

面発光レーザーの低閾値化

小山 二三夫

光技術も複数のコンピューターやLSIチップ間を結ぶ光インターコネクション、さらには並列光情報処理システムなど、いわば新しい光エレクトロニクスへの展開が期待されている。このような大規模並列光システムを構築するために、低消費電力、2次元集積性といった特徴をもつ面発光半導体レーザーが生み出された¹⁻⁴⁾。面発光レーザーの研究は、現在世界数十か所の研究機関で精力的に研究開発が進められ、マイクロアンペアのオーダーまで、低閾値電流化が進められている⁵⁻⁸⁾。面発光レーザーは、消費電力が小さい、2次元アレイ化が可能、ウェハー単位での性能試験が可能であるなど、従来構造の半導体レーザーに比べて多くの利点がある。

面発光レーザーは1977年に提案され、1979年に初めて液体窒素温度77Kでパルス発振が実現された²⁾。その後、0.85 μm 帯のGaAs系面発光レーザーの研究が開始され、1986年に6mAの低閾値動作³⁾、1988年に初めて室温連続動作が達成された⁴⁾。その翌年に当時AT&Tベル研究所のJewellらが、半導体多層膜反射鏡を用いて、活性領域を厚さ数十nmの量子井戸構造まで薄くし、横方向も半導体の微細加工で10 μm 以下まで微小化して、1mA程度の低閾値素子を実現した⁵⁾。これらの研究が契機となって、面発光レーザーの研究者が世界的に急激に増大し、光エレクトロニクスに関する多くの国際会議において数十の研究論文が発表、年間400編近くの学術論文が出版されるようになり、新しい光デバイスの分野が構築された。面発光レーザーの研究は、現在、世界数十か所の研究機関で精力的に研究開発が進められ、特にコンピューター間を結ぶ光インターコネクションに近い応用分野として着目され、サブミリ

アンペアの低閾値素子の実現や、最近では米国で波長1 μm 付近の近赤外波長での商品化が進められている。また、その発光波長も紫外～近赤外の広い波長帯で研究が進められ、今後いろいろな応用分野への展開が期待されている。

性能面で、この数年での進展は、特に目を見張るものがある。図1は、面発光レーザーが誕生してから今日までの、面発光レーザーの閾値電流の推移を示している⁹⁾。閾値電流は、コンパクトディスクなどで使用されている市販のものでは、通常数十mA程度の値である。図1では、いろいろな材料系や動作温度が入り交じったデータをまとめたものであるが、およそ1桁/4年の割合で減少しており、現状でも、すでに市販の通常の半導体レーザーに比べて、3桁以上小さいことになる。また、この勢いでいくと2000年には面発光レーザーの閾値電流もnA(10^{-9} A)の領域に突入するとの予測も立てられる。このように、面発光レーザーは、通常の水平共振器型の半導体レーザーの特性を大きく凌駕しており、今後、さまざまな応用が期待されている。

ここでは、特にGaAs系面発光レーザーの最近の研究動向について、その低閾値化の進展を中心に、その動作特性について述べる。

1. 面発光レーザーの低閾値化の設計指針

半導体レーザーの低閾値化のためには、活性領域の体積を低減すればよい。体積を小さくしたときにも、発振に必要な活性領域の電子密度が変わらないとしよう。例えば、通常の半導体レーザーの活性領域として、厚さ0.1 μm 、幅2 μm 、長さ300 μm の板を考え、面発光レーザーとして、直径3 μm 、厚さ0.01 μm の円盤を想定すると、前者は $V=60\mu\text{m}^3$ で、後者は $V=0.07\mu\text{m}^3$ と約3桁も小さく、前者がミリアンペアオーダーの閾値電流とすると後者はマイクロアンペアとなる。しかし、レーザー共振器の長さを

東京工業大学精密工学研究所 (〒226-8503 横浜市緑区長津田4259)
E-mail: koyama@pi.titech.ac.jp

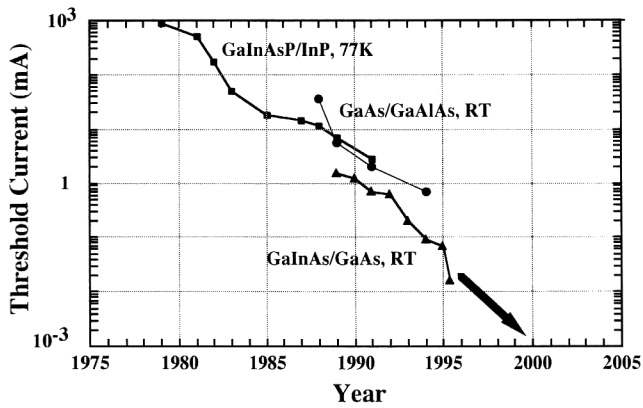


図1 面発光レーザーの低閾値化の推移⁹⁾.

短くしていくと、共振器の損失が増大して、発振に必要な電子密度が増大してしまうため、同時にレーザー共振器の反射率を上げていかなければならない。したがって、いかにしてレーザー共振器の光損失を小さくして、高い反射率のレーザー反射鏡を作れるかが技術的なポイントである。

2種類の異なる半導体を4分の1波長の厚さで交互に重ね合わせると、その干渉作用により光が強く反射される。面発光レーザーでは、高い反射率を実現するために、このような多層膜反射鏡が導入された。図2(a)は、多層膜反射鏡を用いた面発光レーザーの概念図を示している。この多層膜技術により、現在では結晶成長技術の進展もあり、99.9%以上の反射率の実現も可能である。また、この反射鏡を用いれば、結晶成長中にレーザー共振器を作ることができる。これが、面発光レーザーが、微小共振器化、すなわち低閾値電流化を行う上できわめて有利である点である。半導体の微細加工技術を用いれば、図2(b)に示すように、半導体基板上に多数の微小なレーザー共振器を一括して製作することが可能である。通常のレーザーの活性領域の長さ(共振器長)が300 μm 程度以上であるのに対して、面発光レーザーでは0.01 μm 程度にすることが可能であり、このような体積効果により劇的に閾値電流が低減できる。実際に、図1における低閾値化は、ほとんどレーザー共振器の微小化によるところが大きい。

さて、このような半導体の微細加工技術によって、閾値電流はどこまで下げられるのであろうか。活性領域の直径の2乗に比例して減少するはずであるが、図2に示すような簡単なポスト構造では、小さくなるとともに緩やかな減少になることが実験的にわかってきた。この原因は、活性領域の露出した側面における非発光再結合によるキャリア損失と、側面の粗さによる散乱による光学損失の双方の影響による。これは、共振器の横方向の大きさが小さくなればなるほど影響が大きくなり、閾値電流を低減する際の

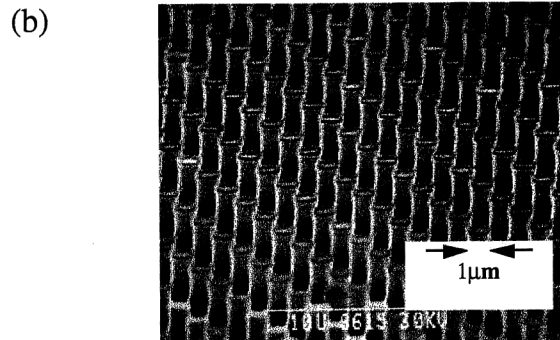
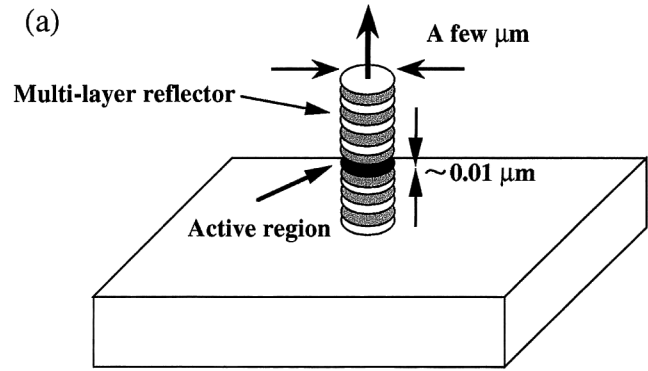


図2 (a) 半導体多層膜反射鏡を用いた面発光レーザー概念図、(b) 半導体微細加工で形成された多数の垂直共振器。

限界を与える。現状では、このような簡単な構造での低閾値化の限界は数百 μA である。この限界を打破するため、次節で述べるような新しい狭帯技術が生み出された。

2. 酸化膜を用いた光/電子の閉じ込め

図3は、AlAsの選択酸化膜を用いた狭帯構造を有する面発光レーザーの概念図である。AlAsの選択酸化プロセスは、イリノイ大学のHolonyakのグループで始められたものである¹⁰⁾。AlAs中のAlは、酸素との結合が強いため、きわめて酸化されやすい性質があり、大気中に放置すると即座にAl酸化物が形成される。しかし、この酸化物は、きわめて不安定であり、Alを含む光デバイスを大気中に放置した場合の劣化要因となる。しかしながら、400°C以上の比較的高温で水蒸気中にて酸化させると、きわめて安定な Al_xO_y が形成され、絶縁層が形成できる¹⁰⁾。また、この酸化速度がGaAlAsの混晶比 x に大きく依存するため、エッチングによって形成したメサの側面から選択的にAlAsのみ酸化させることにより、半導体中に酸化膜を形成することが可能である。テキサス大学のDeppeらは、この酸化プロセスを初めて面発光レーザーに導入して、低閾値素子の実現に成功した⁶⁾。また、Al酸化膜の屈折率が1.55程度と小さいために、いわゆる凸レンズのように光

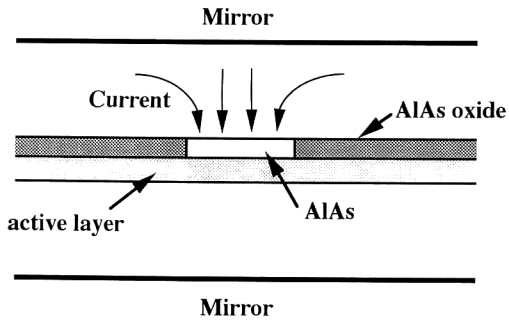


図3 AlAs酸化膜を用いて狭窄構造を形成した面発光レーザー。

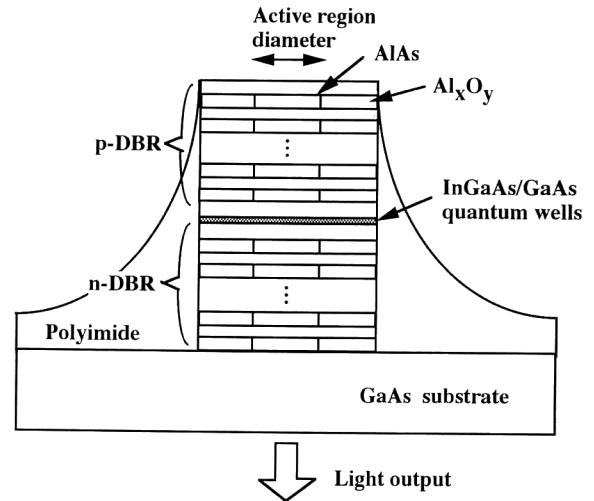


図5 選択酸化プロセスを用いた低閾値面発光レーザーの構造⁷⁾。

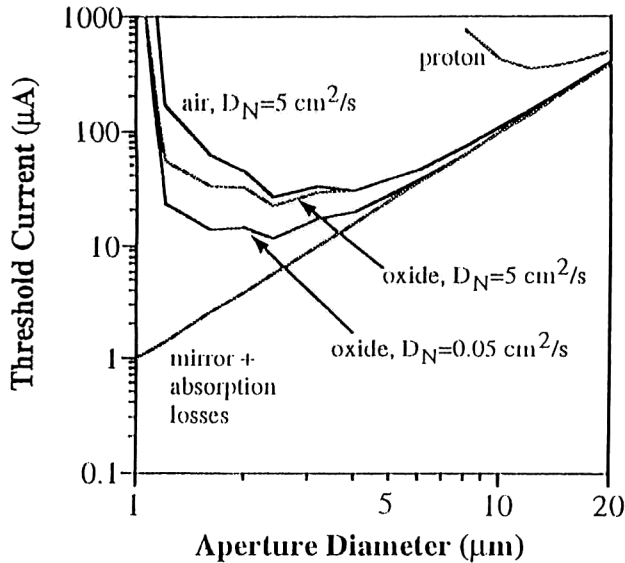


図4 酸化狭窄構造の直径に対する閾値電流の計算結果。直径2~3 μm 程度まで微小化が可能であることを示している¹¹⁾。

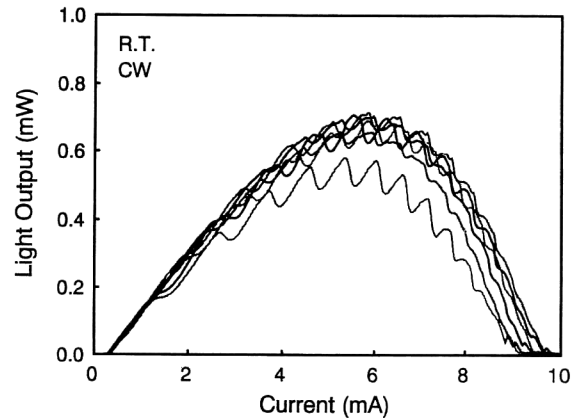


図6 低閾値素子の電流対光出力特性¹²⁾。

の集光作用が生じ、光の回折損失が大幅に低減しうることが明らかになってきた。したがって、この構造を用いれば、活性層を大気に露出することなく、光と電子を同時に微小領域に閉じ込める2重の閉じ込め作用が得られるため、それまで問題であった表面再結合と散乱損失を一挙に解決することができた。

図4は、3次元モデルのシミュレーションにより期待される閾値電流を狭窄構造の直径に対して示している¹¹⁾。この図からわかるように、直径3 μm 程度まで、光と電流をほぼ閉じ込めて、10 μA 程度の低閾値動作が期待できる。また、図5に示すように、単膜の酸化膜でなく、半導体多層膜構造の全体を酸化した多層膜構造の狭窄構造では、光ファイバーのような導波構造が共振器全体にわたって形成することも可能である⁷⁾。

3. 低閾値素子の発振特性

この酸化膜狭窄構造を用いることにより、0.98 μm 帯

中心に面発光レーザーの低閾値化の報告(テキサス大学: 225 μA ⁶⁾, 東工大: 70 μA ⁷⁾, 南カリフォルニア大学: 10~20 μA ⁸⁾)が相次いだ。図6は、GaInAs/GaAs系の面発光レーザーで、複数素子の電流対光出力特性を示している¹²⁾。サブミリアンペアの低閾値動作が比較的容易に得られる。

また、酸化膜閉じ込め構造では、閾値の低減もさることながら、駆動電圧の低減と微分効率の向上も達成された。これは、活性領域の近傍で電流狭窄が可能になったため、素子抵抗の主要因である多層膜の抵抗をその面積を拡大することにより実現される。このようにして、50%以上の電気光変換効率が達成された¹³⁾。これは、入力した電気エネルギーの50%以上が光に変換されるという驚異的な効率の高さである。また、これが数mAの低電流駆動で達成できるというのが、これまでの半導体レーザーとは異なる。つまり、低電流動作できわめて高い変換効率を実現できる。さらに、0.85 μm 帯素子に対して、変換効率57%が報

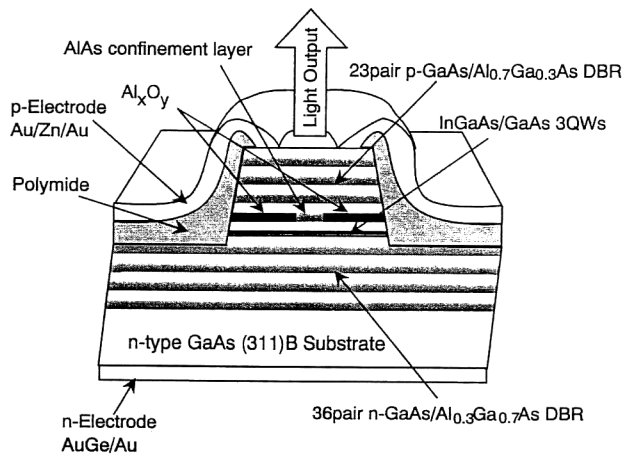


図7 (311)B 基板上の偏波制御面発光レーザー¹⁹⁾。

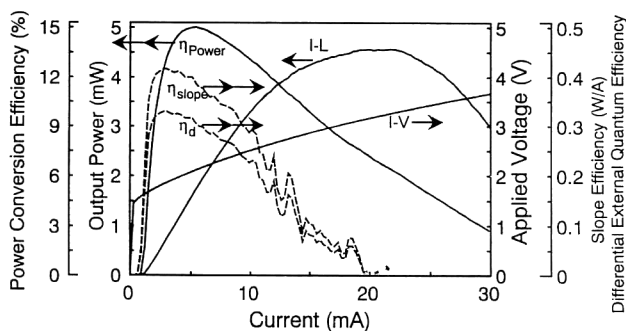


図8 偏波制御面発光レーザーの特性¹⁹⁾。

告された¹⁴⁾。また、このような低閾値素子では、低電流動作での高速変調も可能である。また、1 mA 程度での微小電流で 15 GHz を超える高速変調が実現されている¹⁵⁾。これらの高い変換効率や高速変調特性は、特に低消費電力を要求される光インターコネクต์への応用で重要である。実際に、超高速光インターコネクต์を目指した 10 Gb/s の高速伝送や 1 Gb/s の無バイアス変調による伝送実験が報告されている¹⁶⁾。

4. 傾斜基板上を用いた面発光レーザーの高性能化

さらに、低閾値化を進める手法として、傾斜基板を用いる方法が検討されている。また、傾斜基板上の面発光レーザーは、偏波面制御を実現するために、きわめて有効である。軸対称構造の面発光レーザーは、円形状の出射ビームが得られるが、偏波面が定まらないという問題があり、実際の素子では、直線偏光が得られるものの、その方向がランダムであったり、動作電流を変えると偏波スイッチングが起きてしまう。これは、偏光依存性のあるコンポーネントを含む光データリンクや光メモリのシステムに用いるとき、大きな過剰雑音を生じてしまう。また偏光依存性のないシステムにおいても、閾値の異なる 2 つの偏光モード

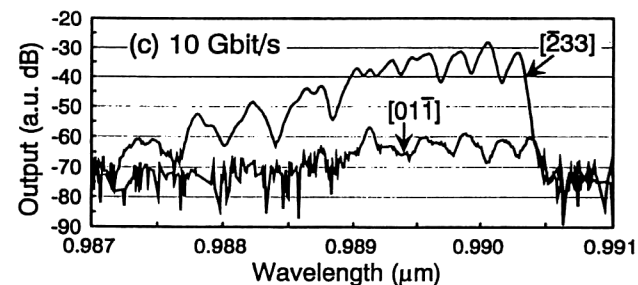
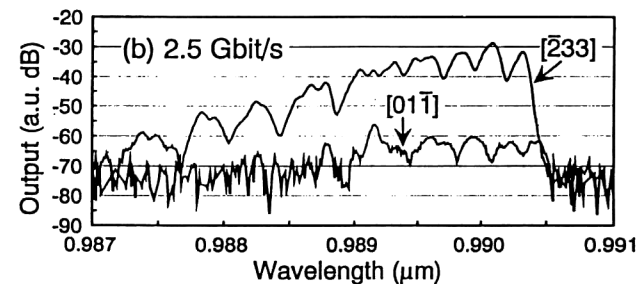
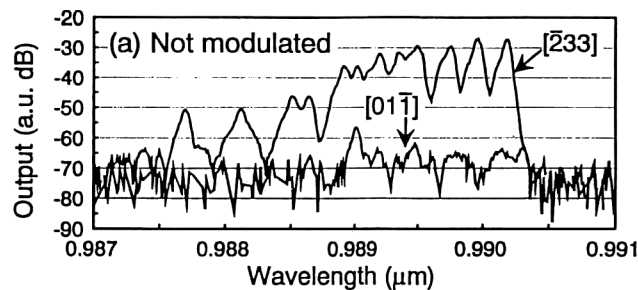


図9 高速直接変調時の偏波特性¹⁹⁾。

の存在は、過剰雑音の発生や高速変調特性に影響を及ぼすおそれがある。

理論的に、通常の(100)面の基板から大きく結晶面を傾斜させると、光学異方性が得られ、同時に閾値も低減できる可能性があることが理論的に示された¹⁷⁾。まず、分子線エピタキシャル (MBE) 法を用いて、(311)A 面基板上で低閾値の偏波制御面発光レーザーが実現された¹⁸⁾。最近では、量産性にすぐれる有機金属気相成長法を用いて、(311)B 面基板上に(100)面基板上の素子と同等以上の性能を有し、かつ、偏波面が強固に安定化された素子を実現されるようになった¹⁹⁾。図7に(311)B 基板上の面発光レーザーの構造を示す。構造は、基板の面方位を除いては、(100)基板上のものと全く同じである。図8に電流対光出力特性を示す。閾値等に関しては、(100)基板と同等の性能が得られている。今後さらに成長条件やドーピング条件を最適化することによって、いっそうの低閾値化を期待している。また、図9に示すように、10 Gbit/s の高速変調時にも偏波面が完全に制御されていることがわかる。この技術により、初めて面発光レーザーで、縦モード、横モード、偏波のす

すべてのモードを完全に単一化する技術が確立されたといえよう。

5. 低閾値面発光レーザーの応用

面発光レーザーの低閾値特性やアレイ化が容易であるなどの特徴から、最も早い応用分野として、光インターコネクタがある。面発光レーザーは、わが国で誕生したが、応用に関しては、米国を中心に精力的に進められようとしている。いくつかのコンソーシアムが政府援助の下に形成されるとともに、いくつかのメーカーですでに商品化が行われている。表1は、これまでの光インターコネクタへの応用例をまとめている²⁰⁾。米国では、主に0.85 μm 面発光レーザーと多モード光ファイバーとの組み合わせであり、対照的にわが国では、1.3 μm 帯端面発光型レーザーと単一モード光ファイバーの組み合わせで研究開発が進められている。特に、この応用分野では、大きな市場を得るためには低コスト化が至上課題であり、低コスト実装技術の開拓とともに、面発光レーザーのすぐれた量産性が決め手になるかもしれない。

面発光レーザーの高い変換効率や高速変調特性は、特に低消費電力を要求される光インターコネクタへの応用で重要である。実際に、超高速光インターコネクタを目指した10 Gb/sの高速伝送や1 Gb/sの無バイアス変調による伝送実験が報告されている^{12,16)}。図10は、面発光レーザーと多モード光ファイバーを用いた超高速光伝送の測定結果を示している。最大で12.5 Gb/sの変調も達成されてい

表1 面発光レーザーの光インターコネクタへの応用例²⁰⁾。

製造会社/ プロジェクト	Motorola	OETC	POLO	Vixel	Jitney	NTT
波長 (μm)	0.85	0.85	0.98	0.85	0.85	0.85
伝送速度 (Mb/s/ch)	200	500	622	1250	500	700
チャンネル数	10	32	10	4	20	40
伝送距離 (m)	300	100	400	300	100	100

る¹²⁾。アレイ化による並列大容量光伝送への展開が期待される。

一方、面発光レーザーの量産技術を導入して、CDやDVDといった光記録用の光源としての開発が実用化間近の状況である。サブミリアンペアの780 nm, 650 nm帯の面発光レーザーもすでに実現されている^{21,22)}。また、大規模な2次元レーザーアレイを用いたレーザープリンターへの応用も検討されている。

面発光レーザーの20年に及ぶ研究開発の結果、面発光レーザーのレーザー単体としての性能も通常の半導体レーザーを凌ぐようになってきた。ここでは、紙面の関係で触れることができなかったが、2次元レーザーアレイや電子デバイスとの集積化、あるいは波長可変などの多機能化、マイクロマシンとの融合、近接場光学手法による光ヘッドなどの多様な研究も進められている。また、欧米では複数の面発光レーザーに関するコンソーシアムが形成され、商品化も積極的に進められている。ナノアンペアレーザーなどの極限性能を追求するとともに、真に低閾値特性や大規模アレイ集積を必要とする新しい応用分野への展開を大いに期待したい。

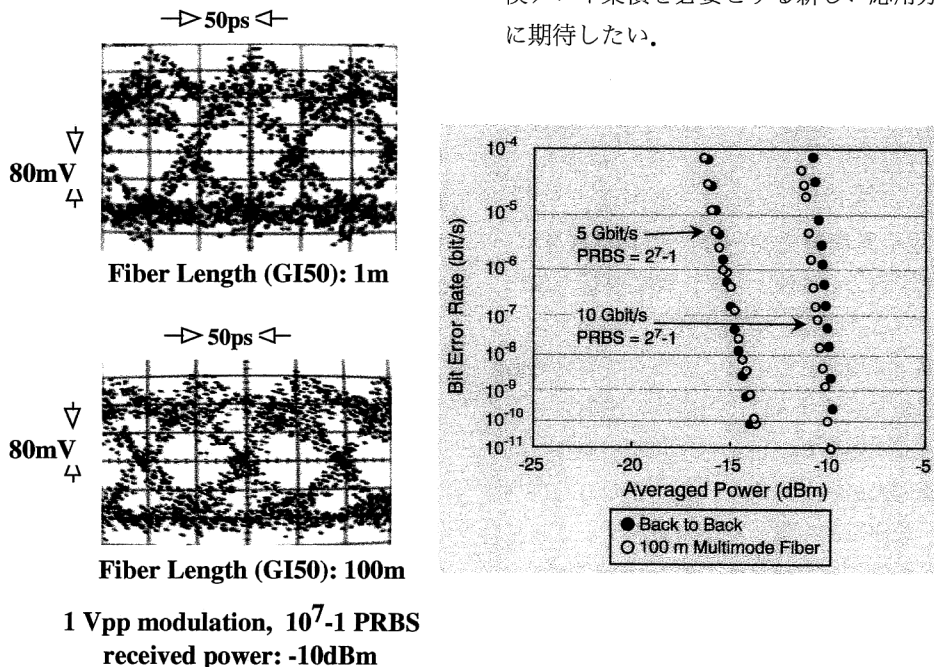


図10 面発光レーザーを用いた10 Gbit/s高速光伝送特性¹²⁾。

文 献

- 1) 伊賀健一, 小山二三夫: 面発光レーザー(オーム社, 1990).
- 2) H. Soda, K. Iga, C. Kitahara and Y. Suematsu: "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18** (1979) 2329-2330.
- 3) K. Iga, S. Kinoshita and F. Koyama: "Microcavity GaAlAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th}=6$ mA," *Electron. Lett.*, **23** (1987) 134-136.
- 4) F. Koyama, S. Kinoshita and K. Iga: "Room-temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting laser," *Appl. Phys. Lett.*, **55**(3), (1989) 221-222.
- 5) 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 microlasers," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 1123-1124.
- 6) D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar and T. J. Rogers: "Native oxide defined ring contact for low threshold vertical cavity lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 97-99.
- 7) Y. Hayashi, T. Mukaihara, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama and K. Iga: "Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical cavity surface emitting laser with a native oxide confinement structure," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 560-561.
- 8) G. M. Yang, M. H. Macdougall and P. D. Dupkus: "Ultralow threshold current vertical cavity surface emitting lasers obtained with selective oxidation," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 886-888.
- 9) 伊賀健一: "超並列光エレクトロニクス", 学術月報, **49** (1996) 42-49.
- 10) J. M. Dallesasse, P. Gavrilovic, N. Holonyak, Jr., R. W. Kaloski, D. W. Nam and E. J. Vesely: "Stability of AlAs in AlGaAs-AlAs-GaAs quantum well heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **56** (1990) 2436-2438.
- 11) H. K. Bissessur, F. Koyama and K. Iga: "Modeling of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **3** (1997) 344-352.
- 12) N. Hatori, A. Mizutani, N. Nishiyama, A. Matsutani, F. Motomura, F. Koyama and K. Iga: "An Over 10-Gbit/s transmission experiment using a p-type delta doped InGaAs / GaAs quantum well vertical-cavity surface-emitting lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 194-196.
- 13) K. L. Lear, R. P. Schneider, Jr., K. D. Choquette, S. P. Kilcoyne and K. M. Geib: "Selectively oxidised vertical cavity surface emitting lasers with 50% power conversion efficiency," *Electron. Lett.*, **31** (1995) 208-209.
- 14) B. Weigl, M. Grabherr, R. Jager, G. Reiner and K. J. Ebeling: "57% wallplug efficiency wide temperature range 840 nm wavelength oxide confined GaAs VCSELs," *15th IEEE International Semicon. Laser Conf.*, Post deadline paper, PDP2 (1996).
- 15) K. L. Lear, A. Mar, K. D. Choquette, S. P. Kilcoyne, R. P. Schneider, Jr. and K. M. Geib: "High-frequency modulation of oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers," *Electron. Lett.*, **32** (1996) 457-458.
- 16) U. Fiedler, G. Reiner, P. Schnitzer and K. J. Ebeling: "Top surface-emitting vertical-cavity laser diodes for 10-Gb/s data transmission," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 746-748.
- 17) T. Ohtoshi, T. Kuroda and S. Tsuji: "Dependence of optical gain on crystal orientation in surface-emitting lasers with strained quantum-wells," *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1886-1888.
- 18) M. Takahashi, P. Vaccaro, K. Fujita, T. Watanabe, T. Mukaihara, F. Koyama and K. Iga: "An InGaAs-GaAs vertical-cavity surface-emitting laser grown on GaAs (311)A substrate having low threshold and stable polarization," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 737-739.
- 19) A. Mizutani, N. Hatori, N. Nishiyama, F. Koyama and K. Iga: "A low-threshold polarization-controlled vertical-cavity surface-emitting laser grown on GaAs (311)B substrate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **10** (1998) 633-635.
- 20) 高井厚志, 花谷昌一, 深代康之: "光インターコネクットの現状", 電子情報通信学会信学技報, LQE96-150 (1996).
- 21) H. E. Shin, Y. G. Zoo and E. H. Lee: "Ultralow threshold current 780 nm vertical-cavity surface emitting lasers with oxide current aperture," *16th Conference on Lasers and Electro-Optics* (Anaheim), JTuH7 (1996).
- 22) J. A. Lott and R. P. Schneider, Jr.: "Electrically injected visible (639-661 nm) vertical cavity surface emitting laser," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 830-831.

(1998年6月2日受理)