

研究

He-Ne レーザー共振器を基準とする 半導体レーザーの周波数安定化

福永 匡則*・梅田 倫弘・高崎 宏

静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1984年4月14日受理)

Frequency Stabilization of Semiconductor Laser to the Resonant Cavity of a He-Ne Laser

Masanori FUKUNAGA,* Norihiro UMEDA and Hiroshi TAKASAKI

Research Institute of Electronics, Shizuoka University,
3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432

The frequency of a GaAlAs semiconductor laser was stabilized by locking to the resonant cavity of a stabilized 633nm He-Ne transverse Zeeman laser (STZL). The first derivative signal of the transmission spectrum of the resonant cavity of STZL was used as an error signal to be fed back to the injection current of the semiconductor laser. The frequency stability obtained was $1.8 \times 10^{-10} \leq \sigma \leq 5.7 \times 10^{-10}$ for $0.1 \text{ s} \leq \tau \leq 300 \text{ s}$. In this method the light of He-Ne laser can be utilized for adjusting the optical alignment.

1. ま え が き

半導体レーザーの周波数安定化における代表的な方法は、原子・分子の吸収スペクトルを基準として用いる方法¹⁻⁴⁾と、ファブリペローエタロンに共振させる方法⁵⁻¹²⁾である。前者は、原子・分子の定数を基準としているから、長期安定性と再現性に優れているが、その適用は、基準となる吸収線に近い波長のレーザーに限定される。これに対して後者は、ファブリペローエタロンの動作する波長範囲が広いのでレーザーの発振波長を問題にせず比較的簡単に適用できる。しかし、長期安定性はファブリペローエタロンの安定性に依存し必ずしも保証されず、得られるのは短期安定性のみである。この方法で、長期安定性を向上させるには、基準エタロンを長期に安定化する必要がある。このために、通常、周波数安定化した基準レーザーによって基準エタロンを安定化し、これに対して半導体レーザーの周波数を安定化するという方法が用いられている¹²⁾。しかし、この方法では、最終

的な安定性に三つの制御系の動作が関係する。この影響要因の数はできるだけ少ないことが望ましい。そこで、周波数安定化レーザーの共振器そのものを基準エタロンとして、半導体レーザーの周波数安定化を行なった。

2. ファブリペローエタロンによる長期安定化

ファブリペローエタロンを基準とする半導体レーザーの周波数安定化装置を模式的に **Fig. 1** に示す。(a) は、基準エタロンを、別の周波数安定化レーザーを用いて安定化した場合¹²⁾、(b) は、周波数安定化レーザーの共振器そのものを基準エタロンに用いた場合である。

(a)の方法における半導体レーザーの周波数安定度は、(1)式で与えられる。

$$S_{LD} = (S_{\text{He-Ne}}^2 + T_{\text{FP}}^2 + T_{\text{LD}}^2)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $S_{\text{He-Ne}}$ は、He-Ne レーザーの安定度、 T_{FP} は、ファブリペローエタロンの He-Ne レーザーへの追従度、 T_{LD} は、半導体レーザーのファブリペローエタロンへの追従度、 S_{LD} は、半導体レーザーの周波数安定度である。

これに対して、周波数安定化レーザー共振器を基準のエタロンに用いる(b)の方法において、半導体レーザー

* 現在：三菱電機(株)北伊丹製作所 〒664 伊丹市瑞原 4-1
Present address: Mitsubishi Electric Corporation,
4-1, Mizuhara, Itami 664

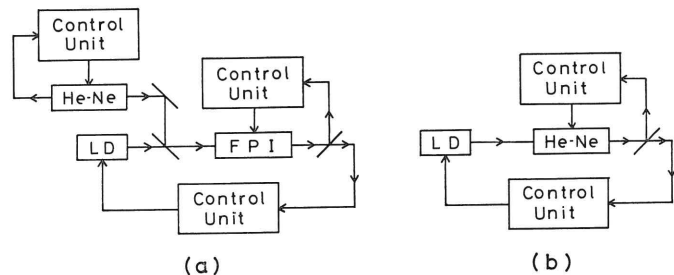


Fig. 1 Block diagram of frequency stabilization of semiconductor laser by locking to the Fabry-Perot interferometer.

の周波数安定度は、(2)式で与えられる。

$$S_{LD} = (S_{He-Ne}^2 + T_{LD}^2)^{1/2} \quad (2)$$

Fig. 1(a)と(b), 式(1)と(2)を比較すると, 周波数安定化されたレーザー共振器を基準エタロンとして用いることにより, 光学系が簡単になるばかりでなく, ファブリペローエタロンの追従度が介入しないので, 周波数安定度も向上すると考えられる。

しかし, 周波数安定化レーザーの共振器そのものを基準エタロンとして用いることによる問題もある。たとえば, He-Ne レーザーを用い, GaAlAs 半導体レーザーの発振周波数を安定化させようとするとき, 半導体レーザーの発振波長 780~850nm に対する He-Ne レーザー反射鏡の反射率が20%以下にすぎないため, この光に対するエタロンのフィネスが小さくなる。またレーザー共振器は細いキャピラリーで囲まれていて約30cmと長いために, 安定化する半導体レーザーの光に対して鮮明度の高い干渉が得にくい。このために, 誤差信号の取り出しや制御方法に工夫が必要となる。

3. 実 験

周波数安定化横ゼーマンレーザー (STZL) の共振器を基準エタロンに用い, 発振波長 816nm の GaAlAs TJS レーザーの発振周波数を安定化した。

実験装置構成を **Fig. 2** に示す。半導体レーザー LD の発振光を, 対物レンズLでコリメートし, 偏光子Pと1/4波長板Qから成るアイソレータを通した後, 光線束をM₁・M₂で調整し横磁場を印加して単一縦モード化した内部鏡型 He-Ne レーザー管 (横ゼーマンレーザー)¹³⁾に通す。このレーザー管から出射する光は, 横ゼーマンレーザーの 0.63μm の発振光と半導体レーザーの 0.82μm の発振光を含んでいるから, これらを回折格子で分離する。

横ゼーマンレーザーの光は加えられた横磁場の方向と

それに直交した方向の二つの直線偏光成分で発振しており, その差周波数が共振器の同調状態に従って変化する。この差周波数は45°直線偏光子を通してフォトダイオード PD₁ で光電変換することにより, 縦モード内ビート周波数として得られるからこれを f-v 変換し, この値が一定になるようにサーボアンプで小型のモーターファンを駆動しレーザー管温度を風冷制御して周波数安定化する¹³⁾。

0.82μm の光は, フォトダイオード PD₂

で光電変換される。

半導体レーザーはヒートシンク温度をペルチェ素子により, ±0.05°C に制御して発振させている。注入電流

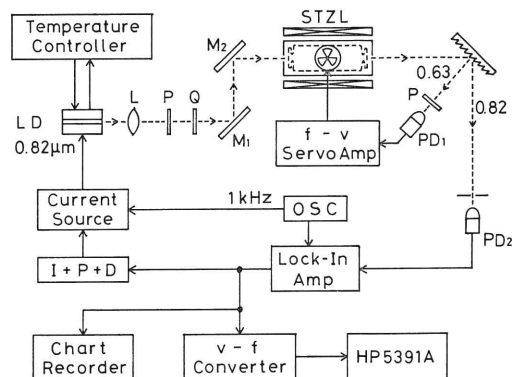


Fig. 2 Schematic diagram of the frequency stabilization of semiconductor laser.

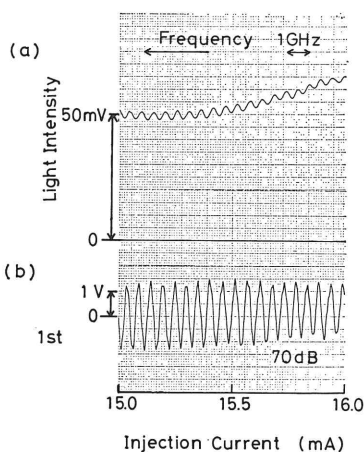


Fig. 3 Transmission spectrum of resonant cavity of the STZL obtained by sweeping the injection current of laser. (a) Transmission spectrum, (b) first derivative signal.

を15から16mAまで鋸歯状に変化させて発振周波数を掃引すると、STZL共振器を通過した $0.82\mu\text{m}$ の透過光強度は、Fig. 3(a)のように変化した。

Fig. 3(a)の曲線の変化周期がエタロンの縦モード間隔560MHzである。したがって、使用した半導体レーザーの発振周波数の変化は、注入電流1mAに対して約10.6GHzとなる。この値は、発振スペクトルのピーク波長の注入電流による変化を回折格子分光器で測定した値とほぼ一致した。しかし、STZLのレーザー反射鏡の $0.82\mu\text{m}$ に対する反射率が低いため透過光強度の変調度は低い。

注入電流に、 $15\mu\text{A}_{p-p}$ 、1kHzの正弦的な微小電流変化を重畳して発振周波数を周波数変調し、ロックインアンプによりPD₂からの光電変換出力を注入電流変調周波数で同期検出しながら、注入電流を鋸歯状に変化させるとFig. 3(b)に示す1次微分信号が得られる。この1次微分信号は、ゼロを中心として正負方向にほぼ正弦的に変化する。そこで、積分・比例・微分増幅器から成る制御系を用い、1次微分信号をゼロにするように注入電流を制御し、周波数安定化を行なった。

4. 実験結果

フリーランニングから安定化状態に入る過程の誤差信号電圧を記録した結果をFig. 4に示す。

Aはフリーランニング状態で、発振周波数が大きくドリフトしているために共振次数が逐時変化し、誤差信号電圧は極大・極小値にわたって変化している。B点で、積分時間33秒の積分制御による制御を開始し、制御系

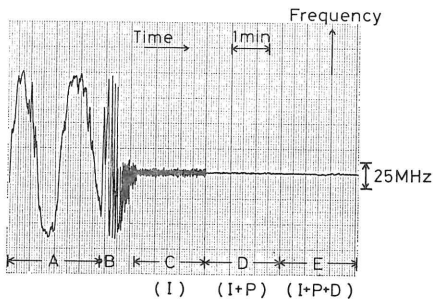


Fig. 4 Chart recorder traces showing the error signal from the lock-in amplifier. (A) Free-running state, (B) servoloop turn on, (C) result obtained by using the servo-amplifier with integrator (I), (D) result with integrator and proportional amplifier (I+P), (E) result with integrator, proportional amplifier and differentiator (I+P+D).

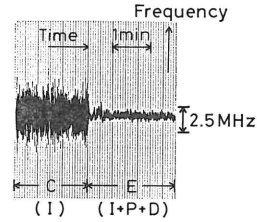


Fig. 5 Enlarged Fig. 4. Traces (C) and (E) correspond to Fig. 4.

のゲインを上げると、Cのようにドリフトは止まる。しかし、発振周波数は約7MHzの幅で変動している。比例制御を追加すると、Dのように誤差信号の変動は著しく小さくなる。しかし、これに微分制御を追加しても、誤差信号の変動に著しい変化はなかった。微分制御を加えても安定度がほとんど向上しないのは、追加した微分増幅器の低域遮断周波数が、150Hzであるのに、制御系の高周波域の応答が、ロックインアンプの時定数によって、1.5Hzで遮断されているためである。

安定化状態における周波数変動を拡大した結果を、Fig. 5に示す。

Cの積分制御のみの状態では、発振周波数の変動は、約7MHzであったが、比例・微分制御を追加したEの状態では、この変動は、約1MHzとなった。

安定化状態を定量的に評価するために、誤差信号電圧を ω - f 変換し、このアラン分散値を周波数安定性評価システムHP 5391Aにより測定した。

誤差信号電圧と発振周波数変動の関係は、Fig. 3(b)の曲線の変化周期がエタロンの縦モード間隔560MHzであることを用いて、1次微分曲線の直線部の傾きから求められ、50MHz/Vとなった。この誤差信号電圧1Vの変化を ω - f 変換器により100kHzの周波数変化に変換した。したがって、誤差信号周波数1Hzの変動が、発振光周波数500Hzの変動を表わす。

Fig. 6に、横軸を積分時間をとり、アラン分散値の平方根 $\sigma(2, \tau)$ を示す。

A(▲)は、フリーランニング時の結果で、積分時間 $\tau=0.1\sim 300$ 秒で、 $\sigma(2, \tau)=2.5\times 10^{-8}\sim 3.8\times 10^{-7}$ となった。積分時間とともに分散値が大きくなるのは、温度変動に伴う周波数ドリフトのためと考えられる。

B(■)は、基準としたエタロン、すなわちSTZLの共振器長の安定性を、STZLの制御信号である縦モード内ビート周波数のアラン分散によって評価した結果である。この結果は、積分時間 $\tau=0.3\sim 100$ 秒の範囲で、ほぼ 1×10^{-10} であった。

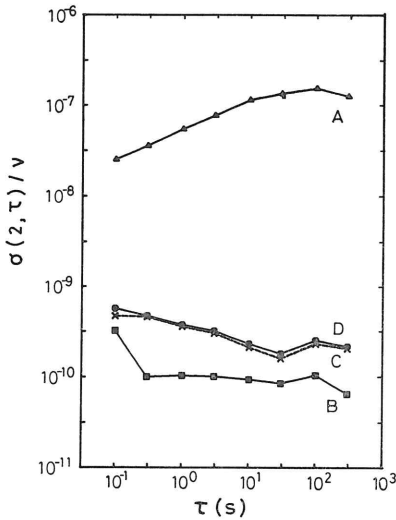


Fig. 6 The square root of Allan variance σ for the integration time τ .
 A(\blacktriangle): The frequency stability of free-running semiconductor laser, B(\blacksquare): the frequency stability of the STZL, C(\times): the frequency traceability of the semiconductor laser to the STZL, D(\bullet): the frequency stability of the stabilized semiconductor laser estimated by using Eq. (2), curves B and C.

C(\times)は、半導体レーザーをPID制御により安定化したときの誤差信号電圧を v - f 変換して、アラン分散で評価した結果で、エタロンへの追従度を示す。(2)式により、半導体レーザー発振光周波数の安定度は、このエタロンへの追従度に、基準としているSTZLの安定度を加えたものD(\bullet)となる。この結果は、積分時間0.1~300秒で、 $\sigma(2, \tau) = 1.8 \sim 5.7 \times 10^{-10}$ となった。分散値の平方根の最小値 1.8×10^{-10} は、 $\tau = 30$ 秒のとき得られた。

フリーランニング時の周波数安定度A(\blacktriangle)と、PID制御したときの周波数安定度D(\bullet)を比較すると、周波数安定化により、長期の安定度が約3桁向上したことがわかる。

なお、アラン分散値を計算するためのサンプル数 N は、 τ が3秒以下では100, 10秒以上では80から徐々に少なくなり、最も積分時間の長い $\tau = 300$ 秒では10である。

5. He-Ne レーザーの改良

前述の半導体レーザーの周波数安定化は、0.63 μm 用のレーザー管で構成されたSTZLの共振器を基準エタ

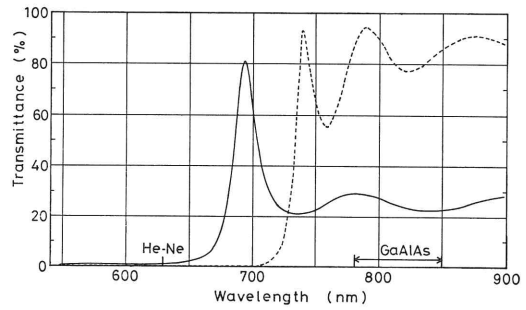


Fig. 7 Spectrum transmittance curves of He-Ne laser mirrors.
 A solid line is the one increased reflectance in the wavelength over 780 nm.
 A dotted line is a normal laser mirror.

ロンとして行なわれている。このために、周波数安定化する半導体レーザーの光に対するレーザーミラーの反射率が低く、エタロンに対する共振状態の変化による透過光強度の変調度が低い。

半導体レーザーの発振周波数を変調し、基準エタロンの透過光を同期検出すると、1次微分信号が得られる。しかし、得られる信号のSN比はあまりよくない。しかも、1次微分信号は、透過光強度の傾斜がゼロとなる曲線の極大・極小位置でゼロになるから、透過光強度が全体的に変化する場合には、1次微分信号の値をゼロにするように安定化する方法では、Fig. 3(a)のように、透過光強度全体の変化の1次微分と、エタロンの共振特性の1次微分とを加えたものをゼロにするように制御することになり安定化点に変化する。この変化は、透過光強度の変調度が小さいほど影響が大きい。したがって、この方式による周波数安定化の性能を向上させるためには、透過光強度の変調度を大きくし、制御信号を改善する必要がある。そこで、基準エタロンとして用いるHe-Ne STZLのレーザーミラーの反射率を、半導体レーザーの発振波長に対しても高くすることを検討した。

Fig. 7は、He-Neレーザーの発振波長633nmの他に、780nm以上のGaAlAs半導体レーザーの発振波長に対しても約70%の反射率をもつように作られたレーザーミラー(朝日分光(株)製)の透過波長特性(実線)と、通常の633nm He-Neレーザー用レーザーミラーの透過波長特性(点線)を対比した図である。半導体レーザーの発振波長でも高い反射率をもつレーザーミラーを用いて内部鏡型He-Neレーザーを製作し、基準エタロンとして用いた。このレーザー管の諸元は次のとおりである。

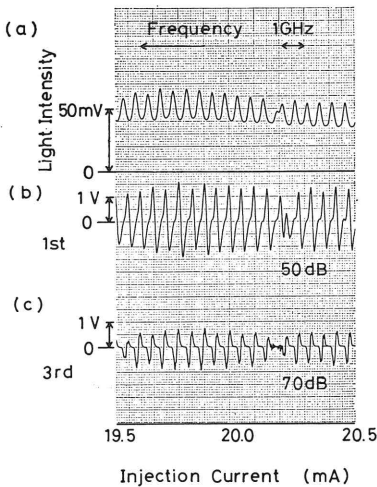


Fig. 8 The transmission spectrum of resonant cavity of a laser tube constructed by using mirrors with high reflectance at the two wavelengths. (a) The transmission spectrum, (b) the first derivative signal, (c) the third derivative signal.

共振器長 270 mm, 共振器は半球型で凹球面曲率半径 300 mm, キャピラリー内径 1.5 mm, 封入ガス $^3\text{He} : ^{20}\text{Ne} = 7 : 1$, 3 Torr, 電極: アルミ冷陰極.

注入電流により半導体レーザーの発振周波数を掃引したときの透過光強度変化を **Fig. 8(a)** に示す. この変調度は, **Fig. 3(a)** の場合の 4% から約 20% に上昇した. この結果, 1 次微分信号(b) の出力は大きくなり, SN 比もよくなった. そして, 通常の He-Ne レーザーで構成した STZL の共振器を基準エタロンとして用いた場合には, 雑音のため得られなかった 3 次微分信号も(c) のように得られた. 半導体レーザーの発振波長に対して高い反射率をもつレーザーミラーを用いたレーザー管をエタロンとして得られる 1 次微分信号(**Fig. 8(b)**) は, 50 dB 増幅したもので, 633 nm 用レーザー管をエタロンとして得られる 1 次微分信号を 70 dB 増幅した信号 (**Fig. 3(b)**) と同等の信号振幅が得られた. すなわち, 10 倍の信号振幅がある.

また, 1 kHz で周波数変調された 820 nm の信号を変調周波数の第 3 高調波で同期検出すると 3 次微分信号が得られる. この 3 次微分信号は, 通常の He-Ne レーザーを用いて行なった安定化における 1 次微分信号(**Fig. 3(b)**) の 1/2 以上の大きさがある. この信号は, 透過光強度(a) の極大付近の曲率の変化速度が一定となる点でゼロとなり, この光周波数位置は, 透過光強度曲線の

直線的傾斜が変化しても変わらない. したがって, 1 次微分信号より, より高次の安定化誤差信号となる. このことは, **Fig. 3(b)** の 1 次微分信号が注入電流の変化によってドリフトしているのに対し, **Fig. 8(c)** の 3 次微分信号は, 注入電流が変化しても, まったくドリフトしないことから知られる.

6. 検 討

ここで報告した実験では, 安定化される半導体レーザーの発振光出力すべてを安定化のために利用している. これでは安定化のための安定化に止まってしまう. しかし, STZL を構成するレーザー管を半導体レーザーの発振波長に対して反射率を高めたレーザーミラーを用いて製作し, この共振器を基準エタロンとして用いることにより, 通常の He-Ne レーザー管を用いた場合と比べ約 10 倍の 1 次微分信号振幅が得られた. これは, 半導体レーザーの光出力の 1/10 を利用して, 今回実験で得た 10^{-10} オーダーの発振周波数安定化ができることを意味する. また, 3 次微分信号を安定化に利用できることも確認された.

ここで報告した安定化には, STZL の共振器を基準エタロンとして用いている. STZL は共振器長を変調しない方式だから, この共振器を基準エタロンとして, 安定化制御信号を得るために安定化されるレーザーの発振周波数を周波数変調している. ところが, レーザー光が周波数変調されていると不都合な場合も多い. この場合には, 半導体レーザー光は無変調のまま基準エタロンの長さを, 基準長さを中心に变調し, 安定化させることを考える必要がある. この目的には, ラムディップ型とか, ヨウ素安定化レーザー等の変調型安定化レーザーの共振器を基準エタロンとして利用できる.

7. ま と め

周波数安定化横ゼーマンレーザーの共振器を基準エタロンとし, これを透過した安定化しようとする半導体レーザーの光強度の 1 次微分信号を用いて周波数安定化を行なった. この結果, 積分時間 33 秒で, 発振周波数のアラン分散値の平方根 1.8×10^{-10} が得られた. これは, フリーランニング時と比較して約 3 桁の安定度向上を意味する.

この安定化方式は, 被安定化レーザーの発振周波数に対し寛容性が大きい. しかも, 基準エタロンがアクティブで可視光を発振するから, これをアラインメントに利用して簡単に光学調整できるという特徴をもっている.

さらに、半導体レーザーの発振波長についても高い反射率をもつレーザーミラーで、He-Ne レーザー管を製作し、STZL を構成し、この共振器を基準エタロンとして用いることにより、通常の He-Ne レーザー管を用いた場合と比べ約 10 倍の 1 次微分信号振幅が得られ、また、3 次微分信号も実用的な大ききで得られ、制御信号として 1 次微分信号を用いるならば、安定化されるレーザーの出力の 10% の光を用いて安定化できることと、3 次微分信号を用いてより高次の周波数安定化ができることがわかった。

最後に、本研究に使用した半導体レーザーの電源回路を快くお教えくださった東工大・大津元一助教授、土田英実博士に感謝申し上げます。

文 献

- 1) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) L1.
- 2) H. Tsuchida, M. Ohtsu, T. Tako, N. Kuramochi and
- 3) S. Yamaguchi and M. Suzuki: Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 597.
- 4) H. Hori, Y. Kitayama, M. Kitano, T. Yabuzaki and T. Ogawa: IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 169.
- 5) F. Favre and D. Le Guen: Electron. Lett., **16** (1980) 709.
- 6) H. Tsuchida, S. Sampei, M. Ohtsu and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1981) 721.
- 7) K. Kikuchi, T. Okoshi and S. Kawanishi: Electron. Lett., **17** (1981) 515.
- 8) A. Dandridge and A. B. Tveten: Electron. Lett., **17** (1981) 937.
- 9) K. W. Cobb and B. Culshaw: Electron. Lett., **18** (1982) 336.
- 10) S. Sampei, H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) L258.
- 11) H. Tsuchida and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) 1543.
- 12) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako: Jpn. J. Appl. Phys., **20** (1981) L403.
- 13) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: Appl. Opt., **19** (1980) 442.

N. Oura: Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) L561.