

# 高輝度ブロードエリア半導体レーザー

大 枝 靖 雄

高輝度な半導体レーザーとしては、横モードが基本モードで発振する単一モード型半導体レーザーにまさるものはない。しかしながら、狭ストライプ型の単一モード型半導体レーザーによる高出力化はせいぜい数百 mW が限界で、その出力限界は主に射出端面の瞬时光学損傷 (catastrophic optical mirror damage: COMD)<sup>1)</sup> で決定されている。

このため、より高出力な半導体レーザーは、横モードはマルチになるものの、電流注入ストライプ方向に発光部を広げたブロードエリア型半導体レーザーとして 10 数年前より開発が進められてきた。この間、ダブルヘテロ構造から量子井戸構造へ、さらに量子井戸分離閉じ込め構造での最適化により 1988 年には 6 W/100  $\mu\text{m}$  の最大出力が報告されている<sup>2)</sup>。

このようなブロードエリア半導体レーザーの製品化は SONY・SDL 社を中心に進められ、1980 年代では 0.5 W/100  $\mu\text{m}$  だったものが、1990 年代の初頭には 1 W/100  $\mu\text{m}$  まで高輝度化されている。

その用途は Nd, Yb イオンをドープした固体レーザー・ファイバーレーザーの励起をはじめとして、印刷・はんだ付けに代表されるレーザー加工など、幅広い展開を示しているが、いずれの用途においても高輝度・高出力化が強く求められている。

本論文では、三井化学で開発を進めている完全分離閉じ込め構造 (decoupled confinement heterostructure: DCH)<sup>3)</sup> を中心として、ブロードエリア半導体レーザーの高輝度・高出力化の現状について報告する。

## 1. ブロードエリア半導体レーザーの高輝度・高出力化

ブロードエリア型半導体レーザーにおいても、その最大出力は主に COMD により制限されている。COMD はへき開端面の酸化などによる非発光再結合センターの存在、非発光再結合による温度上昇とキャリアの欠乏、温度上昇に伴うバンドギャップ縮小による光吸収の増大、光吸収によるキャリアの生成、生成キャリアの非発光再結合という一連の正帰還により、端面温度が融点まで上昇し破壊にいたると考えられている<sup>4,5)</sup>。

COMD は量子井戸活性層での光パワー密度で決定されている。ストライプ方向の光分布が一様と近似した場合、COMD で制限されるとき CW (continuous wave) 最大出力は、

$$P_{\max} = P_c \cdot SW \cdot (d_w / \Gamma_w) \cdot \{(1-R)/(1+R)\} \quad (1)$$

で見積もることができる<sup>6)</sup>。ここで、 $P_c$  は COMD にいたる量子井戸活性層での光パワー密度、 $SW$  はストライプ幅、 $\Gamma_w$  は量子井戸での光閉じ込め率、 $d_w$  は量子井戸幅、 $R$  は射出端面の反射率である。 $d_w / \Gamma_w$  は等価スポットサイズと呼ばれ、量子井戸に存在する光強度の逆数である。

式(1)によると  $P_c$ 、 $d_w / \Gamma_w$  が大きく、反射率を小さくすることで、CW 最大出力を大きくできる。 $P_c$  は量子井戸に使用する材料や端面処理等のプロセスにより改善できる。 $d_w / \Gamma_w$  については導波路構造を適切に設計することにより大きくすることが可能である。射出面の反射率は通常コーティング膜に使用される  $\text{Al}_2\text{O}_3$  などの  $\lambda/4$  膜が使用されていることから 2~5% 程度となっている。

この COMD パワーレベルを向上させるために、三井化学で開発を進めている DCH 構造<sup>3,7)</sup>をはじめとして、アルミフリー材料<sup>8-10)</sup>・ブロード導波構造<sup>11)</sup>・端面処理技術<sup>12)</sup>等による高輝度・高出力化が精力的に行われている。

三井化学株式会社機能材料研究所 (〒299-0265 袖ヶ浦市長浦 580-32)  
E-mail: Yasuo.Oeda@mitsui-chem.co.jp

その結果、10 W/100  $\mu\text{m}$  を超える CW 最大出力が報告されるまでになった。表 1 に各発振波長での各機関より近年に報告されたストライプ幅 100  $\mu\text{m}$  のブロードエリア半

導体レーザーにおける CW 最大出力をまとめた。

## 2. 完全分離閉じ込め構造による高輝度化

半導体レーザーの高輝度・高出力化には COMD パワーレベルを向上させるだけでなく、

- 1) 閾電流・スロープ効率の特性温度の向上
- 2) 電気抵抗・熱抵抗の低減

が必要である。これらの特性を向上させるためには長共振器化が有効である。しかしながら、内部ロスが  $1\text{ cm}^{-1}$  程度であることと実装時の熱歪みなどを考慮すると、実用上

表 1 ストライプ幅 100  $\mu\text{m}$  ブロードエリア半導体レーザーの各波長帯における連続発振最大出力。

研究機関	連続発振最大出力(W)/測定温度( $^{\circ}\text{C}$ )		
	809 nm	870 nm	980 nm
三井化学	8.5/20 <sup>7)</sup>	—	9.5/10 <sup>18)</sup>
ウィスコンシン大	8.8/10 <sup>9)</sup>	—	10.6/10 <sup>10)</sup>
SDL	8.5/10 <sup>28)</sup>	11.3/10 <sup>29)</sup>	9.3/10 <sup>30)</sup>

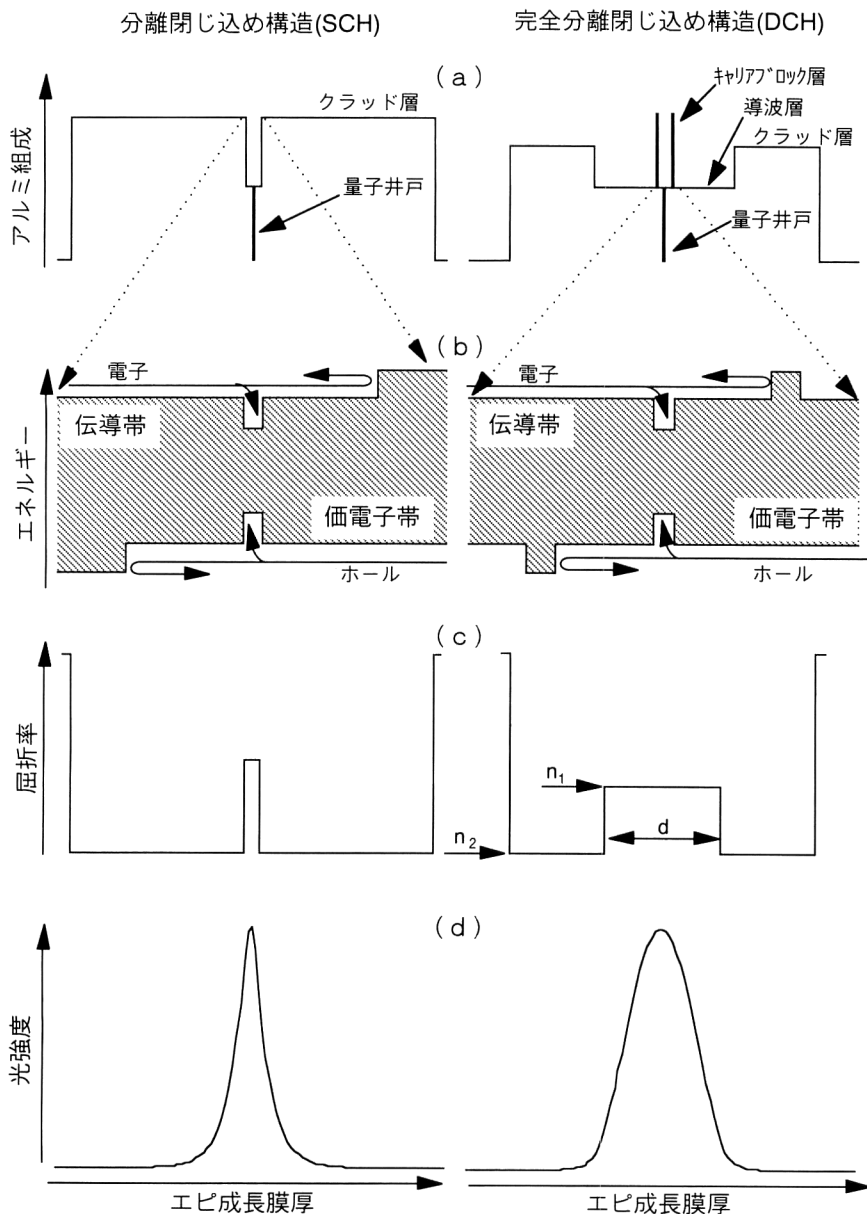


図 1 左側に SCH 構造、右側に DCH 構造の、(a) アルミ組成図、(b) エネルギーバンド図 (量子井戸近傍を拡大)。矢印でキャリアの閉じ込めを模式的に表す。(c) 屈折率分布図。  $n_1$  は導波層の屈折率、  $n_2$  はクラッド層の屈折率、  $d$  は導波層の幅である。(d) 導波モードプロファイルを示す。

は 2 mm 程度が限度と考えられる。

このような状況でピークパワーを低減しながら電気抵抗・熱抵抗を低減できる構造として、DCH 構造が考え出された。

## 2.1 キャリヤブロック層による活性層へのキャリヤの閉じ込め

図 1 に従来より高出力・高輝度ブロードエリア半導体レーザーに採用されてきた分離閉じ込め構造 (separate confinement heterostructure: SCH) と三井化学が提案した DCH 構造<sup>13)</sup> の、(a) にエピタキシャル構造、(b) にバンドダイアグラム、(c) に屈折率ダイアグラムならびに (d) にモードプロファイルを示す。

SCH 構造ではクラッド層が光の閉じ込めとキャリヤのオーバーフローを防止するキャリヤブロック層とを兼用している。このために、良好なキャリヤの閉じ込めを行うためには、クラッド層のエネルギーバンドギャップと導波層の厚さに制限がかかる。

一方、DCH 構造では、量子井戸活性層の近傍に薄いキャリヤブロック層を設けることによりキャリヤのオーバーフローを抑制し、光の閉じ込めはクラッド層により、完全に分離して行っている。このキャリヤブロック層の存在により、光の導波構造ならびに材料の設計自由度が向上する。

## 2.2 光導波構造の最適化

ここで、導波構造について導波層とクラッド層で構成される対称 3 層スラブ近似で考察する。量子井戸活性層とキャリヤブロック層は光の波長に比べて十分薄いためここでは無視して考える。対称型 3 層スラブ導波路の導波構造は次式で定義される規格化周波数で特徴づけられる<sup>14)</sup>。

$$V = \frac{k_0 d}{2} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

ここで、 $d$  は導波層の厚み、 $n_1$  は導波層の屈折率、 $n_2$  はクラッド層の屈折率、 $k_0$  は真空中での光の波数を表す。

図 2 に発振波長 810 nm で導波層のアルミ組成を 0.3 とした場合のピーク強度の規格化周波数に対する依存性を示す。

SCH 構造では、量子井戸活性層へのキャリヤの閉じ込めとクラッドからのキャリヤのオーバーフローを抑制するために、放射角は 30° 前後で、規格化周波数は  $\pi/6$  前後で設計されていた。しかしながら、高輝度・高出力化にとっては決して最適な設計とはいえない。図 2 に示すように規格化周波数を大きくしていくとピーク強度は減少し、規格化周波数  $\pi$  ではピーク強度は規格化周波数  $\pi/6$  と比べて半減する。ピーク強度が下がることに

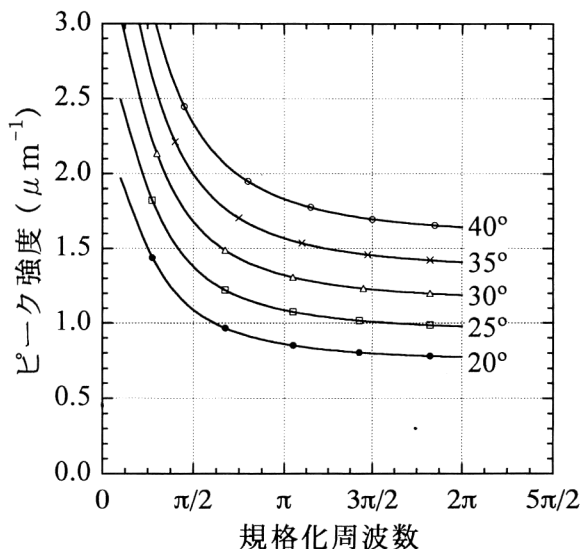


図 2 導波モードのピーク強度の規格化周波数依存性。図中の値は遠視野像の放射角 (FWHM) を表す。

COMD を起こすパワーレベルが上昇する。筆者らは放射角 35° で規格化周波数  $\pi$  と  $\pi/6$  の素子を作製し、COMD パワーレベルが倍増することを確認している<sup>3)</sup>。

さらに、図 1(d) に示すように規格化周波数  $\pi$  では導波モードがガウス型に近づき、レーザー光のビーム品質の指標である  $M^2$  が従来の 1.5 から 1.1 になる<sup>3)</sup>。

規格化周波数  $\pi/2$  以上では高次モードが伝搬可能である。しかしながら、高次モードは基本モードに比べて量子井戸活性層とのゲインカップリングが小さいことと、フリーキャリヤ吸収・基板放射ロスが大きくなることから基本モードでレーザー発振する。

## 2.3 熱抵抗・電気抵抗の低減

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  系ではアルミ組成比  $x$  を大きくするとエネルギーバンドギャップが大きくなるが、電気抵抗<sup>15)</sup>・熱抵抗<sup>16)</sup> は上昇する。したがって、熱抵抗・電気抵抗の低減にはエネルギーバンドギャップの大きなクラッド層の膜厚の低減が重要である。

規格化周波数を大きくすると、図 1(d) に示すようにモードプロファイルのクラッドへの裾引きが小さくなることから、基板放射ロス<sup>17)</sup>を一定にしたときのクラッド層厚が薄くできる。図 3 に発振波長 810 nm で導波層のアルミ組成を 0.3、基板放射ロスを  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  とした場合のクラッド厚の規格化周波数に対する依存性を示す。規格化周波数  $\pi$  では  $\pi/6$  に比べて 70% 程度低減できることがわかる。単に、ピークパワーを下げるだけであれば放射角 20° 前後で弱導波構造でも設計は可能である。しかしながら、クラッド膜厚の増加が著しいことが図 3 よりわかる。

分離閉じ込め構造でも上述のような観点からブロード導

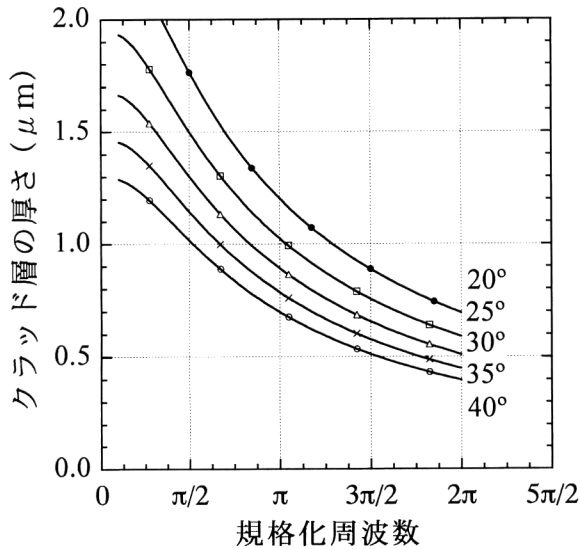


図3 クラッド層厚みの規格化周波数依存性. 基板放射ロス  
を  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  で計算を行った.

波構造<sup>11)</sup>が提案されているが, 単に導波層を広げただけでは温度特性の劣化を招く. 温度特性の劣化を防ぐためには, 導波層のバンドギャップを大きくとり, 量子井戸へのキャリアの閉じ込めを強くすると同時にクラッド層のバンドギャップを高くしてキャリアのオーバーフローを阻止するしかない. このため, 電気抵抗・熱抵抗の低減は期待できない.

#### 2.4 動作特性

上述のように, DCH 構造は半導体レーザーの高輝度・高出力化に最適な構造であると筆者らは考えている. 実際に, ストライブ幅  $100 \mu\text{m}$  のブロードエリア半導体レーザーから, 発振波長  $809 \text{ nm}$  で  $8.5 \text{ W}$  (温度  $20^\circ\text{C}$ )<sup>7)</sup>,  $980 \text{ nm}$  で  $9.5 \text{ W}$  (温度  $10^\circ\text{C}$ )<sup>18)</sup> の CW 最大出力を記録している.

実使用においては CW 最大出力ばかりでなく信頼性が最も重要である. DCH 構造の信頼性は  $800 \text{ nm}$  帯の信頼性については Oeda ら<sup>7)</sup>により,  $980 \text{ nm}$  帯については Yamada ら<sup>19)</sup>により報告されている.  $800 \text{ nm}$  帯においてはストライブ幅  $50 \mu\text{m}$  のデバイスで動作温度  $50^\circ\text{C}$ ・APC (automatic power control)  $1 \text{ W}$  で  $4000$  時間にわたる安定動作を, またストライブ幅  $100 \mu\text{m}$  デバイスでは動作温度  $50^\circ\text{C}$ ・APC  $2 \text{ W}$  で  $1000$  時間以上の安定動作を報告している. さらに,  $980 \text{ nm}$  帯ではストライブ幅  $50 \mu\text{m}$  のデバイスで動作温度  $50^\circ\text{C}$ ・APC  $1 \text{ W}$  で  $14,000$  時間にわたる安定動作が報告されている. 従来の倍輝度で十分実用に耐えるデバイスである. また, 低アルミ組成で構成される  $980 \text{ nm}$  帯が信頼性においても有利である.

表2 各種材料での COMD パワー密度.

量子井戸材料	COMD 内部パワー密度 ( $\text{MW}/\text{cm}^2$ )
AlGaAs	$\sim 8^9)$
GaAs	$\sim 12^9)$
InGaAs	$\sim 18^{10)}$
InGaAsP	$\sim 18^9)$

注) 通常のへき開・スパッタリングによる端面コーティングを前提としている.

### 3. アルミフリー材料による高輝度化

GaAs 基板と格子整合する InGaAsP 系は  $1.42 \sim 1.91 \text{ eV}$  のバンドギャップエネルギーをもつ. InGaAsP 系は Al を含まないことから,

- 1) 酸化劣化しにくい
- 2) DLD 成長速度が小さい

等の理由から,  $800 \text{ nm}$  帯において Garbuzov らが  $100 \mu\text{m}$  ストライブ<sup>8)</sup>で,  $980 \text{ nm}$  では Ohkubo らが単一横モード構造<sup>20)</sup>で検討が始まった.

通常のへき開・スパッタリング等による保護膜形成を前提として, Mawst らは COMD にいたる内部パワー密度  $P_c$  が量子井戸活性層に使用する材料系でほぼ決定されていることを報告している<sup>6)</sup>. 各材料系における  $P_c$  を表2にまとめた. Al の酸化に起因する表面再結合速度が大きいために AlGaAs が最も低く, ついで GaAs, 最も大きな材料が InGaAs と InGaAsP である.

Mawst らはこのようなアルミフリー系にブロード導波構造を適用してストライブ幅  $100 \mu\text{m}$  のデバイスで  $10.6 \text{ W}$  の最大出力を  $10^\circ\text{C}$  で記録している<sup>10)</sup>.

$800 \text{ nm}$  帯では  $P_c$  が小さい AlGaAs 量子井戸に変わって InGaAsP 系を量子井戸活性層に用いることにより, 最大出力の向上が期待されたが, 導波層 (InGaAsP) とクラッド層 ( $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ :  $1.91 \text{ eV}$ ) とのバンドギャップエネルギー差が  $80 \text{ meV}$  しかないことから, 導波層からクラッド層への電子のオーバーフローが顕在化した<sup>21)</sup>.

Fukunaga らは導波層に  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  ( $E_g = 1.91 \text{ eV}$ ), クラッド層に  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  ( $E_g = 2.06 \text{ eV}$ ) を<sup>22)</sup>, Wade らは導波層に  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ , クラッド層に  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{As}$  ( $E_g = 2.21 \text{ eV}$ ) を採用してバンドギャップエネルギーを増加させ, 活性層領域にのみアルミフリー材料 InGaAsP を適用した Al-free active region で検討を行っている. Wade らは Al-free active region とブロード導波構造を組み合わせることで, ストライブ幅  $100 \mu\text{m}$  で最大出力  $8.8 \text{ W}$  を測定温度  $10^\circ\text{C}$  で記録している<sup>9)</sup>.

InGaAsP 系を量子井戸活性層に適用することは COMD に対する耐性ばかりでなく, AlGaAs 系では不可能であった歪量子井戸による閾電流の低減が期待でき, 量子井戸活

表3 SDLより報告されたCOMDパワー密度。

量子井戸材料	COMD内部パワー密度(MW/cm <sup>2</sup> )
AlGaAs	~21 <sup>28)</sup> *
GaAs	~27 <sup>29)</sup>
InGaAs	~19 <sup>30)</sup>

\*文献29)には  $d_w/F$  は記載されていなかったもので、文献30)の  $d_w/F$  を用いて見積もった。

性層として魅力的な材料である。

#### 4. 端面処理技術による高輝度化

COMDパワー密度  $P_c$  を向上するための技術に、ウィンドウ構造に代表される端面処理技術<sup>23)</sup>がある。端面処理技術による高輝度・高出力化は高出力単一モード半導体レーザーを中心に多数報告されている<sup>24-27)</sup>。しかしながら、ブロードエリア半導体レーザーに端面処理を施した例<sup>12)</sup>はあまり報告されていない。

端面処理技術の項目で取り上げるのが適切かどうかかわからないが、SDL社のO'Brienらにより、SCH構造でAlGaAs系を用いて、809nmで8.5W<sup>28)</sup>、870nmで11.3W<sup>29)</sup>、970nmで9.3W<sup>30)</sup>が報告されている。O'Brienらによるとフリーキャリア吸収、電気抵抗を低減するために、ドーピングプロファイル、Al組成の最適化を行い、その結果として最大出力が向上したと報告している。表3に彼らの報告しているCOMDパワー密度を載せる。表2と比較して、InGaAsを除いて彼らの報告しているCOMDパワー密度が格段に高いことがわかる。O'Brienらの報告例には端面処理技術を適用していると推測している。

端面パッシベーションにより経時的なCOMDパワーレベルの低下が抑制できると報告されている<sup>31)</sup>。現状ではブロードエリア半導体レーザーへの適用例は少ないが、今後一般的になってくるだろう。

輝度の観点からは横モードが単一な半導体レーザーにまさるものはない。MOPA (master oscillator power amplifier)<sup>32)</sup>・ $\alpha$ -DFB ( $\alpha$ -distributed feedback)<sup>33)</sup>・フェーズロックアレイ<sup>34)</sup>・不安定共鳴器<sup>35)</sup>などストライプ幅が100 $\mu$ m以上のブロードストライプタイプでの単一横モード化も盛んに行われている。モード不安定性を引き起こす原因のひとつとしてキャリアのホールバーニング効果によるモード不安定性がある。この効果を抑制するには、量子井戸活性層とのゲインカップリングを下げるのが有効である<sup>36)</sup>。2節で述べたようにDCH構造はゲインカップリングを下げるのに有効で、さらにInGaAs系では、高出力単

一モード半導体レーザー<sup>18)</sup>やDFBレーザー<sup>37)</sup>の試作からも実証されているように加工容易性を併せもっている。DCH構造を用いたMOPA・ $\alpha$ -DFB・不安定共鳴器などによるブロードストライプタイプの単一横モード化も半導体レーザーの高輝度化に有効であると期待している。

ブロードエリア半導体レーザーの高輝度化について、完全分離閉じ込め構造を中心に、アルミフリー材料、端面パッシベーション等の各技術の現状について報告を行った。ブロードエリア半導体レーザーの高輝度・高出力化はどこまで可能なのだろうか？今後の進展に期待したい。

#### 文 献

- 1) A. Moser: Appl. Phys. Lett., **59** (1991) 522-524.
- 2) D. F. Welch, *et al.*: Electron. Lett., **24** (1988) 113-115.
- 3) T. Fujimoto, *et al.*: Proc. SPIE, **3285** (The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1998), 80-87.
- 4) M. Fukuda: *Reliability and Degradation of Semiconductor Lasers and LEDs* (Artech House, Boston, 1991) pp. 128-136.
- 5) A. Moser and E. E. Latta: J. Appl. Phys., **71** (1992) 4848-4853.
- 6) L. J. Mawst, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **69** (1996) 1532-1534.
- 7) Y. Oeda, *et al.*: *Technical Digest of CLEO '98* (Conference on Lasers and Electro-Optics, San Francisco, 1998) CMD1, p. 10.
- 8) D. Z. Garbuzov, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **27** (1991) 1531-1536.
- 9) J. K. Wade, *et al.*: Electron. Lett., **34** (1998) 1100-1101.
- 10) L. J. Mawst, *et al.*: Proc. SPIE, **3284** (The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1998) 2-10.
- 11) D. Z. Garbuzov, *et al.*: Proc. SPIE, **2682** (The International Society for Optical Engineering, 1996) 20-26.
- 12) A. V. Syrбу, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 352-354.
- 13) 藤本 毅, ほか: 第42回応用物理学学会講演予稿集 (1995) 28p-ZG-9.
- 14) 伊藤良一: “光の導波”, 半導体レーザ [基礎と応用], 伊藤良一, 中村道治 共編 (培風館, 1989) pp. 44-65.
- 15) W. Walukiewicz: “Low-field mobilities in AlGaAs alloys,” *Properties of Aluminium Gallium Arsenide*, ed. S. Adachi (INSPEC, the Institution of Electrical Engineers, London, 1993) pp. 167-172.
- 16) W. Nakwaski: J. Appl. Phys., **64** (1988) 159-166.
- 17) W. Streifer, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-12** (1976) 177-182.
- 18) T. Fujimoto, *et al.*: Proc. SPIE, **3628** (The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1999) to be published.
- 19) Y. Yamada, *et al.*: Proc. SPIE, **3626B** (The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1999) to be published.
- 20) M. Ohkubo, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **30** (1994) 408-414.
- 21) J. Diaz, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 2260-2262.
- 22) T. Fukunaga, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L1175-L1177.

- 23) P. G. Eliseev: *Prog. Quant. Electr.*, **20** (1996) 1-82.
- 24) L. W. Tu, *et al.*: *J. Appl. Phys.*, **80** (1996) 6448-6451.
- 25) A. Jakubowicz: *Materials Science & Engineering*, **B44** (1997) 359-363.
- 26) J. Hashimoto, *et al.*: *Conf. Digest* (IEEE 16th Inter. Semi. Laser Conf., Nara, 1998) TuE19, pp. 131-132.
- 27) H. Horie, *et al.*: *Conf. Digest* (IEEE 16th Inter. Semi. Laser Conf., Nara, 1998) TuE20, pp. 133-134.
- 28) S. O'Brien, *et al.*: *Conf. Proc.* (Int. LEOS Annu. Meet. 10th, vol. 2, 1997) pp. 486-487.
- 29) S. O'Brien, *et al.*: *Electron. Lett.*, **34** (1998) 184-186.
- 30) S. O'Brien, *et al.*: *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1869-1871.
- 31) A. Oosenbrug and A. Jakubowicz: *Proc. SPIE*, **3004** (The International Society for Optical Engineering, 1997) 62-70.
- 32) D. F. Welch and D. G. Mehuys: "High-power coherent, semiconductor laser, master oscillator power amplifiers and amplifier arrays," *Diode Laser Arrays*, eds. D. Botez and D. R. Scifres (Cambridge University Press, 1994) pp. 72-122.
- 33) R. J. Lang, *et al.*: *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (1998) 2196-2210.
- 34) D. Botez: "Monolithic phase-locked semiconductor laser arrays," *Diode Laser Arrays*, eds. D. Botez and D. R. Scifres (Cambridge University Press, 1994) pp. 1-71.
- 35) S. A. Biellak, *et al.*: *IEEE J. Quantum Electron.*, **33** (1997) 219-230.
- 36) M. Mikulla, *et al.*: *Proc. SPIE*, **3284** (The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1998) 72-79.
- 37) S. Okada, *et al.*: *Technical Digest of CLEO '99* (Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999), CMI6, to be published.

(1999年4月6日受理)