

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04809

研究課題名（和文）絶対放射量子効率測定に基づいた窒化ガリウムの点欠陥定量計測

研究課題名（英文）Quantification of the point defect concentration in gallium nitride based on measurement of the absolute quantum efficiency of radiation

研究代表者

小島 一信 (Kojima, Kazunobu)

東北大学・多元物質科学研究所・准教授

研究者番号：30534250

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,400,000円

研究成果の概要（和文）：発光ダイオードや高耐圧トランジスタ等の構成材料として、我々の身の回りで利用されている窒化ガリウムの結晶品質を定量的に評価する手法を開発した。具体的には、独自手法である全方位フォトルミネセンス（ODPL）を用いた量子効率（QE）測定により、結晶品質を左右する点欠陥濃度の定量手法を確立した。また、QEと発光寿命の相関を明らかとし、1億分の1以下という低い水準における不純物濃度推定や、極低温におけるQE評価法をも確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、発光ダイオードや高耐圧トランジスタ等の構成材料として、我々の身の回りで利用されている窒化ガリウム（GaN）の結晶品質を定量的に評価する手法の開発に至った。これは、構造的欠陥である貫通転位が極めて抑制された高品質GaNの結晶品質評価に利用できることを意味し、省エネに資する半導体デバイスの研究や開発に利用されることで、大きな社会的意義が期待できる。また、半導体材料のQE評価法としてODPL分光法の優位性や改善点なども明らかとなり、本手法の高度化という点において、学術的意義も大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：A quantitative method to characterize GaN crystals, which are widely utilized as light-emitting diodes and power transistors. In particular, the concentration of point defects in crystals are quantified with quantum efficiency of radiation (QE), which is measured by omnidirectional photoluminescence (ODPL) spectroscopy. The relationship between QE and photoluminescence lifetime is also clarified, and estimation for the concentration of impurities is carried out.

研究分野：半導体光物性

キーワード：窒化ガリウム 全方位フォトルミネセンス 発光量子効率

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体は、InN、GaN、AlN、BN およびそれらの混晶から成る半導体材料の総称であり、発光ダイオードや高周波トランジスタ等の構成材料として、我々の身の回りで利用されている。特に近年、パワー素子向け基板として GaN 単結晶育成技術の発達が著しく、貫通転位や積層欠陥といった構造的結晶欠陥が極めて抑制されつつある。このような高品質結晶においては、深い準位(DL)を形成する点欠陥がキャリアの再結合過程に及ぼす影響が相対的に重要となる。秩父・上殿らは、時間分解フォトルミネセンス(PL)計測法と陽電子消滅分光(PAS)法を組み合わせ、GaN における主たる非輻射再結合中心(NRC)が、Ga 空孔複合点欠陥であることを明らかにした[1]。また申請者は、酸性アモナーマル法とハイドライド気相エピタキシ法を組み合わせることで作製された GaN 単結晶において、非輻射性の点欠陥濃度が PAS の検出限界に近い 10^{16} cm^{-3} を下回ることを見出した[1,2]。しかし、そのような高品質結晶においてもなお、室温の光物性は非輻射再結合過程に強く支配され、輻射内部量子効率(IQE)が依然低い水準にあることが分かった。したがって、GaN 単結晶のさらなる高品質化のためには、非輻射性点欠陥の濃度を精度よく定量する計測法の確立が急務である。

2. 研究の目的

研究代表者が考案した新規分光法である全方位フォトルミネセンス(ODPL)法を用いて、GaN 結晶の輻射量子効率(QE)を定量する。次に、QE 測定に基づいた非輻射性点欠陥の定量法を確立する。最後に、高感度・電極フリー・非破壊・非接触を特徴とする、半導体評価装置を実現する。

3. 研究の方法

(1) ODPL 分光法の確立

申請時点にて構築済みであった ODPL 分光系は最適化がなされておらず、発光外部量子効率(EQE)の測定限界値は 5×10^{-4} 程度であり、残留キャリア濃度が高くかつ高品質 GaN の評価では十分なものの、品質の悪い GaN(参照用)やアンドープ GaN(絶縁性基板向け)の評価にはやや不十分であることが、事前検討で明らかとなっている。そこで、EQE 測定限界値の目標を 1×10^{-4} 以下に設定し、測定系を改善する。GaN 単結晶の光取り出し効率(LEE)は 10^{-2} (1%)オーダーであるため、EQE 測定限界値が 1×10^{-4} 以下になれば、 $\text{IQE} \sim \text{EQE} \times \text{LEE} \sim 10^{-2}$ (1%)を下回る試料の評価が可能になる。

(2) 分析方法の確立(QE から点欠陥濃度を定量する解析法)

結晶中の点欠陥をバンド端発光の QE から定量するために必要な数理モデルの構築および分析手法の確立を行う。事前検討として、ショックレー・リード・ホール(SRH)統計に基づく数理モデルを構築することにより、点欠陥を濃度 N と捕獲係数 C (捕獲断面積とキャリアのドリフト速度の積)の二つの変数で特徴づけられることが分かっている。しかし、キャリアが 3 次元の空間自由度を持つ単結晶の物性評価では、IQE が空間依存性を有することから、多次元拡散方程式とポアソン方程式を無撞着的に解く大規模計算の手法確立が必要である。

4. 研究成果

(1) QE の測定限界値の改善

EQE の計測精度は主に、(a)光検出器の暗電流と(b)測定系の波長感度補正とによって決定される。このうち、(a)は暗電流の少ない高性能 CCD 光検出器を採用することで改善できる。(b)については、励起光波長帯の透過率が低く、試料の発光波長帯にて透過率の高い、いわゆる「短波長カットフィルタ」を用いる。ただし、急峻な透過率特性を持つ誘電体多層膜で構成されたフィルタは、励起光の吸収率の誤差を大きくするため不適と考えられる。したがって、波長特性の緩やかなガラスフィルタを中心に、最適なフィルタを設計・自作も含め検討した。加えて、本フィルタを装着したうえで EQE 測定系全体の感度補正を行う必要があるため、要求を満たす EQE 測定系を、これまで蓄積した経験を活かして新たに構築した。この結果、EQE 測定限界値は従前の 0.05%から 0.01%以下へと、大きく改善することができた。

(2) 様々な材料における QE 計測

本研究にて提案した実験手法(ODPL)の実験装置が実際に立ち上がり、GaN のみならず、酸化亜鉛(ZnO)やペロブスカイト材料など、様々な材料系において検証実験に取り組んだ。検証に用いたすべての直接遷移型半導体発光材料において、想定通り、通常の PL スペクトルとは異なる形状(ダブルピーク構造)を持つ発光スペクトルが得られ、ODPL 法における「直接脱出にかかる EQE」の定量法の正しさが裏打ちされたと言える。

(3) QE と非輻射性点欠陥濃度との相関

本研究を推進した結果、ODPL 法における基本的な数理モデル解析手法が構築できた。また、外部研究機関(産総研)と連携を行い、当初想定していた規模を大幅に超え、かつユニバーサルな光物性シミュレータの開発の糸口もつかんだ。既存の半導体デバイスシミュレータは主に電子デバイスのシミュレータを指向したものであるが、本研究で得られた絶対効率や絶対吸収量といった光学的な絶対測定

値を再現するように、光物性を三次元的にシミュレートできるようになれば、基礎研究から応用研究まで、幅広く活用が見込める。

(4) 高感度・電極フリー・非破壊・非接触を特徴とする半導体評価装置の実現

一般に光計測は一般に瞬時かつ感度が高いという利点があるが、計測者の技量によってその強度が簡単に揺らぐため、再現性に乏しい側面がある。ODPL 法は、これを補うべく開発された手法であるが、積分球よりも大きな結晶の評価が難しいという問題があった。

そこで、新しく図1のような ϕ 配置と呼ばれる、積分球に空けたごく小さな穴(ピンホール)から試料の発光を測定する手法を考案した。通常、積分球の外に結晶がある場合、すべての光を検出することは困難であるが、ある光のエネルギー(GaN の場合は 3.31 eV)よりも大きなエネルギー

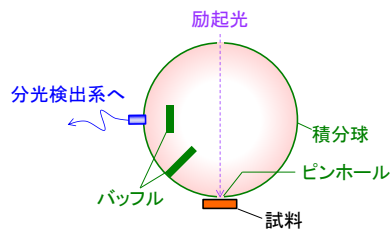


図1 ϕ 配置 ODPL 法の概略図。

領域に限定すると、従来の ODPL 配置と、新しく考案した ϕ 配置によって得られる光のスペクトルや強度がほぼ完全に一致することが見いだされた。3.31 eV は GaN の基礎吸収端エネルギーに相当し、これより大きなエネルギーの光は結晶に完全に吸収される(結晶の厚みが十分大きな場合)。したがって、基礎吸収端エネルギーより大きなエネルギーの光は、結晶の上方向にしか放出されず、結晶が積分球の外にあっても、すべての光がピンホールを経由して積分球にて検出される。 ϕ 配置 ODPL 法は、従来の ODPL 法の良い点を継承しつつ、試料の大きさへの制限がないため、例えばウェハを自動ステージにて少しずつ移動させ、ウェハ面内の各点において発光量や効率を計測することにより、欠陥濃度の大小関係を非破壊・非接触にてウェハ全面を検査することが可能となる。

また、これまでの成果を結集し、GaN 自立結晶の定量的評価として、QE と非輻射再結合中心濃度とを結びつける分析方法を用い、最終到達地点である非輻射性の点欠陥濃度の定量に成功した。その結果の一例を図2に示す。図2は、GaN 自立結晶における炭素不純物濃度の定量に挑戦した結果であり、 10^{15} cm^{-3} を下回るような低い濃度域においても定量の可能性を見出したものである。

さらに、GaN 以外の材料(有機・無機ハイブリッドペロブスカイト半導体や酸化亜鉛)への展開も行った。また、極低温下における QE の計測装置の一号機に当たる装置の発明にも至り、当初予定以上の研究成果を得ることができた。

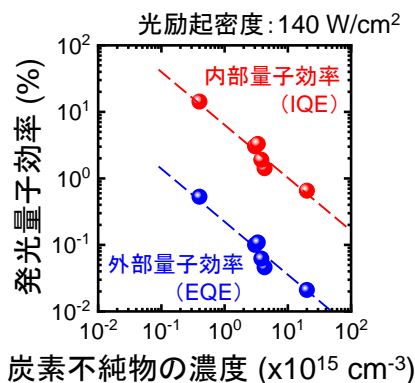


図2 QE と炭素不純物濃度との関係。

<引用文献>

- ① S. F. Chichibu, A. Uedono, and T. Onuma, "Limiting factors of room-temperature nonradiative photoluminescence lifetime in polar and nonpolar GaN studied by time-resolved photoluminescence and slow positron annihilation techniques", *Appl. Phys. Lett.* **86**, 021914 (2005).
- ② K. Kojima, Y. Tsukada, E. Furukawa, M. Saito, Y. Mikawa, S. Kubo, H. Ikeda, K. Fujito, A. Uedono, and S. F. Chichibu, "Electronic and optical characteristics of an *m*-plane GaN single crystal grown by hydride vapor phase epitaxy on a GaN seed synthesized by the ammonothermal method using an acidic mineralizer", *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 05FA03 (2016).
- ③ K. Kojima, Y. Tsukada, E. Furukawa, M. Saito, Y. Mikawa, S. Kubo, H. Ikeda, K. Fujito, A. Uedono, and S. F. Chichibu, "Low resistivity *m*-plane freestanding GaN substrate with very low point-defect concentrations grown by hydride vapor phase epitaxy on a GaN seed crystal synthesized by the ammonothermal method", *Appl. Phys. Express* **8**, 095501 (2015).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kamiyama Akinori, Kojima Kazunobu, Chichibu Shigefusa F., Yusa Go	4. 巻 10
2. 論文標題 Analyzing oxygen and silicon incorporation in GaN microstructures composed of c-planes and angled facets by confocal magneto-photoluminescence microscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035215 ~ 035215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5144549	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Asai Hidehiro, Kojima Kazunobu, Chichibu Shigefusa, Fukuda Koichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Theoretical analysis of photo recycling effect on external quantum efficiency considering spatial carrier dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SGGK02-1 ~ 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab5b4d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Asai Hidehiro, Kojima Kazunobu, Chichibu Shigefusa F., Fukuda Koichi	4. 巻 12
2. 論文標題 Theoretical Formulation of Experimentally Observed Quantum Efficiency of Radiation in Semiconducting Crystal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 035215-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.12.014002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kojima Kazunobu, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Yoshida Takehiro, Fujikura Hajime, Chichibu Shigefusa F.	4. 巻 13
2. 論文標題 Roles of carbon impurities and intrinsic nonradiative recombination centers on the carrier recombination processes of GaN crystals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012004 ~ 012004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab5adc	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kojima K., Ikemura K., Matsumori K., Yamada Y., Kanemitsu Y., Chichibu S. F.	4. 巻 7
2. 論文標題 Internal quantum efficiency of radiation in a bulk CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ perovskite crystal quantified by using the omnidirectional photoluminescence spectroscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 071116 ~ 071116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5110652	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kojima Kazunobu, Ikemura Kenichiro, Chichibu Shigefusa F.	4. 巻 12
2. 論文標題 Quantification of the quantum efficiency of radiation of a freestanding GaN crystal placed outside an integrating sphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 062010 ~ 062010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab2165	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kojima K., Nagasawa Y., Hirano A., Ippommatsu M., Honda Y., Amano H., Akasaki I., Chichibu S. F.	4. 巻 114
2. 論文標題 Carrier localization structure combined with current micropaths in AlGa _N quantum wells grown on an AlN template with macrosteps	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 011102 ~ 011102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5063735	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chichibu S. F., Uedono A., Kojima K., Ikeda H., Fujito K., Takashima S., Edo M., Ueno K., Ishibashi S.	4. 巻 123
2. 論文標題 The origins and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in wide bandgap GaN and AlGa _N	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 161413 ~ 161413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5012994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shima K., Iguchi H., Narita T., Kataoka K., Kojima K., Uedono A., Chichibu S. F.	4. 巻 113
2. 論文標題 Room-temperature photoluminescence lifetime for the near-band-edge emission of (000 1) p-type GaN fabricated by sequential ion-implantation of Mg and H	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 191901 ~ 191901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5050967	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kojima Kazunobu, Ikeda Hiroataka, Fujito Kenji, Chichibu Shigefusa F.	4. 巻 111
2. 論文標題 Demonstration of omnidirectional photoluminescence (ODPL) spectroscopy for precise determination of internal quantum efficiency of radiation in GaN single crystals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 032111 ~ 032111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4995398	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chichibu S. F., Uedono A., Kojima K., Ikeda H., Fujito K., Takashima S., Edo M., Ueno K., Ishibashi S.	4. 巻 123
2. 論文標題 The origins and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in wide bandgap GaN and AlGaIn	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 161413 ~ 161413
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5012994	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計63件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 29件)

1. 発表者名 K. Kojima and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Quantum efficiency of radiation in wide bandgap semiconductors
3. 学会等名 19th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN19) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 K. Kojima and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Relationship between internal quantum efficiency of radiation and photoluminescence lifetime in a ZnO single crystal
3 . 学会等名 The 10th International Workshop on ZnO and Other Oxide Semiconductors (IWZnO2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Koike, M. Yano, S. Gonda, S. Ishibashi, A. Uedono
2 . 発表標題 The origin and properties of intrinsic nonradiative recombination centers in the bulk and epitaxial ZnO
3 . 学会等名 The 10th International Workshop on ZnO and Other Oxide Semiconductors (IWZnO2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Shima, K. Kojima, S. Takashima, K. Ueno, M. Edo, H. Iguchi, T. Narita, K. Kataoka, S. Ishibashi, and A. Uedono
2 . 発表標題 Room-temperature photoluminescence lifetime for the near-band-edge emission of epitaxial and ion-implanted Mg-doped GaN on GaN substrate
3 . 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018), Kanazawa, Japan, November (2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Y. Nagasawa, K. Kojima, A. Hirano, M. Ipponmatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Microscopic structure of boosting IQE for AlGaIn-based UV-B (285 nm) LED grown on macrosteps
3 . 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018), Kanazawa, Japan, November (2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名	K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ipponmatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2. 発表標題	Current localization structure observed in AlGaN-based deep-ultraviolet light-emitting diodes grown on AlN templates with macrosteps
3. 学会等名	International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2018), Kanazawa, Japan, November (2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	秩父重英, 嶋紘平, 小島一信, 高島信也, 上野勝典, 江戸雅晴, 井口紘子, 成田哲生, 片岡恵太, 石橋章司, 上殿明良
2. 発表標題	Mg添加GaNエピ層及びイオン注入層のフォトルミネッセンス評価
3. 学会等名	応用物理学会結晶工学分科会 第149回結晶工学分科会研究会 (招待講演)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	秩父重英, 嶋紘平, 小島一信, 高島信也, 上野勝典, 江戸雅晴, 井口紘子, 成田哲生, 片岡恵太, 石橋章司, 上殿明良
2. 発表標題	エピタキシャル成長およびイオン注入Mg添加GaN中の非輻射再結合中心
3. 学会等名	応用物理学会シリコンテクノロジー分科会 接合研究委員会 研究会 (招待講演)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	小島一信, 渡邊賢司, 谷口尚, 秩父重英
2. 発表標題	バンド端近傍発光の外部量子効率が4%を超える六方晶BN単結晶の光学評価
3. 学会等名	2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 神山晃範, 小島一信, 遊佐剛, 秩父重英
2. 発表標題 空間・時間分解PLを用いたGaNの局所励起子応答
3. 学会等名 2018年 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 池村賢一郎, 秩父重英
2. 発表標題 自立窒化ガリウム結晶の角度分解フォトルミネセンス分光
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 浅井栄大, 小島一信, 秩父重英, 福田浩一
2. 発表標題 自己吸収過程を考慮した発光量子効率の解析式
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秩父重英, 嶋紘平, 井口紘子, 成田哲生, 片岡恵太, 小島一信, 上殿明良
2. 発表標題 注入深さ・極性面の異なるMgイオン注入GaNのフォトルミネッセンス
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小島一信, 長澤陽祐, 平野光, 一本松正道, 本田善央, 天野浩, 赤崎勇, 秩父重英
2. 発表標題 マクロステップを持つc 面AlN/サファイアテンプレート上に成長させたAlGaIn 量子井戸の構造解析 (1)
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長澤陽祐, 小島一信, 平野光, 一本松正道, 本田善央, 天野浩, 赤崎勇, 秩父重英
2. 発表標題 マクロステップを持つc 面AlN/サファイアテンプレート上に成長させたAlGaIn 量子井戸の構造解析 (1)
3. 学会等名 2019年 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 IQE Quantification of Nitride Semiconductors -Omnidirectional photoluminescence (ODPL) measurement utilizing an integrating sphere-
3. 学会等名 The 5th international conference of light-emitting devices and their industrial applications (LEDIA'17) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno, M. Shimizu, T. Takahashi, S. Ishibashi, and A. Uedono
2. 発表標題 Origin and properties of intrinsic Shockley-Read-Hall nonradiative recombination centers in GaN
3. 学会等名 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu and K. Kojima
2 . 発表標題 Periodic compositional undulation in the m-plane Al _{1-x} In _x N epilayers grown by metalorganic vapor phase epitaxy on a GaN substrate
3 . 学会等名 European Materials Research Society, 2017 Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Recent progress of acidic ammonothermal growth of GaN
3 . 学会等名 10th International Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (IWBNS-X) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, and A. Uedono
2 . 発表標題 Optical and defect characteristics of m-plane Al _{1-x} In _x N epitaxial nanostructures
3 . 学会等名 8th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS-2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, A. Uedono, and Y. Sato
2 . 発表標題 Vacuum-fluorescent-display devices emitting polarized deep-ultraviolet and visible lights using m-plane Al _{1-x} In _x N epitaxial nanostructures
3 . 学会等名 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2017) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Shima, A. Uedono, and S. Ishibashi
2. 発表標題 Consideration of Shockley-Read-Hall nonradiative recombination centers in wide bandgap (Al,Ga)N and ZnO
3. 学会等名 Materials Research Society, 2017 Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Determination of absolute quantum efficiency of radiation in nitride semiconductors using an integrating sphere
3. 学会等名 The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Photonics West 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kojima, K. Furusawa, Y. Yamazaki, H. Miyake, K. Hiramatsu, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 A theoretical proposal for achieving more than 90% of the overlap integral of electron and hole wavefunctions in high AlN mole fraction Al _x Ga _{1-x} N multiple quantum wells
3. 学会等名 The 18th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN18) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kojima, H. Ikeda, K. Fujito, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 A high internal quantum efficiency of the emission in GaN single crystals observed by omnidirectional photoluminescence (ODPL)
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Kojima, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ipponmatsu, Y. Honda, H. Amano, I. Akasaki, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Optical characteristics of c-plane AlGaIn multiple-quantum-well light-emitting diode structures with macro-size steps
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, K. Furusawa, Y. Yamazaki, K. Hiramatsu, and H. Miyake
2. 発表標題 A way to achieve more than 90% of the overlap integral of electron and hole wavefunctions in high AlN mole fraction AlGaIn MQWs
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Saito, Q. Bao, K. Kurimoto, D. Tomida, K. Kojima, Y. Kagamitani, R. Kayano, T. Ishiguro, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 High Quality Bulk GaN Crystal Grown by Acidic Ammonothermal Method
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Sakai, T. Minami, K. Kojima, S. F. Chichibu, and A. A. Yamaguchi
2. 発表標題 Quantum-Wire-Like Density of States in c-plane AlGaIn Quantum Wells in Polarization-Crossover Composition Region
3. 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. F. Chichibu, K. Kojima, S. Takashima, M. Edo, K. Ueno, M. Shimizu, T.Takahashi, S. Ishibashi, and A. Uedono
2 . 発表標題 Role of point defects on the luminescent properties of epitaxial and ion-implanted Mg-doped GaN fabricated on a GaN substrate
3 . 学会等名 The 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-12) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 S. Usami, Y. Honda, K. Kojima, M. Kushimoto, M. Deki, S. Nitta, S. F. Chichibu, and H. Amano
2 . 発表標題 Internal quantum efficiency evaluation of LED by photocurrent measurement
3 . 学会等名 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2017) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Kojima, Y. Hayashi, K. Hiramatsu, H. Miyake, and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Compositional modulation for high AlN mole fraction Al _x Ga _{1-x} N multiple quantum wells to enhance overlap integral of carrier wavefunctions
3 . 学会等名 International Workshop on UV Materials and Devices (IWUMD) 2017 (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 K. Kojima and S. F. Chichibu
2 . 発表標題 Quantum efficiency of radiation in wide bandgap semiconductor materials
3 . 学会等名 Kick-off Symposium for World Leading Research Centers (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信
2. 発表標題 窒化物半導体レーザ構造における光学利得生成機構と性能予測
3. 学会等名 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信, 上殿明良
2. 発表標題 GaN中の非輻射再結合中心の正体とその特性
3. 学会等名 応用物理学会結晶工学分科会 第147回結晶工学分科会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 斉藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 嶋紘平, 小島一信, 鏡谷勇二, 茅野林造, 石黒徹
2. 発表標題 酸性銲化剤を用いたアモノサーマル法による電子デバイス用GaN結晶合成の進展
3. 学会等名 2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島一信, 池田宏隆, 藤戸健史, 秩父重英
2. 発表標題 高品質窒化ガリウム単結晶の光物性評価
3. 学会等名 公益社団法人日本セラミックス協会第30回秋季シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島一信, 三宅秀人, 平松和政, 秩父重英
2. 発表標題 全方位フォトルミネセンス(ODPL)法を用いた窒化物半導体の発光量子効率測定
3. 学会等名 日本結晶成長学会 第46回結晶成長国内会議 (JCCG-46) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 上殿明良, 嶋紘平, 小島一信, 石橋章司
2. 発表標題 GaNの低転位密度化・高純度化と主要な非輻射再結合中心
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第3回個別討論会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島一信, 秩父重英
2. 発表標題 ワイドギャップ半導体の発光量子効率と発光寿命の相関
3. 学会等名 応用物理学会励起ナノプロセス研究会 第13回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 秩父重英
2. 発表標題 全方位フォトルミネッセンス法による絶対輻射量子効率測定
3. 学会等名 日本学術振興会 ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会 第107回研究会、光電相互変換第125委員会 第240回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 赤尾賢一, 菅野美幸, 水野広介, 永森浩司, 秩父重英
2. 発表標題 減衰全反射法を用いたGaN単結晶の表面状態評価
3. 学会等名 2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島一信, 浅井栄大, 福田浩一, 秩父重英
2. 発表標題 光励起下のGaN単結晶における内部量子効率の空間的不均一
3. 学会等名 2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小島一信, 林侑介, 三宅秀人, 平松和政, 秩父重英
2. 発表標題 二次組成変調によって電子・正孔波動関数の重なり積分を増強させたc面AlGaN多重量子井戸の発光特性評価
3. 学会等名 2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信, 嶋紘平, 高島信也, 江戸雅晴, 上野勝典, 石橋章司, 上殿明良
2. 発表標題 GaN基板上Mg添加GaNの時間分解フォトルミネッセンス評価
3. 学会等名 2017年 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 包全喜, 齊藤 真, 栗本浩平, 嶋紘平, 富田大輔, 小島一信, 石黒徹, 秩父重英
2. 発表標題 超臨界アンモニアを用いた酸性アモノサル法による2インチバルクGaN結晶育成
3. 学会等名 化学工学会第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 浅井栄大, 福田浩一, 秩父重英
2. 発表標題 GaN単結晶における光励起キャリアの空間的不均一と内部量子効率との関係(2)
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 秩父重英
2. 発表標題 ZnO単結晶の絶対輻射量子効率測定(2)
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島一信, 堀切文正, 成田好伸, 吉田文洋, 秩父重英
2. 発表標題 有機金属気相成長法にて自立GaN基板上に成長させたGaNホモエピタキシャル層の光物性評価
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷川智之, 小島一信, 秩父重英, 松岡隆志
2. 発表標題 GaNの二光子励起フォトルミネッセンス測定における自己吸収の影響
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 浅井栄大, 小島一信, 福田浩一, 秩父重英
2. 発表標題 GaN単結晶における光励起キャリアの空間的不均一と内部量子効率との関係(1)
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秩父重英, 小島一信
2. 発表標題 MOVPE成長m面AlInN/GaNヘテロ構造における特異構造(1)
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 稲富悠也, 草場彰, 柿本浩一, 寒川義裕, 小島一信, 秩父重英
2. 発表標題 MOVPE成長m面AlInN/GaNヘテロ構造における特異構造(2)
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高島信也, 田中亮, 上野勝典, 松山秀昭, 江戸雅晴, 小島一信, 秩父重英, 上殿明良, 中川清和
2. 発表標題 Mgイオン注入GaN MOSFETのチャネル特性向上
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 嶋紘平, 井口紘子, 成田哲生, 片岡恵太, 上殿明良, 小島一信, 秩父重英
2. 発表標題 Mgイオン注入N極性面GaNの時間分解フォトルミネッセンス評価
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 秩父重英, 梅原直己, 小島一信, 原和彦
2. 発表標題 サファイア基板に気相成長させた六方晶BN薄膜の発光スペクトル
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 斉藤真, 包全喜, 栗本浩平, 富田大輔, 嶋紘平, 小島一信, 石黒徹, 秩父重英
2. 発表標題 酸性アモノサル法による大型GaN結晶成長の検討
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大石昌嗣, 塩見昌平, 山本孝, 植木智之, 改井陽一郎, 秩父重英, 高取愛子, 小島一信
2. 発表標題 赤色蛍光体(CaAlSiN ₃ :Eu)の高温劣化機構の評価
3. 学会等名 2018年 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kojima
2. 発表標題 Optical characterization and gain calculation of AlGaN quantum wells
3. 学会等名 1st International Workshop on AlGaN based UV-Laser diodes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kojima, K. Watanabe, T. Taniguchi, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Quantification of external quantum efficiency for near-band-edge emission of freestanding h-BN crystals under photo-excitation
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Asai, K. Kojima, S. F. Chichibu, and K. Fukuda
2. 発表標題 Analytical formula for quantum efficiency of radiation considering self-absorption process
3. 学会等名 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kojima, F. Horikiri, Y. Narita, T. Yoshida, and S. F. Chichibu
2. 発表標題 Dependences of external quantum efficiency of radiation and photoluminescence lifetime on the carbon concentration in GaN on GaN structures
3. 学会等名 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Asai, K. Kojima, S. F. Chichibu, and K. Fukuda
2. 発表標題 Theoretical analysis of photo-recycling effect on external quantum efficiency considering spatial Carrier dynamics
3. 学会等名 2019 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>公衆衛生や生活の質的向上に寄与！ ~深紫外発光素子の高効率動作メカニズムを解明~ https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2016/11/press20161124-03.html 窒化ガリウムウェハの高速・高感度検査技術を確立 -分光技術を駆使した半導体の結晶欠陥計測- https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/05/press20190524-01-gal.html 太陽電池の材料はよく光る！？ -ペロブスカイト半導体の発光量子効率計測- https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/08/press20190801-01-sun.html 一億個に一つの不純物も見逃さない！ -窒化ガリウム結晶中の炭素不純物を高感度・非破壊・非接触検出- https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2019/12/press20191205-02-ODPL.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考