

研究

出力一定 FM レーザダイオードとその干渉計測への応用

高橋 佳孝・大出 暢之・芳野 俊彦

群馬大学工学部電気電子工学科 〒376 桐生市天神町 1-5-1

(1993年9月27日受付, 1993年11月17日受理)

Amplitude-Stabilized FM Laser Diode and Its Interferometric Sensing Application

Yoshitaka TAKAHASHI, Nobuyuki OHDE and Toshihiko YOSHINO

Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Gunma University, 1-5-1, Tenjin-cho, Kiryu 376

(Received September 27, 1993; Accepted November 17, 1993)

A direct frequency-modulated (FM) laser diode light source without light power variation is developed. The amplitude variation of an FM laser diode is compensated by means of a feedback system using a superluminescent diode (SLD) as an external light power controller in a way that part of the output light amplified by the SLD is compared with a reference voltage in a differential amplifier and fed back to the SLD driving circuit. A stabilization factor of 150 and 0.9 mW output power at a modulation frequency of 70 Hz was obtained. The amplitude-stabilized FM laser diode was applied to the measurement of absolute distance by use of the frequency modulation continuous wave (FMCW) interferometry. A precise reading of subfringes is demonstrated for sensing path differences in a Michelson interferometer.

1. はじめに

レーザダイオードは注入電流を変調することで容易に周波数変調ができるので光センシング用光源として広く用いられている。例えばその広い周波数同調性を利用した変調分光法は回折格子分光器よりもはるかに高い分解能を得ることができ、変調周波数と同期検波したり、光ヘテロダイン検波した例が報告されている^{1,2)}。干渉計測においては、外部周波数変調器やピエゾトランスデューサ等を必要とせず簡便で安定な干渉を構成できるため、この特徴を活かし、FMCW 法干渉距離測定³⁻⁶⁾、位相シフト干渉計⁷⁾、位相ロック干渉計⁸⁾ など多くの研究が報告されている。こうした利点に反して、レーザダイオードの周波数変調には注入電流変化に伴い望ましくない出力変動が付随してしまう。この出力変動は実際の計測では測定誤差を引き起こしたり周波数変調域を制限したりする原因となる。このような変動の影響を除去する手段として計測された信号出力を強度変調波形の出

力で除算することで規格化する方法がある⁹⁾。しかしながらこの方法は電氣的な割算回路を必要とし、さらに出力信号が非線形応答を示したりバイアスが重畳しているような場合には適さず、一般に測定精度が低下する。

我々はこういった問題点の改良を目指して、注入電流変化に付随する周波数変調時の出力変動を抑制した、実用的な FM レーザダイオード光源を開発した。この出力一定 FM レーザダイオードは主として(1)所望の波長で発振する単一モードレーザダイオード、(2)外部光強度コントローラである光増幅器としてのスーパーluminescentダイオード (SLD)、(3)適当なバンドパスフィルタから構成されている。この出力一定 FM レーザダイオードは半導体素子を基本的構成としているので集積化やモノリシック化も可能であり、光計測のみならず多岐にわたる分野での利用が期待される。

2. 出力一定 FM レーザダイオードの構成

開発した出力一定 FM レーザダイオードの構成を

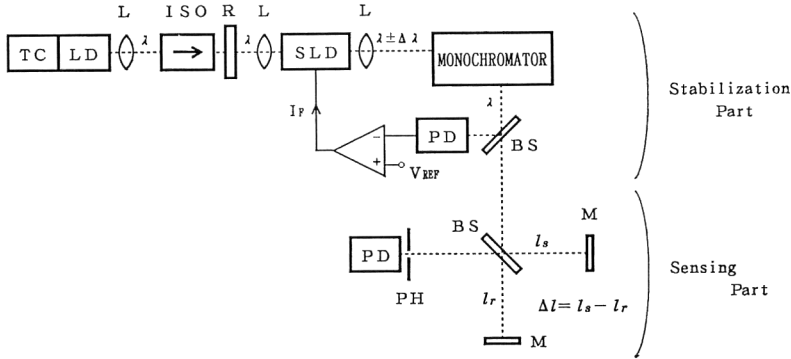


Fig. 1 Configuration of amplitude-stabilized FM laser diode system. LD : Laser diode, TC : Thermo-controller, L : lens, ISO : Faraday optical isolator, R : $\lambda/2$ plate, SLD : Superluminescent diode, PD : PIN photodiode, BS : Beam splitter, M : Mirror, PH : Pinhole.

Fig. 1 に示す。所望の波長の単一モードレーザダイオード (LD) の出射光は光増幅器である SLD に結合され SLD 活性層を導波し増幅される。SLD からの出射光は、モノクロメータや干渉フィルタなどの適当なバンドパスフィルタに通され、SLD 自身の (不要な) スペクトル成分が除去される。一部が PIN フォトダイオード (PD) で光電検出され、残りの大部分が所望の“出力一定 FM レーザダイオード”光として取り出される。PD で検出された光量信号は SLD 駆動回路内のアイソレーションアンプで出力の上限値を決める参照信号と比較され、その差動出力が SLD にフィードバックされる。このようにして光源である LD の周波数変調時に付随する出力変動は抑制され、出力一定 FM レーザダイオード光源が得られる。

3. 実験

3.1 光増幅器としての SLD

はじめに半導体光増幅器として用いた SLD の増幅 (透過) 特性の測定を行った。今回用いた SLD (浜松ホトニクス製) は GaAs/AlGaAs のダブルヘテロ接合からなる Fabry-Perot 型レーザの両端面に無反射コーティングを施した構造となっている。SLD 単体での発光スペクトルを **Fig. 2** に示す。中心波長 $\lambda \approx 820$ nm, スペクトル幅 $\Delta\lambda \approx 14$ nm である。コヒーレンス長 $L_c = \lambda^2/\Delta\lambda$ は約 $48 \mu\text{m}$ である。Fig. 2 のスペクトル波形を見ると SLD キャビティの縦モード間隔 $\Delta\lambda_{fs} = \lambda^2/2nd$ (光路長 $nd \approx 1$ mm) に相当する間隔 (0.33 nm) のキャビティモード構造を含んでいることがわかる。すなわちこの SLD は、進行波増幅器 (TWA) というよりも Fabry-Perot 型増幅器 (FPA) として動作するといえ

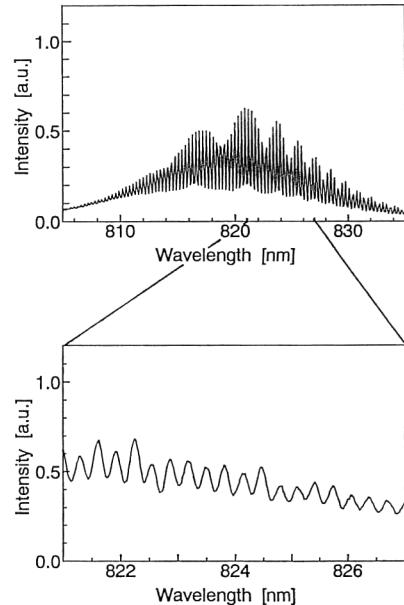


Fig. 2 Spectrum of SLD at an injection current of 90 mA. It involves multimodelike structures whose separation ($\Delta\lambda_{fs} = 0.33$ nm) corresponds to longitudinal mode spacing.

る⁹⁾。

次にこの SLD の光増幅器としての特性を評価するために、Fig. 1 に示す配置で LD 光と結合し、その透過特性を評価した。LD (シャープ製 : LT 015 MD) からの出射光 ($\lambda \approx 823$ nm) はコリメートし、戻り光による影響を除去するために光アイソレータに通した後、集光し SLD に入射結合する。LD からの出射偏光は SLD に TE-導波するように $\lambda/2$ 板で適宜調節される。SLD からの出射光は LD 光に加えて SLD 自身の幅広いスペク

トル成分を含んでいるので、コリメートされた後この余分な成分を除去するためにバンドパスフィルタとしてのモノクロメータ (JOVIN-YVON 製: HR-320, スペクトル幅=0.15 nm) に導かれる. こうして出射光のスペクトル成分の大部分が所望の LD 光成分となる. またこのとき SLD はその駆動電流の大きさにより増幅器にも減衰器にもなりうる. LD の駆動電流をパラメータとして, SLD の駆動電流を変化させながら SLD 透過後の出力を測定した結果を Fig. 3 に示す. 透過出力特性は SLD の利得特性を表し, SLD 単体の電流-光出力特性とはほぼ一致する.

3.2 DC フィードバック特性

Fig. 1 の配置で, モノクロメータからの出射光の一部を PD で光電検出し, その信号を 2 個の差動増幅器から構成されるフィードバック回路に帰還し SLD の増幅率を制御する. フィードバック特性を評価するために, LD を DC 駆動してその注入電流を変化させ SLD 透過後の出力を測定した結果を Fig. 4 に示す. LD の注入電流が増加しその光量が差動増幅器に入力される参照信号によって決まる上限値以上になるとリミッタ効果が働き, モノクロメータからの出力, すなわち所望のレーザー光の出力は一定となることがわかる (Fig. 4 (a) 参照). また LD 光を SLD に対し TE-導波ではなく TM-導波で入射したときにも同様のフィードバック特性が得られたが, このとき SLD の増幅率は約 1/5 になる (Fig. 4 (b) 参照).

3.3 出力一定 FM レーザーダイオード

LD の駆動電流として閾値以上のバイアス電流 (I_b) に変調周波数 ω の交流電流 ($I_m \cos \omega t$) を重畳することで LD を周波数変調する ($I = I_b + I_m \cos \omega t$). モノクロ

メータからの出射光はフィードバック機構により出力一定 FM レーザーダイオード光として取り出される. $\omega = 2\pi \cdot 70 \text{ Hz}$, $I_b = 60 \text{ mA}$, $I_m = 3 \text{ mA}$ のときの出力を Fig. 5 に示す. 上の波形はフィードバックのないときで, 入力光の周波数変調に伴い出力も正弦波状に変動しているが, フィードバックのあるときは SLD の増幅率が制御されることで下の波形に見られるように出力は一定となっていることがわかる. このときの出力一定 FM レーザーダイオード光の出力は 0.9 mW であった.

フィードバックのないときとあるときの変調度の比で

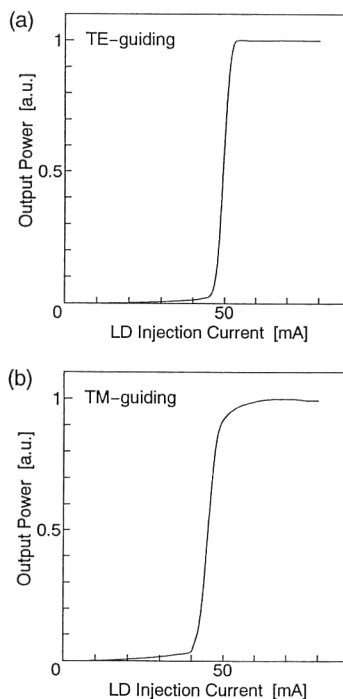


Fig. 4 Feedback characteristics with input from DC-driven LD. $I_{SLD-max} = 90 \text{ mA}$. (a) TE-guiding light, (b) TM-guiding light.

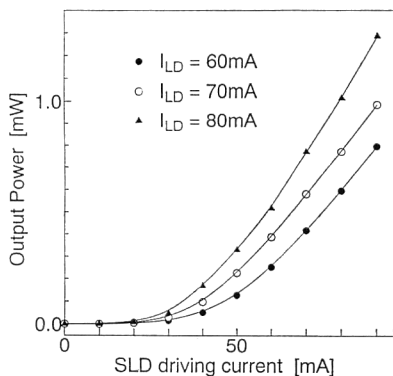


Fig. 3 Output characteristics of SLD against its driving current for different LD driving currents I_{LD} .

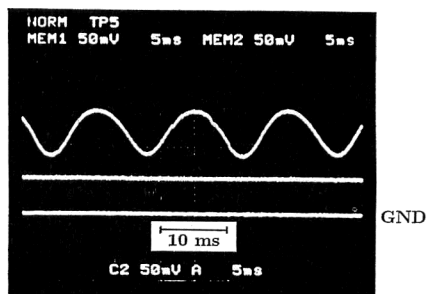


Fig. 5 Output from monochromator with modulated LD input signal ($I = 60 \text{ mA} + 3 \text{ mA} \cdot \cos 2\pi \cdot 70 t$). The upper trace: without feedback. The lower trace: with feedback.

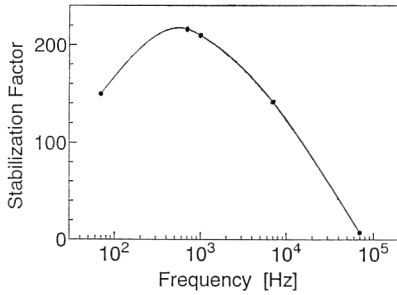


Fig. 6 Frequency dependence of stabilization factor.

定義される安定度の周波数依存性を Fig. 6 に示す. Fig. 5 に示した場合では安定度は 150 である. 応答する帯域は SLD 駆動回路の周波数特性により制限されるが, 低周波領域では実際の計測应用到十分な安定度が得られている. SLD 駆動回路の改良によりダイナミックレンジを広げることが可能である.

4. 干渉計測への応用

この出力一定 FM レーザーダイオード光は周波数変調を利用した種々の干渉計測に適用可能である. 適用例として光路長が非平衡 ($\Delta l \neq 0$) の Michelson 干渉計へ導入した場合を示す. 距離測定として参照アームと計測アームとの長さの違い Δl をフリンジ計数干渉法で計測した. レーザー光の周波数変調により生じたフリンジパターンを Fig. 7 に示す. このときバイアス電流 I_b は 60 mA, 変調電流の振幅 I_m は 3 mA, 変調周波数 $\omega/2\pi$ は 70 Hz であり, Fig. 7 (a), (b) がそれぞれ, フィードバックある, なし, に対応する. Fig. 7 (a) において干渉信号波形の包絡線は周波数変調に伴う出力変動によるものであり, また各フリンジが周波数変化により生じたビート信号に相当し, LD を単体で用いた場合と同様の波形が観察される. 一方 Fig. 7 (b) ではフィードバックにより出力の一定化されたビートによるフリンジが観察でき, この場合その本数は適当な閾値を設定することで容易に計数できることがわかる.

Michelson 干渉計の参照アームと計測アームとの光路差を Δl , LD の周波数のシフト量を $\Delta\nu$ とするとこの場合, 位相シフト量 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = \frac{2\pi \cdot \Delta\nu \cdot \Delta l}{c} \quad (c \text{ は空気中の光速}), \quad (1)$$

したがって

$$\Delta l = \frac{c \Delta\phi}{4\pi \Delta\nu}, \quad (2)$$

となる. フリンジ数を計数することで位相シフト量 $\Delta\phi$ を計測することにより, レーザーダイオードの周波数シフト量 $\Delta\nu$ から Michelson 干渉計の光路差 Δl を求めることができる.

Fig. 7 の場合, レーザーダイオード駆動電流の最小値から最大値まで, すなわち変調の 1/2 周期で, フリンジの本数は 7 本であり位相シフト量としては $\Delta\phi = 14\pi$ となる. 今回用いたレーザーダイオードの変調電流に対する周波数変調率は 2.52 GHz/mA であり, この 1/2 周期での駆動電流変化量 $2I_m$ は 6.0 mA なのでこのときの周波数シフト量は $\Delta\nu = 15.1$ GHz である. 参照アーム長 l_r は 5.0 cm であるので式 (2) より測定したい計測アーム長 $l_s = l_r + \Delta l$ は 11.9 cm と求められる.

また光路長が準平衡 ($\Delta l \approx 0$) の Michelson 干渉計へ導入した場合を Fig. 8 に示す. 光路長差以外は先の場

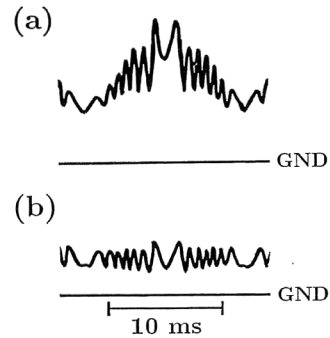


Fig. 7 Fringe pattern of path-imbalanced interferometer (at 70 Hz). (a) without feedback; output was modulated as LD driving current changed. (b) with feedback; variation was suppressed.

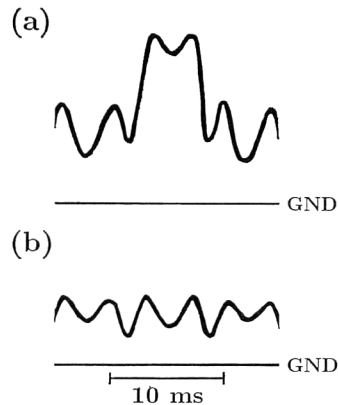


Fig. 8 Fringe pattern of almost path-balanced interferometer (at 70 Hz). (a) without feedback. (b) with feedback.

合と同一条件である。この場合には光路長がほぼ等しいため観察されるフリンジの本数はわずかである。フィードバックのない場合 (Fig. 8 (a)) では特に極値付近の干渉波形の包絡線を識別することは困難で、したがって1本以下のフリンジすなわちサブフリンジを読み取ることができない。これに対しフィードバックのある場合 (Fig. 8 (b)) では出力一定化のためサブフリンジの精度でフリンジの本数を計測することができる。

5. ま と め

電流変調に付随する出力変動を伴わずに周波数変調が可能な出力一定 FM レーザーダイオード光源を開発した。またこの応用として Michelson 干渉計へ導入したときの干渉波形を観測し、距離測定への応用例を示した。出力一定化により適当な閾値を設ければ容易にフリンジの本数を計数することができるので距離測定などの干渉計測に適しているといえる。またサブフリンジの精度で計測できるので特に観察されるフリンジ本数が少ないときでも高精度の計測が実現できる。

上に述べた半導体光増幅器と LD を組み合わせた構造である出力一定 FM レーザーダイオードの方式はすべてレーザーダイオードに関連する技術を基盤としているので、

- (1) E-O 変調器のような受動型変調器を用いるときは異なり、SLD の増幅特性のため得られる光出力は元の光より大きくすることができる。

- (2) 広帯域の FM 動作が得られる。

- (3) 全システムを小型・集積化しモノリシックに作製することができる。

などのいくつかの重要な利点を有しており、干渉計測だけでなく種々の分野での応用が期待される。

文 献

- 1) K. Uehara: "Signal recording and averaging in diode-laser spectroscopy," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 81-83.
- 2) W. Lenth: "Optical heterodyne spectroscopy with frequency- and amplitude-modulated semiconductor lasers," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 575-577.
- 3) 小林喬郎: "半導体レーザーによる干渉測長技術", *光学*, **17** (1988) 279-284.
- 4) K. Tatsuno and Y. Tsunoda: "Diode laser direct modulation heterodyne interferometer," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 37-40.
- 5) H. Kikuta, K. Iwata and R. Nagata: "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2976-2980.
- 6) T. Kubota, M. Nara and T. Yoshino: "Interferometer for measuring displacement and distance," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 310-312.
- 7) Y. Ishii, J. Chen and K. Murata: "Digital phase-measuring interferometry with a tunable laser diode," *Opt. Lett.*, **12** (1987) 233-235.
- 8) T. Yoshino, M. Nara, S. Mnatzakanian, B.S. Lee and T.C. Strand: "Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurement," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 892-897.
- 9) N.A. Olsson: "Semiconductor Optical Amplifiers," *Proc. IEEE*, **80** (1992) 375-382.