

He-Ne 気体レーザーの変調と雑音

Modulation and Noise of a He-Ne Gas Laser

上原 信吾*・藤井 陽一*

Shingo UEHARA and Yoichi FUJII

1. はじめに

現在までに報告されているところでは、レーザー光雑音の主要なものとしては、放電電流雑音による変調雑音¹⁾(放電電流変調雑音)および、発振モードの相互作用によって生ずる雑音²⁾(モード相互作用雑音)が挙げられる。

本報告は、多重モード動作状態のレーザー光雑音について、放電電流変調雑音を中心に研究した結果よりなる。

2. 直接変調の理論と実験

放電電流の変動がレーザー光強度の変動となって生じる変換過程について考察し、放電電流変調雑音の発生過程を明確にする。

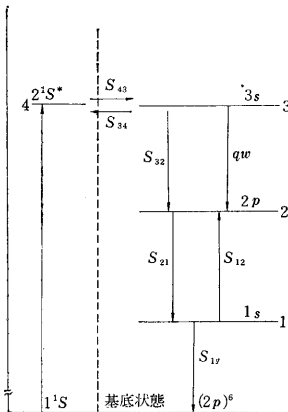


図1 He-Ne 気体レーザー (λ=6328 Å) エネルギー単位

まず、上記の過程を理論的に解析する。図1のエネルギー単位図をもとにレーザー動作の Rate equation を求めると次のようになる。

$$dn_4/dt = p + S_{34}n_3 - S_{43}n_4 \quad (1)$$

$$dn_3/dt = S_{43}n_4 = qw(n_3 - n_2) - (S_{34} + S_{32})n_3 \quad (2)$$

$$dn_2/dt = qw(n_3 - n_2) + S_{32}n_3 + S_{12}n_1 - S_{21}n_2 \quad (3)$$

$$dn_1/dt = S_{12} + S_{17}n_1 \quad (4)$$

$$dw/dt = qw(n_3 - n_2) - rw \quad (5)$$

ここで、 S_{ij} は単位 i から単位 j への遷移周波数、 n_i は単位 i の population、 w はモード当りの光子密度、 q は誘導放出係数、 r は共振器の半値幅である。 p および S_{12} はそれぞれ励起密度、第2種衝突による

飽和項であり、自由電子密度に比例する。

微小信号の近似により光子密度の交流分 \tilde{w} と放電電流密度の交流分 \tilde{i} との関係の求めると

$$\tilde{w} = \frac{P_0}{S_{21}(j\omega + r)(j\omega + S_e)} \left[\frac{S_{21} - S_{32}}{S_{17}} \frac{j\omega + \frac{S_{21}S_{17} - S_{32}S_{17}(a(i_0) + 1)}{S_{21} - S_{32}}}{1 + j\omega \frac{S_{17} + S_{43}}{S_{17}S_{43}} - \omega^2/S_{17}S_{43}} - S_{32}a(i_0) \right] \tilde{i} \quad (6)$$

となる。ここで、 P_0 は励起密度と \tilde{i} との比例定数、 S_e はイオン化周波数、 $a(i_0)$ は Rate equation の直流解とレーザー光出力の飽和特性測定値より求められる飽和パラメータである。

式(6)により放電電流の変化分とレーザー光強度の変動分との関係が明確になる。この結果を実験的に確かめるために放電管に印加する電圧を交流的に微小変化させ、レーザー光を変調するいわゆる直接変調の実験を行なった。この実験では放電電流の交流分とレーザー光の被変調

実線は理論値 ($S_{17}/2\pi = 20$ kHz, $S_{43}/2\pi = 200$ kHz) 破線は測定値 図中の数字は対応する周波数 (kHz) をあらわす。

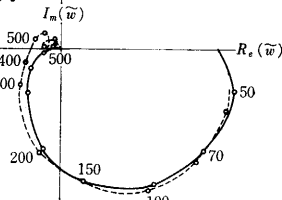


図2 $R_e(\tilde{w}) - I_m(\tilde{w})$ 線図 (放電電流 10 mA)

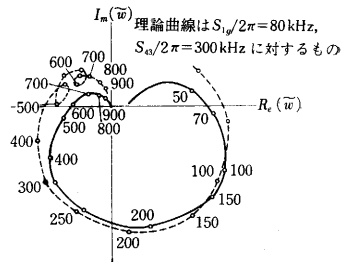


図3 $R_e(\tilde{w}) - I_m(\tilde{w})$ 線図 (放電電流 20 mA)

交流分の振幅および位相の相互関係を求めた。

図2, 3に直接変調の実験結果および式(6)より求められる $R_e(\tilde{w}) - I_m(\tilde{w})$ 線図を示す。実験値と理論値とは比較的良く一致している。放電電流 20 mA の場合には 100 kHz 付近にピークを有する顕著な共振特性が測定されたが、これは Rate equ-

* 東京大学生産技術研究所 第3部

ation に飽和項を組み込むことによって理論的に表現することができた。また、実験曲線で 500~600 kHz 近辺で共振特性が測定されているが、これは放電電流の不安定性である移動縞によるものである。理論曲線と実験曲線の一致により、今まで明確でなかったパラメータの値 ($S_{1\theta}$, S_{43}) が推定される。

3. レーザ光雑音の測定

雑音測定は日電製 He-Ne 気体レーザー GLT-719 に対して行ない、光検出には東芝製光電子増倍管 PM-55 を用いた。また、光電流の雑音分は岩崎通信機製直流増幅器 DA1 および HP 製同調検出器 TND-4403 A により検出した。励起は直流電流により行なった。光共振器は曲率半径 1m, 反射率 100% および曲率半径 1m, 反射率 99.8% の反射鏡を 1.05m の間隔に配置して構成した。レーザーおよび光学系は飛行機用チューブと insulating board により防震を施した。

図 4, 5 に雑音測定結果を示す。縦軸は、レーザー光雑音の等価変調度であり、 $m_n = \bar{i}_n^2 / \left(\frac{1}{2} i_0^2 B \right)$ (ただし、 \bar{i}_n^2 は光電流雑音の二乗平均値、 i_0 は直流光電流、 B は検出系の帯域幅をあらわす) により定義される。

レーザーにモード同期をかけることにより雑音が 20~程度減少するが、これはモード相互作用雑音が減少することによる。すなわち、多重モード動作のレーザーにおいて

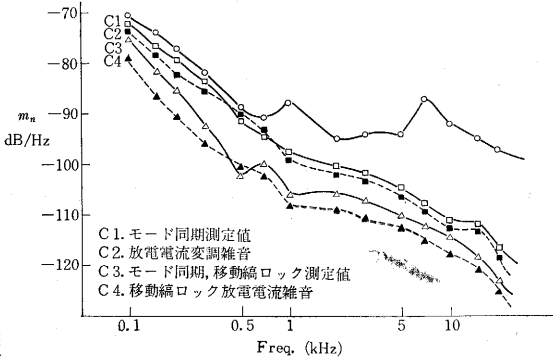


図 4 レーザ光雑音 (放電電流 10mA)

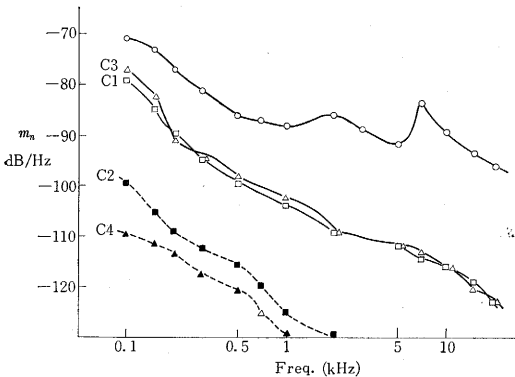


図 5 レーザ光雑音 (放電電流 20mA)

はモード相互作用雑音がきわめて大きいことがわかる。

つぎに、モード同期状態の残留レーザー光雑音について述べる。放電電流の雑音測定結果および直接変調の実験結果より推定される放電電流変調雑音を図中の曲線 C2 に示してある。レーザー出力の飽和していない、放電電流 10mA の場合にはこの曲線は残留レーザー光雑音とはほぼ一致している。したがって、残留雑音では放電電流変調雑音が支配的であるといえる。

一方、移動縞を外部から注入した信号(直接変調信号)によりロックすると低周波放電電流雑音が 10 dB 程度減少する事実が明らかとなった。この事実より、残留雑音において放電電流変調雑音が支配的ならば、移動縞をロックすることにより残留レーザー光雑音が減少するはずである。レーザー光モード同期、移動縞ロックの状態における雑音測定値を図中 C3 で、またこの状態で推定される放電電流変調雑音を C4 で示す。図 4 よりわかるように C3 と C4 とはほぼ一致しており、残留レーザー光雑音において放電電流変調雑音が支配的であることを示している。放電電流が 20 mA の場合には、レーザー出力の飽和のため放電電流変動からレーザー光変動への変換効率がきわめて小さくなるため、放電電流変調雑音は実測された残留レーザー光雑音より小さくなる。この場合の残留レーザー光雑音は横モードによる相互作用雑音および光学系の振動による雑音であろう。

4. おわりに

本研究の結果をまとめると次のようになる。

放電電流の変動がレーザー光の変動として現われる過程を理論的に記述し実験結果と良い一致をみた。なお、この結果から、今まで明らかでなかったレーザー動作のパラメータ ($S_{1\theta}$, S_{43}) の値が求まる。

放電電流の移動縞をロックすることにより、放電電流雑音が減少することを明らかにした。これは、レーザーの放電電流変調雑音を減少させるのに有効な方法である。

縦、横多重モード動作状態のレーザー光雑音の構成を明確にし、特にモード同期非飽和状態のレーザー光雑音において放電電流変調雑音が支配的であることを示した。

なお、本研究の詳しい内容は、他の機会に発表する予定である。

最後に、御指導、御教示下さった斎藤教授、浜崎教授に感謝いたします。また、いろいろお世話になった斎藤研、浜崎研をはじめとする本研究所第 3 部の方々に感謝いたします。

(1969年4月22日受理)

参考文献

- 1) L. J. Prescott et al, IEEE J. Quantum Electronics, QE-2, p. 173, July, 1966.
- 2) T. Uchida, IEEE J. Quantum Electronics, QE-3, p. 7, Jan., 1967.