



フレネルロム・ファブリーペロー共振器による 半導体レーザーの周波数安定化

植平 一郎*・大場 良次

北海道大学工学部応用物理学科 〒060 札幌市北区北13条西8丁目

(1992年1月6日受付, 1992年3月11日受理)

Frequency Stabilization of LD with Fresnel Rhomb Fabry-Perot Resonator

Ichiro UEHIRA* and Ryoji OHBA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University,
Kita-13 Nishi-8, Kita-ku, Sapporo 060

(Received January 6, 1992; Accepted March 11, 1992)

This paper proposes a new simple method to stabilize frequency of a laser diode using a Fresnel rhomb as a Fabry-Perot resonator. Its principle is based on the one half FSR difference between resonance modes for P- and S-wave components, which is caused by one quarter wave optical path difference in the rhomb between them. The transmitted light from the Fresnel rhomb is divided into P- and S-components, and powers of which are detected separately. The frequency is locked at a point which is deviated one quarter FSR from a resonance mode by controlling the driving current of the LD to balance the both powers. The present method needs no frequency modulation and has increased anti-vibration property due to the miniaturized optical system.

1. はじめに

小型軽量で簡単な電流制御回路で駆動できることから、半導体レーザーは工業的に広く利用されている。また、駆動電流や温度によって、その発振周波数が簡単に変化できるため、各種センサーやコヒーレント光通信の光源としての利用が期待されている。しかし、そのためには上述の特長とは相反する、発振周波数の安定化という要求を満たす必要がある。本研究では、フレネルロムをファブリーペロー共振器として用いる、きわめて単純な光学系と制御系による周波数安定化を試みた。

フレネルロムをファブリーペロー共振器として周波数

安定化に用いる方法は、大津ら¹⁾によっても提案されている。この原理は Hänsch ら²⁾によるものに類似したもので、ファブリーペロー共振器からの反射光強度が最小値の付近では、反射光の位相が共振器のフィネスに応じた度合いで変化することを利用して、いま、フレネルロムをファブリーペロー共振器とすると、例えばP波が反射光強度最小のときS波は最大となる。共振器のフィネスが十分大きければ、この周辺でレーザー光周波数が揺らいだ場合、P波の位相は大きく変動するがS波のそれはほとんど変化しない。この両者による反射光の偏光状態の変化を検知することによって周波数弁別信号を得られる。これに対し本方法では、単純にP波とS波とではフレネルロムの中で〔波長/4〕の光路差があるという点に着目して、両者の透過光強度の差を周波数弁別信号として用いる。

本方式の特長としては、

* 現在：職業訓練大学校電子工学科 〒229 相模原市橋本台 4-1-1
Present address: Department of Electronic Engineering, University of Industrial Technology, 4-1-1, Hashimoto-dai, Sagami-hara 229

- 1) 反射式より光学系が単純である.
- 2) 透過光の検出には, 定在波型の反射式に必要なビームスプリッタ等による光線の分割が不要であるので, 検出器への入力が大きく S/N の点で有利である.
- 3) 共振器の光軸の傾きによって, 反射光はその2倍の角度光軸が傾くが, 透過光では変化しない. したがって, 反射式に比較し振動の影響を受けにくい.

短所としては, 周波数弁別信号を制御点付近で直線的にするためには, 共振器のフィネスをある程度低く抑えなければならないので, 周波数弁別能力が反射式に比べ劣る点である.

しかし, 現実問題として, 安定化のためには不安定要素を極力排除することが望ましく, その点では特長で述べたように透過式に利点がある.

以下に本方式の原理と結果について述べる.

2. 安定化原理

光は誘電体の境界面で全反射するとき, P波とS波の間に位相差を生じる. フレネルロムは, この全反射が2回繰り返されて位相差が $\pi/2$ になるように反射角が設計されている³⁾. フレネルロム材質の屈折率の波長分散のため, 位相差には若干の波長依存性があるが, 今回使用するレーザーの波長変動の範囲内ではそれは無視できる. フレネルロムの入・出力端面を鏡面化してファブリーペロー共振器を構成すると, それによるP波とS波の共振モード間では, フリースペクトルレンジ (FSR) の半分の周波数差が生じる. したがって, フレネルロムの透過光強度をP波とS波とに分割して検知し, その差がゼロとなる点に半導体レーザーの周波数をロックすることにより, 共振周波数から $(1/4)$ FSR ずれた位置に周波数を安定化できる.

3. 実験装置

Fig. 1 に光学系と基本的な制御系を示す. 温度制御

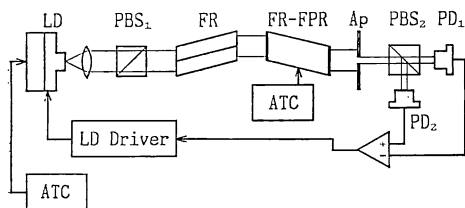


Fig. 1 Schematics of experimental setup for LD frequency stabilization with a Fresnel rhomb Fabry-Perot resonator.

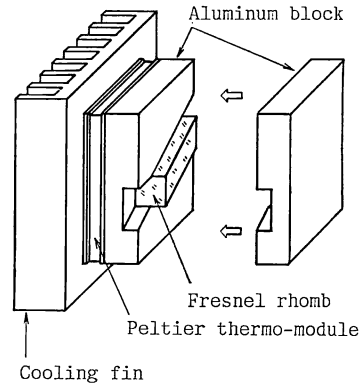


Fig. 2 Structure of the heat bath used for stabilizing the resonator temperature.

されている半導体レーザー (LD) (三菱 ML 4102 A-02) はシングルモード, 波長 $\lambda=780$ nm で発振している. 短時間では温度制御がなくても発振周波数の安定化は可能であるが, 出力の変動を極力小さくし, 特にモードホップを抑えるには温度制御が不可欠である. 第1の偏光ビームスプリッタ (PBS₁) とフレネルロム (FR) は光アイソレータを構成し, 共振器からの反射光が LD に帰還されるのを減少させるとともに, それを通過した光を円偏光とし, フレネルロムに対してP波とS波とに強度を振り分けている. この円偏光がフレネルロム・ファブリーペロー共振器 (FR-FPR) に入射する. ただし, 本方式では共振器への入射光の偏光状態を特定する必要はない. しかし, 円偏光にすることによりP波とS波の方向が任意にとれ, 共振器以降の光学系の設定に自由度が増し, 同時に振動の影響が減少する. 共振器はフレネルロムの両端面をアルミ蒸着したもので, フィネスは約3である. FR-FPR を通過した光を, 開口 (A_p) を通した後, 第2の偏光ビームスプリッタ (PBS₂) にてP波とS波とに分割し, Si フォトダイオード PD₁, PD₂ で光強度を検出する. その出力差を増幅後, LD 駆動回路に帰還している.

FR-FPR は Fig. 2 に示すような恒温槽に入れて温度制御している. フレネルロムをアルミブロックで囲み, これをペルチェ素子で温度制御する. アルミブロックには IC 温度センサーが埋め込まれている. フレネルロムの両端面間の距離は 20 mm であり, 屈折率を 1.51 とするとその FSR は 3.37 GHz である.

4. 実験および討論

Fig. 3 にフィードバックループを閉じずに LD の駆動電流を変化させたときの, 透過光のP波 (PD₁) と

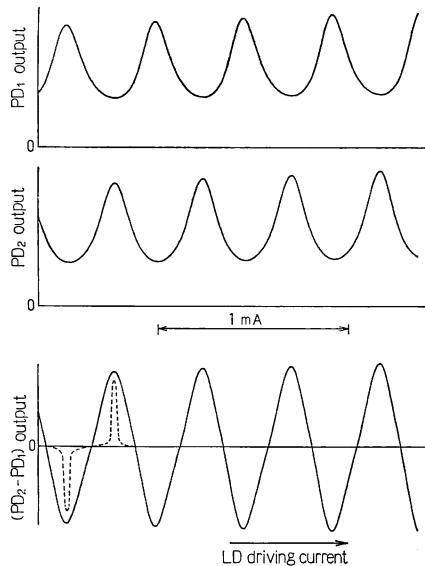


Fig. 3 Power changes of transmitted lights of P- (PD_1) and S-wave (PD_2) from the resonator, and their difference ($PD_2- PD_1$), when LD driving current is increased.

S波 (PD_2) の強度と、それらの差動出力を示す。このように、P波とS波とでは干渉縞の明暗が逆転しているために、PBS や偏光板等を通さなければ FR-FPR の共振器透過光の干渉縞の明瞭度はきわめて小さい。差動出力を見るとゼロクロス付近で直線的になり、周波数弁別信号として利用することができる。もちろんこれは共振器のフィネスに依存するもので、フィネスが高くなると、破線で示すような出力となり周波数弁別信号として用いることはできなくなる。また、低くなると直線性は保たれるが感度が低下するので好ましくない。温度制御により共振器長を変化させ、P波とS波の透過光強度の変動振幅が等しくなるよう Si フォトダイオード PD_1 , PD_2 の増幅回路の増幅率を調整し、ついで、一方のオフセット量を調整し差動出力を正負対称にする。これにより、差動出力の0点は LD の出力の変動には影響されなくなる。オフセット量によってこの0点は移動してしまうので精密な調整が必要であるが、増幅回路の熱的な安定度から推定して、変動振幅の 10^{-3} 程度の精度で設定が可能である。

帰還による周波数安定化の様子を **Fig. 4** に示す。縦軸は差動出力の0点近傍の勾配から換算した値で、出力電圧を周波数に対応させてある。20分まではフィードバックループを開いたままの状態、20分にループを閉じている。フリーランニング状態の時、発振周波数

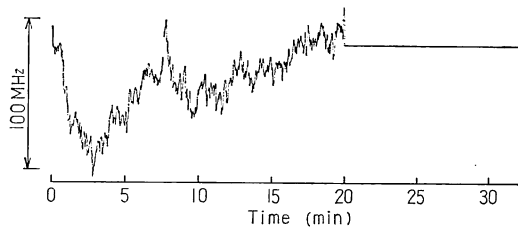


Fig. 4 Frequency perturbation; Frequency is stabilized when feed-back loop is closed at 20 minutes.

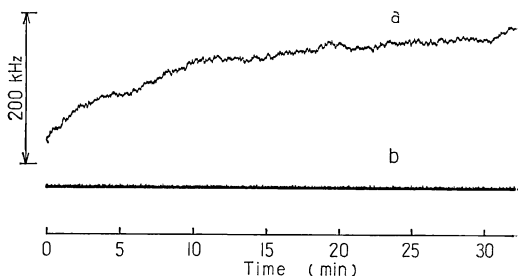


Fig. 5 Stabilities of frequency by P control (a) and by PI control (b).

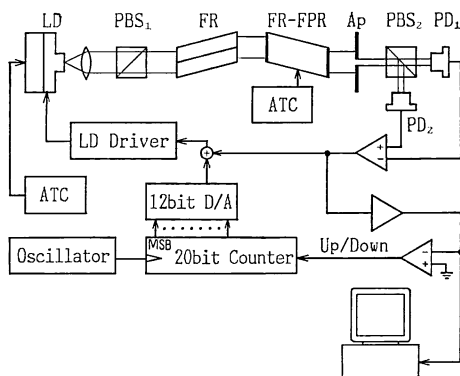


Fig. 6 Final control system in which digital integral is added to proportional circuit.

は約 100 MHz の範囲にわたって変動しているが、帰還をかけるとその変動が収まる様子がわかる。しかし、この縦軸をさらに 500 倍拡大して観測すると、**Fig. 5** の a のトレースが示すように、200 kHz 程度のドリフトが残っている。このドリフトを抑えるには積分制御を加える必要がある。ここでは **Fig. 6** に示すカウンタ回路を帰還回路に並列に付加したデジタル型積分制御によりドリフトを打ち消した。20 bit の up-down カウンタを、外部発振器から供給される一定周波数のパルスを用いて、差動出力の正負により up または down する。

この計数値の上位 12 bit を D/A 変換して LD 駆動回路に帰還する。積分ゲインは発振器の周波数によって任意に変えることができ、LD 駆動回路が発振しない範囲でできるだけ高い周波数にセットしてゲインを大きくとる。Fig. 5 の b のトレースは両帰還回路を併用することによる安定化を示すもので、ドリフトは、D/A コンバータの 1 bit に相当する変動以内に収まっている。なお、この場合の発振器の周波数は 100 kHz であった。このカウンタ回路の出力は入力の大きさには無関係であるため、通常の積分時定数として表すことはできないが、D/A コンバータの変換範囲を $\pm 5V$ に設定しているので、1 秒で約 100 mV の出力変化となる。これをフィードバック回路の入力インピーダンスをもとに、LD の駆動電流に換算すると、約 0.2 mA/s の変化率になり、Fig. 3 から駆動電流を周波数に対応させると、約 1.5 GHz/s となる。このデジタル型積分制御回路は、入力の正負のみ判定するように簡略化されているが、安定化のためには十分な性能を有しているといえる。

LD の周波数安定度を評価するために、差動出力を計算機に取り込み、積分時間 0.01 秒から約 800 秒までにわたって、Allan 分散を計算した。Fig. 7 にその結果を示す。縦軸は Allan 分散の平方根を表している。点線はフリーランニング状態での場合で、安定度は 10^{-8} 前後であるが、比例制御のみ (破線) でも、およそ $1/10^3$ に改善される。しかし、フリーランニング時に見られたドリフトは、桁こそ小さくなってはいるが、依然そのまま残っている。これにデジタルの積分制御を加えると、実線で示すようにドリフトも大幅に改善される。積分時間が 100 秒を超える範囲では約 4.3×10^{-14} という値になるが、これは理論的に計算される安定度の限界値⁴⁾を超えている。この限界値は量子雑音から計算されるもの

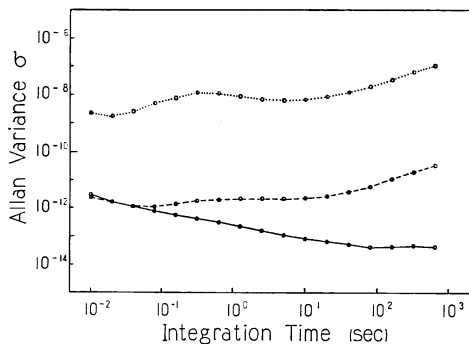


Fig. 7 Root mean square of Allan variance estimated from (PD_2-PD_1) output. Free-running (dotted line), by P control (broken line) and by PI control (solid line).

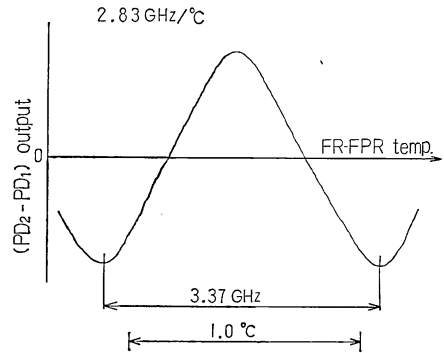


Fig. 8 Change of (PD_2-PD_1) output with cavity length extension caused by an increment of temperature.

で、積分時間 100 秒で約 9×10^{-13} と推定される。電子回路による LD 制御では原理的にこの限界値を超えることは不可能であり、 4.3×10^{-14} という値は弁別信号の変動がどの程度抑えこまれているかを示すもので、現実の周波数安定度ではないことに注意が必要である。さらに、この安定度はあくまでもフレネルロム・ファブリーペロー共振器を基準とするものなので、この共振器長をいかに安定化するか問題となる。

Fig. 8 には共振器の温度変化に対する差動出力の変化の様子を示すが、 $1^\circ C$ で LD の半波長に近い約 328 nm の共振器長変化があることがわかる。ただし、この値は屈折率をかけた光学的長さである。また、これは先に推定した FSR から換算して、 $2.83 \text{ GHz}/^\circ C$ となり、共振器の温度変化は LD の発振周波数に大きく影響することがわかる。ここで用いたフレネルロムの材質は BK7 であり、この線膨張係数 $\alpha = 7.1 \times 10^{-6}$ から $1^\circ C$ 当りの共振器長変化を計算すると 315.6 nm となり測定値とほぼ一致する。

5. ま と め

従来の干渉計を用いた周波数安定化では、干渉光強度と LD 出力強度の両者を検出する際、離れた 2 地点で測定するために、振動はもとより、光学機器による反射光やバックグラウンド光の影響が避けられなかった。今回の方法では測定点は P 波、S 波とも同一の開口にあり、光検出器も近接しているため、振動や他の外乱の影響を小さくすることができる。また、共振器の鏡面が劣化しても、P 波と S 波に対するフィネスの変化は同じなので、差動出力の 0 点は移動しない。しかもこの差動出力は FSR の半分に近い周波数範囲にわたって直線的であるので、いったん帰還をかければ周波数ロックが外れ

ることは稀であった。

以上は長所であるが、短所としては、共振器長が短いので FSR が広い、すなわち周波数分解能が低い、温度による共振器長の変化が大きい、である。この短所を改善するためには、鏡面とフレネルロムとは別構造にし、鏡面間隔を長くとり、フレネルロムを必要最小限の大きさにする方法が考えられるが、大型化し振動には弱くなる。よって小型軽量という半導体レーザーの特長を生かすためには、フレネルロムの温度制御をより精密にする方向で改善すべきである。また、フレネルロムの材質を BK7 から、温度による光学的長さの変化がさらに小さい材質のものに換えることも可能である。水晶位相板($\lambda/4$ 板)を用いても同様の結果は得られるが、これは

波長依存性が強いので好ましくない。

文 献

- 1) M. Kouroggi and M. Ohtsu: "Novel optical frequency discriminator for FM noise reduction of semiconductor lasers," *Opt. Commun.*, **81** (1991) 204-208.
- 2) T. W. Hänsch and B. Couillaud: "Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity," *Opt. Commun.*, **35** (1980) 441-444.
- 3) 村田和美: 光学 (サイエンス社, 1979) p. 32.
- 4) M. Ohtsu, H. Fukada, T. Tako and H. Tsuchida: "Estimation of the ultimate frequency stability of semiconductor lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **22** (1983) 1157-1166.