

Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

Istituto Nazionale di Ottica Applicata
Sezione di Napoli

BraSS

Sensore di deformazioni meccaniche in fibra ottica



Manuale tecnico a cura di:

Pietro Ferraro
Alessandra Rocco
Paolo De Natale



Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

Istituto Nazionale di Ottica Applicata
Sezione di Napoli

BraSS

Sensore di deformazioni meccaniche in fibra ottica

Manuale tecnico a cura di:

Pietro Ferraro
Alessandra Rocco
Paolo De Natale

Centro Regionale di Competenza
Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale
Polo delle Scienze e delle Tecnologie
Dipartimento di Scienze Fisiche
C/o Facoltà di Ingegneria - Via Nuova Agnano, 11 - III° Piano
80125 - Napoli - Italy
www.amra.unina.it
ambiente@na.infn.it
Telefono +39 081 76-85125/124/115
Fax. +39 081 76-85144

Autori

Pietro Ferraro, Alessandra Rocco, Paolo De Natale
Istituto Nazionale di Ottica Applicata - Sezione di Napoli

Coordinamento editoriale

doppiavoce
www.doppiavoce.it

Copyright © 2004 Università degli Studi di Napoli "Federico II" - CRdC-AMRA

Tutti i diritti riservati
È vietata ogni riproduzione

Indice

| | |
|---|----|
| Introduzione | 5 |
| Descrizione tecnica e principi di funzionamento | 7 |
| Possibili sviluppi e applicazioni | 13 |
| Bibliografia | 15 |

Introduzione

Le sorprendenti innovazioni che hanno avuto luogo nel settore delle telecomunicazioni e dell'informatica, nell'ultimo decennio, sono in gran parte risultato dei grandi progressi compiuti nel campo dell'ottica guidata e dell'elettronica. Le competenze e le conoscenze acquisite, in questa fase, hanno oggi un ruolo cruciale nel campo della ricerca sui sensori, aprendo nuove prospettive nelle attività di sviluppo di dispositivi ottici portatili per la misura di parametri chimici e fisici ambientali. La richiesta sempre crescente di strumentazione affidabile, per fini che vanno dal monitoraggio dell'ambiente al controllo dei processi industriali, ha accresciuto le esigenze sulle prestazioni in termini di sensibilità, accuratezza e precisione e sulle possibilità d'impiego in situazioni reali. Tali aspetti sono di notevole importanza in alcune applicazioni, come nei controlli di sicurezza in campo industriale o nel monitoraggio di aree urbane, essendo spesso necessaria la misura accurata di una grandezza combinata alla possibilità di effettuarne rilievi a distanza e in tempo reale. L'impiego di fibre ottiche, in particolare, permette di ridimensionare notevolmente i requisiti di spazio e di costo, pur conservando doti di elevata affidabilità, maneggevolezza, resistenza meccanica e semplicità di fabbricazione. L'estrema compattezza di tali dispositivi rende possibile la loro integrazione in vere e proprie stazioni di controllo distribuite su vaste aree. È questo il caso dei sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) per rilievi termici e meccanici. Questo genere di dispositivo è estremamente sensibile a deformazioni meccaniche e variazioni di temperatura, mentre è totalmente immune al rumore elettromagnetico e può essere, in principio, direttamente inglobato nel materiale oggetto del monitoraggio. Svariati sono gli esempi, in letteratura, del loro impiego alla geofisica e all'ingegneria [1-3]. L'uso di sensori trasportabili basati su FBG, infatti, è in grado di accrescere in maniera decisiva il livello di conoscenza di determinati fenomeni naturali e dei rischi ambientali connessi, come quelli che interessano le dinamiche e le modificazioni delle aree circostanti a siti vulcanici o urbani. Tuttavia, l'utilizzo di sensori di Bragg richiede lo sviluppo di metodologie di anali-

si innovative come passo cruciale per raggiungere le prestazioni necessarie in alcune applicazioni tipiche.

Nei laboratori dell'INOA di Napoli, nell'ambito delle attività del Centro Regionale di Competenza per l'Analisi e il Monitoraggio del Rischio Ambientale (AMRA), vengono studiati e sperimentati sensori per questo tipo di attività. In particolare, è stato recentemente sviluppato un apparato di misura, denominato BraSS (Bragg Strain Sensor), il cui funzionamento si fonda sull'utilizzo di reticoli di Bragg in fibra ottica per la rivelazione e l'analisi di deformazioni meccaniche mediante metodi optoelettronici.

Descrizione tecnica e principi di funzionamento

BraSS (Bragg Strain Sensor) è un sistema di rivelazione di deformazioni meccaniche statiche e dinamiche che fa uso di un piccolo elemento sensibile, costituito da un reticolo di Bragg inscritto in fibra ottica (FBG) e di un apparato di acquisizione e lettura dei segnali. Il principio di funzionamento del reticolo di Bragg è mostrato in modo chiaro in Figura 1. La formazione di reticoli permanenti in fibra ottica è stata dimostrata per la prima volta da K.O. Hill nel 1978 [4]. Nel nucleo fotosensibile di una fibra, viene inscritto un vero e proprio reticolo di diffrazione di passo periodico che si comporta da filtro ottico selettivo in frequenza. La sua massima riflessione avviene in corrispondenza di un determinato valore di lunghezza d'onda λ_B . Infatti, le lunghezze d'onda che si propagano lungo il core della fibra attraversano il reticolo di Bragg senza subire alcun tipo di perturbazione, ad eccezione di quelle che soddisfano la condizione $\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$ che si sommano invece in maniera coerente e vengono riflesse dal reticolo (n_{eff} indice di rifrazione efficace e Λ passo del reticolo). Si intuisce pertanto che ogni cambiamento di periodo del reticolo, dovuto ad allungamento o compressione

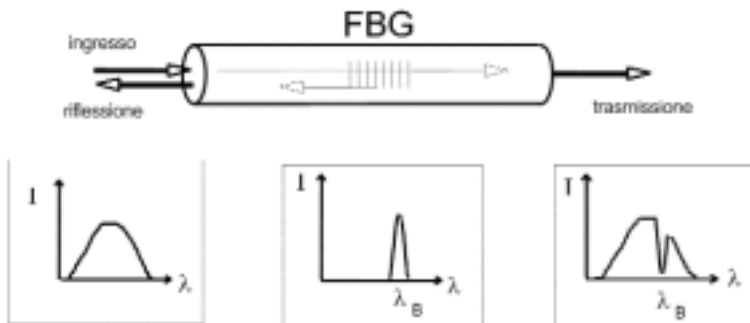


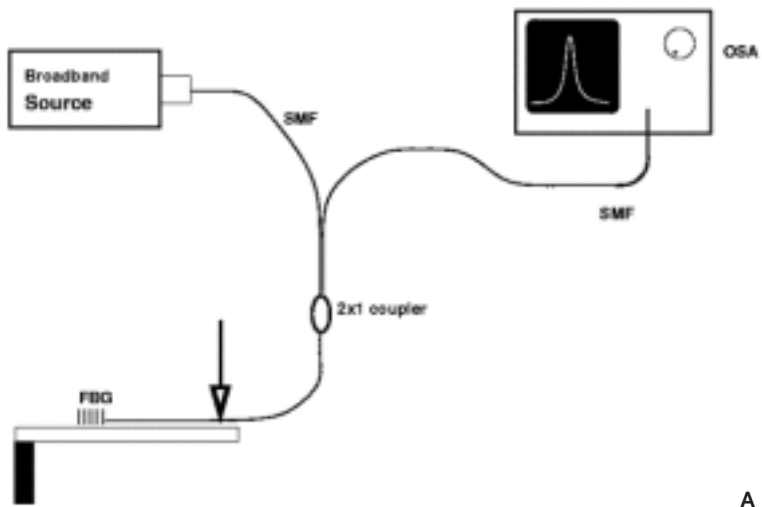
Fig. 1. Principio di funzionamento del reticolo di Bragg.

dello stesso, così come a una variazione d'indice di rifrazione per effetti termici, causa uno spostamento del *picco* di Bragg. Nel sistema BraSS, rappresentato in Figura 2, la radiazione infrarossa proveniente da una sorgente a basso grado di coerenza viene iniettata in un tratto di fibra ottica singolo modo e, attraverso un accoppiatore ad "Y", inviata all'FBG (prodotto da AOS-GmbH) per essere parzialmente riflessa e trasmessa. Il fascio di ritorno attraversa nuovamente l'accoppiatore, percorrendo l'altro ramo della "Y", e viene inviato all'ingresso di un sistema di analisi spettrale dal quale è possibile ricavare le informazioni sullo stato meccanico del reticolo, trasportate dalla radiazione stessa. Due dei suoi possibili schemi sono rappresentati in Figura 2. Nella schema di Figura 2A, viene utilizzata una sorgente in fibra ottica a largo spettro (ASE) che emette nell'intervallo 1540-1600 nm. La luce proveniente dal reticolo viene inviata a un OSA, Analizzatore di Spettro Ottico (ANDO AQ6317B), in grado di effettuare una scansione in lunghezza d'onda con risoluzione nominale pari a 0,05 nm.

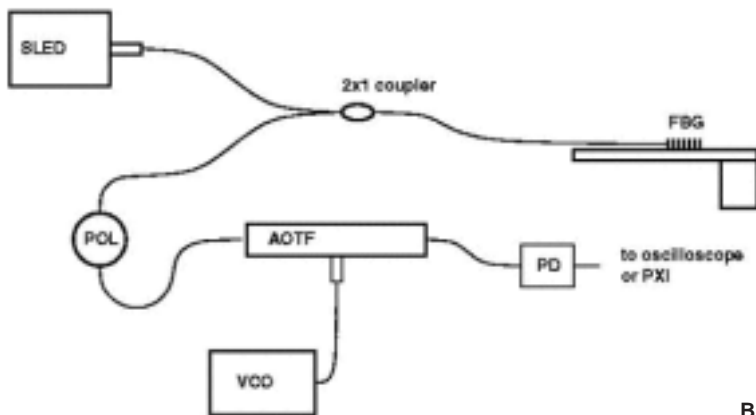
Successivamente, sono stati sperimentati sistemi di analisi alternativi, con l'aggiunta di alcuni componenti messi a disposizione da enti esterni nell'ambito di collaborazioni scientifiche (Alenia; Istituto di Microelettronica e Microsistemi del CNR), allo scopo di ottimizzare le prestazioni del sensore per l'impiego sul campo.

Nella configurazione di Figura 2B, viene utilizzato come sorgente un diodo superluminescente, che emette su una banda di lunghezze d'onda centrata intorno a 1300 nm, con larghezza pari a 30 nm e potenza di 10 mW (Optospeed mod. 1300D20A). La radiazione riflessa, in questo caso, viene analizzata da un filtro acustooptico accordabile (AOTF) combinato a un sistema d'acquisizione e controllo di tipo PXI (National Instruments).

L'unità adimensionale che viene comunemente utilizzata per le misure di deformazioni meccaniche è il microstrain ($\mu\epsilon$), indicando con $1 \mu\epsilon$ il rapporto tra l'allungamento subito dall'elemento sensibile e la sua lunghezza totale, moltiplicato per 10^6 . Il reticolo di Bragg utilizzato nello schema di Figura 2B, ad esempio, ha il massimo di riflessione, a riposo, a una lunghezza d'onda pari a 1313,5 ($\pm 0,1$) nm, e le sue caratteristiche di sensibilità sono di 1 nm/1000 $\mu\epsilon$. Le dimensioni reali dell'ele-



A



B

Fig. 2. Schema dell'apparato utilizzato.

mento sensibile (FBG) sono estremamente ridotte e corrispondono essenzialmente a quelle di un tratto di fibra ottica di circa 10 mm (diametro esterno medio inferiore a 0,2 mm). Esso è solidale a una barretta di alluminio, di lunghezza pari a circa 30 cm e larghezza di 2,5 cm, utilizzata a fini di caratterizzazione del sensore. La calibrazione complessiva del sistema è stata effettuata applicando alla barretta una serie di carichi di massa nota e accoppiando il sensore a uno "Strain-Gauge meter" elettrico. Dal confronto tra le letture di strain, misurando la variazione della lunghezza d'onda del Bragg sottoposto a tensione attraverso il sistema d'acquisizione, è risultato l'andamento mostrato in Figura 3. Le variazioni della λ_B misurate in funzione del carico applicato, seguono un andamento con buona approssimazione lineare. Gli errori sperimentali sulle singole misure sono dati dall'errore massimo dovuto al limite di risoluzione della scheda d'acquisizione che controlla il filtro acustooptico

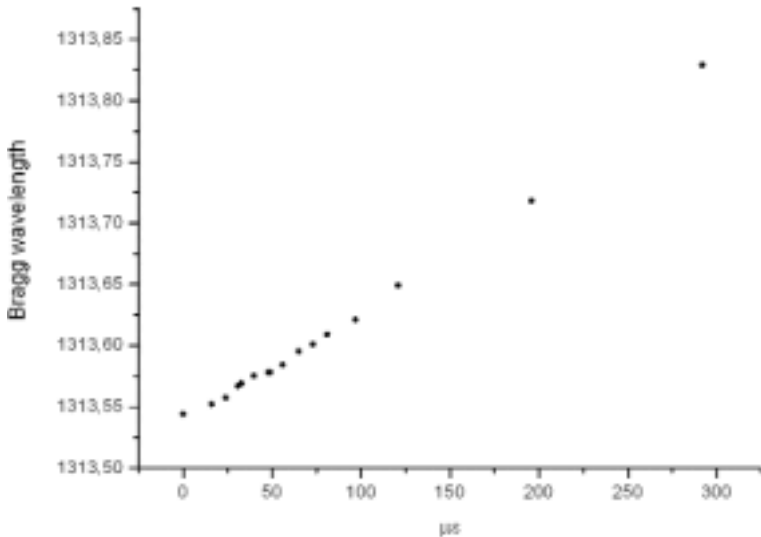


Fig. 3. Andamento dello spostamento del picco di Bragg in funzione dello strain applicato.

(0,05 nm). Dalla procedura di test dell'apparato è risultato un limite di sensibilità nella misura di deformazioni pari a $10 \mu\epsilon$. Un ulteriore metodo di analisi utilizzato per il BraSS è basato su di un filtro "etalon" costituito da una lamina ricavata da un wafer di silicio di comune impiego in microelettronica (Figura 4) [5]. Il nuovo schema fa ancora uso della sorgente ASE, mentre l'analizzatore OSA funge da metodo di confronto. La lamina di silicio si comporta come un interferometro di tipo Fabry-Pérot e produce, sul rivelatore, lo spettro di una figura d'interferenza, sfruttando la sua risposta in frequenza in una regione lineare. Dall'analisi delle frange è possibile seguire le sollecitazioni meccaniche sia statiche sia dinamiche cui è soggetto il sensore di Bragg e quindi le deformazioni della struttura alla quale esso è stato reso solidale [5, 6]. Nella Figura 5 è rappresentato il segnale interferometrico acquisito durante l'applicazione di una sollecitazione forzata di tipo acustico.

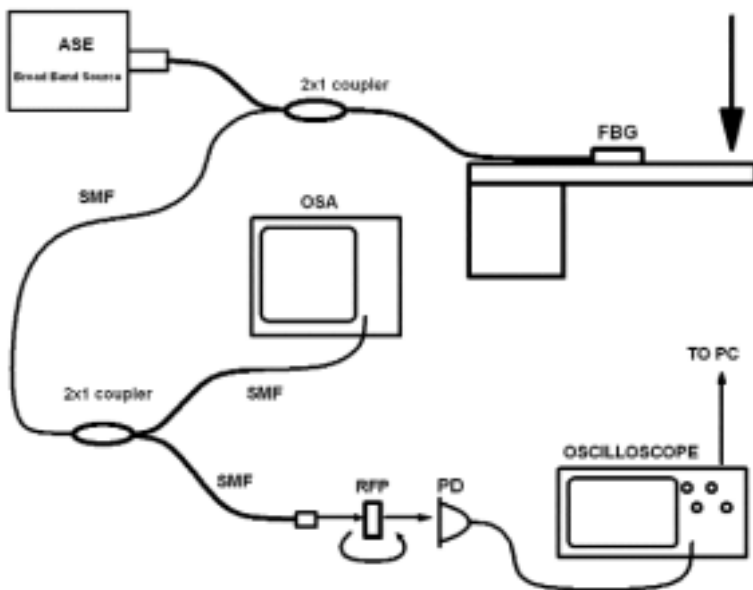


Fig. 4. Apparato di misura basato su "etalon" di silicio.

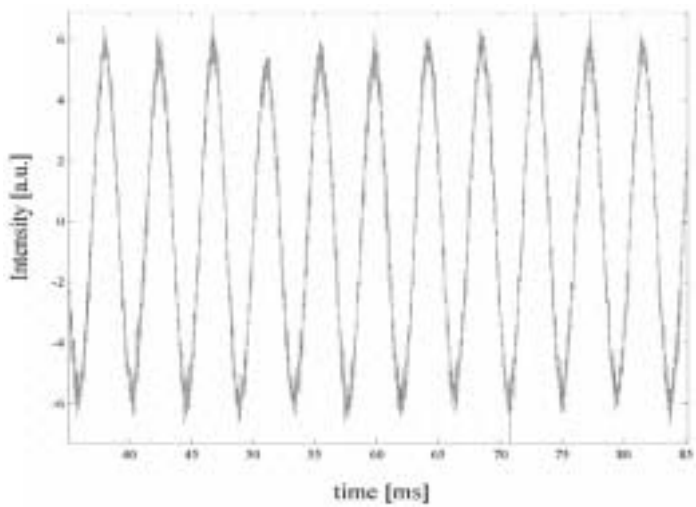


Fig. 5. Segnale di risposta a un'oscillazione forzata a 230 Hz sulla barretta di prova.

Possibili sviluppi e applicazioni

Il sistema BraSS per misure di deformazioni rappresenta uno dei dispositivi più interessanti che la ricerca nel campo della sensoristica ottica è in grado di offrire, allo stato attuale. Questa categoria di sensori costituisce sicuramente un valido strumento per il monitoraggio di aree a rischio vulcanico che è uno degli obiettivi del lavoro svolto. A questa fase preliminare di caratterizzazione in laboratorio farà seguito la messa a punto di una configurazione finalizzata ad applicazioni sul campo (accelerometri, monitoraggio di deformazioni). Le caratteristiche di sensibilità e risposta in frequenza dell'apparato presentano diversi vantaggi rispetto agli strumenti preesistenti. BraSS offre la possibilità di un monitoraggio continuo delle grandezze fisiche in esame, monitoraggio che può potenzialmente essere effettuato su vaste aree e in più punti critici. Mediante l'uso di una sorgente nel vicino infrarosso di elevata potenza luminosa, infatti, può essere realizzata una vera e propria rete di sensori (FBG multipli), in cui l'acquisizione d'informazioni può avvenire attraverso comunicazioni satellitari o via internet, per un'analisi dei dati in tempo reale. La possibilità di integrare sensori di Bragg con sensori di gas, basati eventualmente sulle stesse sorgenti di radiazione, rappresenterebbe una svolta nella realizzazione di strutture di controllo intelligenti per aree vulcaniche a rischio.

D'altra parte, l'insieme delle possibili applicazioni del sistema BraSS è alquanto ampio. Tra queste, la misura "on-line" di stress meccanici e fratture per il controllo statico di strutture, come edifici o ponti, la rilevazione di variazioni di temperatura, pressione o accelerazione in applicazioni alla geofisica [7] così come alla sicurezza ambientale [8]. Una sua ingegnerizzazione, pertanto, appare auspicabile dal momento che la tecnologia di base è a un stadio di maturità avanzato e i componenti di BraSS sono per la gran parte reperibili sul mercato delle telecomunicazioni a costi estremamente contenuti. In prospettiva, una sua versione da campo potrebbe essere d'interesse per Enti di Ricerca, Osservatori, così come Enti Regionali o il Dipartimento per la Protezione Civile.

Ringraziamenti

Gli autori del manuale desiderano ringraziare Alenia Aeronautica e Alenia Marconi System, per aver fornito il filtro AOTF e lo "Strain-Gauge meter", e l'Istituto di Microelettronica e Microsistemi del CNR per il sistema di acquisizione PXI della National Instruments.

Bibliografia

1. Schmidt-Hattenberger C et al. Dynamic deformation in rock masses for monitoring strain variation in the range 1ne and a bandwidth of 0.1 to 2KHz and comparison with conventional geophone. Proc. SPIE 1999; 3860:417-24.
2. Schroeck M et al. Strain Monitoring in steel rock bolts that are used for structural stability in underground cavities to reduce volume excavation. Proc. SPIE 2000;4074:298.
3. Sato T et al. Ground strain measuring system using FBG sensors. Proc. SPIE 2000;3986:180-90.
4. Hill KO, Meltz G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. J. Lightwave Tech., vol. 15, no. 8, August 1997.
5. Coppola G, Ferraro P, Iodice M, Rendina I, Rocco A. A simple bi-polished silicon sample to detect vibrations by fiber Bragg sensor. Proc. IEEE/LEOS Annual Meeting 2002;02CH37369:6000-6001.
6. Coppola G, Ferraro P, Iodice M, De Nicola S. Simple interferometric method for measuring severally the refractive index and the thickness of transparent plates. Proc. of SPIE 2003;4946:207-214.
7. Ferraro P, De Natale G. On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring. Opt. and Las. in Eng. 2002;37:115-30.
8. Chastin S, James SW, Boulton G, Tatam RP. Soli and sediment deformation sensor. Geophysical Research Abstract 2003;5:06722.

Finito di stampare nel mese di giugno 2004
presso la LEGMA/Napoli

I manuali del CRdC-AMRA 2