レーザーオリジナル

マイクロプロセッサ制御による内部鏡He-Neレーザーの
周波数安定化(Ⅱ)

田中義人*・大田建久*・一ノ瀬琢美*・村上文夫**

(1992年3月4日 受理)

Frequency Stabilization of an Internal-Mirror He-Ne Laser
by Means of a Microprocessor Controller. (Ⅱ)

Yoshito TANAKA*, Tatehisa OHTA*, Takumi ICHINOSE* and Fumio MURAKAMI**

(Received March 4, 1992)

This paper presents the detailed analysis of a frequency stabilized internal-mirror He-Ne laser ($\lambda=633\text{ nm}$) controlled digitally by making use of the dependency of the intensities of two orthogonal polarization modes on frequency detuning. A laser tube containing an equivolume mixture of Ne^{20} and Ne^{22} was used in the experiment. Frequency stabilities were evaluated in terms of the resolutions of the digitization of polarization mode intensities. A 14-bit resolution system provided a stability of better than 10^{-10} for the integration time of 0.1 to 250 [sec] while lower resolution systems exhibited lower stabilities. It was found that the flexure of the laser tube due to thermal expansion slightly changed the detuning characteristics and limited long-term stability.

Key Words: Frequency stabilized He-Ne laser, Two orthogonal polarization modes, Microprocessor controller, Flexure of a laser tube.

1. 序

著者らはこれまで、内部鏡633 nmHe-Neレーザーの安定化のために従来アナログ回路によって構成されていた制御演算部に、マイクロプロセッサを用いたデジタル制御を用いてモードの強度差を任意に設定することにより、容易に周波数オフセットを可能にした¹⁾。その結果700 MHzにわたって均一な周波数オフセットを

実現した。またPID制御に比べI-PD制御の方が一桁程度安定度を向上させることができ、アラン分散による評価では積分時間10秒以上で 4×10^{-10} が達成された。さらにこのような周波数安定度とオフセット特性はレーザー媒質のNeの同位元素比 $\text{Ne}^{20}:\text{Ne}^{22}=1:1$ に基づく広い利得幅から生ずるなどらかな出力特性に起因することにも言及した。そしてこれらの成果をまとめて本誌で公表した²⁾。その後さらに本方式

*同志社大学工学部電子工学科 (〒602 京都市上京区烏丸今出川)

**日本無線(株)研究所 (〒181 埼玉県上福岡市福岡2-1-4)

*Department of Electronics, Faculty of Engineering, Doshisha University (Karasuma Imadegawa, Kamigyo-ku, Kyoto 602)

**Laboratory, Japan Radio Co. Ltd. (2-1-4, Fukuoka, Kamifukuoka 356)

の実用化をめざして本システムの性能の向上をはかってきた³⁾。

筆者らはこれらの成果をふまえ、誤差信号検出の分解能、レーザーへの戻り光、レーザー管のたわみがこの方法で安定化したレーザーに及ぼす影響について実験をもとに総合的な検討を行なった。本論文はこの成果について述べる。

2. 実験装置

2モード法により内部鏡He-Neレーザーを安定化するにあたって、出力特性の形状が単純になり、その再現性がよい $\text{Ne}^{20}:\text{Ne}^{22}=1:1$ のレーザー(Uniphase社製1103H)を用いた。このレーザーは軸モード間隔 $\Delta=723\text{ MHz}$ で、ほぼ全離調領域で2モード動作している。またレーザー管壁に管長を制御するためのヒーターが取り付けられている。このレーザーの偏光出力 $I_{\parallel}$ 、 $I_{\perp}$ をもとに誤差信号として $V_f=(I_{\parallel}-I_{\perp})/(I_{\parallel}+I_{\perp})$ を用い、 V_f が一定値となるように制御を行う。したがって、 $I_{\parallel}$ と $I_{\perp}$ の発振周波数を $f_0=(\nu_0+\nu_2)/2$ に対し $\pm\Delta\text{ Hz}$ 程度の範囲でオフセットする事ができる²⁾(ν_0 、 ν_2 はそれぞれ Ne^{20} 、 Ne^{22} の遷移周波数)。

Fig.1に本研究で構成したHe-Neレーザーの安定化システムを示す。本システムは操作性を容易にするため、文献(2)で示したシステムを2分化し、レーザーヘッド部とコントローラ部により構成されている。レーザー管の高反射ミラー側からの光を、PSBで $I_{\parallel}$ 、 $I_{\perp}$ に分離し、PDで光電変換する。PDの出力電流をトランスインピーダンス増幅器でI-V変換し、レーザーヘッド部からコントローラ部へ信号を伝送するためにV-F変換を行なう。そしてコントローラ部のカウンタ回路で伝送されたパルス列をカウントし、そのデータをCPUボードに取り込み、レーザー管の伸びに比例する誤差信号 V_f をもとに制御演算(PID制御またはI-PD制御)を行い操作量を算出する。ここで、ヒーターで発生する熱量は、ヒーターに流す電流の2乗に比例するので、操作量の平方根をD/A変換し、さらにV-I変換してヒーターに電流を与える。このように

Fig. 1 Schematic diagram of the frequency-stabilized laser system.

してレーザー共振器長を制御し周波数安定化を行っている(本装置ではこの制御を50 msごとに行なう)。また、文献(2)に示したシステムに加え、上述したレーザー共振器長制御とともに、レーザー管周囲温度の安定化も同時に行えるようにレーザー管の周囲を鉄製のケースで囲み、そのケースの上部に温度検出用の白金薄膜抵抗体を取り付け、ケースの下部に取り付けたペルチェ素子に流す電流を制御することによって、ケース(レーザー周囲温度)を安定化する。本装置はさらに、発振周波数や温度等の設定値や制御パラメータ等をRS-232Cインターフェースを介して外部から設定できる。

3 実験および考察

3.1 周波数オフセット値の再現性

レーザー周波数をオフセットして安定化させ

る際には、特に周波数の再現性が重要である。そこで、この再現性を調べるためにFig.2の様な測定系を構成した。この系において、同じ仕様で作った2台の安定化レーザーを用い、同じオフセット値を設定して周波数安定化を行う。そして各レーザーの出力の//成分どうしのビート周波数をアバランシフォトダイオード(APD)で検出し、広帯域増幅器を経て周波数カウンターにより計測し、パーソナルコンピュータにデータを転送する。この実験をおよそ40日の期間にわたって数回行ない、そのうち初期の5日間と後の10日間にわたるビート周波数をFig.3に示す。その結果、2台のレーザーの間に十数MHzの周波数差が存在し、その周波数差の変動は40

日間でおおよそ6 MHz以内であった。

このように同一オフセット点において動作させたとき、2台のレーザー間に周波数差が十数MHz程度存在する原因としては、PBSによる偏光分離の不完全さや、検出器のばらつき等によって各偏光出力 $I_{//}$ 、 $I_{\perp}$ の検出感度に差が現れることや、レーザー出力の利得曲線の中心周波数が管内圧力、放電電流等により異なること⁴⁻⁶⁾があげられる。

3.2 誤差信号検出の分解能が周波数安定度に及ぼす影響

まずレーザーを点灯してから熱平衡状態に到るまでヒートアップし、フリーラン動作をさせた。その時2台のレーザーのビート周波数を測定することにより、レーザー管の単体としての周波数安定度を測定した。その結果をアラン分散の平方根により評価しFig.4に示す。次に本システムにおける誤差信号の検出の分解能を7 bit, 11 bit, 14 bitと変化させて制御動作を行なった場合の周波数安定度について、2台のレーザーのビート周波数を計測することにより測定した。その結果をFig.5に示す。同図より、誤差信号検出の分解能を向上させるにつれて周波数安定

Fig. 2 Experimental setup for the frequency stability measurement.

Fig. 3 Beat frequency measurements of two stabilized lasers. Their reference inputs were adjusted to the same value. Measurements were made for 40 days.

Fig. 4 Allan variance plots of the beat frequency of two lasers. Both lasers are at the free running state.

Fig. 5 Allan variance plots of the beat frequency of two stabilized lasers. Parameters are the digitization resolution of the polarization mode intensities.

度が向上していくのがわかる。誤差信号検出精度の低い場合において、積分時間の短い領域の周波数安定度が、Fig.4のフリーランの場合よりも悪くなっているのは、その領域におけるレーザー単体の安定度が誤差信号の分解能を超えているためであると考えられる。

3.3 戻り光が周波数安定度に及ぼす影響

一般にレーザー発振特性は、戻り光により大きく攪乱されることが知られている。本研究における実験でもそのことを考慮し光アイソレータや各光学機器を光軸に対し傾けることなどにより戻り光対策を行っている。しかしながら実験結果を詳細に検討すると、実験系からの微少な戻り光により周波数安定度が劣化している疑いが生じた。そこでレーザーと偏光子の間にクロムプレートハーフミラーを光軸に対して45度程度傾けて挿入し、戻り光を低減して周波数安定度を測定した。その結果を戻り光低減の措置をとらなかった場合と比較してFig.6に示す。同図より、レーザーへの戻り光を低減することにより、特に τ が数秒の領域で周波数安定度を改善することができた。

Fig. 6 Allan variance plots of the beat frequency of two stabilized lasers. The back talk from the beam splitter affects the stability. The lasers operate on a 14-bit resolution system.

3.4 誤差信号とビート周波数による周波数安定度評価

前節の方法で戻り光を低減し、誤差信号検出の分解能を14bitとして安定化を行ったときの周波数安定度について、レーザー#1の誤差信号、レーザー#2の誤差信号および2台のレーザーのビート周波数の変動により評価した。これらをまとめてFig.7に示す。同図より、誤差信号により評価した周波数安定度とビート周波数によって評価した周波数安定度とが特に τ の大きい領域において大きく食い違っていることがわかる。ビート周波数の変動は実際の周波数変動であるから、このことは $\tau >$ 数十秒の領域において、誤差信号 V_f では検出できない、安定度にして 10^{-10} 程度の周波数変動が存在することを示している。

したがって3.2節で述べた誤差信号の検出分解能を今以上に向上させても、周波数安定度の向上は期待できないと考えられる。

3.5 レーザ管のたわみによる周波数変動

筆者らは前節で述べた実験とは別に、レーザーの共振器長の変化にともなう出力特性を詳細に

Fig. 7 Allan variance plots of the beat frequency and error signals of the two stabilized lasers. The lasers operate on a 14-bit resolution system.

調べた^{7, 8)}。その結果モードの移動による変化とは別の、比較的ゆっくりとした揺らぎがあることが判明した。その揺らぎはFig.8に示すように各偏光成分に同相の揺らぎとして現れ、それはすなわちレーザー全出力の揺らぎである。この揺らぎはレーザー管の周囲温度の変化により現れ、その原因はレーザー管のたわみであると考えられる^{7, 8)}。

Fig. 8 Fluctuations of orthogonal polarization mode intensities and the total intensity.

そこでこのレーザー共振器のたわみによる揺らぎが誤差信号 V_f にどのような影響を与えるか検討した。各偏光出力 $I_{\parallel}$, $I_{\perp}$ は共振器の伸びに對し互いに逆相で変化するが、その三角状の波形は互いに相似である。したがってその形状にのみ注目すればFig.9のようになり、 $I_{\parallel}$ は $I_{\perp}$ によって(3.1)式のように示せる。

$$I = K_i \cdot I_{\perp} + i_{of} \quad (3.1)$$

ここで K_i は $I_{\parallel}$, $I_{\perp}$ のピーク・ピーク値に関する比例定数、 i_{of} は各偏光出力の最大値あるいは最小値の差に相当するオフセット値である。誤差信号の周波数弁別特性は $I_{\parallel}$ と $I_{\perp}$ の相似性に依存している。つまり K_i と i_{of} が変動すれば誤差信号の周波数弁別特性も変動することになる。そこでレーザー管のたわみによって誤差信号の周波数弁別特性がどのように影響されるかを、誤差信号 $V_f=0$ なる点のあらわすオフセット周波数の変動に注目し検討した。オフセット周波数の変動はフリンジの移動ごとに K_i と i_{of} の値を算出し、ある基準点に対する K_i , i_{of} の変動を調べ、それによって生ずる V_f の変動量を計算することにより見積もった。その結果、Fig.10のようにレーザー管のたわみによる全出力の変動とともにオフセット周波数が変動していることが判明した。このオフセット周波数の変動幅は最大で2 MHz程度になり、これは発振周波数に対する安定度に換算すると 4×10^{-9} に相当する。つまり、この変動が周波数安定化を $V_f=0$ にて行なっているときに生じると、制御は $V_f=0$ に保とうとす

Fig. 9 Schematic illustration of the similarity of the detuning characteristics of orthogonal polarization mode intensities.

Fig.10 Estimated frequency and intensity fluctuations caused by the flexure of a laser tube.

るので、 V_f は一定であるが周波数はシフトするという現象が起こる。

この現象によって3.4節で示した誤差信号には現れない $\tau >$ 数十秒の領域の周波数変動と、3.1節において示したオフセット周波数の変動を説明することができる。

4. 結 論

本論文では、マイクロプロセッサ制御を採用した2モード法による安定化He-Neレーザーを改良しその特性を評価した。その結果以下の成果が得られた。

(i) 同じ仕様で製作した2台の安定化レーザーの周波数再現性を約40日にわたって調べ、ピークピーク値で6 MHz程度のばらつきが観測された。

(ii) 誤差信号検出精度を7bit, 11bit, 14bitと向上させることにより、周波数安定度を向上させることができることを示した。誤差信号検出精度を14bitにし、レーザーへの戻り光を低減することによってアラン分散による評価で $0.25[s] < \tau < 250[s]$ の領域において 10^{-10} よりも高い周波数安定度を得ることができた。

(iii) レーザー管のたわみにより各偏光出力 $I_{\parallel}$, $I_{\perp}$ の周波数弁別特性の関係が変化することを示

した。これより誤差信号 V_f では検知できない比較的周期の長い揺らぎと周波数オフセット値のばらつきを説明することができた。

以上のことからさらに周波数安定度を向上させる場合、誤差信号検出精度の更なる向上による効果は余り期待できず、レーザー管のたわみをできるだけ小さく抑えることが重要であることがわかった。

今後これらの成果をもとに、本システムを改良することにより、この周波数オフセット可能な周波数安定化He-Neレーザーの信頼性がさらに高まり、光ヘテロダイン計測用レーザーとしての活用が期待できる。

謝 辞

本研究の実験やシミュレーション等で、ご協力いただいた学部生井上典昭氏、大西康智氏、掃部幸一氏、星野美保嬢に感謝いたします。なお本研究の一部は文部省科学研究費一般研究(c) No.03650040の補助金によって行なわれたことを記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 田中, 床並, 大田, 佐々木, 村上: 電気関係学会関西支部連合大会予稿集 (1990) G-300.
- 2) 床並, 大田, 佐々木, 村上: レーザー研究 18 (1990) 69.
- 3) 田中, 大田, 佐々木, 平山, 畑中, 村上: 電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1991) C-296.
- 4) A. D. White: Appl. Phys. Letters 10 (1967) 24.
- 5) E. J. G. Engelhard and K. A. Mohamed: J. Opt. Soc. Am. 61 (1971) 216.
- 6) T. M. Niebauer, J. E. Faller, H. M. Godwin, J. L. Hall and R. L. Barger: Appl. Opt. 27 (1989) 1285.
- 7) 田中, 大田, 一ノ瀬, 村上: 信学技報 (1992) OQE91-153.
- 8) 田中, 井上, 大西, 掃部, 星野, 大田, 一ノ瀬, 村上: 電子情報通信学会春季全国大会予稿集 (1992) C-156