



## 極微半導体光共振器

小山二三夫・伊賀 健一

東京工業大学精密工学研究所 〒227 横浜市緑区長津田 4259

(1990年6月7日受理)

### Semiconductor Optical Micro-Cavity

Fumio KOYAMA and Kenichi IGA

Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology,  
4259, Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 227

#### 1. はじめに

最近、極微光共振器を用いた半導体レーザーが注目されている。これは、レーザー共振器の大きさが光波長の数倍程度という従来の半導体レーザーに比べて2桁以上も小さい極微構造から成る。この新しい半導体レーザーは、基板と垂直方向に共振器を形成し、半導体基板の表面から光を射出する面発光レーザー<sup>1)</sup>の研究の進展から産まれたもので、高密度2次元集積性や極低しきい値動作などの優れた特性が期待されており、現在国内外の多くの研究機関で研究が進められている。とくに、ここ数年室温連続動作やサブミリアンペア動作が実現されるなど、その研究の進展には目を見張るものがある<sup>2-5)</sup>。

一方、このような極微光共振器を用いて自然放出光を制御し、非常にわずかな電流で動作する発光デバイスを実現しようという別の観点からの試みもなされている<sup>6)</sup>。

本稿では、半導体レーザーへの応用を目的とした極微半導体光共振器について述べる。まず、極微光共振器を用いた面発光レーザーの研究経緯について概説し、これを実現するための基盤技術について紹介するとともに、極微光共振器を用いた半導体レーザーの特性と将来展望について述べる。

#### 2. 極微光共振器と面発光半導体レーザー

半導体レーザーは固体レーザーや気体レーザーに比べると圧倒的に小さく、通常の半導体レーザーの長さは300  $\mu\text{m}$ 程度である。しかし、波長0.88  $\mu\text{m}$ のレーザー

を考えると、共振器内に数千という多数の節をもつ定在波が立ち、多数の縦モードが活性層の利得帯域幅(数百Å)に存在することになる。この場合には、原理的に多数のモードが発振可能であり、わずかな温度変化や動作電流の変化でモードが跳んだりする。これに対して、共振器長が1  $\mu\text{m}$ の極微レーザー共振器が実現できれば縦モード間隔は1,000 Åを越えるため、利得帯域幅に一つしか縦モードが存在しなくなる状況になる。このような極微共振器構造の半導体レーザーは、面発光レーザーと呼ばれる共振器の形成方向を基板と垂直に変えた新しい構造で最初に試みられた。著者らの研究グループは、1977年にこの面発光レーザーを提案し、1979年に世界に先駆けて初めて電流注入による面発光レーザーのレーザー発振を実現した<sup>7)</sup>。ここでは、波長1.3  $\mu\text{m}$ 帯のGaInAsP/InP系を用いており、温度77 Kにおけるパルス動作で発振しきい値電流は700 mAと高かった。この面発光レーザーは、レーザー反射鏡が半導体結晶表面から構成され、基板表面から光を取り出すことを特徴としている。その後、基板における光吸収を除去して良好な反射鏡を形成するために、基板をエッチングにより取り除いて10  $\mu\text{m}$ 以下の短共振器構造を導入した<sup>8)</sup>。これが、利得帯域幅に縦モードが数個しか存在しない微小半導体レーザーの最初のレーザー発振であろう。

図1に極微共振器をもった面発光レーザーの概念図を示す。レーザー共振器は上下二つの反射鏡で構成された共振器長 $\sim$ 数  $\mu\text{m}$ のファブリ・ペロー共振器となっており、基板と垂直方向に発振し、出力光は表面から取り出される。このような極微共振器のレーザーを発振させ

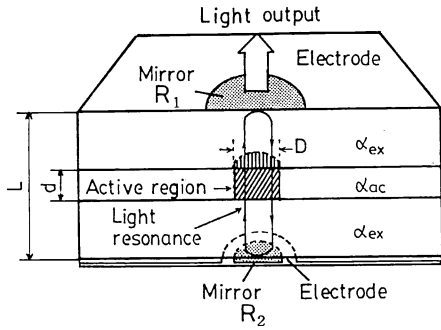


図1 極微光共振器をもった面発光レーザーの概念図

るためには、レーザー反射鏡の高反射率化と微小領域にキャリアを閉じ込める電流狭窄構造がとくに重要であり、埋込み構造等の電流狭窄構造の開拓<sup>9)</sup>や、誘電体多層膜<sup>10)</sup>や半導体多層膜<sup>11-13)</sup>が導入されてレーザー反射鏡の高反射率化が進められた。その結果、低しきい値動作が示されるとともに<sup>2)</sup>、室温における連続発振が実現された<sup>3)</sup>。

さて、著者らの研究が契機となって、他の研究機関でも面発光レーザーの研究が始められ、ここ数年における面発光レーザーの研究の進展には目を見張るものがある。分子線エピタキシー法や有機金属気相成長法などの膜厚制御性に優れた結晶成長法の導入により、高反射率の半導体多層膜反射鏡が形成されるようになり、良質な極微光共振器が実現されるようになってきている<sup>4,5,14)</sup>。三洋電機の茂木らは、半導体多層膜反射鏡を用いた埋込み形面発光レーザーで、しきい値 5.2 mA の室温連続発振を実現した<sup>14)</sup>。また、AT&T ベル研究所の Jewell らが直径 2~3 μm、活性層厚み 80 Å のマイクロ共振器を形成し、しきい値 1.2 mA を実現している<sup>4)</sup>。また、ごく最近、カリフォルニア大学サンタバーバラ校から、0.7 mA のしきい値が報告され<sup>5)</sup>、今後の飛躍的發展を予見するようなデータが出始めており、2次元集積化と極低しきい値動作を目指した研究がなされている。

また、3次元的に光の波長程度の大きさの共振器に光を閉じ込めた微小閉共振器レーザーについて、異なる観点からの提案が成されるとともに<sup>15)</sup>、ごく最近では自然放出の制御にこのような極微共振器を応用しようという試みがなされている<sup>6,16)</sup>。

### 3. 半導体レーザーの極微化による低しきい値電流化

図1に示される面発光レーザーの発振に必要なしきい

値利得  $g_{th}$  は活性層厚を  $d$ 、電力反射率  $R_1, R_2$  の反射鏡で作られるファブリ・ペロー共振器の平均反射率を  $R_m(=\sqrt{R_1R_2})$ 、共振器長を  $L$ 、活性層およびクラッド層での損失をそれぞれ  $\alpha_{ac}, \alpha_{ex}$  とすると式(1)で与えられる<sup>1)</sup>。

$$g_{th} = \alpha_{ac} + \alpha_{ex} \left( \frac{1}{\xi} - 1 \right) + \frac{1}{\xi L} \ln \left( \frac{1}{R_m} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\xi$  は共振モードが活性領域に閉じ込められる割合を示す、いわゆる光閉じ込め係数である。

式(1)から、長さが数 μm の極微光共振器の場合には第3項のミラー損失を抑えるために、高い反射率が要求されることがわかる。GaAs 系のレーザーに対して、単位面積当りに必要なしきい値電流密度の計算結果を図2に示す。反射率  $R_m$  を高めるほどしきい値電流密度は下がり、レーザー発振はそれだけ容易となる。一方、活性層厚が極端に薄く利得領域長が短すぎると、しきい値利得は高くなりレーザー発振は困難になり、厚くしすぎてもしきい値電流は高くなるため、活性層厚には最適値が存在する。反射率が上がるほどしきい値電流密度が最小になる活性層厚は薄くなるため、実際には、常に反射率を高める努力をしながら活性層厚を薄くしていくことが極微化による低しきい値化には重要となる。反射率が 99.9% まで高めることができれば、最適活性層厚は 100 Å オーダーまで薄くできる。また、活性層厚が 100 Å 程度になると電子およびホール状態密度が離散的になり、量子効果により、さらにしきい値は低くなり、およそ 60% 程度のしきい値の低減が期待できる。

しきい値電流を下げるためには、横方向の大きさも小さくしなければならない。図3は、共振器内に5%の屈折率差をもつ円筒状の導波路を設けた極微構造レーザ

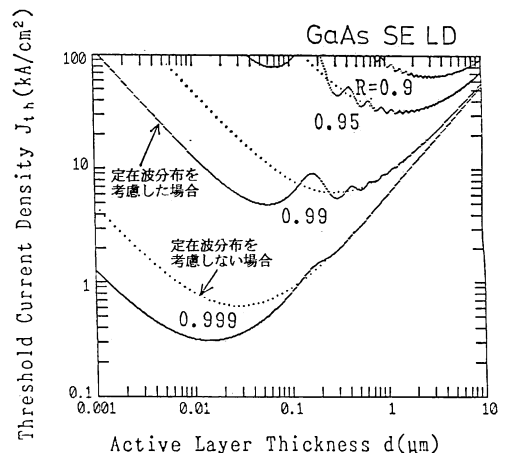


図2 面発光レーザーのしきい値電流密度

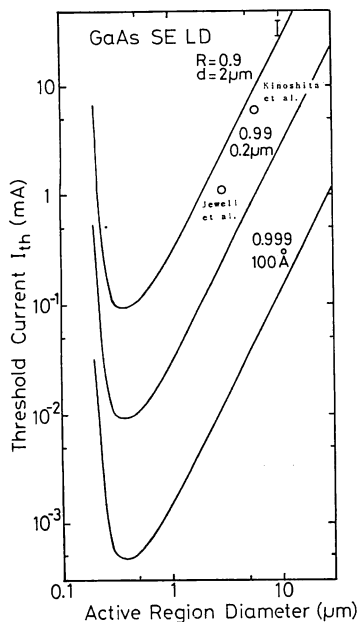


図3 面発光レーザーのしきい値電流

一のしきい値と活性領域(導波路)径の関係を示している。直径  $1 \mu\text{m}$  以下で  $1 \mu\text{A}$  以下の極低しきい値も期待できる。直径を極端に小さくしたときに発振しきい値が上昇するのは、横方向の光閉じ込め係数が減少して共振モードの受ける利得が減少するためである。

このように、極微化を進めることによりマイクロアンペアオーダの低しきい値動作が期待できる。これを実現するためには、次に述べるような 99% 以上の高反射率反射鏡の形成技術と半導体の微細加工による 3 次元的な極微光共振器製作の基盤技術の開拓が不可欠である。

#### 4. 極微光共振器の形成技術

##### 4.1 多層膜反射鏡

光の領域で 99% 以上の高い反射率を実現する反射鏡として、屈折率の異なった誘電体を周期的に積層した多層膜反射鏡がある。SiO<sub>2</sub> などの誘電体を用いたものと半導体レーザーと同じ III-V 族半導体材料を用いたものに分類される。

##### 4.1.1 誘電体多層膜反射鏡

ここでは、SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 誘電体多層膜反射鏡の設計および製作について述べる。特性マトリックス法を用いて多層膜反射鏡の反射率と透過率について求めた<sup>10)</sup>。近赤外で透明な SiO<sub>2</sub> ( $n=1.45$ )、TiO<sub>2</sub> ( $n=2.5$ ) を GaAs ( $n=3.59$ ) 基板上に光学的な厚み  $\lambda/4n$  ( $\lambda=0.88 \mu\text{m}$ ) で交互に積み重ねた誘電体多層膜の反射率の計算結果の

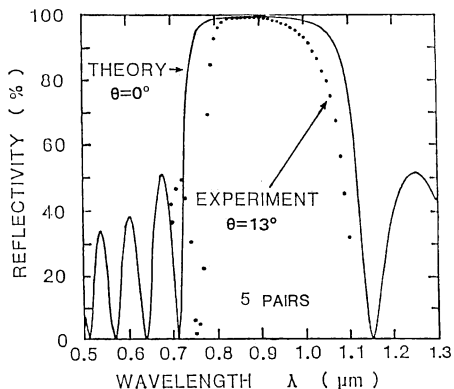


図4 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 誘電体多層膜の反射率 ( $\theta$  は試料への入射角を示す)

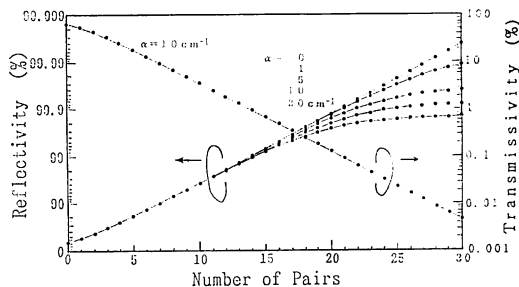


図5 AlAs/GaAlAs 半導体多層膜の反射率と透過率<sup>19)</sup>

一例を図4に示す。高反射率が得られる波長領域が約  $3,000 \text{ \AA}$  と広いので、温度変化により発振波長が変化しても発振波長における反射率はほとんど影響しない。

電子ビーム蒸着による SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> 多層膜の実際の形成法について述べる。TiO<sub>2</sub> などの酸化物の蒸着の際には、酸素欠損による吸収増加を防ぐために酸素を導入するなどの工夫が重要である。SiO<sub>2</sub> と TiO<sub>2</sub> を GaAs 基板上に 5 対蒸着した多層膜の反射率の測定結果を図4に示す。波長  $\lambda=0.88 \mu\text{m}$  において、ほぼ理論値に近い反射率 99% を得ている。現在、光学モニターを導入して層厚の超精密制御を行い、さらに反射率の向上を試みている。

##### 4.1.2 半導体多層膜反射鏡

半導体多層膜反射鏡は、組成の異なる半導体材料を  $1/4$  波長の光学的厚さで交互に積み重ねて高反射率の反射鏡となることを利用したもので、これはレーザーウェハ成長時に同時に反射鏡の形成が可能であり、また、近年の半導体薄膜の成長技術の発展によって、きわめて良質な反射鏡の形成が可能になっている。図5に、AlAs と Ga<sub>0.9</sub>Al<sub>0.1</sub>As から成る半導体多層膜反射鏡の層数に

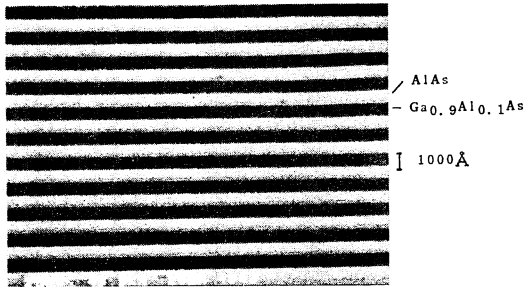


図 6 MOCVD で成長した AlAs/GaAlAs 多層膜の SEM 断面写真<sup>17)</sup>

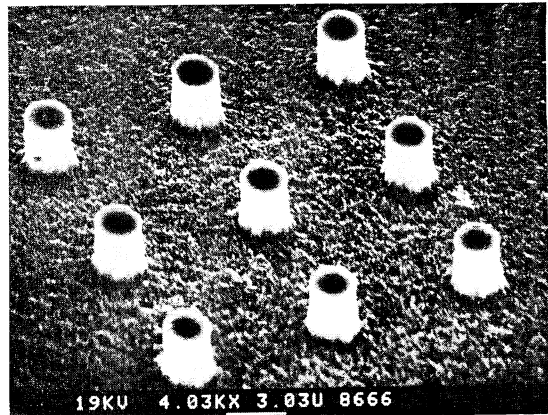
対する反射率と透過率の計算結果を示す。25 対の多層膜で 99.9% 以上の高い反射率も実現可能であることがわかる。

図 6 に、MOCVD 法で成長した 15 対の AlAs/Ga<sub>0.9</sub>Al<sub>0.1</sub>As 半導体多層膜の電子顕微鏡による断面写真を示す。層厚はそれぞれ 720 Å と 640 Å である。GaAs 系半導体レーザーの発振波長 0.88 μm で、反射率 97% を得ている。半導体多層膜の場合、不純物を添加することにより、多層膜を通して電流を活性層に流すことが可能である。実際に電流注入形面発光レーザーへ応用して、良好なレーザー発振を得ている<sup>13)</sup>。しかし、多数のヘテロ障壁を含むため低抵抗の p 型伝導を得るのが困難であり、多層膜反射鏡を電流注入型レーザーに用いる場合、低抵抗化が今後の課題として残されている<sup>17)</sup>。

#### 4.2 半導体微細加工

横方向の大きさを波長の数倍程度まで微小化する極微光共振器を実現するためには、より精度の高いエッチング法、すなわちエッチング断面の垂直性および均一性に優れたドライエッチングの導入が必要になってくる。現在ドライエッチング技術は半導体デバイス等の微細化、高密度集積化のために必要不可欠なものとなりつつあり、さまざまな方法が研究されているが、イオンビームエッチング (ion beam etching; IBE)、反応性イオンエッチング (reactive ion etching; RIE)、反応性イオンビームエッチング (reactive ion beam etching; RIBE) イオンビームアシストエッチング (ion beam assisted etching; IBAE) などがある。

RIBE に限っていうと、この装置は反応性ガスを使用したイオンビームエッチング装置に対応するため、プラズマ生成室とエッチング室が分離した構造になっている。ガス流量・排気速度・入射パワーを変えることでプラズマ密度を変えることができ、引き出し電圧を変えることで引き出されるイオンの量およびエネルギーを変えることができる。またプラズマ密度と引き出し電圧の



← 2.5 μm

図 7 反応性イオンビームエッチングで形成した微小円形メサ構造

双方を適当に選ぶことにより、引き出されるイオンとラジカル割合を変化させることができる。したがって RIBE では、エッチングパラメータを適当に選ぶことにより、さまざまなエッチング形態を自由に選ぶことができる。

図 7 は、InP 基板上に RIBE を用いて直径 2.5 μm の円筒状の柱を形成したものである<sup>18)</sup>。垂直性の優れた形状が得られており、電子ビーム露光法などを用いてより微細なマスクパターンを形成すれば、光の波長程度の微小光共振器の作製は可能である。しかし、レーザーに応用する場合は、エッチングによって形成された側壁の加工損傷が重大な問題である。とくに、それはサイズが小さくなってくると顕著になる。加速イオンのエネルギーの最適化やエッチング後の加工損傷除去が今後の研究課題である。

## 5. 極微構造半導体レーザーの現状

### 5.1 発振特性

図 8 は、製作した GaAlAs/GaAs 系面発光レーザーの具体的な構造を示している<sup>3)</sup>。活性層厚は 2.5 μm、共振器長は 5 μm である。2 回の常圧での MOCVD 法とフォトリソグラフィなどのプレーナ技術で製作されている。反射鏡として、前節で述べた誘電体多層膜 (反射率 95%) が用いられており、直径 5 μm の微小反射鏡で横モードが制御されている。室温パルス駆動で、しきい値電流 30 mA 程度、10 mW 以上の光出力が得られた。外部微分子効率率は約 10% である。長さ 5 μm という微小共振器のレーザーとしては初めての室温連続動作も得られている。図 9 は、このレーザーの発振スペクトル

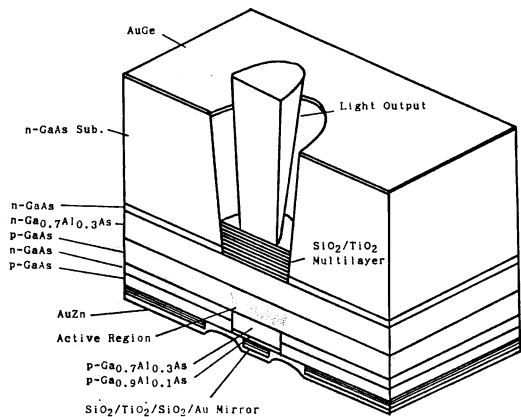


図8 GaAs系面発光レーザーの構造<sup>3)</sup>

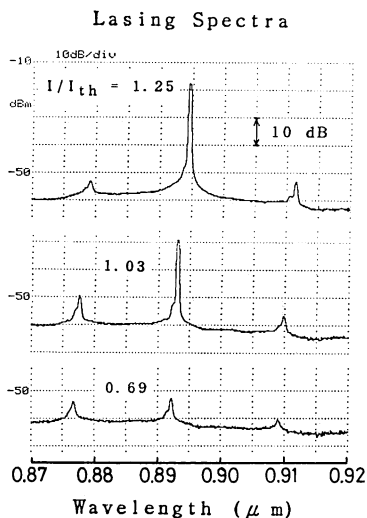


図9 発振スペクトル

を示している。この素子では、縦モード間隔は160であり、これは通常のスライプ構造のレーザーに比べて約50倍大きい。発振モードに対して隣接の縦モードの相対光強度は、 $-35$  dB以下に抑圧されており、極短共振器構造による良好な単一波長性を示した。また、温度特性を測定したところ波長の温度係数は $0.07$  nm/KでDFBレーザーやDBRレーザーの動的単一モードレーザーと同様に小さく、単一波長動作する温度範囲も $50$  K以上得られている。

スペクトル線幅(半値全幅)は $50$  MHzであり<sup>19)</sup>、通常の単一モードレーザーと同程度の高いコヒーレンス性をもっている。長さ $5$   $\mu$ mの微小共振器ではあるが、 $95\%$ 程度の高反射率反射鏡を用いているため、高い共振器 $Q$ 値が維持されたためである。測定結果はミラー反射率を $95\%$ としたときの理論値にほぼ一致している。現

状のデバイスでは熱的要因により連続光出力が $1$  mW程度に制限されているが、放熱等の改善により高出力化を進めれば、さらに狭線幅化が可能と考えられる。

### 5.2 2次元レーザーアレイ

極微共振器を用いた面発光レーザーの大きな特徴として、光の特徴を十分に生かした並列光通信や情報処理への発展性をもつ2次元レーザーアレイを構成できることが挙げられる。ここでは、初期的な実験として、 $5 \times 5$ の面発光レーザーを集積した2次元レーザーアレイについて紹介する(図10)。各素子の構造はMOCVD法による埋込み構造で、各レーザーの電極は共通であり、すべて同時に電流注入を行った。素子の間隔は $20$   $\mu$ mであり、このような高密度2次元集積は面発光レーザーで初めて可能になる。また、直径 $25$   $\mu$ mの領域に $1.3$   $\mu$ m径の極微レーザーを160素子並べた報告もなされている<sup>21)</sup>。

### 5.3 低しきい値化

活性領域を極微化することにより、低しきい値化が進められている。図11、図12はAT&TのJewellらによる半導体多層膜反射鏡を用いた極微構造面発光レーザー

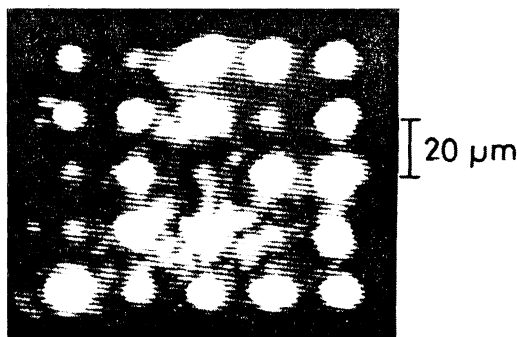


図10 2次元レーザーアレイの発光近視野像<sup>20)</sup>

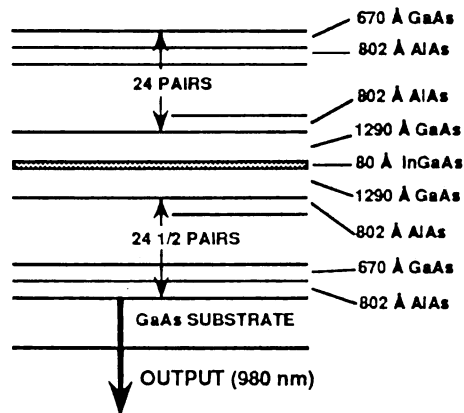


図11 極微共振器InGaAs/GaAs面発光レーザー<sup>4)</sup>

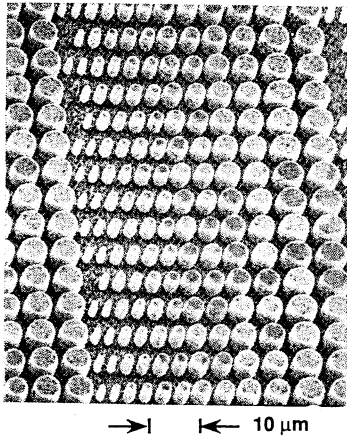


図 12 同一基板上に並べた 100 万個の極微レーザー<sup>4)</sup>

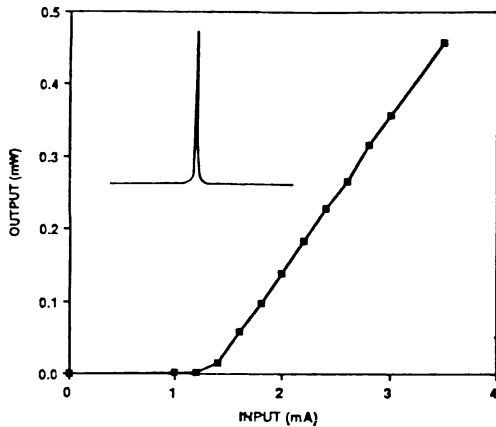


図 13 極微構造面発光レーザーの極低しきい値動作<sup>4)</sup>

一の構造と外観写真である<sup>4)</sup>。共振器方向は分子線エビタキシー法で形成した GaAs/AlAs の半導体多層膜反射鏡を両側に用いており、反射率は 99.9% 以上と推定されている。この高反射率化により活性領域の長さは  $80 \text{ \AA}$  まで薄膜化されている。横方向はさらにドライエッチング法を用いて直径数  $\mu\text{m}$  から  $10 \mu\text{m}$  程度までの極微共振器を形成している。図 13 に示すように、最低  $1.2 \text{ mA}$  の低しきい値動作が実現されている。また、UCSB の Coldren らのグループでは同様な構造で、しきい値  $0.7 \text{ mA}$  のサブミリアンペア動作を実現している<sup>5)</sup>。しかし、この値は理論的に予想される値よりもまだ 2 桁程度高いものであり、原因としては微小共振器の側壁におけるキャリアの非発光再結合が考えられている。マイクロアンペアオーダーの低しきい値デバイスを実現するためには、パッシベーション技術の開拓と洩れ電流の少ない良質な微小埋込みヘテロ構造の実現が望ま

れる。

## 6. む す び

共振器の大きさが数  $\mu\text{m}$  の極微構造の半導体レーザーが実現され、動作電流もサブミリアンペアが達成されるようになった。これは、半導体の薄膜形成技術や微細加工などの基盤技術の進展によるところが大きい。今後、さらに極微化が進められ、サブミクロンの極微光共振器の形成が行われよう。加工損傷の低減や、有効にキャリアを閉じ込める微小ヘテロ構造の開拓などの技術的課題を克服することにより、マイクロアンペアの低電流で動作するレーザーデバイスの実現も夢ではない。このようなデバイスが実現されれば、大規模集積回路における高速光配線や光ニューロコンピュータなど、光エレクトロニクスも光通信や光記録・計測から、並列光情報処理を加え、新しい発展が期待される。

## 文 献

- 1) K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita: "Surface emitting emiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-24** (1988) 1845-1855.
- 2) K. Iga, S. Kinoshita and F. Koyama: "Microcavity GaAlAs/GaAs surface emitting laser with  $I_{th}=6 \text{ mA}$ ," Electron. Lett., **23** (1987) 134-136.
- 3) F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga: "Room temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser," Trans. IEICE Jpn., **E71** (1988) 1089-1090.
- 4) J.L. Jewell, A. Scherer, S.L. McCall, Y.H. Lee, S. J. Walker, J.P. Harbison and L.T. Florez: "Low threshold electrically-pumped vertical-cavity surface-emitting micro-lasers," Electron. Lett., **25** (1989) 1123-1124.
- 5) R.S. Geels, S.W. Corzine, J.W. Scott, D.B. Young and L.A. Coldren: OFC '90, Postdeadline Paper, PD-13 (1990).
- 6) H. Yamamoto, S. Machida, K. Igeta and Y. Horikoshi: 16th International Conf. on Quantum Electron., WB-2 (1988).
- 7) H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu: "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1989) 2329-2330.
- 8) Y. Motegi, H. Soda and K. Iga: "Surface emitting GaInAsP/InP injection laser with short cavity length," Electron. Lett., **18** (1982) 461-463.
- 9) S. Kinoshita and K. Iga: "Circular buried heterostructure (CBH) GaAlAs/GaAs surface emitting lasers," IEEE J. Quantum Electron., **QE-23** (1987) 882-888.
- 10) S. Kinoshita, T. Sakaguchi, T. Odagawa and K. Iga: "GaAlAs/GaAs surface emitting laser with high reflective  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  multilayer reflector," Jpn. J. Appl. Phys., **26** (1987) 410-415.
- 11) M. Ogura, T. Hata and T. Yao: "Distributed feedback surface emitting laser diode with multi-

- layered heterostructure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) L512-L514.
- 12) A. Chailertvanitkul, K. Iga and K. Moriki: "GaInAsP/InP surface emitting laser ( $\lambda=1.4\ \mu\text{m}$ ) with heteromultilayer Bragg reflector," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 303-304.
  - 13) T. Sakaguchi, F. Koyama and K. Iga: "Vertical cavity surface emitting laser with an AlGaAs/AlAs Bragg reflector," *Electron. Lett.*, **24** (1988) 928-929.
  - 14) A. Ibaraki, K. Kawashima, K. Furusawa, T. Ishikawa, T. Yamaguchi and T. Niina: "Buried heterostructure GaAs/GaAlAs distributed Bragg reflector surface emitting laser with very low threshold (5.2 mA) under room temperature cw conditions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L667-L668.
  - 15) 小林哲郎, 瀬川太郎, 森本朗裕, 末田 正: "自然放出を制御した新形のレーザ, 発光素子, 光機能素子", 応用物理学会秋季全国大会, 29a-B-6 (1982).
  - 16) H. Yokoyama, K. Nishi, T. Anan and H. Yamada: Topical Meeting on Quantum Wells for Optics and Optoelectronics (1989).
  - 17) 坂口孝浩, 小山二三夫, 伊賀健一: "半導体多層膜分布ブラッグ反射鏡を用いる面発光レーザの設計と製作", *レーザ研究*, **18** (1990) 38-46.
  - 18) T. Tadokoro, F. Koyama and K. Iga: "Classification of etching mechanism in reactive ion beam etch," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B7** (1989) 1111-1114.
  - 19) M. Tanobe, F. Koyama and K. Iga: "Spectral line-width of a GaAlAs/GaAs surface emitting laser," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1444-1446.
  - 20) F. Koyama, K. Tomomatsu and K. Iga: "GaAs surface emitting lasers with circular buried heterostructure grown by metalorganic chemical vapor deposition and two-dimensional laser array," *Appl. Phys. Lett.*, **52** (1988) 528-529.
  - 21) H. J. Yoo, A. Scherer, J. P. Harbison, L. T. Florez, E. G. Paek, B. P. Van der Gaag, J. R. Hayes, A. Von Lehmen, E. Kapon and Y. Kwon: "Fabrication of a two-dimensional phased array of vertical-cavity surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **56**(1990) 1198-1200.