AlGaIn深紫外LDの実現へ向けた最近の進展

平山 秀樹¹, 前田 哲利¹, 定 昌史¹, M. Ajmal Khan¹, 只友 一行², 岡田 成仁², 山田 陽一²

¹理化学研究所 開拓研究本部 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1)

²山口大学 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

Recent Progress Toward Realizing AlGaIn-Based Deep-UV Laser Diodes

Hideki HIRAYAMA,¹ Noritoshi MAEDA,¹ Masafumi JO,¹ M. Ajmal KHAN,¹
Kazuyuki TADATOMO,² Naruhito OKADA,² and Yoichi YAMADA²

¹RIKEN Cluster for Pioneering Research (CPR), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198

²Yamaguchi University, 2-16-1 Tokiwadai, Ube, Yamaguchi 755-8611

(Received January 17, 2019)

AlGaIn deep-ultraviolet (DUV) laser diodes (LDs) have the potential to be used as compact, highly efficient, high-power light sources. The applications for DUV-LDs include sterilization and fine machining of metals or other advanced materials, utilizing the advantage of the very high absorption coefficient of UV light in these materials. In this work, we fabricated AlGaIn DUV LD structures based on growth techniques used for fabricating highly efficient AlGaIn light-emitting diodes (LEDs). We fabricated laser mirror facets using a laser stealth-dicing (SD) process. With current injection of 0.1 KA/cm² and under continuous wave (CW) operation, spontaneous emission at a wavelength of 277 nm from the DUV LD structure with a relatively high external quantum efficiency (EQE) of over 4% was observed. We also observed stimulated emission by optical pumping from the AlGaIn DUV quantum wells with low threshold exciting power density of 68 kW/cm² at room temperature.

Key Words: Deep-UV, AlN, AlGaIn, Laser diode, MOCVD

1. はじめに

AlGaIn系半導体を用いた深紫外レーザーダイオード (DUV-LD) は、もし実現されれば、コンパクト、高効率、高出力な深紫外レーザー光源となり得、様々な応用分野での利用が期待されている。Fig. 1に、AlGaIn系深紫外LD 及びLEDに期待される応用分野を示す。短波長の紫外光は、赤外・可視の光に比べて金属等への光吸収率が格段に高いため、低出力でも効率の良い加工が可能である。そのため、各種金属や先端材料の加工に大変有用である。また、深紫外LEDと同様に、UVCは殺菌・浄水、空気浄化、UVBは皮膚治療などの医療、商品作物の病害防止などの農業、UVAは樹脂硬化加工、印刷・塗装・コーティングなど幅広い分野での応用が期待されている。

1995年に、日亜化学によって窒化物半導体LDがはじめて実現¹⁾されてから、InGaIn活性層、それに続きAlGaIn活性層を用いたLD短波長化へのチャレンジが行われてきた²⁻⁸⁾。Fig. 2に窒化物紫外LDの短波長化の歴史について示す。2000年頃までに、日亜化学によって

InGaInを用いたサブ400 nmのLDが開発され、波長は水銀ランプの置き換えとなる365 nmに達した。その後、パロアルトリサーチセンター、名城大学やCree社によって、AlGaIn活性層を用いたLDが実現され、345 nm程度まで短波長化された。それよりも短波長、特に340 nmより短波長のLD開発は、p型AlGaInのホール濃度が低くホール注入が難しいためになかなか進まず、現在の最短

Fig. 1 Potential applications of AlGaIn UVA-UVC LEDs and laser diodes (LDs).

Fig. 2 History of shortest wavelength of nitride-based deep-UV LDs from 1995 to 2015.

波長は、2015年に浜松ホトニクスが記録した326 nmである⁸⁾。

一方、最近のAlN系結晶成長技術の進展とLED設計技術の向上により、波長260–280 nmの殺菌用途・深紫外LEDの開発は大きく進展した。薄いp型層でホール注入が出来るLEDでは、p型濃度が低い場合でも、ある程度の高効率動作が可能である。

我々は、深紫外LEDの開発を1996年頃に開始し、その短波長化と高効率化に関する研究を長年行ってきた。2006年に、AlN結晶の貫通転位密度を従来よりも約1/100に低減する事に成功し、サファイア基板上に高品質なAlNテンプレートで成長できる様になった^{9,10)}。それを用いることにより、AlGaIn量子井戸の紫外発光の内部量子効率(IQE)は50%以上に向上した。また、電子ブロック層に多重量子障壁(MQB)を導入することにより、注入効率(IE)を大幅に向上させた¹¹⁾。最近ではさらに、光取り出し効率(LEE)向上に関する研究を進めており^{12,13)}、2017年に、世界最高効率のUVC-LED(波長275 nmで外部量子効率(EQE)=20.3%)を実現した¹⁴⁾。現在は、各企業間で激しい開発競争が繰り広げられ、1素子で50–100 mWのUVC-LEDが商品化されている。

我々は、長年開発してきた高効率AlGaIn深紫外LEDの技術をベースとして、深紫外LDの実現を目指した開発を行っている。Fig. 3に、我々が行っている深紫外LD開発の骨子を示す。開発に於いて、高効率発光を得るための高品質AlN結晶の開発、AlGaInへの高濃度p型ドーパの実現と高ホール注入の実現、を骨子としている。各アプローチに関して次節以降に詳しく述べる。

2. AlN結晶の低転位化と高効率発光の実現

AlGaIn深紫外LDの基板としてはAlNバルク基板が最も望ましいが、現在はまだ極めて高価(2インチ基板で100万円以上)であるため、それを用いてLD開発を行う事は難しい。本研究では、サファイア基板上AlN結晶の高品質化を行い、それを用いて紫外LDの開発を行っている。我々は、「アンモニアパルス供給多段成長法」⁹⁾を用いて、サファイア基板上AlNの刃状転位密度を $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 以下に低減し、AlGaIn深紫外発光において50%以上のIQEを

Fig. 3 Development overview of deep-UV LD in our project.

実現した¹⁰⁾。最近はこの方法に加え、高温アニールによるAlNの再結晶化^{15,16)}を取り入れ、AlNの転位密度をさらに低減し、UVC発光のさらなる高効率化を進めている。

IQEの見積もりに関しては、低温(4K)と室温におけるフォトルミネッセンス(PL)の励起強度依存性を詳細に調べることで信頼性の高い値を得ている。Fig. 4に、270 nmで発光するAlGaIn量子井戸の、各励起パワー密度における室温PLスペクトル(a)、及び4Kと室温におけるバンド端PL強度の励起パワー密度依存性(b)、を示す。Fig. 5(a)に、4Kと室温における発光効率の励起パワー密度依存性、Fig. 5(b)に、貫通低位密度とIQEの関係^{17,18)}を示す。Fig. 5(a)から、低温(4K)で比較的弱励起の場合に発光効率は高く、非発光遷移が小さく発光遷移が支配的であることが分かる。また、室温では比較的強励起密度の場合に高い効率を得られることが分かる。本研究では低温(4K)弱励起密度の発光効率をほぼ100%と仮定して、室温におけるIQEを算出している¹⁹⁾。Fig. 5(a)から、室温におけるIQEの最高値は51%と見積もられた。Fig. 5(b)から、このIQEは貫通転位密度が約 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ に対応する値である。本研究で作製しているAlNテンプレートの貫通転位密度は、 $2 \times 10^8 \sim 1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ の領域であるため、IQEの最高値として70%程度の実現が可能であると考えられる。

Fig. 6に、高温アニール再結晶化処理を行った場合と

Fig. 4 (a) Photoluminescence (PL) spectra under various excitation power densities and (b) PL intensities measured at 4 K and 300 K as a function of excitation power density for 270 nm emission AlGaIn quantum well (QW) fabricated on AlN template on sapphire substrate.

Fig. 5 (a) Internal quantum efficiency (IQE) as a function of excitation power density for 270 nm emission AlGaIn QW measured at 4 K and 300 K and (b) relationship between IQE and threading dislocation density (TDD).^{17, 18)}

Fig. 6 (a) Layer structures of AlN templates with and without high-temperature annealing treatment layer, and (b) EQE characteristics of 275 nm UVC-LEDs fabricated on each template.

行なわなかった場合のAlNテンプレートの構造、及び、それらの上に作製したUVC-LEDの外部量子効率の特性を示す。通常のAlNテンプレートでは「アンモニアパルス多段成長法」⁹⁾を用い、膜厚4 μm のAlNを成膜した。もう一方は、はじめに膜厚0.3 μm のAlNを成膜した後、1700°Cで1時間アニールして再結晶化を行った後、さらに2 μm のAlNを成膜してバッファーとした。両者の上に、波長275 nmで発光するUVC-LEDを同時に作製し動作させた。その結果、効率は両者でほぼ同等であった (Fig. 6)。両者の貫通転位密度はおおよそ $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ と推測される。高温アニール処理層を導入した場合、約半分のAlN膜厚で同じ貫通転位密度を実現しており、再結晶層を導入した方が転位の低減効果がより高いことが実証された。

LDの素子寿命は貫通低位の影響で著しく低減するため、レーザーストライプ上に貫通転位が皆無である構造

が望ましい。本研究では、ストライプ加工基板上にAlN埋め込み再成長(Epitaxial lateral overgrowth: ELO)を行い、ライン上に貫通転位密度の少ない領域を形成し、その上にレーザー共振器を形成する事で、長寿命LDの実現を目指している。Fig. 7に、ELO成長AlNテンプレートの作製工程の写真、ならびに転位密度の評価結果を示す。サファイア/AlN成長層に周期6 μm のストライプ加工を行い、その上にAlNを約15 μm 再成長してストライプを融合させ、平坦なAlNテンプレートとした。その後、貫通転位密度の評価を行うために、高温のKOHでエッチングレピットを形成した。Fig. 7の断面写真から、ストライプはAlNの再成長で平坦に埋め込まれ、また、表面写真から、大面積にわたって異常成長など欠陥の無い表面が得られていることが分かる。KOHエッチング後の表面から、貫通転位密度の高い領域と、ほとんど無い領域がストライプ状に周期的に繰り返されていることが分かる。今後、LD共振器を転位の無い部分に形成する事で、深紫外LDの実現を目指す予定である。

3. AlGaIn深紫外LDの試作

Fig. 8に、試作したAlGaIn深紫外LD構造の、エビ層構造(a)、素子の鳥瞰図(b)、及び、表面からの光学顕微鏡写真(c)を示す。LD構造は、サファイア基板上に成膜したAlNテンプレート層、n-AlGaInバッファ層、n-AlGaIn光閉じ込め層、AlGaIn多重量子井戸(MQW)活性層、p-AlGaIn多重量子障壁(MQB)電子ブロック層、p-AlGaIn光閉じ込め層、p-AlGaInクラッド層から構成さ

Fig. 7 Left-side; (a) cross-sectional scanning electron microscopy (SEM) images after fabricating AlN stripe on sapphire substrate and (b) after epitaxial lateral overgrowth (ELO) of AlN, and (c) optical microscope image of ELO-AlN surface. Right-side; (d) surface SEM image after KOH etching of ELO-AlN and (e) schematic image of threading dislocations (TDs) in ELO-AlN.

Fig. 8 (a) Schematic layer structure, (b) schematic bird's view image and (c) surface optical microscope image of fabricated AlGaIn UVC-LD. Schematic layer structure of UVC-LED is also shown in Fig. 8 (a) as a reference.

れている。高効率UVC-LED構造を同図にリファレンスとして示す。LD構造は、電子ブロック層までの層は、既に実績のある高効率UVC-LEDと同一の構造とし、その上にp-AlGaIn光閉じ込め層を40 nm、およびp-AlGaInクラッド層を220 nm成膜した構造とした。MOCVDによるエビ構造形成後、共振幅18 μmのリッジ構造をドライエッチングにより形成し、SiO₂パッシベーション膜を成膜、コンタクト用の窓明けを施した後、Ni/Au-p型電極とTi/Au-n型電極を真空蒸着法により形成した。

サファイア基板とその上に成膜した窒化物結晶の面方位は30度ずれているため、サファイア基板上的LDは劈開による共振器ミラーの形成が出来ないことはよく知られている。本研究では、UVC-LDウェファァを厚さ150 μmまで研削し、その後、レーザーステルスダイシングを用いて切断し共振器ミラーを形成した。共振器長は0.7~

1.5 mmとした。ステルスダイシングを用いることにより、レーザ発振に必要な共振器ミラーの平坦性を確保した。Fig. 9に、ステルスダイシングによるサファイア基板の切断面、及び、共振器端面付近の拡大写真を示す。厚さ150 μmの中程にレーザをフォーカスした傷の列が観測できる。また、共振器端面はSEMで見た限りでは平坦である。

作製したAlGaIn-LD構造に電流注入を行った。Fig. 10に電流注入発光の様子を示す。サンプルは、共振器長1.2 mmにステルスダイシングを行った後に、レーザモードの状態ですファイア基板上に載せ、電極に通電した。発光波長277 nmにおいて、シングルピーク発光が得られた。Fig. 10の写真から、サンプルはレーザ発振はしておらず、LEDモード(自然放出光)で発光している。

LED測定の時と同様の方法を用い、自然放出発光を基板の裏面から観測することにより外部量子効率の測定を行った¹²⁾。Fig. 11に、電流密度-外部量子効率(J-EQE)特性を示す。リファレンスとしてUVC-LEDのJ-EQE特性も同時に示した。LEDでは最高EQEとして4.7%が得られた。この値は、光取り出し効率を考慮したUVC-LEDの効率としては、トップレベルの高い値である¹²⁾。LD構造に関しては、最高のEQEとして4.2%が得られ、LEDの場合とほとんど遜色ない値が得られた。LD構造では、LED構造に加えて高抵抗のp型クラッド層を挿入しているので、注入効率は低下するはずであるが、電流密度が0.1 kA/cm²以下の低注入領域では高い値が維持されている。実際の深紫外LD発振では5 kA/cm²以上の高い閾値電流密度が予測されるため、さらに高い注入電流密度で高効率動作を維持することが要求される。今後は、p型クラッド層の高ホール濃度化を行、高い注入電流下で高効率動作を目指す。

Fig. 9 Cross-sectional SEM images of (a) sapphire substrate and (b) edge of laser cavity of AlGaIn LD structure after fabricating cavity mirror by using laser stealth dicing method.

Fig. 10 Digital camera photos of AlGaIn deep-UV LD sample under current injection operation taken under a light (a) and in the dark (b).

Fig. 11 Current density-external quantum efficiency (J-EQE) characteristics of AlGaIn LD and LED measured at room temperature. Operation spectra are also shown in inset.

4. 高濃度p型・高注入への取り組み

AlGaIn紫外LDの短波長化は、p型AlGaIn層のホール濃度で制限されている。Mgアクセプターの活性化エネルギーは、GaInで240 meV、AlInで590 meVであることから、短波長化のためにAl組成を増やすと、ホール濃度が著しく低減する事が要因である。p型AlGaInのホール濃度向上に関する研究は、超格子の導入、コドーピング、分極ドーピング効果、高濃度ドーピングによる縮退効果など、幅

広く行われており、高濃度化の報告もいくつか存在する。しかし、深紫外LD実現への有効な結果はまだ報告されていない。

紫外発光デバイスのp-AlGaInに超格子を用いることで、横方向ばかりで無く縦方向のホール伝導が改善することは以前から報告されている^{20,21)}。本研究では深紫外LDのp型クラッド層に超格子を導入し高電流注入を試みた。

Fig. 12に、超格子p-AlGaInクラッド層を用いたUVC-LDのエピ構造、及びLED発光の電流密度-EQE(J-EQE)特性を示す。LDのp型クラッド層として、単位周期が2 nm/4 nmからなるMgドーピングp-AlGaIn/AlGaIn超格子を用いた。超格子の周期数を10、20及び50と変化させ、トータルのp型クラッド膜厚が60、120、300 nmの3種類のサンプルを作製した。p-AlGaInクラッド層が最も薄い10周期(60 nm)のサンプルで最高EQE2.8%が得られた。発光波長は275 nm付近であった。クラッド層を20周期(120 nm)及び50周期(300 nm)と厚くしたサンプルでも大幅な注入効率の低下は見られず、超格子が50周期のサンプルで0.8 kA/cm²程度まで電流注入を行う事が出来た。UVC-LDで必要とされるクラッド層厚は300-500 nmであるため、クラッド層を含むLD構造で、ある程度の高い電流注入が可能であることが分かった。今後は、超格子構造の最適化、UVBへの波長シフトにより、高密度電流注入とドレープの改善を目指す。

UVC-LD(波長<280 nm)の実現では、光閉じ込めを行うために、クラッド層にAl組成が70%程度の高Al組成p-AlGaInが用いられる。それに対し、320 nmのUVB-LD

Fig. 12 (a) Schematic epi-layer structure and (b) J-EQE characteristics of the emission of UVC-LD structure with superlattice (SL) p-cladding layer.

ではクラッドのAl組成は50%程度で動作が可能である。Al組成を低減する事で高いホール濃度が得られ、ホール注入に取って大変有利である。本研究では、UVB-LDを実現する準備として、UVB-LEDの高効率化を行った。UVB-LEDの各AlGaIn層のAl組成は、UVCよりも低い。Al組成がより低いAlGaInバッファ層をAlN上に形成する場合、新たな転位の発生や格子歪みの影響が大きくなるため、高品質バッファ層の形成はより難しくなる。そのため、UVB-LEDの効率はUVC-LEDの効率より低いのが現状である。本研究では、n-AlGaInバッファ層に多段構造や超格子歪み緩和層を用いることで、UVB-LEDの高効率化を行った。

Fig. 13に、作製したUVB-LED(波長304 nm)の電流-光出力(I - L)、及び、電流-外部量子効率(I -EQE)特性を示す。室温連続動作で、最高EQE6.2%、最高出力22 mWが得られ、UVB-LEDの文献値としては最高の効率が得られた。今後、この構造をUVB-LDに適用し、高電流注入の実現とレーザー発振動作を目指す予定である。

5. 光ポンプによる低閾値誘導放出発光の観測

本研究では、深紫外LDの電流注入発振と並行して、光ポンプ発振の実現を試みている。今回、比較的低い閾値励起パワー密度で誘導放出発光を観測した。

Fig. 14に、光ポンプ誘導放出の観測に用いたAlGaIn量子井戸サンプルの層構造、屈折率分布、および光閉じ込めフィールド分布のシミュレーション結果を示す。サンプルは、Fig. 8(a)に示したUVC-LD構造において、量子井戸までで成膜を終了しp側層が無い構造を用いた。今

Fig. 13 (a) Current-output power (I - L) and (b) I -EQE characteristics of AlGaIn UVB-LED with emission wavelength of 304 nm measured under room temperature cw operation.

回は試験的なサンプルで、Fig. 14に示したように量子井戸の位置とフィールド分布のピークは一致させておらず、光閉じ込め係数は1.3%程度と低い値となった。本来、光ポンプ用のサンプルは、上側の光閉じ込め層まで設けた構造が望ましく、光閉じ込めのピークと量子井戸の位置を一致させる事により5%程度の光閉じ込め係数が得られる。前述の様にステルスダイシングによりレーザーミラーを形成し、共振器長は1.2 mmとした。励起用レーザーとして、エキシマレーザー励起色素レーザーの第2高調波(波長260 nm)を用いた。シリンドリカルレンズを用いてライン状にレーザー光を照射して励起し、ミラー端面から発光スペクトルを観測した。

Fig. 15に、低温(10 K)および室温(295 K)におけるAlGaIn UVC量子井戸レーザー構造の光励起発光スペクトル、及び、発光積分強度の励起パワー密度依存性を示す。10 K~室温において、いずれの温度においても、はじめに弱励起状態ではブロードな自然放出発光が観測され、さらに励起パワー密度を上げると、自然放光よりも明らかに半値の狭い発光が観測された。先行文献に習って²²⁻²⁴⁾、発光積分強度の励起パワー密度依存性の非線形性から、これらの発光を誘導放出発光と判断した。誘導放出発光は波長277 nm付近から観測された。観測された誘導放出発光は、先行文献(文献22-24)と同様の傾向を示し、発光半値幅は3 nm程度と広く、共振器特有の縦モードは観測されなかった。今回得られた誘導放出発光は、自然放光のピーク波長よりも短波長側から起こっている。先行文献からは、長波側から起こる場合²²⁾も短波側から起こる場合^{23,24)}も報告されている。自然放光と誘導放出光の波長のずれは、光利得と導波路損失の波長依存性で議論できると考えられ、詳細な議論は今後の課題として行う予定である。

Fig. 16に、Fig. 15から得られた誘導放出発光の閾値励起パワー密度の測定温度依存性を示す。誘導放出発光の閾値励起パワー密度は、10 Kで12.7 kW/cm²、室温で68.6 kW/cm²であった。低温において低い閾値励起パワー密度が得られたのは、基本的には、低温では電子・ホールのエネルギー分布がシャープとなり高い光利得が

Fig. 14 Layer structure, distribution of refractive index and confinement optical field of AlGaIn quantum well (QW) UVC laser used for optical pumping measurement. (OCL: optical confinement layer).

Fig. 15 Emission spectra with various excitation power densities and integrated emission intensity as a function of excitation density of AlGaIn UVC laser measured by optical pumping under 10 K (a) and 295 K (b).

Fig. 16 Threshold excitation power density for stimulated emission in AlGaIn UVC laser as a function of temperature measured by optical pumping

得られる効果であると考えられる。また、Fig. 5(a)のIQEの励起パワー密度依存性に示されるように、AlGaIn量子井戸のIQEは10~100 kW/cm²の励起パワー密度で大幅に低下する。室温において誘導放出に必要な光利得を得るためには、発光効率が下がる分を考慮すると、より高い励起パワー密度が必要となる。従って、室温における閾値励起パワー密度の上昇は顕著となると考えられる。Fig. 16から、10~200 Kと250~300 Kの領域で閾値励起パワー密度が不連続になっている事が分かる。温度250 K付近で発光メカニズムが変化していると考えられ、今後その原因を検討していきたい。

AlGaIn UVCレーザー構造で、100 kW/cm²以下の閾値

励起パワー密度で誘導放出が得られているグループは、現在のところ、ノースカロライナ大、名城大などに限られており、我々の閾値励起パワー密度は比較的低い値が得られている。今後は、光閉じ込め係数を最適化する事で、さらに低い閾値励起パワー密度が得られると考えられる。

6. まとめ

AlGaIn深紫外LDを実現するためのアプローチとその進展状況を紹介した。サファイア基板上AINテンプレートの高品質化を行い、IQE50%以上の高効率UVC発光を観測した。また、AINテンプレートに高温アニール再結晶層を取り入れ、LEDの高効率動作を実証した。将来のLD動作を目指し、ストライプ加工基板を用いたELO-AINバッファを試作した。リッジ導波路からなるUVC-LD構造を試作し、ステルスダイシング法を用いてレーザー共振器ミラーを作製した。素子に電流注入を行い、低電流密度領域では高効率LED(自然放出)発光が得られた。高い電流密度動作を目指し、LD構造に超格子p型クラッド層を導入し、0.8 kA/cm²程度の注入電流密度を実現した。最後に、UVCレーザーの光ポンプ発振を試み、比較的低い閾値励起パワー密度で誘導放出発光を観測し、深紫外LD発振へ向けた構造の有効性を実証した。今後、p型AlGaInのホール濃度を向上させ高注入を行う事で、深紫外LDの実現が可能になると考えられる。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務により得られた結果である。

参考文献

- 1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) L74.
- 2) S. Nagahama, T. Yanamoto, M. Sano, and T. Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L785.
- 3) S. Masui, Y. Matsuyama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1318.
- 4) M. Kneissl, D. W. Treat, M. Teepe, N. Miyashita, and N. M. Johnson: Appl. Phys. Lett. **82** (2003) 4441.
- 5) K. Iida, T. Kawashima, A. Miyazaki, H. Kasugai, S. Mishima, A. Honshio, Y. Miyake, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L499.
- 6) H. Yoshida, Y. Yamashita, M. Kuwabara, and H. Kan: Nature Photonics **2** (2008) 551.
- 7) H. Yoshida, Y. Yamashita, M. Kuwabara, and H. Kan: Appl. Phys. Lett. **93** (2008) 241106.
- 8) S. Okawara, Y. Aoki, Y. Yamashita, and H. Yoshida: The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6) Nov. 8-13 Act City, Hamamatsu (2015).
- 9) H. Hirayama, T. Yatabe, N. Noguchi, T. Ohashi, and N. Kamata: Appl. Phys. Lett. **91** (2007) 071901.
- 10) H. Hirayama, N. Noguchi, S. Fujikawa, J. Norimatsu, T. Takano, K. Tsubaki, and N. Kamata, Physica Status Solidi (a) **206** (2009) 1176.
- 11) H. Hirayama, Y. Tsukada, T. Maeda, and N. Kamata: Appl. Phys.

- Express **3** (2010) 031002.
- 12) H. Hirayama, N. Maeda, S. Fujikawa, S. Toyota, and N. Kamata: Jap. J. Appl. Phys. (Selected Topic) **53** (2014) 100209.
 - 13) Y. Kashima, N. Maeda, E. Matsuura, M. Jo, T. Iwai, T. Morita, M. Kokubo, T. Tashiro, R. Kamimura, Y. Osada, H. Takagi, and H. Hirayama: Appl. Phys. Express **11** (2018) 012101.
 - 14) T. Takano, T. Mino, J. Sakai, N. Noguchi, K. Tsubaki, and H. Hirayama: Appl. Phys. Express **10** (2017) 031002.
 - 15) H. Miyake, C. H. Lin, K. Tokoro, and K. Hiramatsu: J. Cryst. Growth **456** (2016) 155.
 - 16) H. Miyake, G. Nishio, S. Suzuki, K. Hiramatsu, H. Fukuyama, J. Kaur, and N. Kuwano: Appl. Phys. Express **9** (2016) 025501.
 - 17) M. Shatalov, W. Sun, Y. Bilenko, A. Sattu, X. Hu, J. Deng, J. Yang, M. Shur, C. Moe, M. Wraback, and R. Gaska: Appl. Phys. Express **3** (2010) 062101.
 - 18) K. Ban, J. Yamamoto, K. Takeda, K. Ide, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, I. Akasaki, and H. Amano: Appl. Phys. Express **4** (2011) 052101.
 - 19) T. Kohno, Y. Sudo, M. Yamauchi, K. Mitsui, H. Kudo, H. Okagawa, and Y. Yamada *et al*: Jpn. J. Appl. Phys. **51** (2012) 072102.
 - 20) P. Kozodoy, M. Hansen, S. P. DenBaars, and U. K. Mishra: Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 3681.
 - 21) A. Kinoshita, H. Hirayama, M. Ainoya, A. Hirata and Y. Aoyagi: Appl. Phys. Lett. **77** (2000) 175.
 - 22) W. Guo, Z. Bryan, J. Xie, R. Kirste, S. Mita, I. Bryan, L. Hussey, M. Bobea, B. Haidet, M. Gerhael, R. Collazo, and Z. Sitar: J. Appl. Phys. **115** (2014) 103108.
 - 23) J. Mickevicius, J. Jurkevicius, G. Tamulaitis, M. S. Shur, M. Shatalov, J. Yang, and R. Gaska: Opti. Express **22** (2014) A491.
 - 24) V. N. Jmerik, A. M. Mizerov, A. A. Sitnikova, P. S. Kopev, S. V. Ivanov, E. V. Lutsenko, N. P. Tarasuk, N. V. Rzhetskii, and G. P. Yablonskii: Appl. Phys. Lett. **96** (2010) 141112.