周波数安定化用543 nm He-Ne レーザの最適動作

笠原 剛*・石橋利晃**・杉山尚樹***・田幸敏治****
山下正文*****・李 容哲*****・畠山重雄*****・秋元義明*

*工業技術院計量研究所計測システム部 つくば市梅園 1-1-4 (〒305-8563)

** ヤマハ(株) AV・IT 事業本部 DS 商品開発部 磐田郡豊岡村松ノ木島203 (〒438-0192)

***(株)リコー画像システム事業本部 FCP 事業部 大田区中馬込 1-3-6 (〒143-0027)

**** 東京理科大学理工学部 野田市山崎2641 (〒278-0022)

***** 日本科学エンジニアリング(株)八王子工場技術部 八王子市中野町2062-21 (〒192-0015)

(1999年10月4日 受理)

キーワード: 543 nm He-Ne レーザ, 発振特性, レーザ媒質

Optimal Operation of 543 nm He-Ne Laser for Frequency Stabilization

Takeshi KASAHARA*, Toshiaki ISHIBASHI**, Naoki SUGIYAMA***, Toshiharu TAKO****,
Masafumi YAMASHITA*****, Yong Chol LI*****, Shigeo HATAKEYAMA*****, and Yoshiaki AKIMOTO*

*National Research Laboratory of Metrology, 1-4, Umezono 1-chome, Tsukuba 305-8563

**Yamaha, Matsunokijima 203, Toyooka, Iwata 438-0192

***Ricoh, 1-3-6 Nakamagome, Oota 143-0027

****Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Science University of Tokyo,
2641 Yamazaki, Noda 278-0022

*****Nihon Kagaku Engineering, 2062-21 Nakano, Hachioji 192-0015

(Received October 4, 1999)

Keywords: 543 nm He-Ne Laser, Characteristics on Oscillation, Laser Medium

Optimal conditions of a 543 nm He-Ne laser that is a useful light source as the wavelength standard are investigated for a gas mixture ratio, total gas filling pressure and excitation current. It is also studied experimentally for the transverse magnetic field for the suppression of a mode hopping. In the experiments, the tuning range of 880 MHz was demonstrated a stable oscillation at the product pd of 3×10^2 mmPa, p is the total gas filling pressure and d corresponds to the capillary diameter of the laser tube.

1. はじめに

メートル条約に基づく「メートルの定義に関する諮問委員会」は、メートルを具現する方法の一つとして、放射リストを勧告している¹⁾。1992年に開催された同諮問委員会(名称を長さ諮問委員会に改称)では、新たに543 nm よう素安定化 He-Ne レーザを放射リストに追加することが勧告された²⁾。He-Ne レーザは計測用光源としても、現在広く普及しており、3.39 μ m, 633 nm, 612 nm など、幾つかの波長域では、既に周波数安定化レーザが実現されている。He-Ne レーザの内、最短波長である543 nm 発振線

についても、よう素の飽和吸収スペクトルの SN 比が優れているという特性を生かすことで、周波数安定化レーザの実現が期待されてきた³⁾。一方、レーザの動作状態が放電電流、封入ガス圧などに依存することは定性的によく知られている。しかしながら、543 nm He-Ne レーザの利得は小さく、優れた品質のレーザミラーの入手が困難であることなどの理由により、周波数安定化を目的として、出力特性を詳細に論じた論文は少ない。

よう素の飽和吸収スペクトルを用いた周波数安定化レーザを実現するためには、安定な単一モード発振と、安定化に用いる基準スペクトルが最大出力の条件下で観測される

ことが重要である。本論文では、543 nm He-Ne レーザの発振特性に影響を及ぼす封入気体の混合比、封入圧力及び放電電流の依存性及び、固有偏光特性について実験的に検討した結果を基に、これらの最適条件について述べる。

2. 実験

2.1 実験装置

レーザは、Fig. 1 に示すように管内のレーザ媒質を実験条件に合わせ設定可能な構造のパイレックスガラス製の内部ミラー型とした。共振器長は約340 mm で、細管内径は1.6 mm、放電長は約290 mm である。ミラー M1 及び M2 には、面精度が約0.1 nm で、543 nm 発振線に対する反射率が99.985% (M1), 99.92% (M2 : 出力側) のPMS 社製543 nm He-Ne レーザ用ミラーを用いた。これらのミラーは、He-Ne レーザの中で最も利得の高い3.39 μm 領域における反射率が0.5%以下に抑制され、曲率半径は M1 が ∞ 、M2 が1 m である。カソードは、直径約40 mm、長さ約150 mm でアルミニウム製の円筒形にし、最大放電電流を10 mA に設計した。また、レーザの発振モード制御のために横磁場発生のための永久磁石を準備した。

Fig. 2 に出力特性観測システムの構成図を示す。発振モードは、543 nm 専用でありフリースペクトルレンジが2 GHz のスキャニングファブリ・ペロー (以下、SFP という

Fig. 1 Schematic diagram of laser tube.

Fig. 2 Experimental set-up.

う) とオシロスコープで観測した。レーザ出力は、測定範囲が 10^{-7} W から 10^{-1} W のパワーメータで測定した。レーザには安定抵抗 (アノード側 : 20 k Ω , カソード側 : 62 k Ω) を通し、約5 kV のトリガー電圧を重ねた最大電流7.5 mA、最大電圧が3 kV の定電流直流高圧電源を接続した。封入ガスの状態を変えられるようにするため、真空排気装置に金属ベローズを介してレーザ管を接続した。真空排気装置は、ロータリーポンプ、オイル拡散ポンプと電離真空計、オイルマノメータで構成し、 ^3He 及び $^{\text{nat}}\text{Ne}$ のポンプを取り付けた。封入気体の圧力は、比重1.05のシリコンオイルを満たしたオイルマノメータで測定した。

2.2 実験方法

2.2.1 レーザ媒質の封入

レーザ管内の残留気体を、電離真空計で観測しながら約0.7 mPa までロータリーポンプとオイル拡散ポンプで十分に排気した。He と Ne の気体は、実験条件に合わせ規定の圧力の Ne 気体を先に封入し、その後 He 気体を実験条件の分圧に合せオイルマノメータで観測しながら封入した。これらの気体は、20分程度放電させ十分に混合を促進した。

オイルマノメータの測定誤差として示度、温度、姿勢、重力加速度の違いによる誤差等が考えられるが、U字管のメニスカスにおける読みとり誤差は約0.5 mm 程度であり、これは封入圧力に換算すれば50 Pa 程度と推定される。

2.2.2 偏光特性及び発振モードの観測

543 nm He-Ne レーザの偏光特性は、これまでに報告されている限り、2つの固有な偏光方向で発振しており、各縦モードの発振周波数領域は連続的でなく頻りにモードホップが生じており、安定化には不適當な特性であった。このため、偏光特性の改善を目的に、磁場をパラメータとして、その効果を実験的に検討した。

偏光特性及び発振モードの評価は、偏光板を介して各固有偏光方向を選択し、SFP へレーザビームを導き、各固有偏光毎にオシロスコープで観測し、写真撮影を行った。レーザの発振周波数は、レーザ管の熱膨張を利用して連続的に制御した。

2.2.3 電流依存性の測定

電流依存性は、レーザ管の熱膨張などに基づく共振器の調整条件を整え、レーザ出力の初期変動が十分に抑えられ安定な発振状態を確認した後、放電電流を4.5 mA から、0.5 mA の間隔で増加させながら、レーザ出力を測定した。パワーメータの測定誤差要因として、センサーの特性及び表示に基づく測定誤差などが考えられる。センサーに依存する測定誤差は、レーザビームの角度を一定に保つことにより、10 nW 以下と推定される。これに対し、表示誤差は測定レンジに依存し比較的大きく、表示値の約 $\pm 5\%$ である。

3. 実験結果

3.1 偏光特性

Fig. 3 及び Fig. 4 に、固有偏光の発振モードを示す。これらの結果は、発振周波数を掃引し光スペクトルアナライザで観測した結果である。縦軸はレーザ出力で、横軸は周波数を表す。Fig. 3 は、横磁場を印加しない場合の各固有偏光の出力特性のプロファイルであり、連続掃引可能な範囲は縦モード間隔に相当し約440 MHz である。従って、Fig. 3(a) 及び Fig. 3(b) に示されているとおり、発振縦モードは発振周波数領域により固有偏光の方向が異なることが分かる。この状態で更にレーザ周波数を掃引すると、モードホップが観測され偏光方向は変わった。

Fig. 4 は、レーザ管のアノード付近に約0.02 T の横磁

場を印加した場合のレーザ出力特性のプロファイルである。横磁場を印加することで、モードホップを抑制でき、単一縦モードでの発振領域が広がり、偏光方向を変えることなく連続的に掃引できた⁴⁾。これらの結果より、利得曲線のプロファイルは縦モード間隔の約2倍と考えられるから、単一モードでかつ、偏光特性を変えることなく掃引可能な範囲は、約880 MHz になる。また、Fig. 4 の利得曲線は Fig. 3 のそれより全体に下り、横磁場の影響により、レーザ出力は無磁場時のレーザ出力に比べ、小さくなったことが分かった。

3.2 レーザ出力の電流依存性

He と Ne の混合比及び混合気体の封入圧力をパラメータにして測定した結果に、最小自乗法を適用しカーブフィッティングを施して特性曲線を求めた。得られた特性曲線の中で横モードが抑制できた実験結果について、最大出力 $P_{\max}$ (mW) とその放電電流 I_{opt} (mA) の値を Table 1 に示す。

封入圧力 p と細管内径 d の間には、 $p \cdot d$ 積が一定となる相似則が成り立つことが知られている⁵⁾。実験結果から得られた543 nm He-Ne レーザの $p \cdot d$ 積は 2.6×10^2 Pamm $\sim 3.4 \times 10^2$ Pamm 程度であった。この値は、3.39 μm He-Ne レーザの 6.7×10^2 Pamm $\sim 8.3 \times 10^2$ Pamm 程度⁶⁾、633 nm He-Ne レーザの 4.8×10^2 Pamm $\sim 5.3 \times 10^2$ Pamm 程度⁵⁾より小さい結果となった。

Table 1 Mixed ratio dependence of He and Ne

He($\times 10^2$ Pa)	Ne (Pa)	I_{opt} (mA)	$P_{\max}$ (mW)
1.6	31	8.0	1.3
1.9	"	5.9	1.2
2.7	"	5.3	1.0

Fig. 3 (a) Output curve of a horizontal polarization state in single mode operation: Without transverse magnetic field.

Fig. 3 (b) Output curve of a vertical polarization state in single mode operation: Without transverse magnetic field.

Fig. 4 Output curve of a specified polarization state in single mode operation: With transverse magnetic field of about 0.02 T.

Fig. 5 Excitation current dependence versus total gas-filling pressure.
○: 2.9×10^2 Pa, ●: 2.5×10^2 Pa, ▲: 2.1×10^2 Pa, ◇: 1.7×10^2 Pa, □: 1.3×10^2 Pa

また、実験結果から得られた最適混合比は、He : Ne $\approx$ 5 : 1 であった。3.39 μ m He-Ne レーザの He : Ne = 9 : 1 程度⁶⁾、633 nm He-Ne レーザの He : Ne = 5 : 1 ~ 7 : 1 程度⁷⁾と報告されており、543 nm He-Ne の場合小さいことが分った。これらの結果より、He-Ne レーザの $p \cdot d$ 積は波長が長くなるほど大きく、混合比については波長が長くなるほど He の割合が大きくなる傾向がある。

混合比を概ね 5 : 1 に設定し、混合気体の全封入圧力をパラメータに測定したレーザ出力の電流依存性を Fig. 5 に示す。全封入圧力のパラメータの範囲は、約 1.3×10^2 Pa から約 2.9×10^2 Pa である。また Fig. 5 中の曲線は、実験結果に最小自乗法を適用して推定したカーブフィッティングの結果である。実験結果より明らかなように、封入圧力が 1.7×10^2 Pa と 2.1×10^2 Pa の場合は、放電電流が 5 mA から 7 mA までの付近で、他の封入圧力の場合と比べて、出力の電流依存性が小さくなる傾向がある。

4. 考 察

4.1 最適条件

周波数安定化レーザの光源に要求される性能としては、出力変動が小さいことが重要である。更に、安定化の基準スペクトルを大きく観測することができ、スペクトル線の SN 比が高いことが要求される。これらの条件を満たすためには、レーザの出力特性が、基準スペクトルが観測される

Fig. 6 Total gas-filling pressure dependence versus excitation current.
●: 5 mA, ○: 6 mA, △: 7 mA

範囲で最大になることが望ましい。

ここでレーザ管の温度変動に起因する封入圧力変動が、出力変動へ及ぼす影響が懸念される。先ず、圧力変動について考察する。レーザ管の温度変動は、レーザ管自身の膨張と、封入されているレーザ媒質の膨張として現れる。レーザ管の材質であるパイレックスの線膨張係数は、 2.8×10^{-6} であり⁸⁾、材質が等方質とすれば、体膨張率は約 8.4×10^{-6} となる。一方、He と Ne の混合気体であるレーザ媒質には、圧力 p 、体積 V 及び温度 T の間に一般的にファン・デル・ワールスの状態方程式⁹⁾が成立する。しかし、レーザ管が使用される温度領域が常温範囲であれば、レーザ媒質を理想気体として取り扱えるから、状態方程式は、

$$pV = nRT \quad (1)$$

で示される⁹⁾。ここで、 n : モル数と R : 気体定数は一定である。 V の変動は前述のとおり、約 $8.4 \times 10^{-6}/K$ 程度で、極めて小さいから一定であると仮定できる。従って、常温付近において約 30 K に相当する温度の変動に対し、 p の変動は $\Delta p = T/273.155 \approx 0.11$ 、即ち約 10% 程度生じると考えられる。 Δp に対するレーザ出力の変動について Fig. 6 に示す。放電電流をパラメータとして、5 mA、6 mA 及び 7 mA の条件下における圧力依存性である。各特性曲線から、極値付近における約 10% の圧力変動に対するレーザの出力変動は、放電電流が 5 mA の時で約 3

μW , 6 mA の時で約28 μW , 7 mA の時で約69 μW 程度である。比較的小さな変動ではあるが, Fig. 6 から分かるとおり, 放電電流が小さい方が, 出力変動へ及ぼす圧力変動の影響が小さい。しかし, 放電電流を 5 mA 以下に設定した場合, 放電が不安定になるに伴いレーザ出力も不安定になることもあった。

偏光特性は, 混合比, 封入圧力及び放電電流に依存する顕著な傾向はみられなかった。しかし, 試作したレーザ装置は横磁場を印加しない状態で二つの固有な偏光方向で発振しており, 更にそれぞれの偏光方向での発振周波数領域は連続的でなく, 頻繁にモードホップした。このためモードホップを抑制できる最適状態について, 永久磁石を用いて実験的に検討を行った結果, 最適な横磁場の強度は約 0.02 T であった。レーザ管に横磁場を印加すると, Ne の準位はゼーマン効果により分裂し, ゼーマン分離周波数は

$$f_z = \mu g B / h \quad (2)$$

で表される¹⁰⁾。ここに, μ はボーア磁子, g は Lande の g 因子, B は磁束密度である。縦モード間隔と f_z が等しくなるように磁場を印加すると, 3 本の縦モード間の結合, 即ち利得の競合が強まり, このため単一モード発振が起きると考えられる。543 nm 遷移では, 上下両準位の各 g 因子は $g_a = 1.295$, $g_b = 1.984$ である。従って, 縦モード間隔が 400 MHz であれば, 0.022 T, 或いは 0.026 T の横磁場を印加すればモード競合が生じ, このため単一モード発振が実現できる。しかし, 異なったレーザ管を使用した時には, モードホップを抑制できる横磁場の印加方向と最適な磁場の強さが異なることより, 横磁場の状態はレーザミラーの偏光特性と取り付け状態, 更にレーザ媒質の状態にも依存すると考えられる。

4.2 レーザ媒質の封入条件

3.2 で示したとおり, 封入圧力が低い程, 最大出力に対応する放電電流値は大きい。また, 封入圧力が約 2.1×10^2 Pa での観測結果では, 放電電流値が概ね 6.5 mA を超えると, 出力は低下する。しかし, Fig. 5 に示す観測結果から封入圧力約 1.7×10^2 Pa 又は約 2.1×10^2 Pa で, 出力が比較的安定しており, 封入圧力については, この間の値が適切であると考えられる。また, 混合比についても, He : Ne = 5 : 1 が適切であるから, He を約 1.6×10^2 Pa, Ne を約 30 Pa 程度が好ましいと考えられる。以上から, 出力変動を比較的抑制できる混合比, 封入圧力及び放電電流の最適条件をまとめ, Table 2 に示した。但し, 封じ切りの放

電管では, 放電によるクリーンアップ効果を勘案して, 封入圧力をやや高め 2.0×10^2 Pa ~ 2.1×10^2 Pa 程度にする方が長寿命になると考えられる。

5. ま と め

よう素安定化 543 nm He-Ne レーザの実現をめざし, 光源用レーザに関する動作条件の最適化を試みた。そのため, PMS 社製 543 nm He-Ne レーザ用ミラーを採用したレーザ管を試作し, 封入気体の混合比, 圧力及び放電電流をパラメータに, 出力及び偏光特性を測定した。混合比, 封入圧力及び放電電流の最適値を実験的に検討した結果は, 次のとおりである。

- 1) 比較的小さな放電電流 (約 5 mA) で動作させることにより, 圧力依存性が小さく, 安定な出力を得られた。
- 2) 混合比 (He : Ne = 5 : 1) 及び封入圧力 (約 1.6×10^2 Pa) の最適条件の下では, 最大出力を得ることができた。しかし, 封じ切りの条件は, クリーンアップ効果を勘案して, 2.0×10^2 Pa ~ 2.1×10^2 Pa が適切であると考えられる。
- 3) 543 nm He-Ne レーザの $p \cdot d$ 積は約 2.6×10^2 Pamm ~ 3.4×10^2 Pamm であることを明らかにした。
- 4) He-Ne レーザの混合比と $p \cdot d$ 積は, 従来から 3.39 μm He-Ne レーザと 633 nm He-Ne レーザの実験結果を基に検討され, 発振波長に依存することを明らかにしてきた。本実験の結果, これらの現象が 543 nm 域の短波長側まで拡張できることが立証できた。
- 5) 頻繁なモードホップに対し, 特定の横磁場 (約 0.02 T) を印加することにより利得特性内を単一モードでかつ固有偏光特性を変えずに連続的に掃引できた。この結果, 543 nm よう素安定化 He-Ne レーザの光源としての要件を明確にすることができた。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 実験に協力していただいた広島県立西部工業技術センターの佐々木憲吾氏, 並びに計量研究所坂本和平及び稲場肇氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Documents Concerning the New Definition of the Metre: Metrologia **19**, 163-177 (1984).
- 2) Quinn T. J., Mise en Pratique of the Definition of the Metre (1992): Metrologia **30**, 523-541 (1994).
- 3) 例えば, 秋元義明, 坂本和平, 稲場 肇, 石橋利晃, 山下正文, 田幸敏治, 李 容哲, 畠山重雄: 電気学会計測研究会資料 IM-93-61 (1993).
- 4) T. Ishibashi, M. Yamashita, T. Tako, Y. C. Li, S. Hatakeyama, K. Sakamoto, H. Inaba, and Y. Akimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 1645-1647 (1994).
- 5) レーザ学会編: レーザーハンドブック (オーム社) 197 (1989).

Table 2 An optimal operation condition

He Pressure	1.6×10^2 Pa
Ne Pressure	31 Pa
Mixed ratio	He : Ne = 5 : 1
Excitation current	5 mA

- 6) 田幸敏治, 大井みさは, 秋元義明, 赤羽正志, 原 敏幸 : 光学 4, 225 (1974).
- 7) 矢島達夫, 霜田光一, 稲場文男, 難波 進編 : 新版レーザーハンドブック (朝倉書店) 152 (1989).
- 8) 東京天文台編 : 理科年表 (丸善) 470 (1991).
- 9) 例えば, 戸田盛和, 宮島龍興編 : 物理学ハンドブック 2 (朝倉書店) 156 (1996).
- 10) 例えば, 吉永 弘編 : 応用分光学ハンドブック (朝倉書店) 33 (1981).