

解説

0.6 μm 帯可視光半導体レーザー

鈴木 徹

日本電気(株)光エレクトロニクス研究所 〒213 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1987年11月4日受理)

0.6 μm -Band Visible-Light Semiconductor Lasers

Tohru SUZUKI

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 213

1. ま え が き

半導体レーザーは、超小型、高信頼、低消費電力、高速直接変調可能、などの著しい特徴のために、光情報処理や光通信のキーデバイスとして使われている。実用化は1980年代にはいつてからであり、商品としての歴史は、研究開発の歴史に比較して短い。しかし、周知のようにコンパクトディスクや光ディスク情報ファイルシステム、レーザープリンタなどの光源として、昭和61年度において年間数百万個の AlGaAs 半導体レーザーが、また、光ファイバ通信用光源として年間数万个の GaInPAs 半導体が生産されるなど、急速な普及が進んでいる。

ところが、これら半導体レーザーの発振波長は、光通信用が 1.3~1.55 μm 、光情報処理用が 0.78~0.83 μm と近赤外線領域に属している。そのため、可視域($\lambda < 0.7 \mu\text{m}$)で発振する半導体レーザーへの要望には根づいものがあったが、近年、新しい III-V 族化合物半導体混晶 AlGaInP のエピタキシャル成長が可能になって以来、0.6 μm 帯赤色可視光半導体レーザーの研究開発が進み実用化への見通しも得られつつある。本稿では、AlGaInP 可視光半導体レーザーの最近の進展について筆者グループの結果を中心に述べる。おわりに、0.5 μm 以下の緑青色 LD への展望についても簡単に触れたい。

2. 可視光半導体レーザーの用途

可視光半導体レーザーにはさまざまな用途が考えられ

る。応用上の利点として、まえがきの冒頭にあげた点に加えて、①光線の可視性、②集光スポットが小さくできること、③重要な半導体、無機・有機材料との相互作用が大ききことなどが挙げられる。

図1に視感度の波長依存性を示す¹⁾。0.6 μm 帯の半導体レーザーが実用化されれば、従来の AlGaAs 半導体レーザーの波長 0.78~0.83 μm での視感度に比べ $10^3 \sim 10^4$ 倍の視感度のコヒーレント光が得られるようになる。可視性は、可視光半導体レーザーの最大の特徴であり、無数の応用を生む源である。

第2の特徴である集光スポット径の微小化も応用範囲が広い。波長 λ の光の、開口数 NA のレンズによる集光スポット径の下限は λ/NA で決まるため、短波長レーザーは光ディスクの記録密度を上げるのに有効である。この効果は波長 0.68 μm の可視光半導体レーザーを用いて実際に確認されている(4.章参照)。一方、同一のスポット径に対しては、短い波長であれば、小さな NA の光学系が使えるため、光学系設計上の利点が生ずる。

第3の、重要物質との強い相互作用という点では、たとえばセレンやアモルファスシリコン、さらには有機光導電体など可視域で吸収が大きく光導電特性にすぐれたものが多い。これらの利用が可能となるため、たとえばレーザープリンタの高性能化、小型化が可能となる。

こうした著しい特徴のゆえに、可視光半導体レーザーは、実用化されるならば広い応用分野を切り拓いてゆくものと期待される。もともと現在商用になっている AlGaAs 半導体レーザーの波長 0.78~0.83 μm は、結

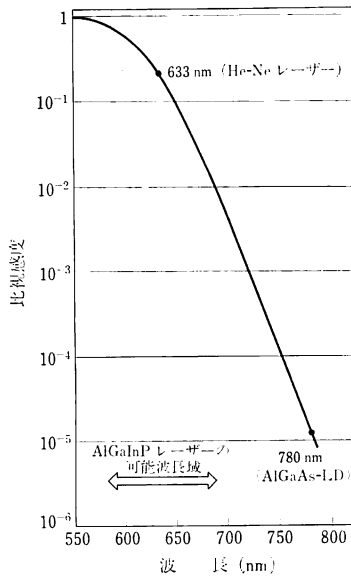


図 1 視感度の波長依存性

晶工学と半導体レーザー工学の歴史の「必然と偶然の織りなす結果」として決まっているものであり、この波長自身に特別な意味があるわけではない。したがって、上に述べた特徴を合わせもつ可視光半導体レーザーは、信頼性、レーザー特性、量産性が少なくとも AlGaAs レーザー並み以上であれば、現在の AlGaAs レーザーの相当部分にとってかわる力をもつものと考えられる。

また、可視光半導体レーザーは、従来光計測その他の分野で長らく使われてきた He-Ne ガスレーザー (波長 0.63 μm) の相当部分にとってかわるであろう。電力利用効率の高い半導体レーザーは、高出力化も可能であり、1 W クラスの半導体レーザーが出現すれば、Kr, Ar などの可視光ガスレーザーの応用分野でも利用が進むことになるものと思われる。

3. AlGaInP 可視光半導体レーザー

3.1 結晶の開発

2. 章で述べたように、0.7 μm 以下に発振波長をもつ可視光半導体レーザーが実現したときの用途は広大なものであるが、ごく近年に AlGaInP レーザーが出現するまでは、まったく見通しのない「可能性」にすぎなかった。AlGaInP²⁾ は、Ⅲ₁-Ⅲ₂-Ⅲ₂-Ⅴ 型のⅢ-Ⅴ族化合物半導体であり、可視光半導体レーザー用の理想的な材料であるが、LPE ではエピタキシャル成長が事実上不可能な混晶であったため開発が進まなかった。1981~1982

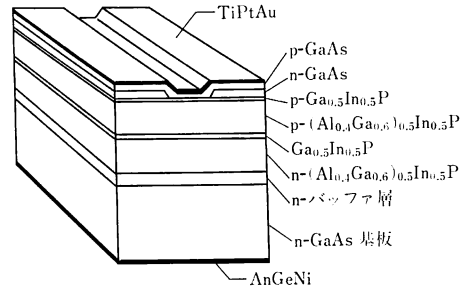


図 2 利得導波型レーザーの構造

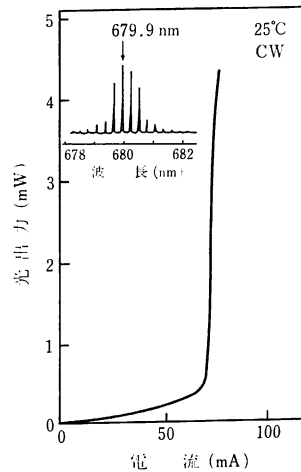


図 3 利得導波型 AlGaInP 可視光半導体レーザーの電流-光出力特性と発振スペクトル

年に MBE³⁾ (molecular beam epitaxy) と MOVPE^{4,5)} (metalorganic vapor phase epitaxy) によってはじめてエピタキシャル成長が可能となった。これがブレイクスルーとなり、0.6 μm 帯可視光半導体レーザー研究開発の今日の盛況が実現しているといえる。

3.2 利得導波型 AlGaInP レーザー

まず、AlGaInP レーザーの最も単純な構造の一つで、信頼性を含めた基本的なレーザー特性が最も見やすい利得導波型レーザーについて述べる。レーザーはとくに断らない限り図 2 に示す構造である⁶⁾。

AlGaInP 系レーザーの基本となるのは、活性層が Al を含まない構造である (図 2 で $x=0$)。クラッド層の組成は活性層とのバンドギャップ差を 300 meV とするために $y=0.4$ としている。AlGaInP レーザーで室温連続 (cw) 発振⁶⁻⁸⁾ が得られたのはこの構造のレーザーにおいてであった。活性層とクラッド層の膜厚はそれぞれ 0.1 μm, 1.2 μm である。この構造は 2 回の MOVPE 成長でつくられる。電流狭窄は、幅 8~10 μm のストラ

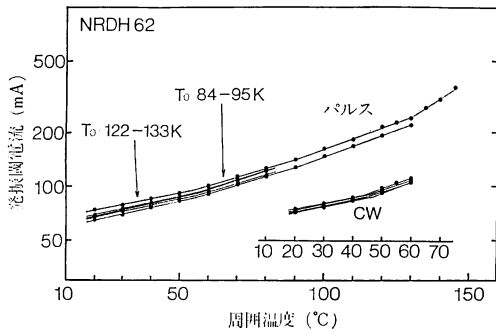


図4 発振閾電流値の温度依存性

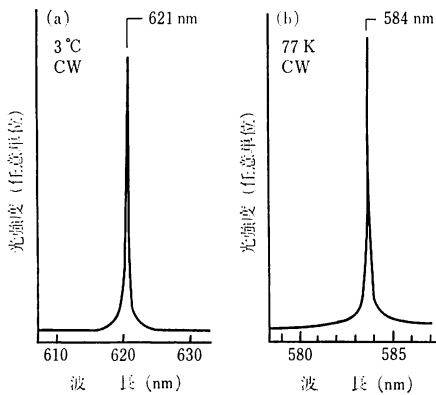


図5 活性層が AlGaInP の短波長可視光半導体レーザーの発振スペクトル

イブ両側に設けられた p-n-p 電流ブロック構造により行なっている。共振器長は 200~250 μm である。

図3に、このレーザーの cw 動作時の発振スペクトルおよび電流-光出力特性を示す。発振波長は 680 nm、発振閾電流密度 (パルス) は最低 2.6 kA/cm² である。ブロードコンタクトのレーザーでは ~1 kA/cm² を確認している。50°C 付近までの特性温度 T_0^* (パルス動作) は 122~133 K、50°C 以上で 84~95 K であった (図4)⁹⁾。

AlGaInP 系レーザーは、原理的には 580 nm までの短波長化が可能である。短波長化のためには、①活性層に 3元混晶 Ga_{0.5}In_{0.5}P の代わりに 4元混晶 (Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P を用いる方法と、②活性層に量子井戸を採用する方法があるが、後者はまだ研究が始まったばかりである。①についてはいくつかの試みがある。

Al を活性層に入れた半導体レーザーの短波長発振の例を図5に示す。3°C ではあるが、He-Ne レーザーより短い 621 nm で cw 発振が得られている¹⁰⁾。また本

材料系の理論的限界発振波長に近い 583 nm (黄色) において 77 K での cw 発振が得られている¹¹⁾。

Al を活性層に含むレーザーは、発振閾電流密度が Al 組成の増加 (= 発振波長の短波長化) とともに漸増する傾向がある。He-Ne レーザーでの波長 (633 nm) で発振する実用的な可視光レーザーの実現には、4元混晶の結晶性のひきつづく改善が必要であろう。

実用的可視光半導体レーザーにとっては、素子寿命が最大の問題の一つである¹²⁾。活性層 Ga_{0.5}In_{0.5}P のレーザー (波長 678 nm) の室温におけるエージング試験結果を図6に示す。出力 3 mW、室温で 7,000 時間以上の連続動作が得られている。また 50°C においても出力 3 mW の条件で 6,000 時間以上の連続動作が可能であることが確認されている。これらのデータは、新しい半導体 AlGaInP を用いた可視光レーザーが実用に耐える性質をもつものであることを示している。

なお、Ga_{0.5}In_{0.5}P を活性層とする半導体レーザーは、いくつかの研究機関から研究発表があるが、発振波長が 650~690 nm の範囲に分布している^{7,13,14)}。これは、各研究機関での Ga_xIn_{1-x}P の組成制御が不十分であるためではなく、MOVPE 結晶成長条件により、同じ組成であっても、結晶中に Ga と In の超格子が形成されるためにおこるバンドギャップの変化を反映したものと解

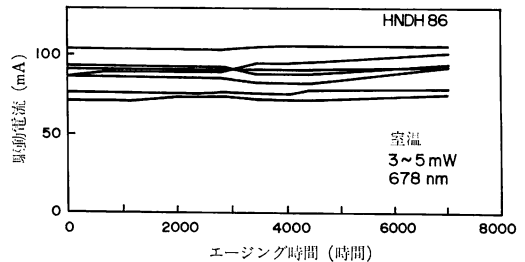


図6 素子の寿命特性

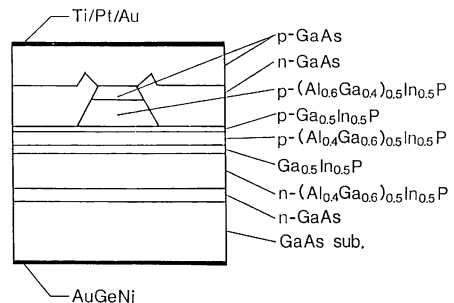


図7 屈折率導波型 AlGaInP 半導体レーザーの構造

*¹⁾ $J_{th}(T) = J_{th}(T_0) \exp[(T - T_0)/T_0]$ で特性温度 T_0 を定義する。

積されている²¹⁾.

3.3 屈折率導波型 AlGaInP レーザー

図7に屈折率導波型 AlGaInP レーザーの構造例を示す¹⁶⁾. この構造は, Ishikawa ら²²⁾ のものと類似であるが, クラッド層中に薄い ($\sim 40 \text{ \AA}$) 「エッチングストップ層」を設けてあるために, 活性層と GaAs 吸収層との間の距離の制御性が良好であり, 量産に向くものとなっている.

ストップ層は $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ でできているが, 層厚が 40 \AA と薄いために, エネルギーレベルが量子化されている. このため吸収端がバルクの $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ (活性層) より短波長側にずれており, レーザー光は活性層と同一組成をもつストップ層によって著しい吸収を受けることはない.

結晶成長は MOVPE の3回成長で, ストライプ幅は

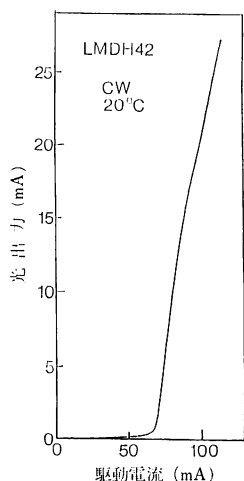


図8 電流 - 光出力特性
27 mW までの高出力 cw
動作が得られている.

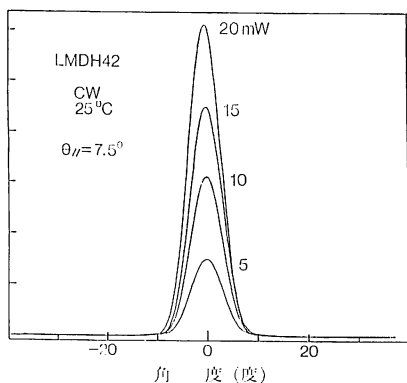


図9 遠視野像

$5 \mu\text{m}$, 共振器長は $320 \mu\text{m}$ である. 図7のレーザーは, 高光出力を得るために, 共振器の両面にコーティングを行なっている.

図8, 図9に電流-光出力特性および, pn 接合に平行方向の遠視野像を示す. ここでは最大光出力 27 mW が得られた. 図9が示すように, 少なくとも光出力 20 mW まで基本横モード発振が得られている. 発振波長は 683 nm であった. 以下に示すようにこの高出力可視光半導体レーザーを用いて, 光ディスク書込み実験が行なわれた.

4. 応用例

以下に, 光ディスクとバーコードリーダへの応用例について述べる.

4.1 光ディスク¹⁶⁾

2. 章で述べたように, 発振波長が短いレーザーを用いれば集光スポットを小さくできるが, その最も直接的な応用の一つが光ディスクの高密度化である. 683 nm の高出力半導体レーザーを用いた追記型光ディスクヘッドが開発され, 従来の 830 nm AlGaAs レーザーを用いた場合に比べ 1.5 倍の高密度記録・再生が確認できた. 集光スポット径は約 $0.7 \mu\text{m}$ (FWHM) である. 媒体は 5 インチ Te 系光ディスクを用いた. 図10は幅記録における再生信号振幅の周波数特性をディスクの最内周において求めたものである. 振幅が半減する記録周波数は従来 (830 nm レーザー) に比べ 1.3 倍になっていることがわかる.

このほか, 光学式ビデオディスクへの適用実験も行なわれ, 良好なディスク読取り特性が確認されている¹⁷⁾.

4.2 バーコードリーダ¹⁸⁾

バーコードシンボルを読み取るバーコードリーダには

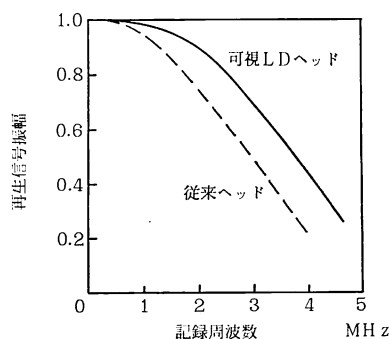


図10 光ディスクの記録周波数特性
本ヘッドは 683 nm レーザーを, 従来ヘッドは 830 nm レーザーを用いている.

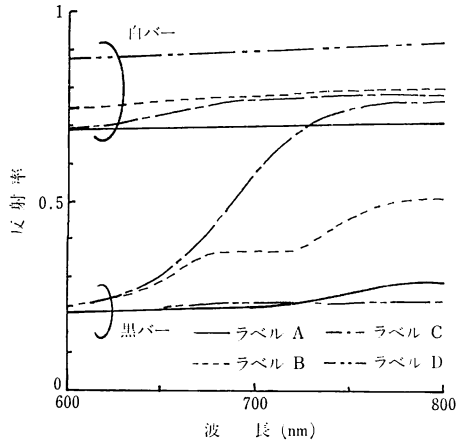


図 11 バーコードシンボルの“黒バー”の分光反射率

現在 He-Ne レーザーが用いられている。半導体レーザーが使えれば小型化、軽量化できるはずであるが、従来の 780 nm AlGaAs レーザーでは問題があった。図 11 は現在市場に出回っている種々のバーコードシンボルの白バー、黒バーの分光反射率である。JIS 規格ではバーコードの反射率を測定する条件は、実質的には波長 590 ~ 680 nm の間に限られているため、波長 700 nm 付近で黒バーの反射率が急に高くなるものがある。このようなバーコードシンボルは相当に普及しており、したがって 780 nm のレーザーは使うことができなかった。680 nm の可視光半導体レーザーを使ったところ、これらのバーコードシンボルが支障なく読めることが明らかとなった。さらに、633 nm の He-Ne レーザーで読取りが困難であった若干の色付きバーコードシンボルも読取り可能であることがわかった。こうして、680 nm の可視光半導体レーザーを光源としたバーコードリーダーは、実際のフィールドで使用可能であることが明らかになっている。

5. 短波長化、緑青色半導体レーザーへの展望

AlGaInP レーザーは、~580 nm までの室温 cw 発振が可能と信ぜられている。実用化は、活性層が $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$ のときの波長域である 660~690 nm で行なわれるものと思われるが、材料の極限可能波長 580 nm (黄色) のレーザーが将来実現することになる。

AlGaInP は事実上、III-V 族化合物半導体の最もバンドギャップの大きな結晶であり、580 nm より短い波長の注入型半導体レーザーを実現するには、II-VI 族化合物半導体の pn 接合が必要となる。しかし、ZnSe や

ZnS などのワイドギャップ II-VI 族では pn 接合の形成に必要な低抵抗の p 型結晶が得られていない。低抵抗の p 型結晶を実現するための努力は営々と続けられており、最近はこの動きも活発化している。しかし、低抵抗 p 型結晶に最短の位置にあると思われる ZnSe は、結晶自身の高品質化が着実に進んでいるにもかかわらず、p 型低抵抗結晶が得られる気配が感じられない。この原因はより全面的に解明される必要がある。ことによると、ZnSe の低抵抗 p 型結晶は原理的に実現不可能であるかもしれない。であればこそ、ZnSe 中での p 型となるべき不純物準位の正確な決定、それら不純物の ZnSe 中への固溶限界などの基本に関する計算物理の手法をも考慮した真剣な検討が、今求められていると考えられる。

このような正攻法に対し、第 2 高調波発生による短波長化が近道ではないかとの指摘がなされた¹⁹⁾が、最近この方向での試みが集光特性などに問題をもちながらも成功をおさめつつある²⁰⁾。実用化へはまだ若干の道のりがありそうだが、期待のもてる方向と思われる。

6. む す び

0.6 μm 帯可視光半導体レーザーは、近年わが国において新しい半導体結晶 AlGaInP の研究開発が進んだ結果、660~690 nm の波長域で実用化の見通しが初めて得れつつある。また、光ディスク光源などへの応用研究もはじまりつつある。580 nm (黄色) までの短波長化が将来可能となる。

0.4~0.5 μm 帯の高効率レーザーダイオードは、II-VI 族化合物半導体結晶工学の分野での大きなブレイクスルーが必要とされており前途は厳しいものがある。近赤外高出力半導体レーザー光の通倍によって緑青色を得る方法の進展が期待される。

本稿を作製するにあたりご協力を得た日野功、小林健一、五明明子、河田誠治、窪田恵一、河合 滋、小野雄三、山中豊の諸氏に感謝いたします。

なお、本稿に述べた当社可視光半導体レーザーに関する研究成果の基本部分は、工業技術院大型プロジェクト「光応用計測制御システムの研究開発」の一環として行なわれたものである。

文 献

- 1) 久保田広ほか編: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 東京, 1968) p. 316.
- 2) H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish: *Hetero-structure Lasers, Part B* (Academic Press, New York, 1978).

- 3) H. Asahi, *et al.*: Inst. Phys. Conf. Ser., **63** (1982) 575.
- 4) T. Suzuki, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys., **21** (1982) L 731.
- 5) I. Hino and T. Suzuki: J. Cryst. Growth, **68** (1984) 483.
- 6) K. Kobayashi, *et al.*: Electron. Lett., **21** (1985) 931.
ほぼ同時期に次の二つの論文も AlGaInP レーザーの室温 cw を報じた。レーザー構造は互いに多少異なる。
- 7) M. Ikeda, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **47** (1985) 1027.
- 8) M. Ishikawa, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 207.
- 9) K. Kobayashi, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **QE-23** (1987) 704.
- 10) S. Kawata, *et al.*: Electron. Lett., **22** (1986) 1265.
- 11) I. Hino, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **48** (1986) 557.
- 12) A. Gomyo, *et al.*: Electron. Lett., **23** (1987) 85.
- 13) T. Suzuki: *Extended Abstracts of the 18th Int. Conf. on Solid Devices and Materials*, Tokyo (1986) p. 149.
- 14) M. Ishikawa, *et al.*: *Extended Abstracts of the 19th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tokyo (1987) p. 115.
- 15) H. Fujii, *et al.*: Electron. Lett., **23** (1987) 938.
- 16) 山中 豊, ほか: 第 48 回秋季応用物理学会学術講演会予稿集, 17 a-ZP-1 (1987).
- 17) 小野雄三, ほか: 1987 年テレビジョン学会予稿集 (1987).
- 18) 河合 滋: 昭和 62 年電子情報通信学会全国大会, 講演番号 1003, 予稿集 4-166 (1987).
- 19) 伊藤良一: 応用物理, **53** (1984) 128.
- 20) 谷内哲夫, 山本和久: 第 48 回秋季応用物理学会学術講演会予稿集, 19 p-ZG-1~4 (1987).
- 21) 五明明子, ほか: 第 48 回秋季応用物理学会学術講演会口頭発表, 17 p-W-2 (1987).
- 22) M. Ishikawa, *et al.*: *Extended Abstracts of the 18th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tokyo (1986) p. 153.