

技術報告

市販半内部鏡型レーザー管を用いた ヨウ素安定化 He-Ne レーザー

梅田 倫弘・瀬戸口敬裕

東京農工大学工学部生産機械工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

(1988年9月26日受付)

Iodine Stabilized He-Ne Laser Using Commercially Available Semi-Internal Mirror Laser Tube

Norihiro UMEDA and Takahiro SETOGUTI

Department of Industrial Mechanical Engineering Faculty of Technology,
Tokyo University of Agriculture and Technology,
2-24-16, Nakamachi, Koganei 184

This paper describes an iodine-stabilized He-Ne laser using commercially available semi-internal mirror laser tube. Although the gain center of the laser used in the experiment shifted by 430 MHz from that of He-²⁰Ne laser which is usually used as iodine-stabilized laser, three saturated absorption lines were detected. The frequency of the laser was locked to one of the three absorption lines by dual servo-control system. One is the fast control loop by the PZT driven mirror, and the other is the slow loop using the heater wound around the laser tube. The frequency stability of 3×10^{-10} was estimated from the fluctuation width of the error signal detected in the fast servo-control loop.

1. ま え が き

軸ゼーマンレーザーに代表される実用型周波数安定化レーザーを用いた干渉測長法の実用化によって、超精密加工や超精密位置決め精度が飛躍的に向上している。たとえば、メモリ IC の集積度は、縮小投影露光装置の性能向上によって、配線幅 $1 \mu\text{m}$ の 1 Mbit DRAM¹⁾ が量産されるにいたっている。このような配線幅を達成するにはその十分の一以下の位置決め精度が要求され、実用レベルの周波数安定化レーザーの出現によって初めて可能となった。

実用型周波数安定化レーザーの明確な定義はないが、その目安として周波数安定度は 10^{-8} 程度で生産現場、実験室レベルでの使用、構造が簡単、そしてその多くが製品化され入手が容易なことが考えられる。このような安定化レーザーの性能は、安定性についてはほぼ満足すべき値といわれているが、その発振周波数の再現性 (resettability と reproducibility) は、用いている周波

数弁別基準のために 10^{-6} 程度で十分な値とはいえない。そこで、周波数安定化レーザーの性能を維持するために定期的な発振周波数の校正するのが理想的である。

校正のための基準安定化レーザーとしては、ヨウ素 ¹²⁷I₂ の飽和吸収線に制御したヨウ素安定化レーザーが使用されている。ヨウ素安定化レーザーは、各国の標準研究機関で研究開発され、その性能は光速度による長さの定義において一つの標準となっているほど安定した性能をもつものである²⁾。しかし、その安定化装置は大きく、実用型周波数安定化レーザーの校正のために手軽に使用できるほど取扱いが容易なものではなかった。ところが、ヨウ素安定化レーザーの国際的な相互比較のために可搬型の装置が開発されたり³⁾、制御装置の小型化による実用型ヨウ素安定化レーザーが報告される⁴⁾ に及んで、その状況は変化している。すなわち、実用型周波数安定化レーザーのユーザーにも、ヨウ素安定化レーザーを手元においておけるという状況になってきている。しかし、実際にヨウ素安定化レーザーを製作するとき、二

つの困難が伴う。一つが、ヨウ素吸収セル、もう一つがレーザー管である。前者については詳細な製作の報告があり⁵⁾、自作も可能である。しかし、後者については現実的には自作は難しく、特注に頼らざるをえない。結果として、高価、寿命のパラッキ等のリスクを負うことになる。

そこで、われわれは、レーザー管の一方が反射鏡、他端がプリュスター角になっており、性能的にも安定していると考えられる市販のレーザー管（以下、半内部鏡型と呼ぶ）を用いて、ヨウ素安定化レーザー装置の製作を試みた。

本報告は使用したレーザー管の特性、ヨウ素吸収セルによる吸収線の検出および吸収線への周波数制御の結果について述べている。

2. レーザー装置の特性

Fig. 1 に本研究において使用したレーザー発振器の模式図を示す。レーザー管はメレスグリオ社製 05 LHB 670 (管長 350 mm) で、一端が高反射率鏡、他端がプリュスター角をもつ半内部鏡型レーザーである。レーザー管を長さ 700 mm の光学台に取り付け、レーザー反射鏡から 500 mm の所に、反射率 98.6% の反射鏡が固定された反射鏡台を設置した。また、後述するように発振光に FM 変調を与えるため、反射鏡は平行バネからなるマウントに取り付けられ、積層型 PZT によって光軸方向にマウントを微振動させた。積層型 PZT には、富士電気化学製 FMPC-4X5X10 を用い、その変位特性は実測で 23 nm/V であった。

Fig. 1 のレーザー装置のモード特性を求めるため、その発振光と ^{20}Ne が封入された $\text{He-}^{20}\text{Ne}$ レーザー光とを半透鏡で混合して光スペクトルアナライザによって両者のモード周波数の相対関係を観測した。**Fig. 2** がその結果である。図の上部の利得形状が $\text{He-}^{20}\text{Ne}$ レーザーによるものである。低周波側の強度が高周波側のそれよりも弱いのは、半透鏡の偏光特性によるものである。下部が製作した半内部鏡レーザーの利得形状である。

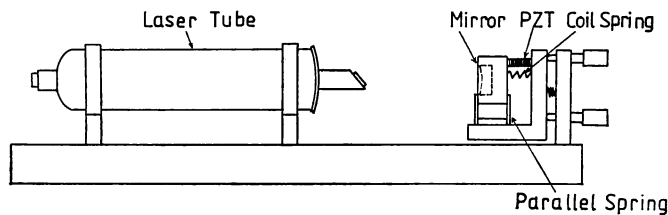


Fig. 1 Schematic structure of semi-internal mirror type He-Ne laser used in the experiment.

これから、半内部鏡レーザーの利得中心は、 $\text{He-}^{20}\text{Ne}$ レーザーの利得中心よりも約 430 MHz だけ高周波側にシフトしていることがわかる。 ^{22}Ne の利得中心は ^{20}Ne のそれに比べ 875 MHz だけアイソトープシフトしていること⁶⁾ から、実験に用いた半内部鏡レーザーには ^{20}Ne と ^{22}Ne の同位体ガスがほぼ 1:1 で封入されていると推定される。

次に、発振光周波数に FM 変調を与えるための PZT

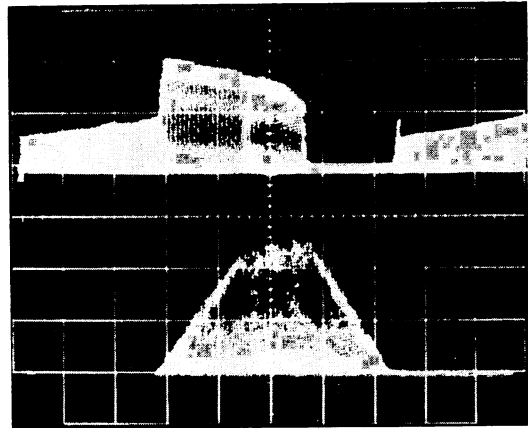


Fig. 2 Power profiles of $\text{He-}^{20}\text{Ne}$ laser (upper trace) and of semi-internal mirror type He-Ne laser (lower trace). 210 MHz/div.

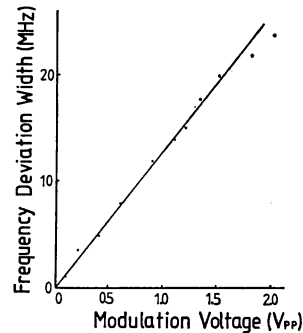


Fig. 3 Frequency deviation width of the external mirror FM modulator as a function of peak-to-peak PZT voltage.

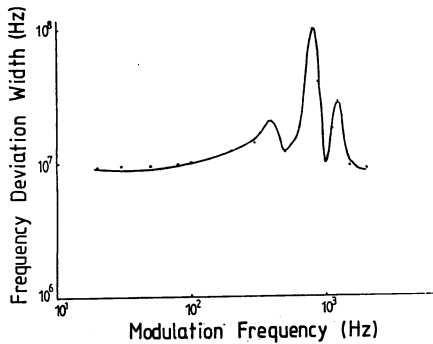


Fig. 4 Frequency characteristic of external mirror FM modulator.

駆動平行バネ微振動装置の特性を測定した。測定実験は、Fig. 1 に示すレーザーの発振光と周波数安定化レーザーを光混合して両者の光ビートをアバランシェフォトダイオードで検出し、そのビートスペクトルを高周波スペクトルアナライザで観測して行なわれた。Fig. 3 は PZT に正弦波を入力したときの正弦波電圧の p-p 値に対する光周波数の周波数偏移幅である。変調周波数は、1 kHz とした。これから、入力電圧振幅値に対し変調幅はほぼ比例しており、変位感度は $1 V_{p-p}$ に対し 13.6 MHz であることがわかる。

Fig. 4 は平行バネ微振動装置の共振周波数特性を求めため、PZT 電圧振幅を一定にして変調周波数を変えたときの光周波数の変調幅の測定結果である。これから、800 Hz 付近に大きな共振点があり、製作した平行バネ微動装置は、平坦な周波数特性を表わす 400 Hz 以下で動作させることが可能であることがわかる。

3. 吸収線の3次微分信号の検出

前節において、使用したレーザー管の封入ガスの同位体組成は、 $^{20}\text{Ne} : ^{22}\text{Ne} = 1 : 1$ であることが推定された。 ^{20}Ne および自然 Ne ガスを用いたレーザー管のヨウ素吸収線の検出は報告されている⁵⁾が、上記のような組成比のレーザーを用いた吸収線の報告はなされていない。そこで、レーザー装置の外部鏡とレーザー管の間に、光路長 95 mm、外径 20 mm のヨウ素吸収セルを挿入して飽和吸収線の3次微分信号の検出を試みた。

Fig. 5 に実験装置の概略を示す。前節で述べたレーザー装置の管球と外部反射鏡の間にヨウ素セルを設置し、そのコールドフィンガーをペルチェ冷却器によって $15 \pm 1^\circ\text{C}$ に温度制御した。発振光は半透鏡 HM で反射され、633 nm 用フィルターを透過して光電検出器に入射し、検出された光電流はロックイン増幅器に入力す

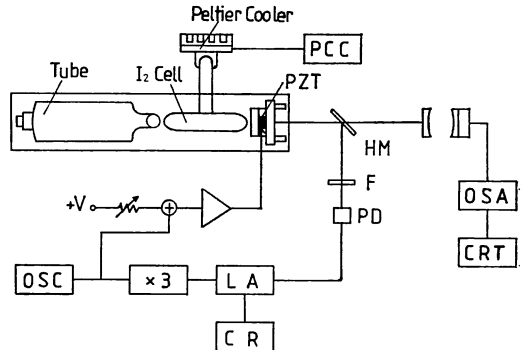


Fig. 5 Experimental apparatus for the detection of third derivative signal of $^{127}\text{I}_2$ saturated absorption line. CR: chart recorder, CRT: oscilloscope, F: 633 nm interference filter, HM: half mirror, LA: lock-in amplifier, OSA: optical spectrum analyzer, OSC: oscillator, PCC: Peltier cooler controller, PD: photodiode.

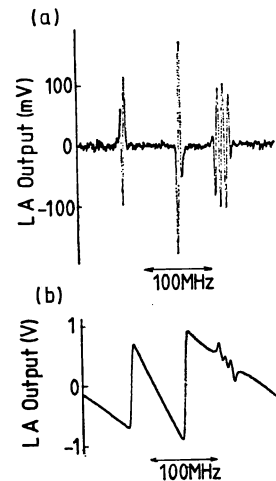


Fig. 6 Third (a) and first (b) derivative signal of 633 nm He-Ne laser with I_2 absorption cell during frequency sweep.

る。また、発振器 OSC の出力を3通倍してロックイン増幅器の参照信号とする。一方、平行バネ微振動装置の PZT には、OSC からの変調信号とレーザー周波数を掃引するための直流電圧を重畳して加える。HM を透過した光は、縦モードを観測するため光スペクトルアナライザに入射する。以上の装置でヨウ素吸収線の3次微分信号を、PZT に加える直流電圧を単調増大させながらロックイン増幅器の出力をチャートレコーダ CR に記録した。

Fig. 6 は、変調周波数 1 kHz、レーザー出力 $80 \mu\text{W}$ 、ロックイン増幅器の時定数 0.3 s における1次および3

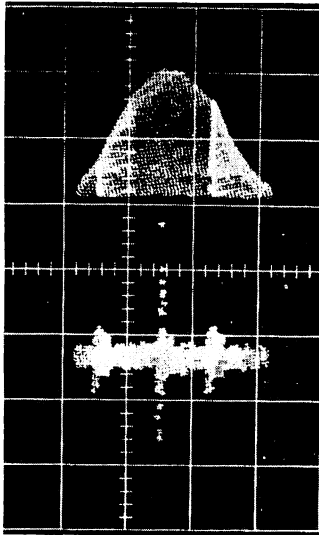


Fig. 7 Tuning characteristics of power profile (upper trace) and of third derivative signal of absorption line (lower trace). 180 MHz/div.

次微分信号の記録例である。両者を比較して3本の吸収線が検出されていることがわかる。

次に、吸収線が得られる光周波数と利得形状との相対関係を求めるため、次のような観測を行なった。Fig. 5の実験装置において、光スペクトルアナライザによりメモリスコープのch. 1にモード形状を蓄積記録するとともに、ch. 2に3次微分信号を入力し、縦モードが存在する時点だけを輝度表示させる。Fig. 7がその結果である。図の上が利得形状、下が3次微分信号である。三つの変動している信号が記録されている。そのうち、中央は利得形状のピークに相当する3次微分信号、その左右にある信号群が吸収線である。両者のうち左の信号群は強度の弱い縦モードが存在するために画面上に記録されたものであって、真の吸収線は利得中心より高周波数

側である。これから、観測された吸収線は利得中心に対し約 119 MHz だけ高周波数側にあることがわかった。

4. 周波数安定化実験

前節の実験結果から、使用した市販レーザー管によって3本のヨウ素吸収線を検出できることがわかった。そこで、3次微分信号を用いて3本の吸収線のうちの1本にレーザー周波数を制御することを試みた。

Fig. 8(a)は実験装置の構成である。吸収線を検出する装置構成と基本的に変わらない。ただ、ロックイン増幅器の出力を、PZT 駆動増幅器に変調信号と重畳させることによって3次微分信号のゼロ交差する点にレーザー周波数を制御させている。実際には、レーザー管が放電熱で伸びて共振器長が変わり、ロックイン増幅器出力を記録しているチャートレコーダ CR 上に吸収線が現れたとき、制御ループを手動で閉じることによって安定化制御を開始する。

このようにして得られた安定化制御の結果を Fig. 9 に示す。(a)はロックイン増幅器の出力、(b)が PZT の印加電圧である。ロックイン増幅器の出力をゼロに保つために、PZT の印加電圧が直線的に上昇していることがわかる。PZT 電圧の上昇は、使用したレーザー管が半内部鏡構造のため、レーザーの放電発熱によって共振器長が増加しようとしているのに対して、それを補正を表わしている。しかし、PZT の駆動増幅器は、高電圧増幅器を使用せず通常の演算増幅器を用いたため、13 V 程度で制御範囲を越えて安定化制御できなくなってしまう。この実験では、安定化制御できる時間は8分程度であったが、レーザー管を予熱して熱平衡状態にさせておけば、さらに制御時間を長くすることができる。しかし、熱平衡状態ではレーザー管周囲の空気流の乱れによ

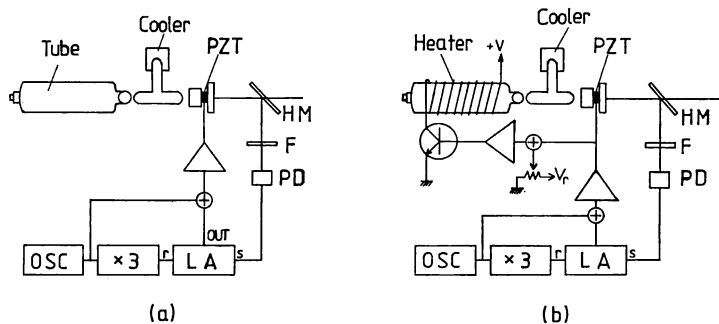


Fig. 8 Schematic diagram of proto-type iodine stabilized laser (a) and of improved iodine stabilized laser system (b).

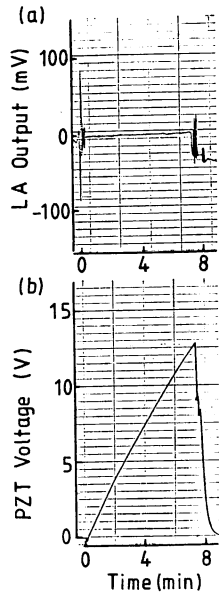


Fig. 9 Frequency stabilization by the use of apparatus shown in **Fig. 8 (a)**. (a) Third derivative signal from the lock-in amplifier. (b) Change of PZT voltage.

って共振器長が変動しやすく、制御がはずれてしまう可能性が高い。そこで、内部鏡レーザーの周波数安定化において使われている⁷⁾ ヒーター巻線による共振器長の制御を併用することにした。

Fig. 8(b)がPZTとヒーター巻線による二重共振器長制御方式の装置構成である。線径0.2φのニクロム線を長さ18cmにわたってパイファイラー巻にしたヒーターを用いた。PZTの制御電圧範囲を補正する意味から、ヒーターの制御誤差信号にはPZTの印加電圧を用いることにした。また、ヒーターによる制御方式は、定常的な加熱状態からの加熱量の調節によって共振器長の伸び縮みを制御する必要がある。そのために、誤差信号であるPZT印加電圧に、調節可能なオフセット電圧を加えている。

以上の装置を用いて周波数制御の実験を試みた。安定化制御の手順は次のとおりである。まず、レーザーを発振させロックイン増幅器の出力を記録計でモニターする。共振器の長さが飽和する手前までレーザー管に巻いたヒーターを加熱して共振器長を伸ばす。あらかじめ実験的に求めておいた共振器長まで伸びて3次微分信号が検出されたところでPZT制御ループを閉じ、次にPZT印加電圧が上昇し始めた時点でヒーター制御ループを閉じる。**Fig. 10**がこのようにして得られたPZTおよびヒーター制御による周波数安定化状態におけるロ

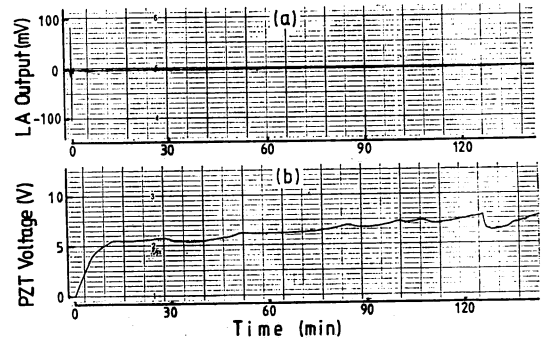


Fig. 10 Frequency stabilization by the improved iodine stabilized laser shown in **Fig. 8 (b)**. (a) Third derivative signal from the lock-in amplifier. (b) Change of PZT voltage.

ックイン増幅器の出力(a)とPZT印加電圧(b)の時間変化である。このとき、レーザー出力は $180\mu\text{W}$ 、ヨウ素吸収セル温度は 15.5°C 、ロックイン増幅器の時定数は 0.3s である。吸収線信号が検出され、制御ループが閉じられると同時にPZT印加電圧が上昇し始める。しかし、11分後にヒーター制御ループを閉じることによってPZT電圧の上昇は抑えられ、その後2時間以上にわたって3次微分信号はほぼ一定となっている。すなわち、PZT印加電圧がPZT駆動増幅器の狭い動作範囲内にとどまっているにもかかわらず周波数安定化状態にあることがわかる。これから、PZTおよびヒーター巻線による二重制御方式が、今回使用した半内部鏡型レーザーの共振器長制御に有効であることが確認された。

周波数安定度は、ロックイン増幅器の誤差信号出力の変動幅から推定した結果、 3×10^{-10} であった。

5. ま と め

市販されている半内部鏡型レーザー管を使用し、ヨウ素の飽和吸収線の3次微分信号を検出して周波数安定化制御するヨウ素安定化レーザーを試作した。

使用した半内部鏡型He-Neレーザーの封入ガスは、 $^{20}\text{Ne} : ^{22}\text{Ne} = 1 : 1$ の同位体組成からなっていることが推定された。しかし、このような組成のHe-Neレーザーのヨウ素吸収線は報告されておらず、本実験で初めて3本の吸収線の存在が確認された。しかし、これらの吸収線名は同定できなかった。

試作したヨウ素安定化He-Neレーザーは以下のような特徴をもつ。

- 1) 反射鏡の一方がレーザー管に取り付けられ、他方は外部鏡からなる半内部鏡型レーザー管を用いたた

め、レーザー発振のための光学調整が容易になった。

- 2) 共振器長の変調および補正に積層型 PZT を用いたため、通常の演算増幅器でも駆動可能になった。
- 3) 低電圧駆動 PZT により狭くなった制御範囲を拡大させるため、レーザー管に巻いたヒーターの発熱制御と PZT 制御からなる二重制御回路を用いた。

本研究を遂行するに当たり、さまざまな情報とヨウ素吸収セルをご提供いただきました東京電機大学田中敬一教授、計量研究所岩崎茂雄氏に感謝申し上げます。

文 献

- 1) 牛田一雄: “ステッパー用投影光学系”, 光学, **17** (1988) 409-410.
- 2) 田中敬一: “光の速さの測定とメートルの新定義”, 光学, **11** (1982) 537-545.
- 3) R. B. Hurst, N. Brown, V. D. Dandawate, G. R. Hanes, J. Helmcke, H. P. Layer, L. Zhonggon, W. R. C. Rowly, T. Sakurai and M. S. Chung: “International intercomparison of iodine-stabilized He-Ne lasers at 633 nm involving ten standard laboratories,” *Metrologia*, **24** (1987) 39-44.
- 4) 石川 純: “ヨウ素安定化 He-Ne レーザーの新しい制御系”, 光学, **15** (1986) 309-316.
- 5) 田中敬一, 岩崎茂雄: “ $^{127}\text{I}_2$ の精製と波長標準用 $^{127}\text{I}_2$ 吸収セルの寿命評価”, 計測と制御, **25** (1986)
- 6) R. H. Cordover, T. S. Jaseja and A. Javan: “Isotope shift measurement for 6328 Å He-Ne laser transition,” *Appl. Phys. Lett.*, **7** (1965) 322-334.
- 7) S. J. Bennett, R. E. Ward and D. C. Wilson: “Comments on; Frequency stabilization of internal mirror He-Ne lasers,” *Appl. Opt.*, **12** (1973) 1406.