

ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901897234A1

Publication Date

20120609

Applicant

FIBERSENS S.R.L.

Title

APPARATO DI MISURA

Testo allegato alla domanda di brevetto per invenzione industriale dal titolo:

"APPARATO DI MISURA"

di FIBERSENS S.R.L., di nazionalità italiana,

5 con sede in VIA REGINA, 24, 22016 LENNO (CO)

e di Consorzio Nazionale Interuniversitario per le Telecomunicazioni C.N.I.T.,

con sede in Viale G.P. Usberti, n. 181/A, 43100 PARMA

Inventori: Bolognini Gabriele, Di Pasquale Fabrizio,

10 Nannipieri Tiziano, Sacchi Giovanni, Signorini Alessandro

La presente invenzione è relativa ad un apparato di misura. In particolare, la presente invenzione è relativa
15 ad un apparato di misura di tipo opto-elettronico. Più in particolare la presente invenzione è relativa ad un apparato di misura opto-elettronico impiegabile per monitorare delle caratteristiche fisiche di una struttura architettonica o ingegneristica.

20 DESCRIZIONE DELLO STATO DELLA TECNICA

Nel campo dell'ingegneria civile ed industriale, ed in particolare nell'ambito della costruzione di strutture di grandi dimensioni, ad esempio gallerie autostradali e ferroviarie, oleodotti, gasdotti, elettrodotti ed
25 impianti industriali in genere, è noto impiegare degli apparati di misura per monitorare con continuità dei

parametri strutturali e/o funzionali di tali strutture. In particolare, tali apparati di misura sono comunemente impiegati per controllare l'andamento nel tempo della temperatura e/o dello "strain", cioè della deformazione o
5 elongazione relativa, della rispettiva struttura. Più in dettaglio, tali apparati di misura sono atti a restituire delle informazioni di carattere locale e sono quindi impiegabili per monitorare, in funzione del tempo, la temperatura e/o lo strain associati ad una pluralità di
10 porzioni e/o di componenti della struttura ingegneristica da mantenere sotto osservazione.

Fra gli apparati di misura impiegati per monitorare lo stato di strutture ingegneristiche o architettoniche, particolare importanza ricoprono i dispositivi opto-
15 elettronici basati su fibre ottiche. In particolare, tali apparati, possono essere tipicamente di due tipi:

a) sensori distribuiti in fibra ottica che comprendono comunemente un dispositivo opto-elettronico di misura provvisto di una sonda a fibra ottica costituente
20 l'elemento di sensing e presentante estensione elevata, solitamente dell'ordine delle diverse decine di chilometri. In uso, tale fibra ottica viene accoppiata stabilmente e mantenuta sostanzialmente a contatto con delle porzioni o dei componenti della struttura
25 ingegneristica di cui si desidera monitorare dei rispettivi parametri fisici. Ad esempio, tale fibra

ottica potrà correre lungo binari ferroviari o lungo le tubature di un oleodotto, vapordotto o gasdotto, oppure essere inserita all'interno di un cavo per trasporto energia o allocata all'interno di gallerie ferroviarie e autostradali, in modo tale da essere impiegabile per visualizzare l'andamento locale della temperatura e/o dello strain di tali elementi con caratteristiche tipicamente distribuite spazialmente e statiche, nel senso che le tecniche di misura impiegate richiedono tipicamente tempi di misura non inferiori all'ordine di secondi o decine di secondi.

b) sensori concentrati in fibra ottica che comprendono comunemente un dispositivo opto-elettronico di misura provvisto di una sonda a fibra ottica presentante estensione variabile a seconda delle specifiche applicazioni, fino all'ordine delle diverse decine di chilometri, e provvisto inoltre di elementi sensoriali discreti in fibra ottica, posizionati lungo la fibra in posizioni spazialmente disgiunte e tipicamente costituiti da reticoli di Bragg, detti "Fiber Bragg Grating" (FBG), potenzialmente scrivibili direttamente nel nucleo della fibra stessa. In uso, tali elementi sensoriali discreti disposti lungo la fibra in posizioni spazialmente diverse, vengono accoppiati stabilmente e mantenuti sostanzialmente a contatto con componenti critiche della struttura ingegneristica di cui si desidera monitorare

dei rispettivi parametri fisici, tipicamente variabili nel tempo anche a frequenze elevate fino all'ordine di svariati kHz. Ad esempio, tale fibra ottica potrà correre lungo le tubature di un oleodotto o gasdotto oppure lungo un binario ferroviario, lungo strutture civili o geotecniche di elevate dimensioni, quali ponti e dighe, all'interno di gallerie ferroviarie e autostradali, in modo tale da consentire il posizionamento di FBG lungo la fibra in punti considerati critici delle rispettive strutture, e la loro interrogazione dinamica al fine di misurare localmente in tali punti critici parametri fisici di interesse quali le vibrazioni, le deformazioni, la pressione, la portata e la temperatura.

Dall'informazione distribuita del profilo di temperatura statico della struttura e dalle informazioni fornite dall'interrogazione dinamica degli FBG è quindi possibile estrarre informazioni complementari relative al corretto funzionamento delle strutture stesse e quindi importanti ai fini della sicurezza e dell'impatto ambientale; per esempio è possibile rilevare la temperatura distribuita lungo un binario ferroviario ed individuare contemporaneamente il passaggio di rotabili ed eventualmente il loro peso, mediante interrogazione dinamica di FBG posti in punti specifici del binario. Oppure è possibile individuare precocemente perdite in gasdotti, oleodotti e vapordotti, corrispondenti a

variazioni statiche di temperatura lungo le condutture, e monitorare simultaneamente vibrazioni anomale in punti critici delle condutture individuando precocemente sia perdite che potenziali problemi strutturali.

5 A questo punto è opportuno notare che tali strumenti di misura basati su fibre ottiche possono essere suddivisi in varie tipologie in funzione sia della/e grandezza/e fisica/che che sono atti a misurare, sia del principio fisico impiegato per rivelare tale grandezza, sia anche
10 in base alle caratteristiche precedentemente citate di misura distribuita, sostanzialmente statica, e misura concentrata sostanzialmente dinamica. In particolare, sono noti degli apparati di misura distribuita basati sullo "scattering" o diffusione Raman spontanea, effetto
15 ottico comunemente indicato con l'acronimo SRS, in cui ogni rispettivo dispositivo opto-elettronico di misura comprende una sorgente ottica, ad esempio un laser, atta ad emettere lungo una fibra ottica comune una pluralità di impulsi luminosi presentanti una durata dell'ordine di
20 nanosecondi o decine di nanosecondi. In uso tali impulsi luminosi percorrono la fibra ottica della sonda per tutta la rispettiva estensione subendo in corrispondenza di ogni tratto di tale fibra ottica un processo di parziale retro-diffusione anelastica noto appunto come scattering
25 Raman.

Senza addentrarsi nei principi fisici che sono all'origine della radiazione retro diffusa dalla fibra ottica, è opportuno notare che i processi di retro diffusione anelastici dovuti all'interazione Raman generano due componenti spettralmente separate dalla sorgente, dette rispettivamente riga Raman Anti-Stokes (AS) e riga Raman Stokes (S); in caso di fibra ottica in silica, le righe Raman S e AS sono separate di circa 13 THz dalla sorgente, rispettivamente al di sotto e al di sopra dalla sua frequenza.

In particolare, è noto che l'intensità della riga Anti-Stokes (AS) retro diffusa dipende non solo dalla temperatura della porzione di fibra in cui è avvenuta l'interazione anelastica che ha dato origine a tale componente Raman AS, ma anche da perdite indotte lungo la fibra da eventuali cause esterne. Pertanto è noto che per distinguere efficacemente le variazioni di temperatura dalle variazioni di perdita lungo la sonda in fibra ottica, solitamente si monitorizza il rapporto fra le intensità delle righe Raman Anti-Stokes e Stokes, o, in alternativa, il rapporto tra le intensità della riga Anti-Stokes e quella della retro-diffusione Rayleigh alla stessa lunghezza d'onda del laser di pompa.

Pertanto monitorando l'andamento nel tempo di tale rapporto è possibile ottenere delle informazioni relative alla temperatura associata a tali porzioni della fibra ottica e quindi alla struttura architettonica o ingegneristica a cui essa è stabilmente accoppiata. Tale tecnica, che permette di misurare la distribuzione spaziale lungo una fibra ottica di almeno una grandezza fisica, determinata mediante l'analisi di almeno un segnale ottico che viene retro-diffuso elasticamente o anelasticamente da tale fibra ottica, è indicata con il nome di Riflettometria Ottica nel Dominio del Tempo (OTDR) e rappresenta un'evoluzione delle comuni tecniche OTDR basate sulla retro-diffusione elastica della luce, ed impiegate comunemente per misurare la perdita di segnale lungo le fibre ottiche usate per le telecomunicazioni.

Un esempio di apparato di misura opto-elettronico basato sulla retro-diffusione Raman spontanea di impulsi luminosi lungo una rispettiva fibra ottica è descritto nell'articolo scientifico del Dr. G. Bolognini e altri, pubblicato nella rivista scientifica MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, Vol. 18 No. 10, Ottobre 2007, pagine 3211-3218, dal titolo "Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification". Tale articolo, qui e nel seguito indicato come documento D ed i cui

insegnamenti devono considerarsi parte integrante della presente domanda di brevetto, presenta un dispositivo predisposto per misurare lungo una fibra ottica di vari chilometri, l'andamento nel tempo della temperatura locale di tale fibra ottica, dove con il termine locale si intende una risoluzione spaziale che può variare da un minimo di 1 metro fino a decine di metri, con caratteristiche sostanzialmente statiche (tempi di misura dell'ordine di secondi o decine di secondi).

10 Inoltre sono noti degli apparati di misura concentrata basati sull'interrogazione di FBG disposti lungo la fibra ottica, che in tal caso non agisce come elemento sensoriale ma semplicemente come mezzo di trasposto dell'informazione fra i sensori puntuali FBG e

15 l'interrogatore. E' noto in letteratura che tali FBG presentano uno spettro di riflessione dipendente dalla temperatura e dallo strain locali, e che tali FBG rispondono rapidamente a variazioni di tali parametri locali. E' anche noto che esistono varie tecniche di

20 interrogazione di FBG che spaziano da tecniche nel dominio del tempo (TDM) a tecniche del dominio della frequenza (WDM), fino a comprendere tecniche ibride TDM-WDM, accomunate dal fatto che una misura dinamica della posizione spettrale del picco di riflessione dell'FBG può

25 fornire informazioni relative alle variazioni dinamiche di temperatura, di strain e di altri parametri quali la

pressione e la portata (mediante opportuni trasduttori) nell'intorno della specifica posizione spaziale della struttura ove è inserito il particolare FBG. In particolare nella tecnica di interrogazione TDM può
5 essere utilizzata una sorgente ottica, ad esempio un laser, atta ad emettere lungo una fibra ottica una pluralità di impulsi luminosi presentanti una durata dell'ordine di nanosecondi o decine di nanosecondi. In uso tali impulsi luminosi percorrono la fibra ottica per
10 tutta la sua rispettiva estensione, subendo in corrispondenza di ogni FBG un processo di parziale retro-diffusione la cui intensità nel tempo dipenderà dalla posizione spettrale del particolare FBG interrogato; tali FBG saranno scelti a bassa riflettività, saranno disposti
15 lungo la fibra nelle posizioni critiche della struttura ad una distanza minima l'uno dall'altro dipendente dalla durata degli impulsi utilizzati, saranno centrati alla medesima lunghezza d'onda e avranno caratteristiche tali da potere essere utilizzati come trasduttori frequenza-
20 ampiezza. La misura dinamica delle variazioni delle intensità riflesse da ogni FBG consente di risalire mediante tecniche di rivelazione di tipo TDM alle variazioni dinamiche di temperatura e strain, o altri parametri fisici correlati mediante opportuni
25 trasduttori, nei vari punti di interrogazione, con una velocità massima di interrogazione legata alla frequenza

di ripetizione degli impulsi laser.

A titolo di esempio, impulsi da 10 ns a 5 kHz di frequenza di ripetizione consentono di interrogare FBG distanti fra loro non meno di 1 metro, con banda di 5 kHz e distanza massima lungo la fibra di 20 Km (corrispondente al tempo di transito degli impulsi lungo la fibra ottica). In casi di interesse pratico il numero di FBG interrogabili con tecniche TDM è tipicamente limitato da effetti di riflessioni multiple ed è inferiore a una o qualche decina.

Un esempio di apparato di interrogazione opto-elettronico di FBG basato sulla tecnica TDM è descritto nell'articolo scientifico del Dr. Alan D. Kersey e altri, pubblicato nella rivista scientifica JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 15, NO. 8, AUGUST 1997, dal titolo "Fiber Grating Sensors". Tale articolo, qui e nel seguito indicato come documento E, ed i cui insegnamenti devono considerarsi parte integrante della presente domanda di brevetto, presenta varie configurazioni di misura di tipo TDM, WDM ed ibride TDM/WDM, per interrogare FBG posti lungo una fibra ottica di vari km, ed individuare l'andamento dinamico della temperatura e dello strain locali nelle posizioni degli FBG, dove con il termine dinamico si intendono frequenze di vari kHz. Gli FBG potranno essere a bassa o ad alta riflettività, centrati intorno alla stessa lunghezza d'onda o a lunghezze d'onda

differenti, di tipo Gaussiano, chirpati, apodizzati, lineari a seconda della particolare tecnica di interrogazione utilizzata.

E' tuttavia opportuno notare che spesso in applicazioni
5 pratiche esiste l'esigenza di monitorare simultaneamente il profilo statico distribuito di temperatura lungo strutture di elevate dimensioni spaziali e contemporaneamente monitorare dinamicamente parametri fisici quali le vibrazioni della stessa struttura in
10 punti considerati critici o misurare dinamicamente la pressione o la portata di liquidi, fluidi o gas all'interno di condutture. A titolo di esempio strutture estese quali gasdotti, oleodotti e vapordotti rappresentano il tipico esempio in cui tale esigenza si
15 manifesta; i punti critici nei quali misurare dinamicamente lo strain sono in tali casi individuabili in snodi o sostegni delle condutture, mentre altri punti potranno essere utilizzati mediante opportuni trasduttori per misure di pressione e/o portata. Altro esempio
20 significativo riguarda i binari ferroviari nel qual caso può interessare una misura statica distribuita di temperatura combinata a misura dinamica di strain in punti discreti del binario al fine di conteggio di assi di rotabili o pesatura dinamica di convogli.
25 I prodotti commerciali disponibili attualmente sul mercato effettuano separatamente misura distribuita di

temperatura, basata sulla retrodiffusione (scattering) Raman spontanea, ed interrogazione dinamica di FBG posizionati in punti discreti lungo strutture civili ed industriali in generale.

5 Pertanto, il problema di disporre di un unico apparato di misura opto-elettronico in grado di misurare simultaneamente il profilo statico distribuito di temperature lungo una struttura di elevata estensione spaziale, utilizzando lo scattering Raman spontaneo di
10 radiazioni elettromagnetiche all'interno di una prima fibra ottica, ed in grado di interrogare simultaneamente e dinamicamente svariati FBG posizionati lungo una seconda fibra ottica posizionata lungo la medesima struttura in posizioni considerate critiche, risulta al
15 momento non risolto, o risolvibile in modo insoddisfacente utilizzando due apparati di misura opto-elettronici separati, e rappresenta quindi una sfida interessante per le richiedenti che si sono date lo scopo di realizzare un apparato di misura unico che sia
20 atto a superare i limiti dell'arte nota sopra illustrata. In particolare, alla luce dello stato della tecnica sopra illustrata, sarebbe auspicabile disporre di un economico ed affidabile apparato di misura opto-elettronico basato sullo scattering Raman spontaneo di impulsi
25 elettromagnetici all'interno di una prima fibra ottica, e sulla riflessione concentrata di impulsi elettromagnetici

generati dalla medesima sorgente, da parte di FBG
posizionati su una seconda fibra ottica posizionata lungo
la medesima struttura; sarebbe auspicabile che tale
apparato presenti una portata di misura distribuita
5 statica di temperatura dell'ordine di decine di Km con
risoluzioni spaziali dell'ordine del metro o di pochi
metri, risoluzioni in temperatura dell'ordine del grado
centigrado e tempi di misura di secondi o decine di
secondi, e contemporaneamente la possibilità di
10 interrogazione dinamica a frequenze dell'ordine dei kHz
di decine di FBG posizionati lungo la medesima struttura
in punti considerati critici o di interesse particolare.

SOMMARIO DELLA PRESENTE INVENZIONE

La presente invenzione è relativa ad un apparato di
misura. In particolare, la presente invenzione è relativa
15 ad un apparato di misura di tipo opto-elettronico. Più in
particolare la presente invenzione è relativa ad un
apparato di misura opto-elettronico impiegabile per
monitorare delle caratteristiche fisiche di una struttura
20 architettonica o ingegneristica.

Scopo della presente invenzione è realizzare un apparato
di misura che permetta di risolvere gli inconvenienti
sopra illustrati, e che sia atto a soddisfare un insieme
di esigenze allo stato dei fatti ancora senza risposta, e
25 quindi, atto a rappresentare una nuova ed originale fonte
di interesse economico, in grado di modificare l'attuale

mercato degli apparati di misura.

Secondo la presente invenzione viene realizzato un
apparato di misura le cui caratteristiche principali
verranno descritte in almeno una delle rivendicazioni che
5 seguono.

Ulteriore scopo della presente invenzione è fornire un
metodo di misura validamente impiegabile per monitorare
con continuità e localmente in modo dinamico delle
caratteristiche fisiche di un corpo determinato.

10 Secondo la presente invenzione viene fornito un metodo di
misura e le caratteristiche principali di tale metodo
verranno descritte in almeno una delle rivendicazioni che
seguono.

BREVE DESCRIZIONE DELLE FIGURE

15 Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'apparato di
misura secondo la presente invenzione appariranno più
chiari dalla descrizione seguente, esposta con
riferimento alle figure allegate che ne illustrano alcuni
esempi di attuazione non limitativi, nelle quali parti
20 identiche o corrispondenti del dispositivo stesso sono
identificate dagli stessi numeri di riferimento. In
particolare:

- la figura A rappresenta uno spettro di retro-diffusione
Raman spontaneo di una radiazione elettromagnetica
25 trasmessa lungo una fibra ottica
- la figura B rappresenta uno schema di principio di

interrogazione dinamica di FBG mediante una particolare tecnica TDM, nella quale una sorgente impulsata a banda stretta è inviata lungo una fibra ottica comprendente FBG a bassa riflettività posizionati in posizioni spaziali
5 distinte lungo la fibra; le riflessioni di tali impulsi da parte di FBG, utilizzati come filtri lineari, e spazialmente distinti lungo la fibra raggiungeranno il ricevitore a tempi distinti e consentiranno quindi di misurare variazioni frequenziali dei diversi FBG
10 corrispondenti a variazioni locali di strain e temperatura

- la figura C rappresenta uno schema di principio di interrogazione dinamica di FBG mediante coppia di FBG a pendenza opposta utilizzati come filtri lineari al fine
15 di eliminare effetti di perdite spurie

- la figura 1 è una vista schematica a blocchi della preferita forma di attuazione di un apparato di misura secondo la presente invenzione;

- la figura 2 illustra una seconda preferita forma di
20 attuazione della figura 1;

DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELLA PRESENTE INVENZIONE

Nella figura 1, con 1 è indicata nel suo complesso un apparato di misura di tipo opto-elettronico impiegabile per monitorare con continuità nel tempo delle
25 caratteristiche fisiche statiche e dinamiche di un corpo
100 determinato. In particolare, come risulterà evidente

da quanto segue, l'apparato 1 di misura è preferibilmente
atto a misurare localmente e staticamente in modo
distribuito la temperatura del corpo 100 e
simultaneamente lo strain dinamico in specifiche
5 posizioni spaziali del corpo 100 che potrà, ad esempio,
comprendere una struttura architettonica od
ingegneristica come un binario ferroviario o un gasdotto
o oleodotto, ma anche una centrale nucleare o un cavo
energia. A tale scopo, l'apparato 1 di misura è provvisto
10 di una prima sonda 25 presentante un'estensione L
determinata che, in uso, è disposta a contatto con il
corpo 100 e permette di effettuare delle misure
distribuite delle proprietà fisiche di tale corpo, cioè
delle misure atte a fornire delle informazioni sulle
15 caratteristiche fisiche di porzioni limitate del corpo
100 o su tutto il corpo 100. Pertanto, impiegando una
sonda 25 presentante un'estensione L opportunamente
commisurata con le dimensioni del corpo 100 sarà
possibile conoscere uno stato fisico dell'intero corpo
20 100 monitorando staticamente, ad esempio, la temperatura
locale di una pluralità di porzioni contigue del corpo
100 stesso. L'apparato 1 di misura è provvisto inoltre di
una seconda sonda 26 presentante un'estensione L
determinata che, in uso, è disposta in prossimità del
25 corpo 100 e consente di interrogare sensori puntuali in
fibra ottica di tipo FBG, 40 e 41, posti a contatto con

determinate porzioni spazialmente distinte del corpo 100. La seconda sonda 26 permette di effettuare delle misure dinamiche locali delle proprietà fisiche di tale corpo, cioè delle misure atte a fornire delle informazioni sulle
5 caratteristiche fisiche di porzioni limitate del corpo 100. Pertanto, impiegando le due sonde 25 e 26 simultaneamente, presentanti un'estensione L opportunamente commisurata con le dimensioni del corpo 100 e comprendenti FBG 40, 41, disposti in posizioni
10 spazialmente distinte lungo il corpo 100, sarà possibile conoscere simultaneamente uno stato fisico dell'intero corpo 100 monitorando staticamente, ad esempio, la temperatura locale di una pluralità di porzioni contigue del corpo 100 stesso, e gli stati fisici di porzioni
15 specifiche del corpo 100, nelle quali sono posizionati gli FBG, monitorando ad esempio lo strain dinamico in tali punti discreti di misura.

Si noti che le due sonde 25 e 26 saranno preferibilmente, ma non limitatamente, posizionate all'interno del
20 medesimo cavo. Il posizionamento dei sensori puntuali in fibra ottica di tipo FBG può essere deciso contestualmente alla posatura in campo della sonda 26, ma può essere anche modificato in un qualsiasi momento successivo senza interferire con la sonda 25 ed il suo
25 corretto funzionamento.

Con particolare riferimento alla figura 1, il dispositivo

di misura 1, comprende un gruppo di emissione 10
associato a o provvisto di una sorgente 15
elettromagnetica atta a produrre con continuità una
radiazione EM1 elettromagnetica determinata, presentante
5 una prima frequenza F portante ed una potenza ottica di
picco P , corrispondente ad una sequenza periodica di
impulsi ottici a frequenza di ripetizione determinata e
costante nel tempo, dell'ordine dei kHz, controllata
direttamente dal generatore di impulsi elettrico 16.

10 A questo punto è opportuno notare che qui e nel seguito
si farà riferimento ad una sorgente 15 elettromagnetica
comprendente un laser 15 di tipo noto, ad esempio un
laser impulsato realizzato in fibra drogata con ioni
Erbio, ed atto a generare una radiazione elettromagnetica
15 impulsata ad elevata potenza di picco dell'ordine di
decine o centinaia di Watt, presentante preferibilmente,
ma non limitatamente, una prima frequenza F determinata
dell'ordine dei 193 THz ed avente preferibilmente durata
degli impulsi D dell'ordine di nanosecondi o decine di
20 nanosecondi e, preferibilmente ma non limitatamente,
larghezza di riga spettrale dell'ordine di un decimo di
nanometro.

Tuttavia è opportuno notare che tale scelta progettuale
ha carattere puramente arbitrario e non rappresenta un
25 limite per la generalità della presente invenzione il cui
rispettivo apparato 1 di misura potrà essere predisposto

per impiegare sorgenti elettromagnetiche di tipo diverso, come per esempio sorgenti di tipo Q-switched passive, con caratteristiche tuttavia simili a quelle descritte precedentemente in termini di potenza di picco, durata degli impulsi e frequenza di ripetizione. E' da notare che sorgenti elettromagnetiche di questo tipo, a causa delle modeste frequenze di ripetizione, sebbene caratterizzate da potenze di picco elevate, presentano potenze medie relativamente basse, e quindi convenienti al fine dell'affidabilità dei componenti ottici utilizzati negli apparati oggetto della presente invenzione. Inoltre tali sorgenti elettromagnetiche possono essere facilmente accoppiabili sia a fibre ottiche di tipo singolo modo, per esempio SMF G652, che a fibre ottiche multimodali, come per esempio fibre di tipo a profilo d'indice graduale 50/125, senza sostanziali limitazioni alle potenze di picco degli impulsi generati (limitazioni alle potenze massime di picco sono tuttavia dettate dall'insorgenza di effetti non lineari di propagazione in fibra, come verrà descritto in dettaglio in seguito).

La sorgente elettromagnetica 15 sarà preferibilmente accoppiata in fibra ottica monomodale alla frequenza F di funzionamento. Con riferimento alla figura 1 è possibile notare che il gruppo di emissione 10 è seguito da dispositivo 11 di divisione di potenza, atto a ricevere

in ingresso la sequenza di impulsi di durata D e periodo T e a dividerla su due fibre in uscita con opportuno rapporto di divisione, preferibilmente sbilanciato a favore di una delle due porte di uscita. Il gruppo di
5 divisione di potenza 11 è seguito da due attenuatori ottici variabili 5 e 6, controllabili elettronicamente o manualmente, ed atti in uso a controllare separatamente le potenze di picco delle due sequenze di impulsi inviate lungo le sonde 25 e 26. Il periodo T con cui vengono
10 generati gli impulsi P (si veda figura 1) è determinato dalle lunghezze L delle fibre ottiche 25 e 26, in quanto occorre far sì che ogni impulso si propaghi completamente lungo la fibra e che la corrispondente retro-diffusione ritorni al trasmettitore senza sovrapposizioni fra
15 impulsi successivi.

Dovrà quindi essere soddisfatta la condizione $T > 2Ln/c$ ove n è l'indice efficace del modo fondamentale della sonda 26 e c è la velocità della luce nel vuoto. Per esempio, per fibre ottiche 25 e 26 di estensione pari a
20 40 km, considerando la velocità di propagazione in fibra in silice pari a 2×10^8 m/s, ed un percorso di andata e ritorno pari a 80 km, il periodo T dovrà essere non inferiore a 400 microsecondi e la frequenza di ripetizione $1/T$ dovrà essere non superiore a 2.5 kHz.

25 Si noti che la durata D degli impulsi determina la risoluzione spaziale del sensore distribuito (in assenza

di dispersione intermodale, l'impiego di impulsi di durata D pari a 10 nanosecondi consente una risoluzione spaziale di 1 metro, mentre D pari a 1 nanosecondo consente di arrivare a una risoluzione spaziale di 10 cm). La durata D degli impulsi determina anche la distanza minima fra i sensori puntuali a FBG disposti lungo la fibra 26. Infatti per potere interrogare tali FBG utilizzando tecniche nel dominio del tempo (TDM) occorre garantire che le riflessioni concentrate da parte di FBG posti in posizioni contigue lungo la fibra 26, ad una distanza fra loro indicata con L_{FBG} , arrivino al ricevitore 17 senza sovrapposizioni temporali. Ciò è garantito se $L_{\text{FBG}} > cD/2n$ dove c è la velocità della luce nel vuoto, D è la durata degli impulsi ed n l'indice efficace del modo fondamentale della fibra 26. A titolo di esempio con impulsi di durata pari a 10 nsec la separazione minima fra FBG successivi è pari a 1 metro. In casi di interesse pratico il numero di FBG interrogabili con tecniche TDM è tipicamente limitato da effetti di riflessioni multiple ed è non superiore a una o qualche decina. Si noti che la frequenza di ripetizione FR degli impulsi, legata alla lunghezza L delle fibre 25 e 26, determina anche la massima frequenza di interrogazione degli FBG. Per esempio se con fibre di estensione pari a 40 Km sarà necessario limitare la frequenza di interrogazione degli FBG a 2.5 kHz, con

fibre più corte, per esempio 20 Km, sarà possibile interrogare gli FBG a frequenza maggiore, fino ad un massimo di 5 kHz, corrispondente al tempo di transito in andata e ritorno degli impulsi lungo l'intera lunghezza L delle fibre.

Si noti che le sorgenti per generazione di impulsi con durata D dell'ordine del nanosecondo o decine di nanosecondi, caratterizzati da potenze di picco di decine o centinaia di Watt e frequenze di ripetizione FR dell'ordine dei kHz, atte all'applicazione di tecniche di misura distribuite basate su OTDR, sostanzialmente di tipo statico, ed atte all'applicazione di tecniche di misura dinamiche basate su interrogazione di sensori puntuali di tipo FBG utilizzando multiplazione nel dominio del tempo (TDM), sono tipicamente costose e rappresentano perciò la voce di costo principale nella componentistica dei sistemi optoelettronici di misura corrispondenti. L'impiego quindi di una unica sorgente di impulsi elettromagnetici in apparati opto-elettronici ibridi, per la simultanea misura distribuita di temperatura lungo strutture di elevate dimensioni, e il contemporaneo monitoraggio dinamico di sensori puntuali in fibra ottica quali FBG posizionati in punti critici della struttura medesima, rende applicabile commercialmente tali apparati ad un numero elevato di applicazioni in settori industriali strategici quali

l'energia, l'ambiente, il monitoraggio strutturale, la sicurezza e la difesa.

E' opportuno notare che la potenza di picco massima utilizzabile all'ingresso delle fibre ottiche 25 e 26, dipende dal tipo di fibra utilizzata, che preferibilmente sarà di tipo multimodale con profilo di indice di rifrazione parabolico 50/125 in caso di misura distribuita di temperatura e di tipo singolo modo G.652 nel caso di interrogazione di sensori puntuali di tipo FBG. Tale potenza di picco è sostanzialmente limitata dall'insorgenza di effetti di propagazione non lineari, quali la retro-diffusione Raman stimolata, la cui presenza darebbe luogo a inevitabili distorsioni e renderebbe impossibile la determinazione corretta della temperatura locale lungo la sonda 25, e l'insorgenza di fenomeni di retro-diffusione di Brillouin stimolato o fenomeni di auto-modulazione di fase "self-phase modulation" nel caso di impulsi propaganti lungo la sonda 26. In presenza di fibre ottiche multimodali tale limite massimo in presenza di impulsi di durata pari a 10 nanosecondi è dell'ordine di 20 Watt a 1550 nm, mentre nel caso di fibra monomodali la soglia di insorgenza di fenomeni di retro-diffusione di Brillouin stimolato e/o di SPM è dell'ordine di alcuni Watt. Appare quindi evidente come sia conveniente sbilanciare il rapporto di separazione di potenza del divisore ottico 11 in figura 1

a favore del ramo di misura verso la fibra 25. E' inoltre importante notare che le sorgenti disponibili sul mercato ed in grado di generare sequenze di impulsi del tipo richiesto alla presente invenzione, sia di tipo in fibra
5 drogata con terre rare sia di tipo Q-switched passivo, presentano potenze ottiche di picco più che sufficienti alle presenti applicazioni.

Considerando in figura 1 la presenza di un divisore ottico 11, degli attenuatori ottici 5 e 6 e del filtro e
10 circolatore ottico 37 e 38, le cui funzioni saranno chiarite in seguito, la potenza di picco richiesta dalla sorgente ottica 15 per garantire circa 20 Watt accoppiati nella fibra 25, e contemporaneamente qualche Watt accoppiati nella fibra 26 sarà dell'ordine di 50-100
15 Watt.

E' opportuno notare che la soluzione tecnologica oggetto della presente invenzione consente di inviare in fibra le massime potenze di picco, compatibili con l'insorgenza di effetti non lineari, e di applicare simultaneamente
20 tecniche di interrogazione distribuita e concentrata di sensori in fibra ottica, rispettivamente di tipo statico e di tipo dinamico; tali caratteristiche, come verrà illustrato in seguito, consentono di superare le principali limitazioni in termini di costo degli attuali
25 apparati di misura commerciali, qualora ne venissero utilizzati simultaneamente due distinti, uno per

monitoraggio distribuito della temperatura locale di
strutture architettoniche o ingegneristiche di estensione
pari a varie decine di Km e uno per misure dinamiche
mediante interrogazione di sensori FBG in punti discreti
5 delle medesime strutture mediante impiego di fibre
ottiche.

E' opportuno inoltre notare che qui e nel seguito si farà
uso di una terminologia comunemente impiegata nel campo
dell'ottica senza con questo volersi limitare all'ambito
10 della sola luce visibile, ma al contrario, si è inteso
interpretare ogni termine afferente al dominio
dell'ottica nella sua accezione più ampia e, quindi,
prendendo in considerazione ogni radiazione
elettromagnetica che rispetti sostanzialmente le leggi
15 dell'ottica ondulatoria e/o dell'ottica geometrica, ad
esempio, delle radiazioni elettromagnetiche
nell'infrarosso.

Tuttavia la scelta di operare a frequenze dell'ordine di
193 THz, corrispondenti a lunghezze d'onda nell'intorno
20 di 1550 nm, è preferibile sebbene non esclusiva, in
quanto in tale campo di lunghezze d'onda le fibre ottiche
in silice presentano il minimo di attenuazione. Inoltre
in tale campo di lunghezze d'onda sono disponibili
componenti ottici commerciali largamente utilizzati per
25 comunicazioni ottiche, e quindi affidabili e a basso
costo, quali filtri, isolatori, accoppiatori,

circolatori, divisori ottici e fotodiodi sia di tipo PIN che APD, ampiamente utilizzati nello schema di Figura 1. Sempre con riferimento alla figura 1, l'apparato 1 di misura comprende un gruppo di trasmissione ottica 200
5 aderente al corpo 100 provvisto delle sonde 25 e 26, che possono essere sia fibre ottiche monomodali che multimodali; la fibra 25 sarà preferibilmente multimodale e la fibra 26 monomodale. Le sonde 25 e 26 sono configurate per ricevere in ingresso le sequenze di
10 impulsi P della radiazione EM1 a frequenza ottica F, caratterizzati da durata D, periodo T e frequenza di ripetizione FR, compatibili con le lunghezze L delle fibre 25 e 26 e la separazione minima fra FBG successivi lungo la fibra 26 (L_{FBG}).

15 A questo punto è opportuno ricordare che è ben noto il fenomeno per cui, quando un impulso elettromagnetico viene trasmesso lungo una rispettiva guida d'onda, ogni tratto di quest'ultima interagisce con tale impulso retro-riflettendo una piccola frazione della rispettiva
20 energia ottica. In particolare tale fenomeno di retro-diffusione può essere interpretato come la sovrapposizione di un fenomeno di diffusione o "scattering" elastico, in cui una frazione della radiazione elettromagnetica trasmessa lungo la guida
25 d'onda viene retro-diffusa senza che avvenga una variazione della rispettiva frequenza portante, e di un

fenomeno di scattering anelastico, in cui la radiazione elettromagnetica viene diffusa dopo aver subito almeno una variazione della propria frequenza portante.

Pertanto in uso, l'invio di impulsi P elettromagnetici
5 lungo la fibra ottica 25, genera una seconda radiazione EM2 elettromagnetica data dalla sovrapposizione di tutte le frazioni di tali impulsi P che vengono retro-diffuse dalle rispettive porzioni della fibra ottica 25 man mano che l'impulso procede lungo l'estensione lineare L di
10 tale fibra ottica 25. In particolare tale seconda radiazione presenterà una prima componente EM2' diffusa elasticamente e quindi centrata sulla prima frequenza portante F, ed almeno una seconda componente EM2'' presentante una seconda frequenza FR.

15 A questo punto è opportuno notare che, durante ogni processo di retro-diffusione, possono verificarsi una pluralità di fenomeni di scattering anelastico distinti, ad ognuno dei quali sarà associata la creazione di una diversa componente EM2'' elettromagnetica, ed ognuna di
20 queste componenti presenterà una frequenza diversa dalla prima frequenza F. Tuttavia qui e nel seguito si prenderanno in considerazione solamente le seconde componenti EM2'' generate da quei fenomeni di retrodiffusione ottica nella fibra 25 noti come "Effetto
25 Raman spontaneo", e che, come illustrato in figura A, comportano al primo ordine ottico, la creazione di due

seconde componenti $EM2''$ presentanti delle rispettive frequenze disposte in modo spettralmente simmetrico rispetto alla prima frequenza F portante. A questo punto è importante osservare che qui e nel seguito, con il
5 termine "effetto Raman" si farà riferimento ad ogni fenomeno di scattering anelastico interpretabile, secondo la fisica quantistica, come l'interazione fra fotoni e fononi. In aggiunta, come appare chiaro dalla figura A, le seconde componenti $EM2''$, che sono
10 rispettivamente indicate come componenti di Stokes e Anti-Stokes Raman, presentano una potenza ottica nettamente inferiore alla prima componente $EM2'$ retro-diffusa elasticamente, che viene comunemente indicata come componente di Rayleigh. L'emissione di ogni seconda
15 radiazione $EM2''$ presenterà una durata sostanzialmente doppia rispetto al tempo necessario per ogni impulso P per attraversare l'intera fibra ottica. La durata T fra l'emissione di due impulsi successivi dovrà essere maggiore rispetto al tempo necessario per ogni impulso P
20 per attraversare l'intera fibra ottica e ritornare indietro, per evitare sovrapposizioni delle seconde radiazioni $EM2''$ corrispondenti a treni di impulsi successivi. Il rapporto tra l'intensità della riga AS retro-diffusa e l'intensità della riga S retro-diffusa
25 dipende dalla temperatura e può quindi essere utilizzato per estrarre la distribuzione spaziale lineare di

temperatura lungo la fibra ottica, eliminando inoltre
effetti spuri di perdite localizzate lungo la fibra 25,
che potrebbero erroneamente essere interpretate come
variazioni di temperatura. A questo punto, sempre con
5 riferimento alla figura 1, è opportuno osservare che il
blocco 37 comprende un filtro ottico che consente agli
impulsi P di essere accoppiati in fibra ottica 25, e alle
componenti EM2'' retro-diffuse di essere separate
spetttralmente in componenti S e AS Raman ed essere
10 quindi inviate a due stadi di rilevazione, blocchi 18 e
19 in figura 1, che consentono di rilevare
simultaneamente le due componenti S e AS Raman retro-
diffuse. Le due componenti S e AS Raman retro-diffuse
vengono convertite in corrente mediante fotodiodi di tipo
15 preferibilmente a valanga (APD) e successivamente
condizionati elettricamente dagli stadi elettronici 22 e
23, comprendenti amplificatori a trans-impedenza ed
amplificatori di tensione a più stadi.

Una volta condizionati, i segnali elettrici
20 corrispondenti alle due componenti S e AS Raman retro-
diffuse possono essere digitalizzati dal sistema di
acquisizione 27 controllato dall'elaboratore elettronico
50.

A questo punto è anche opportuno ricordare che è ben noto
25 il fenomeno per cui, quando un impulso elettromagnetico
viene trasmesso lungo una rispettiva fibra ottica ed

incontra lungo il suo cammino un sensore puntuale in fibra ottica quale un FBG, parte della intensità incidente verrà retro-riflessa verso il ricevitore qualora la lunghezza d'onda della radiazione incidente
5 corrisponda alla banda di riflessione del FBG. E' anche noto che, come illustrato schematicamente in figura B, l'impiego di particolari FBG operanti come filtri lineari, la cui forma spettrale può essere scelta in modo tale da fare corrispondere alla stretta riga della
10 sorgente di impulsi una zona quasi-lineare di riflessione dell'FBG, permette di effettuare misure dinamiche di vari parametri, quali strain e temperatura, ma anche pressione e portata mediante opportuni trasduttori. Tali FBG operanti come filtri lineari, caratterizzati da bassa
15 riflettività e con zona quasi-lineare della loro riflettività centrata sulla lunghezza d'onda degli impulsi P, possono essere utilmente interrogati utilizzando tecniche di tipo TDM, nelle quali gli impulsi P raggiungono in istanti di tempo successivi i vari FBG,
20 con caratteristiche spettrali statiche sostanzialmente identiche fra loro, e posizionati lungo la sonda 26 in posizioni considerate critiche nelle quali si vogliano effettuare misure dinamiche. Le variazioni spettrali dei singoli FBG, indotte da fenomeni dinamici locali presenti
25 lungo il corpo 100, e dovute per esempio a sollecitazioni dinamiche lungo un binario o a vibrazioni lungo un ponte

o un viadotto, vengono tradotte in variazioni di intensità al ricevitore, rilevabili ad intervalli di tempo diversi e corrispondenti ai vari FBG in posizioni spaziali disgiunte lungo il corpo 100.

5 A questo punto, sempre con riferimento alla figura 1, è opportuno osservare che il blocco 38 comprende un circolatore ottico che consente agli impulsi P di essere accoppiati in fibra ottica 26, e alle componenti retro-riflesse dai vari FBG lungo la fibra 26 di essere
10 inviate allo stadio di rilevazione, blocco 17, che consente di rilevare la riflessione EM3', comprendente le intensità retro-riflesse dai vari FBG che, posizionati in porzioni spazialmente disgiunte lungo la fibra 26, arriveranno ad istanti diversi al ricevitore. La
15 riflessione EM3' può essere utilizzata anche per misura OTDR della retro-diffusione Rayleigh lungo la fibra 26. La traccia OTDR e le retro-riflessioni corrispondenti ai vari FBG vengono convertite in corrente mediante il fotodiodo 30 di tipo PIN e successivamente processate
20 elettricamente dall'adattatore elettrico 32, comprendente amplificatori elettronici a trans-impedenza ed amplificatori di tensione a più stadi.

L'adattatore elettrico 17 non è previsto nella seconda preferita forma di attuazione dell'apparato di misura di
25 figura 1. In tale seconda forma, illustrata in figura 2, la misura distribuita di temperatura sulla sonda 25

prevede l'utilizzo della retro-diffusione di Rayleigh per distinguere le variazioni di temperatura dalle variazioni di perdita lungo la stessa sonda 25. A tale fine non è prevista l'acquisizione della componente retro-diffusa Stokes, la componente retro-diffusa EM3' costituisce l'ingresso all'adattatore elettrico 19 e il filtro ottico 37 non seleziona in ricezione entrambe le righe anti-Stokes e Stokes, come quello presente nell'apparato illustrato in figura 1, ma solamente la riga anti-Stokes.

10 Nella suddetta seconda preferita forma l'adattatore elettrico 19, basato su fotodiodo a valanga APD, sostituisce interamente l'adattatore 17 nella foto-rivelazione delle retro-riflessioni dei vari FBG e della componente Rayleigh provenienti dalla sonda in fibra

15 ottica 26. Una volta convertite in segnali elettrici, le tracce OTDR e le retro-riflessioni dei vari FBG possono essere acquisite dal sistema di acquisizione 26 controllato dall'elaboratore elettronico 50.

Si noti che il funzionamento di FBG come filtro lineare,

20 descritto schematicamente nella figura B, è basato sul fatto che variazioni spettrali della riflettività di ciascun FBG vengono tradotte direttamente in variazioni di intensità al ricevitore. E' quindi in linea di principio possibile misurare le variazioni spettrali di

25 ciascun FBG, e risalire quindi alle conseguenti variazioni dinamiche locali di strain e temperatura,

conoscendo le rispettive sensibilità dell'FBG che sono tipicamente di $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ e di $11 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.

Esistono tuttavia due problemi pratici da affrontare che risultano essere la dipendenza incrociata da temperature e strain e l'effetto di variazione di intensità spurie indotte lungo il cavo che potrebbero essere confuse per variazioni di temperature e/o strain.

Per quanto riguarda la dipendenza incrociata da temperature e strain, sono note varie tecniche in letteratura per risolvere il problema, fra cui l'utilizzo di due FBG posti spazialmente in prossimità del punto di interrogazione, uno solidale con la struttura, corpo 100, e quindi affetto sia da temperatura che strain, e l'altro solo in prossimità e quindi affetto solo da temperatura.

Opportune calibrazioni consentono di estrarre sia la temperatura che lo strain. La presente invenzione consente di utilizzare la misura locale di temperatura ricavata mediante la misura distribuita sulla sonda 25 per eliminare la dipendenza spettrale degli FBG disposti lungo la sonda 26 dalla temperatura, permettendo così l'utilizzo di un unico FBG per ogni misura puntuale di strain dinamico.

Per quanto riguarda variazioni di intensità spurie indotte lungo il cavo che potrebbero essere confuse per variazioni di temperature e/o strain è possibile seguire due approcci: il primo consiste nell'utilizzare la

traccia OTDR misurata dalla riflessione del cavo 26 come riferimento per eliminare l'effetto di tali perdite spurie; il secondo consiste nell'utilizzare localmente due FBG caratterizzati da pendenza opposta della loro
5 riflettività quasi-lineare ed interrogarli mediante sorgente a banda stretta. Una opportuna ricezione differenziale dei segnali retro-riflessi dai due FBG consente di distinguere perdite spurie, caratterizzate da attenuazione di entrambe le intensità retro-riflesse dai
10 due FBG, da effettive variazioni spettrali dei due FBG, caratterizzate da variazioni opposte delle intensità retro-riflesse dai due FBG a pendenza opposta (si veda la figura C).

L'elaboratore 50 è anche atto a processare i dati
15 acquisiti, ad ottenere quindi il profilo di temperatura distribuito lungo la fibra 25, utilizzando le formule matematiche descritte per esempio nel documento D, e ad ottenere le variazioni dinamiche della riflettività dei vari FBG, direttamente legate alle variazioni dinamiche
20 di temperature e strain locali, mediante tecniche di interrogazione nel dominio del tempo descritte per esempio nel documento E.

A questo punto, è opportuno ricordare che all'apparato di misura qui descritto ed illustrato possono essere
25 apportate modifiche e varianti senza per questo uscire dall'ambito protettivo della presente invenzione.

A questo punto, dopo aver illustrato una preferita forma di attuazioni e una variante dell'apparato 1 di misura, è opportuno ricordare che la presente invenzione è relativa anche a metodi di misura eseguibili mediante l'apparato 5 1 ed atti a misurare la distribuzione lineare di almeno una grandezza fisica, ad esempio la temperatura, lungo tutta l'estensione lineare della sonda, fibra ottica 25, e le variazioni dinamiche di almeno una grandezza fisica, ad esempio lo strain, in posizioni specifiche lungo la 10 sonda 26 dove sono stati inseriti FBG a contatto con il corpo 100.

In particolare tali metodi comprendono tecniche di misure basate su riflettometria nel dominio del tempo (OTDR) ed interrogazione di FBG a bassa riflettività mediante 15 multiplazione nel dominio del tempo (TDM).

Nei metodi di misura è prevista innanzi tutto la fase di generare una radiazione elettromagnetica di pompaggio ottico mediante la sorgente di impulsi 10 in figura 1 a frequenza di ripetizione costante. A questo punto, il 20 metodo di misura secondo la presente invenzione prevede una fase di trasmettere la sequenza di impulsi P associata alla radiazione EM1 sia lungo una sonda 25 che la sonda 26, entrambe di estensione L determinata, e la fase di ricevere, per ogni impulso P, le seconde 25 radiazioni elettromagnetiche EM2'' retro-diffuse anelasticamente per effetto Raman spontaneo, da almeno

una porzione della sonda 25 e la radiazione EM3' comprendente la retro-riflessione da parte di almeno un FBG posizionato a contatto del corpo 100 lungo la sonda 26 ed eventualmente la retro-diffusione Rayleigh da
5 parte della sonda 26.

A questo punto, il metodo di misura secondo la presente invenzione comprende almeno una fase di misurare la variazione nel tempo di componenti retro-diffuse per ricavare una misura statica di temperatura associata ad
10 ogni porzione della sonda 25 e una misura dinamica puntuale di parametri fisici associati al corpo 100 quali lo strain.

A questo punto si può precisare che la fase di convertire le componenti retro-diffuse anelasticamente per effetto
15 Raman ed elasticamente per effetto Rayleigh in segnali elettrici può essere ripetuta un numero k di volte, al termine del quale può essere effettuato un processo di media per ottenere un rapporto segnale su rumore significativamente più elevato.

20 Infine, il metodo di misura secondo la presente invenzione comprende la fase di calcolare la distribuzione lineare della temperatura associata alla sonda 25, e quindi a delle rispettive porzioni contigue del corpo 100, applicando alle funzioni numeriche delle
25 formule empiriche note e per la conoscenza delle quali si rimanda al documento D. Il metodo di misura secondo la

presente invenzione comprende inoltre la fase di calcolare le variazioni temporali di grandezze fisiche quali lo strain in posizioni discrete del corpo 100 lungo la sonda 26, applicando alle funzioni numeriche delle formule empiriche note e per la conoscenza delle quali si rimanda al documento E.

Le caratteristiche del metodo di misura secondo la presente invenzione risultano chiare da quanto sopra descritto e non richiedono ulteriori chiarimenti; tuttavia può essere opportuno presentare alcuni ulteriori vantaggi derivanti dall'impiego simultaneo di una singola sorgente di impulsi per la simultanea misura distribuita di temperatura lungo strutture di elevate dimensioni, e il contemporaneo monitoraggio dinamico di sensori puntuali in fibra ottica quali FBG posizionati in punti critici della struttura medesima. Oltre a rendere applicabile commercialmente tali apparati ad un numero elevato di applicazioni in settori industriali strategici quali l'energia, l'ambiente, il monitoraggio strutturale, la sicurezza e la difesa, l'impiego di una singola sorgente fornisce un apparato optoelettronico altamente integrato in quanto la proposta tecnica TDM di interrogazione di FBG di tipo filtro lineare non richiede sostanzialmente componentistica ottica aggiuntiva se non un divisore di potenza ed un circolatore ottico. La tecnica proposta consente di eliminare efficacemente la

dipendenza spettrale incrociata degli FBG da strain e temperatura utilizzando la misura statica distribuita di temperatura ottenuta tramite scattering Raman lungo la sonda 25. In tal modo è possibile utilizzare efficacemente un singolo FBG in ogni punto di misura di strain dinamico. Inoltre la scelta preferita di operare a 1550 nm con sorgente impulsata accoppiata in fibra monomodale, particolarmente indicata all'interrogazione dinamica di FBG, può utilmente utilizzare componenti commerciali disponibili per comunicazioni ottiche consentendo di ridurre ulteriormente i costi dell'apparato e garantendo elevata affidabilità del sistema; infine, a causa della bassa attenuazione delle fibre ottiche in silica in terza finestra (intorno a 1550 nm) tale scelta consente di massimizzare le prestazioni di entrambe le misure, sia quella statica che dinamica, in termini di distanza di sensing, caratteristica non ottenibile qualora si seguissero le scelte tipiche dei sistemi commerciali di misura distribuiti di temperatura basati su effetto Raman, tipicamente operanti in bande spettrali differenti ed utilizzando diodi laser ad elevate area di emissione a 980 nm e a 1064 nm.

RIVENDICAZIONI

1. Apparato (1) di misura per monitorare almeno una caratteristica fisica statica determinata di un corpo (100) ed almeno una caratteristica fisica dinamica determinata del medesimo corpo (100); il detto apparato (1) comprendendo dei mezzi di emissione (10) atti a generare una radiazione elettromagnetica impulsata (EM1) comprendente impulsi elettromagnetici periodici presentanti una frequenza F determinata, una potenza di picco (P), una durata (D) e un periodo (T) tali da consentire l'impiego efficace di un'unica sorgente laser caratterizzata da bassa potenza media degli impulsi ed elevata potenza di picco (P) degli impulsi e condivisa per la misura simultanea delle due suddette caratteristiche fisiche; dei mezzi di trasmissione ottica di detti impulsi (P) elettromagnetici comprendenti almeno due guide d'onda (25) e (26) presentanti estensione (L) lineare determinata, accoppiabile, in uso, con il detto corpo (100) ed atte, in uso, a trasmettere almeno un impulso elettromagnetico lungo tutta la rispettiva detta estensione (L) lineare determinata; dei mezzi di rivelazione atti, in uso, a campionare la variazione di almeno una prima componente ($EM2''$) di una frazione della prima radiazione (EM1) elettromagnetica impulsata accoppiata alla sonda (25); ogni detta prima componente ($EM2''$) essendo generata dalla retro-diffusione per

effetto Raman spontaneo dei rispettivi impulsi da parte di almeno una porzione di detta guida ottica (25); dei mezzi di rivelazione atti, in uso, a campionare la variazione dinamica di almeno una prima retro-riflessione

5 EM3' di una frazione della prima radiazione elettromagnetica impulsata (EM1) accoppiata alla sonda (26); ogni detta radiazione elettromagnetica (EM3') essendo generata almeno dalla retro-riflessione da parte di almeno un sensore concentrato di tipo FBG posizionato

10 lungo la guida ottica (26) in contatto con una porzione specifica del corpo (100); caratterizzato dal fatto che i detti mezzi di emissione di impulsi (10) consentono l'impiego efficace di sorgenti laser impulsive caratterizzate da bassa potenza media ed elevata potenza

15 di picco (P) degli impulsi, per la simultanea interrogazione dinamica di sensori puntuali in fibra ottica detti reticoli di Bragg, FBG, mediante tecnica a multiplazione nel dominio del tempo e contemporanea misura distribuita di temperatura mediante misura OTDR di

20 scattering Raman spontaneo;

2. Apparato secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto di consentire l'utilizzo della misura locale di temperatura ricavata mediante la misura distribuita statica sulla sonda 25 per correggere la dipendenza

25 spettrale degli FBG disposti lungo la sonda 26 dalla temperatura, permettendo così l'utilizzo di un unico FBG

per ogni misura puntuale di strain dinamico.

3. Apparato secondo la rivendicazione 2, caratterizzato dal fatto che il detto mezzo di emissione (10) comprende un generatore di impulsi elettrici (16) atto, in uso, a
5 controllare la durata (D), la frequenza di ripetizione e la potenza di picco (P) della sequenza di impulsi periodica.

4. Apparato secondo una delle qualsiasi rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che la detta prima
10 sorgente elettromagnetica (15) può essere utilizzata per la simultanea interrogazione dinamica di sensori puntuali in fibra ottica detti reticoli di Bragg (FBG) mediante tecnica a moltiplicazione nel dominio del tempo e contemporanea misura distribuita di temperatura mediante
15 misura OTDR di scattering Raman spontaneo.

5. Apparato secondo le rivendicazioni 2, 3 e 4, caratterizzato dal fatto che la detta prima sorgente elettromagnetica (15) è un laser atto ad emettere radiazione infrarossa impulsata, e che tale laser possa
20 essere un laser impulsato in fibra ottica drogata con terre rare o un laser Q-switched, ad elevata potenza di picco e bassa potenza media, accoppiabile sia a fibre ottiche di tipo monomodale che di tipo multimodale.

6. Apparato secondo una delle qualsiasi rivendicazioni
25 precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere almeno un dispositivo per rilevazione diretta (18 o 19)

optoelettronico atto, in uso, a monitorare la variazione nel tempo della potenza ottica associata a ogni detta prima componente EM2'' determinata dalla retro-diffusione Raman lungo la guida d'onda (25).

5 7. Apparato secondo una delle qualsiasi rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di comprendere almeno un dispositivo optoelettronico per rilevazione diretta (17) atto, in uso, a monitorare la variazione nel tempo della potenza ottica associata a ogni detta prima
10 componente EM3' determinata dalla retro-riflessione da parte di almeno un sensore in fibra ottica puntuale di tipo Bragg posizionato lungo la guida d'onda (26) a contatto con il corpo (100).

8. Apparato secondo le rivendicazioni 6 caratterizzato
15 dal fatto che la variazione nel tempo della potenza ottica associata a ogni detta prima componente EM2'' determinata dalla retro-diffusione Raman è monitorata staticamente con tempi di misura dell'ordine dei secondi o decine di secondi.

20 9. Apparato secondo le rivendicazioni 7 caratterizzato dal fatto che la variazione nel tempo della potenza ottica associata a ogni detta prima componente EM3' determinata dalla retro-riflessione da parte di almeno un sensore in fibra ottica puntuale di tipo Bragg, è
25 monitorata dinamicamente con tempi di misura dell'ordine dei millisecondi o frazioni di millisecondi e quindi con

frequenze dell'ordine dei kHz.

10. Apparato secondo la rivendicazione 6 e 7, caratterizzato dal fatto che i detti dispositivi di rilevazione diretta comprendono un primo sensore
5 fotoelettrico (30, 20 o 21) atto, in uso, a convertire ogni radiazione elettromagnetica incidente in un segnale elettrico.

11. Apparato secondo la rivendicazione 6, 7 e 10 , caratterizzato dal fatto che il detto primo dispositivo
10 di rilevazione diretta, nella preferita forma illustrata in figura 1 ovvero nella preferita forma illustrata in figura 2, comprende a valle del primo sensore fotoelettrico (30, 20 o 21 in figura 1 ovvero 20 o 21 in figura 2) un dispositivo di condizionamento del segnale
15 costituito da un amplificatore a trans-impedenza e da una cascata di amplificatori di tensione a guadagno variabile (32, 22 o 23 in figura 1, ovvero 22 o 23 in figura 2).

12. Apparato secondo la rivendicazione 6, 7, 10 e 11,
20 caratterizzato dal fatto che l'utilizzo dei soli due adattatori elettrici 18 e 19 è sufficiente alla foto-rivelazione e condizionamento elettrico del segnale di retro-diffusione anti-Stokes proveniente dalla sonda in fibra ottica 25, del segnale di retro-diffusione
25 Rayleigh e di retro-riflessione dei vari FBG provenienti dalla sonda in fibra ottica 26. La suddetta

caratteristica permette l'implementazione della presente invenzione senza il costo aggiuntivo, rispetto agli apparati di misura di temperatura distribuita basati sull'effetto Raman, di un terzo adattatore elettrico.

5 13. Apparato secondo la rivendicazione 6, 10 e 11 , caratterizzato dal fatto che ogni seconda componente EM2'' generate dalla retro-diffusione anelastica dovuta ad effetto Raman spontaneo, da parte di almeno una porzione della guida d'onda (25), è convertita in
10 rispettivi segnali elettrici.

14. Apparato secondo la rivendicazione 7, 10 e 11, caratterizzato dal fatto che ogni seconda componente EM3' generata dalla retro-riflessione da parte di almeno un sensore in fibra ottica puntuale di tipo Bragg in
15 contatto lungo la guida d'onda (26) con una porzione corpo (100), è convertita in rispettivi segnali elettrici.

15. Apparato secondo le rivendicazioni 3, 4, 6, 7, 8 e 9 caratterizzato dal fatto di essere predisposto per essere
20 collegato ad un elaboratore (50) elettronico atto, in uso, a fungere da unità di controllo delle misure statica della retro-diffusione Raman lungo la fibra (25) e dinamica della retro-riflessione da parte di almeno un sensore in fibra ottica puntuale di tipo Bragg posto
25 lungo la fibra (26).

16. Apparato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni

precedenti, caratterizzato dal fatto di essere atto, in uso, a misurare con continuità spaziale la temperatura statica di una pluralità di porzioni contigue del detto corpo (100) lungo la guida d'onda (25) per la sua intera
5 lunghezza.

17. Apparato secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto di essere atto, in uso, a misurare lo strain dinamico di una pluralità di porzioni del detto corpo (100) lungo la guida d'onda
10 (26).

18. Metodo di misura simultanea della distribuzione spaziale di almeno una prima grandezza fisica determinata lungo una prima guida d'onda (25) di estensione (L) lineare determinata e dei valori dinamici di almeno una
15 seconda grandezza fisica determinata in porzioni locali lungo una seconda guida d'onda (26) di estensione (L); il detto metodo comprendente almeno una fase di trasmettere una radiazione elettromagnetica a frequenza (F) attraverso dette guide d'onda (25) e (26); la fase di
20 ricevere almeno una seconda radiazione (EM2) elettromagnetica presentante almeno una prima componente (EM2'') generata da un processo di retro-diffusione spontanea secondo l'effetto Raman di almeno una frazione di ogni detta prima radiazione (EM1) elettromagnetica da
25 almeno una porzione della detta guida d'onda (25), e una fase di misurare la variazione nel tempo della potenza

ottica delle prime componenti ($EM2''$) di Raman; la fase di ricevere almeno una seconda radiazione ($EM3$) elettromagnetica presentante almeno una prima componente ($EM3'$) generata da un processo di retro-riflessione da
5 parte di almeno un sensore puntuale in fibra ottica di tipo Bragg posizionato lungo la guida d'onda (26), e una fase di misurare dinamicamente la variazione nel tempo della potenza ottica delle componenti ($EM3'$); caratterizzato dal fatto di utilizzare la medesima
10 sorgente di impulsi elettromagnetici periodici per interrogazione delle guide d'onda (25) e (26).

19. Metodo secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che ogni detta fase di generare impulsi ottici associati ad una prima radiazione a frequenza F ,
15 comprende la fase di definire la durata (D) di ogni detto impulso elettromagnetico, per variare selettivamente la risoluzione spaziale associata ad ogni misura della detta distribuzione spaziale di almeno una detta grandezza fisica statica lungo la guida d'onda (25), determinando
20 di conseguenza anche la distanza minima fra gli FBG lungo la guida d'onda (26).

20. Metodo secondo la rivendicazione 17, caratterizzato dal fatto che ogni detta fase di generare impulsi ottici associati ad una prima radiazione a frequenza F ,
25 comprende la fase di definire il periodo (T) di tali impulsi elettromagnetici, per adattarli alla estensione

(L) delle due guide d'onda (25) e (26) e determinando anche la massima frequenza di interrogazione degli FBG pari all'inverso del periodo T.

21. Apparato e metodo di misura così come descritto ed
5 illustrato con riferimento alle figure allegate.

p.i. FIBERSENS S.R.L. e Consorzio Nazionale
Interuniversitario per le Telecomunicazioni C.N.I.T.

CLAIMS

1. Measuring apparatus (1) for monitoring at least one given static physical characteristic of a body (100) and
5 at least one dynamic physical characteristic of the same body (100); said apparatus (1) comprising emitting means (10) suitable, in use, to generate a pulsed electromagnetic wave (EM1); including periodic electromagnetic pulses characterized by a given first
10 frequency (F), a given peak power (P), time duration (D) and period (T) such that to allow the effective use of a single laser source characterized by low average power and high peak power of the pulses; optical transmission means for transmitting such first electromagnetic pulses
15 comprising at least two optical waveguides (25) and (26), which present a first linear extension (L), and can be coupled, in use, to said body (100), and are suitable, in use, to transmit at least one said electromagnetic pulse along all the respective said given linear
20 extension (L); detecting means suitable, in use, to sample the time variation of at least a first component (EM2'') of a first fraction of the electromagnetic radiation (EM1); each said first component (EM2'') being generated by the spontaneous Raman backscattering of a
25 respective said periodic electromagnetic pulses by at

CLAIMS

least one portion of said waveguide (25); detecting means
suitable, in use, to sample the dynamic time variation of
at least a first component (EM3') of a second fraction of
the electromagnetic radiation (EM1) coupled to the
5 waveguide (26); each said first component (EM3') being
generated by the back-reflection from at least one fiber
Bragg grating sensor (FBG) placed along the waveguide
(26) in contact with one specific portion of the body
(100); characterized by the fact that such emitting means
10 (10) allow the effective use of pulsed laser sources
characterized by low average power and high peak power,
for the simultaneous dynamic interrogation of point FBG
sensors through a time division multiplexing technique,
and the simultaneous distributed temperature measurement
15 based on spontaneous Raman scattering using Optical Time
Domain Reflectometry (OTDR) technique.

2. An apparatus according to claim 1, characterized in
that it allows for the correction of the temperature and
strain FBG cross sensitivity by using the distributed
20 static temperature measurements along fiber 25, allowing
for the use of a single FBG for each local dynamic strain
measurement.

3. An apparatus according to claim 2, characterized in
that said emitting mean (10) includes an electrical
25 waveform generator suitable, in use, to control the time

CLAIMS

duration (D), the repetition rate and the peak power (P) of the periodic sequence of electromagnetic pulses.

4. An apparatus according to any of the previous claims, characterized in that the said first electromagnetic source (15) can be used for the simultaneous dynamic interrogation of point FBG sensors using a time domain multiplexing technique and distributed temperature measurement using spontaneous Raman scattering based on OTDR.

10 5. An apparatus according to claims 2 or 3 or 4, characterized in that said first electromagnetic source (15) is a laser suitable, in use, to emit pulsed infrared radiation, and in that said laser can be a pulsed rare earth doped fiber laser or a Q-switched laser,
15 characterized by high peak power and low average power, and that said lasers can be coupled to both single mode and multimode optical fibers.

6. An apparatus according to any of the previous claims, characterized in that it includes at least one
20 optoelectronic direct detection receiver (18 or 19) suitable, in use, to monitor the time variation of the optical power associated to said first optical components EM2'' generated by the spontaneous Raman scattering along the fiber (25).

25 7. An apparatus according to any of the previous claims,

CLAIMS

characterized in that it includes at least one optoelectronic direct detection receiver (17) suitable, in use, to monitor the time variation of the optical power associated to said first components EM3' generated
5 by the back reflection of at least one fiber Bragg grating placed along the fiber (26) and in contact with the body (100).

8. An apparatus according to claim 6 characterized in that the time variation of the optical power associated
10 with said first optical components EM2'' generated by the spontaneous Raman scattering along the fiber (25), is statically monitored with measurement times of the order of seconds or tens of seconds.

9. An apparatus according to claim 7 characterized in
15 that the time variation of the optical power associated to said first components EM3' generated by the back reflection of at least one fiber Bragg grating is dynamically monitored with measurement times of the order of milliseconds or fraction of milliseconds.

20 10. An apparatus according to claims 6 and 7 characterized in that said direct detection receivers include a first photodiode (30, 20 and 21) suitable, in use, to convert input electromagnetic field into electrical signals.

25 11. An apparatus according to claims 6, 7 and 10,

CLAIMS

characterized in that said direct detection receivers include, as in first preferred embodiment of fig. 1 or in second preferred embodiment of fig. 2, after the first photodiode (30, 20 or 21 in first embodiment of fig. 1,
5 or 20 and 21 in second preferred embodiment of fig. 2), an electrical device including a transimpedance amplifier and a cascade of variable gain voltage amplifiers (32, 22 or 23 in first embodiment of fig. 1, or 22 or 23 in second preferred embodiment of fig. 2).

10 12. An apparatus according to claims 6, 7, 10 and 11, characterized in that the photo-detection and the signal conditioning of the anti-Stokes back-scattered light from fiber optic 25, of the Rayleigh and the FBG back-scattered lights from the fiber optic 26, need only two
15 electrical devices 18 and 19. This characteristics allows for the implementation of the present invention without the additional cost, with respect to traditional Raman distributed apparatus, of a third electrical device.

13. An apparatus according to claims 6, 10 and 11,
20 characterized in that the second component $EM2''$ generated by the spontaneous Raman scattering from at least one portion of the waveguide (25), is converted into electrical signals.

14. An apparatus according to claims 7, 10 and 11,
25 characterized in that the second component $EM3'$ generated

CLAIMS

by the back reflection from at least one FBG along the waveguide (26) and in contact with one portion of the body (100), is converted into electrical signals.

15. An apparatus according to claims 3, 4, 6, 7, 8 and 9,
5 characterized by being designed so as to be connected to a computer (50) suitable, in use, to act as said control unit to control the static measurement of the spontaneous Raman backscattering from the waveguide (25) and the dynamic measurement of the back reflection from at least
10 one FBG along the waveguide (26).

16. An apparatus according to any of the previous claims, characterized by being suitable, in use, to measure the temperature associated with a plurality of portions of said body (100) along the waveguide (25).

15 17. An apparatus according to any of the previous claims, characterized by being suitable, in use, to measure the dynamic strain associated to a plurality of portions of said body (100) along the waveguide (26).

18. A measuring method for simultaneously measuring the
20 spatial distribution of at least one given physical quantity along a waveguide (25) with given linear extension L , and the dynamic measurement of at least a second physical quantity in spatial positions along the waveguide (26) and in contact with the body (100); said
25 method comprising at least one step of transmitting a

CLAIMS

first electromagnetic radiation presenting a first frequency (F) through said waveguides (25) and (26); the step of receiving at least a second electromagnetic radiation (EM2) presenting at least a first component
5 (EM2'') generated by a process of spontaneous Raman backscattering of at least a fraction of each said first electromagnetic radiation (EM1) by at least one portion of said waveguide (25), and one step of measuring the time variation of the optical power of said first Raman
10 component (EM2''); the step of receiving at least a second electromagnetic radiation (EM3) presenting at least a first component (EM3') generated by the back reflection from at least one FBG located along the waveguide (26), and the step of dynamically measuring the
15 time variation of said optical power of the component (EM3'); characterized by the fact of using the same electromagnetic source of periodic pulses to interrogate both waveguides (25) and (26).

19. An apparatus according to claim 17 characterized in
20 that each said step of generating optical pulses associated to a first frequency F, includes the step of defining the pulse duration (D) of each electromagnetic pulse, in order to control the spatial resolution of the distributed measurement along the waveguide (25), fixing
25 then also the minimum spatial separation between two

CLAIMS

consecutive FBG along the waveguide (26).

20. An apparatus according to claim 17 characterized in that each said step of generating optical pulses associated to a first frequency F , includes the step of
5 defining the pulse period (T) of the pulse sequences, in order to adapt the pulse repetition rate to the length (L) of the waveguides (25) and (26), also fixing the maximum bandwidth of the FBG interrogation which is given by $1/T$.

10 21. Measuring apparatus and method as described and illustrated herein with reference to the accompanying figures.

p.i. FIBERSENS S.R.L. and Consorzio Nazionale
15 Interuniversitario per le Telecomunicazioni C.N.I.T.

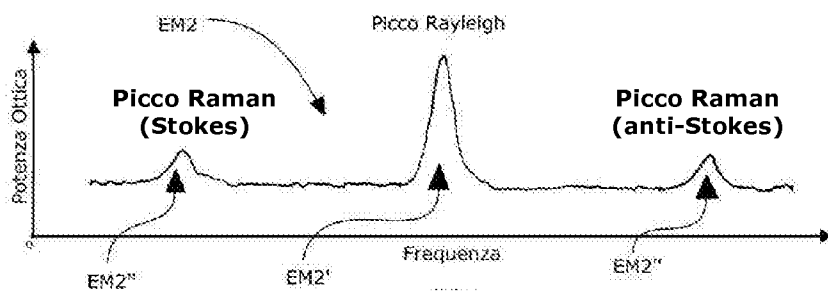


FIGURA A

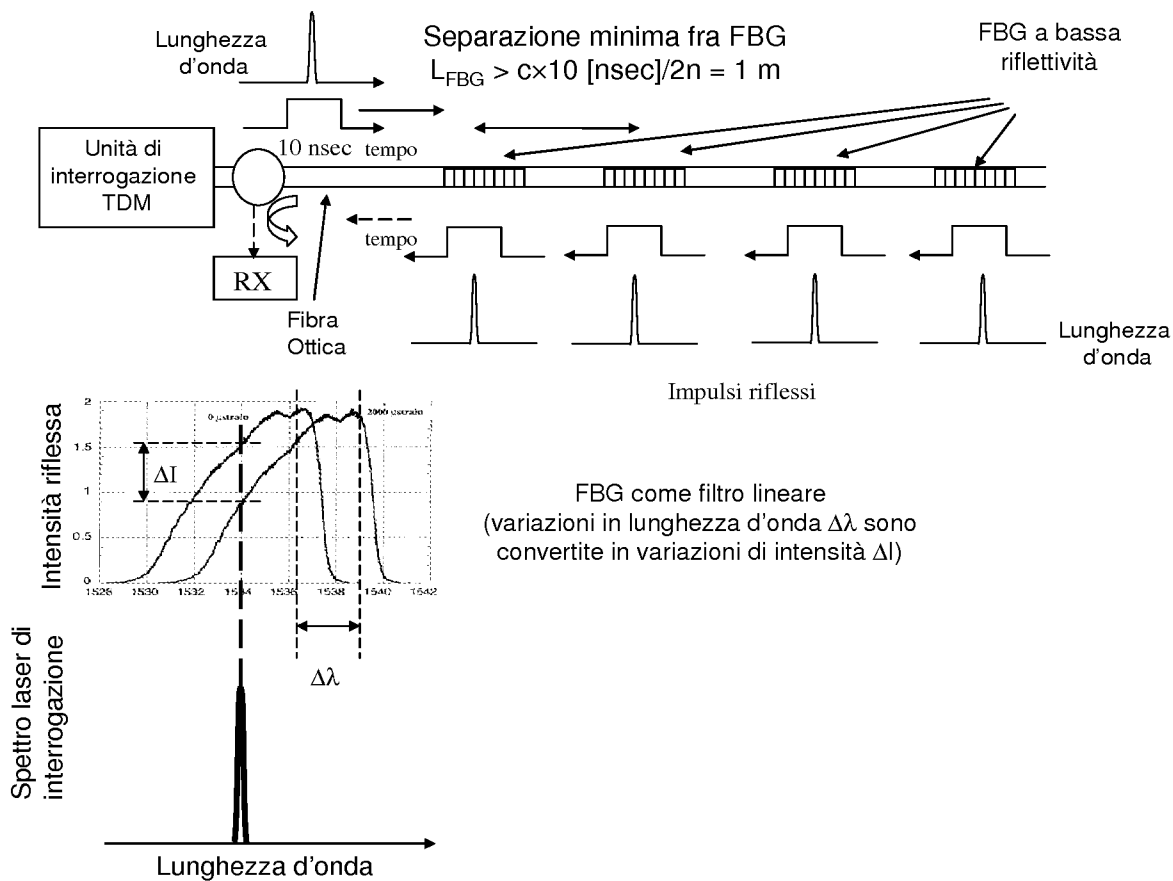


FIGURA B

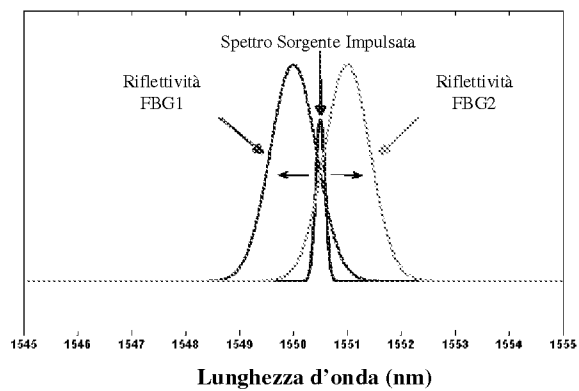


FIGURA C

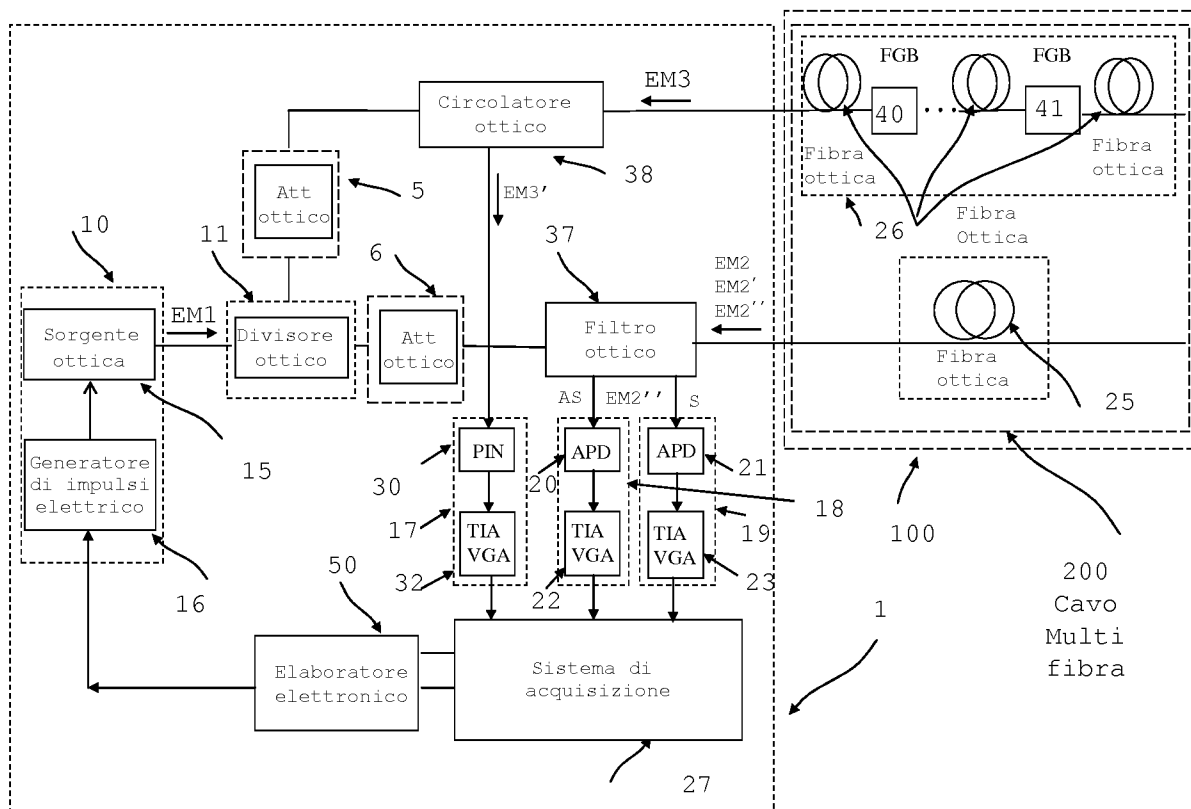


FIGURA 1

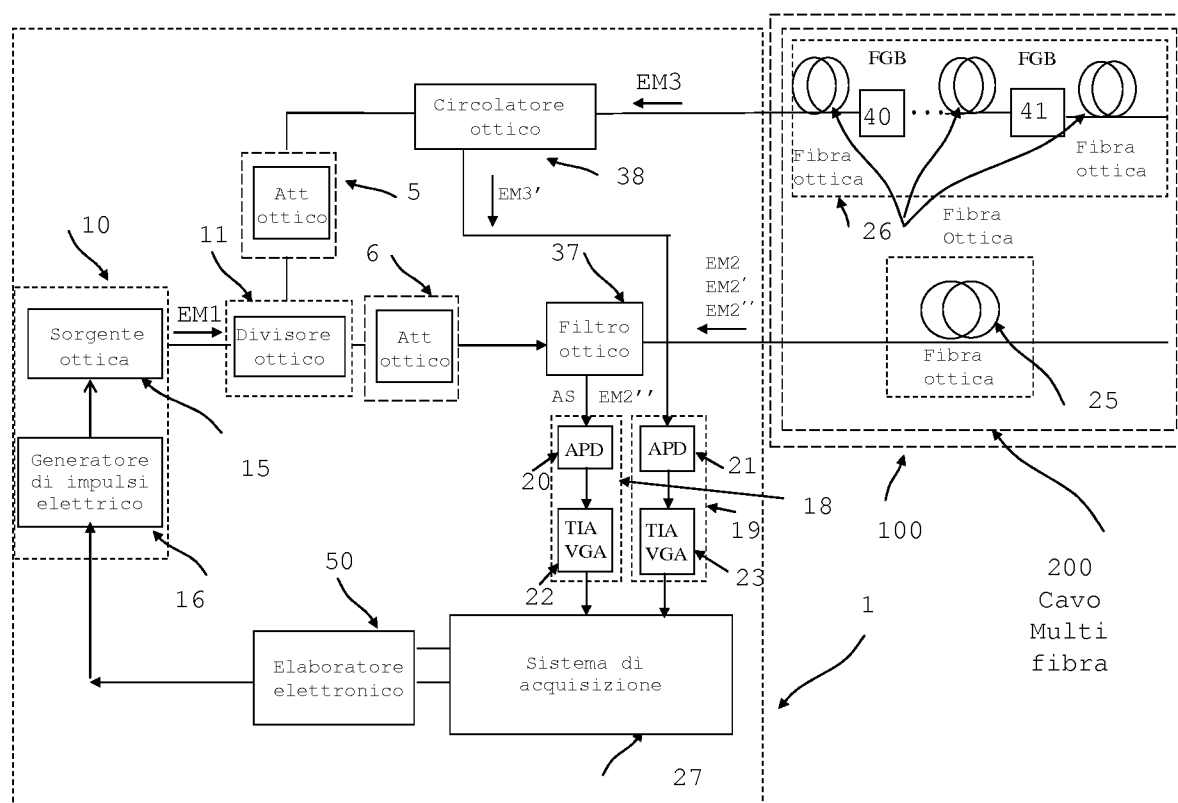


FIGURA 2