レーザーオリジナル

軸モード間ビート法による内部鏡型
He-Neレーザーの安定化

佐々木 彰*・岡田 武彦**・河合 淳***・青山 尚之*

(1993年2月9日 受理)

Frequency Stabilization of an Internal-Mirror
He-Ne Laser using an Axial Mode BeatAkira SASAKI*, Takehiko OKADA**, Sunao KAWAI***
and Hisayuki AOYAMA*

(Received February 9, 1993)

The frequency of a commercially available internal-mirror He-Ne laser ($\lambda = 633 \text{ nm}$) was stabilized by using an axial-mode beat frequency. The beat-frequency conversion technique between the axial-beat frequency and the output signal of a frequency synthesizer was used for the laser frequency stabilization. The frequency stability of 4.5×10^{-10} was estimated by means of the Allan variance analysis. The amplitude stability of this stabilized laser was estimated to be 0.21 %.

Key Words : Frequency stabilization, He-Ne laser, Internal-mirror He-Ne laser.

1. はじめに

内部鏡型He-Neレーザー($\lambda = 633 \text{ nm}$)は、可視光であること、レーザービーム特性が良質であること、低電力で作動することなどから基礎的研究及びレーザー応用計測などに、現在にいたるまで広く利用されている。しかしながら、それを精密な測定に使用する場合、レーザーは出力が数%変動すること及び周波数が 10^{-6} のオーダーで変動していることが問題となる。特に超

精密測定及び高精度レーザー干渉計を使用した計測において、レーザー周波数変動が特に問題となる。その場合、周波数安定化されたレーザーが必要とされるため¹⁾、He-Neレーザーの種々の安定化法が研究されてきている²⁻¹³⁾。

レーザー周波数の変動は、主にレーザー管の熱膨張及び収縮による光共振器長の変動に起因している。内部鏡型He-Neレーザーにおいては放電管とレーザー反射鏡が一体化されているため、反射鏡の間隔がレーザー管の温度上昇と共に

* 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北3-5-1)

** 住友電気工業(株) (〒244 横浜市区田谷町1)

*** ブラザー工業(株) (〒467 名古屋市瑞穂区苗代町15-1)

* Faculty of Engineering, Shizuoka University (Johoku, Hamamatsu 432)

** Sumitomo Electric Industries, Ltd. (1 Taya-machi, Sakae-ku, Yokohama 244)

*** Brother Industries, Ltd. (Nawashiro-chou, Mizuho-ku, Nagoya 467)

に熱膨張し、軸モードが移動し、レーザー出力や周波数が変動する。そこで、光共振器の長さを熱的に制御し、一定に保つことによってレーザー周波数の安定化を行ってきた²⁻¹⁰⁾。安定化は、レーザーの強度³⁾、 Lamb くぼみ²⁾、あるいは、内部鏡型He-Neレーザーの偏光状態を利用し⁴⁾、レーザーの共振器長が一定になるように制御されている。これらの安定化法はレーザー強度変化を利用しているため、レーザーの放電電流変動による強度変動の影響、光検出素子、電流-電圧変換器、増幅器、制御回路及び基準電圧の経年変化、またレーザー管及び上記電子回路の温度変動の影響を受けやすい。

内部鏡型He-Neレーザーに横あるいは縦方向に磁場を印加し、Zeemanビート周波数を検出してレーザー周波数を制御する方法が開発されている⁵⁾。この方法は、交流信号を制御信号として用いているため、レーザー計測への応用範囲も広い。一般にこのビート周波数はレーザー管により異なるが、1 MHz程度である。この周波数を積極的に利用した種々の計測が行われている。しかし、ビート周波数が低いため、高速計測への光源としては適していない。そこで、光強度の変動や光学的及び電氣的雑音の影響を受けにくく、また高速変動現象も計測可能である方法が望まれている。その方法としてレーザーの軸モード間ビート周波数の変化を直接検出し、それを制御信号として用いた新しい安定化法が必要とされている¹⁰⁾。本報告において、この軸モード間ビート周波数を使用した安定化法の原理、安定化システム及び安定化の実験結果について詳細を述べる。

2. 安定化原理

He-Neレーザーの出力特性曲線をFig. 1(a)に示す。2本の軸モードで発振しているレーザーの周波数と出力強度は、図に示すようにレーザー管の熱膨張あるいは収縮により軸モードが移動するため変動する。また、各々の軸モードはレーザー反射鏡の異方性のため、互いに直交偏光している¹¹⁾。各偏光方向をそれぞれ $\parallel$ 及び $\perp$ で識

別すると出力強度は $I_{\parallel}$ 及び $I_{\perp}$ で表される。

一方、観測される出力強度($I = I_{\parallel} + I_{\perp}$)は内部鏡型レーザー管の長さが熱的に変動すると、共振器の長さ L が変動するため、軸モードが移動し、Fig. 1(b)に示すようになる。2本の軸モードの周波数を各々 f_1 及び f_2 とすると、軸モード間のビート周波数は $f_B = |f_1 - f_2|$ と表される。このビート周波数は、偏光方向に対し、レーザー共振器の Q 値や屈折率の違いにより、Fig. 1(c)に示すようにレーザー管の長さ変化に伴い変動する¹²⁾。また、ビート周波数は軸モード間の相互作用及び非線形性に依存する。強度比較を採用した制御法では、基本的にこれらの周波数変動は制御できない。そこで、軸モード間ビート周波数を誤差信号として、レーザー周波数の安

Fig. 1 Schematic representation of (a) a laser gain profile as a function of frequency; (b) laser output power and (c) axial-beat frequency as a function of the laser cavity length L . λ is the laser wavelength.

安定化を行った。

軸モードビートの周波数は高く制御信号として適していないため、ビート信号 $\Delta f = |f_B - f_{PLL}|$ のように周波数変換して使用した。ここで f_{PLL} は、基準周波数発振器に水晶発振子(1.4×10^{-10} / °C)を使用した周波数シンセサイザーの発振周波数である。この Δf を電圧信号に変換し、熱的にレーザー管の長さを制御し、安定化を行った。

3. 実験

実験に使用したレーザー安定化のためのブロック図をFig. 2に示す。また、レーザー管の周囲の図をFig. 3に示す。内部鏡型He-Neレーザーは、UNL-210R(ウシオ社、30 mm同軸構造)で、軸モード間周波数が650 MHz(レーザー管長230 mm)であり、通常2ないし3本の軸モードで同時発振する。放電電流の変動はレーザーの周波数及び強度に影響を与えるため、自作の高精度定電流電源¹³⁾を使用した。この電源の最大放電電流は5 mAであり、電流安定度は $\pm 0.001\%$ 以下であった。定電流電源にレーザー管は、バラスト抵抗(50 k Ω)を介して接続した。

Fig. 2 Experimental arrangement for frequency stabilization : P, polarizer ; APD, silicone avalanche photodiode ; DBM, double balanced mixer ; FVC, frequency-voltage converter ; BS, beam splitter.

安定化状態にあるレーザー共振器長が変化しない状態においてもレーザー回りの室温が変化すると、レーザー管の熱膨張のため管径等が変化し、レーザー管の封入気体圧力が変動する。これが主原因で、レーザー周波数が ≈ 0.4 MHz/°Cで変動するため^{2, 14)}、レーザー管を直径40 mmのアルミニウム管内にテフロンで固定し、そのアルミニウム管の温度を制御した。アルミニウム管の外側に温度制御用のニクロム線ヒータを電氣的に絶縁して巻いた。ヒータ線に電流を流すと磁界が発生する。これらの効果を避けるため、2本のヒータ線を平行に巻き、各々の巻線に逆方向の電流を流し、磁界の発生を防止した。これはレーザー管に磁界を印加した場合、Zeeman分離と軸磁界による周波数変動を防止するためである。アルミニウム管は、室温の変動によりレーザー管の温度が変動するため、ガラス繊維で覆った。この状態で30 °Cに温度制御したとき、アルミニウム管内部の温度変動は ± 0.2 °Cであった。この温度変動は、レーザー周波数変動に換算すると、 ± 80 kHzとなり、本研究では十分な性能であると考えられる。レーザー周波数を安定化するため、レーザー管にMINCO社のフィルム・ヒータ(360 Ω)を両面接着テープで固定し、共振器長を熱的に制御した。また、レーザー管後側ミラーの裏面からの戻り光により安定度が低下することを防ぐため、エッジ状のガラス板をミラーの裏面に接着した。

制御信号として使用するビート周波数 f_B はレーザー管の後側に出力されるビームから検出した。

Fig. 3 Schematic representation of the laser tube circumference.

そのため、前方へのビームは、計測等に有効に使用できる。内部鏡型He-Neレーザーの隣り合う軸モードは、レーザー反射鏡の異方性のため互いに直交した方向に直線偏光している¹¹⁾。そこでモード間ビート周波数は、レーザー管の後側に偏光子を45°の方角で設置し、シリコン・アバランシェ・フォトダイオード(APD, 浜松ホトニクス, S2382)によって検出した。このAPDの出力信号は高周波増幅器により増幅された。ビート周波数の変動は、増幅器出力をスペクトル・アナライザーに導き観測した。軸モードの発振特性は光スペクトル・アナライザーで測定した。ダブル・バランスド・ミキサー(DBM)はビート周波数 f_b の周波数変換器として用いた。FVCは Δf の周波数-電圧変換器である。制御信号は、FVCの出力信号と基準電圧(高安定温度補償型ツェナーダイオードLM399を使用)を差動増幅器(INA101HP)で比較し発生させた。その信号でレーザー管に巻いたフィルム・ヒータを加熱し、レーザー管長を熱的に制御した。制御系の時定数及び利得は、安定化系が最適制御状態になるように選択した。加熱によりレーザー管長を制御するため、制御時にはレーザー管長が収縮状態にあることが必要であり、制御前にフィルム・ヒータに電流を流し、レーザー管長を十分に熱膨張させた。また、FVCの出力をペンレコーダに接続し、レーザー管の熱膨張の特性と熱膨張時の軸モードのビート周波数変動の状況及び周波数安定化の状態を記録した。

本安定化法で安定化したレーザーの周波数安定度評価のため、他の安定化レーザー¹⁵⁾(ミットヨ LSI-50, $\lambda = 632990937.4 \text{ fm}$ (沃素安定化レーザーで校正済み波長))とのビート周波数を偏光素子を使用しAPDで検出し、周波数カウンタで計数した。カウンタの計数結果をパーソナルコンピュータに取り込み、アラン分散¹⁶⁾で安定度の評価を行った。

4. 実験結果及び考察

本研究で使用したレーザー管の点灯時からの熱膨張特性を、出力変動より見積もり³⁾, Fig. 4

Fig. 4 Thermal expansion length of the laser tube as a function of time after start of discharge.

に示す。この図は、アルミニウム管の温度制御をレーザー点灯時から行い、また制御用のフィルム・ヒータを加熱状態にした場合を示している。アルミニウム管の温度は約20分後に設定値となり、温度変動幅は $\pm 0.2^\circ\text{C}$ であった。しかし、この状態でもレーザー管は多少線膨張状態にある。

Fig. 5は、熱膨張状態における軸モード間ビート周波数変動の拡大図である。この図で示したように軸モード間ビート周波数はレーザー管の熱膨張と共に変動している。このビート周波数の変動幅は1.36 MHzであった。この値は他のレーザーではほぼ同じ値である¹²⁾。光スペクトル

Fig. 5 Experimental results of axial-beat frequency as a function of time.

アナライザーを使用し、実測した各軸モードの $\parallel$, $\perp$ 成分の相対的位置, 及び, その状態でのモード間ビート周波数との関係をFig. 6に示す。Fig. 6(b)は, Fig. 5のビート周波数変化を拡大したものである。図の状態Aは, 2本の軸モードで発振しており, $\perp$, $\parallel$ の順に軸モードが存在する場合に, 軸モードビート周波数が最も低い。A, B, Cの状態の順に周波数が高くなり, 状態Cでは3本のモードが同時発振状態となる。光スペクトルアナライザーによる観測結果, 及びビート周波数変化から判断すると, $\parallel$ と $\perp$ の高周波数成分との間のビート周波数を測定していると考えられる。3本の軸モード発振状態は,

2本の軸モード発振状態に比較し軸モード間の相互作用が強くなり, ビート周波数が高くなったものと考えられる。また, C, D, E状態の順にビート周波数が低くなる。そして, 状態Eでは2本の軸モード状態で発振し, 偏光状態は $\parallel$, $\perp$ の順となる。この状態では, Aの状態に比較し, ビート周波数が高くなっている。これらの軸モード間のビート周波数の特性は, 各偏光方向に対するレーザー共振器の Q 値の違い, あるいは, 屈折率の違いによるものと考えられる。

安定化前のレーザーと他に準備した安定化レーザーとのビート周波数をカウンタで計数した結果をFig. 7に示す。カウンタの計数時間は, 1秒であった。ビート周波数は, レーザーの管長が熱膨張に伴い, 変動する。また, この状態のアラン分散を示した図がFig. 8である。安定化していない場合, レーザーの安定度は約 10^{-6} であることが分かる。本研究において, 軸モード間のビート周波数をレーザーの安定化信号として使用し, また加熱的にレーザー管の長さを制御する場合, レーザー安定化に使用できる状態はFig. 6(b)においてBとCの間及びFの位置が好ましいが, 予備的安定化実験の結果, F点における制御がより安定であった。この結果は制御系の安定性及びレーザー管の熱膨張速度に関係していると考えられる³⁾。この状態では3本の軸モードでレーザー発振しているが, $\parallel$ 偏光のモードのうち強度の弱い成分はビート周波数発生に

Fig. 6 Schematic diagram of (a) gain profile and axial modes, and (b) axial-beat frequency.

Fig. 7 Frequency fluctuations of the unstabilized laser as a function of time.

Fig. 8 Square-root of the normalized Allan variance vs. the averaging time τ . The laser is at the free running state.

はほとんど寄与しないため、2本の軸モード間ビート周波数が検出可能であった。

Fig. 9に安定化した場合のビート周波数変動と時間との関係を示す。図に示すように安定化が可能であった。安定化前のビート周波数の変動幅は1.36 MHzであった。これに対し、安定化後の変動幅は約0.04 MHzとなった。安定化レーザーの周波数安定度を評価するため、基準レーザーとのビート周波数をカウンタで計数し、計数データをパーソナル・コンピュータに入力し解析した。計数時間は1秒で測定したビート周波数と時間の関係をFig. 10に示す。Fig. 10とFig. 7とを比較すると明らかなように、安定化されていることがわかる。図におけるビート周

Fig. 9 Experimental result of frequency stabilization. The axial-beat frequency as a function of time.

Fig. 10 Frequency fluctuations of the stabilized laser as a function of time.

Fig. 11 Square-root of the normalized Allan variance vs. the averaging time τ . The laser is at the stabilized state.

波数の変動幅は、 $\pm 2.2 \text{ MHz}$ ($\pm 4.6 \times 10^{-9}$) であった。ビート周波数変動のアラン分散をFig. 11に示す。この結果、周波数安定度は 4.5×10^{-10} であることが分かる。また、安定化時のレーザー出力の安定度は0.21 %であった。なお、安定化された単一周波数は、Fig. 6のFから分かるように偏光子を使用すれば、得ることができる。

5. まとめ

内部鏡型He-Neレーザーの軸モード間ビート周波数はレーザー管の熱膨張とともに変動する

が、この変動を積極的に利用した新しいレーザー安定化法の詳細について述べた。本安定化法は、軸モード間ビートと周波数シンセサイザーとのビート周波数を用いて、レーザー周波数を制御している。ビート周波数の最大変動幅は1秒の平均時間において2.2 MHz (4.6×10^{-9})であり、アラン分散による周波数安定度は 4.5×10^{-10} であった。また、この場合のレーザー出力安定度は0.21%であった。この安定化レーザーは、高精度レーザー干渉計、高周波ビート周波数を積極的に利用した高速ヘテロダイン干渉計及びレーザー距離計¹⁷⁾に使用可能であると考えられる。

本安定化法において、軸モード間ビートと周波数シンセサイザーの周波数がほぼ同一に設定可能であるならば、DBMによって両周波数の位相差を検出し、それによりレーザー周波数が制御可能であると考えられる。この場合、FVC回路を省略でき、さらなる高安定化が達成できると考えられる。

謝 辞

本研究にあたり種々ご協力いただいた深谷次助氏、またご援助いただいた(株)ミットヨに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H. Matsumoto : Precision Eng. 6 (1984) 87.
- 2) A. Sasaki and S. Masuda : Appl. Opt. 30 (1991) 933.
- 3) 佐々木, 石川 : レーザー研究 11 (1983) 754.
- 4) R. Balhorn, H. Kunzmann and F. Lebowsky : Appl. Opt. 11 (1972) 742.
- 5) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki : Appl. Opt. 19 (1980) 442.
- 6) C. Eom, T. B. Eom and M. S. Chung : Appl. Phys. Lett. 57 (1990) 739.
- 7) P. -Y. Chien and C. -L. Pan : Rev. Sci. Instrum. 62 (1991) 933.
- 8) 梅田 : 光学 16 (1987) 398.
- 9) 田中, 大田, 一ノ瀬, 村上 : レーザー研究 20 (1992) 392.
- 10) A. Sasaki, T. Okada, S. Kawai and H. Aoyama : Appl. Phys. Lett. 58 (1992) 1151.
- 11) T. Yoshino : Jpn. J. Appl. Phys. 11 (1972) 263.
- 12) R. Balhorn, F. Lebowsky and D. Ullrich : Appl. Opt. 14 (1975) 2955.
- 13) A. Sasaki : Jpn. J. Appl. Phys. 24 (1985) 885.
- 14) W. R. C. Rowley : Meas. Sci. Technol. 1 (1990) 348.
- 15) 上田 : 光アライアンス 2(3) (1991) 9.
- 16) D. W. Allan : Proc. IEEE 54 (1966) 221.
- 17) K. Seta and T. O'ishi : Appl. Opt. 29 (1990) 354.