

# 解説

## ZnSSe系II-VI族半導体レーザーの現状と課題

中野 一志・石橋 晃

ソニー(株)中央研究所 〒240 横浜市保土ヶ谷区藤塚町 174

(1995年6月30日受理)

### Recent Progress in ZnSSe-Based II-VI Semiconductor Lasers

Kazushi NAKANO and Akira ISHIBASHI

Sony Corporation Research Center, 174, Fujitsuka, Hodogaya-ku, Yokohama 240

#### 1. まえがき

光ディスクの高密度記録化、あるいはカラーディスプレイへの応用のキーデバイスとしてコンパクト青色レーザーの実現が期待されている。その実現の手法としてはII-VIあるいはIII-Vワイドギャップ半導体を用いた半導体レーザーと、赤外半導体レーザーと非線型光学結晶の組合せによる第2次高調波の発生で青色のレーザー光を得る方法が考えられ、活発に研究が進められている。

そのような中で1991年、米国の3MがZnSeをベースにしたII-VI半導体を用いて青緑色のレーザー発振に世界で初めて成功した<sup>1)</sup>。このレーザー発振達成のブレイクスルーとなったのは長年II-VIワイドギャップ半導体においてp型の伝導型制御が困難であったものが窒素のプラズマドーピング<sup>2,3)</sup>により十分なキャリア濃度が得られるようになったことである。それ以来多くの研究機関でII-VI半導体レーザーの開発が活発に取り組まれており、近年著者らのグループをはじめ、II-VI半導体素子での室温連続発振が報告されるようになった<sup>4-6)</sup>。ここでのキーとなった技術的進展はGaAs基板に格子整合するZnMgSSe四元混晶の開発であった<sup>7)</sup>。この混晶をクラッド層に用いることにより室温連続発振に十分なキャリアおよび光の閉込めが可能になりレーザー特性が飛躍的に向上したのである。またさらに結晶欠陥の低減を図ることで最近では時間オーダーの寿命まで達成されている<sup>8)</sup>。本稿ではまず最近得られているII-VIレーザー素子の動作特性について紹介し、その後にレーザー素子の実用化に向けて必要な信頼性と長寿命化のための技術的問題、および今後の課題について言及する。

#### 2. デバイス特性

表1に今までに得られているII-VI半導体レーザーでの諸特性のトップデータをまとめた。これらのデータは複数の研究機関から報告されたものであるが、いずれもほぼ同様のレーザー構造を有していることは興味深い(図1)。つまり、(1)量子井戸を活性層にした分離閉込めヘテロ構造を採用している点、(2)クラッド層にZnMgSSe混晶を用いている点、(3)p側電極にp-ZnTe/p-ZnSe超格子構造を用いている点、などである。前述したようにZnMgSSeクラッド層の採用は、活性層領域へのキャリアの閉込めおよび光の閉込めに必要な、活性層とのバンドギャップ差<sup>7)</sup>、屈折率差<sup>17)</sup>に関して、初期の頃のZnSSeクラッド層に比べ格段の改善がみられ、室温での連続発振達成に必要不可欠な技術である。そのような構造によってIII-V半導体レーザーに比較しても閾値電流密度、光出力などにおいては遜色ない特性が得られているのがわかる。特に光出力840mWという値は電源の供給能力により制限されたもので素子の本質的な能力の上限ではない。このようにII-VI半導体は端面破壊という点では非常に耐性のある材料系と思われ、高出力レーザーを作製する場合に非常に好都合であるといえる。これらの得られた特性の中で素子寿命が問題であることは明らかであろう。図2に1時間室温連続動作素子のエージング曲線を示す。最初の連続動作は秒オーダーであったのに比べ飛躍的な向上がみられてはいるが、実用化の観点からはまだまだ不十分といわざるを得ない。この点の改善がII-VIレーザーの実用化に向けての大きな技術的課題であることは言を待たない。

表1 ZnMgSSe系半導体レーザーの素子特性

	連続動作 (文献)	パルス動作 (文献)	
発振波長 (nm)	490~524	4,5)	463~522
閾値電流 (mA)	6.9	10)	2.5
閾値電流密度 (A/cm <sup>2</sup> )	310	10)	
動作電圧 (V)	3.7	12)	
動作温度 (°C)	80	13)	121
光出力 (mV)	30	15)	840
寿命 (h)	1	8)	16)

### 3. 技術的課題

#### 3.1 積層欠陥低減

先述したように、現在では室温連続発振が達成されてはいるものの、その素子寿命が短いことが重要な課題で

あることは研究者の間では共通の認識となっている。それに伴い最近ではII-VIデバイスの劣化に関する研究が多数報告されるようになった<sup>18-24)</sup>。これらの結果から現在の素子寿命を決めている要因としてはIII-V/II-VIヘテロ界面から発生する積層欠陥が核となって急速劣化が起こっていることが明らかとなっており、その詳細について以下に述べる。

レーザー素子と同じエピタキシャル層構造を有するLED (light emitting diode) デバイスに通電し、上部の薄膜透明電極を通してその発光トポグラフを観測すると、通電直後からいくつもの暗点が観測される。つまりこれらの暗点となるものはもともと結晶中に存在することを意味する。その密度は  $10^5 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$  程度である。通電を引き続行うと、その暗点から<100>方向に沿って暗線が成長して、さらには扇状の暗黒領域が暗点を頂点にして多数形成されていく(図3)。この暗黒領域の形成に伴い徐々にLED素子全体の発光量が低下する。通電により劣化した試料を薄膜化しエピタキシャル層を透過電子顕微鏡で平面観察した例を図4に示す。扇状に広がる密集した転位のダイポール、ループが観測された。またこれらの転位はエピタキシャル層の中でも活性層領域に存在している。さらに扇形の頂点には図では明確ではないがフランクタイプと呼ばれる積層欠陥が位置しているのが観測される。

未通電の試料でも積層欠陥は存在が確認されるのに対

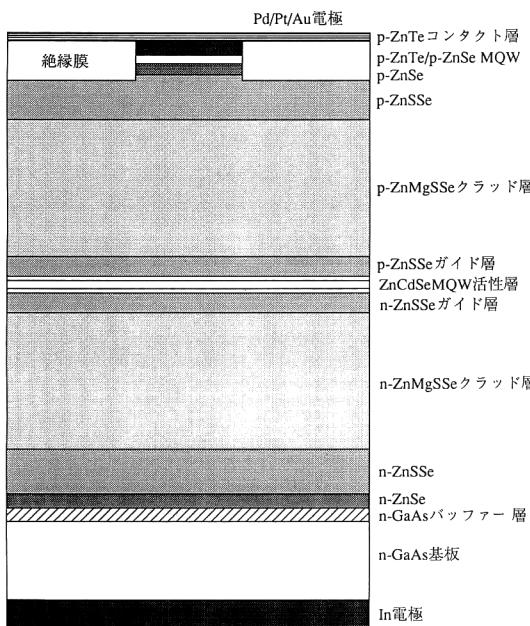


図1 ZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSe SCH レーザーの断面概略図

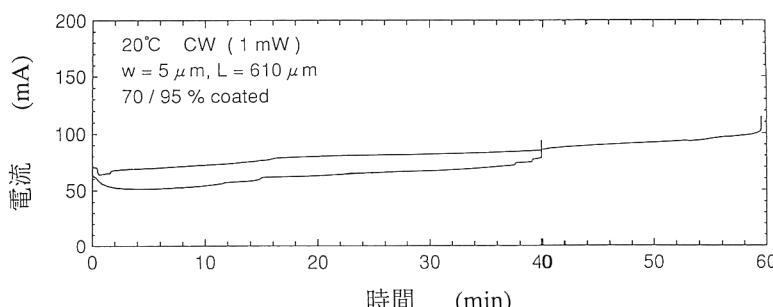


図2 室温連続動作におけるエージング特性

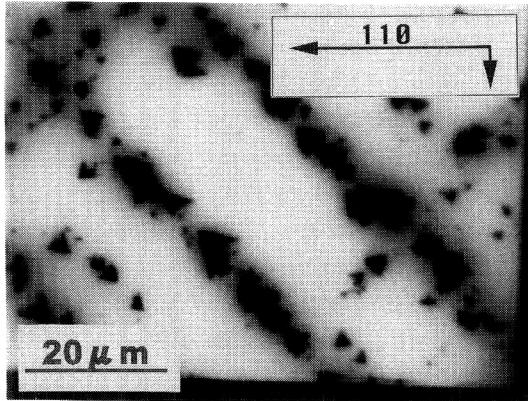


図3 LED発光パターン

し、高密度の転位領域はみられないこと、さらに形状が発光トポグラフでの暗黒領域と一致することから、これらの高密度転位領域は通電により形成されたもので、暗点に対応するのは積層欠陥であることが結論された。積層欠陥の縁は部分転位で形成されているが、転位芯に存在する不対電子は電気的に活性であるため、そこでキャリアの再結合が非発光的に起こり、局所的な熱の発生、熱歪が生じると考えられる。その熱応力のために転位の分解が起こり、それに引き続き転位のすべり運動と上昇運動のコンビネーションで高密度の転位ダイポールが形成されてゆくと考えている。III-V半導体レーザーの急速劣化でみられる暗線状欠陥(DLD)<sup>25)</sup>と比較すると、もとから存在する欠陥(III-V素子の場合は貫通転位)を核にする点、転位ダイポールが形成される点など共通点も見出されるが、暗黒領域の形状、転位ダイポールの延びる方向などで特徴が異なる。このことはエピ層中の歪の度合、DLD形成のメカニズムの違いを示唆していると思われる。

成長中に導入される積層欠陥はIII-V/II-VIへテロ界面での何らかの異常箇所(コンタミネーション、ラフネスなど)が原因で発生すると考えられ、清浄な面が得られれば積層欠陥の密度が低減されることが予想される。実際GaAs基板とn型ZnMgSSeクラッド層の間にZnSe層を挿入することで $4 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ に積層欠陥密度が減少し、さらにGaAs基板上にIII-V半導体用の成長装置でGaAs層を成長させた後に連結されたII-VI用の装置へ高真空中で搬送し、II-VI半導体層を成長させることにより積層欠陥密度を $10^5 \text{ cm}^{-2}$ 台にまで下げられることが報告されている<sup>13)</sup>。

これは基板のサーマルクリーニングにより得られる表面に比較してGaAsエピタキシャル層表面が格段に良

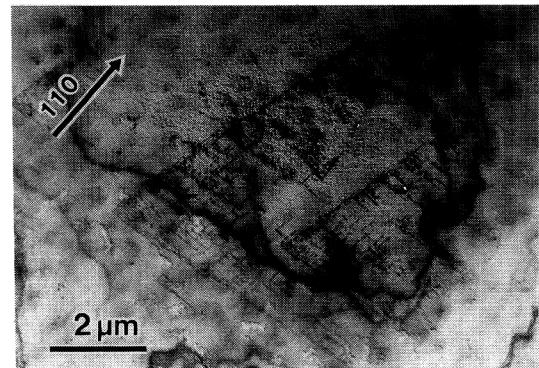


図4 劣化したII-VI LEDデバイスの平面透過電子顕微鏡写真

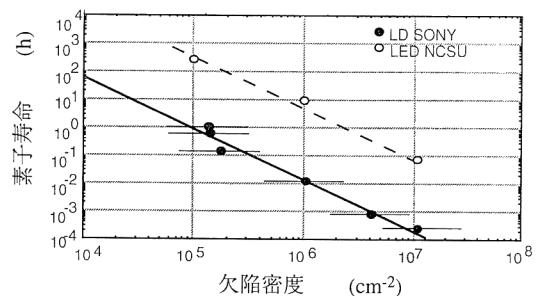


図5 素子寿命と欠陥密度の関係

質であることによる。1時間寿命の素子もこのような改善により達成されたものである。今まで得られた連続発振素子の寿命とその欠陥密度に対してプロットしたのが図5である。図中にはノースカロライナ大から報告されているLEDデバイスの寿命もプロットされている<sup>26)</sup>。

LEDの寿命は電流密度が低いため長寿命であるが、両者とも寿命が密度の2乗に反比例の依存性を示しているのがわかる。エピ上がりすでに存在するマクロな欠陥(pre-existing defects)は、前述したように成長技術の向上で克服可能であると思われる。そのようなマクロ欠陥がない状況で、最終的にII-VIデバイスの実用化の可否の鍵を握るのは点欠陥に起因する劣化である。この点欠陥の関与する劣化は、pre-existing defectsがある間はこれに起因する劣化でマスクされてなかなか垣間見ることは難しいが、図5の依存性から劣化のプロセスに関して少し考察してみると<sup>27)</sup>。

ここでは通電により増殖した欠陥と、もともと存在する暗点の両者は、非発光再結合により劣化を促進する元凶としては機能的に同一視できると仮定している。ある時間 $t$ での欠陥密度を通電で増殖した部分も含め $N(t)$

として、その時間変化をべき級数展開して代表項だけ抽出すると以下のように表せる。

$$N(t) \sim N_0 \exp(-E_a/kT)(t/t_0)^\gamma \quad (1)$$

ここで  $N_0$  は pre-existing defect 密度、 $E_a$  は劣化過程の活性化エネルギー、 $k$  はボルツマン係数、 $T$  は絶対温度、 $t_0$  はその過程の特徴的な時間を表している。もし II-VI 半導体が非常に結晶的に弱く、欠陥が生成されやすいとすると欠陥の濃度は急激に増加し、時間に対し発散することが予想される（すなわち  $\gamma > 1$  あるいは  $\gamma \gg 1$ ）。素子が死ぬ際にあるクリティカルな欠陥濃度  $N_c$  が存在するとすると、素子寿命  $\tau$  は濃度が  $N_c$  に達する時間で与えられるから式(1)より、

$$\log(\tau/t_0) = \text{const.} - (1/\gamma)\log(N_0) \quad (2)$$

である。図4の直線の傾きから

$$1/\gamma \sim 2$$

$$\gamma \sim 1/2 < 1$$

となり、 $N(t)$  は時間の平方根に比例して増加することがわかる。このことから劣化過程はおそらく何らか（点欠陥と考えられる）の拡散過程に支配されていることが示唆され、カタストロフィックな劣化を起こすような致命的なものではないと考えられる。II-VI ワイドギャップ半導体では、そのイオン性の高さと相まって“凝集エネルギー < バンドギャップエネルギー”が素子の高信頼性を妨げると危惧されてきたが、実用上問題ないことを示唆しており朗報である。

また現在の素子の電極面積( $1\text{ mm} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ )を考慮すると、欠陥密度が  $10^4\text{ cm}^{-2}$  を下回れば、ストライプ内に暗点が存在しない素子を得ることが可能となってくる。そのような素子においては前述したように点欠陥に支配された劣化モードが発現てくるものと考えられる。このような劣化モードにおいては素子寿命は飛躍的に増大することが期待されるが、それがどの程度であるかはまだ予測されていない。しかしながら実用化されている赤外レーザーの材料である AlGaAs 結晶においても、格子定数の異なる Si 基板上に成長させて転位密度が  $2 \times 10^7\text{ cm}^{-2}$  であるようなものでは 6 分の寿命しかないこと<sup>28)</sup> から逆に類推すると、II-VI デバイスにおいても実用化に耐え得る信頼性が得られることも十分可能性があると期待される。

### 3.2 p型ドーピングおよびオーム性電極

半導体レーザー素子は温度に非常に影響されやすいデバイスであるため、自らの消費電力も極力避けることが望ましい。しかしながら II-VI デバイスはこの点に関してもひとつの課題が残されている。それは高濃度 p 型

層が得られないために p 側電極のコンタクト抵抗が高く、動作電圧が下がらないということである。長年の課題であった p 型伝導型制御は、MBE(molecular beam epitaxy)法における窒素プラズマドーピング<sup>2,3)</sup>により実現されるようになり、ZnSeにおいては最大キャリア濃度は  $10^{18}\text{ cm}^{-3}$  程度まで達成されている。しかしながらこれ以上のキャリア濃度は高濃度に窒素をドーピングしても得られず飽和傾向を示すことが知られている<sup>29)</sup>。さらに ZnMgSSe の混晶系ではそのバンドギャップが大きくなるにつれ、飽和濃度も急激に減少してしまう<sup>30)</sup>。このような依存性はアンフォテリック・ネイティブディフェクト・モデルによって定量的に議論できる<sup>31)</sup> ことからも物質固有の現象であることが示唆され、最近超格子構造を用いたドーピングレベルの向上の手法が提案されてはいるものの<sup>27,32)</sup>、いずれにしても高濃度ドーピングは容易ではないと考えられる。仮に  $10^{18}\text{ cm}^{-3}$  のキャリア濃度の得られる ZnSe をコンタクト層に用いるとしても、金属とのオーム性接触を得るには 1 枠以上濃度が低い。そのため Au/p-ZnSe 電極を用いたデバイスでは動作電圧は 10 V 以上となってしまう<sup>1,4)</sup>。しかしながら現在では動作電圧低減の手法がいくつか試みられておりある程度の成果が得られている<sup>33-35)</sup>。ひとつは、ZnTe を p-コンタクト層として用いる構造である。ZnTe は II-VI 族ワイドギャップ半導体の中で、唯一容易に p 型ドーピングが可能であるため、金属とのオーム性は得られやすい<sup>36)</sup>。p 型 ZnTe および p 型 ZnSe 間の接続に関しては、Fan らによる p-ZnTe/p-ZnSe 擬傾斜バンドギャップ構造<sup>33)</sup>、あるいは樋江井らによる p-ZnTe/P-ZnSe 共鳴多重量子井戸構造<sup>34)</sup>が提案されており、前者の構造においては、接触比抵抗は  $4 \times 10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、それを用いたレーザーの閾値電圧として 3.7 V の値が報告されている<sup>12)</sup>。また、後者の構造においては、伊藤らが閾値電圧として 4.7 V という値を報告している<sup>13)</sup>。また II-VI 青色 LED デバイスでは半金属である HgSe をコンタクト層と用いて動作電圧 3.2 V を達成している<sup>37)</sup>。今後、以上のような構造での最適化あるいは新しい手法により、built-in 電位と p-ZnMgSSe の比抵抗により決定される約 3.0 V 程度まで、動作電圧の低減化がすすめられていくものと考えられる。

### 4. 結 言

本稿では、ZnSe 系 II-VI 族半導体レーザーの現状と、解決されるべき課題についてまとめた。現在の静特性は

III-V族レーザーとほぼ同等といえる。実用化のために長寿命の素子が期待されており、そのためにはIII-V/II-VI界面近傍の積層欠陥低減が必要であることを述べた。他に、p型ドーピング向上、動作電圧のさらなる低減化という問題点がある。これらの問題を解決することで、青色半導体レーザーを応用した高密度記録や各種表示装置が近い将来必ず実現するであろう。

## 文 献

- 1) M. A. Haase, J. Qiu, J. M. DePuydt and H. Cheng : "Blue-green laser diodes," Appl. Phys. Lett., **59** (1991) 1272-1274.
- 2) R. M. Park, M. B. Troffer, C. M. Rouleau, J. M. DePuydt and M. A. Haase : "p-Type ZnSe by nitrogen atom beam doping during molecular beam epitaxial growth," Appl. Phys. Lett., **57** (1990) 2127-2129.
- 3) K. Ohkawa, T. Karasawa and T. Mitsuyu : "Characteristics of p-type ZnSe layers grown by molecular beam epitaxy with radical doping," Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) L152-L155.
- 4) N. Nakayama, S. Itoh, T. Ohata, K. Nakano, H. Okuyama, M. Ozawa, A. Ishibashi, M. Ikeda and Y. Mori : "Room temperature continuous operation of blue-green laser diodes," Electron. Lett., **29** (1993) 1488-1489.
- 5) N. Nakayama, S. Itoh, H. Okuyama, M. Ozawa, T. Ohata, K. Nakano, M. Ikeda, A. Ishibashi and Y. Mori : "Continuous-wave operation of 489.9 nm blue laser diode at room temperature," Electron. Lett., **29** (1993) 2194-2195.
- 6) A. Salokatve, H. Jeon, J. Ding, M. Hovinen, A. V. Nurmikko, D. C. Grillo, L. He, J. Han, Y. Fan, M. Ringle, R. L. Gunshor, G. C. Hua and N. Otsuka : "Continuous-wave, room temperature, ridge waveguide green-blue diode laser," Electron. Lett., **29** (1993) 2192-2194.
- 7) H. Okuyama, K. Nakano, T. Miyajima and K. Akimoto : "Epitaxial growth of ZnMgSSe on GaAs substrate by molecular beam epitaxy," Jpn. J. Appl. Phys., **30** (1991) L1620-L1623.
- 8) A. Ishibashi and S. Itoh : "One-hour-long room temperature cw operation of ZnMgSSe-based blue-green laser diodes," IEEE Lasers and Electro-Optics Society 7th Annual Meeting, Boston, MA (1994).
- 9) D. C. Grillo, J. Han, M. Ringle, G. Hua, R. L. Gunshor, P. Kelkar, V. Kozlov, H. Jeon and A. V. Nurmikko : "Blue ZnSe quantum-well diode laser," Electron. Lett., **30** (1994) 2131-2133.
- 10) Y. Fan, D. C. Grillo, M. D. Ringle, J. Han, L. He, R. L. Gunshor, A. Salokatve, H. Jeon, M. Hovinen, A. V. Nurmikko, G. C. Hua and N. Otsuka : "Electrical properties of blue/green diode lasers," J. Vac. Sci. Technol. B, **12** (1994) 2480-2483.
- 11) M. A. Haase, P. F. Baude, M. S. Hagedorn, J. Qiu, J. M. DePuydt, H. Cheng, S. Guha, G. E. Höfner and B. J. Wu : "Low-threshold buried-ridge II-VI laser diodes," Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 2315-2317.
- 12) S. Guha, G. M. Haugen, H. Cheng, M. A. Haase, J. Qiu and J. M. DePuydt : "Microstructure related degradation in II-VI based blue/blue green light emitters," IEEE Lasers and Electro-Optics Society 7th Annual Meeting, Boston, MA (1994).
- 13) S. Itoh, N. Nakayama, S. Matsumoto, M. Nagai, K. Nakano, M. Ozawa, H. Okuyama, S. Tomiya, T. Ohata, M. Ikeda, A. Ishibashi and Y. Mori : "ZnCdSe/ZnSSe/ZnMgSSe SCH laser diode with a GaAs buffer layer," Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) L938-L940.
- 14) J. M. Gaines, R. R. Drenten, K. W. Haberern, T. Marshall, P. Mensz and J. Petruzzello : "Blue-green injection lasers containing pseudomorphic  $Zn_{1-x}Mg_xS_2Se_{1-y}$  cladding layers and operating up to 394 K," Appl. Phys. Lett., **62** (1993) 2462-2464.
- 15) N. Nakayama, H. Okuyama, E. Kato, S. Itoh, M. Ozawa, T. Ohata, K. Nakano, M. Ikeda, A. Ishibashi and Y. Mori : "Continuous-wave operation of ZnMgSSe based blue-green laser diodes under high temperature and high output power," Electron. Lett., **30** (1994) 568-570.
- 16) N. Nakayama, S. Itoh, H. Okuyama, E. Kato, S. Matsumoto, M. Nagai, M. Ozawa, T. Ohata, K. Nakano, M. Ikeda, A. Ishibashi and Y. Mori : 5th Optoelectronics Conference Technical Digest, Makuhari Messe, 15 A 2-6 (1994) .
- 17) M. Ukita, H. Okuyama, M. Ozawa, A. Ishibashi, K. Akimoto and Y. Mori : "Refractive indices of ZnMgSSe alloys lattice matched to GaAs," Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 2082-2084.
- 18) S. Guha, J. M. DePuydt, M. A. Haase, J. Qiu and H. Cheng : "Degradation of II-VI based blue-green light emitters," Appl. Phys. Lett., **63** (1993) 3107-3109.
- 19) S. Guha, H. Cheng, M. A. Haase, J. M. DePuydt, J. Qiu, B. J. Wu and G. E. Höfner : " $<1\ 0\ 0>$  dark line defect in II-VI blue-green light emitters," Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 801-803.
- 20) G. C. Hua, N. Otsuka, D. C. Grillo, Y. Fan, J. Han, M. D. Ringle, R. L. Gunshor, M. Hovinen and A. V. Nurmikko : "Microstructure study of a degraded pseudomorphic separate confinement heterostructure blue-green laser diode," Appl. Phys. Lett., **65** (1994) 1331-1333.
- 21) S. Tomiya, E. Morita, M. Ukita, H. Okuyama, S. Itoh, K. Nakano and A. Ishibashi : "Structural study of defects induced during current injection to II-VI blue light emitter," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 1208-1210.
- 22) M. Hovinen, J. Ding, A. Salokatve, A. V. Nurmikko, G. C. Hua, D. C. Grillo, L. He, J. Han, M. Ringle and R. L. Gunshor : "On degradation of ZnSe-based blue-green diode lasers," J. Appl. Phys., **77** (1995) 4150-4152.
- 23) G. M. Haugen, S. Guha, H. Cheng, J. M. DePuydt, M. A. Haase, G. E. Höfner, J. Qiu and B. J. Wu : "Photodegradation of  $Cd_xZn_{1-x}Se$  quantum wells," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 358-360.
- 24) M. Hovinen, J. Ding, A. V. Nurmikko, G. C. Hua, D. C. Grillo, L. He, J. Han and R. L. Gunshor : "Degradation of (Zn, Cd)Se quantum well heterostructures for blue/green light emitters under high optical injection," Appl. Phys. Lett., **66** (1995) 2013-2015.
- 25) P. Petroff and R. L. Hartman : "Rapid degradation phenomenon in heterojunction GaAlAs-GaAs lasers," J. Appl. Phys., **45** (1974) 3899-3903.
- 26) J. F. Schetzina, R. P. Vaudo and J. W. Cook, Jr. : 6th Int. Conf. II-VI Compounds and Related Opto-electronic Materials, ThB-1, Newport, RI (1993).
- 27) A. Ishibashi : "II-VI blue-green laser diodes," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **1** (1995) 741-748.
- 28) T. Egawa, T. Jimbo, Y. Hasegawa and M. Umeno : "Optical and electrical degradations of GaAs-based laser

- diodes grown on Si substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 1401-1403.
- 29) S. Itoh, M. Ikeda and K. Akimoto : "Plasma doping of nitrogen in ZnSe using electron cyclotron resonance," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) L1316-L1318.
- 30) H. Okuyama, Y. Kishita, T. Miyajima, A. Ishibashi and K. Akimoto : "Epitaxial growth of p-type ZnMgSSe," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 904-906.
- 31) K. Kondo, H. Okuyama and A. Ishibashi : "Relation between hole density and impurity density in ZnMgSSe semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, **64** (1994) 3434-3436.
- 32) W. Faschinger, S. Ferreira and H. Sitter : "Band structure engineering and doping of wide gap II-VI superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 2516-2518.
- 33) Y. Fan, J. Han, L. He, J. Saraie, R. L. Gunshor, M. Hagerott, H. Jeon, A. V. Nurmikko, G. C. Hua and N. Otsuka : "Graded band gap ohmic contact to p-ZnSe," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 3160-3162.
- 34) F. Hiei, M. Ikeda, M. Ozawa, T. Miyajima, A. Ishibashi and K. Akimoto : "Ohmic contacts to p-type ZnSe using ZnTe/ZnSe multiquantum wells," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 878-879.
- 35) Y. Lansari, J. Ren, B. Sneed, K. A. Bowers, J. W. Cook, Jr. and J. F. Schetzina : "Improved ohmic contacts for p-type ZnSe and related p-on-n diode structures," *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 2554-2556.
- 36) M. Ozawa, F. Hiei, A. Ishibashi and K. Akimoto : "Au(Pt)Pd ohmic contacts to p-ZnTe," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 503-505.
- 37) D. B. Eason, Z. Yu, W. C. Hughes, W. H. Roland, C. Boney, J. W. Cook, Jr., J. F. Schetzina, G. Cantwell and W. C. Harsch : "High-brightness blue and green light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 115-117.