

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号 : 32621

研究種目 : 特別推進研究

研究期間 : 2012~2016

課題番号 : 24000013

研究課題名 (和文) ナノ結晶効果によるエネルギー・環境適合デバイスの革新

研究課題名 (英文) Innovation of energy and environment-friendly devices by nanocrystal effect

研究代表者

岸野 克巳 (KISHINO Katsumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号 : 90134824

交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 424, 000, 000 円

研究成果の概要 (和文) :

GaN ナノコラムは研究代表者が最初に発見した一次元ナノ結晶である。本研究では、ナノコラムの選択成長法を改良し、コラム径 26nm の高密度・細線規則配列化に成功した。この手法によりコラム径を系統的に変化させてナノコラムを作り、貫通転位フィルタリング、ひずみ緩和、In 組成揺らぎ抑制効果など、さまざまなナノ結晶効果を学術的に解明した。InGa_N ナノコラムで量子ドット効果を発現させ単一光子発光特性を得た。ナノ結晶効果は、ナノコラム発光特性の改善に寄与し、波長 600nm・赤色域ナノコラムで 20% を超える内部量子効率を得た。Si 基板上の InGa_N ナノコラムの選択成長法を開拓し、ナノコラム LED のフリップチッププロセスを確立し、高密度二次元 LED アレイ化への道を拓いた。また、多色集積型ナノコラム LED を作製し、微小領域 (10×10μm²) ナノコラムアレイの高密度集積化によって、ナノコラムの発光色を青色から赤色まで制御して白色 LED 動作を得た。また、ナノコラム・フォトリソニック結晶効果を用いて放射ビーム指向性の高いナノコラム LED を実証し、コラム径を面内で一次的に変化させた系でランダムレーザリングを起こし、スペクトル幅を広げて、スペckル抑制に適したレーザ特性を得た。これらのデバイス技術は、低消費電力・次世代ディスプレイの実現に寄与しうる。

研究成果の概要 (英文) :

GaN nanocolumns are one-dimensional nanocrystals, which had been discovered by the leader of this project. In this project, we have improved the method for selective area growth of the nanocolumns, resulting in the successful fabrication of densely packed, ordered fine-nanocolumn arrays with a nanocolumn diameter of 26 nm. Using this method, nanocolumn arrays with various nanocolumn diameters were prepared on the same substrate, following which we investigated various nanocrystal effects such as dislocation filtering, strain relaxation, and In compositional fluctuation suppression as a function of the diameter. Single photon emission characteristics were obtained based on the quantum dot effect observed in InGa_N nanocolumns. The nanocrystal effects contribute to the improvement of the emission properties of the nanocolumns, and we observed an internal quantum efficiency of over 20% in the 600-nm-wavelength red-emission range of the nanocolumns. We developed the selective area growth of the InGa_N nanocolumns on the Si substrates, and established the flip-chip process of nanocolumn LEDs, which paved the way for the development of high-density two-dimensional LED arrays. Multicolor-emission integrated nanocolumn LEDs were also fabricated; the high-density integration of the microscopic emission area (10×10 μm²) nanocolumn arrays was performed by controlling their emission colors from blue to red, resulting in white-colored LED operation. Nanocolumn LEDs with a high directional radiation beam was demonstrated using the nanocolumn photonic crystal effect. The nanocolumn system was fabricated changing the nanocolumn diameter one-dimensionally along the in-plane direction. The random lasing occurred for the nanocolumn system, providing a broad lasing spectrum, which is suitable for speckle reduction. The nanocolumn-based technologies developed in this study will contribute to the fabrication of next-generation displays with low power consumption.

研究分野 : 応用光学・量子光工学

キーワード : 窒化物半導体、ナノコラム、三原色、LED、フォトリソニック結晶、超細線、ランダムレーザ、選択成長

1. 研究開始当初の背景

窒化物半導体(InGaN系)では、青から緑さらに赤色域へと長波長化とともに発光効率が急激に減少し、赤色域では内部量子効率が1%以下となって全く光らない。これは、InGaN系ではIn組成比の増加とともに結晶欠陥、内部電界、In組成揺らぎが増加し、それが相乗的に作用して引き起こされるからで、有効な解決法が見出されていなかった。半導体光デバイスの歴史に学ぶと、このような材料的限界に直面したとき、構造効果に活路を見出してきた。

研究代表者らは自己形成 GaN ナノコラムを最初に(1997年に)創製し、ナノコラム研究分野を先導してきていた。ナノコラムは直径が数百 nm 以下の一次元ナノ結晶で、貫通転位低減とひずみ緩和効果の発現が期待された。これらのナノ結晶効果は、InGaN 系の課題解決に有効と考えられ、ナノデバイスへの関心が高まり、次々に研究が開始され、大きな潮流が起こり始めていた。そこで産業的インパクトを生み出す InGaN 系デバイスの材料限界の突破に挑み、わが国発の研究分野で世界を先導する水準を保持して、格段に優れた成果を得るべく本研究を開始した。

2. 研究の目的

均一形状のナノコラムを規則的に配列した規則配列 GaN ナノコラム、ナノコラム細線化で期待されるナノ結晶効果を学術的に解明し、窒化物半導体デバイスが直面する材料的課題の克服に挑戦し、革新的なエネルギー・環境適合デバイスの基盤技術を開拓する。

この研究目的を効率よく完遂させるため、研究項目に課題をブレイクダウンして、問題点を詳らかにし、解決策を探索する。

- (1) 超細線化(コラム径 $<50\text{nm}$)に挑戦し、超微細・高精度ナノコラム結晶を実現する。
- (2) コラム径を系統的に変化させてナノ結晶効果を学術的に探究し、InGaN 系発光デバイスの発光効率低下に対するナノ結晶効果の寄与を学術的に解明する。
- (3) 赤色発光ナノコラムの内部量子効率(IQE)に寄与するナノ結晶効果を解明し、赤色 LED 高効率化の基盤技術を開拓する。
- (4) 規則配列ナノコラムを基礎に Si 基板上のナノコラム LED/レーザ、InGaN 系面発光型ナノコラムレーザの基盤技術を開拓する。
- (5) ナノコラムの発光色制御と設計法を確立し、三原色ナノコラム LED の一体集積化を実現し、微細領域ナノコラム LED アレイ化技術を探求して、フルカラーディスプレイ、白色半導体ランプの基盤技術を開拓する。
- (6) ナノコラム関連ナノ結晶(ナノウォール、ナノプレートなど)の光応答特性、レーザ特性を探求し、ナノ結晶効果を研究する。
- (7) 細線 GaN ナノコラムを実現し、InGaN 量子井戸(QW)を内在化させ、量子ドット効果を探求する。

3. 研究の方法

- (1) ナノコラム細線化では、サファイア基板上 GaN テンプレート上に形成したナノホール Ti マスクパターンを選択成長マスクとして、RF プラズマ分子線エピタキシーによる超微細・規則配列 GaN ナノコラムの選択成長条件を確立する。微細ナノマスク作製がキイとなるため、高性能な EBL とドライエッチング装置を購入し整備する。
- (2) マスク径でコラム径を系統的に変化し、同一基板上に複数の規則配列 InGaN/GaN ナノコラムを成長させる。フォトルミネッセンス(PL)、時間分解 PL、断面透過型顕微鏡(TEM)、EDX などで InGaN の発光・結晶特性のコラム径依存性を明らかにして、コラム細線化によるナノ結晶効果の発現を解明する。
- (3) 赤色域発光ナノコラムを作製し、成長条件の最適化を進め IQE 評価法を確立する。
- (4) AlN を成長核形成層として、Si 基板上の GaN ナノコラム選択成長法を確立する。Si エッチング除去によるフリップチップ(FC)型ナノコラム LED を作製する。これによって上下配線を可能とし、微小ナノコラム LED の超高密度二次元配列化への突破口を拓く。ナノコラム規則配列化によってフォトニック結晶効果を発現させ、高い放射ビーム指向性をもつナノコラム LED を実現する。また、面発光型レーザ発振を得るとともに、コラム径を面内で変調させてランダムレーズングを起こしスペクトル幅を広げ、スペckルフリーレーザ特性を実証する。
- (5) 規則配列 InGaN/GaN ナノコラムのコラム径・周期を系統的に変化させ発光色制御メカニズムを明らかにする。コラム径と周期の異なる規則配列ナノコラムを配置して、多色発光ナノコラム LED の一体集積化を実現し、微細アレイ化により白色発光を探索する。
- (6) ナノコラム上 GaN プレートでウィスパリングギャラリモード発振を調べ、希土類(Eu)ドープ結晶の高品質化を図り、新たなエッチング法を開拓し、トップダウンナノ構造を作製する。
- (7) InGaN ナノコラムの PL 特性を測定し、量子ドット効果を調べる。

4. 研究成果

(1) GaN ナノコラムの細線化⁸⁾

高密度で直径 50nm 以下の微細なナノホールパターン上の GaN 選択成長では、成長核形成が不均一に起こる。超細線・規則配列 GaN ナノコラムの均一成長は、結晶工学における未踏破域であった。本研究では、核形成を促進させるための低温交互供給モードと横方向成長が少ない高温同時供給モードを組み合わせて、独自の二段階選択成長法を開拓し、図 1 に示すように、超高密度・細線規則配列ナノコラムの成長(コラム径 $D:26\text{nm}$ 、密度: $\sim 3.2 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$)を実証した⁸⁾。デバイス領域($50 \times 50 \mu\text{m}^2$)に 80 万本ものナノコラムをもつ高密度・規則配列ナノコラムで 30nm 以下の細線化の実証は他の材料系でも例がな

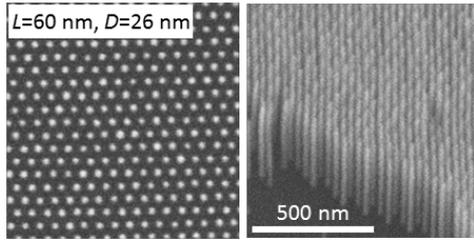


図1. 規則配列 GaN ナノコラムの細線化

く、結晶工学に大きなインパクトを与える成果が得られた。

(2) ナノ結晶効果の学術的探究^{1, 3, 6, 12, 13, 15)}

規則配列化は本研究の独壇場で、ナノ結晶効果のコラム径依存性を系統的に検討した。

① 貫通転位の抑制効果¹³⁾

Si 基板上に GaN を成長させると、高密度の貫通転位 ($\sim 10^{11} \text{cm}^{-2}$) が入り、通常はこれを低減するのに苦労する。本研究ではこの GaN バッファ層として GaN ナノコラム選択成長を行い、高さ $0.3 \mu\text{m}$ で平板状にナノコラムを切り出して TEM によって転位伝搬メカニズムを議論し、貫通転位フィルタリング効果のコラム径依存性を世界で初めて解明した(図2)。コラム径 250nm 付近から無転位ナノコラムの発生確率が増加し、 200nm 以下では無転位となった。膜結晶では、密度 $\sim 10^{11} \text{cm}^{-2}$ の貫通転位が、厚さ $0.3 \mu\text{m}$ の薄膜成長で消滅することはなく、ナノ結晶効果は結晶工学的にも驚くべき特性を発現することが判明した。

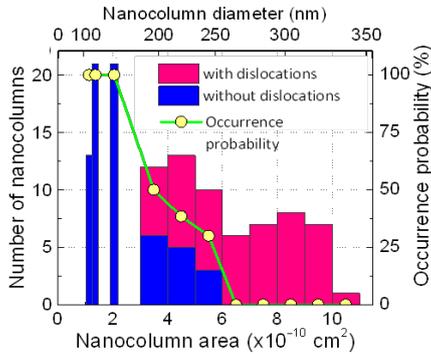


図2. 貫通転位フィルタリング効果

② 格子ひずみ緩和効果^{1, 3)}

GaN ナノコラム上 InGaN 成長ではひずみ緩和効果のために臨界膜厚 h_c が増大し、理論的に、ある臨界コラム径以下では h_c が無限大に発散する。実験ではコラム径 ($D_{\text{GaN}}=86\sim 248 \text{nm}$) の GaN ナノコラム上に In 組成比 $\sim 30\%$ の InGaN ナノコラムを $\sim 400 \text{nm}$ 成長した。図3(a)は成長結晶の断面 TEM 像で、膜構造では $h_c < 30 \text{nm}$ で不整合転位が入るが、ナノコラムでは高品質の無転位結晶であった。 $D_{\text{GaN}} < \sim 130 \text{nm}$ ではアキシアル型、コラム径の太い領域ではコアシェル型 InGaN となる新たな成長現象を発見

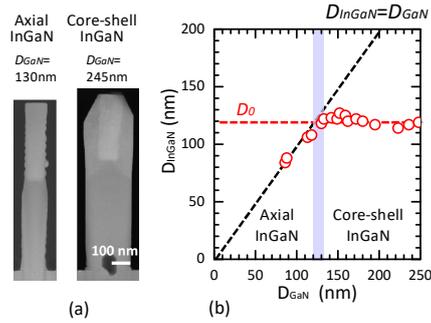


図3. 貫通転位フィルタリング効果

した³⁾。ひずみ極小化のため In 原子が成長中にコラムトップを拡散し組成変調が誘起されるため、InGaN 発光特性に関与する表面再結合とキャリア拡散効果を解明した¹⁾。

(3) 赤色域ナノコラム^{18, 19)}

波長 600nm で発光する InGaN/GaN 多重量子井戸ナノコラム(図4(a))の IQE を測定した。本研究では励起 PL 積分強度と光励起強度の比(PL 効率)の光励起密度依存性を求め(図4(b))、低温 PL 効率の最大値を IQE=100% として室温 IQE を算定する厳密な手法で IQE=22%

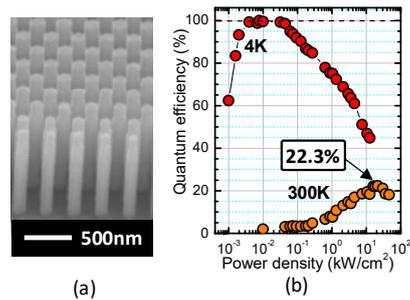


図4. InGaN ナノコラムの内部量子効率測定

を得た¹⁸⁾。また、表面プラズモン効果を発現させ、波長 600nm で 5 倍の発光増強効果を確認した。金属膜は発光層の近く形成する必要があるが薄膜構造では難しい。ナノコラムでは、電流注入機構とは独立にナノ構造側面に金属膜を装着できるので、プラズモンは赤色ナノコラム LED の高効率化に寄与しうる。

(4) ナノコラム LED/レーザ基盤技術の開拓

① Si 上ナノコラムとフリップチップ LED^{9, 14)}

2 インチ Si 基板にスパッター法で AlN 薄膜を成膜し、これを成長核形成層として、Si 上

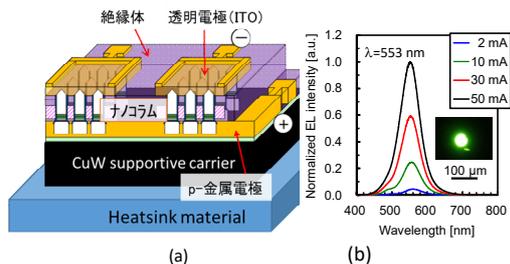


図5. フリップチップ型 LED と発光スペクトル

への規則配列 InGaN/GaN ナノコラムの成長法を開拓した。LED 結晶を Cu-W 支持基板に貼付けて、フリップチップ型ナノコラム LED を作製した(図 5(a))^{9,14}。波長 553nm の緑色発光が得られ、Si 除去も優れたナノコラム規則配列が保持されており、大面積・上下配線化への突破口が拓かれた。グラフェン/SiO₂ 基板上へのナノコラム成長に成功した⁷。グラフェンは横方向導電性がよく、光の透過率も高く、新たなデバイス構成ができ、将来のガラス基板上ナノコラムデバイスが現実的となり、更なる大面積化・高機能化への道が拓かれた。

② スペックルフリー・ナノコラムレーザ⁵⁾

AlGaIn/GaN 分布ブラッグ型反射鏡 (DBR) 上に InGaIn ナノコラムを成長させ、垂直方向の光閉じ込め作用を導入して、光励起レーザを実現した(図 6)。三角格子状(周期 250nm)ナノコラム配列において、コラム径を一次元方向で変化させた(93nm~213nm)一次元グレーディット構造において、ランダムレーズング特性を確認し、広い発振スペクトル幅 32nm を得た⁵⁾。コントラスト比 5% までのスペックル抑制効果が予測され、スペックルフリーレーザ開拓への道が拓かれた。

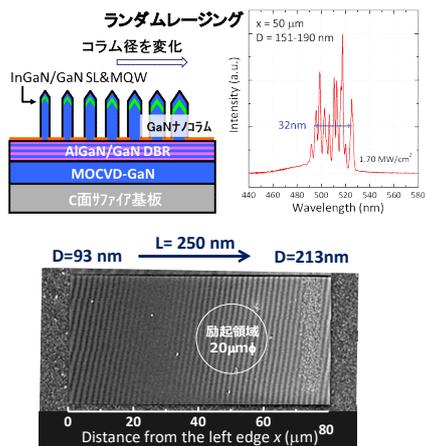


図 6. AlGaIn/GaN 多層膜反射鏡 (DBR) 上の一次元グレーディット構造ナノコラムレーザ

③ 高指向性放射ビーム・ナノコラム LED¹⁶⁾

規則配列ナノコラムのフォトニックバンド端における光回折を活用して、指向性の高い鋭い放射ビームをもつナノコラム LED を実現した(図 7)。黄色発光で放射角は±20 度であったが、発光波長の安定性が高く、電流密度変化 250A/cm² に対する波長変動幅は 0.2nm

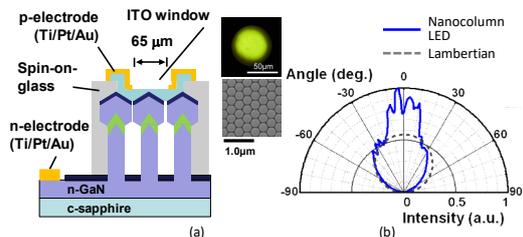


図 7. 放射ビーム指向性をもつナノコラム LED

以下である¹⁶⁾。フォトニックバンド端波長のコラムパラメータ依存性を実験的に調べ、LED 結晶の設計条件を明らかにして、高指向性放射ビーム LED を青、緑、黄、橙、赤色で実証した。優れたビーム特性はレンズ系を簡易化しディスプレイ応用に革新をもたらす。

(5) 発光色制御と多色集積型ナノコラム LED

① 多色集積型ナノコラム LED^{10,20)}

コラム周期と径を変化させて規則配列ナノコラムを成長し、コラム径による発光色変化を観測し、発光色制御メカニズムの理解を進めた。4 種類のナノコラム LED を同一基板上に成長させ、四色集積型ナノコラム LED を実現した(図 8)。これらは $L=300\text{nm}$ である。一方、周期の異なる ($L=350\text{nm}$) 接近した LED ユニットから赤色発光が得られ、三原色 LED の集積化の基礎技術が開拓された¹⁰⁾。

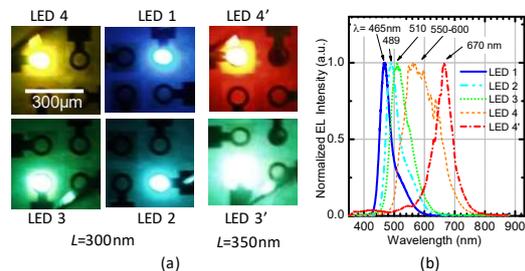


図 8. 多色集積型ナノコラム LED

② ナノコラム微細アレイ化

項目①では面積 $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ の規則配列ナノコラムのコラム径を変えて発光色制御を行ったが、本項では、図 9(a)のように面積 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ナノコラムのコラムパラメータを変化させて 4 つ配列したものをユニットとして、面内に敷き詰め、ナノコラム微細アレイ化を実現した。各微細領域は異なるピーク波長で発光し、直径 $100 \mu\text{m}$ 領域に電流注入したところ、青色から赤色域にブロードに広がったスペクトルとなり、白色発光が得られた。

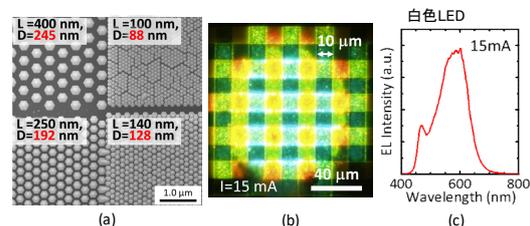


図 9. ナノコラム微細アレイ化

(6) ナノコラム関連ナノ結晶^{2,4,11)}

GaN ナノコラム上に成長した六角形 GaN マイクロディスクのウィスパーリングギャラリモード発振の解析を行い、環境センシング応用性を明らかにした¹¹⁾。

MBE 成長自己形成 GaN ナノコラムに Eu 添加を行い、高濃度 Eu 添加でも発光特性が劣化しにくいナノ結晶効果を実証した。Eu 添加

GaN ナノコラム LED の赤色発光動作に成功して、ピーク波長 620nm、半値幅 7nm のシャープなスペクトルを得た。電流変化による波長シフト量は 0.2nm と小さく、波長安定性の高い新たな発光デバイス潜在性を示した²⁾。

GaN の熱分解反応を利用する水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法を開発し、ディスク径 10-12nm の極微細 InGaN ナノディスクのエッチング作製に成功した⁴⁾。この微小ナノ構造でも明瞭な室温青色 PL 発光がみられ、HEATE 法の低損傷エッチング性が示された。

(7) InGaN ナノコラムの量子ドット効果⁶⁾

単一の InGaN ナノコラムの低温 (20K) 顕微発光分光では、線幅 $300\mu\text{eV}$ 程度の狭線発光が見られ (図 10 (a))、量子ドットの電子状態を持っていることが確認された。そこで、単一光子発生判定のために HBT 自己光強度相関測定を実施した。図 10 (b) のように明瞭なアンチバンチングが観測され、指標となる $g^{(2)}(0)$ は生データで 0.52 であった⁶⁾。本試料では他の局在状態、連続状態からの発光が残存しており、これを除去すると、 $g^{(2)}_{\text{corr}}(0) = 0.39$ となり、単一光子発生していることが実証された。この結果、高温動作可能、集積化可能な単一光子通信素子としてのナノコラムの有望性を強く示唆する成果を得た。

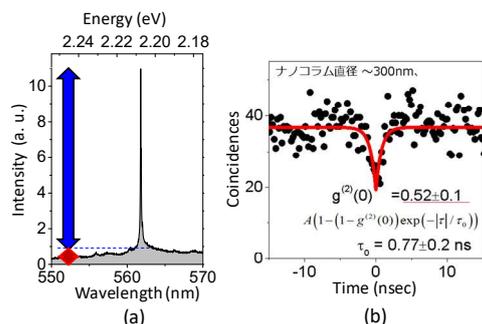


図 10 (a) InGaN ナノコラム狭線発光、(b) HBT (Hanbury Brown and Twiss) 自己光強度相関測定

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 70 件) (すべて査読有)

- ① T. Oto, Y. Mizuno, A. Yanagihara, K. Ema, and K. Kishino, “Effect of structural properties on optical characteristics of InGaN/GaN nanocolumns fabricated by selective area growth”, *Appl. Phys. Express* **10**, 045001 (2017). 10.7567/APEX.10.045001
- ② H. Sekiguchi et al., “Stable-wavelength operation of Europium-doped GaN nanocolumn light-emitting diodes grown by rf-plasma-assisted molecular beam epitaxy”, *Electron. Lett.* **53**, 666 (2017). 10.1049/el.2017.0447 (8名7番目)
- ③ T. Oto et al., “Influence of GaN column diameter on structural properties for InGaN nanocolumns grown on top of GaN nanocolumns”, *AIP Advances* **6**, 115214 (6pp) (2016). 10.1063/1.4968176 (8名8番目)

- ④ K. Ogawa, R. Hachiya, T. Mizutani, S. Ishijima, and A. Kikuchi, “Fabrication of InGaN/GaN MQW nano-LEDs by hydrogen-environment anisotropic thermal etching”, *phys. stat. soli. (a)* **214**, 1600613 (5pp) (2016). 10.1002/pssa.201600613
- ⑤ K. Kishino and S. Ishizawa, “Spectrally-broadened multimode lasing based on structurally graded InGaN nanocolumn photonic crystals suitable for reduction of speckle contrast”, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 071106 (5pp) (2016). 10.1063/1.4961306
- ⑥ T. Yamamoto, M. Maekawa, Y. Imanishi, S. Ishizawa, T. Nakaoka, K. Kishino, “Photon correlation study of background suppressed single InGaN nanocolumns”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 04EK03 (5pp) (2016). 10.7567/JJAP.55.04EK03
- ⑦ H. Hayashi, Y. Konno and K. Kishino, “Self-organization of dislocation-free, high density, vertically aligned GaN nanocolumns involving InGaN quantum wells on graphene/SiO₂ covered with a thin AlN buffer layer”, *Nanotechnol.* **27**, 055302 (7pp) (2016). 10.1088/0957-4484/27/5/055302
- ⑧ T. Kano et al., “GaN nanocolumn arrays with diameter <30 nm prepared by two-step selective area growth”, *Electron. Lett.* **51**, 2125-2126 (2015). 10.1049/el.2015.3259 (6名6番目)
- ⑨ H. Hayashi, D. Fukushima, T. Noma, D. Tomimatsu, Y. Konno, M. Mizuno, and K. Kishino, “Thermally engineered flip-chip InGaN/GaN well-ordered nanocolumn array LEDs”, *Photonic. Tech. Lett.* **27**, 2343-2346 (2015). 10.1109/LPT.2015.2463756
- ⑩ K. Kishino, A. Yanagihara, K. Ikeda, and K. Yamano, “Monolithic Integration of Four-Color InGaN-based Nanocolumn LEDs”, *Electron. Lett.* **51**, 852-854 (2015). 10.1049/el.2015.0770
- ⑪ T. Kouno, M. Sakai, K. Kishino, and K. Hara, “Sensing operations based on hexagonal GaN microdisks acting as whispering-gallery mode optical microcavities”, *Opt. Lett.* **40**, 2866-2869 (2015). 10.1364/OL.40.002866
- ⑫ N. Shimosako, Y. Inose, H. Satoh, K. Kinjo, T. Nakaoka, T. Oto, K. Kishino, and K. Ema, “Carrier-density dependence of photoluminescence from localized states in InGaN/GaN quantum wells in nanocolumns and a thin film”, *J. Appl. Phys.* **118**, 175702 (5pp) (2015). 10.1063/1.4935025
- ⑬ K. Kishino and S. Ishizawa, “Selective-area growth of GaN nanocolumns on Si (111) substrates for application to nanocolumn emitters with systematic analysis of dislocation filtering effect of nanocolumns”, *Nanotechnol.* **26**, 225602 (13pp) (2015). 10.1088/0957-4484/26/22/225602

- ⑭ H. Hayashi et al., “Flip-chip bonding and fabrication of well-ordered nanocolumn arrays on sputter-deposited AlN/Si (111) substrate”, *phys. stat. soli. (a)* **212**, 992-996 (2015). 10.1002/pssa.201431728 (6名6番目)
- ⑮ K. Sekine, Y. Onoue, T. Yoshiike, K. Asami, S. Ishizawa, T. Nakaoka, K. Kishino, “Single InGaN nanocolumn spectroscopy”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54**, 04DJ03 (2015). 10.7567/JJAP.54.04DJ03
- ⑯ A. Yanagihara, S. Ishizawa, and K. Kishino, “Directional radiation beam from yellow-emitting InGaN-based nanocolumn LEDs with ordered bottom-up nanocolumn array”, *Appl. Phys. Express* **7**, 112102(4pp) (2014). 10.7567/APEX.7.112102
- ⑰ K. Kishino and K. Yamano, “Green-Light Nanocolumn Light Emitting Diodes with Triangular-Lattice Uniform Arrays of InGaN-Based Nanocolumns”, *IEEE J. Quantum Electron.* **50**, 538-547 (2014). 10.1109/JQE.2014.2325013
- ⑱ Y. Igawa, R. Vadivelu and K. Kishino, “Photoluminescence Behaviors of Orange-Light-Emitting InGaN-Based Nanocolumns Exhibiting High Internal Quantum Efficiency (17-22%)”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JD09 (3pp) (2013). 10.7567/JJAP.52.08JD09
- ⑲ R. Vadivelu, Y. Igawa and K. Kishino, “633nm Red Emissions from InGaN Nanocolumn Light-Emitting Diode by Radio Frequency Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **52**, 08JE18(2pp) (2013). 10.7567/JJAP.52.08JE18
- ⑳ K. Kishino, K. Nagashima, and K. Yamano, “Monolithic Integration of InGaN-Based Nanocolumn Light-Emitting Diodes with different Emission Colors”, *Appl. Phys. Express* **6**, 012101 (2013). 10.7567/APEX.6.012101

[学会発表] (計 273 件)

- ① K. Kishino et al., “Nanocolumn (NC) multicolour LEDs and related growth technology”, *Light Sources 2016 (LS-15)*, Kyoto, Japan, May 22-27, 2016. **(Keynote lecture)** (5名1番目)
- ② K. Kishino et al., “Progress on InGaN-based Orderly Arrayed Nanocolumn Technology”, *10th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2014)*, Kaosiung, Taiwan, December 14-19, 2014. **(Plenary talk)** (12名1番目)
- ③ K. Kishino et al., “InGaN-based nanocolumns for photonic devices”, *International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2012)*, Sapporo, Japan, October 14-19, 2012. **(Plenary talk)** (4名1番目)

[図書] (計2件)

岸野克巳、シーエムシー出版、GaNナノコラム発光デバイス(ナノワイヤ最新技術の基礎と応用展開、第Ⅲ編デバイス第1章)、2013、188-197.

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称：光デバイスおよび光デバイスの製造方法

発明者：岸野克巳、石沢峻介

権利者：学校法人 上智学院

種類：特許

番号：特許願 2017-037093

出願年月日：平成 29 年 2 月 28 日

国内外の別：国内

[その他]

<http://rscdb.cc.sophia.ac.jp/Profiles/60/0005910/profile.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸野 克巳 (KISHINO, Katsumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90134824

(2) 研究分担者

大槻 東巳 (OHTSUKI, Tomi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：50201976

(3) 研究分担者

関口 寛人 (SEKIGUCHI, Hiroto)

豊橋技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00580599

(4) 研究分担者

光野 徹也 (KOUNO, Tetsuya)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：20612089

(5) 研究分担者

江馬 一弘 (EMA, Kazuhiro)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：40194021

(6) 連携研究者

菊池 昭彦 (KIKUCHI, Akihiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90266073

(7) 連携研究者

中岡 俊裕 (NAKAOKA, Toshihiro)

上智大学・理工学部・准教授

研究者番号：20345143

(8) 連携研究者

野村 一郎 (NOMURA, Ichirou)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：00266074

(9) 連携研究者

関根 智幸 (SEKINE, Tomoyuki)

上智大学・理工学部・名誉教授

研究者番号：60110722

(10) 連携研究者

音 賢一 (OTO, Kenichi)

千葉大学・大学院理科学研究科・教授

研究者番号：30263198