

深紫外窒化物系発光デバイス

川崎 宏治^{*,†}・武内 道一^{**}・青柳 克信^{*,**}

Deep Ultraviolet Nitride Light Emitting Devices

Koji KAWASAKI^{*,†}, Misaichi TAKEUCHI^{**} and Yoshinobu AOYAGI^{*,**}

Compact deep-ultraviolet (DUV) light sources emitting at 200 to 350 nm with high efficiency is strongly required for numerous applications such as the efficient white light, sterilization, decomposition of pollutant, medical treatment and nonline-of-sight communication. High quality AlGaIn active layer, high extraction efficiency and reduction of operation voltage are necessary for realization of the DUV light source. In this report, after description of the current state and issues in the device development, crystal growth techniques for high quality AlGaIn epitaxial film and new AlGaIn vertical device structure for high efficient DUV light emitting devices are described.

Key words: MOCVD, AlGaIn, deep ultraviolet, epitaxy, light emitting diode

GaN を用いた p-n 接合発光ダイオード (light emitting diode: LED) は、1989 年に天野らが電子線照射によって p 型 GaN を実現したことが発端である¹⁾。その後、窒素雰囲気中でアニールすることで不純物の活性化が可能になり、p 型 GaN が得られることが中村らにより明らかにされ²⁾、1995 年に電流注入による誘導放出が³⁾、翌 1996 年には室温連続発振が報告された⁴⁾。GaN ベースの青色 LED は^{5,6)}、交通信号機をはじめ日常のイルミネーションとしても、われわれの周囲いたるところで容易に見受けられる。また、波長 405 nm の青紫レーザーは今日まで多くの改良が加えられ、ゲーム機やプレーヤー等の家電製品に搭載され、一般家庭にも広く普及するようになってきた。現在、青色発光で発光波長帯をさらに短くした短波長青色発光デバイス開発の研究が国内外で盛んに行われており、発光波長 375 nm や 365 nm の紫外線 LED (UVLED) がすでに紫外窒化物系の発光デバイスとして市場に出ている。これらの発光デバイスの実現には、高品質低欠陥密度 GaN 層を実現する横方向成長 (lateral epitaxial overgrowth: LEO) 法の開発と⁷⁾、InGaIn 層を活性層に用いることに

よる発光効率の向上が背景にある⁶⁾。これに対し、波長が 350 nm よりも短い発光デバイス実現には、AlGaIn 層を活性層に用いる必要がある。この場合、Al の組成を変化させることにより、おおよそ 200~350 nm の範囲の深紫外域 (deep UV: DUV) で発光するデバイスが実現可能である。

既存の深紫外光源としては、He-Cd レーザー、エキシマーレーザー等の気体レーザー、水銀ランプ、キセノンランプなどがあげられるが、これらは装置サイズや発熱量、消費電力、効率といった点に大きな問題があり、これらを高出力深紫外半導体発光デバイスに置き換えることができれば、その社会的あるいは経済的影響は甚大である。

図 1 は、高出力深紫外 LED の代表的な応用例を示している。深紫外光には強い殺菌作用があるため、院内感染の原因となる細菌類の分解処理などに応用される。また、生体に関する作用が大きいので、光照射治療や、生体組織のマーキングに利用可能である。さらに、フォトンのエネルギーが大きいので、従来分解できない有機材料、たとえば環境ホルモンとされるダイオキシンの分解処理等、環境浄化に応用されることが期待される。この波長帯を用いた地

* 東京工業大学大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

† E-mail: koji@ep.titech.ac.jp

** 理化学研究所 (〒351-0198 和光市広沢 2-1)



図1 深紫外発光デバイスの応用例。波長 200～350 nm の深紫外光には白色光源をはじめ，殺菌や公害物質の分解，医療，通信など幅広い応用分野がある。

上での近距離通信への応用も可能である。また，一般照明機器への応用も大きな市場があると考えられており，その実現が期待されている。本稿では，窒化物半導体を用いた深紫外線発光デバイス研究の最近の動向について解説し，筆者らの最近の研究結果を紹介する。

1. 深紫外線 LED の発光効率の向上

1.1 発光効率とは

一般的に，LED の発光効率 η は，内部量子効率： η_i ，取り出し効率： η_{ext} ，電圧効率： η_v を用いて， $\eta = \eta_i \cdot \eta_{ext} \cdot \eta_v$ として表現できる。内部量子効率は，LED に流す電子数に対して，活性層で発生する光子の個数を割合で示したものであり，取り出し効率は，活性層で発生した光子数のうち LED チップやパッケージ外に出てくる光子数を割合で示したものである。電圧効率 η_v は，出射する光のエネルギー $h\nu$ に対するデバイスの動作電圧 V の比で， $h\nu/qV$ (ただし q は素電荷量) と表現される。投入電力に対する光エネルギーの比が，いわゆる発光効率である。したがって，深紫外線 LED の発光効率の向上には，おのおの効率を 1 に近づけることが必要不可欠であることがわかる。

1.2 外部量子効率の向上

図2は，従来報告された DUV-LED の発光ピーク波長に対する外部量子効率 η_e を文献から拾い上げて，作図し

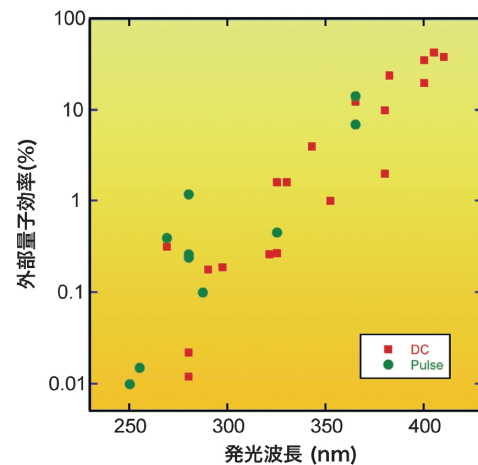


図2 紫外ならびに深紫外 LED の発光ピーク波長と外部量子効率の関係⁸⁻²⁴⁾。直流駆動とパルス駆動における効率の値を色分けして区別している。

たものである⁸⁻²⁴⁾*1。外部量子効率は LED に流す電子数に対して，LED チップやパッケージ外に出てくる光子の個数を割合で示したものであり， $\eta_e = \eta_i \cdot \eta_{ext}$ と表現され，電流-光強度 ($I-L$) 特性の傾き (dL/dI) として容易に評価可能な量である。同図において，発光波長が短波長になるにつれて，効率が指数関数的に低下していることがわかる。青色発光デバイスで成功を収めた InGaN 系発光デバイスの場合，デバイス構造の下地層にはサファイヤ基板に成長した数ミクロン厚の GaN 層が一般的に用いられ

*1 http://www.jrcm.or.jp/news/b_news10.htm

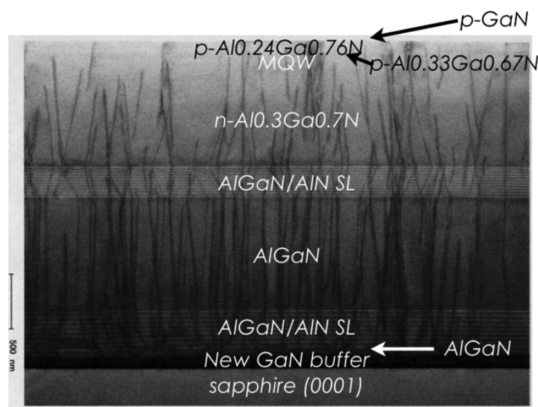


図3 新しい GaN バッファ層を用いて作製した AlGaIn 系深紫外線 LED 構造の断面透過電子顕微鏡写真。

る。基板と GaN 層の格子定数差に起因した高密度貫通転位が GaN 層内に発生するが、低温バッファ層、およびそのアニール技法の最適化により、結晶成長技法のみでは 10^8 cm^{-2} 台、LEO 法では $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}$ の貫通転位密度を有する良好な結晶が得られる²⁵⁾。これに対して、AlGaIn 系においては、数多くの貫通転位が存在するだけでなく、Al 組成が高くなっていくにつれて、本質的に点欠陥が発生しやすいという問題点があるため、一般的に結晶品質の向上が困難であることが内部量子効率の低下につながっている。

1.3 内部量子効率の向上

内部量子効率の向上のためには、活性層への電子の注入効率を高め、かつ注入電子の輻射性再結合過程を増やし、非輻射性再結合過程を減らすことが必要である。キャリアの注入効率の向上のため、一般に DUV-LED の活性層はキャリアブロック層付きのダブルヘテロ構造を有する多重量子井戸構造の形をとる。キャリアブロック層を導入することで^{26,27)}、電子がクラッド層にオーバーフローして、設計外の波長で発光することを抑制している²⁸⁾。

サファイヤ (0001) 面上に成長させた窒化物結晶には、自発分極とピエゾ分極による内部電解の発生のために、量子閉じ込めシュタルク効果 (quantum-confinement Stark effect: QCSE) により輻射性再結合時間が長くなり、結果として内部量子効率が低下する²⁹⁾。QCSE は量子井戸の幅が広いほど大きくなるため、数ナノメートル程度に薄くする必要があり³⁰⁾。AlGaIn 系の量子井戸においては、自発分極のほうが優勢的であるため、井戸層とバリア層間の Al の組成差が大きくなるにつれて分極効果が大きくなり、内部量子効率は一般的に低下する。井戸幅と組成差の両者を考慮した量子井戸設計が必要である。

AlGaIn 薄膜中の非輻射再結合の要因となる結晶欠陥の

低減のために、Khan らは、流量変調法により高品質 AlN バッファ層をサファイヤ基板上に成長させ、きわめて平坦な量子井戸を形成することでデバイスを実現している^{22,31)}。また、川西らも流量変調法を用いて、AlGaIn 多重量子井戸構造を製作し、光励起により波長 241 nm でレーザー発振を確認している³²⁾。

筆者らは、バッファ層として GaN を用いる独自の手法により、AlGaIn 薄膜の高品質化を行っている。一般に、AlGaIn 系深紫外発光デバイスに数ミクロンと厚い GaN バッファ層を用いた場合、バッファ層による光吸収や、その上に形成した AlGaIn 層にクラックが発生するという問題が生じる。筆者らは、GaN バッファ層において 10^8 cm^{-2} 台の貫通転位密度が実現される成長プロセスを精査した結果、転位低減効果は、「低温 GaN バッファ層+アニール+100 nm 厚程度の高温成長 GaN 層」といったサファイヤ基板とのインターフェース直上のごく薄い部位で最も効果的に機能していることをつきとめ、AlGaIn 層の下地層としてこうした“薄膜 GaN 層”を用いた。その結果、図3に示すように、Al 組成 35% 以下の AlGaIn 層に対しては GaN 層が薄いことも相まってクラックフリー、かつ効果的に貫通転位の低減を可能とする新たなバッファ層となることを見いだした。この組成の AlGaIn 層は、325 nm 帯の発光デバイスに利用可能である。“薄膜 GaN 層”は、後述するレーザーリフトオフ法による縦型 LED 構造作製の際には、剝離層としての機能も果たし、サファイヤ基板とともに除去され、GaN 層を下地層として使ったことによる深紫外光の吸収の問題も回避できる。

しかしながら、Al 組成 30% 以上の AlGaIn 層に対しては、上記“薄膜 GaN 層”ではクラックが発生してしまうため、325 nm 帯より短波長の発光デバイスに対しては、数ミクロン以下の膜厚の AlN 層をサファイヤ基板上に形成する手法をとる。筆者らは、AlN 成長に対しても結晶成長モードを詳細に考察し、有機金属気相 (metal organic chemical vapor deposition; MOCVD) 流量変調法のシーケンスの最適化による二次元核形成・ステップフロー交互積層法で高品質 AlN 層を得ており、その上に図4に示すような原子ステップの見える高品質の $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ を得ることに成功した。また、Si ドープした n 型の $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 薄膜において、 $60 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高い電子移動度と $0.034 \text{ } \Omega\text{cm}$ と低い比抵抗の値が得られている。

1.4 取り出し効率の向上

LED の活性層で発生する光子の一部は、活性層自身や、金属電極やバッファ層、基板等の LED チップ内で吸収

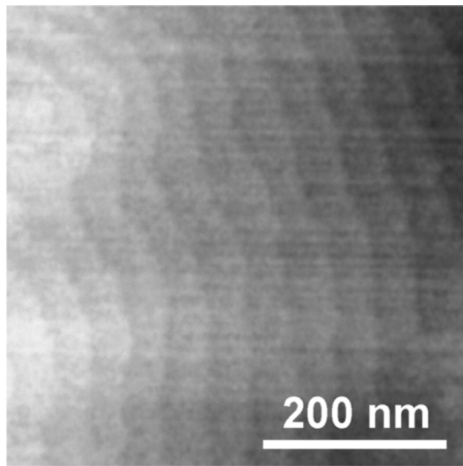


図4 二次元核形成・ステップフロー交互積層法により得た $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{N}$ 薄膜の表面の原子間力顕微鏡写真。

されたり、あるいは半導体の屈折率が外部の屈折率よりも高いために、チップ内で反射されつづけ、外に光が出てこない。このため、吸収の高い SiC 基板や GaN バッファ層を除去するための何らかの方法が必要である。

裏面に反射率の高い金属材料で電極を形成し、反射鏡として利用したり、あるいは光の取り出し面に凹凸レンズを形成し、取り出し効率を高める工夫が InGaN 系の LED で行われている^{19,33}。最近では、微細加工技術の発展によって光の伝搬を解析したり、特性をコントロールしようとする動きが始まっており³⁴、深紫外発光デバイスに関しても同様の手法で効率向上が見込まれている。

1.5 電圧効率の向上

ワイドバンドギャップ材料である AlGaIn においては、電極と半導体の接触抵抗や電位障壁、デバイスの大きな直列抵抗の存在が動作電圧の増大につながり、電圧効率の観点から、これらの問題を無視できない。図5(a)に示すような可視の LED と同様に深紫外発光デバイスを設計した場合、AlGaIn の抵抗が本質的に高いため、広い電極に電

流が一樣に流れず、大きな抵抗損失を生じさせる。電流を注入すればするほど発熱によりデバイスの温度が上昇する結果として、内部量子効率を大きく低下してしまうため、良好な電極の形成、ならびに膜の抵抗値の低減、電流経路の短縮が必要不可欠である。

p 型 AlGaIn に対する電極形成においては、GaIn などの電極接触層を用いて形成され³⁵、その電極材料としては、Ni/Au をはじめ Pt/Au、Ni/Pd/Au 等の金属多層構造が用いられている³⁶⁻⁴⁴。n 型 AlGaIn に対しては、Ti/Al/Ti/Au 等の金属の組み合わせが用いられる⁴⁵⁻⁴⁹。また、p 型 GaIn 層の抵抗低減のために Mg のドーピングをしすぎると結晶性が劣化するため⁵⁰、p 型 GaIn 層のかわりに p 型の AlGaIn/GaIn の超格子構造を用いる手法もとられている⁵¹⁻⁵³。

AlGaIn DUV-LED 構造は絶縁性の高いサファイヤ基板の上に形成され、かつ AlGaIn 薄膜自身の抵抗も高いため、電流経路の低減は効率向上のために必要不可欠である。電極の形状をリング状⁵⁴あるいは楕円に変化する手法や⁵⁵、直径 $10\ \mu\text{m}$ 程度のマイクロ LED を用いることにより⁵⁶、電流経路の短縮を行い直列抵抗の低減が試みられている。

筆者らは、図5(b)に示されるような、p 型と n 型の 2 つの電極で活性層がサンドイッチされる縦型 DUV-LED の実現を試みた。絶縁性基板をレーザーリフトオフ法により除去し、透明電極をつけることにより、縦方向に大面積で発光層全体に均一に電流を流すことが可能である。その電流経路は高々 $1\ \mu\text{m}$ 程度であるため、デバイスの抵抗が低くなり、電圧効率を高く維持することが可能である。加えて、サファイヤ基板のかわりに反射率の高い金属でも電極形成が可能のため、活性層で発光した光の大半を表面に取り出すことが可能となり、高い取り出し効率を実現可能であることも優位な点である。

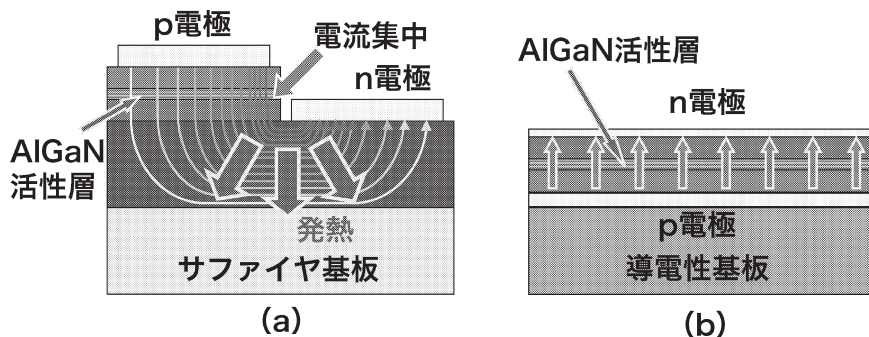


図5 深紫外 LED の模式図。(a) 従来の裏面光取り出し型の横型 LED 構造、(b) 新しく提案した表面光取り出し型の縦型 LED 構造。

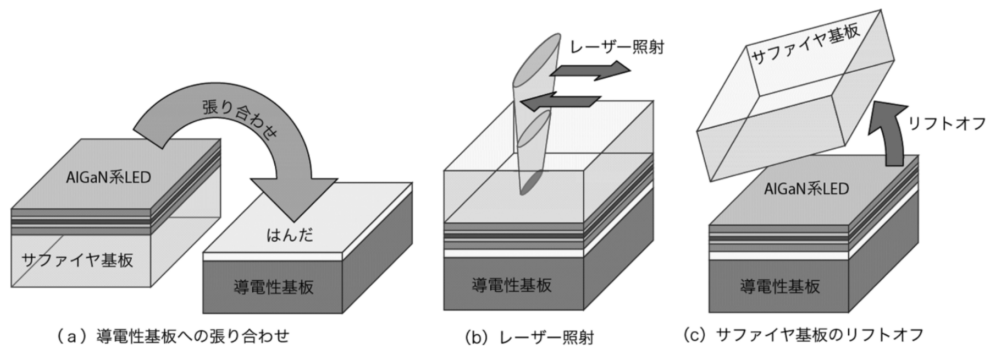


図6 縦型構造 LED 実現のためのレーザーリフトオフ技術。(a) はんだを用いて導電性基板とサファイヤ基板上の AlGaIn 薄膜を張り合わせた後、(b) サファイヤ基板の裏面からレーザー照射を行う。界面で光吸収を起こさせ、界面の半導体を熱分解させた後、(c) サファイヤ基板をリフトオフする。

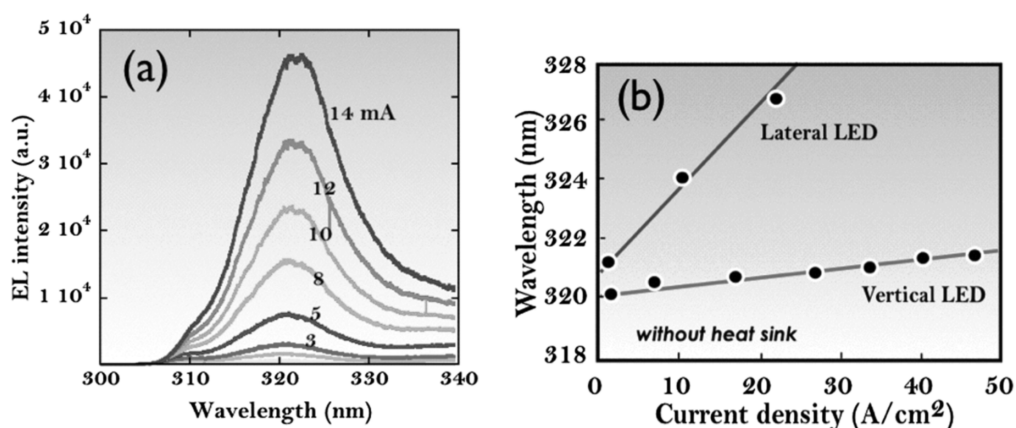


図7 作製した AlGaIn 縦型 LED の発光特性。(a) 発光スペクトルの注入電流依存性。(b) 縦型 LED の発光ピーク波長の注入電流密度依存性。同図には従来の横型構造のピーク波長依存性も示している。

2. レーザーリフトオフによる縦型 LED の作製

レーザーリフトオフ法は、図6に示すように、サファイヤ基板上に形成した LED 構造をはんだ等の接着剤を介して導電性の基板に張り合わせた後、透明なサファイヤ基板側からレーザー照射を行い、光吸収により発熱する熱で AlGaIn の一部を溶かすことで、サファイヤ基板からリフトオフする手法である。GaN バッファーを用いた InGaIn 系の可視光デバイスに関しては、GaN を熱分解するレーザーリフトオフ法によるデバイス作製例が報告されているが^{13,57-61)}、AlGaIn 薄膜の例は報告されていない。これは、通常 AlGaIn がレーザーリフトオフ用の光を吸収できないために実現しなかったのであるが、筆者らは、新たに薄膜のレーザー吸収層を結晶成長層の中に形成し、AlGaIn でもレーザーリフトオフをはじめて可能にした。また、装置としても、小型かつ取り扱いが容易な固体レーザー励起の Q スイッチ YVO₄ レーザーの第四高調波 (波長 266 nm) を用いたレーザーリフトオフ装置を開発し、いろいろな波長で動作可能な AlGaIn 系 LED のレーザーリフトオフを

はじめて実現した。

本手法を用いて 325 nm 帯の縦型 DUV-LED を試作した例を示し、以下に概要を記す。サファイヤ基板上に MOCVD 法により低温 GaN バッファー層を用いて、図3に示すような LED 構造を作製した。Al の組成はクラッド層で 30% 程度であった。

図7(a)に、作製した DUV-LED の発光スペクトルの注入電流依存性を示す。測定は室温で行い、注入電流量は 1~14 mA まで変化させた。同図より、注入電流 14 mA によりピーク波長 322 nm で発光していることがわかる。また、同図(b)には、その発光ピーク波長の注入電流密度依存性を示す。図中に比較のため、従来の横型 LED を用いた実験結果も示している。従来の横型デバイスでは、電流注入の増加に対して発光ピーク波長が長波長側に大きくシフトしてゆくのに対して、縦型 LED ではその波長シフトがより少ないことがわかる。本デバイスの直列抵抗は従来型に対して 5 分の 1 に低減されており、このピーク波長シフトの低減は、直列抵抗低減によりデバイスの発熱が

抑制されたためと考えられる。AlGaIn 縦型デバイス構造はきわめて低い直列抵抗をもつため、今後の短波長化に向けたより高い Al の組成の AlGaIn デバイスに適しているため、今後の深紫外発光デバイスの開発に期待がもてる。

水銀ランプの代替を目指した高い Al 組成の DUV-LED の開発を目標に、窒化物半導体を用いた深紫外発光デバイスの研究の動向と、筆者らの研究の一部を紹介した。本稿では、詳細は触れなかったが、350 nm 帯の深紫外レーザーも近年ではいくつか報告がなされており⁶²⁻⁶⁴、結晶成長ならびに不純物添加等の技術も格段に向上している。今後の短波長化には、やはり高い Al 組成において高品質な膜を得ると同時に、上述した効率を下げている要因を的確にとらえ対処していくことが、紫外窒化物系発光デバイスの開発のうえで重要といえる。

文 献

- 1) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki: "P-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L2112-L2114.
- 2) S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai: "Hole compensation mechanism of p-type GaN films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 1258-1266.
- 3) I. Akasaki, H. Amano, S. Soda, H. Sakai, T. Tanaka and M. Koike: "Stimulated emission by current injection from an AlGaIn/GaN/GaInN quantum well device," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) L1517-L1519.
- 4) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku: "Continuous-wave operation of InGaIn multi-quantum-well-structure laser diodes at 233 K," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 3034-3036.
- 5) 赤崎 勇編著: III族窒化物半導体 (培風館, 1999).
- 6) S. Nakamura, S. Pearton and G. Fasol: *The Blue Laser Diode*, 2nd Rev. and Enlarged Ed. (Springer-Verlag, Berlin, 2000).
- 7) O.-H. Nam, M. D. Bremser, T. S. Zheleva and R. F. Davis: "Lateral epitaxy of low defect density GaN layers via organometallic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **71** (1997) 2638-2640.
- 8) A. J. Fischer, A. A. Allerman, M. H. Crawford, K. H. A. Bogart, S. R. Lee, R. J. Kaplar, W. W. Chow, S. R. Kurtz, K. W. Fullmer and J. J. Figiel: "Room-temperature direct current operation of 290 nm light-emitting diodes with milliwatt power levels," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 3394-3396.
- 9) V. Adivarahan, S. Wu, J. P. Zhang, A. Chitnis, M. Shatalov and V. Mandavilli: "High-efficiency 269 nm emission deep ultraviolet light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 4762-4764.
- 10) A. A. Allerman, M. H. Crawford, A. J. Fischer, K. H. A. Bogart, S. R. Lee, D. M. Follstaedt, P. P. Provencio and D. D. Koleske: "Growth and design of deep-UV (240-290 nm) light emitting diodes using AlGaIn alloys," *J. Cryst. Growth*, **272** (2004) 227-241.
- 11) W. Sun, V. Adivarahan, M. Shatalov, Y. Lee, S. Wu, J. Yang, J. Zhang and M. A. Khan: "Continuous wave milliwatt power AlGaIn light emitting diodes at 280 nm," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L1419-L1421.
- 12) T. Mukai and S. Nakamura: "Ultraviolet InGaIn and GaIn single-quantum-well-structure light-emitting diodes grown on epitaxially laterally overgrown GaN substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5735-5739.
- 13) D. Morita, M. Sano, M. Yamamoto, T. Murayama, S. Nagahama and T. Mukai: "High output power 365 nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) L1434-L1436.
- 14) K. Tadatomo, H. Okagawa, Y. Ohuchi, T. Tsunekawa, Y. Imada, M. Kato and T. Taguchi: "High output power InGaIn ultraviolet light-emitting diodes fabricated on patterned substrates using metalorganic vapor phase epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L583-L585.
- 15) T. Nishida and N. Kobayashi: "Ten-milliwatt operation of an AlGaIn-based light emitting diode grown on GaN substrate," *Phys. Status Solidi a*, **188** (2001) 113-116.
- 16) J. Edmond, A. Abare, M. Bergman, J. Bharathan, K. L. Bunker, D. Emerson, K. Haberern, J. Ibbetson, M. Leung, P. Russel and D. Slater: "High efficiency GaN-based LEDs and lasers on SiC," *J. Cryst. Growth*, **272** (2004) 242-250.
- 17) S. Nagahama, N. Iwasa, M. Senoh, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, T. Kozaki, M. Sano, H. Matsumura, H. Umemoto, K. Chocho, T. Yanamoto and T. Mukai: "GaN-based light-emitting diodes and laser diodes, and their recent progress," *Phys. Status Solidi a*, **188** (2001) 1-7.
- 18) D. Morita, M. Sano, M. Yamamoto, M. Nonaka, K. Yasutomo, K. Akaishi, S. Nagahama and T. Mukai: "Over 200 mW on 365 nm ultraviolet light emitting diode of GaN-free structure," *Phys. Status Solidi a*, **200** (2003) 114-117.
- 19) M. Yamada, T. Mitani, Y. Narukawa, S. Shioji, I. Niki, S. Sonobe, K. Deguchi, M. Sano and T. Mukai: "InGaIn-based near-ultraviolet and blue-light-emitting diodes with high external quantum efficiency using a patterned sapphire substrate and a mesh electrode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) L1431-L1433.
- 20) K. Mayes, A. Yasan, R. McClintock, D. Shiell, S. R. Darvish, P. Kung and M. Razeghi: "High-power 280 nm AlGaIn light-emitting diodes based on an asymmetric single-quantum well," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1046-1048.
- 21) A. Chitnis, J. P. Zhang, V. Adivarahan, M. Shatalov, S. Wu, R. Pachipulusu, V. Mandavilli and M. Asif Khan: "Improved performance of 325-nm emission AlGaIn ultraviolet light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 2565-2567.
- 22) V. Adivarahan, W. H. Sun, A. Chitnis, M. Shatalov, S. Wu, H. P. Maruska and M. Asif Khan: "250 nm AlGaIn light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 2175-2177.
- 23) J. P. Zhang, S. Wu, S. Rai, V. Mandavilli, V. Adivarahan, A. Chitnis, M. Shatalov and M. A. Khan: "AlGaIn multiple-quantum-well-based, deep ultraviolet light-emitting diodes with significantly reduced long-wave emission," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 3456-3458.
- 24) M. Kneissl, Z. H. Yang, M. Teepe, C. Knollenberg, N. M. Johnson, S. B. Schujman and L. J. Schowalter: *Abstracts of 6th Inter. Conf. on Nitride Semiconductor*, Bremen, Germany (2005) Tu-PD2-4.
- 25) S. Nagahama, N. Iwasa, M. Senoh, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, T. Kozaki, M. Sano, H. Matsumura, H. Umemoto, K. Chocho and T. Mukai: "High-power and

- long-lifetime InGaN multi-quantum-well laser diodes grown on low-dislocation-density GaN substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L647-L650.
- 26) A. Chitnis, J. P. Zhang, V. Adivarahan, M. Shatalov, S. Wu, R. Pachipulusu, V. Mandavilli and M. A. Khan: "Improved performance of 325-nm emission AlGaIn ultraviolet light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 2565-2567.
 - 27) T. Nishida, T. Ban and N. Kobayashi: "Highly transparent structure for nitride ultraviolet light emitting diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **42** (2003) 2273-2277.
 - 28) K. Domen, R. Soejima, A. Kuramata and T. Tanahashi: "Electron overflow to the AlGaIn p-cladding layer InGaIn/GaN/AlGaIn MQW laser diodes," *MRS Internet J. Nitride Semicond. Res.*, **3** (1998) 1-5.
 - 29) S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota and S. Nakamura: "Spontaneous emission of localized excitons in InGaIn single and multi-quantum well structures," *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 4188-4190.
 - 30) M. D. Craven, P. Waltereit, J. S. Speck and S. P. DenBaars: "Well-width dependence of photoluminescence emission from *a*-plane GaN/AlGaIn multiple quantum wells," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 496-498.
 - 31) J. P. Zhang, M. Asif Khan, W. H. Sun, H. M. Wang, C. Q. Chen, Q. Fareed, E. Kuokstis and J. W. Yang: "Pulsed atomic-layer epitaxy of ultrahigh-quality $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ structures for deep ultraviolet emissions below 230 nm," *Appl. Phys. Lett.*, **81** (2002) 4392-4394.
 - 32) T. Takano, Y. Narita, A. Horiuchi and H. Kawanishi: "Room-temperature deep-ultraviolet lasing at 241.5 nm of AlGaIn multiple-quantum-well laser," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 3567-3569.
 - 33) K. Nakahara, K. Tamura, M. Sakai, D. Nakagawa, N. Ito, M. Sonobe, H. Takasu, H. Tampo, P. Fons, K. Matsubara, K. Iwata, A. Yamada and S. Niki: "Improved external efficiency InGaIn-based light-emitting diodes with transparent conductive Ga-doped ZnO as p-electrodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L180-L182.
 - 34) K. Orita, S. Tamura, T. Takizawa, T. Ueda, M. Yuri, S. Takigawa and D. Ueda: "High-extraction-efficiency blue light-emitting diode using extended-pitch photonic crystal," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 5809-5813.
 - 35) M. S. Shur, A. D. Bykhovski, R. Gaska, J. W. Yang, G. Simin and M. A. Khan: "Accumulation hole layer in *p*-GaN/AlGaIn heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 3061-3063.
 - 36) J.-O. Song, D.-S. Leem, J. S. Kwak, S. N. Lee, O. H. Nam, Y. Park and T.-Y. Seong: "Low resistance and transparent Ni-La solid solution/Au ohmic contacts to *p*-type GaN," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1504-1506.
 - 37) H. W. Jang, S. Y. Kim and J.-L. Lee: "Mechanism for Ohmic contact formation of oxidized Ni/Au on *p*-type GaN," *J. Appl. Phys.*, **94** (2003) 1748-1752.
 - 38) D. Qiao, L. S. Yu, S. S. Lau, J. Y. Lin and H. X. Jiang and T. E. Haynes: "A study of the Au/Ni ohmic contact on *p*-GaN," *J. Appl. Phys.*, **88** (2000) 4196-4200.
 - 39) V. Adivarahan, A. Lunev, M. A. Khan, J. Yang, G. Simin, M. S. Shur and R. Gaska: "Very-low-specific-resistance Pd/Ag/Au/Ti/Au alloyed ohmic contact to *p* GaN for high-current devices," *Appl. Phys. Lett.*, **78** (2001) 2781-2783.
 - 40) J.-L. Lee, M. Weber, J. K. Kim, J. W. Lee, Y. J. Park, T. Kim and K. Lynn: "Ohmic contact formation mechanism of nonalloyed Pd contacts to *p*-type GaN observed by positron annihilation spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 2289-2291.
 - 41) T. Maeda, Y. Koide and M. Murakami: "Effects of NiO on electrical properties of NiAu-based ohmic contacts for *p*-type GaN," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 4145-4147.
 - 42) J.-K. Ho, C.-S. Jong, C. C. Chiu, C.-N. Huang, K.-K. Shih, L.-C. Chen, F.-R. Chen and J.-J. Kai: "Low-resistance ohmic contacts to *p*-type GaN achieved by the oxidation of Ni/Au films," *J. Appl. Phys.*, **86** (1999) 4491-4497.
 - 43) J. K. Kim, J.-L. Lee, J. W. Lee, H. E. Shin, Y. J. Park and T. Kim: "Low resistance Pd/Au ohmic contacts to *p*-type GaN using surface treatment," *Appl. Phys. Lett.*, **73** (1998) 2953-2955.
 - 44) M. L. Nakarmi, K. H. Kim, M. Khizar, Z. Y. Fan, J. Y. Lin and H. X. Jiang: "Electrical and optical properties of Mg-doped $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ alloys," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 092108.
 - 45) H.-K. Kim, T.-Y. Seong, I. Adesida, C. W. Tang and K. M. Lau: "Low-resistance Pt/Pd/Au ohmic contacts to *p*-type AlGaIn," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 1710-1712.
 - 46) J. O. Song and S.-H. Kim: "Formation of vanadium-based ohmic contacts to *n*-GaN," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 1154-1156.
 - 47) K. O. Schweitz, P. K. Wang, S. E. Mohny and D. Gotthold: "V/Al/Pt/Au Ohmic contact to *n*-AlGaIn/GaN heterostructures," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 1954-1956.
 - 48) A. N. Bright, P. J. Thomas, M. Weyland, D. M. Tricker, C. J. Humphreys and R. Davies: "Correlation of contact resistance with microstructure for Au/Ni/Al/Ti/AlGaIn/GaN ohmic contacts using transmission electron microscopy," *J. Appl. Phys.*, **89** (2001) 3143-3150.
 - 49) C.-T. Lee and H.-W. Kao: "Long-term thermal stability of Ti/Al/Pt/Au Ohmic contacts to *n*-type GaN," *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000) 2364-2366.
 - 50) S.-R. Jeon, Z. Ren, G. Cui, J. Su, M. Gherasimova and J. Han: "Investigation of Mg doping in high-Al content *p*-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.3 < x < 0.5$)," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 082107.
 - 51) A. Yasan, R. McClintock, S. R. Darvish, Z. Lin, K. Mi, P. Kung and M. Razeghi: "Characteristics of high-quality *p*-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, **80** (2002) 2108-2110.
 - 52) P. Kozodoy, Y. P. Smorchkova, M. Hansen, H. Xing, S. P. DenBaars, U. K. Mishra, A. W. Saxler, R. Perrin and W. C. Mitchell: "Polarization-enhanced Mg doping of AlGaIn/GaN superlattices," *Appl. Phys. Lett.*, **75** (1999) 2444-2446.
 - 53) I. D. Goepfert, E. F. Schubert, A. Osinsky, P. E. Norris and N. N. Faleev: "Experimental and theoretical study of acceptor activation and transport properties in *p*-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ /GaN superlattices," *J. Appl. Phys.*, **88** (2000) 2030-2038.
 - 54) H. W. Choi and M. D. Dawson: "Improved current spreading in 370 nm AlGaIn microring light emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 053504.
 - 55) M. Shatalov, G. Simin, V. Adivarahan, A. Chitnis, S. Wu, R. Pachipulusu, V. Mandavilli, K. Simin, J. P. Zhang, J. W. Yang and M. A. Khan: "Lateral current crowding in deep UV light emitting diodes over sapphire substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (2002) 5083-5087.
 - 56) V. Adivarahan, S. Wu, W. H. Sun, V. Mandavilli, M. S. Shatalov, G. Simin, J. W. Yang, H. P. Maruska and M. A. Khan: "High-power deep ultraviolet light-emitting diodes based on a micro-pixel design," *Appl. Phys. Lett.*, **85** (2004) 1838-1840.
 - 57) T. Ueda, M. Ishida, S. Tamura, Y. Fujimoto, M. Yuri, T. Saito and D. Ueda: "Vertical InGaIn-based blue light emit-

- ting diode with plated metal base fabricated using laser lift-off technique," *Phys. Status Solidi c*, **0** (2003) 2219-2222.
- 58) B. S. Tan, S. Yuan and X. J. Kang: "Performance enhancement of InGaN light-emitting diodes by laser lift-off and transfer from sapphire to copper substrate," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 2757-2759.
- 59) D. W. Kim, H. Y. Lee, M. C. Yoo and G. Y. Yeom: "Highly efficient vertical laser-lift-off GaN-based light-emitting diodes formed by optimization of the cathode structure," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 052108.
- 60) W. S. Wong, T. Sands, N. W. Cheung, M. Kneissl, D. P. Bour, P. Mei, L. T. Romano and N. M. Johnson: "In_xGa_{1-x}N light emitting diodes on Si substrates fabricated by Pd-In metal bonding and laser lift-off," *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 2822-2824.
- 61) C.-F. Chu, F.-I. Lai, J.-T. Chu, C.-C. Yu, C.-F. Lin, H.-C. Kuo and S. C. Wang: "Study of GaN light-emitting diodes fabricated by laser lift-off technique," *J. Appl. Phys.*, **95** (2004) 3916-3922.
- 62) Y. He, Y.-K. Song, A. V. Nurmikko, J. Su, M. Gherasimova, G. Cui and J. Han: "Optically pumped ultraviolet AlGaInN quantum well laser at 340 nm wavelength," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 463-465.
- 63) M. Kneissl, D. W. Treat, M. Teepe, N. Miyashita and N. M. Johnson: "Ultraviolet AlGaInN multiple-quantum-well laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **82** (2003) 4441-4443.
- 64) K. Iida, T. Kawashima, A. Miyazaki, H. Kasugai, S. Mishima, A. Honshio, Y. Miyake, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano and I. Akasaki: "350.9 nm UV laser diode grown on low-dislocation-density AlGaInN," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) L499-L500.

(2006年3月13日受理)