

半導体レーザーを用いる選択的イメージング法 によるリフレクトメトリーへの応用

小野寺理文・石井 行弘

レーザーリフレクトメトリーは、光機能デバイスなどにレーザー光を照射し、そこからの反射光を測定、分析することにより測定対象物体の特性評価や検査を非接触で行うことができる光計測法であり、今まで主に光ファイバーの故障診断などに用いられてきた。近年、高いコヒーレンスを有するレーザーや発振周波数を広帯域に変化させることができるレーザーが出回るようになり、リフレクトメトリーの応用分野は、デバイス中の反射位置の特定から、光路上の屈折率や位相分布の測定、生体計測など新しい領域へ広がりがつつある。

本稿は、これまで種々提案されてきたリフレクトメトリー技術の中で、半導体レーザー (laser diode: LD) を光源とした光リフレクトメトリーについて述べる。特に、注入電流変化によって LD の発振周波数を変化させることができる特性を利用した周波数領域リフレクトメトリーの中で、任意の光路差に置かれた多重位相物体の中から所望の物体の 2 次元位相情報を選択的に結像することができる方法について、筆者らの最近の研究成果をもとに紹介する。

1. 半導体レーザーを光源とした光リフレクトメトリー

半導体レーザーは、光干渉システムの中で有望な光源として注目されており¹⁾、コンパクトなサイズ、低消費電力で高効率なレーザー発振が可能、高いコヒーレンスを有しているなどの特長をもっている。また、注入電流によってレーザー光強度や発振周波数を簡便に変調することができ、電子回路制御技術を利用して、コンピューターや計測機器と結び合わせたさまざまな計測法が提案されている。ここでは、LD を光源として用いた光リフレクトメトリーにつ

いて概観する。

時間領域リフレクトメトリー (optical time domain reflectometry: OTDR) は、パルス光を物体へ照射し、パルスを送信してから物体からの反射光を受信するまでの飛行時間 TOF (time of flight) を測定することにより、反射点の位置 l を次式に従って測定する方法である。

$$l = \frac{(TOF) \cdot c}{2} \quad (1)$$

ここで c は、光速度である。パルス光の代わりに正弦波で強度変調された LD 光を使用し、正弦波周波数をチャープする方法が報告されている²⁾。反射点の位置は、 TOF 自体の測定からではなく、 TOF の時間でチャープ光の周波数がどの程度変化するかを測定することによって特定される。またパルス光の代わりに、図 1 に示したような有限な時間内で正弦波で強度変調された LD 光³⁾ (文献 3) では 100 周期の正弦波の連なりで coherent burst と名づけられている) を利用する方法が報告されている。この方法は、coherent burst を 1 つのパルス光とみなしたときの飛行時間から TOF のおおよその値を求め、さらに基準正弦波の位相と反射光の coherent burst の位相の比較から、相対位相 δ を同時に検出することにより TOF を正確に決定し、反射点の位置を高精度に同定している。

周波数領域リフレクトメトリー (optical frequency domain reflectometry: OFDR) は、図 2 に示すように光周波数を鋸歯状に変化させた CW 光を物体に照射し、反射点からの光と参照光の各々の周波数変化に差を生じさせる FMCW (frequency-modulated continuous-wave) 技術を利用して、反射点の位置 l は、物体光と参照光を干渉させたときに生ずるビート周波数 ω_b を測定することにより、次式から求めることができる。

職業能力開発大学校電子工学科 (〒229-1196 相模原市橋本台 4-1-1)
E-mail: onodera@uitech.ac.jp

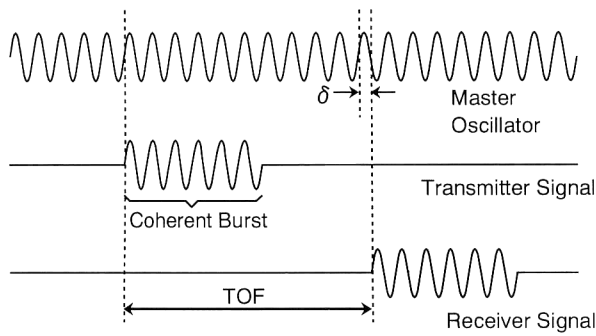


図1 Coherent burst を用いた OTDR 法.

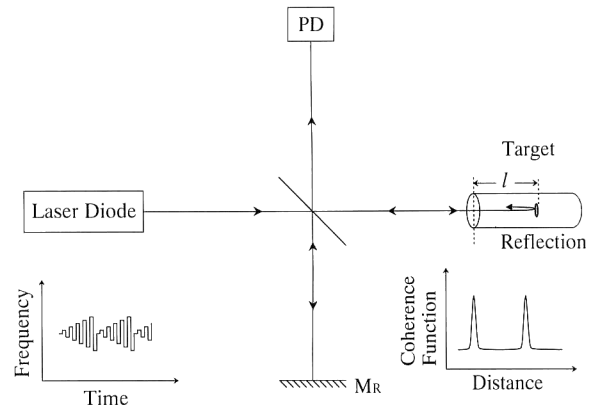


図3 OCDR 法の基本構成.

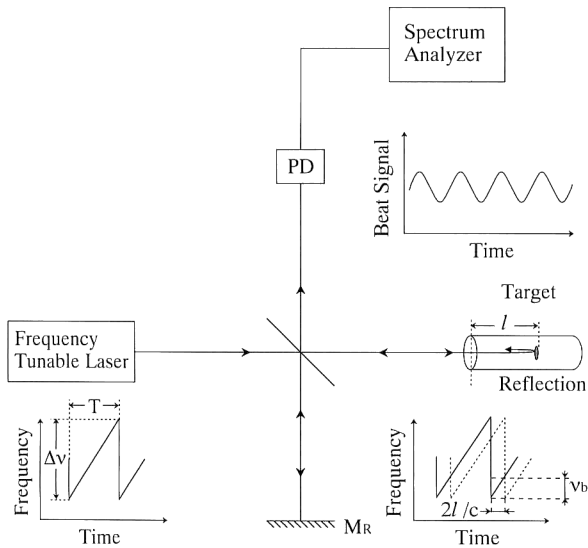


図2 OFDR 法の基本構成.

$$l = \frac{cT\nu_b}{2\Delta\nu} \quad (2)$$

ここで T は鋸歯状波の周期, $\Delta\nu$ は光源の周波数変調幅である. LD 注入電流を変調し, 光周波数を鋸歯状波に変化させ, OFDR へ応用した研究が報告され^{4,5)}, 高い分解能とともに広いダイナミックレンジが示されている. さらに近年, 外部回折格子により LD の利得スペクトル幅 (約 100 THz) 以内で, 発振周波数を連続的に走査できる外部回折格子付 LD 光源が市販されるようになり, この広帯域光源を用いた OFDR の報告がある⁶⁾. LD の共振器内に音響光学変調器が挿入された周波数シフト帰還型レーザーをリフレクトメトリーへ応用した研究があり⁷⁾, 1 km 程度の被測定ファイバーの長さが約 2 mm の距離分解能で測定されている. 図2において周波数可変レーザーの代わりにマルチモード LD を使用し, 光検出器として分光器を用いて, 各発振縦モードに対する干渉光強度を測定し, フーリエ変換すると, 物体の反射率強度の分布が求まる⁸⁾. LD の注入電流変調に伴う発振周波数変化によって干渉信号中に生成

される時間キャリアを利用した, 3次元物体の奥行き方向の反射率分布を測定する方法として, 散乱媒質中に置かれた物体のイメージングに関する研究⁹⁾ や空間時間キャリア周波数を利用した多重位相物体の同時記録についての報告がある¹⁰⁾.

コヒーレンス領域リフレクトメトリー (optical coherence domain reflectometry: OCDR) は, LD の光周波数を変化させ, 光波コヒーレンス関数を制御する方法である¹¹⁾. 図3に示すように, 光周波数が階段状に変化すると, 時間軸上に多モード光源のスペクトルプロファイルが合成され, 周期的なデルタ関数列となるコヒーレンス関数が得られる. ここで, 1ステップの周波数変化幅を調整すると, デルタ関数の位置を掃引することができ, 所望の光路からの干渉信号だけを観測することができる. 参照光の位相変調を光源の LD の周波数変調に同期して駆動することで, コヒーレンス関数のプロファイルを一定に保ったまま, 光軸方向へ掃引することができる位相変調 OCDR 法が提案されている¹²⁾.

2. 半導体レーザーを用いる選択的イメージング

筆者らは, 3次元物体の奥行き方向の反射率分布を測定するひとつの方法として, LD 注入電流を鋸歯状に変調し, 任意の反射位置にある物体の複素振幅で変調されたビート信号に同期検波を行い, 選択的に2次元干渉縞情報を取り出すことができる光計測法について提案してきた¹³⁾. さらに, 複数の多重位相物体の干渉縞情報を同時に結像できる多重イメージング法について報告している¹⁴⁾. ここでは, その測定原理について簡単に説明し, 実験結果を示す. また, 多重イメージ間のクロストークについて議論する.

2.1 測定原理

図4の干渉計は, 図2と同じトワイマン・グリーン干渉計で, 物体光路上に位相物体 $O_i (i=1, \dots, N)$ が置かれてい

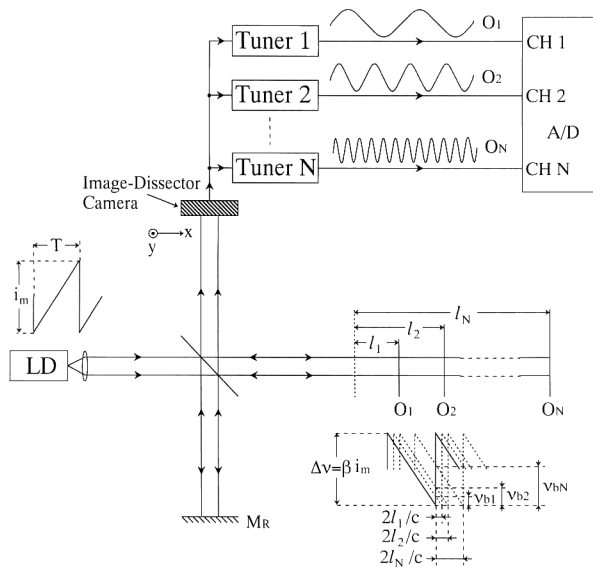


図4 選択的イメージング法の構成。

る。ここで、 N は物体総数を表す。光源のLDは、OFDRのFMCW技術と同様に、周期 T 、振幅 i_m の鋸歯状波電流で駆動される。周波数変調幅 $\Delta\nu$ は、次式で表される。

$$\Delta\nu = \beta i_m \quad (3)$$

ここで、 β はLDの電流変調率である。電流変化により周波数変調されたレーザー光は、ハーフミラーにより参照光と物体光に振幅分割される。光周波数の変化を実線で示した参照鏡からの光と、点線で示した光路差 l_i 上の物体からの光は、ハーフミラーで再び重なり合い、互いに干渉する。図4で示すように、参照光と物体光の間に時間遅れ $2l_i/c$ が生じ、次式で定義されるビート周波数が生成される。

$$\nu_{bi} = 2l_i\beta i_m / (Tc) \quad (i=1, \dots, N) \quad (4)$$

各物体からの光と参照光の間の干渉縞の強度分布は、イメージ・ディセクター・カメラにより検出される。イメージ・ディセクター・カメラは、 x, y 偏向信号によりアドレスされたカメラ検出面上の任意の位置における光強度を検出することができるカメラである。イメージ・ディセクター・カメラにより x 方向にスキャンニング周波数 f_s 、スキャンニング間隔 p で干渉ビート信号を検出したカメラの出力信号は、

$$O(t) = A + \sum_{i=1}^N B_i \cos[2\pi\nu_{bi}t + \phi_i(f_s p t, y)] \quad (5)$$

となり、多重化された干渉信号となる。ここで、 A はバイアス強度、 B_i は光路差 l_i にある物体からの干渉縞の変調強度、 ϕ_i は i 番目の物体の位相分布を表す。式(4)より、ビート周波数 ν_{bi} は、光路差 l_i に比例しているので、カメラの出力信号を電氣的にチューニングすることにより、多重化された干渉信号から任意の光路差にある物体の干渉縞

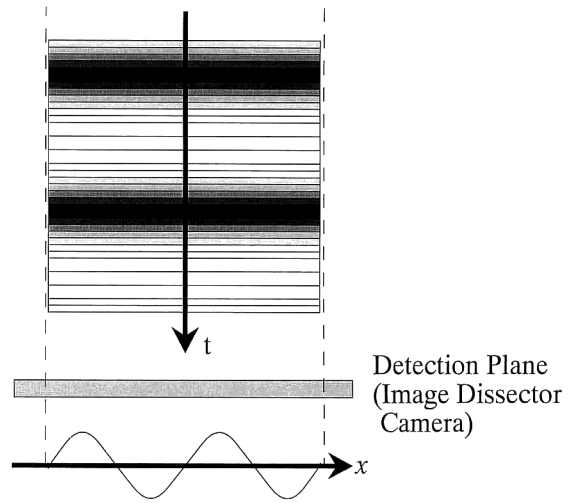


図5 選択的イメージング法の模式図。

情報を選択的に抽出することができる。 n 番目のビート周波数 ν_{bn} にチューニングされた信号は、A/D変換器によりカメラのスキャンニング周波数に同期された周波数でサンプリングされる。サンプリングされたデータのアドレスは、カメラのスキャンニングの位置と1対1で対応しているので、カメラの検出面上での x 方向の干渉縞強度分布が測定されることになる。図5は、イメージ・ディセクター・カメラにより時間的に変動する干渉信号が、空間的に変化する干渉縞として検出されることを示した模式図である。空間的に変化する干渉縞としてサンプリングされた信号は、

$$I_n(x, y) = B_n \cos[2\pi f_n x + \phi_n(x, y)] \quad (6)$$

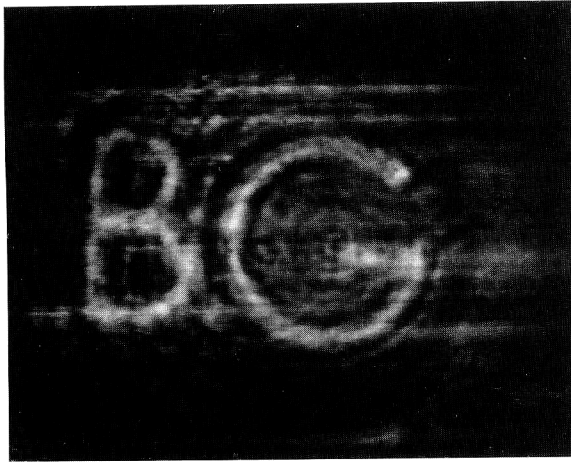
となる。ここで f_n は空間周波数を表し、次式で与えられる。

$$f_n = \nu_{bn} / (f_s p) \quad (7)$$

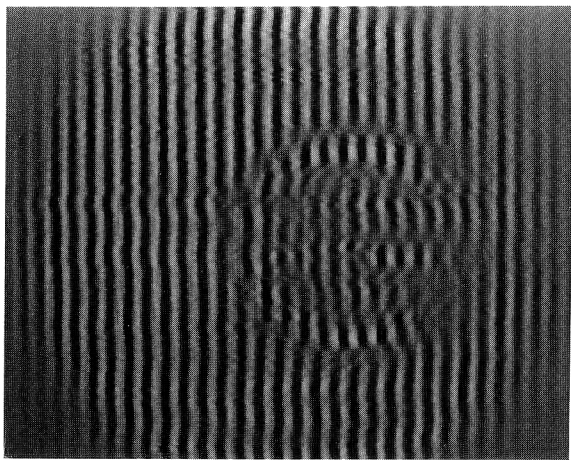
ここまでは、 x 方向の1ラインにおける選択的イメージングの測定原理について記述した。2次元干渉縞は、カメラの検出ラインを y 方向にラスタースキャンすることにより測定される。また、図4に示すように各物体からの干渉縞は、それぞれのビート周波数と等しい中心周波数を有する N 個のチューナーにより分離され、A/D変換器により逐次サンプリングされる。各々の物体に対応する2次元干渉縞は、サンプリングされたデータから生成され、多重イメージングが実現される。

2.2 実験と結果

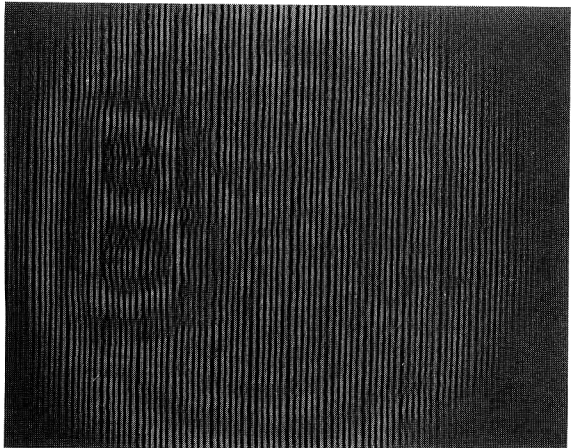
図4の干渉計において、光源のLDは、AlGaAsの近赤外LDである。光源の発振波長は780 nmで、電流変調率は $\beta = 3.4$ GHz/mAである。LD光は、開口数0.1、倍率5倍の対物レンズを用いて直径7 mmの平行光となる。周波数変調されたレーザー光は、2つの光路差($l_1 = 15$ mm, $l_2 = 45$ mm)に“G”と“B”の文字を表す2次元位相物体が



(a)



(b)

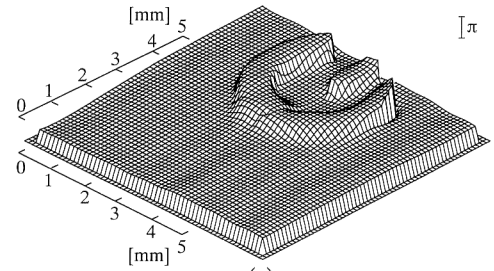


(c)

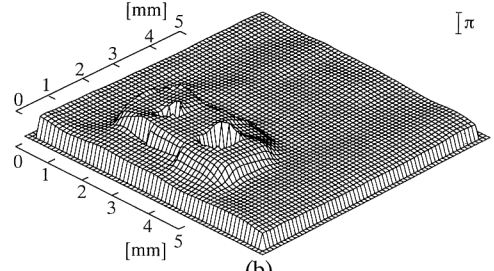
図6 多重位相物体の選択的イメージングの実験結果。

置かれたトワイマン・グリーン干渉計へ入射する。位相物体は、ホログラム乾板に写真露光した後、漂白したトランスパレンシーである。

図6(a)は、図4の干渉計で光源のLDを無変調のバイア



(a)



(b)

図7 フーリエ変換法により計算された位相分布。

ス電流で直流駆動し、チューナを用いずに干渉縞を撮影した実験結果である。図6(b), (c)は、位相物体“G”と“B”を測定した結果で、各々の光路差に比例したビート周波数を有する干渉信号がチューナーにより選択され、干渉縞画像としてイメージングされている。このときのLD変調電流振幅は、振幅 $i_m = 5.9 \text{ mA}$ である。

この方法のひとつの応用として、それぞれの物体の位相分布の導出がある。測定された干渉画像は、式(4)と式(7)から、各々の光路差に比例した空間キャリア f_i が重畳しているため、フーリエ変換法¹⁰⁾を適用して、位相分布を計算することができる。図6(b), (c)の干渉縞は、2次元フーリエ変換され、フーリエスペクトルが求められる。位相分布は、+1次のスペクトルを原点に移動させ、逆フーリエ変換された信号の位相成分から計算される。図7(a), (b)は、図6(b), (c)の測定結果から求められた位相分布である。それぞれ“G”と“B”の位相分布だけが抽出されており、本方法により、多重化された干渉画像の中から、各々の位相分布が独立に測定されている。

2.3 多重イメージ間のクロストークと縦分解能

選択的イメージング法の縦分解能は、次式で与えられることが報告されている¹³⁾。

$$\Delta l_{\text{res}} = l_n / Q \quad (8)$$

ここで、 Q は、中心周波数 $\nu_{b,n}$ 、バンド幅 $2B$ をもつチューナーの Q 値、 $Q = \nu_{b,n} / (2B)$ である。式(8)は、隣り合う干渉信号のスペクトルがチューナーのバンド幅以上に離れている条件、 $\nu_{b,n} - \nu_{b,(n-1)} \geq 2B$ から導出されている。したがって、多重化された物体が式(8)を満たす間隔以上に置かれていれば、クロストークなく多重イメージングを実現

できる。

通常の干渉ビート信号は、 ν_{bn} に唯一のスペクトルをもっており、ビート周波数がチューナーの中心周波数と等しくないと、減衰してしまう。式(8)は、この仮定の下で成り立っていると考えられる。しかし、半導体レーザーを鋸歯状波で変調することによって生成された干渉ビート信号のスペクトルは、通常のビート信号のスペクトルと大きく異なることが示されている¹⁵⁾。これは、ビート信号が連続的に変化している変調周期が有限であるため、鋸歯状波変調の繰り返し部分での干渉信号の不連続性が、スペクトル分布に大きな影響を与えるためである。本干渉法においても、連続的に走査できるLDの周波数変調幅が有限であるため、 x 方向1ラインで16周期の鋸歯状波変調を行い、干渉ビート信号を生成している。以下に文献15)の解析を用いて、本干渉法の縦分解能について議論する。

中心周波数 $2/T$ のチューナーを通過したLDの鋸歯状波変調により生成された多重干渉信号は、次式で与えられる¹⁴⁾。

$$s_r(t) = \sum_{i=1}^N D_i B_i \cos(2t/T + \phi_i) \quad (9)$$

式(9)は、式(5)で表されるカメラの出力信号が変調周波数の倍の周波数 $2/T$ をもつチューナーを通過したときの信号を表している。ここで、多重化された各干渉信号の中で $2/T$ の周波数スペクトル成分だけが通過しており、その割合を係数 D_i で表している。式(9)の干渉縞変調強度係数 D_i とその位相 ϕ_i は、変調周波数とビート周波数の比である $b_{ri} = \nu_{bi} T$ の関数となっている。

図8は、 D_i を b_{ri} の関数として数値計算した結果である。 b_{ri} が整数の場合、すなわちビート信号の周波数が変調周波数の整数倍のとき、干渉ビート信号は、各変調周期の始めと終わり等で等しい位相をもつようになり、時間に対して連続的な正弦波となる。 b_{ri} が2以外の整数でビート周波数がチューナーの周波数と異なると、入力信号が完全に減衰し、 D_i は0となる。 b_{ri} が2のときは、全信号が通過し、 D_i は1となる。したがって、 b_{ri} が整数で時間に対して連続的な正弦波となる場合、縦分解能は式(8)で記述できる。 b_{ri} が非整数のとき、つまりビート周波数が変調周波数の非整数倍のとき、図8より D_i が有限な値をもつことがわかる。これは、干渉ビート信号の位相に時間的な不連続性が生じ、時間に対して連続的な正弦波とならず、ビート信号がチューナーの中心周波数のスペクトル成分をもつようになるためである¹⁵⁾。この場合、本報告の干渉法で抽出された干渉信号間に漏れが生じ、測定された干渉画像に他の画像成分が挿入されてくるクロストークが生じる。よって、この場

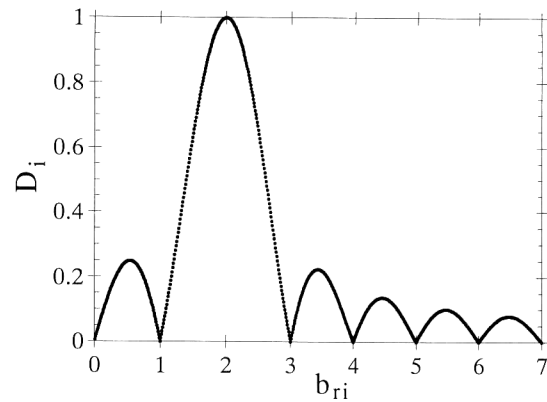


図8 チューナーを通過する多重干渉信号の割合を表す係数 D_i と変調周波数とビート周波数の比 b_{ri} との関係。

合の縦分解能は、式(8)で説明されなくなる。クロストークの問題に対するひとつの解決方法は、広帯域な変調周波数領域を有する光源を用いて、 x 方向1ラインのスキューニングの間、光源の周波数を連続的に変調することである。このとき、干渉ビート信号は、1ラインのスキューニングの間、連続的なビート信号となり、本稿で議論したクロストークの問題はなくなる。

レーザーリフレクトメトリーの中で、半導体レーザーを光源とした時間領域リフレクトメトリー、周波数領域リフレクトメトリー、コヒーレンス領域リフレクトメトリーについて概観した。さらに、周波数領域リフレクトメトリーの測定原理を2次元干渉縞信号へ応用し、任意の光路差に置かれた多重位相物体の中から所望の物体の2次元位相情報を選択的に結像することができる方法について、筆者らの研究に基づき解説した。近年、広帯域で高速に周波数変調が可能なLD光源や新しい機能を有する計測機器が次々に誕生しており、コンピューターの発達による計算処理能力が向上している。これらの科学技術の発展をリフレクトメトリーへ応用することにより、測定精度の向上や新しいリフレクトメトリー技術の展開が期待される。

文 献

- 1) Y. Ishii: "Recent developments in laser-diode interferometry," Opt. Lasers Eng., **14** (1991) 293-309.
- 2) B. L. Stann, W. C. Ruff and Z. G. Sztankay: "Intensity-modulated diode laser radar using frequency-modulation/continuous-wave ranging techniques," Opt. Eng., **35** (1996) 3270-3278.
- 3) E. A. Wachter and W. G. Fisher: "Coherent-burst laser ranging: Decoupling resolution and unambiguous range," Opt. Lett., **22** (1997) 570-572.
- 4) S. A. Kingsley and D. E. N. Davies: "OFDR diagnostics for

- fibre and integrated-optic systems,” *Electron. Lett.*, **21** (1985) 434-435.
- 5) D. Uttam and B. Culshaw: “Precision time domain reflectometry in optical fiber systems using a frequency modulated continuous wave ranging technique,” *J. Light-wave Technol.*, **LT-3** (1985) 971-977.
 - 6) S. R. Chinn, E. A. Swanson and J. G. Fujimoto: “Optical coherence tomography using a frequency-tunable optical source,” *Opt. Lett.*, **22** (1997) 340-342.
 - 7) 宮原利治, 原 武文, 中村孝一郎, 伊藤弘昌: “周波数シフト帰還型レーザーを用いた高精度ファイバ長測定”, *Optics Japan '97 講演予稿集* (1997) pp. 55-56.
 - 8) N. Tan-no, T. Ichimura, T. Funaba, N. Anndo and Y. Odagiri: “Optical multimode frequency-domain reflectometer,” *Opt. Lett.*, **19** (1994) 587-589.
 - 9) T. Yoshimura, N. Masazumi and Y. Shigematsu: “Imaging a reflecting plate located in scattering media using optical frequency domain reflectometry,” *Opt. Rev.*, **4** (1997) 221-227.
 - 10) M. Takeda and M. Kitoh: “Spatiotemporal frequency multiplex heterodyne interferometry,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **9** (1992) 1607-1614.
 - 11) K. Hotate and T. Okugawa: “Selective extraction of a two-dimensional optical image by synthesis of the coherence function,” *Opt. Lett.*, **17** (1992) 1529-1531.
 - 12) K. Hotate and T. Saida: “Phase-modulating optical coherence domain reflectometry by synthesis of coherence function,” *Electron. Lett.*, **31** (1995) 475-476.
 - 13) R. Onodera and Y. Ishii: “Selective imaging with a frequency-modulated laser-diode interferometer,” *Opt. Lett.*, **20** (1995) 761-763.
 - 14) R. Onodera and Y. Ishii: “Multiplex imaging by a frequency-ramped laser-diode interferometer,” *Opt. Commun.*, **149** (1998) 143-151.
 - 15) R. Onodera and Y. Ishii: “Effect of beat frequency on the measured phase of laser-diode heterodyne interferometry,” *Appl. Opt.*, **35** (1996) 4355-4360.

(1998年11月24日受理)