200-250  $\mu m$ . Secondo la Fig. 3.6 infatti, il diametro modale avrebbe grossomodo triplicato la sua estensione, e ciò si è pensato che fosse sufficiente per riuscire ad eccitare il secondo modo della fibra a cristallo fotonico.

Un dispositivo che presenta una risposta marcatamente sinusoidale è stato ottenuto effettuando una giunzione che formava una zona collassata lunga circa 200  $\mu m$ . La sua trasmissione, valutata nella banda tra 1500 nm e 1600 nm, è

## 22 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

mostrata in Fig. 3.12.

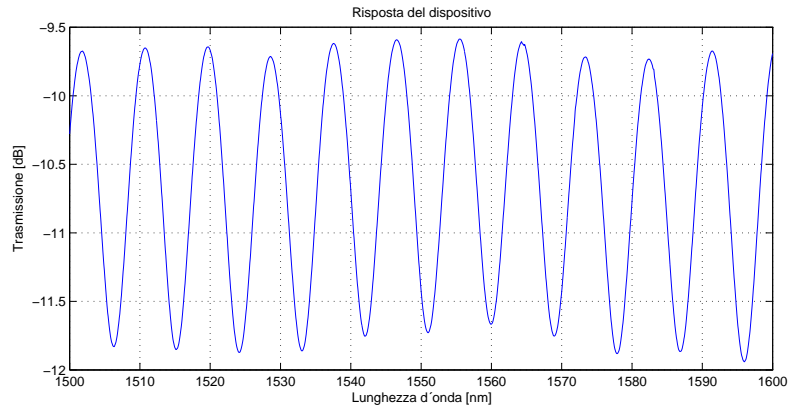


Figura 3.12: Risposta del dispositivo

Si può notare che il sensore presenta delle perdite di inserzione di 9,5 dB e un contrasto tra massimi e minimi della trasmissione di circa 2 dB. Nonostante il contrasto tra i picchi sia basso, il suo periodo principale è ben definito, e ciò lo si può notare meglio nel dominio di Fourier.

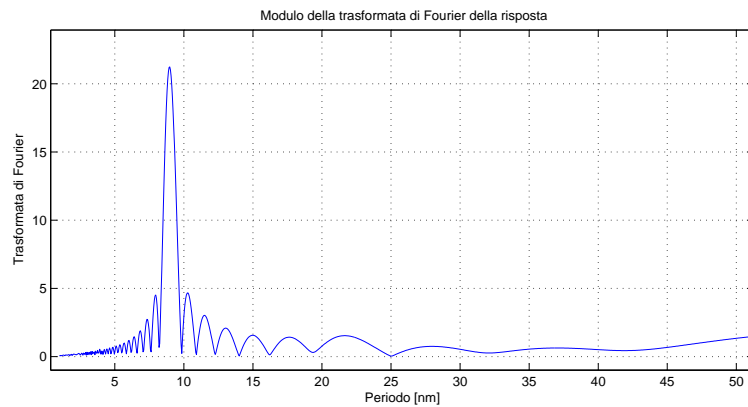


Figura 3.13: Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo

In Fig. 3.13 è infatti mostrata la trasformata di Fourier della risposta (in scala lineare) del dispositivo, calcolata tramite la FFT, in funzione delle lunghezze d'onda corrispondenti ai periodi della risposta. La trasformata assomiglia molto alla funzione Delta del caso ideale; risulta inoltre evidente che il dispositivo presenta un periodo principale di circa 9 nm.

### 3.3 Dispositivi con interferenza tra primo e secondo modo: risposta a temperatura ambiente 23

Per cercare di aumentare il contrasto tra i picchi, si sono realizzati dei dispositivi amentando la lunghezza della regione collassata. Un esempio di risultato ottenuto è mostrato in Fig. 3.14. Tale sensore presenta una zona collassata di circa  $300 \mu m$ .

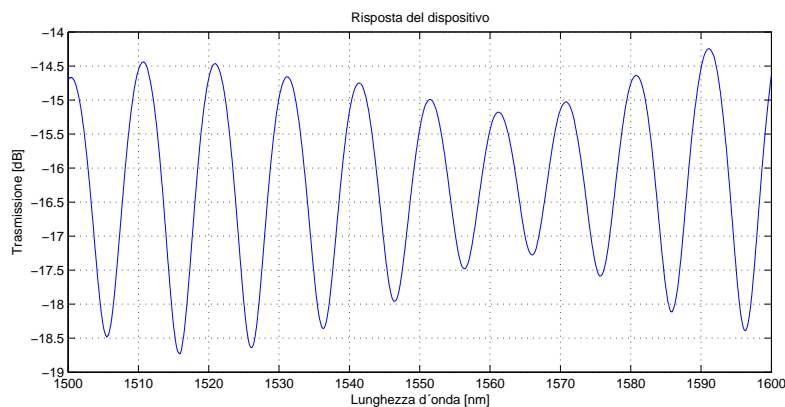


Figura 3.14: Risposta del dispositivo

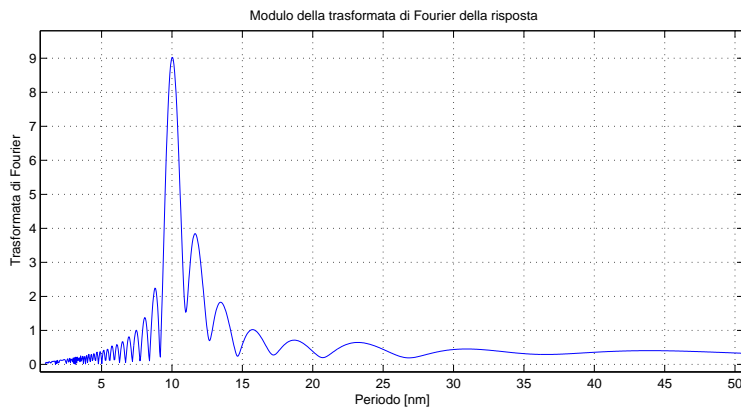


Figura 3.15: Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo

Come si può notare le perdite di inserzione sono ora di circa 14,5 dB ma contemporaneamente la differenza tra massimi e minimi è diventata di circa 4 dB. Inoltre la trasmissione del dispositivo, pur essendo periodica, non è più perfettamente sinusoidale come nel precedente caso. In realtà questo è un problema trascurabile, perchè tramite l'analisi di Fourier, mostrata in Fig. 3.15, si riesce a distinguere chiaramente il periodo principale, che in questo caso è attorno ai 10 nm.

### 3.3.2 Modi del mantello

Le risposte dei dispositivi precedenti erano state ottenute immergendo lo spezzone di fibra a cristallo fotonico in un liquido con lo stesso indice di rifrazione del nucleo in grado quindi di sopprimere eventuali modi evanescenti che si propagano nel mantello.

Se il campo che si propaga in fibra fosse totalmente guidato, la trasmissione visualizzata sull'analizzatore di spettro rimarrebbe invariata una volta posto il liquido di adattamento d'indice.

I dispositivi precedenti invece presentavano una risposta differente a seconda che la fibra fosse o non fosse immersa in questo liquido. Ciò significa che la diffrazione, necessaria per ottenere interferenza con il secondo modo, espande il fronte del campo in modo tale da illuminare anche il mantello e provoca l'eccitazione di modi evanescenti che la fibra non riesce a sopprimere. Questi modi, non essendo guidati, sono sensibili alla minima variazione di posizione della fibra; infatti appena la fibra a cristallo fotonico veniva mossa la risposta cambiava radicalmente.

In Fig. 3.16 è mostrata la risposta dell'ultimo dispositivo presentato, senza che questo fosse immerso nel liquido ad adattamento d'indice.

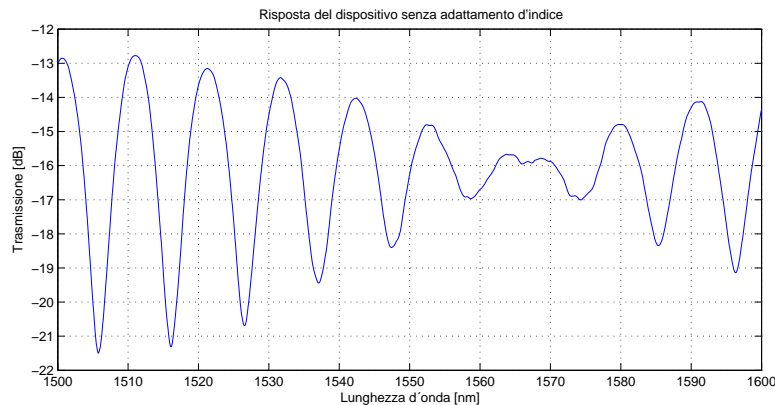


Figura 3.16: Risposta del dispositivo senza adattamento d'indice

È evidente che questa risposta, confrontata con quella in Fig. 3.14, è sensibilmente diversa. La ragione per cui non è chiaramente sinusoidale probabilmente è il fatto che più di due modi concorrono a creare interferenza. Inoltre in questa situazione il sensore presenta meno perdite di inserzione e il contrasto tra massimi e minimi è raddoppiato passando da 4 dB a 8 dB.

Ciò è dovuto al fatto che questa interferenza è determinata da tutto il campo presente in fibra, non solo da quello guidato.

Tuttavia i modi del mantello probabilmente compromettono le prestazioni del sensore in quanto non sono confinati e quindi sono sensibili all'ambiente esterno. Ci si aspetta che un sensore in cui siano presenti modi evanescenti, una volta testato nel forno, non abbia uno spostamento della fase lineare con la temperatura.



## 3.4 Dispositivi con interferenza tra primo e terzo modo: risposta a temperatura ambiente

### 3.4.1 Interferenza tra modi a simmetria dispari

Si è dovuto quindi risolvere il seguente problema: dal momento che il secondo modo della fibra a cristallo fotonico è a simmetria pari, per ottenere interferenza con tale modo è necessaria una zona di pura silice dove il campo diffranga. Contemporaneamente però, tale diffrazione è responsabile della formazione di modi del mantello, la cui presenza impedisce il corretto funzionamento del sensore una volta portato in temperatura.

Non è stato possibile trovare un compromesso che permettesse di soddisfare entrambe le richieste, ed è stato quindi necessario trovare un'altra soluzione.

Non appena il fronte del campo in arrivo dalla fibra standard è soggetto ad una diffrazione tale da subire un allargamento non trascurabile, nella fibra a cristallo fotonico si formano modi evanescenti. L'unica soluzione è quindi limitare tale diffrazione.

Secondo la Fig. 3.6, il diametro modale cresce praticamente linearmente dopo circa  $50 \mu m$ , mentre per lunghezze inferiori si mantiene invariato. Una regione collassata di questa lunghezza quindi non avrebbe permesso di eccitare modi del mantello, però non sarebbe stata sufficiente per creare interferenza con un modo a simmetria pari.

Si è pensato quindi di utilizzare la fibra francese I (si veda la in Fig. 3.2) che supporta la propagazione dei primi tre modi. L'idea era che una zona collassata di lunghezza inferiore ai  $50 \mu m$  sarebbe stata in grado di eccitare il terzo modo della fibra mostrato in Fig. 3.17, anch'esso a simmetria pari, ma non il secondo. In questo modo si sarebbe ottenuta un'interferenza tra il primo e il terzo modo senza la presenza di modi evanescenti nel mantello.

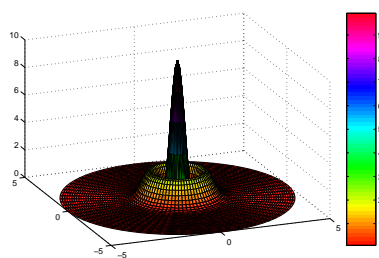


Figura 3.17: Terzo modo di una PCF

Un primo esempio di dispositivo costruito con fibra trimodale, in cui si ha interferenza tra modi a simmetria pari, è mostrato il Fig. 3.18. Tale sensore è stato ottenuto con una giunzione che crea una regione collassata di circa  $70 \mu m$ .

Questo dispositivo presenta delle perdite di inserzione di circa 10 dB e un contrasto tra picchi di 4 dB. La sua risposta rimane immutata una volta che lo spezzone di PCF viene immerso nel liquido di adattamento ed è insensi-

## 26 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

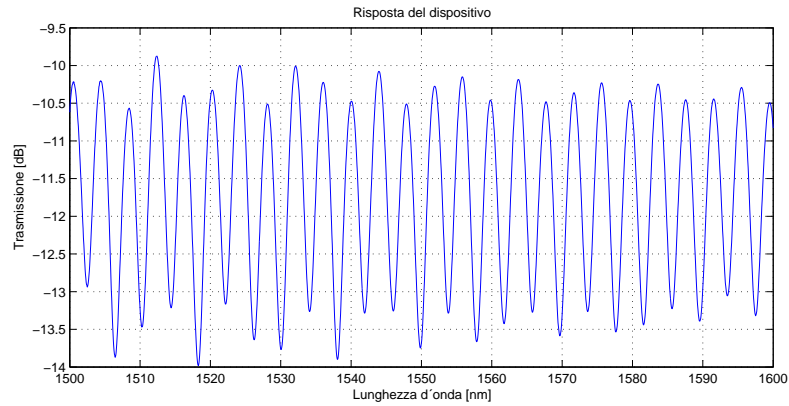


Figura 3.18: Risposta del dispositivo a temperatura ambiente

bile a movimenti della fibra. Ciò significa che il campo presente all'interno è completamente guidato. Si nota chiaramente un'interferenza tra i due modi. Visualizzando tale risposta nel dominio di Fourier, Fig 3.19, ci si può rendere conto che il periodo principale è di circa 4 nm. C'è la presenza di un altro periodo significativo attorno ai 10 nm, a testimoniare il fatto che l'interferenza non è perfettamente sinusoidale; tuttavia la sua ampiezza è circa sei volte inferiore, e ciò è sufficiente per poter distinguere univocamente il periodo principale in fase di analisi dei dati.

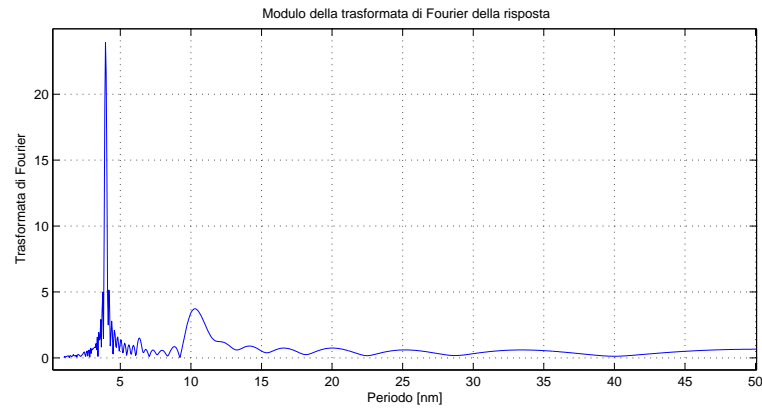


Figura 3.19: Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo

### 3.4.2 Dispositivi a basse perdite

Ottenuto un dispositivo con interferenza tra primo e terzo modo, si è cercato di ottimizzare la giunzione tra le fibre.

Si è pensato che eccitando modi a simmetria pari il campo dovesse diffrangere

### 3.4 Dispositivi con interferenza tra primo e terzo modo: risposta a temperatura ambiente 27

molto poco e si sarebbe potuto ottenere interferenza anche con giunzioni quasi dirette, cose che avrebbe permesso di ottenere dei sensori con perdite molto basse.

Si è provato quindi a costruire dispositivi riducendo la lunghezza della regione collassata e vedere se la risposta presentava un'interferenza significativa.

Un sensore ottenuto con una zona di collasso di circa  $50 \mu m$  è mostrato in Fig. 3.20.

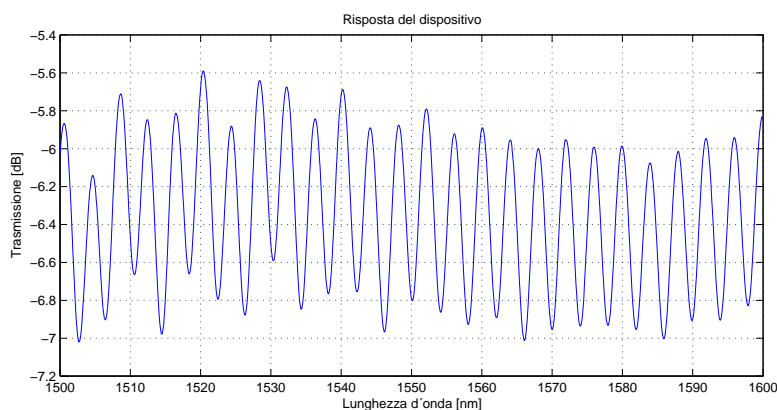


Figura 3.20: Risposta del dispositivo a temperatura ambiente

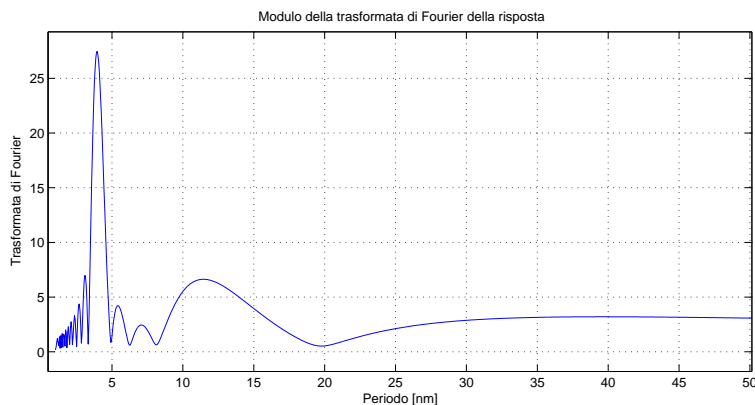


Figura 3.21: Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo

Le perdite sono scese a circa 6 dB ma si ha un minor contrasto tra massimi e minimi, dell'ordine di 1 dB. Infatti dal momento che il campo è soggetto a minor diffrazione, si riduce la potenza che viene persa per il fatto di non essere più guidata, ma contemporaneamente si riduce anche l'integrale di sovrapposizione tra il modo della fibra standard e il terzo modo della fibra a cristallo fotonico,

## 28 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi

determinando un minor contrasto tra picchi.

Il fatto che l'interferenza non sia una sinusoide in realtà non è un problema, in quanto l'analisi dei dati si esegue nel dominio di Fourier e, come si può vedere in Fig. 3.21, nella trasformata della risposta il periodo principale, intorno ai 6 nm, si distingue chiaramente rispetto a eventuali altre periodicità.

Nel tentativo di ottenere un sensore con perdite ancora minori, si è ridotto la lunghezza della regione collassata a circa 20-30  $\mu m$ . La risposta di tale dispositivo è mostrata in Fig. 3.22.

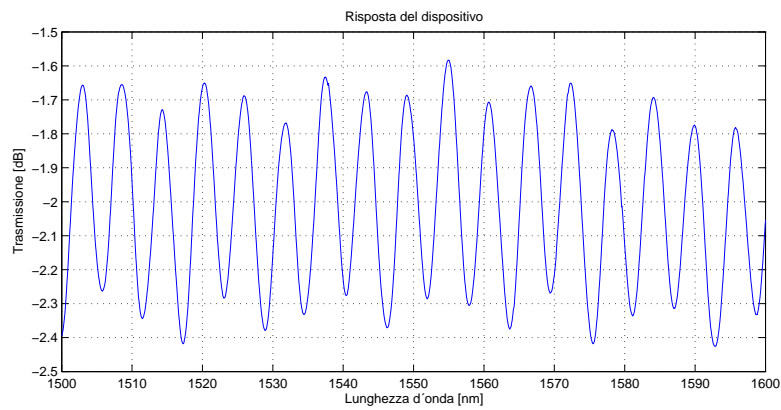


Figura 3.22: Risposta del dispositivo a temperatura ambiente

Come si può notare le perdite di inserzione sono molto basse, di circa 1,7 dB, e la differenza tra massimi e minimi è scesa a 0,7 dB. Nuovamente l'interferenza non ha la forma di una sinusoide però nel dominio di Fourier, Fig. 3.23, il periodo principale è perfettamente distinguibile.

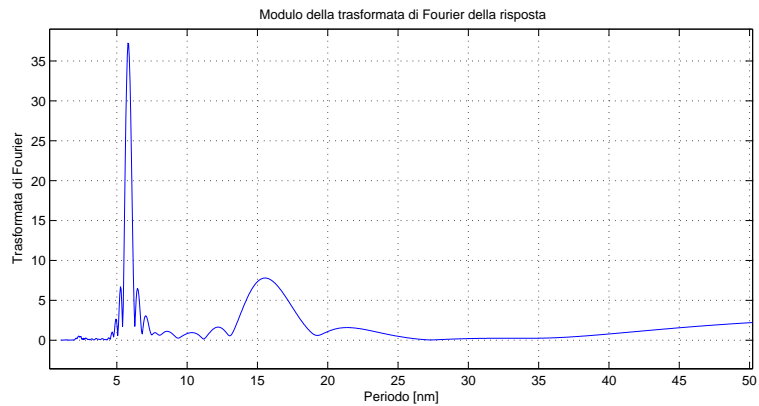


Figura 3.23: Trasformata di Fourier della risposta del dispositivo

### 3.5 Controllo del periodo

Una specifica per poter rendere commerciale il sensore è quella di poter controllare il periodo.

Secondo l'Eq. 1.9 il periodo dell'interferenza  $\Lambda$  è dato da:

$$\Lambda = \frac{\lambda_0^2}{\Delta n(T_0)L(T_0)} \quad (3.5)$$

Ponendo  $\lambda_0 = 1550$  nm, ovvero la portante della sorgente, il periodo è inversamente proporzionale alla lunghezza della zona sensibile  $L$  (a temperatura ambiente) e alla differenza tra indici efficaci dei modi a temperatura ambiente  $\Delta n(T_0)$ .

Per calcolare quest'ultimo dato, incognito, sono stati realizzati diversi dispositivi di lunghezza diversa, se ne è valutato il periodo principale grazie alla trasformata di Fourier, per ogni campione si è ricavato il corrispondente valore di  $\Delta n(T_0)$  e si è considerato il valore medio.

La Fig. 3.24 mostra il valore della differenza tra indici efficaci per ogni campione realizzato e il valore medio calcolato. Si ottiene un valore medio di  $\Delta n(T_0) = 0,0168$  con una deviazione standard di  $5,23 \times 10^{-4}$ .

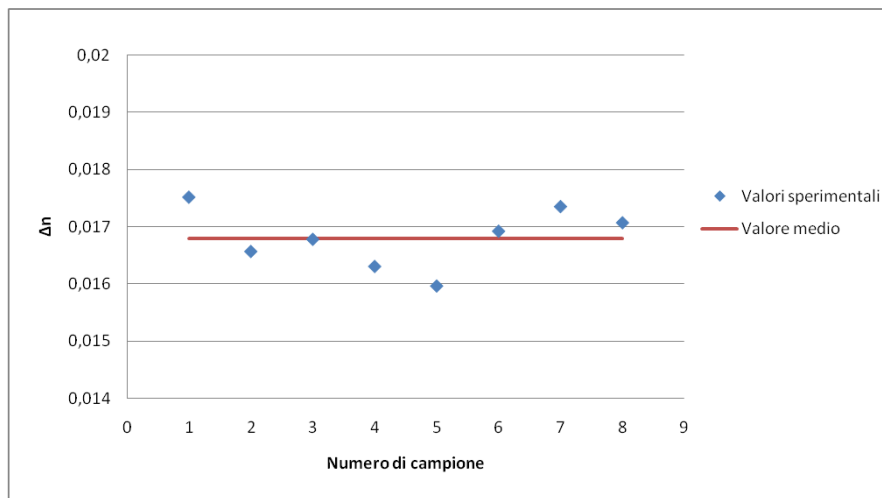


Figura 3.24: Valori sperimentali per la differenza tra indici di rifrazione e valore medio

In Fig. 3.25 invece è mostrato il periodo in funzione della lunghezza del sensore. I singoli punti costituiscono i campioni sperimentali mentre la curva continua rappresenta l'andamento teorico del periodo ottenuta utilizzando il  $\Delta n(T_0)$  medio.

Si nota che i dati teorici e quelli sperimentali sono in ottimo accordo.

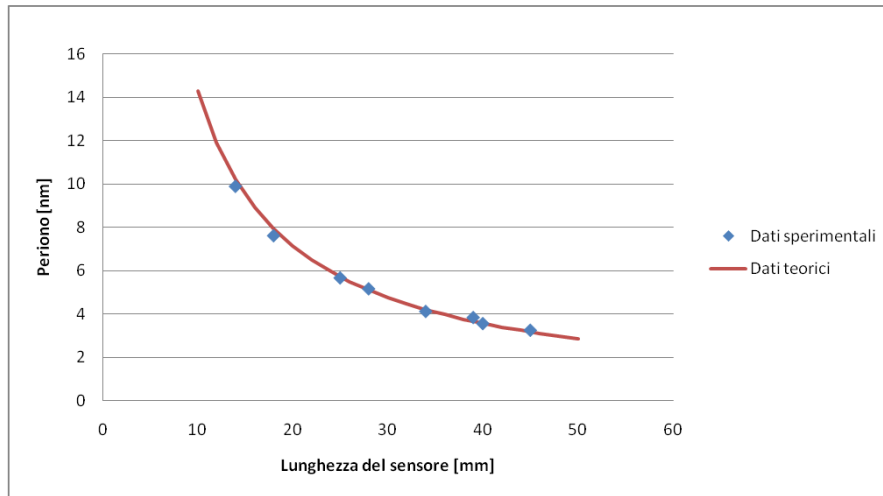


Figura 3.25: Valori teorici e sperimentali del periodo in funzione della lunghezza della zona sensibile

È quindi possibile controllare il periodo dell'interferenza tramite la lunghezza del sensore.

### 3.6 Conclusioni

Si avevano a disposizione due tipi di fibra a cristallo fotonico, una bimodale e una che supportava anche il terzo modo.

I primi tentativi sono stati fatti con la fibra bimodale ed erano finalizzati a massimizzare la potenza trasmessa. In questo modo non si è ottenuta interferenza tra i modi. Si è quindi capito che per eccitare il secondo modo era necessario far diffrangere il campo creando una regione in cui i buchi della fibra a cristallo fotonico collassavano.

Dopo aver trovato il modo di controllare la lunghezza di tale regione tramite il programma della giuntatrice, si sono ottenuti dei dispositivi con la fibra bimodale in cui l'interferenza tra i primi due modi creava una risposta sinusoidale. Il problema di tali dispositivi era il fatto che la diffrazione del campo determinava anche l'eccitazione di modi del mantello che, non essendo guidati, probabilmente avrebbero compromesso le prestazioni del sensore una volta portato in temperatura.

Si è quindi pensato di utilizzare la fibra che supportava anche il terzo modo, costruendo il sensore con una giunzione che avrebbe collassato la PCF in una zona molto corta. In questo modo si sarebbe evitato di creare modi evanescenti nel mantello e si sarebbe ottenuta interferenza tra il primo e il terzo modo, entrambi a simmetria pari. Il secondo modo invece, essendo a simmetria dispari, non sarebbe stato eccitato.

Tali sensori presentavano una risposta insensibile a movimenti della fibra e alla presenza di un liquido per l'adattamento dell'indice, e ciò stava a significare che

il campo era totalmente guidato. L'interferenza ottenuta non era perfettamente sinusoidale e il contrasto tra i suoi massimi e minimi era molto basso. Tuttavia tramite l'analisi di Fourier è sempre stato possibile distinguere con certezza il periodo principale dell'interferenza. Inoltre il fatto di ottenere dispositivi con giunzioni quasi dirette ha permesso di ridurre al minimo le perdite di inserzione, arrivando ad ottenere sensori con perdite inferiori ai 3 dB.

Infine sono stati realizzati diversi campioni di lunghezza diversa e se ne è valutato il periodo principale nel dominio di Fourier. Ciò ha permesso di stimare la differenza tra indici efficaci dei modi e di controllare quindi il periodo del sensore mediante la sua lunghezza.

## 32 Ottimizzazione della giunzione tra le fibre: interferenza tra modi



## Capitolo 4

# Risposta in temperatura

### 4.1 Descrizione dell'apparecchiatura

Il circuito utilizzato per testare il comportamento dei dispositivi, una volta portati in temperatura, è mostrato in Fig. 4.1.

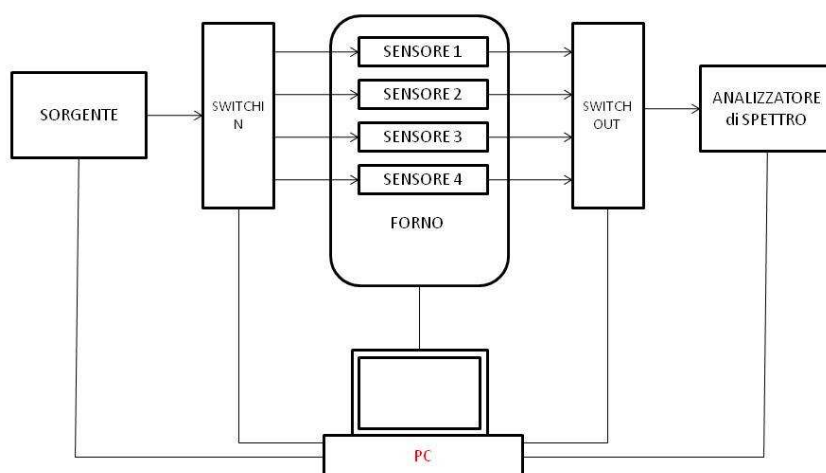


Figura 4.1: Circuito utilizzato per interrogare i sensori

È stato possibile interrogare contemporaneamente quattro sensori, avendo a disposizione due switch a quattro ingressi e un'uscita. Allo switch-IN è connessa in ingresso la sorgente ASE, e nelle quattro uscite i relativi sensori. Ogni sensore

è inserito nel forno e termina su una porta di ingresso dello switch-OUT. La sua uscita è infine connessa all'analizzatore di spettro.

Il forno è dotato di un programma con cui controllare la sua temperatura nel tempo. È quindi possibile testare il comportamento di sensori facendo salire e scendere la temperatura a piacere.

L'intero circuito è gestito via computer.

Il software di controllo, sviluppato tramite Labview, necessita innanzitutto della traccia di normalizzazione, ottenuta connettendo i due switch attraverso la stessa porta (in questo modo si includono le perdite degli switch). Poi tramite il forno, si programma il ciclo di temperature che si intende eseguire. Il software interroga a turno i quattro sensori selezionando la relativa porta degli switch, esegue la scansione della traccia visualizzata dall'OSA e la salva in un file binario insieme all'istante temporale in cui è stata presa e alla temperatura a cui si trovava il forno. In questo modo è possibile ottenere un grafico in cui si visualizza la variazione nel tempo della temperatura e lo spostamento della fase della risposta nello stesso istante temporale.

Come già anticipato in precedenza, per ricavare lo spostamento di lunghezza d'onda della fase dalla traccia visualizzata sull'analizzatore di spettro si ricorre all'analisi nel dominio di Fourier.

Infatti dall'Eq. 1.8, ci si aspetta che l'interferenza ottenuta sia una funzione sinusoidale dove il periodo rimane fisso, Eq. 1.9, mentre la sua fase ha una dipendenza lineare dalla temperatura, Eq. 1.10, a causa dell'effetto termo-ottico. Quindi per ogni traccia, acquisita ad una temperatura nota, si esegue la trasformata di Fourier effettuata tramite la DFT (algoritmo di calcolo più preciso), si seleziona la lunghezza d'onda corrispondente al periodo principale (che come già notato si distingue chiaramente rispetto a eventuali periodicità secondarie), e si analizza il valore della fase in corrispondenza di tale lunghezza d'onda. Lo spostamento di lunghezza d'onda subito dal coseno si ricava dall'Eq. 1.11. Tale analisi di dati è stata effettuata via Matlab.

Per ogni sensore quindi viene presentato un grafico che mostra la variazione nel tempo della temperatura del forno secondo i cicli impostati e il corrispondente spostamento della fase del pattern di interferenza, e un grafico che relaziona direttamente queste due grandezze.

Se il dispositivo funziona correttamente, la curva della temperatura e quella dello spostamento saranno proporzionali, nel secondo grafico la relazione tra le due grandezze sarà di tipo lineare.

In questo caso ha senso definire la sensibilità del sensore come il coefficiente angolare di tale retta, misurata in pm/grado. Un altro parametro di interesse è l'isteresi: di fatto la retta di sensibilità viene graficata ogni volta che la temperatura viene fatta salire e scendere. Questo serve per valutare se tale curva passa sempre per gli stessi punti, e quindi è una funzione a singolo valore.

I quattro sensori testati sono:

**Sensore 1** : quello mostrato in Fig. 3.14

**Sensore 2** : quello mostrato in Fig. 3.18

**Sensore 3** : quello mostrato in Fig. 3.20

**Sensore 4** : quello mostrato in Fig. 3.22

Ognuno di questi sensori è stato testato mediante tre cicli di temperatura del forno:

**Ciclo 1** : la temperatura viene portata a  $1000^{\circ}\text{C}$  in mezz'ora, viene mantenuta costante per un'ora e poi il forno viene spento in modo che si raffreddi naturalmente fino a tornare a temperatura ambiente (questa terza fase ha quindi la forma di un esponenziale decrescente)

**Ciclo 2** : la temperatura viene portata a  $1000^{\circ}\text{C}$  in mezz'ora, viene mantenuta costante per quattro ore e in seguito si spegne il forno. Questo ciclo serve per valutare il comportamento dei sensori quando la temperatura è mantenuta per molto tempo ad alti valori.

**Ciclo 3** : la temperatura dopo essere stata portata a  $1000^{\circ}\text{C}$  in mezz'ora, subisce quattro volte una discesa fino a  $800^{\circ}\text{C}$  e una risalita fino a  $1000^{\circ}\text{C}$ , dopodichè il forno viene spento. Questo ciclo serve per valutare se i sensori sono in grado di seguire rapide variazioni di temperature elevate.

La retta di sensibilità con la relativa valutazione dell'isteresi viene ricavata dal terzo ciclo, quanto è l'esperimento dove la temperatura subisce più variazioni.

## 4.2 Primo sensore

La Fig. 4.2 mostra la risposta del primo sensore al primo ciclo di temperatura e si può notare che il dispositivo non ha buone prestazioni. Lo spostamento della fase non segue l'andamento della temperatura del forno.

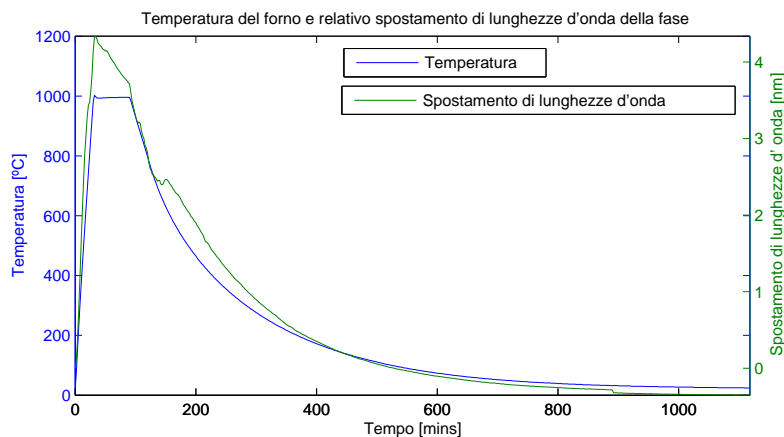


Figura 4.2: Risposta del primo sensore al primo ciclo di temperatura

Come si vede in Fig. 4.3, quando la temperatura viene mantenuta costante a 1000°C per molto tempo questo dispositivo subisce una notevole variazione di fase. Nemmeno quando la temperatura non cambia la risposta di questo dispositivo ha un comportamento corretto.

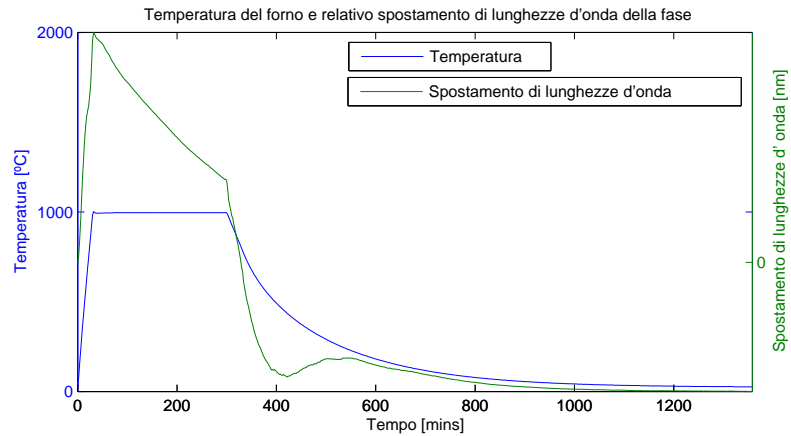


Figura 4.3: Risposta del primo sensore al secondo ciclo di temperatura

Anche quando è stato sottoposto al terzo ciclo, il primo sensore non ha fornito risultati soddisfacenti: in Fig. 4.4 si vede che nuovamente la sua risposta non è coerente con i valori di temperatura.

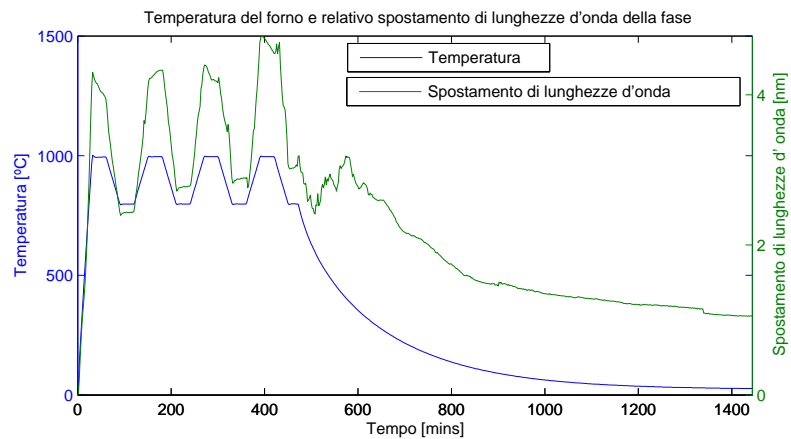


Figura 4.4: Risposta del primo sensore al terzo ciclo di temperatura

La Fig. 4.5 mostra i valori dello spostamento subito dalla fase per ogni temperatura del terzo ciclo: non solo l'andamento di tale curva non è lineare, ma per temperature uguali si ottengono dei valori di lunghezza d'onda molto differenti.

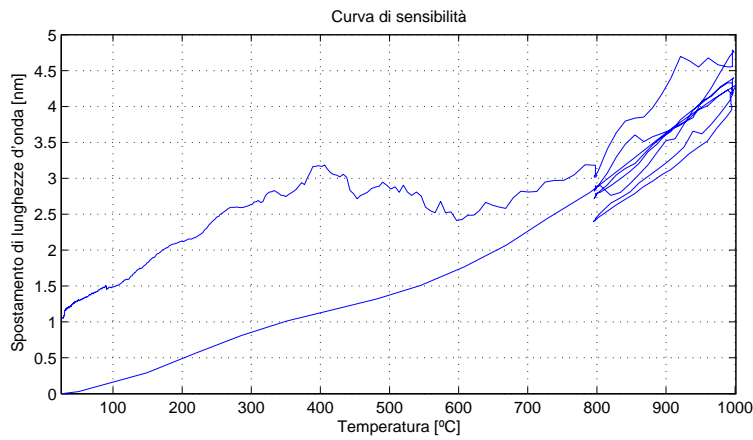


Figura 4.5: Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura

Come ci si poteva aspettare la presenza di modi del mantello compromette le prestazioni del sensore. In questo caso la risposta in temperatura dell'interferometro non è concorde con l'analisi teorica che ci si aspetta, e il comportamento del dispositivo pare avere una natura aleatoria.

### 4.3 Secondo sensore

In Fig. 4.6 è mostrato lo spostamento della fase del secondo sensore relativo al primo ciclo di temperatura. La forma delle due curve è identica e ciò significa che il dispositivo ha avuto una risposta lineare.

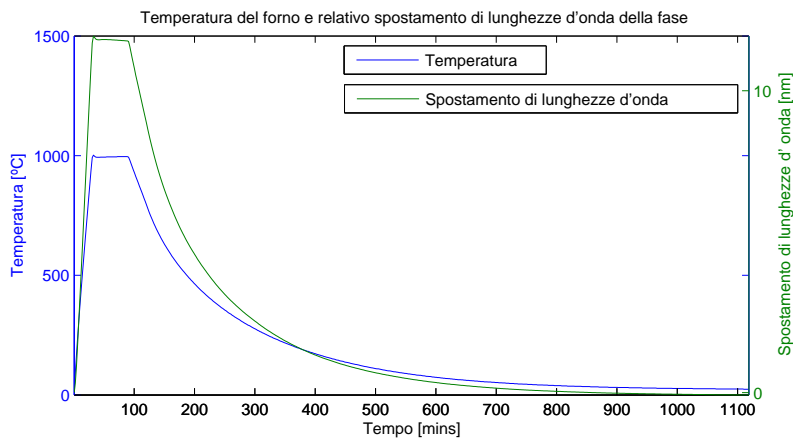


Figura 4.6: Risposta del secondo sensore al primo ciclo di temperatura

Dalla Fig. 4.7 si nota che quando la temperatura del forno viene mantenuta

al alti valori per molto tempo, il dispositivo non riesce a mantenere costante la sua risposta, che presenta una leggera flessione.

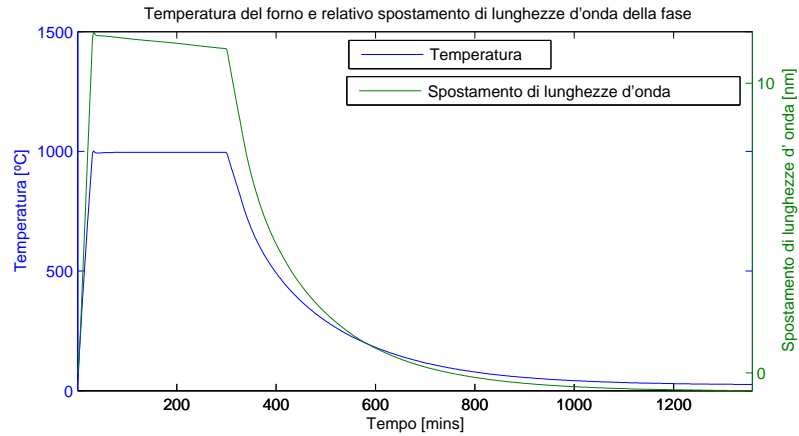


Figura 4.7: Risposta del secondo sensore al secondo ciclo di temperatura

Nel terzo ciclo la temperatura subisce rapide variazioni, pur mantenendosi a valori elevati. Come dimostra la Fig. 4.8 il sensore è in grado di seguire molto bene tali cambiamenti.

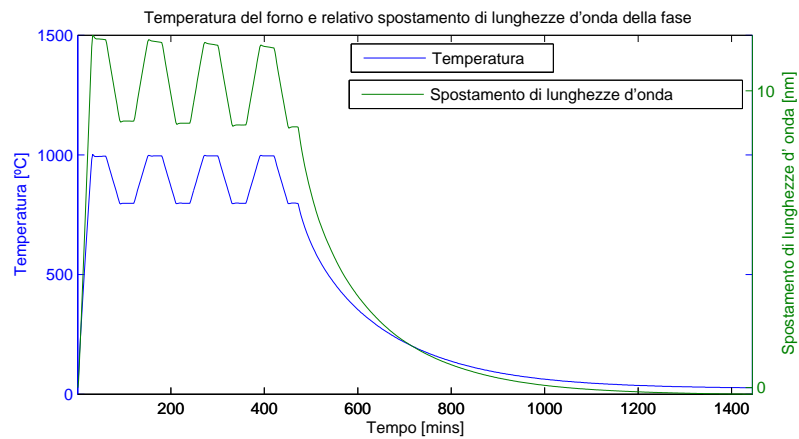


Figura 4.8: Risposta del secondo sensore al terzo ciclo di temperatura

La curva di sensibilità, mostrata in Fig. 4.9, ha un andamento lineare come ci si aspettava. Ciò dimostra che questo dispositivo funziona correttamente come sensore in quanto ad una variazione di temperatura corrisponde sempre lo stesso spostamento della fase della sua interferenza. In particolare la sua sensibilità è di 12 pm/grado.

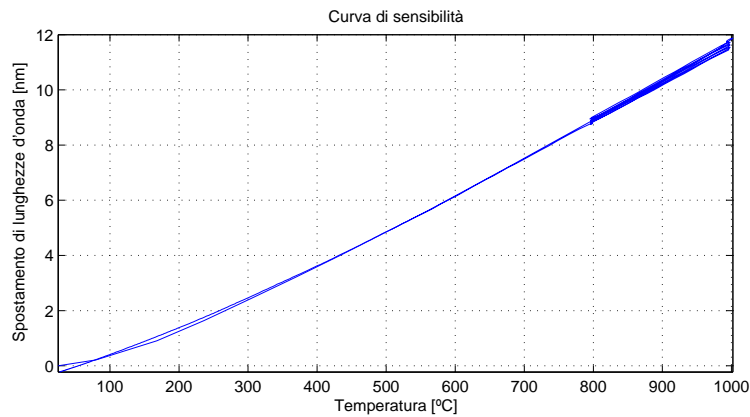


Figura 4.9: Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura

#### 4.4 Terzo sensore

Viene mostrata in Fig. 4.10 la risposta del terzo sensore al primo ciclo a cui è stato sottoposto. Il dispositivo è in grado di seguire bene l'andamento della temperatura.

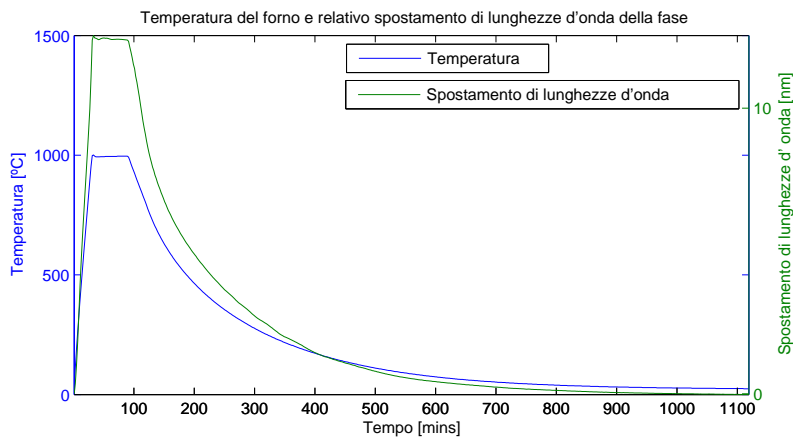


Figura 4.10: Risposta del terzo sensore al primo ciclo di temperatura

In Fig. 4.11 si può vedere lo spostamento della fase della risposta del sensore associato al secondo ciclo di temperatura. Si nota che anche questo dispositivo, come quello precedente, non è in grado di mantenere invariata la sua risposta quando la temperatura rimane a lungo costante intorno ai 1000°C. La fase tende ad avere di nuovo un decremento, in particolare cala di circa un nanometro nell'arco delle quattro ore in cui la temperatura rimane fissa. Tale decremento si traduce in un'incertezza sulla temperatura di un centinaio di gradi centigradi.

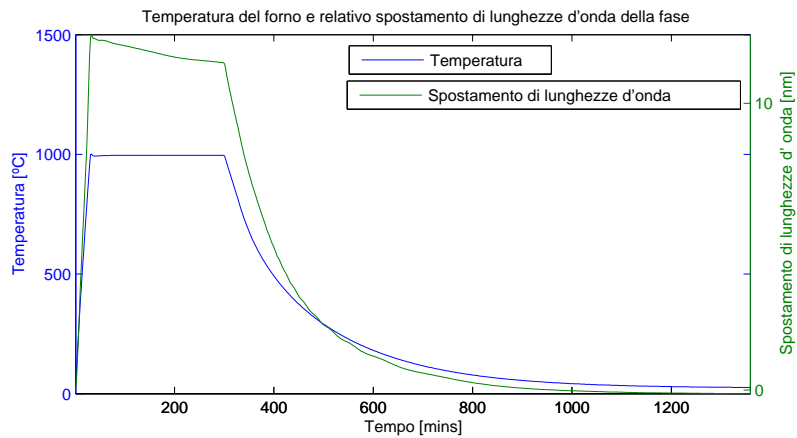


Figura 4.11: Risposta del terzo sensore al secondo ciclo di temperatura

La Fig. 4.12 mostra la risposta del sensore una volta sottoposto al terzo ciclo. Anche questo dispositivo è in grado rispondere bene a rapide variazioni della temperatura.

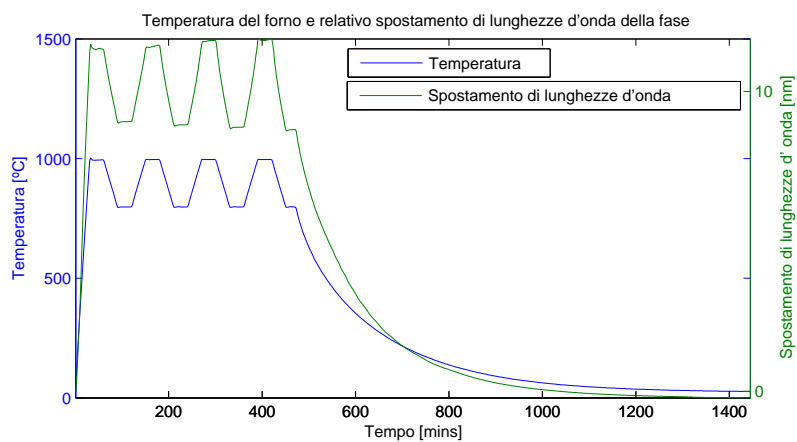


Figura 4.12: Risposta del terzo sensore al terzo ciclo di temperatura

Come ci si aspettava, la relazione tra temperatura e spostamento di fase è nuovamente lineare, con una sensibilità 12 pm/grado. La curva di Fig. 4.13, ottenuta con i dati del terzo ciclo di temperatura, è caratterizzata da una piccola isteresi: la fase di salita e quella di discesa presentano una leggera differenza per temperature tra i 200°C e i 500°C. Inoltre, come notato in precedenza, questo dispositivo risponde bene quando la temperatura varia rapidamente mentre ha prestazioni peggiori quando la temperatura rimane costante ad alti valori per molto tempo.



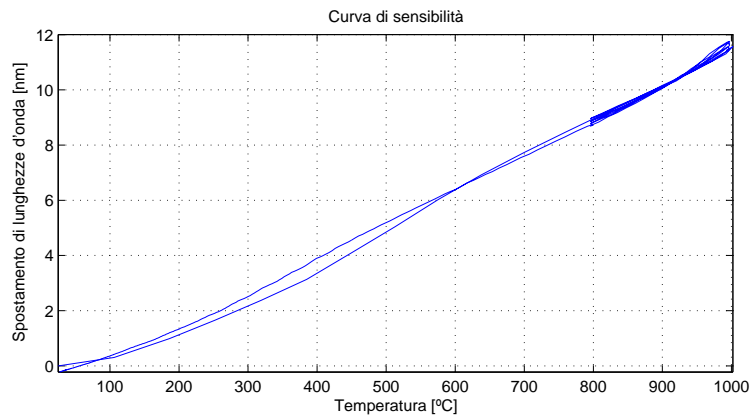


Figura 4.13: Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura

## 4.5 Quarto sensore

La Fig. 4.14 presenta la risposta del quarto sensore al primo ciclo di temperatura. Ci si può rendere conto che anche questo dispositivo presenta buone prestazioni dal fatto che nuovamente la curva di temperatura e quella dello spostamento in lunghezza d'onda della fase hanno lo stesso andamento.

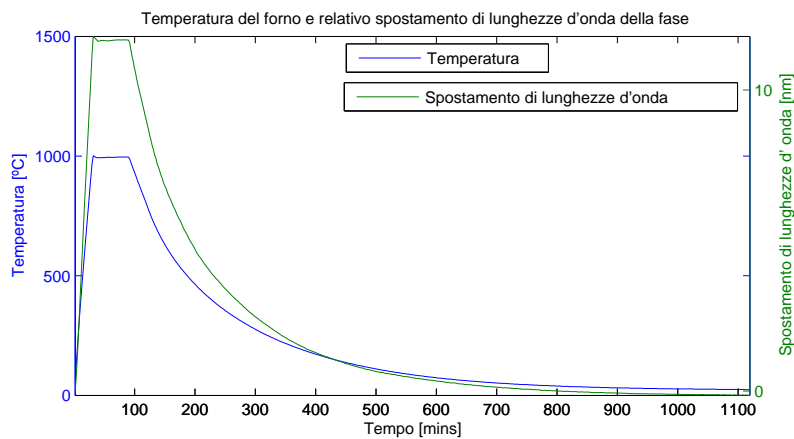


Figura 4.14: Risposta del quarto sensore al primo ciclo di temperatura

Anche la risposta di questo dispositivo al secondo ciclo ha dato buoni risultati. In particolare in Fig. 4.15 si nota che, diversamente dai casi precedenti, durante l'arco delle quattro ore in cui la temperatura viene mantenuta a 1000°C la fase dell'interferenza resta costante.

In Fig. 4.16 è mostrata la risposta di questo dispositivo al terzo ciclo di temperatura. Per valori di temperatura alti l'andamento dello spostamento del-

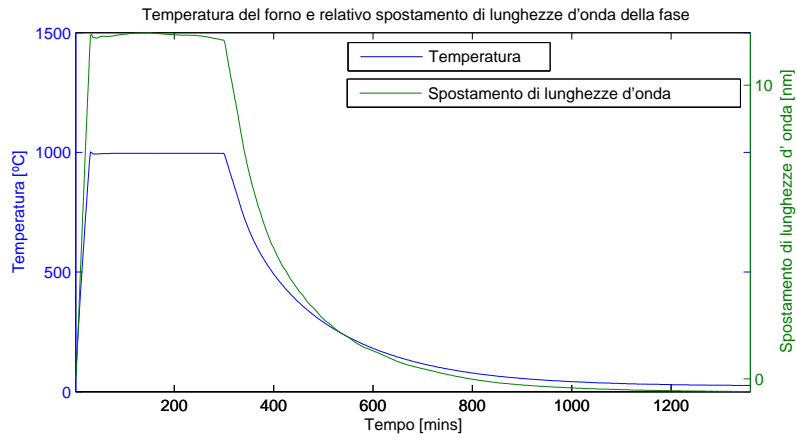


Figura 4.15: Risposta del quarto sensore al secondo ciclo di temperatura

la fase è leggermente irregolare rispetto a quello della temperatura del forno.

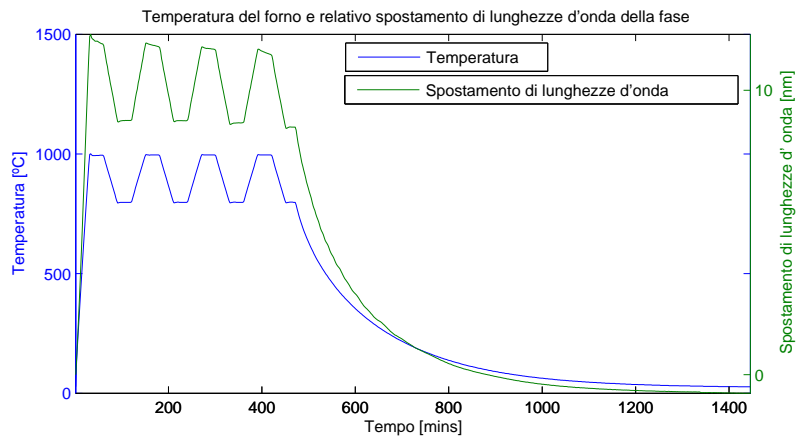


Figura 4.16: Risposta del quarto sensore al terzo ciclo di temperatura

La curva di sensibilità, ottenuta con i dati del terzo ciclo di temperature, presenta un andamento lineare. Si nota però una leggera isteresi per alte temperature, tra gli 800° e i 1000°. Ciò testimonia, come già notato in precedenza, che questo dispositivo presenta prestazioni peggiori quando la temperatura cambia rapidamente.

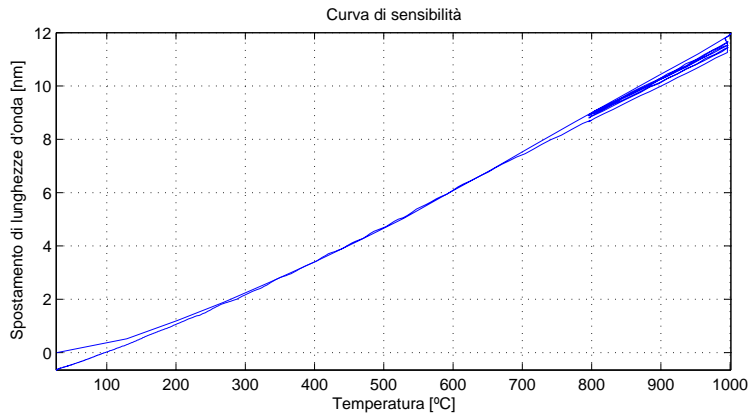


Figura 4.17: Spostamento di lunghezze d'onda in funzione della temperatura

## 4.6 Conclusioni

Si sono testate le prestazioni in temperatura di quattro sensori, il primo che presentava interferenza tra il primo e il secondo modo, mentre gli altri tre tra il primo e il terzo. Ogni sensore è stato sottoposto a tre cicli di temperatura per verificarne il comportamento a temperatura costante e variabile.

Il primo dispositivo non ha avuto buoni risultati. Come ci si aspettava, la presenza di modi non guidati invalida l'analisi teorica su cui si basano questo tipo di sensori, determinando una risposta che pare aleatoria.

I dispositivi ottenuti con interferenza tra modi a simmetria dispari, il cui campo è quindi totalmente guidato, sono in grado di funzionare bene come sensori di temperatura. Presentano infatti uno spostamento della fase dell'interferenza direttamente proporzionale alla temperatura, grazie all'effetto termo-ottico. In particolare il secondo e il terzo sensore si sono dimostrati in grado di seguire bene le variazioni della temperatura. Il quarto sensore funziona meglio quando la temperatura rimane costante o subisce variazioni lente, mentre presenta prestazioni peggiori in presenza di rapidi cambiamenti di temperatura.

Infine si è notato che tutti i dispositivi presentano la stessa sensibilità nonostante la zona sensibile fosse di lunghezza differente (infatti il periodo della loro interferenza non è lo stesso). Ciò significa che, secondo l'Eq. 1.10, la sensibilità di questi sensori dipende principalmente dalla dipendenza dalla temperatura della differenza tra indici efficaci dei modi  $\frac{\partial \Delta n}{\partial T}$ .



## Capitolo 5

# PCF hole inflation: analisi teorica e risultati sperimentali

### 5.1 PCF Hole Inflation

Dopo aver realizzato il sensore utilizzando una fibra a cristallo fotonico adatta, il nuovo obiettivo è stato quello di poter controllare le caratteristiche propagative della PCF, ovvero della parte sensibile del dispositivo, in modo da poterla adattare alle specifiche richieste.

Come già discusso nel Cap. 1.4.3, le proprietà guidanti di una fibra a cristallo fotonico dipendono dalla sua geometria. Era quindi necessario sviluppare una tecnica che permettesse di modificare in modo controllato le dimensioni del diametro dei buchi e del pitch di una PCF pre-esistente. Tale tecnica prende il nome di PCF Hole inflation e, nonostante in letteratura siano già presenti articoli sull'argomento [17], all'ICFO era la prima volta che veniva applicata. Questo processo è basato su un'altra tecnica di post-processing nota: il taper.

#### 5.1.1 Dal taper alla PCF Hole Inflation

Il taper delle fibre è una tecnica nota in letteratura, [18], [19], per ridurre il diametro di una fibra in modo controllato, mantenendo però costante il rapporto tra le dimensioni di nucleo e mantello.

Per analisi approfondite si rimanda a testi specifici sopra citati, mentre qui ci si limita a fornirne dei cenni.

Il funzionamento del taper è descritto in Fig. 5.1. Un tratto di fibra di lunghezza  $L$  viene fissato su due blocchi  $TS_1$  e  $TS_2$ . Tali blocchi sono dotati di un'apposita scanalatura dove viene fissata la fibra e si muovono a velocità controllata in direzioni opposte mantenendola in tensione. Sotto la fibra è posta una fiamma,  $B$ , che si sposta avanti e indietro lungo tutta la lunghezza iniziale della fibra, da  $LS_1$  a  $LS_2$ , con temperatura, velocità, accelerazione e numero di passate controllate.

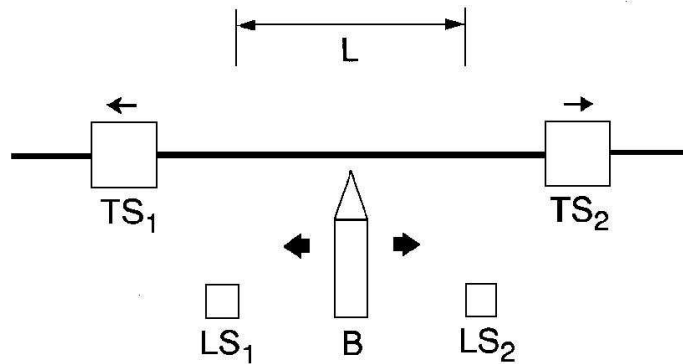


Figura 5.1: Schema del taper

In questo modo si scalda la fibra portando la silice prossima alla sua temperatura di rammollimento (softening point) e la si rende quindi malleabile. Conseguenza del fatto che i blocchi si muovono in direzioni opposte è che il diametro della fibra si assottiglia. Il profilo finale si può vedere in Fig. 5.2: la fibra ha raggio iniziale  $r_0$ , si avranno due zone di transizione coniche lunghe  $Z_0$  dove il raggio  $r(z)$  è in generale funzione della coordinata longitudinale  $z$ , e una lunghezza  $l_w$  dove il raggio  $r_w$  è costante.

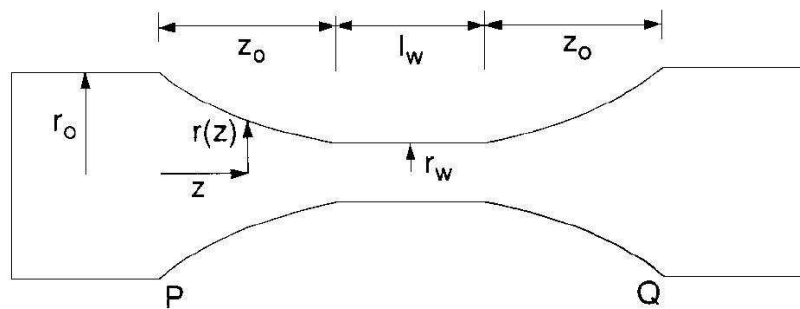


Figura 5.2: Profilo finale di una fibra dopo il taper

La PCF Hole Inflation è una tecnica che combina il taper di una PCF con l'unione di una pressione controllata all'interno dei suoi buchi. Se si applicasse solo il taper i buchi d'aria nella silice tenderebbero a collassare e chiudersi. La pressione fa in modo non solo di evitare il collasso dei buchi, ma anche di determinarne una espansione controllata.

### 5.1.2 Analisi teorica della PCF Hole Inflation

Per un buco cilindrico in un liquido esiste una pressione  $P_{th}$ , detta pressione di soglia, sufficiente ad opporsi al collasso del buco stesso. Tale pressione è legata alla tensione superficiale del liquido  $\gamma$  e al diametro  $d$  del buco secondo, [20]:

$$P_{th} = \frac{2\gamma}{d} \quad (5.1)$$

Quindi per un dato diametro  $d$ , una pressione interna  $P$  determina un'espansione o un collasso del buco stesso a seconda che sia rispettivamente maggiore o minore di  $P_{th}$ . Nonostante la viscosità della silice cambi rapidamente per temperature prossime al suo softening point, la sua tensione superficiale si mantiene grossomodo costante [21].

Perciò, secondo questa teoria, il fatto che un buco si espanda o collasi dipende solo dal suo diametro iniziale e dalla pressione applicata, mentre la temperatura del vetro e la differenza di pressione  $P - P_{th}$  determina solo la velocità dell'espansione o del collasso.

Assumendo per la tensione superficiale della silice il valore di [21]  $\gamma = 0.3 \text{ J/m}^2$ , si può riesprimere l'Eq. 5.1 secondo:

$$P_{th}[\text{bar}] = \frac{6}{d[\mu\text{m}]} \quad (5.2)$$

Ci si aspetta quindi che il processo sia ripetibile e che permetta di controllare l'espansione o il collasso dei buchi di una PCF tramite la pressione applicata. Per valori di pressione inferiori a  $P_{th}$  ci si aspetta un collasso dei buchi mentre per valori superiori a  $P_{th}$  ci si aspetta un'espansione.

## 5.2 Strumentazione, processo e primi risultati

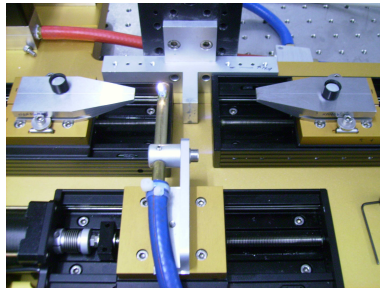
### 5.2.1 Descrizione della strumentazione

La tapering machine utilizzata per realizzare tale processo, progettata direttamente dai ricercatori dell'ICFO, è mostrata in Fig. 5.3(a). Come si può vedere è costituita da due blocchi sulla cui scanalatura si fissa la fibra, e da un terzo su cui è montata la fiamma. Il movimento dei tre blocchi è controllato tramite un computer via software (Winpos), anch'esso sviluppato all'ICFO.

La fiamma è data dalla reazione di butano ( $CH_4H_{10}$ ) e ossigeno ( $O_2$ ) provenienti da due apposite bombole, Fig. 5.3(c). Ognuna delle due bombole è connessa a un flussimetro che controlla la quantità di ognuno dei gas che intervengono nella reazione, Fig. 5.3(d). I gas sono infine mischiati con una giunzione a T.

Il gas con cui si controlla l'espansione è azoto ( $N_2$ ) e proviene dalla bombola visibile in Fig. 5.3(e), la cui pressione arriva fino a 8 bar, ed è iniettato nella PCF grazie a un'apposita cella di pressione al cui tappo la fibra viene fissata con del silicone, Fig. 5.3(b).

In laboratorio erano disponibili due tipi di fibre a cristallo fotonico: la LMA-10 e la LMA-8, il cui nucleo è rispettivamente di  $10 \mu\text{m}$  e  $8 \mu\text{m}$ . Le sezioni trasverse delle due fibre sono visibili in Fig. 5.4(a) e in Fig. 5.4(b), e le loro specifiche sono le seguenti:



(a) Tapering station



(b) Cella di pressione per iniettare l'azoto nella fibra



(c) Bombole di butano e ossigeno



(d) Flussimetro



(e) Linea di azoto

Figura 5.3: Attrezzatura per l'hole inflation

**LMA 10**Diametro esterno :  $125 \mu m$ Nucleo :  $10,37 \mu m$ Diametro dei buchi :  $3,11 \mu m$ Pitch :  $6,45 \mu m$ 

Air-Filling fraction : 0,48

**LMA 8**Diametro esterno :  $127 \mu m$ Nucleo :  $8,56 \mu m$ Diametro dei buchi :  $2,35 \mu m$ Pitch :  $5,59 \mu m$ 

Air-Filling fraction : 0,42



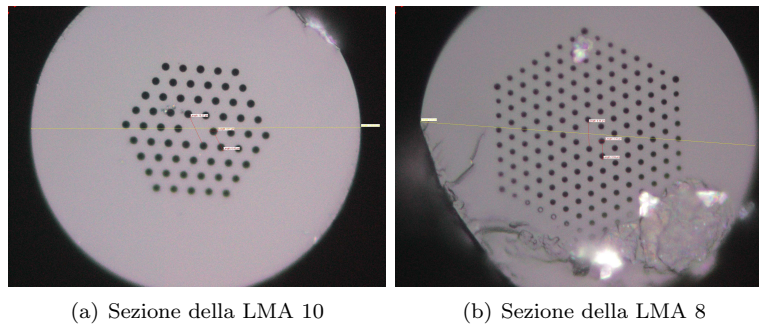


Figura 5.4

### 5.2.2 Parametri del processo

Per le specifiche del processo si è partiti dai parametri utilizzati in [17]. In particolare i parametri caratteristici di tale processo sono:

**velocità di trazione** : velocità con cui la fibra viene tirata. Serve per combattere il collassamento dei buchi mantenendo la silice in tensione.

**velocità della fiamma** : velocità con cui viaggia la fiamma scaldando la fibra.

**numero di passate** : numero di passate che la fiamma esegue sotto la fibra.

**riduzione ad ogni passata** : per evitare il collasso della fibra nelle zone dove la fiamma cambia direzione e garantire una zona di transizione tra la fibra originale e quella espansa, la lunghezza della zona spazzolata dalla fiamma viene ridotta di una quantità costante ad ogni passata.

**flusso di gas** : flusso di ognuno dei gas che intervengono nella reazione per formare la fiamma. La sua unità di misura è l'SCCM ovvero Standard Cubic Centimeters per Minute (centimetro cubo standard al minuto).

**pressione** : pressione iniettata nella PCF con la quale si controlla l'espansione dei buchi.

### 5.2.3 Primi risultati sperimentali

La prima prova è stata effettuata su un campione di fibra LMA-10 di circa un centimetro con i seguenti parametri:

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 13

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 15 SCCM,  $O_2$ : 25 SCCM

**pressione** : variabile da 2 bar a 8 bar

I risultati di questa prima prova sono stati deludenti: tutte le sezioni della fibra erano uguali alla fibra originale, indipendentemente dalla pressione applicata. In pratica non si sono modificate le dimensioni della fibra.

L'analisi teorica del processo proposta nel capitolo precedente mostra che la pressione applicata e la temperatura della fiamma determinano solo la velocità di espansione; in questo caso sembra non essere così. L'ipotesi per spiegare questo risultato è stata che la fiamma utilizzata fosse troppo fredda e che quindi non avesse portato la silice alla sua temperatura di rammollimento, condizione necessaria per poterla trattare. Quindi la teoria proposta non era applicabile in quanto probabilmente non ci si trovava nelle condizioni di temperatura ottimale della fiamma.

In effetti è stata utilizzata una fiamma,  $CH_4H_{10}$ : 15 SCCM,  $O_2$ : 25 SCCM, che all'ICFO si utilizza per il tapering, un processo molto più lungo e quindi meno critico, in quanto si applica a fibre standard che non presentano buchi d'aria all'interno.

Il primo passo è stato cercare una fiamma caratterizzata da una temperatura tale che consentisse un ragionevole controllo sulla fibra: troppo fredda non renderebbe la fibra malleabile, troppo calda determinerebbe il collasso immediato dei buchi non lasciando il tempo di espanderla. Per far ciò si è studiato la reazione di combustione che sta alla base della fiamma a disposizione.

### 5.3 Temperatura della fiamma

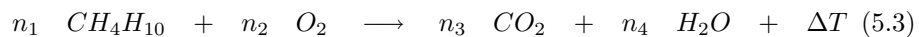
La combustione è una reazione chimica che comporta l'ossidazione di un combustibile da parte di un comburente con sviluppo di calore. I prodotti della combustione dipendono dalla natura del combustibile e dalle condizioni di reazione. La fiamma è il fenomeno luminoso tipico della combustione. Fisicamente, la luce emessa è dovuta alle molecole dei prodotti gassosi della combustione, ancora eccitate, che emettono l'energia in eccesso sotto forma di fotoni nello spettro visibile.

Per poter controllare la temperatura della fiamma è stato necessario analizzare la reazione alla base della combustione.

#### 5.3.1 Reazione chimica alla base della combustione

La combustione di ossigeno e butano è una reazione irreversibile e ha come prodotto la formazione di acqua, anidride carbonica e calore.

Tale reazione è:



Bilanciando la reazione secondo l'equilibrio stechiometrico si ottiene:



Da questa equazione si osserva il fatto che la quantità di calore sviluppata  $\Delta T$  è legata alla quantità di reagenti: aumentando la quantità di reagenti aumenta la quantità dei prodotti e la quantità di calore secondo questo equilibrio stechiometrico.

Tuttavia nel caso in cui la combustione non avvenga secondo l'equilibrio stechiometrico, la reazione rimane la stessa ma, cambiando le condizioni,  $\Delta T$  dipende dal rapporto tra i due reagenti [8], ovvero combustibile (il butano) e comburente (l'ossigeno).

Per quantificare ciò si definisce un parametro  $\Phi$  secondo:

$$\Phi = \frac{n_1/n_2[\text{reazione}]}{n_1/n_2[\text{stechiometria}]} \quad (5.5)$$

ovvero il rapporto combustibile/comburente nella reazione considerata diviso per il rapporto combustibile/comburente secondo il bilanciamento stechiometrico.

Per  $\Phi > 1$  si parla di sistema ipoossidante in quanto rispetto al rapporto stechiometrico c'è meno comburente (ossigeno). Per  $\Phi < 1$  si parla invece di sistema iperossidante in quanto c'è eccesso di comburente. Ovviamente  $\Phi = 1$  per il rapporto stechiometrico.

Qualitativamente la dipendenza della temperatura della fiamma da questo parametro  $\Phi$  è mostrato in Fig. 5.5.

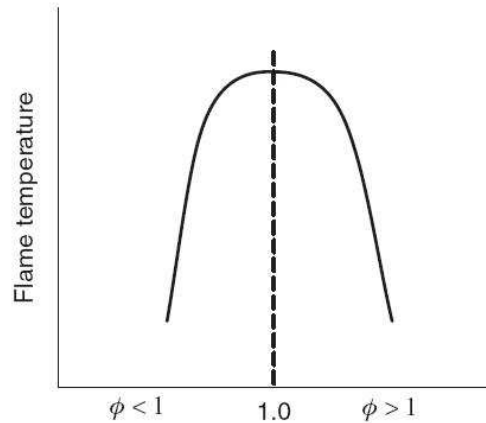


Figura 5.5: Temperatura della fiamma al variare del parametro  $\Phi$

La temperatura della fiamma dipende quindi non solo dalla quantità di reagenti nella reazione ma anche dal loro rapporto. Eseguendo la reazione secondo l'equilibrio stechiometrico ( $\Phi = 1$ ) si massimizza la temperatura, mentre se ci si discosta da tale rapporto, che sia il sistema iperossidante o ipoossidante, la temperatura in generale diminuisce.

La stechiometria della nostra combustione imporrebbe un rapporto butano/ossigeno di 1:7. Però impostando i regolatori di flusso con tale rapporto

( $CH_4H_{10}$ : 10 SCCM,  $O_2$ : 70 SCCM) si ottiene una piccola esplosione, probabilmente dovuta al fatto che la pressione dei due gas è alta e la reazione con tale rapporto tra gas non può avvenire in un tubo di circa un centimetro di diametro.

Si è quindi pensato di controllare la temperatura della fiamma mantenendo costante il rapporto tra i reagenti e aumentando o diminuendo il flusso dei reagenti in proporzione. Si è scelto un rapporto butano/ossigeno di 2:5 (sistema ipoossidante).

### 5.3.2 Temperatura della fiamma

Il primo esperimento effettuato è stato quindi far variare in modo proporzionale il flusso dei due gas reagenti e misurare la temperatura della fiamma grazie ad un'apposita sonda.

I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 5.6, dove in ascissa si ha il flusso totale di gas (che secondo questo rapporto è composto per 28% da butano e per 72% da ossigeno, vedi Tab. 5.1), e in ordinata la temperatura della fiamma rilevata. Si sono effettuate tre prove.

Butano [SCCM]	Ossigeno [SCCM]	Flusso totale [SCCM]
12	30	42
14	35	49
16	40	56
18	45	63
20	50	70
22	55	77
24	60	84
28	70	98

Tabella 5.1

Come ci si aspettava la temperatura varia grossomodo linearmente con l'aumento del flusso totale. Tuttavia le misure di temperatura probabilmente non sono molto precise in quanto la sonda utilizzata non era adatta a tale tipo di misura. Si trattava infatti di una sonda per ambienti esterni con una zona sensibile lunga qualche centimetro, mentre per misurare la temperatura di una fiamma si avrebbe bisogno di una sonda più puntuale.

### 5.3.3 Hole inflection con differenti fiamme

Per questo motivo abbiamo deciso di controllare la variazione del flusso di gas valutandone direttamente i suoi effetti sulla fibra.

Si è trattato quindi di ripetere il processo dell'hole inflection mantenendo costante la pressione dell'azoto e cambiando di volta in volta il valore del flusso di gas che genera la fiamma.

Gli esperimenti sono stati effettuati con fibra LMA-10 su campioni di fibra di 3

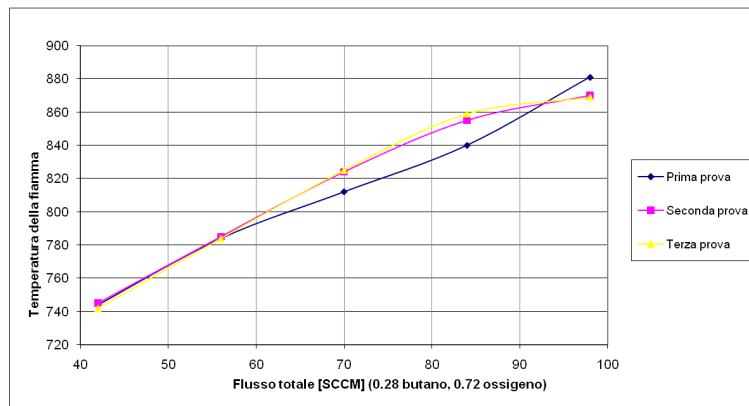


Figura 5.6: Temperatura della fiamma al variare del flusso totale di gas

cm con pressione costante a 6 bar.

I parametri utilizzati per il processo sono:

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** : variabile da  $CH_4H_{10}$ : 12-22 SCCM,  $O_2$ : 30-55 SCCM

**pressione** : 6 bar

I risultati sono visibili in Tab. 5.2 e in Fig. 5.7. In ascissa c'è sempre il flusso totale di gas, mentre in ordinata è riportato l'air-filling-fraction ( $d/\Lambda$ ).

Le misure sono state ottenute tagliando la fibra con una cleaver e analizzando la sezione trasversale al microscopio ottico. Il microscopio era collegato a un computer che permetteva di effettuare la misura via software (Analysis Work). Si tratta di misure distruttive: per poter analizzare la fibra era necessario tagliarla e quindi non poteva più essere utilizzata.

Butano [SCCM]	Ossigeno[SCCM]	Flusso totale [SCCM]	Air-filling fraction
12	30	42	0,45
14	35	49	0,46
16	40	56	0,49
18	45	63	0,56
20	50	70	0,66
22	55	77	0,71

Tabella 5.2

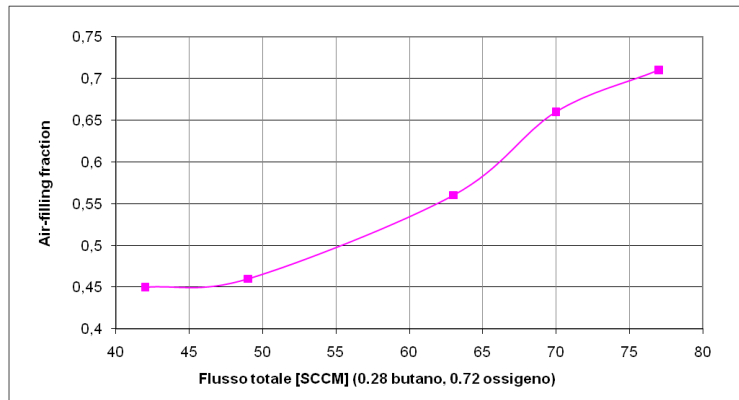


Figura 5.7: Air-filling-fraction al variare del flusso totale di gas

Si nota che mantenendo fissa la pressione, all'aumentare del flusso dei gas, e quindi della temperatura della fiamma, la silice diventa sempre più malleabile e la stessa pressione ha un effetto differente. Infatti più la fibra è scaldata, più la stessa pressione riesce ad espandere i buchi della PCF.

Si è deciso di utilizzare la fiamma con  $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM che con 6 bar da un'espansione di 0.66, ed effettuare un test variando la pressione.

## 5.4 Hole inflation a pressione variabile

I successivi esperimenti quindi erano finalizzati al controllare l'espansione della PCF mediante la pressione, con una fiamma costante.

### 5.4.1 Esperimenti con fibra LMA-10

Inizialmente si sono effettuate delle prove con spezzoni di fibra LMA-10 di circa 3 cm. I parametri di tali esperimenti sono:

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM

**pressione** : variabile da 3 a 8 bar

I risultati ottenuti sono riportati in Tab. 5.3 e mostrati in Fig. 5.8 e in Fig. 5.9.

Pressione [bar]	diametro (d) [ $\mu m$ ]	Pitch ( $\Lambda$ ) [ $\mu m$ ]	Air-filling fraction ( $d/\Lambda$ )
3	2,21	5,57	0,396768
4	2,55	5,71	0,446585
5	2,83	5,75	0,492174
6	3,41	5,93	0,575042
7	4,55	6,39	0,71205
8	7,18	8,47	0,847698

Tabella 5.3

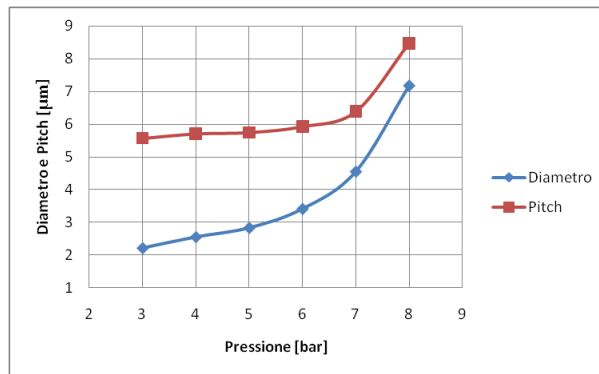


Figura 5.8: Espansione di diametro e Pitch al variare della pressione

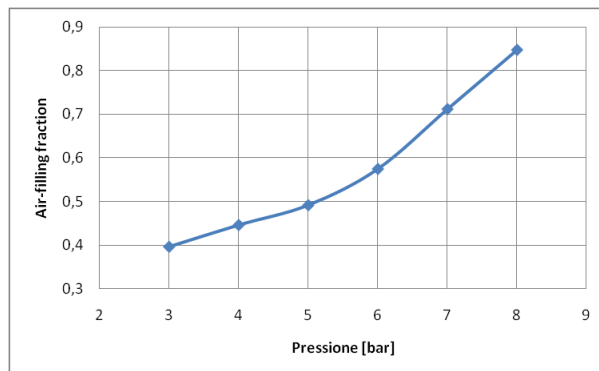


Figura 5.9: Air-filling-fraction al variare della pressione

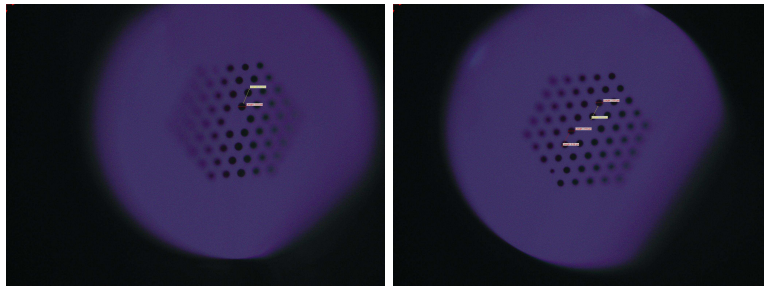
Quello che si nota è che all'aumentare della pressione sia il diametro dei buchi che il pitch della fibra subiscono un'espansione. Il diametro però subisce un'espansione proporzionalmente maggiore quindi il loro rapporto  $d/\Lambda$  cresce con la pressione.

Per pressioni basse si ha un collasso dei buchi rispetto alla fibra originale, mentre per pressioni alte il diametro dei buchi praticamente coincide con il pitch e la fibra è quasi totalmente vuota.

Inoltre per valori di pressioni alte i buchi tendono a perdere la loro forma circolare e ad assumere una configurazione esagonale. Questo è dovuto al fatto che quando la fibra viene espansa molto ogni buco sente la spinta dovuta all'espansione dei buchi vicini e tende quindi ad espandersi nelle direzioni dove tale spinta è minore. Dal momento che i buchi hanno una disposizione esagonale, tendono ad assumere questa forma. In tali situazioni non ha più senso parlare di rapporto  $d/\Lambda$  in quanto non esiste più un diametro, e l'air-filling fraction è inteso nel suo significato letterale di rapporto aria-materia (silice).

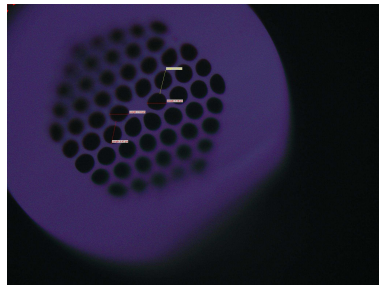
In seguito sono riportati alcuni esempi di foto al microscopio dei campioni ottenuti.

La Fig. 5.10 mostra la fibra espansa rispettivamente con 5, 6 e 8 bar di pressione.



(a) LMA 10 espansa con 5 bar, Air-Filling fraction di 0,49

(b) LMA 10 espansa con 6 bar, Air-Filling fraction di 0,57



(c) LMA 10 espansa con 8 bar, Air-Filling fraction di 0,85

Figura 5.10

Sorprendentemente si sono ottenuti risultati differenti con esperimenti uguali.

Infatti nel precedente esperimento, Fig. 5.7, con fiamma  $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM e 6 bar di pressione si era ottenuto un'air-filling fraction di 0,66, mentre nella Fig. 5.9 è di 0,57.

Essendo la differenza significativa, era necessario capire il motivo che non rendeva ripetibile il processo.



### 5.4.2 Esperimenti con fibra LMA-8

Prima di cercare di risolvere questo problema si è voluto fare un confronto tra le due fibre, per vedere se l'effetto della stessa fiamma su fibre diverse era simile o molto diverso.

Le due fibre hanno parametri differenti: rispetto alla LMA-10, la LMA-8 ha buchi più piccoli e quindi presenta 7 corone esagonali di buchi invece che 4.

Si è effettuata quindi la stessa prova descritta sopra su uno spezzone di fibra LMA-8 di circa 3 cm. I risultati sono riportati Tab. 5.4, in Fig. 5.11 e in Fig. 5.12

Pressione [bar]	diametro (d) [ $\mu m$ ]	Pitch ( $\Lambda$ ) [ $\mu m$ ]	Air-filling fraction ( $d/\Lambda$ )
3	1,4	4,5	0,311111
4	2,05	4,93	0,415822
5	3,6	6,2	0,580645
6	6,7	8,1	0,82716
7	8,61	9,46	0,910148
8	9,3	9,85	0,944162

Tabella 5.4

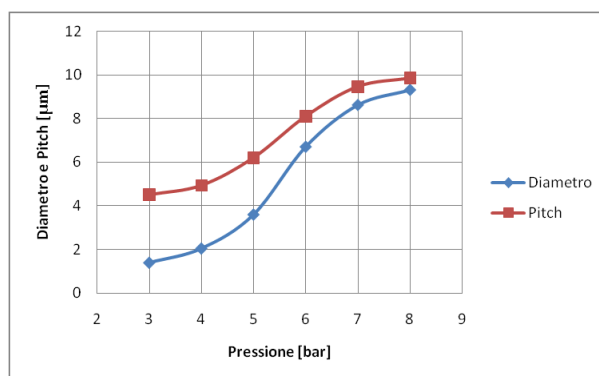


Figura 5.11: Espansione di diametro e Pitch al variare della pressione

La Fig. 5.13 mostra la fibra espansa rispettivamente con 4, 5 e 8 bar di pressione.

Confrontando questi risultati con i grafici relativi alla LMA-10, ci si può rendere conto che l'effetto della stessa fiamma ( $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM) sulla LMA-8 è diverso.

Pare che questa fiamma renda la LMA 8 più malleabile. Infatti tale fibra per pressioni basse tende a collassare i buchi, mentre per pressioni alte tende ad espandere molto di più.

La conclusione che si deduce da tale esperimento è che la fiamma utilizzata è troppo calda per la fibra LMA-8 in quanto non consente molto margine di

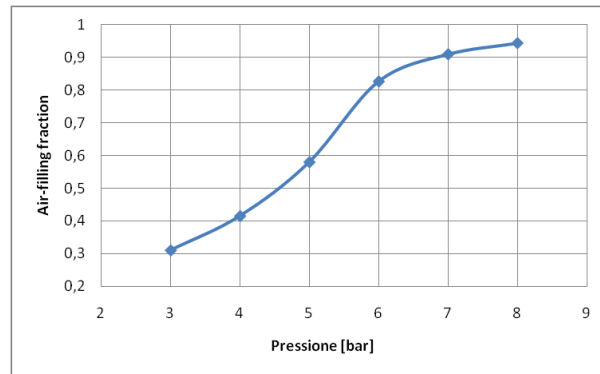
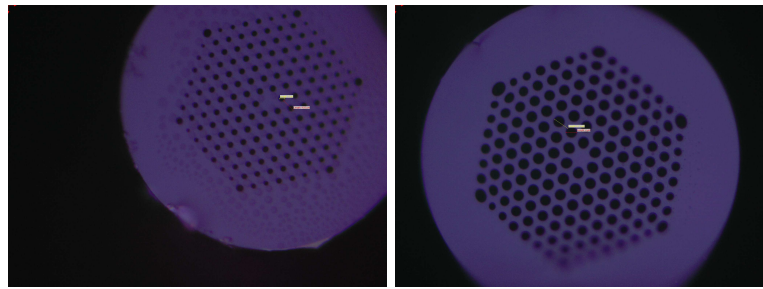
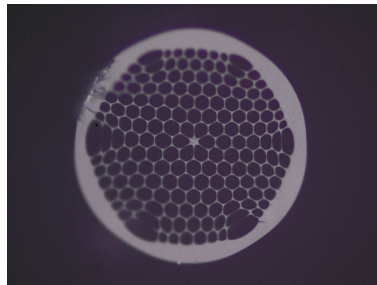


Figura 5.12: Air-filling-fraction al variare della pressione



(a) LMA 8 espansa con 4 bar, Air-Filling fraction di 0,41  
 (b) LMA 8 espansa con 5 bar, Air-Filling fraction di 0,58



(c) LMA 8 espansa con 8 bar, Air-Filling fraction di 0,95

Figura 5.13

controllo mediante la pressione. Si è reso quindi necessario utilizzare fiamme differenti per le due fibre.

## 5.5 Ripetibilità e uniformità del processo

### 5.5.1 Apparente irripetibilità del processo

Una volta compreso il processo, si è presentato il problema di renderlo ripetibile. Si è già menzionato in precedenza il fatto che si sono ottenuti due risultati differenti con processi apparentemente uguali. Tuttavia per assicurarsi del fatto che nella descrizione del processo mancasse ancora qualche effetto rilevante, si sono effettuati una serie di esperimenti apparentemente uguali distanziati nel tempo. In seguito sono riportati i parametri di alcuni esperimenti effettuati, con i relativi risultati ottenuti.

Un esempio di un test con fibra LMA 10 eseguito più volte è il seguente.

**fibra** : campione di LMA 10 da 3 cm

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM

**pressione** : 6 bar

Alcuni risultati di tale processo sono visibili in Fig. 5.14.

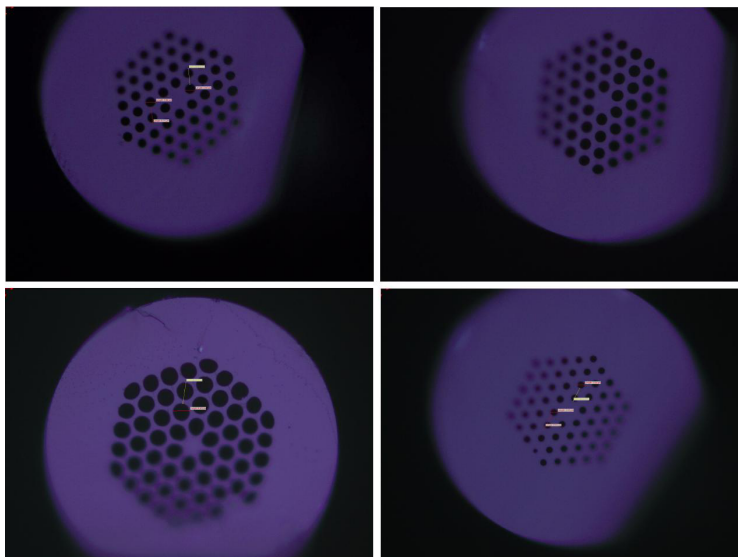


Figura 5.14: Espansioni differenti su LMA 10 ottenute con lo stesso processo

Un altro esempio di esperimento ripetuto, questa volta con fibra LMA 8 è sotto riportato, e alcuni dei suoi differenti esiti sono visibili in Fig. 5.15

**fibra** : campione di LMA 10 da 3 cm

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 16 SCCM,  $O_2$ : 40 SCCM

**pressione** : 6 bar

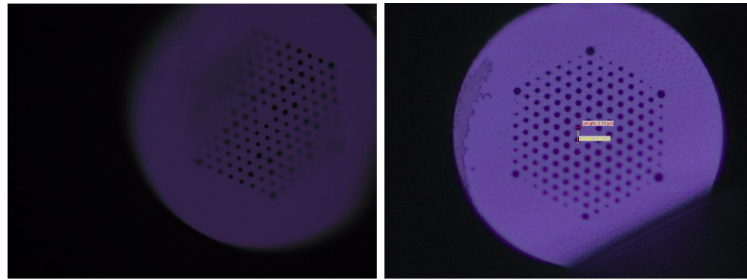


Figura 5.15: Espansioni differenti su LMA 8 ottenute con lo stesso processo

Il fatto che processi uguali portassero ogni volta ad un'espansione differente ha fatto pensare che ci fosse qualche condizione di lavoro incognita. Tuttavia quale o quali fossero i parametri che ancora non erano controllati non era immediatamente evidente.

### 5.5.2 Calo di pressione

Inizialmente è stato ipotizzato il fatto che la fiamma non fosse stabile. La tapering machine utilizzata per questo processo in realtà era stata progettata per il tapering che, come detto, pare essere un processo con una dipendenza dalla temperatura della fiamma molto meno critica. Un'ipotesi poteva essere quindi che l'apparecchiatura per ottenere la fiamma fosse tale da causare delle piccole instabilità nella sua temperatura, trascurabili per quanto riguarda il tapering ma non per il processo dell'hole inflection.

Inoltre, se la dipendenza dalla temperatura era così critica come pareva, era necessario considerare il fatto che la fiamma non ha una temperatura uniforme, generalmente è più calda all'interno e più fredda all'esterno. Questo gradiente di temperatura, relazionata alle dimensioni di una fibra, poteva non essere trascurabile.

In realtà in seguito ci si è resi conto che queste instabilità erano in prima approssimazione trascurabili e che la condizione che cambiava era un'altra. Iniettando pressione in dei buchi, a livello microscopico le molecole dell'azoto urtano contro le pareti della silice determinando un fenomeno di attrito. Si è ipotizzato che, essendo i buchi di dimensioni micrometriche, questo fenomeno non fosse trascurabile e a livello macroscopico determinasse un calo di pressione lungo la fibra. Ovviamente tale calo di pressione era maggiore per tratti di fibra lunghi.

### 5.5.3 Disuniformità del processo

Si è cercato di misurare questo fenomeno direttamente tramite il processo dell'hole inflection. In particolare si è pensato di vedere se e quanto questo calo di pressione fosse critico, effettuando l'hole inflection su spezzoni di fibra molto più lunghi e in seguito analizzare la zona che ci si aspettava essere uniformemente espansa.

Si riportano in seguito alcuni test significativi.

Un esperimento è stato fatto su uno spezzone di LMA 10 di 6,5 cm. In seguito si sono tagliate delle sezioni della zona che ci si aspettava essere uniforme (in questo processo lunga 5 cm) e si sono analizzate al microscopio. In Fig. 5.16 e in Fig. 5.17 è mostrata l'espansione di ogni sezione in funzione della coordinata longitudinale.

**fibra** : campione di LMA 10 da 6,5 cm (5 cm di zona uniforme)

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 20 SCCM,  $O_2$ : 50 SCCM

**pressione** : 6 bar

La prima sezione è quella più lontana dalla cella di pressione, mentre l'ultima quella più vicina. Come si può notare l'espansione non è uniforme lungo la fibra. In particolare è maggiore nelle zone di fibra più corte (vicine alla cella) e minore nelle più lunghe (lontane dalla cella).

Un altro test significativo è stato effettuato con un tratto di fibra LMA 8 di 8,5 cm, i cui risultati sono mostrati in Fig. 5.18 e in Fig. 5.19.

**fibra** : campione di LMA 8 da 8,5 cm (7 cm di zona uniforme)

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

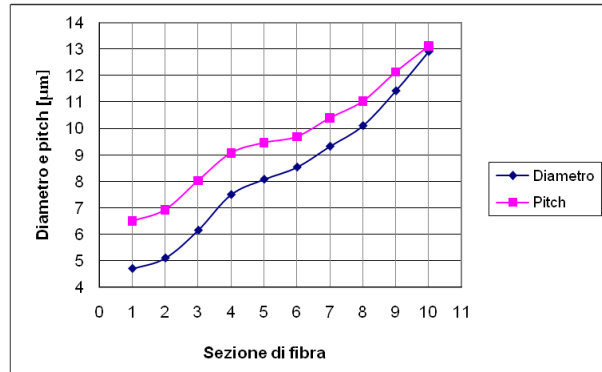


Figura 5.16: Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 10

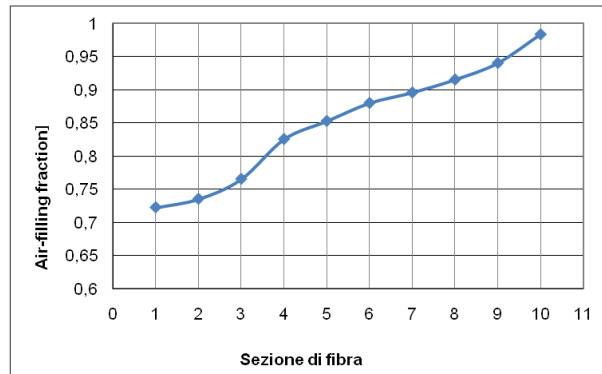


Figura 5.17: Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 10

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 16 SCCM,  $O_2$ : 40 SCCM

**pressione** : 6 bar

Nuovamente nella zona processata uniformemente (7 cm) si ottiene un'espansione della fibra disuniforme.

Questi test hanno confermato che effettivamente c'era un calo di pressione lungo la fibra. Questo fenomeno porta a risultati diversi a seconda della distanza del pezzo di fibra processata dalla cella di pressione e inoltre determina espansioni disuniformi su tratti di fibra più lunghi di qualche centimetro.

#### 5.5.4 Condizioni di lavoro finali: processo uniforme e ripetibile

Un primo accorgimento per ovviare a questo problema è stato quello di collasare la testa della fibra dopo averla messa sotto pressione. In questo modo ci si

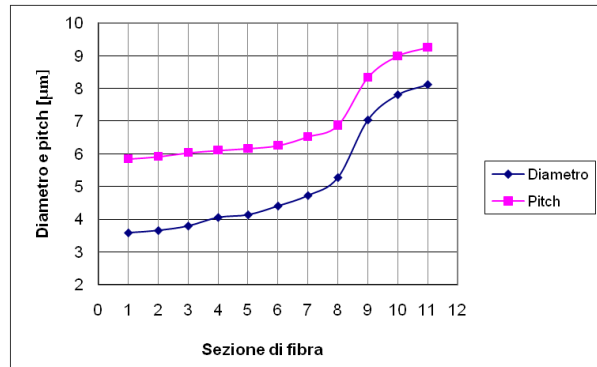


Figura 5.18: Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 8

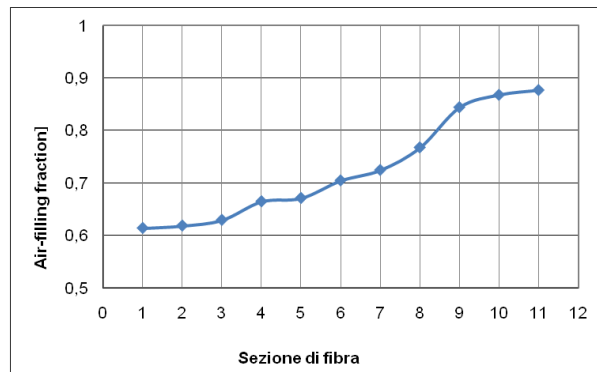


Figura 5.19: Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 8

assicura che la pressione iniettata dalla cella non esca dall'altro capo della fibra, in quanto collassando l'altra estremità si crea un tappo. Prima di sottoporre la fibra all'hole inflation inoltre si è preferito aspettare qualche minuto affinché la pressione si potesse distribuire in maniera più uniforme lungo tutta la fibra, creando così, dal punto di vista termodinamico, un sistema chiuso e statico in cui non vi era un movimento di gas.

Inoltre, dal momento che questo calo di pressione pareva più critico per spezzoni di fibra lunghi, si è pensato fosse meglio lavorare con fibre relativamente corte, dell'ordine quindi di una ventina di centimetri. Infine per assicurarsi che le condizioni di lavoro fossero sempre uguali e che il processo fosse quindi affetto da meno incertezze possibili, si è scelto di porre come parametro la lunghezza della fibra, ovvero la distanza dell'estremità collassata dalla cella.

In seguito sono riportati alcuni esperimenti effettuati con queste nuove accortezze e i relativi risultati.

Un primo esperimento significativo è stato fatto su un campione di LMA 10 di

6,5 cm (zona uniforme di 5 cm) distante circa 20 cm dalla cella. I risultati sono riportati in Fig. 5.20 e in Fig. 5.21.

**fibra** : campione di LMA 10 da 6,5 cm (5 cm di zona uniforme), distanza dalla gas-cell: 25 cm

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 28 SCCM,  $O_2$ : 70 SCCM

**pressione** : 6 bar

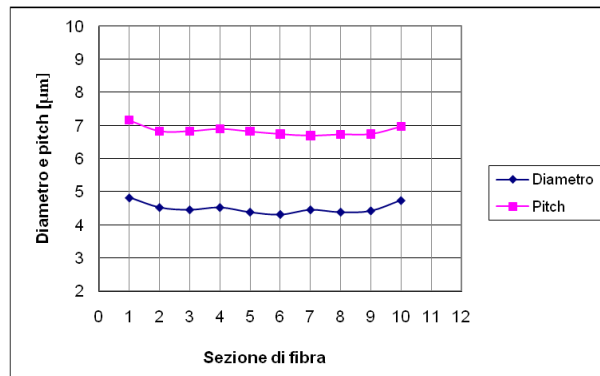


Figura 5.20: Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 10

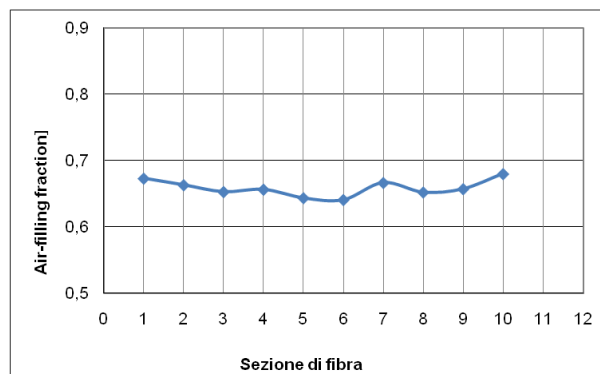


Figura 5.21: Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 10



Si può notare che l'espansione che subiscono diametro e pitch, e quindi anche il loro rapporto, è grossomodo uniforme lungo tutta la fibra. Le piccole differenze probabilmente sono perlopiù causate dall'incertezza delle foto scattate col microscopio e dalla risoluzione del sistema ottico.

Per ottenere questo risultato inoltre è stato necessario aumentare il flusso dei gas che generano la fiamma, sempre mantenendone fisso il rapporto.

In Fig. 5.22 è mostrata una sezione della fibra LMA 10 espansa.

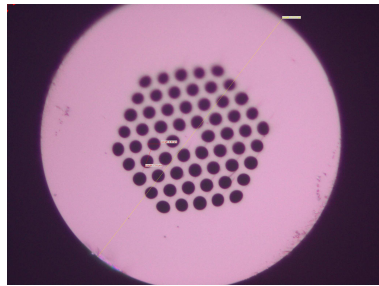


Figura 5.22: Fibra LMA 10 espansa, Air-filling fraction di circa 0,66

Viene riportato anche un altro test con esito positivo, questa volta eseguito su un tratto di fibra LMA 8 di 8,5 cm (con zona uniforme quindi di 7 cm), distante circa 25 cm dalla cella. I risultati sono presentati in Fig. 5.23 e in Fig. 5.24.

**fibra** : campione di LMA 8 da 8,5 cm (7 cm di zona uniforme), distanza dalla gas-cell: 25 cm

**velocità di trazione** : 0.036 mm/s

**velocità della fiamma** : 4 mm/s

**numero di passate** : 15

**riduzione ad ogni passata** : 1 mm

**flusso di gas** :  $CH_4H_{10}$ : 30 SCCM,  $O_2$ : 75 SCCM

**pressione** : 6 bar

Nuovamente si può notare come la fibra subisca la stessa espansione nella zona che ci si aspettava essere uniforme.

In Fig. 5.25 è mostrata una sezione della fibra LMA 8 espansa.

## 5.6 Conclusioni

L'obiettivo da raggiungere era quello di definire un processo che permettesse di cambiare la struttura, e quindi le caratteristiche propagative, di una fibra a cristallo fotonico. In particolare si è cercato di modificare le dimensioni dei

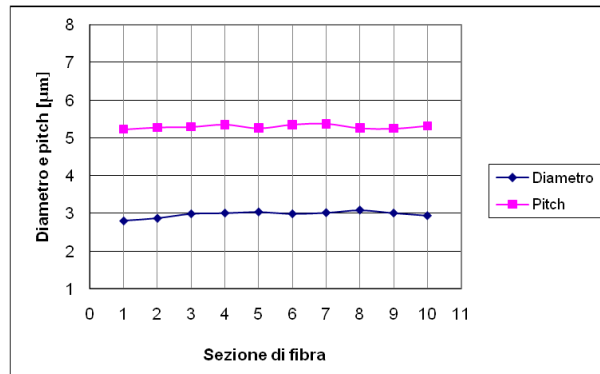


Figura 5.23: Diametro e pitch per ogni sezione di fibra LMA 8

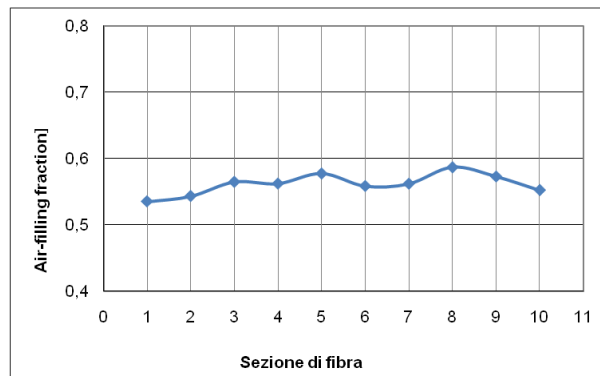


Figura 5.24: Air-filling fraction per ogni sezione di fibra LMA 8

fori iniettandoci all'interno azoto ad una pressione controllata, mentre la fibra veniva scaldata da una fiamma.

Per far ciò si avevano a disposizione dei macchinari solitamente utilizzati per il tapering di fibre standard, e delle fibre a cristallo fotonico monomodali.

Dopo i primi risultati insoddisfacenti, si è studiato il fenomeno di combustione, per trovare dei parametri sperimentali che permettessero di ottenere una fiamma in grado di trattare la fibra con la tempistica e le modalità che il processo richiedeva. La ricerca di tali condizioni sperimentali è stata fatta in un primo momento misurando l'effetto della variazione del flusso di combustibile e comburente con una sonda. Successivamente si è valutato tale effetto direttamente tramite il processo dell'hole inflation.

Una volta trovati i parametri adatti, si è tentato di controllare l'espansione dei buchi della fibra variando la pressione del gas iniettato. Si è notato che era necessario cambiare leggermente la fiamma a seconda della fibra che si processava. Inoltre il processo dava risultati di volta in volta differenti e, per spezzoni

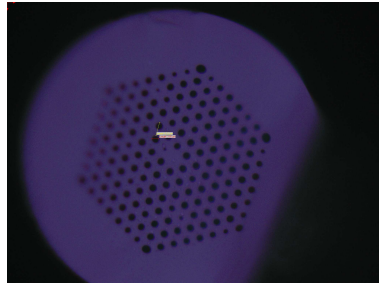


Figura 5.25: Fibra LMA 8 espansa, Air-filling fraction di circa 0,55

di fibra relativamente lunghi, si otteneva un'espansione dei buchi longitudinalmente non uniforme.

Ciò era dovuto a un calo di pressione lungo la fibra, e quindi ci si è posti in condizioni di lavoro tali da ovviare a questo problema. In particolare si è scelto di lavorare con spezzoni di fibra sempre della stessa lunghezza e, prima di effettuare il processo, aspettare il tempo necessario affinché la pressione si distribuisse uniformemente lungo la fibra.

Una volta testato e reso ripetibile in processo, si è potuto ottenere spezzoni di fibra della geometria desiderata semplicemente aumentando o diminuendo la pressione.

In questo lavoro di tesi si è realizzato un sensore di temperatura con una fibra a cristallo fotonico pre-esistente e in seguito si è sperimentato il processo dell'hole inflation, tramite il quale è stato possibile ottenere PCF con geometria a piacere.

Non è si è riusciti a costruire il sensore tramite una fibra a cristallo fotonico espansa con questo processo per questioni di tempo e di mancanza della strumentazione adatta. Infatti per tale dispositivo si sarebbe dovuta utilizzare una splicer Vytran, strumento molto più preciso che permette un controllo nanometrico dei parametri, che è stato in fase di riparazione per tutta la durata del lavoro.

I ricercatori dell'ICFO proseguiranno con lo sviluppo del progetto.



# Conclusioni e sviluppi futuri

Era necessario realizzare un sensore di temperatura che arrivasse fino a 1000 gradi. Il dispositivo doveva essere affidabile, compatto, istantaneo e semplice da realizzare.

Un sensore in fibra ottica rispondeva a tutte queste caratteristiche e si è pensato di realizzare un interferometro modale: uno spezzone di fibra a cristallo fotonico multimodale giunta a due fibre monomodali crea un'interferenza sinusoidale. Il sensore sfrutta l'effetto termo-ottico, secondo cui l'aumento della temperatura determina uno spostamento lineare delle lunghezze d'onda della risposta del dispositivo.

Inizialmente si è tentato di ottenere l'interferenza tra i primi due modi utilizzando una fibra a cristallo fotonico bimodale. Dal momento che il secondo modo è a simmetria dispari, era necessario far diffrangere il campo nelle zone di giunzione per circa  $300\ \mu\text{m}$  in modo tale che aumentasse il suo diametro modale. Tale diffrazione però determinava l'eccitazione di modi del mantello non guidati che compromettevano le prestazioni del dispositivo. Per tali sensori infatti lo spostamento delle lunghezze d'onda della risposta non era lineare con la temperatura.

Si è quindi pensato di utilizzare una fibra a cristallo fotonico trimodale ottenendo l'interferenza tra il primo modo e il terzo, entrambi a simmetria dispari. Per far ciò la lunghezza della zona collassata nelle giunzioni era di circa  $30\ \mu\text{m}$ , e ciò determinava una diffrazione del campo sufficiente ad eccitare il primo modo e il terzo ma non il secondo. In questa maniera non solo si è ottenuta una risposta stabile in quanto determinata da un campo totalmente guidato, ma si è potuto ridurre le perdite di inserzione del dispositivo. Le prestazioni di questi sensori sono state ottime: infatti presentavano tutti uno spostamento delle lunghezze d'onda della risposta lineare con la temperatura, con una sensibilità di  $12\ \text{pm/grado}$ .

Dal momento che le fibre multimodali con cui si è realizzato il sensore non erano fibre commerciali, è stata poi sviluppata una tecnica per modificare le dimensioni e quindi le caratteristiche propagative di una fibra a cristallo fotonico pre-esistente. Tale tecnica prende il nome di hole inflation: uno spezzone di fibra viene fissato su dei blocchi che si muovono in direzioni opposte mantenendo la fibra in tensione. Sotto la fibra è posta una fiamma che si muove avanti e indietro, la cui temperatura è controllata dal flusso dei gas che determinano la combustione. All'interno dei buchi della fibra è iniettato dell'azoto median-

te una cella di pressione. La fiamma, scaldando la fibra, rammollisce la silice rendendola malleabile, mentre la presenza dell'azoto nei suoi buchi determina il loro allargamento. In questo modo è possibile ottenere delle fibre a cristallo fotonico con geometria a piacere semplicemente aumentando o diminuendo la pressione del gas iniettato.

Tale tecnica permette, partendo da una fibra commerciale, di ottenere una fibra a cristallo fotonico adatta alla realizzazione dell'interferometro modale. Il futuro di questo progetto sarà la realizzazione e l'ottimizzazione del sensore utilizzando come parte sensibile del dispositivo una fibra modificata tramite l'hole inflation. La speranza è che potendo ora controllare la geometria della fibra, si possano ottenere dei sensori con prestazioni ancora migliori.

# Bibliografia

- [1] A. Rose, "*Devitrification in annealed optical fiber*", J. Lightwave Technology, 15(5), 808-814 (1997)
- [2] S. Bandyopadhyay, J. Canning, M. Stevenson, K. Cook, "*Ultrahigh-temperature-resistant chemical composition Bragg gratings in Er<sup>3+</sup>-doped optical fiber*", Opt. Lett. 30, 607-609 (2005)
- [3] A. Kersey, M. Davis, H. Patrock, M. LeBlanc, K. Koo, C. Askins, M. Putnam, E. Friable, "*Fiber grating sensors*", J. Lightwave Technology, 15(8), 1442-1463 (1997)
- [4] D. Monzon-Hernandez, V. P. Minkovich, J. Villatoro, "*High-temperature sensing with tapers made of microstructured optical fiber*", IEEE Photon. Technol. Lett. 18, 511-513 (2006).
- [5] G. Coviello, V. Finazzi, J. Villatoro, V. Pruneri, "*Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000° C*", Optics Express, vol. 17, No. 24 (2009)
- [6] V. Finazzi, J. Villatoro, V. Pruneri, V. P. Minkovich, G. Badenes "*Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing*", Appl. Phys. Lett. 91(9), 091109, (pages 3) (2007)
- [7] H. Y. Choi, K. S. Park, B. H. Lee, "*Photonic crystal fiber interferometer composed of a long period grating and one point collapsing of air holes*", Opt. Lett. 33(8), 812-814 (2008)
- [8] I. Glassman, R. Yetter, *Combustion*, 4th edition, AP 2008
- [9] G. Coviello, V. Finazzi, J. Villatoro, V. Pruneri, "*Encapsulated and coated photonic crystal fiber sensor for temperature measurements up to 1000°*" in CLEO EUROPE - EQEC 2009. *Conference of lasers and electro-optics - European Quantum Electronic Conference*, p. CH1.6 (2009)
- [10] V. Finazzi, J. Villatoro, G. Coviello, V. Pruneri, "*Photonic Crystal Fibre Sensors for High Temperature Energy Environment*", in *Optics and Photonics for Advanced Energy Technology*, p. ThC1 (Optical Society of America, 2009)
- [11] F. Poli, A. Cucinotta, S. Selleri, "*Photonic Crystal Fibers, properties and applications*", Springer series in materials science 102

- 
- [12] C. M. Smith, N. Venkataraman, M. T. Gallagher, D. Müller, J. A. West, N. F. Borrelli, D. C. Allan, K. W. Koch, "*Low-loss hollow-core silica-air photonic bandgap fibre*", *Nature*, vol. 424, pp. 657-659, 2003
- [13] W. Jin, Z. Wang, J. Ju, "*Two-mode photonic crystal fibers*", *Optic Express*, vol. 13, No. 6 (2005)
- [14] T. A. Briks, J. C. Knight, P. St. J. Russel, "*Endlessly single-mode photonic crystal fiber*". *Opt. Lett.* 22 961-963 (1997)
- [15] W. Zhi, R. Guobin, L. Shuqin, L. Weijun, S. Guo, "*Compact supercell method base on opposite parity for Bragg-Fibers*", *Opt. Express* 11, 3542-3549 (2003)
- [16] L. Xiao, W. Jin, "*Fusion splicing Photonic Crystal fibers and Conventional Single-Mode Fibers: Microhole Collapse effect*", *Lighthwave Technology*, vol. 25, 2007
- [17] W. J. Wadsworth, A. Witkowska, S. G. Leon-Saval, T. A. Birks, "*Hole inflation and tapering of stock photonic crystal fibres*", *Opt. Express* 17, vol. 13 (2005)
- [18] T. A. Briks, Y. W. Li, "*The shape of fiber tapers*", *IEEE J. Lighthwave Technology*, 10, 432-438 (1992)
- [19] T. A. Briks, G. Kakarantzas, P. St. Russel, "*All-fibre devices based on tapered fibres*", presented at *Opt. Fiber Commun. Conf.* paper ThK2 (2004)
- [20] D. Tabor, "*Gases, liquids and solids*", Penguin Books, Harmondsworth UK, 1969
- [21] W.D. Kingery, "*Surface tension of some liquid oxides and their temperature coefficients*", *J. Am. Ceramic Soc.* 42(1), 6-10 (1959)