

# 解説

## 可視光半導体レーザーの物理

岸野克巳

上智大学理工学部電気電子工学科 〒102 東京都千代田区紀尾井町 7-1

(1995年8月7日受理)

### Physics of Visible Light Semiconductor Lasers

Katsumi KISHINO

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Science and Technology,  
Sophia University, 7-1, Kioicho, Chiyoda-ku, Tokyo 102

### 1. はじめに

10ギガバイト超級の記録容量をもつ光ディスクの実現のために、青-緑色半導体レーザーの実用化が急がれている。ZnCdSe/MgZnSSe系のII-VI族半導体レーザーでは<sup>1,2)</sup>、実用化レベルにある半導体レーザーと遜色のないレーザー特性がすでに得られているが<sup>3)</sup>、寿命時間は依然として実用化に遠く及ばない。発振波長は510 nm付近の緑色域にある。ただし、寿命時間は着実にのびて、当初の1秒以下が、1時間から<sup>1,4)</sup>それ以上になってきており、ブレーカスルーバイパスによる飛躍が待たれる。一方、InGaN/AlGaN系青色LED(light emitting diode)では、バンド端発光でも高輝度が得られるようになり、波長450 nmで外部量子効率が7.3%となった<sup>5)</sup>。寿命時間もLEDとしては十分に長いため、ますますレーザー発振への期待が高まっている。しかし、理論的には、しきい値電流密度はII-VI族レーザーよりも高いとの計算結果もあり<sup>6)</sup>、依然として両者の進展からは目が離せない。

このような背景のもとで、ここでは青-緑色半導体レーザーの基本的な課題を述べるとともに、II-VI族とIII-Vナイトライド系の半導体レーザーの比較検討を行いたい。

### 2. 可視光レーザー材料と基本的課題

MgZnCdSeとAlGaN混晶系は、図1に示すように青-緑色域から紫外域に広いバンドギャップ波長域を有し、ZnCdSe/MgZnSSeやInGaN/AlGaNなどのへ

テロ構造が構成される。AlGaNでは立方晶と六方晶の両者が研究され、GaAsなどの立方晶基板上では立方晶のGaNが成長することが明らかとなっている<sup>7)</sup>。しかし、六方晶GaNの方が質がよく、InGaN/AlGaN LEDには六方晶が用いられる<sup>8)</sup>。

レーザーの観点からみると、これらの材料系の問題点の一つに良質の基板の欠如があげられよう。図1の黒丸は基板材料の物性値を示す。通常の場合、ZnCdSe/MgZnSSeにはGaAsが、InGaN/AlGaNにはサファイヤが基板として利用される。前者はMgZnSSeと格子整合するが、II-VIとIII-V族の異なる材料系の界面で積層欠陥の発生がみられる<sup>9)</sup>。後者ではGaNとC面上で13.8%の格子不整合があり、欠陥密度も $10^8\sim 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と大きい<sup>10)</sup>。欠陥密度が大きくても、GaN系LEDの外部量子効率は高い<sup>5,8)</sup>。この理由は、十分に解明されていないが、レーザーのような高注入では問題となるかもしれない。やはり、ZnSeやGaN基板が望ましく、基板となり得る良質のバルク結晶の開発が待たれる。ZnSe基板については、最近 $10^9 \text{ cm}^{-3}$ 台まで欠陥密度が下がったともいわれ、ZnSe上の高輝度II-VI族LEDが報告されている<sup>11)</sup>。しかしながら、良質のZnSe基板が自由に大量に手に入る状況ではない。さらに、GaN基板は商業的には開発されていない。

一方、GaN系の半導体レーザーという観点でみると、サファイヤ基板は堅く、割り難いし導電性もないためレーザー加工がやり難い。そこで、6H-SiC基板などが注目され始めている<sup>12)</sup>。GaNとの格子不整合もサファイヤに比べてずっと小さく(～3%)導電性があり容易にへ

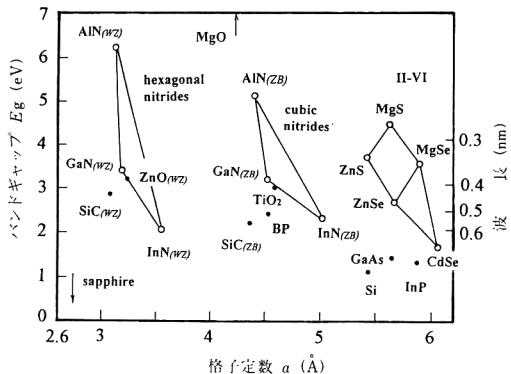


図1 可視光レーザー材料のバンドギャップと格子定数

き開ができるからである。また、(111)面  $MgAl_2O_4$  上には(0001)配向した良質の六方晶GaNが成長でき、よいへき開面が得られる<sup>13)</sup>。

可視光域では、活性層がワイドギャップになるため、レーザー性能の向上においてヘテロ障壁の高さが問題となる。しきい値電流密度  $J_{th}$  は、発光成分  $J_r$  と非発光成分  $J_{NR}$  によって次式で与えられる。

$$J_{th} = J_r + J_{NR} \quad (1)$$

ここで、 $J_r$  は、レーザー利得などから計算される。 $J_{NR}$  の成分としては、材料の質など理論的に取り込めない成分も含まれる。この成分は高品質化によって取り除かれるので、可視域ではヘテロ障壁を越えるリーク電流が支配的と考えてよい<sup>14)</sup>。このリーク電流を十分に抑制するためには、活性層とクラッド層のバンドギャップ差  $\Delta E_g$  として 0.4 eV 以上は必要である。リーク電流は、p型クラッド層への電子リークが支配的であり、拡散長の小さい正孔のリークは通常の場合考えなくてもよい<sup>14)</sup>。したがって p 側が問題となる。ヘテロ障壁はクラッド層のキャリア密度が小さい場合には低くなる。そこで、高いヘテロ障壁を確保するためには、大きな  $\Delta E_g$  とともに適度のドーピング濃度（特に p 型クラッド層の）が必要であり、この面で短波長域のレーザー性能が制限される場合が多い。たとえば、GaInP/AlGaInP レーザーでは、630 nm 以下の波長でレーザー特性が急激に劣化するのは、 $\Delta E_g$  が不十分となるからである<sup>15)</sup>。後で記述するように、ZnCdSe/MgZnSSe II-VI族レーザーもこの点では、例外ではあり得ない。

### 3. ZnCdSe/MgZnSSe II-VI族半導体レーザー

II-VI族レーザーは、米国の 3 M によって最初にレー

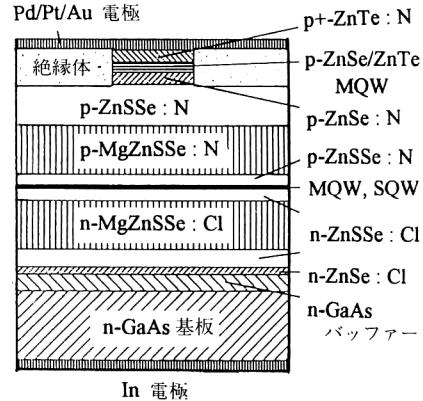


図2 ZnCdSe/MgZnSSe系青-緑色半導体レーザー<sup>1)</sup>

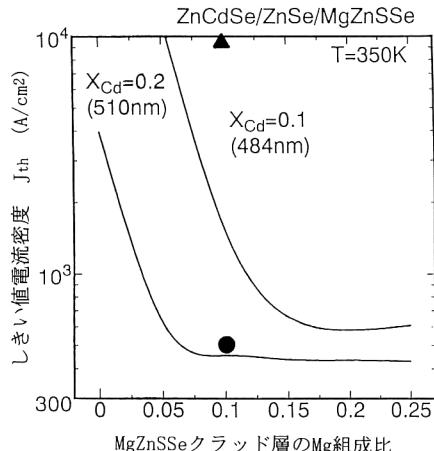


図3 ZnCdSe/MgZnSSe レーザーのしきい値電流密度の計算<sup>20)</sup> (●は波長 516 nm<sup>18)</sup>, ▲は 485.7 nm の室温の  $J_{th}$  の実験値<sup>36)</sup>

ザー発振が得られたが<sup>16)</sup>、そのときのレーザーは ZnCdSe/ZnSSe 半導体構造をもつ。その後、ソニーの開発した MgZnSSe をクラッド層に用いることで<sup>17)</sup>、室温におけるレーザー特性の飛躍的な向上が得られた<sup>18,19)</sup>。図2にこの ZnCdSe/MgZnSSe レーザーの構造を示したが、寿命時間などの詳細な特性は後続の解説論文に譲り、ここでは短波長化と横モード制御について記述したい。

図3は ZnCdSe/MgZnSSe レーザーのしきい値電流密度  $J_{th}$  の計算値であり<sup>20)</sup>、実用的な観点から 350 K (77°C) の高温での値が示されている。横軸が MgZnSSe クラッド層の Mg 組成比で、パラメーターには ZnCdSe 活性層の Cd 組成比(発光波長)をとった。横軸が 0 の点

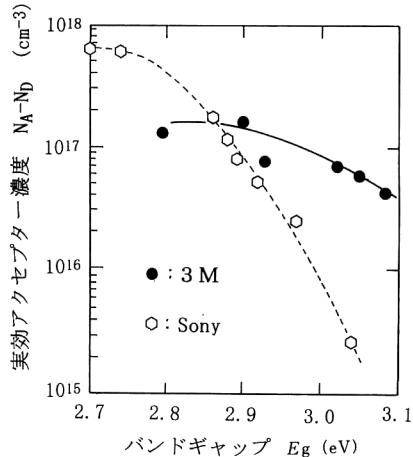


図4 p型 MgZnSSe の実効アクセプター濃度の室温  
バンドギャップ依存性<sup>21,23)</sup>

は ZnSSe クラッド層で、この場合の  $J_{th}$  は 3M 型の ZnCdSe/ZnSSe レーザーのしきい値電流密度を与えて いる。これをみると、MgZnSSe クラッド層による動作 電流の低減効果は顕著である。ZnSSe クラッド層を用 いる 3M 型レーザーでは、波長が 510 nm (緑色)でも  $J_{th}$  が  $4 \text{ kA/cm}^2$  を越え、良質な高温特性は望めない。一方、ZnCdSe/MgZnSSe レーザーでは、わずかな Mg 組成比でもリーク電流が抑制され、顕著な  $J_{th}$  の低減化 が得られる。Mg 組成は、波長 510 nm では 7%程度 ( $E_g$  (77 K)～2.93 eV), 484 nm では 15%程度 (~3.04 eV) 以上が<sup>3</sup> 必要になる。

しかししながら、MgZnSSe の p 型ドーピングはワイドギャップ化とともに難しくなり、バンドギャップが 2.95 eV(77 K での値、室温で~2.87 eV)以上では、実効アクセプター濃度が  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  台以下まで急激に減少する<sup>21)</sup>。この様子は図 4 の破線で示されているが、横軸は室温の  $E_g$  の値である。この特性により、これまで MgZnSSe クラッド層には、主に室温で 2.87 eV 付近のバンドギャップの材料が利用されてきた。この場合、 $\Delta E_g > 0.4 \text{ eV}$  という条件を単純に入れて計算すると活性層のバンドギャップは~2.47 eV 以下、すなわち短波長限界が 510 nm 付近ということになる。実際、文献から拾った  $J_{th}$  と外部微分量子効率  $\eta_d$  の波長依存性を整理すると図 5 が得られ、500 nm 以下の波長域で  $J_{th}$  の急激な増加と  $\eta_d$  の劣化がみられる。すなわち、現在、高性能特性が得られている II-VI 族半導体レーザーはまだ緑色域(青緑)であって、純粋な青色域は今後の課題といえよう。

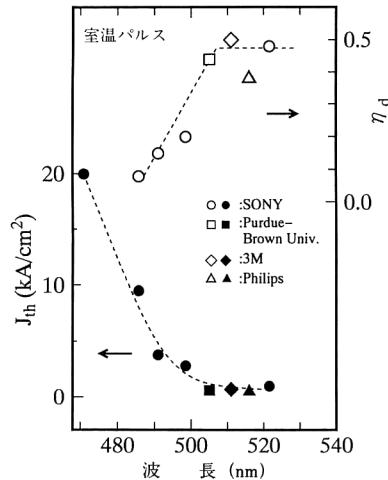


図5 ZnCdSe/MgZnSSe系II-VI族レーザーのしきい値電流密度と外部微分量子効率  $\eta_d$  の室温発振波長依存性（文献36）など

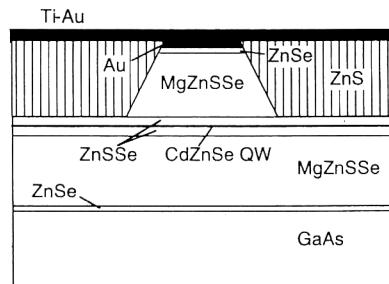


図6 埋込みリッジ型 ZnCdSe/MgZnSSe 半導体レーザー<sup>24)</sup>

青色域の波長 462 nm での室温パルス発振も報告されているが、外部微分量子効率は 1% 台と非常に小さい<sup>22)</sup>。とはいっても、しきい値電流密度は 4 kA/cm<sup>2</sup> と比較的低い。p 型ドーピングの面ではにわかには信じ難いが、バンドギャップ 3.25 eV の MgZnSSe をクラッド層に使用したという<sup>22)</sup>。しかしながら、最近図 4 の実線のように室温の  $E_g$  が ~3.02 eV でも実効アクセプター濃度が  $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  を越えるような実験結果も報告されている<sup>23)</sup>。p 型ドーピング特性の改善により、ワイドギャップの MgZnSSe がクラッドに利用できるようになれば、青色域でもレーザー性能の向上が得られるであろう。

一方、II-VI族レーザーの実用化には、ビーム品質の向上と横モード安定化のために、屈折率導波による横モード制御も重要な課題で、この材料系の特質に適合したレーザー構造の創出が必要となろう。図6に初期的な実

験段階のレーザー構造を示したが、波長が 510 nm 付近でしきい値電流も 2.5 mA と低い。ただし、これは幅 2  $\mu\text{m}$  程度のレーザーリッジ構造を単に ZnS のポリ結晶で埋め込んだだけであり<sup>24)</sup>、今後本格的な横モード制御型構造の提案が望まれる。

#### 4. III-V ナイトライド系半導体レーザー

InGaN/AlGaN 系半導体レーザーの電流注入動作は現時点では得られていないが、最近の LED の性能向上をみると<sup>5,8)</sup>発振しないのが不思議な感じがする。InGaN/AlGaN 系 LED の材料技術については後続の解説記事があるので、ここでは半導体レーザーの基本的事項について考察する。

##### 4.1 レーザー構造

図 7 は InGaN/AlGaN 半導体レーザーの概念図の一例であり、InGaN 活性層、GaN ガイド層、AlGaN クラッド層からなる SCH (separate confinement heterostructure) 構造を想定して描いたものである。現実には、AlGaN はドーピング特性がよくないので、シリーズ抵抗を低く抑えるためなるべく薄膜にして、外部をもう 1 回 GaN などでクラッドするダブルクラッド構造となるかもしれない。In の組成比の増加とともに、すなわち波長が長くなるとともに、InGaN 活性層には大きな圧縮歪が加わり、超薄膜として歪量子井戸構造とする必要がある。最近の発光ダイオードの例では、20 Å の InGaN 活性層が利用されている<sup>5)</sup>。サファイヤ基板は容易に割れないので、図のように反射器をドライエッチングなどで作製し、正負の電極をプレーナー面内で取り出す必要があり、実装上の観点からエピサイドアップでポンディングすることになろう。しかし熱放散の点ではエピサイドをヒートシンク側にした方が有利である。最近、GaN, AlN, InN や InGaN, AlGaN などのドライエッチングの研究も進んでおり<sup>25,26)</sup>、基板面に垂直に近い(~90°)エッティング面も得られている<sup>26)</sup>。とはいえる、今後はへき開性があり導電性のある基板上への成長が、III-V ナイトライド系半導体レーザー研究の重要な課題となろう。最近、6 H-SiC 上の発光ダイオードが報告されている。

図 8 は無歪の InGaN からのフォトルミネセンスのピーク波長と In 組成比との関係である<sup>27)</sup>。バンドギャップ波長は GaN では紫外域の 363 nm 付近であるが、In の組成比が 0.2 のとき 420 nm, 0.3 では 450 nm である。歪が加わると約 170 meV だけレッドシフトするというので<sup>5)</sup>、In の組成比が 0.2 でも 450 nm の青色発光

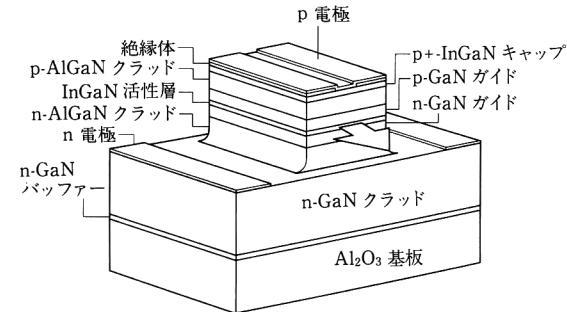


図 7 InGaN/AlGaN 系半導体レーザーの概念図

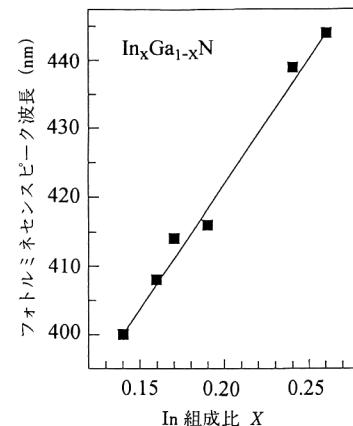


図 8 InGaN のフォトルミネセンス発光波長の In 組成比依存性<sup>27)</sup>

が得られるだろう。

##### 4.2 キャリアと光の閉込め効果

AlN と GaN のバンドギャップが大きく異なるため (3.4 eV と 6.2 eV)，小さな Al 組成比で大きなバンドギャップの AlGaN が得られる。Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N のバンドギャップに対して，-0.8 eV<sup>28)</sup>，0 eV<sup>29)</sup>，1 eV<sup>30)</sup> の 3 通りのボーディングパラメーター  $b$  が報告されているが， $b \sim 0$  eV とすると  $E_g = 3.4 + 2.8x$  (eV) となる。これより計算すると， $x = 0.1$  でも 390 nm 以上の波長では  $\Delta E_g$  が 0.5 eV 以上となり，キャリア閉込めは問題がない。

図 9 に GaN と AlGaN の屈折率の波長分散の測定値を示そう<sup>31)</sup>。Al の組成比 0.12 は上式とバンド端波長から算出した。ここで、実線は MSEO (modified single effective oscillator) 法<sup>32,33,14)</sup>による理論曲線の実験値へのフィッティングを試みたものである。この結果、下記の单一振動子エネルギー  $E_0$  (eV)，分散エネルギー  $E_d$  (eV) の場合に実験値がよく説明できることがわかった。

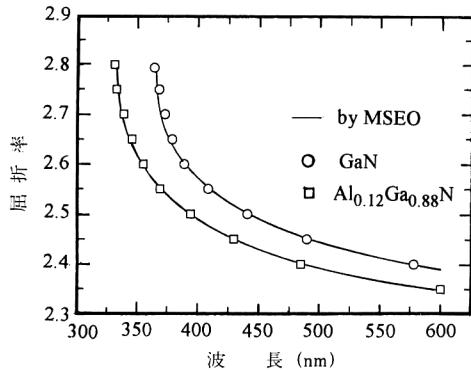


図9  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  結晶の屈折率の波長依存性の測定値<sup>31)</sup>とMSEO法による計算値(実線)

$$\begin{aligned} E_0 &= 6.72 + 3.11x \\ E_d &= 28.6 + 5.30x \end{aligned} \quad (2)$$

そこで、任意の組成の  $\text{AlGaN}$  の屈折率が推定できる。InGaN 活性層の屈折率はほぼ 2.8 程度と考えられるため、InGaN 活性層と  $x=0.1$  の  $\text{AlGaN}$  クラッド層の屈折率差を計算すると、390 nm より長波長域では 10% 以上となる。したがって、光閉込めの点でも図 7 のレーザー構造は十分である。例えば、厚さが 10 nm の InGaN 活性層と 80 nm の GaN ガイド層では、波長 420 nm 付近の光閉込め係数は 5% となり、通常の値の 2~3% からみて十分に大きい。また、屈折率差が大きいことから、光閉込め効果からの制限が緩和され、超薄膜の InGaN 活性層にできる利点も出てくるであろう。

#### 4.3 レーザー利得

図 10 は  $k\theta$  摂動論で計算された六方晶  $\text{GaN}/\text{AlGaN}$  量子井戸レーザーの光利得である<sup>6)</sup>。量子井戸幅は 50 Å である。ここでは、十分に明らかとなっていない六方晶  $\text{GaN}$  の物性定数(有効質量、変形ポテンシャルなど)は第一原理より計算して求めている<sup>6)</sup>。計算ではスピン-軌道分裂が小さいため(9.6 meV)、HH と LH サブバンド間の強いバンドミキシングによって正孔のバンド端状態密度が大きくなり、transparency キャリア密度(正の利得が現れるキャリア密度)が約  $7.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と高い。図 10 には別途計算した GaInP と ZnCdSe 活性層レーザーのレーザー利得<sup>20)</sup>も示したが、これらと比べてレーザー発振には高いキャリア密度が必要である。しきい値利得を  $1000 \text{ cm}^{-1}$  としきりア寿命時間を 1 ns と仮定すると、しきい値電流密度は  $880 \text{ A/cm}^2$  と計算される。これは、II-VI族レーザーの計算値の 2.5 倍程度であるが、決して高い値ではない。この値は式(1)の  $J_r$  成分で、

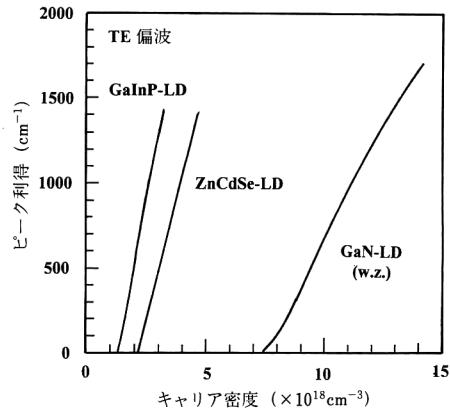


図10 六方晶  $\text{GaN}/\text{AlGaN}$  レーザーのピーク光利得のキャリア密度依存性<sup>6)</sup>(比較のため GaInP, ZnCdSe 活性層レーザーの光利得<sup>20)</sup>も併記)

表1 高性能な可視光半導体レーザーの予測波長域

ダブルヘテロ構造	基板	発光波長 ( $\mu\text{m}$ )			
		0.4	0.5	0.6	0.7
GaInP/AlGaInP	GaAs				■
ZnCdSe/MgZnSSe	GaAs		■		
InGaN/AlGaN	$\text{Al}_2\text{O}_3$ SiC	■			

実際のしきい値電流密度はこれに  $J_{NR}$  を加えた値である。

#### 5. 可視光半導体レーザーの波長域

表 1 に 3 種類の可視光半導体レーザーでカバーし得る予測波長域をまとめた。赤色域では、GaInP/AlGaInP レーザーによって 600 nm 程度までレーザー発振が得られているが、高性能なレーザー特性が得られる波長域は 630 nm 付近より長波長域である。緑から青色域は ZnCdSe/MgZnSSe 系、青から紫外域は InGaN/AlGaN 系レーザーでカバーできるであろう。450~500 nm 域は、あるいは InGaN/AlGaN 半導体レーザーの発振の可能性があるかもしれない。しかし、この波長域で LED の外部量子効率が急速に低下することからみて<sup>4)</sup>、高性能化は難しいであろう。また、この波長域は ZnCdSe/MgZnSSe レーザーでも、現時点では高性能化が達成されていない。これはワイドギャップ MgZnSSe の高い p 型ドーピング技術の確立の成否に係っている。さらに、表 1 をみると 550~630 nm が欠落している。これも、最近検討が進んでいる InP 基板上の

MgZnCdSe 系<sup>34)</sup>を用いて、ZnCdSe/MgZnCdSe レーザー<sup>35)</sup>が構成できればカバーされるであろう。

## 6. ま と め

ZnCdSe/MgZnSSe 系と InGaN/AlGaN 系を中心として、青・緑色半導体レーザーとしての課題を記述しつつ、両者の比較を試みた。InGaN/AlGaN レーザーの電流注入によるレーザー発振は得られていないが、波長域は青色から紫外域となろう。ZnCdSe/MgZnSSe レーザーでは、すでに緑色域(青緑色)で優れたレーザー特性が得られており、長寿命化が実用化の課題である。また青色域での高性能化が望まれる。両者は、今後、時間軸と波長軸の両方の面で棲み分けて発展してゆくものと期待される。

## 文 献

- 1) A. Ishibashi : "II-VI blue-green laser diodes," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **1** (1995) 741-748.
- 2) A. V. Nurmikko and R. L. Gunshor : "Blue-green emitters in wide-gap II-VI quantum-confined structures," IEEE J. Quantum Electron., **30** (1994) 619-630.
- 3) 岸野克巳 : "青色・紫外域半導体レーザーの研究動向と展望", レーザー研究, **23** (1995) 487-496.
- 4) A. Ishibashi and S. Itoh : "One-hour-long room temperature cw operation of ZnMgSSe-based blue-green laser diodes," IEEE LEOS '94 Annual Meeting, PD 1, Boston (1994).
- 5) S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa and S. Nagahama : "High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L797-L799.
- 6) S. Kamiyama, K. Ohnaka, M. Suzuki and T. Uenoyama : "Optical gain calculation of wurtzite GaN/AlGaN quantum well laser," Jpn. J. Appl. Phys., **34** (1995) L821-L823.
- 7) M. Mizuta, S. Fujieda, Y. Matsumoto and T. Kawamura : "Low temperature growth of GaN and AlN on GaAs utilizing metalorganics and hydrazine," Jpn. J. Appl. Phys., **25** (1986) L945-L948.
- 8) S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh : "Candela-class high-brightness InGaN/AlGaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes," Appl. Phys. Lett., **54** (1994) 1687-1689.
- 9) G. C. Hua, N. Otsuka, D. C. Grillo, et al. : "Microstructure study of a degraded pseudomorphic separate confinement heterostructure blue-green laser diode," Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 1331-1333.
- 10) S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Crawford and D. A. Steigerwald : "High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 1249-1251.
- 11) D. Eason, J. Ren, Z. Yu, et al. : "Blue and green light-emitting diode structures grown by molecular beam epitaxy on ZnSe substrates," J. Cryst. Growth, **150** (1995) 718-724.
- 12) V. A. Dmitriev, K. Irvine and C. H. Carter, Jr., et al. : "AlGaN pn junctions," Appl. Phys. Lett., **67** (1995) 115-117.
- 13) 倉又朗人, 堀野和彦, 堂免 恵, ほか : "MgAl<sub>x</sub>O<sub>y</sub>基板上へのGaN結晶のMOVPE成長", 第42回応用物理学関係連合講演会, No. 1, 28 p-ZH-12 (1995).
- 14) 伊賀健一編著 : 半導体レーザー, 応用物理学会シリーズ(オーム社, 1994).
- 15) A. Kikuchi, K. Kishino and Y. Kaneko : "600 nm-range GaInP/AlInP multi-quantum-well(MQW) lasers grown on misorientation substrates by gas source molecular beam epitaxy(GS-MBE)," Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) 3865-3872.
- 16) M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt and H. Cheng : "Blue-green laser diodes," Appl. Phys. Lett., **59** (1991) 1272-1274.
- 17) H. Okuyama, T. Miyajima, Y. Morinaga, et al. : "ZnSe/ZnMgSSe blue laser diode," Electron. Lett., **28** (1992) 1798-1799.
- 18) J. M. Gaines, R. R. Drenten, K. W. Haberern, et al. : "Blue-green injection lasers containing pseudomorphic Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>S<sub>y</sub>Se<sub>1-y</sub> cladding layers and operating up to 394 K," Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 2462-2464.
- 19) N. Nakayama, S. Itoh, T. Ohata, et al. : "Room temperature continuous operation of blue-green laser diodes," Electron. Lett., **29** (1993) 1488-1489.
- 20) 倉本 大 : "II-VI族青色半導体レーザーの特性向上に関する研究", 1993 年度上智大学修士論文.
- 21) H. Okuyama, Y. Kishita, T. Miyajima, et al. : "Epitaxial growth of p-type ZnMgSSe," Appl. Phys. Lett., **64** (1994) 904-906.
- 22) D. C. Grillo, J. Han, M. Ringle, et al. : "Blue ZnSe quantum-well diode laser," Electron. Lett., **30** (1994) 2131-2133.
- 23) B. J. Wu, J. M. DePuydt, G. M. Haugen, et al. : "Wide band gap MgZnSSe grown on (001) GaAs by molecular beam epitaxy," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 3462-3464.
- 24) M. A. Haase, P. F. Baude, M. S. Hagedorn, et al. : "Low-threshold buried-ridge II-VI laser diodes," Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 2315-2317.
- 25) S. J. Pearton and C. R. Abernathy : "Dry patterning of InGaN and InAlN," Appl. Phys. Lett., **64** (1994) 3643-3645.
- 26) S. J. Pearton, C. R. Abernathy and C. B. Vartuli : "ECR plasma etching of GaN, AlN and InN using iodine or bromine chemistries," Electron. Lett., **30** (1994) 1985-1986.
- 27) S. Nakamura and T. Mukai : "High-quality InGaN films grown on GaN films," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) L1457-L1459.
- 28) S. Yoshida, S. Misawa and S. Gonda : "Properties of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N films prepared by reactive molecular beam epitaxy," J. Appl. Phys., **53** (1982) 6844-6848.
- 29) D. K. Wickenden, C. B. Bergeron, W. A. Bryden, et al. : "High quality self-nucleated Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N layers on (001) sapphire by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 2024-2026.
- 30) Y. Koike, H. Itoh, N. Sawaki, et al. : "Epitaxial growth and properties of Al<sub>(x)</sub>Ga<sub>(1-x)</sub>N by MOVPE," J. Electrochem. Soc., **133** (1986) 1956.
- 31) H. Amano, N. Watanabe, N. Koide and I. Akasaki : "Room-temperature low-threshold surface-stimulated emission by optical pumping from Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN double heterostructure," Jpn. J. Appl. Phys., **32** (1993) L1000-L1002.

- 32) M. A. Afromowitz : "Refractive index of  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ ," *Solid State Commun.*, **15** (1974) 59-63.
- 33) K. Utaka, Y. Suematsu, K. Kobayashi, *et al.* : "GaInAsP/InP integrated twin-guide lasers with first-order distributed Bragg reflectors at  $1.3 \mu\text{m}$  wavelength," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19** (1980) L137-L140.
- 34) T. Morita, A. Kikuchi, I. Nomura and K. Kishino : "Molecular beam epitaxial growth of MgZnCdSe on (1 0 0) InP substrates," *Conf. Proc. of IPRM '95* (1995) pp. 805-808.
- 35) I. Nomura, T. Morita, A. Kikuchi and K. Kishino : "Novel ZnCdSe/MgZnCdSe compound system grown on InP substrates by MBE and theoretical investigation of 550-640 nm range ZnCdSe/MgZnCdSe lasers," *Seventh Int. Conf. II-VI Compounds and Devices*, MO-6, Edinburgh (1995).
- 36) S. Itoh, N. Nakayama, T. Ohata, *et al.* : "ZnCdSe/ZnSe/ZnMgSSe separate-confinement heterostructure laser diode with various Cd mole fractions," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L639-L642.