レーザーオリジナル

市販内部鏡型 He-Ne レーザーの出力・周波数同時安定化

佐々木 彰*・石川 秀 昭*

(1983年 8 月22日 受理)

Simultaneous Stabilization of Output Power and Frequency
of a Commercially Available Internal-Mirror He-Ne Laser

Akira SASAKI* and Hideaki ISHIKAWA*

(Received August 22, 1983)

Both the output power and the frequency of a commercially available internal-mirror He-Ne ($\lambda = 633 \text{ nm}$) laser (GLG5000) are stabilized simultaneously by a simple method. The total rear beam intensity is detected with a silicon photodiode. The electric voltage proportional to the difference between the photodiode output and a stable dc reference voltage is applied to a dc motor which rotates a cooling fan controlling the laser tube length change due to thermal expansion; consequently the laser output and frequency are stabilized at the same time. The relative laser output stability of $\pm 0.45\%$ and the relative frequency stability of $\pm 1.48 \times 10^{-8}$ are obtained over a period of 10 minutes or longer.

1. はじめに

He-Ne レーザーは可視光であること、ビームの良質さ、低電力で作動するなどの優れた特徴から、レーザー応用分野、特に計測用として広範囲にわたって利用されている。一般に良く用いられる内部鏡型 He-Ne レーザーはほぼ完全な TEM₀₀ モードであり、出力光はガウス型の強度分布をもつガウスビームである。しかしこの型のレーザー出力の偏光状態はレーザー鏡のわずかな異方性のため、隣り合う軸モード間で異なり、各々垂直に直線偏光している^{1,2)}。上述したような特徴を有している内部鏡型 He-Ne レーザーも精密な測定に用いる場合、レーザー出力パワーが数%変動すること、そして相対的レーザー周波数が 10^{-6} のオーダーで変動していることなどが問題となっている^{3,4)}。例えば、レーザーを用いた光計測において、多くの場合光信号

を光電的に検出するのであるが、その際レーザー出力パワーの変動は測定精度を著しく低下させる。このような問題点を克服するため過去に多くの周波数⁵⁻¹⁷⁾ならびに出力安定化レーザー^{5,7,18-24)}の研究がなされてきた。

筆者らは以前に、レーザー管の後側の鏡から漏れてくるレーザーの出力パワー、すなわち後側レーザー全出力を検出し、その信号によりレーザー管をファン冷却することで、出力・周波数同時安定化できることを示した³⁾。しかしながらこの制御方式をそのまま市販 He-Ne レーザー装置 (例: NEC GLG5000) に適用するには、レーザー装置内部の空間が小さいこと、レーザー鏡ガラスによる光学的帰還があること、レーザー管特性の違い等がある。本報告において市販 He-Ne レーザー装置をほとんど改良せずに行った出力・周波数同時安定化の試みについて述べる。製作した装置は市販 He-Ne レー

* 静岡大学工学部 (〒432 浜松市城北)

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

ザー装置 (GLG 5000) がそのまま使用できること、電気回路等が簡単であることのため、研究室等で出力・周波数同時安定化 He-Ne レーザーを簡単に製作できるものとする。

2. 安定化原理

He-Ne レーザー出力パワーの周波数特性曲線を Fig.1(a), (b) に示す。特性曲線はアイソトープシフト, Lamb dip 等のため²⁵⁾, ドップラー効果による線の広がり形状とは異なったものとなっており, 中心周波数に対して非対称の曲線となっている。今, この特性曲線のもとでレーザーが2あるいは3軸モードで発振している場合を考える。内部鏡型 He-Ne レーザーにおいては鏡に含まれるわずかの反射異方性とモード競合のため軸モードは直線偏光し, 隣接する

各々の軸モードの偏光方位は互いに直交しており, 直線偏光の向きはレーザー管に特有である^{1,2)}。図において $\parallel$ そして $\perp$ はそれぞれ直線偏光の方向を表わす。各々の軸モードは同一の, そして一定の周波数特性曲線上で発振すると仮定する。それぞれの偏光成分に対するレーザー出力を $I_{\parallel}$, $I_{\perp}$ と表わす。レーザー共振器長 L が変化した場合レーザーの全出力 ($I_{\parallel} + I_{\perp}$) そしてそれぞれの偏光成分の出力の差 ($I_{\parallel} - I_{\perp}$) は Fig.1(c) そして (d) に示すように変動する。今 Fig.1(c) に示す A あるいは B の部分でレーザー出力を制御すれば, $I_{\parallel} + I_{\perp}$ は安定化されることになる。レーザー周波数特性曲線を同一そして一定であると仮定したため, $I_{\parallel}$, $I_{\perp}$ そして $I_{\parallel} - I_{\perp}$ もまた安定化されることになる。 $I_{\parallel} - I_{\perp}$ の値は Fig.1(d) に示すようにレーザー管の伸びと共にレーザー波長 λ の周期で変動するため, この値よりレーザー発振周波数の安定度を見積ることができる。

通常の内部鏡型 He-Ne レーザーではレーザー鏡が放電管と一体となっているため, 共振器は機械的に非常に安定である。レーザーの出力および発振周波数変動の主な原因はレーザー放電電流によるレーザー管の加熱によりレーザー共振器長そしてレーザー Q 値等が変化するためである。共振器の熱膨張によって共振周波数が変化し周波数特性曲線上を動くため, Fig.1(c) に示すようなレーザー出力変動が生じる。

Fig.1(c) に示した A あるいは B の部分でレーザー出力を制御するため, ファン冷却による方法を採用した。今制御設定値よりレーザー管が伸びることによってその値が大きくなったとする, その時冷却ファンでレーザー管長を縮めれば出力値は小さくなる, このように設定値で制御可能となる。Fig.1(c) の A, B の部分において, レーザーは2軸モードで発振している。3軸モードで発振しているのは Fig.1(c) の山, 谷の部分においてのみである。このように2あるいは3軸モードで発振しているにかかわらず, 制御時には2軸モードで発振しており, 偏光子を用いることにより簡単に出力・周波数安定化した単一周波数出力を取り出せることを意味している。

Fig.1 Schematic representation of (a) a three-mode laser output power profile; (b) a two-mode laser output power profile, (c) sum of the intensities of the modes and (d) difference in intensities between $I_{\parallel}$ and $I_{\perp}$ as a function of laser cavity length L . λ is the laser wavelength.

3. 装置の製作および実験

実験配置を Fig. 2 に、またレーザーと装置の写真を Fig. 3 に示す。使用した He-Ne レーザー装置は NEC GLG5000 であり、そこで用いられているレーザー管は同軸型構造の GLT172 である。GLG5000 レーザーのほとんどのものは 2 あるいは 3 軸モードで発振しており、隣接する軸モードの偏光状態は各々垂直に直線偏光している。このレーザー管の共振器長は約 225 mm であるため、モード間隔 ΔF は約 670 MHz である。GLG5000 レーザーにおいて、前側レーザー鏡のガラス面による光学的帰還（ガラス面

によるレーザービームの反射成分がレーザー共振器にもどる現象^{22,26)}のため、後側ビーム出力が安定化されても、前側ビーム出力が変動する現象が見られる。この効果を避けるため、角度約 3 度をもったくさび状ガラス板を前側レーザー鏡に接着した。

後側レーザービームを受光する素子 SP1 を配置するため、GLG5000 内の電源用トランスを多少後方に移動した。後側レーザービームはピンホール（約 1 mm ϕ ）、赤色プラスチック・フィルター F そしてシリガラス板を通過後シリコン・フォトダイオード SP1（HTV S1227-66BR）を用いて受光される。ピンホール、フィルターは制御に悪影響をあたえるレーザー管からの 633 nm 以外の放出光を減光するために挿入されている。シリガラスはシリコン・フォトダイオード面上の受光感度むらの影響を避けるために挿入されている。フィルター、シリガラスはそれらによる反射レーザービームがレーザー共振器に帰還するのを避けるため、わずかに傾けてある。狭い空間に上記のものを取り付けるため、特にシリコン・フォトダイオード SP1 の電氣的絶縁に注意する必要がある。

シリコン・フォトダイオード SP1 からの光電流 I はオペアンプ OP1 を使用した I - V 変換器により電圧信号 $V_p = -IR$ に変換される。ここで R は OP1 の負帰還抵抗であり、後側ビーム出力によってその抵抗値を決定する。本実験の場合 800 k Ω の抵抗を用いた。OP1 には入抵抗が大きく、漏れ電流の小さい JFET 入力のものを使用した。抵抗と並列に接続された電気容量 C によって、本制御系の時定数を決定する。レーザー管の熱膨脹等の時定数は大きいため、この容量 C の値を小さくしてもほとんど制御系には影響をあたえない。本実験では約 1300 pF のものを使用し、時定数を 1×10^{-3} sec とした。

I - V 変換器からの制御信号 V_p と基準電圧 V_R が差動増幅器 DA に入力される。基準電圧 V_R と制御信号 V_p との差が増幅され後段に送られる。基準電圧の安定度が本装置の性能に最

Fig. 2. Experimental arrangement for output power and frequency stabilization: F, plastic filter; SP1-SP3, silicon photodiode; OP1, operational amplifier (LF 356HC); DA, differential amplifier (LF352D); OP2, operational amplifier (LM 741HC); MS, measurement system; ZD, zener diode (LM399).

Fig. 3 Photograph of a He-Ne laser (GLG 5000) and a control system.

も影響をあたえるため、恒温槽入り高安定ツェナーダイオードZD（温度係数 3 ppm/°C）を使用している。ダイオードの出力電圧は約6.95 Vであり、ポテンシオメーターPMを用いて分圧して基準電圧を得ている。なおポテンシオメーターを可変することでFig.1(c)のAあるいはBのどの部分に基準電圧を設定するかが可変でき、またFig.1(d)からもわかるように設定するレーザー周波数も多少可変できる。

差動増幅器のゲインは R_s/R_c の比でさまり、本装置では R_c を可変にすることによって1～1000倍のゲインが可能である。差動増幅器の出力はDCモーター駆動用パワーアンプに入力される。DCモーターとしては信州精器のSUN-5（ハンディ・ミニドリル用モーター）を使用した。

GLG 5000レーザーに冷却用ファンを取り付けるためレーザー上蓋上に直径50 mmの穴をあけた。穴の位置はレーザー管長さ方向の中心とした。なおファンによる振動の効果をできるだけ低減するため、ファンの支持台をシリコンゴムを介して、レーザー上蓋上に取り付け、かつレーザー上部前後に重りを載せ測定を行った。レーザー本体に加工した部分は上記のファン冷却用部分に加えて後側ビーム光強度測定用、リニアサーミスタ（温度測定用）用の線の取り出し口をGLG 5000レーザーの側面にもうけた部分を合計すれば3カ所だけである。

レーザービームの出力、周波数安定度を測定するため、前側ビームをWollastonプリズムWPを用いて、互いに直交する偏光成分に分離し、各々をシリコン・フォトダイオードSP2, SP3を用いて受光した。Fig.2に示した測定系MSで $I_{||}$, $I_{\perp}$, $I_{||} + I_{\perp}$ そして $I_{||} - I_{\perp}$ の信号を作り、それらをペンレコーダーに入力して記録した。後側ビーム光強度（Fig.2のmonitor）も記録できるようにした。実際に本装置を使用する際には後側ビーム出力を観測すれば安定度の目安が得られ十分その目的が達せられる。それを行わないときには、一様に回転しているモーター音を聞いているだけで制御がうまく働いてい

るか確認できる。

レーザー管の温度は温度と出力電圧が線型であるサーミリアー・コンポーネント（YSI社 44202）を用いて測定した。レーザー管に温度分布が生じているので、レーザー管の平均的温度を測定するため、銅板をレーザー管に沿わせて接触させ、その銅板に素子を取りつけ測定した。なお、この銅板を取り付けた状態およびはずした状態で制御をかけたが、差はみられなかった。GLG 5000レーザー用電源としては電圧安定化装置を通したのち、スライドトランスで所望の電圧（レーザー放電電流）を得ている。

4. 結果と考察

4.1 レーザー管の熱膨脹特性

Fig.4 Typical experimental result of (a) output power fluctuations, (b) $I_{||} - I_{\perp}$ and (c) temperature rise of the laser tube under a free running condition. The laser discharge current is 5.2 mA.

Fig. 4 にレーザー放電流 5.2 mA (AC100 V) の場合のレーザー全出力 $I_{\parallel} + I_{\perp}$, $I_{\parallel} - I_{\perp}$ およびレーザー管温度上昇を時間の関数として示す。Fig. 4(a) よりわかるようにレーザー出力は時間と共に大きくなり、ある時間ではほぼ一定値（平均値として）に近づく、またレーザー出力変動は温度上昇と共に周期が長くなる。その変動はレーザー全出力の平均値の $\pm 3\%$ である。この一周期は Fig. 1(c) で示したようにレーザー管の熱膨脹による $\lambda/2$ の伸びに相当している。この変動の様子はほとんどすべての GLG 5000 で同じように観測される。変動の立ち上り部分が各々 Fig. 1(c) の A, B 部分に相当しており、ほとんどすべての GLG 5000 レーザーのこの部分は熱膨脹に対してほぼ直線的に変化するため本制御方式はレーザー管を選ぶことなく適用可能であると考ええる。

Fig. 4(b) の $I_{\parallel} - I_{\perp}$ の 1 周期はレーザー管の熱膨脹による伸び λ に相当しており、山谷の間が 670 MHz のレーザー周波数に対応している。また、この直線部分で制御がかかればその変動値より、周波数変動値が見積れることがわかる。Fig. 4(c) は室温からの温度上昇を示している。以上の測定をレーザー放電電流を変化させて行った。その時のレーザー出力と放電電流との関係を Fig. 5 に示す。約 5.2 mA 付近にピークをもつ型となっている。

Fig. 6 にレーザー管の熱膨脹による伸びと時間の関係をレーザー放電電流をパラメータとして示す。レーザー放電電流値が大きいほど早くレーザー管が伸びることがわかる。この時の時定数は放電電流にほとんど依存せず約 13 分であった。Fig. 7 にレーザー管の熱膨脹の速さと時間の関係を示す。レーザー管熱膨脹速度が時間と共に減少していること、またレーザー放電電流の大きさに依存していることがわかる。

Fig. 8 にレーザー管の熱膨脹速度とレーザー管の温度上昇の関係をレーザー放電電流をパラメーターとして示す。レーザー放電電流を変化させた場合でも、その傾きはほぼ一定であること、レーザー放電電流値が変化すると熱膨脹速

Fig. 5. Relative laser output power as a function of laser discharge current.

Fig. 6. Thermal expansion length of the laser tube as a function of time after start of discharge.

Fig. 7. Thermal expansion speed of the laser tube length as a function of time after start of discharge.

度が大きく変わることがわかる。Fig. 9 にレーザー管膨脹速度と温度上昇の関係をレーザー放電電流をパラメーターとして示す。この図より放電電流値が変化しても、その関係はあまり変化せずほぼ同一の直線上にのることを示している。この図の直線は熱膨脹係数 $56 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ の場合を示しており、ほぼこの値に近い値が測定値よ

Fig. 8 Thermal expansion speed of the laser tube length as a function of temperature rise.

Fig. 9 Thermal expansion length of the laser tube as a function of temperature rise.

り得られる。使用したレーザー管の材質は硼珪酸ガラスであるが、この熱膨脹係数とほぼ等しい値となっている。ファン冷却により制御をかけた場合、以上のことより出力および周波数安定度に最も影響をあたえるのはレーザー管伸び速度と考えられるため、伸び速度の関数として出力・周波数の測定を行う。

4.2 出力・周波数安定化

Fig. 10 に出力、周波数安定化例を示す。図の場合放電電流は約 5.2 mA であり、制御を入れた時点のレーザー管の伸び速度は約 2 λ/min であった。制御を入れることによって放電電流によるレーザー管の加熱とファンによる冷却が平衡状態になり、レーザー管の熱的伸びがほぼなくなる。この場合の出力変動 Δa は $\pm 3\%$ から $\pm 0.4\%$ に減少している。また周波数変動 Δf も $\pm 7\text{MHz}$ の範囲内に安定化している。差動増幅器 DA のゲインを最適の状態に設定し、その状態でゲインを固定した。ゲインが大きい場合、ハンテイングが $I_{\parallel} + I_{\perp}$, $I_{\parallel} - I_{\perp}$ に見られる。またゲインがあまり小さいと制御状態に入れないことになる。Fig. 10 に示した制御状態の場合

Fig. 10 Typical result of, (a) output power stabilization and (b) frequency stabilization. The thermal expansion speed at the time of Feedback on is 2 λ/min and the laser discharge current is 5.2 mA.

Fig.11 Typical experimental results of (a) relative frequency stability and (b) output power stability as a function of thermal expansion speed. The laser discharge current is 5.2 mA.

合、前に示したようにレーザーは2軸モードで発振しており、Wollastonプリズムあるいは偏光子を用いることにより簡単に単一周波数出力を取り出せる。

Fig.11に放電電流値を5.2 mAとし、レーザー管伸び速度と相対的周波数安定度および相対的出力安定度の関係を示す。安定度の測定は10分間における変動値のピーク・ピーク値より求めている。伸び速度が遅いまたは早い場合には安定度が落ちることがわかる。伸び速度が早い場合には制御系の応答がおいつかないためと考えられるが、その主原因はレーザー放電電流により、レーザー発振用細管が加熱され、熱伝導により同軸構造の外部ガラス管に熱が伝わるのに時間がかかるためと考えられる。すなわち同軸型レーザー管の熱的応答は遅いため、急激な熱的变化がある場合、制御しきれないことになる。レーザー管の伸び速度が遅い場合には、

Fig.1(c)のA, Bの傾きがゆるくなり、みかけ上制御系のゲインが減少するため安定度が悪くなると考えられる。

伸び速度0.5~2.8 λ/minの間で安定度はほぼ一定値となり、相対的周波数安定度は $\pm 1.48 \times 10^{-8}$ 、相対的出力安定度は $\pm 0.45\%$ となった。レーザー放電電流値を変化した場合にも Fig.11に示した結果とほぼ同じような結果が得られた。Fig.12に放電電流5.2 mA、レーザー管伸び速度2.8 λ/minで制御を入れた場合の周波数そして出力の長期的安定度の実験結果例を示す。周波数は ± 9 MHz ($\Delta f/f = \pm 1.9 \times 10^{-8}$)、出力は $\pm 0.5\%$ の安定度が得られた。室温を15~35℃の間で変化させ、出力、周波数安定化の実験を行ったが上に述べたのと同様な実験結果が得られた。種々の計測に用いる場合この程度の出力・周波数安定度があれば十分に使用に耐えると考えられる。

Fig.13にレーザー放電電流の関数として出力そして相対的周波数安定度の測定結果を示す。これらの値は Fig.11のレーザー管伸び速度0.5~2.8 λ/minの領域のものに相当するものである。レーザー放電電流が増加するといくぶん安定度が良くなる傾向にあるが、その依存性は小さい。制御に入った状態で放電電流値を変化させた場合、レーザー管の加熱状態が急激に変化するため、出力そして周波数安定度は悪く

Fig.12 Long term stability of (a) frequency and (b) output power as a function of time. The laser discharge current is 5.2 mA and the thermal expansion speed is 2.8 λ/min.

Fig. 13 Output power stability (a) and relative frequency stability (b) as a function of laser discharge current.

なり、その後異なった出力、周波数に安定化される。レーザー放電電流値の変動が大きい場合には安定制御状態からはずれず。この一つの原因としては放電電流が変化すると、Fig. 5 に示したように出力光強度が変化し、Fig. 1(c)のA, Bの直線部分から外れるためと考えられる。以上の事より本装置を実際に使用する場合には、レーザー電源として安定化電源を使用することが望ましい。

本装置によって得られた出力・周波数安定度は今回用いたのと同じレーザー管の1あるいは2軸モード発振の場合³⁾に比較すると悪くなっている。この原因は今回製作したものでは、ファン冷却時の空気の流れについて考慮していないこと等のためと考えられる。レーザー装置底部等に穴をあけ空気が滑らかに流れれば改善できるものと考えられる。

5. まとめ

市販内部鏡型 He-Neレーザー装置 (GLG5000) の後側レーザー全出力を検出し、その信号を用

いて、レーザー管をファン冷却することで出力・周波数同時安定化を行った。使用した He-Ne レーザーの上蓋に3ヶ所の穴をあけると言う改造を行っただけであり、簡単な電気回路を使用して、相対出力安定度は $\pm 0.45\%$ そして相対的周波数安定度は $\pm 1.48 \times 10^{-8}$ が得られた。用いた制御方法はレーザー管を選ばず採用可能であり、光学的帰還にのみ注意を払えば、どこでも製作可能である。この方式は他の方式に比較して、(1)出力、周波数同時安定化ができること、(2)出力が比較的大きく偏光子の使用により単一周波数光を容易に得られること、(3) Lamb dip 法に較べて出力光が変調を受けないこと、(4)装置が簡単、安価にできる等の特徴を有している。

最後に本研究にあたり、くさび状ガラス板製作において御指導下さった本田猪三郎氏、種々御協力いただいた伊藤卓郎氏、牛丸真司氏、また穴あけ加工をして下さった静岡大学工学部学校工場の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 芳野：応用物理 **46** (1977) 601.
- 2) 梅田，平野，十川，高崎：応用物理 **47** (1978) 42.
- 3) A. Sasaki and T. Hayashi: Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 1455.
- 4) 佐々木，長手：レーザー研究 **10** (1982) 501.
- 5) レーザー学会編：レーザーハンドブック，オーム社 (1982)，P. 353.
- 6) 高崎，梅田：レーザー研究 **9** (1981) 11.
- 7) 芳野：レーザー研究 **9** (1981) 117.
- 8) R. Balhorn, H. Kunzmann and F. Lebowsky: Appl. Opt. **11** (1972) 742.
- 9) S. J. Bennett, R. E. Ward and D. C. Wilson: Appl. Opt. **12** (1973) 1406.
- 10) S. K. Gordon and S. F. Jacobs: Appl. Opt. **13** (1974) 231.
- 11) R. H. Morris, J. B. Ferguson and J. S. Warniak: Appl. Opt. **14** (1975) 2808.
- 12) J. N. Desai, T. Chandrasekhar and R. Madhavan: J. Phys. E **12** (1979) 1040.
- 13) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: Appl. Opt. **19** (1980) 442.
- 14) T. Yoshino: Jpn. J. Appl. Phys. **19** (1980) 2181.
- 15) N. Brown: Appl. Opt. **20** (1981) 3711.
- 16) P. N. Puntambekar, H. S. Dahiya and V. T. Chitnis: Opt. Commun. **41** (1982) 191.
- 17) H. Ogasawara and J. Nishimura: Appl. Opt. **31** (1982) 1156.

- 18) K. Sakurai, Y. Mitsuhashi and T. Honda: IEEE Trans. Instrum. & Meas. **IM-16** (1967) 212.
- 19) J. W. Hansen, K. F. Rodgers, Jr. and D. E. Thomas: Rev. Sci. Instrum. **39** (1968) 872.
- 20) R. Nowicki: J. Phys. E **4** (1971) 274.
- 21) E. A. Franke: Rev. Sci. Instrum. **44** (1973) 1515.
- 22) 林, 鈴木: 光学 **4** (1975) 234.
- 23) T. Yoshino and K. Kurosawa: Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 555.
- 24) T. Yoshino, S. Umegaki, H. Inoue and K. Kurosawa: Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 612.
- 25) J. T. Verdeyen: *Laser Electronics* (Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1981) p. 149.
- 26) W. R. C. Rowley and D. C. Wilson: Appl. Opt. **11** (1972) 475.