

## 技術報告

## 磁気変調法による 633 nm He-Ne レーザーの周波数安定化

瀬田 勝男\*・岩崎 茂雄\*・尾坂 一\*\*

\* 計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

\*\* 長野県精密工業試験場 〒394 岡谷市 9959

(1987年3月27日受理)

### Frequency Stabilization of a He-Ne Laser by Means of Magnetic Modulation

Katuo SETA,\* Shigeo IWASAKI\* and Hajime OSAKA\*\*

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

\*\* Precision Industrial Research Institute of Nagano Prefecture,  
9959, Okaya 394

Polarization directions of a 2-modes internal-mirror He-Ne laser are modulated by a weak axial AC magnetic field. By means of this magnetic modulation, the laser frequency was stabilized at a point where each mode had an equal intensity together. From the error estimation, it was shown that frequency stability was not affected by the drift of the electric circuit and/or the photodetector with this method. Indeed, a high repeatability of about 500 kHz ( $1 \times 10^{-9}$ ) was confirmed by using an I<sub>2</sub>-stabilized He-Ne laser as a frequency standard.

#### 1. はじめに

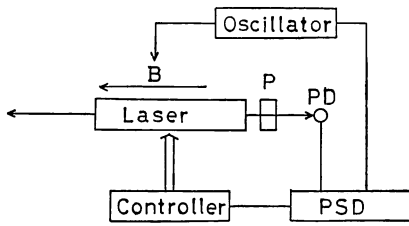
内部鏡型の 633 nm He-Ne レーザーは計測用光源としてよく用いられているが、手軽で実用的な周波数の安定化法として 2 モード法がある。これは、内部鏡レーザーが 2 モードで発振しているときにはその偏光方向が互いに直交していることを利用し、偏光ビームスプリッタにより 2 モードを分離した後、おのおのの強度が等しくなるようにレーザー管長を制御する方法である<sup>1,2)</sup>。これは、簡便な方法という意味では非常に優れたものであり、波長の安定度としては  $10^{-8}$  から  $10^{-9}$  程度が容易に実現できることから、数種類の製品が市販されている。しかし同時に欠点としては、受光素子の感度の変化や電気回路におけるドリフトの影響を受けやすい、バックトークに対して出力や周波数の変動が大きい<sup>3)</sup>、絶対周波数の繰返し性が管ごとにばらつき、必ずしも高くなく、 $2 \times 10^{-7}$  から  $10^{-8}$  程度にすぎない<sup>4)</sup> といったことが挙げられる。とくに、絶対周波数の繰返し性は、干渉計用光源

としては不足である場合も多い。

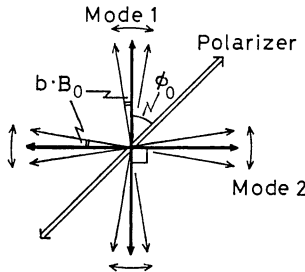
そこで弱い軸磁場による偏光方向の変調を利用し、電気回路のドリフトなどに左右されることなく 2 モードの強度差をゼロにする方式を考案し、繰返し性を改善した周波数の安定化を試みた。この方式は、原理的にはすでに 1960 年代から知られている効果を利用したものであり<sup>5,6)</sup>、また、これを試みた例もある<sup>7)</sup>。本研究では、安定化の系をより簡単なものとしてまとめると同時に、制御系の特性について評価を行ない、また、I<sub>2</sub> 安定化レーザーを基準として周波数安定度を測定した。

#### 2. 安定化の原理と誤差要因

磁気変調法による安定化の概略を Fig. 1 に示す。内部鏡 He-Ne レーザーが 2 モードで発振しているとき、この 2 モードの偏光方向は互いに直交している。これに弱い交流磁場  $B = B_0 \cdot \sin 2\pi ft$  を軸方向にかけると、発振しているモード 1, 2 の偏光方向  $\phi_1, \phi_2$  が磁場により変調される。偏光方向の変化は弱い磁場のもとでは磁



**Fig. 1** A schematic diagram of the magnetic modulation method. *B*, AC magnetic field; *P*, polarizer; *PD*, photodetector; *PSD*, phase sensitive detector.



**Fig. 2** Polarization directions of a 2-modes internal-mirror He-Ne laser under the magnetic modulation.  $\phi_0$ , the angle between the polarization direction of a mode and the polarizer when there is no magnetic field;  $b \cdot B_0$ , the amplitude of polarization modulation.

場の強度に対して一次関数で近似でき、 $b$  を比例係数として

$$\begin{aligned} \phi_1 &= b \cdot B_0 \cdot \sin 2\pi ft \\ \phi_2 &= b \cdot B_0 \cdot \sin 2\pi ft + \pi/2 \end{aligned} \quad (1)$$

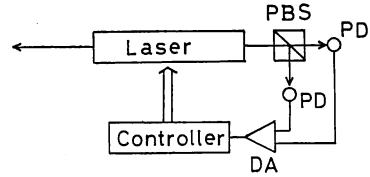
と表わすことができる。この偏光変調により、Fig. 2 に示すようにモード 1 の偏光方向から  $\phi_0$  傾けた軸をもつ偏光子 *P* を通過した光は周波数  $f$  で強度変調された状態となる。偏光子を透過した後、光検出器 *PD* へ入射する光の強度  $I$  は

$$I = I_1 \cdot \cos^2(\phi_0 + b \cdot B_0 \cdot \sin 2\pi ft) + I_2 \cdot \sin^2(\phi_0 + b \cdot B_0 \cdot \sin 2\pi ft) \quad (2)$$

となる。ここで  $I_1, I_2$  は 2 モードおのおのの光強度である。この式はベッセル級数  $J_n$  により

$$\begin{aligned} I &= (1/2)(I_1 + I_2) + (1/2)(I_1 - I_2) \\ &\times [\cos 2\phi_0 \cdot \{J_0(2b \cdot B_0) \\ &+ 2 \sum J_{2n}(2b \cdot B_0) \cdot \cos 2n(2\pi ft) \\ &- 2 \cdot \sin 2\phi_0 \cdot \sum J_{2n+1}(2b \cdot B_0) \cdot \sin(2n+1)(2\pi ft)\}] \end{aligned} \quad (3)$$

と展開することができる。ここで  $\phi_0$  を  $\pi/4$  として、偏光角の変調振幅は小さい、すなわち  $b \cdot B_0 \ll 1$  と仮定す



**Fig. 3** A schematic diagram of 2-modes method. *PBS*, polarizing beam splitter; *PD*, photodetector; *DA*, differential amplifier.

れば、上式は近似的に

$$\begin{aligned} I &= (1/2) \cdot (I_1 + I_2) \\ &- (1/2) \cdot (I_1 - I_2) \{u \cdot (2b \cdot B_0) \cdot \sin(2\pi ft) \\ &+ 2\pi f \text{ の高次項}\} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。ここで  $u$  は 1 よりわずかに小さい補正係数である。この式を導くのに必要な仮定は実験的に容易に実現できる。また、高次項は、それ自体が小さいばかりでなく、周波数  $f$  の同期検出により除くことができる。実際には上記の仮定から多少はずれた条件で、たとえば  $\phi_0 = 3\pi/8$  で測定を行なっても、周波数  $f$  で同期検出を行えば、係数  $u$  の値はいくぶん変わってくるが二つのモードの強度差  $(I_1 - I_2)$  に比例した振幅が得られる。つまりおのおののモードは  $\phi_0 = 0$  のとき以外は周波数  $f$  で逆位相の強度変調を与えていることになる。したがって 2 モードの強度が等しい場合にのみこの変調成分は 0 となり、これを利用した周波数の安定化、2 モードの強度が等しい位置への安定化が可能である。

通常の 2 モード法では Fig. 3 に示すように二つのモードを偏光ビームスプリッタにより分離し、おのおのの光強度を二つの光検出器により光電変換したのち、その差を差動増幅器により求める。したがって制御回路に入力される誤差信号  $E_2$  は、

$$E_2 = (\eta_0 \cdot g_a) \cdot (r_s \cdot \eta_1 \cdot g_1 \cdot I_1 - t_p \cdot \eta_2 \cdot g_2 \cdot I_2) + \epsilon_a \quad (5)$$

となる。 $g_1, g_2$  は差動増幅器の二つの入力に対する増幅度を  $g_a$  により規格化したもので、 $\epsilon_a$  は差動増幅器のオフセットを示す。 $r_s, t_p$  は偏光ビームスプリッタの *S, P* おのおのの偏光成分に対する反射率および透過率であり、いずれも 1 よりわずかに小さな値である。また、 $\eta_1, \eta_2$  は二つの光検出器のおのおのの感度、すなわち光電気変換効率を  $\eta_0$  により規格化したものである。制御されている状態では、 $I_1 \approx I_2$  と近似することができるが、 $\delta I = I_2 - I_1$  として、制御時 ( $E_2 = 0$ ) の偏差  $\delta I$  を求めると、微小量の 2 次以上の項は無視できると考えれば、

$$\delta I = [(r_s - t_p) + \delta\eta + \delta g] \cdot I_1 + \epsilon_a / (g_a \cdot \eta_0) \quad (6)$$

となる。ここで  $\delta g = g_1 - g_2$ ,  $\delta\eta = \eta_1 - \eta_2$  である。

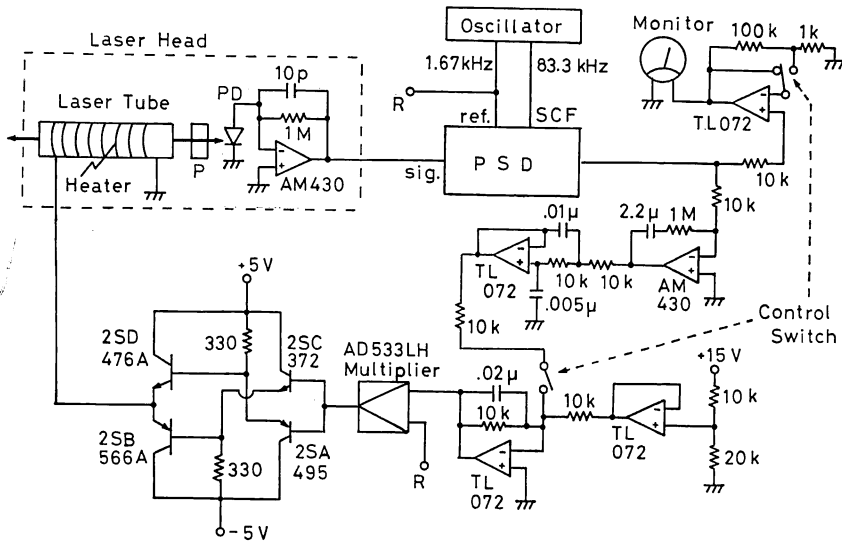


Fig. 4 A diagram of the frequency stabilized He-Ne laser by means of the magnetic modulation. PD, photodetector; P, polarizer; PSD, phase sensitive detector<sup>8)</sup>; SCF, switched capacitor filter.

一方、磁気変調法における誤差信号  $E_m$  は、

$$E_m = C \cdot (d_p \cdot I_1 + d_s \cdot I_2) + \varepsilon_m \quad (7)$$

ただし  $C = \eta \cdot g_m \cdot u \cdot 2b \cdot B_0$ ,

$$d_p = \left( \frac{dt_p}{d\phi} \right)_{\phi=\phi_0}, \quad d_s = \left( \frac{dt_s}{d\phi} \right)_{\phi=\phi_0}$$

であり、 $\eta$  は光検出器の効率、 $g_m$ 、 $\varepsilon_m$  は同期検出回路の増幅度とオフセットである。(1)~(4)式では、 $d_p = -d_s$  を仮定しているが、より厳密に  $d_p + d_s = \delta d$  として制御時の偏差  $\delta I$  を求めると、

$$\delta I = (\delta d / d_p) \cdot I_1 + \varepsilon_s / (C \cdot d_p) \quad (8)$$

となる。

(6)式と(8)式はいずれも入力信号に比例した第一項と、オフセットによる第二項からなっており、いずれの場合においても第二項については、差動増幅器や同期検出回路の増幅度を大きく、また、オフセットを小さくするという回路技術により十分小さくできることがわかる。これに対して第一項の性質は(6)式と(8)式とでかなり異なっている。(8)式では偏光子の非対称性による項のみが存在しているのに対し(6)式には偏光子、光検出器、差動増幅器のおおのの非対称性に基づく三つの項が含まれている。そして偏光子の非対称性に基づく項は温度などの環境による変化がきわめて小さいが、光検出器や差動増幅器の非対称性は環境の変化に対して影響を受けやすい。この点で、磁気変調法には、2モード法に比べ長期の安定度が優れたものを実現する可能性がある。もちろん、通常の2モード法であっても、(6)式に

示したような誤差要因を小さくすることで長期安定度の向上を図ることは可能である。しかし、磁気変調法は電子回路がやや煩雑にはなるものの、原理的により有利な方法であるといえる。

### 3. 安定化装置

Fig. 4 に安定化装置を示す。用いたレーザーは市販の管長 175 mm のもので、出力は 1 mW 弱である。このレーザー管の中央部約 7 cm の区間に、27 回りボンヒーターを巻き付けてあり、その抵抗値は約 5  $\Omega$  である。偏光子としては、10 mm 立方の偏光ビームスプリッタを用いている。フォトダイオードからの信号は、電圧変換されたのち、電子回路シャーシへ送られる。このシャーシは 300 W  $\times$  225 D  $\times$  130 H mm<sup>3</sup> の大きさで、この中にレーザーの電源を含めて電子回路の全体が納められている。

レーザーヘッドから送られてきた信号は、RC バンドパスフィルタを介して変調周波数  $f$  (1.67 kHz) 近傍の帯域の信号のみが前置増幅器へ入力される。これを同期検出回路により処理して周波数  $f$  の信号の振幅を検出し<sup>8)</sup>、この振幅の大きさを誤差信号として制御回路に入力する。制御回路では、積分回路により直流増幅度を無限大とし、時定数などを適当に調整する。これを基準振幅電圧  $V_0$  と足し合わせた後、乗算器で周波数  $f$  の基準信号と掛け合わせる。この結果、振幅に制御情報を含んだ交流電圧信号が得られ、パワートランジスタにより

電流増幅されてコイル状ヒーターへ供給される。コイル状のヒーターは交流電流により振幅  $B_0$  の交流磁場を発生すると同時に、電流の振幅に応じた熱量を発生し、レーザー管の熱膨張を利用した管長の制御が可能となる。

ヒーターの抵抗は約  $5\Omega$  であり、電源電圧は  $\pm 5V$  であるから、ヒーターには最大  $1A$  の振幅で電流が流れる。この結果交流磁場の最大振幅は約  $400 A/m$  となり、また、供給できる最大熱量は約  $2.5 W$  となる。

安定化の手順としては、まず制御スイッチを開いた状態で約 20 分間待つと、基準振幅電圧に対応した振幅の電流がヒーターに流れてレーザー管がプレヒートされる。この状態で制御スイッチを閉じると、2モードの強度差に比例した誤差信号により制御が開始される。積分回路の直流利得はほぼ無限大と近似できるから、同期検出回路の出力が 0、すなわち 2モードの強度が等しいところへレーザー管長が制御される。

この制御系は、装置を簡単なものにするためにコイルの役割も兼ねたりボンヒーターを用いている。この方式の問題点は、制御することにより磁場の振幅  $B_0$  を変化させてしまうことにある。(8)式から明らかのように、 $B_0$  が変化すれば誤差信号の感度が変化することになる。しかし幸いなことに、 $B_0$  の変動は制御点の変化を意味せず感度が多少変化するだけである。この場合、制御回路のゲインと時定数を適当に選ぶことにより、安定的な制御が可能である。実際に、Fig. 4 に示したような、比例動作においても高いゲインをもつ簡単な積分回路を採用したところ、きわめて容易に安定的な制御を行なうことができた。

#### 4. 周波数安定化の結果

レーザー管長  $L$  が伸びていくときの誤差信号の変化を Fig. 5 に、制御ループを開いているとき、および閉じているときの誤差信号のようすを Fig. 6 に示す。これらの誤差信号は同期検出回路の出力、すなわち光検出器の出力に含まれる周波数  $f$  の成分の振幅  $A$  である。この振幅  $A$  は、すでに述べたように 2モードの強度差、および交流磁場の振幅  $B_0$  に比例した量であり、Fig. 5, 6 の誤差信号から、レーザー周波数のゆらぎ  $\delta\nu$  を

$$\delta\nu = \nu_b (dL/dA)_0 (\delta A_c / L_b) (B_{00}/B_{0c}) \quad (9)$$

と求めることができる。ここで  $\delta$  はゆらぎの幅を示し、添字  $c$  は制御時の量であることを表わしている。また、 $\nu_b$  はビート周波数、 $L_b$  はレーザー周波数が  $\nu_b$  変化するときのレーザー管長の伸縮量であり、 $(dL/dA)_0$  は Fig. 5 に、 $\delta A_c$  は Fig. 6 にそれぞれ示す。 $(B_{00}/B_{0c})$  は、

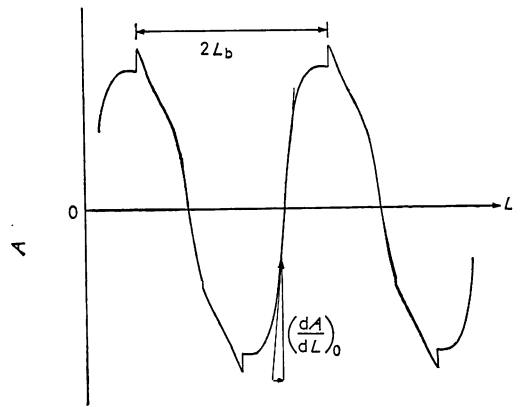


Fig. 5 The error signal  $A$  of the stabilizer.  $L$ , the length of the laser tube.

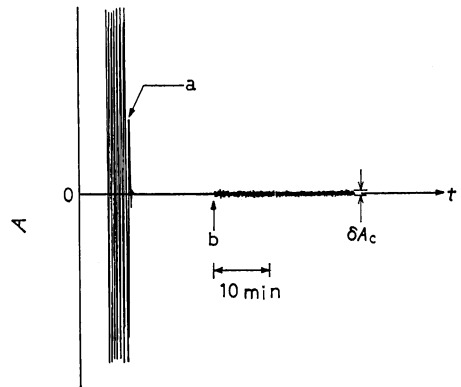
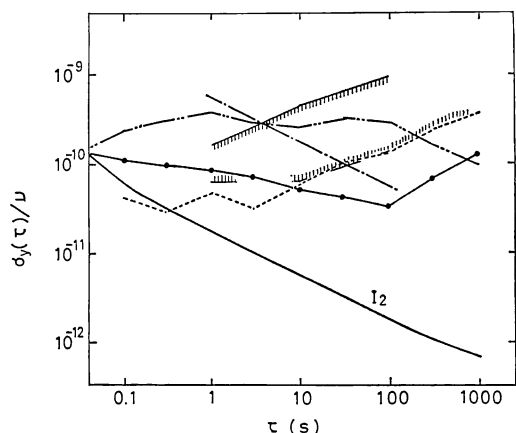


Fig. 6 The error signal when the servo loop is open and is closed. a, the servo loop is closed; b, the sensitivity of the recorder is changed to  $\times 50$ ;  $\delta A_c$ , the fluctuation of the error signal when the servo loop is closed.

プレヒート時と制御時の交流磁場の振幅比である。Fig. 5, 6 から求めた数 Hz までの帯域における peak-peak 値を  $\delta\nu$  とすると、その値はおよそ  $\pm 200 \text{ kHz}$  であり、 $\nu$  に対して  $\pm 5 \times 10^{-10}$  程度の大きさである。この値から周波数絶対値の、とくに長時間に渡る安定度を評価することには無理がある。しかし短時間での安定度のおよその目安となる。

さらに、磁気変調法による安定化レーザーの長時間での安定度や波長の絶対値を知るために、 $I_2$  安定化 He-Ne レーザーを基準として、周波数の比較を行なった<sup>9,10</sup>。この  $I_2$  安定化レーザーは、すでに標準用光源として波長の絶対値が知られており、また、今回製作したような簡易型の安定化レーザーに比べて十分に高い長期安定度をもつ。



**Fig. 7** Square root of Allan variance. —,  $I_2$ - $I_2$ ; —●—,  $I_2$ -the magnetic modulation method; ·····,  $I_2$ -2-modes method (thin film heater)<sup>13)</sup>; ▨▨▨▨,  $I_2$ -2-modes method (wire heater)<sup>4)</sup>; ···—,  $I_2$ -transverse Zeeman method<sup>12)</sup>; - - - - -,  $I_2$ -longitudinal Zeeman modulation method.<sup>11)</sup>

その結果得られたアラン分散を **Fig. 7** に示す。この図には各種の安定化レーザーの、同じく  $I_2$  安定化レーザーを基準としたアラン分散も同時に示してある<sup>4, 11-13)</sup>。とくに興味があるのは、従来の2モード法による安定化レーザーとの比較である。まず  $\tau$  が 10 s 以下の短時間領域では安定度が必ずしも改善されていないことがわかる。とくに破線で示した抵抗体被膜をレーザー管にコーティングしたもの<sup>13)</sup>と比較すればむしろ安定度は低下している。これは変調信号を同期検出して平均化することによる時間遅れ、および、コイル状のヒーターを含んだ系の熱的な時定数が大きいことから、短時間での制御特性がいくぶん劣っていることによると思われる。しかし  $\tau$  が 10 s 以上の領域では、2モード法による最も高い安定度のレーザーと比べても半桁ほど、比べる対象によっては1桁以上も安定度が改善されている。これはすでに3章で述べたように制御信号の温度ドリフトなどの影響が原理的にきわめて小さいことが反映した結果であると考えられる。

一方、より長期的な安定度を評価する目安として、繰返し性 (repeatability) と呼ばれる量がある。これは安定化レーザーを何度か on, off してそのときの周波数の最大変化幅を見るものである。数カ月にわたって  $I_2$  安定化レーザーを基準として繰返し性の評価を行なった結果を **Table 1** に示す。表の No. 1~4 では偏光ビームスプリッターからの透過光のみを用いているが、No. 5~7 では反射光も検出し、二つの信号の差を同時検出回路

**Table 1** Repeatability of the absolute frequency.

No.	Date	$(\nu_{MM} - \nu_a)/\text{MHz}^*$	$\phi_0$
1	'86 10/31	255.36	$\pi/4$
2	10/31	255.48	
3	11/07	255.05	
4	11/08	255.56	
5	11/20	257.69	$\pm \pi/4^{**}$
6	'87 2/24	258.08	
7	2/24	257.86	

\*  $\nu_{MM}$ , The frequency of the laser stabilized by means of magnetic modulation;  $\nu_a$ , The frequency of the laser stabilized at d-line of  $I_2$ .

\*\* Intensity difference between two light beams obtained by the polarizing beam splitter is used as the input of the phase sensitive detector.

へ入力している。これは信号の SN 比を向上させるための改良であったが、偏光子からの入力法を変えたことにより 2 MHz ほど周波数がシフトした。このシフトの原因は、偏光子特性のわずかな非対称性によるものと考えられる。また、入力法を固定した場合の変動幅は約 500 kHz ( $1 \times 10^{-9}$ ) 程度であり、従来の2モード法に比べて1桁から2桁ほど小さな変動であった。

## 5. ま と め

レーザー管軸方向への弱い交流磁場による偏光方向の変調を利用して、2モードで発振している内部鏡 He-Ne レーザーの周波数を2モードの強度が等しくなる位置へ安定化することができた。また、この方法は、従来の2モード法に比べ、絶対周波数の長期安定度において原理的に優れていることを解析により示した。実際に  $I_2$  安定化レーザーを基準にして安定度を評価したところ、10s 以上の領域におけるアラン分散値で半桁から1桁以上、また、数カ月にわたる周波数の繰返し性では1桁から2桁ほど2モード法より優れていることがわかった。この結果、磁気変調法による長期安定度の改善が確認され、干渉計用光源として、絶対周波数安定度の高いレーザーを製作することができた。

この安定化装置を製作するに当たり、計量研究所量子部の石川純氏には同期検出回路の設計と部品の提供でご助力いただいた。ここに感謝の意を表す。

## 文 献

- 1) R. Balhorn, H. Kunzmann and F. Lebowsky:

- "Frequency stabilization of internal-mirror helium neon lasers," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 742-744.
- 2) 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.
  - 3) N. Brown: "Frequency stabilized lasers: optical feedback effects," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 3711-3714.
  - 4) P. E. Ciddor and R. M. Duffy: "Two-mode frequency-stabilised He-Ne (633 nm) lasers: studies of short- and long-term stability," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **16** (1983) 1223-1227.
  - 5) W. Calshaw and J. Kannelaud: "Coherence effects in gaseous lasers with axial magnetic fields. I. Theoretical," *Phys. Rev.*, **141** (1966) 228-236.
  - 6) J. Kannelaud and W. Calshaw: "Coherence effects in gaseous lasers with axial magnetic fields. II. Experimental," *Phys. Rev.*, **141** (1966) 237-245.
  - 7) P. N. Puntambekar, P. K. Mohanty and H. S. Dahiya: "Frequency stabilization of 0.633  $\mu\text{m}$  He-Ne laser using polarization modulation," *Proc. of Conf. on Precision Electromagnetic Measurements*, Gaithersburg, MD (1986) pp. 332-333.
  - 8) 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.
  - 9) 田中敬一: "He-Ne レーザーの周波数安定化", *計量研報告*, **24** (1975) 181-236.
  - 10) 岩崎茂雄, 桜井慧雄: "市販波長安定化レーザーの波長校正とその安定度", *応用物理*, **49** (1980) 870-875.
  - 11) T. Baer, F. V. Kowalski and J. L. Hall: "Frequency stabilization of a 0.633- $\mu\text{m}$  He-Ne longitudinal Zeeman laser," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 3173-3177.
  - 12) N. Umeda, M. Tsukiji and H. Takasaki: "Stabilized  $^3\text{He-}^3\text{Ne}$  transverse Zeeman laser," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 442-443.
  - 13) K. Seta and S. Iwasaki: "Frequency stabilization of a He-Ne laser using a thin film heater coated on the laser tube," *Opt. Commun.*, **55** (1985) 367-369.