

令和元年6月3日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06298

研究課題名(和文) 超低損失・新規窒化物ヘテロ構造トランジスタの実現に向けたプロセス・設計基盤の構築

研究課題名(英文) Construction of process and design basis for the realization of a new ultra-low loss nitride heterostructure transistors

研究代表者

三好 実人 (MAKOTO, MIYOSHI)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30635199

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：MOCVD成長したAlGaIn膜に対し、ドライエッチング処理や絶縁膜形成など半導体加工プロセスが材料物性に与える影響をPL発光挙動を用いて調べた。また、AlGaInチャネルMISダイオードを試作し、C-V測定を用いた界面準位評価を実施した。AlGaInチャネルMIS構造の界面準位は、GaInチャネルのものと大きな矛盾が見られなかった。AlGaInチャネルMISトランジスタがGaInチャネルHFETを超える高いオフ特性を示すことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、将来の増え続ける電力需要に応える超低損失パワーデバイスの創成を目指し、応募者が独自開発した新規窒化物ヘテロ構造による絶縁ゲートトランジスタ実現に向けた基盤研究を計画した。研究では、絶縁ゲート形成プロセスに係るフォトルミネッセンス特性や電気特性を調べることができ、結果として良好なデバイス特性を示す絶縁ゲートトランジスタの試作に成功した。ここで得られた成果は、将来の超低損失パワーデバイス実現に大きく寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Effects of semiconductor processing, such as dry etching and insulating film deposition, on material properties of MOCVD-grown AlGaIn films were investigated by PL measurements. In addition, an AlGaIn channel MIS diode was fabricated and its interface state was evaluated by CV measurements. There was no large contradiction in interface properties of the AlGaIn channel MIS structure in comparison with conventional GaIn-channel structures. It has been confirmed that the AlGaIn-channel MIS transistor exhibits superior off-state characteristics than those of the conventional GaIn-channel HFET.

研究分野：電子デバイス

キーワード：窒化物半導体 パワートランジスタ 界面準位 フォトルミネッセンス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

環境・資源の保護意識が世界的に高まる中、電力機器の中核を担う半導体パワーデバイスにおいても「より低損失で省エネルギー」なものが求められるようになっており、その帰着として窒化物（GaN系）やSiCがSiに代る次世代材料として注目されるに至っている。一方、電力機器の今後の普及や電力消費量のトレンドを鑑みると、こうした次世代材料パワーデバイスが実用化した将来においても、デバイス自体への低損失化要求は緩むことこそあれ留まることはないと予想される。本研究課題では、持続的な低損失化ニーズに応えられる進化する窒化物半導体としてAlGaInチャンネルヘテロ構造によるMIS-HFET [MISゲート（＝絶縁ゲート）トランジスタ]の開発を進めることとした。GaNとAlNとの混晶からなるAlGaInは、SiCやGaNを凌駕する絶縁破壊特性を有しており、次世代のパワーデバイス材料として有望である。

### 2. 研究の目的

本課題研究に着手するまでに、当研究室ではAlGaInチャンネル層を有する窒化物系2DEGヘテロ構造について研究を行ってきた。他方、AlGaIn系パワーデバイスの実現を目指すには、デバイス製造に必須となる各種半導体加工プロセスのAlGaIn結晶への影響を把握することが重要である。AlGaInチャンネルHFETについては、GaNチャンネルHFETに比べ過去の研究事例が希少であり各種の加工プロセスが結晶・物性に及ぼす影響については改めて一つ一つ解明していく必要がある。本研究では、MOCVD成長したAlGaIn膜のAs-grownサンプルに加え、反応性イオンエッチング(RIE)を施したサンプル、ALD法によるAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を形成したサンプルについて、紫外線レーザー励起によるフォトルミネッセンス(PL)測定による比較評価を実施し、各種プロセスが材料物性に及ぼす影響について知見を得ると同時に、ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜を用いたゲート界面の電子物性について知見を得るために、容量-電圧(C-V)測定による界面品質の評価、さらに研究の最終段階としてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ゲートMISFETの試作評価を行うこととした。

### 3. 研究の方法

MOCVD法を用いて2インチ径AlN(1μm)/サファイアテンプレート上にAlGaInチャンネルヘテロ構造を成長した。このAs-grownサンプルに加え、Cl<sub>2</sub>ガスを用いたRIE処理(10W、10分間)を施したサンプル、さらにRIE処理後にALD法を用いてAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜(20nm)を形成したサンプルを作成した。ALD法では、Al原料にTMA、酸素原料にH<sub>2</sub>OとO<sub>2</sub>の交互供給法を採用した。ALDでの反応温度は300°Cであった。このようにして作成した3種類のサンプルについてそれぞれ温度10Kから室温の範囲でPLライフタイム測定を実施した。測定に用いた励起光源はTiサファイアレーザーの4倍波(波長:λ=210nm、パルス幅80fs、照射強度5~10nJ/cm<sup>2</sup>)であり、ルミネッセンス光はストリークカメラにより検出した。次に、上記と同じエピウェハを用い、ALD-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜絶縁膜を備えた評価用のMISダイオードとMIS-HFETを試作した(図1参照)。作製したMISダイオードについてC-V測定とコンダクタンス法による界面準位導出を実施した。HFETについては、ソースドレイン間I-V特性、伝達特性、3端子I-V阻止特性を評価した。

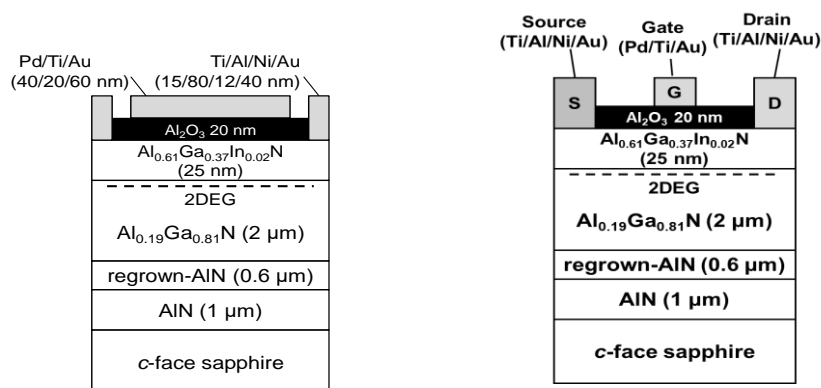


図1. 本研究で試作したMISダイオード(左)、MIS-HFET(右)の断面模式図

#### 4. 研究成果

図 2 に、MOCVD 成長した混晶組成の異なる AlGaN エピタキシャル膜 ( $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$ 、 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$ ) の、温度 10K における PL 発光スペクトルを示した。各サンプルのドミナント発光波長は、 $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$  で約 345nm、 $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$  で約 330nm、 $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$  で約 300nm となり、AlN モル分率の増加に伴いバンドギャップが増加しバンド端発光が短波長化する様子が確認された。AlN モル分率が高いサンプルではバンド端発光以外に意図しない混入不純物に由来すると思われるブロードな発光が観測された。

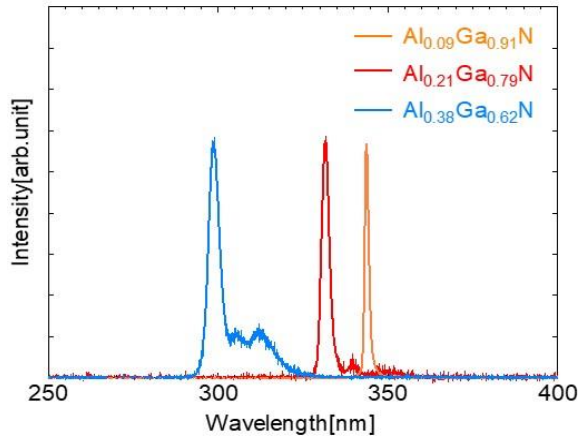
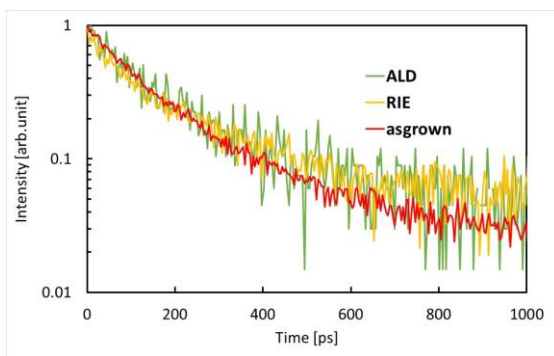
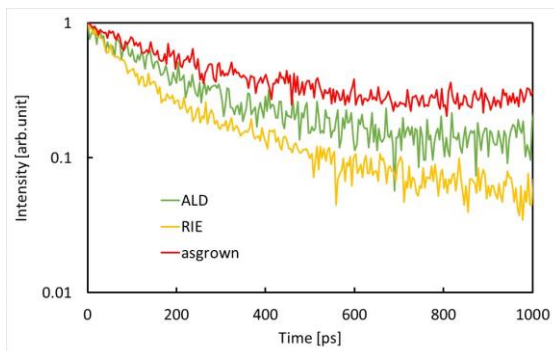


図 2.  
混晶組成の異なる AlGaN エピタキシャル膜の、温度 10K における PL 発光スペクトル

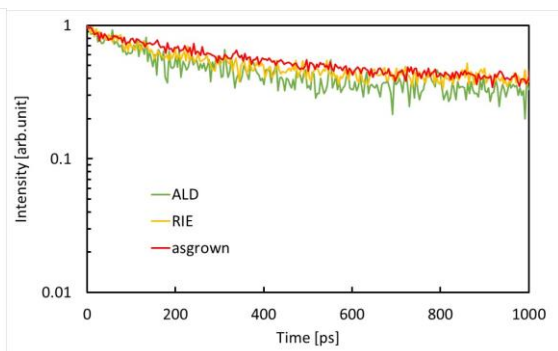
図 3 に、異なる AlGaN を有する試料の温度 10K における PL 減衰波形の測定結果を示した。3 つの試料を比較すると、AlN モル分率が高いサンプルで PL ライフタイムが長くなっていることが分かる。これについては、低温で観測される束縛励起子による発光寿命が、不純物濃度の増加に伴って長くなったためと推察している。すなわち、Al 濃度が上昇するにつれて不純物が増加していることを示しており、PL 測定結果とも一致する。その他、特筆すべきこととして、 $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$  において PL ライフタイムが RIE 処理後に一旦低下するものの、ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜の形成によりある程度回復することが示された。プラズマダメージによって誘発された表面欠陥が  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜の形成で不活性化した可能性があり、さらに注意深い分析が必要と思われた。



(a)  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$



(b)  $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$



(c)  $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$

図 3.  
混晶組成の異なる AlGaN エピタキシャル膜の、温度 10K における PL 発光減衰波形  
(a)  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.91}\text{N}$ 、  
(b)  $\text{Al}_{0.21}\text{Ga}_{0.79}\text{N}$ 、  
(c)  $\text{Al}_{0.38}\text{Ga}_{0.62}\text{N}$

次に、AlGaInN チャネル MIS ダイオードの C-V 測定を行い、コンダクタンス法による界面準位の導出を試みた。図 4 に、試作した MIS ダイオードについて、周波数 5 kHz~10 MHz の領域で測定した C-V 曲線を示した。

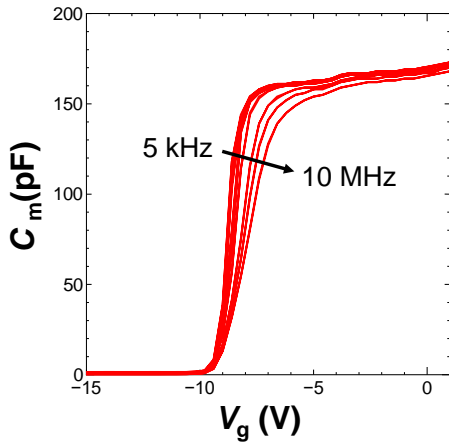


図 4.  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS ダイオードについて、周波数 5 kHz~10 MHz の領域での C-V 測定結果

図 4 に示した C-V 測定結果にコンダクタンス法を適用し、界面準位密度  $D_{it}$  を導出した。図 5 は、伝導帯下端を基準とした禁制帯内エネルギーを横軸として導出した  $D_{it}$  値をプロットした結果である。図には、比較のために当研究室で試作した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/GaN MIS ダイオードの結果についても併せてプロットしている。図より、導出された Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS 界面準位については、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/GaN MIS 構造の結果と本質的な差異が無いように見られた。また、観測された E-E<sub>c</sub> 値は、バリア層のエネルギーバンドギャップ差 (AlGaInN : 約 5.1eV, AlGaIn : 約 4.2eV) を考慮すると妥当な範囲と思われた。

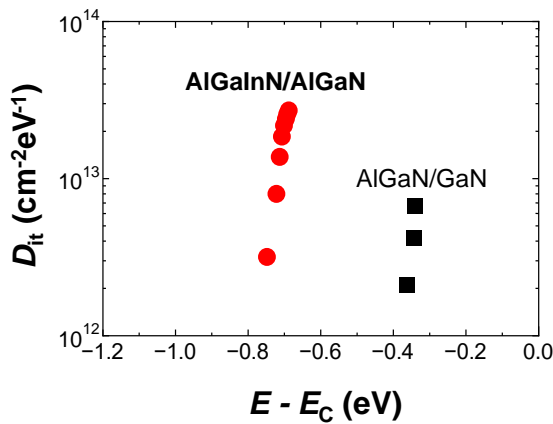


図 5.  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS ダイオードと Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/GaN MIS ダイオードで導出された界面準位密度分布

次に、作製した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS-HFET の DC 特性を測定した。図 6 には、ゲート幅 ( $W_g$ ) 15  $\mu$ m, ゲートドレイン間距離 4  $\mu$ m の Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS-HFET のドレインソース間 I-V 特性と伝達特性を示した。図から明らかなように、作製した MIS-HFET デバイスは、良好なピンチオフ特性を示していることが分かる。また、デバイスはゲートバイアス約 -6V 以下でオフ状態になることが確認できた。

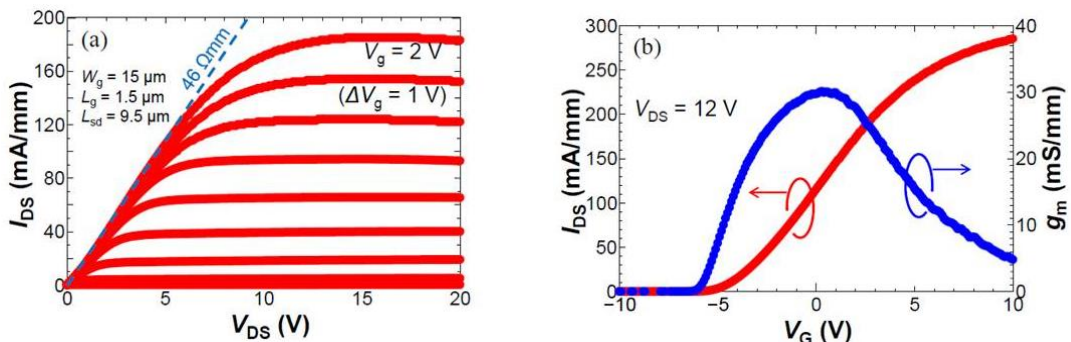


図 6. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaInN/AlGaIn MIS-HFET のソース-ドレイン I-V 特性 (左) と伝達特性 (右)

図7は、ゲート-ドレイン長さ ( $L_{gd}$ ) の異なる4つの AlGaInN/AlGaInN MIS-HFET のソース-ドレイン電極間のブレイクダウン特性を示す。計測は、ゲートバイアス-20V を印加しオフ状態で行ったものである。図より、 $L_{gd} = 20 \mu\text{m}$  の MIS-HFET は、約 2.5 kV という非常に高いブレイクダウン電圧を示した。ここから、AlGaInN チャネルの絶縁破壊電界  $E_c$  は  $122 \text{ V}/\mu\text{m}$  と見積もることができる。なお、本研究においては、フィールドプレート構造など、電極下の電界集中を緩和するような構造を採用していない。従って、適切に設計されたフィールドプレート電極を有するデバイスを作製すれば、ブレイクダウン電圧の更なる向上が期待できる。

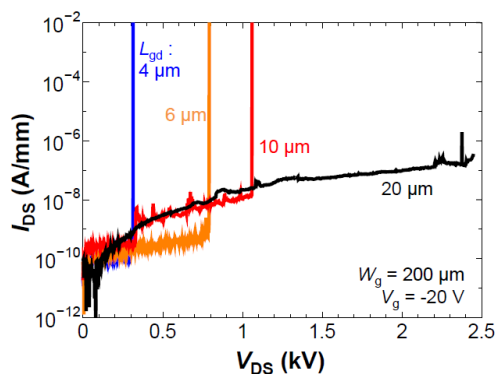


図7.  
ゲート-ドレイン間距離の異なる  
 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaInN}/\text{AlGaInN}$  MIS-HFET の3端  
子阻止特性の測定結果

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- (1) D. Hosomi, H. Chen, T. Egawa and M. Miyoshi, “Design and material growth of AlGaInN-channel two-dimensional-electron gas heterostructures employing strain-controlled quaternary AlGaInN barrier layers”, Jpn. J. Appl. Phys. 58 (2019) 011004 (査読有り)
- (2) D. Hosomi, Y. Miyachi, T. Egawa and M. Miyoshi, “Improved mobility in InAlN/AlGaInN two-dimensional electron gas heterostructures with an atomically smooth heterointerface”, Jpn. J. Appl. Phys. 57 (2018) 04FG12 (査読有り)
- (3) L. Li, D. Hosomi, Y. Miyachi, M. Miyoshi and T. Egawa, “Distinct light emission from two-dimensional electron gas at a lattice-matched InAlN/AlGaInN heterointerface”, Appl. Phys. Lett. 112 (2018) 102102 (査読有り)
- (4) L. Li, D. Hosomi, Y. Miyachi, T. Hamada, M. Miyoshi, and T. Egawa, “High-performance ultraviolet photodetectors based on lattice-matched InAlN/AlGaInN heterostructure field-effect transistors gated by transparent ITO films”, Appl. Phys. Lett. 111 (2017)102106 (査読有り)
- (5) T. Kubo, M. Miyoshi, T. Egawa, “Post-deposition annealing effects on the insulator/semiconductor interfaces of  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaInN}/\text{GaInN}$  structures on Si substrates”, Semicond. Sci. Tech. 32 (2017) 065012

[学会発表] (計17件)

- (1) S. Saito, D. Hosomi, K. Furuoka, T. Kubo, T. Egawa and M. Miyoshi, “Study on MIS interface states of ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaInN}/\text{AlGaInN}$  heterostructures”, 11th International Symposium on Advanced Plasma Science and Its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2019, Nagoya Institute of Technology, Japan), March 2019.
- (2) 齊藤 早紀, 細見 大樹, 古岡 啓太, 久保 俊晴, 江川 孝志, 三好 実人, “ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜を堆積した AlGaInN/AlGaInN ヘテロ構造における MIS 界面準位の評価”, 第66回応用物理学会春季学術講演会, 2019年03月
- (3) 三好 実人, “高効率パワーエレクトロニクス機器のための WBG 半導体パワーデバイス技術と超高耐圧 AlGaInN トランジスタ”, 日本金属学会・日本鉄鋼協会東海支部 学術討論会『将来のクルマを支える材料技術』, 2019年1月 (招待講演)
- (4) 細見 大樹, 古岡 啓太, 陳 桁, 齊藤 早紀, 久保 俊晴, 江川 孝志, 三好 実人, “歪み制御 AlGaInN バリア層を備えた耐圧 2.5kV 級 AlGaInN チャネル HFET”, 電子情報通信学会 CPM/ED/LQE 研究会, 2018年11月
- (5) D. Hosomi, K. Furuoka, H. Chen, T. Kubo, T. Egawa and M. Miyoshi, “Device characteristics of a novel AlGaInN-channel HFET employing a quaternary AlGaInN barrier layer”, 2018 International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2018, Kanazawa, Japan), November 2018
- (6) 細見 大樹, 古岡 啓太, 陳 桁, 齊藤 早紀, 久保 俊晴, 江川 孝志, 三好 実人, “四元混晶 AlGaInN バリア層を有する AlGaInN チャネル HFET のデバイス特性評価”, 先進パワー半導体分科会 第5回講演会, 2018年11月
- (7) 細見 大樹, 古岡 啓太, 陳 桁, 久保 俊晴, 江川 孝志, 三好 実人, “四元混晶 AlGaInN バリア層を用いた AlGaInN チャネル HFET のデバイス特性評価”, 第79回応用物理学会秋季学術

講演会, 2018 年 9 月

- (8) D. Hosomi, H. Chen, T. Egawa and M. Miyoshi, “A novel AlGa<sub>N</sub>-channel 2DEG heterostructure employing a quaternary InAlGa<sub>N</sub> barrier layer and its thermal stability of 2DEG properties” 19th International conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE XIX, Nara, Japan), June 2018
- (9) 細見 大樹, 陳 桁, 江川 孝志, 三好 実人, “MOCVD 法による InAlGa<sub>N</sub>/AlGa<sub>N</sub> ヘテロ構造の成長とその 2DEG 特性の熱的安定性評価”, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年 3 月
- (10) 細見 大樹, 宮地 祐太, 江川 孝志, 三好 実人, “ヘテロ界面平坦性改善による InAlN/AlGa<sub>N</sub> HFET 構造の移動度向上”, 先進パワー半導体分科会 第 4 回講演会, 2017 年 11 月
- (11) D. Hosomi, Y. Miyachi, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Improved mobility in InAlN/AlGa<sub>N</sub> two-dimensional electron gas heterostructures with an atomically-smooth heterointerface”, 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2017, Sendai, Japan), October 2017
- (12) 細見 大樹, 岡田 真由子, 李 磊, 江川 孝志, 三好 実人, “格子整合系 InAlN/AlGa<sub>N</sub> ヘテロ構造を用いた電界効果 UV フォトトランジスタ”, 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月
- (13) 細見 大樹, 江川 孝志, 三好 実人, “AlGa<sub>N</sub> チャネル 2DEG ヘテロ構造の結晶評価～ヘテロ界面平坦性と AlGa<sub>N</sub> 初期成長条件との関係～”, 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月
- (14) 中島 陸, 森 拓磨, 細見 大樹, 江川孝志, 三好 実人, “プラズマエッチング処理ならびに Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ALD 成膜プロセスを経た AlGa<sub>N</sub> エピタキシャル膜の PL ライフタイム測定”, 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月
- (15) M. Miyoshi, D. Hosomi, M. Okada, R. Nakashima, J.J. Freedsman and T. Egawa, “Nearly lattice-matched InAlN/AlGa<sub>N</sub> 2DEG heterostructures and field-effect transistors for high power applications”, 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS12, Strasbourg, France), July 2017
- (16) L. Li, D. Hosomi, M. Miyoshi, and T. Egawa, “High-performance ultraviolet photodetectors based on lattice-matched InAlN/AlGa<sub>N</sub> heterostructure field-effect transistors gated by transparent ITO films”, 12th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS12, Strasbourg, France), July 2017
- (17) 細見 大樹, 宮地 祐太, 江川 孝志, 三好 実人, “ヘテロ界面平坦性改善による InAlN/AlGa<sub>N</sub> HFET 構造の移動度向上”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年 03 月

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://miyoshi.web.nitech.ac.jp/index.html>

## 6. 研究組織

(1)研究分担者  
なし

(2)研究協力者  
なし

※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。