

解説

可視光半導体レーザー

波多腰玄一・植松 豊

(株)東芝総合研究所 〒210 川崎市幸区小向東芝町1

(1990年2月23日受理)

Visible-Light Laser Diodes

Gen-ichi HATAKOSHI and Yutaka UEMATSU

Toshiba Research and Development Center,
1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

1. はじめに

半導体レーザーの短波長化¹⁻⁶⁾は光情報処理機器における高密度化、高速化等の高機能化を実現するための鍵となる技術であり、従来から多くの研究が行われている。可視域で室温連続発振が確認されている半導体レーザーの材料としては、GaAlAs系⁷⁾、InGaAsP系^{8,9)}およびInGaAlP系¹⁰⁻¹²⁾があるが、このなかでInGaAlP系半導体レーザーは0.6 μm帯で発振するレーザーとしての優位性が認められてきており、ここ数年の間に、実用化に向けての精力的な開発が進められてきた¹³⁻¹⁷⁾。すでに光出力5 mW以下の利得導波型赤色レーザーは製品化され、バーコードリーダー等の光源として使われ始めており、また、光ディスク等への応用を目的とした屈折率導波型レーザーも製品化が開始されている。

このInGaAlP半導体レーザーに対する課題の一つは、光出力、雑音、横モード等に関して、従来より広く用いられているGaAlAs系レーザーと同等以上の特性を実現することであろう。GaAlAs系ですでに実用化されている30 mWクラスの高出力レーザーに関しては、この材料系においても初期特性としての報告はあるものの、信頼性を含めた実用化に対してはまだ多くの開発課題がある。

もう一つの課題は短波長化である。現在製品化されているInGaAlPレーザーの発振波長は670 nmであるが、たとえばこれがHe-Neレーザーと同じ633 nmになると、人間の目に対する視感度は8倍に向上する。目に明るく見えること自体がすべての応用において重要な

わけではないが、従来より光計測等の分野で広く用いられてきたHe-Neガスレーザーを半導体レーザーで置き換えることができれば、装置の小形化、低消費電力化が可能となるため、応用分野も飛躍的に拡大するものと思われる。

本稿では、InGaAlP可視光半導体レーザーに関する現状技術と、上述の高出力化および短波長化に関する開発動向を述べる。

2. InGaAlP半導体レーザーの構造と特性

GaAlAs系半導体レーザーではさまざまな電流狭窄構造、横モード制御構造が考えられているのに対し、InGaAlP系では開発の歴史がまだ浅いこと、および現状の結晶成長技術からの制約等から、報告されている基本素子構造の種類はそれほど多くない。

図1にInGaAlP半導体レーザーの代表的な素子構造例を示す。(a)は利得導波型、(b)は屈折率導波型である。(b)のレーザーは選択成長を用いてリッジストライプ部を埋め込むことにより作製される¹⁸⁾ので、SBR (selectively buried ridge waveguide) レーザーと呼ばれる。利得導波型レーザーと屈折率導波型レーザーとは横モード、非点収差、スペクトル等の特性が異なるため、応用分野もそれぞれ異なる。以下では、各レーザーの諸特性に関して、シミュレーション解析例を含め、それぞれの特徴を述べる。

2.1 利得導波型 InGaAlP レーザー^{14,17,19)}

図1(a)の半導体レーザーでは、n-GaAs電流狭窄層により電流がストライプ部分に狭窄され、これによって

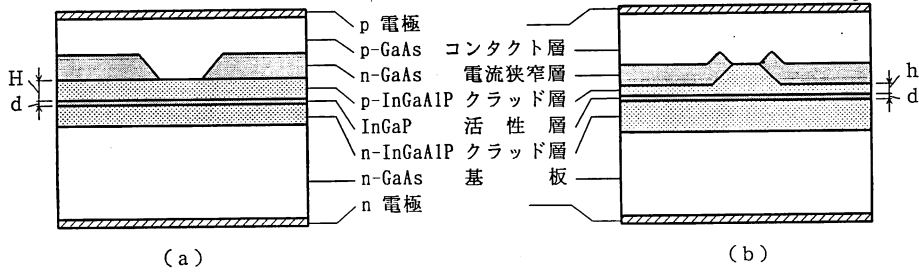


図1 代表的な InGaAlP 半導体レーザーの構造
(a) 利得導波型, (b) 屈折率導波型

生ずる利得分布により導波モードが形成される。利得導波型レーザーは一般にマルチモード発振でありまた非点収差が大きいため、その用途は限られるが、次に述べる屈折率導波型に比べると構造が簡単なため、作製が比較的容易であるという利点をもつ。

InGaAlP 材料は GaAlAs 系に比べ熱抵抗率が大きいため、熱特性を考慮した構造設計が必要である^{20,21)}。シミュレーションによれば、ヒートシンク材料や素子の共振器長の他、GaAlAs 系ではあまり問題とならないクラッド層厚も熱特性に大きく影響することがわかっている。図2にクラッド層厚を $0.6\ \mu\text{m}$ とした利得導波型レーザーの電流-光出力特性を示す^{17,22)}。波長 $670\ \text{nm}$ で最高発振温度として 90°C が得られている。同じ構造の素子の寿命試験結果例を図3に示す²³⁾。端面コーティングなしの素子で、 50°C 、 $3\ \text{mW}$ の駆動条件で1万時間動作している。なお、InGaAlP レーザーにおいても長期通電による端面近傍の劣化が観測されており、これに起因した動作電流の漸増が端面保護膜により阻止できることが確認されている²⁴⁾。

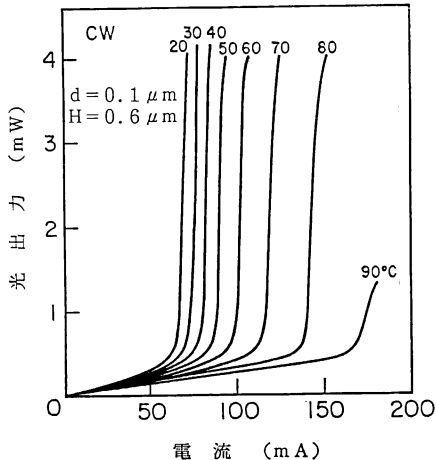


図2 利得導波型レーザーの電流-光出力特性

2.2 屈折率導波型 InGaAlP レーザー^{18,25-28)}

図1(b)のレーザーでは n-GaAs 電流狭窄層がストライプ外領域で活性層に近接しているため、GaAs の吸収損失の影響により実効屈折率実数部がストライプ内に比べ小さくなり、これにより形成された実効屈折率分布により光の閉込めが行われる。このようなリッジストライプ型のレーザーでは、ストライプ部とストライプ外との実効屈折率差 ΔN_{eff} が横モード安定化に対して重要なパラメータとなる。図4に活性層厚 d およびストライプ外における活性層-電流狭窄層間距離 h と ΔN_{eff} との関係を示す。安定な横モード発振を実現するには 10^{-2} 程

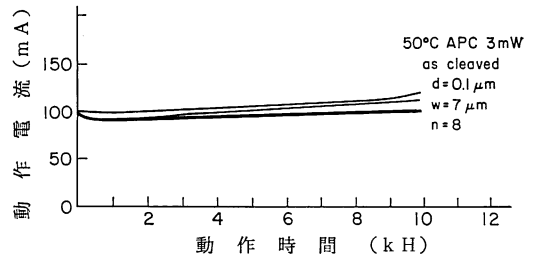


図3 動作試験結果

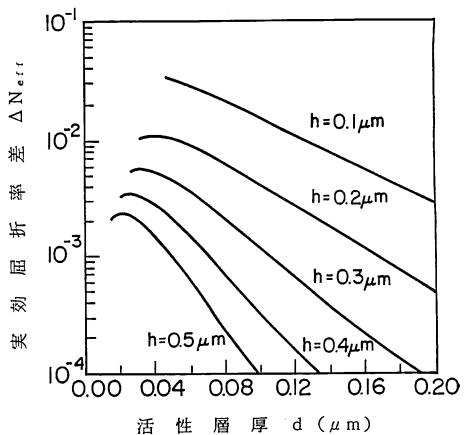


図4 実効屈折率差の構造パラメータ依存性

度の ΔN_{eff} が必要である. したがって, たとえば活性層厚を $0.06 \mu\text{m}$ とすると, 図より h としては $\sim 0.2 \mu\text{m}$ が適当な値となる. 図5は $d=0.06 \mu\text{m}$, $h=0.2 \mu\text{m}$ として作製した SBR レーザーの遠視野像プロファイルを示したものである²⁸⁾. 光出力 5 mW まで安定な基本横モード発振が得られている.

上述の d と h は非点隔差^{29,30)}および雑音特性^{31,32)}にも影響を与える重要なパラメータである. 図6に非点隔差 Δz の d および h に対する依存性を計算した結果を示す³⁰⁾. SBR レーザーでは, d または h が大きくなると非点隔差が増大する. これは図4に示したように, d , h が大きくなると ΔN_{eff} が小さくなり光の閉込めが弱くなるためである. 一方, 利得導波型レーザーでは, Δz の d 依存性が SBR レーザーとは逆になる. これは活性層厚に依存した閾電流値の違いにより電流広がり幅が変わるためである. SBR レーザーでも h が十分大きくなると, 利得導波型レーザーの特性を示すようになる. SBR レーザーおよび利得導波型レーザーの非点隔差の測定結果を図7に示す³⁰⁾. 活性層厚依存性に関して, 計算結果と同様の傾向を示していることがわかる.

SBR レーザーの雑音特性測定結果を図8に示す³²⁾. 図8(a)に示したように, 相対雑音強度 (RIN) は活性

層厚が大きくなると低減される傾向にある. したがって, 高出力化および非点隔差低減と雑音特性とはトレードオフの関係にある. 図8(b)に示したように, 活性層厚 $0.06 \mu\text{m}$ の素子では光出力 3 mW , 戻り光量 5% 以下で -130 dB/Hz 以下の RIN が得られた.

InGaAlP 材料系の特徴の一つとして, InGaP/InGaAlP ヘテロ接合における伝導帯側のバンド不連続が

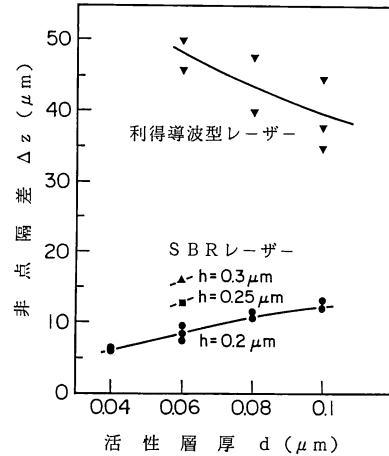


図7 非点隔差測定例

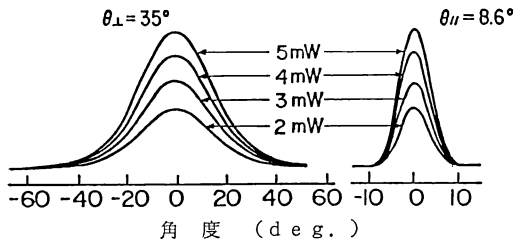


図5 SBR レーザーの遠視野像

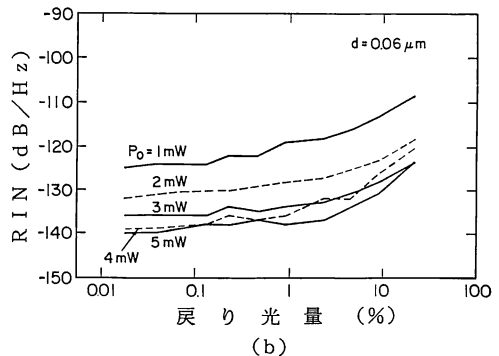
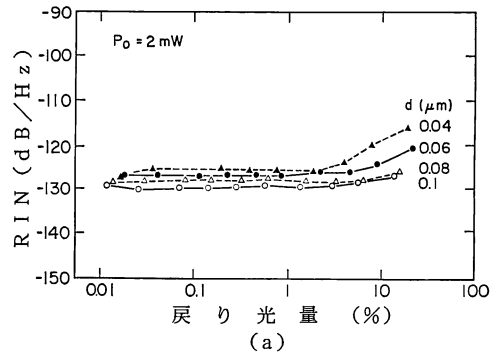


図8 SBR レーザーの雑音特性
(a)活性層厚依存性, (b)光出力依存性

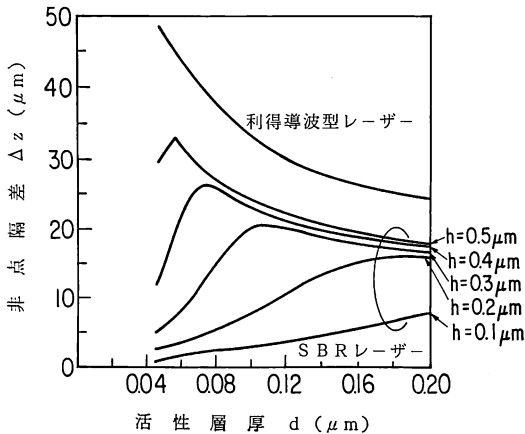


図6 非点隔差の構造パラメータ依存性

GaAlAs 系等比べて小さいことが挙げられる³³⁾。そのため活性層とクラッド層とのバンドギャップ差を比較的大きな値にとった場合でも、活性層から p クラッド層へのキャリアオーバーフローにより、高温動作時での閾値上昇が起り、最高発振温度が制限される。このような温度特性は p クラッド層のキャリア濃度に大きく影響される。実験においても、p キャリア濃度を上げることにより最高発振温度が向上されることがわかった²¹⁾。図 9 に SBR レーザーの電流-光出力特性を示す²⁸⁾。図に示したように、このレーザーでは最高発振温度として 99°C が得られている。

屈折率導波型レーザーとしては、この他にストライプ外に低屈折率層を形成して実屈折率差により横モードを制御する構造のレーザーも報告されている³⁴⁾。

2.3 ヘテロ障壁を電流狭窄に利用した InGaAlP レーザー^{35,36)}

上述のバンド構造に関するもう一つの特徴は、GaAs/InGaAlP ヘテロ接合における価電子帯端バンド不連続値が大きいことである^{33,37)}。このため、ある条件の下では p-GaAs/p-InGaAlP 界面におけるヘテロ障壁により電流がほとんど流れなくなる。この性質を電流狭窄に利用した HBB (hetero barrier brocking) レーザー^{35,36)}の構造を図 10 に示す。図 11 は、このレーザーのストライプ部およびストライプ外に対応した構造における電圧-電流特性のシミュレーション結果を示したものである。レーザーの動作電圧の範囲ではストライプ外にほとんど電流が流れないことがわかる。この特性は実験でも確認された。

HBB レーザーの屈折率分布は図 1 (b) と同じなので、横モード特性に対しては SBR レーザーと同等の屈

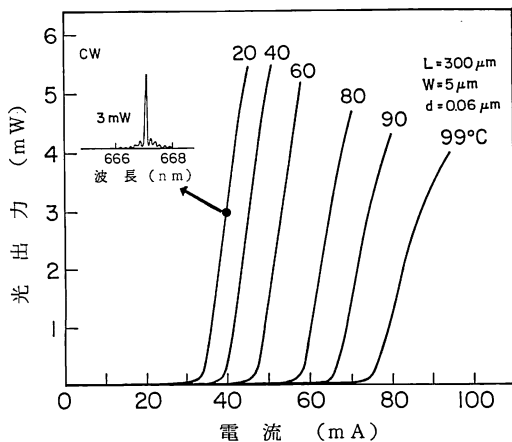


図 9 SBR レーザーの電流-光出力特性

折率導波構造となっている。作製プロセス上では、SBR レーザーと比較した場合、電流狭窄層を形成する必要がないことから、結晶成長回数が 1 回少なく済むという利点も持っている。

HBB レーザーの電流-光出力特性および接合面に平行方向の遠視野像プロファイルを図 12 に示す。10 mW までキックはなく安定な単一横モード発振が実現されている。連続発振最高温度は 80°C であり、また端面コーティングなしの素子で、40°C、3 mW において 1000 時間を越える動作試験結果が得られている³⁶⁾。

3. 高出力化

半導体レーザーの高出力化を制限する要因の一つは端

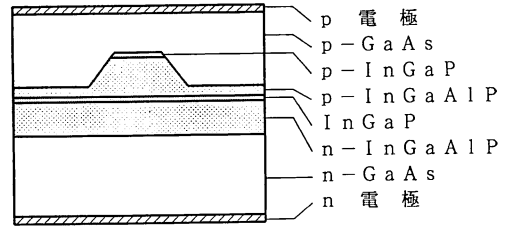


図 10 HBB レーザーの構造

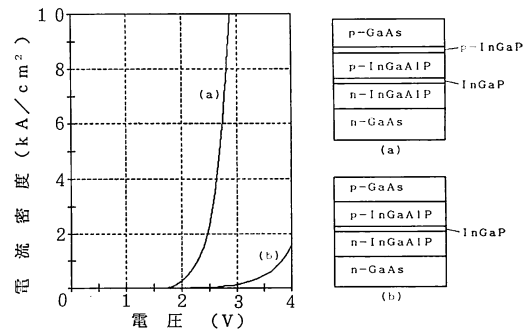


図 11 HBB レーザーのストライプ部 (a) およびストライプ外 (b) における電圧-電流特性

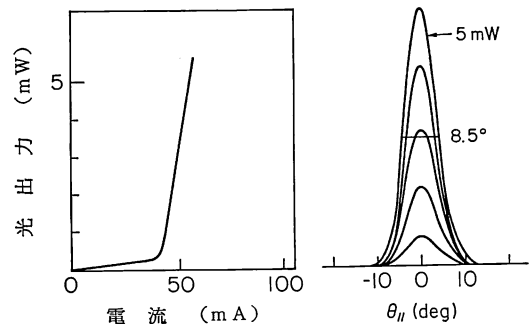


図 12 HBB レーザーの特性

面における COD (瞬時光学損傷) である。COD を起こす光出力は端面の光パワー密度および動作条件に依存する。端面の光パワー密度低減の手段としては、接合面に垂直方向に対しては活性層薄膜化、平行方向に対しては広ストライプ化がある。以下で横モード制御 (狭ストライプ) 構造および広ストライプ構造の InGaAlP レーザにおける高出力化の現状を述べる。

3.1 横モード制御 InGaAlP レーザの高出力化

図1(b)に示した SBR レーザにおける規格化光パワー密度と活性層厚 d との関係を図13に示す³⁸⁾。ここで規格化光パワー密度は、単位光出力に対する端面光パワー密度のピーク値として定義してある。図13で、活性層-電流狭窄層間距離 h が大きいほど、規格化光パワー密度が低いのは、図4に示したように水平方向の実効屈折率差 ΔN_{eff} が小さくなり、モードの横方向の広がりが大きくなることによる。このような領域では利得導波性が強くなり、非点隔差の増大を招くので、 h を大きくすることによる光パワー密度低減は望ましくない。一方、活性層薄膜化による光パワー密度低減は、光閉込め係数の低減に起因した閾値上昇があるため、活性層厚の最適化が必要である。解析および実験によれば、 $d \geq 0.04 \mu\text{m}$ の領域では、閾電流密度の上昇は顕著ではない³⁹⁾。

図14に、活性層厚を $0.04 \mu\text{m}$ 、ストライプ幅を $5 \mu\text{m}$ として試作した SBR レーザの電流-光出力特性を示す。端面コーティングなしの素子で最大光出力 27.5mW の連続発振が得られた⁴⁰⁾。またパルス動作では 100mW 以上の光出力が得られている。横モード制御レーザーでは、このほかにも 30mW クラスの室温連続発振が報告されている^{41,42)}。しかし図14に示した例を含め、い

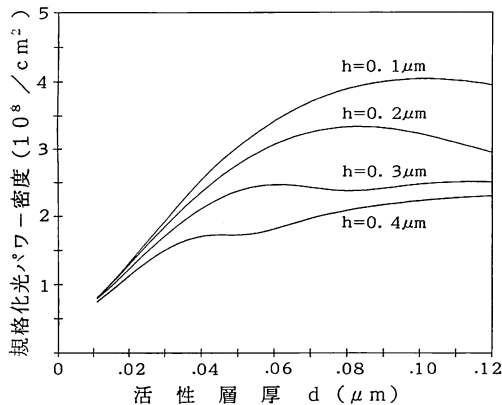


図13 規格化光パワー密度の構造パラメータ依存性

れも寿命特性までは確認されておらず、信頼性確保がこれからの大きな課題と考えられる。

3.2 広ストライプ構造による高出力化

光パワー密度を小さい値に保ったまま高出力を得る比較的簡単な方法として、広ストライプ化がある^{15,38,43)}。

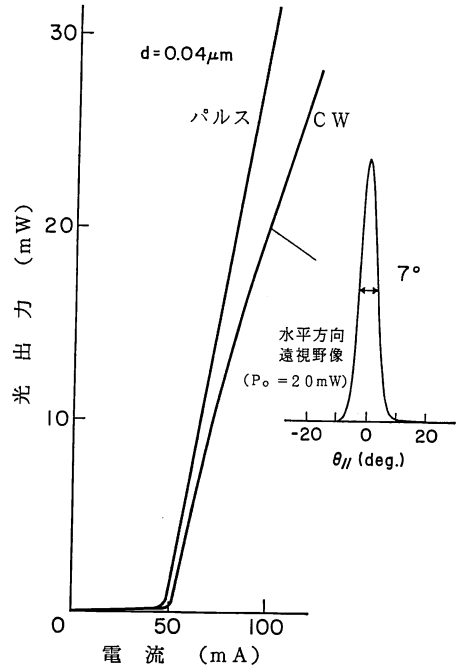


図14 高出力 SBR レーザの特性

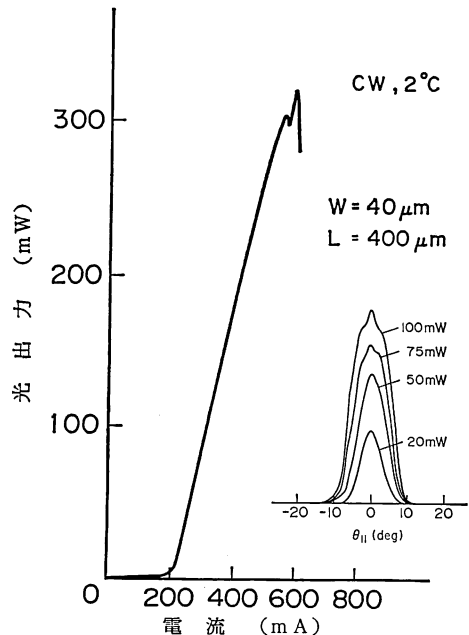


図15 広ストライプレーザーの特性

図 15 にストライプ幅を $40\ \mu\text{m}$ とした InGaAlP レーザーの電流-光出力特性例を示す。2°C にて、光出力 300 mW 以上の連続発振が得られている⁴⁴⁾。なお、このレーザーは前面反射率 10%、後面反射率 90% の端面コーティングを施してある。

InGaAlP レーザーの場合、100 mW を越える高出力動作ではヒートシンク材料や共振器長、クラッド層厚等の構造寸法が熱特性に大きな影響を与える。したがって、これらを考慮したデバイス設計が必要である³⁸⁾。

4. 短波長化

InGaAlP レーザーの短波長化の方法としては、① 活性層への Al 添加⁴⁵⁻⁵⁰⁾、② 多重量子井戸構造の採用^{26,51-53)}、③ バンドギャップエネルギーの基板方位依存性の利用⁵⁴⁻⁵⁷⁾が報告されている。2.1 節で述べたように、InGaAlP レーザーでは p クラッド層へのキャリアオーバーフローが連続発振可能な最高温度を制限する大きな要因となっている。短波長になると活性層とクラッド層とのバンドギャップ差が低減するため、この効果がさらに顕著になる⁵⁰⁾。

図 16 に 0°C 以上で連続発振が得られている波長と発振温度の報告例を示す。図からわかるように、発振波長と発振可能温度との関係はほぼ一つの直線上に載っており、上述した短波長化の手段にはあまり依存していない。これらの報告例はデバイス構造や結晶成長条件等が異なり、また必ずしも最高発振温度の観点から報告されているわけではないので、短波長化の手段に関する優劣をここで論ずることはできないが、いずれにしてもこの

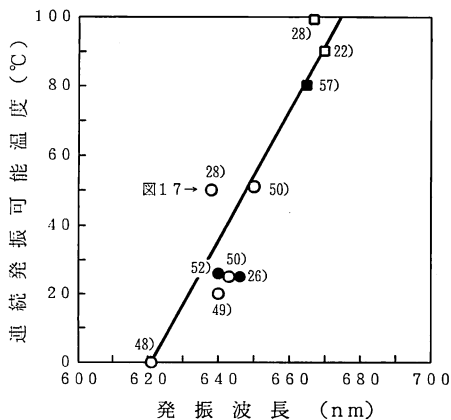


図 16 InGaAlP レーザーの発振波長と連続発振可能温度の報告例
□: InGaP 活性層, ○: InGaAlP 活性層,
■: オフ基板, ●: MQW

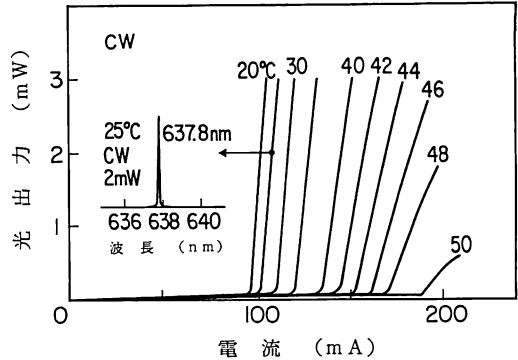


図 17 波長短 InGaAlP レーザーの発振スペクトルおよび電流-光出力特性

図の直線が短波長化に関する現状レベルを示していることになる。この直線の上にシフトさせることがこれからの課題であろう。

図 17 に、最近得られた InGaAlP 活性層による短波長レーザーの結果を示す²⁸⁾。波長 638 nm で 50°C まで連続発振が可能であり、明らかに図 16 の線より上に位置していることがわかる。高出力レーザーと同様に信頼性確保もこれからの課題の一つであるが、すでに波長 650 nm のレーザーでは 1000 時間を越える寿命特性が報告されている⁵⁰⁾。

5. ま と め

InGaAlP 可視光半導体レーザーに関する現状技術と、高出力化および短波長化に関する開発動向を述べた。この材料系で現在製品化されているレーザーの応用分野は、利得導波型レーザーを用いた比較的簡単な応用が主となっているが、今後は屈折率導波型レーザーによる光ディスクシステム等への応用^{58,59)}と、そのための性能改善に関する開発が進むと考えられる。また高出力化、短波長化によりさらにその応用範囲が広がることが期待される。

文 献

- 1) 特集“可視光レーザー”: 光技術コンタクト, 25, 5 (1987) 252-286.
- 2) 石川正行, ほか: 信学誌, 70 (1987) 157-162.
- 3) 鈴木 徹: 応用物理, 56 (1987) 990-999.
- 4) 鈴木 徹: 光学, 17 (1988) 8-13.
- 5) 植松 豊: レーザー研究, 16 (1988) 724-731.
- 6) 植松 豊: 光技術コンタクト, 27 (1989) 66-70.
- 7) S. Yamamoto, *et al.*: Appl. Phys. Lett., 41 (1982) 796-798.
- 8) A. Usui, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., 24 (1985) L163-L165.
- 9) 鄭 台鎬, ほか: 信学技報, ED 89-107 (1990) 65-71.

- 10) K. Kobayashi, *et al.*: Electron. Lett., **21** (1985) 931-932.
- 11) M. Ikeda, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **47** (1985) 1027-1028.
- 12) M. Ishikawa, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 207-208.
- 13) H. Tanaka, *et al.*: J. Appl. Phys., **61** (1987) 1713-1719.
- 14) K. Kobayashi, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-23** (1987) 704-711.
- 15) M. Ikeda, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 101-105.
- 16) T. Hayakawa, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) L1553-L1555.
- 17) H. Okuda, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **25** (1989) 1477-1482.
- 18) M. Ishikawa, *et al.*: Extended Abstracts, 18th Conf. on Solid State Devices and Materials (1986) pp. 153-156.
- 19) M. Ikeda, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **51** (1987) 1572-1573.
- 20) G. Hatakoshi, *et al.*: Trans. IEICE Jpn., **E71** (1988) 315-317.
- 21) 奥田 肇, *ほか*: 信学技報, **OQE88-10** (1988) 65-70.
- 22) H. Shiozawa, *et al.*: Electron. Lett., **24** (1988) 877-879.
- 23) M. Ishikawa, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) 1615-1621.
- 24) K. Itaya, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 1363-1365.
- 25) M. Ishikawa, *et al.*: Trans. IECE Jpn., **E69** (1986) 382-384.
- 26) S. Kawata, *et al.*: Electron. Lett., **24** (1988) 1489-1490.
- 27) R. Tanaka, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **54** (1989) 1391-1393.
- 28) Y. Uematsu, *et al.*: Proc. SPIE, **1219** (1990).
- 29) 波多腰玄一, *ほか*: 昭和61年電子通信学会光・電波部門全国大会 (1986) p. 212.
- 30) K. Nitta, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) L2089-L2091.
- 31) G. Hatakoshi, *et al.*: Electron. Lett., **25** (1989) 125-126.
- 32) 新田康一, *ほか*: 1989年電子情報通信学会春季全国大会, C-440.
- 33) M. O. Watanabe, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 906-908.
- 34) 上山 智, *ほか*: 1989年電子情報通信学会秋季全国大会, C-190.
- 35) 板谷和彦, *ほか*: 信学技報, **OQE89-44** (1989) 49-54.
- 36) K. Itaya, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1989) L2414-L2416.
- 37) G. Hatakoshi, *et al.*: Trans. IEICE Jpn., **E71** (1988) 923-925.
- 38) 波多腰玄一, *ほか*: レーザー研究, **17** (1990) 706-713.
- 39) 石川正行, *ほか*: 信学技報, **OQE87-46** (1987) 115-120.
- 40) M. Ishikawa, *et al.*: Extended Abstracts, 19th Conf. on Solid State Devices and Materials (1987) pp. 115-118.
- 41) H. Fujii, *et al.*: Electron. Lett., **23** (1987) 938-939.
- 42) 小林健一, *ほか*: 信学技報, **OQE88-9** (1988) 61-64.
- 43) G. Hatakoshi, *et al.*: Technical Digest, 15th European Conf. on Optical Communication, TuB10-1 (1989).
- 44) 板谷和彦, *ほか*: レーザー学会学術講演会第10回年次大会, 26p II7 (1990).
- 45) M. Ikeda, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **45** (1984) 964-966.
- 46) I. Hino, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 557-558.
- 47) K. Kobayashi, *et al.*: Electron. Lett., **21** (1985) 1162-1163.
- 48) S. Kawata, *et al.*: Electron. Lett., **22** (1986) 1265-1266.
- 49) S. Kawata, *et al.*: Electron. Lett., **23** (1987) 1327-1328.
- 50) M. Okajima, *et al.*: Technical Digest, International Symposium on Optical Memory 1989, 27D-8 (1989).
- 51) M. Ikeda, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **50** (1987) 1033-1034.
- 52) J. M. Dallesasse, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **53** (1988) 1826-1828.
- 53) 菊池昭彦, *ほか*: 信学技報, **ED89-105** (1990) 49-56.
- 54) M. Ikeda, *et al.*: Electron. Lett., **24** (1988) 1094-1095.
- 55) T. Tanaka, *et al.*: Electron. Lett., **25** (1989) 905-907.
- 56) S. Minagawa, *et al.*: Electron. Lett., **25** (1989) 925-926.
- 57) 浜田弘喜, *ほか*: 信学技報, **ED89-106** (1990) 57-64.
- 58) 小野雄三, *ほか*: 1987年テレビジョン学会全国大会, 7-7.
- 59) 山口 隆, *ほか*: 1989年テレビジョン学会全国大会, 7-1.