

## パーソナルコンピュータ制御による 横ゼーマンレーザーの周波数安定化

張 健\*・梅田 倫弘\*\*・高橋 秀年\*\*

\*中国ハルビン科学技術大学

\*\*静岡大学電子工学研究所 〒432 浜松市城北 3-5-1

(1985年7月22日受理)

### A Personal-Computer-Controlled Frequency Stabilization of Transverse Zeeman Laser

Jian ZHANG,\* Norihiro UMEDA\*\* and Hidetoshi TAKAHASHI\*\*

\*China Harbin University of Science and Technology, Harbin, China

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

This paper describes a frequency stabilization of transverse Zeeman laser controlled by a current of heater wound around the laser tube. First, an optimum structure of the laser tube enclosure is experimentally designed so as to reach near its thermal equilibrium state in the shortest possible time. By means of this laser head, we realized the single loop frequency stabilization by controlling the heater current with the aid of personal computer to keep the frequency of intramode beat constant. The frequency stability of the laser was  $2 \times 10^{-11}$  for the integration time of 1,000 s. Furthermore, to increase the frequency stability the control loop was added to the single frequency control loop in order to maintain the constant temperature of the magnetic poles at the side of laser tube.

#### 1. ま え が き

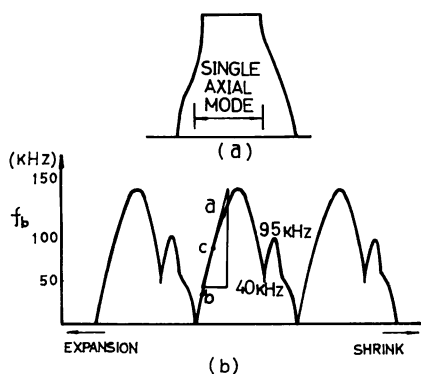
われわれは、周波数安定化横ゼーマンレーザー(STZL)を開発し、さまざまな光学計測への応用を提案してきた<sup>1,2)</sup>。これらに用いてきた装置のレーザー共振器長の調節方式は風冷ファンによる方法で、比較的応答速度が速いこと、構成が簡単なこと、駆動パワーが小さいことなどの特徴があげられる。しかし、ファンモーターが機械的な回転部品であるため、寿命が比較的短いこと、微小な振動を伴うこと、レーザーが外界の空気と直接接していることなどの欠点があった。

そこで、簡易型周波数安定化レーザーの初期段階から使われてきたヒーターによる共振器長制御方式<sup>3)</sup>を利用してSTZLを試作した。ヒーターによる制御方式は応答速度が比較的遅いので、制御利得や積分定数が自由に変更できるパーソナルコンピュータを採用して、制御系の最適化を行なった。

#### 2. レーザーの横磁場特性

この装置に使用したレーザー管は市販品の自然 Ne が封入された 285 mm 長さの内部鏡型 He-Ne レーザー管 (NEC 製 GLT 141) である。約 300 ガウスの横磁場を加えたとき、単一同位体ネオンを封入した管球と違うのは全利得領域で単一縦モード化するのではなく<sup>1)</sup>、**Fig. 1(a)**で示すように全利得領域の約 70% において単一縦モード化することである。これに対応して、単一共振縦モード内に存在する磁場方向とそれに直交する偏光成分の差周波数 (縦モード内ビート周波数:  $f_b$ ) の共振器離調特性も単調な S 字型<sup>\*1</sup> にならず、**Fig. 1(b)** のように二つの山があるように変化する。この図は、共振器長の長さ変化に伴って  $f_b$  周波数が周期的に変動する様子をその変化の三周期分表示したものである。横軸

\*1 参考文献 1) の **Fig. 3(b)** を参照。



**Fig. 1** (a) Gain profile of the laser filled with natural Ne, when a transverse magnetic field of 300 G is applied to the laser tube. (b) Bidirection change of intramode beat frequency when the temperature of laser tube is changed.

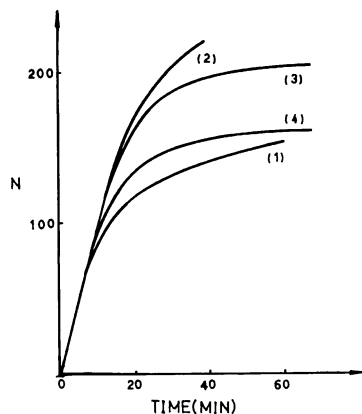
は共振器長の長さ変化, すなわち共振器の離調周波数に対応している。この曲線の直線部分を利用してレーザー管の長さを制御することができる。たとえば, **Fig. 1** (b)のc点において, レーザー管が伸びると, c点がb点に近づいて周波数  $f_b$  が減る。逆にレーザー管が縮むと, c点がa点に近づいて周波数  $f_b$  が増える。この特徴を利用し, レーザー管の温度制御によって共振器長を制御し, 周波数安定化を行なうことができる。

### 3. レーザー共振器の温度特性

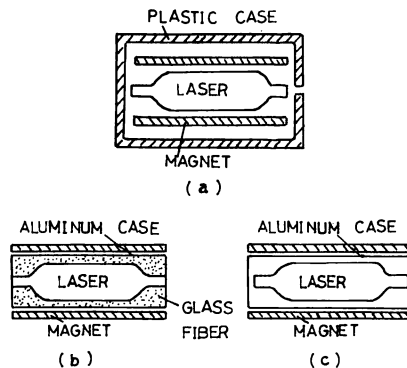
レーザー管の縦モードの周波数は次の式で決まる<sup>1)</sup>,

$$\nu = J \cdot c / 2nd$$

ただし,  $J$  は正整数,  $c$  は光速,  $n$  は媒質の屈折率,  $d$  は共振器の長さである。  $d$  は温度の関数であるから, レーザー管の周波数安定化というのは共振器の温度安定化といえる。共振器の温度特性は温度場の状態によって大きな差異を現す。 **Fig. 2** はある一本のレーザー管をそれぞれ違う温度場において測ったレーザー管の放電発熱による共振器長の伸びから求めたレーザー共振器の温度特性である。横軸は時間で, 縦軸は,  $f_b$  が **Fig. 1**(b)のように共振器長の伸びに伴って周期的に変化する回数  $N$  を積算したものである。この  $f_b$  周波数の変化が一周期だけ変化することは共振器長さが  $1/2n$  波長だけ変化することを意味するから, 縦軸は共振器の長さの変化を表す。 **Fig. 2** の曲線(1)は **Fig. 3**(a)に示すようなレーザー管と磁石を一緒にプラスチックの密閉箱に入れた場合である。レーザー管放電のため, 共振器が加熱されて伸び, 曲線(1)に示すように通電後15



**Fig. 2** Characteristics of expansion of laser resonator as a function of time. Curves 1, 2 and 3 represent the expansion for the use of housing shown in **Fig. 3** (a), (b) and (c), respectively. Curve 4 represents the expansion for the same housing for curve 3, but the aluminum housing is painted in black and the heat sinks are attached to the magnetic poles.



**Fig. 3** Various enclosures of laser tube to measure the temperature characteristics. (a) The laser tube with magnetic poles is enclosed with the plastic housing. (b) The laser tube enclosed with glass fiber is set in the aluminum housing. (c) Only the laser tube is set in the aluminum housing.

分間は共振器の伸びが速く, それ以後だいに遅くなるが, 伸びつつける傾向がある。これはプラスチック箱内の加熱される対象の熱容量が大きすぎて, なかなか熱平衡になることができないためである。 **Fig. 2** の曲線(2)は **Fig. 3**(b)に示すようなレーザーの外部をガラス繊維で巻いてから, アルミニウムで包んだ場合である。レーザー管は周囲のガラス繊維によって断熱されていて, レーザー管の放電熱が外へ出ないので, 温度が上昇し続ける。その結果, 共振器の伸び速度は速いが, 熱

平衡になる可能性はほとんどない。

前者の実験結果から、レーザー管を熱平衡にするには、加熱される対象の熱容量はできるだけ小さいほうがよい。また、後者の実験結果から、レーザー管を密閉する箱は外と一定程度の熱交換を保持しなければならないことが知られる。この考えに基づいて、Fig. 3(c)のような装置を試作した。レーザー管をアルミニウムで作った密閉箱に入れて、空気を通して外部と熱交換をする。この装置の温度特性は Fig. 2 の(3)に示すように、約45分たつと熱飽和の状態になる。つまり、レーザー管放電により出す熱量とアルミニウム箱から周囲の空間へ出す熱量がほぼ平衡した。もう一步考えると、アルミニウム箱と周囲の空間に対流の道がなく、レーザー管の支持材料も断熱材料であるから、熱交換の形式はほとんど輻射だけである。したがって、アルミニウム箱の表と裏を黒くすれば、熱平衡に達する時間が短くなるはずである。ただ、アルミニウム箱の表の磁石に向いている部分は黒くせず、しかも磁石に放熱板をつけて、磁石に吸収された放電熱を放射させて、磁石の温度と周囲の空間の温度とを一致させるようにする。このようにして得られた温度特性が Fig. 2 の(4)で、たしかに熱平衡に達する時間が短くなり、熱平衡温度も低くなった。

Fig. 2 の(3)或は(4)の場合において、熱平衡に近づくところで温度制御すれば、レーザー共振器の長さを制御できると考えられる。

## 4. 制御装置

### 4.1 構成

制御系を Fig. 4 に示す。

レーザー管の放電電流は安定化電源から供給する。レーザー管の周囲に電流  $I_1$  を通すヒーター  $H_1$  を巻く。

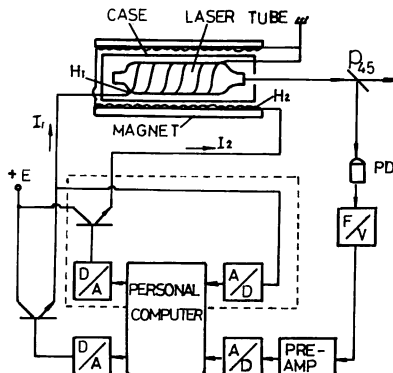


Fig. 4 Schematic diagram of a personal-computer-controlled frequency stabilization of laser.

このヒーターは電流によって発生する磁場がレーザーに影響を与えないようにするためにバイファイラー巻にした。所用のパワーは約2Wである<sup>4)</sup>。レーザーの出力光の一部を45°方位の検光子  $P_{45}$  を通して抜き出し、フォトダイオード PD に入射することによって縦モード内ビート信号  $f_b$  が電気信号としてえられる。この信号を周波数/電圧コンバーター (FVC)、プリアンプ、8 bit アナログ/デジタルコンバーター (ADC) を通じて、パーソナルコンピュータ (APPLE II) に取り込む。ADC のサンプリング時間は0.5秒である。マイコンからの比例積分制御信号を8 bit デジタル/アナログコンバーター (DAC)、パワーアンプを通して、ヒーター  $H_1$  に加える。

この装置の温度特性は Fig. 2 の(4)と似ている。ただ、ヒーター  $H_1$  の予熱電流を240 mA にすれば、熱平衡に達する時間が30分ぐらいに短縮できる。制御過程は次のとおりである。周波数  $f_b$  の制御目標値が Fig. 1 のc点だとすると、マイコンへ読み込む周波数  $f_b$  がこれより高ければ、マイコンからの比例積分制御出力が増して、 $I_1$  が増加し、動作点が目標値に移行する。逆に、読み込む周波数  $f_b$  が目標値より低ければ、比例積分制御系がヒーター電流  $I_1$  を下げ、レーザー管温度が下がって、共振器の長さが縮み、動作点が目標値に移行する。

### 4.2 オートロックプログラム

Fig. 1 に示すようにレーザー管が伸びているときと縮んでいるときの  $f_b$  変化の方向は逆になって、しかも二つの山がある。したがって、予熱状態から自動的に周波数制御状態に入るには、次の二点に注意しなければならない。

- (1) レーザー管が伸びているか縮んでいるかを判定すること。
- (2)  $f_b$  の直線の変化の a~b の間に動作点が設定されるようにすること。

このために、マイコンは  $f_b$  変化の傾きを計算して、 $f_b$  変化の方向を判断し、周波数制御するタイミングを自動的に選択する。そのプログラムのフローチャートを Fig. 5 に示す。

この装置では、まず  $f_b > 95$  kHz の山のところに注目し (Fig. 1(b)参照)、 $f_b$  変化の傾きがプラスからマイナスに変化すれば、レーザー管が伸びている状態にあり、逆になれば、レーザー管が縮んでいる状態にあることがわかる。もし、伸びる状態にあれば、制御系が a 点から、すなわち  $f_b > 95$  kHz かつ傾きがマイナスのとき

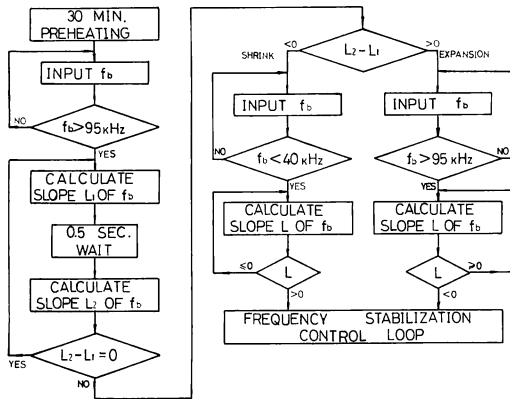


Fig. 5 A flow chart of program for automatic lock in frequency control loop.

自動的に制御に入ればよい。逆に、縮む状態にあれば、制御系がb点から、すなわち  $f_b > 40$  kHz かつ傾きがプラスのとき自動的に入る。装置は予熱してから自動的に制御ループを閉じる。

4.3 周波数安定度

以上のような装置で制御動作が最適化するようにパーソナルコンピュータのプログラムを用いて、制御系の比例利得と積分時定数を対話形式で適宜変更した。その結果、比例利得は  $f_b$  1 kHz の変化に対して、ヒーター電流 250  $\mu$ A, 積分制御は台形近似法を用いて4秒の時定数のとき、もっともよい安定化動作を示した。このときの周波数安定度をアラン分散値の平方根で評価した<sup>6)</sup>。光周波数の変化  $\Delta\nu$  は  $f_b$  同調曲線 Fig. 1 の動作点における傾きから求まる係数<sup>6)</sup>を用いて、 $f_b$  周波数の変動  $\Delta f_b$  の実測値から求めた。この装置の係数は  $\Delta\nu/\Delta f_b = 1.12 \times 10^8$  であった。実測した  $I_1$  制御系の光周波数アラン分散値の平方根は Fig. 6 の a に示すように、短期安定度は  $6 \times 10^{-10}$  で、長期安定度は  $2 \times 10^{-11}$  であった。比較のため、アナログ回路を用いたヒーター  $H_1$  による周波数制御の結果を b に示す。

4.4 二重制御による性能の改善

ヒーター  $H_1$  による制御は、ヒーターが露出しているため、たとえば、レーザーヘッド付近に人間が近づき、わずかな空気流の乱れがあると、安定化  $f_b$  周波数は擾乱を受ける。これを改善するためにレーザー管と磁石の間にもう1本ヒーター  $H_2$  を置き、レーザー管と外界を熱的に遮断した。ヒーター  $H_2$  に流す電流  $I_2$  は Fig. 4 の点線の囲みで示すようにヒーター  $H_1$  の電流  $I_1$  を目標値に保つようにパーソナルコンピュータを用いて積分制御させる。 $I_1$  制御系に対する外部擾乱は  $I_2$

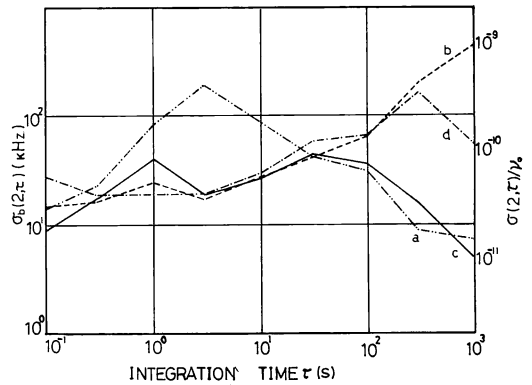


Fig. 6 Allan variance analysis of fluctuation in the intramode beat frequency for various types of control system. a: Single control by personal computer, b: Single control by analogue circuit, c: Dual control by personal computer, d: Dual control by analogue circuit.

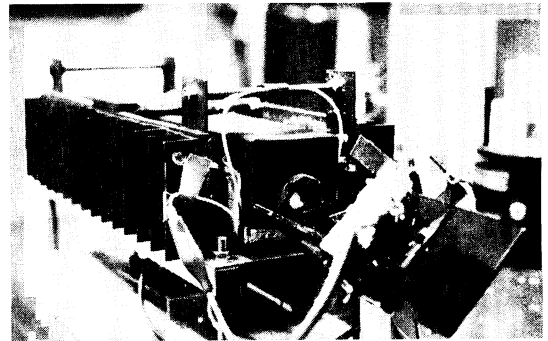


Fig. 7 A view of laser head of dual control system.

の制御系で克服し、外部擾乱が直接レーザー管に影響を与えず、レーザー管をほぼ恒温の環境で働かせる。このように構成した二重制御装置のレーザーヘッド部を Fig. 7 に示す。

ヒーター  $H_1, H_2$  に流す予熱電流をそれぞれ 240, 400 mA にしたとき、飽和温度に達する時間を25分に短縮することができた。このようにして予熱したレーザー管を周波数制御するため、 $I_1$  の制御系の制御利得、積分定数は一重制御系の時と同じに、 $I_2$  制御系の積分時定数は4秒にした。Fig. 8 は装置が外部擾乱を受けたときの  $I_2$  と  $I_1$  のゆらぎを CRT モニター上に表示した写真で、中央付近の横線が制御目標値である。写真から、外部擾乱によって  $I_2$  が大きくゆらいでいるにもかかわらず、二重制御系のために、 $I_1$  のゆらぎ、すなわち、 $f_b$  周波数はほとんど変化せず、制御目標値に安定している。このときの周波数安定度を  $f_b$  周波数のゆらぎの

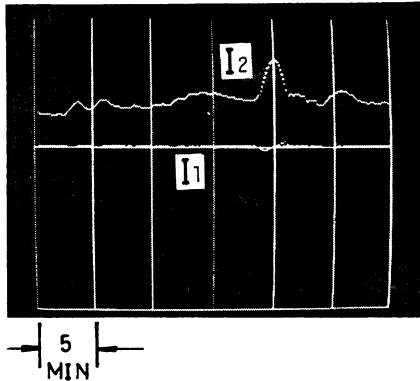


Fig. 8 Monitor display of heater currents  $I_1$  and  $I_2$  for the disturbance to the laser head.

実測値から推定したアラン分散値の平方根を Fig. 6 の c に示す。比較のため、アナログ二重制御による周波数安定度を Fig. 6 の d に示す。これからデジタル二重制御のほうはアナログ二重制御に比べ、長期の安定性が 1 桁ほど改善されていることがわかる。

## 5. 考 察

パーソナルコンピュータを用いたヒーター加熱制御による周波数安定化横ゼーマンレーザーを試作し、その性能を評価した。

レーザー管に巻きつけたヒーターの加熱電流の調節による共振器長の制御は十分な予熱を必要とし、かつ微妙な熱収支のバランスの上に成りたっている。したがって、横ゼーマンレーザーのように大きな熱容量をもつ磁石がヒーターの周囲にある場合、短い予熱時間をうるために被制御系の温度特性を測定して何らかの工夫をする必要がある。この装置では、レーザー管のケースを黒塗色とし、磁石に放熱器を取りつけ、ヒーターに一定な予

備加熱電流を流して、25 分の最短予熱時間が得られた。

Fig. 5 にみられるようにデジタル制御による一重制御方式と二重制御方式ではほとんど周波数安定度は変わらない。これは、アラン分散の測定中においては、レーザー装置付近の空気流の乱れがないためである。しかし、実際の STZL の応用に際しては、実験者がおり、空気流の変動が考えられる。そのような場合、二重制御方式の STZL のほうが有利であると考えられる。

ヒーター加熱による周波数制御方式は、従来の STZL 装置に用いたファンモーターのような回転部品がないので、装置の寿命が伸び、振動もいっさいない。また、パーソナルコンピュータによる自動制御は長期安定性の向上、制御系の最適化のためのパラメータ設定の容易さなどの特徴があげられる。しかし、アナログ方式と比べ、装置がやや大がかりとなるが、今回用いたパーソナルコンピュータではなく、いわゆるワンボードマイコンを用いれば、アナログ方式と変わらない、コンパクト性が得られる。

本研究は静岡大学電子工学研究所故高崎宏教授のご指導のもとに進めてきたものである。とくに記して深謝し、ご冥福をお祈り申し上げる。

## 文 献

- 1) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: Appl. Opt., **19** (1980) 442.
- 2) H. Takasaki, N. Umeda and M. Tsukiji: Appl. Opt., **19** (1980) 435.
- 3) S. K. Gordon and S. F. Jacobs: Appl. Opt., **13** (1974) 231.
- 4) P. E. Ciddor and R. M. Duffy: J. Phys. E: Sci. Instrum., **16** (1983) 1223.
- 5) 秋元義明, 大井みさほ: 応用物理, **47** (1978) 425.
- 6) 高崎 宏, 梅田倫弘: 静岡大学電子工学研究所研究報告, **15** (1980) 21.