

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 70 (1992)

Heft: 4

Artikel: Méthodes de mesures optiques par rétrodiffusion = Metodi di misura ottici a retrodiffusione

Autor: Novak, Rostislav P. / Beaud, Paul / Hodel, Walter

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-873981>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Méthodes de mesures optiques par rétrodiffusion

Metodi di misura ottici a retrodiffusione

Rostislav P. NOVAK, Paul BEAUD, Walter HODEL e Heinz GILGEN, Berne

1 Introduction

Les caractéristiques optiques de composants intégrés et de composants à fibres optiques peuvent être déterminées en fonction de l'affaiblissement de passage (transmission) ou d'après la structure de la lumière rétrodiffusée (réflexions). Etant donné que les mesures de réflexion renseignent sur la distribution locale de zones perturbées, elles sont beaucoup plus révélatrices que les mesures de transmission qui ne permettent qu'une évaluation intégrale. Dans le domaine de l'«*Optical Time Domain Reflectometry*» (OTDR), les impulsions lumineuses sont injectées dans l'objet à mesurer. L'intensité lumineuse rétrodiffusée par l'objet est détectée puis analysée et résolue en fonction du temps et de la distance. Cette méthode de mesure de rétrodiffusion optique, connue en 1979 déjà [1], s'est implantée dans la technique des fibres optiques et représente un procédé pratique qui a souvent fait ses preuves dans le terrain. La résolution locale des appareils pour fibres optiques est de l'ordre du mètre. De ce fait, il est impossible d'examiner des structures intégrées ou des structures à fibres optiques dont la longueur ne dépasse pas quelques centimètres. Dans un futur système de transmission, il faut s'attendre à l'emploi de composants optiques intégrés tels que des réseaux de distribution, des coupleurs ou des modulateurs. On s'est de ce fait demandé si et à quelles conditions la méthode de mesure par rétrodiffusion pouvait aussi être utilisée pour examiner de tels éléments opérant dans le domaine du centimètre.

De toute évidence, il semblait nécessaire de raccourcir autant que possible les impulsions lumineuses du réflectomètre. La durée d'impulsion d'un réflectomètre OTDR pour la technique des fibres optiques se situe dans la gamme des nanosecondes. Etant donné que l'*Institut de physique appliquée de l'Université de Berne* possédait déjà de l'expérience dans la production d'impulsions lumineuses ultracourtes, on y a construit, dans le cadre d'un projet de recherche et de développement, une source laser et un système de détection répondant à ces exigences. Le système produit et traite des impulsions

1 Introduzione

Le caratteristiche di componenti del campo dell'ottica integrata e delle fibre ottiche possono essere determinate in base all'attenuazione o ai segnali luminosi retrodiffusi dalla struttura (riflessioni). Le misure di riflessione forniscono informazioni sulla distribuzione locale di centri di guasto; le misure di trasmissione consentono solo un giudizio integrale. Se si adotta il metodo «*Optical Time Domain Reflectometry*» (OTDR), gli impulsi ottici vengono accoppiati nell'oggetto da misurare. L'intensità luminosa retrodiffusa dall'oggetto viene rivelata ed esaminata con risoluzione temporale risp. spaziale. Questo metodo di misura della retrodiffusione ottica [1], che viene impiegato nella tecnica delle fibre ottiche già dal 1978, è molto pratico ed è stato più volte sperimentato in campo. La risoluzione spaziale degli apparecchi impiegati nella tecnica delle fibre si situa nell'ambito dei metri. Di conseguenza non è possibile esaminare strutture del campo dell'ottica integrata con una lunghezza massima di alcuni centimetri. Si prevede che in un futuro sistema di trasmissione verranno impiegati componenti di ottica integrata quali reti di distribuzione, accoppiatori o modulatori. Si tratta di vedere se e a quali condizioni il sistema di misura a retrodiffusione può essere utilizzato anche per esaminare simili strutture nell'ambito dei centimetri.

Naturalmente si è dovuto ridurre il più possibile la durata degli impulsi ottici del riflettometro. Gli impulsi di un riflettometro OTDR per la tecnica delle fibre ottiche sono misurabili in nanosecondi. Nell'ambito di un progetto di ricerca e di sviluppo è stato costruito un sistema laser e di rivelazione sulla base delle esperienze fatte dall'*Istituto di fisica applicata dell'Università di Berna* nella generazione di impulsi ottici ultracorti. Il sistema genera e tratta impulsi di 300 fs ($f = \text{femto} = 10^{-15}$) e ottiene quindi una risoluzione di 60 μm . La sensibilità del sistema riferita al segnale in entrata raggiunge -110 dB ed è limitata a causa delle instabilità della sorgente laser di elevata potenza. Siccome l'apparecchiatura è molto complessa e costosa, le PTT hanno preso in esame un secondo metodo denominato «*Optical Low Coherence*

d'une durée de 300 fs ($f = \text{femto} = 10^{-15}$) et atteint de ce fait une résolution de 60 μm . La sensibilité du système, rapportée au signal d'entrée, atteint -110 dB et sa seule limite est l'instabilité de la source laser à haute performance. Vu que l'appareil est très complexe et difficile à utiliser, une deuxième méthode a été examinée par les PTT, à savoir l'«Optical Low Coherence Reflectometry» (OLCR), qui, comme on s'en est aperçu, est beaucoup plus simple et tout aussi sensible.

2 Réflectométrie optique

21 Principe

La *figure 1* montre le principe d'un réflectomètre de type courant. La lumière issue de la source est dirigée par une lame semi-réfléchissante 50 %:50 % (appelée aussi coupleur), puis injectée dans l'objet à mesurer. La lumière qui y est rétrodiffusée et réfléchi, à savoir le signal de mesure MS, retourne vers la lame semi-réfléchissante et parvient ensuite au détecteur. Le temps de propagation de ces impulsions, de la source vers un endroit perturbé de l'objet et de là vers le détecteur est une fonction de l'emplacement de l'endroit perturbé. En mesurant à la fois l'intensité et le temps de propagation des impulsions, on peut tirer des déductions sur le coefficient de rétrodiffusion ou de réflexion et sur l'éloignement de l'endroit perturbé. La photodétection et le traitement du signal sont influencés par le signal de référence RS.

Le signal de référence peut être une fenêtre de détection décalable dans le temps par voie électronique, qui est synchronisée avec la modulation de la source lumineuse. Ce procédé est appelé *détection directe*; il est utilisé pour les mesures de fibres optiques dans un OTDR à impulsions classique. Chaque impulsion est détectée séparément, étant entendu que le décalage temporel de la fenêtre permet de mesurer le signal réfléchi avec une résolution en fonction du temps. La procédure décrite permet d'examiner l'atténuation de trajets de transmission en fonction de la distance, de déterminer l'affaiblissement de connecteurs et d'épissures, de localiser et d'analyser les endroits perturbés ainsi que de déterminer l'affaiblissement global [2].

Fig. 1 Réflectomètre optique, schéma de principe – Riflettometro ottico, schema di base

MS Messstrahl – Rayon à mesurer – Fascio di misura
 RS Referenzstrahl – Rayon de référence – Fascio di riferimento
 Lichtquelle, Modulation – Source lumineuse, modulation – Sorgente luminosa, modulazione
 Strahlteiler – Lame semi-réfléchissante – Separatore di fascio
 Testobjekt – Objet à tester – Oggetto di misura
 (Reflexionen, Rückstreuung) – (Réflexions, rétrodiffusion) – (Riflessioni, retrodiffusione)
 Referenz – Référence – Riferimento
 Photodetektion, Signal-Verarbeitung – Photodétection, traitement du signal – Fotorivelazione, trattamento del segnale

Reflectometry» (OLCR) che si è rivelato molto più semplice e altrettanto sensibile.

2 Riflettometria ottica

21 Principio

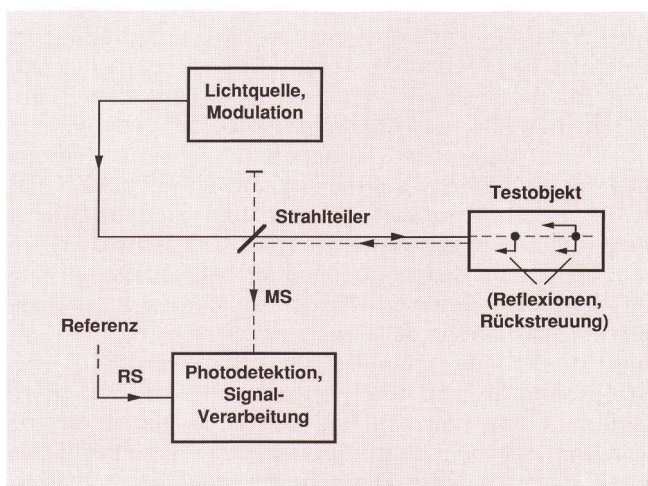
La *figura 1* illustra il principio di ogni riflettometro ottico. La luce che esce dalla sorgente luminosa viene condotta a una separatore di fascio 50 %:50 % (chiamato anche accoppiatore) e in seguito iniettata nell'oggetto di misura. La luce retrodiffusa, ossia il segnale di misura MS, ritorna al separatore di fascio e in seguito giunge al rivelatore. Il tempo di propagazione di questi impulsi dalla sorgente al guasto nell'oggetto e dal guasto al rivelatore è una funzione del posto in cui si trova il guasto. Misurando l'intensità e il tempo di propagazione degli impulsi si ottengono informazioni in merito al coefficiente di diffusione o di riflessione e al guasto. La fotorivelazione e il trattamento dei segnali sono influenzati dal segnale di riferimento RS.

Il segnale di riferimento può essere una finestra di rivelazione spostabile temporalmente in modo elettronico che viene sincronizzata con la modulazione della sorgente luminosa. Questo procedimento è chiamato «*rivelazione diretta*» e viene utilizzato nel classico metodo OTDR per la misura di fibre ottiche. Ogni singolo impulso viene rivelato separatamente e lo spostamento temporale summenzionato della finestra consente di misurare il segnale riflesso con risoluzione temporale. Il procedimento descritto permette quindi di rilevare la caratteristica locale di attenuazione di tratte di trasmissione, di determinare attenuazioni di connettori e di giunti, di localizzare e analizzare guasti e di rilevare l'attenuazione globale [2].

22 Metodi di riflettometria

221 Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

Se non è possibile rivelare direttamente singoli impulsi, p.es. perché la loro durata è inferiore a 100 ps, occorre trovare un'altra soluzione. A questo scopo, si prende



22 Méthodes de réflectométrie

221 Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

Lorsque la détection directe décrite d'impulsions discrètes est impossible pour des raisons physiques, par exemple lors de durées d'impulsions inférieures à 100 ps, il y a lieu de chercher une autre solution. A cet effet, on utilise comme référence le rayon réfléchi par la lame semi-réfléchissante de la figure 1. Ce rayon est superposé à un trajet de temporisation modifiable par miroir décalable à la lumière réfléchie par la structure puis capté par le détecteur. Vu que les phénomènes de superposition entre les deux rayons ne se produisent que durant une impulsion lumineuse du rayon de référence, l'impulsion de référence influe sur le signal superposé d'une manière analogue à la fenêtre dans la détection directe. De ce fait, le signal généré par la superposition doit être séparé au niveau du détecteur du reste de lumière incidente. Dans la méthode par interférence, le rayon de référence est décalé dans sa fréquence optique d'une excursion en fréquence Δf . Le signal superposé est ainsi modulé par une fréquence Δf . Cette composante en fréquence peut être extraite par filtrage du signal détecté. Son intensité est proportionnelle au produit des champs des deux rayons lumineux. Vu que la durée de l'impulsion est très courte et que Δf devrait se situer de préférence dans la gamme du kilohertz, le signal superposé est généré à partir d'un grand nombre de superpositions d'impulsions. Dans cette *détection indirecte*, on ne détermine donc pas la valeur de crête du signal de réflexion d'une impulsion discrète, mais la valeur moyenne de plusieurs réponses impulsives. Par modification du trajet de temporisation du rayon de référence, le signal mesuré peut être exploré avec une résolution dans le temps proportionnelle à la largeur de l'impulsion lumineuse.

222 Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)

Une impulsion optique peut être décomposée comme une impulsion électrique en une multiplicité d'oscillations sinusoïdales (série de Fourier). Il importe alors peu que les composantes en fréquences soient analysées ensemble sous forme d'impulsions ou successivement en tant que «peigne» ou d'excursion en fréquence. On utilise ce phénomène dans l'«Optical Frequency Domain Reflectometry». Dans ce cas, comme dans la détection indirecte, le rayon de référence optiquement non modulé est superposé à la lumière réfléchie par l'objet à mesurer. En tant que source lumineuse, on utilise un laser réglable opérant en régime continu qui peut être réglé par incréments de Δf entre f_0 à f_{\max} . L'allure de ce signal dépendant de la fréquence est transposée par calcul au moyen d'une transformée de Fourier en une valeur qui est fonction de la distance. Dans ce cas, la résolution du procédé est limitée par la grandeur $1/(f_{\max} - f_0)$. En décalant la lame semi-réfléchissante de $1/\Delta f$ et en accordant une nouvelle fois la source lumineuse, on peut analyser avec cette méthode les signaux réfléchis d'une structure. Pour atteindre la résolution souhaitée,

comme référence il faut le faisceau réfléchi par le séparateur (figure 1). Ad esso viene sovrapposta la luce riflessa dalla struttura lungo una tratta di ritardo che può essere modificata con uno specchio mobile. L'impulso viene in seguito raccolto dal rivelatore. Siccome i fenomeni della sovrapposizione fra i due fasci si manifestano unicamente per la durata di un impulso ottico del fascio di riferimento, l'effetto che l'impulso di riferimento ha sul segnale di sovrapposizione è analogo a quello della finestra nella rivelazione diretta. Quando giunge al rivelatore, il segnale che deriva dalla sovrapposizione deve essere separato dall'altra luce incidente. Col metodo d'interferenza, il fascio di riferimento viene spostato di una deviazione di frequenza Δf nella sua frequenza ottica. Il segnale di sovrapposizione viene quindi modulato con la frequenza Δf . Questa componente della frequenza può essere filtrata dal segnale del rivelatore. La sua intensità di segnale è proporzionale al prodotto delle intensità di campo di entrambi i fasci luminosi. Dato che la durata degli impulsi è molto breve e che Δf dovrebbe trovarsi preferibilmente nell'ambito dei kilohertz, il segnale di sovrapposizione viene generato da una moltitudine di sovrapposizioni di impulsi. Con questo metodo di *rivelazione indiretta* viene pertanto determinato il valore medio risultante da molte risposte impulsive e non il valore di punta del segnale di riflessione di un singolo impulso. Se si modifica la tratta di ritardo del fascio di riferimento è possibile esaminare il segnale di misura con una risoluzione temporale proporzionale alla larghezza dell'impulso ottico.

222 Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)

Un impulso ottico può essere diviso in varie oscillazioni sinusoidali (sviluppo di Fourier) analogamente a un impulso elettrico. Le componenti di frequenza possono essere analizzate insieme come impulso oppure in successione come componenti di frequenza equidistanti. Il metodo «Optical Frequency Domain Reflectometry» tiene conto di questo fatto. Anche qui come nella rivelazione indiretta, al fascio di riferimento non modulato otticamente viene sovrapposta la luce riflessa dell'oggetto di misura. La sorgente è un laser sintonizzabile e sempre in esercizio, il quale viene sintonizzato da f_0 a f_{\max} a livelli di Δf . Questo andamento del segnale in funzione della frequenza viene convertito per mezzo di calcoli, con una trasformazione di Fourier, in un andamento del segnale dipendente dal luogo. La risoluzione del sistema è data dalla grandezza $1/(f_{\max} - f_0)$. Spostando lo specchio di $1/\Delta f$ e sintonizzando nuovamente la sorgente si può con questo metodo analizzare i segnali ottici riflessi di una struttura. Per ottenere la risoluzione spaziale necessaria, la sorgente deve essere sintonizzata su varie decine di nanometri. L'ampio spettro richiesto e il tempo di calcolo necessario per la trasformazione di Fourier hanno impedito fino ad oggi la diffusione di questo metodo.

223 Optical Low Coherence Reflectometry (OLCR)

Condizioni analoghe a quelle summenzionate sono ottenibili con una sorgente che dopo un determinato inter-

en fonction de la distance, la source doit pouvoir être réglable sur une plage de plusieurs dizaines de nanomètres. Cette grande gamme et le temps de calcul nécessaires pour la transformée de Fourier empêchent jusqu'ici une large utilisation de cette méthode.

223 Optical Low Coherence Reflectometry (OLCR)

Si l'on imagine une source modifiant statiquement sa fréquence optique d'une fréquence médiane f_c après un certain intervalle de temps $\Delta\tau$, on obtient des conditions analogues à celles qui sont décrites précédemment. En recourant à la détection indirecte et en modulant le rayon de référence avec une fréquence f_{mod} dans la gamme du kilohertz, on ne peut obtenir un signal de détection avec f_{mod} que si la temporisation relative entre le rayon de mesure et le rayon de référence est inférieure à $\Delta\tau$. Pour qu'on s'en aperçoive, les deux temporisations doivent être réglées avec précision à la même valeur. Le détecteur captera alors en tout temps, indépendamment des modifications de fréquence de la source, la superposition de deux rayons de même fréquence optique. Vu que le rayon de référence est modulé avec f_{mod} , le signal hétérodyné se modifie aussi avec la fréquence de modulation. Si la temporisation relative est choisie à une valeur supérieure à $\Delta\tau$, les deux rayons auront toujours une fréquence optique différente. Etant donné que dans ce cas les différences de fréquences se situent à l'extérieur de la largeur de bande des détecteurs, le détecteur ne fournira que l'intensité des deux rayons, mais non le signal hétérodyné avec f_{mod} . La résolution en fonction du temps et de la distance d'un tel réflectomètre est de ce fait donnée par le temps $\Delta\tau$, qui est indiqué en tant que temps de cohérence ou, multiplié avec la demi-vitesse de la lumière, en tant que longueur de cohérence d'une source. Suivant le type de construction, les lasers atteignent une longueur de cohérence de quelques centimètres à plusieurs kilomètres. Les sources lumineuses thermiques présentent des longueurs de cohérence de l'ordre du micromètre. Entre ces deux extrêmes, se situent les diodes électroluminescentes (DEL) avec des longueurs de cohérence de 10 à 200 μm . Une DEL est petite, maniable, robuste, aisée à moduler et se révèle idéale comme source lumineuse pour les appareils de mesure transportables.

23 Diffusion de Rayleigh

Une grandeur importante dans la réflectométrie optique appliquée à la technique de mesure des fibres optiques est la diffusion de Rayleigh. Elle se produit sur des particules ou des inhomogénéités du matériel, qui sont sensiblement plus petites que la longueur d'ondes de la lumière injectée. Le verre est une substance amorphe composée d'innombrables microcristaux à structure désordonnée d'un diamètre de quelques nanomètres. La lumière est diffusée sur ces cristaux. La diffusion de Rayleigh est isotrope, ce qui signifie que la lumière est diffusée régulièrement dans toutes les directions de l'espace. C'est pourquoi on peut aussi observer une partie de la lumière dans le sens inverse. L'intensité de la lumière P_{RS} dépend de l'intensité locale P_{l0} , du nombre des

vallo di tempo $\Delta\tau$ cambia statisticamente la sua frequenza ottica di una frequenza media f_c . Se si applica la rivelazione indiretta e se il fascio di riferimento viene modulato con una frequenza f_{mod} nell'ambito dei chilohertz, si può ottenere un segnale di rivelazione con f_{mod} solo a condizione che il ritardo relativo fra il fascio di misura e quello di riferimento sia inferiore a $\Delta\tau$. Per osservare ciò, occorre fissare entrambi i ritardi esattamente sullo stesso valore. Il rivelatore riceverà così, in qualsiasi momento, la sovrapposizione dei due fasci con la stessa frequenza ottica indipendentemente dai cambiamenti di frequenza della sorgente. Dato che il fascio di riferimento è modulato con f_{mod} , anche il segnale di battimento cambia con questa frequenza di modulazione. Se il ritardo relativo è maggiore di $\Delta\tau$, entrambi i fasci presenteranno sempre frequenze ottiche diverse. Siccome in questo caso le differenze di frequenza sono al di fuori della larghezza della banda dei rivelatori, il rivelatore fornirà solo l'intensità di entrambi i fasci e non il segnale di battimento con f_{mod} . La risoluzione temporale e locale di un riflettometro di questo tipo è data quindi dal tempo $\Delta\tau$ che viene indicato come tempo di coerenza o, moltiplicato con la metà della velocità della luce, come lunghezza di coerenza di una sorgente. I laser raggiungono, a seconda del tipo e della costruzione, una lunghezza di coerenza che va da alcuni centimetri a parecchi chilometri. Le sorgenti luminose termiche presentano lunghezze di coerenza nell'ambito di alcuni micrometri. Fra questi due estremi vi sono i diodi emettitori di luce (LED) con lunghezze di coerenza comprese fra 10 e 200 μm . Il LED è piccolo, maneggevole, solido, facilmente modulabile e naturalmente è molto indicato come sorgente luminosa per apparecchi di misura trasportabili.

23 Diffusione di Rayleigh

Un'importante grandezza nella riflettometria della tecnica di misura delle fibre ottiche è la diffusione di Rayleigh. Essa si presenta sotto forma di particelle o di disomogeneità del materiale che sono sensibilmente più piccole della lunghezza d'onda della luce diffusa. Il vetro è un materiale amorfo composto di molti microcristalli non ordinati con un diametro di alcuni nanometri. La luce viene diffusa da questi cristalliti. La diffusione di Rayleigh è isotropica, ossia la luce viene diffusa uniformemente in tutte le direzioni dello spazio. Una parte della luce può perciò essere osservata anche nella direzione di ritorno. L'intensità della luce diffusa P_{RS} dipende dall'intensità locale P_{l0} , dal numero di cristalliti per ogni unità di lunghezza moltiplicato per il loro coefficiente di diffusione α_s e dal fattore di accoppiamento geometrico della fibra G . Il segnale di retrodiffusione può quindi essere espresso mediante la relazione seguente:

$$P_{RS} = P_{l0} \alpha_s G \Delta x \quad (1)$$

dove Δx è la risoluzione dell'apparecchio di misura [2]. Se l'assorbimento o la diffusione causano una diminuzione dell'intensità luminosa all'interno della struttura, l'intensità luminosa diminuisce anche nel segnale di retrodiffusione con risoluzione spaziale. La diminuzione dell'intensità del segnale osservabile nel riflettogramma indica direttamente il coefficiente di perdita della strut-

crystallites par unité de longueur multipliée par le coefficient de diffusion α_s et par le facteur de couplage géométrique G de la fibre. Le signal rétrodiffusé peut de ce fait être décrit par l'équation suivante:

$$P_{RS} = P_{10} \alpha_s G \Delta x \quad (1)$$

Dans ce cas Δx est la résolution de l'appareil de mesure [2]. Si l'intensité lumineuse diminue par absorption ou diffusion à l'intérieur de la structure, cette diminution apparaît également dans le signal rétrodiffusé résolu en fonction de la distance. La chute de l'intensité du signal se produisant sur le réflectogramme indique directement le coefficient de perte de la structure. Si, dans l'objet, un mini-trajet présente une perte plus élevée, par exemple un connecteur ou une épissure ou encore un défaut optique, on aperçoit un palier dans l'allure du signal. La possibilité de lire directement le genre et l'importance de la perte a conféré à cette méthode une large diffusion dans la technique de la mesure des fibres optiques. Le nombre de cristallites qui provoquent la rétrodiffusion du signal dépend de la distribution de la lumière dans la fibre optique (dans les fibres monomodes environ $9 \mu\text{m}$) et de la résolution Δx du réflectomètre. Si l'on admet une résolution de dix mètres, on procède à la somme pour chaque point de mesure sur tous les cristallites distribués sur dix mètres de fibre. Pour une fibre monomode conventionnelle, il faudrait s'attendre à un signal rétrodiffusé affaibli de 43 dB par rapport à la puissance de sortie de la source. Si la résolution n'est que de $10 \mu\text{m}$, on ne fait la somme que sur $10 \mu\text{m}$ et le niveau du signal rétrodiffusé se situerait à une valeur un million de fois inférieure. La sensibilité d'un appareil à haute résolution doit donc être supérieure à 100 dB pour être en mesure de détecter un signal de Rayleigh. Il sera démontré plus loin que la sensibilité doit être beaucoup plus élevée afin que les pertes dans le matériel cristallin puissent également être décelées comme dans la réflectométrie OTDR conventionnelle. Cela provient, d'une part, du fait que le matériau cristallin tel que GaAs ou LiNbO_3 possède des coefficients de diffusion α_s beaucoup plus petits et que, d'autre part, le facteur de couplage géométrique G pour des structures intégrées est moins grand et que, de ce fait, moins de lumière est rétrodiffusée par ces structures vers le détecteur que par la fibre optique. Le prix de cette haute résolution s'est traduit par une perte dans l'analyse du signal ou par la mise en œuvre d'une technologie complexe permettant de réaliser l'extrême sensibilité de l'appareil.

3 Guide d'ondes optique intégré en tant qu'objet de mesure

Les propriétés importantes suivantes des structures des guides d'ondes optiques intégrés typiques à analyser exercent une influence sur les exigences posées à l'appareil de mesure:

- Longueur des structures: 5 à 50 mm
- Matériel: SiO_2 (verre), GaAs, InGaAs, LiNbO_3 , etc.
- Indice de réfraction du matériel: 1,5 à 3,5
- Perte du matériel: 1 à 6 dB/cm

tura. Se nell'oggetto vi è una perdita maggiore, p.es. nel connettore, nel giunto o in un punto difettoso, nell'andamento del segnale si manifesta un'irregolarità. La possibilità di individuare direttamente il tipo e l'intensità delle perdite ha contribuito alla diffusione di questo metodo nella tecnica di misura delle fibre ottiche. Il numero di cristalliti che contribuiscono a formare il segnale di retrodiffusione dipende dalla distribuzione della luce nelle fibre ottiche (nella fibra monomodale circa $9 \mu\text{m}$) e dalla risoluzione Δx del riflettometro. Se si assume come valore una risoluzione di dieci metri, il segnale retrodiffuso è formato dalla luce diffusa dai singoli cristalliti sulla distanza di dieci metri di fibra. Per una fibra monomodale convenzionale ci sarebbe da aspettarsi un segnale di retrodiffusione ridotto di 43 dB rispetto alla potenza d'uscita della sorgente. Se la risoluzione è unicamente di $10 \mu\text{m}$, la luce retrodiffusa viene calcolata sulla distanza di $10 \mu\text{m}$ e il livello del segnale di retrodiffusione risulta inferiore di un ulteriore milione di volte. Per rivelare il segnale di Rayleigh, la sensibilità di un'apparecchiatura a risoluzione elevata deve quindi essere superiore a 100 dB. Tuttavia, come verrà dimostrato in seguito, affinché le perdite nel materiale cristallino possano essere rilevate con la stessa facilità con cui vengono rilevate col metodo OTDR convenzionale, la sensibilità deve essere molto più elevata. Ciò è dovuto da un lato al fatto che i materiali cristallini come il GaAs o il LiNbO_3 presentano coefficienti di diffusione α_s molto inferiori e dall'altro lato al fatto che il fattore di accoppiamento geometrico G per strutture integrate è più piccolo e quindi al rivelatore giunge meno luce retrodiffusa che non dalla fibra ottica. L'elevata risoluzione comporta una perdita nell'analisi del segnale, la quale può essere evitata impiegando un'apparecchiatura di estrema sensibilità.

3 Guide d'onda ottiche integrate quali oggetti di misura

L'apparecchiatura di misura deve addirsi alle caratteristiche, qui sotto indicate, delle tipiche strutture integrate delle guide d'onda:

- lunghezza delle strutture: da 5 a 50 mm
- materiale: SiO_2 (vetro), GaAs, InGaAs, LiNbO_3 e simili
- indice di rifrazione del materiale: da 1,5 a 3,5
- perdite del materiale: da 1 a 6 dB/cm

Inoltre sono graditi ulteriori parametri di misura:

- lunghezza d'onda di lavoro λ nelle finestre ottiche della telecomunicazione: 1300 nm, in seguito anche 1550 nm
- risoluzione spaziale $\Delta\lambda$: da 10 a $100 \mu\text{m}$
- misure a passi minimi di: $0,1 \mu\text{m}$
- settore dinamico: superiore a 100 dB

4 Procedimento OTDR

Per prima cosa viene descritta la funzione del sistema di riflettometria ottico con impulsi di brevissima durata. Particolare attenzione è dedicata ai nuovi metodi di generazione e rivelazione di tali impulsi.

Les paramètres de mesure suivants sont encore souhaitables:

- Longueur d'onde de travail λ dans les fenêtres optiques de la télécommunication: 1300 nm, plus tard aussi 1550 nm
- Résolution locale $\Delta\lambda$: 10 à 100 μm
- Pas de mesure minimaux: 0,1 μm
- Plage dynamique: supérieure à 100 dB

4 Procédé OTDR

On décrit tout d'abord la fonction du système de réflectométrie optique à très courtes impulsions. Une attention particulière est accordée aux nouvelles méthodes lors de la production et de la détection de telles impulsions.

41 Résolution locale

L'un des principaux paramètres d'un réflectomètre optique est sa résolution en fonction de la distance. Elle peut être définie comme le plus petit intervalle décelable entre deux centres de diffusion de même intensité. Comme pour la résolution d'appareils optiques, ce phénomène dépend essentiellement de la forme et de la largeur des impulsions. Pour les impulsions d'une largeur de bande limitée ayant la forme de cloches de Gauss avec des largeurs de bande à mi-amplitude T , la résolution du système Δx selon [2, 3] est exprimée par:

$$\Delta x = v_g T / \sqrt{2} \quad (2)$$

v_g étant le temps de propagation de groupe de l'impulsion lumineuse.

Parce que le temps de propagation de groupe est une fonction de l'indice de réfraction (n_g) et de la dispersion du matériel, la résolution en fonction de la distance dépend fortement du matériel. Souvent, on indique de ce fait à des fins de comparaison la résolution du système dans l'air ($n_g = 1$).

Pour obtenir une résolution locale de 100 μm dans l'air les impulsions lumineuses doivent avoir une durée inférieure à 500 fs, comme on peut facilement le calculer à partir de la formule 2.

42 Source lumineuse

La génération d'impulsions optiques d'une durée inférieure à 1 ps, particulièrement dans la gamme des longueurs d'ondes de 1300 nm, était encore impossible il y a peu. L'Institut de physique appliquée de l'Université de Berne est parvenu, à l'aide d'un laser à colorants organiques accordables, excité par un laser Nd:YAG, à fabriquer une telle source lumineuse. A cet effet, on a utilisé un colorant organique nouveau (N° 26 + HFB), ainsi qu'une compression des impulsions [4]. La figure 2 montre schématiquement la structure de ces dispositifs. Un laser à colorants organiques accordables est excité par des impulsions optiquement synchrones et comprimées d'un laser Nd:YAG. Ce laser Nd:YAG fonctionnant en mode rigide délivre des impulsions de 100 ps avec une

41 Risoluzione spaziale

Uno dei parametri più importanti di un riflettometro ottico è la sua risoluzione spaziale. Essa è definita la più piccola distanza osservabile fra due singoli centri di diffusione di uguale intensità. Analogamente alla risoluzione di apparecchi ottici, la risoluzione spaziale dipende principalmente dalla forma e dalla larghezza degli impulsi. Per gli impulsi a larghezza di banda limitata sotto forma di curva di Gauss con una semilarghezza T , la risoluzione del sistema Δx secondo [2,3] è data da:

$$\Delta x = v_g T / \sqrt{2} \quad (2)$$

dove v_g è la velocità di gruppo dell'impulso ottico.

Dato che la velocità di gruppo è una funzione dell'indice di rifrazione (n_g) e della dispersione del materiale, anche la risoluzione spaziale dipende strettamente dal materiale. Spesso, a scopo di paragone, la risoluzione del sistema viene pertanto indicata in aria ($n_g = 1$).

Come si può dedurre dalla formula 2, per ottenere una risoluzione spaziale di 100 μm in aria, la durata degli impulsi ottici deve essere inferiore a 500 fs.

42 Sorgente luminosa

Fino a poco tempo fa, specialmente nella gamma delle lunghezze d'onda di 1300 nm, non era affatto possibile generare impulsi ottici con una durata inferiore a 1 ps. L'Istituto di fisica applicata dell'università di Berna è riuscito a creare una sorgente luminosa capace di generare tali impulsi, servendosi di un laser a coloranti a Nd:YAG.

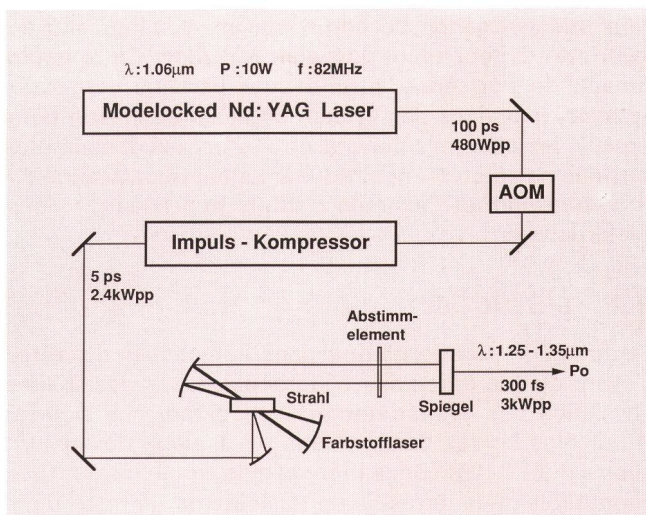


Fig. 2 Source lumineuse impulsionnelle – Sorgente luminosa

- AOM Akustooptischer Modulator – Modulateur acoustico-optique – Modulatore acustico-ottico
- Modelocked Nd: YAG Laser – Laser à mode bloqué Nd: YAG
- Impuls-Kompressor – Compresseur d'impulsions – Compresseur di impulsi
- Abstimmelement – Élément d'accord – Elemento di sintonizzazione
- Strahl – Rayon – Fascio
- Spiegel – Miroir – Specchio
- Farbstofflaser – Laser à colorants organiques accordables – Laser a coloranti

fréquence de répétition de 82 MHz. Pour éviter toute rétroaction sur le laser Nd:YAG, on couple le rayon de sortie dans un modulateur acoustico-optique AOM. Celui-ci décale la fréquence lumineuse de la valeur de la fréquence de modulation. La lumière réfléchiée par les composants suivants présente de ce fait une longueur d'ondes légèrement différente. Cette manière d'isolation optique convient surtout pour des systèmes à haute performance et permet des rapports d'extinction supérieurs à 40 dB. Les impulsions de sortie du laser Nd:YAG sont ensuite comprimées à un rapport de 4 à 5 ps dans un compresseur comportant une paire grille/prisme. La compression des impulsions d'excitation est nécessaire, parce que le temps de présence à l'état excité de la molécule de colorant liquide ne comporte que 11 ps. Des indications plus précises se rapportant à cette technique de compression et de mode rigide (technique mode-locking) figurent dans [4].

La structure optique du laser à colorants organiques accordables correspond à la configuration d'un résonateur linéaire. Afin que l'excitation puisse avoir lieu de manière synchrone, la longueur optique du résonateur du laser à colorants liquides doit correspondre exactement à celle du laser excitateur. La longueur d'ondes du laser à colorants liquides accordables peut être réglée dans une plage de 1,25...1,36 μm . Un accord exige naturellement un réajustage de la longueur du résonateur pour obtenir une puissance de crête maximale et des impulsions aussi courtes que possible. La durée typique des impulsions à la sortie est de 300 fs. La puissance de sortie moyenne se situe vers 700 mW, ce qui correspond à une puissance d'impulsion de 3 kW. Le rayon de sortie peut être focalisé à des dimensions de l'ordre du micron, ce qui permet une injection efficace de la lumière dans une fibre ou dans un composant optique. Pour une puissance de sortie maximale, l'intensité au foyer atteint cependant plusieurs MW/cm^2 . Cette haute densité de puissance suscite pour certains matériaux optiques examinés des effets non linéaires, raison pour laquelle les examens doivent être effectués dans la plupart des cas à puissance réduite. La haute puissance de la source permet l'examen d'effets non linéaires dans les structures.

43 Détection

La détection directe d'impulsions lumineuses discrètes n'ayant qu'une durée de 300 fs dépasse ces possibilités physiques des photodétecteurs modernes. La *figure 3* montre les limites de détection de signaux de mesure faibles d'un OTDR conventionnel et le signal rétrodiffusé supputable de la diffusion de Rayleigh en tant que fonction de la durée d'impulsions de la lumière. La puissance du signal rétrodiffusé est directement proportionnelle à la résolution locale, c'est-à-dire à la durée de l'impulsion. La droite de la puissance détectable minimale augmente de ce fait toujours plus en fonction du raccourcissement des impulsions, vu que pour leur détection des largeurs de bande toujours plus grandes sont nécessaires. Il en résulte une augmentation du souffle et une détérioration du rapport signal/bruit. La plage dynamique «utilisable» pour un OTDR conventionnel (surface hachurée) diminue fortement pour des durées d'impulsions inférieures à 10 ns et disparaît vers environ 300 ps.

A questo scopo sono stati utilizzati un nuovo colorante (n. 26⁺HFB -) e la tecnica di compressione degli impulsi [4]. La *figura 2* presenta schematicamente la struttura utilizzata. Un laser a coloranti viene pompato otticamente in sincronia con gli impulsi compressi di un laser a Nd:YAG. Il laser con modi vincolati in fase (mode-locked) a Nd:YAG emette impulsi di 100 ps con una frequenza di ripetizione di 82 MHz. Per evitare qualsiasi retroazione sul laser a Nd:YAG, il fascio di uscita viene iniettato in un modulatore acustico-ottico AOM. Quest'ultimo provoca uno spostamento della frequenza della luce dell'ordine di grandezza della frequenza di modulazione. La luce riflessa delle componenti successive presenta quindi lunghezze d'onda leggermente diverse. Questo tipo di isolamento ottico è indicato soprattutto per i sistemi ad alta potenza e raggiunge rapporti di cancellazione superiori a 40 dB. Gli impulsi in uscita del laser a Nd:YAG vengono in seguito compressi fino a 4-5 ps in un compressore costituito di reticolo/prisma. La compressione degli impulsi di pompaggio è necessaria poiché la molecola di colorante permane nello stato eccitato solo 11 ps. Per avere maggiori informazioni sulla tecnica di compressione e di modelocking si può consultare [4].

La struttura ottica del laser a coloranti corrisponde alla configurazione lineare del risonatore. Affinché si possa pompare sincronicamente, la lunghezza ottica del risonatore del laser a coloranti deve corrispondere esattamente a quella del laser di pompaggio. La lunghezza d'onda del laser a coloranti può essere sintonizzata nella gamma da 1,25 a 1,36 μm . Per ottenere una potenza di punta massima e impulsi di durata minima, la sintonizzazione richiede naturalmente anche la regolazione supplementare della lunghezza del risonatore. La durata di un impulso all'uscita è normalmente di 300 fs. La potenza d'uscita ottica media si aggira attorno ai 70 mW, il che dà una potenza d'impulso di 3 kW. Il fascio d'uscita può essere focalizzato su misure nell'ambito dei micrometri, ciò che consente un'efficace iniezione della luce in una fibra oppure in una componente ottica. Se la potenza d'uscita è massima, l'intensità nel punto focale aumenta di parecchi MW/cm^2 . Dato che quest'elevata densità di potenza provoca effetti non lineari in alcuni materiali ottici, nella maggior parte dei casi i lavori di ricerca sono stati svolti con una potenza ridotta. L'elevata potenza della sorgente consente di esaminare gli effetti non lineari nelle strutture.

43 Rivelazione

La rivelazione diretta di singoli impulsi ottici lunghi solo 300 fs esula dalle possibilità fisiche di fotorivelatori moderni. La *figura 3* illustra i limiti di rivelazione dei segnali di misura deboli di un metodo convenzionale OTDR e indica l'atteso segnale di retrodiffusione della diffusione di Rayleigh quale funzione della durata dell'impulso della luce. L'intensità del segnale di retrodiffusione è direttamente proporzionale alla risoluzione spaziale, rispettivamente alla durata dell'impulso. La retta della potenza minima rivelabile aumenta con il diminuire della durata degli impulsi poiché per la loro rivelazione sono necessarie larghezze di banda sempre più grandi. Ciò causa un aumento del rumore e un deterioramento del rapporto segnale-rumore. Se la durata dell'impulso è in-

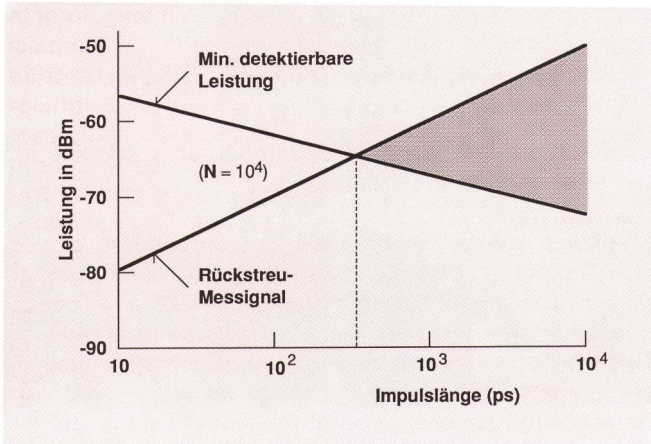


Fig. 3 Signal de mesure rétrodiffusé et puissance minimale détectable dans une fibre monomode en cas de détection directe – Segnale di misura retrodiffuso e potenza minima rivelabile in una fibra monomodale con rivelazione diretta

Min. detektierbare Leistung – Puissance minimale détectable – Potenza minima rivelabile
 Rückstreu-Messsignal – Signal de mesure rétrodiffusé – Segnale di misura retrodiffuso
 Impulslänge (ps) – Longueurs d’impulsions (ps) – Lunghezza d’impulso (ps)
 Leistung in dBm – Puissance en dBm – Potenza in dBm

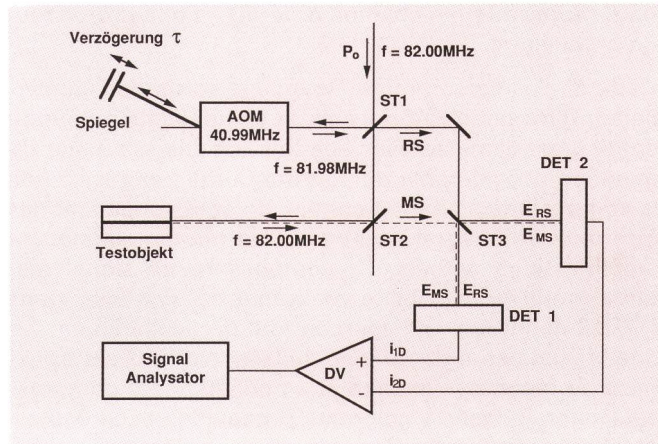


Fig. 4 Détection symétrique par hétérodynage (Balanced Heterodyne Detection) – Rivelatore simmetrico a eterodina (Balanced Heterodyne Detection)

ST1, ST2, ST3 Strahlteiler – Lame semi-réfléchissante – Separatori di fascio
 DET1, DET2 Détecteurs – Detettori
 DV Differentialverstärker – Amplificateur différentiel – Amplificatore differenziale
 Verzögerung τ – Temporisation τ – Ritardo τ
 Spiegel – Miroir – Specchio
 Testobjekt – Objet à tester – Oggetto di misura
 Signal Analysator – Analyseur de signal – Analizzatore di segnale

Pour détecter les impulsions générées de 300 fs, on utilise la détection indirecte. La figure 4 montre le sous-ensemble de détection OTDR constitué comme détecteur hétérodyne symétrique (Balanced Heterodyne Detection BHD). Les impulsions provenant de la source lumineuse sont dirigées vers les branches du signal de mesure et de référence au moyen des lames semi-réfléchissantes ST1 et ST2. Dans la branche de référence, le signal est modulé dans un modulateur acoustico-optique AOM à une fréquence de 40,99 MHz, pour qu’il arrive retardé vers le miroir mobile avant d’être renvoyé vers le diviseur ST1. La double distance à travers AOM décale le signal de référence RS du double de la fréquence, à savoir de 81,98 MHz.

Le signal rétrodiffé ou réfléchi est dirigé en tant que signal de mesure MS vers la lame semi-réfléchissante ST3, s’y réunit avec le rayon de référence et parvient finalement aux deux détecteurs DET1 et DET2. Le diviseur ST3 temporise à chaque fois le rayon réfléchi par rapport au rayon optiquement traversant de la valeur $\pi/2$. Au niveau de DET1, l’onde électromagnétique de MS est donc temporisée par rapport à RS, cependant qu’au niveau de DET2 le phénomène inverse se produit. On peut démontrer [3] que la superposition de tels champs entraîne différents sauts de fréquences et de phases, ce qui fait qu’à chaque sortie de détecteur une composante hétérodynée à basse fréquence $\Delta\omega$ de 20 kHz ($82,00 \text{ MHz} - 81,98 \text{ MHz} = 20 \text{ kHz}$) apparaît avec une phase différente. (Polarité)

$$i_{1D} \approx (E_{RS}^2 + E_{MS}^2 + 2 \delta E_{RS} E_{MS} \sin \Delta\omega t) \quad (3a)$$

$$i_{2D} \approx (E_{RS}^2 + E_{MS}^2 - 2 \delta E_{RS} E_{MS} \sin \Delta\omega t) \quad (3b)$$

feriore a 10 ns, l’ambito dinamico «utilizzabile» per un metodo convenzionale OTDR (superficie tratteggiata) si riduce notevolmente e a circa 300 ps scompare.

Per rivelare gli impulsi della durata di 300 fs si applica la rivelazione indiretta. La figura 4 illustra la parte di rivelatore del metodo OTDR utilizzata come rivelatore simmetrico a eterodina (Balanced Heterodyne Detection BHD). Gli impulsi provenienti dalla sorgente luminosa vengono condotti al braccio di riferimento e al braccio del segnale di misura con i separatori di fascio ST1 e ST2. Nel braccio di riferimento, il segnale viene modulato in un modulatore AOM acustico-ottico con 40,99 MHz allo scopo di ritardare il raggiungimento dello specchio mobile. In seguito il segnale viene ricondotto al separatore ST1. Il doppio percorso attraverso il modulatore AOM provoca lo spostamento del segnale di riferimento RS del doppio della frequenza, ossia di 81,98 MHz.

Il segnale di retrodiffusione risp. di riflessione viene condotto al separatore di fascio ST3 come segnale di misura MS, dove si unisce con il fascio di riferimento; infine giunge ai due rivelatori DET1 e DET2. Il separatore di fascio ST3 ritarda ogni volta otticamente di $\lambda/2$ il fascio riflesso rispetto a quello che transita. Nel rivelatore DET1 l’onda elettromagnetica del segnale di misura viene quindi ritardata rispetto al segnale di riferimento mentre nel rivelatore DET2 avviene il contrario. Si può dimostrare [3] che la sovrapposizione di tali campi con frequenze diverse e variazioni brusche di fase ha come conseguenza la formazione in ogni uscita del rivelatore di una componente di battimento a bassa frequenza $\Delta\omega$ di 20 kHz ($82,00 \text{ MHz} - 81,98 \text{ MHz} = 20 \text{ kHz}$) con fase diversa (segno):

où E représente les champs produits et δ la profondeur de modulation.

Cette disposition a pour effet qu'à la sortie de l'amplificateur différentiel DV qui suit, la composante à courant continu est éliminée avec ses fluctuations, d'où une diminution considérable du souffle. Cette suppression de la composante à courant continu ne peut cependant pas être réalisée intégralement avec les photodiodes et les amplificateurs actuels. La composante de signal restante limite la sensibilité réalisable du système. Dans l'OTDR décrit, on s'en aperçoit tout particulièrement, vu que la plus petite fluctuation du laser Nd:YAG est transmise de façon non linéaire et amplifiée par le compresseur dans le laser à colorants organiques accordables. Malgré la stabilisation des deux lasers, on observe des fluctuations de la puissance de sortie, de la forme d'impulsions et de la gigue pouvant atteindre 1 %. Pratiquement, on peut atteindre une sensibilité maximale de -120 dB. On doit partir de l'idée que cela représente la limite de ce système.

44 Exemple de mesure avec OTDR

Un exemple typique d'une mesure OTDR sur une structure optique intégrée est représenté à la *figure 5*. La mesure a été réalisée avec un interféromètre *Mach-Zehnder*. Il s'agit en l'occurrence d'un guide d'ondes cannelé qui a été réalisé par attaque chimique sèche d'une couche n-GaAs sur un substrat n⁺GaAs. La section des canaux est de 3 μm \times 6 μm , la longueur de 6,4 mm. Ces guides d'ondes peuvent être considérés à la longueur d'ondes de 1 μm comme canaux monomodes. La représentation symbolique du guide d'ondes se trouve sous le réflectogramme correspondant. Les mesures ont été faites dans les deux sens, de «O» vers «X» et inversement.

Les pics frontaux (F) et terminaux (R) correspondent aux réflexions de Fresnel des deux surfaces frontales des guides d'ondes. Entre celles-ci, d'autres réflexions sont encore visibles, qui proviennent de différents endroits, notamment de l'aiguillage «Y», des électrodes soudées initiales ou terminales ou directement du guide d'ondes lui-même, le cas échéant d'inhomogénéités de structure ou d'encrassement. La plage dynamique se situe vers 110 dB. La résolution locale obtenue de 60 μm dans l'air correspond à la résolution de 15 μm dans une structure.

5 Procédé OLCR

La *figure 6* représente le schéma bloc de l'OLCR. Une diode électroluminescente à rayonnement latéral est alimentée par une source électrique constante et injecte sa lumière dans une fibre monomode reliée à un polariseur de fibres. A sa sortie, on peut régler avec précision la polarisation TE ou TM à l'aide d'un connecteur optique rotatif. La lumière est ensuite dirigée dans un coupleur directif comprenant des fibres maintenant la polarisation (Polarization Maintaining Fibers PM) répartie sur deux branches. Dans la branche de mesure, la lumière est injectée dans l'objet à mesurer. Dans la branche de référence, la lumière est conduite sur un miroir mobile S qui la renvoie à travers un modulateur de phase piézo-

$$i_{1D} \approx (E_{RS}^2 + E_{MS}^2 + 2 \delta E_{RS} E_{MS} \sin \Delta \omega t) \quad (3a)$$

$$i_{2D} \approx (E_{RS}^2 + E_{MS}^2 - 2 \delta E_{RS} E_{MS} \sin \Delta \omega t) \quad (3b)$$

dove E sta per le intensità di campo corrispondenti e δ per la profondità di modulazione.

Mediante questa disposizione, la componente di corrente continua viene eliminata con le sue oscillazioni all'uscita dell'amplificatore differenziale DV e di conseguenza anche il rumore viene sensibilmente attenuato. Tuttavia, con i fotodiodi e gli amplificatori attuali, la componente di corrente continua non può essere soppressa integralmente. La componente residua del segnale limita la sensibilità del sistema. Ciò si nota particolarmente nel metodo OTDR descritto poiché le più piccole oscillazioni del laser a Nd:YAG si riproducono sul laser a coloranti attraverso il compressore in modo non lineare e con maggiore intensità. Nonostante la stabilizzazione di entrambi i laser, si osservano oscillazioni nella potenza di uscita, nella forma dell'impulso e nel Jitter che raggiungono l %. Nella prassi è stata raggiunta una sensibilità massima di -120 dB. Si ritiene che ciò rappresenti il limite di questo sistema.

44 Esempi di misura con il metodo OTDR

La *figure 5* illustra un tipico esempio di misura con il metodo OTDR in una struttura ottica integrata. La misura è stata eseguita con un interferometro di *Mach-Zehnder*. Si tratta di una guida d'onda formata attaccando a secco uno strato n-GaAs a un substrato n⁺GaAs. La sezione dei canali è di 3 μm \times 6 μm e la lunghezza di 6,4

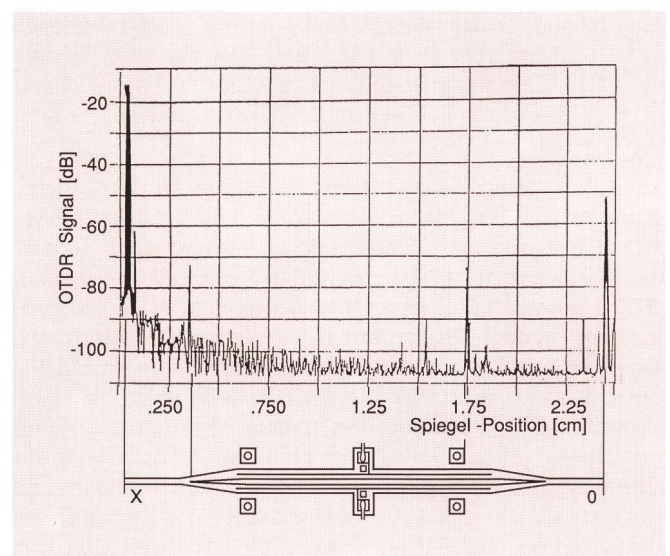


Fig. 5 Réflexion d'un interféromètre du type Mach-Zehnder – Riflessioni misurate con un interferometro di Mach-Zehnder

OTDR Signal [dB] – Signal OTDR [dB] – Segnale OTDR [dB]
Spiegel-Position [cm] – Position du miroir [cm] – Posizione dello specchio [cm]

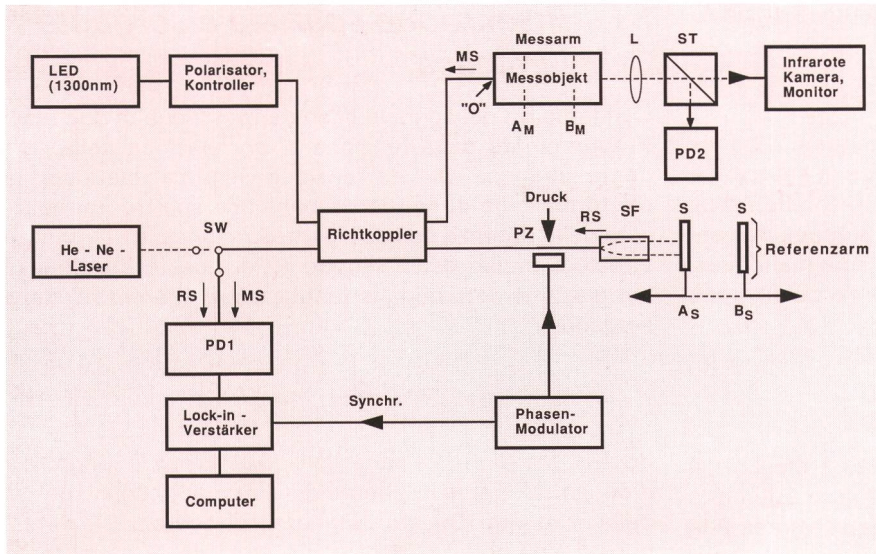


Fig. 6 Schéma de principe OLCR – Schema a blocchi del sistema OLCR

PZ	Piezo-Phasenmodulator – Modulateur de phase piézo-électrique – Piezo-modulatore di fase
SF	Selfoc-Linse – Lentilles Selfoc – Lente Selfoc
S	Beweglicher Spiegel – Miroir mobile – Specchio mobile
PD1, PD2	Photodetektoren – Photodétecteur – Fotorivelatori
LED (1300 nm)	DEL (1300 nm) – LED (1300 nm)
Polarisator, Kontroller	Contrôleur de polarisation – Polarizzatore, strumento di controllo
Messarm	Branche de mesure – Braccio di misura
Messobjekt	Objet à mesurer – Oggetto di misura
Infrarote Kamera, Monitor	Caméra infrarouge, moniteur – Telecamera a raggi infrarossi, monitor
Referenzarm	Branche de référence – Braccio di riferimento
Druck	Pression – Pressione
Richtkoppler	Coupleur directif – Accoppiatore direzionale
He-Ne Laser	Laser He-Ne – Laser He-Ne
Lock-in-Verstärker	Amplificateur «lock-in» – Amplificatore lock-in
Computer	Ordinateur – Computer
Phasen-Modulator	Modulateur de phase – Modulatore di fase
Synchr.	Synchronisation – Sincr.

mm. Queste guide d'onda con una lunghezza di $1,3 \mu\text{m}$ possono essere considerate dei canali monomodali. L'illustrazione simbolica della guida d'onda si trova sempre sotto il riflettogramma corrispondente. Sono state eseguite misure in entrambe le direzioni, da «O» a «X» e viceversa.

La punta iniziale e la punta finale del segnale corrispondono alle riflessioni di Fresnel di entrambe le superfici frontali della guida d'onda. Fra quest'ultime sono visibili altre riflessioni che derivano da diversi punti, p. es. dalla diramazione a «Y», dai punti dove iniziano e terminano gli elettrodi evaporati o direttamente dalla guida d'onda, eventualmente dalle disomogeneità della struttura o dalle impurità. Il campo dinamico si aggira attorno a 110 dB. La risoluzione spaziale di $60 \mu\text{m}$ in aria corrisponde a una risoluzione di $15 \mu\text{m}$ nella struttura.

5 Metodo OLCR

optique PZ et une lentille SF (Selfoc). Le décalage axial de ce miroir produit la temporisation optique nécessaire afin que l'on puisse mesurer à l'intérieur de l'objet avec une résolution en fonction de la distance. Le rayon de mesure et le rayon de référence parviennent finalement à travers un coupleur directif sur le photodétecteur PD1 où ils se superposent. Le laser HE-NE, combiné à la lentille L, la lame semi-réfléchissante ST, la photodiode PD2 ainsi que la caméra avec moniteur servent à ajuster avec précision l'injection de la lumière dans l'objet à mesurer.

La figura 6 mostra lo schema a blocchi del metodo OLCR. Un diodo elettroluminescente con emissione di spigolo viene alimentato da una corrente costante e fornisce la sua potenza luminosa a una fibra monomodale che è collegata a un polarizzatore di fase. All'uscita di quest'ultimo, la polarizzazione TE o TM può essere regolata con un preciso connettore ottico girevole. La luce viene quindi ripartita fra due bracci in un accoppiatore direzionale costituito di fibre che mantengono la polarizzazione (Polarization Maintaining Fibers PM). Nel braccio di misura, la luce viene iniettata nell'oggetto. Nel braccio di riferimento, la luce passa attraverso un piezomodulatore di fase ottico PZ e una lente SF (Selfoc) e giunge a uno specchio mobile S da dove viene retrodiffusa. Lo spostamento assiale di questo specchio provoca il ritardo ottico necessario per poter misurare con risoluzione spaziale all'interno dell'oggetto di misura. Il fascio di misura e il fascio di riferimento giungono infine, attraverso l'accoppiatore direzionale, sul fotorivelatore PD1 dove si sovrappongono. Il laser He-Ne insieme con la lente L, il separatore di fascio ST, il fotodiodo e la telecamera con monitor serve per regolare con precisione l'iniezione della luce nell'oggetto di misura.

51 Résolution en fonction de la distance et source lumineuse

Le parcours du signal hétérodyné de deux rayons est déterminé par la fonction de corrélation de la source lumineuse. Celle-ci peut être calculée au moyen de la transformée de Fourier en se fondant sur le spectre de puissance normalisé de la source lumineuse. La largeur à mi-amplitude de l'enveloppe $\tau\gamma$ de cette fonction de cor-

relation détermine la longueur de cohérence l_c de la source:

$$l_c = c_0/2 \cdot \tau_\gamma = (\lambda^2/\Delta\lambda) \quad (4)$$

où C_0 est la vitesse de la lumière, λ la longueur d'ondes et $\Delta\lambda$ la largeur à amplitude du spectre de la source. La longueur de cohérence l_c détermine la résolution d'un OLCR en fonction de la distance. Deux signaux doivent avoir un écart supérieur à l_c pour pouvoir être distingués. La résolution locale Δx est de ce fait définie comme suit [3]:

$$\Delta x = l_c/n_g = (\lambda^2/\Delta\lambda)/n_g \quad (5)$$

où n_g = indice de réfraction du matériel.

Pour analyser les propriétés des structures à mesurer, il est nécessaire dans le cas d'un réflectomètre optique à faible cohérence, de poser les exigences suivantes à la source lumineuse: la puissance optique devrait, pour une longueur d'ondes de 1,3 μm , être supérieure à 5 μW dans une fibre monomode. Le spectre d'émission devrait avoir la forme d'une courbe à faible ondulation et une largeur à mi-amplitude de 10 nm à 60 nm. La faible ondulation de la courbe spectrale est particulièrement importante, vu qu'elle exerce une influence directe sur la forme du signal mesuré et de ce fait sur la résolution locale du système. Des diodes électroluminescentes spécialement sélectionnées, mais qu'on peut obtenir dans le commerce, peuvent satisfaire aux exigences posées.

52 Détection

Comme le montre la figure 6, la fréquence de mesure et la fréquence de référence se superposent dans la branche de détection du coupleur directif sur le photodétecteur PD1. Si l'on décale le miroir de $\lambda/4$, le rayon de référence est temporisé de $\lambda/2$ par rapport au rayon de mesure, parce que la lumière parcourt ce chemin supplémentaire à l'aller et au retour. Un décalage de $\lambda/4$ du miroir, à partir d'une position où une superposition constructive entre les deux rayons existait, conduit en conséquence à une superposition destructive des deux ondes lumineuses. Un décalage supplémentaire de $\lambda/4$ produit à nouveau une interférence constructive. En déplaçant le miroir à une vitesse constante, on observerait une croissance ou une décroissance périodique ou même une disparition du signal de sortie au niveau du détecteur. Ce mode de mesure permet un examen rapide mais peu sensible de l'objet à mesurer. Pour saisir le rayonnement de Rayleigh, on doit tendre à une sensibilité extrêmement élevée du système. A cet effet, la phase du rayon de référence est décalée périodiquement de $\lambda/4$ par rapport au rayon de mesure. La photodiode reçoit ainsi un signal hétérodyné à fluctuation périodique, même lorsque le miroir est immobile, avec la même fréquence que la modulation de phase, c'est-à-dire un signal qui peut être extrait par filtrage et mesuré avec une grande précision au moyen d'un amplificateur à phase rigide. La modulation de phase exige de ce fait une attention particulière. Un simple décalage du miroir conduirait à une modulation d'amplitude indésirable de l'onde de référence. De ce fait, on a choisi une modulation de phase par l'étirement mécanique des fibres

51 Risoluzione spaziale e sorgente luminosa

L'andamento del segnale di sovrapposizione di due fasci è determinato dalla funzione di correlazione della sorgente luminosa. Questa funzione viene calcolata con la trasformazione di Fourier in base allo spettro normalizzato della potenza della sorgente luminosa. La larghezza di valore medio dell'involuppo τ_γ di questa funzione di correlazione determina la lunghezza di coerenza l_c della sorgente:

$$l_c = c_0/2 \cdot \tau_\gamma = (\lambda^2/\Delta\lambda) \quad (4)$$

dove c_0 sta per la velocità della luce, λ per la lunghezza d'onda e $\Delta\lambda$ per la larghezza di valore medio dello spettro della sorgente. Questa lunghezza di coerenza l_c determina a sua volta la risoluzione spaziale di un sistema OLCR. Affinché possano essere contraddistinti l'uno dall'altro, due segnali devono avere una distanza superiore a l_c . La risoluzione spaziale Δx è pertanto definita nel seguente modo [3]:

$$\Delta x = l_c/n_g = (\lambda^2/\Delta\lambda)/n_g \quad (5)$$

dove n_g = indice di rifrazione del materiale.

In base all'analisi delle caratteristiche delle strutture da misurare, nel caso di un riflettometro ottico a bassa coerenza la sorgente luminosa deve soddisfare le seguenti esigenze: se la lunghezza d'onda è di 1,3 μm , la potenza ottica deve raggiungere più di 5 μW in una fibra monomodale. Lo spettro d'emissione deve presentare una curva poco ondulata e una larghezza di valore medio compresa fra 10 nm e 60 nm. L'ondulazione limitata della curva spettrale è di particolare importanza poiché ha un influsso diretto sulla forma del segnale di misura e quindi sulla risoluzione spaziale del sistema. Queste esigenze possono essere soddisfatte da LED speciali disponibili sul mercato.

52 Rivelazione

Come illustrato nella figura 6, il fascio di misura e il fascio di riferimento si depositano sul fotorivelatore PD1 nel braccio di rivelazione dell'accoppiatore direzionale. Se si sposta lo specchio di $\lambda/4$, il fascio di riferimento subisce un ritardo di $\lambda/2$ rispetto al fascio di misura poiché la luce percorre questa tratta sia all'andata sia al ritorno. Spostando lo specchio di $\lambda/4$ da una posizione in cui vi è una sovrapposizione costruttiva fra entrambi i fasci, si ottiene una sovrapposizione distruttiva delle due onde luminose. Se si sposta di nuovo lo specchio di $\lambda/4$ si ottiene ancora una volta un'interferenza costruttiva. Se si sposta lo specchio a velocità costante si constata un aumento e un calo periodico o addirittura la scomparsa del segnale di uscita del rivelatore. Questo tipo di misura consente un rapido, ma non troppo sensibile controllo dell'oggetto di misura. Per rilevare la diffusione di Rayleigh occorre però cercare di raggiungere una sensibilità estremamente elevata del sistema. A questo scopo, la fase del fascio di riferimento viene spostata periodicamente di $\lambda/4$ rispetto a quella del fascio

maintenant la polarisation (fibres PM), qui sont fixées sur une longueur de 3 cm sur une piézo-plaquette et pressées entre deux couches de caoutchouc. La pression nécessaire peut être finement réglée au moyen d'une vis et des oscillations parasites dues aux résonances mécaniques de l'élément piézo-électrique sont atténuées. Il en résulte que la pression sur la fibre modifie son indice de réfraction, ce qui entraîne une temporisation de la lumière passante. Une tension de modulation en dents de scie a été choisie de manière que l'excursion de modulation corresponde à une longueur d'ondes $\lambda/2$ du support optique (modulation serrodyne). La fréquence de modulation s'élève à environ 117 Hz.

Il est possible, en partant du courant de la photodiode, de mesurer avec une très grande sensibilité au moyen d'un amplificateur quadripôle à phase rigide la fréquence produite par modulation de phase ω en tant que composante à courant alternatif stable i_{ac} . L'allure du signal mesuré en tant que fonction de la position du miroir correspond aux enveloppes des deux champs de superposition. A condition que l'intensité de référence optique I_{RS} soit constante, le courant photoélectrique i_{ac} est proportionnel au champ de la lumière rétrodiffusée I_{MS} [5].

$$i_{ac} = 2 \sqrt{I_{RS} \cdot I_{MS}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{OPT}) \quad (6)$$

où φ_{OPT} est la phase optique entre les deux ondes.

La *figure 7* montre la modulation de phase en dents de scie. Pendant la montée linéaire de la tension de modulation e_{MOD} et de ce fait pendant la modification linéaire

di misura. In questo modo il fotodiode riceve, anche con uno specchio fisso, un segnale di sovrapposizione che oscilla periodicamente con la stessa frequenza di una modulazione di fase e che può essere filtrato e misurato con un amplificatore ad aggancio di fase di elevata sensibilità. La modulazione di fase richiede particolare attenzione. Già solo lo spostamento dello specchio provocherebbe una modulazione d'ampiezza dell'onda di riferimento con effetti indesiderati. Si è quindi optato per una modulazione di fase mediante tensione meccanica della fibra che mantiene la polarizzazione (fibra PM), la quale viene fissata su una lunghezza di 3 cm su una piezopiastina e compressa fra due strati di gomma. La pressione necessaria può essere regolata con precisione mediante una vite allo scopo di attenuare eventuali oscillazioni di risonanza meccaniche e parassite della piezopiastina. La pressione sulla fibra modifica pertanto il suo indice di rifrazione, il che provoca un ritardo della luce passante. La tensione di modulazione a denti di sega è stata scelta di modo che la cresta di modulazione di una lunghezza d'onda $\lambda/2$ corrispondesse alla portante ottica (modulazione serrodyna). La frequenza di modulazione è di circa 117 Hz.

Nella corrente di fotodiode la frequenza ω generata dalla modulazione di fase può essere misurata con estrema precisione per mezzo di un amplificatore a 360° quale componente della corrente alternata stabile i_{ac} . L'andamento del segnale misurato in funzione della posizione dello specchio corrisponde all'involuppo di entrambi i campi di sovrapposizione. Se l'intensità ottica di riferimento I_{RS} è costante, la corrente del fotodiode i_{ac} è

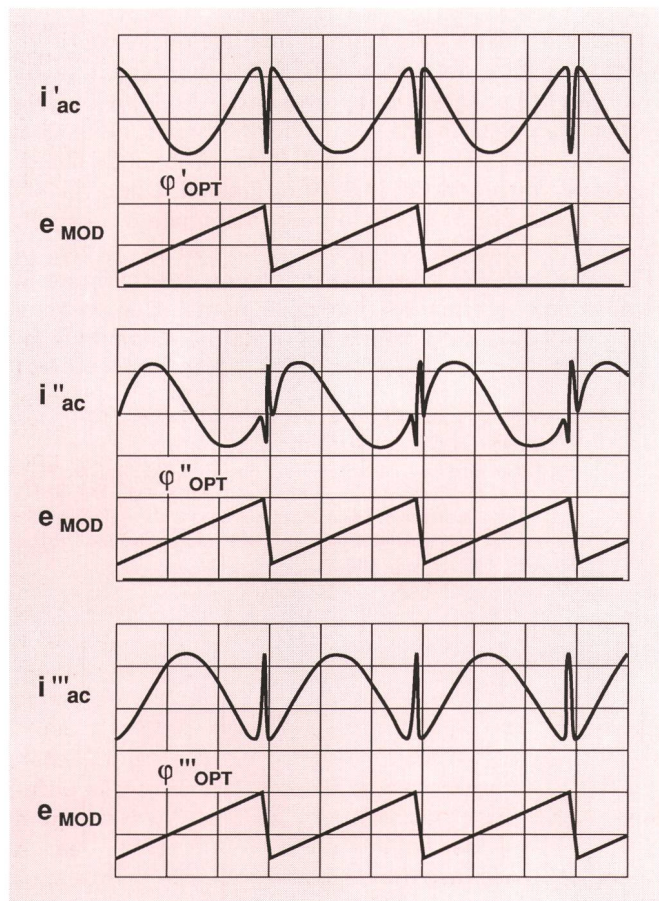


Fig. 7 Modulation de phase en dents de scie – Modulation de phase a denti di sega

i'_{ac} , i''_{ac} , i'''_{ac} Photodiodenstrom in verschiedenen Phasenlagen – Courant de photodiode pour diverses positions de phase – Corrente dei fotodiodi in diverse posizioni di fase
 φ'_{OPT} , φ''_{OPT} , φ'''_{OPT} Optische Phase zwischen den beiden Wellen – Phase optique entre les deux ondes – Fase ottica fra entrambe le onde
 e_{MOD} Modulationsspannung – Tension de modulation – Tensione di modulazione

de l'indice de réfraction, la composante à courant alternatif du courant de la photodiode i_{ac} présente une allure en cosinus. Le même phénomène se produit en sens inverse, c'est-à-dire durant le retour rapide de la tension de modulation. Le point de rebroussement de la modulation peut cependant présenter une position en phase quelconque par rapport à l'allure en cosinus du courant photoélectrique. Ce phénomène est dû à la phase optique effective des deux trains d'ondes φ_{OPT} . En règle générale, l'excursion de tension peut aussi être choisie en tant que multiple de $\lambda/2$. La fréquence du courant alternatif qui en résulte est alors également un multiple de $\Delta\omega$.

Grâce au dispositif décrit, la modulation d'amplitude gênante reste, comme l'expérience le montre, au-dessous de la limite du bruit de fond. La plage dynamique réalisée atteint 125 dB, la résolution en fonction de la distance se situe vers 16 μm dans l'air.

53 Exemples de mesure

Quelques exemples typiques montrent les possibilités potentielles de ce système de mesure. Toutes les mesures des intensités rétrodiffusées se rapportent à la puissance de référence observée à la sortie du réflectomètre – point «0», figure 6 -.

La *figure 8* montre le résultat d'une telle mesure de référence. La sortie OLCR est réalisée sous la forme d'une fibre PM polie, perpendiculairement par rapport à l'axe de la fibre et montée dans une ferrule. Une forte crête de réflexion au point «0» de cette extrémité de fibre correspond à la réflexion verre/air de Fresnel de -14,9 dB. Après cette crête, on n'aperçoit plus de signaux rétrodiffusés. La limite de souffle se situe en moyenne vers environ -125 dB à -130 dB. Le signal n'atteint cette valeur qu'après environ 1,6 mm après la crête. Cette zone n'est pas donnée par la saturation du détecteur, comme dans un OTDR classique, mais par la forme du spectre d'émission de la diode électroluminescente. Elle n'est de ce fait pas désignée comme zone morte, mais plutôt comme «zone d'aveuglement» du système. Dans cette zone, la sensibilité est réduite et elle est fonction de la distance. Les deux réflectomètres examinés ont le même facteur «d'aveuglement», bien que dans l'OTDR

proportionale à l'intensité de champ de la lumière rétrodiffuse I_{MS} [5]

$$i_{ac} = 2 \sqrt{I_{RS} \cdot I_{MS}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{OPT}) \quad (6)$$

dove φ_{OPT} equivale alla fase ottica fra entrambe le onde.

La *figure 7* illustre la modulation de phase a denti di sega. Durante l'aumento lineare della tensione di modulazione e_{MOD} – e quindi anche durante il cambiamento lineare dell'indice di rifrazione – la componente di corrente alternata della corrente dei fotodiodi i_{ac} segue un andamento cosinusoidale. Ciò avviene anche nella direzione inversa, ossia durante il rapido regresso della tensione di modulazione. Rispetto all'andamento cosinusoidale della corrente dei fotodiodi, il punto d'inversione nella modulazione può presentare una qualsiasi posizione di fase. Quest'ultima è determinata dalla fase ottica effettiva di entrambi i treni d'onda φ_{OPT} . Generalmente si può scegliere la cresta di tensione anche come multiplo di $\lambda/2$. Anche la frequenza della corrente alternata che ne risulta sarà un corrispondente multiplo di $\Delta\omega$.

Secondo l'esperienza, la struttura descritta fa sì che la restante modulazione d'ampiezza spuria, indesiderata, rimanga sotto il livello del rumore di fondo. Il campo dinamico ottenuto è di 125 dB e la risoluzione spaziale è di 16 μm in aria.

53 Esempi di misura

Le possibilità potenziali di questo sistema di misura sono mostrate con alcuni esempi tipici. Tutte le misure delle intensità retrodiffuse si riferiscono alla potenza di riferimento che esce dal riflettometro (punto «0», figura 6).

La *figure 8* mostra il risultato di una tale misura di riferimento. L'uscita del sistema OLCR è rappresentata da una fibra PM adagiata in un involucro (ferrule) e levigata verticalmente. L'elevata punta di riflessione indicata al punto «0» di questa estremità di fibra corrisponde alla riflessione vetro/aria di -14,9 dB di Fresnel. Dopo questa punta non è più osservabile nessun segnale di retrodiffusione. Il limite di rumore è compreso in media fra -125 dB e -130 dB. Il segnale raggiunge questo limite di rumore solo a circa 1,6 mm dalla punta. Questa zona non è data dalla saturazione del rivelatore come in un si-

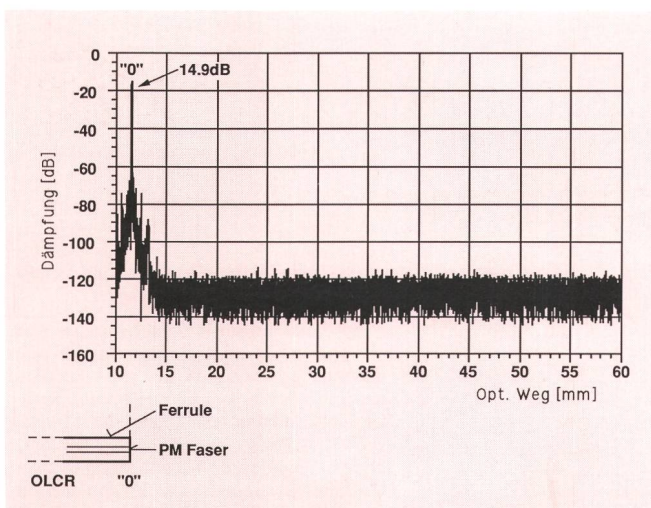


Fig. 8 Sortie OLCR, mesure de référence – Uscita del sistema OLCR, misura di riferimento

PM-Faser Polarisationserhaltende Faser – PM Fibre – Fibre maintenant la polarisation – Fibra PM – Fibra che mantiene la polarizzazione
 Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Ferrule – Ferrule – Ferrule
 PM-Faser – Fibre PM – Fibra PM
 Opt. Weg [mm] – Parcours optique [mm] – Percorso ottico [mm]

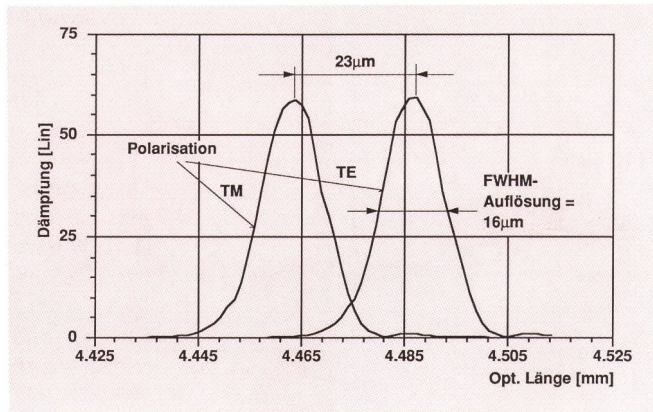


Fig. 9 Résolution locale, dispersion de polarisation – Risoluzione spaziale, dispersione di polarizzazione

FWHM = Halbwertsbreite (Full Width at Half Maximum) – Largeur de bande à mi-amplitude – Larghezza di valor medio FWHM (Full Width at Half Maximum)
 Dämpfung [Lin] – Affaiblissement [Lin] – Attenuazione [Lin]
 Polarisation – Polarisation – Polarizzazione
 FWHM-Auflösung – Résolution FWHM – Risoluzione FWHM
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]

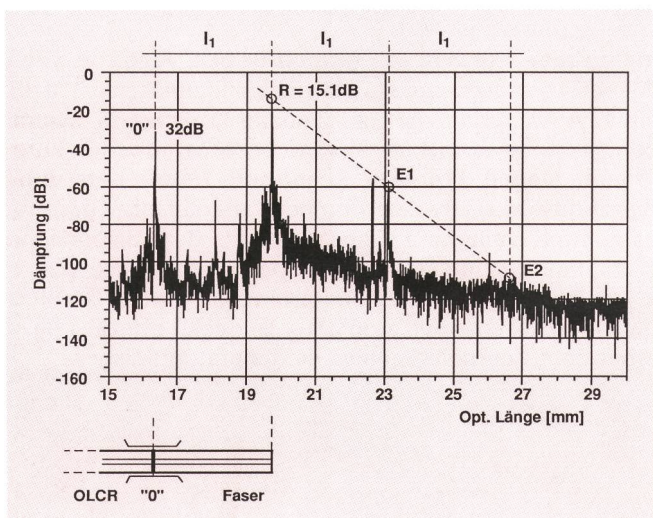


Fig. 10 Transition fibre-fibre (connecteur optique) – Passaggio fibra-fibra (conduttore ottico)

Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Faser – Fibre – Fibra

la résolution soit environ quatre fois moins bonne que dans l'OLCR. Cette différence provient du fait que les spectres des sources lumineuses utilisées sont différents. Dans le laser à colorants organiques accordables, le spectre ressemble à une cloche de Gauss, cependant que celui de la diode électroluminescente a une forme exponentielle. A résolution égale, le signal de mesure d'une courbe spectrale de Gauss atteindrait donc beaucoup plus rapidement la limite du souffle que celui d'une diode électroluminescente. Peut-être parviendrait-on, avec un filtre approprié, à éliminer cet inconvénient de la DEL.

stema convenzionale OTDR, ma dalla forma dello spettro di emissione del diodo luminoso. Essa non viene quindi chiamata zona morta, ma piuttosto «cecità» del sistema. In questa zona la sensibilità del sistema è ridotta e dipende dalla posizione. I due riflettometri analizzati sono caratterizzati dalla stessa «cecità» anche se col sistema OTDR è stata raggiunta una risoluzione quattro volte peggiore di quella raggiunta col sistema OLCR. Questa differenza è dovuta agli spettri diversi delle due sorgenti luminose utilizzate. Lo spettro del laser a coloranti segue una curva di Gauss; quello del LED decresce in modo esponenziale. In caso di uguale risoluzione, il segnale di misura per una curva spettrale di Gauss raggiungerebbe molto più rapidamente il limite di rumore del segnale di misura per una curva spettrale di un LED. Questo svantaggio del LED può forse essere soppresso con l'impiego di un filtro adatto.

La punta di riflessione del passaggio vetro-aria è ancora una volta presentata in modo lineare, ma più dettagliatamente, nella figura 9. A metà dell'altezza della punta, la risoluzione spaziale è di 16 μm. La posizione della punta di riflessione dell'estremità della fibra cambia di 23 μm a dipendenza della polarizzazione regolata (TE o TM). Questo effetto va ricondotto alla duplice rifrazione della fibra che mantiene la polarizzazione. Dalla lunghezza della fibra si può giungere a una dispersione dei modi di polarizzazione di 1,7 ps/m circa. Questo valore corrisponde ai valori di misura ottenuti con altri sistemi.

La figura 10 illustra la misura di un passaggio fibra/fibra in un connettore ottico. Il contatto fisico al punto «0» ha un'attenuazione di regolarità di circa -32 dB. Il segnale di misura dell'altra estremità della fibra R rappresenta di nuovo la riflessione di Fresnel. Scegliendo un percorso ottico più lungo si possono osservare contemporaneamente due echi E1 e E2. Sono i segnali che possono transitare più volte fra «0» e l'estremità della fibra. L'interpolazione delle punte si trova su una retta e denota l'elevata linearità del sistema di misura. Sulla base dei valori di misura R e E1 si possono calcolare le perdite globali della tratta di misura [3].

La figura 11 illustra le caratteristiche di un passaggio fibra-lente Selfoc. Il collegamento in fibra ottica presenta due riflessioni a una distanza di 94 μm. Ciò indica il sussistere di un contatto «difettoso». La fibra «è appesa» in aria. La relativa riflessione di -14,8 dB corrisponde al passaggio vetro-aria. Un segnale di R = -42 dB riflesso dall'altra estremità della lente Selfoc caratterizza lo strato antiriflesso AR. L'indice di rifrazione effettivo di questo elemento $n_{\text{eff}} = 1,62$ è stato calcolato sulla base della via ottica percorsa e della lunghezza fisica della lente Selfoc.

La figura 12 mostra gli «effetti di microcurvatura». Un pezzo di fibra è stato fissato con la colla in un tubetto di ceramica. Evidentemente la colla ha sottoposto la fibra a una pressione meccanica. Di conseguenza, lungo la fibra sono visibili molte riflessioni diverse fino a -80 dB. Il contatto fisico al punto «0» indica il valore di -33,7 dB che è senz'altro soddisfacente.

Sono pure indicati i risultati di misura ottenuti con alcune guide d'onda ottiche integrate. La figura 13 mostra un esempio di una struttura LiNbO_3 . Nel canale misurato ($4 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 24 \text{mm}$) è chiaramente visibile l'indebolito-

La crête de réflexion de l'interface verre/air est représentée une fois de plus linéairement avec davantage de détails à la *figure 9*. La résolution en mi-amplitude fonction de la distance comporte à $16 \mu\text{m}$. La position de la crête de réflexion de l'extrémité de la fibre se modifie de $23 \mu\text{m}$ en fonction de la polarisation réglée (TE ou TM). Cet effet est dû à la double réfraction de la fibre maintenant la polarisation. En se fondant sur la longueur de la fibre, on peut calculer une dispersion modale de polarisation d'environ $1,7 \text{ ps/m}$. Cette valeur correspond bien aux valeurs de mesure obtenues avec d'autres méthodes.

La mesure d'une transition fibre/fibre dans un connecteur optique est représentée à la *figure 10*. Le contact physique au point «0» a un «affaiblissement de réflexion» d'environ -32 dB . Le signal de mesure de l'autre extrémité de la fibre R représente à nouveau une réflexion de Fresnel. On voit aussi encore deux échos, – en raison du choix d'une voie optique plus longue – soit E1 et E2. Il s'agit des signaux qui transitent plusieurs fois entre «O» et l'extrémité de la fibre. L'interpolation des crêtes se situe sur une droite et révèle la haute linéarité du système de mesure. En se fondant sur les valeurs de mesure R et E1, on peut calculer les pertes totales du trajet de mesure [3].

La *figure 11* montre les caractéristiques d'une interface fibre-Selfoc. Le raccordement de la fibre lui-même montre deux réflexions à un espacement de $94 \mu\text{m}$. Cela signifie que le contact est «mauvais». La fibre est en quelque sorte «suspendue» en l'air. La réflexion y relative de $-14,8 \text{ dB}$ correspond à l'interface verre/air. Un signal réfléchi de $R = -42 \text{ dB}$ provenant de l'autre extrémité Selfoc caractérise les propriétés de la couche antiréfléchissante AR. A l'appui du chemin optique parcouru et de la longueur physique du Selfoc, l'indice de réfraction effectif de cet élément a été calculé en tant que $n_{\text{eff}} = 1,62$.

La *figure 12* montre des «effets de microcourbures». Un bout de fibre a été collé à un tube céramique. La colle a manifestement exercé une contrainte mécanique sur la fibre. Le résultat: toute une série de réflexions différentes allant jusqu'à -80 dB sont visibles le long de la fibre. Le contact physique au point «0» montre une bonne valeur de $-33,7 \text{ dB}$.

Par ailleurs, on montre quelques résultats de mesure effectués sur quelques guides d'ondes optiques intégrés. La *figure 13* illustre une structure LiNbO_3 . Dans le canal mesuré ($4 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m} \times 24 \text{ mm}$), l'affaiblissement de l'intensité de rétrodiffusion le long des premiers mm est clairement visible. Ultérieurement, cette intensité se stabilise à environ 110 dB . La cause de ce comportement est actuellement peu claire et exige d'autres éclaircissements. On remarquera la comparaison de la crête de réflexion «O» avec «R», représentée en détail à la *figure 14*. La crête R est élargie. Il faut en voir la raison dans la dispersion chromatique de l'indice de réfraction du matériel à $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$. Simultanément, l'amplitude s'en trouve réduite. Les deux effets doivent de ce fait être pris en considération lors de l'analyse des résultats de mesure.

La lumière rétrodiffusée sort de manière beaucoup plus prononcée d'un guide d'ondes ASG (verre de silice dopé

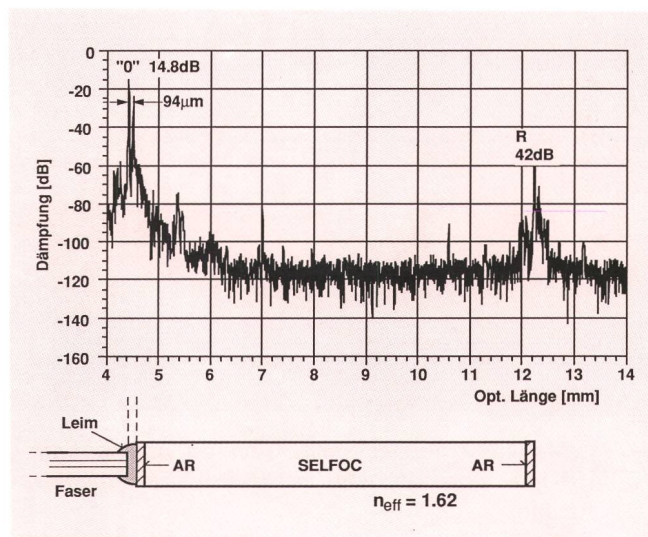


Fig. 11 Transition fibre-Selfoc – Passaggio fibra-Selfoc

AR = Reflexionsdämpfende Schicht – Couche atténuant la réflexion – Strato di attenuazione della riflessione AR
 Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Leim – Colle – Colla
 Faser – Fibre – Fibra
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]

mento dell'intensità di retrodiffusione lungo i primi 20 mm. In seguito questa intensità si stabilizza a 110 dB circa. Al momento non si conosce la causa di questo comportamento e pertanto sono necessari ulteriori chiarimenti. Degno di nota è il confronto fra le punte di riflessione «O» e «R» illustrato nei dettagli nella *figura 14*. La punta R è allargata, il che è causato dalla dispersione cromatica dell'indice di rifrazione del materiale pari a $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$. Tale dispersione cromatica è pure la causa della diminuzione dell'ampiezza. Di questi effetti si deve tener conto durante l'analisi dei risultati di misura.

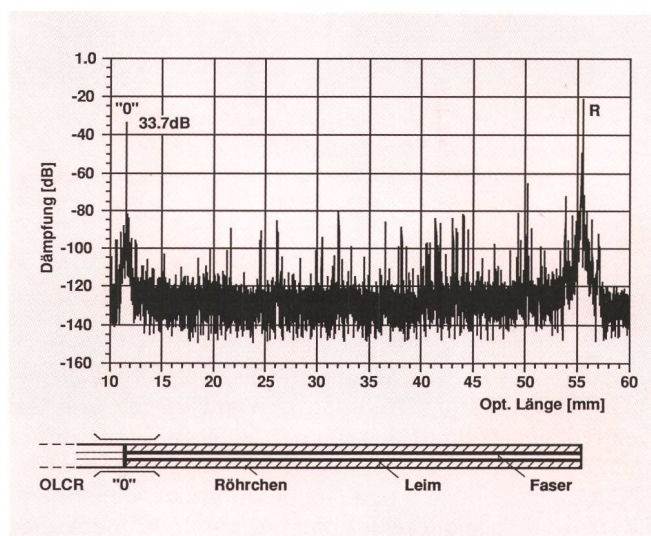


Fig. 12 Fibre enrobée – Fibra in tubetto

Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Röhrchen – Tube – Tubetto
 Leim – Colle – Colla
 Faser – Fibre – Fibra

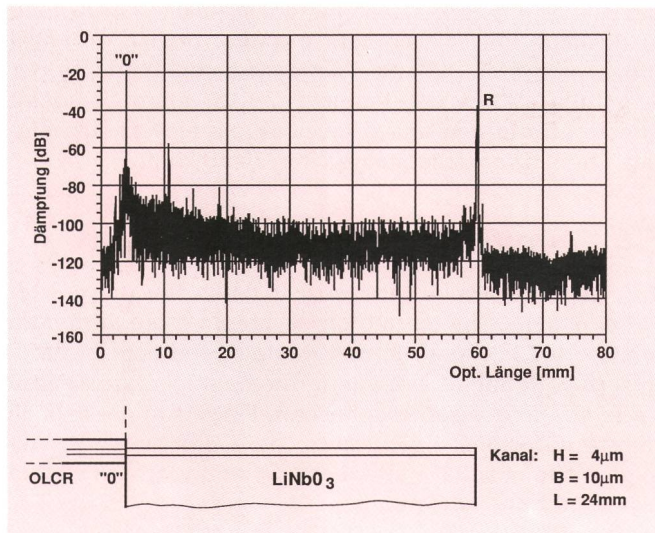


Fig. 13 Réflexions dans un guide d'ondes LiNbO₃ – Riflessioni nella guida d'onda LiNbO₃

Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Kanal – Canal – Canale
 H = hauteur – alt. 4 µm
 B = largeur – larg. 10 µm
 L = longueur – lung. 24 mm

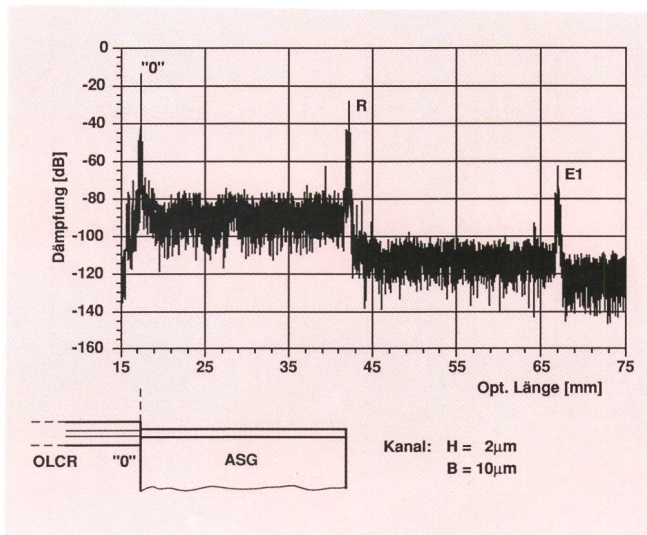


Fig. 15 Réflexions dans un guide d'ondes ASG – Riflessioni nella guida d'onda ASG

ASG Arsendotiertes Silikatglas – ASG = Verre au silicium dopé à l'arsenic – Vetro di silicato dotato di arsenico
 Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Kanal – Canal – Canale
 H = hauteur – alt. 2 µm
 B = largeur – larg. 10 µm

à l'arsenic sur un substrat Si) (fig. 15). Grâce à la haute sensibilité de l'appareillage de mesure, on voit même très bien sur ce graphique la diffusion de Rayleigh. Elle est si forte qu'on la voit même dans le signal d'écho (entre les réflexions R et E). Un double coude avec un rayon R = 50 µm est représenté pour le même matériel ASG à la figure 16. La diffusion de Rayleigh, au début fortement visible, qui se situe encore vers -100 dB jusqu'au premier coude, disparaît complètement en raison des hautes pertes dans le double coude. La figure 17 montre cet effet avec une résolution plus poussée. L'atténuation correspondante atteint environ 70 dB/mm.

La luce di retrodiffusione proveniente da una guida d'onda ASG (fig. 15) risulta molto più accentuata (vetro di silicato dotato di arsenico su un substrato Si). Grazie all'elevata sensibilità dell'apparecchiatura di misura si può addirittura osservare chiaramente la diffusione di Rayleigh. Quest'ultima è così intensa che è visibile persino nel segnale d'eco (fra la riflessione R e la riflessione E). Nella figura 16 è indicato un doppio arco con un rag-

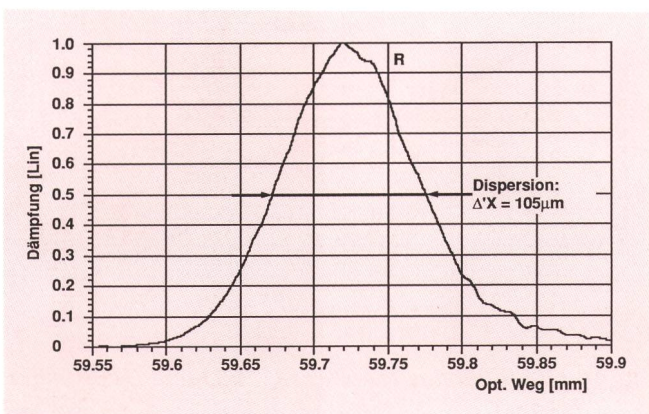


Fig. 14 Dispersion dans un guide d'ondes LiNbO₃ – Dispersione nella guida d'onda LiNbO₃

Dämpfung [Lin] – Affaiblissement [Lin] – Attenuazione [Lin]
 Dispersion – Dispersion – Dispersione
 Opt. Weg [mm] – Chemin opt. [mm] – Percorso ottico [mm]
 Kanal – Canal – Canale
 H = hauteur – alt. 4 µm
 B = largeur – larg. 10 µm
 L = longueur – lung. 24 mm

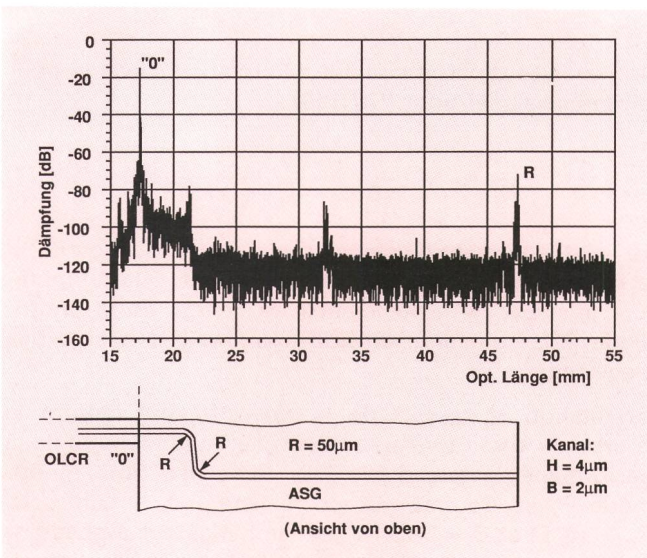


Fig. 16 Guide d'ondes ASG – Guida d'onda ASG

Kanal mit Bögen – Canal avec coudes – Canale con archi
 Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Kanal – Canal – Canale
 H = hauteur – alt. 4 µm
 B = largeur – larg. 2 µm
 (Ansicht von oben) – (Vue de dessus) – (Vista dall'alto)

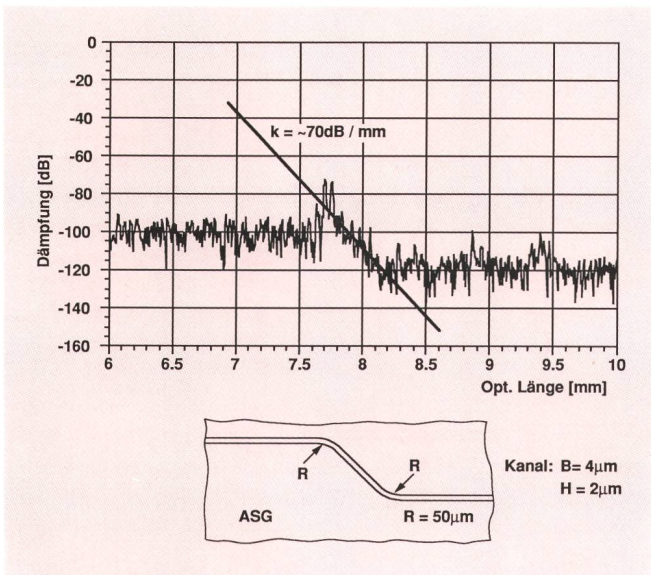


Fig. 17 Détail du coude ASG de la Fig. 16 – L'arco ASG della fig. 16 nei dettagli

Dämpfung [dB] – Affaiblissement [dB] – Attenuazione [dB]
 Opt. Länge [mm] – Longueur opt. [mm] – Lunghezza ottica [mm]
 Kanal – Canal – Canale
 B = largeur – larg. 4 μm
 H = hauteur – alt. 2 μm

54 Limites théoriques

Tous les exemples sont caractérisés par la haute sensibilité de mesure. On a tenté de déterminer le facteur de bruit limitatif, afin d'étudier la possibilité d'améliorer encore l'appareillage de mesure. Par ailleurs, il est intéressant de savoir à quel point les forts signaux rétrodiffusés – avant tout la diffusion de Rayleigh – peuvent être attendus dans les conditions données pour un objet à mesurer.

Une analyse du bruit conduit à la relation suivante pour le rapport signal/bruit (S/N) [6]:

$$\frac{S}{N_{\text{TOTAL}}} = \frac{I_s^2}{2eB(I_D + I_S) + (4kTB/R_L)} \quad (7)$$

où I_s est le courant de signal, I_d le courant d'obscurité, B la largeur de bande équivalente au bruit, T la température absolue, R_L la résistance de charge de la photodiode, k la constante de Boltzmann et e la charge des électrons.

La relation 7) ressort de la *figure 18*, qui montre la courbe du «bruit total» en dB, en tant que fonction de la performance totale d'une DEL dans une fibre monomode P_{fibre} . Comme valeur réaliste, on a admis ici $R_L = 10^6 \Omega$ et $B = 0,25 \text{ Hz}$ de l'amplificateur à phase rigide. Les valeurs mesurées prouvent que la théorie correspond bien à la réalité. La droite «bruit thermique» concorde avec l'expression $4kTB/R_L$.

En plus, on a représenté sur le même diagramme la «dispersion de Rayleigh en SMF» comme exemple d'une dispersion de Rayleigh isotropique à laquelle il faut s'attendre dans une fibre monomode typique. Ces rapports ne sont naturellement valables que pour les fibres opti-

gio $R = 50 \mu\text{m}$ nello stesso materiale ASG. La diffusione di Rayleigh che inizialmente è molto intensa e fino al primo arco è di -100 dB, scompare completamente per le perdite elevate nel doppio arco. La *figura 17* mostra questo effetto con una risoluzione più elevata. La relativa attenuazione raggiunge circa 70 dB/mm.

54 Limiti teorici

Tutti gli esempi sono caratterizzati da un'elevata sensibilità di misura. Si è tentato di rilevare il fattore di rumore limitatore per vedere in che modo l'apparecchiatura di misura potrebbe essere ulteriormente migliorata. D'altra parte si è interessati a conoscere l'intensità dei segnali di retrodiffusione – soprattutto della diffusione di Rayleigh – che ci si deve attendere da un oggetto di misura alle condizioni indicate.

Dall'analisi del rumore deriva la seguente equazione per il rapporto segnale/rumore (S/N) [6]:

$$\frac{S}{N_{\text{TOTAL}}} = \frac{I_s^2}{2eB(I_D + I_S) + (4kTB/R_L)} \quad (7)$$

dove I_s è la corrente di segnale, I_D è la corrente d'oscurità, B è la larghezza di banda, T è la temperatura assoluta, R_L è la resistenza di carico del fotodiode, k è la costante di Boltzmann ed e è la carica d'un elettrone.

L'equazione 7) è rappresentata nella *figura 18* sotto forma di curva «rumore totale» in dB quale funzione della potenza globale di un LED nella fibra monomode P_{fibre} . In questo caso sono stati impiegati i valori realistici $R_L = 10^6 \Omega$ e $B = 0,25 \text{ Hz}$ dell'amplificatore ad aggancio di fase. I valori misurati equivalgono a quelli teorici. La retta «rumore termico» corrisponde all'espressione $4kTB/R_L$.

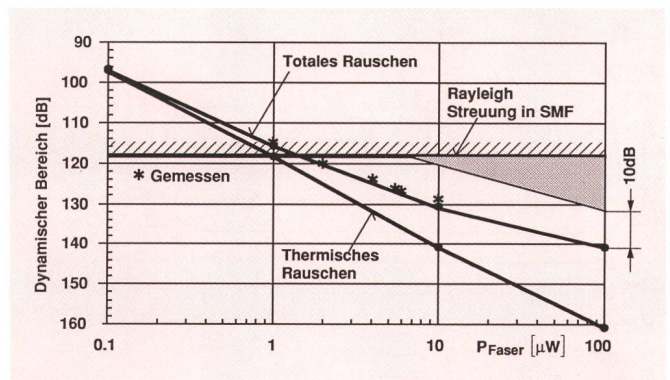


Fig. 18 OLCR, limites théoriques – Sistema OLCR, limiti teorici

SMF = Einmodenfaser – SMF = Fibra monomode – Fibra monomodale SMF
 Dynamischer Bereich [dB] – Plage dynamique [dB] – Campo dinamico [dB]
 Totales Rauschen – Bruit total – Rumore totale
 Rayleigh Streuung in SMF – Diffusion de Rayleigh dans SMF – Diffusione di Rayleigh in SMF
 Gemessen – Mesuré – Misura
 Thermisches Rauschen – Bruit thermique – Rumore termico
 $P_{\text{Faser}} [\mu\text{W}]$ – $P_{\text{fibre}} [\mu\text{W}]$ – $P_{\text{fibra}} [\mu\text{W}]$

ques modernes. Les résultats de mesure sur des structures d'autres matériaux (LiNbO₃, GaAs, etc.) sont beaucoup plus difficiles à évaluer, vu qu'il s'agit ici d'une matière non pas amorphe mais cristalline. Les centres de diffusion présentent de ce fait non plus des dimensions inférieures à la longueur d'onde de la lumière, comme cela est typique pour la dispersion de Rayleigh. La dispersion dans ces matériaux résulte plutôt de défauts de cristaux et de défauts de structure et n'est pas la même dans toutes les directions spatiales (isotrope), mais peut présenter un maximum dans un sens quelconque de l'espace. Le coefficient de couplage G pour une onde rétrodiffusée peut parfois adopter une valeur quelconque entre zéro et un.

La figure 18 montre que de par sa nature le bruit thermique n'est pas une grandeur limitative. La plus grande composante de bruit est directement produite par la composante de la lumière non modulée du rayon de référence en tant que «shot noise». Une augmentation de la plage de mesure dynamique à 130 dB jusqu'à 140 dB ne pourrait être obtenue que par l'utilisation de DEL plus performantes avec des puissances P_{fibre} allant jusqu'à 100 μW . Le secteur pointillé montre la région dans la-

Nel diagramma è pure indicata la «diffusione di Rayleigh in SMF» quale esempio di un'attendibile diffusione di Rayleigh isotropica in una tipica fibra monomodale. Naturalmente queste condizioni si hanno solo per le fibre ottiche moderne. I risultati ottenuti dalle misure di altri materiali (LiNbO₃, GaAs ecc.) sono molto più difficili da stimare poiché non si tratta di materiali amorfi ma di materiali cristallini. Pertanto, i centri di diffusione non presentano più dimensioni inferiori alla lunghezza dell'onda luminosa come è il caso per la diffusione di Rayleigh. La diffusione in questi materiali avviene soprattutto per difetti dei cristalli e della struttura e non è uguale (isotropa) in tutte le direzioni, ma può essere massima per una qualsiasi direzione. A queste condizioni, il coefficiente di accoppiamento G per un'onda retrodiffusa può assumere un valore qualsiasi fra zero e uno.

La figura 18 mostra che il disturbo termico non è di per sé una grandezza limitatrice. La più grande componente di disturbo viene generata direttamente quale «shot noise» dalla componente della luce non modulata del fascio di riferimento. L'aumento del campo di misura dinamico a 130 – 140 dB sarebbe unicamente pensabile nel

Tableau I. Comparaison des caractéristique technique des deux systèmes de mesure
Tabella I. Confronto fra i dati tecnici dei due sistemi di misura

Paramètre — Parametri	OLCR — Sistema OLCR	OTDR — Sistema OTDR
Puissance lumineuse Potenza luminosa	5...10 μW en SMF 5...10 μW in SMF	30...70 mW (valeur médiane) 3 kW _{p-p} 30...70 mW (valore medio) 3 kW _{p-p}
Longueur d'ondes Lunghezza d'onda	1,3 μm (évent. 1,55 μm) 1,3 μm (ev. 1,55 μm)	1250...1350 nm 1250...1350 nm
Largeur spectrale Larghezza spettrale	11,5 THz (env. 65 nm) 11,5 THz (circa 65 nm)	2,15 THz 2,15 THz
Longueur des impulsions Lunghezza d'impulso	Lumière continue Luce continua	300 fs 300 fs
Détection	Homodyne avec amplificateur à phase rigide	Hétérodyne, symétrique avec analyseur de signal
Rivelazione	A omodyna con amplificatore ad aggancio di fase	A eterodyna, simmetrica con analizzatore di segnale
Sensibilité typique du système (rapportée à la sortie) Tipica sensitività del sistema (riferita all'uscita)	125 dB 125 dB	115 dB 115 dB
Résolution locale (dans l'air) Risoluzione spaziale (in aria)	16 μm 16 μm	60 μm 60 μm
Cécité (effet d'aveuglement) du système (à 100 dB) «Cecità» del sistema (a 100 dB)	1,6 mm 1,6 mm	1,5 mm 1,5 mm
Examens non linéaires Analisi non lineari	Non No	Possibles Possibili
Présentation	Petit; desserte simple	Modèle de laboratoire; réglage relativement compliqué
Struttura	Piccola; funzionamento semplice	Esecuzione; regolazione relativamente complicata

quelle la diffusion de Rayleigh dans des structures de verre serait détectable avec un rapport signal/bruit de 10 dB.

Une autre possibilité de mieux mesurer la diffusion de Rayleigh réside dans l'utilisation de diodes électroluminescentes possédant des trajets d'émission cohérente plus longs. Cela produirait une temporisation de la résolution locale Δx . Selon la formule 1), il en résulterait une augmentation de l'intensité de la lumière rétrodiffusée, et cela au détriment d'une résolution en fonction de la distance souvent trop élevée.

6 Comparaison OLCR-OTDR

Les deux systèmes de mesure ont pu faire l'objet de tests poussés. On s'est aperçu à cette occasion de quelques différences marquées représentées au *tableau I*.

La constatation la plus importante est que l'équipement OTDR, grâce à sa forte puissance de sortie, convient particulièrement bien à l'examen d'effets optiques non linéaires. Le système OLCR, en revanche, est plus flexible en ce qui concerne la résolution et la longueur d'ondes de sortie (emploi vers 1,5 μm). De ce fait, il se prête mieux à la mesure de pertes et de réflexions dans des structures de guides d'ondes.

7 Conclusion et recommandations

Deux nouveaux réflectomètres optiques ont été testés. Avec le système OTDR, un appareillage très complexe comprenant des lasers à haute performance, on s'est heurté à la limite de la sensibilité d'un système. Grâce à la puissance de sortie élevée atteinte, ce système est avant tout prometteur pour l'examen d'effets non linéaires dans des composants optiques. Le système OLCR, composé de dispositifs beaucoup moins complexes, convient mieux pour la réflectométrie optique dans la gamme linéaire. Un grand nombre de mesures ont déjà été effectuées sur des guides optiques fabriqués en divers matériaux.

Au vu des expériences pratiques, les améliorations suivantes du système de mesure OLCR peuvent être proposées:

– Sources lumineuses plus puissantes

Une version améliorée d'une DEL optimale devrait pouvoir injecter une puissance optique accrue dans la fibre (jusqu'à 100 μW). Les deux longueurs d'ondes 1300 nm et 1550 nm sont demandées. La largeur spectrale pourrait être ramenée avec avantage à environ 5...10 nm (notamment à l'aide de filtres de bande optique). La modulation spectrale de la courbe d'émission ne doit pas dépasser 1 %. Pour augmenter la puissance optique, on peut aussi recourir à des amplificateurs optiques à semi-conducteurs.

– Modulateurs de phase améliorés

L'emploi de modulateurs de phase à optique intégrée est très prometteur. Il pourrait en résulter une stabilité de longue durée et une linéarité de la modulation de phase améliorées. En outre, il convient de poursuivre les études portant sur la possibilité d'intégrer sur une puce des composants optiques tels que coupleurs, polariseurs et modulateurs.

caso in cui si impiegasse un LED più forte con potenze P_{fibra} che raggiungono i 100 μW . Il campo punteggiato indica la zona in cui anche la diffusione di Rayleigh sarebbe rivelabile in strutture di vetro con un rapporto segnale-rumore di 10 dB.

Per misurare meglio la diffusione di Rayleigh si possono utilizzare diodi che emettono luce con lunghezze di coerenza maggiori. Ne conseguirebbe un aumento della risoluzione spaziale Δx . Secondo la formula 1) ciò porterebbe a un aumento dell'intensità della luce retrodiffusa a scapito quindi di una risoluzione spaziale spesso troppo elevata.

6 Confronto fra il metodo OLCR e il metodo OTDR

Entrambi i sistemi di misura sono stati testati. A questo riguardo si sono constatate alcune differenze importanti che sono indicate nella *tabella I*.

L'informazione più importante è il fatto che, grazie all'elevata potenza d'uscita, il sistema OTDR può essere impiegato soprattutto per analizzare effetti ottici non lineari. Il sistema OLCR è invece più flessibile in merito alla risoluzione e alla lunghezza d'onda in uscita (impiego a 1,55 μm) ed è pertanto più indicato per misurare perdite e riflessioni nelle strutture di guide d'onda.

7 Conclusioni e consigli

Due nuovi riflettometri ottici sono stati sottoposti a prova. Con il sistema OTDR, la cui apparecchiatura dotata di laser ad elevata potenza è molto costosa, ci si è spinti fino al limite della sensibilità del sistema. Grazie all'elevata potenza di uscita raggiunta, questo sistema verrà impiegato soprattutto per analizzare gli effetti non lineari nelle componenti ottiche. Il sistema OLCR, la cui apparecchiatura è molto meno costosa, è più adatto alla riflettometria ottica nell'ambito lineare. Finora sono già state effettuate numerose misure su guide d'onda di materiali diversi.

Per migliorare il sistema di misura OLCR si possono applicare i consigli seguenti che si basano su varie esperienze fatte.

– Sorgente luminosa più forte

Un LED ottimale dovrebbe fornire maggiore potenza ottica (fino a 100 μW) alla fibra. Sono necessarie le lunghezze d'onda di 1300 nm e di 1550 nm. La larghezza spettrale dovrebbe essere preferibilmente diminuita (con l'ausilio di un filtro ottico o di un altro strumento simile) a circa 5...10 nm. La modulazione spettrale della curva d'emissione non può superare l'1 %. Per aumentare la potenza ottica si possono pure impiegare degli amplificatori a semiconduttore.

– Modulatori di fase perfezionati

L'impiego di modulatori di fase di ottica integrata potrebbe essere molto promettente. Infatti ci si dovrebbe aspettare una migliore stabilità nel tempo e una maggiore linearità della modulazione di fase. È necessario inoltre perseguire l'integrazione su un chip di componenti ottici quali accoppiatori, polarizzatori e modulatori.

– *Traitement du signal*

Il faut en outre absolument tenir compte des effets de dispersion lors de l'analyse des signaux et de leur traitement. Alors que dans le matériel de verre ces effets peuvent pratiquement être négligés à $\lambda = 1300$ nm, ils deviennent importants pour des matériaux semi-conducteurs.

– *Technique de couplage*

L'injection de la lumière du système OLCR dans l'objet à mesurer doit être améliorée. A cet effet, des moyens de couplage mécaniques plus précis et plus stables, permettant en outre une précision du positionnement supérieure, doivent être testés.

Les résultats obtenus jusqu'ici sont très encourageants. La réflectométrie optique avec une résolution de l'ordre du micron deviendra un instrument important pour l'étude et l'analyse de petites structures optiques intégrées. A l'avenir aussi, elle mérite d'être encouragée et suivie avec attention.

– *Trattamento del segnale*

Durante la valutazione e il trattamento del segnale occorre assolutamente tener conto degli effetti di dispersione. Nei materiali di vetro questi effetti a $\lambda = 1300$ nm vengono praticamente trascurati; al contrario, nei materiali a semiconduttore tali effetti hanno una notevole importanza.

– *Tecnica di accoppiamento*

L'iniezione della luce dal sistema OLCR all'oggetto di misura va migliorata. A questo scopo occorre sperimentare l'impiego di strumenti di accoppiamento meccanici più sensibili, stabili e con una maggiore precisione di posizionamento.

I risultati ottenuti finora sono assai incoraggianti. La riflettometria ottica con risoluzione micrometrica sta diventando uno strumento importante per l'analisi di piccole strutture dell'ottica integrata e pertanto merita estrema attenzione e massimo sostegno.

Bibliographie

[1] Barnoski M.K. and Jensen S.M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. Appl. Opt., vol. 15, pp. 2112-2115, 1976.
[2] Novák R. Rückstreu-Dämpfungsmessmethode an Glasfasern. Techn. Mitt. PTT, 63 (1985) 1, S. 9:
[3] Gilgen H.H., Novák R.P., Salathé A., Hodel W. and Beaud P. Submillimeter Optical Reflectometry. Journal of Lightwave Technology, vol. 7, No. 8, 1989.
[4] Beaud P., Zysset B., Schwarzenbach A.P. and Weber H.P. «1.3 μ m subpicosecond pulses from a dye

laser pumped by compressed Nd:YAG laser pulses», Opt. Lett., vol. 11, pp. 24-26, 1986.
[5] Novák R.P. and Gilgen H.H. Comparison between OTDR and OLCR with micrometer spatial resolution. New improved OLCR detection scheme and latest measurement results on IOC. Digest Symposium on Optical Fiber Measurements, NIST Spec. Publ. 792. Boulder/USA, 1990.
[6] Ross Douglas A. Optoelektronik. Bauelemente und optische Abbildungsmethoden. R. Oldenburg Verlag GmbH, München, 1982.

Zusammenfassung

Optische Rückstreu-Messmethoden mit Mikrometer-Auflösung

Zur Charakterisierung von integriert-optischen und faser-optischen Komponenten wurden zwei neue Verfahren erarbeitet, die beide auf der optischen Reflektometrie beruhen und mit denen örtliche Auflösungen von kleiner als $60 \mu\text{m}$ erzielt werden. Im ersten Verfahren werden ultrakurze Lichtimpulse von 300 fs Dauer verwendet, im zweiten wird die begrenzte Überlagerungseigenschaft des niederkohärenten Lichts einer Leuchtdiode ausgenutzt. Die Empfindlichkeit beider Verfahren liegt bei etwa -120 dB, bezogen auf die Eingangsleistung.

Résumé

Méthodes de mesures optiques par rétrodiffusion avec résolution de l'ordre du micron

Pour caractériser les composants du domaine de l'optique intégrée et des fibres optiques deux nouveaux procédés ont été développés, reposant sur la réflectométrie optique, qui permettent d'obtenir l'un et l'autre une résolution locale inférieure à $60 \mu\text{m}$. La première méthode recourt à l'injection d'impulsions lumineuses ultracourtes de 300 fs et la deuxième utilise la durée limitée de l'effet de superposition de la lumière non cohérente d'une diode électroluminescente. La sensibilité des deux procédés se situe vers -120 dB rapportée à la puissance d'entrée.

Riassunto

Metodi di misura ottici a retrodiffusione con risoluzione micrometrica

Sono stati sviluppati due nuovi procedimenti per caratterizzare i componenti del campo dell'ottica integrata e delle fibre ottiche. Ambedue si basano sulla riflettometria ottica. Permettono di ottenere una risoluzione locale inferiore a $60 \mu\text{m}$. Nel primo metodo sono impiegati impulsi luminosi ultracorti di 300 fs. Nel secondo viene sfruttata la durata limitata dell'effetto di sovrapposizione della luce non coerente di un diodo elettroluminescente. La sensibilità dei due procedimenti si aggira attorno a -120 dB, rispetto alla potenza d'entrata.

Summary

Optical Reflectometer Measuring Methods with Micrometer Resolution

Two new methods were developed for the characterization of integrated optical and fibre optical components, both based on the optical reflectometry and with resolutions of smaller than $60 \mu\text{m}$ attained. In the first method ultra short light impulses of 300 fs duration are used, in the second the limited interference properties of the low coherent light of a light-emitting diode is used. The sensitivity of both methods is approximately -120 dB relative to the input power.