

## 〔研究〕

# 二分割 p 型電極を用いたビーム偏向垂直共振器型面発光レーザー Beam Steering Vertical Cavity Surface Emitting Laser with Two-p-Type Electrodes

清水 三 聡      井 手 利 英  
M. SHIMIZU      T. IDE

Using vertical cavity surface emitting lasers with two p-type electrodes, continuous output beam steering was achieved by controlling injection current profile. The far-field peak position can be shifted linearly by varying the ratio between injection currents into the two p-type electrodes. The deflection angle measured from the surface normal direction ranges from -1.3 to +1.0 degrees. Also we investigated operation characteristics that are important for optical processing such as optical fuzzy inference.

### §1 はじめに

面発光レーザーは、成長基板に対して光を垂直に出射できる、二次アレー化が可能、出射ビームが円形で狭出射角である、低しきい値化が可能などの特長を有する。そのため、光インターコネクション等の応用に使用する高密度の二次元化された光源として有望である<sup>1)</sup>。Plantらは、4×4 にアレー化した面発光レーザーを用いてプリント基板間の光インターコネクションを実現している<sup>2)</sup>。また石川らは、二次元状に配置した電子素子間を、光空間通信でデータ通信させることにより光電子並列演算システムを実現している<sup>3)</sup>。このシステムでは8×8の受光器、電子素子、および面発光レーザーからなり、高速の画像処理を可能としている。

さらに面発光レーザーの出射ビームが電氣的に偏向可能ならば、これらのシステムはよりコンパクトで機能性を高めることが可能になるという意見がある。

Fanらは面発光レーザーのビームの出射窓の半分に位相調整用の光学薄膜を取り付けることにより出射ビームをスイッチングしている<sup>4)</sup>。これにより出射ビームを0°と2.9°の二つに選択できるようになっている。この面発光レーザーの構造は分割された二つの近接した共振器からなり、片側の出射窓にのみ波長の半分

の厚さに相当する光学薄膜を取り付けている。共振器を一つずつ発振させる場合には出力ビームは基板に対して垂直になるが、二つを同時に発振させると、二つの共振器がカップリングして一つの位相のあった波長で発振するが、出射窓で位相のずれが生じるため出射ビームは角度をもつことになる。

一方、面発光レーザーとは異なる通常の半導体レーザーにおいて、つまり基板と平行に発振するものに、偏向機能をそなえているツインストライブレザーというものがある。これにおいては、連続的に12°の偏向が達成されている<sup>5,6)</sup>。このデバイスではp型電極が二電極構造をしており、その各々に注入される電流量を調整することにより活性領域内のキャリア分布を調整できるようになっている。さらにこのデバイスを用いて出射ビームのスイッチング<sup>7)</sup>、双安定動作<sup>8)</sup>等が実現されている。このように分割電極を用いて活性領域内のキャリア分布をコントロールする方法は、ビーム偏向に適した方法であると考えられる。

そこで本研究では、二分割されたp型電極を用いた面発光レーザーを作成し、その動作特性を調べた。

### §2 素子構造

Fig.1 に2分割したp型電極を用いたビーム偏向面発

KEY WORDS : ビーム偏向, 垂直共振器構造, 面発光レーザー, 2分割 p 型電極

光レーザの構造を示す。n型半導体多層膜反射鏡，4つの量子井戸からなる多重量子井戸活性領域，p型半導体多層膜反射鏡，高濃度にドーピングしたp型キャップ層は，n型のGaAs基板上にMOCVD法を用いて成長した。半導体多層膜反射鏡は，厚さが発振波長の1/4で，Alの組成比xが0.1と0.9の二つの半導体層つまり $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ と $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ を交互に26ペア積層したものである。多重量子井戸活性領域は，厚さ100Åの井戸層（GaAs層）を，厚さ100Åのバリアー層（ $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 層）で挟んだ量子井戸からなる。また直径36μmで高さ1μmのメサ構造を残し，その回りのp型半導体多層膜反射鏡とp型キャップ層をりん酸含有のエッチング液で除去することにより，不必要な電流の広がりを防ぐ構造となっている。しかしそれだけでは不完全であり，さらに460の水蒸気雰囲気中で，メサ構造側面のp型半導体多層膜反射鏡を酸化して電流が流れにくくしてある。この水蒸気雰囲気中での酸化により電流の広がる量を調整できる。2分割したp型電極はメサ構造上部周辺に取り付ける構造をしている。そのp型電極と電極パッドが断線を起こさないように，メサ周辺はポリイミドを用いて埋め込んであり，メサ上部とポリイミド上部の連結部が平坦になるようにしてある。Fig.2にビーム偏向面発光レーザの上部写真を示す。明るく見えている部分がp型電極部分であり，円形になっているのがメサ上部の縁である。メサ上部の縁に2つのp型電極が形成されており，その2つの電極の間から光が取り出される。光の取り出し窓の直径は，素子ごとに異なっており，直径にして8~22μmである。p型電極の最短距離は4μmであり，2つのp型電極間の抵抗は100~150である。2つの電

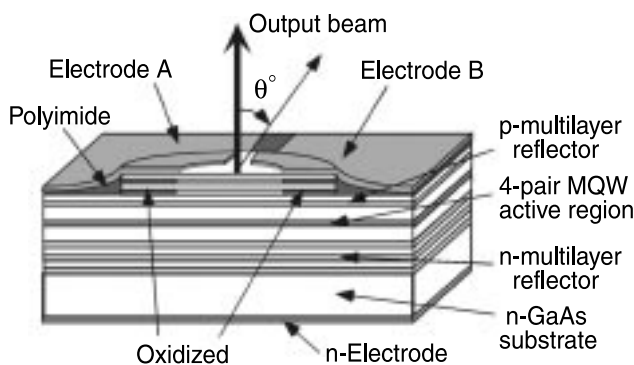


Fig.1 二分割されたp型電極を用いたビーム偏向面発光レーザの構造

極から均一に電流を注入した時の発振しきい値電流は30~90mAであり，これは電流の広がり量によって決まる。つまり水蒸気雰囲気中での酸化量が多く電流が中央近辺しか流れない時にはしきい値が低く，逆の場合には高くなる。

### §3 測定結果と考察

ビーム偏向面発光レーザからの出射ビームを偏向させるには，電極Aに注入させる電流 $I_A$ と電極Bに注入させる電流 $I_B$ を調整すれば良い。そこで，電流 $I_A$ と電流 $I_B$ の和がしきい値電流 $I_{th}$ の1.5倍になる条件( $I_A+I_B=1.5I_{th}$ )のもとに，電流 $I_A$ と $I_B$ を変化させながら出力ビームがどのように変化するか測定した。Fig.3に出力ビームの遠視野像を示す。ここで素子ごとにしきい値電流が異なるため，規格化電流 $i_A$ を $i_A=I_A/(I_A+I_B)$ となるように定めた。そして，この規格化電流 $i_A$ が0.46から0.93の間の時の測定結果を示す。遠視野像の光強度が角度によって細かく変動しているのは，測定に用いた対物レンズにより生じた干渉の為である。出射ビームは連続的に偏向されていることが分かる。規格化電流 $i_A$ を増加させると，遠視野像のピークの位置つまり偏向角が大きくなる。つまり電極Bの側に出射ビームが偏向されていることが分かる。規格化電流 $i_A$ が0.64よりも大きい時は，+側へ偏向し，0.61よりも小さい時は，-側へ偏向している。また規格化電流 $i_A$ が0.57から0.93の範囲では，出射ビームの遠視野像は単峰性である。この遠視野像の半値全幅は，約8.5°である。しかし規格化電流 $i_A$ が0.95よりも大きいと0.46よ

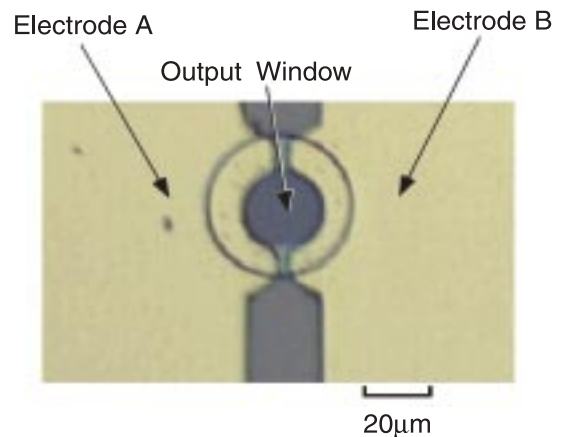


Fig.2 作成したビーム偏向面発光レーザのp側表面写真

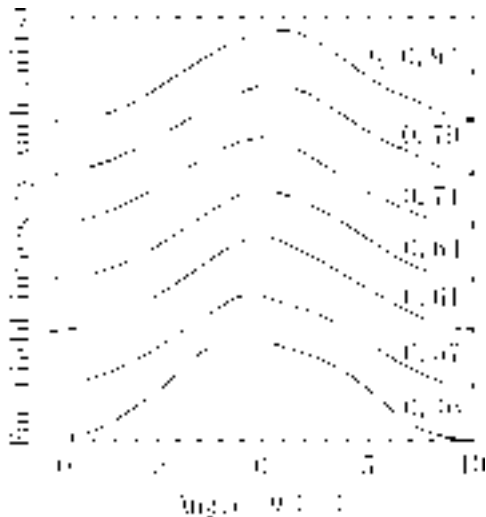


Fig. 3 注入電流量を変化させながら測定した出射ビームの遠視野像  
電極 A と電極 B に注入される全電流量は、しきい値の 1.5 倍で一定に保っている。

りも小さいと、遠視野像は広がって多数のピークが見られるようになる。これは、多数のピークを有する高次の横モードで発振する為である。

Fig. 4 に、規格化電流  $i_A$  を変化した時の遠視野像のピーク位置を示す。遠視野像のピーク位置は、規格化電流  $i_A$  を増やすにしたがって、 $-1.3^\circ$  から  $+1.0^\circ$  の範囲で連続的に変化している。つまりこの  $i_A$  が 0.4 から 0.75 の範囲で、偏向角度は線形に変化しているといえる。このような実験結果は、出射ビームは  $2\sim 3^\circ$  連続的に偏向できるという向井による計算結果と一致している<sup>9)</sup>。

以上述べてきた遠視野像の測定結果に加えて、遠視野のある一点に置かれた光検出器で検出する光強度がビーム偏向中にどのように変化するかという点も重要である。これは、光ファジーコントロールシステム等でビーム偏向レーザを用いて光信号処理を行なう場合に重要な特性である<sup>10)</sup>。このシステムでは、光検出器は遠視野のなかの一点におかれ、ビーム偏向レーザに注入する電流値が変化した時に光検出器で検出される光強度の変化によって光論理演算が行なわれる。そのため、光検出器を遠視野の一点に配置し、全注入電流値  $I_{A+B}$  がしきい値の 1.5 倍になる条件のもとに光検出器で検出される光強度を測定した結果を Fig. 5 に示す。光検出器の位置が  $-1^\circ, 0^\circ, +1^\circ$  の時に検出される光強度を規格化電流値  $i_A$  の関数とし

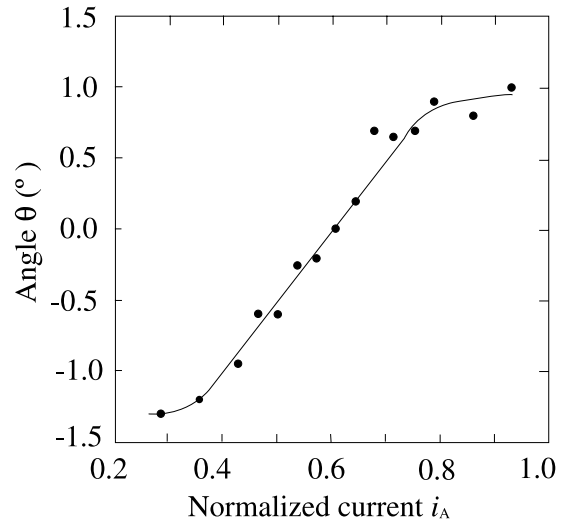


Fig. 4 規格化電流  $i_A$  とピーク位置の関係  
電極 A と電極 B に注入される全電流量は、しきい値の 1.5 倍で一定に保っている。

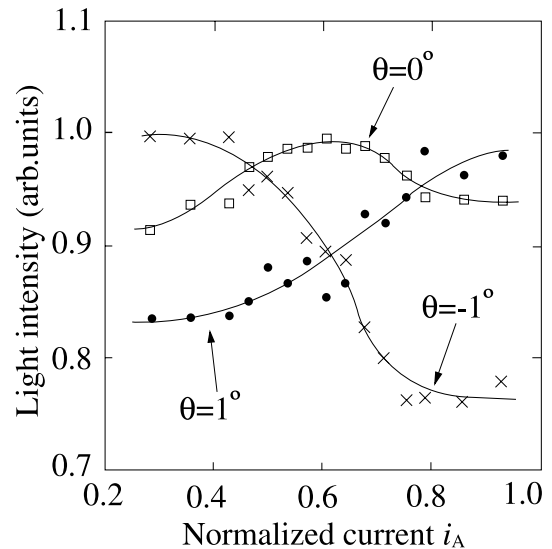


Fig. 5 遠視野像において、 $0^\circ$  と  $\pm 1^\circ$  における光強度が規格化電流  $i_A$  を変化するときどう変わるかを示した図。電極 A と電極 B に注入される全電流量は、しきい値の 1.5 倍で一定に保っている。

て示す。規格化電流  $i_A$  が増加すると  $-1^\circ$  の光検出器で検出される光は減少し、 $+1^\circ$  の光検出器で検出される光は増加することがわかる。 $0^\circ$  の光検出器で検出される光は規格化電流  $i_A$  のガウス関数のような形をしており、このような特性が、まさしく光ファジー演算が必要とされるものである<sup>10)</sup>。

Fig. 3-5 に示した結果は、ツイストライプレーザの出射ビームの偏向角度と比較するとやはり小さい。このような特性は、活性領域のキャリア密度分

布により生じた利得と屈折率の分布に依存していると考えられる。そこで、そのようなビーム偏向面発光レーザ中の活性領域のキャリア密度分布により生じた利得や屈折率分布による光導波効率を、ツインストライプレーザの場合と比較するために、ツインストライプレーザで測定されているのとおなじ偏向特性<sup>11)</sup>を測定した。ツインストライプレーザもやはり2つのp型電極に注入する電流を制御することによってビーム偏向がなされる。そして光出射パワー一定のもとに二つの電極に注入した時の出射ビームの偏向特性が測定されている。

Fig.6 に光出力が0.25mW一定のもとで測定した結果をしめす。この光出力のときビーム偏向角度は最大であった。Fig.6に示す結果は、各々の電極に注入する最大注入電流で規格化した電流値つまり、電極Aへの規格化電流値  $I_A/I_{Amax}$  と電極Bへの規格化電流値  $I_B/I_{Bmax}$  の、光出力一定のもとでの関係を示したものである。ここで電極Aに注入される最大電流値  $I_{Amax}$  は、電極Bへの電流値  $I_B$  が0の時の電極Aへの電流値である。おなじく電極Bに注入される最大電流値  $I_{Bmax}$  は、電極Aへの電流値  $I_A$  が0の時の電極Bへの電流値である。またFig.6に示す曲線は、電極Bつまり等光出力曲線と名付けられるものである。

ここで比較の為にFig.6中にツインストライプレ-

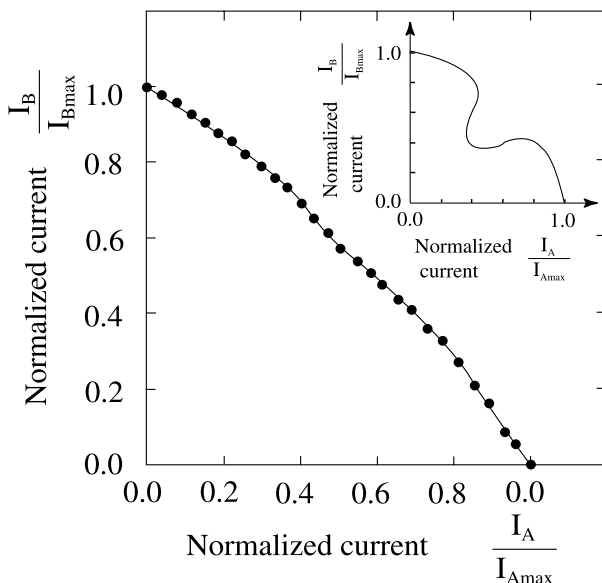


Fig.6 光出力が一定になる時の、電極Aと電極Bから注入される電流の関係。おのおのの電流値は、最大電流値で規格化してある。

ザの等光出力曲線を示す。これらの二つの曲線を比較すると明白であるが、ビーム偏向面発光レーザの場合、この等光出力曲線はほぼ直線的に変化するのに対して、ツインストライプレーザの場合には、 $I_A/I_{Amax}=I_B/I_{Bmax}$  の時に大きな凹みがある。この凹みは、キャリアが存在することにより生ずる活性領域の屈折率変化が、共振器内の光分布に与える影響によるものである。電極の直下もしくは近辺の活性領域は注入電流が大きい為キャリア密度が高くなる。屈折率はキャリア密度が高くなると低くなるため、キャリア密度が大きい所は光が導波しにくくなる。しかしキャリア密度が高い所の方が利得は高く、両者の兼ね合いにより光分布が変化するわけである。ツインストライプレーザの場合の凹みは、二つの電極から均一に電流が注入された場合に起きており、この時  $I_A+I_B$  は最小になっている。即ちもっとも電気-光変換の効率の高い時が凹みに相当する。これは、二つの電極直下の屈折率が低くなる、言い替えれば二つの電極間の活性領域の屈折率が高くなり、これにより光が二つの電極間の中央に導波されて、結果的に最大の利得を得たためと考えられる。しかし、ビーム偏向面発光レーザの場合にはこのような凹みはほとんどない。これはそもそも活性領域内で利得分布や屈折率変化が生じて光分布に大きく影響を与えないことを示している。

よって、より大きなビーム偏向角度をビーム偏向レーザで達成するには、構造の最適化が必要である。ツインストライプレーザの解析と同様に、ビーム偏向角度は、活性領域内での横方向の利得分布の傾き  $g$  に依存すると考えられる<sup>9)</sup>。

$$g = G/x$$

ここで  $G$  は活性領域内への光閉じ込め係数、 $x$  は活性領域内横方向の利得の傾きである。ビーム偏向面発光レーザの場合には、共振器長さを  $L$ 、活性領域の厚さを  $d$  とすると光閉じ込め係数は  $d/L$  となる。今回の実験では活性領域は4ペアの量子井戸であり、一つの井戸が100Åなので活性領域の厚さ  $d$  は400Åである。また半導体多層膜反射鏡の有効長は1.2  $\mu\text{m}$  であり、その結果、光閉じ込め係数は0.018となる。ビーム偏向面発光レーザの場合にはこのように光閉じ込め係数が小さいために活性領域内の利得分布や屈折

率変化が光分布に与える影響が少なく、その結果ビーム偏向角度が小さいと考えられる。

光閉じ込め係数を大きくする一つの方法は、活性領域を多重量子井戸をやめてバルクの活性領域にすることである。これにより活性領域の厚さを  $0.5\ \mu\text{m}$  程度に増やすことが可能である。また、半導体多層膜反射鏡の代わりに誘電体多層膜反射鏡を用いて有効長を短くし、共振器長を短くする方法も考えられる。しかし一方で、バルクの活性領域はしきい値が高くなる、誘電体多層膜反射鏡は電流が流せず熱伝導率が小さい、などの欠点があり、これらを勘案しながら総合的にデバイスを設計する必要がある。

#### § 4 結論

2 分割された p 型電極構造となっている面発光レーザーを用いて出射ビームの偏向を行なった。2 分割電極を通して活性領域に注入する電流を制御することにより  $-1.3^\circ$  から  $+1.0^\circ$  の範囲でビーム偏向を行なうことができた。またビーム偏向レーザーが、光ファジーシステムなどに応用可能であることを示した。今後 4 分割電極構造等を採用することにより出射ビームを 2 次元的に偏向することが可能と考えられる。

次に、ビーム偏向面発光レーザーの時間応答性について考察する。本研究の方法におけるビーム偏向面発光レーザーやツインストライプレーザーでは、活性領域内のキャリア分布が変化する事により光分布が変化し、その結果、出射ビームが偏向する。活性領域内のキャリアが拡散現象により移動したり、自然放出光を放射して消滅したりする現象の時定数は数 ns 程度であり、変調速度は数百 MHz 程度になる。空間的なビーム偏向の時間応答性もこれに準じたものになる。

今後ビーム偏向機能の実用性を考えるならば、たとえば機械的部品のないスキャナーのヘッドや、あるいは高速スキャンを行なう光センサーなどへの実際のターゲットを明確に、そのシステムのなかでの必要とされる速度、精度、多重度、消費電力、素子寿命等のスペックにあった素子開発が必要と考えられる。

#### 謝 辞

本研究を遂行する上で数多くの方々にご協力を頂

いた。MOCVD法によるウエハの成長と素子作成、および測定等は著者らが行なったが、その他は以下の方々にご協力による。

ツインストライプレーザーの研究を実際に主体となつて行なってきた向井誠二氏には、素子設計や面発光レーザーとの比較、数値解析による検討等幅広い範囲でご協力を頂いた。特筆すべきことは、向井誠二氏はツインストライプレーザーを電総研で初めて開発し、その知識とアドバイスがビーム偏向面発光レーザーの作成上必要不可欠であった。

また短期間で素子用の半導体基板が成長可能であったのは、電子デバイス部の王学論氏の日頃からの努力による。成長時のドーピング量および成長速度等のきちんとしたデータがあったことと、日頃からの好意的な協力があつたため素子用基板の成長が究めてスムーズに達成できた。

フォトレジストのパターン用マスク作成は、元東海大学工学部岡田工氏と電子デバイス部小倉睦郎氏による。ビーム偏向面発光レーザーの作成に用いたマスクパターンは全て彼らの手によるものである。

出射ビームの偏向特性の測定システムは、光技術部伊藤日出男氏および元東海大学工学部菊地卓也氏らによるものを用いた。測定結果の数値データ化、遠視野像、近視野像等がスムーズに測定できたのは、彼らの努力による。また光ファジーシステムへの応用は伊藤氏のアイデアによる。

以上の方々には、深く感謝の意を表したい。

#### 参 考 文 献

- 1) K. Iga : Opt. Quant. Elect., **24** (1992) S97.
- 2) D. V. Plant et al. : Appl. Opt., **35** (1996) 6365.
- 3) M. Ishikawa, N. McArdle : Computer, **31** (1998) 61.
- 4) L. Fan, M. C. Wu, H. C. Lee and P. Grodzinski : IEEE Photon. Technol. Lett., **9** (1997) 505.
- 5) D. R. Scifres, W. Streifer and R. D. Burnham : Appl. Phys. Lett., **33** (1978) 702.
- 6) S. Mukai, M. Watanabe, H. Itoh, H. Yajima, Y. Hosoi and S. Uekusa : Opt. Quant. Elect., **17** (1985) S431.
- 7) S. Mukai, H. Yajima, S. Uekusa and A. Sone : Appl. Phys. Lett., **43** (1983) 432.
- 8) M. Watanabe, I. H. White and J. E. Carroll : IEEE J. Quantum

Electron., **28** (1992) 395.

9) S. Mukai : IEICE Trans. Electron., E77-C (1994) 1479.

10) H. Itoh, M. Shimizu, M. Ogura, S. Mukai and M. Watanabe :  
Proc. SPIE, **3490** (1998) 70.

11) M. Watanabe, S. Mukai, H. Itoh, H. Yajima, M. Saito and K.  
Hasegawa : J. Appl. Phys., **68** (1990) 2599.

( 2000.3.3受付 )