

解説

高分解能光後方散乱測定法

今 井 洋

九州工業大学情報工学部電子情報工学科 〒820 飯塚市川津 680-4

(1991年1月7日受理)

High Resolution Optical Reflectometry

Yoh IMAI

Department of Computer Science and Electronics, Kyushu Institute of Technology,
680-4, kawazu, Iizuka 820

1. はじめに

光ファイバの損失・欠陥を光学的に非接触で検査する方法として1976年に Barnoski と Jensen が初めて光時間領域後方散乱測定法 (optical time domain reflectometry: OTDR) を提案した¹⁾。この方法は光パルスが光ファイバに送り、ファイバから返って来る後方散乱光強度の時間変化を検出する。実験では200 ns 幅の光パルスと20 MHz の周波数帯域をもつ検出系により約55 m の空間分解能が得られた。それ以来、空間分解能とダイナミックレンジの向上を目指し種々の工夫がなされた。なかでも、光パルス幅の測定に用いられていた相関検出法を利用し高い空間分解能を得た相関 OTDR²⁾、広いダイナミックレンジを目指し最小検出感度を向上させるため、コヒーレント検出法を用いたコヒーレント OTDR³⁾ やフォトンカウンティング法を用いた OTDR⁴⁾ が特徴的である。また、空間分解能は悪いがユニークな手法を用いたもので、偏光を利用した偏光 OTDR (POTDR)⁵⁾、誘導ラマン散乱光を検出するラマン OTDR⁶⁾、誘導ブリルアン散乱光を検出するブリルアン OTDR⁷⁾ 等も提案されている。OTDR は、他の方法に比べ研究発表数も多く、いくつかのレビュー論文⁸⁻¹⁰⁾によくまとめられている。

次に、cw 光を用いる光周波数領域後方散乱測定法 (optical frequency domain reflectometry: OFDR) が登場した。OFDR は基本的な OTDR に比べ検出信号の S/N 比に関して有利であるにもかかわらず、今日まで発表論文も少ない。最初の OFDR は、1981年に Macdo-

nald によって提案された¹¹⁾。そこでは、半導体レーザー光を強度変調してその変調周波数を掃引し、参照信号と後方散乱光との時間遅延差に起因する差周波ビート信号のスペクトルを測定する。実験では4.45 MHz の変調周波数帯域幅に対し3.5 m の空間分解能を得ている。この方式の OFDR には、その後、変調信号の位相差を検出する、コヒーレントレーダーの手法^{12,13)}が取り入れられた。さらに、ネットワーク解析用の広帯域なコード化位相変調器を用いることにより4 mm の空間分解能が得られるに至っている¹⁴⁾が、変調周波数を掃引することにより大幅な分解能の改善はできない。

OFDR には、また、光源の周波数 (キャリア周波数) そのものを掃引し、時間遅延差に起因する差周波ビート信号を光学的に発生させ検出する方式^{15,16)}や位相差を検出する方式^{17,18)}も提案されており、高分解能化が期待される。

光ファイバを対象として登場した光後方散乱測定法だが、近年の微細な光薄膜デバイスや光機能性素子の著しい開発に伴い、これらの内部やさらには半導体レーザーの内部までもを評価する必要性が高まり、マイクロメートルのオーダーの空間分解能を有する測定法が強く望まれている。このような背景にあって、ここ数年では、先述の OTDR, OFDR の種々の改善に加え、低コヒーレンス光による干渉を利用した光コヒーレンス領域後方散乱測定法 (optical coherence domain reflectometry: OCDR)¹⁹⁻²¹⁾ などの新しい測定法も提案され、ミリメートル以下の空間分解能が報告されるに至っている。

本稿では、光後方散乱測定法のなかから、とくに高い

分解能が得られている、あるいは、その可能性の高い手法に着目し、OTDR では、相関検出法、および、コヒーレント検出法を用いたもの、OFDR では、キャリア周波数掃引方式で差周波ビート信号あるいは位相変化を検出するもの、そして高分解能測定が容易な OCSR、また、ユニークな光波長領域後方散乱測定法 (optical wavelength domain reflectometry : OWDR)²²⁾ について、これらの基本的な測定原理と具体例を紹介する。

2. 高分解能光後方散乱測定法の測定原理

基本的な OTDR では後方散乱光強度を直接検出するので測定系は図 1 の点線部を含まないが、相関 OTDR、コヒーレント OTDR、OFDR、OCSR では、後方散乱光と参照光との相関出力あるいは干渉出力を検出するので点線部を含んだ干渉計を構成する。

相関 OTDR では、パルス光源を用い、参照光パルスとテスト物体からの後方散乱光パルスを非線形光学結晶に入射させる。非線形光学結晶では、両光パルスを励起光として両パルスが結晶内に同時に存在した時だけ 2 次高調波が発生する。したがって、この 2 次高調波は参照光と後方散乱光の強度相関出力となり、その大きさは後方散乱光強度に比例する。測定は、参照光の光路長を空間的に掃引して 2 次高調波を検出する。

コヒーレント OTDR では、周波数シフトさせた参照光パルスと後方散乱光パルスを干渉させヘテロダイン検出を行うことにより理論的には量子限界まで検出感度を上げることができる。やはり、参照光の光路長を空間的に掃引して導波路の空間的特性を測定する。

キャリア周波数を掃引する OFDR では、光源の周波数を時間的に直線的に掃引する cw 光を用いて、参照光と後方散乱光との干渉出力を検出する。このなかで、周波数差を検出する方式では、参照光と後方散乱光との間の光路長差に起因する検出器への到達遅延時間差によ

り差周波ビート信号が得られる。したがって導波路の異なる位置からの後方散乱光から生ずるビート信号は異なる周波数差をもつ。一方、位相差を検出する方式では、光源の周波数をステップ状に掃引し、参照光と後方散乱光は同じ周波数をもつ。周波数の掃引により位相差を含む干渉出力は変化し、その変化の速さは、参照光と後方散乱光との光路長差に比例して大きくなる。両方式とも、干渉出力のフーリエスペクトルにより導波路特性を評価できる。OFDR では、参照光の光路長を掃引する必要はない。

OCSR では時間的に低コヒーレント光を用いて干渉計を構成するので、光路長が一致したときのみ干渉出力が得られる。したがって、参照光の光路長を掃引しながら、後方散乱光の干渉出力を検出し導波路を検査する。

相関 OTDR とコヒーレント OTDR では、検出系の周波数帯域が十分広ければ、検出信号のピークの鋭さは光パルスの重なり合い、または、強度相関関数によるので空間分解能は基本的に光パルス幅で決まり、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\Delta x = (v/2)\sqrt{2} T \text{ (相関 OTDR)}$$

$$\Delta x = (v/2)2T \text{ (コヒーレント OTDR)}$$

ここで、 v は光パルスの群速度、 T は光パルス幅である。高分解能化には相関 OTDR のほうが有利である。

OCSR では検出信号の鋭さは時間コヒーレンス関数によるので、分解能は光源のコヒーレンス長 (スペクトル幅の逆数) で決まり、次式で与えられる¹⁰⁾。

$$\Delta x = \lambda^2 / (2n\Delta\lambda)$$

ここで、 n は、テスト物体の屈折率である。

OFDR では、いずれの方式も出力はフーリエスペクトルとなるので、分解能は基本的に光源の波長掃引幅の逆数で与えられる^{17),18)}。

$$\Delta x = \lambda^2 / (2n\Delta\lambda)$$

OFDR も OCSR も結局、空間分解能は同一の形で与えられることになる。

3. 高分解能 OTDR

3.1 非線形結晶を用いた相関 OTDR

OTDR において、空間分解能の向上を目指し、それまで光パルス幅の測定に利用されていた非線形結晶による 2 次高調波発生を用いた強度相関法²³⁾ が取り入れられた²⁾。その実験系と測定結果を図 2 に示す。参照光とプローブ光は、互いに 2 次高調波発生条件を満たす角度で KDP 結晶に入射する。KDP 内に参照光パルスと後方散乱光パルスとが同時に存在したときだけ 2 次高調波

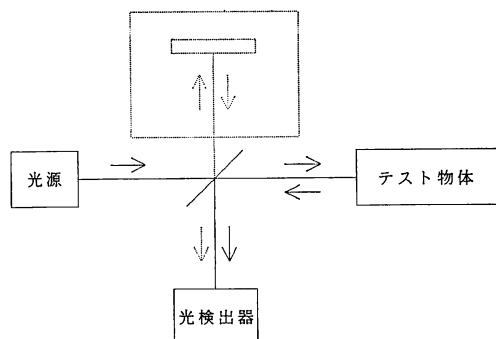


図 1 光後方散乱測定法の基本構成

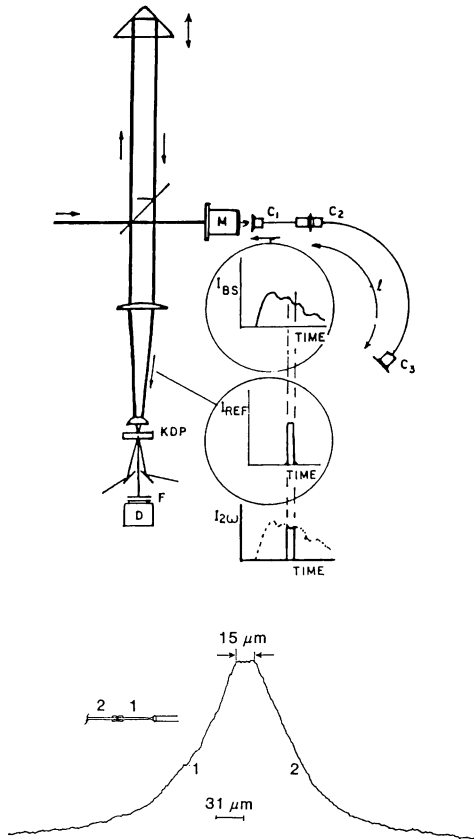


図2 非線形結晶を用いた相関 OTDR²³⁾

が発生するので、プリズムを空間的に掃引してこの2次高調波を検出する。実験では、モードロックされたダイレーザーによりパルス幅 0.12 ps、繰り返し周波数 250 MHz、中心波長 600 nm でのピークパワー 300 W の光パルスを用いて 15 μm の空間分解能が得られた。

相関 OTDR には、ほかに、ランダムな光パルス列を用いて相関出力を得る方式が提案されている²⁴⁾。この方式では、高出力な光源は必要ないが、空間分解能は変調信号の1ビットの時間間隔で決まるので高分解能化が困難である。

3.2 コヒーレント OTDR

コヒーレント検出法を用いて広いダイナミックレンジと同時に高い分解能を得た OTDR も提案されている。図3に Beaud²⁵⁾ らによって示された実験系と測定結果を示す。モードロック Nd:YAG レーザー励起ダイレーザー光パルスは、マッハツェンダー干渉計を経て互いに位相が π 異なる二つの干渉出力を作る。参照光は、音響光学変調器 (AOM) を2回通り周波数がシフトしているので、二つの干渉出力を差動検出してバランスドヘテ

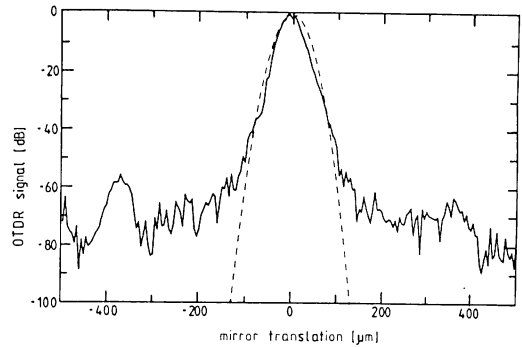
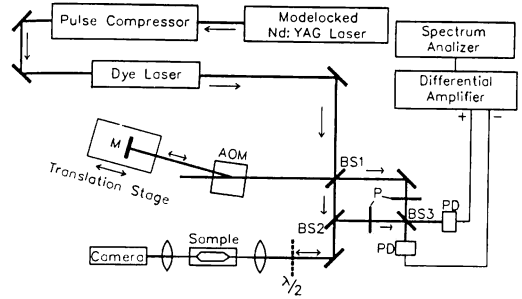


図3 コヒーレント OTDR²⁵⁾

ロダイン検出系が構成されている。単純なヘテロダイン検出に比べ 45 dB 感度が向上している。空間分解能に関して、一つの散乱点からの後方散乱光の検出信号は 300 fs の光パルスを用いて 60 μm である。さらに二つの散乱点の分解に関しては、この2点の間隔が 60 μm 以下では後方散乱光は重なり合い干渉してしまうが、互いの散乱光の位相差を π とすれば、打ち消し合うので二つのピークが現れる。この位相差の調整はダイレーザーの波長をチューニングして行う。この手法により 10 μm 以下の2点まで分解しているが、現れる二つのピーク位置は実際の散乱点位置を表していないことに注意が必要である。

4. 高分解能 OFDR

4.1 差周波ビート信号を検出するキャリア周波数掃引方式 OFDR

Barfuss らによって示された実験系と測定結果を図4に示す²⁶⁾。周波数可変幅の大きいダイレーザーを用い、出射光は参照光とプローブ光とに分けられ、それぞれ反対方向から薄膜導波路に導波され、差周波ビート信号が検出される。ダイレーザー光のコヒーレンス長は約 10 mm で、光路長差がこの範囲でしかビート信号は得られない。しかし、参照光の光路長を測定ごとに順次変え、

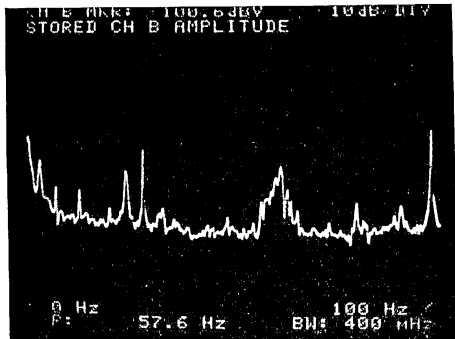
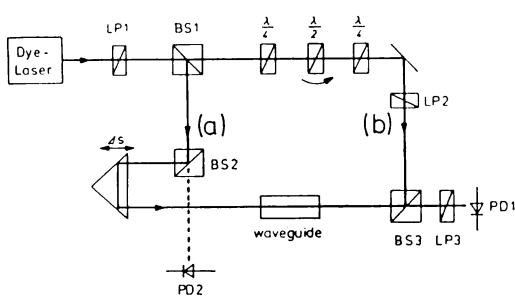


図 4 ビート信号を検出するキャリア周波数掃引方式 OFDR²⁶⁾

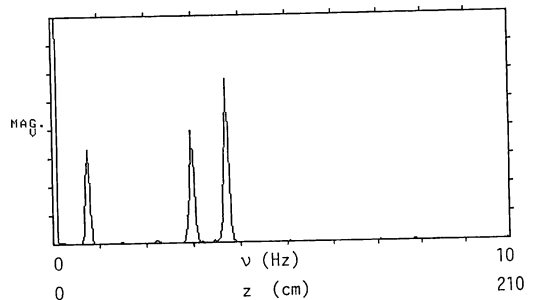
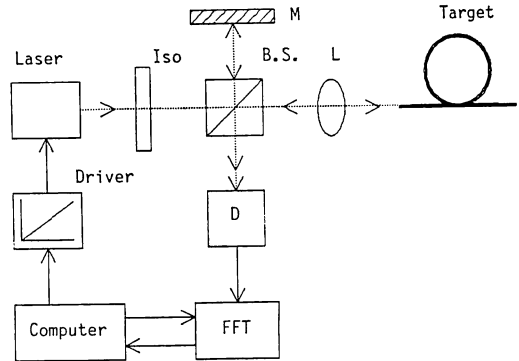


図 5 位相変化を検出するキャリア周波数掃引方式 OFDR¹⁷⁾

導波路全体を検査することができる。ただし、参照光とプローブ光との光路長差がゼロのときから正、負どちら側に変化しても検出されるビート周波数は等しくなり散乱点位置が曖昧になる。この問題を、プローブ光側に回転半波長板を挿入しあらかじめ参照光とプローブ光との周波数差をもたせることで解決している。実験では、ダイレーザーの波長可変幅 2.2 nm, 中心波長 590 nm に対し空間分解能約 50 μm が得られている。

4.2 位相変化を検出するキャリア周波数掃引方式 OFDR

筆者らによって提案された実験系と測定結果を図 5 に示す¹⁷⁾。半導体レーザー励起 Nd:YAG リングレーザー光は、マイケルソン干渉計を構成し、参照光とテストファイバからの後方散乱光による干渉出力が検出される。光源の周波数は時間的にステップ状に掃引され、参照光と後方散乱光は同一の周波数で重ね合わされる。したがって、干渉出力には伝搬時間遅延差に起因する周波数差は含まれず、位相差が含まれる。この位相差は、光源の周波数を掃引すると変化し、参照光と後方散乱光との光路長差が大きいくほど速く変化する。すなわち、干渉出力の周波数は散乱点位置に対応しており、干渉出力のスペクトル分布から導波路を評価できる。実験では光源

の周波数掃引幅 20 GHz に対し 5 mm の空間分解能が得られている。この手法はホモダイン検出なので、出力のスペクトルには所望の参照光と後方散乱光との干渉成分の他に、散乱光同士の干渉成分も現れる。この問題を避けるために、参照光の光路長をファイバを含めたプローブ光の光路長より十分大きく取り、不必要な干渉成分を低周波側に分離している。

同様の原理を用いて、参照光の周波数を AOM によりシフトさせ、ヘテロダイン検出を行う方法も提案されており¹⁸⁾、そこでは不必要な干渉成分は現れない。

5. 光コヒーレンス領域後方散乱測定法

5.1 基本的な OADR

Youngquist らによって提案された実験系と測定結果を図 6 に示す¹⁹⁾。低コヒーレンス光を用いてマイケルソン干渉計を構成する。参照光とプローブ光とは光路長がほぼ一致したときだけ干渉するので、参照光の光路長を空間的に掃引することにより導波路に沿った後方散乱光の干渉出力分布が得られる。参照光側のミラーは干渉出力のヘテロダイン検出のため PZT により一定周波数で振られている。実験では中心波長 830 nm の半導体レー

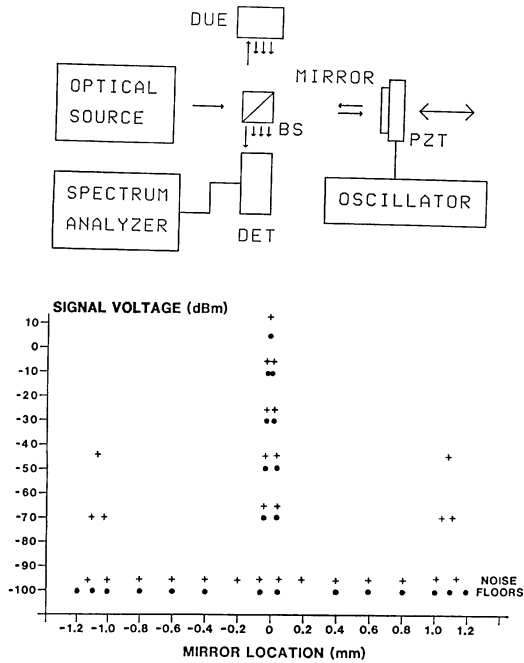


図 6 基本的 OCDR¹⁹⁾

ザーをしきい値以下の注入電流で用い、 $10\ \mu\text{m}$ の空間分解能を得ている。

OCDR では、低コヒーレンス光源として LED²¹⁾ スーパーミネッセントダイオード²⁰⁾を用いたものもあり、LED を用いたもので数マイクロメートルの空間分解能が達成されている²¹⁾。

5.2 コヒーレンス変調を用いた OCDR

周期的にコヒーレントな光の干渉を用いた OCDR が Hotate らによって提案されている²⁷⁾。光源の発振スペクトルが離散的で周期的 (Comb 関数状) であれば、その時間コヒーレンスは、スペクトルと互いにフーリエ変換の関係にあるので、やはり離散的周期的形状となる。光源のスペクトルの周期が広がればコヒーレンスの周期は狭くなる。すなわち、光源のスペクトル周期を変えると干渉する2点の間隔が変わり、テスト物体からの後方散乱光の干渉出力を導波路に沿って選択的に得ることができる。ただし、周期的コヒーレンスの周期よりもテスト物体のほうが短くなければならない。実験系と測定結果を図7に示す。半導体レーザーへの注入電流をステップ状に等間隔で連続的に変え、Comb 関数状の発振スペクトルをもつ光源を疑似的に発生させる。光学系は通常の OCDR と同じマイケルソン干渉計だが、この方法では参照光の光路長を空間的に掃引する必要はない。

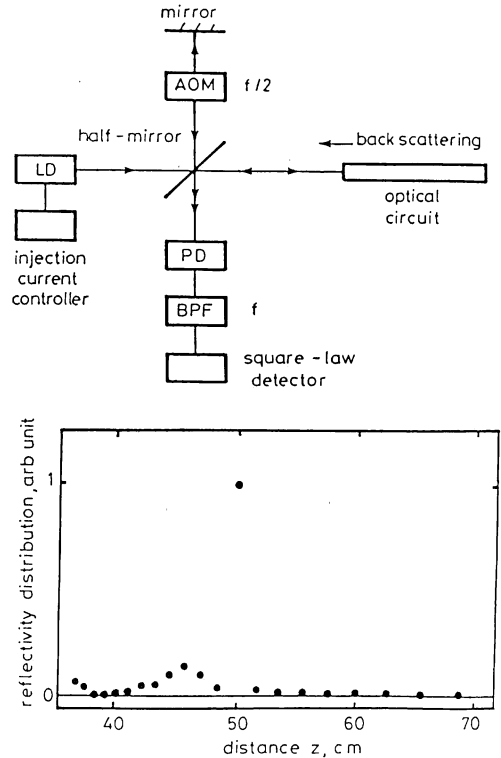


図 7 コヒーレンス変調方式 OCDR²⁷⁾

空間分解能は、周期的コヒーレンスの一つのピークの幅で決まるが、結局、これは半導体レーザーの全体の周波数変調幅の逆数に比例し、理論的には前節の OFDR と同じである。実験では、 $32\ \text{GHz}$ の全周波数掃引幅に対し $7\ \text{mm}$ の空間分解能が得られている。

6. その他の方法—光波長領域後方散乱測定法 (OWDR)

これは、Macdonald らによって 1987 年に提案されたもので、テスト物体の温度変化に伴う屈折率変化を導波光の波長変化として干渉計により検出することを原理としている²²⁾。実験系と測定結果を図8に示す。波長 $1.521\ \mu\text{m}$ で発振する He-Ne レーザー光がファイバピグテイルを経てテスト物体である薄膜導波路に導波される。この導波路の入射端からの反射光を参照光とし、これと導波路中の後方散乱光との干渉出力が検出される。導波路の温度を変えると干渉出力が変化するが、その変化の速さは、参照光と後方散乱光との光路長差が大きければ速くなる。したがって、干渉出力の周波数が散乱点位置に対応し、出力のフーリエスペクトルにより導波路を評価できる。実験では、 $4.5\ \text{mm}$ 長のチタン拡散

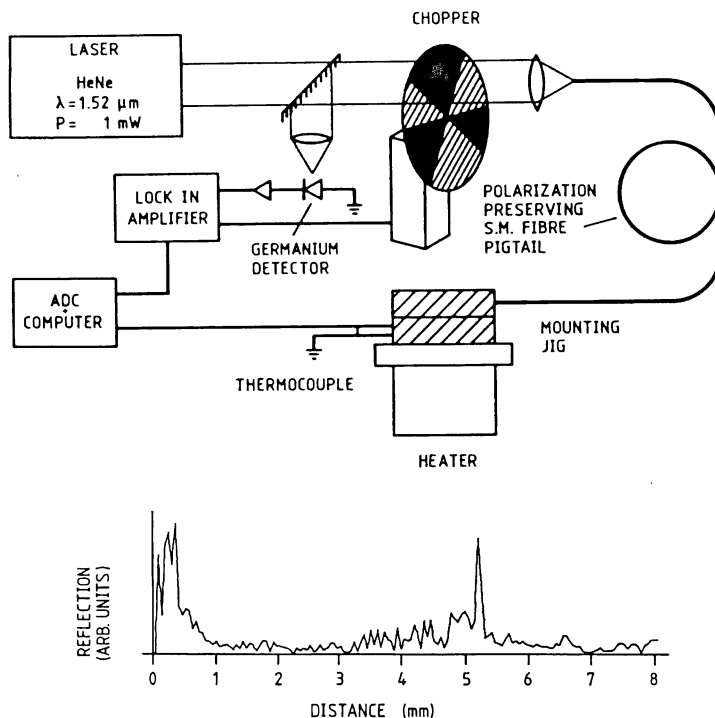


図 8 光波長領域後方散乱測定法²²⁾

リチウムナイオベート薄膜導波路をテスト物体とし、これを 184°C から 30°C まで自然冷却している。この温度変化幅に対し 0.1 mm 以下の空間分解能が得られている。この方法では空間分解能は、温度変化幅の逆数に比例し、次式で与えられる。

$$\Delta x = \lambda / \{2(dn/dT)\Delta T\}$$

7. ま と め

高い空間分解能を有する光後方散乱測定法を紹介した。

今後、さらに高い空間分解能を目指すには、各方法において以下の問題が上げられる。OFDR では、空間分解能が光源の周波数掃引幅の逆数に比例するのでさらに広帯域な周波数可変幅をもつ光源が必要である。現在、波長可変幅にして 100 nm 以上をもつ外部共振器型の半導体レーザーが開発されつつある。このような光源を用いると空間分解能はマイクロメートルのオーダーとなり今後有望な手法の一つである。OTDR では、マイクロメートルの分解能を得るには、サブピコ秒の光パルスが必要で、テスト物体を考えると波長領域は 1.3~1.5 μm が望ましい。3.2 で述べた方法では波長 1.3 μm のモードロックダイレーザーを用いているが、さらに実用性を

考えると、高ピークパワーのモードロック半導体レーザー光源の開発が期待される。また、非線形結晶を用いる関連 OTDR では、結晶の変換効率の悪さも問題となる。基本的な OCDR では比較的容易に高い分解能が得られるが、参照光の光路長を機械的に空間的に走査しなければならないという欠点を有する(この問題は関連 OTDR やコヒーレント OTDR でも同様である)。また、LED 等の光源を用いると、出力パワーが小さくダイナミックレンジの点で不利である。やはりこの場合も高出力でスペクトル幅の広い(100 nm 以上)光源が必要である。コヒーレンス変調方式の OCDR でも OFDR と同様、周波数可変幅の大きい光源が欠かせない。

OWDR では、テスト物体に外的刺激を与えそれによって生ずる現象を光学的に検出するところに本質的な問題がある。屈折率の温度依存性を利用するのでは、テスト物体における広範囲な温度変化が必要で、大幅な分解能の改善は期待できない。導波路におけるより効率のよい誘起現象の利用も考えられる。

今後、ますます実用化の進む薄膜導波路光デバイスや半導体レーザーの損失・欠陥検査には、マイクロメートルのオーダーの空間分解能を有し広いダイナミックレンジの測定法が必要不可欠である。この実現には、光源の

開発のみならず新しい手法の開発を含め、今後の光後方散乱測定法の発展が大いに期待される。

文 献

- 1) M.K. Barnoski and S.M. Jensen: "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics," *Appl. Opt.*, **15** (1976) 2112-2115.
- 2) J.J. Fountain *et al.*: "Subpicosecond-time-domain reflectometry," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 405-407.
- 3) P. Healey and D.J. Malyon: "OTDR in single-mode fiber at 1.5 μm using heterodyne detection," *Electron. Lett.*, **18** (1982) 862-863.
- 4) C.G. Bethea *et al.*: "High-resolution and high-sensitivity optical-time-domain reflectometer," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 233-235.
- 5) A.J. Rogers: "Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 1060-1074.
- 6) Noguchi *et al.*: "52-km-long single-mode fiber fault location using the stimulated Raman scattering effect," *Electron. Lett.*, **18** (1982) 41-42.
- 7) T. Horiguchi and M. Tateda: "BOTDR-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1170-1176.
- 8) J. King *et al.*: "Development of a coherent OTDR instrument," *J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 616-624.
- 9) M. Tateda and T. Horiguchi: "Advances in optical time-domain reflectometry," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1217-1224.
- 10) H.H. Gilgen *et al.*: "Submillimeter optical reflectometry," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 1225-1223.
- 11) R.I. Macdonald: "Frequency domain optical reflectometry," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 1840-1844.
- 12) H.G. Shiraz and T. Okoshi: "Optical-fiber diagnostics using optical-frequency-domain reflectometry," *Opt. Lett.*, **10** (1985) 160-162.
- 13) J. Nakayama, K. Iizuka and J. Nielsen: "Optical fiber fault locator by the step frequency method," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 440-443.
- 14) D.W. Dolfi and M. Nazarathy: "Optical frequency domain reflectometry with high sensitivity and resolution using optical synchronous detection with coded modulators," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 160-162.
- 15) W. Eickhoff and R. Ulrich: "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber," *Appl. Phys. Lett.*, **39** (1981) 693-695.
- 16) S.A. Kingsley and D.E.N. Davis: "OFDR diagnostics for fiber and integrated-optic systems," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 434-435.
- 17) Y. Imai and K. Iizuka: "Optical carrier frequency swept reflectometry for a waveguide," *Proc. of 7th Optical Fiber Sensors Conf.* (1990) pp. 183-186.
- 18) K. Iizuka *et al.*: "Optical step frequency reflectometry," *J. Appl. Phys.*, **68** (1990) 932-936.
- 19) R.C. Youngquist, S. Carr and D.E.N. Davis: "Optical coherence-domain reflectometry: a new optical evaluation technique," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 158-160.
- 20) K. Takada *et al.*: "New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1603-1606.
- 21) B.L. Danielson and C.D. Whittenberg: "Guided-wave reflectometry with micrometer resolution," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 2836-2842.
- 22) R.I. Macdonald and H. Ahlers: "Swept wavelength reflectometry for integrated-optic measurements," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 114-117.
- 23) H. Mahr and M.D. Hirsch: "An optical up-conversion light gate with picosecond resolution," *Opt. Commun.*, **13** (1975) 96-99.
- 24) M. Zoboli and P. Bessi: "High resolution OTDR attenuation measurements by a correlation technique," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3680-3681.
- 25) P. Beaud *et al.*: "Optical reflectometry with micrometer resolution for the investigation of integrated optical devices," *IEEE J. Quantum Electron.*, **25** (1989) 755-759.
- 26) H. Barfuss and E. Brinkmeyer: "Modified optical frequency domain reflectometry with high spatial resolution for components of integrated optic system," *J. Lightwave Technol.*, **7** (1989) 3-10.
- 27) K. Hotate and O. Kamatani: "Reflectometry by means of optical-coherence modulation," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1503-1505.