



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO  
DIREZIONE GENERALE PER LA TUTELA DELLA PROPRIETA' INDUSTRIALE  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

# UIBM

<b>DOMANDA NUMERO</b>	<b>101995900434848</b>
<b>Data Deposito</b>	<b>13/04/1995</b>
<b>Data Pubblicazione</b>	<b>13/10/1996</b>

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
G	01	N		

Titolo

PROCEDIMENTO E APPARECCHIATURA PER LA MISURA DEL COEFFICIENTE DI NON LINEARITA' KERR IN UNA FIBRA OTTICA MONOMODO.

Descrizione dell'invenzione avente per titolo:

**"Procedimento e apparecchiatura per la misura del coefficiente di non linearità Kerr in una fibra ottica monomodo"**

a nome CSELT - Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A., Via G. Reiss Romoli 274, 10148 Torino, nazionalità italiana.

Inventori: Massimo ARTIGLIA

Ernesto CIARAMELLA

Bruno SORDO

Domanda N. 0 95A000290

TU 95A000290

Depositata il 13 APR. 1993

CSELT  
Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A.

=====  
La presente invenzione concerne la caratterizzazione delle fibre ottiche e in particolare riguarda un procedimento e un'apparecchiatura per la misura del coefficiente di non linearità in una fibra ottica monomodo.

Nella maggior parte dei materiali di interesse per le comunicazioni ottiche uno dei principali fenomeni non lineari è l'effetto Kerr ottico, che agisce sull'indice di rifrazione rendendolo dipendente dall'intensità ottica  $I$  secondo la formula:

$$n(I) = n_0 + n_2 I \quad (1)$$

dove  $n(I)$  è l'indice di rifrazione in funzione dell'intensità  $I$  (e quindi della potenza) della radiazione inviata nella fibra,  $n_0$  è l'indice di rifrazione lineare (costante), mentre  $n_2$  è il cosiddetto coefficiente non lineare dell'indice di rifrazione (chiamato anche semplicemente indice di rifrazione non lineare).

Con l'introduzione degli amplificatori ottici nei sistemi di comunicazione ottica, le potenze trasmesse in una fibra rendono non più trascurabili gli effetti non lineari legati a  $n_2$ : dal momento che questi effetti possono significativamente degradare le prestazioni di

un sistema o per converso possono essere sfruttati per realizzare nuove soluzioni tecniche, è importante la loro accurata conoscenza. Nel caso delle fibre ottiche gli effetti non lineari sono in generale caratterizzati mediante il cosiddetto coefficiente di non linearità Kerr  $\gamma$ , che tiene conto anche del confinamento della luce nella fibra e quindi dà informazioni più utili, dal punto di vista operativo, di quelle fornite dal solo indice di rifrazione non lineare  $n_2$  che è un parametro del solo materiale. Il coefficiente  $\gamma$  è dato dalla relazione

$$\gamma = (2\pi/\lambda) \cdot (n_2/A_{\text{eff}}) \quad (2)$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda e  $A_{\text{eff}}$  è l'area efficace del nucleo della fibra, che è un parametro che dà una misura del confinamento ottico della luce all'interno della fibra. Dal valore di  $\gamma$  si può quindi risalire a quello di  $n_2$ , una volta noto  $A_{\text{eff}}$ . L'espressione matematica del parametro  $A_{\text{eff}}$  è ben nota al tecnico e quindi non è necessario riportarla qui.

Sono noti numerosi metodi per la determinazione di  $\gamma$  o di  $n_2$ . Quelli usati più comunemente prevedono l'invio nella fibra di impulsi ottici di potenza elevata e l'analisi dello spettro degli impulsi uscenti dalla fibra per misurare lo sfasamento non lineare  $\Phi_{\text{NL}}$  prodotto da ogni impulso su se stesso (modulazione di fase autoindotta). Questo sfasamento è dovuto al fatto che l'impulso cambia l'indice di rifrazione della fibra, come indicato dalla relazione (1), ed è legato al coefficiente  $\gamma$  dalla relazione  $\Phi_{\text{NL}} = \gamma P \cdot L$ , dove  $P$  è la potenza dell'impulso e  $L$  la lunghezza della fibra. Gli impulsi utilizzati sono in generale impulsi molto brevi, per ottenere le volute potenze di picco necessarie, e devono avere prodotto tra la larghezza dell'impulso  $\Delta\tau$  e la larghezza della riga spettrale  $\Delta\nu$  tale da rendere l'impulso limitato nella trasformata.

Esempi di tali metodi sono descritti negli articoli: "Measurement of nonlinear index of silica-core and dispersion-shifted fibers", di K.S. Kim e altri, Optics Letters, Vol. 19, n. 4,

15 Febbraio 1994, pagg. 257 e segg., "Nonlinear coefficient measurements for dispersion shifted fibres using self-phase modulation method at 1.55  $\mu\text{m}$ ", di Y. Namihiro e altri, Electronics Letters, Vol. 30, N. 14, 7 Luglio 1994, pagg. 1171-1172, e nella memoria "Nonlinear-index measurement by SPM at 1.55  $\mu\text{m}$ ", di R.H. Stolen e altri, presentata alla conferenza OFC'95, San Diego (USA), 26 Febbraio - 2 Marzo 1995, memoria FD1.

I metodi basati sulla modulazione di fase autoindotta presuppongono che il profilo temporale dell'impulso rimanga inalterato durante la propagazione. Tuttavia in generale non si può trascurare l'effetto della dispersione introdotta dalla fibra: in effetti, per ottenere sfasamenti facilmente rilevabili, date le limitate potenze delle sorgenti, occorre spesso impiegare tratte di fibra relativamente lunghe e/o impulsi molto stretti. I valori ottenuti con la misura devono quindi essere sottoposti a elaborazioni numeriche per tener conto di tale effetto e tali elaborazioni, oltre a rendere più complessa la determinazione di  $\gamma$ , sono a loro volta causa di errori, perché si basano su modelli semplificati del comportamento della fibra.

L'invenzione fornisce invece un procedimento e un'apparecchiatura che sfruttano proprio la dispersione introdotta dalla fibra per ottenere una misura precisa di  $\gamma$ .

Più precisamente l'invenzione si basa su un'altra tipica manifestazione dell'effetto Kerr ottico, la cosiddetta "instabilità di modulazione". Questo è un fenomeno che si verifica quando si invia un segnale ottico continuo di potenza elevata in una fibra in regime di dispersione anomala (cioè quando la lunghezza d'onda  $\lambda$  del segnale è superiore alla lunghezza d'onda  $\lambda_0$  di dispersione nulla della fibra). Per effetto di questo fenomeno l'onda continua diviene instabile (da cui il nome dell'effetto) e si generano, nello spettro ottico, due bande laterali di guadagno, simmetriche rispetto alla portante e i cui massimi sono separati dalla portante stessa di una frequenza  $\Omega_M$ . Se la potenza  $P$

del segnale può essere considerata costante (cioè se si può trascurare l'attenuazione introdotta nella fibra), il guadagno massimo  $G$  in tali bande è legato tramite  $\gamma$  alla sola potenza  $P$  ed è dato da

$$G = e^{2\gamma PL} \quad (3)$$

dove  $L$  è la lunghezza della fibra. Se invece l'attenuazione non è trascurabile, vale una relazione analoga alla (3) in cui la lunghezza effettiva  $L$  è sostituita da  $a \cdot L_{\text{eff}}$ , dove  $L_{\text{eff}}$  è la lunghezza efficace della fibra, data da  $L_{\text{eff}} = (1 - e^{-\alpha L}) / \alpha$  ( $\alpha =$  coefficiente di attenuazione lineare) e  $a$  è un coefficiente che vale circa 1 e che dipende debolmente da  $\alpha$  e  $L$  nelle condizioni standard di misura.

Secondo il procedimento, si invia in fibra un treno d'impulsi rettangolari, aventi lunghezza d'onda tale che la fibra operi in regime di dispersione anomala, potenza di picco tale da provocare nella fibra instabilità di modulazione e rapporto tra durata e periodo di ripetizione tale che la potenza media sia inferiore alla soglia per cui si verifica l'effetto Brillouin stimolato; si misura, nello spettro degli impulsi uscenti dalla fibra, il valore massimo del guadagno dell'instabilità di modulazione per una pluralità di valori della potenza di picco degli impulsi; e si ricava il coefficiente di non linearità  $\gamma$  dai valori massimi misurati del guadagno dell'instabilità di modulazione minimizzando l'errore, nell'intervallo di valori di potenza utilizzato per la misura, rispetto a una curva teorica che esprime tale guadagno massimo in funzione della potenza di picco.

Non sono stati finora proposti metodi di misura di  $\gamma$  basati sull'instabilità di modulazione. In effetti, è difficile usare per la misura un segnale continuo, in quanto alle potenze necessarie per dar luogo all'instabilità di modulazione si verificherebbe nella fibra il cosiddetto effetto Brillouin stimolato, che consentirebbe di accoppiare nella fibra solo la frazione di potenza corrispondente a una certa potenza di soglia, mentre la potenza restante verrebbe diffusa all'indietro. Usando sequenze di impulsi Gaussiani o

a secante iperbolica, come fatto finora per lo studio del fenomeno, da un lato è difficile valutare con precisione la potenza di picco dell'impulso e dall'altro non esiste più una relazione semplice tra  $G$ ,  $P$  e  $\gamma$  che consenta un'agevole determinazione di  $\gamma$ .

E' anche oggetto dell'invenzione l'apparecchiatura che realizza il procedimento.

A maggior chiarimento si fa riferimento al disegno allegato, in cui:

- la fig. 1 mostra in forma schematica l'apparecchiatura che realizza il procedimento;
- la fig. 2 rappresenta un tipico spettro del segnale uscente dalla fibra, e
- la fig. 3 è un grafico che mette a confronto i dati sperimentali e la curva teorica del guadagno dell'instabilità di modulazione.

Nel disegno le linee a tratto sottile indicano il percorso dei segnali ottici e quelle a tratto spesso connessioni elettriche. Una sorgente 1, p. es. un laser a retroazione distribuita, genera un segnale continuo che viene inviato a un modulatore di ampiezza 2, che trasforma il segnale continuo in un treno di impulsi rettangolari con durata  $t$  e periodo di ripetizione  $T$ . Il treno di impulsi rettangolari è amplificato in uno stadio di amplificazione ottica 3, tale da portare gli impulsi a una potenza tale da dar luogo a instabilità di modulazione nella fibra in esame 5. Il segnale amplificato viene inviato nella fibra 5 tramite un attenuatore variabile 4, che permette di selezionare valori diversi per la potenza media. All'uscita dalla fibra si ottiene un segnale con uno spettro ottico del tipo di quello rappresentato in fig. 2, che mostra due bande laterali simmetriche rispetto alla riga della portante dovute all'amplificazione non lineare del fondo di rumore prodotto dall'amplificatore ottico 3. Il segnale uscente dalla fibra 5 viene raccolto da un analizzatore di spettro ottico 6 o altro strumento in grado di determinare il guadagno massimo  $G$  in corrispondenza delle due bande laterali al variare della potenza di picco  $P$  (data dal prodotto della potenza media per l'inverso  $T/t$  del duty cycle). Un sistema elaborativo 7, che è associato all'analizzatore 6 e pilota il modulatore 2, ottiene il valore

di  $\gamma$  minimizzando, nell'intervallo di variazione di  $P$ , le differenze tra i valori sperimentali e la curva teorica

$$G(P) = 1 + \eta(e^{2\gamma a P L_{\text{eff}}} - 1) \quad (4)$$

dove  $\eta$  è un coefficiente di proporzionalità, che è legato al duty cycle degli impulsi e il cui valore tiene conto dello stato di polarizzazione dei segnali,  $a$  è il coefficiente definito in precedenza e  $L_{\text{eff}}$  è la lunghezza efficace della fibra 5, anch'essa definita in precedenza.

La relazione (4), valida nel caso di una sequenza di impulsi rettangolari, è ottenibile dalla (3), valida per un segnale continuo, con semplici considerazioni fisiche, tenendo conto che lo spettro della luce entrante nella fibra è costituito dal segnale monocromatico emesso dal laser 1 e amplificato dall'amplificatore 3 e dall'emissione spontanea amplificata dell'amplificatore stesso, e che il rumore dell'emissione spontanea amplificata è effettivamente amplificato per effetto dell'instabilità di modulazione solo quando è temporalmente sovrapposto a un impulso (cioè per il tempo  $t$  durante il periodo  $T$ ) e ha lo stesso stato di polarizzazione. Va anche precisato che  $G(P)$  è un valore medio del guadagno massimo dell'instabilità di modulazione, in quanto i radiometri presenti nell'analizzatore di spettro 6 misurano la potenza media.

Affinché si presenti il fenomeno dell'instabilità di modulazione, la fibra 5 deve operare in regime di dispersione anomala, cioè la radiazione inviata nella fibra stessa deve avere una lunghezza d'onda  $\lambda$  superiore alla lunghezza d'onda  $\lambda_0$  di dispersione nulla. Ciò è facilmente ottenibile con sorgenti che emettono radiazioni a lunghezza d'onda nella terza finestra (intorno a  $1,55 \mu\text{m}$ ), come richiesto dagli amplificatori a fibra drogata con erbio, che sono quelli più comunemente usati.

Un altro fattore importante per l'uso di impulsi rettangolari è il rapporto tra la durata  $t$  e il periodo  $T$  degli impulsi uscenti dal modulatore. In particolare, il periodo  $T$  deve essere molto inferiore al tempo di rilassamento degli amplificatori ottici 3, per evitare distorsioni

degli impulsi dovute alla dinamica del guadagno degli amplificatori stessi. Se questa condizione per  $T$  è rispettata, gli amplificatori reagiscono solo alla potenza media del segnale. Le elevate potenze di picco necessarie per poter osservare i fenomeni non lineari sono pertanto ottenute riducendo il rapporto  $t/T$ . Valori adatti sono di qualche centinaio di nanosecondi per  $T$  e di qualche decina di nanosecondi per  $t$ . Sono possibili ampie tolleranze per  $t$  e  $T$ .

In un esempio di realizzazione dell'invenzione, la fibra aveva una lunghezza di 10,1 km e una lunghezza d'onda di dispersione nulla  $\lambda_0 = 1539$  nm, la sorgente aveva una lunghezza d'onda  $\lambda = 1553$  nm e gli impulsi avevano durata  $t = 25$  ns e periodo  $T = 250$  ns; la potenza di picco era fatta variare tra 60 e 200 mW. Nella fig. 2, si è rappresentato lo spettro di un impulso all'uscita della fibra per una potenza di picco di 180 mW. La misura si riferisce alla sola polarizzazione parallela al segnale. Nella fig. 3 sono rappresentati un certo numero di valori misurati di  $G$  nelle condizioni dette sopra e la curva teorica. Si vede chiaramente la precisione di misura consentita dall'invenzione. Una fibra della lunghezza data sopra, unitamente alla modulazione della sorgente, permette di sopprimere l'effetto Brillouin stimolato.

E' evidente che quanto descritto è dato unicamente a titolo di esempio non limitativo e che varianti e modifiche sono possibili senza uscire dal campo di protezione dell'invenzione. Così per esempio, se si dispone all'uscita delle fibra 5 un campionatore 8 pilotato dal sistema elaborativo 7 in modo sincrono con il modulatore 2 e un dispositivo di controllo della polarizzazione unito a un polarizzatore (schematizzati nel loro insieme dal blocco 9) per selezionare solo la radiazione polarizzata come il segnale d'ingresso, è possibile utilizzare direttamente la (3) per ricavare  $\gamma$ . In alternativa, è anche possibile utilizzare solo il campionatore 8 o solo il dispositivo di controllo della polarizzazione e il polarizzatore: varierà solo la relazione teorica che lega  $G(P)$  a  $\gamma$ .



## Rivendicazioni

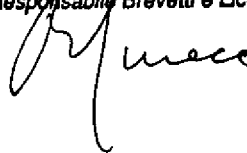
1. Procedimento per la misura del coefficiente di non linearità Kerr in una fibra ottica monomodo, in cui si invia nella fibra (5) un segnale costituito da un treno d'impulsi ottici a potenza elevata e si analizza lo spettro degli impulsi uscenti dalla fibra (5), caratterizzato dal fatto che detti impulsi sono impulsi rettangolari, aventi lunghezza d'onda tale che la fibra operi in regime di dispersione anomala e potenza di picco tale da provocare nella fibra instabilità di modulazione; si misura, nello spettro dei segnali uscenti dalla fibra (5), il valore massimo del guadagno dell'instabilità di modulazione per una pluralità di valori della potenza di picco degli impulsi; e si ricava il coefficiente di non linearità  $\gamma$  dai valori massimi misurati del guadagno dell'instabilità di modulazione minimizzando, nell'intervallo di valori di potenza utilizzati per la misura, l'errore rispetto a una curva teorica che esprime tale guadagno massimo in funzione della potenza di picco.
2. Procedimento secondo la riv. 1, caratterizzato dal fatto che si campiona il segnale di uscita dalla fibra (5) in sincronismo con la generazione degli impulsi rettangolari e/o si seleziona in tale segnale di uscita solo la polarizzazione uguale a quella del segnale inviato nella fibra (5).
3. Apparecchiatura per la misura del coefficiente di non linearità Kerr in una fibra ottica monomodo, comprendente:
  - mezzi (1, 2, 3) per generare e inviare nella fibra una sequenza d'impulsi ottici di potenza elevata, tale da indurre nella fibra effetti non lineari, e
  - mezzi (6) per analizzare lo spettro ottico degli impulsi uscenti dalla fibra;

caratterizzata dal fatto che:

  - i mezzi (1, 2, 3) per generare e inviare nella fibra (5) la sequenza d'impulsi sono atti a generare un treno d'impulsi rettangolari, con lunghezza d'onda tale che la

- fibra (5) operi in regime di dispersione anomala e potenza di picco tale da dare origine a instabilità di modulazione nella fibra (5), e sono associati a mezzi (4) per variare la potenza degli impulsi; e
- i mezzi (6) per analizzare lo spettro ottico degli impulsi uscenti dalla fibra sono atti a determinare il valore massimo del guadagno dell'instabilità di modulazione al variare della potenza degli impulsi e sono associati a un sistema elaborativo (7) per ricavare il coefficiente di non linearità Kerr  $\gamma$  dai valori massimi misurati di detto guadagno massimo minimizzando l'errore, nell'intervallo di valori di potenza utilizzato per la misura, rispetto a una curva teorica che esprime tale guadagno massimo in funzione della potenza di picco.
4. Apparecchiatura secondo la riv. 3, caratterizzata dal fatto di comprendere, tra la fibra (5) e i mezzi (6) per analizzare lo spettro ottico, un campionatore (7) azionato in modo sincrono con i mezzi (2) di generazione degli impulsi rettangolari e mezzi (9) per selezionare, nel segnale di uscita dalla fibra (5), solo luce con la stessa polarizzazione della sequenza di impulsi.

**CSELT**  
Centro Studi e Laboratori Telecomunicazioni S.p.A.  
Il Responsabile Brevetti e Licenze



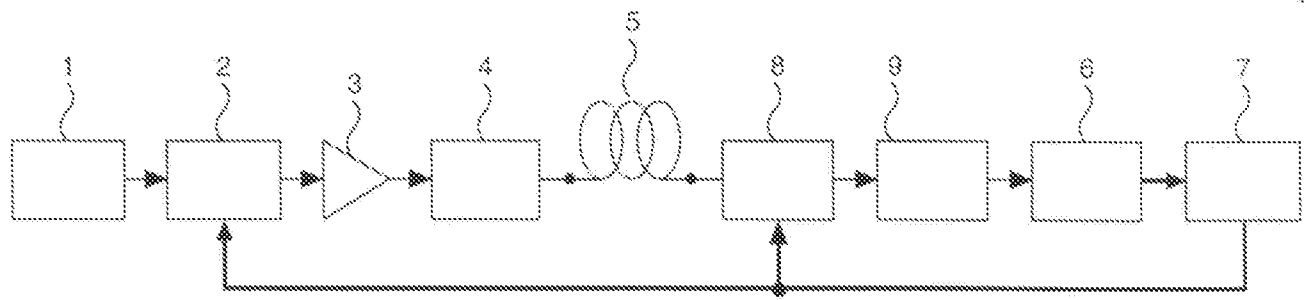


FIG. 1

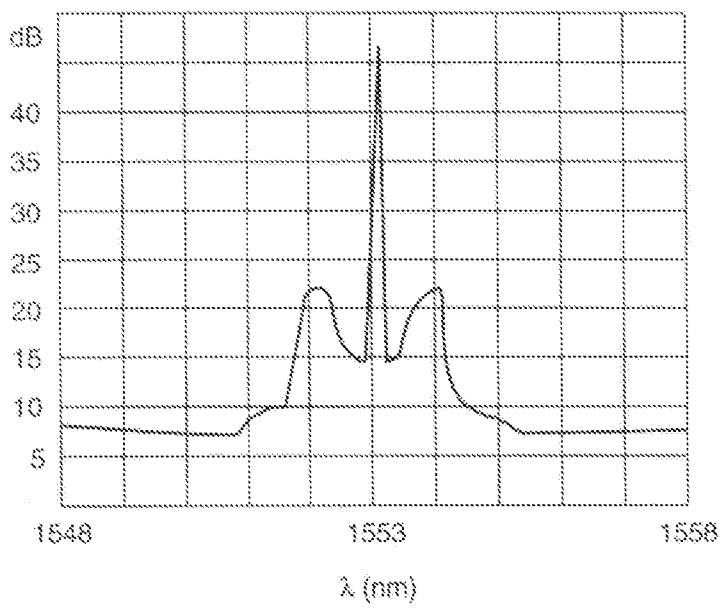


FIG. 2

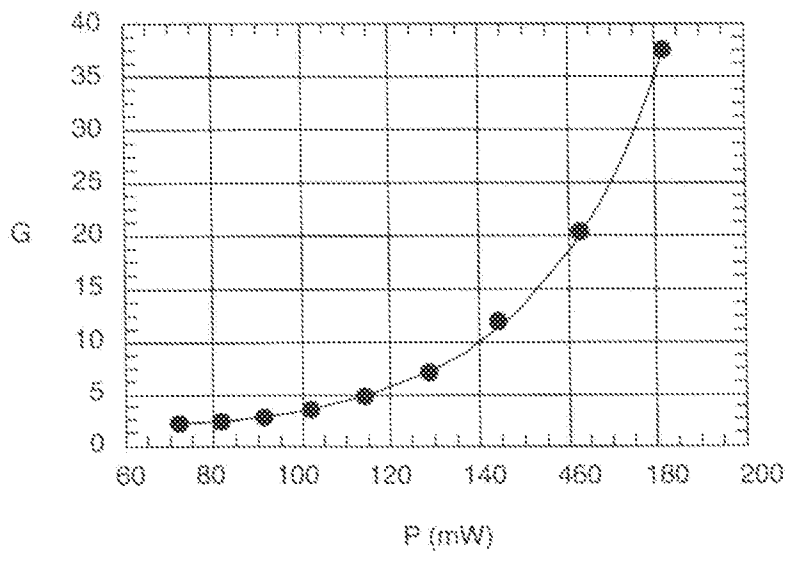
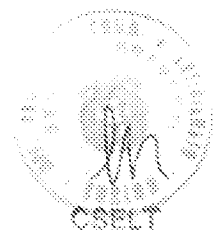


FIG. 3



*Reference*