

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 10 日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390071

研究課題名(和文)窒化物半導体表面・界面における再結合過程の解明と素子性能向上に向けた基礎研究

研究課題名(英文)Fundamental studies on carrier recombination process at the surface and interface to improve nitride-based optoelectronic device performance

研究代表者

尾沼 猛儀 (Onuma, Takeyoshi)

工学院大学・公私立大学の部局等・准教授

研究者番号：10375420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒化物半導体光・電子素子の特性を議論する上で、欠かすことのできない表面・界面における再結合過程に注目した。AlGaIn/GaN系電子素子において、AlGaInの表面状態の制御は重要な課題である。そこで、AlO<sub>x</sub>薄膜の有無、成長条件の違いが、AlN/GaNヘテロ構造の発光特性に与える影響を調査した。2DEG関連の発光エネルギー、発光寿命の変化から、AlO<sub>x</sub>構造により表面状態のコントロールが可能であることを示した。酸化膜の調査と並行して、酸化ガリウムそのものの特性を調査した。また、Ag分散ZnO薄膜をGaInN系青色LED上へ堆積し表面プラズモンの効果を検討した。

研究成果の概要(英文)：Carrier recombination process at the surface or interface is a crucial issue when the nitride-based optoelectronic devices are put into practical use, e.g., controlling the condition of the AlGaIn surface states in the AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors. AlO<sub>x</sub>/AlN/GaN structures were prepared by the RF-MBE. Simultaneous changes in the emission energies and lifetimes were observed for the 2DEG related emission by changing in a crystallinity of the AlO<sub>x</sub> layer. The results demonstrate a possibility to control the surface states by changing in the surface oxide structure. Fundamental optical properties of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates were investigated for further improvements in the Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based devices. Electrical and optical properties of ZnO films dispersed with Ag nanocrystals and their application in the GaInN-based blue LEDs were studied through the observations of surface plasmon resonant emission and analytical simulations.

研究分野：半導体工学，半導体光物性

キーワード：窒化物半導体 酸化ガリウム 酸化インジウムガリウム ヘテロ構造 表面酸化膜 界面 時間分解フォトルミネセンス 表面プラズモン

### 1. 研究開始当初の背景

(Al, In, Ga)N 窒化物半導体は、バンドギャップエネルギー ( $E_g$ ) を 6.01 eV (AlN) から 0.65 eV (InN) まで変化させることができるため、遠紫外線から通信波長領域までの波長の発光・受光素子へ応用が期待出来る。しかし、発光効率が極めて高い波長は 400 ~ 520 nm 程度に限られており、それよりも短波長域では AlGaIn 材料の低転位化が困難なこと、それよりも長波長 (可視) 域では、低温成長に伴う InGaIn 材料の結晶性の劣化に加えてウルツ鉱構造の  $c$  軸方向に発生する分極の増大によって歪量子井戸に内部電場 ( $F_{int}$ ) が発生し、電子と正孔の波動関数が分離されて発光遷移確率が低下してしまう (量子閉じ込めシタルク効果) 点が問題とされてきた。

一般に発光素子の外部量子効率 ( $\eta_{external}$ ) は、内部量子効率 ( $\eta_{int}$ )、注入効率 ( $\eta_{inj}$ )、光取り出し効率 ( $\eta_{extract}$ ) の積により表される。結晶そのものの品質改善は必須であるが、これ以外に効率改善に向けた様々なアプローチが試みられている。例えば、(1)  $a$ ,  $m$  面などの非極性面や半極性面へ素子を作成し、 $F_{int}$  を抑制して  $\eta_{int}$  向上を試みる手法。(2) ナノコラム、ナノピラーなどナノ構造を利用する手法。ナノコラムには転位が含まれないため  $\eta_{int}$  向上が期待できる他、幾何学配置から  $\eta_{extract}$  向上も期待できる。(3) ナノホールなどのフォトニック構造による  $\eta_{extract}$  の向上、(4) 表面プラズモンによる  $\eta_{int}$  の向上等が挙げられる。(1) に関しては研究代表者自身もフォトルミネセンス (PL) 測定や時間分解フォトルミネセンス (TRPL) 測定、空間分解カソードルミネセンス測定などの光学的特性調査や結晶成長を通じて非極性面素子の長所を示してきた。自立 GaN 基板の高品位化により、非・半極性面素子の  $\eta_{external}$  は  $c$  面素子のそれに迫る勢いであるが、さらに凌駕するためには、欠陥形成過程や再結合過程の面方位依存性を考慮した上で素子設計を行う必要がある。また、(2)、(3) では、表面/体積 ( $S/V$ ) 比増加により表面再結合過程の影響が無視できない。しかし、表面状態に関しては、理論的研究の報告はあるものの、実験的研究の報告は少なく、表面準位のエネルギー位置や密度など基本的なパラメータすら明らかになっていない。また、(4) 窒化物半導体におけるプラズモニクス研究は近年始まったばかりである。

### 2. 研究の目的

本研究では、窒化物半導体光・電子素子の特性を議論する上で、欠かすことのできない表面・界面における再結合過程に注目した。結晶成長と光学的特性評価を主な手段として用い、発光効率向上に向けた設計指針を提案することを目的とした。

### 3. 研究の方法

研究の方法、研究成果を 5 点にまとめる。  
(1) サファイア基板に MOVPE 法により成長された GaN をテンプレート基板として用い、RF-MBE 法により  $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  p-n 接合構造を製作した。一般に p 層には p-GaN が用いられるが、太陽電池への応用も踏まえ、p 層、n 層ともに 80 nm 厚の  $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  で製作した。XRD 測定から、 $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  層はわずかに緩和しているものの、面内に圧縮歪が残っていることを確認した。製作した LED に対し、光起電力 (PV)、フォトルミネセンス励起 (PLE)、PL、EL 測定を行った。PV、PLE 測定では 450 W のキセノンランプを光源として用いた。

(2) AlGaIn/GaN 系電子素子において、AlGaIn の表面状態の制御は重要な課題である。AlGaIn/GaN 界面に分極により誘起される電子は主に AlGaIn 表面から供給されていると考えられているが、素子駆動時には界面電子が表面状態に捕獲され、電流コラプスを引き起こす。これを回避しようと SiN 膜によるパッシベーションやフィールドプレートが採用されているが、最近、Miao 等のグループから第一原理計算より、AlGaIn 表面の窒素の一部を酸素で置き換えると、エレクトロンカウンティング則に従い表面状態をコントロールできる可能性があることが指摘された。そこで、 $\text{AlO}_x$  薄膜の有無、成長条件の違いが、AlN/GaN ヘテロ界面付近の発光特性に与える影響を、PL と TRPL 測定により定量化し、 $\text{AlO}_x$  薄膜による表面状態のコントロールの可否を調査した。

RF-MBE 法により  $c$  面サファイア基板に AlN バッファ層 (300 nm) を介し成長した GaN 薄膜 (1.5  $\mu\text{m}$ ) の上に、さらに AlN スペース層 (3.5 nm) を成長したものを酸化膜無しの試料とした (AlN/GaN とラベル)。続いて、試料を大気にさらすことなく同チャンバー内で  $\text{AlO}_x$  バッファ層 (1.5 nm) を形成し、基板温度 400°C または 800°C で  $\text{AlO}_x$  薄膜を成長した (それぞれ AlO400、AlO800 とラベル)。断面 TEM 観察から、400°C で成長した  $\text{AlO}_x$  薄膜は厚さ 20 nm で殆どアモルファスである一方、800°C で成長した  $\text{AlO}_x$  薄膜は厚さ 5-6 nm で結晶化していることが確認された。シートキャリア密度は、AlO400 が  $n_s=1.9 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 、AlO800 が  $n_s=1.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  であった。発光測定では、励起光源に He-Cd レーザー (325 nm)、または繰り返し周波数 21 kHz、パルス幅 400 ps、平均出力 16 mW の YAG:Nd レーザー (266 nm) を用いた。

(3) (2) の酸化膜の調査と並行して、酸化ガリウムそのものの特性を調査した。酸化ガリウムはバンドギャップが GaN や SiC よりも大きく単結晶作製も容易なため、パワーラングスター材料として近年、特に注目を集める。しかし、酸化ガリウムは安定相で単斜晶型構造 ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ) をとり、Si や GaAs、GaN などの

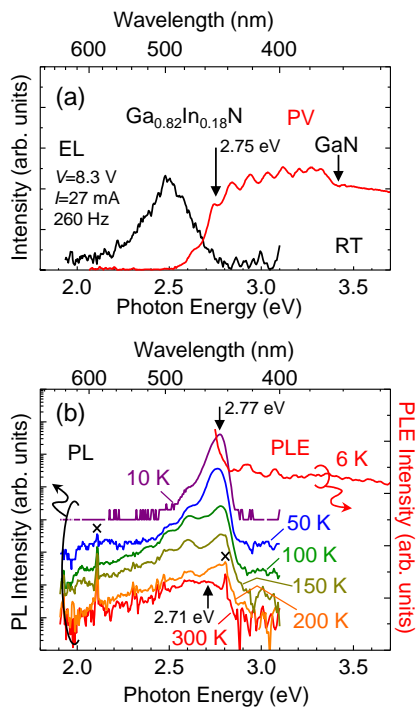


図 1 (a) 室温における  $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  p-n 接合 LED の PV と EL スペクトル、(b) 6 K での PLE スペクトルと PL スペクトルの温度依存性。

一般的な半導体の構造とは異なるため、デバイス応用する上で指標となる物性に関する情報が圧倒的に乏しい。例えば、最も基本的な情報であるはずの  $E_g$  が 4.4~5.0 eV と様々な実験値が報告され、定まっていなかった。そこで、融液成長法により製作した  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  結晶の透過と反射スペクトルの偏光依存性を調査し、吸収端付近のバンド構造を詳細に調査した。また、温度依存性や偏光ラマン、赤外分光エリプソメトリ測定から、光学遷移と格子振動との関係を明らかにした。

(4) GaN MOS LED を試作した。分子プレカーサー法により製膜した Ga-In-O 薄膜の光学的特性を調査すると同時に、同薄膜を電極とすることで、遠紫外線領域での透明導電膜用の材料として有用であることを示した。最終年度は、フォトリソプロセスにより GaN MOS LED の集積化を行った。

(5) 分子プレカーサー法を用いて、Ag ナノ結晶を分散した ZnO 薄膜 (Ag-NC/ZnO) を製作した。Ag 濃度を変化させた Ag-NC/ZnO 薄膜を製作し、電気的特性、光学的特性の変化を明らかにし、GaInN 系青色 LED でのプラズモン効果を検討した。LED は c 面サファイア基板上に MOVPE 法により製作され、n 型 GaN 層、GaInN/GaN 超格子 (SL) 層、GaInN/GaN 多重量子井戸 (MQW) 活性層、p 型 GaN 層により構成される。

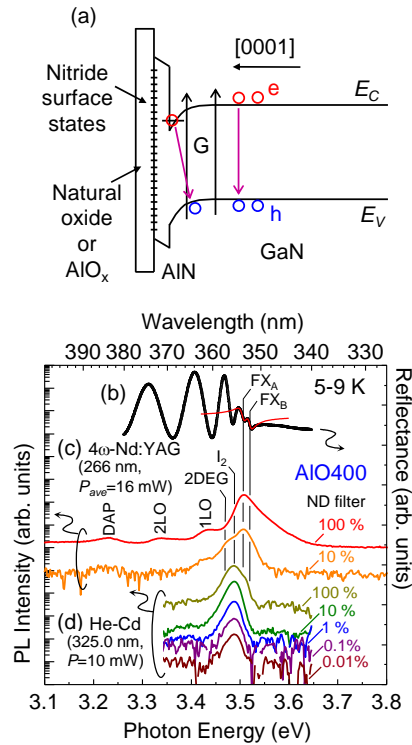


図 2 (a)  $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$  構造の模式的なバンド図、(b) 5 K での反射スペクトル、(c)、(d) 極低温における PL スペクトルの励起密度依存性。

#### 4. 研究成果

(1) I-V 測定では良好な整流性は得られなかったが、図 1(a) に示すように室温では 2.5 eV に青緑色の EL 発光が得られた。また、PV スペクトルには開放電圧が観測され、バンドギャップは 2.75 eV と見積もられた。EL ピークとの差からストークスのシフト量は 250 meV であることが分かった。PL スペクトルの温度依存性を図 1(b) に示す。室温での PL ピークエネルギーは 2.71 eV であり、EL ピークの値よりも大きかった。低温での PLE スペクトルの結果と合わせ、PL で観測される発光に、p 層の Mg アクセプタ準位が関与していることが示唆され、EL における n 層の発光とは異なることが分かった。以上の結果は、試作した p-GaN を含まない GaInN p-n 接合が、LED や太陽電池の基本構造として有望であることを示すと同時に、さらに InN モル分率を増加させた GaInN p-n 接合試作への試金石となった。

(2) 極低温で励起密度を変化させて測定した AlO400 の PL スペクトルを図 2(c)、図 2(d) に示す。図 2(b) に示す反射スペクトルとの比較から、2 次元電子ガス (2DEG) に関連した発光が 3.45-3.46 eV 付近のショルダーとして観測されているが分かった。製作した 3 つの試料の PL と TRPL 信号の比較を図 3 にまとめる。全ての試料で 2DEG 関連のショルダーが観測された。TRPL 信号は二成分の指数関数型を示し、早い成分は図 2(a) のバルク領域での発光再結合寿命を表し、遅い成分は界面の電

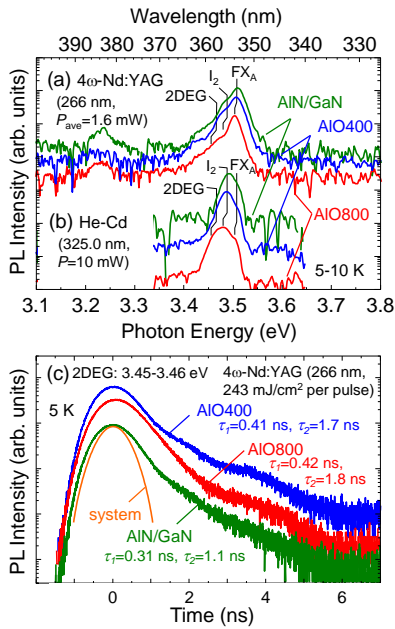


図3 (a)、(b) 極低温でのPLスペクトルの比較、(c) 2DEG 関連発光のTRPL信号の比較。

子と内部電界によりバルク領域にドリフトした正孔の発光再結合寿命を表してると考えられる。AlN/GaNとAlO400に殆ど差異がないことから、アモルファスのAlO<sub>x</sub>は界面電子に影響を及ぼさないことが分かった。一方、AlO800では、発光エネルギーの減少と寿命の増加が観測された。これらの結果は、結晶化させたAlO<sub>x</sub>を形成することで界面の分極電場が増加したことを示している。ホール効果測定で得られた $n_s$ の減少とも矛盾していないことから、AlO<sub>x</sub>の構造により表面状態のコントロールが可能であることが示された。

(3) 代表例として、FZ法により成長した(010)、(001)面基板を用いて観測した偏光反射スペクトルの温度依存性を図4に示す。測定には、最終年度に完成した温度依存測定システムを用いた。スペクトルには価電子帯の $\Gamma$ 点頂上付近の3つのバンドから伝導帯への遷移による反射率異常が現れ、解析から励起子共鳴構造であることが明らかになった。励起子共鳴エネルギーとブロードニングパラメータの温度依存性を、それぞれ図5(a)および図5(b)に示す。図5(b)の右軸に示すように、赤外分光エリプソメトリ測定から得られたL0フォノンエネルギーは3つの範囲に分かれ、低温におけるブロードニングパラメータはL0フォノンエネルギーに相当する。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶では、励起子-L0フォノン相互作用が、バンドギャップやブロードニングパラメータの温度変化に大きく関与することが分かった。フォノンに関する情報は、光学的特性に留まらず、キャリア伝導機構の解明等にも役立つ。これらの結果は、同材料の本質を見極め、パワーランジスター材料として最大

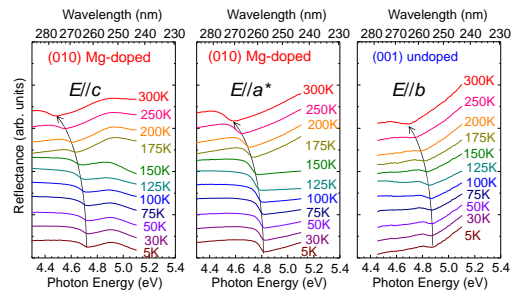


図4 酸化ガリウム基板の偏光反射スペクトルの温度依存性。

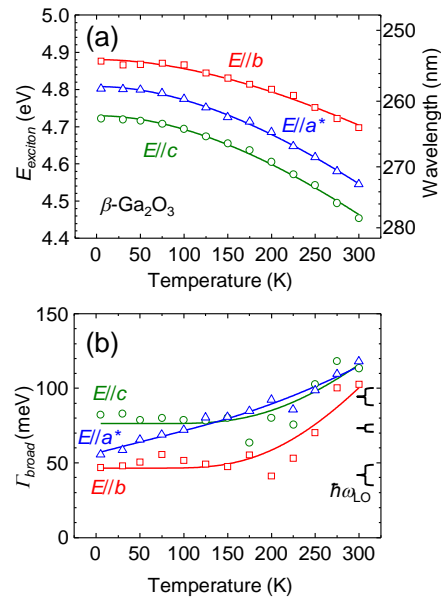


図5 (a)励起子共鳴エネルギーと(b)ブロードニングパラメータの温度依存性。

限のパフォーマンスを発揮するための基礎データとして寄与すると期待される。

(4) 代表的な結果として分子プリカーサー法により製膜したGa-In-O薄膜の光学的特性の一部を記載する。酸化ガリウムは単斜晶構造であるが、高温で製膜したため比較的低いInNモル分率 $x$  ( $x \geq 0.15$ )で立方晶相が支配的となった。透過率測定から $E_g$ が変化していることが確認されたが、 $x \geq 0.39$ では表面荒れのため透過率が減少した。ホール効果測定より、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>薄膜の抵抗率は $\rho > 10^6 \Omega \text{ cm}$ と高かったが、In添加により低減した。例えば、 $x=0.4$ では、室温でキャリア密度 $n=4.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、ホール電子移動度 $\mu = 2.8 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ で $=5.3 \Omega \text{ cm}$ であった。図6(a)にGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の12 KでのCLスペクトルを黒線で示す。バンド端発光は観測されず、3.1~3.6 eVに紫外線発光帯(UV)、2.6~3.1 eVに青色発光帯(BL)、2.2~2.6 eV付近に緑色発光帯(GL)、1.4~1.9 eV付近に赤色発光帯(RL)が観測された。Inを添加すると発光強度は急激に減少し、 $x \geq 0.39$ では発光が観られなかった。UV

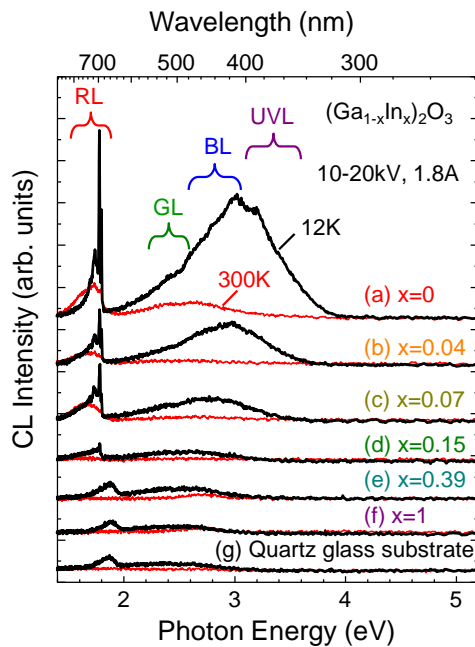


図6 12 Kと 300 Kにおける Ga-In-O 薄膜のカソードルミネセンス (CL) スペクトル。

は観られず、 $E_g$ の減少に伴う BL エネルギーの減少が観られた。RL は、残留 Cr 添加による発光であり、In を添加した薄膜 ( $x \leq 0.15$ ) でも同様な発光が観られた。得られた結果は、Ga-In-O 薄膜が遠紫外線領域での透明導電膜用の材料として有用であることを示す。

(5) 走査電子顕微鏡で Ag-NC/ZnO の表面を観察したところ、図 7(a)に示すように Ag が数  $\mu\text{m}$  のサイズで繋がって分布しており、ナノ構造の制御には至っていないことが分かった。電気的特性は、 $\text{Ag}^+:\text{Zn}^{2+}=5:5$  では絶縁性を示し、さらに Ag 濃度を増加させると  $\text{Ag}^+:\text{Zn}^{2+}=7:3$  で抵抗率が  $1.25 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$  となった。 $\text{Ag}^+:\text{Zn}^{2+}=0:10, 6:4$  の薄膜の室温での反射スペクトルを図 7(b)に示す。380 nm 付近に ZnO の励起子反射率異常によるピークが現れた。Ag を分散させると 440 nm 付近に反射率の減少が観られた。計算結果との比較からこの減少は表面プラズモン吸収によるものであることが分かった。10 K での PL スペクトルを図 7(c)に示す。ZnO のバンド端発光、緑色発光 (GL) 帯に加え、2.0 eV 付近にピークが現れた。銀の比率を減少させるとピーク位置が高エネルギー側にシフトした。LED 上に成膜すると、図 7(d)に示すように MQW 活性層、ZnO のバンド端発光に加え、2.3 eV 付近に発光ピークが現れた。サファイア基板での 2.0 eV 付近の発光ピークと LED 上での 2.3 eV 付近の発光ピークは、ZnO のバンド端発光、LED の MQW からの発光とピーク形状がよく似ていることから、表面プラズモンを介した発光であることが示唆される。このような現象は過去に報告がなく、表面プラズモンを介した発光機構解明、さらに発光効率向上に向けた重要な情報となる。

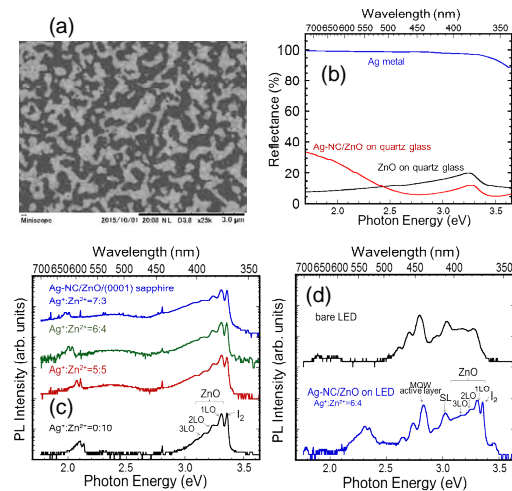


図 7 (a) Ag-NC/ZnO 薄膜の走査電子顕微鏡像、(b) 室温での反射スペクトル、(c) 10 K での Ag-NC/ZnO 薄膜の PL スペクトル、(d) 10 K での青色 LED と Ag-NC/ZnO/LED 構造の PL スペクトル。

#### <分子プリカーサー法に関する引用文献>

M. Sato, H. Hara, T. Nishide, and Y. Sawada, J. Mater. Chem. Vol. 6, pp.1767-1770 (1996).

H. Nagai and M. Sato, in *Heat Treatment-Conventional and Novel Applications, Heat Treatment in Molecular Precursor Method for Fabricating Metal Oxide Thin Films*, ed. Dr. F. Czerwinski (InTech, Rijeka, 2012).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件) 全て査読あり

(1) T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, A. Kuramata, and M. Higashiwaki, "Temperature-dependent exciton resonance energies and their correlation with IR-active optical phonon modes in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals", *Applied Physics Letters* Vol. 108 (10), pp.101904 1-5 (2016). DOI: 10.1063/1.4943175

(2) T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Valence band ordering in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  studied by polarized transmittance and reflectance spectroscopy", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 54 (11), pp.112601 1-5 (2015). DOI: 10.7567/JJAP.54.112601

(3) T. Onuma, K. Narutani, S. Fujioka, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, L. Sang, M. Sumiya, and T. Honda, "Optical properties of  $\text{Ga}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  p-n homojunction

blue-green light-emitting-diode grown by radio-frequency plasma-assisted molecular beam epitaxy", Trans. Mat. Res. Soc. Japan Vol. 40 (2), pp.149-152 (2015).

(4) T. Onuma, Y. Sugiura, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Impacts of  $\text{AlO}_x$  formation on emission properties of AlN/GaN heterostructures", Applied Physics Express Vol. 8, pp.052401 1-3 (2015). DOI: 10.7567/APEX.8.052401

(5) T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, Y. Itoh, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda, "Polarized Raman spectra in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals", Journal of Crystal Growth Vol. 401, pp.330-333 (2014). DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2013.12.061.

(6) T. Onuma, T. Yasuno, S. Takano, R. Goto, S. Fujioka, T. Hatakeyama, T. Oda, H. Hara, C. Mochizuki, H. Nagai, T. Yamaguchi, M. Sato, and T. Honda, "Cathodoluminescence spectra of Ga-In-O Polycrystalline films fabricated by molecular precursor method", Japanese Journal of Applied Physics Vol. 53 (5S1), pp.05FF02 1-4 (2014). DOI: 10.7567/JJAP.53.05FF02.

(7) T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda, "Correlation between blue luminescence intensity and resistivity in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  single crystals", Applied Physics Letters Vol. 103 (4), pp.041910 1-3 (2013). DOI: 10.1063/1.4816759.

〔学会発表〕(計 44 件)うち招待講演 計 7 件

#### (1) 国際学会

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Valence band structure of monoclinic gallium oxide studied by polarized optical measurements", The Collaborative Conference on Crystal Growth 2015 (3CG 2015), Hong Kong, Dec. 15 (2015), No. B20 (Invited-Oral).

T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, K. Goto, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Optical Anisotropy in (010) Plane of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  Single Crystals", 1st International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials, Kyoto, Japan, Nov. 6, (2015), 13.

T. Onuma, T. Shibukawa, D. Taka, K. Serizawa, E. Adachi, H. Nagai, T. Yamaguchi, J.-S. Jang, M. Sato, and T.

Honda, "Study on spontaneous emission in nitride-based LEDs with Ag-nanocrystallites ZnO films fabricated by molecular precursor method", 22nd International Society of Pure & Applied Coordination Chemistry Symposium (SPACC 22), University of Namibia, Namibia, Aug.14 (2015), No. SPACC-6 (Invited-oral).

T. Onuma, K. Narutani, S. Fujioka, T. Yamaguchi, K. Wang, T. Araki, Y. Nanishi, L. Sang, M. Sumiya, and T. Honda, "Optical properties of GaInN p-n homojunction blue-green light-emitting-diodes", International Union of Materials Research Societies, International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka, Japan, Aug. 25 (2014), No.C3-I25-009 (Invited-oral).

#### (2) 国内の学会

尾沼猛儀, 齋藤伸吾, 佐々木公平, 後藤健, 増井建和, 山口智広, 本田徹, 倉又朗人, 東脇正高, " $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  結晶における励起子-L0 フォノン相互作用", 2016 年春季応用物理学会(21a-S222-6), 2016 年 3 月 21 日, 東京工業大学・大岡山キャンパス.

高大地, 尾沼猛儀, 澁川貴史, 永井裕己, 山口智広, Ja-Soon Jang, 佐藤光史, 本田徹, "分子プレカーサー法で製作した銀分散 ZnO 薄膜の光学的特性", 2016 年春季応用物理学会(19p-P12-25), 2016 年 3 月 19 日, 東京工業大学・大岡山キャンパス.

尾沼猛儀, 山口智広, 伊藤雄三, 本田徹, 佐々木公平, 増井建和, 東脇正高, " $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の光学的特性評価", ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第 162 委員会, 第 91 回研究会「酸化物材料の最近の進展」, 2014 年 9 月 26 日, 京都大学東京オフィス, 品川.

尾沼猛儀, 杉浦洋平, 山口智広, 本田徹, 東脇正高, " $\text{AlO}_x/\text{AlN}/\text{GaN}$  ヘテロ構造の発光特性", 2014 年秋季応用物理学会(20p-C5-4), 2014 年 9 月 20 日, 北海道大学.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

尾沼 猛儀 (ONUMA TAKEYOSHI)  
工学院大学・先進工学部応用物理学科・准教授  
研究者番号: 10375420

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし