

## 論 文

# 方形波重畳三角波変調による半導体レーザの線形光周波数掃引とそのFMCWリフレクトメトリへの応用

飯山 宏一<sup>†</sup>      岡本 卓也<sup>†\*</sup>      高宮 三郎<sup>†</sup>

## Linearizing Optical Frequency Sweep of a Laser Diode by Injection Current Modulation with a Rectangular-Signal-Superimposed Triangular Signal for FMCW Reflectometry

Koichi HIYAMA<sup>†</sup>, Takuya OKAMOTO<sup>†\*</sup>, and Saburo TAKAMIYA<sup>†</sup>

あらまし FMCWリフレクトメトリにおける空間分解能向上を目的として、方形波重畳三角波変調による半導体レーザの光周波数掃引の線形化について述べた。本方法は、光周波数掃引のための三角波変調電流に、それに同期した方形波を重畳することにより、三角波の折返し点付近での光周波数の応答遅れを補正するものであり、方形波振幅を最適化することにより、光周波数掃引を線形化できる。本方法を実際にFMCWリフレクトメトリの光源である半導体レーザに適用し、方形波振幅の最適化により空間分解能が3～6倍向上することを示した。

キーワード 光干渉センサ, FMCWリフレクトメトリ, 半導体レーザ, 変調

### 1. ま え が き

高度情報処理に向けた大容量光通信や高性能光計測の社会的要請を受けて、光導波路や光集積回路の研究・開発が盛んに行われている。それに伴い、これらの光素子の性能評価のための高空間分解能内部診断法の確立も望まれており、各種の診断法が開発されている [1]～[7]。FMCW (Frequency-Modulated Continuous Wave) リフレクトメトリはそのような診断法の一つであり、図1に示すように、光源の光周波数を時間的に線形に掃引し、鏡から反射される参照光と被診断光素子からの反射光 (あるいは後方散乱光) を干渉させる。参照光と反射光との間には、その光路長差に比例した時間差があり、干渉信号はその時間差に比例したビート周波数をもつ。従って、干渉信号をスペクトル解析することによって光導波路の長さ方向の特性分布を知ることができる。この方法の空間分解能  $\delta z$  は、被診断光素子の屈折率を  $n$ 、真空中での光速を  $c$ 、光

周波数掃引幅を  $\Delta f$  とすると、次式で与えられる。

$$\delta z = \frac{c}{2n\Delta f} \quad (1)$$

半導体レーザは、その注入電流を変えることによって容易に発振周波数を変えることができることはよく知られており、FMCWリフレクトメトリの光源に適している。しかしながら、半導体レーザの熱抵抗により光周波数変化は電流変化に対して遅れるため、三角波あるいはのこぎり波で注入電流を変化させても光周波数掃引は非線形となり、空間分解能が劣化する。そのため、半導体レーザの線形光周波数掃引法を開発する必要がある。我々はこれまでに、基準干渉計の干渉

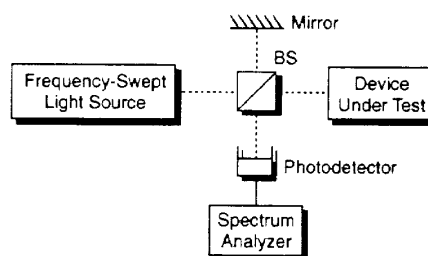


図1 FMCWリフレクトメトリの構成図  
Fig.1 Configuration of FMCW reflectometry.

<sup>†</sup> 金沢大学工学部, 金沢市

Faculty of Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa-shi, 920-8667 Japan

\* 現在, 富士通北陸通信システム株式会社

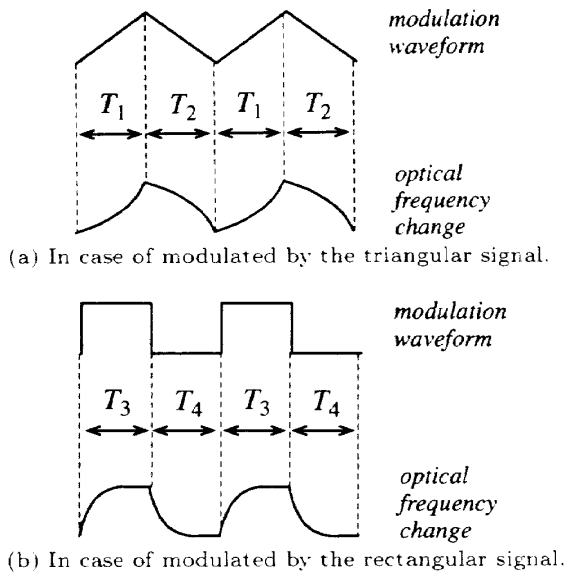


図2 応答遅れによる光周波数変化の波形  
Fig. 2 Waveform of the optical frequency change due to response lag.



図3 補正された半導体レーザーの変調波形  
Fig. 3 Modified modulation waveform of a laser diode.

信号を外部信号と位相比較して、その誤差信号を半導体レーザーの変調電流に帰還する方法[7]~[9]やデジタルフィルタを用いた半導体レーザーの光周波数掃引の線形化[10]を提案している。ここでは、半導体レーザーの光周波数掃引線形化のより簡便な方法として、光周波数掃引のための三角波変調電流に、それに同期した方形波を重畳する方法について報告する。

## 2. 光周波数掃引線形化の原理

### 2.1 基本的考え方

半導体レーザーの注入電流変調による光周波数の応答には、遅れがあることが知られている。そのため、注入電流を三角波で変調すると、光周波数の時間波形は図2 (a) に示すようにひずむ。一方、注入電流を方形波で変調すると、光周波数の時間波形は図2 (b) のようにひずむ。図2 (a) と (b) とを比較すると、(a) の  $T_1$  部分の波形と (b) の  $T_3$  部分の波形は逆方向にひずんでおり、(a) の  $T_2$  部分の波形と (b) の  $T_4$  部分の波形についても逆方向にひずむことがわかる。そ

のため、三角波の  $T_1$  部分と方形波の  $T_3$  部分を同期させ、三角波の  $T_2$  部分と方形波の  $T_4$  部分を同期させて加えると、波形のひずみを少なくできると考えられる。つまり、図3に示す波形で半導体レーザーの電流変調を行うことになる。この場合、補正の程度は重畳する方形波の振幅に依存し、最適な方形波振幅が存在する。

### 2.2 シミュレーション方法

本方法による光周波数掃引の線形化を、簡単なモデルを用いて、シミュレーションにより確認する。半導体レーザーの光周波数の変化は、注入電流変調による交流的变化や注入電流変調によるバイアス点変化による直流的变化(チャープ)など、さまざまな要因が考えられるが、本論文では交流的考えのみを採用するものとする。半導体レーザーの注入電流波形を  $f_m(t)$ 、半導体レーザーの光周波数変化のインパルス応答を  $h(t)$  とおくと、光周波数掃引波形  $\nu(t)$  は次式で与えられる。

$$\nu(t) = \alpha \{f_m(t) * h(t)\} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$  は注入電流-光周波数変換係数(周波数変調効率)、 $*$  は畳込み積分を表し、インパルス応答  $h(t)$  により応答遅れを記述する。半導体レーザーの光周波数の応答遅れの時定数は複数個あることが知られており[11].[12]、光周波数変化の単位ステップ応答  $g(t)$  は次式で与えられる。

$$g(t) = 1 - \sum_k a_k \exp(-t/\tau_k) \quad (3)$$

$$\sum_k a_k = 1 \quad (4)$$

ここで、 $\tau_k$  は応答遅れの時定数であり、その数として3個あるいは4個が報告されている。このとき、インパルス応答  $h(t)$  は  $g(t)$  を時間微分することによって得られ、次式となる。

$$h(t) = \sum_k \frac{a_k}{\tau_k} \exp(-t/\tau_k) \quad (5)$$

### 2.3 時定数が1個のとき

まず、簡単のために、時定数が1個のとき ( $k = 1$  のみを考え、 $a_1 = 1$  とする) のシミュレーション結果を示す。図4に、 $\tau_1 = 200 \mu s$  のときの光周波数掃引波形のシミュレーション結果を示す。図において、 $\Delta I_t$  および  $\Delta I_r$  はそれぞれ三角波変調振幅および方形波変調振幅を表し、いくつかの  $\Delta I_r / \Delta I_t$  についてシミュレーションを行った。なお、変調の繰返し周波数は100

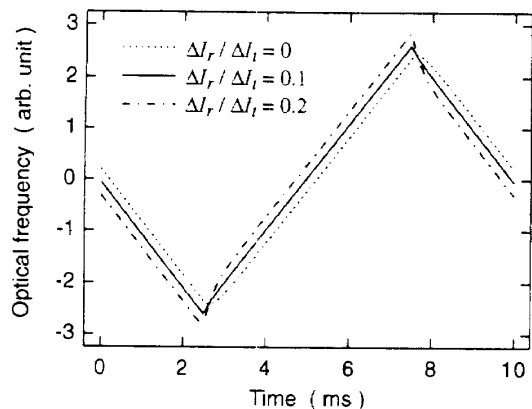


図4  $\tau_1 = 200 \mu\text{s}$  のときの光周波数掃引波形のシミュレーション結果  
 Fig.4 Simulated result of the waveform of the optical frequency sweep for  $\tau_1 = 200 \mu\text{s}$ .

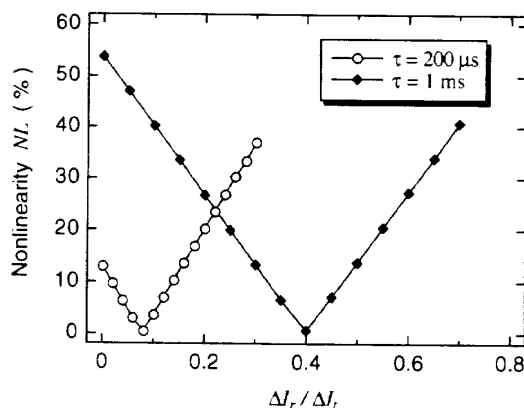


図6 方形波変調振幅に対する光周波数掃引の非線形性の変化  
 Fig.6 Calculated nonlinearity of the optical frequency sweep against the amplitude of the rectangular signal.

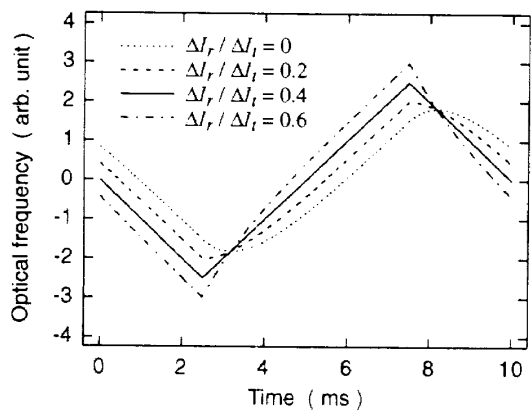


図5  $\tau_1 = 1 \text{ms}$  のときの光周波数掃引波形のシミュレーション結果  
 Fig.5 Simulated result of the waveform of the optical frequency sweep for  $\tau_1 = 1 \text{ms}$ .

Hzとした。この図より、 $\Delta I_r / \Delta I_t = 0.1$  のときに光周波数掃引はほぼ線形化されていることがわかり、この値が最適値と考えられる。また、 $\Delta I_r / \Delta I_t = 0.2$  のときには光周波数掃引波形は補正前と比べて逆方向にひずんでおり、過補正になっていることがわかる。また、方形波変調振幅  $\Delta I_r$  が大きくなるに従って光周波数掃引幅が大きくなることもわかる。

図5に、 $\tau_1 = 1 \text{ms}$  および変調の繰返し周波数が 100 Hz のときの光周波数掃引波形のシミュレーション結果を示す。この図より、 $\Delta I_r / \Delta I_t = 0.4$  のときに光周波数掃引はほぼ線形化されていることがわかり、この値が最適値と考えられる。一方、 $\Delta I_r / \Delta I_t = 0.2$  のときには補正不足、 $\Delta I_r / \Delta I_t = 0.6$  のときには過補正になっていることがわかる。また、図4と同様に、方

形波変調振幅  $\Delta I_r$  が大きくなるに従って光周波数掃引幅が大きくなることもわかる。

図6はシミュレーション結果から得られた光周波数掃引の非線形性の方形波変調振幅に対する依存性であり、時定数  $\tau = 200 \mu\text{s}$  および  $\tau = 1 \text{ms}$  の場合について描いた。図の横軸は  $\Delta I_r / \Delta I_t$  であり、縦軸は次式で定義した非線形性  $NL$  を表す。

$$NL = 100 \times \sqrt{\frac{\{f_m(t) - \nu(t)/\alpha\}^2}{f_m^2(t)}} \quad (\%) \quad (6)$$

光周波数掃引が完全に線形であれば  $\nu(t) = \alpha f_m(t)$  となるので非線形性  $NL = 0\%$ 、完全に非線形であれば  $\nu(t) = 0$  であるので非線形性  $NL = 100\%$  となり、 $NL$  が小さいほど線形性が良いことを表している。この図より、時定数  $\tau$  が大きくなるほど非線形性  $NL$  が最小になる方形波変調振幅（最適方形波変調振幅）は大きくなること、非線形性は方形波変調振幅  $\Delta I_r$  に対して直線的に変化することがわかる。

図7は時定数  $\tau$  に対する最適な方形波変調振幅  $(\Delta I_r / \Delta I_t)_{opt}$  とそのときの非線形性  $NL$  の変化の計算結果である。この図より、時定数  $\tau$  が大きくなると最適な方形波振幅は直線的に増加すると共に、非線形性  $NL$  は大きくなることわかる。このことから、本方法は、時定数の小さな半導体レーザの光周波数掃引を線形化する場合に効果が大きいことがわかる。

#### 2.4 時定数が2個のとき

次に、より実際の半導体レーザに近い例として2個の時定数をもつと仮定し、インパルス応答  $h(t)$  を次式で表す。

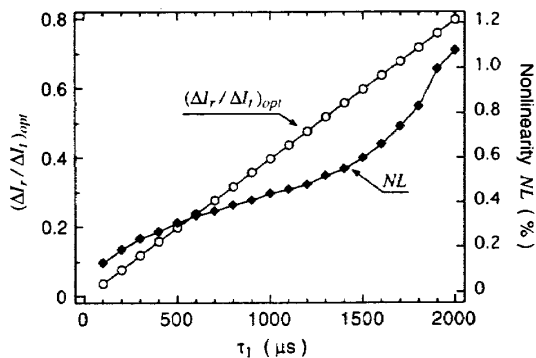


図7 時定数  $\tau$  に対する最適な方形波変調振幅および光周波数掃引の非線形性の変化

Fig.7 Optimum amplitude of the rectangular signal and the nonlinearity of the optical frequency sweep against the time constant  $\tau$ .

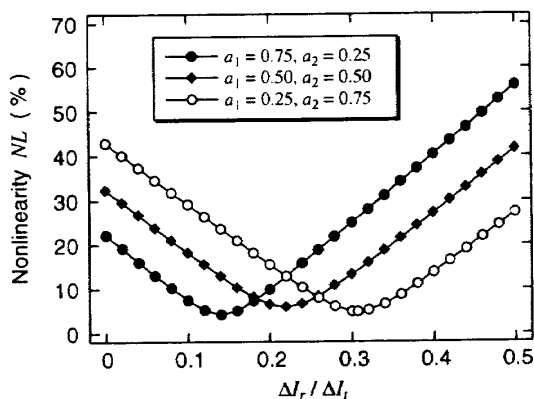


図8 時定数が2個の場合の方形波変調振幅に対する光周波数掃引の非線形性の変化

Fig.8 Calculated nonlinearity of the optical frequency sweep against the amplitude of the rectangular signal when two time constant in the response lag is considered.

$$h(t) = \frac{a_1}{\tau_1} \exp(-t/\tau_1) + \frac{a_2}{\tau_2} \exp(-t/\tau_2) \quad (7)$$

但し、 $a_1 + a_2 = 1$  である。

図8は、2個の時定数を考慮したときの方形波変調振幅に対する光周波数掃引の非線形性  $NL$  の計算結果である。時定数は  $\tau_1 = 200\mu\text{s}$  および  $\tau_2 = 1\text{ms}$  であり、二つの応答遅れの値 ( $a_1, a_2$ ) を (0.75, 0.25)、(0.5, 0.5) および (0.25, 0.75) の3種類について描いた。この図より、2個の時定数を考慮した場合においても、方形波を重畳することにより光周波数掃引の線形性を大きく改善できること、また、 $a_1$  の値が大きい、つまり、小さい時定数の寄与が大きいほど最適な方形波変調振幅が小さくなることがわかり、これは、図6の結果からも予想されることである。また、非線形性はいずれの場合も5%程度まで改善されているが、1個の

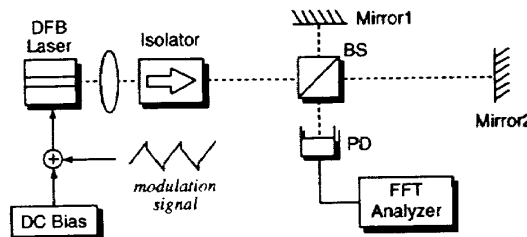


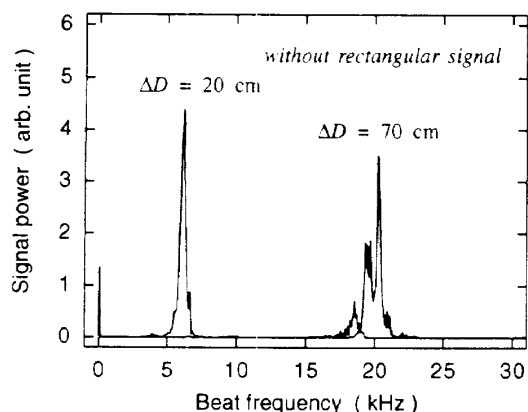
図9 FMCW リフレクトメトリの実験システム  
Fig.9 Experimental setup for FMCW reflectometry.

時定数の場合の1%以下と比べると劣化していることがわかる。このことより、複数の応答遅れの時定数をもつ半導体レーザに対して本方法を適用する場合は、ある程度の非線形性が残存することになり、変調信号の繰返し周波数が高いときや診断距離が遠いときには、診断プロファイルが広がって空間分解能の劣化をもたらす。また、本論文では交流的变化のみを考慮したが、実際には直流的变化(チャージング)も関係してくるので、実際の光周波数掃引の線形性は、上記シミュレーション結果より劣化するものと考えられる。

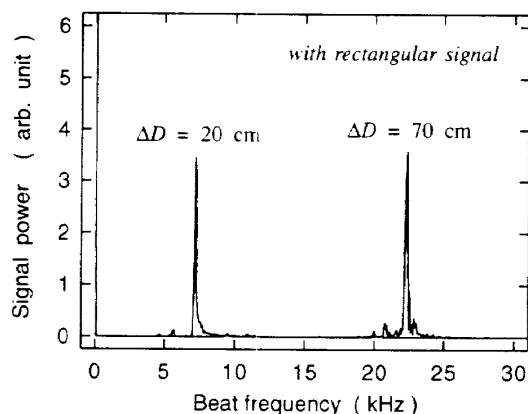
### 3. FMCW リフレクトメトリへの応用

前章のシミュレーション結果より、方形波重畳により半導体レーザの光周波数掃引の線形性が向上することがわかったので、その効果を実験により確認した。本研究の目的は、高分解能 FMCW リフレクトメトリを構成するための光周波数掃引の線形化を行うことであること、光周波数掃引波形を直接測定することは困難であるので、FMCW リフレクトメトリを構成して実験を行った。FMCW リフレクトメトリでは、干渉信号は参照光と信号光の光路長差に比例するビート周波数をもつが、光周波数掃引が線形の際にはビート周波数は一定となって干渉信号スペクトルは細くなるが、光周波数掃引が非線形の際にはビート周波数は変動し、その結果、干渉信号スペクトルは広がりをもつ。それ故、干渉信号スペクトルの広がり程度を測定し、光周波数掃引の線形性を評価する。

図9に実験システムを示す。光源には1.55  $\mu\text{m}$  帯 DFB レーザ (閾電流値 24 mA, スペクトル線幅 5 MHz, NTT: NLK1553CCA) を使い、その注入電流を三角波で変調することにより光周波数を掃引した。被診断光素子には鏡 (Mirror2) を用いた。変調の繰返し周波数 32 Hz, 直流バイアス電流 100 mA, 三角波変調振幅 46 mA (光周波数掃引幅 50 GHz 程度) とした。干渉信号スペクトルの測定には FFT アナライ



(a) without the rectangular signal.



(b) with the rectangular signal.

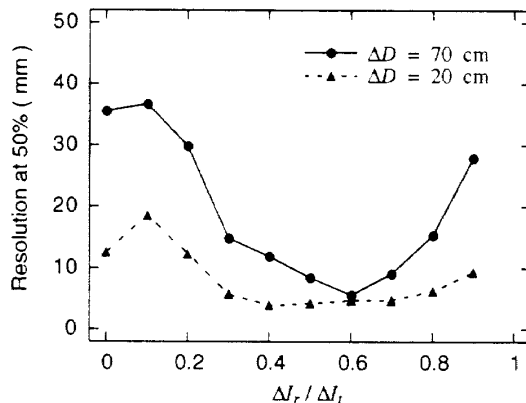
図10 干渉信号スペクトルの測定結果

Fig. 10 Measured interference signal spectrum.

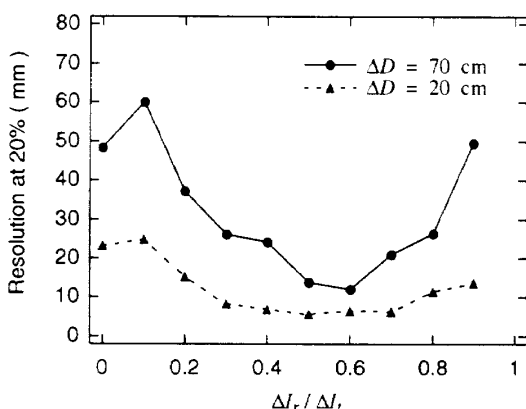
ザを用い、窓関数にはハニング関数を用いた。なお、この条件での理論的空間分解能は3 mmである。

図10に干渉信号スペクトルの測定結果を示す。図において、 $\Delta D$ は被診断光素子である鏡(Mirror2)の位置である。同図(a)は方形波を重畳しない場合、(b)はほぼ最適な振幅の方形波を重畳した場合であり、方形波振幅 $\Delta I_r$ は $\Delta D = 20$  cmおよび $\Delta D = 70$  cmに対してそれぞれ $\Delta I_r/\Delta I_t = 0.5$ および $\Delta I_r/\Delta I_t = 0.7$ である。この図より、方形波を重畳することにより干渉信号スペクトルが細くなり、空間分解能が向上することがわかる。これはすなわち、光周波数掃引が線形化されたことを表している。また、干渉信号スペクトルのすそ野の部分が高周波側に若干広がっていることより、若干過補正になっていると考えられる。

図11に、方形波振幅に対する空間分解能の変化を示す。横軸は、三角波振幅で規格化した方形波振幅 $\Delta I_r/\Delta I_t$ である。また、空間分解能は干渉信号スペクトルのピーク強度の50%の信号強度での全幅と20%の信号強度での全幅で定義し、それぞれ同図(a)および



(a) Full width at half maximum.



(b) Full width at 20% of the maximum.

図11 方形波振幅に対する空間分解能の測定結果

Fig. 11 Measured spatial resolution against the amplitude of the rectangular signal.

表1 方形波重畳による空間分解能の向上

Table 1 Improvement of the spatial resolution by superimposing the rectangular signal.

| 診断距離        | 70 cm  | 20 cm  |
|-------------|--------|--------|
| 重畳前 (50%地点) | 36 mm  | 13 mm  |
| 重畳前 (20%地点) | 48 mm  | 23 mm  |
| 重畳後 (50%地点) | 5.7 mm | 4.0 mm |
| 重畳後 (20%地点) | 12 mm  | 5.7 mm |
| 向上率 (50%地点) | 6.3倍   | 3.25倍  |
| 向上率 (20%地点) | 4.0倍   | 4.0倍   |

び(b)に示す。なお、式(1)で与えられる理論的空間分解能は、ピーク強度の50%の信号強度での全幅とほぼ等しい。この図より、 $\Delta I_r/\Delta I_t = 0.5 \sim 0.7$ に最適値があることがわかる。方形波振幅が最適値のときの空間分解能をまとめたのが表1であり、空間分解能は方形波重畳前と比べて3~6倍向上し、理論的空間分解能(3 mm)とほぼ等しい空間分解能(5.7 mmおよび4.0 mm)が得られることがわかる。理論的空間分

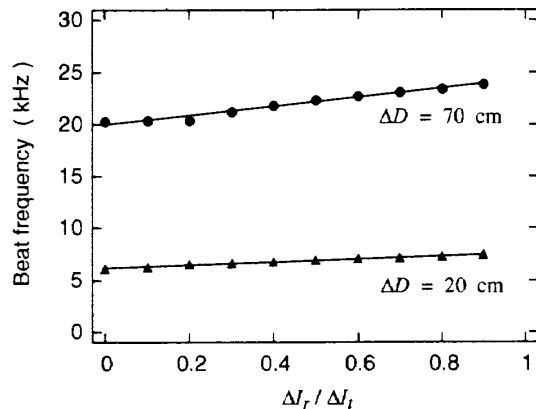


図12 方形波振幅に対するビート周波数の変化  
Fig.12 Beat frequency against the amplitude of the rectangular signal.

解能との違いは、光周波数応答の遅れの時定数が複数個あること、および、光周波数の直流的变化（チャージング）によるものと考えられる。

ところで、図10より方形波を重畳することにより干渉信号のビート周波数が高くなっていることがわかる。そこで、図12に方形波振幅に対するビート周波数の変化の測定結果を示す。方形波振幅  $\Delta I_r$  が大きくなるに従ってビート周波数が高くなることからわかる。これは、図4および図5からわかるように、方形波を重畳することにより光周波数掃引幅が大きくなるためである。FMCWリフレクトメトリにおいて周波数-距離変換を行う際には注意しなければならない。

#### 4. む す び

本研究では、FMCWリフレクトメトリにおける半導体レーザの光周波数掃引の線形化法として、方形波重畳三角波による注入電流変調について述べた。まず、方形波重畳法の原理について述べ、光周波数が交流的にのみ変化するとした簡単なモデルを用いたシミュレーションにより、最適な方形波変調振幅が存在することを示した。次に、方形波重畳の効果を実験的に検証するため、FMCWリフレクトメトリを構成して、その光源である半導体レーザに適用した。その結果、三角波変調振幅に対して方形波変調振幅の比率が0.5～0.7のときに空間分解能が最も向上することがわかった。

本研究で述べた方法では、完全な光周波数掃引の線形化は困難であるが、非常に簡単な方法にもかかわらず大きな改善が得られる点で、非常に有効な方法と考えられる。半導体レーザの光周波数応答の遅れの程度

は、半導体レーザ自身、マウント形状や駆動回路の周波数特性などにより千差万別である。そのため、本研究で求められた方形波振幅の最適値はすべての半導体レーザに対して適用できないかもしれないが、程度の差こそあれ、適用できると考えられる。

謝辞 本研究は、文部省科学研究費補助金（基盤研究(A)(2) 課題番号08555090)の補助により行われた。

#### 文 献

- [1] K. Takada, N. Takato, J. Noda, and N. Uchida, "Interferometric optical-time-domain reflectometer to determine backscattering characterization of silica-based glass waveguide." *J. Opt. Soc. Am. A*, vol.7, no.5, pp. 857-867, May 1990.
- [2] M. Kobayashi, H. Hanafusa, K. Takada, and J. Noda, "Polarization-independent interferometric optical-time-domain reflectometer," *J. Lightwave Technol.*, vol.9, no.5, pp.623-628, May 1991.
- [3] W. V. Sorin and D. M. Baney, "Measurement of Rayleigh backscattering at 1.55  $\mu\text{m}$  with 32  $\mu\text{m}$  spatial resolution." *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.4, no.4 pp.374-376, April 1992.
- [4] H. Barfuss and E. Brinkmeyer, "Modified optical frequency domain reflectometry with high spatial resolution for components of integrated optic systems," *J. Lightwave Technol.*, vol.7, no.1, pp.3-10, Jan. 1989.
- [5] W. V. Sorin, D. K. Donald, S. A. Newton, and M. Nazarathy, "Coherent FMCW reflectometry using a temperature tuned Nd:YAG ring laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.2, no.12, pp.902-904, Dec. 1990.
- [6] L.-T. Wang, K. Iiyama, F. Tsukada, N. Yoshida, and K. Hayashi, "Loss measurement in optical waveguide devices by using coherent frequency-modulated continuous-wave reflectometry." *Opt. Lett.*, vol.18, no.13, pp.1095-1097, July 1993.
- [7] L.-T. Wang, K. Iiyama, and K. Hayashi, "Excellent linearly frequency-swept light source for sensor system utilizing FMCW technique." *IEICE Trans. Electron.*, vol.E77-C, no.11, pp.1716-1721, Nov. 1995.
- [8] K. Iiyama, L.-T. Wang, and K. Hayashi, "Degradation of spatial resolution in FMCW reflectometry due to nonlinear optical frequency sweep and its compensation." *Proc. Integrated Optics and Opt. Comm., Hong Kong*, no.WB3-4, pp.64-65, June 1995.
- [9] K. Iiyama, L.-T. Wang, and K. Hayashi, "Linearizing optical frequency-sweep of a laser diode for FMCW reflectometry." *J. Lightwave Technol.*, vol.14, no.2, pp.173-178, Feb. 1996.
- [10] 飯山宏一, 岡本卓也, 能川昌久, 林 健一, "FMCWリフレクトメトリのための半導体レーザの線形光周波数掃引-デジタルフィルタを用いた実現," *信学技報, LQE96-18*, May 1996.
- [11] M. Ito and T. Kimura, "Stationary and transient

thermal properties of semiconductor laser diodes.”  
IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-17, no.5,  
pp.787-795, May 1981.

- [12] 王 陸唐, 飯山宏一, 林 健一, “光周波数掃引の非線形性  
による FMCW Reflectometry の空間分解能劣化に関する  
一考察,” 信学論 (C-I), vol.J78-C-I, no.3, pp.166-172,  
March 1995.

(平成9年8月28日受付)

#### 飯山 宏一 (正員)



昭60金沢大・工・電子卒, 昭62同大大学院  
院修士課程了, 同年横河・ヒューレット・パッ  
カード(株)入社, 昭63金沢大・工・助手, 平  
7同講師, 平8同助教授, 光ファイバセンサ,  
光リフレクトメトリ, 光導波路の研究に従事,  
工博, 日本応用物理学会, IEEE 各会員

#### 岡本 卓也 (正員)



平7金沢大・工・電気・情報卒, 平9同大  
大学院修士課程了, 同年富士通北陸通信シス  
テム(株)入社, 在学中, FMCW リフレクト  
メトリの研究に従事.

#### 高宮 三郎 (正員)



昭40東工大・理工・物理卒, 同年三菱電  
機(株)入社, 中央研究所, 北伊丹製作所およ  
び光・マイクロ波デバイス開発研究所にて,  
半導体レーザ, 光検出器, 化合物半導体電子  
デバイスの研究・開発, 製造事業化, 実用化  
に従事, 平9金沢大・工・教授, 工博, 昭50  
米沢記念学術奨励賞受賞, 昭51論文賞受賞, 日本応用物理学会  
会員.