

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：32621

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310106

研究課題名(和文) InGaN量子構造活性層を内在する超薄膜GaNナノウォール発光デバイスの研究

研究課題名(英文) Research on ultrafine GaN nanowall light-emitting devices having InGaN quantum active layer

研究代表者

菊池 昭彦 (KIKUCHI, Akihiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号：90266073

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：窒化物半導体GaNナノウォール結晶を中心に、形状制御限界に迫る微細ナノ結晶(<50nm)の実現と光デバイス応用技術の開発を目標とした。GaNの低損傷エッチング技術である水素雰囲気異方性熱エッチング法を開発し、幅28nmのInGaN/GaNナノウォールやナノピラーの作製、青色ナノLEDの室温電流注入発光、および直径10nmのGaNナノピラーの作製を実証し、研究目標を達成した。

また、世界最高水準の広帯域(波長315～780nmの平均透過率88.2%)と高導電性(7.6 /sq.)を有するMgZnO/Ag(Al)/MgZnO透明度電膜と新しい機能性薄膜の堆積技術(ナノミスト堆積法)を開発した。

研究成果の概要(英文)：Based on GaN nanowall crystal, we aimed to develop ultrafine GaN nanostructures approaching the limit of artificial fabrication limit (< 50 nm in width), and application technology for optoelectronic devices. We have developed a low-damage GaN etching technique of hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE), fabricated InGaN/GaN nanowalls and nanopillars with lateral dimension of 30 nm, demonstrated room temperature current injection blue-color emission from InGaN/GaN nano-LEDs, and realized GaN nanopillars with smallest diameter of 10 nm. The research goal have been achieved.

We also obtained unplanned results of the high performance transparent conductive film with a high average transmittance of 88.2% (315-780 nm) and low sheet resistance of 7.6 ohm/sq., and development of a solution based deposition technique named "nano-mist deposition (NMD)" for functional thin films.

研究分野：半導体工学

キーワード：ナノ光デバイス 量子構造 化合物半導体 ナノ結晶 ナノ加工 窒化物半導体 発光ダイオード エッチング

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、1996年に GaN 極微細柱状ナノ結晶 (ナノコラム) を世界に先駆けて開発し、貫通転位フリー性や優れた発光特性の検証、InGaN 活性層を用いたナノコラム LED による可視全域における電流注入発光の実証など、窒化物ナノ結晶分野で多くの先導的成果を報告してきた^{①-④}。特に、Ti マスク選択成長技術による GaN ナノ結晶の位置・形状制御技術の開発は、当該分野に大きなインパクトを与えた^⑤。GaN ナノウォール結晶は、基板上に形成した幅数十～数百ナノメートルのストライプ状開口パターンに沿って垂直に成長する形状制御性に優れたナノ結晶であり (図 1)、研究代表者が 2006～2008 年度に受けた基盤研究 (B) 「InGaN ナノコラムの多色発光機構の解明とデバイス応用に関する研究」の実施過程で創出した貫通転位フリーの超高品質シート状 GaN ナノ結晶である^{⑥、⑦}。本研究開始当初において、GaN ナノウォールは独自性の高い技術であり、その学術的研究やデバイス応用技術は未開拓であった。

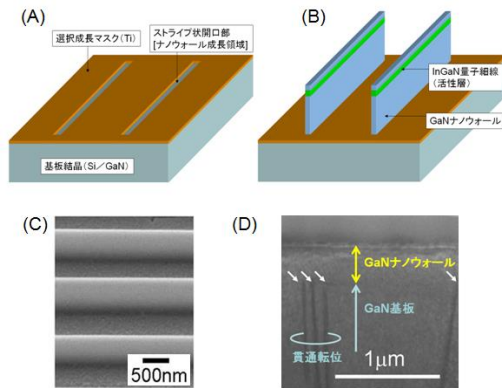


図 1. GaN ナノウォールの成長モデル図 (A)、(B)、鳥瞰 SEM 像 (C)、断面 TEM 像 (D)

2. 研究の目的

本研究では、窒化物半導体ナノ結晶の特徴的な一形態である GaN ナノウォールをベースとして、人工的に形状制御可能な究極のナノ結晶の実現と光デバイス応用技術の開拓を目的とした。具体的には、(1)ナノウォール結晶の超薄膜化 (<50nm)、(2)InGaN 量子細線および量子ドット活性層の内在化と基礎物性評価、(3)ナノウォールを用いるナノ光デバイスの開拓、を目標として研究を実施した。

3. 研究の方法

結晶成長には、rf プラズマ励起窒素を窒素原料とし、他の原料 (Ga、In、Mg、Si) を K セルから抵抗加熱によって供給する分子線エビタキシー (RF-MBE) 法を用い、基板には (0001) 面 Al₂O₃ 基板上に有機金属気相堆積 (MOCVD) 法で成長した n-GaN テンプレートを使用した。研究開始当初における InGaN/GaN ナノウォール結晶の成長には、規則配列 GaN ナノコラムやナノウォールの成長に用いてきた実績のあ

る Ti マスク選択成長法を採用した。しかしながら、RF-MBE による Ti マスク選択成長法で幅 60nm 以下の InGaN 活性層を内在する超薄膜 GaN ナノウォールを成長すると、ナノウォールの長軸方向に周期的なたわみが生じる現象が見いだされた。これは、成長温度と室温における InGaN と GaN の熱膨張係数差と格子不整合に起因する長軸方向の応力が生じたためであると考察した。この問題を回避し、ナノウォールやナノピラーの極限微細化を実現するために、本研究で新規に開発したトップダウン型の GaN ナノ加工技術である水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法を用いた。

研究の実施においては、ナノウォール結晶の微細化に向けた電子ビームリソグラフィ (EBL) による微細パターン描画技術の確立、RF-MBE 選択成長で作製した幅 150～200nm 程度の InGaN/GaN ナノウォールの光学特性評価、FDTD 法によるナノウォールの光導波特性解析、トップダウン加工技術である HEATE 法の新規開発、HEATE 法による GaN 結晶の加工特性の理解と低加工損傷性の検証、InGaN/GaN 量子井戸エビ基板からの微細 InGaN/GaN ナノウォールおよびナノピラーの作製と光学特性評価、HEATE 法による加工条件の最適化と極限ナノ加工の試み、InGaN/GaN ナノウォール LED およびナノピラー LED の作製と評価など、適時テーマを設定し、研究の進捗状況や問題点に対応ながら研究目標の達成に向けた効率的な遂行を心掛けた。

また、GaN ナノウォールやナノピラーを有機半導体と組み合わせる新しい有機/無機複合型光デバイスへの展開を見据え、ナノ構造上へも成膜が可能と期待される有機薄膜成膜技術 (ナノミスト堆積法) や高性能透明導電膜技術についても検討を行った。

4. 研究成果

(1)選択成長法 InGaN/GaN ナノウォールの作製と光励起発振： EBL によるナノパターン描画条件および RF-MBE 法による Ti マスク選択成長法で InGaN 量子井戸を内在する GaN の成長条件を最適化することにより、ウォール幅 150～250nm の極めて制御性に優れた GaN ナノウォールアレイを得た。図 2(A)-(C)は周期の異なるナノウォールアレイの上面 SEM 像であり、周期 300nm、幅 250nm、ウォール間隔 50nm の超高密度 GaN ナノウォールアレイ構造を実現した (図 2(C))。また、InGaN 量子井戸を内在する周期 500nm、幅 240nm の青色 InGaN/GaN ナノウォールアレイを室温において波長

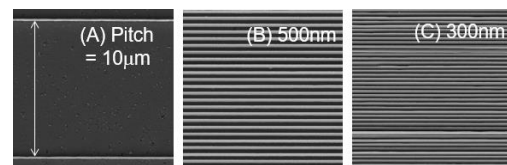


図 2. GaN ナノウォールの上面 SEM 像の例
周期：(A)10μm、(B)500nm、(C)300nm

355nm、パルス幅 5nm の YAG レーザで光励起したところ、GaN ナノウォールと空気の周期構造を共振器とする室温光励起発振を得た。図 3 に単一パルス励起時のスペクトルを示す。発振波長 366.8nm、半値全幅 0.13nm であり、発振は GaN ナノウォールが利得媒質となっていると考えられる。この試料では InGaN 層が薄く利得領域が少ないため、InGaN からの可視域での誘導放出は確認されなかった。

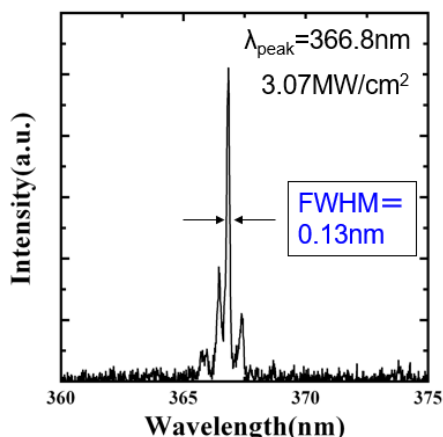


図 3. InGaN/GaN ナノウォールアレイの室温単一光パルス励起時の発振スペクトル

(2) 水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法の開発： 窒化物半導体ナノ構造の新しい作製法である水素雰囲気異方性熱エッチング (Hydrogen Environment Anisotropic Thermal Etching: HEATE) 法を開発した。HEATE 法は、減圧水素雰囲気中での GaN 結晶の熱分解反応を利用するエッチング技術である。熱力学解析により次式の反応が主体であることを確認した。(s) と (g) はそれぞれ固相と気相を表す。

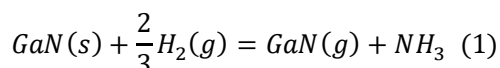


図 4 に HEATE 法で作製した GaN ナノウォール構造の鳥瞰 SEM 像および断面の原子配列を示す。SiO₂ マスクは GaN の a 軸に沿ったパタ

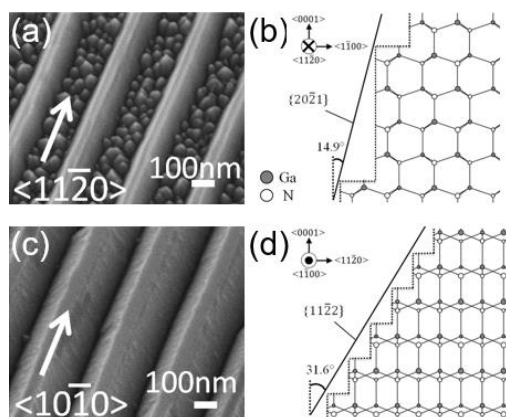


図 4. HEATE 法で作製した GaN ナノウォールの結晶方位依存性 (a): a 軸ストライプ、(b): m 軸ストライプ

ーン (a) と m 軸に沿ったパターン (b) を用いた。エッチングは 1050°C、10Pa、15min で行った。ナノ構造の高さは約 240nm、上部幅 50nm の台形状であり、a 軸に沿ったナノ構造の側面は極めて平坦であり、m 面から 14.9 度傾斜した {20_21} 面やその高指数面が形成された。一方、m 軸に沿ったナノ構造の側面は微細な突起構造を有し、a 面から 31.6 度傾斜した {11_22} 面が形成された。また、円形マスクを用いると六角錘台構造のナノピラーが形成され、側面は六つの {20_21} 面あるいはその高指数面で囲われており、これらの面が安定面であることが確認された。

(3) 超薄膜 GaN ナノウォール結晶と超微細 GaN ナノピラーの作製： 図 5 に SiO₂ マスク除去前後における GaN ナノウォール構造の上面 SEM 像を示す。SiO₂ 除去前後でいずれも幅 38nm と変わらず、SiO₂ 下部のサイドエッチングが数 nm 以下と極めて少ない条件でエッチング可能であることがわかった。また、図 6(a) は a 軸方向 GaN ナノウォールの断面 SEM 像であり、上部幅 24nm の超薄膜ナノウォールの形成に成功し、当初の目標であった幅 50nm 以下の GaN ナノウォールの作製を達成した。また、HEATE の熱処理時間を増加すると GaN ナノ構造の側面方向にエッチングが始まり、SiO₂ マスク下のアンダーカットが生じて m 面に近い高指数面が現れ、垂直に近い形状が得られることを見出した。この手法によって、SiO₂ 円形マスク下に直径 10nm という加工限界に迫る超微細 GaN ナノピラーの作製に成功した。我々の知る限りにおいて、この値はこれまでの位置制御可能なエッチング加工で作製された GaN ナノ構造における最小値である。

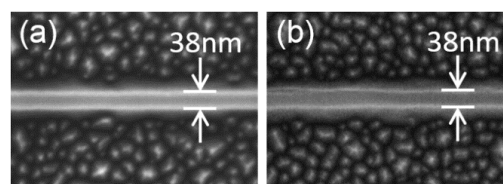


図 5. HEATE 法で作製した GaN ナノウォールの上面 SEM 像 (a): SiO₂ マスク除去前、(b): SiO₂ マスク除去後

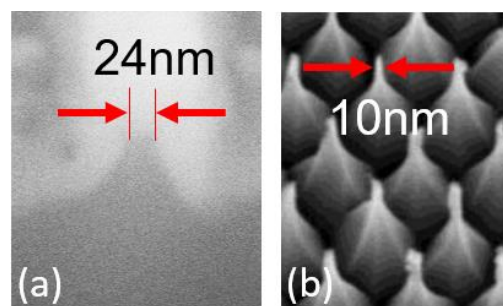


図 6. HEATE 法で作製した GaN ナノウォールの断面 SEM 像(a)、と長時間 HEATE で作製した超微細 GaN ナノピラーの鳥瞰 SEM 像(b)

(4) InGaN 量子細線および量子ドットの内在化と基礎特性： (0001) 面 Al_2O_3 基板上に MOCVD 法で作製した p-GaN(52nm)/ $In_{0.18}Ga_{0.82}N$ (3nm)/n-GaN/AlGaIn/GaN 単一量子井戸エピウエハ表面に、厚さ 100nm の SiO_2 ナノマスクを形成した。この試料を水素圧力 10Pa、温度 1050°C で 12.5 分間 HEATE 加工し、高さ 100~110nm の a 軸および m 軸に沿ったナノウォール、三角格子配列のナノピラーおよび $150\mu m \times 150\mu m$ のメサ構造等を作製した。光学特性評価には、He-Cd レーザ (発振波長 325nm) による室温 PL 測定を用いた。

図 7 に作製した InGaN/GaN 量子井戸を内在するナノウォールの鳥瞰 SEM 像を示す。a 軸に沿ったナノウォール (図 7(a)) の側面には、上述のように平坦な {20-21} 面あるいはその高指数面が形成された。一方、m 軸に沿ったナノウォール (図 7(b)) の側面には {20-21} 面やその高指数面で形成される三角形の凹凸構造が現れた。これは GaN 単膜の場合と異なる形状であり、InGaN を含む pn 接合ウエハを使用した際に観察された。図 8(a)-(e) は、 SiO_2 ナノマスクの直径を変えて作製した InGaN/GaN-SQD ナノピラーの上面 SEM 像と鳥瞰 SEM 像の例であり、内在する六角形 InGaN 量子ディスク (SQD) の直径 (対辺間距離 d) は 50nm (a) から 322nm (e) と見積もられた。

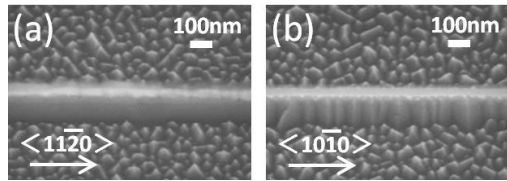


図 7. HEATE 法で作製した InGaN 単一量子井戸を内在するウォール構造の鳥瞰 SEM 像。(a) : a 軸ストライプ、(b) : m 軸ストライプ。

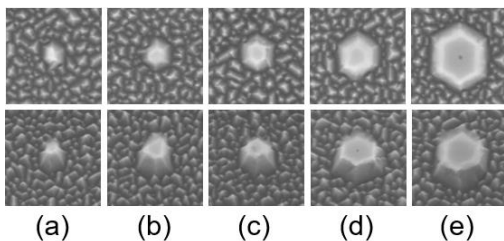


図 8. 様々な直径 d の InGaN 単一量子ディスクを内在する InGaN/GaN-SQD ナノピラーの上面 SEM 像 (上段) と鳥瞰 SEM 像 (下段) の例 (a) d=50nm、(e) d=322nm

図 9 に InGaN-SQW 元ウエハおよび、HEATE で作製したナノウォール (InGaN 層幅 57nm、周期 300nm)、ナノピラー構造 (InGaN 直径 140nm、ピッチ周期 400nm) の室温 PL スペクトルを示す。HEATE 加工後の PL スペクトルは、パシベーション処理等を行っていない状態で測定した。InGaN 層が露出する深さで 1050°C の高温熱処理を経たにも関わらず InGaN 量子井戸からの明瞭な発光 (ピーク波長 425nm) が観測された。HEATE 後のピーク波長は最大 15nm 短波

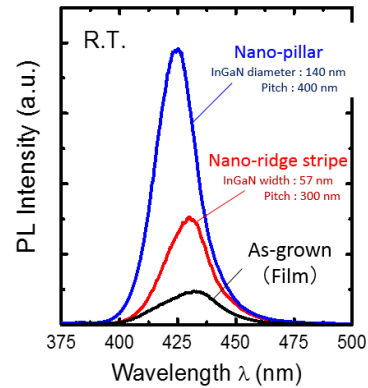


図 9. HEATE 法で作製した InGaN 単一量子井戸を内在するナノ構造の室温 PL スペクトル

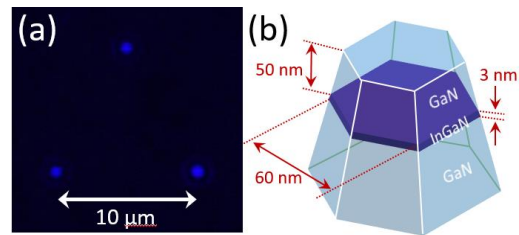


図 10. 周期 $10\mu m$ で三角格子状に配置した直径約 60nm の InGaN-SQD ナノピラーの室温蛍光顕微鏡像(a)、および構造図(b)

長化しており、その原因には In の脱離や歪緩和、In 拡散による量子井戸の形状変化など複数の可能性が考えられる。図 10 に周期 $10\mu m$ で三角格子状に配列した直径約 60nm の InGaN-SQD ナノピラーの水銀ランプ励起室温蛍光顕微鏡像を示す。加工後の特別な処理等を行わずに単一の微細 InGaN-SQD からの明瞭な室温発光が観察され、HEATE 法が低損傷な加工技術であることが示された。

(5) HEATE 法で作製した InGaN/GaN ナノ構造の発光特性評価： 周期 400nm および 800nm で配置された InGaN-SQD ナノピラーアレイの発光特性の InGaN ディスク直径依存性を評価した。図 11(a) に PL 強度および図 11(b) に PL ピーク波長の InGaN-SQD の直径 d 依存性をそれぞれ示す。InGaN 層の直径や周期が異なる試料を比較するため、強度は InGaN 層の面積で規格化した。PL 強度は $d \geq 200nm$ では発光強度はほぼ一定であり、d が 200nm から 116nm に

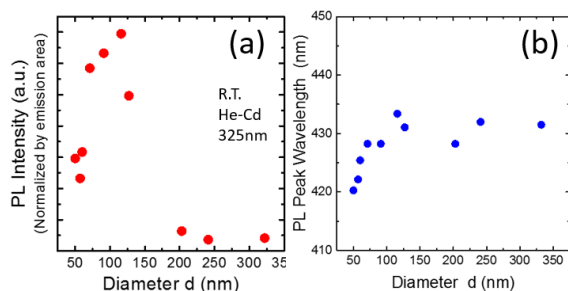


図 11. InGaN SQD ナノピラーアレイの室温における(a)PL 発光強度および(b)ピーク波長の SQD 直径 d 依存性 (強度は活性層面積で規格化)

減少するにつれ急速に増加し、 $d \leq 100\text{nm}$ で減少に転じた。 $d=166\text{nm}$ の強度は $d=332\text{nm}$ に対して約 17 倍であり、この PL 強度の増加原因としてナノ構造による光取出し効率の向上、InGaN の歪緩和効果、貫通転位隔離効果等が考えられる。 $d \leq 100\text{nm}$ での強度低下は表面非発光再結合の影響と考えられる。PL ピーク波長は $d=332\text{nm}$ から 116nm までほぼ一定値をとり、 $d \leq 100\text{nm}$ で短波長化した。これは $d=100\text{nm}$ 以下で InGaN 層の歪緩和効果が顕在化したことを示唆している。

(6) InGaN/GaN ナノ構造 LED の作製と評価：

HEATE 法を用いて InGaN/GaN ナノ構造 pn 接合 LED を作製し、電流注入発光特性を評価した。HEATE 加工後、試料表面を SOG で埋め込み、 CF_4 プラズマエッチングで p 層の一部を露出させた後、 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ のナノパターン領域全面に ITO 電極を形成した。図 12 (a) に作製したナノ構造 LED の断面構造図を、(b) と (c) にはナノウォール LED およびナノピラー LED の電流注入発光像をそれぞれ示す。図 12 は電流-電圧-光出力特性の一例であり、電流電圧特性は良好な整流性を示し、順方向電流は約 3V で立ち上がり、逆方向リーク電流は -5V 時に -6.4nA であった。順方向電流注入時に明瞭な青色発光が観察され、電流の増加に伴い光出力が増加した。初期段階ではあるが、HEATE 法によって作製した InGaN ナノ構造 LED における室温電流注入発光を実証した。

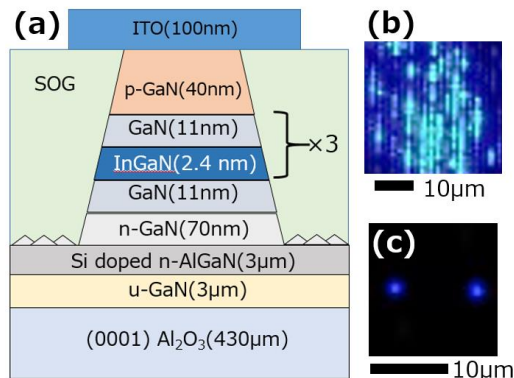


図 12. HEATE 法で作製した InGaN/GaN ナノ構造 LED の断面構造図(a)と発光像(b),(c)

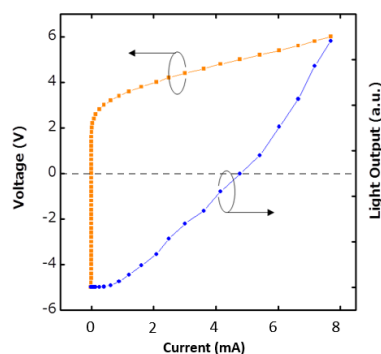


図 13. InGaN/GaN ナノ構造 LED の室温における電流-電圧-光出力特性の一例

(7) 予定外の研究成果 (無機/有機ハイブリッド LED、ナノミスト堆積法、高性能 MgZnO/Ag(Al)/MgZnO 多層構造透明導電膜)： 蛍光系 (F8BT) および燐光系 (PVK : Ir(ppy)₃) 有機発光層を ZnO と MoO₃ で挟んだ無機/有機ハイブリッド LED (IO-HyLED) に、MgZnO や自己配列双極子分子、Cs₂CO₃ を組合せた多重中間層を導入し、発光特性の顕著な向上が得られることを見出した。MoO₃/F8BT/ZnO 系 IO-HyLED において、ZnO/Ag/ZnO 多層構造 (誘電体/金属/誘電体 : DMD) が ITO と遜色ない透明導電膜として利用可能であることを示し、Duty 比 1% のパルス駆動でピーク輝度 237,000cd/m² という高輝度発光を得た。

低コスト大面積化が可能な溶液ベースの成膜技術である三電極型静電塗布法 (ナノミスト堆積法 : NMD 法) が、高分子 F8BT 系 IO-HyLED や低分子 Alq₃/NPB 積層構造などの作製に有効であることを示した。

MgZnO/Ag/MgZnO-DMD の Ag 層に Al を 1.7at% 添加することにより、耐熱性が向上し、可視域のプラズモン吸収が抑制されることを見出し、紫外 (UVA) から可視 (315~780nm) 全域における平均透過率 88.2%、シート抵抗 7.6 Ω/sq. という最高水準の透明導電膜の作製に成功した。

<引用文献>

- ①M. Yoshizawa, A. Kikuchi et al. Jpn. J. Appl. Phys., 36, (1997) L459.
- ②M. Yoshizawa, A. Kikuchi et al. J. Cryst. Growth, 189/190 (1998) 138.
- ③A. Kikuchi, K. Yamano et al. physica status solidi (b), 241 (2004) 2754.
- ④A. Kikuchi, M. Kawai et al. Jpn. J Appl. Phys. (Exp. Lett.) 43 (2004) L1524.
- ⑤H. Sekiguchi, A. Kikuchi et al, Applied Physics Express, 1, (2008) 124002.
- ⑥A. Kikuchi, T. Hoshino et al. MRS Fall Meeting, Q4.6, Boston, USA, 2007/11/26-30.
- ⑦A. Kikuchi, K. Kishino et al. SPIE Photonics West, 6894-04, San Jose, USA, 2008/01/19-24.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

- ①Y. Sugimoto, K. Igarashi, S. Shirasaki, and A. Kikuchi, "Effect of Al doping in the Ag layer of MgZnO/Ag/MgZnO dielectric/metal/dielectric UV-visible transparent conductive films", Physica Status Solidi C, 査読有, (2016) online 16 Mar. 2016. (DOI: 10.1002/pssc.201510290)
- ②J. Kamimura, M. Ramsteiner, U. Jahn, C-Y. J. Lu, A. Kikuchi, K. Kishino and H. Riechert, "High-quality cubic and hexagonal InN crystals studied by micro-Raman scattering and electron backscatter

diffraction”, Journal of Physics D: Applied Physics, 査読有, 49 (2016) 155106. (DOI: 10.1088/0022-3727/49/15/155106)

③Y. Niinuma, Y. Takatsuka, R. Terada, H. Ueda and A. Kikuchi, “Deposition characteristics of small-molecule CBP:PBD:TPD:Ir(mppy)₃ organic thin films using a modified electrospray deposition method”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 55 (2016) 04EL01. (DOI: 10.7567/JJAP.55.04EL01)

④R. Kita, R. Hachiya, T. Mizutani, H. Furuhashi and A. Kikuchi, “Characterization of hydrogen environment anisotropic thermal etching and application to GaN nanostructure fabrication”, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, 54 (2015) 046501. (DOI: 10.7567/JJAP.54.046501)

⑤J. Kamimura, K. Kishino and A. Kikuchi, “Growth of very large InN microcrystals by molecular beam epitaxy using epitaxial lateral overgrowth”, Journal of Applied Physics, 査読有, 117 (2015) 084314. (DOI: 10.1063/1.4913626)

⑥Y. Shimada, J. Ishino, S. Shirasaki, T. Irie, and A. Kikuchi, “Effect of MgZnO-bilayer/BA-CH₃ combination interlayer on emission characteristics of MoO₃/F8BT/ZnO hybrid light emitting diodes fabricated on ZnO/Ag/ZnO transparent cathode”, Displays, 査読有, 34, 5 (2013) 437-441. (DOI: 10.1016/j.displa.2013.08.006)

⑦R. Bardoux, M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, A. Kikuchi and K. Kishino, “Two-photon absorption induced anti-Stokes emission in single InGaN/GaN quantum-dot-like objects”, physica status solidi, Rapid Research Letters, 査読有, 7, 5 (2013) 344 - 347. (DOI: 10.1002/pssr.201307067)

⑧R. Bardoux, M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, A. Kikuchi, and K. Kishino, “Complex strain distribution in individual faceted InGaN/GaN nanocolumnar heterostructures”, Optical Materials Express, 査読有, 3, 1 (2013) 47-53. (DOI: 10.1364/OME.3.000047)

[学会発表] (106件)

(国際会議 65件、研究会 6件、国内学会 65件：内、招待講演 7件)

①A. Kikuchi, R. Hachiya, T. Mizutani, S. Ishijima, and K. Ogawa, “Low-damage top-down fabrication of InGaN/GaN single quantum disk nanopillars by hydrogen environment anisotropic thermal etching”, 4th Nano Today Conference, D3.1, Dubai, Emirate of Dubai, December 6-10, 2015.

②T. Mizutani, R. Hachiya, K. Ogawa, S.

Ishijima, and A. Kikuchi, “Optical property of InGaN/GaN single quantum disk nano-pillars fabricated by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)”, 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6), We-B7, Act City Hamamatsu, Hamamatsu, Shizuoka, Japan, November 8-13, 2015.

③A. Kikuchi, R. Hachiya, and T. Mizutani, “Fabrication of InGaN/GaN quantum well based nanostructures by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)”, Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices - 2015 German-Japanese-Spanish Joint Workshop -, Mo-5, Shiran-Kaikan, Kyoto University, Kyoto, Japan, July 11-14, 2015. (招待講演)

④A. Kikuchi, R. Kita, R. Hachiya, and T. Mizutani, “Fabrication of GaN based nanostructures by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)”, The 7th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors, TUP2-38, Seoul, Korea, May 17-20, 2015.

⑤菊池昭彦、蜂屋諒、水谷友哉、”窒化物半導体ナノ結晶デバイス作製に向けた水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法の検討”、日本学術振興会 将来加工技術第 136 委員会 平成 26 年度第 1 回研究会、プラザエフ、千代田区、東京、2015 年 4 月 23 日。 (招待講演)

⑥A. Kikuchi, R. Kita, and R. Hachiya, “Hydrogen Environment Anisotropic Thermal Etching (HEATE) of (0001) GaN for Nanostructure Fabrication”, The 8th International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2014), TuGP69, Wroclaw, Poland, August 24-29, 2014.

⑦菊池昭彦、島田雄平、石野隼一、喜多諒、”誘電体/金属多層構造透明導電膜を用いた無機/有機複合 LED の作製と評価”、IDY2013-1、映像メディア学会、情報ディスプレイ研究会、東京、2013 年 3 月 15 日。 (招待講演)

[図書] (計 1 件)

①菊池昭彦、”MoO₃/ZnO/F8BT 系 無機/有機複合型 LED の作製と評価”、pp. 40-46、月刊ディスプレイ Vol. 18 No. 9、2012 年 9 月号特集「有機 EL の最新技術とトレンド」、(株)テクノタイムズ社、ISSN 1341-3961、2012/9/1 発行。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 昭彦 (KIKUCHI, Akihiko)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号： 90266073

(2) 連携研究者

岸野 克己 (KISHINO, Katsumi)

上智大学・理工学部・教授

研究者番号： 90134824