レーザー解説

GaAs/AlGaAs系光ディスク用高出力半導体レーザー

松本 晃広*

(1995年10月23日 受理)

GaAs/AlGaAs High-Power Semiconductor Laser Diodes for Optical Disks

Mitsuhiro MATSUMOTO*

(Received October 23, 1995)

GaAs/AlGaAs high-power semiconductor laser diodes are widely used for optical data storage disks such as magneto-optical disks, mini disks, and phase-change disks. Improvement of the characteristics of high-power lasers is indispensable to achieve excellent performance of optical disks. The present paper reviews several laser structures developed to attain a high output power for high-speed data transferring in optical disks. Also reviewed are various laser structures developed to attain a low driving current and a low noise for low power operation and RF-module free pickups in optical disks.

Key Words: GaAs/AlGaAs, High-power semiconductor laser diode, Optical disks, Low driving current, Low noise.

1. はじめに

GaAs/AlGaAs系半導体レーザーは、信頼性の最も優れた短波長半導体レーザーである。発振波長 $0.78 \mu\text{m}$ で、光出力 $30 \sim 40 \text{ mW}$ の GaAs/AlGaAs系高出力半導体レーザーが、光磁気ディスク (MOD) を中心とする書換可能型光ディスク装置に搭載されている¹⁾。MODの用途は、これまでは主としてパソコンのバックアップ用メモリに限られていたため、その本格的な普及は進んでいなかった。しかし、画像情報を含めた情報の大容量化に伴い、大容量メモリの需要が増大してきたことと、録音再生用ミニディスク (MD) という民生向けの新規の膨

大な市場が形成されるに至って、MODは現在急速な勢いで普及しつつある。それと同時に、光ディスク装置に搭載されるGaAs/AlGaAs系高出力半導体レーザーの市場も急速に成長しつつある。また、MOD以外の相転移型の光ディスク (PD) の商品化と、CDあるいはCD-ROMの爆発的な普及に伴うCD-Rの用途増大が、それらに搭載される高出力半導体レーザーの市場拡大に拍車をかけている。

高出力半導体レーザーを搭載した光ディスク装置については、高性能化、小型化・軽量化を目指して開発が進められており、そのために高出力半導体レーザーのさらなる特性向上が強く要望されている。現在、主として高出力半導体

* シャープ(株)技術本部中央研究所 (〒632 天理市榛本町2613-1)

* Sharp Corp. Engineering Center, Central Research Laboratory (2613-1 Ichinomoto, Tenri, Nara 632)

レーザーにおいて開発が進められている性能向上項目は以下の通りである。

- (1) 高出力化 (実用光出力50 mW以上)
- (2) 低消費電力化 (主として低電流化)
- (3) 低雑音化 (高周波重畳回路不要)

レーザーの高出力化は、光ディスク装置のアクセスタイム低減と記録速度向上を実現でき、またレーザーの低消費電力化は特に携帯型の光ディスク装置全体の低消費電力化に貢献できる。さらに、レーザーの低雑音化はこれまで必要とした高周波重畳回路を不要にでき、光ディスク装置全体の低消費電力化と小型・軽量化を可能にするという点で注目されている。

本報告では、発振波長 $0.78\ \mu\text{m}$ の GaAs/AlGaAs系光ディスク用高出力半導体レーザーの開発の現状について紹介する。まず、高出力レーザーの現状仕様と要求性能について簡単にまとめて示す。次に、要求性能実現のために、最近の成果について筆者等が開発を行った結果を中心に報告する。

2. 高出力半導体レーザーに対する要求性能

高出力半導体レーザーに対する要求性能については、前記の3つの主要項目がある。各性能の現状と目標仕様をTable Iにまとめて示す。

現状の実用光出力は30 mWであり、その場合のディスクの回転数は1200回転/分程度であるが、実用光出力を50 mW以上に増大できると、ディスクの回転数は約3倍の3600回転/分程度まで増大可能である²⁾。ディスクの回転数を3倍増大すると、アクセスタイムを1/3に低減、及び記録速度を3倍に高速化することが期待で

きる。

レーザーの低消費電力化に対して、駆動電圧は活性層のバンドギャップでほぼ決まるために、駆動電流の低減が課題となっている。現状のレーザーの駆動電流は光出力30 mW条件下で100~120 mAであるが、その駆動電流の半減、即ち消費電力の半減を目指して開発が進められている。

レーザーの雑音は、レーザーを光ディスクに用いた場合にディスク表面からの戻り光に起因した光出力変動である。それを抑制するために、高出力レーザーの駆動電流に高周波 (RF) 信号を重畳して、縦モードをマルチモードにすることにより、レーザー光の可干渉性を低下させる方法が一般的に用いられている³⁾。RF重畳がない場合のレーザーの相対雑音強度 (RIN) は -100 dB/Hzであり、システムから要求される仕様値 -130 dB/Hzを満足しない。これに対して、RF重畳がある場合にはRINを -130 dB/Hz以下に低減できるので雑音の仕様を満足する。しかし、RF重畳にはRFモジュール、及びそれをシールドするケースが必要となる。そのために、レーザーを含めた光ピックアップの小型・軽量化には望ましくなく、RF重畳用の消費電力が必要なために低消費電力化の点からも問題となる。そこで、RF重畳を用いずに、レーザー自体の低雑音化を目指して精力的な開発が進められている。

以上述べた高出力レーザーに対する要求性能の中で、高出力化は主として大容量の情報をメモリする据え置き型の光ディスク装置において特に強く要望されている。低消費電力化及び低

Table I Present parameters and targets of GaAs / AlGaAs high-power semiconductor laser diodes.

Parameters	Present characteristics	Targets
Available output power	30mW	more than 50mW
Driving current (at 30mW)	100mA~120mA	50mA~60mA
Relative intensity noise		
without RF module	~-100dB/Hz	less than -130dB/Hz
with RF module	less then -130dB/Hz	—

雑音化は、携帯型の光ディスク装置、即ちMDにおいて強い要望がある。

3. 高出力半導体レーザーに対する開発成果

要求性能を実現するための最近の成果について、筆者等の成果を中心に報告する。

3.1 高出力化

実用光出力30 mWの高出力半導体レーザーは、レーザー光を発生するAlGaAs活性層の層厚⁴⁾、共振器の長さ⁵⁾及び端面反射率⁶⁾を最適化することにより高出力動作を達成する。しかし、実用光出力50 mW以上を実現するには、光出射端面の光学損傷(COD)劣化を抑制する必要がある。COD劣化は、光出射端面の光吸収と発熱による正帰還によって、端面温度の異常上昇に起因した端面劣化である⁷⁻⁹⁾。COD劣化が発生するまでの時間は光出力の増大に伴い、減少することが報告されており¹⁰⁾、実用光出力50 mW以上を実現するには、COD劣化を抑制することが重要となる。

COD劣化抑制手法として以下の3つの手法がある。

- (1) 端面の光強度低減
- (2) 端面の発熱低減
- (3) 端面の光吸収抑制

(1)の手法を実現する構造として、位相同期アレイ¹¹⁾やフレア形状ストライプ¹²⁾があるが、レンズで回折限界の単一スポットに集光するために、複雑な光学系を必要とするという問題がある。(2)の手法に対しては、レーザーの活性層を多重量子井戸構造^{13,14)}にすること、及び低光損失導波路構造¹⁵⁾によって実現されており、実用光出力50 mW程度が実証されている。しかし、COD劣化に対して本質的な抑制は不可能であるので、50 mW以上の動作は信頼性の点で問題がある。これに対して、(3)の手法はCOD劣化を完全に抑制できる可能性がある。(3)を実現するために、端面付近の活性層のバンドギャップを共振器内部より増大して、端面近傍で光吸収のない窓領域を形成した端面窓構

造レーザーが開発され、COD発生を抑制できるという実験結果が報告されている^{16,17)}。COD劣化抑制に伴い、光出力100 mWにおいても信頼性が確保されている¹⁸⁾。しかし、端面窓構造で問題となるのが、窓領域と内部領域の導波光の不一致による出射光の放射ビーム形状の乱れである。光ディスクに用いるには、放射ビームに乱れがあると、実用上の支障が大きく、その適用を困難にする。これに対して、放射ビームの乱れを抑制した端面窓構造レーザーが報告されている。Fig. 1はその一例であり、筆者等が開発を行った端面成長窓形(window grown on facets:WGF)レーザーの構造図を示す^{19,20)}。光出射端面となる劈開面上に、薄層のAlGaAs半導体層を有機金属気相成長(MOCVD)法により結晶成長した構造となっている。薄層の半導体層のAl組成比(z)は活性層のAl組成比(x)より高く設定されているので、端面における光吸収は抑制され、薄層の半導体層が窓層の役目を果たす。さらに端面上の窓層の層厚は1 μ m以下であるために、窓層領域における導波光と内部の導波光はほぼ完全に一致する。従って、放射光の乱れは生じないで、良好な放射光特性が得られる。Fig. 2に作製したWGFレーザーの窓層の断面の走査電子顕微鏡写真を示す。窓層

Fig. 1 Schematic structure of a semiconductor laser diode with a window grown on facets.^{19,20)}

Fig. 2 Scanning electron microscopy image of the window layer on a cleaved facet.²⁰⁾

Fig. 3 Optical output power versus driving current characteristics of a WGF laser and a conventional laser.¹⁹⁾

の成長界面及びその結晶成長が良好に行われていることがわかる。

次に、作製したWGFレーザーの電流対光出

Fig. 4 Aging test results of a WGF laser.^{19,20)}

Fig. 5 Far-field patterns parallel and perpendicular to the junction plane in relation to the output power in a WGF laser.¹⁹⁾

力特性をFig. 3に示す。比較のためにWGF構造のない従来レーザーの特性を同時に示す。従来レーザーでは光出力110 mWでCOD劣化が起こるのに対して、WGFレーザーでは最大光出力235 mWが得られ、熱飽和によって制限される。Fig. 4に信頼性評価用のエージング試験結果を示す。条件は、雰囲気温度60℃、光出力70 mWの一定出力駆動である。4000時間以上に渡って安定に走行している。駆動電流が初期の1.2倍に上昇するまでの時間を寿命と定義すると、WGFレーザーでは室温(25℃)10000時間以上の寿命が達成されている。さらに、WGFレーザーの放射光の遠視野像の光出力依存性をFig. 5に示す。遠視野像に干渉パターンは見られず、遠視野像のピークが変動したり、半値幅の異常な変動は見られない。このように、

WGFレーザーでは端面窓効果によってCOD劣化を抑制でき、光出力70 mWで良好な信頼性が実証され、放射光特性も非常に良好であることが示されている。

3.2 低電流化

低電流化を実現するために、主として次の2つの構造が用いられている。

(1) 多重量子井戸型活性層構造

(2) 低光損失導波路構造

(1) を従来の損失導波路構造に適用すると、レーザー利得の飽和の影響があるので、効果的な低電流化はできない。そこで、(1) は(2) の低光損失導波路構造に適用して効果を発揮する。従って、現在の開発目標は(2) に集中している。レーザーの導波路損失と駆動電流(光出力30 mW) の関係の計算結果をFig. 6に示す。従来のレーザーの導波路は、ストライプ外部の光損失によってストライプ内部に光を閉じ込める損失導波路構造であるために、導波路損失は約 30cm^{-1} 存在する。これに対して、ストライプ内外の屈折率差によって光を閉じ込める実屈折率導波路構造の場合は、導波路損失が 0cm^{-1} になる。従ってFig. 6に示すように、導波路を現状の損失導波路から実屈折率導波路にすることによって、駆動電流は約40%低減できる。実屈折率導波路の有効性はこれまでも指摘されており、それを実現する試みはなされてきた。

Fig. 6 Dependence of the calculated driving current on the waveguide loss. The results of both a conventional index guide and a real refractive index guide are shown.

例えば、活性層及びそれを挟むクラッド層をストライプ状に加工して半導体層で埋め込む構造²¹⁾、及び活性層の上のクラッド層をリッジストライプ形状に加工して絶縁膜を設ける構造²²⁾が検討されてきたが、前者の構造は活性層自体を加工するために素子信頼性に問題があり、後者の構造は絶縁膜の放熱不良により高周動作に問題がある。このように実用上十分な特性を有する実屈折率導波路型レーザーは実現されていなかった。しかし、最近、新規構造の採用と成長プロセス技術の進歩によって、特性に優れた実屈折率導波路型レーザーが報告されている。

Fig. 7はその一例の素子構造を示す¹⁵⁾。n-AlGaAs電流ブロック層にストライプ状の溝を形成して、その溝を埋め込むようにp-AlGaAsクラッド層を成長して作製する。p-クラッド層の屈折率の方がn-AlGaAs電流ブロック層の屈折率より大きくなるように設計してあるので、屈折率差によって光はストライプ内部に閉じ込められる。電流対光出力特性をFig. 8に示す。30 mWにおける駆動電流は70 mAとなり、Fig. 6の計算結果で示された低電流特性が実現されている。また、ストライプ溝埋め込みのリアルガイド構造で、電流ブロック層にAlGaAs透明層/GaAs光吸収層/AlGaAs透明層の3層構成にすることにより、低電流化と同時に横モードの安定性を向上させたレーザーが報告されている²³⁾。さらに、活性層の上の

Fig. 7 Schematic structure of a real refractive index guided laser.¹⁵⁾

Fig. 8 Optical output power versus driving current characteristics.¹⁵⁾

クラッド層をリッジストライプ形状に加工して、屈折率の小さなAlGaAs半導体層で埋め込み成長を行ったレーザーについても、同様の低電流特性が実現されている^{24,25)}。

3.3 低雑音化

高出力レーザーの低雑音化を達成するために、自励発振現象²⁶⁾の適用が検討されている²⁷⁾。そのために、自励発振レーザーの素子設計を行う必要がある。これに対して、最近、過飽和吸収効果を考慮した自励発振の理論検討が報告されている²⁸⁾。その検討結果を基に、高出力特性と低雑音特性を両立を図るべく、筆者等は信号読み取りの低出力時のみ自励発振が起こるレーザーを作製し、ストライプ内外の屈折率差 (Δn) を変えて、素子特性評価を行った結果の報告を行っている^{29,30)}。

作製した素子構造をFig. 9に示す。ストライプ溝埋め込み型レーザーで、ストライプ外部のp-クラッド層厚を変えて、 Δn を調整することにより自励発振を制御する。Fig. 10に Δn に対する特性の依存性を示す。Fig. 10 (a) に Δn に

Fig. 9 Schematic structure of a self-sustained high-power laser.²⁹⁾

Fig. 10 Dependence of laser characteristics on a refractive index difference (Δn). The characteristics are (a) coherency, (b) output power versus current, and (c) divergence of radiation beam parallel to junction plane.²⁹⁾

対する出射レーザー光の可干渉性指数(γ)の測定結果を示す。 Δn が 4×10^{-3} 以下になると、低出力状態で自励発振が起こるために可干渉性指数は低下する。しかし、Fig. 10 (b) に示す Δn に対する電流対光出力特性の実験結果より、 Δn を低減すると閾値電流が急激に増大する。さらに、 Δn に対する水平方向の放射角の変化をFig. 10 (c) に示す。 Δn が低減すると、低出力状態と高出力状態における水平放射角の差が大きくなり、光ディスクに用いる場合に支障を生じる。従って、高出力レーザーで、 Δn の制御によって自励発振を起こし、同時に閾値電流の増大を抑制し、かつ水平放射角の低出力と高出力における差を少なくするには、 $\Delta n = 3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ の範囲に設定する必要がある。 $\Delta n = 3.3 \times 10^{-3}$ の素子を作製して、Fig. 11 に示すように戻り光量が0.001%から10%の範囲に渡って、相対雑音強度(RIN)を-120 dB/Hz以下に低減できている。また、信頼性試験では、雰囲気温度70℃、光出力35 mWで3500時間経過して安定に走行している。

このように、 Δn を厳密に制御すると、低雑音特性と高出力特性及び光学特性の両立は可能となる。しかし、自励発振型の高出力レーザーは従来のレーザーに比べて、駆動電流が増大する傾向にあるので、それを防止するために低電流化の検討と同様に、ガイド構造をリアルガイドにする検討がなされている³¹⁾。また、自励発振型レーザーではレーザービームの非点隔差

Fig. 11 Relative intensity noise as relation to a feedback ratio.³⁰⁾

Fig. 12 Schematic structure of a self-sustained structure laser with a saturable absorption layer.³²⁾

が増大するという問題があり、それを防止するためにFig. 12に示すようなストライプ内部の活性層近傍に可飽和吸収層を設ける構造³²⁾についても検討がなされており、従来レーザーと同程度にまで非点隔差を低減した自励発振型レーザーを実現している。

4. まとめ

GaAs/AlGaAs系光ディスク用高出力半導体レーザーの最近の開発状況を紹介した。GaAs/AlGaAs系レーザーはCD用の光源として実用化されて以来、約10年以上が経過し、技術的に成熟した感がある。その間に、InGaP系の赤色レーザーが開発、実用化され、さらに最近ではII-VI族半導体あるいはGaN系の半導体によって、緑色もしくは青色レーザーの研究開発が主流となっている。しかし、現在の光ディスク用の光源としてGaAs/AlGaAs系レーザーは主要な地位を保っており、それと同時に技術的な革新が現在も盛んに行われている。GaAs/AlGaAs系光ディスク用高出力レーザーの開発動向は、現在主として高出力化、低電流化、低雑音化である。高出力化に関しては、実用光出力50 mW以上を目指して開発が進められており、端面窓構造や量子井戸型活性層構造によって実現されている。低電流化は、導波路構造をリアルガイドにすることにより、光出力30 mW駆動電流を現状から半減することを目

指して、開発が進められている。低雑音化については、高出力レーザーに自励発振現象を適用することが検討されており、低雑音特性と高出力特性、及び光学特性の両立を課題として開発が進められている。

GaAs/AlGaAs系光ディスク用高出力レーザーは、光ディスクの性能向上のために、その性能限界を目指して今後も活発な技術開発が続けられていくと思われる。

参 考 文 献

- 1) 例えば、森本泰司、小川勝、兼岩進治：シャープ技報 50 (1991) 53.
- 2) 熊谷修：機能材料，1989年6月，p.23.
- 3) M. Ojima, K. Aiki and S. Yonezawa: *Annual Meeting of OSA* (Chicago, USA, Oct. 1982, TuE12).
- 4) K. Hamada, M. Wada, H. Shimizu, M. Kume, A. Yoshikawa, F. Tajiri, K. Itoh and G. Kano: *Proc. 9th IEEE Semiconductor laser conf.* (Brazil, Aug. 1984) p. 34.
- 5) 兼岩進治，吉田智彦，河西秀典，宮内伸幸，林 寛，矢野盛規，土方俊樹：第49回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1988, 秋) p.856.
- 6) 佐々木義光，梶村俊，大歳創，中村道治：電子通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料，OQE82-125 (1983).
- 7) C. H. Henry, P. M. Petroff, R. A. Logan and F. R. Merritt: *J. Appl. Phys.* 50 (1979) 3721.
- 8) H. Yonezu, K. Endo, T. Kamejima, T. Torikai, T. Yuasa and T. Furuse: *J. Appl. Phys.* 50 (1979) 5150.
- 9) O. Ueda: *J. Electrochem. Soc.* 135 (1989) 11C.
- 10) A. Moser and E. E. Latta: *J. Appl. Phys.* 71 (1992) 4848.
- 11) M. Taneya, M. Matsumoto, S. Matsui, H. Hosoba, S. Yano and T. Hijikata: *Optoelectronics — Devices and Technologies — 2* (June, 1987) 99.
- 12) S. O. O'Brein, D. F. Welch, R. A. Parke, D. Mehuys, K. Dzurko and D. Scifres: *IEEE J. Quantum Electron.* 29 (1993) 2052.
- 13) K. Uomi, S. Nakatsuka, T. Ohtoshi, Y. Ono, N. Chinone and T. Kajimura: *Appl. Phys. Lett.* 45 (1984) 818.
- 14) 中塚慎一，山下茂男，内田憲治，梶村俊：電子情報通信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料，OQE91-27 (1991).
- 15) 杉浦秀幸，高山徹，今藤修，油利正昭，内藤浩樹，糸雅博，伊藤国雄：第53回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1992, 秋) p.929.
- 16) H. Yonezu, M. Ueno, T. Kamejima and I. Hayashi: *IEEE J. Quantum Electron.* QE-15 (1979) 775.
- 17) D. Botez and J. C. Connolly: *Electron. Lett.* 20 (1984) 530.
- 18) H. Naito, M. Kume, K. Hamada, H. Shimizu and G. Kano: *IEEE J. Quantum Electron.* QE-25 (1989) 1495.
- 19) M. Matsumoto, K. Sasaki, M. Kondo, T. Ishizumi, T. Takeoka, H. Nakatsu, M. Watanabe, O. Yamamoto and S. Yamamoto: *Jpn. J. Appl. Phys.* 32 (1993) L665.
- 20) 松本晃広，佐々木和明，近藤正樹，石住隆司，竹岡忠士，山本三郎：電子情報通信学会論文誌C-I, J78-C-I (1995) 207.
- 21) T. Ohtoshi, T. Kawano, Y. Sasaki, T. Kajimura, N. Chinone and M. Nakamura: *J. Appl. Phys.* 56 (1984) 2491.
- 22) 加守田裕樹，佐藤文彦，高木剛，今本浩史，志村幹彦：第37回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1990, 春) p.907.
- 23) 猪口和彦，工藤裕章，菅原聡，伊藤茂稔，八木久晴，瀧口治久：第53回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1992, 秋) p.932.
- 24) 井上優一，下山謙司，細井信行，藤井克司，宮田浩，平沢浩彦，後藤秀樹：第54回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1993, 秋) p.1062.
- 25) 島頭洋，杵築弘隆，國次恭宏，永井豊，唐木田昇市，相賀正夫：第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1994, 春) p.989.
- 26) S. Matsui, H. Takiguchi, H. Hayashi, S. Yamamoto, S. Yano and T. Hijikata: *Appl. Phys. Lett.* 43 (1983) 219.
- 27) T. Tanaka, T. Kawano and T. Kajimura: *Appl. Phys. Lett.* 53 (1988) 2471.
- 28) 内田智士，井川光彦，股木宏至：第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1994, 春) p.990.
- 29) T. Takayama, O. Imafuji, H. Sugiura, M. Yuri, H. Naito, M. Kume and K. Itoh: *Jpn. J. Appl. Phys.* 34 (1995) 3533.
- 30) M. Yamada: *IEEE J. Quantum Electron.* QE-29 (1993) 1330.
- 31) 松本晃広，猪口和彦，菅原聡，八木久晴，須山尚宏，大林健，池田裕章，瀧口治久：第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集 (1994, 春) p.990.
- 32) 須山尚宏，松本晃広，猪口和彦，菅原聡，大林健，八木久晴，池田裕章，瀧口治久，鈴木彰：第55回応用物理学会学術講演会講演予稿集 (1994, 秋) p.932.
- 33) 林伸彦，後藤壮謙，松本光晴，吉沢浩太郎，井手大輔，茨木晃，吉年慶一，新名達彦：第12回半導体レーザシンポジウム予稿集 (1995) p.11.