

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420328

研究課題名(和文) MIS構造窒化物半導体トランジスタの低損失高耐圧化に関する研究

研究課題名(英文) Study on III-Nitride Based MIS-Transistors with Low-loss and High-breakdown voltage Characteristics

研究代表者

葛原 正明 (Kuzuhara, Masaaki)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20377469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： AlGaIn/GaN MIS構造において、逆方向リーク電流が低く動的オン抵抗の増加の少ないゲート絶縁膜の研究を行い、原子層堆積法で堆積したAl₂O₃とZrO₂の複合膜の有効性を示した。

次に、表面保護膜の検討を行い、スパッタ堆積したSiN膜、SiON膜、SiO₂膜について動的オン抵抗を評価した結果、SiN膜またはSiON膜が電流コラプスの低減に有効であることを明らかにした。また、保護膜堆積前の酸素プラズマ処理が電流コラプス抑制に極めて有効であることを示した。最後に、最適化したゲート絶縁膜と表面保護膜を併せ持つMIS-HEMTを試作し、2kVを超える高耐圧かつ低リーク電流特性を実証した。

研究成果の概要(英文)： The purpose of this work is to develop AlGaIn/GaN MIS HEMTs with a low reverse gate leakage current and a suppressed increase in dynamic on-resistance. It was found that ALD-deposited composite layers of Al₂O₃ and ZrO₂ were effective as an MIS gate insulator.

We then studied surface passivation films, such as SiN, SiON, and SiO₂, in terms of improvement in current collapse characteristics. It was found that SiN or SiO₂ film was effective to reduce dynamic on-resistance in AlGaIn/GaN HEMTs. In addition, we found that more significant reduction in current collapse was achievable by introducing O₂ plasma treatment before surface passivation film deposition. The fabricated MIS-HEMT with separately optimized gate insulator and passivation film demonstrated very promising breakdown characteristics of more than 2 kV with a very reduced gate leakage current.

研究分野：化合物半導体デバイス

キーワード：窒化物半導体 HEMT MOSFET ゲート絶縁膜 パッシベーション 耐圧 電流コラプス

1. 研究開始当初の背景

族窒化物半導体を用いたパワートランジスタ開発では、低オン抵抗化とソース・ドレイン端子間の高耐圧化の同時達成が重要である。しかし、例えばオン抵抗の低減に有利なゲート絶縁膜を選ぶと、同じ絶縁膜を表面保護膜として共通に用いたときには、却って逆方向耐圧が劣化するという矛盾がしばしば見られる。すなわち、ゲート絶縁膜と表面保護膜の機能には異なる条件が要求されるが、従来報告では、両者を独立に最適化した例は見られない。具体的には、ゲート絶縁膜として、界面特性に優れた高バンドギャップで高誘電体材料が要求され、一方、高耐圧化に有利な表面保護膜としては、漏れ電流が小さく局所的な電界集中を起こさず、しかも電流コラプスが少ないことが要求される。

本研究は、我々のこれまでの個別に行ったゲート絶縁膜と表面保護膜の実験結果に工夫を加味し、低オン抵抗と高耐圧性の両特性を兼ね備えた MIS 構造 HEMT を実現することをめざして発案されたものである。

2. 研究の目的

本研究では、各種絶縁膜を用いた MIS ゲート構造における界面特性評価、および表面保護膜が HEMT の耐圧特性と動的オン抵抗に与える効果の評価結果を踏まえ、両者の同時最適化を達成すべく、1) 絶縁膜の多層積層化と 2) ゲート絶縁膜と表面保護膜の独立プロセス化に挑戦する。絶縁膜を多層化する目的は、絶縁膜・半導体間の界面特性の最適化と膜全体の誘電率とバンドギャップを最大化するためである。一方、ゲート絶縁膜と表面保護膜を独立分離プロセス化する目的は、両絶縁膜に求められる電気的特性を独立して満足させるためである。

このようにして、独立に最適化したゲート絶縁膜と表面保護膜を用いて、MIS ゲート構造 HEMT を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず界面特性に優れ、しかもリーク電流の少ない良好な AlGaIn/GaN MIS 界面特性が得られる絶縁膜について調べる。絶縁膜の堆積には、本学が所有する原子層堆積 (ALD) 法とスパッタ法を用いる。次に、表面保護膜としてリーク電流が少なく、動的オン抵抗の増加 (電流コラプス) の影響の少ない絶縁膜について調べる。次に、最適化されたゲート絶縁膜と表面保護膜を適用して AlGaIn/GaN MIS-HEMT を試作し、デバイス特性の向上を検証する。

4. 研究成果

(1) MIS ゲート絶縁膜

MIS ゲート絶縁膜の特性評価を行うため、AlGaIn/GaN MIS-HEMT を試作した。プロセス概要は以下の通りである。まず、反応性イオンエッチング (BCl₃ + Cl₂ 混合ガス) を用い

て素子間分離を行い、次に、ソース及びドレイン電極 Ti/Al/Mo/Au (15/60/35/50 nm) を蒸着形成した。オーミック熱処理 (850 °C) 後、AlGaIn 表面にゲート絶縁膜を堆積した。ゲート金属として Ni/Au (100/150 nm) を蒸着後、300 °C でポスト熱処理を行いデバイスは完成する。ゲート長 L_g=3 μm、ゲートドレイン間隔 L_{gd}=5 μm、ゲート幅 W_g=100 μm とした。絶縁膜には原子層堆積 (ALD) 法で形成した Al₂O₃、ZrO₂ を用いた。同時に、これら絶縁膜を組み合わせた複合絶縁膜構造 Al₂O₃/ZrO₂、ZrO₂/Al₂O₃ についても検討した。膜厚は単層膜 4nm、複合膜では 2nm/2nm とした。試作した HEMT の断面構造を図 1 に示す。

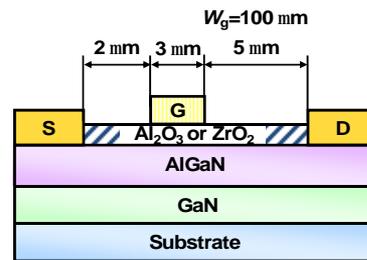


図 1 試作した MIS-HEMT の断面構造

図 2 に試作した 4 通りの MIS-HEMT の逆方向ゲートリーク特性 (I_g-V_{gd}) を示す。2 層 MIS-HEMT の逆方向ゲートリーク電流は 1 ~ 2 × 10⁻¹⁰ A/mm であり、絶縁膜の積層順による有意差はない。また、2 層 MIS-HEMT のゲートリーク電流は、単層 ZrO₂ と同程度で単層 Al₂O₃ より 2 桁近く小さい値を示した。これより、Al₂O₃ 膜に ZrO₂ 膜を組み合わせることにより効果的にゲートリーク電流が抑制できることが明らかとなった。

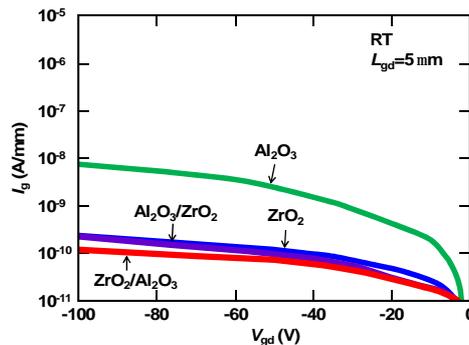


図 2 逆方向ゲートリーク特性

図 3 に動的オン抵抗の規格値を縦軸にそのストレスドレイン電圧依存性を示す。AlGaIn 界面側に Al₂O₃ を用いた ZrO₂/Al₂O₃ 複合膜では、ドレイン電圧を増加させてもオン抵抗は変化せず、動的オン抵抗比は 3 倍程度の低い値を示した。この動的オン抵抗特性は Al₂O₃ 単層膜の特性と同様に良好であった。一方、AlGaIn 界面側に ZrO₂ を用いた Al₂O₃/ZrO₂ 複合膜では、ZrO₂ 単層膜と同様に 50 V 以上のストレス電圧においてオン抵抗の急激な増加が見られた。つまり、AlGaIn 界面側に Al₂O₃ を用いると、電流コラプスによる動的オン抵

抗増加の影響を大幅に抑制できた。単層 MIS HEMT の場合と同様に C-V 測定から 2 層 MIS HEMT の絶縁膜/半導体界面の界面準位密度を求めたところ、0.4 から 0.52eV の間に界面準位が存在し、ZrO₂/Al₂O₃ 複合膜で $6 \times 10^{12} \text{cm}^{-2}$ 程度に対し、Al₂O₃/ZrO₂ 複合膜では $1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 以上と約 2 倍大きい値を示した。この界面準位密度は、単層 ZrO₂ で得られた値とほぼ等しく、界面特性決定には界面側の絶縁膜が重要であることがわかった。

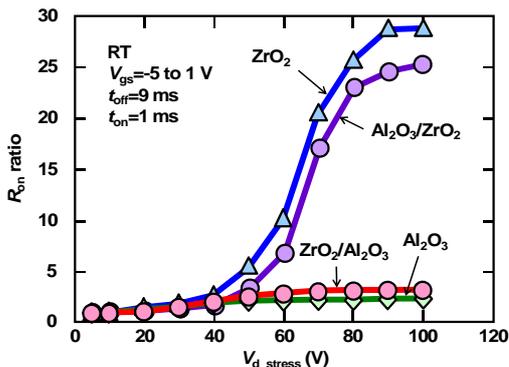


図 3 規格化動的オン抵抗の電圧依存性

図 4 に MIS ダイオードの順方向特性の比較を示す。禁制帯幅が 6.1 eV の ZrO₂ 単層ダイオードでは順方向電圧約 1.7 V で順方向電流が 1 $\mu\text{A}/\text{mm}$ を越えた。一方、禁制帯幅が 9-10 eV の Al₂O₃ 膜を含むダイオードでは、順方向約 3 V まで 1 $\mu\text{A}/\text{mm}$ 以下の低い値を維持した。順方向耐圧の観点から、ZrO₂ 単層膜は MIS 膜として適さないことが分かった。

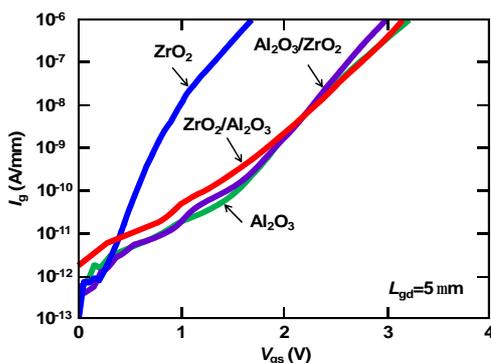


図 4 MIS 順方向電流の電圧依存性

Al₂O₃ 単層膜では逆方向リーク電流が大きいことを図 2 に示したが、この問題は Al₂O₃ 堆積時の酸素源を水 (H₂O) からオゾン (O₃) に変更することにより解決できることを確認した。図 5 に酸素源に H₂O を用いた Al₂O₃ 膜をもつ MIS-HEMT と O₃ を用いた Al₂O₃ 膜の MIS-HEMT の逆方向ゲートリーク特性を示す。O₃ の適用により、G-D 間に逆バイアス電圧 50V を印加したときのリーク電流は約 3 桁低減し ($3 \times 10^{-10} \text{ A}/\text{mm}$)、また、図 6 に示した伝達特性のように、MIS-HEMT のドレイン電流のオン/オフ比は 10 桁以上に改善した。しきい値電圧のヒステリシスも約 0.1V と極めて良好である。また、O₃ を用いた

MIS-HEMT では、G-D 間距離 (Lgd) の増加とともにオフ耐圧が直線的に増加し、Lgd=30 μm においてオフ耐圧は 2 kV を越えた。

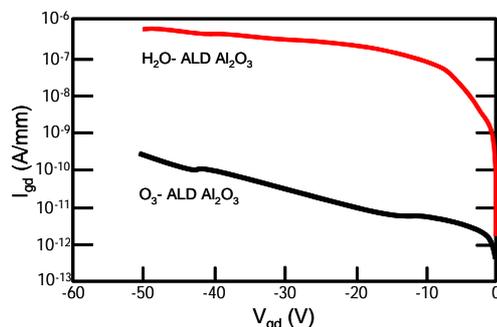


図 5 オゾン源を用いた MIS-HEMT の逆方向リーク電流の電圧依存性

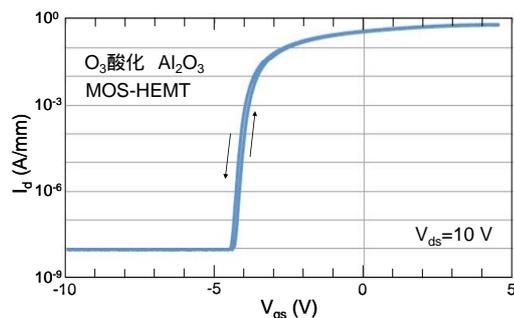


図 6 オゾン源を用いた MIS-HEMT の伝達特性とそのヒステリシス

(2) 表面保護膜

SiC 基板にゲート長 $L_g=3 \mu\text{m}$ 、ゲートドレイン間隔 $L_{gd}=10 \mu\text{m}$ をもつ AlGaIn/GaN HEMT を作製し、表面保護膜として、スパッタ法で堆積した SiO₂ (屈折率 1.45) SiON (屈折率 1.68) SiON (屈折率 1.85) SiN (屈折率 1.90) の 4 種類の絶縁膜を堆積した。膜厚はいずれも 150 nm とした。図 6 に逆方向リーク電流の保護膜依存性を示す。ゲートリーク電流については、SiO₂ 膜が最も少なく、屈折率の増加とともに約 1 桁増加した。ただ、いずれの膜でもリーク電流は 0.1 $\mu\text{A}/\text{mm}$ 以下に抑えられることが分かった。

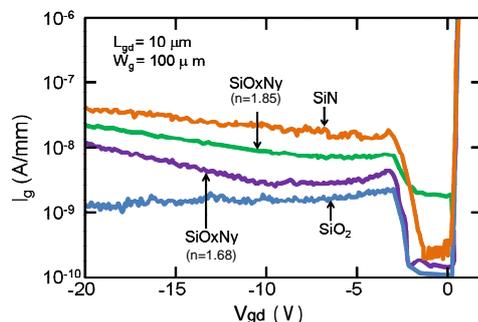


図 6 ゲートリーク電流の電圧依存性

次に、各保護膜に対して動的オン抵抗のストレスドレイン電圧依存性を評価した。ゲートパルスのオン時間 100 μs 、オフ時間 10 ms

とした。結果を図7に示す。最も低いゲートリークを示した SiO₂ 膜が最も大きな動的オン抵抗を示し、電流コラプス抑制の観点からは、SiON 膜または SiN 膜が優れていることが分かった。

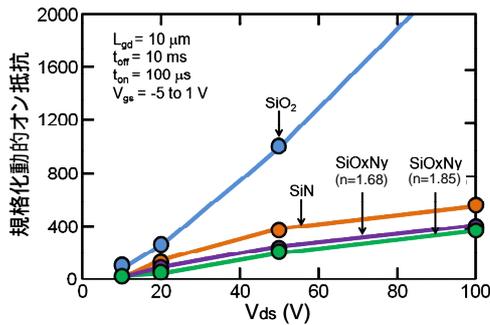


図7 規格化動的オン抵抗の保護膜依存性

次に、表面保護膜堆積前の前処理として酸素プラズマ照射の効果調べた。酸素プラズマの RF パワーは 100 W (一定) とし、酸素流量 15 sccm で照射時間は 60 s とした。表面保護膜として SiO₂、SiN に加えてスパッタ法で形成した AlN 膜についても検討し、それぞれ保護膜堆積前の酸素プラズマ照射の有無について、動的オン抵抗の変化を調べた。結果を図8に示す。いずれの保護膜についても、酸素プラズマ照射により動的オン抵抗が減少することが分かった。しかも酸素プラズマ照射後の動的オン抵抗が表面保護膜の種類に無関係にほぼ同じ値に収束することが分かった。すなわち、酸素プラズマ照射によって AlGaIn 表面に酸素原子が取り込まれた結果、保護膜の種類に関係なく AlGaIn 表面特性が電流コラプスに対して有利な状態に改質されたものと推測することができる。

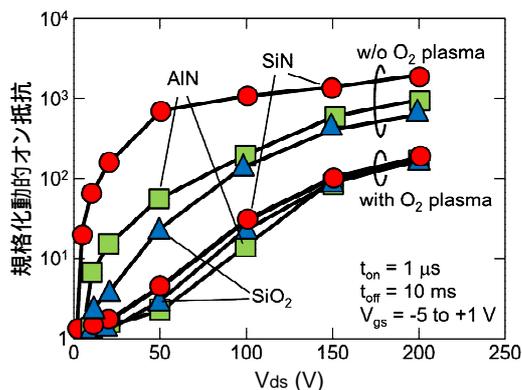


図8 酸素プラズマ照射の効果

この仮説を確かめるため、AlGaIn 表面の結合状態を X 線光電子分光 (XPS) を用いて分析したところ、酸素プラズマ照射により、Al 原子と Ga 原子がそれぞれ O 原子と結合している可能性が示唆された(図9参照)。また、ドレイン電流のパルス過渡応答の解析から、酸素プラズマ照射が 0.6 eV より深い電子トラ

ップ準位を減少させる作用のあることが分かった。以上の結果は、酸素プラズマ処理が、AlGaIn 中の窒素空孔や表面未結合手を補償するため、プラズマ処理後の表面にたとえ異なる保護膜を成膜しても膜の影響を受けなくなったものと推測される。

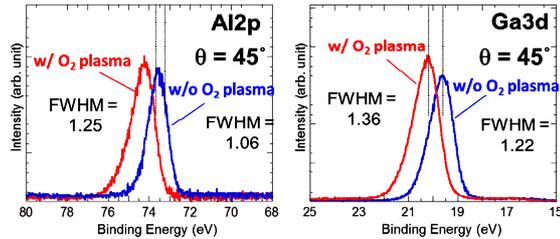


図9 酸素プラズマ照射した AlGaIn 表面の XPS 解析結果

動的オン抵抗の劣化(電流コラプス)が大きく改善される原因が AlGaIn 表面での酸素の取り込みであるのなら、他の酸素導入法でも同様の効果が得られるはずである。そこで、表面保護膜として SiN 膜を堆積する前に高圧水蒸気熱処理 (HPWVA) を試みた。HPWVA とは、サンプル表面を高温高圧化 (0.5MPa) で水蒸気に晒す処理のことであり、処理時間は 30 分とした。予想通り、HPWVA 温度を 200 から 400 °C に増加するにつれて、動的オン抵抗は急激に改善した。図10に規格化動的オン抵抗のオンパルス時間依存性を示す。オンパルス 1 μs のとき、HPWVA (400 °C) により動的オン抵抗は約 3 桁改善し、100 μs 以上では実質的に電流コラプスの完全抑制が実現できた。

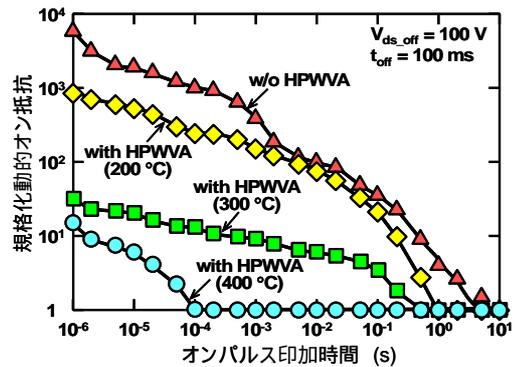


図10 高圧水蒸気熱処理した HEMT の規格化動的オン抵抗のオンパルス時間依存性

以上のように、本研究では、ゲート絶縁膜と表面保護膜について独立に最適化を試み、ゲート絶縁膜としては、Al₂O₃/ZrO₂ 複合膜またはオゾン (O₃) を用いた ALD-Al₂O₃ 膜が、逆方向リーク特性としきい値電圧の安定性、および電流コラプス抑制の観点から優れていることが明らかとなった。一方、表面保護膜としては、保護膜の種類も重要であるが、それ以上に膜堆積前処理として、酸素プラズ

マ処理や高圧水蒸気熱処理などの酸化処理を AlGa_N 表面に施すことが重要であることが分かった。保護膜としては、スパッタ堆積した Si₃N₄ 膜や SiO₂ 膜などが有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

- [1] J. T. Asubar, Y. Kobayashi, K. Yoshitsugu, Z. Yatabe, H. Tokuda, M. Horita, Y. Uraoka, T. Hashizume, and M. Kuzuhara, "Current Collapse Reduction in AlGa_N/Ga_N HEMTs by High-Pressure Water Vapor Annealing," IEEE Trans. Electron Devices, 62, 2423-2428, (2015).
- [2] J. T. Asubar, Y. Sakaida, S. Yoshida, Z. Yatabe, H. Tokuda, T. Hashizume, and M. Kuzuhara, "Impact of oxygen plasma treatment on the dynamic on-resistance of AlGa_N/Ga_N high-electron-mobility transistors," Appl. Phys. Express, 8, 111001 (2015).
- [3] M. Kuzuhara and H. Tokuda, "Low-Loss and High-Voltage III-Nitride Transistors for Power Switching Applications," IEEE Trans. Electron Devices, 62, 405-413 (2015).
- [4] M. Hatano, N. Taniguchi, S. Kodama, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Reduced gate leakage and high thermal stability of AlGa_N/Ga_N MIS-HEMTs using Zr₂/Al₂O₃ gate dielectric stack," Appl. Phys. Express, 7, 044101 (2014).

[学会発表](計14件)

- [1] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, "Ga_N-based HEMTs for High-voltage and Low-loss Power Applications," Tech Dig., 46 th IEEE Semiconductor Interface Specialists Conf., Washington DC, USA, 5.1, 2015. (Invited)
- [2] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, "Ga_N-based Power Devices", 5 th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, Niigata, Japan, OB3-I-1, p.24, 2015. (Invited)
- [3] M. Kuzuhara, J. T. Asubar, and H. Tokuda, "Characterization and Reduction of Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs," 2015 German-Japanese-Spanish Joint Workshop, Kyoto, Japan, p.32, 2015. (Invited)
- [4] S. Ohi, Y. Sakaida, J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Correlation between Luminescence and Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs," 2015 CS-MANTECH, Arizona, USA, pp. 265-268, 2015.
- [5] Y. Sakaida, S. Toshida, J. T. Asubar, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Effect of O₂ plasma exposure on dynamic on-resistance in AlGa_N/Ga_N HEMTs," ISPlasma 2015, Nagoya, Japan, B2-O-06, Mar.29, 2015.
- [6] Y. Kobayashi, J. T. Asubar, K. Yoshitsugu, H. Tokuda, M. Horita, Y. Uraoka, and M. Kuzuhara,

"Suppressed Current Collapse in High Pressure Water Vapor Annealed AlGa_N/Ga_N HEMTs," CS-MANTECH, Arizona, USA, pp.185-188, 2015.

[7] R. Maeta, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Analysis of Time Dependent Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs," ASDAM 2014, Smolenice, Slovakia, pp. 149-152, 2014.

[8] M. Kuzuhara, and H. Tokuda, "Challenges of Ga_N-based transistors for power electronics applications," 2014 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD), Kanazawa, Japan. (Invited). pp. 19-20, 2014.

[9] T. Kakegami, S. Ohi, K-P. Sengendo, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Study of current collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs passivated with sputter-deposited SiO₂ and SiNx," Intl. Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Kyoto, Japan, pp. 54-55, 2014.

[10] S. Ohi, T. Kakegami, K-P. Sengendo, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Effect of passivation films on DC characteristics of AlGa_N/Ga_N HEMTs," Intl. Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Kyoto, Japan, pp. 62-63, 2014.

[11] S. Kodama, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Interface Properties of n-Ga_N MIS Diodes with ZrO₂/Al₂O₃ Laminated Films as a Gate Insulator," Intl. Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Kyoto, Japan, pp. 58-59, 2014.

[12] Y. Sakaida, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Improved Current Collapse in AlGa_N/Ga_N HEMTs by O₂ Plasma Treatment," CS-MANTECH, Denver, Colorado, USA, pp.197-200, 2014.

[13] Y. Sakaida, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Electrical characterization of AlGa_N/Ga_N HEMTs fabricated on CF₄-plasma-treated AlGa_N surface," Intl. Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, Osaka, Japan, pp. 58-59, 2013.

[14] M. Hatano, Y. Taniguchi, H. Tokuda, and M. Kuzuhara, "Improved high temperature characteristics of AlGa_N/Ga_N MIS HEMTs with ZrO₂/Al₂O₃ dual dielectric films," Intl. Conf. on Solid State Devices and Materials, Fukuoka, Japan, pp. 922-923, 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://fuee.u-fukui.ac.jp/~kuzuhara/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

葛原 正明 (KUZUHARA MASAOKI)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20377469

(2)研究分担者

徳田 博邦 (TOKUDA HIROKUNI)
福井大学・大学院工学研究科・特命助教
研究者番号：10625932