

解 説

半導体レーザーの光学的使用法

有 本 昭

(株)日立製作所中央研究所第6部 〒185 国分寺市東恋ヶ窪 1-280

(1983年12月2日受理)

Optical Treatment of a Diode Laser

Akira ARIMOTO

Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
1-280, Higashi Koigakubo, Kokubunji 185

1. はじめに

半導体レーザーは、発振の歴史は古い¹⁾が、注目を集めだしたのは1970年の室温発振以後²⁾である。最近は出力、寿命特性等の性能向上は著しい。半導体レーザーの応用として最初に考えられたのが、ファイバーを伝送路とする光通信の分野であった。その波長域は0.85μm以上の長波長域であった。その後、レーザーの短波長化が進むとともに他の用途への応用が真剣に検討され始めた。

その一つは情報処理機器への応用であり、レーザープリンタ、光ディスクはその例である。また、可干渉性の向上とともに、光計測への応用も検討されている。

本稿は、光学懇話会会員を対象として、通信を除いた応用での光学的使用法について述べたいと思う。

2. 半導体レーザーの基本特性

2.1 出力特性

半導体レーザーの出力特性は図1に示すような直線的な出力-電流特性をしている。閾値電流は40~100mAの範囲にある。3mWの光出力を得るには閾値電流+10~20mAの電流を加えることで得られる。しかし、レーザーによって、この直線特性の傾きが異なるので注意を払う必要がある。また、この光出力・電流特性は周囲温度によって著しく変化する。これは一定光出力特性を得ようという用途(たとえば光ディスク)では都合が悪い。これに対しては、常に光出力を一定になるようにフィードバック制御をするAPC(automatic power con-

trol)回路をつけることが行なわれる。最近の市販の半導体レーザーでは、パッケージの中にレーザーの後方光の出力をモニタする光検出器を内蔵しているので、これを用いてAPCを行なうのがよい(図2)。

2.2 幾何光学的特性

半導体レーザーの共振器は、数μm×数μm×数百μm(長さ)の導波路形共振器である。発光点は、気体レーザーの場合とくらべてきわめて小さく、幾何光学的には、点光源と考えてよい(図3)。また、ファーフィールドパターンは、非対称な形状をしている。気体レーザーのように、同一方向に指向性のよい光線をつくりだすには、図4のようにコリメートレンズを用いて、その焦点位置にレーザーを配置すればよい。

しかし、レーザー光の出射角度が、10~40°と大きいので、NAの小さいレンズを用いたのでは、レーザー光量の損失をひきおこす。コリメートレンズの透過光量とNAとの関係を図5に示す。ここでプレーナー方向に垂直な方向の出射角度θ₁(θ₁ > θ₀)が透過光量に大きな影響を与えるので、θ₁をパラメータとした透過光量を図中に示した。レーザー光を60%以上用いるには、NAを0.25以上にする必要がある。また使用するうえではコリメート後の平行度が要求される。これはレーザーとコリメートレンズの相互距離に依存するが、この目安として

$$\text{焦点深度} = \lambda/(NA)^2 \quad (1)$$

で定義される量を用いる。これはレーザーがコリメートレンズの焦点位置からはずれたときの焦点移動の波面収差が、Rayleigh criterion内になる距離を意味する。この

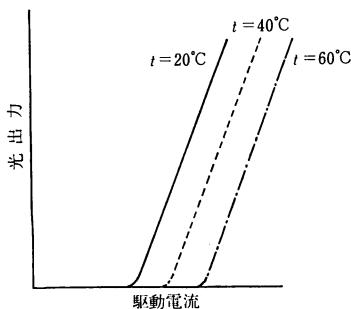


図 1 半導体レーザーの電流 - 出力特性

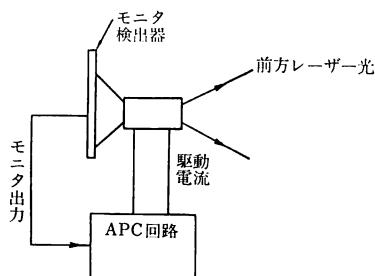


図 2 APC 回路

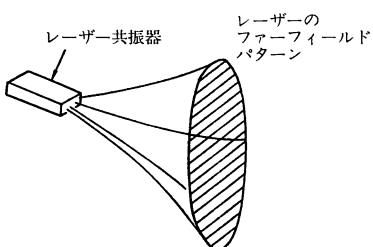


図 3 半導体レーザーのファーフィールドパターン

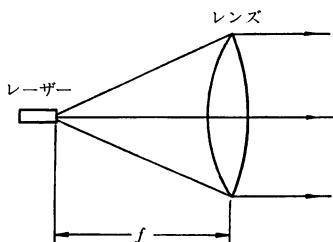


図 4 半導体レーザーのコリメート方法

焦点深度と NA の関係もあわせて図 5 に示す。 NA が大きいほど焦点深度の許容値が厳しくなり、光学系の配置精度は厳しくなる。

2.3 波 長

半導体レーザーの波長は GaAlAs 系レーザーでは $0.7\sim1.7\mu\text{m}$ である。光通信ではファイバーの特性との

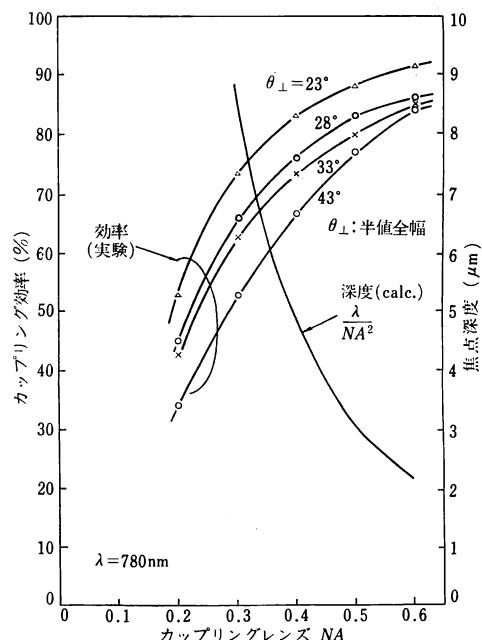


図 5 半導体レーザーの光利用効率と焦点深度

整合性から $0.8\mu\text{m}$ と $1.3\sim1.5\mu\text{m}$ 付近のレーザーが用いられる。一方、レーザープリンタ、光ディスク等の情報機器分野では分解能向上、感光物質の波長特性、調整の容易さとの関係から $0.7\mu\text{m}$ 帯のレーザーが用いられている。 $0.69\mu\text{m}$ とさらに短波長レーザーの連続発振の報告もあるが、信頼性の点で $0.78\mu\text{m}$ 付近の波長をもつものが、主流である。

半導体レーザーは、気体レーザーとは異なり温度変化に対して波長が変化する。通常、 50°C の変化で $0.07\mu\text{m}$ 程度の変化を生じる。これは 3 章でさらに詳しく述べる。

$0.7\mu\text{m}$ 帯のレーザーは、人間の眼でもはっきりみえるので可視半導体レーザーと呼ばれるが、視感度は低いので、レーザー光口径を大きくしたり、走査させると見にくくなる。気体レーザーでは、光路中のゴミで散乱レーザーのパスがよくみえるが、半導体レーザーではそのようなことはできない。

2.4 偏光特性

半導体レーザーは、プレーナ構造の接合面に平行な方向に直線偏光をしている。 $3\sim5\text{mW}$ でのその偏光方向と直交成分の光の光量比は $50:1\sim100:1$ である。直交成分の光はレーザーからの自然放出光である。使用の際は偏光方向によって、光の反射率、透過率および物質によっては屈折率も異なるので装置設計の際には注意を要

する。

3. 半導体レーザーのモード特性と使用方法

3.1 横モード特性

半導体レーザーの横モードの特徴は、ファーフィールドパターンの非対称性と、非点収差がある。半導体レーザーのファーフィールドパターンは半值角で、プレーナの接合面に平行な方向 $\theta_{\parallel}=8\sim20^\circ$ 、垂直な方向 $\theta_{\perp}=20\sim40^\circ$ と偏平なガウス分布をしている。この非対称性はレーザー共振器の二次元的な非対称性によるものと考えられている。この非対称性は、二次元の回転対称を特徴とするレンズ光学系では扱いにくい。これを解決するには、①対称なファーフィールドパターンをもつレーザーをつくる、②光学系によって対称形に直すの2方法が考えられる。

①に対しては BH (埋込みヘテロ形) レーザー³⁾ と呼ばれるレーザーが開発されているが、発振領域がせまく、出力が得にくい点が欠点で、現在は非対称ファーフィールドパターンをもつレーザーが開発の主流となっている。

②光学系によって対称な形とするには、レーザー出力に余裕があるときと、そうでない場合で対処方法が異なる。

レーザー出力に余裕がある場合は、レーザー光の出射直後に NA の小さいカップリングレンズを図 6 のように配置し、レーザー光に無理矢理けられを与えて対称にする方法が使われる。

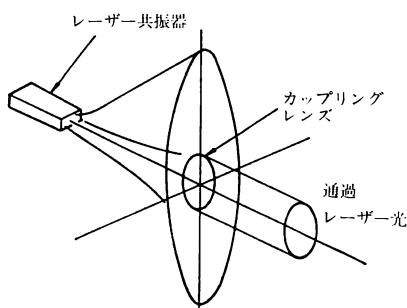
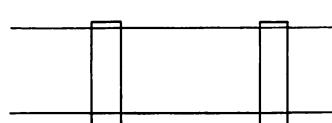
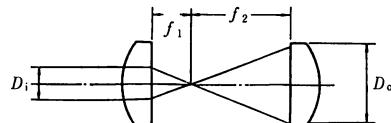


図 6 NA 小のレンズによるビーム整形



(a) レンズ作用のない方向



(b) レンズ作用のある方向

図 8 シリンドリカルレンズによるファーフィールドパターンの整形

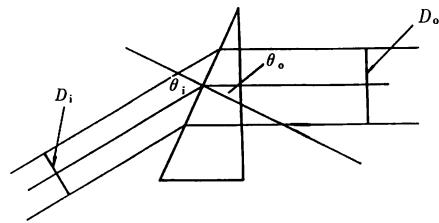


図 7 プリズムによるファーフィールドパターン整形

レーザー出力に余裕がなく、光量を最大限に利用したい場合は、④三角プリズムによる方法、⑤シリンドリカルレンズによる方法で、対称形状にする二つの方法がある。④三角プリズムによる方法はプリズム面に斜めに入射したレーザー光が屈折を生じるときに屈折を起こした方向の形状が変化することを利用している（図 7）。

屈折はスネルの法則に従っており、屈折前後の径の大きさは図 7 の符号を用いると

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_o} \quad (2)$$

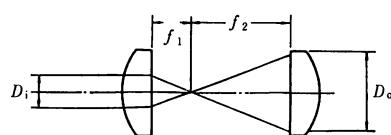
で与えられる。径を大きく変えるには屈折率の大きいプリズムを用いたり、複数段用いたりする方法が有効である。この方法の欠点は、光軸が曲がるという点にある。

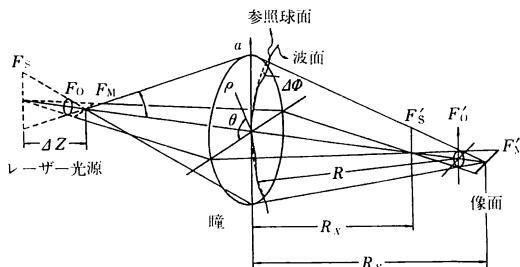
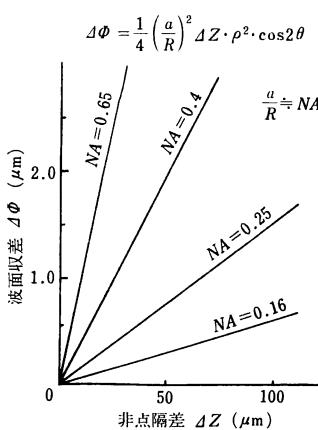
⑤シリンドリカルレンズを用いる方法は 2 個のシリンドリカルレンズを一方向にのみ共焦点に配置し、焦点距離の比で一方向のみの径を変えようとするものである（図 8）。レンズ通過前後の変化は、

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{f_2}{f_1} \quad (3)$$

で与えられる。

非点収差とは、図 9 のように光が子午面内と球欠面内で絞られる z 位置座標が異なっていることを意味する。通常この非点収差はレンズ、ミラー等の光学系によって発生するものであるが、半導体レーザーはレーザー自体が、そのような特性をもっている⁴⁾。前章で、幾何光学的に点光源として取り扱うと述べたが、厳密には点光源とはならない。子午面内と球欠面内焦点の位置の差 ΔZ は非点収差と呼ばれる。非点収差 ΔZ と図 9 の波面収差 $\Delta\phi$ の間には、レーザー光を取り込む光学系の NA をパラメータにすると、



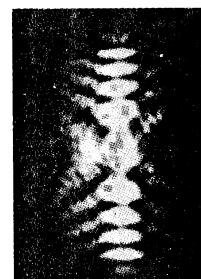
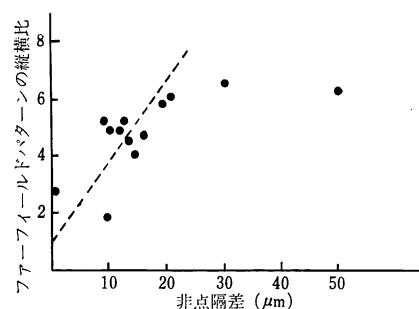
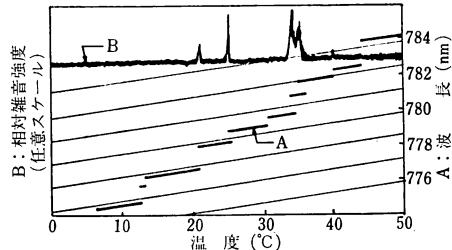
図 9 半導体レーザーの非点収差⁴⁾図 10 波面収差と非点隔差の関係⁴⁾

$$\Delta\phi = \frac{1}{4} (NA)^2 \Delta Z \quad (4)$$

なる関係がある。これを図 10 に示す。光学系評価の目安として Rayleigh criterion ($\Delta\phi \leq \lambda/4$) があるが、 $\lambda=0.8 \mu\text{m}$ としたとき、 $NA=0.16$ では $\Delta Z \leq 30 \mu\text{m}$ 、 $NA=0.4$ では $\Delta Z \leq 5 \mu\text{m}$ が許容となる。この場合、光量に余裕があれば NA を小さくできるが、余裕のない場合は大きな NA の光学系を用いなければならない。後者の場合はシリンドリカルレンズ等による非点収差の補正が必要である。

非点隔差の測定には、レーザー光の絞られた点をビデオコンで観測し、子午、球欠の両焦点間距離を測定するか、干渉系を組んで収差の干渉图形から測定する方法がある。非点収差の干渉图形は図 11 に示すような双曲線となって現われる⁴⁾。

非点隔差は屈折率ガイドによって横モードが制御されている半導体レーザーでは数 μm 以下と小さく、利得ガイドで横モード制御のゆるやかなレーザーでは一般的に $10 \mu\text{m}$ 以上と大きい。利得ガイドのレーザーは縦モードがマルチになっていることが多い。ファーフィールドパターンの非対称性と非点隔差は、相関が強いというデータもある(図 12)。なお現在までは国内では屈折率ガイ

図 11 半導体レーザー非点収差干渉图形⁴⁾図 12 非点隔差とファーフィールドパターン⁵⁾図 13 レーザー波長の温度依存性⁵⁾

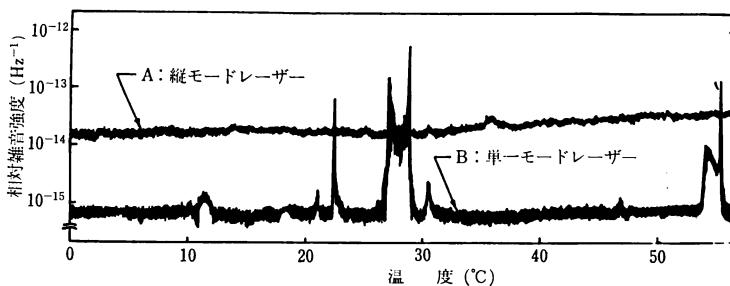
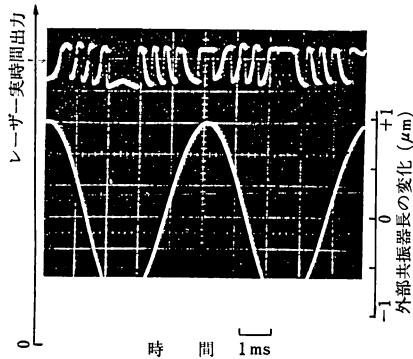
ド型レーザーの開発が主流で、利得ガイド型レーザーは欧洲での開発が盛んである。

3.2 縦モード特性

半導体レーザーは、縦モードの本数からシングルモードレーザーとマルチモードレーザーに大別される。

3.1 で述べたごとく、シングルモードレーザーは横モード特性が、マルチモードレーザーにくらべて良好である。シングルモードレーザーを用いるときの最大の問題点は、温度および光帰還によってレーザーの出力変動、波長変動が生じることである⁵⁾。

まず、温度変化によって生じる問題点について述べる。図 13 は温度が変化することによって波長が長波長側に変化し、約 3°C ごとにモードが飛ぶことを示している。この現象をモードホップと呼んでいる。モードホップの際に、複数モードが競合を起こすと出力変動が生じ、光ディスクではノイズとして問題となっている。図

図 14 半導体レーザーのノイズ特性⁵⁾図 15 フィードバックによる出力変動⁵⁾

14 にビデオ帯域 (2~12 MHz) のノイズ温度特性をマルチモードレーザーと対比して示す。シングルモードレーザーでは、ノイズの発生しないときのノイズはマルチモードレーザーに比べて低いが、モード競合時にはそのノイズレベルはマルチモードレーザーより高くなる。マルチモードレーザーでは常に 5~10 本のモードがたっているため、シングルモードレーザーのようなモード競合によるスパイク状ノイズは発生しない。

干渉を用いる光計測ではモードの変化は致命的である。半導体レーザーでも三次元物体のホログラムがとれるほど干渉性のよさは証明され⁶⁾ているが、精度のよい干渉計測、ホログラフィー干渉を行なうには、温度制御によって波長の変動を抑制する必要がある。マルチモードレーザーでは、特定の光路差以外では干渉縞は現われないので、干渉計測用としては適さない。

次に光帰還によって生じる縦モードの変化と、それに伴うノイズについて述べる。レーザーの光が再び共振器に戻ると光出力の変動が生じる。レーザー光の反射点を微小に動かしたときの出力変動を図 15 に示す(図 15 の上の曲線は出力変動、下の曲線は外部反射点の動きを示す)。反射点位置の 1/2 波長の動きと同期して出力変動をしていることがわかる。これは反射点とレーザー共振器端面で構成される外部共振器の共振モードが、レ

ザー共振器の共振モードと適合するか否かの状態が、反射点が 1/2 波長移動するごとに繰り返されるためである。この出力変動を積極的に利用してビデオディスクの信号読み取り⁷⁾を行なう試みや、微小変位の測定に用いようとする試みもあるが、一定光出力を安定に得ようとする使用用途ではかえってノイズとなって使用上の障害となっている。この出力変動は、レーザー共振器への光帰還量、外部共振器長に大きく依存する。

光帰還量を制御するには、ファラディローテータや偏光プリズムと 1/4 波長板を用いたアイソレータが用いられているが、その他光学部品をレーザーと正対の位置から若干ずらして配置する等の配慮も必要である。

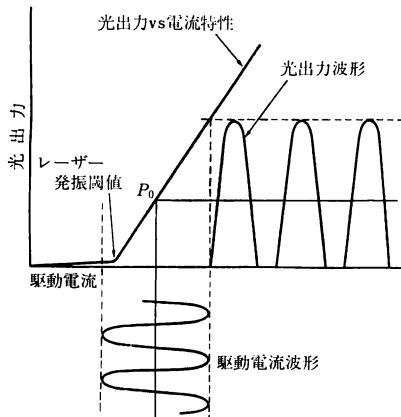
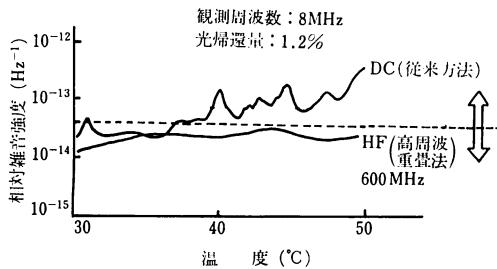
3.3 ノイズの低減方法

前節でレーザーの問題点をのべたが、横モードのきれいさ、ノイズレベルの基底値の低さ等でシングルモードレーザーが優れている一方で、そのシングル状態を保ちえずノイズが発生するという欠点がある。一方、マルチモードレーザーは、温度、光帰還等によるノイズレベルの変動が少ないとされる一方で、ノイズレベルの絶対値が高く、横モードの拡がりが大きく、非点収差が大きいという欠点がある。

ユーザー側の希望とすれば、ノイズレベルが低くかつ温度、光帰還によるノイズの変動がなく、横モードのきれいなレーザーが望ましい。その一つの方法を、ここに紹介する⁸⁾。

それはシングルモードレーザーの駆動電流を図 16 に示すような、レーザー発振閾値を切り込む高周波電流で行なう方法である。閾値を切り込ませると、閾値付近では発振がマルチモードとなることが知られており、そのため本方式でも発振モードは 10 本以上のマルチとなる。このことが、光帰還、温度変化に対してノイズレベル上昇の少ない理由となっている。

この高周波方法によるマルチ化レーザーが、利得ガイドレーザーにくらべてなぜノイズレベルが低いのかはわ

図16 高周波重畠によるノイズ低減法⁹⁾図17 高周波重畠法によるノイズの温度特性
HF: 高周波重畠法, DC: 従来方法⁸⁾

かっていない。重畠高周波の周波数は 500 MHz 以上が望ましい。

図17に温度変化をさせたときのノイズレベルを、従来の直流電流の場合とくらべて示す。直流電流駆動の場合、特定温度でノイズレベルが異常に高くなる現象があるのに対し、本方法のノイズレベルの変動は少ない。この方法は、横モード特性が悪化するおそれもない。この方法は、周辺回路技術の助けによって、ノイズレベルを下げたものであるが、今後はレーザー自体での改善が望まれる。

4. 観測方法

最後に、実用上便利な半導体レーザービームの観測方法について述べる。現在、三つの方法が一般的である。

① IR フォスファーによる方法：物質の蛍光作用を利用して、赤外光を可視光に変換するもので、照射点がだいだい色に輝く。

② ファインドRスコープ：赤外線カメラの一種で、赤外光が非常に明るく観測される。値段が 30 万円以上と高価なのが欠点である。

③ 赤外ビデオコンと TV モニター：ビデオカメラと TV モニターの組合せで、レーザー光を観測する。前2者的方法ではレーザー光の存在のみで、その微細形状がよく判明しないのに対して、本方法では形状までよく観測でき、光学系光路でのレーザー光のけられまで観測でき、調整に便利である。

5. おわりに

半導体レーザーは、今後、光学の分野でさまざまな形で使われていくであろう。本稿は現状での半導体レーザーの使用法について述べたものであるが、レーザーの特性改善とともに、その使用法も変わっていくと考えられる。

文 献

- 1) M. Nathan, W. Dumke, G. Burns, F. Dill, Jr. and G. Lasher: Appl. Phys. Lett., 1 (1962) 62.
- 2) I. Hayashi, M. Panish, P. Foy and S. Sumski: Appl. Phys. Lett., 17 (1970) 109.
- 3) T. Tsukada: J. Appl. Phys., 45 (1974) 4899.
- 4) K. Tatsuno and A. Arimoto: Appl. Opt., 20 (1981) 3520.
- 5) 有本 昭, 尾島正啓, 立野公男: 光学, 11 (1982) 629.
- 6) K. Tatsuno and A. Arimoto: Appl. Opt., 19 (1980) 2096.
- 7) Y. Mitsuhashi, J. Shimada, T. Morikawa, A. Seko and K. Sakurai: Opt. Commun., 17 (1976) 95.
- 8) 有本 昭, 尾島正啓, 大貫信孝, 茅根直樹: 昭和58年秋応物学会講演, 27 PX 3, 27 PX 4 (1983).
- 9) 赤津光治, 有本 昭, 間 剛, 後藤敏彦: 日立評論, 65 (1983) 697.