

解 説

半導体レーザーの基礎

伊 藤 良 一

東京大学工学部物理工学科 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1983年12月10日受理)

Fundamentals of Semiconductor Lasers

Ryoichi Ito

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. はじめに

半導体レーザーは1962年に誕生した。これはルビーレーザー、He-Ne レーザーより約2年おそい。しかし、Ar レーザー、CO₂ レーザー、Nd-YAG レーザーと比べると2年ほど早い。このように半導体レーザーはかなり古株のレーザーであるが、光通信、デジタルオーディオディスクなど特別な場合を別にすれば、まだ一般的に広く使われているとはいえない。それは、おそらく、半導体レーザーに対する一昔前の悪いイメージ—こわれやすい、扱いにくい、特性が悪い、高価である、等々—が完全には払拭されていないためであろう。

現在では、光通信、デジタルオーディオディスクへの応用のおかげで、半導体レーザーはレーザーとしては個数、金額ともに最大級の製品に成長している。光通信、デジタルオーディオディスクは、たしかに半導体レーザーの特徴がとくにうまく生かされている用途であるが、価格、特性、信頼性のいずれの面でもデバイスに対する要求はきびしい。この要求にまがりなりにも応えられるようになった半導体レーザーが、一昔前に比べて面目を一新しているのは当然のことである。応用が光通信、光ディスクに限られる理由は何もない。

本項では、現在一般に入手できる半導体レーザーについて基本的な事項を述べる。物性あるいはデバイス設計的な面、最新の研究成果などについては紙数の関係上割愛せざるをえなかった。

2. 半導体レーザーの特徴

現在実用に供されている半導体レーザーは、III-V 族半導体を材料とするものと、IV-VI 族半導体を材料とするものの2種類に分かれる。PbSnTeなどを活性材料とする IV-VI 族半導体レーザーの発振波長域は5~数十μmで、動作は低温(通常液体窒素温度)に限定される。光学応用には、可視~近赤外域で発振する III-V 族半導体レーザーがふつう使われる所以、以下では III-V 族半導体から作られる注入形レーザーだけを扱うこととする。

半導体レーザーは、他のレーザーと比べたとき、次に挙げるような特徴がある。

(i) 小型、堅牢：図1はパッケージされた半導体レーザーの一例である。中央の黒い部分がレーザーチップの端面(光出力鏡面)で、光はここから放射される。典型的なチップサイズは400 μm × 100 μm × 100 μmである。チップが完結したレーザー構造となっているので堅牢である。このように超小型で堅牢であるという点は、応用においてとくに有利な特徴といえる。

(ii) 高効率：基本的な理由からではないが、現実のレーザーは概して効率の低い光源である。たとえば He-Ne レーザーの効率は0.01~0.1%である。半導体レーザーはこの点できわだっており、効率は数%~数十%に達する。

(iii) 高速直接変調：光を高速で変調するにはふつう光変調器(電気光学変調器など)が使われるが、半導体レーザーの出力光は、注入電流を変調することにより、

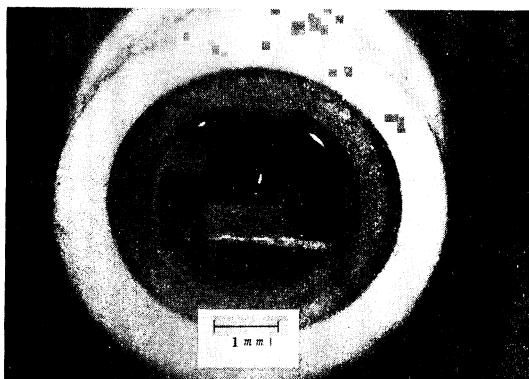


図 1 パッケージした半導体レーザー
ガラスの窓を通してレーザーチップが見える。中央の黒い部分が光出力端面。

簡単に強度変調をすることができる。変調周波数は数 GHz まで可能である。この性質も、通信など情報処理への応用では半導体レーザーの魅力の一つとなっている。

(iv) 広い波長選択範囲：半導体レーザーの発振波長は主として活性材料の種類と組成で決まる。そのために、基本的には同じ材料の半導体レーザーでも、結晶の組成の変化によって波長をかなりの範囲で変えることができる。現在実用化されている III-V 族半導体レーザーの活性材料としては $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (x は組成を表すパラメータ) と $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ の 2 種類がある。前者は $0.75 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 、後者は $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の波長範囲をカバーしている。

組成や不純物などによって波長の制御が可能な点は利点にもなるが、逆にデバイスにより波長がばらつく原因にもなる。これは応用によっては不都合な特徴である。

(v) 長寿命、高信頼性：1970 年代の初期には半導体レーザーの寿命は短いというのが通り相場であった。しかし劣化に関する研究や対策の結果、現在では海底ケーブル通信への適用さえ具体的に検討されるほど信頼性は高まっている。半導体レーザーはいまや最も長寿命のレーザーといってよからう。

(vi) 量産性、低価格：半導体レーザーは半導体デバイスとしては pn 接合ダイオードにすぎない。他の半導体デバイスと同様にバッチ処理で生産されるので、他のレーザーと比べると量産性においてはるかにすぐれている。デジタルオーディオディスクなど量産品への応用ではレーザーの価格はとくに重要である。また、これに関連して、集積化の可能性があることも魅力の一つである。

以上は、どちらかといえば半導体レーザーのすぐれた特徴であるが、あまり好ましくない特徴もいくつかある。

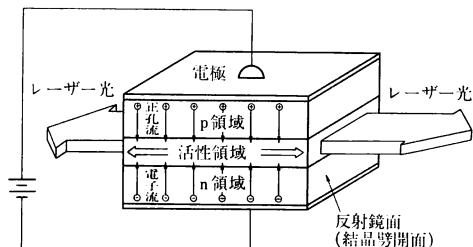


図 2 半導体レーザーの模式図

発振の閾電流と発振波長が温度に敏感に依存するのは最大の欠点といえよう。また共振器が小さいので Q 値が低く、コヒーレンスが比較的悪い。出力鏡面でのスポットサイズが波長程度であるためにビーム広がり角が大きい。これらについては特性の項で再びふれることにしよう。

3. 半導体レーザーの動作原理

半導体レーザーは特殊な pn 接合ダイオードである。図 2 はその構造を模式的に示す。通常、活性領域と、それをはさむ p, n 形領域は異なった組成の半導体結晶から成っている。このような構造をダブルヘテロ（接合）構造と呼ぶ。ダブルヘテロ構造は光学的にはスラブ光導波路として働くので、p, n 形領域をクラッドと呼ぶことがある。クラッド層は、電気的には、活性層に注入されたキャリア（電子と正孔）を、活性層内に閉じ込める役割を果たしている。そこで、クラッド層は（キャリアと光の）閉じ込め層とも呼ばれる。

ダイオードに順方向バイアスが印加されると、p 形閉じ込め層からは正孔が、n 形閉じ込め層からは電子が、それぞれ活性領域に注入される。注入された電子と正孔が再結合して消滅することによって電流が流れる。再結合の際に、おおむね

$$\lambda (\text{nm}) = 1,240/E_g (\text{eV}) \quad (1)$$

程度の波長の光が放射される。ここで E_g は活性材料のバンドギャップエネルギーである。注入されたキャリアの密度が一定値（室温では $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の程度）を越すと、活性領域は分布反転状態になり、上記の波長を中心いて光学利得が生じる。

図 2 に示したように、ふつうの半導体レーザーの光共振器は、pn 接合に垂直な 2 枚の反射鏡から成るファブリ・ペロー構造で構成される。反射鏡は結晶を機械的に劈開したりあるいは化学的にエッチすることにより作成する。結晶の屈折率は約 3.5 と高いが、それでも反射鏡の反射率は 30% 程度で、他のレーザーと比べると著しく低い。

ダイオードに流す電流をふやしてゆくと、ついには、光学利得と共振器の光損失が釣り合い、レーザー動作が開始される。このときの電流および電流密度を、それぞれ、閾電流、閾電流密度と呼ぶ。現在実用になっている半導体レーザーの閾電流密度は数 kA/cm^2 (300K) である。

ふつうの半導体レーザーでは、上に述べたように鏡の反射率 R が低いので、共振器の単位長当たりに換算した反射損失は $(1/L) \ln(1/R) \approx 40 \text{ cm}^{-1}$ と大きい。ただし 2 枚の鏡は同じ反射率をもち、共振器の長さ L は $300 \mu\text{m}$ とした。一方、注入したキャリアによる受動的な光吸収も 20 cm^{-1} 程度と大きいので、出力結合の点からは反射損失がこの程度に大きいことが許容されることになる。しかし、2枚の鏡の反射率が等しいことは、二つの鏡から等しいレーザーパワーが放出されることを意味しており、通常の用途では必ずしも最適の設計とはいえない。最近では、出力鏡面に適当な薄膜コーティングを行ない、反射率を制御することが一つのすう勢となっている。

4. 半導体レーザーの発振波長領域

実用的なダブルヘテロ構造レーザーを作ることが可能と思われる半導体材料の数は多くない。現在実用化されているのは、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (活性層) (発振波長 $0.75 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 、閉じ込め層に $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 、基板として GaAs を使用) と $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}_y\text{As}_{1-y}$ (活性層) (発振波長 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 、閉じ込め層と基板は InP を使用) の 2 種類だけである。

わが国では半導体レーザーの短波長化の研究が盛んに行なわれている。室温発振の最短波長の報告例は、 620 nm (GaInPAs 活性材料)¹⁾ であり、室温連続発振としては 683 nm (AlGaAs 活性材料)²⁾ が最短波長の記録である。 AlGaAs レーザーは現在 750 nm の波長まで実用化されているが、 700 nm 近傍までは十分実用の可能性がある。 600 nm 帯についてはいくつかの材料が研究されておりいずれは実用化されよう。 III-V 族半導体では 560 nm あたりが短波長化の限界と思われる。これより短い波長の半導体レーザーも原理的には可能であるが、現在のところ技術的な見通しは立っていない。

5. ストライプ形レーザー

実用的な半導体レーザーの大部分はいわゆるストライプ構造を採用している。これは図 3 に模式的に示したように、レーザー動作の起こる領域を狭い帯状の部分に制限したものである。ストライプの幅 W は $1 \sim \text{数 } \mu\text{m}$ に

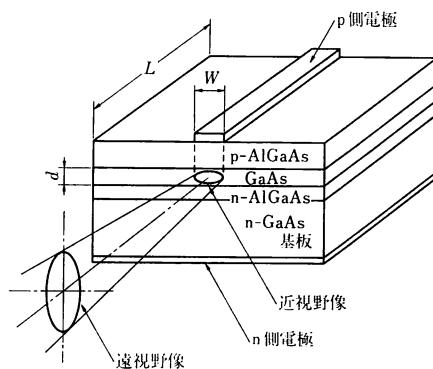


図 3 ストライプ形半導体レーザーの模式図
(GaAs-AlGaAs レーザーの例)

選ばれる。また活性層の厚さ d は典型的には $0.1 \mu\text{m}$ である。したがって、光出力鏡面でのレーザー光のスポットはミクロンサイズとなる。ストライプの長さ、すなわち共振器長 L はふつう $200 \sim 400 \mu\text{m}$ の範囲内にある。

ストライプ構造にする理由は次のとおりである。

(i) 発振モードの制御：全面電極構造のレーザーあるいはストライプ幅が数十 μm もあるレーザーでは、結晶の組成や膜厚のわずかな不均一のためにレーザー発振が局所的に起りやすい。このようなレーザーでは複数個の独立なビームが放出されることになり応用上不都合である。単一の安定な横モード発振を得ることがストライプ構造の最大の目的である。

(ii) 閾電流の低減：閾電流は活性領域の体積にほぼ比例するから、狭いストライプのレーザーでは閾電流が低くなり使いやすい。

(iii) 放熱特性の改善：ストライプ形レーザーでは活性領域で発生した熱は二次元的に広がりヒートシンクに放散される。このため、狭いストライプのレーザーは広いストライプのレーザーよりも放熱特性にすぐれ、同じ電流密度の駆動に対し活性領域の温度上昇が低く抑えられる。これは連続動作を容易にし、また信頼性のうえからも有利である。

一方、狭いストライプの構造ではレーザーの最大出力が低く制限されるという欠点が生じる。

ストライプの構成法は多種多様である。なるべく広い出力範囲で安定な单一モード発振を得ると同時に、作りやすく、信頼性が高く、特性のばらつきの小さなストライプレーザーを求めて数多くの構造が考案された。これらは、ヘテロ接合面内の導波機構によって、屈折率導波形と利得導波形という二つのグループに大別される。

屈折率導波形のストライプレーザーでは单一横モード

発振に伴って縦モードも単一になる傾向が強い。わが国で作られている半導体レーザーの大部分はこのタイプのレーザーである。

利得導波形のストライプレーザーでは縦モード多重発振がふつうである。高い時間的コヒーレンスが障害になる用途ではこのタイプのレーザーのほうが好まれる場合がある。

6. 半導体レーザーの基本特性

6.1 電流-光出力特性

半導体レーザーの最も基本的な特性は電流-光出力特性である。その一例を図4に示す。縦軸は一端面からの光出力を示している。大部分のレーザーでは、もう一つの端面からも等量の光が放出される。

室温における閾電流は、低いものでは 10 mA、高いものでは 200 mA 程度のものもある。閾電流は活性領域の体積、鏡の反射率、活性領域と閉じ込め層のバンドギャップ、屈折率の差などに依存する。閾電流は低いほうが使いやすいが、一方、とり出しうる最大出力も低いことが多い。

発振状態での電流-光出力特性の傾きを微分効率 η_D と呼ぶ。

$$\eta_D = \Delta P / \Delta I \quad (2)$$

ここで ΔI は電流の増加分、 ΔP はそれに対応する光出力の増加分である。 η_D は 0.2~0.5 W/A である。半導体レーザーでは、ダイオードへの印加電圧が放出されるフォトンのエネルギー $h\nu$ (を素電荷 q で割ったもの) とほとんど等しいので、パワー効率^{*1}と量子効率^{*2}は近い値となる。両端面から出る光パワーに対して、微分量

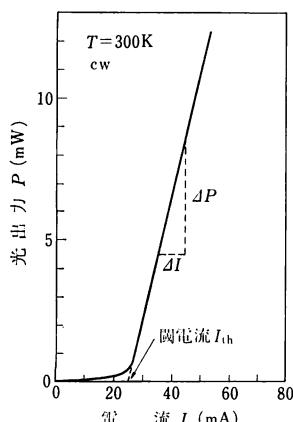


図4 電流-光出力特性の例 (300K, 連続動作)

*¹ 光出力パワーと電気入力パワーの比。

*² 単位時間当たりに放出されるフォトン数と注入電子数の比。

子効率は高いものでは 70% にもなる。

閾電流は温度とともに急速に増大する。温度依存性はしばしば指数関数

$$I_{th} \propto \exp(T/T_0) \quad (3)$$

で近似される。 T_0 は温度依存性を特徴づけるパラメータで AlGaAs 系レーザーで 100~150 K, GaInPAs 系レーザーで 50~70 K である。もちろん T_0 が高いほど温度依存性は小さい。長波長の GaInPAs レーザーは、閾電流の温度依存性が大きいことが泣きどころである。このように閾電流の温度依存性が大きいのは、電子が連続的なエネルギー準位の上に分布しており、温度上昇に伴って電子が高いエネルギー準位にどんどん励起されるためである。

閾電流を決める温度 T は零開気温度ではなく、レーザーの活性領域の温度であることに注意されたい。効率が 100% でないために活性領域では発熱がおこる。素子の熱抵抗はどうしてもゼロにはできないので、活性領域の温度はヒートシンクの温度よりも高くなる。この温度上昇は室温低出力動作ではたかだか数度にすぎないが、高出力動作や高温の動作では数十°C から 100°C 以上にもなり、信頼性低下あるいは出力飽和の原因になる。よく設計されたレーザーは 100°C 以上の連続動作にも耐えるがこのような使い方は現時点では推奨されない。

半導体レーザーの出力の最大定格は 5~25 mW のものが多い。レーザーの駆動電流を増加してゆくと、出力が突然低下するかあるいは飽和-出力減少が起こる。前者は劣化で、瞬時光学損傷と呼ばれる。後者は活性領域の温度上昇によって起こり、劣化ではない。最大定格はこれらの現象が起こるパワーを目安にして設定されている。最近では、出力端面に工夫を加えて瞬時光学損傷レベルを上げる努力がいろいろとなされており、実験的には 50~100 mW クラスの連続出力も得られるようになっている。

電力密度や光パワー密度を上げることなく高い光出力を得るにはスポットサイズを大きくすればよいが、発振モードの安定性を考えるとこの方向には限界がある。そこで近ごろはフェイズドアレイで高出力化をはかる試みが行なわれている。フェイズドアレイは、活性ストライプを近接して多数配置したもので、ストライプ間の光学結合の結果すべてのストライプがコヒーレントに発振する。40 個のレーザーのフェイズドアレイで連続出力 2.5 W が得られたという報告がある³⁾。

6.2 ビームプロファイル、非点収差、偏光

レーザービームの光強度分布の例を図5、図6に示す。

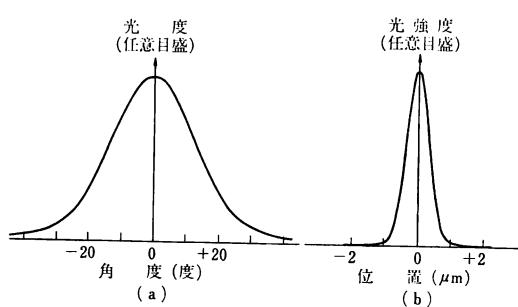


図 5 接合面に垂直な方向の(a)遠視野像と(b)近視野像

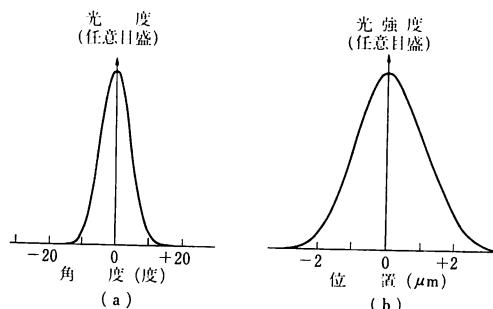


図 6 接合面に平行な方向の(a)遠視野像と(b)近視野像

ここで、近視野像はレーザーチップの光出力端面における強度分布、遠視野像はビームの強度分布（角度に対してプロット）である。両者は互いにフーリエ変換の関係にある。この例のように光の強度分布が単純で、出力の変化に対してプロファイルが変化しないレーザーが、モード安定性の高いレーザーである。図 5, 6 のような発振状態を单一横モード発振と呼ぶ。

光導波路はおおむね矩形導波路で近似される。したがって導波モードは厳密にはガウス形ではない。また、活性領域の断面は、たとえば $0.1 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$ と非常に縦横比が大きい。このため、ビーム拡がり角もヘテロ接合に垂直な方向(θ_{\perp})とヘテロ接合面内(θ_{\parallel})では一般にかなり差がある。拡がり角を半値全角で表わせば、 θ_{\parallel} は 10~30 度、 θ_{\perp} は 30~60 度である。

最近の半導体レーザーでは活性層の厚さ d は $0.1 \mu\text{m}$ 程度かそれ以下ときわめて薄い。このような状況では導波モードのパワーのうちかなりの部分が閉じ込め層にしみ出している。 d を小さくしてゆくとこのしみ出しはますます大きくなり、近視野像はかえって広がる。その結果、 θ_{\perp} はおおむね d に比例して狭くなる。たとえば、 $0.83 \mu\text{m}$ のレーザーで $\theta_{\perp}=16^\circ$ という報告例があるが、この素子では $d \approx 0.03 \mu\text{m}$ と推定される。また、 θ_{\parallel} も

かなりの範囲で制御可能である。

ビームプロファイルはこのように原理的には設計可能な特性なので、今後は円形に近いビームの半導体レーザーも市販されるようになるだろう。

レーザーの種類によっては、ヘテロ接合面に垂直な方向と平行な方向でビームウエストの位置が違っているものがある。このようなレーザーのビームには非点収差があるといい、用途によっては使いにくい。利得導波形のレーザーでは一般に $10 \sim 30 \mu\text{m}$ の収差がある。それは、ヘテロ接合面内の導波が利得導波形であるのに、接合に垂直な方向では屈折率導波形であることが原因である。

半導体レーザーの出力光はふつうヘテロ接合面に平行に偏光している（TE 偏光）。これは鏡の反射率が TE 偏光と TM 偏光の間に差があるためで、実用上好ましい特徴である。

6.3 発振スペクトル、コヒーレンス

図 7 は直流動作時における発振スペクトルの一例である。発振の閾値近傍では、スペクトルはほぼ等間隔のとびとびの波長から成っている。これらの波長は共振条件

$$\frac{1}{2} \frac{\lambda}{n} N = L \quad (4)$$

を満たす波長で、縦モードと呼ばれる。ここで、 n は光導波路の屈折率、 N は整数、 L は共振器長である。縦モードの間隔は

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi L} \quad (5)$$

で与えられる。 \bar{n} は分散を考慮した実効的な屈折率で

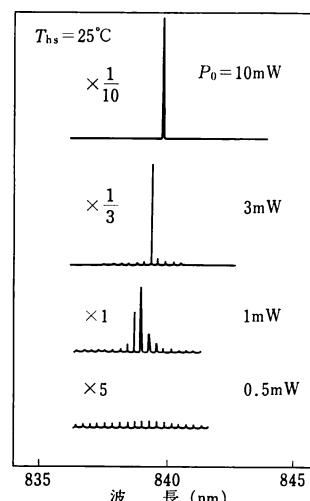


図 7 連続動作時の発振スペクトルの例

$$\bar{n} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (6)$$

である。他のレーザーと比べて、半導体レーザーの共振器長が衍ちがいに短いために $\Delta\lambda$ は通常の分光器で十分分解できるほど大きくなる。 $L=300\text{ }\mu\text{m}$ のレーザーでは $\Delta\lambda$ はおよそ 3 \AA (波長 $0.8\text{ }\mu\text{m}$)~ 8 \AA ($1.3\text{ }\mu\text{m}$) である。

レーザー出力を増してゆくとパワーは1本の縦モードに集中してゆき、その他のモードのパワーは飽和する。これを縦モード単一発振という。屈折率導波形のレーザーは一般に単一縦モードで発振する傾向があるが、利得導波形レーザーでは通常のパワーレベルでは多重縦モード発振が起こる^{*3}。

他のレーザーと比べたとき、半導体レーザーでは利得幅が著しく広く (たとえば $10\text{~}20\text{ nm}$)、また、それが事実上均一拡がりとみなせるという特徴がある。これが単一縦モード発振の生じる原因であるが、同時に、隣接モードとの利得差がきわめて小さいためにモード競合などが起りやすい原因にもなっている。

図7をみると、光出力の増加に伴って、発振波長が長波長側にしだいにずれていることがわかる。これは電流の増加に伴ってレーザーの活性領域の温度が上昇するために起こる現象である。図8は一定の駆動電流のときの発振波長の温度依存性の例を示す。ゆるやかな温度依存性は主として屈折率の温度依存性によるもので 0.5 \AA/K (波長 $0.8\text{ }\mu\text{m}$)~ 0.8 \AA/K ($1.3\text{ }\mu\text{m}$) の割合で波長が変化する。また、縦モードのとびはバンドギャップの変化 (すなわち利得が最大となる波長の温度変化) によるもので、その変化率は 2 \AA/K ($0.8\text{ }\mu\text{m}$)~ 5 \AA/K ($1.3\text{ }\mu\text{m}$) の程度である。

発振波長のこのような温度依存性は他のレーザーと比べてきわめて大きいもので、使用にあたっては常に考慮

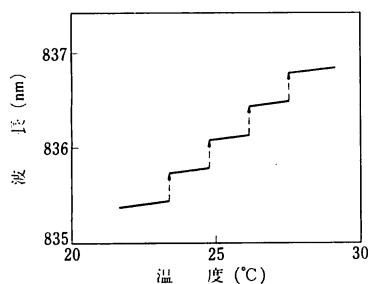


図8 発振波長の温度変化

*3 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯の GaInPAs レーザーでは、屈折率導波形レーザーでも多重縦モードで発振する傾向がある。理由はよくわかっていない。

入れる必要がある。図7の例からもわかるように活性領域の温度は雰囲気温度だけでなく駆動電流によっても変わることに注意しなければならない。逆に、半導体レーザーでは雰囲気温度や駆動電流によって波長のチューニングが可能である。半導体レーザーに数 μs の幅の電流パルスを印加したときに起こる過渡的な波長変化を利用してきわめて短い時間に分光を行なうこともできる⁴⁾。

屈折率導波形レーザーでも、2~数本の縦モードが同時に発振しているように見える場合がある。このような現象は比較的低出力 (数 mW 以下) でしばしば見られる。この場合、モード競合が起こっていることが多く、これに伴って全出力のゆらぎも増大する⁵⁾。

また、図8で示したモードのとびは出力の変化を伴っていることが多い⁶⁾、モード競合とともに雑音の原因の一つになっている。

レーザーによっては、あるパワーレベルで急に単一モード発振から多重モード発振に移行することがある。これは横モードの不安定性や自励パルセイションに伴って起こるが、また劣化に伴って起こることもある。ふつうは好ましくない現象である。しかし、時間的コヒーレンスを低下させたほうが使いやすい用途では、自励パルセイションを積極的に利用しようという提案もある。

1本の縦モードのスペクトル幅は、究極的には位相ゆらぎで決定される。実際にこの究極的なスペクトル幅が観測されることはほとんどなく、現実のスペクトル幅は温度、励起パワーのゆらぎ、共振器の振動などで決まっている。ところが半導体レーザーでは共振器長が衍ちがいに短いために共振器内のフォトンの寿命が著しく短く、その結果スペクトル幅は非常に広くなっている。上記の「究極的な」位相ゆらぎによるスペクトル幅を観測することができる。Fleming-Mooradian による測定結果は、室温で $0.83\text{ }\mu\text{m}$ の AlGaAs レーザーに対し

$$\Delta f(\text{MHz}) = 114/P_0(\text{mW}) \quad (7)$$

である⁶⁾。ここで Δf は半値全幅で、 P_0 は一つの鏡面から放出されるレーザーパワーである。この結果は単純なショウロウ・タウンズの公式と比べると 50 倍ほど大きい^{*4}。この差は屈折率、したがって発振波長がキャリア密度に強く依存するために生じると考えられている。

*4 Δf の値としては、しばしば上の値より著しく狭い値が観測される。多くの場合、それは反射光の帰還、すなわち複合共振器効果によるものである。しかし、 Δf はレーザーの構造にも依存する量であり、レーザーによってはスペクトル幅がショウロウ・タウンズの公式の数倍程度に狭くなることもあります。

る⁷⁾.

7. おわりに

半導体レーザーの基本的な事項について概略を述べた。変調特性、信頼性、モード特性に関する詳細などは別項を参照していただきたい。

現在研究開発レベルでは発振波長域の拡大、量子井戸レーザー、レーザーのアレイ化、他の素子との集積化、高出力化、分布帰還形レーザー、光增幅、光双安定などさまざまのテーマがとり上げられている。オプトエレクトロニクスにおける半導体レーザーの重要性は今後ますます増大するものと思われる。

本小文が半導体レーザーに対する読者の関心をかきたてるのに少しでも役立てば幸いである。

文 献

- 1) A. Fujimoto, H. Yasuda, M. Shimura and S. Yamashita : Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) L 488.
- 2) S. Yamamoto, H. Hayashi, T. Hayakawa, N. Miyauchi, S. Yano and T. Hijikata : Appl. Phys. Lett., **41** (1982) 796.
- 3) D. R. Scifres, W. Streifer, R. D. Burnham, C. Lindström and T. L. Paoli : IOOC '83 (Tokyo), Paper 27, B 2-4 (1983).
- 4) 伊藤良一、小笠原長篤：東京大学工学部紀要(A), **21**(1983) 34.
- 5) N. Ogasawara, R. Ito, M. Kato and Y. Takahashi : Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983) 1684.
- 6) M. W. Fleming and A. Mooradian : Appl. Phys. Lett., **38** (1981) 511.
- 7) C. H. Henry : IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 259.