

平成 22 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (A)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19206036  
 研究課題名 (和文) 新規半極性結晶面上での窒化物半導体緑色レーザの開発  
 研究課題名 (英文) Development of nitride-semiconductor based green laser diodes on a novel semipolar plane

研究代表者  
 船戸 充 (FUNATO MITSURU)  
 京都大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：70240827

研究成果の概要 (和文)：新しい結晶面である半極性(11-22)面上に、InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 量子井戸をベースとするレーザ構造を作製することを目標とし、その結晶成長、光物性評価を行った。結晶成長条件の探索により、レーザ構造に必要な各層の作製条件を確立した。また、光学異方性としては、量子井戸の構造に依存せず TE 偏光しており、面内の偏光方向は、In 組成が小さいとき [1-100]、30%を超えて大きくなる時 [-1-123] 方向であることを初めて見出した。

研究成果の概要 (英文)：Aiming to fabricate laser diodes based on InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> quantum wells (QWs) on a novel semipolar (11-22) plane, crystal growth and optical characterization were performed. Growth conditions for each constituent layer have been established. As for optical anisotropy, the polarization was the TE polarization, independent of QW structures. It has been found for the first time that, when the In composition is less than 30%, the in-plane polarization was in the [1-100] direction, whereas, In compositions greater than 30% cause polarization switching to the [-1-123] direction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	15,200,000	4,560,000	19,760,000
2008 年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2009 年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
総計	35,900,000	10,770,000	46,670,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学／電子・電気材料工学

キーワード：薄膜・量子構造・窒化物半導体・緑色レーザ・半極性結晶面・発光効率・偏光

## 1. 研究開始当初の背景

半導体レーザダイオード(LD)は小型、高出力という特長を持っている。赤外では AlGaAs 系、赤色では AlGaInP 系、青色では InGa<sub>N</sub> 系の材料によって既に実用化が達成され、それぞれ CD, DVD, Blu-ray などに利用されている。さらに、小型である特長を活かし、大型

の気体、固体レーザの置き換えが進みつつある。このような中、緑色領域(波長 480～520 nm)はしばしば「グリーンギャップ」と呼ばれ、半導体発光素子の発光効率が、他の波長領域に比べて著しく低い領域として知られている。この領域で半導体 LD が実現すれば、レーザディスプレイ、医療応用、Ar<sup>+</sup>レーザの置き換えなど多くの分野への波及効果が期

待される。InGaNでは、In組成を変えることにより、発光波長を決定する禁制帯幅を、GaNの3.4 eV (365 nm)からInNの0.7 eV (1770 nm)に至るまで広い範囲にわたって制御すること可能であり、また、紫外から青色域においては、LDやあるいは発光ダイオード(LED)が実用されていることもあわせ、グリーンギャップをカバーする材料系として最も有力である。しかしながら研究開始当初、このInGaNを用いても緑色領域でのLDの実用化には至っていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、LDとしては未踏の波長領域である緑色領域において、(Al)InGaN系窒化物半導体をベースとしたLDの開発を目指した。従来の窒化物半導体光デバイスは(0001)極性面上に作製されており、格子歪に起因したピエゾ分極による発光効率の低下が問題であった。これに対して、申請者らが提唱している新しい結晶面方位、(11-22)半極性面を用いれば、この問題を回避できる可能性が高い。しかし、この研究分野は、まだ新しい分野であり、結晶成長メカニズムの検討、光物性の評価およびその解析、構造の解析など基礎的な研究から、LDの開発まで幅広い領域での課題が残されている。半極性面は、理論的には、ほぼ100%の内部量子効率を実現できる面であるが、実際には、それにはまだまだ及んでいない。結晶成長に問題があるために非輻射再結合確率が(0001)面に比べて高く、ピエゾ分極効果の低減による輻射再結合確率の増大が相殺されていることが原因であろう。また、光物性およびデバイスの光学特性の観点からは、非極性面の持つ結晶の非対称性に基づく偏光特性が興味深く、バンド構造の理解が重要である。以上のように、発光効率および偏光特性を軸に結晶成長、光物性評価、構造評価など基礎研究を行い、その成果をLDの開発につなげるのが本研究の流れである。

## 3. 研究の方法

結晶成長には、現有の有機金属気相成長(MOVPE)装置を用いた。基板には、ハイドライド気相成長法で作製されたGaN厚膜から切り出した(11-22)GaN基板を利用した。この基板のX線回折半値幅は、(11-22)面で27秒であり、他のいくつかの面での測定結果とあわせ、刃状転位密度は $3.0 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 、らせん転位密度は $2.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ と見積もられている。これらの値は、サファイア上のGaNエピタキシャル層の典型値よりも3から4桁小さく、低転位デバイスの実現が期待できる。

作製したサンプルの評価は、構造的には、X線回折、透過型電子顕微鏡(TEM)、原子間力

顕微鏡などを用いた。光学的には、フォトルミネッセンスを基本とし、場合によって顕微系や近接場光学系を利用した。得られた物性を理論的にも検討を加えるため、 $k \cdot p$ 理論によるバンド構造の計算も行った。

デバイス形成に関しては、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチング(RIE)による加工を検討した。

## 4. 研究成果

(1) 緑色領域でのLDは、InGaN/GaN量子井戸(QW)活性層、InGaNガイド層、AlGaNクラッド層からなる。まずは、これら各層の結晶成長条件を検討した。

(11-22)GaN基板上のInGaNの成長条件を確立するために、InGaN単一厚膜層の成長条件を探り、その光学的特性を評価した。その結果、{11-22}面では、(0001)と比べて同程度のIn含有量が見込まれることがわかった。これはm無極性面でInが取り込まれにくいことが報告されていることと好対照をなし、半極性面が高In組成を必要とする緑～長波長領域において有望であることを示している。

また、ガイド、クラッド層となるInGaNおよびAlGaN層の成長条件を確立した。その過程において、結晶成長装置固有の問題により、p型伝導型制御が困難であることが判明したため、装置構成に改良を加え、p型伝導型の制御を達成した。さらに、Alを含んだAlGaNクラッド層でも伝導型制御を達成することが必要であり、成長条件の最適化によりそれを達成した。

(2) 半極性(11-22)InGaN/GaN量子井戸を作製し、その光物性評価を行った。

従来、GaN基板上に作製した(11-22)InGaN/GaN量子井戸(QW)の内部量子効率は、結晶再成長法により作製したマイクロファセットQWより劣っていた。成長条件を検討し、青色領域で、ほぼ同程度(約30%)の内部量子効率を達成した。

無極性面・半極性面は(0001)極性面と比較して結晶の対称性が低く、光学異方性という特徴を本来的に持っている。無歪InGaNの価電子帯トップに関する光学遷移は[0001]軸に垂直に偏光している。歪を含んだInGaN量子井戸発光層においても、従来の報告では、すべてTE偏光でかつ[0001]軸垂直偏光であるとされていた。この偏光特性の波及効果として、例えばm面上のLDの場合、光共振器のミラーは必然的に(0001)面で作製しなければならないことになる。 $k \cdot p$ 摂動法による理論計算でも、比較的信頼性の高い物性値を用いる限り、In組成に関らず[0001]軸垂直偏光することが知られていた。これに対して

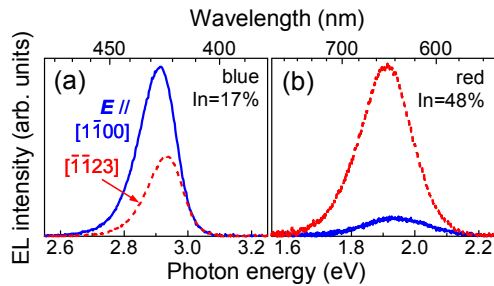


図 1 : (11-22)面上 InGaN/GaN 青色および赤色 LED の室温における偏光 EL 特性

本研究では、広範囲な In 組成についての包括的な実験研究を実施し、TE 偏光ではあるが、面内の偏光方向が必ずしも従来の予想通りにはならないことを見出した。図 1 に一例として、室温における LED の面内偏光エレクトロルミネッセンス (EL) スペクトルの In 組成依存性を示す。In 組成が 17% の青色 LED の場合は、 $E//[1-100]$  で強度最大、 $E//[-1-123]$  で強度最小になった。(E は発光の電界ベクトル。) これは、従来の報告どおり [0001] 垂直方向に強く偏光していることを示している。ところが、In 組成を増加し、発光色を青緑色より長波長とすると、図 1 に示したように支配的な偏光方向が 90 度回転し、 $[-1-123]$  方向となった。

さまざまな井戸幅、In 組成を持った InGaN 量子井戸について、(11-22) 面内の光学異方性を調べた結果を図 2 にまとめた。In 組成約 30% を境として、それ以下では  $[1-100]$  偏光が、それ以上では  $[-1-123]$  偏光が優勢となる。半極性面に関するこれまでの報告は、In 組成約 30% 以下に相当している。In 組成が 30% 以上に大きくなったときの  $[-1-123]$  偏光方向の場合、LD 共振器を m 面の劈開で形成できることが特長の一つである。In 組成 30%、InGaN 膜厚 3 nm としたときの発光波長は約 500 nm であるから、青緑色より長波長の LD において、このデバイスの配置が許される。

偏光スイッチの直接の原因として、価電子バンド(電子エネルギーの高いほうから順に A, B, C とする)の並びが、In 組成 30% において入れ替わることであったと考えた。In 組成が 30% 以下のとき、A バンドは、 $[1-100]$  方向に偏った P 軌道によって構成されており、一方、B バンドは、それと直交した  $[-1-123]$  方向に偏った P 軌道によって構成されている。その結果、遷移エネルギーの小さな A バンドに関連した発光は  $[1-100]$  偏光し、かつ  $[-1-123]$  偏光した B バンド関連の発光よりも低エネルギー側に存在することになる。なお、各バンドが直線偏光することは別の実験で確かめた。In 組成が増加すると、これら A, B バンドが近付いて In 組成 30% 程度で交錯するため、30% 以上では A バンドが  $[-1-123]$  成分で、B バンドが  $[1-100]$  成分で構成されるよ

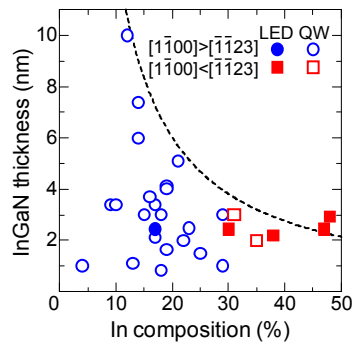


図 2 : (11-22) InGaN/GaN 量子井戸構造における偏光特性のまとめ

うスイッチが起こる。

このような価電子帯のシフトをもたらす要因としては、「歪」と「量子閉じ込め効果」の可能性はある。実験的には、量子閉じ込めは偏光スイッチに関してほとんど影響を持っておらず、歪が主因であると解釈している。その解釈に基づき、これまで不確定であった InN の変形ポテンシャルを予想した。ただし、偏光スイッチ現象は、量子閉じ込めと歪みの競合によって決定され、(11-22) 面では、量子閉じ込めが決定的な要因であるとの理論予測もなされており、今後の更なる議論が必要である。

一方、InGaN 系特有のポテンシャル揺らぎに基づいた局在発光中心に関連して、近接場光学顕微鏡によって低温におけるフォトルミネッセンス (PL) 特性のマッピングを行った。従来の (0001) とは様子が大きく異なり、分解能 30nm でも発光スペクトルはブロードであり、一方で、強度マッピングは均一であることがわかった。これは、ポテンシャル揺らぎが 30nm 以下のナノメータスケールで生じていることを示している。一因として、キャリアの再結合確率が (11-22) 面の場合、(0001) よりも桁違いに高いために、キャリアが拡散しにくいことが考えられ、この面特有の現象であると考えられる。

(3) 半極性 (11-22) GaN 基板上に InGaN/GaN 量子レーザ構造を作製し、光励起誘導放出を試みた。

まず、利得計算を行い、量子井戸活性層の構造 (特に量子井戸膜厚) の設計指針を得た。それを基にレーザ構造を作製した。Nd:YAG レーザの第 3 高調波で励起した OPO (375 nm) で InGaN 層を選択励起した。シリンダリカルレンズで矩形に整形したレーザを試料に照射し、励起された領域を通ってきた増幅された自然放出 (ASE) を試料端面から測定した。測定はすべて室温で行った。

図 3 は、In 組成約 28%、井戸幅 2 nm の LD 構造について、端面から観察した TE モードの (a) ASE スペクトルおよび (b) 発光強度の

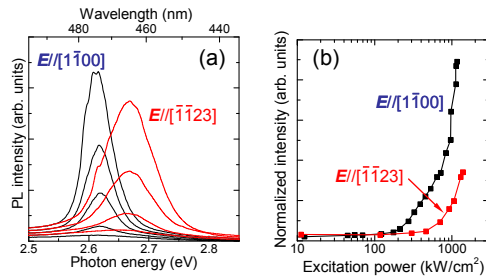


図 3: (a) [1-100]および[-1-123]方向に沿った ASE スペクトル. (b) 発光強度の励起光強度依存性.

励起密度依存性である. 観察方向を[-1-123]あるいは[1-100]とし, それぞれ  $E//[1-100]$  および  $E//[-1-123]$  偏光成分を分解した. この試料では, [1-100] 偏光スペクトルが[-1-123] 偏光スペクトルの低エネルギー側に存在し, さらに[1-100] 偏光の方が低い閾値を持っていた. これらの特性は, この LD 構造においては, A バンドに関連した発光が[1-100] 偏光し, かつ遷移エネルギーの小さい A バンドの方が B バンドよりも先に反転分布に至る, と考えれば理解することができる.

この優先的な偏光方向に関して, 従来の(0001) 極性面上レーザ構造と特性を比較した. 光励起密度が小さい場合は, どちらのサンプルでも線幅の広い自然放出光のみが観察されるが, 励起密度を上げると狭線化を伴った誘導放出が観察された. (0001) 面上 LD では, 自然放出光と誘導放出光の間に大きなブルーシフトが存在するのに対して, (11-22) 半極性面上 LD では, それがほとんど見えないことが大きな特徴である. (11-22) 面では, 分極効果が抑制されているためである. また, (11-22) 面上 LD 構造の閾励起密度は, 405 nm 発光で  $175 \text{ kW/cm}^2$ , その他の発光波長で約  $200 \text{ kW/cm}^2$  であった. これらの値は, (0001) 面上 LD と同等かむしろ低い値であり, (11-22) 面の LD 用結晶面としての優れたポテンシャルを持っていることがわかった.

(4) LD で用いる電流狭窄構造の作製や共振器ミラーの平行平坦化を目指して, 誘導結合プラズマを利用した反応性イオンエッチング装置により (ICP-RIE), エッチングの条件を検討した. 加工そのものは問題なくできるような条件を見出したが, 加工側面の平坦性や垂直性についてはまだ課題が残っており, それが, 電流注入によるレーザ発振を妨げる一因となっている. 今後, 更なる条件の最適化が必要である.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 17 件)

① 船戸充, 上田雅也, 小島一信, 川上養二, 半極性(11-22)面上 InGa<sub>N</sub> 量子井戸の光学特性と緑色レーザー実現の可能性, レーザー研究, **38**, pp.255-260 (2010). 査読有

② M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, Y. Enya, K. Nishizuka, M. Ueno and T. Nakamura, Weak carrier/exciton localization in InGa<sub>N</sub> quantum wells for green laser diodes fabricated on semi-polar {20-21} GaN substrates, Appl. Phys. Express, **3**, pp.021002/1-3 (2010). 査読有

③ Y. Kawakami, A. Kaneta, L. Su, Y. Zhu, K. Okamoto, M. Funato, A. Kikuchi and K. Kishino, Optical properties of InGa<sub>N</sub>/GaN nanopillars fabricated by postgrowth chemically assisted ion beam etching, J. Appl. Phys. **107**, pp.023522/1-7 (2010). 査読有

④ K. Kojima, H. Kamon, M. Funato and Y. Kawakami, Optical anisotropy control of non-*c*-plane InGa<sub>N</sub> quantum wells, Jpn. J. Appl. Phys. **48**, pp. 080201/1-3 (2009). 査読有

⑤ R. G. Banal, M. Funato and Y. Kawakami, Growth characteristics of AlN on sapphire substrates by modified migration-enhanced epitaxy, J. Crystal Growth, **311**, pp.2834-2836 (2009). 査読有

⑥ R. Bardoux, A. Kaneta, M. Funato, Y. Kawakami, A. Kikuchi and K. Kishino, Positive binding energy of a biexciton confined in a localization center formed in a single In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN quantum disk, Phys. Rev. B, **79**, pp.155307/1-6 (2009). 査読有

⑦ M. Funato, K. Hayashi, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Emission color tunable light-emitting diodes composed of InGa<sub>N</sub> multifacet quantum wells, Appl. Phys. Lett. **93**, pp.021126/1-3 (2008). 査読有

⑧ M. Funato, T. Kondou, K. Hayashi, S. Nishiura, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Monolithic polychromatic light-emitting diodes based on InGa<sub>N</sub> microfacet quantum wells toward tailor-made solid-state lighting, Appl. Phys. Express, **1**, pp.011106/1-3 (2008). 査読有

⑨ M. Ueda, M. Funato, K. Kojima, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Polarization switching phenomena in semipolar  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  quantum well active layers, Phys. Rev. B, **78**, pp.233303/1-4 (2008). 査読有

⑩ M. Funato and Y. Kawakami, Excitonic properties of polar, semipolar, and nonpolar  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  strained quantum wells with potential fluctuations, J. Appl. Phys. **103**, pp.093501/1-7 (2008). 査読有

⑪ K. Kojima, M. funato, Y. Kawakami, S. Masui, S. Nagahama and T. Mukai, Stimulated emission at 474 nm from an  $\text{InGaN}$  laser diode structure grown on a (11-22)  $\text{GaN}$  substrate, Appl. Phys. Lett. **91**, pp. 251107/1-3 (2007). 査読有

⑫ K. Kojima, U. T. Schwarz, M. Funato, Y. Kawakami, S. Nagahama and T. Mukai, Optical gain spectra for near UV to aquamarine (Al,In)  $\text{GaN}$  laser diodes, Optics Express, **15**, pp.7730-7736 (2007). 査読有

⑬ Y. Kawakami, K. Nishizuka, D. Yamada, A. Kaneta, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, Efficient green emission from (11-22)  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  quantum wells on  $\text{GaN}$  microfacets probed by scanning near field optical microscopy, Appl. Phys. Lett. **90**, pp. 261912/1-3 (2007). 査読有

⑭ K. Kojima, M. funato, Y. Kawakami, H. Braun, U. T. Schwarz, S. Nagahama and T. Mukai, Comparison between optical gain spectra of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$  laser diodes emitting at 404 nm and 470 nm, Phys. Stat. Sol. A, **204**, pp.2108-2111 (2007). 査読有

⑮ K. Kojima, M. Ueda, M. Funato, and Y. Kawakami, Photoluminescence and optical reflectance investigation of semipolar and nonpolar  $\text{GaN}$ , Phys. Stat. Sol. B, **224**, pp.1853-1856 (2007). 査読有

⑯ M. Ueda, K. Hayashi, T. Kondou, M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Mechanisms of metalorganic vapor phase epitaxy of  $\text{InGaN}$  quantum wells on  $\text{GaN}$  microfacet structures, Phys. Stat. Sol. C, **4**, pp.2826-2829 (2007). 査読有

⑰ M. Ueda, T. Kondou, K. Hayashi, M.

Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Additive color mixture of emission from  $\text{InGaN}/\text{GaN}$  quantum wells on structure-controlled  $\text{GaN}$  microfacets, Appl. Phys. Lett. **90**, pp.171907/1-3 (2007). 査読有

[学会発表] (計 46件)

① 石井良太, 金田昭男, 船戸 充, 川上養一,  $\text{GaN}$  における quasi-cubic 近似の破綻と新たに予見される無極性面および半極性面  $\text{GaN}/\text{AlGaIn}$  量子井戸構造の特異な光学異方性, 第 57 回応用物理学会関係連合講演会, 2010. 3. 18, 神奈川.

② M. Funato and Y. Kawakami, Semipolar III-nitride semiconductors for visible light emitters, 27th Physics Congress, Samahang Pisika ng Pilipinas, 28 Dec 2009, Tagaytay, Philippine (plenary).

③ Y. Kawakami, M. Ueda, A. Kaneta and M. Funato, Semipolar (11-22)-oriented  $\text{InGaIn}/\text{GaN}$  LEDs and their optical properties, The 2nd Intern. Conf. on White LEDs and Solid State Lighting, 16 Dec 2009, Taipei, Taiwan (invited).

④ M. Funato and Y. Kawakami, Semipolar (11-22)-oriented  $\text{InGaIn}/\text{GaN}$  quantum wells, Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 3 Nov 2009, Shanghai, China (invited).

⑤ M. Funato and Y. Kawakami, Polarization anisotropy in semipolar/polar nitride semiconductor quantum wells, 8th Intern. Conf. on Nitride Semiconductors, 23 Oct 2009, Jeju, Korea (invited).

⑥ 川上養一, 船戸 充, Al リッチ  $\text{AlGaIn}$  系量子井戸の光物性-InGaIn 系量子井戸と比較して-, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 9, 富山 (Invited).

⑦ 船戸 充, 川上養一, 交互供給法による  $\text{AlN}$  および  $\text{AlGaIn}$  量子井戸の作製と評価, 第 70 回応用物理学会学術講演会, 2009. 9. 9, 富山 (Invited).

⑧ Y. Kawakami, A. Kaneta, M. Ueda and M. Funato, Characterization and control of recombination process in nitride semiconductors, E-MRS Spring meeting 2009, 11 Jun 2009, Strasbourg, France (Invited).

⑨ M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa

and T. Mukai, Multi-color light-emitting diodes based on GaN micro-structures, SPIE Photonic West, 29 Jan 2009, San Jose, California, USA (Invited).

⑩ M. Funato and Y. Kawakami, Monolithic polychromatic InGa<sub>N</sub> light-emitting diodes based on micro-facet structures, Intern. Meeting on Information Display, Intern. Display Manufacturing, Conf. and Asia Display 2008, 16 Oct 2008, Ilsan, Korea (Invited).

⑪ M. Ueda, M. Funato, Y. Narukawa, T. Mukai and Y. Kawakami, Polarization anisotropy in semipolar InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> quantum well active layers, Intern. workshop on Nitride Semiconductors, 9 Oct 2008, Montreux, Switzerland (Invited).

⑫ 小島一信, 船戸 充, 川上養一, 柁井真吾, 長濱慎一, 向井孝志, 非極性面 InGa<sub>N</sub> 量子井戸レーザの光学特性, 第 55 回応用物理学会関係連合講演会, 2008. 3. 28, 千葉 (Invited).

⑬ Y. Kawakami, M. Ueda, M. Funato, Y. Narukawa and T. Mukai, Light emitting devices based on semipolar-oriented InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> quantum wells, The 14th Intern. Display Workshops, 7 Dec 2007, Sapporo, Japan (invited).

⑭ Y. Kawakami, A. Kaneta, K. Nishizuka, M. Ueda, K. Kojima, M. Funato, Y. Narukawa, and T. Mukai, Local Spectroscopic Investigations on Semipolar InGa<sub>N</sub>-Based Nanostructures and Their Application to LEDs, 7th Intern. Conf. on Nitride Semiconductors, 19 Sep 2007, Las Vegas, Nevada, USA (Invited).

⑮ M. Funato, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa, T. Kosugi, M. Takahashi, and T. Mukai, Blue, green, and amber InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> light-emitting diodes on semipolar {11-22} Ga<sub>N</sub> bulk substrates, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007. 9. 7, 札幌 (Invited).

⑯ 上田雅也, 船戸 充, 川上養一, 成川幸男, 向井孝志, 半極性 {11-22} Ga<sub>N</sub> バルク基板上 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 量子井戸活性層の偏光特性, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007. 9. 6, 札幌 (Invited).

⑰ 川上養一, 船戸 充, 金田昭男, 上田

雅也, 小島一信, 成川幸男, 向井孝志, 高 In 組成 InGa<sub>N</sub> の輻射・非輻射再結合過程の解明と制御, 第 68 回応用物理学会学術講演会, 2007. 9. 5, 札幌 (Invited).

⑱ M. Funato, M. Ueda, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Developments of semipolar (11-22) InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> quantum wells and light emitting diodes, The 26th Electronic Materials Symposium, 2007. 7. 6, 滋賀 (Invited).

[図書] (計 3 件)

① 船戸 充, 川上養一, 窒化物基板および格子整合基板の成長とデバイス特性, シーエムシー出版, pp.104-118 (2009).

② Y. Kawakami, A. Kaneta and M. Funato, Assessment and Modification of Recombination Dynamics in In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-Based Quantum Wells, Advances in Light Emitting Materials, Materials Science Forum, Trans Tech Publications, pp.249-274 (2008).

③ M. Funato, Y. Kawakami, Y. Narukawa and T. Mukai, Semipolar InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> quantum wells for highly functional light emitters, Nitrides with Nonpolar Surfaces: Growth, Properties, and Devices edited by Tanya Paskova, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp.385-411 (2008).

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 窒化物半導体レーザ素子

発明者: 小島一信, 川上養一, 船戸 充, 長濱慎一, 柁井真吾

権利者: 京都大学, 日垂化学工業(株)

種類: 特許権

番号: 2007-239326

出願年月日: 2007. 9. 14

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

船戸 充 (FUNATO MITSURU)

京都大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70240827

(2) 研究分担者

川上養一 (KAWAKAMI YOICHI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30214604