

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLE
TELECOMUNICAZIONI

Tesi di Laurea

PROGETTO E FABBRICAZIONE DI UN SENSORE COMMERCIALE IN FIBRA OTTICA PER ALTE TEMPERATURE

Laureanda

LUCREZIA FOLTRAN

Relatore

PROF. MARCO SANTAGIUSTINA

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

Alle mie nonne

Indice

Introduzione	1
1 Sensori fotonici: cosa sono e come funzionano	3
1.1 Classificazione e nomenclatura	4
1.2 Principio di funzionamento	5
1.3 Applicazioni	5
1.4 Reticoli di Bragg (Fiber Bragg Gratings, <i>FBG</i>)	6
1.4.1 Definizione	6
1.4.2 Classificazione	7
1.4.3 Fabbricazione	10
1.4.4 Base teorica	12
1.4.5 FBG come sensori di temperatura	14
2 Analisi del problema	17
2.1 Problematiche legate al materiale: fotosensibilità e decadimento termico	17
2.1.1 Fotosensibilità del Tipo I	17
2.1.2 Fotosensibilità dei reticoli in fibra <i>hydrogen-loaded</i>	19
2.1.3 Instabilità termica: approccio “power-law”	21
2.1.4 Rigenerazione del reticolo	22
2.2 Problematiche legate al packaging	28
2.2.1 Scelta dei materiali	29
2.2.2 Dimensioni e struttura	29
2.3 Breve panoramica sullo stato dell’arte	30
2.3.1 Sensori commerciali di temperature fino a 1000 °C con tecnologia FBG in fibra standard	30
2.3.2 Sensori di temperature oltre i 1000 °C in fibra non standard	35
3 Progetto del sensore	37
3.1 Materiale	37
3.1.1 FBG	37
3.1.2 Patchcord e pigtails	38
3.1.3 Packaging	38
3.2 Strumentazione	41
3.2.1 Sorgente	41
3.2.2 Forno	42
3.2.3 Analizzatore di spettro ottico	42
3.2.4 Interrogatore di FBG	43
3.3 Assemblaggio del sensore	44
3.3.1 Distribuzione del calore	44

3.3.2	Assemblaggio della struttura	45
4	Test e risultati sperimentali	49
4.1	Confronto tra la risposta ottica del sensore <i>unpacked</i> e <i>packaged</i> . .	49
4.2	Processo di rigenerazione	50
4.2.1	Osservazioni	52
4.3	Test delle proprietà ottiche	57
4.3.1	Discussione dei risultati	60
4.4	Produzione del sensore	62
4.5	Possibili miglioramenti del package	63
4.5.1	Patchcord	63
4.5.2	Compression fitting	64
5	Conclusioni	65
	Bibliografia	67
	Ringraziamenti	69

Introduzione

Nel 1965 CHARLES K. KAO dimostrò teoricamente l'effettiva possibilità di utilizzare la fibra ottica come mezzo di telecomunicazione, segnando l'inizio di un esponenziale incremento della ricerca in questo ambito. Tant'è che il limite pratico di attenuazione di 20 dB/Km, previsto dallo stesso KAO, fu abbattuto appena cinque anni più tardi [1]. Guardando agli ultimi decenni, mentre da una parte si è continuato ad indagare con l'obiettivo di ottimizzare le comunicazioni ottiche (attenuazione attuale raggiunta ~ 0.2 dB/Km), dall'altra la panoramica di utilizzi della fibra è di molto aumentata. Infatti ad oggi è variamente impiegata anche, per esempio, in microscopia, endoscopia, spettroscopia, illuminotecnica.

Un affascinante ambito di ricerca e sviluppo è rappresentato dalla sensoristica, in particolare monitoraggio e telemetria nel campo dell'industria.

In questa tesi sono state approfondite le problematiche concrete legate alla progettazione e alla fabbricazione di un sensore in fibra ottica per alte temperature caratterizzato da costo e tempi di produzione commercialmente competitivi. Il lavoro, svolto presso l'Istituto di Scienze Fotoniche (ICFO, Castelldefels, Spagna), è stato sponsorizzato da progetti finanziati dall'Agenzia Spaziale Europea e dal Ministero dei Lavori Pubblici spagnolo. In particolare, tra le applicazioni richieste, vi sono:

- monitoraggio dello scudo termico di veicoli spaziali in fase di rientro, che può raggiungere e superare i 1000 °C, per un tempo di 10 minuti circa;
- monitoraggio di strutture civili (edifici, gallerie, etc.) in caso di incendio: il sensore viene inserito all'interno del cemento, che durante l'incendio può raggiungere 800-850 °C, per un periodo di alcune ore durante l'incendio;
- monitoraggio continuato per due anni a 700 °C (non sono stati specificati i dettagli dell'applicazione).

Nel primo capitolo si introducono i sensori fotonici illustrandone vantaggi, principio di funzionamento ed applicazioni; si definiscono e si classificano i reticoli di Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG), con attenzione particolare al loro utilizzo come sensori di temperatura.

Nel secondo capitolo si analizza il comportamento del sensore con tecnologia FBG quando è sottoposto ad alte temperature. Si trattano in maniera distinta due aspetti separati, ma necessariamente collegati, del problema.

Dapprima si considera il sensore dal punto di vista del materiale, ossia la risposta termica della fibra nuda. Si introduce il concetto di fotosensibilità e si svolge un'analisi esaustiva del processo di rigenerazione dei reticoli. Successivamente si affrontano le problematiche legate al *packaging*, dalla resistenza all'alta temperatura alla risposta agli urti.

Infine, si dà una breve panoramica sui sensori fotonici per alte temperature attualmente in commercio.

Nel terzo capitolo si presentano caratteristiche, metodi, misure, accorgimenti presi in considerazione per la fabbricazione di un sensore che riesca ad ovviare alle problematiche esposte nel secondo capitolo.

Nel quarto capitolo si chiariscono i processi eseguiti sul sensore assemblato per rigenerare il grating ed i risultati ottenuti. Si testano infine le proprietà ottiche e si determinano le prestazioni del sensore così realizzato, comparandolo coi sensori commerciali introdotti nel secondo capitolo.

1 Sensori fotonici: cosa sono e come funzionano

Nonostante il suo principale utilizzo nel campo delle telecomunicazioni, la fibra ottica si presta a molteplici impieghi. Una posizione di rilievo è occupata dalla sensoristica fotonica, campo in ampia espansione e con grandissime potenzialità. Tra i numerosi settori in cui è presente si annoverano: il controllo e l'automazione dei processi industriali, il settore aerospaziale e quello dei trasporti, le applicazioni di diagnostica medica e le biotecnologie, l'ingegneria civile e geotecnica ed il monitoraggio ambientale.

Ciò è dovuto al fatto che le tecnologie utilizzate nei sensori in fibra ottica hanno una serie di vantaggi che li rendono interessanti per un ampio range di applicazioni. Infatti sono caratterizzati da [2, 3]:

1. dimensioni compatte e leggerezza;
2. natura passiva;
3. basso consumo di potenza;
4. immunità all'interferenza elettromagnetica;
5. immunità alle fluttuazioni di potenza lungo il percorso ottico;
6. alta sensibilità e precisione;
7. larghezza di banda notevolmente ampia;
8. resistenza agli ambienti ostili;
9. semplicità di *multiplexing* lungo la stessa fibra;
10. facilità di integrazione nei sistemi ottici di telecomunicazione;
11. basso costo.

Tuttavia, per fornire una visione bilanciata, è necessario nominare gli aspetti negativi da cui non sono esenti i sensori fotonici [4]:

- necessità di isolare i sensori da parametri indesiderati;
- disponibilità di sorgenti ottiche;
- costo e disponibilità della strumentazione *ad hoc*;
- necessità di controllare la stabilità a lungo termine.

1.1 Classificazione e nomenclatura

Una prima distinzione tra sensori fotonici si basa sul ruolo della fibra ottica all'interno del dispositivo, e per questo si può parlare di sensori:

estrinseci la fibra ottica ha il compito di guidare l'informazione dal/al sensore;

intrinseci la fibra ottica costituisce anche l'elemento sensibile del dispositivo.

I sensori possono essere distinti anche in:

concentrati eseguono la misura su'area ridotta;

multipunto eseguono la misura su un'area più ampia, ponendo in serie elementi concentrati;

distribuiti eseguono la misura su aree molto ampie con continuità, sfruttando effetti a cui è soggetta naturalmente il materiale della fibra (la silice).

Grazie alla possibilità di integrarli all'interno dei sistemi di comunicazione, il meccanismo di interrogazione del sensore risulta particolarmente semplice.

Si illustrano i due possibili schemi di interrogazione :

1. in trasmissione :



Figura 1.1: Schema di interrogazione in trasmissione

2. in riflessione :

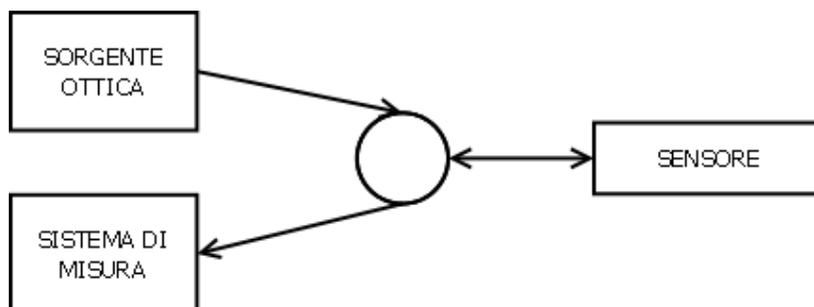


Figura 1.2: Schema di interrogazione in riflessione

1.2 Principio di funzionamento

Grazie ai sensori fotonici si possono facilmente misurare grandezze fondamentali, quali temperatura, tensione meccanica, pressione. Il principio di funzionamento è basato sulla modulazione, per mezzo della quantità da misurare, di uno o più parametri del segnale ottico inviato al sensore: intensità, fase, polarizzazione, lunghezza d'onda, distribuzione spettrale. Il segnale così alterato è trasmesso ad un detector che registra queste variazioni con continuità. Conoscendo le caratteristiche dei segnali in ingresso ed in uscita, si deduce la funzione di trasferimento del sistema. Da qui si risale alla grandezza incognita, in quanto appare esplicitamente nella funzione di trasferimento (Figura 1.3).



Figura 1.3: Schema a blocchi di un sensore fotonico

1.3 Applicazioni

Si possono individuare una serie di “categorie” di applicazioni:

- monitoraggio distribuito di strutture civili o di reti di trasporto, ad esempio per il monitoraggio statico delle strutture, grazie anche alla bassa attenuazione del segnale ed alla scarsa manutenzione necessaria;
- monitoraggio integrato di un numero elevato di grandezze in sistemi quali velivoli, imbarcazioni o auto da corsa, con necessità di ridurre i pesi e le interferenze tra i diversi sistemi installati a bordo;
- misurazioni di grandezze o in ambienti verso i quali il sistema di misura non deve introdurre alcuna alterazione: è il caso della diagnostica medica, in cui si utilizzano per gastroscopia, broncoscopia, chirurgia laser, angioplastica. Con i sensori di temperatura si misura l'ipotermia o si effettua il monitoraggio cardiaco; i sensori di pressione sono di ausilio nelle diagnosi cardiovascolari o intracraniche e, infine, i sensori chimici (di pH, pO₂, pCO₂) rendono possibili indagini su problemi respiratori e metabolici o sul contenuto di ossigeno del sangue e dei tessuti.

Inoltre in questa categoria rientrano i sensori per misurazioni di inquinamento elettromagnetico ambientale, per le quali sono commercializzati soprattutto sensori di tipo estrinseco;

- misurazioni da effettuare in ambienti particolarmente ostili, o nei quali misurazioni con sensori tradizionali sono impossibili. Rientrano in questa categoria le misurazioni da effettuare in prossimità di sorgenti di forti campi elettromagnetici, quali i grossi trasformatori che si utilizzano nelle reti di trasformazione dell'energia o antenne, che rendono inutilizzabili i sensori che richiedono connessioni con conduttori metallici, oppure le misurazioni in presenza o all'interno di materiali esplosivi o infiammabili, che è pericoloso esporre a differenze di potenziale.

1.4 Reticoli di Bragg (Fiber Bragg Gratings, *FBG*)

1.4.1 Definizione

Le strutture in fibra ottica che impiegano gli FBG sono tra le più studiate e certamente quelle che contano il maggior numero di applicazioni commerciali, nella realizzazione sia di sensori che di particolari filtri. Gli FBG sono strutture periodiche di indice di rifrazione che possono essere "scritte" longitudinalmente su una fibra fotosensibile, esponendo il nucleo a intensa radiazione ultravioletta (UV) (Figura 1.4).

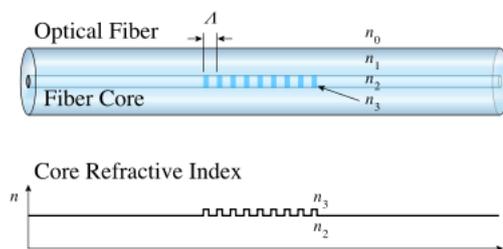


Figura 1.4: Struttura di un FBG

Una tale struttura, il cui principio di funzionamento è illustrato in Figura 1.5, si comporta come un filtro selettivo: quando il reticolo è illuminato con una sorgente luminosa a banda larga, dallo spettro della radiazione trasmessa in uscita dal reticolo sono sottratte le componenti spettrali appartenenti ad una banda centrata su una lunghezza d'onda λ_B , detta lunghezza d'onda di Bragg. Le componenti spettrali eliminate dalla radiazione trasmessa sono riflesse dal reticolo verso la sorgente. Dunque in riflessione si troverà un segnale ottico a banda stretta centrato sulla λ_B , che vale:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.1)$$

con n_{eff} indice di rifrazione efficace del nucleo della fibra (definito da $n_{eff} = n_{co}\sin\theta$ dove n_{co} è l'indice di rifrazione del nucleo e θ è l'angolo di incidenza della luce) e Λ periodo spaziale del reticolo. L'Equazione 1.1 è nota come condizione di Bragg.

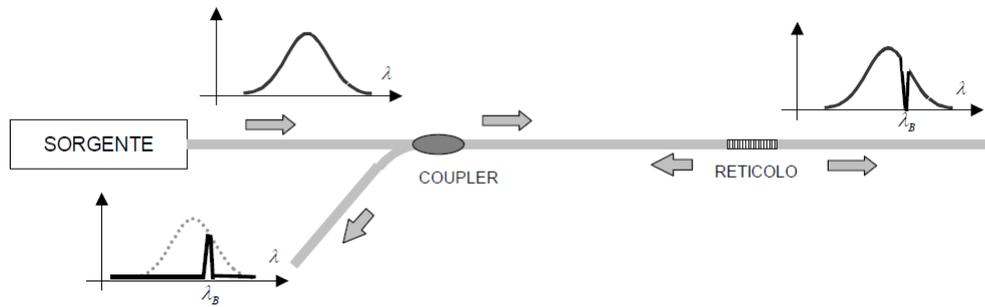


Figura 1.5: Principio di funzionamento di un FBG

1.4.2 Classificazione

1.4.2.1 Accoppiamento

Si possono individuare tre tipi di reticoli di Bragg, a seconda della funzione di accoppiamento [4].

1. *Short-period*: sono gli FBG propriamente detti, ma essendo la tipologia più comune, FBG è diventato sinonimo di reticolo di Bragg generico. Il periodo del reticolo è tipicamente di $0.22 \div 0.54 \mu\text{m}$ e l'accoppiamento della luce incidente avviene con un modo guidato che viaggia in direzione opposta (*backward direction*).
2. *Long-period*: hanno un periodo tipicamente di $100 \div 500 \mu\text{m}$ e la luce incidente si accoppia con un modo di mantello che viaggia nella direzione di propagazione (*forward direction*).
3. *Tilted*: inclinando le frange di un reticolo short-period è possibile accoppiare la luce con un modo irradiante che viaggia in direzione opposta.

1.4.2.2 Meccanismo di formazione

I differenti metodi di creazione delle frange del reticolo [2, 4] hanno un effetto significativo sugli attributi che caratterizzeranno il mezzo ottico, in particolare sulla risposta in temperatura. Le proprietà di alcuni di essi saranno approfondite nel Capitolo 2.

I reticoli di **Tipo I o Standard** si formano in una fibra standard delle telecomunicazioni (silice con nucleo drogato al germanio) mediante un unico processo di assorbimento di fotoni UV. La radiazione UV interagisce solo coi difetti introdotti dal germanio, detti centri ossigeno-deficienti (*germanium oxygen deficiency centers*, GODC), in quanto essi possiedono bande di assorbimento attorno ai 244 nm. Lo spettro di riflessione del modo guidato risulta complementare al segnale in trasmissione, e ciò indica questo tipo di reticoli presenta perdite, per assorbimento o per riflessione nel mantello, irrilevanti. Inoltre, mostrano una variazione positiva dell'indice di rifrazione e un decadimento in riflettività che dipende dalla temperatura.

La fotosensibilità richiesta per la formazione del Tipo I può essere incrementata attraverso un processo chiamato *hydrogen loading* (arricchimento di idrogeno), in cui la fibra ottica è esposta ad idrogeno ad alta pressione a temperatura ambiente [5]. L'idrogeno penetra nella matrice vetrosa fino alla saturazione. In seguito, la radiazione UV porta alla dissociazione dell'idrogeno e alla formazione di difetti Si-OH o Ge-OH, che consentono variazioni d'indice maggiori.

I reticoli di **Tipo II** sono scritti mediante un processo di ionizzazione multifotonica, per mezzo di un singolo impulso di sorgente laser UV ad una intensità di picco tale da superare la soglia di danneggiamento della silice. Per questo motivo sono detti "damage" gratings. Possono raggiungere una riflettività del 99%. Il Tipo II non presenta perdite per lunghezze d'onda più lunghe di quella di Bragg, mentre, a differenza del Tipo I, le più corte risultano fortemente accoppiate al mantello.

Tali reticoli sono stabili a temperature oltre i 1000 °C per qualche ora. Tuttavia, l'esposizione ad alta potenza produce strutture che soffrono di significanti perdite per scattering e caratterizzate da affidabilità e forza meccanica ridotte .

I reticoli **Fs-IR** sono indotti da sorgenti laser IR con durata dell'impulso dell'ordine dei femtosecondi e intensità di picco molto elevata. La formazione avviene per mezzo di un processo di assorbimento/ionizzazione multifotonica non lineare che, a seconda dell'intensità dell'esposizione, porta alla compattazione del materiale e/o alla formazione di difetti. Oltre la soglia di intensità di ionizzazione I_{th} , il processo porta a fusione localizzata, compattazione del materiale e formazione di vuoto che causa un cambio d'indice, stabile fino al raggiungimento della temperatura di transizione del materiale. Le caratteristiche di questa tipologia sono simili a quelle del Tipo II, con una importante differenza. La scarica indotta è rapidamente attenuata, cosicché non si verifica una propagazione del "danno" oltre la zona irradiata. In tal modo le strutture realizzano una performance spettrale di gran lunga migliore rispetto al Tipo II. Al di sotto di I_{th} il processo porta alla formazione di difetti e alla compattazione di materiale simili al Tipo I.

Il vantaggio dell'approccio fs-IR è che non è limitato alle fibre in silice fotosensibili. Inoltre la struttura è termicamente stabile fino alla temperatura di transizione del materiale, che nel caso della silice drogata è superiore ai 1000 °C.

I reticoli di **Tipo In (IIA)** si notano in fibre altamente drogate al germanio non idrogenate. Durante la formazione si osserva che la riflessione inizialmente cresce, come per il Tipo I, poi diminuisce ed è seguita da un ulteriore aumento. Fisicamente, le frange crescono e poi diminuiscono in profondità; successivamente l'esposizione continuata comporta la crescita di un reticolo secondario che mostra uno shift verso il blu nella risposta spettrale, indicando una variazione negativa dell'indice di rifrazione.

In condizioni ottimali, questo tipo di struttura può essere fabbricata in maniera che sia stabile fino a 700 °C.

Infine, si considerano i reticoli **Rigenerati**. Si procede come nel Tipo I con fibre idrogenate, ma dopo la scrittura del reticolo si tratta termicamente. I dettagli

di questo tipo di reticoli saranno trattati nel Capitolo 2.

1.4.2.3 Struttura del reticolo

La struttura dell'FBG può variare sia nell'indice di rifrazione sia nel periodo del reticolo.

Facendo riferimento alla Figura 1.6, il reticolo può essere:

1. uniforme, se il periodo non varia lungo la fibra;
2. *chirped*, se il periodo non è uniforme;
3. *tilted*, se la variazione è inclinata rispetto la normale alla fibra;
4. *superstructured*, se la variazione d'indice è distribuita in superstrutture lungo la fibra.

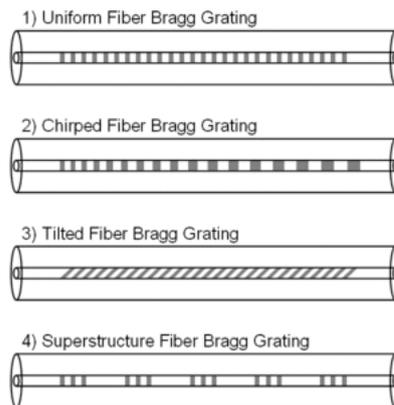


Figura 1.6: Classificazione degli FBG in base alla variazione del periodo

La variazione dell'indice di rifrazione può essere (Figura 1.7):

1. uniforme positiva, se è costante per ogni periodo, con offset positivo;
2. gaussiana *apodized*, se ha una forma longitudinale gaussiana, con offset positivo;
3. *raised-cosine-apodized*, se ha una forma longitudinale a coseno rialzato, con offset nullo;
4. *discrete phase shift*, se le due metà della struttura sono in opposizione di fase, con offset positivo.

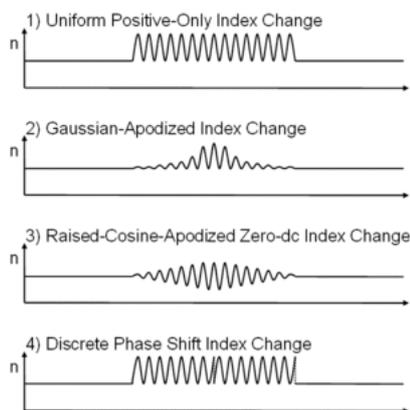


Figura 1.7: Classificazione degli FBG in base alla variazione dell'indice di rifrazione

1.4.3 Fabbricazione

Le principali tecniche di fabbricazione di FBG sono quattro [6].

1.4.3.1 Olografia

Con questa tecnica, che richiede una sorgente laser con una buona coerenza spaziale e temporale, un singolo fascio laser UV è diviso in due componenti, che vengono successivamente ricombinate sulla fibra producendo il pattern di interferenza che realizzerà il reticolo (Figura 1.8).

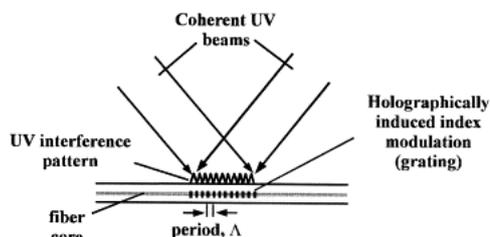


Figura 1.8: Scrittura di un FBG mediante olografia

Il metodo olografico denota flessibilità, perché permette di aggiustare facilmente l'angolo tra i due fasci in maniera tale da creare reticoli con differenti periodi e quindi FBG a differenti lunghezze d'onda. Tuttavia lo svantaggio di questo metodo è che la posizione e la spaziatura tra le frange di interferenza è molto sensibile all'allineamento ottico del sistema. Inoltre, il mantenimento di un adeguato contrasto tra frange richiede una notevole stabilità meccanica e un buon isolamento dalle vibrazioni dell'ambiente.

1.4.3.2 Phase mask

La *phase mask* è una superficie modulata a reticolo di diffrazione, tipicamente in silice fusa. Per periodi più lunghi, il profilo è a onda rettangolare, mentre per periodi più corti tende ad essere quasi-sinusoidale. Quando un fascio laser UV incide

perpendicolarmente sulla phase mask, essa lo divide in due fasci d'uscita, di ordine di diffrazione ± 1 . L'ordine 0 è invece opportunamente annullato. Questi fasci creano un pattern di interferenza nella regione in cui si sovrappongono, scrivendo così l'FBG sul nucleo fotosensibile della fibra. Il periodo dell'FBG sarà la metà di quello della phase mask (Figura 1.9 e Figura 1.10).

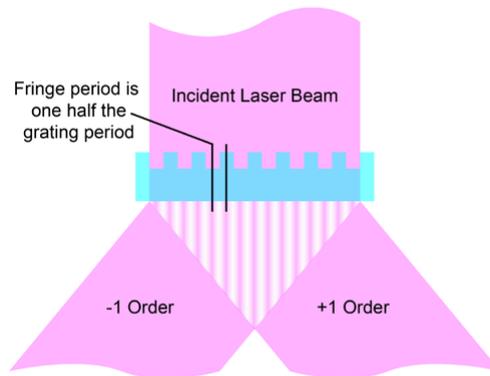


Figura 1.9: Rappresentazione schematica del fenomeno di diffrazione

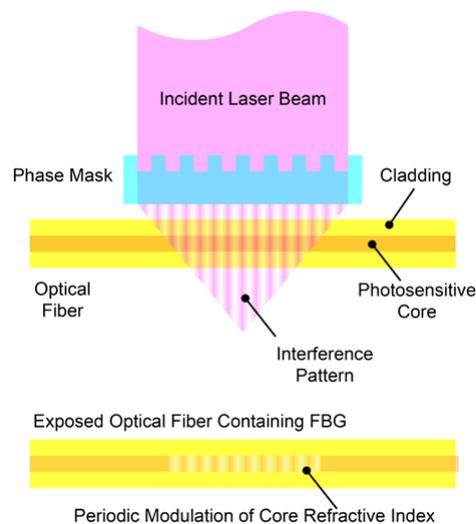


Figura 1.10: Scrittura di un FBG mediante phase mask

Questo metodo è vantaggioso perché è semplice e permette grande ripetibilità. In particolare, l'uso della phase mask non deve obbedire allo stretto requisito di coerenza della sorgente laser UV. Questa tecnica si utilizza anche per la realizzazione di reticoli chirped. Tuttavia ogni phase mask può generare FBG solo per una particolare lunghezza d'onda.

1.4.3.3 Photomask

Il photomask si basa sulla proiezione di una maschera sulla fibra. Il fascio laser viene “omogeneizzato” e fatto passare attraverso la maschera. Il pattern della maschera è così illuminato e proiettato in alta scala di riduzione sulla fibra.

Questa tecnica può teoricamente produrre qualsiasi tipo di reticolo complesso o non periodico. Comunque, è difficile raggiungere risoluzioni sub-micrometriche.

1.4.3.4 Point-by-point

Con questa tecnica un unico fascio laser scrive “punto a punto” il reticolo. In questo caso il fascio del laser è pari al periodo del reticolo. Questo metodo è ideale per la fabbricazione di reticoli a lungo periodo e tilted.

1.4.4 Base teorica

Il risultato che si ottiene esponendo il nucleo di una fibra fotosensibile ad intensa radiazione UV è la perturbazione periodica dell’indice di rifrazione efficace del modo di interesse. Tale perturbazione è descritta da

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (1.2)$$

dove $\overline{\delta n_{eff}}$ è la variazione d’indice media su un periodo del reticolo, v è la visibilità (o contrasto) delle frange, ossia la profondità di modulazione della variazione, Λ è il periodo nominale e $\phi(z)$ descrive il chirp del reticolo, ossia la variazione di Λ [7]. Le proprietà ottiche di un FBG sono essenzialmente determinate dalla variazione di δn_{eff} lungo l’asse longitudinale della fibra, pari a circa 10^{-5} - 10^{-3} [6].

Per una trattazione teorica dell’accoppiamento tra due modi in un FBG si prende in considerazione un reticolo uniforme.

L’azione che esercita un reticolo su un’onda con lunghezza d’onda λ incidente su di esso con angolo θ_1 è descritta da

$$n_{co} \sin \theta_2 = n_{co} \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1.3)$$

dove θ_2 è l’angolo dell’onda diffratta e m è l’intero che determina l’ordine di diffrazione.

Poiché la costante di propagazione del modo è $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$, si ottiene dalla Equazione 1.3

$$\beta_2 = \beta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda}. \quad (1.4)$$

Per il primo ordine di diffrazione, che solitamente domina in un reticolo, si ha $m = -1$. Per un reticolo short-period, in cui l’accoppiamento avviene fra modi che viaggiano in direzioni opposte, si ha che $\theta_2 = -\theta_1$ e quindi $\beta_2 = -\beta_1$ (vedi Figura 1.11)

Inserendo queste informazioni nella Equazione 1.4 si ottiene

$$\lambda_{FBG} = 2n_{eff}\Lambda \quad (1.5)$$

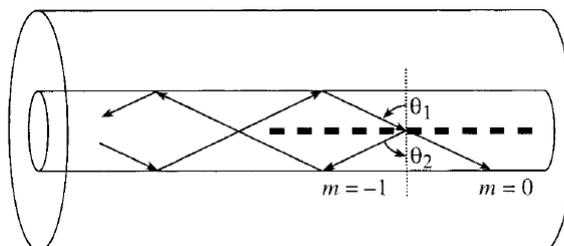


Figura 1.11: Illustrazione a raggi ottici della riflessione di Bragg per mezzo di un FBG

che altro non è che la nota condizione di Bragg.

Ricorrendo alla teoria dei modi accoppiati, si possono ricavare informazioni quantitative sull'efficienza di diffrazione e sulla dipendenza spettrale dei reticoli. Si giunge ad una formula per la riflettività che è

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L)}{\cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \quad (1.6)$$

dove κ è il coefficiente di accoppiamento “puntuale” e rende conto della variazione della modulazione dell'indice; σ è il coefficiente di accoppiamento medio su un periodo; L è la lunghezza totale del reticolo. La dipendenza della riflettività dall'indice di rifrazione è presente nelle espressioni di κ e σ . In Figura 1.12 si illustra la riflettività del reticolo per due valori del parametro κL . Si noti che per valori alti la riflettività aumenta ma il filtro risulta poco selettivo in frequenza.

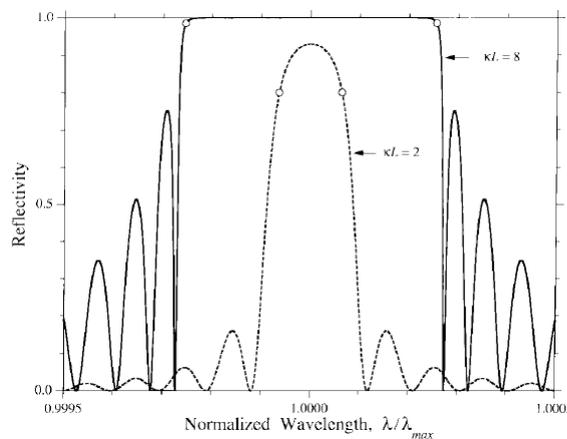


Figura 1.12: Riflettività versus lunghezza d'onda normalizzata per riflessione di Bragg in reticoli uniformi, con $\kappa L = 2$ e $\kappa L = 8$

1.4.5 FBG come sensori di temperatura

Per quanto visto nel paragrafo precedente, la variazione della λ_B può essere imputata ad un cambiamento dell'indice di rifrazione efficace e/o ad un cambiamento del periodo del reticolo. Ciò può avvenire rispettivamente in due modi:

- cambiando la temperatura a cui è soggetto il reticolo;
- sottoponendo il grating a tensione meccanica (*strain*) lungo la direzione della fibra.

In passato la ricerca sulla sensoristica fotonica aveva evitato questo tipo di sensori, a causa della mancanza di componenti in fibra con adeguate prestazioni. Invece, più recentemente gli FBG sono stati i protagonisti del monitoraggio locale di parametri fisici, in particolare di temperatura e strain.

I vantaggi di utilizzare gli FBG come sensori rispetto agli altri sensori in fibra ottica convenzionali o elettronici sono [4]:

1. informazione sul parametro incognito “codificata” come variazione di lunghezza d’onda di picco, quindi non affetta da rumore o da perdita di potenza nella linea;
2. spostamento della lunghezza d’onda di Bragg lineare con le grandezze da misurare per range molto ampi;
3. estrema leggerezza e micro-diametri, per i quali possono essere facilmente posizionati;
4. basso costo di produzione.

Facendo riferimento agli FBG come sensori di temperatura, la traslazione di λ_B si attesta attorno ai 6.8 pm/°C per una λ_B iniziale di 830 nm, 10 pm/°C a 1300 nm, 13 pm/°C a 1550 nm [4], anche se i valori dipendono dal tipo di FBG. Formalmente lo shift per un cambio di temperatura ΔT è esprimibile come

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta)\Delta T \quad (1.7)$$

dove α è il coefficiente di espansione termica per la fibra ($\approx 0.55 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ per la silice) e ζ rappresenta il coefficiente termo-ottico, approssimativamente pari a $8.6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ per fibra con nucleo di silice drogato al germanio [8].

Il principio di funzionamento di un sensore con tecnologia FBG è illustrato in Figura 1.13.

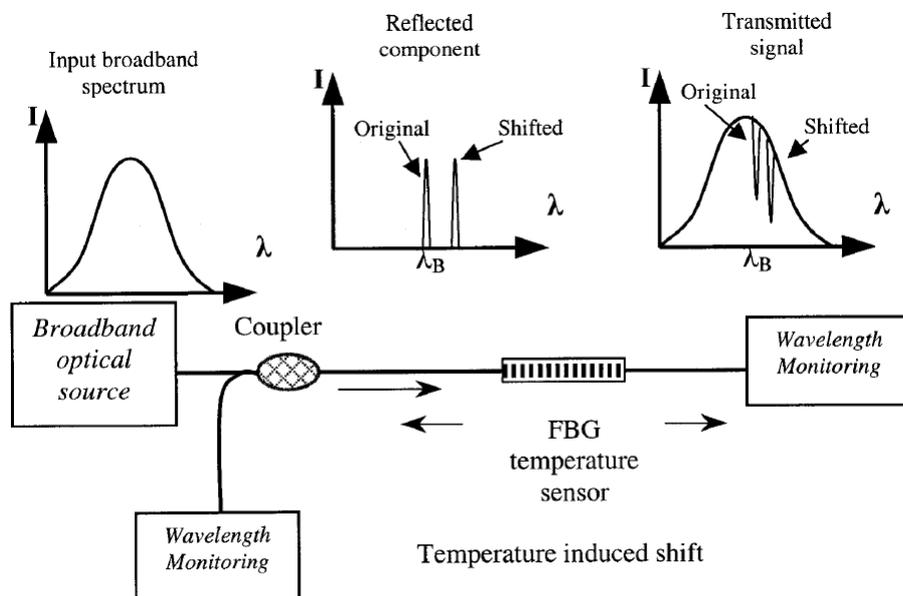


Figura 1.13: Principio di funzionamento di un sensore con tecnologia FBG. Il monitoraggio dei segnali può avvenire contemporaneamente sia in trasmissione che in ricezione

2 Analisi del problema

2.1 Problematiche legate al materiale: fotosensibilità e decadimento termico

Con fotosensibilità della fibra si intende la capacità di cambiare l'indice di rifrazione per mezzo della radiazione incidente. Sebbene essa sia stata oggetto di studio per decenni, non è ancora stata fornita una teoria unificata per i meccanismi fisici e chimici responsabili del cambio di indice di rifrazione. Una spiegazione di tale mancanza è che la fotosensibilità potrebbe differire significativamente in dipendenza da vari fattori, come il tipo di fibra, i pre-trattamenti, la lunghezza d'onda e la potenza del raggio UV che scrive il reticolo.

2.1.1 Fotosensibilità del Tipo I

Si considerino i reticoli di Tipo I. Essi esibiscono un "invecchiamento" naturale che si manifesta nel decadimento temporale in riflettività, il quale può essere modellato con una funzione del tempo "power-law" [9]. Inoltre questo decadimento è fortemente dipendente dalla temperatura. Anche a temperatura ambiente il decadimento è rilevante, benché avvenga su una scala temporale di anni.

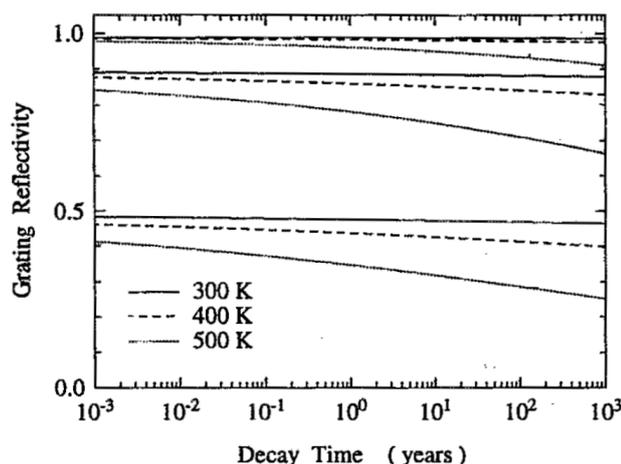


Figura 2.1: Decadimento teorico della riflettività degli FBG con riflettività iniziale del 99%, 90% e 50%

Questo decadimento è il risultato dell'instabilità dell'eccitazione elettronica. Si verifica uno spopolamento termico degli stati trappola eccitati, creati durante la formazione del reticolo. A temperature superiori a quella ambiente, i portatori negli stati trappola ad energia minore riescono ad assorbirne abbastanza per scappare

e tornare allo stato fondamentale. I rimanenti portatori sono associati a stati più stabili, ma anche questi possono tornare allo stato principale se la temperatura aumenta ancora. Poiché la maggior parte dei portatori instabili decade a basse temperature, i reticoli di Tipo I vengono trattati termicamente a temperature maggiori della temperatura di funzionamento di progetto, per ottenere una riflettività stabile a lungo termine. Nonostante ciò, all'interno di ambienti ostili (temperatura > 450 °C), i reticoli di Tipo I sono inadatti, poiché la maggior parte della modulazione di indice di rifrazione è annullata a queste temperature [2].

2.1.1.1 Meccanismo di fotosensibilità

La fotosensibilità delle fibre ottiche in germaniosilicato ha attratto notevole interesse perché è ciò che permette di scrivere reticoli di indice di rifrazione nel nucleo della fibra.

I centri di colore, un tipo di difetto cristallografico che modifica le caratteristiche di assorbimento del materiale, sono i responsabili della fotosensibilità nelle fibre ottiche. In particolare, nelle fibre di silice drogate al germanio la fotosensibilità è dovuta ad una banda di assorbimento a 244 nm attribuita ai difetti GODC del nucleo. Osservando lo spettro di assorbimento, quando si illumina il nucleo con radiazione UV, si verificano uno sbiadimento della banda a 244 nm e la crescita di bande di assorbimento localizzate attorno ai 195 nm. Per la relazione di Kramers-Kronig, ciò significa che l'indice di rifrazione è cambiato [10].

Facendo riferimento alla Figura 2.2, la luce a 240 nm eccita un GODC dal suo stato fondamentale S_0 al suo stato eccitato S_1 , da cui ionizza o spontaneamente o assorbendo un altro fotone a 240 nm. Comunque, dallo stato S_1 , un GODC si rilassa allo stato T_1 . Da lì il difetto subisce una metamorfosi e cambia la sua struttura in *drawing-induced defect* (DID). Questa nuova disposizione strutturale (Figura 2.3) è considerata la causa principale del cambio d'indice di rifrazione [11].

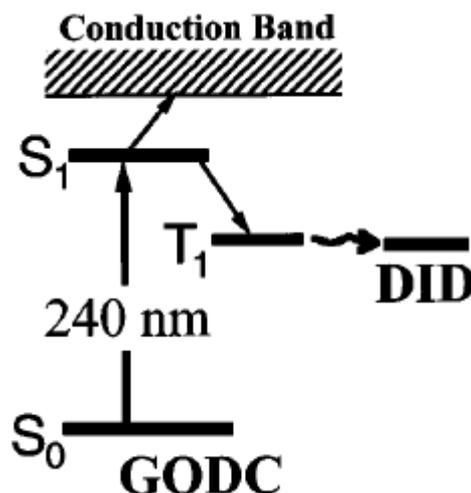


Figura 2.2: Diagramma a livelli energetici di un GODC

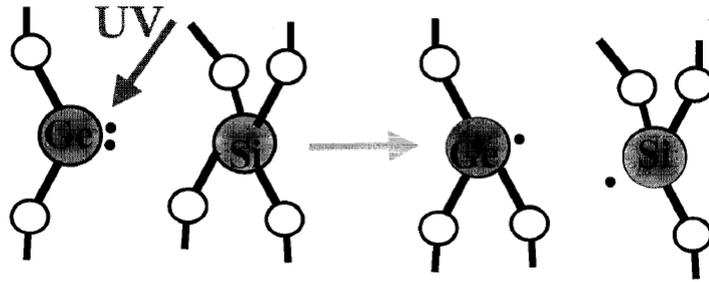


Figura 2.3: Modello del cambio strutturale da GODC a DID

2.1.2 Fotosensibilità dei reticoli in fibra *hydrogen-loaded*

Nella maggior parte dei casi, la situazione ideale sarebbe poter scrivere reticoli nella fibra standard usata nelle reti di telecomunicazioni ottiche (SMF-28[®] di Corning[®] con 3% di drogaggio al germanio [12]). Questo favorirebbe da una parte la piena compatibilità tra fibre e sensori ai fini dell'integrazione, e dall'altra l'uso di fibre prodotte in serie a basso costo. In ogni caso, le fibre standard per telecomunicazioni sono caratterizzate da una fotosensibilità bassa, quindi i reticoli presentano una modulazione più debole e pertanto una riflettività minore.

Per ovviare a questi problemi sono state progettate fibre fotosensibili speciali e/o metodi per rendere le fibre non fotosensibili più sensibili alla radiazione UV. Le tecniche più usate sono:

- multi-drogaggio della fibra (fibra *co-doped*). Ad esempio, l'introduzione di boro riduce l'indice di rifrazione del nucleo e consente un aumento di germanio nel nucleo fino al 10% mol ;
- arricchimento di idrogeno della fibra standard per telecomunicazioni (fibra *hydrogen-loaded*). La fotosensibilità è estremamente alta a 248 nm. In questo modo si riescono a raggiungere modulazioni d'indice dell'ordine di 10^{-3} .

Ad oggi è la più usata per la produzione degli FBG. D'altra parte questa tecnica incide negativamente sulle prestazioni degli FBG:

1. quando la temperatura a cui è sottoposto il reticolo aumenta, la riflettività inizia a diminuire;
2. per tempi di trattamento lunghi, indipendentemente dalla temperatura, la riflettività dell'FBG risulta instabile.

Quindi, sebbene i reticoli appaiano stabili inizialmente, il comportamento appena illustrato ha posto significative limitazioni nell'utilizzo commerciale degli FBG, tenendo conto che:

- potrebbe essere necessario utilizzarli in ambienti termicamente ostili, se paragonati al tipico requisito $[-40 \div +80]$ °C per le telecomunicazioni;
- il tempo di vita richiesto da alcuni componenti nell'industria delle telecomunicazioni è di diversi anni.

In particolare, il problema sorge quando la temperatura a cui è esposto il reticolo comincia ad assumere valori dell'ordine di 500 °C. L'FBG diventa termicamente instabile, la potenza riflessa diminuisce ed a 700 °C il reticolo risulta cancellato. La massima temperatura raggiungibile risulta essere 600 °C. Per questi motivi i sensori di temperatura con tecnologia FBG hydrogen-loaded sono solitamente usati sotto i 200 °C [13].

2.1.2.1 Meccanismo di fotosensibilità

Fibre standard vengono esposte ad idrogeno ad alta pressione a temperature che spaziano dai 21 ai 75 °C. La pressione dell'idrogeno varia da ~20 a oltre 750 atm. I tempi del trattamento sono quelli sufficienti per raggiungere almeno il 95% della solubilità di equilibrio dell'idrogeno nel nucleo. Per 125 μm di diametro, un trattamento di 12 giorni a 21 °C porta a un solubilità dell'idrogeno di ~116 ppm/atm (1 ppm = 10^{-6} moli di H_2 per mole di SiO_2). Sebbene siano possibili tempi di esposizione più brevi a temperature maggiori, è preferibile evitare temperature superiori a 100 °C poiché queste potrebbero causare un aumento delle perdite in fibra dovute alle reazioni dell'idrogeno. Inoltre la solubilità dell'idrogeno non è direttamente proporzionale alla temperatura. Dopo questo trattamento si procede con la scrittura del reticolo, usando laser UV a ~240 nm. Si riescono ad ottenere variazioni d'indice dell'ordine di 10^{-3} (Figura 2.4).

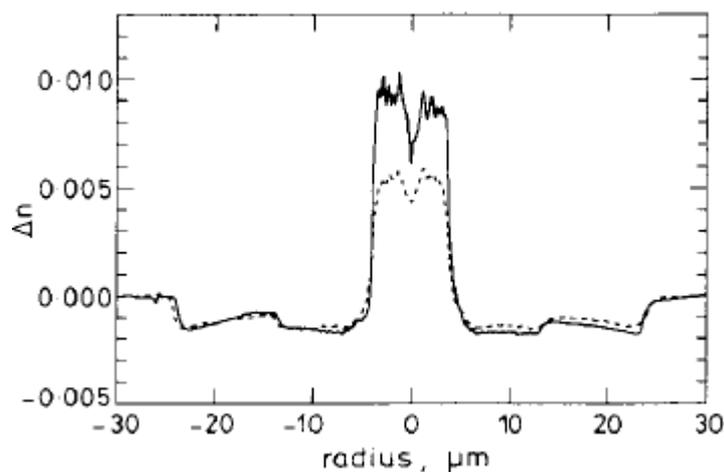


Figura 2.4: Profilo d'indice di un punto dell'FBG in una fibra standard non trattata (linea tratteggiata) e in una fibra che ha subito idrogenazione (linea continua). Δn si riferisce all'indice di rifrazione di silice pura.

Ora, osservando lo spettro di assorbimento, appaiono la nota banda a ~240 nm, indice della presenza di GODC, e picchi di idrossidi Si-OH/Ge-OH (Figura 2.5). La loro concentrazione risulta essere simile a quella del drogaggio e in quantità doppia rispetto la concentrazione iniziale di H_2 [5]. Da ciò si evince che a differenza di altre tecniche che puntano solo sui difetti localizzati normalmente presenti a basse concentrazioni di drogante, con questo metodo la reazione avviene in ogni sito dove è presente il germanio, così da permettere incrementi d'indice molto più grandi.

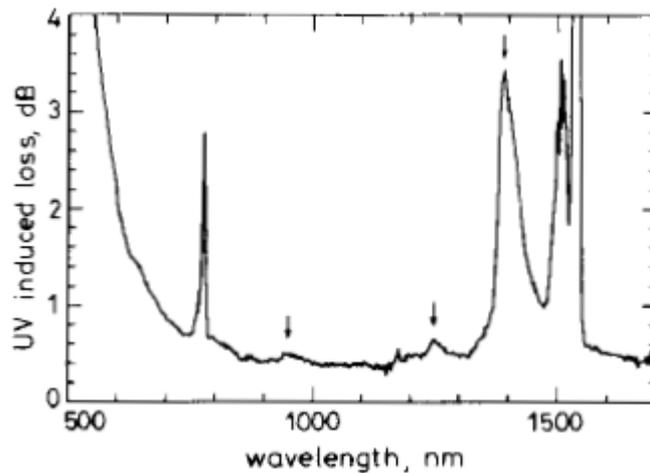


Figura 2.5: Spettro di assorbimento di un reticolo in fibra idrogenata. I picchi indicati con una freccia corrispondono all'assorbimento di idrossidi.

Chimicamente, il meccanismo è il seguente. Le molecole di H_2 si infiltrano nella matrice vetrosa, rompono i legami $Si(Ge)-O-Si(Ge)$ presenti nella rete SiO_4 (GeO_4), portando alla formazione di gruppi idrossili $Si-OH$ ($Ge-OH$) e introducendo un elevato numero di difetti GODC, entrambi contribuenti alle variazioni d'indice osservate (Figura 2.6). Il gruppo OH nelle prossimità del centro Ge^{2+} diminuisce così la dimensione della rete ed aumenta il grado di libertà della struttura attorno al centro Ge^{2+} . L'atomo Ge^{2+} può ora muoversi liberamente nello stato fondamentale per una distanza pari alla lunghezza di equilibrio del legame, e arrivare allo stato eccitato.

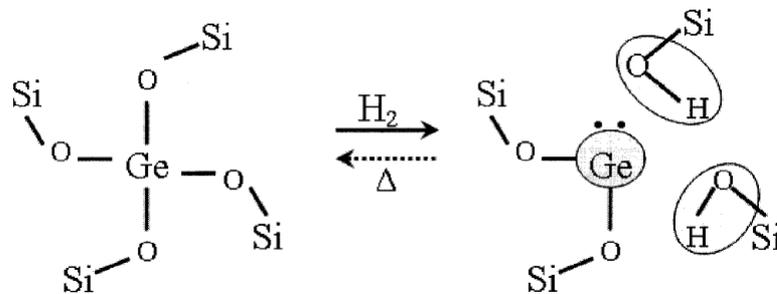


Figura 2.6: Modello chimico di formazione di $Si-OH$ ($Ge-OH$) e GODC

2.1.3 Instabilità termica: approccio “power-law”

Come accennato precedentemente, la degradazione termica in riflettività di un FBG può essere descritta da una funzione del tempo “power-law”, con esponente piccolo ($\ll 1$). La modulazione d'indice inizialmente decade molto rapidamente, ma il tasso decresce con l'avanzare del tempo; inoltre il decadimento è anche fortemente dipendente dalla temperatura. Ciò avviene sia in fibre drogate standard, sia in fibre co-doped che in fibre hydrogen-loaded.

Nell'approccio empirico "power-law", i dati sperimentali di decadimento seguono bene la seguente equazione [9]:

$$\eta = \frac{1}{1 + A(t/t_1)^\alpha} \quad (2.1)$$

dove η è il cambio d'indice normalizzato ($\Delta n(t)/\Delta n_0$), t è il tempo, i parametri di *fitting* A e l'esponente α sono proporzionali a $\exp(\alpha T)$ e T , rispettivamente. In questa forma sia A che α sono adimensionali, e $t_1 = 1 \text{ minuto}$ è introdotto per mantenere la coerenza delle dimensioni. Una volta che i parametri A e α sono stati determinati, il decadimento dell'indice di rifrazione può essere calcolato per ogni temperatura e tempo, usando l'Equazione 2.1. (Figura 2.7)

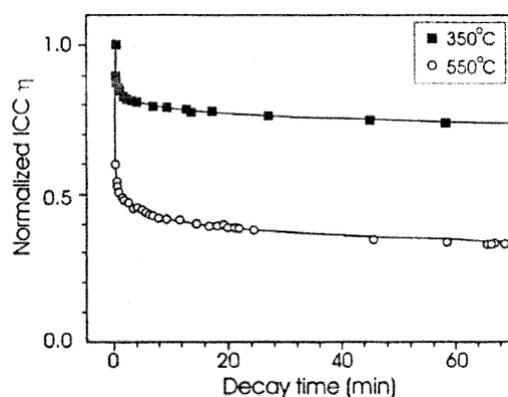


Figura 2.7: Risultati sperimentali di variazione d'indice normalizzata per due reticoli a 350 e 550 °C in funzione del tempo. La linea continua corrisponde all'Equazione 2.1

Dal punto di vista elettronico, il meccanismo è illustrato dalla Figura 2.8. Gli elettroni dei GODC sono eccitati dalla radiazione UV e passano alla banda di conduzione. Da qui vengono intrappolati in stati di energia, detti stati-trappola, creati dalla presenza stessa del drogante (corrispondente alla struttura DID). Lo stato di depopolamento termico per ogni tempo e temperatura è determinato dall'energia di demarcazione E_d , che stabilisce quanti elettroni si trovano ancora negli stati trappola e quanti sono stati rilasciati (corrispondenti alla struttura GODC).

2.1.4 Rigenerazione del reticolo

A partire da reticoli di Tipo I scritti in fibre idrogenate è possibile produrre FBG rigenerati. Dopo la scrittura del reticolo e la fuoriuscita dell'idrogeno che non ha contribuito alla reazione, si procede con un attento trattamento termico ad una temperatura medio-alta di 600-700 °C, che porta alla diffusione interstiziale dei gruppi idrossili con la formazione di molecole d'acqua all'interno del vetro, che diventa così termicamente stabile.

Il trattamento a temperatura intermedia porta alla cancellazione del reticolo di Tipo I originario, ma aumentando ulteriormente la temperatura si genera un nuovo reticolo con una lunghezza d'onda di Bragg maggiore. La periodicità non cambia,

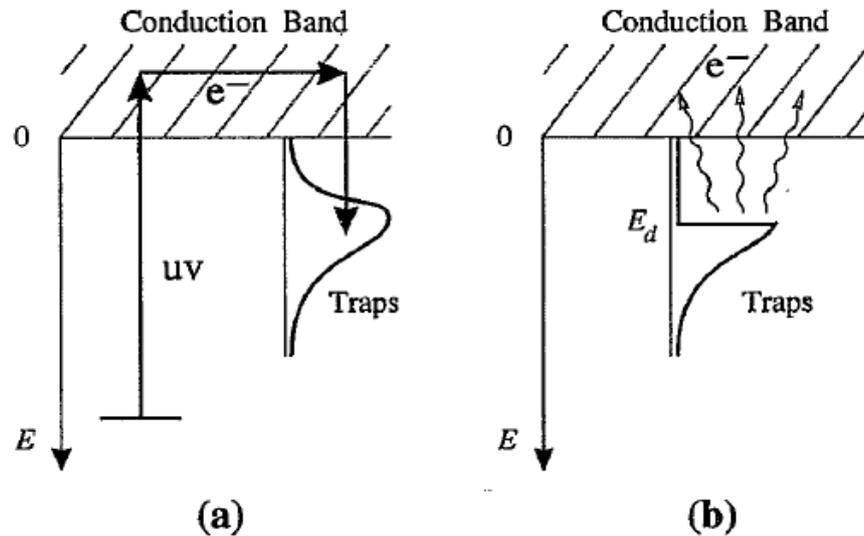


Figura 2.8: Diagramma del modello fisico in cui (a) gli elettroni eccitati sono intrappolati in una distribuzione continua di stati trappola; e (b) il depopolamento termico delle trappole a tempo e temperatura che corrisponde allo svuotamento delle trappole meno energetiche ($E < E_d$).

in quanto la periodicità del reticolo originario e la distribuzione degli idrossili corrispondono. La modulazione d'indice di questo nuovo reticolo è significativamente minore di quella del reticolo originale di circa un'ordine di grandezza, tipicamente minore di 10^{-4} , e ciò comporta una bassa riflettività del reticolo se la sua lunghezza è inferiore ad 1 cm. Tuttavia, per la sua bassa modulazione d'indice, il reticolo risulta meno suscettibile a perdite per scattering, spesso associate ai reticoli di Tipo II. Inoltre l'FBG risulta stabile ad alte temperature e può essere portato ripetutamente a oltre $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Recentemente, è stato mostrato che non è necessario che l'idrogeno sia presente durante l'iscrizione, ma solo durante la rigenerazione termica. Per questi motivi, risulta ancora poco chiaro quale sia l'esatto meccanismo responsabile del processo [2].

2.1.4.1 Principio di formazione di reticoli rigenerati (Regenerated Fiber Bragg Gratings, RFBG)

La modulazione d'indice di rifrazione di questi reticoli è causata da un cambiamento nella composizione chimica, piuttosto che nei difetti elettronici [14].

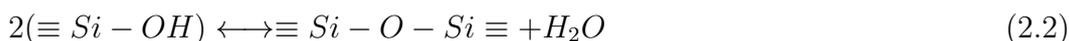
L'idea di base che sta dietro la formazione degli RFBG è cambiare localmente e periodicamente le proprietà di diffusione di uno o più droganti. Una volta ottenuto questo, un trattamento termico omogeneo sull'intera struttura dovrebbe causare una diffusione differenziale che porta ad una ridistribuzione periodica dei droganti. Poiché la concentrazione del drogante generalmente incide sull'indice di rifrazione, il risultato finale sarà una struttura di indice di rifrazione periodica. Dopo che la modulazione è stata creata e il processo di diffusione ha raggiunto l'equilibrio, la

stabilità termica del sistema sarà determinata solo dalle proprietà di diffusione del drogante modulato periodicamente.

Un metodo per creare una variazione periodica delle proprietà di diffusione è utilizzare reazioni chimiche periodicamente indotte per modificare la struttura dei legami nella silice. Questo può essere ottenuto con una buona risoluzione spaziale se nel processo sono coinvolti fotoni UV.

2.1.4.2 Aumento della diffusione efficace dei droganti

Una reazione chimica che può soddisfare i requisiti di modificazione delle proprietà di diffusione è basata sul meccanismo di diffusione dei gruppi idrossili nel reticolo di una fibra hydrogen-loaded. Essi si diffondono, reagiscono e si ha formazione di acqua molecolare, con riproduzione dei legami originari (Equazione 2.2). L'acqua molecolare si diffonde poi per diffusione interstiziale



I gruppi idrossili sono presenti periodicamente nella fibra secondo il periodo del reticolo originario, di conseguenza la diffusione efficace sarà anch'essa periodica.

I vantaggi della formazione di acqua molecolare sono due [13].

1. Da una parte, la scindibilità dell'acqua molecolare è quasi impossibile fino alla temperatura di fusione della silice, grazie ai forti legami che la caratterizzano. Quindi la temperatura a cui può sopravvivere un RFBG è molto più alta di quella di un FBG convenzionale.
2. L'acqua molecolare è caratterizzata da una bassa diffusività all'interno della fibra. Anche ad alte temperature, il processo di diffusione è lento. Pertanto questo tipo di reticoli possiede una stabilità termica più alta dei reticoli convenzionali.

2.1.4.3 Fabbricazione dei reticoli rigenerati

Dopo la creazione di un reticolo di Tipo I, l'idrogeno che non ha contribuito alla reazione viene fatto fuoriuscire, per evitare formazione termica di idrossili, che diminuirebbe l'ampiezza finale della modulazione dell'indice di rifrazione. Il reticolo è inserito in un forno e si aumenta la temperatura da 20-25 °C ad approssimativamente 1000 °C. Come si nota dalla Figura 2.9, l'aumento di temperatura porta al decadimento del reticolo del Tipo I che è di conseguenza cancellato. A seguito della cancellazione, cresce un nuovo reticolo, che dopo un primo decadimento, si stabilizza. Questo secondo reticolo è l'RFBG.

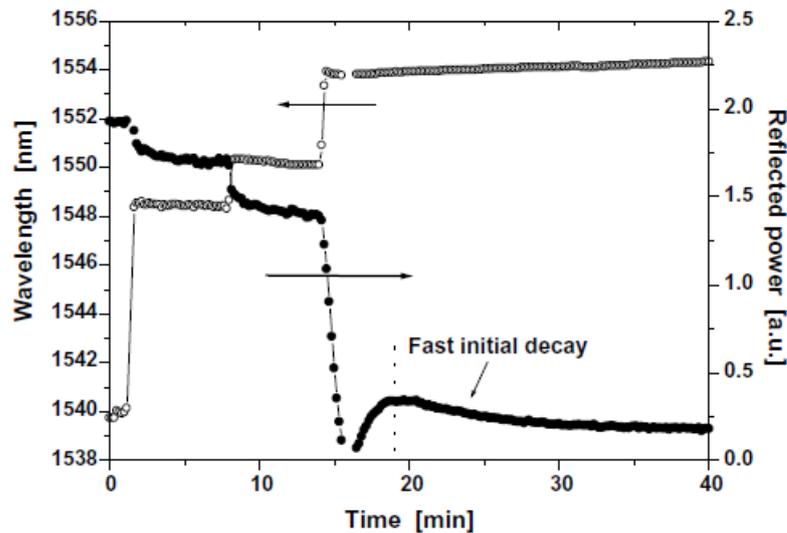


Figura 2.9: Cancellazione di un reticolo di Tipo I e crescita di un RFBG per una fibra hydrogen-load

Comunque, si è notato che la modulazione finale dell'indice di rifrazione del reticolo rigenerato dipende dal trattamento termico che precede quello a 1000 °C. L'ottimo di temperatura per un trattamento termico intermedio è risultato essere di 600-700 °C (Figura 2.10). I risultati di Figura 2.9 sono ottenuti considerando questo test.

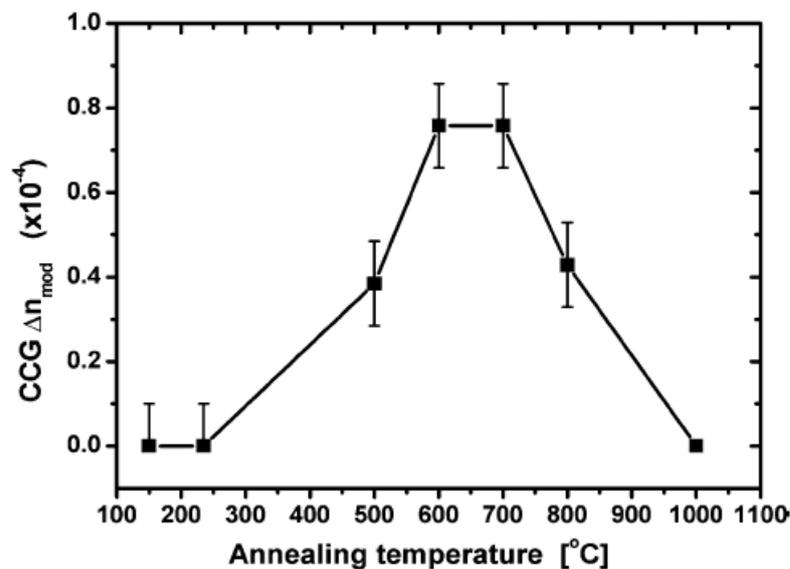


Figura 2.10: Modulazione finale dell'indice di rifrazione del reticolo rigenerato per varie temperature di trattamento termico intermedio

A livello chimico, le immagini suggeriscono la presenza di più processi differenti durante il trattamento ad alta temperatura. Il decadimento del reticolo iniziale è inteso come il tipico decadimento del Tipo I, forse dovuto alla diffusione dell'acqua molecolare, che annulla i difetti indotti da radiazione UV. Il comportamento di

crescita del RFBG è presumibilmente dovuto a differenti meccanismi, tra cui processi di diffusione e rilassamento strutturale del vetro, che comunque conducono ad uno stato di equilibrio termico.

A causa della modificazione della struttura vetrosa, dovuta alle reazioni chimiche e alla diffusione, essa non risulta più all'equilibrio nelle regioni esposte. Il processo alla temperatura di 1000 °C appare indispensabile per lo sviluppo e la stabilizzazione del reticolo, per mezzo del rilassamento della struttura.

2.1.4.4 Instabilità termica dei reticoli RFBG

Poiché la riflettività del reticolo è causata da una variazione periodica della composizione chimica del nucleo, la stabilità termica sarà limitata dalla diffusione dei droganti all'interno delle singole frange. Infatti, dato che i droganti si diffondono all'interno di una struttura periodica, il contrasto tra frange si riduce ma la periodicità è mantenuta.

Per studiare il decadimento degli RFBG è stato determinato un modello di diffusione dei droganti in una struttura periodica che ne determina i coefficienti di diffusione. Tale modello è stato estrapolato dai risultati sperimentali del decadimento di differenti fibre portate a varie temperature, da 1000 a 1200 °C (Figura 2.11).

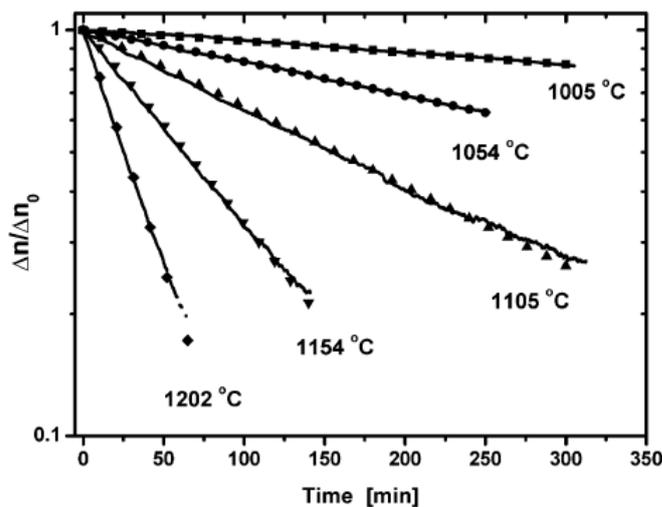


Figura 2.11: Decadimento termico nel tempo per fibre portate a differenti temperature

In ogni caso, fino a 1000 °C il reticolo risulta stabile (Figura 2.12).

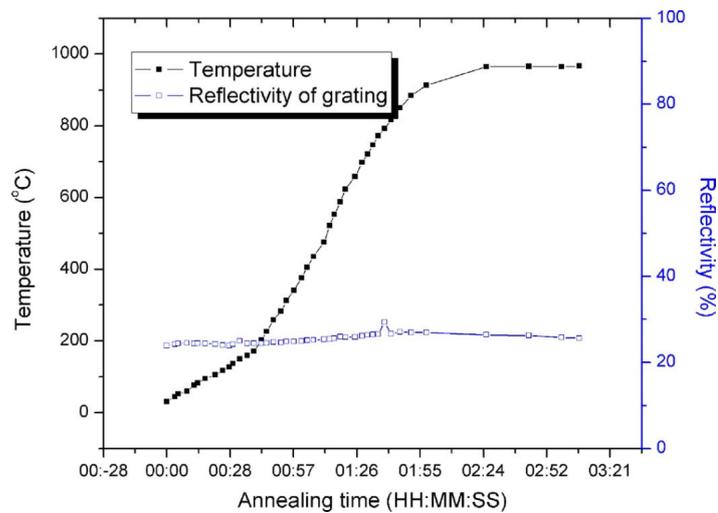


Figura 2.12: Stabilità in temperatura della riflettività di un RFBG

2.1.4.5 Reticoli rigenerati ad alta riflettività

Nonostante la stabilità termica, gli RFBG in questo modo mostrano una riflettività bassa (25% a 1000 °C). In [13] è stato verificato che la riflettività dei reticoli rigenerati in ambiente ad alta temperatura è collegata alla quantità di idrossidi Si-OH, o indirettamente alla riflettività dell'FBG hydrogen-loaded originario. Il reticolo ottenuto da un FBG originario ad alta riflettività è mostrato in Figura 2.13.

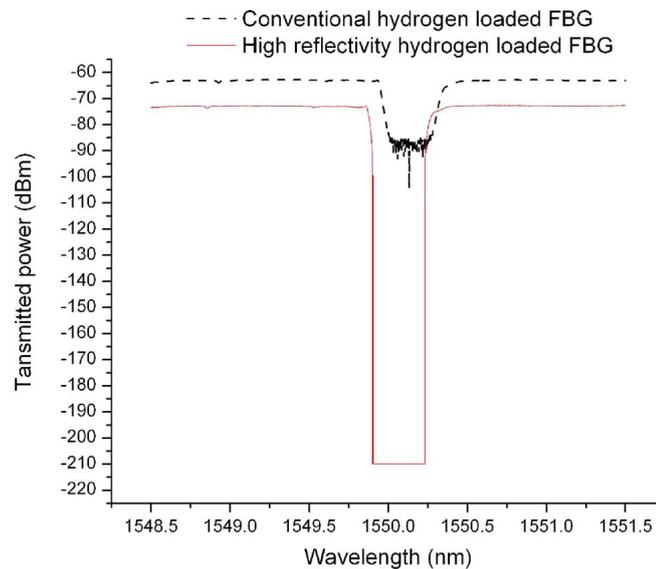


Figura 2.13: Confronto tra riflettività di un reticolo convenzionale e un RFBG a partire da FBG ad alta riflettività

In Figura 2.14, si osserva che a basse temperature (200 °C), l'FBG ad alta riflettività è di poco più forte del convenzionale, circa 4 dB. A 850 °C il comportamento è differente: il convenzionale continua a decrescere mentre l'FBG ad alta riflettività esibisce già un forte incremento di rigenerazione, di circa 6 dB. Conseguentemente, la temperatura di cancellazione dell'RFBG risulta più alta, spostandosi a 1100 °C.

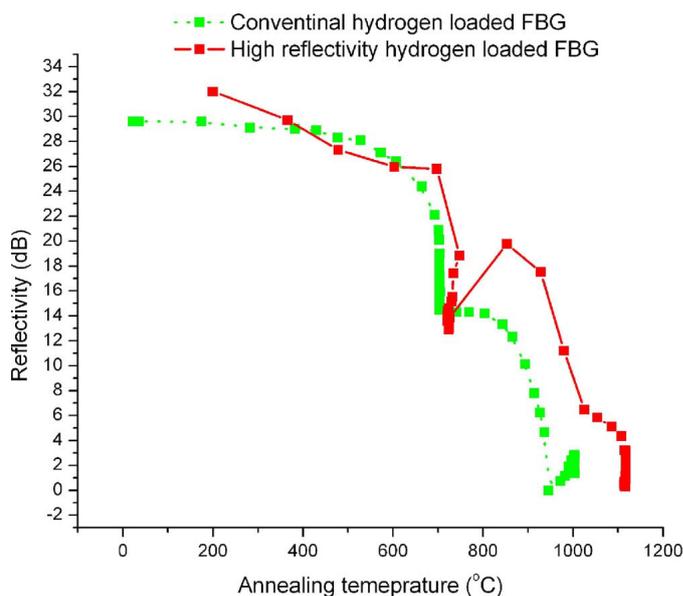


Figura 2.14: Confronto tra il comportamento in temperatura della riflettività di un FBG convenzionale e un FBG ad alta riflettività

Quindi, ad oggi, è possibile fabbricare reticoli che siano utilizzabili fino a 1000 °C.

2.2 Problematiche legate al packaging

Per operare in ambienti ad alta temperatura, un problema importante per qualsiasi sensore in fibra ottica è il *packaging*.

A temperature vicine ai 1000 °C in atmosfera, le fibre standard devono essere spogliate di tutti i loro rivestimenti protettivi (acrilici e polimeri) affinché non si brucino. Tuttavia le fibre nude perdono quasi tutta la loro forza meccanica. Esse sopravvivono centinaia di ore a queste temperature, in quanto il punto di fusione (*melting point*) della fibra è di 1600 °C. Comunque qualsiasi manipolazione successiva al test non è possibile, poiché la fibra diventa estremamente debole. Inoltre la degradazione meccanica è maggiore quando le fibre ottiche sono testate in atmosfere ricche di ossigeno. L'idea è quella di proteggere la fibra dall'esposizione all'ossigeno in alta temperatura realizzando un package adatto, che sopravviva anch'esso alle alte temperature. La scelta più ovvia è quella di rivestire la fibra dopo che è stato scritto il reticolo, o prima nel caso di reticoli rigenerati.

Un buon packaging di un sensore per alte temperature deve garantire:

- la risposta ottica del sensore, nel senso che lo spettro del sensore non deve differire molto dall'originale;
- il mantenimento delle proprietà dell'FBG; ciò comprende: stabilità dello shift della lunghezza d'onda di Bragg con la temperatura (risposta termo-ottica), ripetibilità della risposta termo-ottica ad alte temperature, tempo di risposta del sensore;
- il processo di rigenerazione del reticolo, nel caso di RFBG;

- l'integrità dell'intero sensore ad alte temperature;
- una buona stabilità meccanica, per proteggere la fibra da urti e manipolazioni e per assicurare che il sensore sia sensibile solo alla temperatura;
- flessibilità e compattezza, per poter essere trasportato ed applicato con facilità;
- facilità, velocità e basso costo di fabbricazione, perché sia commercialmente competitivo.

La progettazione di un packaging consono deve prendere in considerazione tutti i punti precedenti.

2.2.1 Scelta dei materiali

Requisiti:

rigidità Il primo obiettivo è quello di evitare fratture della fibra. Il materiale scelto non si deve piegare o modificare sotto l'azione di stress longitudinali o pressioni perpendicolari alla fibra. Oltre allo scopo di protezione della fibra, la resistenza del materiale deve far sì che la risposta ottica del sensore non sia affetta da grandezze diverse dalla temperatura. Infatti, pressioni o stress longitudinali modificano lo shift della lunghezza d'onda di Bragg in maniera indipendente dalla temperatura. Quindi è indispensabile garantire l'unicità della causa dello spostamento di λ_B .

termoresistenza Il materiale scelto deve essere ovviamente resistente a temperature attorno ai 1000 °C, cioè il suo melting point dev'essere molto più alto. Inoltre, anche dopo il trattamento termico ad alta temperatura non deve piegarsi o deformarsi.

reperibilità Ai fini di un packaging economico, il materiale utilizzato dev'essere facilmente reperibile ed a basso costo.

Per soddisfare questi requisiti, i materiali più utilizzati sono quelli metallici. L'oro può essere utilizzato per trattamenti termici fino a 700 °C, mentre per trattamenti a temperature vicino ai 1000 °C non è adatto, poiché il suo melting point è di 1064 °C [2]. Inoltre, per il suo elevato costo, non soddisfa il requisito di reperibilità.

2.2.2 Dimensioni e struttura

Le dimensioni del packaging dipendono molto dall'applicazione del sensore di temperatura. L'idea è posizionarlo attraverso piccoli fori nell'ambiente di cui si vuole monitorare o conoscere la temperatura.

Quindi i requisiti che deve soddisfare sono:

compattezza Il sensore dev'essere sufficientemente compatto, perché interferisca il meno possibile con l'ambiente. Allo stesso tempo la sua lunghezza dev'esser

tale da misurare con esattezza la temperatura del punto desiderato. Tuttavia si desidera che il sensore sia facilmente trasportabile e applicabile, quindi dev'essere anche il meno ingombrante possibile per non pregiudicarne la maneggevolezza.

ininfiammabilità Un aspetto molto importante riguarda la propagazione del calore all'interno dell'intero dispositivo. In particolare, ciò che si vuole garantire è la protezione del patchcord della fibra, costituito da polimeri, il cui melting point non supera le poche centinaia di gradi. Una lunghezza non adeguata potrebbe portare alla bruciatura dei materiali costituenti il patchcord.

Una soluzione generalmente adottata è quella di montare una struttura "a strati" di materiali diversi, in cui la fibra è racchiusa fortemente.

2.3 Breve panoramica sullo stato dell'arte

2.3.1 Sensori commerciali di temperature fino a 1000 °C con tecnologia FBG in fibra standard

I sensori presi in considerazione di seguito sono gli unici prodotti in commercio per alte temperature in fibra standard.

OETMS-700 di O/E Land

Il sensore prodotto dall'azienda O/E Land raggiungere una temperatura di funzionamento massima di 700 °C [15]. La lunghezza standard garantita è di 9 cm, che potrebbe non essere sufficiente per una serie di applicazioni. Comunque, ciò che lo rende meno competitivo è il tempo di consegna, che può raggiungere i 6 mesi per lunghezze superiori alla standard.

Prodotto	OETMS-700
Range di funzionamento	-50 ÷ +700 °C
Risoluzione	0.5 °C
Precisione	± 2 °C
Lunghezza standard	90 mm
Materiale esterno	stainless steel
Diametro materiale esterno	5 mm
Lunghezza patchcord	1 m
Materiale patchcord	armour
Prezzo	€ 580
Tempi di consegna	~ 6 mesi

Tabella 2.1: Caratteristiche tecniche di OETMS-700

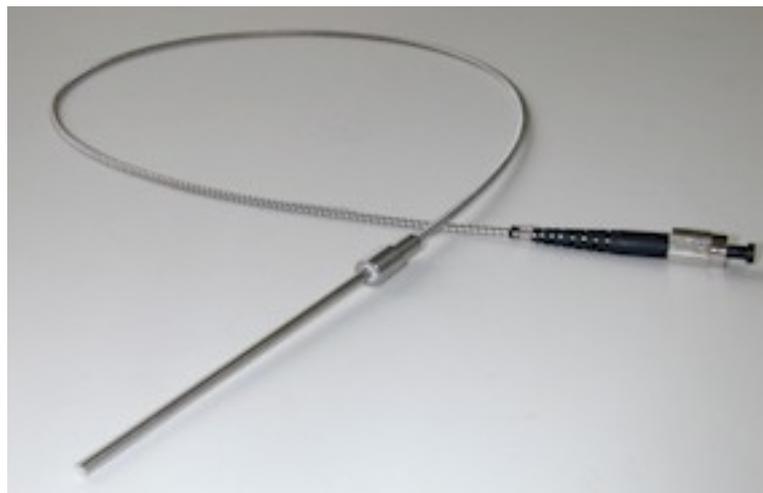


Figura 2.15: OETMS-700

Per quanto riguarda le prestazioni, è stata testata in laboratorio la riflettività del sensore, sottoposto a cicli di temperatura tra 600 °C e 700 °C. Osservando la Figura 2.16, si nota che la riflettività iniziale di - 52 dBm risulta diminuita solo di 0.5 dB (-52.5 dBm).

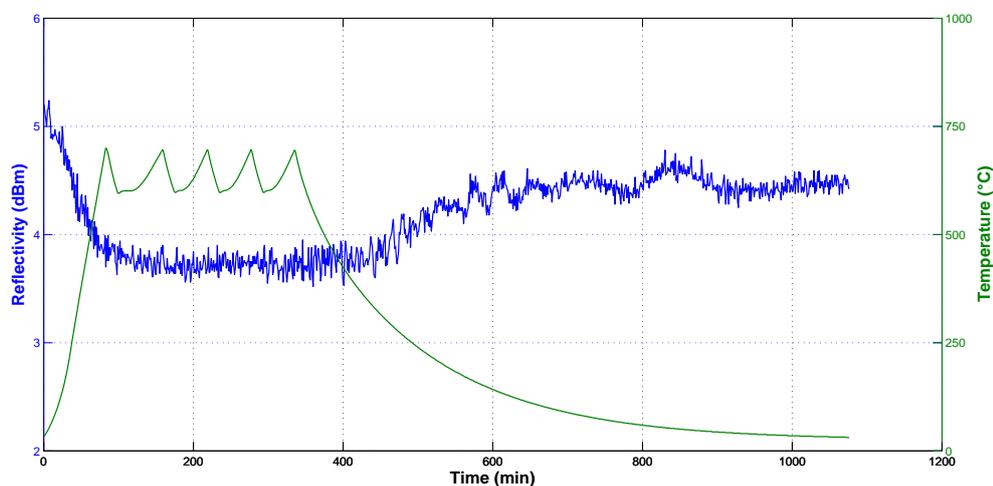


Figura 2.16: Test di riflettività per il sensore OETMS-700

Lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg presenta isteresi: la rampa di discesa differisce dalla rampa di salita di 0.1 nm (Figura 2.17). Ipotizzando che per un sensore con λ_B iniziale pari a 1550 nm lo shift sia di 13 pm/°C [4], allora la precisione del sensore risulta essere in realtà di 7.7 °C. Inoltre, questo sensore presenta un tempo di risposta a 1000 °C pari a 44.72 secondi.

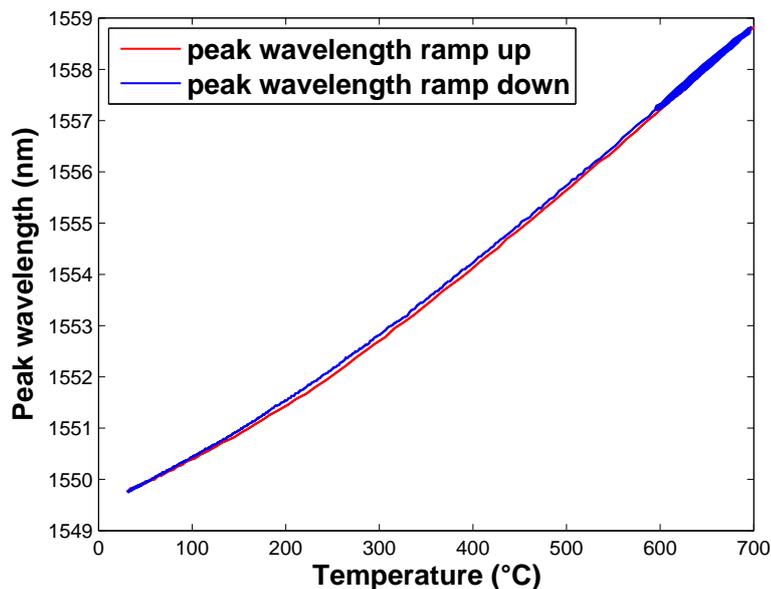


Figura 2.17: Shift della lunghezza d'onda di Bragg per il sensore OETMS-700. Si noti l'isteresi presente nel ciclo.

TP-01 di FBGS

Il prodotto di FBGS presenta lo stesso range di funzionamento del precedente [16]. La lunghezza standard di appena 6 cm lo rende inutilizzabile in molte applicazioni in cui le dimensioni sono di molto superiori e il punto di cui si vuole misurare la temperatura è difficilmente raggiungibile. Inoltre sulla validità del prodotto incidono molto la bassa precisione e l'elevato prezzo di vendita, considerando che non è possibile ordinare meno di 5 pezzi.

Prodotto	TP-01
Range di funzionamento	+50 ÷ +700 °C
Risoluzione	0.1 °C
Precisione	5 °C
Lunghezza standard	60 mm
Materiale esterno	SS316
Diametro materiale esterno	4 mm
Lunghezza patchcord	1.5 m
Materiale patchcord	Acciaio armato con rivestimento in LDPE
Prezzo	€ 1541 (minimo 5 pezzi)
Tempi di consegna	6-8 settimane

Tabella 2.2: Caratteristiche tecniche di TP-01

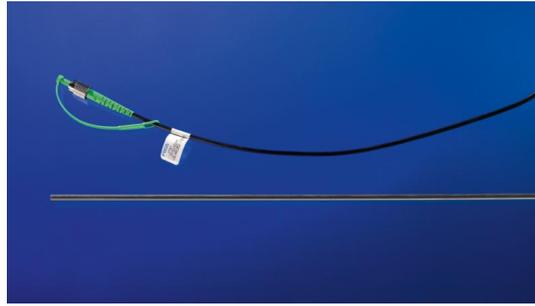


Figura 2.18: TP-01

HELICA™ di Chiral Photonics

Il prodotto di Chiral Photonics si distingue dagli altri per la capacità di resistere a 1000 °C [17]. Ciò dipende dal fatto che il reticolo brevettato dall'azienda non è fabbricato con metodi convenzionali, bensì torcendo uniformemente una fibra di silice pura sottoposta a calore. In questo modo si riesce a realizzare meccanicamente una struttura periodica a doppia spirale stabile, senza il requisito di fotosensibilità della fibra, ovviando dunque alle problematiche introdotte dalla stessa. Questo tipo di reticoli sono intrinsecamente dotati di un profilo d'indice sinusoidale, che è più difficile da ottenere con le tecniche convenzionali FBG. Inoltre non presentano isteresi, sottoposti a cicli di temperatura tra 700 °C e 1000 °C (Figura 2.20).

Comunque, si tratta di reticoli a lungo periodo, quindi per utilizzare un interrogatore in riflessione bisogna inserire un micro-specchio nella punta del dispositivo. Inoltre il dispositivo presenta un diametro esterno di appena 1 mm, che, in caso di flessioni indesiderate del sensore ad alte temperature, potrebbe essere insufficiente per garantire la corretta risposta ottica.

Prodotto	HELICA™
Range di funzionamento	fino a 1000 °C
Sensibilità	0.01 nm/°C
Precisione	± 1%
Lunghezza standard	300 mm
Materiale esterno	metallo
Diametro materiale esterno	1 mm
Lunghezza patchcord	1.7 m
Materiale patchcord	polimero
Prezzo	\$ 600 (2008)
Tempi di consegna	12 settimane

Tabella 2.3: Caratteristiche tecniche di HELICA™

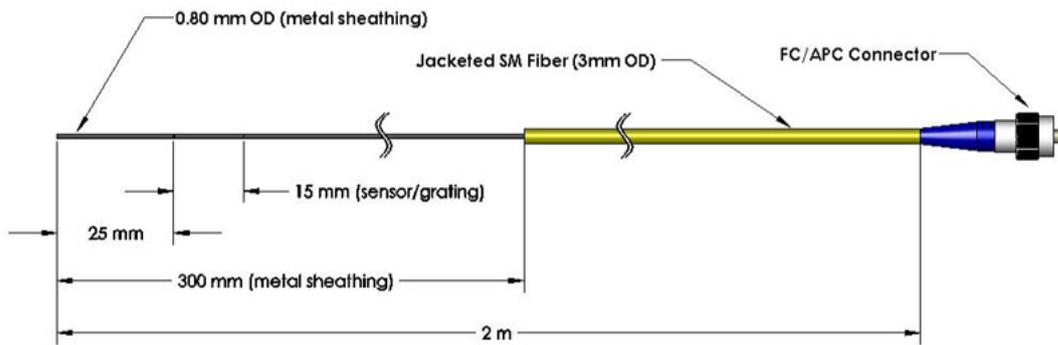


Figura 2.19: HELICA™

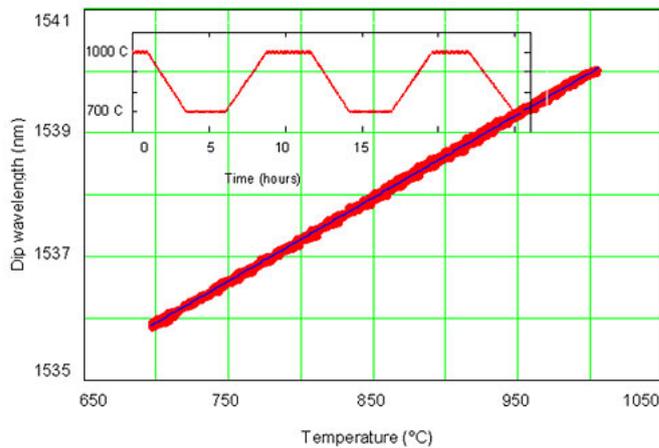


Figura 2.20: Shift della lunghezza d'onda di Bragg per HELICA™

Il sensore è stato testato in laboratorio. Come si vede dalla Figura 2.21, la riflettività in uscita presenta i due picchi di trasmissione, caratteristici dei due segnali in uscita da un reticolo long-period (LPG). Uno svantaggio legato a questa configurazione risulta essere la necessità da parte della casa produttrice di specificare il picco da inseguire nelle misure di temperatura. Inoltre viene fornito un software ad hoc per le misure, poiché in generale la trasmissione appare molto attenuata ad alte temperature, indice di un reticolo poco efficiente.

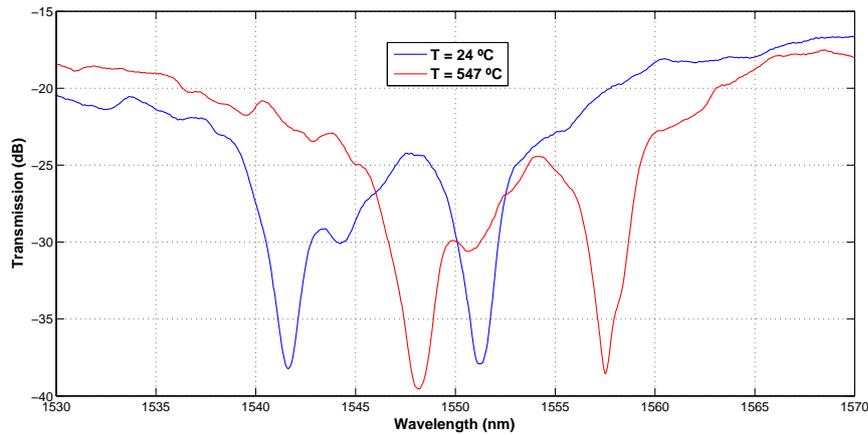


Figura 2.21: Spettro di trasmissione del sensore HELICATM

2.3.2 Sensori di temperature oltre i 1000 °C in fibra non standard

In ambito di ricerca, sono stati sviluppati sensori in fibra ottica non standard che riescono a raggiungere temperature di molto superiori ai 1000 °C. Comunque, questi prodotti non sono ancora presenti in commercio. Essi si basano sempre sulla tecnologia FBG, ma la fibra utilizzata non è quella standard a causa del più basso valore di melting point della silice.

La fibra più utilizzata per le applicazioni ad alta temperatura è la fibra di zaffiro a cristallo singolo (*single-crystal sapphire*), la cui temperatura di transizione è 2030 °C. A differenza delle fibre tradizionali a singolo modo, le fibre di zaffiro presentano un mantello forato longitudinalmente che rende la guida multimodo a 1550 nm e sensibile alle perdite per flessione e alla conversione dei modi [2]. I reticoli fs-IR scritti su fibre sapphire (SFBG) sono quindi dispositivi intrinsecamente multimodo, i quali generano una risposta in riflessione che non è sensibile alla temperatura come gli FBG standard. Infatti lo spettro di riflessione osservato è caratterizzato da una larghezza di banda più ampia con una struttura complessa che consiste nella sovrapposizione di differenti modi riflessi dal reticolo. Ovviamente è preferibile una risposta in riflessione a banda stretta generata da un singolo modo. Per ottenere ciò da SFBG multimodo, si stringe il mantello della fibra SM in modo tale che all'interfaccia il modo fondamentale abbia un diametro pari a quello della fibra di zaffiro (Figura 2.22). Il modo fondamentale della guida in zaffiro viene eccitato producendo una risposta in riflessione monomodale. Gli SFBG non evidenziano degradazioni nella forza meccanica del reticolo fino a temperature pari a 1745 °C. Nonostante ciò risultano essere svantaggiosi perché non sono costituiti da fibra standard e quindi bisogna operare meccanicamente per interfacciare i due tipi di fibra. Da prendere in considerazione anche il costo più elevato della fibra di zaffiro.

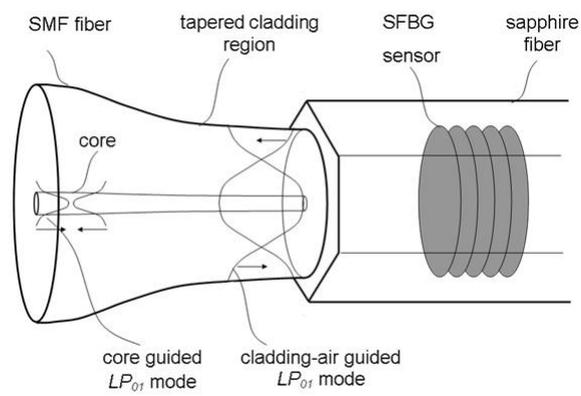


Figura 2.22: Illustrazione del metodo utilizzato per ottenere uno spettro di riflessione a singolo modo in una fibra di zaffiro

3 Progetto del sensore

L'obiettivo di questo lavoro è stato il progetto del packaging di un sensore per alte temperature con le seguenti caratteristiche:

- utilizzo di fibra standard delle telecomunicazioni;
- mantenimento delle proprietà ottiche del reticolo;
- stabilità delle proprietà ottiche del reticolo rigenerato;
- competitività coi sensori operativi fino a 700 °C esistenti in commercio.

3.1 Materiale

La scelta dei materiali si basa sui requisiti appena elencati. La fibra sui cui è scritto il reticolo deve essere standard, si utilizzano materiali possibilmente economici e che siano resistenti per lunghi periodi a 700 °C.

3.1.1 FBG

La fibra utilizzata è SMF-28e[®] prodotta da Corning[®] [18]. L'azienda è da decenni leader nella produzione della fibra standard delle telecomunicazioni. Nella Tabella 3.1 sono indicate alcune caratteristiche.

Lunghezza d'onda di funzionamento	1550 nm
Attenuazione massima	0.19-0.2 dB/Km
Lunghezza d'onda di cut-off	≤ 1260 nm
Dispersione dei modi di polarizzazione (PMD)	≤ 0.2 ps/ $\sqrt{\text{km}}$
Diametro della fibra	125 ± 0.7 μm
Diametro del rivestimento	245 ± 5 μm
Temperatura di funzionamento	-60 ÷ +85 °C
Resistenza a trazione	≥ 100 kpsi

Tabella 3.1: Specifiche della fibra SMF-28e

Gli FBG sono realizzati da Chylas [19]. Si tratta di reticoli uniformi, scritti dopo un processo di idrogenazione con tecnica phase mask. Per le caratteristiche generali si faccia riferimento alla Tabella 3.2 e per la *strength* tipica alla Figura 3.1.

Lunghezza d'onda centrale	1505-1562 nm
Tolleranza	± 0.1 nm
Larghezza di banda a 3 dB	< 0.25 nm (> 0.25 per chirped)
Riflettività	< 99.9 %
Lunghezza del reticolo	< 10 mm

Tabella 3.2: Specifiche degli FBG di Chylas

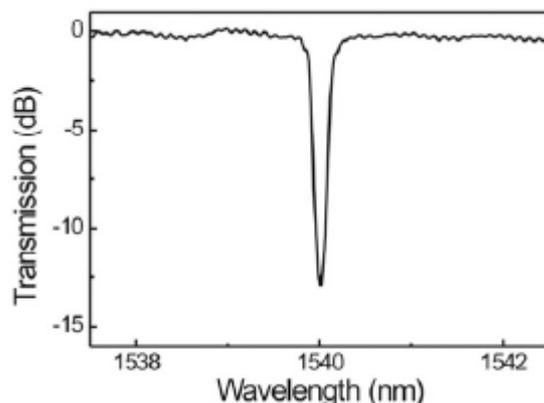


Figura 3.1: Strength tipica di un FBG di Chylas

3.1.2 Patchcord e pigtails

Il patchcord di collegamento utilizzato è un semplice patchcord con connettore FC/APC di Corning (Figura 3.2) [20]. A livello sperimentale non è stato considerato necessario utilizzare cavi più robusti, come un patchcord *armoured*. Le caratteristiche del cavo sono elencate nella Tabella 3.3. La bassa temperatura di funzionamento non attacca la bontà del sensore, perché questa parte è progettata per non entrare a contatto con gli ambienti ad alte temperature da monitorare.

Temperatura di funzionamento	$-20 \div 60$ °C
Materiali del cavo	polimeri LSZH/FRNC
Diametro del cavo	2.8 mm
Resistenza a urto	1000 N/10cm
Resistenza a trazione	200 N

Tabella 3.3: Caratteristiche del patchcord FC/APC di Corning

3.1.3 Packaging

Si precisa che per motivi di confidenzialità non è possibile citare i nomi dei fornitori del materiale, né informare sulle caratteristiche esatte del packaging.

Il packaging del sensore si basa su quello delle termocoppie, i più comuni sensori elettrici di temperatura. Come questi dispositivi, la forma del sensore è tubolare e allungata, per poter essere inserito facilmente negli ambienti da monitorare e raggiungere i punti ad alta temperatura senza compromettere l'intera struttura del



Figura 3.2: Patchcord FC/APC standard

sensores. Nel caso di sensori in fibra ottica, si tratta di proteggere il materiale sensibile e garantirne il principio di funzionamento, mediante sovrapposizione di materiali diversi.

3.1.3.1 Rivestimento esterno

Per soddisfare i requisiti di un package consono si è deciso di utilizzare come guaina esterna acciaio inossidabile 316 (SS316). Questa lega resiste ad una temperatura massima di 900 °C e ha una buona applicabilità in atmosfera di idrogeno. L'acciaio da una parte permette un notevole trasferimento di calore alla fibra, non inficiando le sue proprietà come sensore, dall'altra la protegge da manipolazioni, urti, piegamenti.

In particolare, viene impiegato un tubo di protezione, avente le caratteristiche riportate nella Tabella 3.4.

Materiale	SS316
Diametro esterno	3 mm
Diametro interno	1.78 mm
Lunghezza	300 mm

Tabella 3.4: Caratteristiche del tubo di protezione esterno

3.1.3.2 Guaina interna

Per proteggere ulteriormente la struttura della fibra esposta ad alte temperature si utilizza un tubo ceramico. Lo scopo di questo rivestimento è fare un “matching” tra le proprietà termiche tra il metallo del tubo esterno e il vetro della fibra ottica. Inoltre è atta a riempire lo spazio tra tubo metallico e fibra in quanto non si sono riusciti a trovare tubi metallici economici con diametro esterno di 3 mm e diametro

interno simile a quello della fibra. Questa guaina ha anche il compito di mantenere la fibra dritta all'interno del dispositivo.

Il materiale costituente ha le proprietà fisiche sono illustrate nella Tabella 3.5.

Composizione	80% mullite, 20% vetro
Assorbimento d'acqua	0
Permeabilità a gas	impermeabile
Resistenza a compressione	100000 psi
Resistenza a trazione	14000 psi
Temperatura massima di funzionamento	1650 °C

Tabella 3.5: Proprietà del materiale

Le caratteristiche del tubo utilizzato sono specificate nella Tabella 3.6.

Materiale	Ceramica
Diametro esterno	1.59 mm
Diametro interno	0.79 mm
Lunghezza	300 mm

Tabella 3.6: Caratteristiche del tubo isolante intermedio

3.1.3.3 Connessione package-patchcord

La connessione tra package e patchcord dev'essere resistente a temperatura e urti, ma allo stesso tempo permettere facile maneggevolezza e flessibilità del sensore. Si utilizzano tre pezzi.

TUBO METALLICO

Si tratta di un tubo avente le stesse proprietà del tubo metallico esterno del package ma con differenti dimensioni (si veda la Tabella 3.7).

Materiale	SS316
Diametro esterno	4.5 mm
Diametro interno	3.35 mm
Lunghezza	3.75 mm

Tabella 3.7: Caratteristiche del tubo metallico di connessione

ADESIVO

Per unire in maniera facile ma efficace i materiali all'altezza del giunto, si utilizza una semplice colla che è resistente fino a 150 °C e che non ha bisogno di trattamenti termici per solidificarsi. Infatti quello che si vuole evitare è qualsiasi processo termico precedente la rigenerazione, il quale potrebbe causare una fuoriuscita, anche minima, dell'idrogeno. Le caratteristiche tecniche sono illustrate nella Tabella 3.8.

Tempo di preparazione e applicazione	4 minuti
Tempo di manipolazione	10 minuti
Tempo di solidificazione	60 minuti
Resistenza al tempo di indurimento	100 Kg/cm ²
Temperatura di funzionamento	-30 ÷ 150 °C
Coefficiente di dilatazione	4.75 * 10 ⁻⁵

Tabella 3.8: Caratteristiche di Nural 27

Anche se la temperatura massima raccomandata è di 150 °C, si è deciso di utilizzare comunque questa colla perché si ipotizza che nella zona di utilizzo sia presente una temperatura inferiore (vedere Sezione 3.3.1).

GUAINA TERMORETRAIBILE

Per garantire ulteriore stabilità e protezione alla connessione, senza pregiudicarne la compattezza, si utilizza una guaina in film termoretraibile. Si tratta di un particolare polimero che sottoposto ad una fonte di calore si ritira fino a circa il 50% della dimensione iniziale, aderendo alla superficie dell'oggetto attorno al quale è stato avvolto.

3.2 Strumentazione

3.2.1 Sorgente

La sorgente di luce utilizzata è una sorgente a banda larga di Safibra (Figura 3.3) [21]. Le caratteristiche sono illustrate nella Tabella 3.9.



Figura 3.3: Sorgente a banda larga Safibra

Modello	OFLS-B-15-75-C-FA
Lunghezza d'onda centrale	1550 nm
Larghezza di banda	60 nm
Ripple	0.15 dB
Temperatura di funzionamento	-20 ÷ 60 °C
Tipo di connettore	FC/APC

Tabella 3.9: Dati della sorgente a banda larga Safibra

3.2.2 Forno

Per rigenerare il reticolo e testare il sensore è stato utilizzato un forno tubolare di Carbolite (Figura 3.4) [22] con le caratteristiche descritte nella Tabella 3.10.

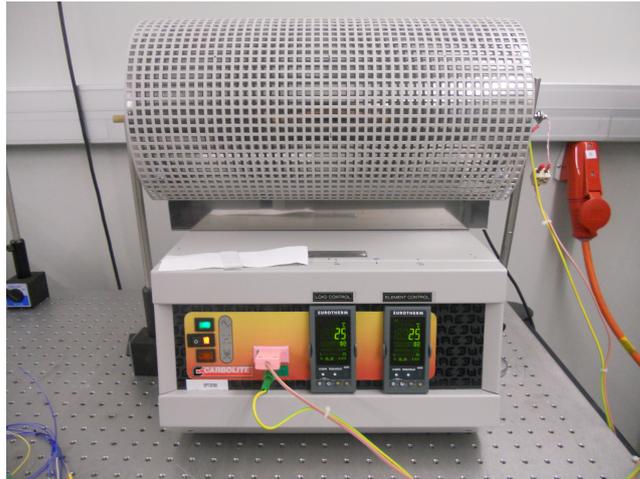


Figura 3.4: Forno tubolare Carbolite

Modello	MTF 12/38/400
Temperatura massima	1200 °C
Lunghezza del tubo	450 mm
Lunghezza di riscaldamento	400 mm
Diametro interno	38 mm
Tempo minimo di riscaldamento	25 min

Tabella 3.10: Caratteristiche del forno Carbolite

3.2.3 Analizzatore di spettro ottico

Per le misure spettrali è stato utilizzato l'analizzatore di spettro HP70952B di HP (Figura 3.5).



Figura 3.5: Analizzatore di spettro ottico

3.2.4 Interrogatore di FBG

Per interrogare il sensore, si utilizza un interrogatore specifico per sistemi basati su FBG. Il dispositivo, illustrato nella Figura 3.6, è prodotto da Ibsen Photonics e possiede le caratteristiche riportate nella Tabella 3.11[23]. In particolare, si utilizza questo strumento quando si ha bisogno di misure ad alta frequenza, dell'ordine del kHz, come ad esempio la misura del tempo di risposta del sensore.

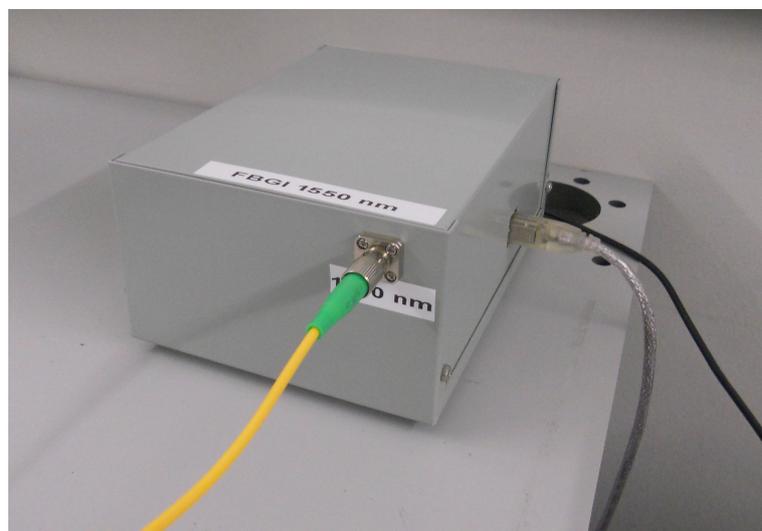


Figura 3.6: Interrogatore I-MON di Ibsen Photonics

Range di lunghezze d'onda	nm
Risoluzione	< 0.5 pm
Precisione	5 pm
Spostamento di lunghezza d'onda	1 pm/°C
Range dinamico	30 dB
Frequenza di misura	970 Hz
Range potenza ottica in ingresso	-80 ÷ -20 dB

Tabella 3.11: Caratteristiche dell'interrogatore

3.3 Assemblaggio del sensore

3.3.1 Distribuzione del calore

Prima di procedere all'assemblaggio del sensore, è stata verificata la distribuzione della temperatura all'interno del forno tubolare. Infatti da essa è possibile avere un'idea di come si distribuisce il calore attorno al sensore nel caso di un'applicazione reale, ed in questo modo si è potuta operare una scelta oculata dei materiali e delle dimensioni del dispositivo.

L'andamento, illustrato in Figura 3.7, è stato calcolato mediante l'utilizzo della termocoppia che controlla il forno stesso.

Dal grafico si deduce che per assicurare una temperatura effettiva di 1000 °C sulla punta del sensore, l'intera struttura deve misurare almeno 25÷30 cm dal punto di inserimento del sensore, con posizionamento del reticolo 0÷5 cm dalla punta.

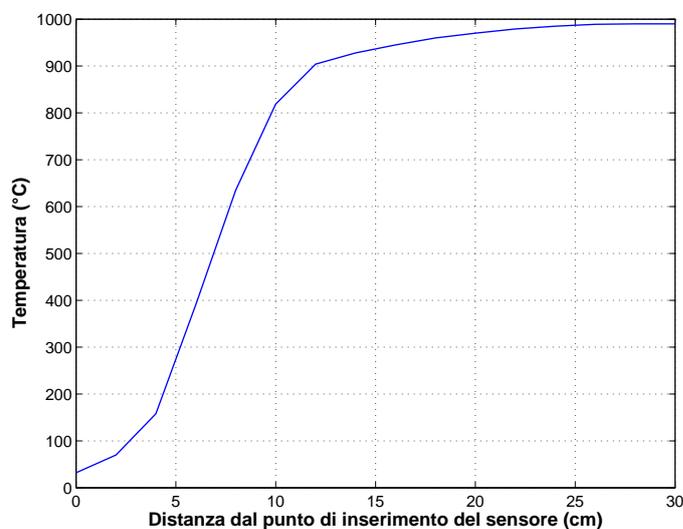


Figura 3.7: Distribuzione della temperatura all'interno del forno

3.3.2 Assemblaggio della struttura

3.3.2.1 Preparazione della fibra

Un FBG così come è prodotto deve essere tagliato e pulito accuratamente, prima di essere giuntato al patchcord.

1. TAGLIO DEL GRATING

Il taglio del grating è effettuato in modo che esso sia posizionato quanto più vicino possibile alla punta del sensore e che non sia creata cavità Fabry-Perot nello spazio che rimane tra il package e il taglio della fibra. Per questo motivo, la fibra contenente il grating viene tagliata a 0.5 cm dal limite del reticolo. Questa può essere considerata una misura di sicurezza, al di sotto della quale la probabilità di tagliare incidentalmente il grating aumenta. Per evitare riflessioni indesiderate, il taglio non è netto, bensì una superficie angolata, ottenuta torcendo e tagliando la fibra contemporaneamente. In questo modo si riduce la retroriflessione della luce fino a - 60 dB.

2. PULIZIA DELLA FIBRA

Parte importante del pre-assemblaggio è la pulizia della fibra. Infatti, ad alte temperature corpi indesiderati potrebbero comprimere o stressare la fibra, in modo da compromettere la capacità del sensore di isolare la temperatura dalle altre possibili grandezze in gioco. Inoltre il polimero di protezione che riveste fibra e reticolo non è resistente ad alte temperature. Esso viene tolto immergendo la fibra in acetone per 10 minuti. Questo trattamento permette di spogliare la fibra senza micro-danneggiarla, cosa che potrebbe succedere utilizzando un normale peeler.

3. GIUNTO TRA FIBRA E PATCHCORD

La fibra tagliata e pulita è giuntata al patchcord, anch'esso tagliato e pulito.

3.3.2.2 Assemblaggio

La fibra viene quindi inserita prima nel tubo di ceramica e poi in quello di metallo. Successivamente si pone la colla sul giunto patchcord-metallo e si infilano il tubo metallico di giunzione e il termoretraibile, quest'ultimo scaldato con una fiamma controllata.

Per le considerazioni sulle dimensioni legate alla distribuzione della temperatura nell'ambiente del forno la misura complessiva del sensore è di 30 cm. Nella Tabella 3.12 sono riportate nel dettaglio le dimensioni di ogni pezzo utilizzato per il package.

Nelle seguenti Figure si possono vedere le varie fasi dell'assemblaggio.

Pezzo	Lunghezza	Diametro esterno
Reticolo	1 cm	0.125 mm
Distanza del reticolo dalla punta del sensore	1.5-3.5 cm	0.125 mm
Fibra totale	26 cm	0.125 mm
Rivestimento plastico bianco	2 cm	0.780 mm
Tubo ceramico	30 cm	1.590 mm
Tubo metallico	30 cm	3.000 mm
Tubo metallico per la giunzione	3.75 cm	4.500 mm
Guaina termoretraibile	3.75 cm	3÷4.5 mm

Tabella 3.12: Dimensioni della struttura

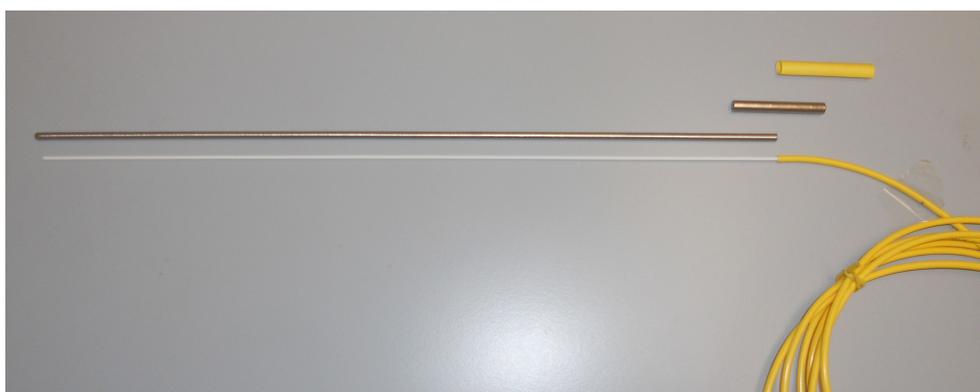


Figura 3.8: Inserimento nel tubo ceramico

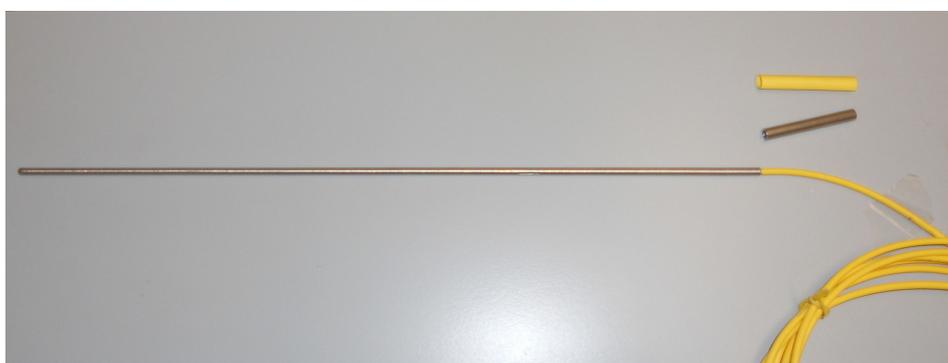


Figura 3.9: Inserimento nel tubo metallico



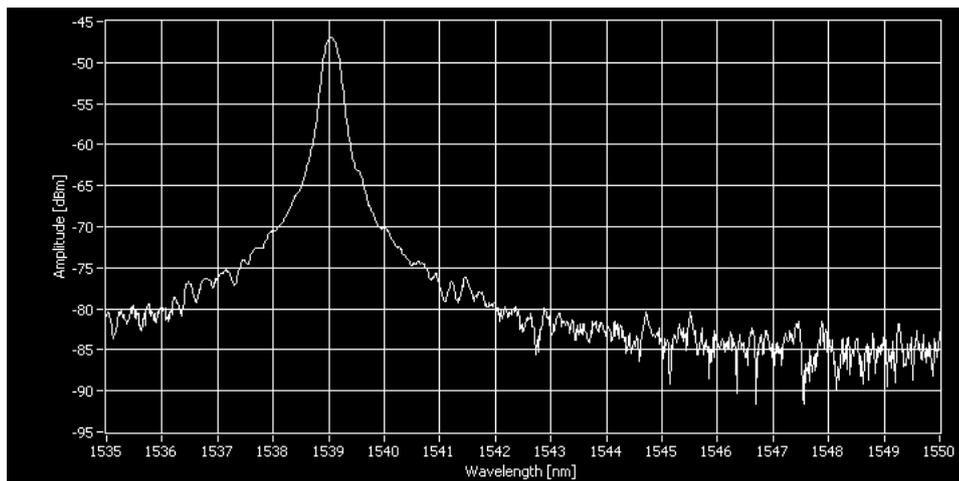
Figura 3.10: Package finale

4 Test e risultati sperimentali

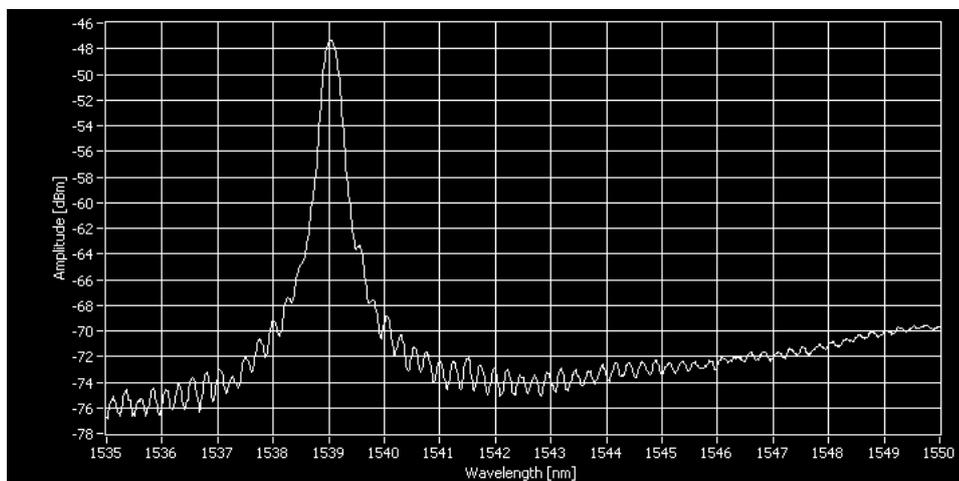
4.1 Confronto tra la risposta ottica del sensore *unpacked* e *packaged*

Per verificare che a temperatura ambiente il packaging non modifichi la risposta ottica del sensore, è stato misurato lo spettro prima e dopo l'assemblaggio.

Dalla Figura 4.1 si può notare che non c'è alcuna sostanziale differenza tra le risposte: sia in ampiezza che in lunghezza d'onda il picco non presenta alterazioni.



(a) Risposta ottica del sensore *unpacked* per $\lambda_B = 1539$ nm a temperatura ambiente



(b) Risposta ottica del sensore *packaged* per $\lambda_B = 1539$ nm a temperatura ambiente

Figura 4.1: Confronto tra le risposte ottiche del sensore *unpacked* e *packaged*

4.2 Processo di rigenerazione

Prima di scrivere i reticoli, le fibre sono state sottoposte ad un processo di idrogenazione, per 14 giorni a temperatura ambiente e alla pressione di 25 bar.

I sensori prodotti sono 4. Per ogni sensore sono riportati:

- Andamento della riflettività del picco della risposta ottica del sensore e andamento del processo termico eseguito, entrambi in funzione del tempo. Con questi dati è possibile determinare le temperature a cui un particolare FBG si cancella e si rigenera. Poiché i reticoli a disposizione hanno subito la stessa idrogenazione si suppone che il processo termico tale da rigenerarli e le temperature di rigenerazione debbano essere identici.
- Risposta ottica a temperatura ambiente, prima e dopo la rigenerazione. Da ciò si evince la differenza di potenza tra il reticolo originario e il reticolo rigenerato.
- Spostamento in lunghezza d'onda del picco della risposta ottica in funzione della temperatura, sia nel caso di aumento di temperatura fino a 1000 °C, che di diminuzione da 1000 °C a temperatura ambiente. Alle alte temperature la modulazione dell'indice di rifrazione efficace del reticolo è modificata, pertanto, per la legge di Bragg, il reticolo rigenerato sarà caratterizzato da una lunghezza d'onda di Bragg diversa da quella del reticolo originario.

SENSORE 1

Le caratteristiche del primo sensore realizzato sono inserite nella Tabella 4.1.

λ_B del reticolo originario	1553.95 nm
Riflettività del reticolo originario	18.42 dB
λ_B del reticolo rigenerato	1552.42 nm
Riflettività del reticolo rigenerato	4.63 dB
Variazione di λ_B	- 1.53 nm
Perdita di riflettività	13.79 dB
Temperatura di rigenerazione	989 °C
Posizione del reticolo dalla punta del sensore	1.5 cm

Tabella 4.1: Caratteristiche principali del sensore 1

SENSORE 2

Le caratteristiche del secondo sensore realizzato sono inserite nella Tabella 4.2.

λ_B del reticolo originario	1514.17 nm
Riflettività del reticolo originario	29.77 dB
λ_B del reticolo rigenerato	1513.10 nm
Riflettività del reticolo rigenerato	8.32 dB
Variazione di λ_B	- 1.07 nm
Perdita di riflettività	21.45 dB
Temperatura di rigenerazione	971 °C
Posizione del reticolo dalla punta del sensore	3.5 cm

Tabella 4.2: Caratteristiche principali del sensore 2

SENSORE 3

Le caratteristiche del terzo sensore realizzato sono inserite nella Tabella 4.3.

λ_B del reticolo originario	1519.20 nm
Riflettività del reticolo originario	16.84 dB
λ_B del reticolo rigenerato	1518.13 nm
Riflettività del reticolo rigenerato	1.98 dB
Variazione di λ_B	- 1.07 nm
Perdita di riflettività	14.86 dB
Temperatura di rigenerazione	979 °C
Posizione del reticolo dalla punta del sensore	3.5 cm

Tabella 4.3: Caratteristiche principali del sensore 3

SENSORE 4

Le caratteristiche del quarto sensore realizzato sono inserite nella Tabella 4.4.

λ_B del reticolo originario	1523.99 nm
Riflettività del reticolo originario	23.36 dB
λ_B del reticolo rigenerato	1522.60 nm
Riflettività del reticolo rigenerato	7.6 dB
Variazione di λ_B	- 1.39 nm
Perdita di riflettività	15.76 dB
Temperatura di rigenerazione	971 °C
Posizione del reticolo dalla punta del sensore	1.5 cm

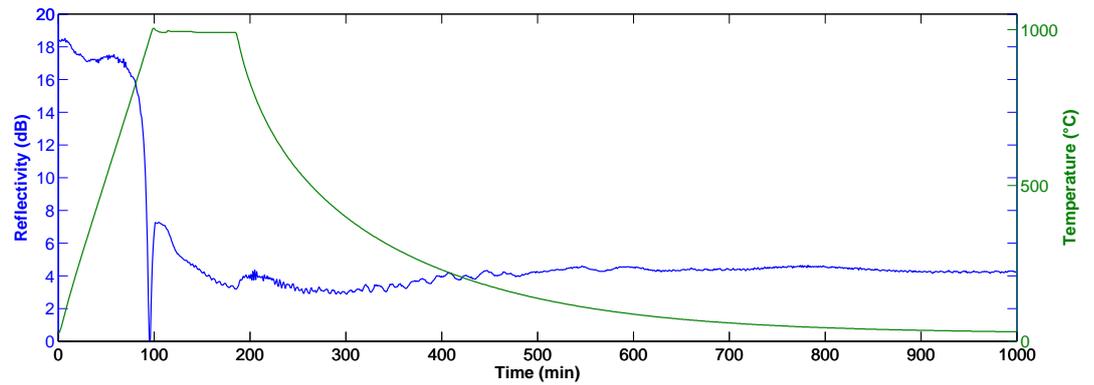
Tabella 4.4: Caratteristiche principali del sensore 4

4.2.1 Osservazioni

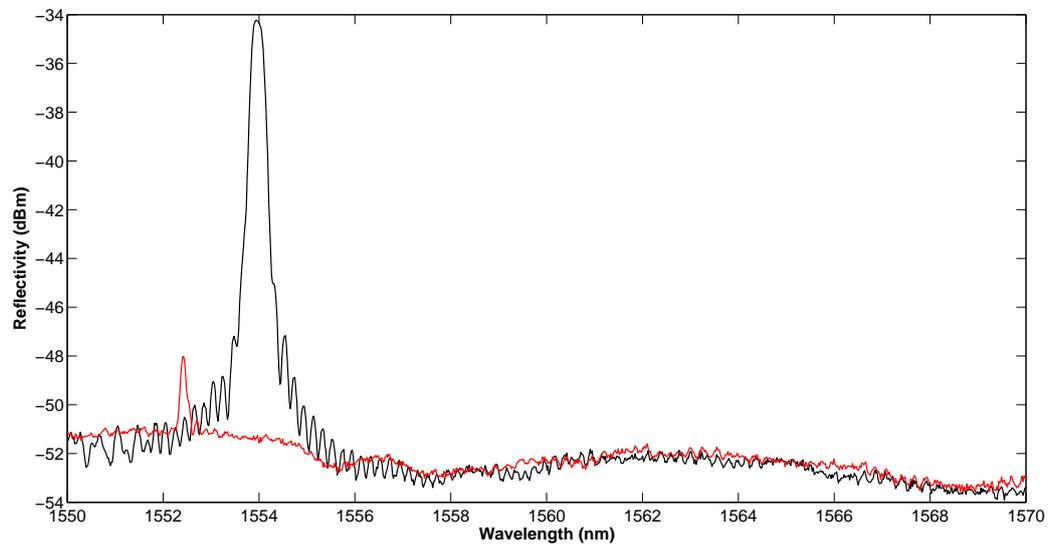
Si presti attenzione alle immagini relative ai quattro sensori, riportate in Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5.

1. La posizione del grating spazia da 1.5 a 3.5 cm dalla punta del sensore. Si può affermare che questa differenza non comporta un diverso comportamento nel processo di rigenerazione. Ciò convalida le considerazioni fatte nel capitolo precedente, riguardanti la distribuzione della temperatura nel forno.
2. Il trattamento termico consiste nel portare gradualmente (10 °C/min) il sensore da temperatura ambiente a 1000 °C, lasciarlo a questa temperatura per un tempo minimo di 30 minuti e poi farlo raffreddare passivamente fino a temperatura ambiente di nuovo. Questa scelta si basa su precedenti test effettuati con grating identici caratterizzati dallo stesso processo di idrogenazione. Per tutti e quattro i sensori la temperatura di rigenerazione si attesta attorno ai 970 ÷ 990 °C.
3. La perdita di riflettività rispetto il grating originario varia da grating a grating. In particolare, il sensore 2, che presenta una riflettività iniziale maggiore degli altri tre, ha perso di più ($L = 21.45$ dB), ma da ciò deriva anche un più forte reticolo rigenerato. Questo significa che, come previsto, la riflettività del reticolo rigenerato è proporzionale alla riflettività del reticolo originario. La diminuzione della forza del reticolo è dovuta principalmente alla diminuzione della modulazione e/o del valore medio dell'indice di rifrazione efficace del reticolo.
4. La lunghezza d'onda di Bragg del reticolo rigenerato è minore dell'originaria. La diminuzione varia da 1.07 a 1.53 nm, in dipendenza della λ_B iniziale. Infatti si nota che quando quest'ultima è maggiore, allora è maggiore anche lo shift. Inoltre, per la legge di Bragg, anche questo effetto implica che è avvenuta una diminuzione della modulazione e/o del valore medio dell'indice di rifrazione efficace del reticolo.

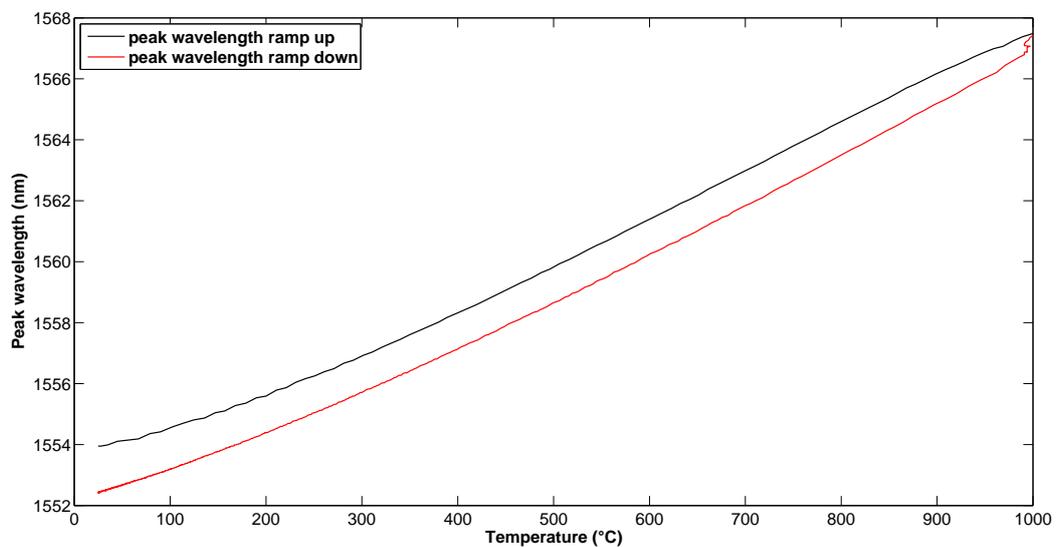
4.2 Processo di rigenerazione



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo

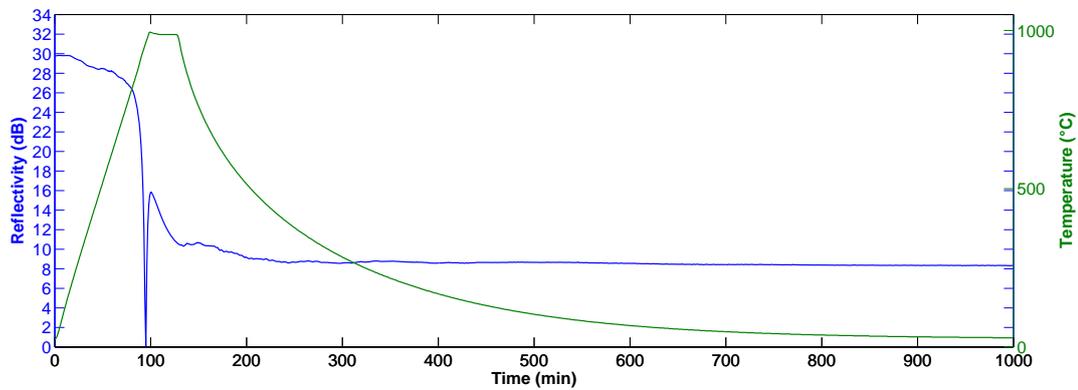


(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del reticolo originario (nero) e del reticolo rigenerato (rosso)

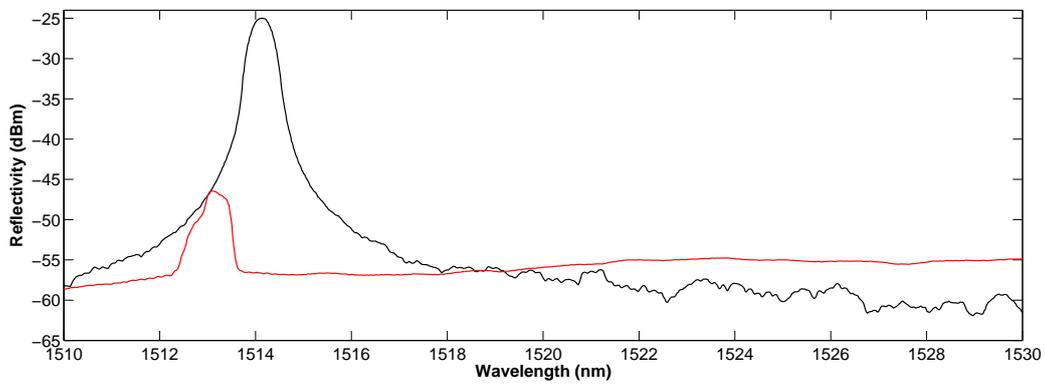


(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura

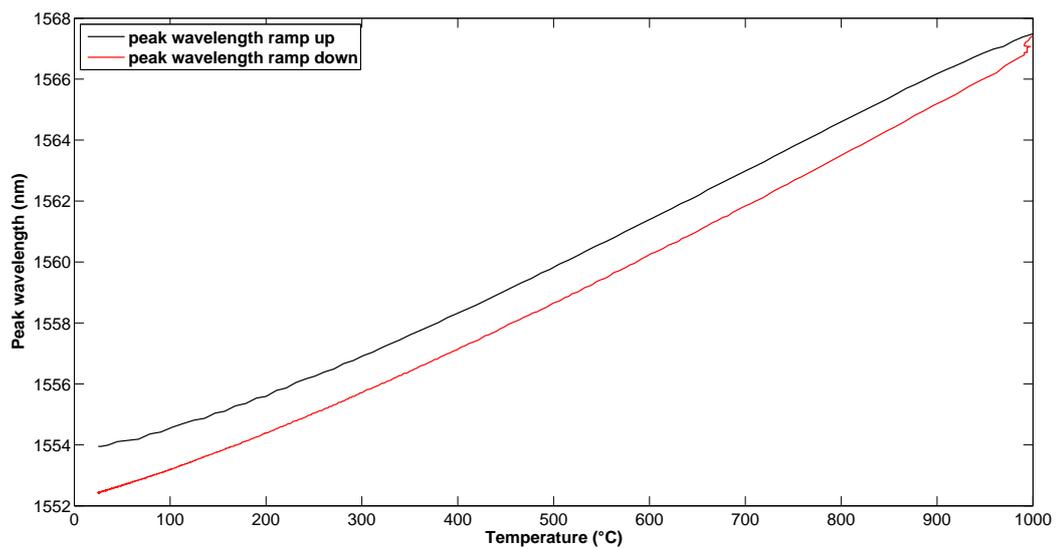
Figura 4.2: Sensore 1



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo



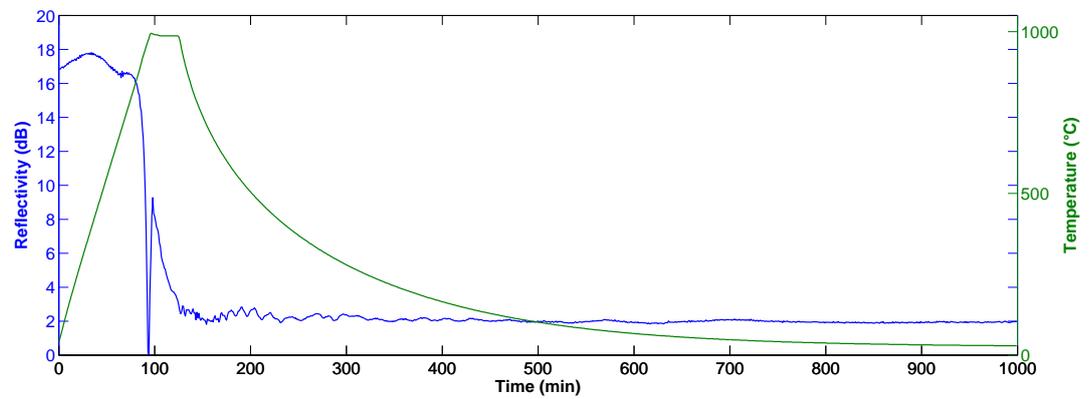
(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del reticolo originario (nero) e del reticolo rigenerato (rosso)



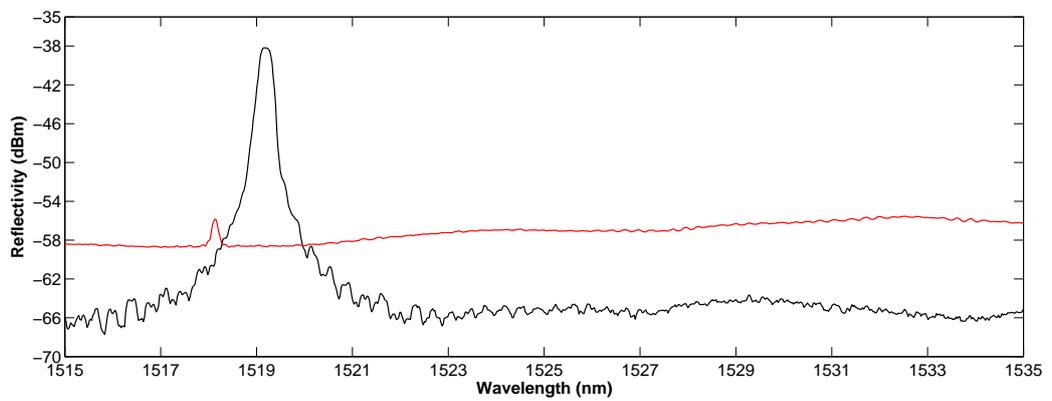
(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura

Figura 4.3: Sensore 2

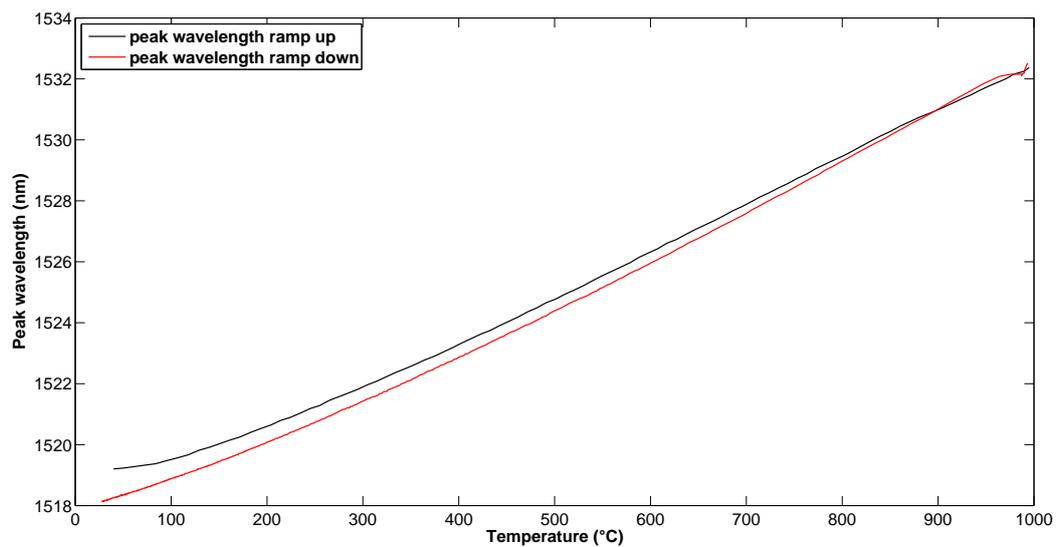
4.2 Processo di rigenerazione



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo

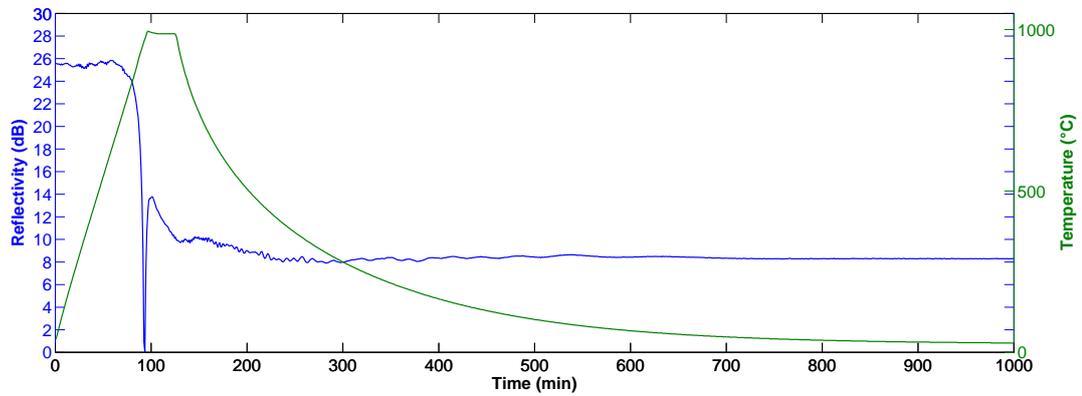


(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del reticolo originario (nero) e del reticolo rigenerato (rosso)

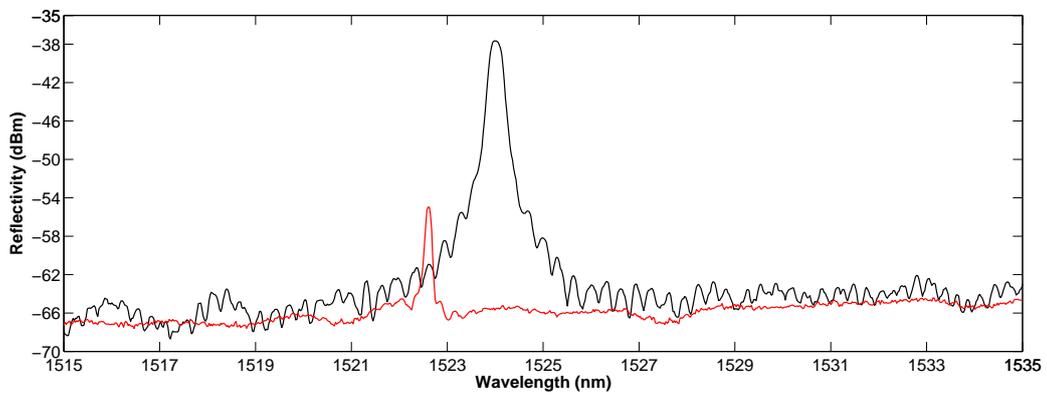


(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura

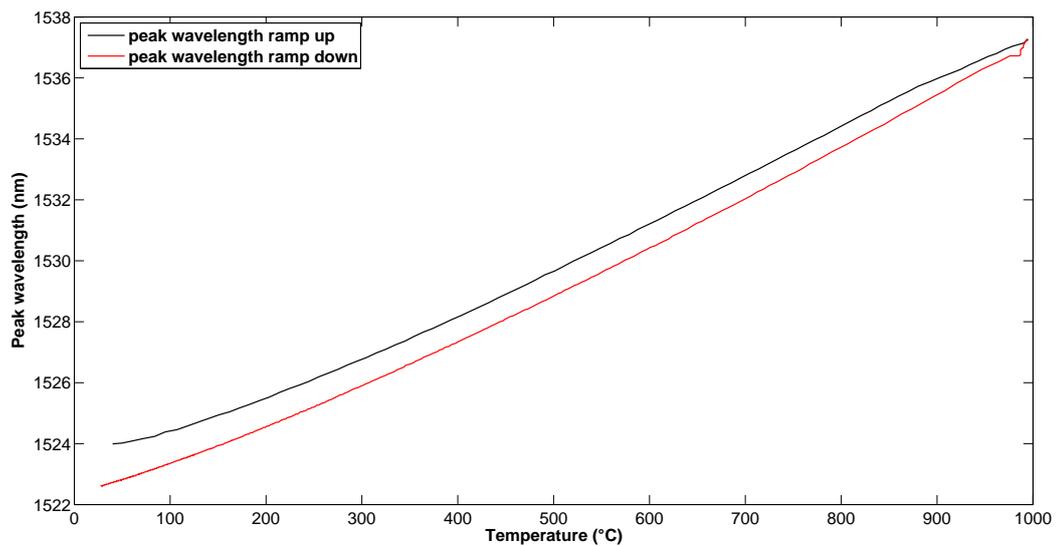
Figura 4.4: Sensore 3



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo



(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del reticolo originario (nero) e del reticolo rigenerato (rosso)



(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura

Figura 4.5: Sensore 4

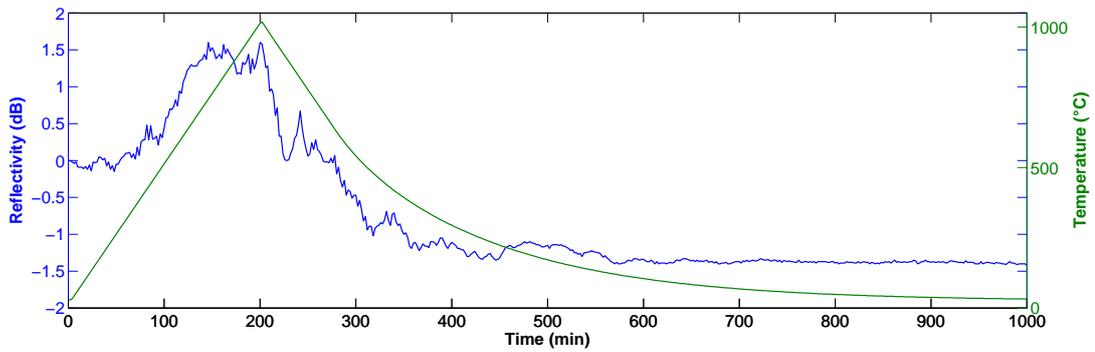
4.3 Test delle proprietà ottiche

Dei quattro sensori, due sono stati testati per verificarne stabilità e prestazioni.

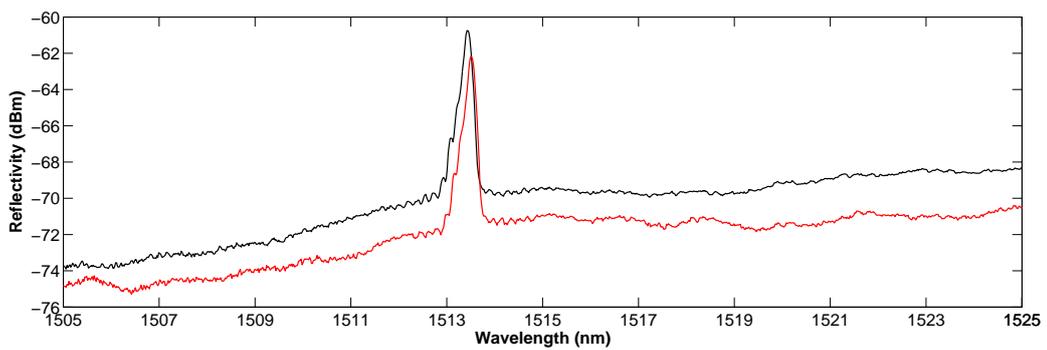
Di entrambi i sensori sono forniti:

- Andamento della riflettività del picco della risposta ottica del sensore e andamento del processo termico eseguito, in funzione del tempo. Sebbene la richiesta sia il progetto di un sensore stabile a 700 °C, le prove sono state eseguite fino alla temperatura di 1000 °C. Il trattamento termico consiste nel portare gradualmente (5 °C/min) il sensore da temperatura ambiente a 1000 °C per poi farlo immediatamente raffreddare in modo passivo. Da questo processo si evince la stabilità in temperatura della riflettività del sensore.
- Risposta ottica a temperatura ambiente, prima e dopo il trattamento termico. Da ciò si estrapola la differenza di potenza, se esiste, tra i picchi antecedente e successivo al ciclo termico.
- Shift della lunghezza d'onda di Bragg durante il processo termico. L'isteresi della curva dell'intero ciclo termico determina la precisione del sensore, e quanto minore è, più la misura è accurata. Da questi dati si può ricavare la funzione di trasferimento del sistema, che determina λ in funzione di T, dove T è la temperatura a cui è sottoposto il reticolo e λ la corrispondente lunghezza d'onda di Bragg.
- Shift della lunghezza d'onda di Bragg quando il sensore è portato da temperatura ambiente a 1000 °C nel più breve tempo possibile. Da ciò si può dedurre il tempo di risposta del sensore.

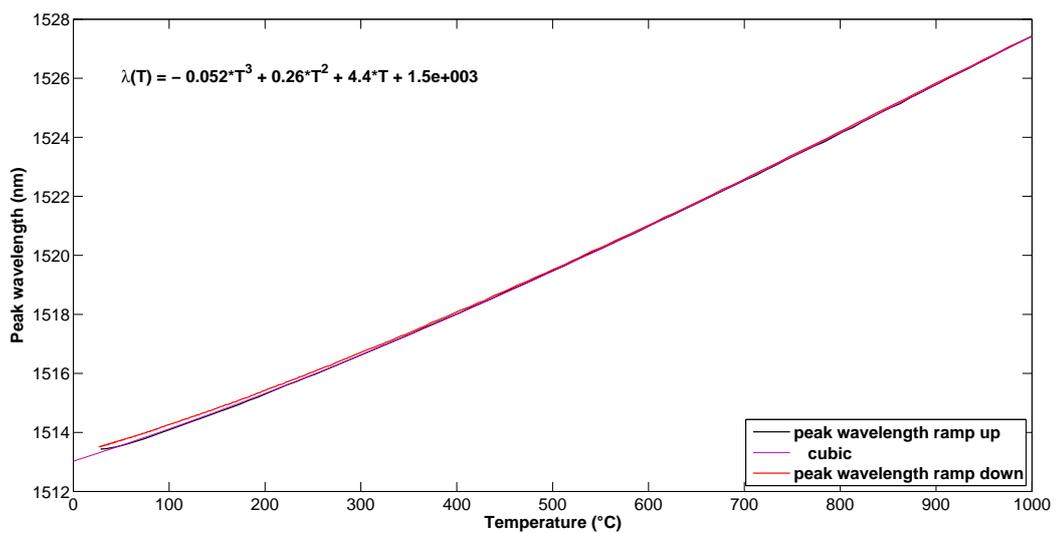
SENSORE 1



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo



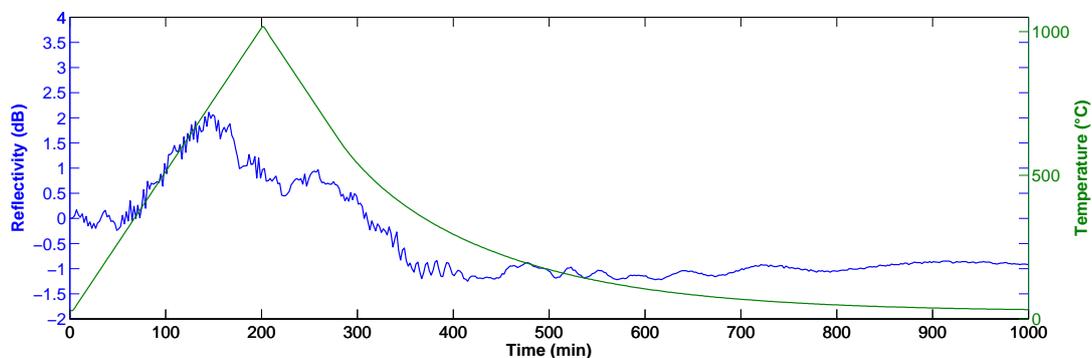
(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del sensore prima (nero) e dopo (rosso) il ciclo termico



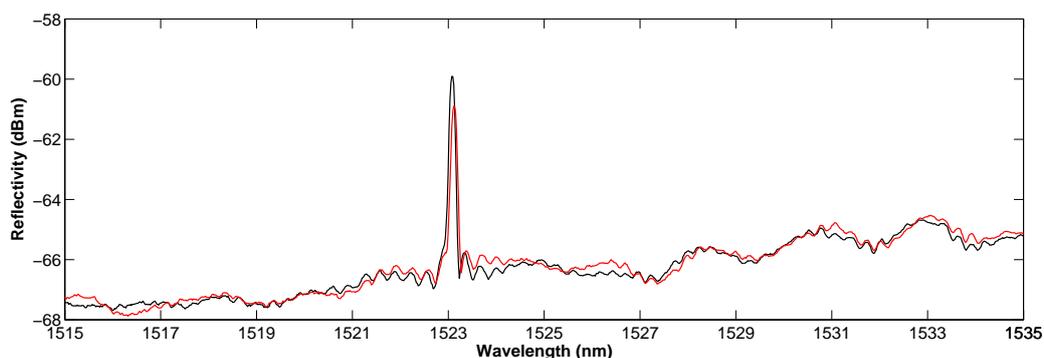
(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura e polinomio cubico di fit (viola) che fornisce la funzione di trasferimento del sistema

Figura 4.6: Sensore 1

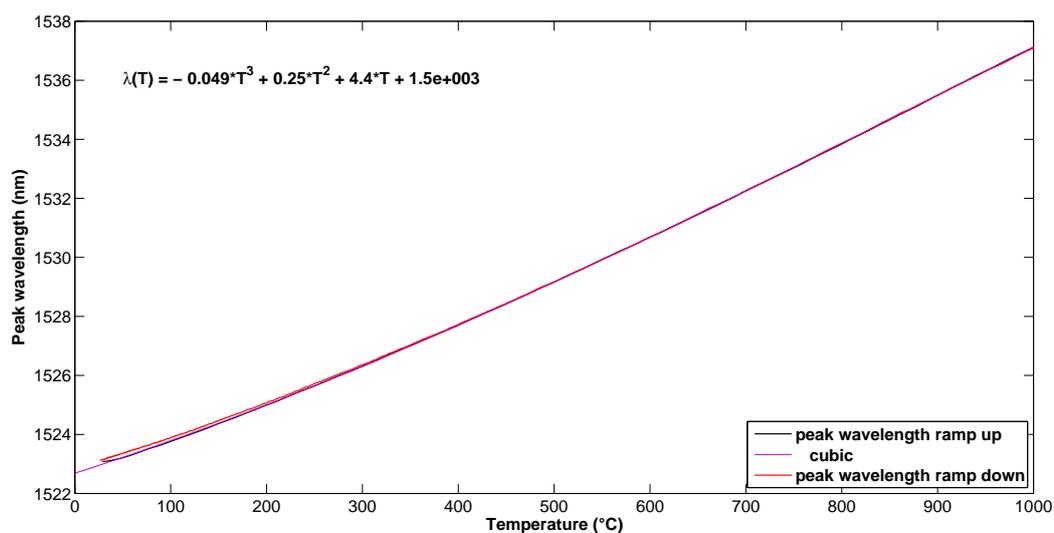
SENSORE 2



(a) Andamento della riflettività del reticolo (blu) e della temperatura (verde) in funzione del tempo

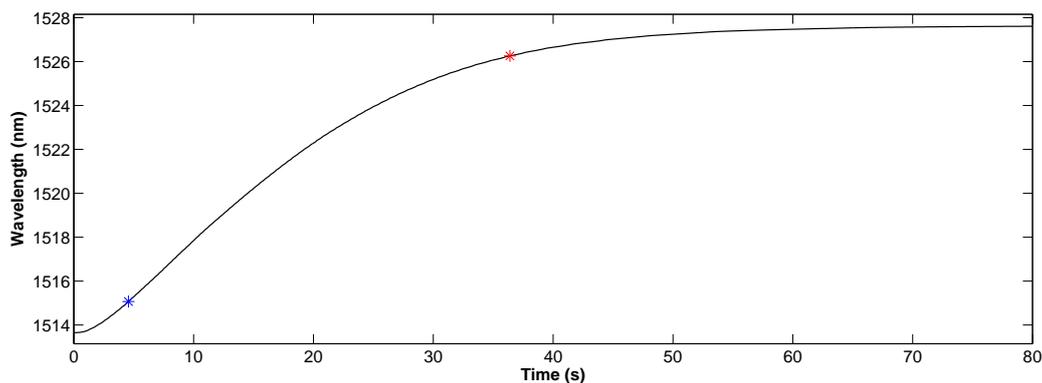


(b) Risposta ottica a temperatura ambiente del sensore prima (nero) e dopo (rosso) il ciclo termico

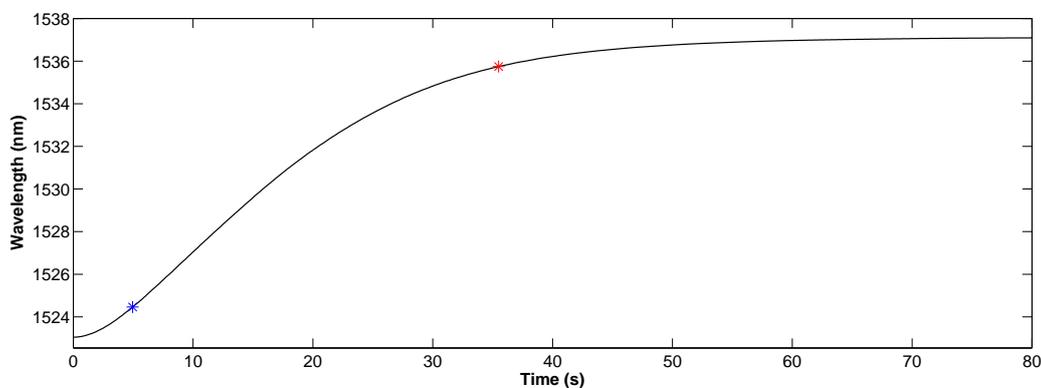


(c) Shift della lunghezza d'onda di Bragg in funzione della temperatura e polinomio cubico di fit (viola) che fornisce la funzione di trasferimento del sistema

Figura 4.7: Sensore 2



(a) Risposta temporale del sensore 1



(b) Risposta temporale del sensore 2

Figura 4.8: Risposta ottica dei sensori portati a 1000 °C. Gli asterischi corrispondono al 10% (blu) e 90% (rosso) del valore finale di lunghezza d'onda. L'intervallo definisce il tempo di risposta del sensore.

4.3.1 Discussione dei risultati

Si faccia riferimento a Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8.

- Il ciclo che riguarda lo spostamento della lunghezza d'onda di Bragg manifesta un'isteresi media di 0.3 nm. Considerando questo dato ed una certa temperatura, è possibile risalire alla precisione del sensore. Si ottiene un valore pari a circa ± 2 °C, accettabile nella maggior parte delle applicazioni. Tollerando questo errore, la funzione di trasferimento del sistema può essere espressa per mezzo di un polinomio cubico di fitting di una delle due curve componenti il ciclo. Da qui è possibile risalire alla temperatura che si vuole misurare e/o monitorare.
- La riflettività del sensore in funzione della temperatura varia in media di ± 1.5 dB rispetto la riflettività iniziale. Da una parte questo comportamento è normale perché tutta la parte riflessa della sorgente (*background*) tende ad aumentare in potenza proporzionalmente alla temperatura, dall'altra la riflettività finale a temperatura ambiente risulta diminuita di 1.5 dB. Questo

comportamento suggerisce la progressiva diminuzione della riflettività del reticolo se sottoposto per lunghi periodi ad alte temperature.

A questo punto è possibile determinare il tempo di stabilità (o tempo di vita) del sensore, sfruttando l'equazione di Arrhenius che lega il tempo di vita del sensore alla temperatura a cui è sottoposto:

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{E}{RT}}$$

dove τ è il tempo di vita e T la temperatura considerata (in gradi Kelvin). Mentre per alte temperature (900-1000 °C) la misura richiede tempi dell'ordine della settimana, per temperature inferiori (600-700 °C) è necessario un tempo molto maggiore (anche 9 settimane). Nella pratica, a partire dalle misure effettuate a 900 e 1000 °C si può dedurre l'intera curva del tempo di vita, che risulta lineare se si considera $\ln \tau$ (Figura 4.9 e Figura 4.10). Il tempo di vita è definito come il tempo necessario per ottenere una degradazione in riflettività al 70% del valore iniziale. Per i sensori progettati si è ottenuto un tempo di vita medio τ a 700 °C maggiore di 7 anni. A 1000 °C invece il tempo di vita è di appena 30-60 minuti.

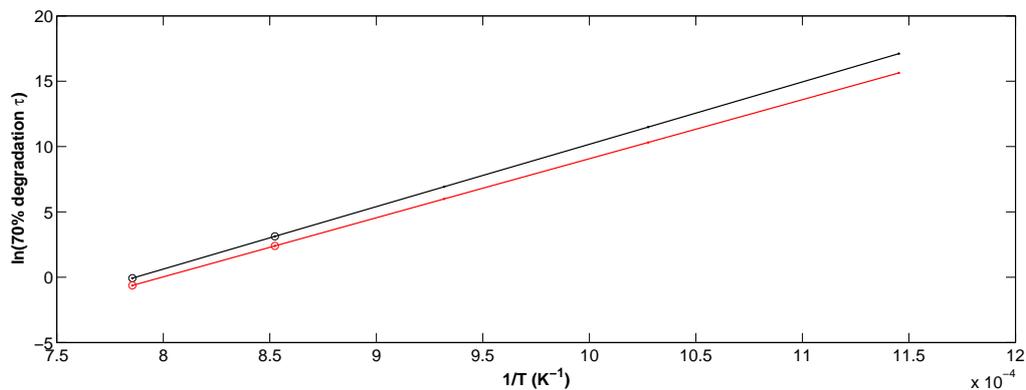


Figura 4.9: Tempo di vita di due sensori per temperature da 1000°C a 600°C, ottenuto a partire da misure effettuate a 1000°C e 900°C

- Il tempo di risposta del sensore viene definito come l'intervallo di tempo necessario al dispositivo per passare dal 10% al 90% del valore di lunghezza d'onda di Bragg corrispondente alla temperatura a cui è sottoposto il sensore. Per i due sensori realizzati il valore medio è pari a circa 31 secondi (Figura 4.8). Il test è stato effettuato ad una temperatura di 1000 °C, anche per poter confrontare i risultati ottenuti coi tempi di risposta di altri tipi di packaging e di altri sensori commerciali. Dalla Figura ?? si evince che lo spessore del packaging influisce in maniera decisiva nella risposta temporale del sensore. D'altra parte il packaging con diametro 1 mm non garantisce il corretto funzionamento del dispositivo nel caso di urti, pressioni o piegamenti. Il packaging realizzato

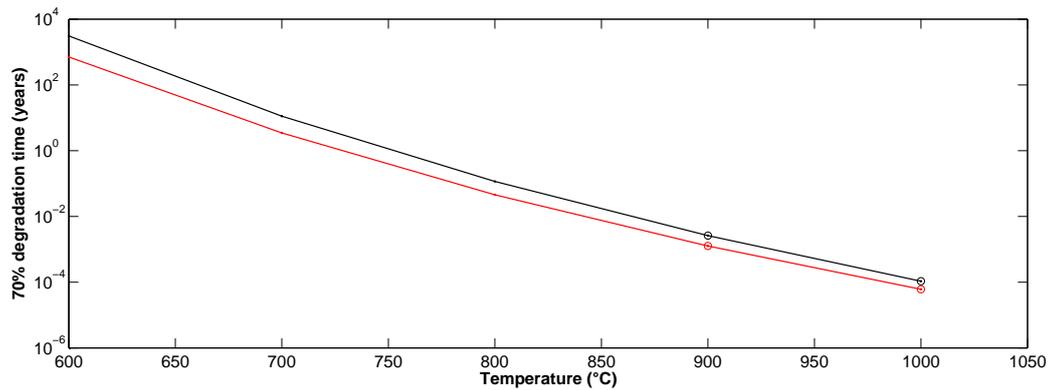


Figura 4.10: Tempo di vita di due sensori per temperature da 1000°C a 600°C, ottenuto a partire da misure effettuate a 1000°C e 900°C

per questo lavoro (linea azzurra nella Figura ??) risulta essere sia nelle misure fisiche che nei tempi di risposta un compromesso tra il sensore prodotto da Chiral, l'unico garantito fino a 1000 °C, e quello prodotto da OEland, funzionante a 700 °C (Tabella 4.5).

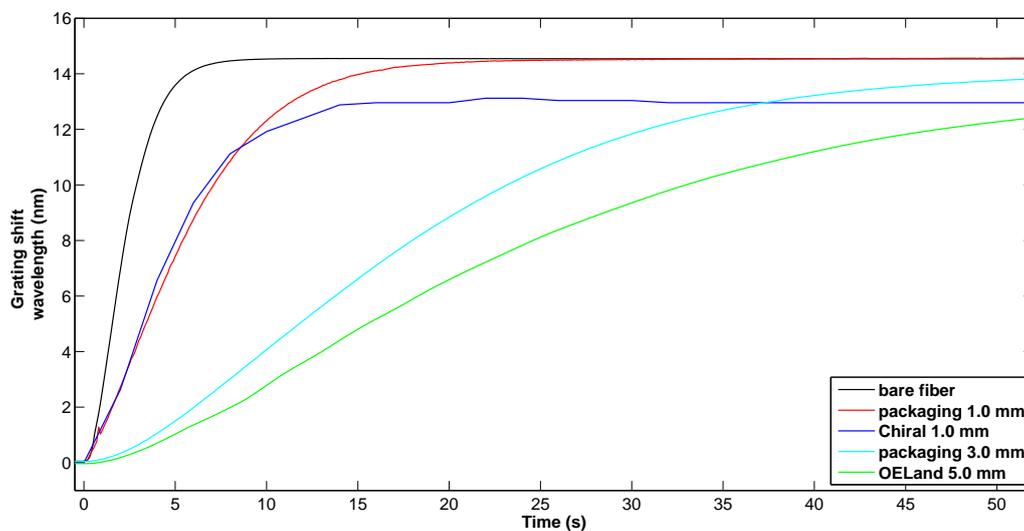


Figura 4.11: Shift rispetto la lunghezza d'onda di Bragg iniziale per sensori inseriti in un ambiente a 1000 °C. Il packaging realizzato per questo lavoro è individuato dalla linea azzurra.

4.4 Produzione del sensore

Affinché il sensore sia competitivo a livello commerciale, influisce nella bontà del progetto il tempo di realizzazione ed il costo finale.

4.5 Possibili miglioramenti del package

Fibra nuda	3.7 s
Packaging 1.0 mm	5.5 s
Chiral 1.0 mm	8 s
Packaging 3.0 mm	~ 30 s
OELand 5.0 mm	44.7 s

Tabella 4.5: Tempi di risposta dei sensori

- Si calcola che per poter fabbricare un sensore stabile nel tempo siano necessarie 6 settimane.
- Per quanto riguarda il prezzo finale del sensore, viene stimato per eccesso considerando il costo dei singoli pezzi.

	Tempo di produzione	Prezzo
Sensore oggetto di questo lavoro	6 settimane	< 200 €
OETMS700 di O/E Land	24 settimane	580 €
Helica di Chiral	12 settimane	465 € (2008)
TP-01 di FBGS	6-8 settimane	1541 € (min. 5 pezzi)

Tabella 4.6: Tabella comparativa tra il sensore realizzato ed i sensori presenti in commercio

4.5 Possibili miglioramenti del package

4.5.1 Patchcord

Il patchcord di collegamento in un'applicazione reale potrebbe essere AFOP (Armoured Fiber Optic Patchcord). Questo tipo di patchcord consente facile manipolazione ed installazione, in maniera simile ad un cavo elettrico standard. È dotato di un tubo di Kevlar con diametro micrometrico rivestito di acciaio inossidabile flessibile, per prevenire possibili rotture della fibra, poi rivestito di PVC ignifugo (Figura 4.12).

Le specifiche sono indicate nella Tabella 4.7.

Connettore	FC/UPC
Fibra Ottica	SMF-28e
Perdite per inserzione (IL)	≤ 0.25 dB
Perdite di ritorno (RL)	≥ 50 dB
Ripetibilità	≤ 0.1 dB
Forza elastica	1500 N a breve termine
Resistenza a trazione	> 200 N tra connettore e cavo
Range di temperatura	-40 ÷ +85 °C

Tabella 4.7: Caratteristiche del patchcord AFOP

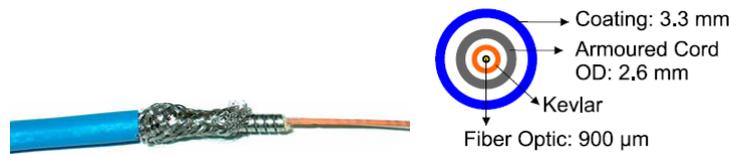


Figura 4.12: Dettagli del patchcord AFOP

4.5.2 Compression fitting

Nella progettazione del package bisogna considerare le seguenti necessità:

- inserire il sensore tramite fori nell'ambiente di cui si vuole monitorare la temperatura;
- limitare il contatto del sensore con l'atmosfera esterna;
- fissare e togliere il sensore rapidamente e facilmente.

Un modo per garantire ciò è utilizzare un raccordo a compressione (*compression fitting*), caratterizzato da un principio di funzionamento semplice ed efficace, che consente un giunto stretto tra i due pezzi. Un possibile *compression fitting* da utilizzare in questo tipo di sensori ha le caratteristiche evidenziate nella Tabella 4.8.

Materiale	SS316
Connessione	BSPP
Diametro	3 mm
Diametro filettatura	1/8 inch

Tabella 4.8: Caratteristiche del *compression fitting*



Figura 4.13: Immagine di un *compression fitting*

5 Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era il progetto di un sensore di alte temperature in fibra ottica per applicazioni industriali.

I requisiti richiedevano che funzionasse a 700 °C e che fosse competitivo coi sensori attualmente in commercio, operativi ad almeno questa temperatura. Ciò che si è tentato di sviluppare è un sensore che potesse essere utilizzabile anche a 1000 °C.

L'utilizzo della tecnologia FBG è stato dettato dal basso costo, dalla semplicità di funzionamento e dalla grande applicabilità di questi dispositivi.

Sia a 1000 °C che 700 °C il sensore, nelle rispettive applicazioni, si presenta come una valida alternativa alle soluzioni proposte dagli altri fornitori:

- A livello fisico, il packaging è facile e veloce da assemblare. I materiali principali (acciaio inossidabile, ceramica) sono facilmente reperibili ed a basso costo.
- Nonostante sia stato portato a temperature elevate, il sensore non si deforma sotto tensione meccanica e/o piegamenti. Ciò non si può dire di Chiral che, per il diametro di appena 1 mm, si piega facilmente.
- Le performance del sensore rappresentano un buon compromesso tra gli altri sensori disponibili.
La precisione del sensore è di ± 2 °C, comparabile con quella di OEland, ma maggiore di quelle di FBGS e, per temperature superiori ai 200 °C, di Chiral. Il tempo di risposta è stato calcolato a 1000 °C, per poter essere confrontato con i dati già noti degli altri sensori. A questa temperatura, la risposta temporale è di circa 30 secondi, migliore di OEland ma peggiore di Chiral.
- Il tempo di vita risulta essere maggiore di 7 anni a 700 °C e tra i 30 e i 60 minuti a 1000 °C. Quindi si tratta di tempistiche più che sufficienti per le applicazioni richieste.
- Dal punto di vista della produzione, il sensore progettato risulta la soluzione migliore, con un tempo di consegna pari a 6 settimane e un costo inferiore a 200 €.

In conclusione, dipendentemente dall'applicazione industriale, il sensore progettato si figura come un dispositivo affidabile, resistente ed economico.

	Sensore progettato	Chiral	OELand	FBGS
Resistenza a tensione meccanica/piegamenti	Sì	No	Sì	Sì
Temperatura max. di funzionamento (°C)	1000	1000	700	700
Precisione (°C)	± 2	± 1%	± 2	± 5
Tempo di risposta a 1000 °C (secondi)	30	8	44.7	n.d.
Tempo di vita a 700 (1000) °C	7 anni (45 minuti)	n.d.	n.d.	n.d.
Tempo di consegna (settimane)	6	12	24	6-8
Prezzo (€, IVA compresa)	< 200	465	580	1541

Tabella 5.1: Quadro comparativo dei sensori commerciali

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, il sensore progettato potrebbe essere migliorato utilizzando un package con diametro esterno leggermente inferiore (2-2.5 mm), al fine di diminuire il tempo di risposta del dispositivo ma comunque assicurare la resistenza meccanica. Per poter essere utilizzato anche a 1000 °C, è necessario garantire la stabilità del sensore, ad esempio trovando il migliore processo di idrogenazione e trattamento termico che consente una rigenerazione più forte.

Bibliografia

- [1] J. Hecht, *City of Light, The Story of Fiber Optics*. Oxford University Press, 1999.
- [2] S. J. Mihailov, "Fiber bragg grating sensors for harsh environments," *Sensors*, 2012.
- [3] P. S. Reddy *et al.*, "Encapsulated fiber bragg grating sensor for high temperature measurements," *Optical Engineering*, 2011.
- [4] B. Zhang, "High temperature sensors based on hydrogen loaded fiber bragg gratings," Ph.D. dissertation, Concordia University, 2004.
- [5] P. J. Lemaire *et al.*, "High pressure h₂ loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal photosensitivity in ge₂ doped optical fibers," *Electronic Letters*, vol. 29, 1993.
- [6] N. Singh *et al.*, "Fiber bragg grating writing using phase mask technology," *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 64, pp. 108–115, 2005.
- [7] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, 1997.
- [8] B. A. Tahir *et al.*, "Fabrication of fiber grating by phase mask and its sensing application," *Journal of Optoelectronics and Advanced Material*, vol. 8, pp. 1604–1609, 2006.
- [9] T. Erdogan *et al.*, "Decay of ultraviolet-induced fiber bragg gratings," *Journal of Applied Physics*, vol. 76, 1994.
- [10] R. M. Atkins *et al.*, "248 nm induced vacuum uv spectral changes in optical fiber preform cores: support for a colour centre model of photosensitivity," *Electronics Letters*, vol. 29, 1993.
- [11] D. S. Starodubov *et al.*, "Bragg grating fabrication in germanosilicate fibers by use of near-uv light: a new pathway for refractive-index changes," *Optic Letters*, vol. 22, 1997.
- [12] D. N. Nikogosyan, "Multi-photon high-excitation-energy approach to fibre grating inscription," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, 2007.
- [13] B. Zangh and M. Kahrizi, "High-temperature resistance fiber bragg grating, temperature sensor fabrication," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, 2007.

-
- [14] M. Fokine, "Underlying mechanisms, applications, and limitations of chemical composition gratings in silica based fibers," *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 349, 2004.
- [15] O. L. Lnc., "High temperature fiber bragg grating sensor and sensor array." [Online]. Available: http://www.o-eland.com/SensorProducts/sensor_temp_hi_FBG.html
- [16] FBGS, "Temperature probe tp-01." [Online]. Available: <http://www.fbgs.com/products/temperature-sensors/tp-01/>
- [17] C. Photonics, "Helica fiber-optic, ultra-high temperature sensor." [Online]. Available: <http://www.chiralphotonics.com/Web/1000Ctempsensor.html>
- [18] Corning, "Corning smf-28e optical fiber." [Online]. Available: http://www.tlc.unipr.it/cucinotta/cfa/datasheet_SMF28e.pdf
- [19] Chylas, "Fiber bragg gratings." [Online]. Available: <http://www.chylas.com/webchylas/productos/Redes%20de%20Bragg.pdf>
- [20] Corning, "Patchcord fc/apc." [Online]. Available: http://catalog.corning.com/CableSystems/en-GB/catalog/CategoryBrowser.aspx?cid=FC_APC_FC_APC_simplex_web
- [21] Safibra, "Broadband light sources." [Online]. Available: <http://www.safibra.cz/en/broadband-light-source>
- [22] Carbolite, "1000 and 1200 c horizontal and vertical tube furnaces." [Online]. Available: <http://www.carbolite.com/products.asp?id=5&doc=5>
- [23] I. photonics, "I-mon e interrogation monitors." [Online]. Available: <http://www.ibsen.dk/im/I-MON-400E-USB-Interrogation-Monitor>

Ringraziamenti

Un doveroso ringraziamento va a Vittoria Finazzi, Valerio Pruneri e Marco Santagiustina, per la pazienza e la professionalità dimostratemi in questi mesi e per avermi permesso di conseguire questo titolo.

Un grande, IMMENSO, grazie ai miei genitori, per avermi sempre appoggiata, anche nelle scelte azzardate ed apparentemente insensate; per avermi dato la libertà di sbagliare e, se possibile, di rimediare. Di questo ve ne sarò sempre riconoscente. E grazie anche per aver continuato a sovvenzionare ogni mia spesa, per avermi permesso di non lavorare mentre studiavo e mi divertivo (non necessariamente in questo ordine).

Grazie a Filippo ed Elettra, che, tra tirate di capelli ed abbracci fraterni, mi sopportano e supportano da una vita. Non riesco proprio ad immaginare la mia vita senza di voi.

Grazie a tutti i parenti, zii e cugini, per l'incoraggiamento e l'affetto incondizionato che mi avete sempre dimostrato. Un pensiero speciale alle mie nonne, che - ne sono certa - mi stanno guardando da lassù.

Un grazie sincero agli amici: Sabina, Giovy, Alice, Monta, Dalla, Dario, Massimo, Rudy, Lele, Anto, Valentina, Ombre, Matteo, con cui ho condiviso percorsi di studio, feste, appartamenti. Anche se ci vediamo di rado è sempre bello ritrovarsi e fare il punto della situazione. Un grazie particolare a Marta per essere sempre presente, anche in quest'ultimo anno nonostante i chilometri che ci separavano!

Grazie davvero ai nuovi amici, italiani e non, conosciuti durante la mia esperienza spagnola, per aver contribuito a renderla fantastica. Un grazie dal profondo del cuore a Bibiana e a Francesca, tanto lontane fisicamente quanto vicine nell'anima, per aver condiviso con me momenti unici. Siete sorelle mancate.

Infine, grazie a colei che ha visto la luce di questa tesi e ne ha fatto da sfondo, colei a cui torno non appena chiudo gli occhi: la mia amata Barcellona.

Voglio a tutti voi un mondo di bene!