

令和元年6月18日現在

機関番号：32621

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14260

研究課題名（和文）AlGaIn/GaNナノ結晶光共振器を用いた有機半導体レーザの開発研究

研究課題名（英文）Research on organic semiconductor laser using AlGaIn/GaN nano-optical resonator

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） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：窒化物半導体ナノ光共振器と有機半導体活性層を有するハイブリッド有機半導体レーザの基盤技術開発を目指した研究を実施した。有機半導体活性層に関しては、静電塗布法を用いる板状有機単結晶成長法と分子ドーピング法の開発、ドーパント分子の配向特性評価、ドーパント分子からの誘導放出の観測などの先駆的成果を得た。また、水素支援熱分解を利用する窒化物半導体ナノ加工技術（HEATE）においてアンモニアを添加すると垂直エッチングが可能となることを見出し、様々な高アスペクト極微細ナノ光共振器を作製可能であることを実証した。これらの成果は窒化物半導体ナノ共振器型有機半導体レーザの実現に大きく寄与すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

低コスト高効率な可視域レーザ光源として期待される電流注入型有機半導体レーザの基盤技術開発を行った。静電塗布法を用いる有機単結晶成長法や分子ドーピング技術の開発は世界的にも先駆的な成果であり、分子ドーピング有機単結晶における学術的知見や応用上の有機半導体の機能性向上に資する成果である。また、新規に開発したアンモニア添加HEATE法による窒化物半導体の低損傷高アスペクトナノ構造を作製技術は、多様な形状のナノ光共振器構造の作製に適用可能であり、ハイブリッド有機半導体レーザのみならず窒化物半導体極微細ナノ構造の学術的解明や産業応用への利用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed at developing basic technology for hybrid organic semiconductor lasers with nitride semiconductor nano-optical resonators and organic semiconductor active layers. With regard to the organic semiconductor active layer, we have achieved pioneering results such as development of plate-like organic single crystal growth method and molecular doping method those using electrospray deposition, evaluation of molecular alignment of dopants, observation of stimulated emission from dopant molecules. We also found out that adding ammonia during HEATE which is nitride semiconductor nanofabrication technology using hydrogen assisted thermal decomposition, enables vertical etching. It was demonstrated that various kinds of high aspect ultrafine nano optical resonators. These achievements are expected to contribute to the realization of a nitride semiconductor nanocavity organic semiconductor lasers.

研究分野：半導体工学

キーワード：光デバイス 有機半導体レーザ 有機半導体 窒化物半導体 光共振器 有機単結晶 ナノ構造 酸化物半導体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

電流注入型有機半導体レーザーは、低コスト、高効率、可視全域における発振可能性を有する魅力的なデバイスである。しかし、様々な有機材料において光励起による自然放出光の増幅現象 (ASE) やレーザー発振の観測が報告されていたが、電流注入励起では、有機半導体への高密度電流注入の困難さ、高キャリア注入時の励起子失活や電極吸収損失などの複数の要因によってレーザー発振が阻害されていた。これらの課題解決に向け、新しい有機材料や動作原、デバイス構造等の様々な研究が精力的に進められてきたが、電流注入型有機半導体レーザーは未だ実現されていない重要な課題であった。

### 2. 研究の目的

研究目的 (概要) ※ 当該研究計画の目的について、簡潔にまとめて記述してください。

本研究は、多くの研究者の挑戦を退けてきた電流注入型有機半導体レーザーを実現するための基盤技術開発を目的とした。具体的には、申請者の独自技術である水素雰囲気異方性熱エッチング (HEATE) 法を用いた窒化物半導体 (AlGaIn/GaN 系) 光共振器構造 (フォトリソニック結晶:PhC やウィスパーリングギャレリーモード:WGM など) 作製技術の開発、および非晶質あるいは単結晶有機半導体薄膜の作製技術の開発を行い、それらを組み合わせた有機/無機ハイブリッド型半導体レーザー構造に向けた基盤技術を開拓して、電流注入型有機半導体レーザーの実用化に向けた端緒を開くことを目標とした。

### 3. 研究の方法

本研究で提案する有機/無機ハイブリッド型半導体レーザーの活性層には、高い発光効率と広範な発振波長帯域を有する有機半導体を用い、電流注入層と光共振器には優れた導電性制御が可能で可視領域の吸収損失が極めて低い窒化物半導体を用いる。本研究では、(1) 有機半導体の成膜および単結晶成長技術の開発、および (2) 独自技術である HEATE 技術による窒化物半導体ナノ構造光共振器作製技術の開発を実施課題とした。

### 4. 研究成果

#### (1) 有機半導体成膜技術と単結晶成長技術の開発

① 非晶質有機薄膜の成膜法として図1に示す静電塗布法を用い、噴霧ノズル先端に複数の液糸が形成されるマルチモードを用いると噴霧される液滴の微細化と単分散性の向上が得られることを見出した。マルチモード下ではナノサイズの液滴が形成されるため、ナノミスト堆積法 (NMD 法) と呼称する。マルチモードを安定制御する目的で図2に示すようにノズル先端に突起を形成したところ、突起数の増加にともなう液滴径が減少し、最大突起数4本においてITOコートガラス基板上に表面粗さ RMS 値 4nm 程度の極めて平坦な有機半導体薄膜の成膜に成功した (図3)。また、ノズル先端の電界強度分布シミュレーション (図2) を行い、液滴の微細化の主要因がノズル先端突起部への溶液供給速度の低減であることを示した。

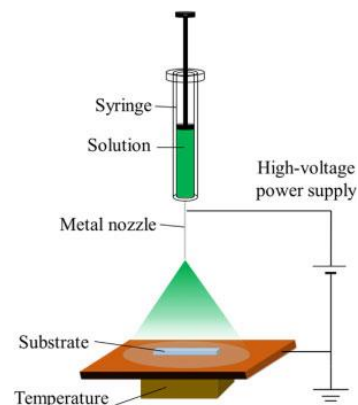


図1. 静電塗布装置 (ナノミスト堆積装置) の概要図。

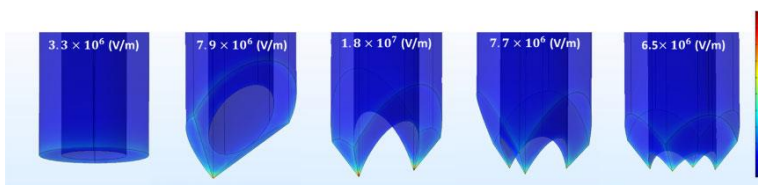


図3. ノズル先端突起部における三次元電位分布シミュレーション結果. 各形状の最大電界強度は左から  $3.3$ 、 $7.9$ 、 $18.0$ 、 $7.7$ 、 $6.5 \times 10^6$  (V/m) である。

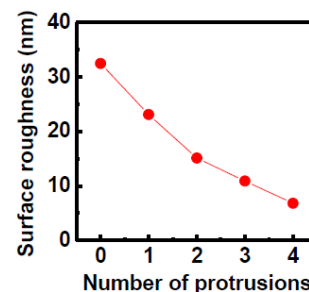


図2. Alq<sub>3</sub>膜の表面 RMS 値のノズル先端突起数依存性。

② 静電塗布法により発光層や電荷注入層としての利用が期待される有機ナノ粒子の生成条件を調査し、低誘電率添加溶媒は噴霧液滴の帯電量を制御して直径分布の単峰性化に寄与することを確認した。また、溶質濃度の調整によりナノ粒子直径を容易に制御できることを検証した。

③ 結晶成長場である溶媒の厚さをガラス板で形成した空間で制御するギャップ法を提案し、誘光励起 ASE が報告されている有機半導体材料 (PBD や CBP、TPD など) の単結晶析出実験を行い、成長条件により結晶サイズや結晶形状の制御が可能であることを見出した。低分子 PBD では、結晶成長速度の制御により直径  $500 \mu\text{m}$  程度の六角形板状結晶や長さ数 mm の針状結晶を得た。

PBD や CBP の単結晶から光励起 ASE を観測し、有機単結晶レーザに適用可能な高品質結晶であることを確認した。

④ 不揮発性（イオン液体）あるいは極低蒸気圧液体（セバシン酸）などの液体薄膜を結晶析出場として用い、静電塗布法で溶質ナノ粒子を表面から供給する新しい単結晶析出法（ナノミスト液膜法）を開発した。この手法を用いて、大型薄膜結晶を得ることが難しいとされてきた  $Alq_3$  において、図 4 に示すような直径  $400 \mu m$  程度の大型六角形板状単結晶の成長に成功した。また、この結晶成長法は、溶質の供給速度を極めて精密に制御できるという特徴を有しており、有機単結晶への精密な濃度制御分子ドーピング技術を開発し、ドーピング濃度を急峻に変化させた面内ドーピング制御も可能であることを示した。図 5 は、ワイドギャップ有機半導体 (PBD) の板状単結晶中に蛍光色素錯体である DCM を位置制御してドーピングした例であり、青色部がノンドーピング PBD、黄色部が DCM ドープ PBD である。このようなドーピングプロファイルの制御は、電流注入デバイスの作製に有効な新規性の高い成果である。

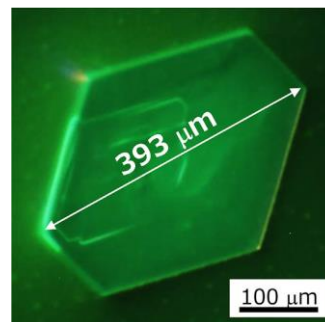


図 4. ナノミスト液膜法で成長した大型板状  $Alq_3$  単結晶の蛍光顕微鏡像。

⑤ 結晶成長場をガラス板や金属板に挟まれた狭空間に限定したマイクロギャップ昇華法を開発し、有機半導体レーザに適した形状の薄膜単結晶を成長可能であることを検証した。この手法は大気中でも有機薄膜単結晶の成長が可能であり、極めて簡便な結晶成長として期待される。

⑥ 蛍光性低分子材料である *o*-MSB や C6 をドーピングした薄膜ワイドギャップ有機半導体 (PBD) 単結晶を成長し、ドーパント分子からの青色と緑色の光励起誘導放出に成功した。また、DCM と C6 をドーピングした PBD 単結晶において、アシストドーパント (C6) によるゲスト分子 (DCM) の蛍光増感作用を有機単結晶においてはじめて観測し、PL スペクトルや時間分解 PL 測定を行ってエネルギー移動効率や偏光依存性などの詳細な評価を行った。板状有機単結晶薄膜の成長と分子ドーピング技術が開発され、低コスト高効率な可視域レーザ光源として期待される電流注入型有機半導体レーザの実現に向けた基盤技術の新しい方向性が示された。

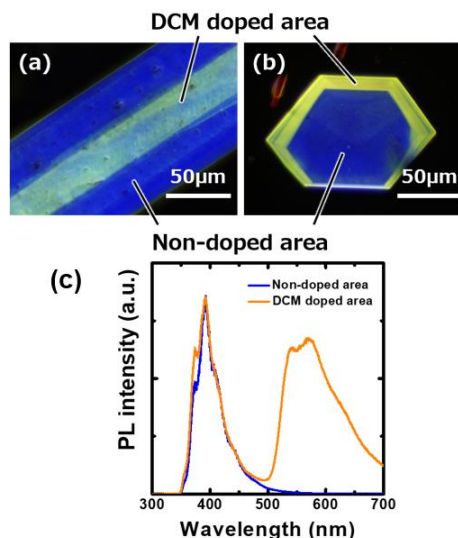
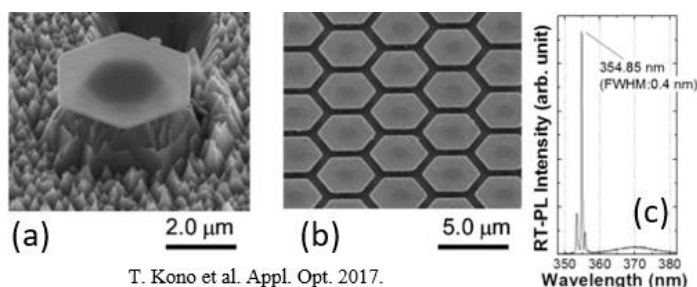


図 5. PBD 板状単結晶に DCM を位置制御ドーピングした試料の蛍光顕微鏡像 (a, b) とノンドーピング領域とドーピング領域の PL スペクトルの例 (c)。

## (2) HEATE 法による窒化物半導体加工技術の開発

① 水素雰囲気中で GaN 層を選択的にエッチング除去する水素支援熱分解法を用い、六角形  $AlGaN$  マイクロディスク構造を作製し、窒素パルスレーザ照射による明瞭な光励起発振を得た。有限差分時間領域法による六角形  $AlGaN$  マイクロディスクの電磁界解析を行い、高 Q 値が得られるウィスパーリング・ギャラリーモードの発振である



T. Kono et al. Appl. Opt. 2017.

図 6. GaN の水素支援熱分解エッチングを用いて作製した  $AlGaN$  六角形マイクロディスク (a) と同アレイ (b)、および光励起レーザ発振スペクトル (c)。

ことを確認し、有機半導体レーザ用共振器としての可能性を検証した。

② GaN 系半導体結晶を用いてフォトニック結晶やファブリペロー型共振器を形成するための HEATE 法の条件を調査し、 $NH_3$  ガスを数%程度添加するとエッチング側面の垂直性が向上することを見出した。図 7 は

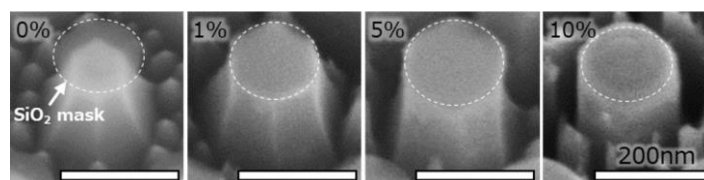


図 7. HEATE 法で作製したナノピラーの  $NH_3$  添加濃度依存性。  $NH_3$  添加量の増加に伴い  $SiO_2$  マスク下のアンダーカットが減少し、側面が垂直に近づくことが分かる。

NH<sub>3</sub> 添加量を 0~10%まで変化させた HEATE 条件で円径 SiO<sub>2</sub> マスクを用いて形成したナノピラーの鳥瞰 SEM 像の例である。NH<sub>3</sub> 添加量の増加に伴い SiO<sub>2</sub> マスク下のアンダーカットが減少し、側面が垂直に近づくことが確認され、極微細かつ高アスペクトな GaN ナノ構造光共振器の作製技術が格段に進歩した。

③ HEATE 法に用いる SiO<sub>2</sub> 選択エッチングマスクを 10nm 程度まで極薄化しても GaN の選択エッチングマスクとして機能することを確認し、電子ビーム露光により形成したレジストパターンを正確にトレースして光共振器形成に必要な高精度エッチングを可能とする条件を把握した。この極薄 SiO<sub>2</sub> マスクと②で開発した NH<sub>3</sub> 添加 HEATE 法を組み合わせることによって、可視光領域に対応可能な 100nm 以下のサイズを有する極微細かつ高アスペクトなピラー型およびホール型の GaN フォトニック結晶光共振器構造の作製が可能となった。図 8 および 9 に、作製したナノピラーアレイ型およびナノホールアレイ型の GaN フォトニック結晶の SEM 像を示す。

④ NH<sub>3</sub> 添加 HEATE 法を用い、可視領域に適用可能な直径 55nm~95nm の高アスペクトナノホール型 PhC の作製に成功した。横型多層膜反射鏡等の多様な GaN 光共振器構造の作製を実証した。本研究により、HEATE 法による高精度 GaN 光共振器作製技術が格段に進歩した。

⑤ 構造乱れに対する高ロバスト性を有するトポロジカルフォトニック結晶導波路の可能性を検討するため、時間領域差分 (FDTD) 法による理論検討を行い、作製が容易な円形開口を組み合わせたフォトニック結晶においてもフォトニックバンドギャップやディラックコーンが形成されることを見出した。

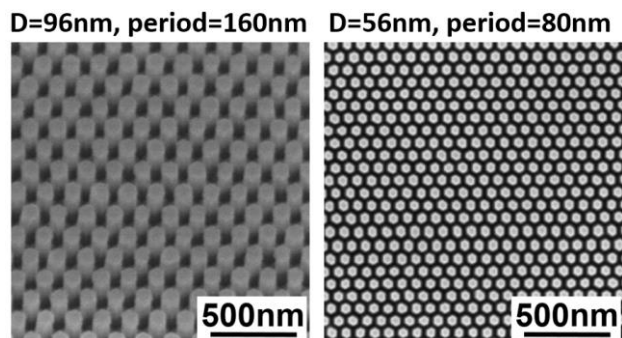


図 5. NH<sub>3</sub> 添加 HEATE 法で作製した側面が垂直に近い高アスペクト GaN ナノピラーフォトニック結晶共振器の SEM 像。

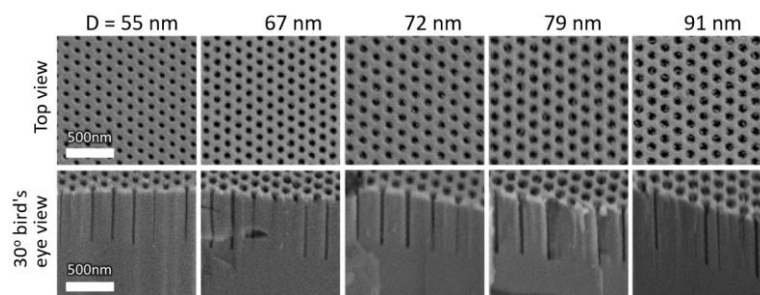


図 8. NH<sub>3</sub> 添加 HEATE 法で作製した GaN ナノホールフォトニック結晶共振器の SEM 像。

上述した(1)有機半導体成膜技術と単結晶成長技術の開発、および(2) HEATE 法による窒化物半導体加工技術の開発は、想定外の成果を含め極めて順調に進歩した。両者の成果を合わせた有機/無機ハイブリッド構造の作製直前で研究期間が終了してしましたが、引き続き研究を継続し、無機半導体共振器による有機半導体の光励起レーザ発振の検証実験と電流注入デバイスの作製と評価を進める予定である。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Keita Takeuchi, Hiroyuki Ueda, and Akihiko Kikuchi, "In-plane doping profile control of plate-like organic single crystals grown by a method combining electrospray and low vapor pressure liquid film," *Japanese Journal of Applied Physics*, 58 (2019) SBBG07. DOI: <https://doi.org/10.7567/1347-4065/aafe6e>. 査読有
- ② Hiroyuki Ueda, Keita Takeuchi, and Akihiko Kikuchi, "Precipitation of thin-film organic single crystals by a novel crystal growth method using electrospray and ionic liquid film," *Japanese Journal of Applied Physics*, 57 (2018) 04FL12. DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.04FL12>. 査読有
- ③ Hiroyuki Ueda, Keita Takeuchi, Ryo Terada, and Akihiko Kikuchi, "Proposal of Organic Single Crystal Growth Method Using Electrospray Deposition and Thin-Film Ionic Liquid," *Physica Status Solidi B*, 255, 4 (2018) 1700351. DOI: 10.1002/pssb.201700351. 査読有
- ④ Tomoyuki Sekine, Yuji Komatsu, Ryuji Iwaya, Haruhiko Kuroe, Akihiko Kikuchi, and Katsumi Kishino, "Surface Phonons Studied by Raman Scattering in GaN Nanostructures", *Journal of the Physical Society of Japan*, 86, 7 (2017) 074602. DOI: 10.7566/JPSJ.86.074602. 査読有

- ⑤ Tetsuya Kouno, Masaru Sakai, Hoshi Takeshima, Sho Suzuki, Akihiko Kikuchi, Katsumi Kishino, and Kazuhiko Hara, "Microsensors based on a whispering gallery mode in AlGaIn microdisks undercut by hydrogen-environment thermal etching," *Applied Optics*, 56, 12 (2017) 3589-3593.  
https://doi.org/10.1364/AO.56.003589. 査読有
- ⑥ Hiroyuki Ueda, Yusuke Takatsuka, Yoshiaki Niinuma, Ryo Terada, and Akihiko Kikuchi, "Fabrication of NPB/Alq<sub>3</sub> small-molecule multilayer structures with suppressed interface mixing by multi-jet mode electrospray deposition", *physica status solidi B*, 254, 2 (2017) 1600564.  
DOI: 10.1002/pssb.201600564. 査読有
- ⑦ Hiroyuki Ueda, Keita Takeuchi, and Akihiko Kikuchi, "Effect of the nozzle tip's geometrical shape on electrospray deposition of organic thin films," *Japanese Journal of Applied Physics*, 56, 4S (2017) 04CL05.  
DOI: 10.7567/JJAP.56.04CL05. 査読有
- ⑧ Tetsuya Kouno, Masaru Sakai, Katsumi Kishino, Akihiko Kikuchi, Naoki Umehara, and Kazuhiko Hara, "Crystal structure and optical properties of a high-density InGaIn nanoumbrella array as a white light source without phosphors", *NPG Asia Materials*, 8 (2016) e289.  
DOI: 10.1038/am.2016.99. 査読有
- ⑨ Kohei Ogawa, Ryo Hachiya, Tomoya Mizutani, Shun Ishijima, and Akihiko Kikuchi, "Fabrication of InGaIn/GaN MQW nano-LEDs by hydrogen-environment anisotropic thermal etching", *physica status solidi A*, 214, 3 (2016) 1600613.  
DOI: 10.1002/pssa.201600613. 査読有
- ⑩ Yukiko Sugimoto, Kanae Igarashi, Shinya Shirasaki, and Akihiko Kikuchi, "Thermal durability of AZO/Ag(Al)/AZO transparent conductive films", *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 4S (2016) 04EJ15.  
DOI: 10.7567/JJAP.55.04EJ15. 査読有
- ⑪ Jumpei Kamimura, Manfred Ramsteiner, Uwe Jahn, Cheng-Ying James Lu, Akihiko Kikuchi, Katsumi Kishino and Henning Riechert, "High-quality cubic and hexagonal InN crystals studied by micro-Raman scattering and electron backscatter diffraction", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49, 15 (2016) 155106.  
DOI: 10.1088/0022-3727/49/15/155106. 査読有
- ⑫ Yoshiaki Niinuma, Yusuke Takatsuka, Ryo Terada, Hiroyuki Ueda and Akihiko Kikuchi, "Deposition characteristics of small-molecule CBP:PBD:TPD:Ir(mppy)<sub>3</sub> organic thin films using a modified electrospray deposition method", *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 4S (2016) 04EL01.  
DOI:10.7567/JJAP.55.04EL01. 査読有

[学会発表] (計 56 件)

国際会議 (21 件)

- ① Yusei Kawasaki, Akihiro Matsuoka, Yusuke Namae, Yuki Ooe, and Akihiko Kikuchi, "Fabrication of high-aspect GaN nanostructures by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE) with addition of ammonia gas", *Int. Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2018)*, ThP-CR-14, Kanazawa, Japan, November 11-16, 2018.
- ② Yusuke Namae, Daichi Ito, Yusei Kawasaki, Yuki Ooe, Akihiro Matsuoka, Yuta Moriya, and Akihiko Kikuchi, "Diameter-dependent emission characteristics of InGaIn/GaN multi quantum well nanopillars fabricated by hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)", *Int. Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2018)*, CR14-5, Kanazawa, Japan, November 11-16, 2018.
- ③ Keita Takeuchi, Hiroyuki Ueda, Ryogo Abe, and Akihiko Kikuchi, "Growth of thin film organic single crystals with controlled in-plane doping profile by a novel method using electrospray and low vapor pressure solvent", *50th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (SSDM2018)*, PS-7-13, Tokyo, Japan, September 9-13, 2018.
- ④ Keita Takeuchi, Hiroyuki Ueda, Ryo Terada, Ryogo Abe, and Akihiko Kikuchi, "Growth of molecularly doped organic single crystal by a novel method using electrospray and low vapor pressure solvent", *2018 Compound Semiconductor Week, We4C4*, Cambridge, MA, USA, May 29-June 1, 2018.
- ⑤ Akihiko Kikuchi, Kohei Ogawa, Shun Ishijima, Yusuke Namae, and Akihiro Matsuoka, "Nanostructuring effects on emission characteristics of InGaIn/GaN quantum well system", *EMN Meeting on Optoelectronics Meeting 2018*, A11, Angkor, Cambodia, March 12-16, 2018. (Invited)
- ⑥ Kohei Ogawa, Shun Ishijima, Yusuke Namae, Akihiro Matsuoka, Yuki ooe, Yusei Kawasaki and Akihiko Kikuchi, "Reduction of surface non-radiative recombination of InGaIn/GaN

nanostructures by saturated ozone water treatment," The 6th International Workshop on Nanotechnology and Application (IWNA2017), NMD-088-P, Phan Thiet, Vietnam, November 8-11, 2017. (First Prize of Best Poster Award)

- ⑦ Akihiko Kikuchi, Shun Ishijima, Kohei Ogawa, Yusuke Namae and Akihiro Matsuoka, "Fabrication of InGaN/GaN nanostructures by low-damage etching Technique of hydrogen environment anisotropic thermal etching (HEATE)," The 6th International Workshop on Nanotechnology and Application (IWNA2017), NFT-005-I, Phan Thiet, Vietnam, November 8-11, 2017. (Invited)
- ⑧ Yusuke Namae, Shun Ishijima, Akihiro Matsuoka, Kohei Ogawa, Tomoya Mizutani, and Akihiko Kikuchi, "Characterization of InGaN/GaN ultra-fine nanopillars fabricated by hydrogen-assisted thermal decomposition etching," The 11th International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED2017), TP18, Banff, Alberta, Canada, October 8-12, 2017.
- ⑨ Hiroyuki Ueda, Kenta Takeuchi, and Akihiko Kikuchi, "Precipitation of thin film organic single crystals by a novel crystal growth method using electrospray and ionic liquid layer," The 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2017), B-3-03, Sendai International Center, Sendai, Japan, September 19-22, 2017
- ⑩ T. Kouno, M. Sakai, K. Kishino, A. Kikuchi, N. Umehara and K. Hara, "Optical properties of InGaN/GaN nanoumbrella high-density arrays", The 24th Congress of the Int. Commission for Optics (ICO-24), Tokyo, Japan, August 21-25, 2017.
- ⑪ Hiroyuki Ueda, Akihiko Kikuchi, Keita Takeuchi, Ryo Terada and Sora Ishii, "Proposal of organic single crystal growth method using electrospray deposition and thin-film ionic liquid," The 44th International Symposium on Compound Semiconductor (ISCS2017), Pl. 51, Berlin, Germany, May 14-18, 2017.
- ⑫ Akihiko Kikuchi, Shun Ishijima, Kohei Ogawa, Yusuke Namae, and Akihiro Matsuoka, "Structural and optical characterization of InGaN/GaN ultrafine nanostructures fabricated by low-damage selective etching based on hydrogen assisted thermal decomposition," The 44th International Symposium on Compound Semiconductor (ISCS2017), Pl. 22, Berlin, Germany, May 14-18, 2017.
- ⑬ Akihiko Kikuchi, Kanae Igarashi, Yukiko Sugimoto and Shinya Shirasaki, "MgZnO/Ag(Al) based dielectric/metal structures for high-performance transparent electrodes", EMN Transparent Electrodes, A08, Orland, USA, December 5-9, 2016. (Invited)
- ⑭ Hiroyuki Ueda, Keita Takeuchi, and Akihiko Kikuchi, "Effect of Geometrical Shape of Nozzle Tip on Electrospray Deposition of Organic Thin Film", The 2016 International Conference on Solid State Devices and Materials, PS-10-12, Tsukuba, Ibaraki, September 26-29, 2016
- ⑮ Hiroyuki Ueda, Yusuke Takatsuka, Yoshiki Niinuma, Ryo Terada, and Akihiko Kikuchi, "Deposition properties of small molecular organic thin films by multi-jet mode electrospray deposition", International Symposium on Compound Semiconductors 2016, MoP-ISCS-127, Toyama, Japan, June 26-30, 2016.
- ⑯ Ryo Terada, Yoshiki Niinuma, Yusuke Takatsuka, Hiroyuki Ueda, and Akihiko Kikuchi, "Deposition properties of small molecular organic thin films by multi-jet mode electrospray deposition", International Symposium on Compound Semiconductors 2016, MoP-ISCS-126, Toyama, Japan, June 26-30, 2016.

※他 3 件

国内学会 (35 件)

- ⑰ 竹内啓太, 安部僚吾, 菊池昭彦, "静電塗布法と低蒸気圧液体膜を用いる制御された面内ドーピングプロファイルを有する薄膜有機単結晶の成長", 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 19p-231C-8, 名古屋国際会議場, 愛知県, 2018 年 9 月 18 日-21 日.

※他 34 件

以下省略

[その他]

ホームページ等

<http://pweb.sophia.ac.jp/kikuchi/>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。