

# Small-diameter thin FBGs ideally suited for embedded sensing in composites



K. Hsu

Kevin Hsu, Andrei Csipkes, Tommy Jin - TECHNICA OPTICAL COMPONENTS



For many advanced embedded-FBG sensing applications it has become necessary and critical that the sensing fibers have small dimension, light weight, and low bend sensitivity in order to allow easy embedding with minimal compromise on the strength of the host materials. Specifically, fiber-optic sensing applications typically use a standard single-mode fiber (SMF) where the core/clad/coating diameters are  $\sim 8/125/250 \mu\text{m}$ . However, when the standard SMF sensors are embedded inside composite materials, the mechanical performance of the composites could be compromised due to local stress concentration.

Driven by increasing demands in mechanical testing and structural health monitoring (SHM) purposes, small-diameter (thin) SMFs have

been developed in order to decrease the size mismatch between embedded FBG sensors and the composites.

This development was pioneered by Takeda et.al. and Hitachi Cable, and has now become particularly useful for applications not only in the aerospace industry but also in robotics,

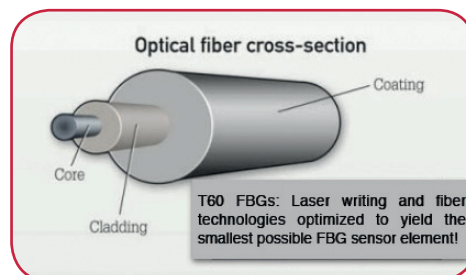


Fig. 1 - Optical fiber cross-section  
Sezione trasversale di una fibra ottica

medical devices, and micro-mechanics.

Fig. 1 illustrates a fiber cross-section with core, cladding and coating. Comparing between a standard  $125/155 \mu\text{m}^*$  cladding/polyimide-coated diameter SMF and an ultra-thin fiber of  $40/52 \mu\text{m}$  cladding/polyimide-coated diameter embedded in carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) laminates one can easily conclude how much less intrusive an ultra-thin fiber based FBG sensor truly is. Applications of thin FBG sensors with cladding diameters ranging from 40 to 50  $\mu\text{m}$  have been investigated theoretically and experimentally. It was shown that the thin FBG sensors are less intrusive at stress heterogeneities, and exhibit linear strain and temperature responses with sensitivity coefficients almost the same as those of the standard-diameter FBG sensors. Studies have

## Piccolo diametro per FBG sottili, perfetti per sensori integrati nei compositi

Kevin Hsu, Andrei Csipkes, Tommy Jin - TECHNICA OPTICAL COMPONENTS



Per molte applicazioni avanzate di sensori FBG integrati è ormai indispensabile ed essenziale che le fibre abbiano dimensioni ridotte, basso peso e una sensibilità minima alla curvatura al fine di consentire l'integrazione facilitata senza compromettere la resistenza dei materiali matrice. In particolare, le applicazioni di sensori nelle fibre ottiche utilizzano una fibra unica standard (SMF) dove i diametri di anima/copertura/rivestimento sono pari a  $\sim 8/125/250 \mu\text{m}$ . Tuttavia, quando i sensori SMF standard vengono integrati nei materiali compositi, la prestazione meccanica dei compositi potrebbe essere compromessa a causa della concentrazione di sforzi locali.

A seguito della domanda in crescita di test meccanici e di un monitoraggio strutturale della salute (SHM), sono stati messi a punto SMF dal diametro ridotto (scarso spessore) al fine di ridurre la disuguaglianza dimensionale fra i sensori FBG integrati e i compositi. Questa attività di sviluppo è stata coordinata da Takeda et al. e Hitachi Cable ed è diventata particolarmente utile per applicazioni non solo nell'ambito dell'industria aerospaziale ma anche nella robotica, nelle strumentazioni medicali e nella micromeccanica.

In Fig. 1 è rappresentata la sezione trasversale della fibra insieme ad anima, placcatura e rivestimento. Comparazione fra un SMF standard con

diametro di  $125/155 \mu\text{m}$ , rivestito di poliimmide/placcatura e una fibra ultrafine di  $40/52 \mu\text{m}$  rivestita con placcatura/poliimmide incorporata nei laminati CFRP, per dimostrare la minima intrusività del sensore FBG a base di fibra ultrafine. L'applicazione di sensori FBG sottili con diametri di copertura variabili dai 40 ai 50  $\mu\text{m}^*$  è stata studiata in modo teorico-sperimentale. Si è dimostrato che i sensori FBG con spessore ridotto sono meno invasivi in condizioni di eterogeneità delle sollecitazioni e che presentano deformazioni lineari e risposte termiche con coefficienti di sensibilità quasi uguali a quelli dei sensori FBG con diametro standard. Gli studi hanno inoltre dimostrato che i sensori FBG integrati

	Core <i>Anima</i>	Cladding <i>Copertura</i>	Coating <i>Rivestimento</i>
Standard	8.2 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	250 $\mu\text{m}$
Thin <i>Sottile</i>	7.8 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$
Ultra-Thin <i>Ultra sottile</i>	4.0 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$

Tab. 1 - Thin Fiber options for acrylate coat fiber  
*Opzioni di fibre sottili per fibre acrilate*



also shown that FBGs in small-diameter fibers experienced slightly less induced birefringence than those in standard fibers for the same embedding conditions. The intensive development of thin FBG sensing in composites in the aerospace industry has advanced to the realization of autonomous sensing-healing systems and a recent successful demonstration of large-scale SHM of a composite aircraft wing.

	Core <i>Anima</i>	Cladding <i>Copertura</i>	Coating <i>Rivestimento</i>
Standard	8.2 $\mu\text{m}$	125 $\mu\text{m}$	150 $\mu\text{m}$
Thin <i>Sottile</i>	7.8 $\mu\text{m}$	80 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$
Ultra-Thin <i>Ultra Sottile</i>	4.0 $\mu\text{m}$	40 $\mu\text{m}$	55 $\mu\text{m}$

Tab. 2 - Thin fiber options for polyimide or metal coated fibers  
*Opzioni di fibre sottili per fibre poliimmide o rivestite con prodotti metallici*



nelle fibre con diametro molto ridotto subiscono una minore birifrangenza indotta di quelli integrati nelle fibre standard alle stesse condizioni di integrazione. Lo sviluppo intensivo dei sensori FBG di basso spessore nei compositi nell'ambito dell'industria aerospaziale è approdato alla realizzazione di sistemi di rigenerazione autonoma grazie al sensore e alla presentazione di un'ala di velivolo in composito prodotta su

Thin fiber types <i>Tipi di fibre sottili</i>	3 mm coil diameter <i>Diametro di lamiera 3 mm</i>		0.9 mm coil diameter <i>Diametro di lamiera 9 mm</i>	
	5 Turns: measured <i>5 giri</i>	1 Turn: average <i>1 giro: media</i>	5 Turns: measured <i>5 giri</i>	1 Turn: average <i>1 giro: media</i>
	50 $\mu\text{m}$ cladding SMF <i>50 <math>\mu\text{m}</math> SMF di copertura</i>	Negligible loss <i>Perdita trascurabile</i>	Negligible loss <i>Perdita trascurabile</i>	0.5 dB
80 $\mu\text{m}$ cladding SMF <i>80 <math>\mu\text{m}</math> SMF di copertura</i>	0.1 dB	Negligible loss <i>Perdita trascurabile</i>	0.6 dB	0.12 dB

Tab. 3 - Thin fiber bend-loss measurements / *Misure della perdita di una fibra sottile*

have correspondingly smaller core, higher NA and higher cut-off wavelengths to significantly reduce macro-bending sensitivity.

Tab. 3 presents the results of bend-loss measurements of the 50  $\mu\text{m}$  and 80  $\mu\text{m}$  cladding diameter SMFs. Indeed it is impressive that even at a bend diameter of 0.9 mm the loss is very low. These thin FBG sensors yield excellent wavelength to temperature and wavelength to strain linearity.



To meet the growing needs of thin FBG sensors for advancing SHM in composite materials and a variety of other applications, Technica has developed thin single-mode fiber-based FBG sensors (T60) for a wide range of optical specifications and coating requirements (Tab. 1 and 2). Fabricated directly in bare fiber and coated with acrylate, polyimide, or metal, these sensors are

ultra-small and durable for use in tight spaces with minimal intrusion.

When metalized (most commonly with Au), these FBGs can be encapsulated into hermetically sealed devices as well. The small-diameter fibers containing these FBGs

Their small-size and fast response time make them useful and uniquely fitting for in-process control of advanced composites manufacturing and real-time monitoring of high performance vehicles for space, air, water and land. New applications are emerging in energy, medical, and robotic sectors.

The T60 FBG is designed to make handling and installation fast, easy and intuitive. It delivers the many advantages inherent

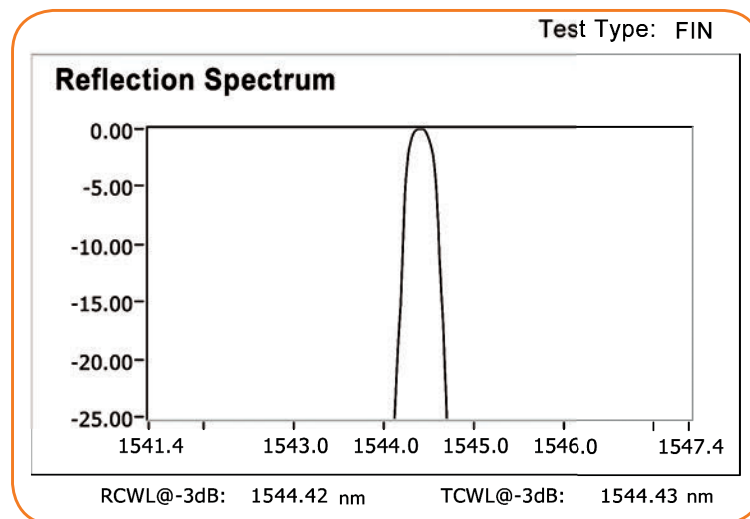


Fig. 2 - Typical thin FBG reflection spectrum with high side lobe suppression  
*Spettro di riflessione FBG con alta soppressione del lobo laterale*



*larga scala. Per soddisfare le richieste crescenti di sensori FBG con spessore ridotto per SHM nei materiali compositi e di una varietà di altre applicazioni, Technica ha sviluppato sensori FBG in fibra, sottili e in modalità unica (T60) per una vasta serie di specifiche ottiche e requisiti del rivestimento (Tab. 1 e 2).*

*Prodotti direttamente in fibra grezza e rivestiti con acrilati, poliammidi o metallo, questi sensori sono molto piccoli e durevoli per l'utilizzo in spazi ristretti e con una intrusione minima. Quando metallizzati (più generalmente con Au), questi FBG possono essere incapsulati anche negli strumenti sigillati ermeticamente. Le*

*fibre di diametro ridotto contenenti questi FBG hanno di conseguenza un'anima più piccola, NA più elevato e anche lunghezze d'onda cut-off maggiori per ridurre in modo significativo la sensibilità nelle macrocurvature.*

*In tab. 3 sono presentati i risultati delle misure della perdita degli SMF con un diametro di 50*

*mm e copertura di 80  $\mu\text{m}$ . Effettivamente, è molto significativo che con un diametro di 0,9 una flessione pari a 0,9 mm la perdita risulta essere molto ridotta. Questi sensori FBG sottili producono un'eccellente lunghezza d'onda al calore e lunghezza d'onda alla linearità della deformazione.*

*Le loro piccole dimensioni e i tempi di risposta rapidi li rendono utili e particolarmente adatti al*

*controllo in processo della produzione di componenti avanzati e alla produzione e al monitoraggio in tempo reale di veicoli di alta prestazione per spazio, aria, terra e acqua. Le nuove aree di applicazione si stanno facendo strada nei settori dell'energia, medicale e della robotica.*

*L'FBG T60 è stato progettato per rendere la*



to all FBG based sensors. Equally sensitive compared to most traditional strain and temperature sensors but immune to electromagnetic interference (EMI). The precise FBG structure written into these specialty fibers' core in producing the T60 yields a simple transducer configuration of high resolution, linearity, and measurement repeatability, as well as high side-lobe suppression ratio (SLSR) for clear signal processing (Fig.2). As the T60 sensors can be provided in arrays of various lengths and with a flexible number of FBGs, they are well suited for projects that require high-density and large-scale monitoring. Additionally, splicing techniques for connecting the thin fibers with normal SMF28-compatible fibers also exist to facilitate further processing and system integration. The T60 is a rugged low-cost FBG with stable operation for highly accurate long-term use, and have been field-proven in many customers' applications worldwide. In addition to SHM in composite materials, there are new and exciting applications that can benefit from the thin FBG sensing technology, including shape sensing development in continuum robots, embedded sensing in 3D printed structures, and touch/force/shape sensing in medical robotics. The authors can be contacted to know detailed performance parameters of the T60 thin FBG sensors.



*manipolazione e l'installazione veloce, facile e intuitiva. Essi offrono i numerosi vantaggi inerenti a tutti i sensori FBG e sono ugualmente sensibili ai sensori più tradizionali termici e di deformazione ma immuni alle interferenze elettromagnetiche (EMI).*

*La precisa struttura di FBG scritta nell'anima di queste fibre di specialità nella produzione di T60 fornisce la configurazione di un semplice trasduttore ad alta risoluzione, linearità e ripetibilità delle misure oltre all'alto rapporto di soppressione del lobo laterale (SLSR) per l'elaborazione chiara del segnale (Fig. 2).*

*Dal momento che i sensori T60 possono essere forniti in schieramenti di varie lunghezze e con un numero flessibile di FBG, essi si addicono in particolare a progetti che richiedono il monitoraggio dell'alta densità e della realizzazione su larga scala. Inoltre, le tecniche di giunzione per la connessione delle fibre sottili con le fibre normali SMF28-compatibili offrono anche il vantaggio di facilitare il trattamento e l'integrazione del sistema. Il T60 è un FBG robusto e dal costo contenuto a operatività stabile per un uso molto accurato a lungo termine ed è stato collaudato sul campo in molte applicazioni della clientela di tutto il mondo.*

*Oltre a SHM nei materiali compositi esistono nuove e interessanti applicazioni che possono trarre vantaggio dalla tecnologia dei sensori FBG, fra cui lo sviluppo dei sensori per robot continui, i sensori integrati nelle strutture stampate in 3D e i sensori di forma/forza/tatto nella robotica medica.*

*Gli autori dell'articolo possono essere contattati per sapere i parametri di performance in maniera più dettagliata dei sensori FBG T60.*