

ヨウ素安定化 He-Ne レーザーの新しい制御系

石川 純

計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1986年4月16日受理)

A New Control System for the I₂ Stabilized He-Ne Laser

Jun ISHIKAWA

National Research Laboratory of Metrology,
1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

A new control system for the I₂ stabilized He-Ne laser has been developed. The new system is composed of a control device and an X-Y oscilloscope. It is much smaller than the conventional system and portable. The third differential signal of the laser output power is observed on the X-Y oscilloscope so that one can easily distinguish a component of the I₂ absorption line to which the laser frequency should be locked from the other components. Owing to this function, it is very easy to operate the new system.

1. はじめに

1983年10月に開催された第17回国際度量衡総会において長さの単位メートルは、それまでのクリプトン原子の橙色スペクトル線による定義から、光速度に基づく新しい定義に改訂された¹⁾。新定義は、“メートルは、光が真空中で1/299792458秒の間に進む距離である”というものである。しかしながらこの定義をそのまま実現する、すなわち実際に光がある距離を進むのに要する時間を測定しその距離を求めることは長距離、たとえば月までの距離をレーザーパルスの往復時間を測定することによりきわめて高精度に求める、には有効であるが、実際により必要とされる短い距離の測定には不向きである。従来より比較的短い距離の高精度測定は、多くの場合、干渉計測により行なわれている。したがって実用的な長さの標準としては、波長が精密に値づけされた光源がより必要とされる。

実際、メートルの定義改訂と同時に、5種類の分子吸収線安定化レーザーが、波長標準として勧告された。これらのレーザーは、各国の標準研究所において、その光周波数が直接あるいは間接的に測定され、光速度をその

周波数で割ることにより波長が精密に値づけされたものである。このうち、実用上最も重要であると思われるものは、波長633nmのヨウ素安定化He-Neレーザーである。計量研究所においても1971年以来633nmヨウ素安定化He-Neレーザーの研究を行なっており²⁻⁴⁾、わが国における波長標準として維持している。

近年のレーザーの著しい発達により、精密計測、分光等へのレーザー応用が急増し、これに伴い計測用レーザーの較正、レーザー分光における波長標準といった用途に、ヨウ素安定化He-Neレーザーの需要は大きく広がりがつつある。しかし従来のヨウ素安定化He-Neレーザーは携帯性、操作性に問題があり、その需要に十分対応することがむずかしくなった。第一にその制御系はかなり大掛かりである。さらに、ヨウ素安定化He-Neレーザーを使用する場合、7成分あるヨウ素の吸収線超微細構造成分から特定の成分を選択する必要がある。この選択はペンレコーダーを用いて行なっており、操作に時間がかかるとともに、ある程度の熟練が必要であった。この弱点を改善し携帯性、操作性の向上を目標とした新しいヨウ素安定化He-Neレーザーの制御系を試作したので、その概要について述べる。

2. 従来の制御系

ヨウ素安定化 He-Ne レーザーの基本的な原理については他の文献に譲り⁵⁾, まず従来のヨウ素安定化 He-Ne レーザー, とくにその制御系について述べる. **Fig. 1** にヨウ素安定化レーザーの制御系のブロックダイアグラムを示す. この制御系は, 位相敏感検出のためのロックインアンプ, 低周波発振器 ($f, 3f$), 積分比例制御アンプ, PZT ドライバ (高電圧アンプ), およびヨウ素の吸収線超微細構造線をモニタするためのペンレコーダにより構成される.

低周波発振器からの出力 (周波数 $f=733$ Hz の正弦波) により, PZT を駆動しレーザーミラーの間隔を変化させ, レーザーの周波数に変調幅 6 MHz の周波数変調を与える. 同じ発振器から位相が PZT 駆動信号にロックされた周波数 $3f(2,200$ Hz) の信号が出力されロックインアンプに参照信号として入力される. このときロックインアンプの出力は, レーザー出力-発振周波数曲線の三次微分となる. 一方, レーザーの出力曲線には, ヨウ素の飽和吸収による小さなピーク (反転ラムディップ) が存在し, 本レーザーの場合, 7成分観察される. これらは $^{127}\text{I}_2$ の $X^1\Sigma_g^+ \rightarrow B^3\Pi_u^+$, 11-5 バンド, R(127) 電子遷移の d成分から j成分に相当し, 三次微分を制御信号としてそのいずれかの成分にレーザーの波長を安定化することができる.

レーザーの周波数走査を, 同じ PZT に加えたオフセット電圧を変化させることにより行ない, ロックインアンプの出力をペンレコーダに描かせると吸収成分のところで S 曲線 (反転ラムディップの三次微分) が得られる. **Fig. 2** にレーザーの出力曲線とその三次微分を示

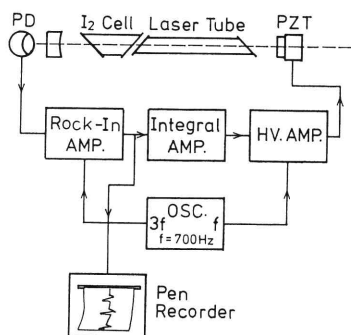


Fig. 1 A block diagram of the conventional control system for the I_2 stabilized He-Ne laser. Each part of the control system is an independent device.

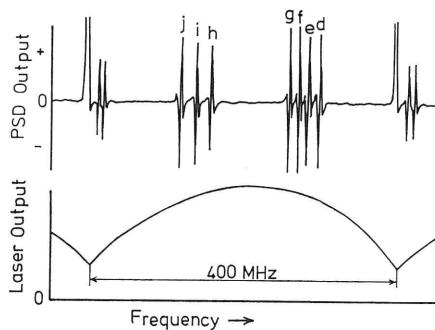


Fig. 2 Third differential signal of the laser output-power. Seven components of the I_2 absorption line can be observed. The laser frequency can be locked to each component. The i component is recommended as one of the international wavelength standard by CIPM 1983.

す. 反転ラムディップは小さいので, **Fig. 2** の出力曲線には認められないが, 三次微分曲線上では明確に観察される. レーザーを安定化する場合, ペンレコーダを観察しながら安定化を行ないたい吸収成分のところで周波数走査を停止しサーボループを閉じる.

ロックインアンプ以降の制御系は, 時定数可変の積分回路および利得可変の増幅器を並列にもつ積分比例制御アンプ, PZT ドライバにより構成される. PZT ドライバは, 先に述べた走査のためのオフセット電圧を発生する機能と, 低周波発振器からの入力で PZT を駆動する機能をもっている.

従来の制御系の実用上の問題点は, 第一にかなり大掛かりなことである. ラック 1 台分にもなり携帯不可能であるが, 今後ヨウ素安定化レーザーの需要が増大することを考えれば是非とも改善する必要がある. 従来の制御系がこのような大掛かりなのは, ヨウ素安定化レーザーの研究段階で種々の実験をする必要上さまざまな機能をもたせたからである. したがって波長標準, 高分解能分光などの実用的用途に用いることだけを考えれば, 不要な機能を省略することによりかなり小型化できる. とくにロックインアンプは汎用の高性能な市販品を用いているからこの部分の機能を必要最低限に限定した専用回路に置き換えれば大幅な小型化と低価格化が実現できる. またロックインアンプは非常に高感度であり電氣的ノイズを拾いやすい傾向にある. 専用回路の感度およびフィルタなどを最適化することにより対ノイズ性の向上も期待できる.

第2の問題点は, 安定化のためにヨウ素の特定の吸収成分を選択する操作が煩雑であることである. 先にも述

べたように、ヨウ素の安定化可能な吸収成分は7成分あるから、サーボループを閉じレーザーを安定化するためには、まず7成分の中から1成分を選択しそれがいかなる成分であるかを確認しなければならない。従来の制御系では、この操作をペンレコーダを用いて行なっている。PZTに掛けるオフセット電圧を徐々に増加させながらペンレコーダを用いてヨウ素の吸収成分の三次微分を数本描かせ、その形と位置関係から安定化する成分の確認を行なう。ペンレコーダの動作はかなり遅いので、吸収成分を七つ描くのに数十秒から1分程度要する。安定化する吸収成分を変える場合にも最初からこの操作を行なう必要があり、かなりの時間と多量のペンレコーダ用紙を消費する。今回試作したヨウ素安定化 He-Ne レーザーのための制御系は、とくに上記の2点の改善したものである。

3. 試作した制御系

Fig. 3 左は試作した制御系である。この制御系は、制御系本体とレーザー出力曲線の三次微分をモニターするためのオシロスコープ (XY 表示の可能なもの) より構成される。試作した制御系本体は、従来の制御系のロックインアンプ、積分比例制御アンプ、PZT ドライバ、および低周波発振器に相当し、オシロスコープがペンレコーダに相当する。本制御系は、従来のもの (**Fig. 3** 右ラック) と比較して大幅に小型化されており携帯も可能である。これは実用上不必要な機能を削除したことによるところが大きい。さらに操作性を向上させるための新し

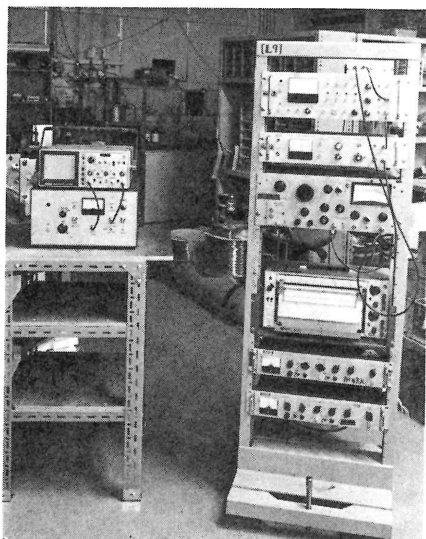


Fig. 3 A photograph of the new control system (left) and the conventional system (right).

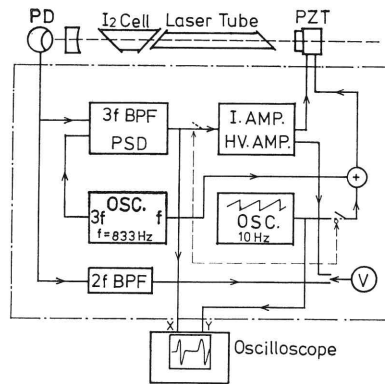


Fig. 4 A block diagram of the new control system for the I_2 stabilized He-Ne laser. The new control device includes the parts enclosed by dashed lines.

い機能も盛り込んである。その代表的なものは、オシロスコープを用いて三次微分を実時間でモニターする機能である。これにより、吸収成分の確認と安定化のための操作が大幅に簡略化され、短時間でこなせるようになった。

Fig. 4 は、本制御系のブロックダイアグラムである。一点鎖線の範囲が制御系本体である。全体としては少々複雑であるので、以下に各回路の構成と機能についての説明を行なう。

3.1 低周波発振回路

Fig. 5 は本制御系の低周波発振回路である。1 MHz の水晶発振器を分周して、 $f=833$ Hz, $3f=2.5$ kHz, およびスイッチトキャパシタフィルタ⁶⁾を駆動するための $50f=41.7$ kHz, $100f=83.3$ kHz, $150f=125$ kHz の TTL クロック出力が得られる。

本制御系の特徴は、低周波発振回路も含めてすべてのバンドパスフィルタにスイッチトキャパシタフィルタ (SCF) MF-5, MF-10 を採用したことである。このフィルタは、駆動周波数の $1/50$ の通過周波数を持ち、 Q の値を広い範囲にわたって容易に変えることができる。 $f=833$ Hz の PZT 駆動のための基本波は高調波歪を厳密に除去する必要があるため、 $Q=100$ に設定した SCF を2段直列に用いた。参照信号 $3f$ は歪に関してはそれほど厳密ではないので、SCF を1段用いた。SCF を採用したことにより他の部分も含めて回路が大幅に簡素化、低価格化された。また水晶発振器を交換することにより容易に f を変更することが可能である。本回路は入力回路および安定化モニタの SCF を駆動するための TTL クロック ($100f$, $150f$) も出力する。

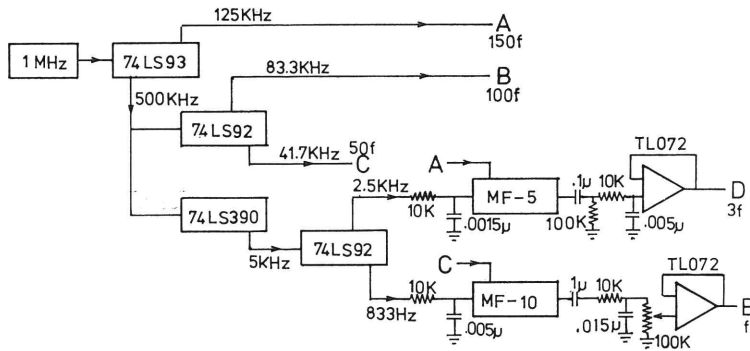


Fig. 5 f and $3f$ signal oscillator.

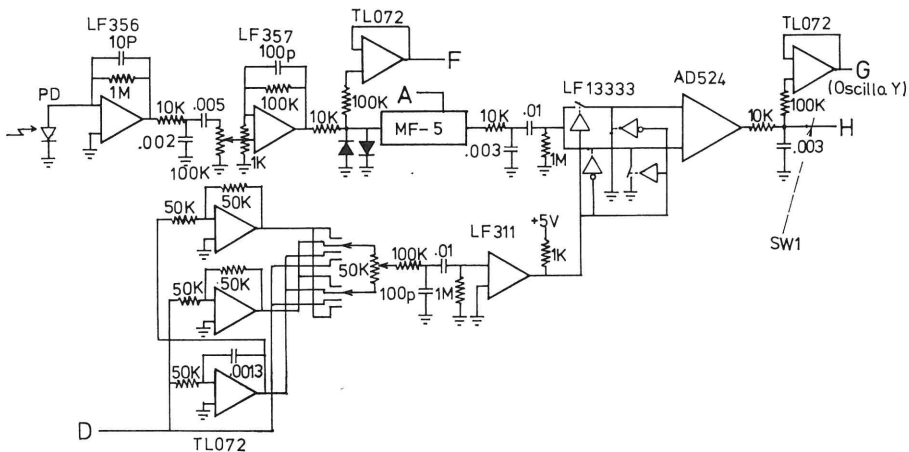


Fig. 6 $3f$ band-pass filter and phase sensitive detection circuit.

3.2 入力, および位相敏感検出回路

Fig. 6 に入力, および位相敏感検出部の回路を示す. フォトダイオードからの入力はまず FET 入力オペアンプ (LF 356) により電流-電圧変換され, さらに信号出力が 100 mV 程度になるようにオペアンプ (LF 357) による非反転増幅器により増幅される. この信号のうち位相敏感検出に必要なものは, $3f$ の成分のみであるので

SCF ($3f$ のみ通過, $Q=30$ に設定) を用いて $3f$ 以外の高調波成分, 基本波 f , および非パルス性ノイズ成分を除去する.

バンドパスフィルタ一般にあてはまることであるが, 強いパルス性のノイズが加わった場合その出力は減衰振動となる. とくに Q の高い場合にはその減衰が緩やかになり, その影響が長く残る. 従来の制御系において,

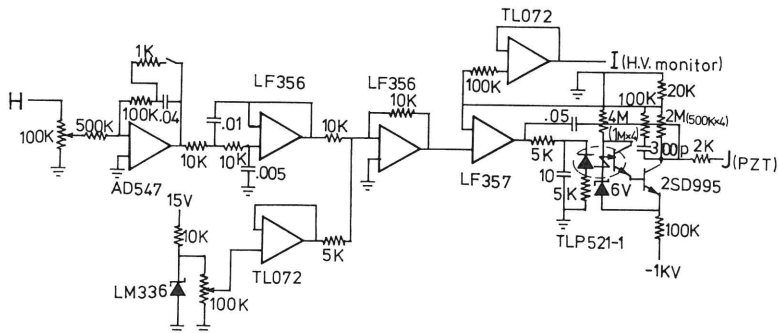


Fig. 7 Integral amplifier and high voltage amplifier.

これが安定化の外れる大きな原因となっていた。SCFの入力には、パルス性ノイズ除去のためにダイオードによるリミッタが設けてある。このリミッタにより従来の制御系と比較して耐パルスノイズ性が非常に高まり、レーザーの近傍での (1 m 程度) テスラーコイルによる放電にも耐え、安定化の外れることがなくなった。

位相敏感検出回路は、従来の制御系のロックインアンプに相当するものであるが、アナログスイッチ (LF 13333) およびインストルメンテーションアンプ (AD 524) により構成され、ロックインアンプと比較してきわめて低価格かつ簡略化されたにもかかわらず、レーザーの制御系用としては、十分な性能をもっている。

アナログスイッチ駆動のための参照信号と入力信号の位相は調整する必要があるが、この調整はオペアンプ (TL 072) による積分器、およびインバータ 2 個を用いて参照信号を位相の 90° 異なる 4 信号として、そのうちの隣り合う 2 信号をロータリースイッチにより選択し、可変抵抗により適当に混合することにより 360° の範囲で可能である。この参照信号はコンパレータ (LF 311) により TTL レベルの信号に変換され、アナログスイッチを駆動する。

3.3 積分回路、および PZT 駆動回路

インストルメンテーションアンプからの出力は RC ローパスフィルタ (カットオフ周波数 250 Hz) を経て、ロックモードでは Fig. 7 に示したロードリフトオペアンプ (AD 547) を用いた積分および比例増幅回路により増幅される。この増幅器のフィードバックループは RC 直列接続となっており、周波数 40 Hz までは積分を、それ以上の周波数では比例増幅を行なう。増幅された信号はさらにオペアンプ (LF 356) によるアクティブローパスフィルタ (2次, バタワース, カットオフ周波数 250 Hz) を通った後オペアンプ (LF 357) フォトカプラ (TLP 521-1) 高圧トランジスタ (2SD 995) により構成される PZT ドライバ回路に入力される。

本レーザーに用いた PTZ は負電圧駆動であり 0~-1 kV の範囲で制御する必要がある。負電圧制御用の PNP トランジスタには高耐圧のものが無いので、NPN トランジスタとフォトカプラを組み合わせることにより負電圧の制御を行なっている。オペアンプの出力は、フォトカプラ、およびトランジスタによる高圧回路と並列に高耐圧コンデンサを通して PZT 駆動出力に直結される。比較的応答の遅い高圧回路に DC から低周波を、高耐圧コンデンサによるバイパスに高周波の成分を受け持たせることによって高速応答が可能となる。PZT ドライ

バ回路のゲインは 40 dB, 250 Hz 以上で 6 dB/oct で減衰する。

3.4 制御系の特性

本制御系の制御特性を決定するのは、位相敏感検出の前のバンドパスフィルタ、および積分-比例増幅回路、その後のローパスフィルタの時定数である。バンドパスフィルタは、本制御系においては RC による 1 次ローパスフィルタと等価であり、その -3 dB 周波数 f_p は次式

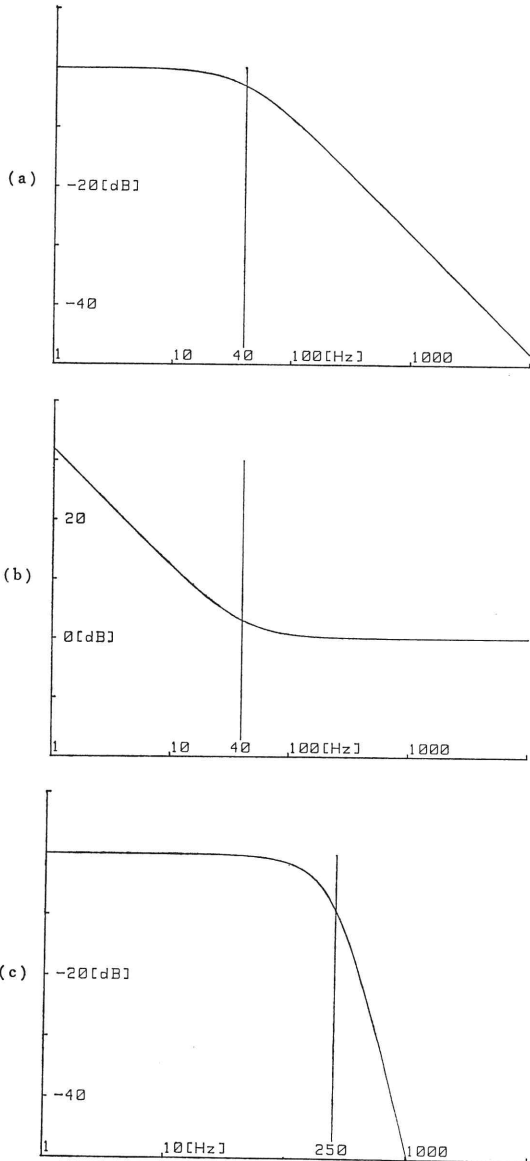


Fig. 8 Frequency response of the system. (a) Frequency roll-off caused by 3f band-pass filter. (b) Frequency response of the integral amplifier. (c) Frequency response of the low-pass filter and high voltage amplifier.

で表される.

$$f_p = f_b / 2Q \quad (1)$$

ここで f_b はバンドパスフィルタの通過周波数である. 本制御系では $f_b = 2.5 \text{ kHz}$, $Q = 30$ であるから, f_p は約 40 Hz である. **Fig. 8 (a)** にその周波数特性を示す. 位相補正を行わず積分制御を行なった場合, 制御帯域 f_0 (0 dB ゲイン) は f_p で制限される. 積分制御による 90° の位相遅れに加え, f_p が第1のポールとなり, さらに位相の遅れが進み 180° に近づくので f_0 が f_p を越えると制御が不安定になり, ついには発振が起きる. しかし位相補正を行なうことによりこの制御帯域を広げることができる.

本回路では, オペアンプによる積分回路のフィードバックコンデンサ (容量 C) と直列に抵抗 (R) を入れることにより位相補正を行なう. 先に述べたように, この回路は周波数 $f_c = 1/2\pi RC$ までは積分を, それ以上の周波数では比例増幅を行なう. **Fig. 8 (b)** は, その周波数特性である. このクロスオーバー周波数 f_c 以上では積分による位相遅れが, 徐々に 0° に近づくので, f_c を f_p (40 Hz) と等しくすることにより第1のポール f_p による位相遅れが完全に補正され, 合計の位相遅れは 90° を越えず, 制御帯域 f_0 を次のポールまで拡大することができる.

この次のポールは位相敏感検出回路で発生するスイッチングノイズ (基本周波数 2.5 kHz) を除去するためのローパスフィルタによって決定される. スwitchングノイズは PZT を通してレーザーに変調をあたえ吸収成分による $3f$ (2.5 kHz) の信号に加わるため安定化周波数にオフセットが生じ, 最悪の場合は安定化不能となる. スwitchングノイズは少なくとも -70 dB 以下に減衰させる必要がある. このためのローパスフィルタは, オペアンプ (LF 356) を用いたカットオフ周波数 250 Hz ,

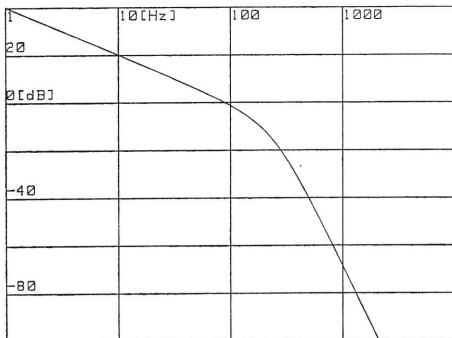
2次のバターワースフィルタである.

先に述べたように PZT ドライバ, および積分-比例増幅回路の前の RC フィルタのカットオフ周波数も同じく 250 Hz に設定した. したがって 2.5 kHz のスイッチングノイズの減衰量は, ローパスフィルタによる -40 dB のほかに -20 dB 2段となり合計 -80 dB であり要求を十分に満たしている. **Fig. 8 (c)** にこれらを合わせた周波数特性を示す. **Fig. 9** は制御系全体の利得と位相遅れである. 位相 180° 遅れの周波数は 100 Hz を少し越えており, 制御帯域は 100 Hz が限度であることがわかる.

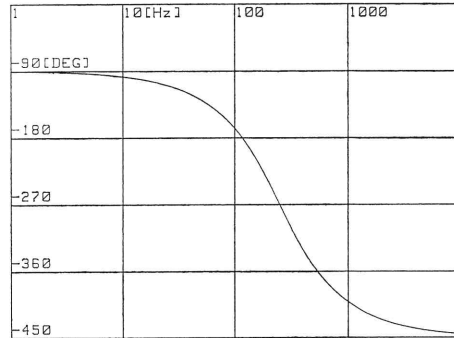
3.5 スキャンロック回路, および安定化モニタ

ヨウ素安定化レーザーを安定化することのできるヨウ素の吸収成分は7成分あるので, 安定化にあたっては, これらのうちから1成分を選択する必要がある. 本制御系では, この選択を迅速かつ簡便に行なうためにスキャンロック方式を採用した. この方式は, NBS, PTB をはじめとする多くの標準研究所の同種の安定化レーザーに採用されている方式と基本的に同等であり, スwitch一つでいつでもスキャンモード (吸収成分を捜す状態) とロックモード (安定化した状態) の切替えができる等, 操作性に優れたものである.

Fig. 10 にスキャンロック回路を示す. ヨウ素安定化レーザーは, 安定化のために正弦波の周波数変調 ($f = 833 \text{ Hz}$) がかけられるが, **Fig. 10** に示した回路はこの変調に加えて鋸歯状波変調 (周波数約 10 Hz) をかけることができる. なおこの変調電圧は, PZT の GND 側にかけられる. ロックモードでは正弦変調のみがかけられ制御系も閉じているが, スキャンモードには位相敏感検出回路と積分-比例増幅回路の間を開き, 正弦変調に鋸歯状波変調を加える. このとき位相敏感検出回路の出力を XY モードのオシロスコープの X 軸に, 鋸歯状波



(a)



(b)

Fig. 9 Total frequency response (a) and phase delay (b) of the system.

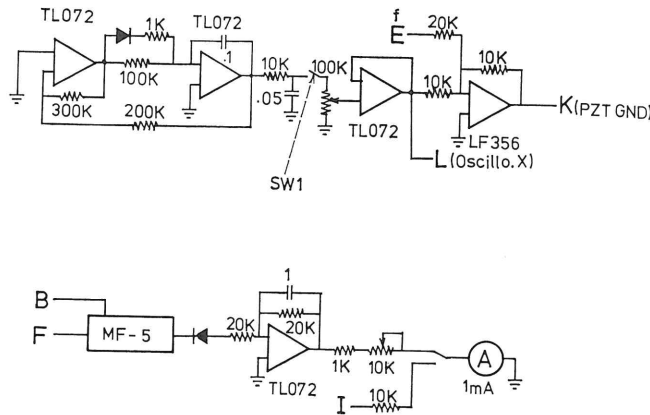


Fig. 10 Sawteeth wave generator and rock monitor.

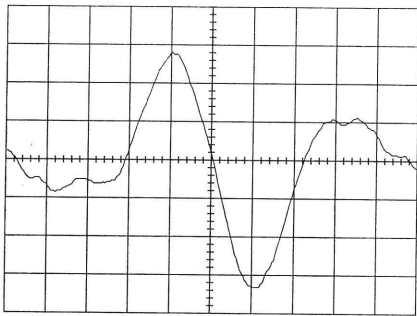


Fig. 11 The third differential signal of laser output power which was recorded by a digital storage scope.

を増幅して X 軸に入力する。

PZT の高圧側にかけるオフセット電圧をポテンシオメータ (Fig. 7) を手で回すことにより変化させ、レーザーの周波数を調整すると Fig. 11 (デジタルストレージスコープにより記録) に示したような吸収成分の 3 次微分がリアルタイムにオシロスコープ上で次々に観察される。観察された順番からその成分が d から j までのいずれであるかを判断することは容易である。安定化を希望する成分をオシロスコープ中央にもってきて、スキャンモードからロックモードにスイッチを切り替えると、瞬時に安定化が行なわれる。

安定化している状態では 3 次微分はゼロになるので、オシロスコープ上からはモニタできなくなる。本制御系は、安定化をモニタする機能ももっている (Fig. 10)。これは安定化した状態でのレーザーの出力曲線の 2 次微分が最大になることを利用したもので、具体的にはフォトディテクタの出力を SCF による通過周波数 $2f$ のバンドパスフィルタを通してメータに出力する、という簡単なものである。なおこのメータは、PZT にかかる電

圧のモニタとして切替え使用することも可能である。

4. おわりに

今回試作したヨウ素安定化 He-Ne レーザーの制御系は、携帯性、操作性、安定性 (ロックの外れにくさ)、および経済性が従来の制御系と比較して大幅に向上している。波長の安定度、ドリフト等の特性についてはいままのところ制御系を 1 台しか試作していないので評価を行っていない、これらの評価は、2 号機、3 号機を制作した時点で相互比較により行なう予定である。

しかし理論的な評価では制御系の精度は少なくとも 10^{-11} 以上、またわれわれの経験でも安定化したヨウ素安定化 He-Ne レーザーの波長の変動は安定化が外れない限り 10^{-10} を越えることはない。したがって特別に高精度の要求される研究以外の用途についてはまったく問題がなく、計測用レーザーの較正等の長さの一次標準としてのヨウ素安定化 He-Ne レーザーの需要の増大には十分対応できるものである。

実際われわれの研究所においてこの制御系は、その操作性の良さから、波長の較正や分光実験における波長標準等の用途に従来の制御系に替わって多用されている。

最後になりましたがこの新しい制御系の試作にあたりまして多くの有用な助言をいただきましたニュージーランド国立物理工学研究所 (PEL) の Robert B. Hurst 博士、研究を進めるにあたっていろいろと便宜を図っていただきました計量研究所量子計測研究室の桜井室長に感謝の意を表します。

文 献

- 1) Editor Metrologia: "Documents concerning the new definition of the metre," Metrologia, 19 (1984) 163-

- 178.
- 2) 田中敬一, 桜井慧雄, 黒沢富蔵: “よう素の飽和吸収を用いた He-Ne レーザの周波数安定化”, 計測自動制御学会論文集, **10** (1974) 669-674.
 - 3) K. Tanaka, T. Sakurai and T. Kurosawa: “Frequency stability and reproducibility of an iodine stabilized He-Ne laser,” Jpn. J. Appl. Phys., **16** (1977) 2071-2072.
 - 4) A. Morinaga and K. Tanaka: “Hyperfine structure in the electronic spectrum of $^{127}\text{I}_2$ by saturated absorption spectroscopy at 633 nm,” Appl. Phys. Lett., **32** (1978) 114-116.
 - 5) たとえば, 田中敬一: レーザーと計測 (共立出版, 東京, 1984) p. 53.
 - 6) 1984 *Linear Supplement Databook* (National Semiconductor Corp., 1984) S9-1.