

## Sensori in fibra ottica

Mariano Severi

*Questo settore presenta interessanti prospettive, grazie anche alla progressiva riduzione dei costi delle tecnologie impiegate*

Una delle rivoluzioni più importanti che ha investito negli ultimi vent'anni la maggior parte dei campi di applicazione è stata lo sviluppo delle tecnologie ottiche. L'industria optoelettronica ha prodotto in ambito consumer innovazioni come le stampanti laser, i lettori di codici a barre o i compact-disc, che sono ormai oggetti di uso comune.

Parallelamente, nel settore delle telecomunicazioni le fibre ottiche hanno consentito di raggiungere capacità di trasmissioni inarrivabili per le soluzioni su rame; il risultato è la disponibilità sempre più ampia delle connessioni a banda larga. Meno conosciuto è invece il settore dei sensori basati su fibra ottica (Fig. 1) che tuttavia, grazie anche alla progressiva riduzione dei costi delle tecnologie impiegate, presenta interessanti prospettive.

Un sensore a fibra ottica è banalmente un sensore che utilizza una fibra per trasportare della luce le cui caratteristiche vengono modificate in seguito alla interazione con la grandezza fisica che si intende misurare; rilevando tali variazioni si ha una stima della grandezza. I sensori si distinguono quindi in intrinseci ed estrinseci (o ibridi). Nel primo caso la variazione delle caratteristiche della luce avviene direttamente all'interno della fibra mentre nel secondo caso la luce viene fatta passare attraverso un elemento elettroottico esterno (trasduttore) sensibile alla



Fig. 1 - Esempi di sensori in fibra ottica

grandezza fisica oggetto della misura. Le proprietà della luce che possono essere modificate in questo modo sono l'intensità della radiazione, la sua fase, la lunghezza d'onda e la polarizzazione. In funzione invece della distribuzione spaziale dell'elemento sensibile si distingue, con ovvia notazione, tra sensori singolopunto, quasi distribuiti e distribuiti.

Diversi sono i vantaggi dei sensori a fibra ottica. Innanzitutto sono realizzati con materiali elettricamente isolanti e quindi possono essere usati in sicurezza in ambienti dove sono presenti tensioni elevate, oltre a essere immuni a interferenze elettromagnetiche e non presentare problemi di emissività. Inoltre, alcuni tipi di fibre sono realizzati con materiali chi-

micamente passivi che non presentano il pericolo di contaminare l'ambiente circostante; non sono soggetti a corrosione e possono essere usati in ambienti esplosivi. I sensori a fibra ottica sono caratterizzati da ridotte dimensioni, pesi contenuti e bassa dissipazione di potenza.

Mediante fibre multi-modali possono essere realizzati strumenti con diversi canali di misura impiegando una stessa sorgente luminosa e un'unica fibra. La sorgente di luce è tipicamente un laser a fibra a singola frequenza, ovvero un laser che utilizza la fibra direttamente come mezzo di amplificazione della luce; la fibra può essere drogata con ioni di terre rare come erbio, neodimio, itterbio, tullio o praseodimio. In alternativa possono

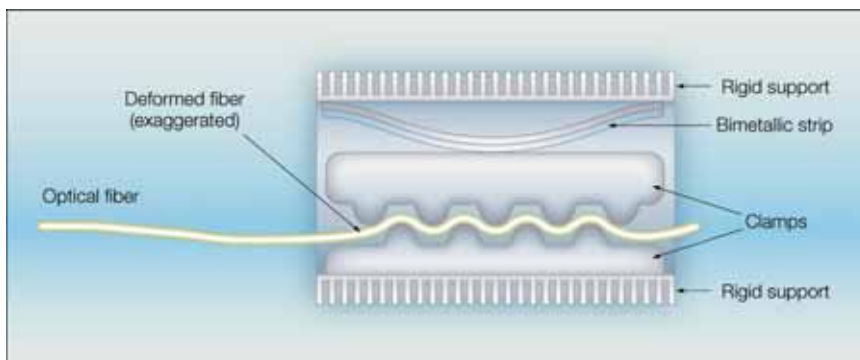
essere usati diodi a superluminescenza, che producono una radiazione ad ampio spettro, caratterizzata da bassa coerenza temporale, spesso impiegata anche in alcune applicazioni medicali. Le applicazioni principali dei sensori a fibra ottica sono in misure di grandezze di tipo meccanico, come pressione, stress, accelerazione e vibrazione; in fibra ottica possono essere realizzati anche sensori di tipo chimico o biologico, strumenti per misure elettriche e magnetiche, sensori di suono.

Nel 2008 il fatturato legato ai sensori in fibra ottica ha raggiunto la quota di 1,4 miliardi di dollari, che rappresenta circa il

### Sensori a modulazione di intensità

I più semplici sensori in fibra ottica si basano, come anticipato in precedenza, sulla misura della variazione della intensità della luce. Possono essere di tipo a riflessione o trasmissione. Nel primo caso la fibra viene disposta di fronte a una superficie riflettente; la quantità di luce riflessa dallo specchio e raccolta dalla fibra dipende dalla distanza tra i due. Si possono così realizzare sensori di pressione. Misure di posizione possono invece essere effettuate usando tecniche WDM multiple; il fascio viene separato in diverse componenti che finiscono per

misura dell'indice di rifrazione di un mezzo aventi una risoluzione di qualche punto percentuale; in questo modo sono stati realizzati in passato sensori per la misura dei livelli di liquidi. Nei sistemi a trasmissione sono invece usate due fibre giustapposte, con la seconda che funziona da collettore della luce trasmessa attraverso l'interstizio. Sistemi di misura di posizione possono essere realizzati in questo modo giustapponendo ad esempio la fibra che trasporta la luce a un reticolo di fibre e misurando i rapporti tra le intensità della luce da queste raccolte. Misure di forza possono invece essere effettuate disponendo nell'interstizio tra le due fibre un materiale elasto-ottico e filtri polarizzatore e di analisi. Diverso è invece il principio di funzionamento delle fibre a micro-bending, dove il trasduttore imprime una curvatura locale alla fibra. A seconda del raggio di curvatura, una certa percentuale della radiazione può disperdersi dal core al cladding. In figura 2 è mostrato ad esempio lo schema di principio di un sensore di temperatura; variazioni di temperatura determinano in questo caso una deformazione della strip bi-metallica che induce la curvatura della fibra. In ambito diverso, ma in base allo stesso principio, sono stati recentemente sperimentati dei sensori ottici caratterizzati da uno speciale rivestimento, realizzato con polimeri che in presenza di miscele si espandono producendo appunto un micro-bending della fibra; sono stati usati, ad esempio, per misure di perdite in condutture per il trasporto dell'acqua. I sensori con modulazione di intensità hanno l'indubbio vantaggio di essere estremamente semplici, anche per quanto concerne la rilevazione della intensità di luce che è alla base della misura. Soffrono tuttavia di problemi di accuratezza legati principalmente a perdite di inserzione della fibra, errori di micro e macro bending, disallineamento tra fibra e sorgente luminosa; in parte gli errori possono essere mitigati utilizzando, a



**Fig. 2 - Schema di un sensore di temperatura basato su modulazione di intensità della luce mediante micro-bending della fibra**

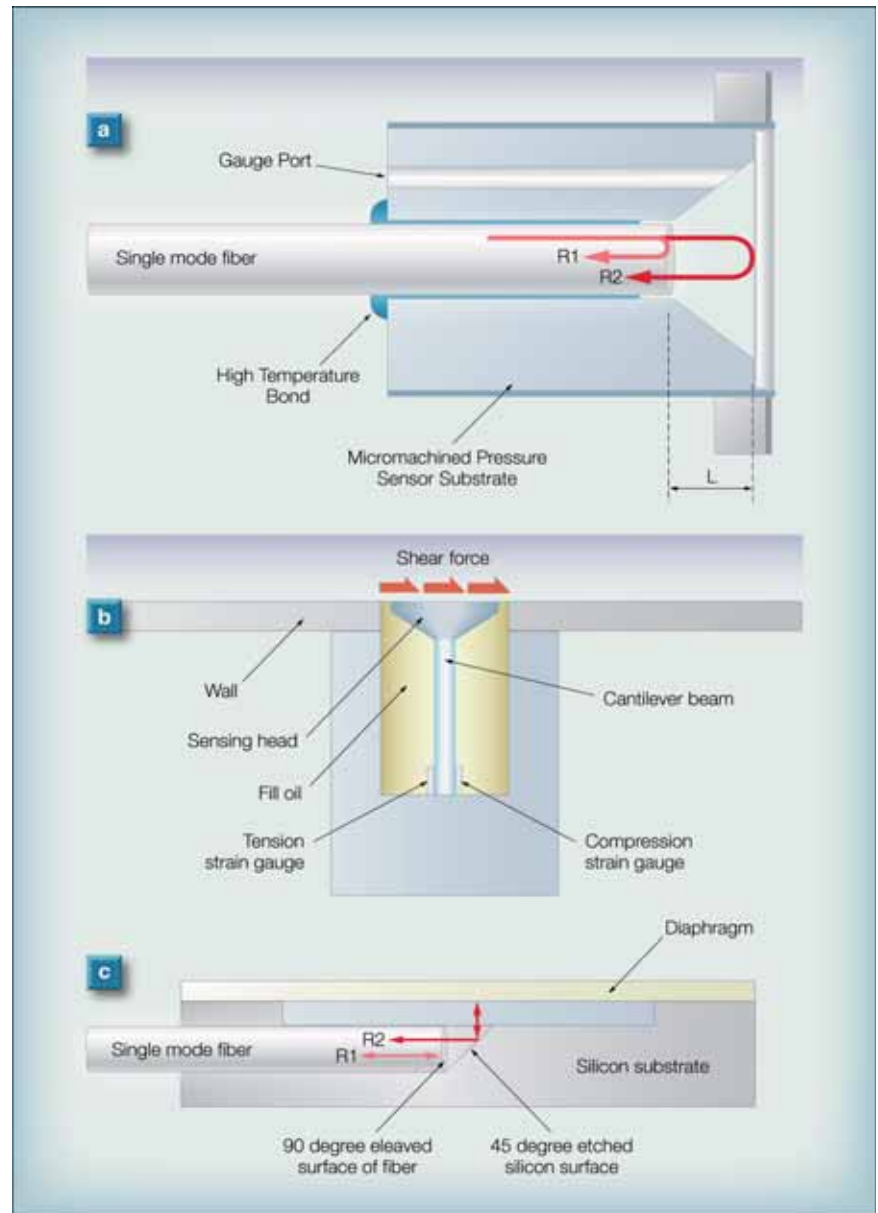
3% dell'intero mercato dei sensori; la crescita su base annua è stimata intorno al 30%, a fronte di un incremento percentuale dell'intero settore inferiore al 5%. Le difficoltà principali della tecnologia riguardano prevalentemente l'eccessiva frammentazione del mercato con applicazioni non ancora nettamente definite, la ancora poca familiarità degli utenti, la poca attitudine all'assunzione dei rischi in alcuni settori industriali, la mancanza di dati confidenti relativi all'impiego sul campo su larga scala, la compatibilità con le esistenti installazioni, i costi in certi casi più elevati rispetto ai classici sistemi, la scarsità di personale qualificato e i costi di formazione di questo, l'assenza di standard condivisi.

incidere su diversi punti di una superficie riflettente. Utilizzando quindi un rivelatore per ogni frequenza della luce riflessa, è possibile determinare la posizione con buona approssimazione. In alternativa sono usate una sorgente luminosa pulsata e, dopo lo split del fascio, fibre caratterizzate da un tempo di arrivo diverso, così da poter impiegare, per rivelare le componenti riflesse, un singolo rivelatore con un semplice schema TDM. Diverse soluzioni per applicazioni fly-by-light sono state realizzate in passato in ambito avionico sulla base di questi principi. In altri casi viene usata direttamente la riflessione interna della fibra per realizzare sensori di pressione a bassa sensibilità, o strumenti di

scapito della semplicità dello strumento, un secondo canale di misura per scopi di calibrazione o misure differenziali.

### Sensori a modulazione di fase

Migliori risultati si ottengono con i sensori a modulazione di fase che utilizzano metodi interferometrici. In questo caso la luce viene scomposta in fasci a cui viene imposta una differenza nel cammino ottico all'interno del trasduttore del sensore o della fibra stessa; da ciò deriva, ad esempio, una variazione dell'intensità della radiazione rilevata. Le soluzioni più convenzionali utilizzano interferometri a due fasci come quelli di Sagnac, Mach-Zender e Michelson, fibre monomodali e sorgenti di luce coerente. La misura dell'intensità della radiazione risultante viene fatta tipicamente in quadratura per ottenere la massima sensibilità nello strumento; gli errori principali sono legati alla fluttuazioni della lunghezza d'onda della radiazione immessa nella fibra. Recentemente sono state studiate strutture reticolare di interferometri Mach-Zender non bilanciati, che presentano basse perdite; prototipi sono stati realizzati per monitorare le variazioni di pressione su diversi canali di misura rilevando effetti di cross-talk trascurabili. L'esempio più noto di sensore a fibra ottica a due fasci è rappresentato dai giroscopi a 3 assi, impiegati in applicazioni di controllo inerziale, per puntamento e stabilizzazione di antenne, sistemi di navigazione assistita o autonoma; l'impiego di fibre ottiche consente di realizzare sensori senza parti in movimento, a elevata affidabilità e con costi contenuti. L'idea originale fu proposta nel lontano 1975 ma la prima commercializzazione si è avuta solo vent'anni dopo a bordo del Boeing 777; si è quindi dovuto attendere il 2005 per assistere a una diffusione su ampia scala. In un giroscopio a fibra ottica una sorgente ad ampio spettro inietta luce nella fibra. In linea di principio, un coupler divide quindi il raggio in due fasci che attraversano una



**Fig. 3 - Sensori EFPI per misure di pressione (a), flusso (b) e accelerazione (c)**

bobina realizzata mediante avvolgimento in fibra. Ruotando la bobina si impone un differente cammino ottico e quindi una differente fase ai fasci che si propagano in senso opposto. I fasci vengono infine ricombinati e viene misurata l'intensità di radiazione risultante. Nelle architetture a loop-chiuso si adottano invece schemi di modulazione della fase della radiazione in ingresso per compensare la variazione indotta dalla rotazione; soluzioni del genere sono adottate per applicazioni in regime di elevata risoluzione garantendo una linearità ottimale del fattore di scala. Altre applicazioni dei sensori fibra ottica a due fasci riguardano i sistemi di misura di stress meccanico, temperatura, pressione, sensori acu-

stici e di corrente/tensione. Sono stati realizzati ad esempio sonar passivi per armamenti anti-sottomarini o matrici di sensori con fino a 50 fibre monomodali per applicazioni nel campo della sismografia. Per misure fini, i sensori a due fasci sono sostituiti da rilevatori a fascio multiplo che impiegano interferometri Fabry-Perot, realizzabili in configurazioni intrinseche ed estrinseche; in questo secondo caso gli specchi sono impiantati direttamente all'interno della fibra. La figura 3 mostra ad esempio il principio di funzionamento di sensori EFPI (Extrinsic Fabry-Perot Interferometer) per misure di pressione, flusso e accelerazione. Tali sensori trovano in effetti impiego nella maggior parte delle misu-

re di tipo meccanico; sono disponibili sensori di tensione con risoluzione inferiore a  $1 \mu\epsilon$ , con un diametro di soli  $250 \mu\text{m}$ , in grado di operare in range di temperatura compresi tra  $-100^\circ\text{C}$  e  $+800^\circ\text{C}$  e immuni a interferenze elettromagnetiche. Le migliori prestazioni in assoluto si ottengono tuttavia impiegando sorgenti di luce a bassa coerenza, come SLD, LED ed EDFA. I sensori LCFI (Low Coherence Fiber-Optic Interferometer) utilizzano, in questo caso, un interferometro di sensing (ad esempio con architettura Fabry-Perot) e uno di read-out (di tipo Mach-Zender). Il vantaggio principale è che la variazione della fase della radiazione rilevata (a cui è legata la misura in oggetto) non dipende significativamente dalla fluttuazione della lunghezza d'onda della luce; presentano inoltre una maggiore risoluzione, range dinamico più ampio e una minore differenza di cammino ottico.

### Sensori a modulazione di lunghezza d'onda

Il principale tipo di sensori in fibra ottica che si basa sulla modulazione della lunghezza d'onda della luce è quello che impiega fibre con reticolo di Bragg. Tali fibre, realizzate per la prima volta da ricercatori canadesi nel 1978, presentano una regione in cui l'indice di rifrazione del core viene variato con una certa periodicità. Si determina in questo modo all'interno della fibra uno specchio dielettrico, attivo a una definita lunghezza d'onda e che funziona sostanzialmente come un filtro integrato; parte della radiazione viene trasmessa, parte riflessa (Fig. 4). La lunghezza d'onda di Bragg di un tale filtro dipende non soltanto dal periodo della fibra ma anche dalla temperatura e dallo stress meccanico; si riescono così a realizzare, ad esempio, misure di stress con sensibilità dell'ordine di  $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$  o sensori di temperatura con risoluzione di  $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ . La misura può essere effettuata mediante semplici analizzatori di spettro ottico, strumenti di scanning o sistemi DSWDM (Digital Spatial Wavelength Domain Multiplexing). Tecniche WDM consentono di multiplexare sulla stessa fibra diversi canali di misura. I sensori FBG (Fiber Bragg Grating) hanno tipicamente una configurazione quasi distribuita, in accoppiamento con tecniche di rilevazioni di tipo OTDR (Optical Time-Domain Reflectometer). Trovano impiego prevalentemente nell'ambito del monitoraggio di costruzioni civili (ponti e abitazioni) o in genere di strutture meccaniche (aeromobili), ma vi sono anche esempi di applicazioni di health-monitoring o per misure di flusso. A bordo dello Space Shuttle STS-96, ad esempio, sensori FBG sono stati usati per monitorare perdite nei serbatoi di idroge-

## INNOVATIONS EMBEDDED

**ROHM**  
SEMICONDUCTOR



### Microcontroller a basso consumo

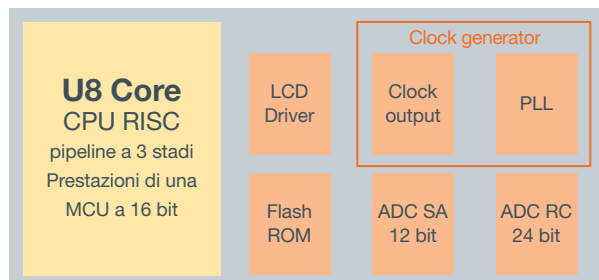
■ Basso consumo ■ Alta efficienza ■ Facilità d'uso

#### "ECO MCU" a bassissimo consumo di ottima qualità

Il basso consumo che caratterizza la serie ML610Q400 di microcontroller CMOS a 8 bit a elevate prestazioni è dovuto alla memoria flash che opera a bassa tensione, alla funzione di gestione dell'alimentazione e alla CPU di tipo RISC ad alta efficienza.



#### MCU a basso consumo con diverse periferiche



#### Caratteristiche:

- Bassa tensione  
(1,1 V incl. memoria flash on-chip):  
alimentazione da una sola pila di piccole dimensioni
- Bassa corrente  
(0,5 uA nella modalità HALT, 0,15 uA nella modalità STOP):  
basso consumo, lunga durata della pila
- Prestazioni elevate  
Un'istruzione per ogni ciclo di clock con architettura RISC a pipeline a 3 stadi
- Costo contenuto  
(driver LCD e diverse periferiche):  
dimensioni compatte e pochi componenti esterni
- Facilità d'uso  
Ambiente di sviluppo software robusto e unità di debug on-chip



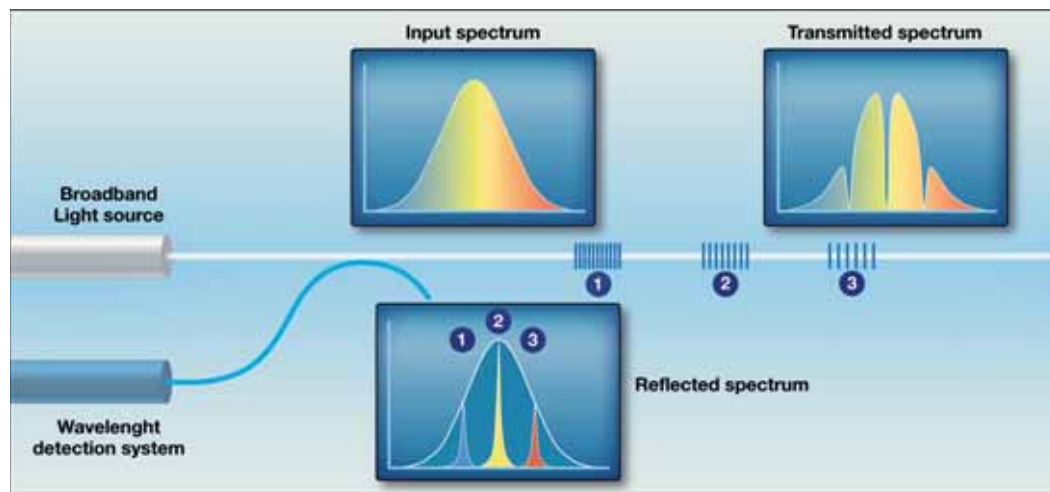
Questa linea di prodotti è l'ideale per prodotti portatili con pile a secco e varie applicazioni.

readerservice.it n.24775

**www.rohmeurope.com**

OKI Semiconductor fa parte del Gruppo ROHM Semiconductor

**Fig. 4 - Principio di funzionamento di un sensore a fibra ottica con reticolo di Bragg**



no. La stessa NASA ha finanziato poi, prevalentemente per scopi civili, un programma per il monitoraggio delle deformazioni delle ali di un velivolo durante le diverse fasi di volo, dalle operazioni di decollo e atterraggio a quelle di crociera. Fino a 3000 sensori del diametro nell'ordine dello spessore di un capello umano sono stati installati a bordo di un Ikhana, una versione modificata del velivolo senza pilota Predator B impiegato per scopi civili, fornendo misure di stress in tempo reale.

Oltre a consentire di monitorare lo stato di salute della struttura del velivolo, la possibilità di studiare sollecitazioni e deformazioni delle ali dell'aereo in volo apre interessanti scenari, tra cui la realizzazione di soluzioni innovative di controllo attivo delle superfici che consentano di migliorare drasticamente l'efficienza nei consumi e la facilità di manovra. Soluzioni simili sono state adottate anche in alcuni programmi dell'Agenzia Spaziale Europea per il monitoraggio della struttura dei satelliti. Più o meno allo stesso modo, sensori FBG sono stati recentemente utilizzati per misurare torsione e curvatura dei cavi elettrici nei sistemi di trasporto della potenza; possibili applicazioni riguardano il monitoraggio, ad esempio, degli impianti eolici. L'immunità elettromagnetica, comune a tutti i sensori in fibra ottica, li rende d'altra parte ideali proprio per misure di temperatura e stress in ambienti fortemente disturbati, come ad esempio

all'interno di super-magneti. Soluzioni di questo tipo sono state proposte per il monitoraggio dei reattori a fusione Tokamak.

Più o meno simile è il principio di funzionamento dei sensori basati su LPFG (Long-Period Fiber Grating) in cui la variazione longitudinale delle proprietà della fibra determina fenomeni di assorbimento e scattering; si osservano così frequenze risonanti nello spettro della radiazione trasmessa.

Poiché il periodo di tali variazioni è maggiore della lunghezza della radiazioni, le fibre LPFG sono più semplici da realizzare di quelle FBG. Sensori estrinseci basati su fibre LPFG e interferometri Fabry-Perot sono stati proposti per misure congiunte di tensione meccanica e temperatura; tali strumenti presentano la capacità di operare in un ampio intervallo di temperature (fino a 650 °C) mantenendo buona risoluzione nella misura dello tensione.

### Sensori distribuiti

I sensori distribuiti, come anticipato in precedenza, utilizzano la fibra come elemento sensibile continuo. Basano il loro funzionamento sui fenomeni di scattering della radiazione all'interno della fibra. Lo spettro della radiazione di back-scattering include le componenti di Rayleigh, Brillouin e Raman. L'effetto Raman, in particolare, è uno scattering inelastico dei fotoni che produce l'insorgere di due righe nello spettro, note

come componenti Stokes (verso il rosso) e anti-Stokes (verso il blu); l'intensità relativa delle due componenti dipende dalla temperatura della fibra e può quindi essere usata per misurare tale grandezza.

Nei sensori distribuiti basati su effetto Raman sono usate sorgenti pulsate e rivelatori OTDR; misurando l'andamento in funzione del tempo dell'intensità della radiazione di back-scattering, è possibile ricostruire il profilo di temperatura della fibra. Sono ad esempio stati realizzati in questo modo sensori con risoluzione in temperatura di 1 °C e risoluzione spaziale inferiore a 1 m su distanze fino a 10 km utilizzando fibre multimodali.

Lo scattering Brillouin deriva invece da una diffusione inelastica tra i fotoni della radiazione e le quasi-particelle presenti nella fibra, come i quanti acustici e vibrazionali (fononi) o le onde di spin magnetiche; permette quindi di rilevare proprietà della materia su larga scala, come ad esempio le caratteristiche elastiche del mezzo.

La radiazione di back-scattering è rilevata tipicamente mediante interferometro Fabry-Perot. Sensori distribuiti basati su scattering Brillouin sono impiegati per misure di temperatura e, soprattutto, di tensione meccanica, nel qual caso presentano caratteristiche migliori rispetto ad altri tipi di soluzioni sia classiche sia basate su tecnologie optoelettroniche diverse.