レーザーオリジナル

内部鏡型He-Neレーザーの自己光ガルバノ効果

佐々木 彰*・中谷真人*・細田 洋*

(1990年8月27日 受理)

Self-Optogalvanic Effect of Internal-Mirror He-Ne Lasers

Akira SASAKI*, Masato NAKAYA* and Hiroshi HOSODA*

(Received August 27, 1990)

A self-optogalvanic effect in the laser positive column of internal-mirror He-Ne lasers is investigated both experimentally and theoretically. The effect of laser power fluctuation on the voltage across a laser discharge tube and its dependence on laser currents (3-7 mA) are observed. A general model based on the steady-state solution of rate equations is developed to interpret the measurements. Good agreement between experimental and calculated results is obtained.

Key Words : Optogalvanic effect, Self-optogalvanic effect, He-Ne laser, Internal-mirror He-Ne laser.

1. はじめに

放電中の原子、分子の光学遷移と共鳴する光を入射すると放電管中の放電電流あるいは放電抵抗が入射光強度の変動に伴い変化する現象が光ガルバノ効果(OG効果)と呼ばれ、He-Neレーザーにおいても観測されている¹⁻⁴⁾。この効果は入射光が放電ガスの定常状態密度あるいはイオン化の程度に影響を与えるために生じると考えられている。また、OG効果は原子・分子の分光および分光分析等にも使用されており、応用範囲は広い⁴⁻⁶⁾。

OG効果はまたCO₂レーザーの周波数安定化及びレーザー出力変動検出等にも使用されている^{7,8)}。これらはCO₂レーザー管の活性レーザー

放電媒体中にレーザー光それ自身によって生じた自己照射効果であり、本報告ではこのような効果を自己光ガルバノ効果(SOG効果)と呼ぶ。外部鏡型He-Neレーザーにおいても、自己照射効果が観測されているが¹⁻³⁾、理論的解析は行なわれていない、また内部鏡型He-Neレーザーにおいてはまだその効果は観測されていない。内部鏡型レーザーにおいては放電管とレーザー反射鏡が一体化しているため、レーザー反射鏡間距離がレーザー管温度上昇とともに熱膨張し、縦モードが移動するためレーザー出力・周波数が変動する^{9,10)}。この変動に伴う内部鏡型He-NeレーザーのSOG効果を測定すると共に、レーザー動作に関係しているHeとNe原子のエネルギー準位及び放電で発生した電子とイオン

*静岡大学工学部(〒432 浜松市城北3-5-1)

*Faculty of Engineering, Shizuoka University (Johoku, Hamamatsu 432)

を考慮したレート方程式を立て、これらの方程式を定常状態で解き、レーザー出力変化と放電インピーダンス変化との関係を理論的に解析するとともに実験結果と比較検討することを目的とする。

2. 実 験

本実験において使用した測定系のブロック図をFig. 1に示す。使用した内部鏡型He-Neレーザー ($\lambda = 633 \text{ nm}$) はUNL-205PS(ウシオ社)であり、縦モード間隔が1260 MHz(レーザー反射鏡間距離11.9 cm)であり、ほぼ単一縦モード状態で発振している。使用したレーザーの放電細管半径(r)は0.475 mm, He分圧(P_{He})は2.37 Torr, Ne分圧(P_{Ne})は0.325 Torrであり、全圧(P)は2.695 Torrである。レーザー発振には自作の高精度定電流電源を使用した。レーザー放電電流は可変でき、電流安定度は $\pm 0.001\%$ 以下であった。定電流電源はバラスト抵抗(50 k Ω)を介してレーザー管に接続した。レーザー放電電圧は自作の絶縁型電圧測定器をもちいて測定し、放電電圧変動は差動増幅器を使用し基準電圧値を減算することで測定した。また、レーザー出力光強度及び変動はシリコンフォトダイオードを電流-電圧変換器に接続し測定した。Fig. 2に使用したレーザーの相対的出力光強度とレーザー放電電流との関係を示す。Fig. 3に

Fig.1 Schematic of the experimental setup of the self-optogalvanic effect. CCP, constant current power supply; Ph, silicon photodiode; VM, isolated amplifier.

Fig.2 Laser output power as a function of laser discharge current. The solid curve represents theoretical results.

Fig.3 Laser discharge voltage as a function of laser discharge current. The solid curve represents theoretical results.

レーザー放電電圧とレーザー放電電流との関係を示す。Fig. 4にレーザー放電電流5 mAの場合のレーザー出力光強度及びレーザー放電電圧変動の時間変化を示す。図においてはレーザー

Fig.4 Experimental results of laser discharge voltage and laser output power as a function of time. The laser discharge current is 5 mA.

点灯10分後からの測定結果を示す。レーザーは主に単一縦モード発振しているため、レーザー出力光強度にラムディプが観測される。それに対応して、レーザー放電電圧変動にもその効果によると考えられるディプが観測される。レーザー放電電圧変動と時間との関係には2成分があると考えられる。すなわち図からわかるように、レーザー出力光強度の長期的わずかな減少にともない放電電圧が時間とともに減少する長期的変動に対応する成分と、レーザー管の熱膨張に伴う縦モード移動のため生じるレーザー出力光変動^{9,10)}に対応する放電電圧変動の成分である。レーザー共振器長がレーザー波長の半波長熱膨張するごとにレーザー出力光強度が周期的に変動するのが後者である。また前者の長期

的変動原因の1つはレーザー鏡の熱的に発生する傾きのため出力が減少したため発生したと考えられ、後者の原因と異なるため、以下の議論においては縦モード移動に伴うレーザー光出力変動及び放電電圧変動を議論する。レーザー放電電圧変動とレーザー出力光変動との関係はレーザー出力が大きくなるほどレーザー放電電圧が大きくなる傾向を示す。このようにレーザー光強度変動と放電電圧変動の間には関連があり、SOG効果が認められたと考えられる。

Fig. 5 に放電電流 5 mA の場合の相対的放電電圧変化 ($\Delta F/F$) と相対的レーザー光強度変動 ($\Delta n_f/n_f$) との比とレーザー点灯後の時間との関係を示す。時間と共に値が一定でなく変化するのは、レーザー管内の温度が時間と共に上昇するためその効果が表れたと考えられる。約20分後には測定値がほぼ一定値となるのはレーザー放電管がほぼ熱的定常状態に達しているためと考えられる。Fig. 6 に相対的放電電圧変化 ($\Delta F/F$) と相対的レーザー光強度変動 ($\Delta n_f/n_f$) との比と放電電流との関係を示す。○印が実験値であり、放電開始約20分後の値で示してある。

Fig.5 $(\Delta F/F)/(\Delta n_f/n_f)$ as a function of time. The laser discharge current is 5 mA.

Fig. 6 $(\Delta F/F)/(\Delta n_i/n_i)$ as a function of laser discharge current. The solid curve represents theoretical results.

3. 理論的解析

内部鏡型He-NeレーザーのSOG効果を理論的に解析するため、Fig. 7に示す簡略化したエネルギー準位の場合について考える。図のようにHeの 2^1S 及びNeの $1s$, $2p_4$, $3s_2$ 準位(Paschen表示以下同じ)についてのみ考える。使用したパラメーターの定義をTable Iに示す。 n_e , n_f および n_i に対するレート方程式は以下で与えられる。

Fig. 7 Simplified energy-level diagram for a He-Ne laser. The main processes of electron impact excitation, radiative decay, and collisional energy transfer are schematically represented.

Table I Definition of parameters

パラメーター	定 義
n_e (cm ⁻³)	電子密度
n_f (cm ⁻³)	光子密度
n_i (cm ⁻³)	i 準位の密度
N_{He} (cm ⁻³)	Heの密度
N_{Ne} (cm ⁻³)	Neの密度
A_{ij} (s ⁻¹)	i 準位から j 準位への自然放出確率
A_i (s ⁻¹)	i 準位から j 準位以外への自然放出確率
D_i (s ⁻¹)	i 準位からの脱励起確率
D_e (s ⁻¹)	拡散係数
F_{0i} (s ⁻¹)	基底状態から i 準位への直接励起確率
I_{ie} (s ⁻¹)	i 準位からのイオン化確率
R_{ij} (s ⁻¹)	i 準位から j 準位へのエネルギー遷移確率
S_{ij} (s ⁻¹)	i 準位から j 準位への段階的励起確率
S_i (s ⁻¹)	i 準位から j 準位以外への段階的励起確率
W_{23} (s ⁻¹)	誘導吸収確率
W_{32} (s ⁻¹)	誘導放出確率
q (s ⁻¹)	光子損失
D_a (cm ² /s)	両極性拡散係数
μ_e (cm ² /(s·V))	電子移動度
D' (V)	$D' = D_a / \mu_e$
r (cm)	放電管内径半径
F (V)	レーザー管放電電圧
L_d (cm)	放電長
E (V/cm)	$E = F / L_d$
v_e (cm/s)	電子速度

$$\frac{dn_e}{dt} = I_{Oe(He)}N_{He} + I_{Oe(Ne)}N_{Ne} + I_{1e}n_1 + I_{2e}n_2 + I_{3e}n_3 + I_{4e}n_4 - D_en_e \quad (1)$$

$$\frac{dn_f}{dt} = W_{32}n_3 - W_{23}n_2 + A_{32}n_3 - qn_3 \quad (2)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = F_{01}N_{Ne} + A_{21}n_2 + (D_1 + I_{1e} + S_1 + S_{12})n_1 \quad (3)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = F_{02}N_{Ne} + S_{12}n_1 + (A_{32} + W_{32})n_3 - (D_2 + A_2 + A_{21} + I_{2e} + W_{23})n_2 \quad (4)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = F_{03}N_{Ne} + W_{23}n_2 + R_{43}n_4 - (D_3 + A_3 + A_{32} + I_{3e} + R_{34} + W_{32})n_3 \quad (5)$$

$$dn_4/dt = F_{04}N_{\text{He}} + R_{34}n_3 - (D_4 + I_{4e} + R_{43})n_4 \quad (6)$$

レート方程式(3) - (6)を定常状態 $dn_i/dt = 0$ と
おいて解くと、 n_i は

$$n_1 = (\alpha_0 + \alpha_2 n_2) / \alpha_1 \quad (7)$$

$$n_2 = N_2 / N_0 \quad (8)$$

$$n_3 = N_3 / N_0 \quad (9)$$

$$n_4 = (\delta_0 + \delta_3 n_3) / \delta_4 \quad (10)$$

となる。ここで

$$\alpha_0 = F_{01}N_{\text{Ne}}, \quad \alpha_1 = D_1 + I_{1e} + S_1 + S_{12},$$

$$\alpha_2 = A_{21}$$

$$\beta_0 = F_{02}N_{\text{Ne}}, \quad \beta_1 = S_{12},$$

$$\beta_2 = D_2 + A_2 + A_{21} + I_{2e} + W_{23},$$

$$\beta_3 = A_{32} + W_{32}$$

$$\gamma_0 = F_{03}N_{\text{Ne}}, \quad \gamma_2 = W_{32},$$

$$\gamma_3 = D_3 + A_3 + A_{32} + I_{3e} + R_{34} + W_{32}, \quad \gamma_4 = R_{43}$$

$$\delta_0 = F_{04}N_{\text{He}}, \quad \delta_3 = R_{34}, \quad \delta_4 = D_4 + I_{4e} + R_{43}$$

および

$$N_2 = (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) (\gamma_3 \delta_4 - \gamma_4 \delta_3)$$

$$+ \alpha_1 \beta_3 (\gamma_0 \delta_4 + \gamma_0 \delta_4)$$

$$N_3 = (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) \gamma_2 \delta_4$$

$$+ (\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1) (\gamma_0 \delta_4 + \gamma_4 \delta_0)$$

$$N_0 = (\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1) (\gamma_3 \delta_4 - \gamma_4 \delta_3)$$

$$- \alpha_1 \beta_3 \gamma_2 \delta_4$$

である。

定常状態において n_i は(2)式より

$$n_i = (W_{32}n_3 - W_{23}n_2) / q \quad (11)$$

と表される。

電子密度 n_e に関するレート方程式を定常状態
で解き、拡散係数について変形し、 $i_{ie} = I_{ie}$
 $/n_e$ と置くと

$$D_e = i_{0e}(\text{He})N_{\text{He}} + i_{0e}(\text{Ne})N_{\text{Ne}} + i_{1e}n_1 + i_{2e}n_2 \\ + i_{3e}n_3 + i_{4e}n_4 \quad (12)$$

となる。また D_e は

$$D_e = D' \{ (2.4/r)^2 + (\pi/L_d^2) v_e / E$$

と表される⁸⁾。またこの式よりレーザー管の放
電電圧 F を求めると

$$F = L_d D' \{ (2.4/r)^2 + (\pi/L_d^2) v_e / D_e \} \quad (13)$$

となる。

レーザー管の放電電気抵抗 R は放電電流を I
とすると、 $R = F / I = L_d E / I$ であり、定常状態
からの変化 Δ について考えると

$$\Delta R / R = \Delta F / F - \Delta I / I = \Delta E / E - \Delta I / I \quad (14)$$

であるが、レーザー電源に定電流電源を用いて
いるため $\Delta I = 0$ となり、(14)式は $\Delta R / R = \Delta F$
 $/F = \Delta E / E$ となり、(13)そして(12)式より Δ
 E / E は

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta D'}{D'} + \frac{\Delta v_e}{v_e} \\ - \sum_{i=1}^4 \left\{ \frac{i_{ie} n_i}{D_e} \left(\frac{\Delta i_{ie}}{i_{ie}} + \frac{\Delta n_i}{n_i} \right) \right\} \quad (15)$$

と表される。 $\Delta D' / D'$ 及び $\Delta I_{ie} / I_{ie}$ は $\Delta v_e / v_e$
と同じオーダーであると考えられるので、(15)
式は

$$\frac{\Delta E}{E} = - \sum_{i=1}^4 \left\{ \frac{i_{ie} n_i}{D_e} \cdot \frac{\Delta n_i}{n_i} \right\} \quad (16)$$

と近似できる。(7) - (10)式と(16)式より

$$\left(\frac{\Delta F}{F} \right) / \left(\frac{\Delta n_i}{n_i} \right) = \\ - \left\{ \frac{i_{1e} n_1}{D_e} \cdot \frac{\alpha_2 n_2}{\alpha_0 + \alpha_2 n_2} \cdot \left(\frac{M_2}{N_2} - \frac{M_0}{N_0} \right) \right. \\ + \frac{i_{2e} n_2}{D_e} \cdot \left(\frac{M_2}{N_2} - \frac{M_0}{N_0} \right) \\ + \frac{i_{3e} n_3}{D_e} \cdot \left(\frac{M_3}{N_3} - \frac{M_0}{N_0} \right) \\ \left. + \frac{i_{4e} n_4}{D_e} \cdot \frac{\delta_3 n_3}{\delta_0 + \delta_3 n_3} \cdot \left(\frac{M_3}{N_3} - \frac{M_0}{N_0} \right) \right\} \quad (17)$$

となる。レーザー出力光強度は n_i に比例する
と考えられるため、レーザー光強度変化と放電

電圧変化との関係が導かれたことになる。ここで

$$M_2 = W_{32} \{ (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) \delta_4 + \alpha_1 (\gamma_0 \delta_4 + \gamma_4 \delta_0) \} \quad (18)$$

$$M_3 = W_{23} \{ (\alpha_0 \beta_1 + \alpha_1 \beta_0) \delta_4 + \alpha_1 (\gamma_0 \delta_4 + \gamma_4 \delta_0) \} \quad (19)$$

$$M_0 = W_{23} \alpha_1 (\gamma_3 \delta_4 - \gamma_4 \delta_3 - \beta_3 \delta_4) + W_{32} \delta_4 (\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 - \alpha_1 \gamma_2) \quad (20)$$

である。

Fig. 2 に○印でレーザー出力光強度と放電電流との実験結果を示したが、図において実線が(11), (8), (9)式およびTable IIのパラメーターから計算した理論値であり、実験結果とはほぼ一致する。Fig. 3 に○印でレーザー放電電圧と放

電電流との実験結果を示したが、図において実線が(13)式より計算した理論値であり、実験結果とはほぼ一致する。Fig. 6 に $(\Delta F/F)/(\Delta n_f/n_f)$ と放電電流の関係の実験結果を○印で示したが、この関係の理論値を(17)式より計算する。計算に使用したパラメーターをTable IIに示す。表において $n_e v_e$ の値は参考文献¹²⁾にしたがって計算した。 n_e はレーザー放電電流 I に比例する¹²⁾、また表に示したように他のパラメーターも I に関係するものもあり、 $(\Delta F/F)/(\Delta n_f/n_f)$ と I の関係を簡単な理論式で示すのは難しい。また、この表において $v_{\text{He-Ne}}$ は He と Ne の相対速度である。Fig. 6 に実線で示したのが理論値であり、理論値は実験結果とはほぼ一致している。また、理論計算における $(\Delta F/F)/(\Delta n_f/n_f)$ の負号は正であり、実験結果の負号と一致している。

Table II Values of rate coefficients

Coefficients	Value	Ref.
$A_{21}(\text{s}^{-1})$	5.24×10^7	11
$A_{32}(\text{s}^{-1})$	1.3×10^7	11
$D_1(\text{s}^{-1})$	$7.6 \times 10^5 / (Pr^2) + 5.9 \times 10^3 P$	11
$D_2 + A_2(\text{s}^{-1})$	$1.64 \times 10^7 [1 + 0.4P + 0.07I (rP)^{1/4}/r^2]$	12, 13
$D_3 + A_3(\text{s}^{-1})$	$1.41 \times 10^7 [1 + 0.4P + 0.22I (rP)^{1/4}/r^2]$	12, 13
$D_4(\text{s}^{-1})$	$440 [(2.4/r)^2 + (\pi/L)^2] / P_{\text{He}}$	11
$F_{01}(\text{s}^{-1})$	$3.0 \times 10^{-18} n_e v_e$	12
$F_{02}(\text{s}^{-1})$	$3.2 \times 10^{-19} n_e v_e$	12
$F_{03}(\text{s}^{-1})$	$5.0 \times 10^{-19} n_e v_e$	12
$F_{04}(\text{s}^{-1})$	$3.3 \times 10^{-19} n_e v_e$	12
$I_{1e}(\text{s}^{-1})$	$2.1 \times 10^{-15} n_e v_e$	11
$I_{2e}(\text{s}^{-1})$	$1.0 \times 10^{-15} n_e v_e$	
$I_{3e}(\text{s}^{-1})$	$3.0 \times 10^{-15} n_e v_e$	
$I_{4e}(\text{s}^{-1})$	$2.6 \times 10^{-15} n_e v_e$	
$R_{34}(\text{s}^{-1})$	$2.53 \times 10^{-10} N_{\text{He}}$	11
$R_{43}(\text{s}^{-1})$	$11.5 \times 10^{-16} \exp(-E_a/kT) N_{\text{He}} v_{\text{He-Ne}}$ ($E_a = 0.034 \text{ eV}$)	15
$S_1(\text{s}^{-1})$	$1.21 \times 10^{-14} n_e v_e$	14
$S_{12}(\text{s}^{-1})$	$2.1 \times 10^{-15} n_e v_e$	14
$D'(\text{V})$	$kT_e/e = 1.1605 \times 10^4 (10.3 - 0.075I) k/e$	15

4. まとめ

定電流電源で駆動した内部鏡型He-Neレーザーの出力光変動に伴うレーザー放電電圧変動が測定された。これには2成分あり、レーザー鏡の熱的傾きに伴う成分と、縦モード移動に伴うレーザー出力変動による成分である。後者は内部鏡型He-Neレーザーの活性レーザー放電媒体中にレーザー光それ自身によって生じる自己照射効果すなわち自己ガルバノ効果であると考えられる。また、相対的レーザー光強度変化と相対的放電電圧変化の関係をレート方程式により解析的に求め、この結果から計算した値を実験結果と比較し、両者の間に良い一致を得た。

放電電圧変動の時間的变化における形状とレーザー光強度変動の時間的变化における形状の間に相関関係があることがわかったため、これらの実験結果を応用するとCO₂レーザーで行なわれているレーザー安定化法と同じように、単一モード発振内部鏡型He-Neレーザーの自己ガルバノ効果のラムディプの位置に対応する位置を利用した安定化法が可能であると考えられる。

最後に本研究にあたり種々ご協力いただいた深谷次助氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) G. Schiffner and F. Seifert : Proc. IEEE 53 (1965) 1965.
- 2) A. Garscadden and S. L. Adams : Proc. IEEE 54 (1966) 427.
- 3) D. Apostol, C. Blănuș, A. Ionescu, Gh. Popescu, I. Iovit Popescu and V. Vasiliu : Rev. Roum. Phys. 27 (1982) 581.
- 4) 鈴木：分光研究 32 (1983) 367.
- 5) 関根, 和田, 廣瀬：レーザー研究 17 (1989) 558.
- 6) B. Barbieri and N. Beverini : Rev. Mod. Phys. 62 (1990) 603.
- 7) M. L. Skolnick : IEEE J. Quantum Electron. QE-26 (1970) 139.
- 8) A. L. Scholtz and G. Schiffner : Appl. Phys. 4 (1980) 407.
- 9) 佐々木, 石川：レーザー研究 11 (1983) 754.
- 10) 佐々木, 石切山, 堀田：レーザー研究 17 (1989) 58.
- 11) B. E. Cherrington : *Gaseous Electronics and Gas Laser* (Pergamon Press, 1979) p.180.
- 12) T. Sakurai : Jpn. J. Appl. Phys. 11 (1972) 1826.
- 13) J. T. Verdeyen : *Laser Electronics* (Prentice Hall, 1982) p.268.
- 14) I. M. Beterov and V. P. Chebotaev : Opt. Spectrosc. 22 (1967) 467.
- 15) C. S. Willett : *Introduction to Gas Lasers : Population Inversion Mechanisms* (Pergamon Press, 1974) p.38.