

解 説

半導体レーザーの電気的使用法

古瀬 孝雄

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1983年12月2日受理)

Electrical Treatment of Laser Diode

Takao FURUSE

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 213

1. はじめに

半導体レーザーの光を変調するには、半導体レーザーに流す電流を変調するだけでよい。これは直接変調といわれ、反転分布密度を含むレーザー本体そのものに変動を与え、レーザー光を変調する方法である。ガスレーザー等他のレーザーにおいても直接変調は不可能ではないが、わずか数 mA から数十 mA の注入電流変調、および数 GHz にもわたる高速応答特性を有する半導体レーザーの直接変調特性に対抗できるものはほかにない。ここでは、半導体レーザーの電気的使用法と題してその変調特性と駆動回路等について解説する。

2. 小信号変調特性

半導体レーザーの直接変調特性は次に示すレート方程式を解くことにより求められる¹⁾。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_s} - G \cdot S \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = G \cdot S - \frac{S}{\tau_p} + C \frac{n}{\tau_s} \quad (2)$$

ここで、 J は注入電流密度、 e は電子電荷の大きさ、 d は活性層厚、 n はキャリア密度、 τ_s はキャリアの寿命時間、 S は光子密度、 G は利得、 τ_p は光子の寿命時間、 C は自然放出光係数である。光子の寿命時間 τ_p は共振器内の光減衰係数 α と放射損失 $(1/L) \ln(1/R)$ を用いて次式で与えられる。

$$\tau_p = (\eta/c) \{ \alpha + (1/L) \ln(1/R) \}^{-1} \quad (3)$$

ここで、 η は媒質の屈折率、 c は光速、 L は共振器長、

R は端面反射率である。半導体レーザーは $\eta \approx 3.5$ 、 $\{ \}$ 内は 40 cm^{-1} 程度であるから τ_p は通常数 ps の値となる。一方、キャリア寿命時間 τ_s は AlGaAs, InGaAsP 半導体レーザーとも $2 \sim 3 \text{ ns}$ である。他のレーザーと比較すると、固体レーザーでは τ_p, τ_s はそれぞれ数 ns、数百 μs 、またガスレーザーでは数十 μs 、数十 ns となっており、 τ_s が数 ns でかつ $\tau_s \gg \tau_p$ なる関係は半導体レーザーの高速応答を可能にする大きな特徴となっている。

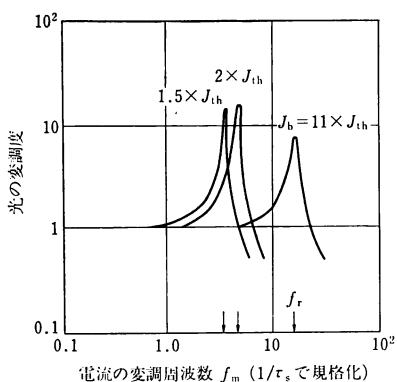
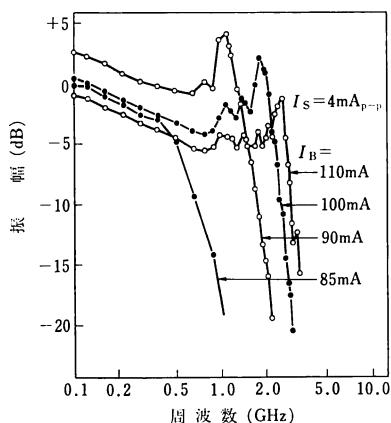
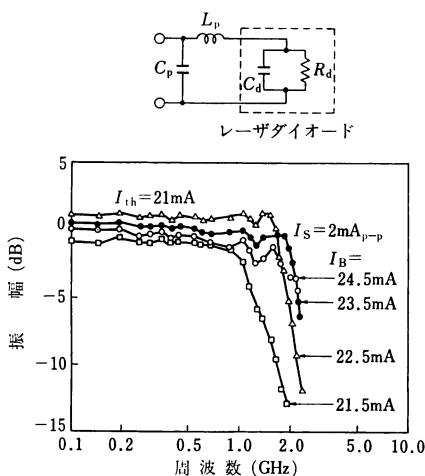
利得 G をキャリア密度に比例するという仮定はよい近似であり、これを用いて微小信号解析を行なうと正弦波状の変調電流に対する光出力特性には次のような特徴があることが理解される。

(1) ある周波数 f_r で光出力の変調度が極大となり、変調周波数が f_r より高くなるとその変調度は急激に減少する。

(2) 共振状周波数 f_r はバイアス電流 J_b に対し近似的に、次式で与えられる。

$$f_r = \frac{1}{\tau_s \tau_p} \sqrt{\frac{J_b}{J_{th}} - 1} \quad (4)$$

ここで J_{th} は閾値電流を示す。これらの解析は簡単のため単一モードを仮定し、かつ自然放出光を無視しているが、 f_r の絶対値を除くと実験的にもよく合うことが示され、 f_r は共振周波数と呼ばれる。図 1 には、小信号変調特性解析例を示す。実際の半導体レーザーにおいては、自然放出光の寄与、キャリアの横方向拡散効果および使用する光検出器の帯域制限等により高周波領域の共振ピークは低減される傾向にある。図 2 および図 3 は変

図 1 小信号変調特性¹⁾ (f_r は共振周波数を示す)図 2 小信号変調実例²⁾図 3 小信号変調実測例³⁾

調特性の実例^{2,3)}であり、共振ピークが明らかな例と抑制されている例を示す。図 3においては変調周波数の上限は~2 GHz であるが、リード線を含めたレーザーのインピーダンスが2 GHz 以上において高くなり 50Ω 系

の駆動回路を用いた場合、十分な変調電流が得られないことによると考えられる。図示した等価回路で、 C_d 、 R_d はダイオード容量、および抵抗、 L_p 、 C_p はパッケージのインダクタンスおよび容量であり $C_d \sim 8 \text{ pF}$ 、 $R_d \sim 10 \Omega$ 、 $L_p \sim 1.6 \text{ mH}$ 、 $C_p \sim 0.5 \text{ pF}$ の値が報告されている³⁾。

3. 発振遅れ時間と緩和振動

ステップ状の駆動電流に対する光出力特性等大信号解析も(1)、(2)式に基づいて行なわれ、(1) f_r は小信号時に比較し多少小さくなる、(2)変調周波数 f_m が $f_m < f_r$ の場合には半導体レーザー特有の固有振動 f_r の波が重なった光出力波形となる、(3) $f_m \approx f_r$ のとき光出力は鋭い光パルス波形となる等の特徴が示される。この現象は LC 回路の共振に類似しているが印加電流に依存する非線形現象でありレーザー共振器内で発生する固有の振動と理解するのが適当である。とくにパルス状に電流を加えて変調する方式(光通信において一般的に用いられる変調方式)においては光出力波形には鋭いスパイク状の減衰緩和振動が観察される。その様子について詳細に観察してみる。図 4 にステップ状印加電流に対するキャリア密度の上昇、光子密度の変動の様子を示す。閾値電流密度に達するまでには、(1)式において、 $G \cdot S$ は小さいから無視でき、キャリア密度 n は CR 時定数をもつ回路と同様に指数関数で表わされる形で定常値 n_∞ に向かって増大する。キャリア密度がレーザー

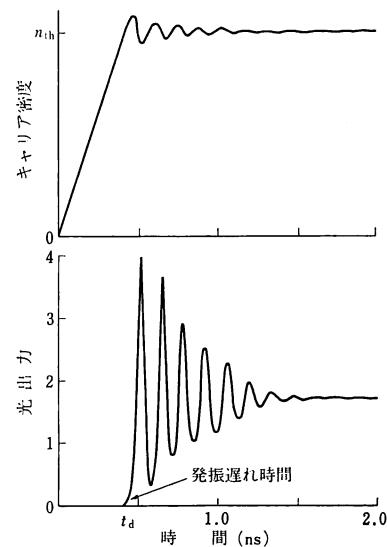


図 4 ステップ状印加電流に対するキャリア密度(上段)と光出力(下段)応答波形

発振に必要な値 n_{th} ($\approx \tau_s \cdot J_{th}/ed$) に達したときレーザー発振が開始される。このレーザー発振が始まるまでの遅れ時間 (t_d) は(1)式を用いれば次式で与えられる。

$$t_d = \tau_s \cdot \ln \left(\frac{J_p}{J_p - J_{th} + J_b} \right) \quad (J_b \leq J_{th}) \quad (5)$$

ここで J_p はステップ状電流値, J_b はバイアス電流値である。このような発振遅れ時間があるため、光出力パルス幅はレーザーを駆動する電流パルス幅よりも本質的にせまいものになる。したがって高速変調時には J_b を大きくして遅れ時間 t_d を小さくすることが必要になる。(1)式において、光子密度 S が自然放出光 (n/τ_s) と同程度に増加するまではキャリア密度 n は増加し続ける。レーザー強度が大きくなるとキャリア密度は急激に減少し始めるが、発振閾値 n_{th} に減少するまでは光子に対する增幅作用があるからレーザー光強度は増加し続ける。このように閾値以上のキャリア密度で増幅されたためレーザー光強度は定常値をはるかに越えてしまう。このためキャリア密度を閾値以下になると消費してしまい、結果として光子密度 S も定常値以下に減少する。以下これをくり返していく、わずかに残るキャリア密度と光子密度のためにオーバーシュートとアンダーシュートの度合いは弱まりしだいにそれぞれの定常値に近づいていく。過渡現象として現われるこの光子密度のスパイク状の減衰緩和振動は、キャリア寿命時間 τ_s と光子寿命時間 τ_p の比 ($\sim 10^3$) が大きいことに起因しており緩和振動数と減衰定数の逆数は主として最終電流値 (バイアス電流 + パルス電流) で定まり、振動の大きさはパルス電流値に依存し、振動周波数は近似的に(4)式で与えられる。緩和振動でオーバーシュートするレーザー光強度の時間幅は数十 ps のオーダーであるが、図5に示す実測例⁴⁾に

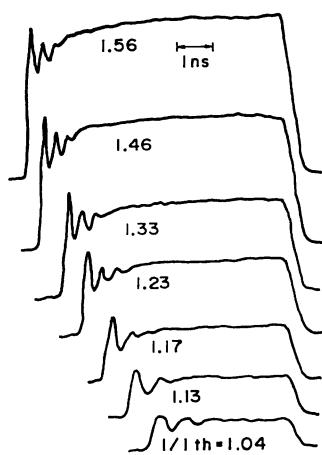
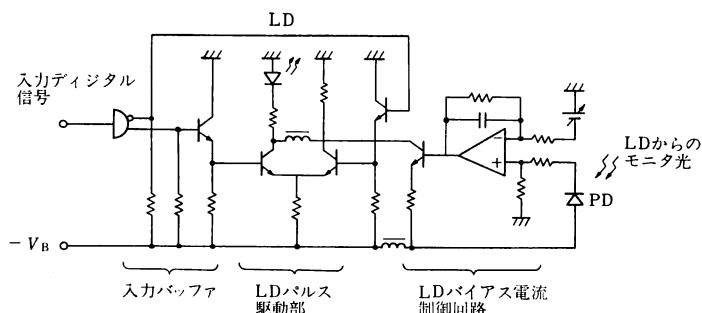
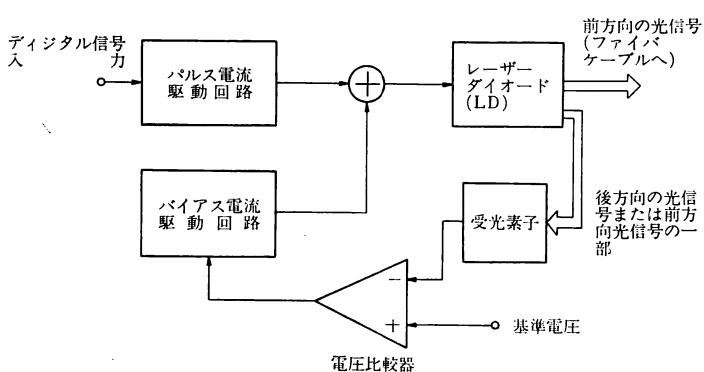
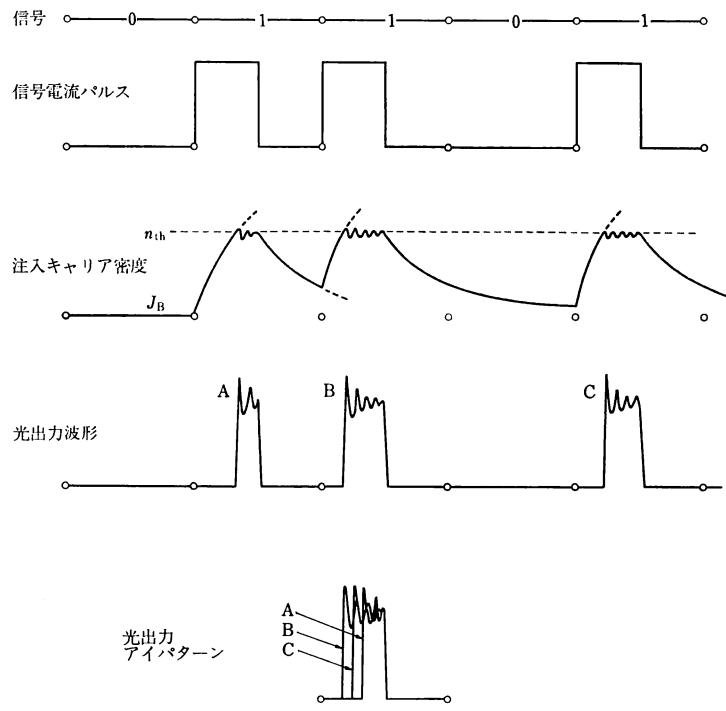


図 5 パルス応答光出力波形

おいて ~100 ps ほどに観察されるのは受光素子の応答特性に制限されているためである。

4. パターン効果

前節で述べた発振遅れ時間と緩和振動効果が原因となってディジタル変調時の阻害要因となるパターン効果が発生する。図6にはパターン効果が生ずる例が示されている。前の信号電流パルスによって注入されたキャリアが発振領域の活性層に残っている間に次の信号電流パルスがきた場合、残留キャリア分だけ余分にバイアス電流を加えていることに相当する。このため発振遅れ時間は短くなる。これに対し前の信号で“0(無信号)”が続く場合は注入電流は定常バイアスレベルにあり、発振遅れ時間はこのときいちばん長くなる。図6に示す光出力アイパターは、不規則な3個の信号電流パルスに対する光出力応答波形を信号電流パルスのスタート時刻を一致して重ねたものであり、光パルス波形立上り時刻の異なる状態のパターン効果が理解される。したがって信号電流パルス幅がキャリアの寿命時間 τ_s より十分に長ければパターン効果は無視できる状態になる。 τ_s の値は通常 2~3 ns 程度であるから 100 Mbit/s 以下の伝送速度であればパターン効果の影響は非常に少ない。逆に、高速変調時には光パルス立上り部分のジッターのみならず波形の高さまで不規則になるパターン効果が現れるようになる。これは、緩和振動が減衰しないうちに電流パルスが off になるような狭いパルス(パルス幅、パルス間隔 ≤ 1 ns)の場合に顕著になる。これは緩和振動中にあらため、キャリア密度と光子密度とが定常値に対しどの状態にあったかによって次のパルス信号が入ってくるときに残存するキャリア密度が大きく変わるものである。当然立上り時間差、ジッターにも依存する。このパターン効果を抑えるためには、遅れ時間 t_d を小さくすることが重要であり、このためには(5)式よりキャリア寿命を短くすること、バイアス電流を発振閾値に近づけること、駆動パルス電流値を大きくすること、パルス信号終了時に逆方向バイアスを与えて、活性層内に残存しているキャリアを積極的にはき出す方法等が有効である。図7には光出力安定化回路を含んだ駆動回路の構成図と駆動回路例⁵⁾を示す。半導体レーザーの光出力の一部をモニターし、基準値と比較して半導体レーザーのバイアス電流あるいは駆動パルス電流を制御し常に光出力が一定になるように帰還をかけて使用するのが普通である。ここで、変調信号速度が速い場合にはバイアス電流を、遅い場合にはパルス電流振幅を制御する方法が一般

図 7 駆動回路構成図および駆動回路例⁵⁾

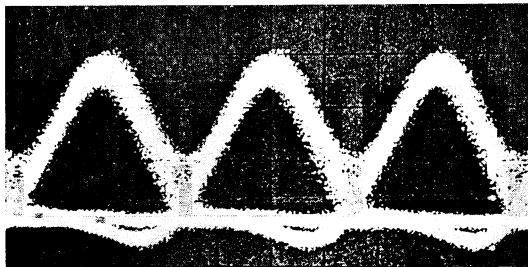


図 8 1.8 Gbit/s 光出力アイパター⁶⁾
(0.2 ns/div)

的に用いられている。以上のような方策により変調速度400~800 Mbit/s はほぼ実用化の段階になっている。図8には1.3 μm 帯 DC-PBH レーザーによる1.8 Gbit/s 変調時の受光アイパター⁶⁾を示す⁶⁾が、1~2 Gbit/s の超高速変調も可能になってきている。

5. アナログ変調特性

アナログ変調においては変調周波数が緩和振動の周波数に一致すると図1に示したように変調度は異常に大きくなる。したがって変調歪は一般に変調周波数が共振周波数 f_r に近づくほど大きくなる。自然放出光の寄与およびキャリアの横方向拡散効果を制御した半導体レーザーにおいては、図1に示したように共振ピークが抑制された変調周波数特性が得られ、このような半導体レーザーを用いると、数 MHz~数百 MHz の周波数領域において、2次高調波歪(D2)、3次高調波歪(D3)は近似的に次式のように示される⁴⁾。

$$2\text{ 次高調波歪 (D2)} \propto 20 \log \left(\frac{I_m \cdot I_{th}}{(I_b - I_{th})^2} \right) \quad (6)$$

$$3\text{ 次高調波歪 (D3)} \propto 20 \log \left(\frac{I_m^2 \cdot I_{th}}{(I_b - I_{th})^3} \right) \quad (7)$$

ここで I_m は変調電流振幅である。

図9には、変調周波数 100 MHz における2次高調波歪(D2: 200 MHz), 3次高調波歪(D3: 300 MHz)の実験例⁴⁾を示す。変調周波数 100 MHz, 変調度 20%, 平均光出力 4 mW 動作において D2 ≤ -55 dB, D3 ≤ -75 dB ほどの直線性のよい特性が確認されている⁴⁾。

6. 発振スペクトルの過渡特性

半導体レーザーの発振スペクトルは CW 動作状態においては発振閾値近傍では多軸モード発振、数 mW 以上の光出力状態では単一軸モード状態の発振が得られる。しかし、パルス電流を印加する変調状態においては発振軸モード数は増加する。図10にはステップ状電流

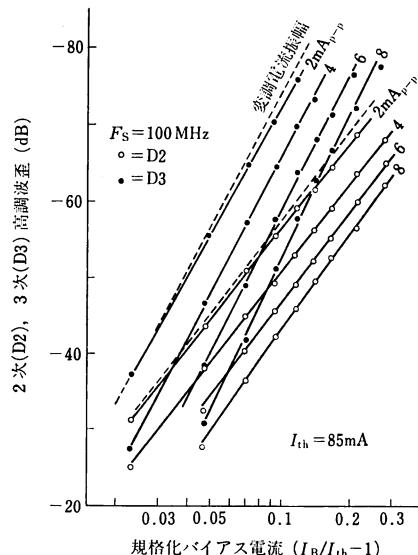


図 9 高調波歪実測例⁴⁾

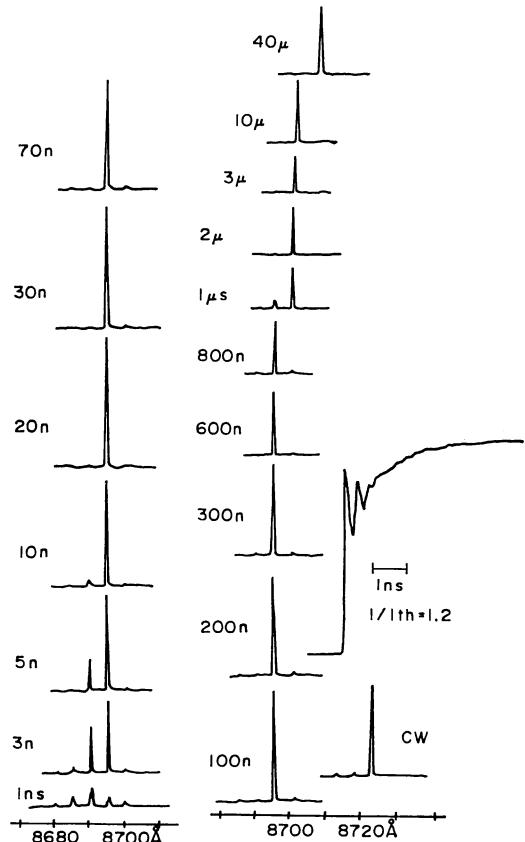


図 10 ステップ状電流に対する時間分解発振スペクトル

に対する光パルス立上り部の波形とパルス立上り時刻以後の時間分解スペクトルの実測例¹⁴⁾を示す。過渡状態でのキャリア密度変化により立上り部では多軸モード発振しその軸モード包絡線は定常状態に比較し短波長側にずれる。時間経過とともに単一軸モード状態に移行するが活性層の発熱温度上昇による利得ピークのずれに対応して長波長側に変化する。このパルス立上り近傍における発振軸モード数の包絡線半価幅 $\Delta\lambda(t)$ は

$$\Delta\lambda(t) \approx \Delta\lambda(0)\sqrt{1+t\sqrt{(J_p+J_b)/J_{th}-1/4V\tau_{sp}}} \quad (8)$$

で与えられる¹⁷⁾。スペクトルが定常値に達するには数 ns の時間を要するため、数百 Mbit/s 以上の高速変調時には軸モード本数の増加は避けられない。緩和振動時の軸モード 1 本のスペクトル幅は CW 動作時に比較し大きく観測される。これはチャーピングとよばれ、過渡的にキャリア密度が変化すれば、Krämer-Krönig の関係から屈折率 n が変化しレーザー波長が変化することによる。屈折率変化 Δn とキャリア密度変化 Δn の比は約 -10^{-20} cm^3 でありチャープ量は $\sim 1 \text{ Å}$ 程度の値となる。

7. サージ保護回路

AlGaAs レーザーの駆動電流を増加し光出力を増大していくと図 11 に示すようにある所で瞬時に光出力の低下を起こす⁸⁾。このとき半導体レーザーの光出射面を観察すると図に示すように結晶の破壊領域が見られる。これが catastrophic optical mirror damage (略して COD, 光学損傷) である。この現象は高い光出力密度によってレーザー出射面上の発振領域が発熱し、さらに吸収係数が増大してレーザー光をより吸収し、温度が増加するという熱暴走が生じて局部的に結晶が融点にまで達すると考えられている。すなわち、出射端面では表面再結合のためキャリアは少なくフェルミ準位が下が

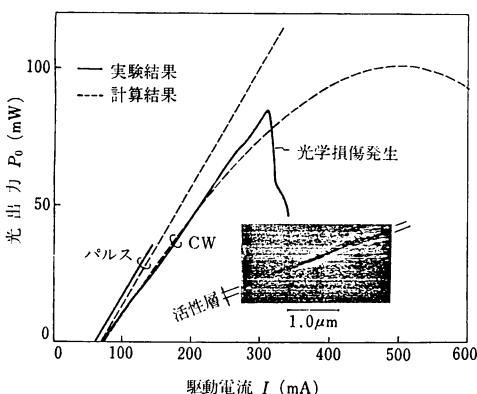


図 11 光学損傷発生時の電流-光出力特性⁸⁾

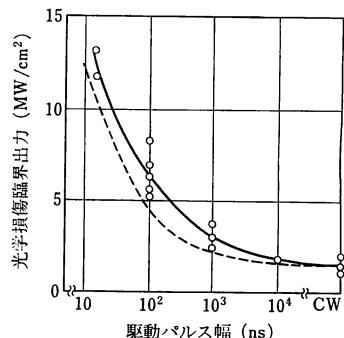


図 12 COD レベルとパルス幅特性⁹⁾

り、光は吸収される状態にありこのため発熱し、表面付近の禁制帯幅をさらに減少させ光吸収を増大させるというフィードバックにより結晶が溶解するものである。反射面の熱暴走はレーザー光の出力密度が 10^6 W/cm^2 のオーダーに達して生じることが実験的にも理論的にも明らかにされている。図 12 に光学損傷臨界出力の印加パルス幅依存性を示す⁹⁾。熱暴走モデルによる計算値を点線で示しよい対応が得られている。基本横モードに安定化された屈折率導波型レーザーは発光断面積は数 μm^2 と小さいため光出力値 $10 \sim 50 \text{ mW}$ で容易に 10^6 W/cm^2 の COD レベルに達する。このため電源の on, off 時に入りやすいサージ電流でしばしば容易にこの光学損傷劣化を発生してしまう。筆者は、電源 on (電圧 0 V) してから半導体レーザーを結線し、実験終了後は電圧 0 V でこの結線をはずし、その後で電源を off するようにしてサージによるトラブル発生を回避している。図 13 には保護回路付きの駆動回路例を示す。本回路には電源電圧を on した後、半導体レーザーには徐々に電圧が印加され、サージが入らない工夫がなされている。また、ダイオード 1S955 を逆並列接続し過剰な逆バイアス電圧が半導体レーザーに印加されることを防止している。ただし、本回路はすべてのサージを防止できるわけではなく、半導体レーザーに付加した電気回路の配線が外来電波に対するアンテナにならぬよう十分な配慮が必要である。とくにパソコンや温度コントローラ等の雑音発生源の近くで半導体レーザーを駆動する際には半導体レーザーのアース電位を明確にするとともに、シールド等も必要となる。

ところで、発振波長 $1 \mu\text{m}$ 帯の InGaAsP レーザーでは、光学損傷が発生しにくく AlGaAs レーザーの 5 倍以上と考えられている。これは InGaAsP 結晶の反射面がレーザー光の吸収体になりにくい物理的性質をもつためであり、その分 AlGaAs レーザーに比較し反射面に

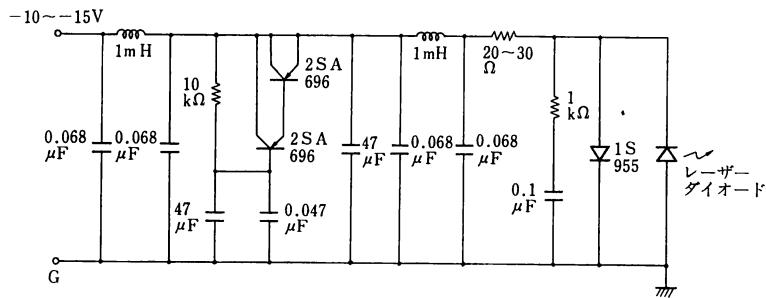


図 13 サージ防止回路付き駆動回路例

起因する劣化は生じにくい特徴がある。

前述のようなサージ保護対策を行ない、注意深く使用すると半導体レーザーの寿命は相当に長いものになってきている。この半導体レーザーの寿命改善に関しては素子特性の改善も含めて精力的な研究が続けられている。すなわち、①基本横モード発光断面積を大きくする、あるいは出射端面の反射率を低くして光出射効率を高めることにより、光学損傷臨界出力値を高くし 40 mW 以上の高出力動作を可能にする素子構造上の改善、また、②低転位密度基板を使用し、清浄な水素雰囲気中で結晶成長することにより、半導体レーザーの劣化原因となる転位を発生させないこと、さらには使用する電極金属材料や融着金属材料と半導体結晶との熱膨張係数差を少なくし、応力導入による転位発生を除去する等素子製造技術の改善がなされている。これらの対策と劣化原因の究明が進展し、現在、 $10^5 \sim 10^6$ 時間に及ぶ室温推定寿命が得られている。今後さらに原子サイズの点欠陥による劣化も究明され、半導体素子固有の長寿命なレーザーが得られることは間違いないものといえよう。

以上、半導体レーザーの変調特性を中心にその使用法

について述べたが、光通信応用だけでなく、光情報処理および計測分野への応用範囲が開かれはじめており、半導体レーザーは情報化社会の発展に寄与する重要なデバイスとして今後ますます発展するものと期待される。

文 献

- 1) 池上徹彦: 応用物理, 47 (1978) 812.
T. Ikegami and Y. Suematsu: IEEE J. Quantum Electr., QE-4 (1968) 148.
- 2) K. Nagano, et al.: Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn., E 61 (1978) 441.
- 3) M. Nakamura: IEEE Trans. Circuits Syst., CAS-26 (1979) 1055.
- 4) F. Saito, et al.: NEC Res. Dev. No. 56 (1980) 175;
古瀬孝雄, ほか: 電子通信学会半導体材料全国大会, 242 (1979).
- 5) 前田光治監修: 光ファイバ通信 (電気通信技術ニュース社, 東京, 1980) p. 404.
- 6) 小林健一, ほか: 電子通信学会全国大会, 918 (1983).
- 7) T. Ikegami, et al.: 1st ECOC Tech. Digest (1975) p. 111.
- 8) H. Yonezu, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 15 (1976) 2393.
- 9) T. Kamejima, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., 19, Suppl. 19-1 (1980) 425.