

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04497

研究課題名（和文）プラズマイオン衝撃により誘発されるp型GaNの電氣的ダメージの全容解明

研究課題名（英文）Global Investigation of Electrical Damage Introduced into p-GaN Films by Plasma Ion Bombardments

研究代表者

中野 由崇（Nakano, Yoshitaka）

中部大学・工学部・教授

研究者番号：60394722

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：次世代パワーデバイスとして期待されるGaN縦型パワーMOSトランジスタを大電流動作化させるためにはプラズマイオンを用いた反応性ドライエッチング技術による3次元的なデバイス構造の作製が必要不可欠となるが、プラズマイオンの物理的衝撃により電氣的ダメージが発生する。本研究では、p型GaNへのプラズマイオン衝撃による電氣的ダメージの生成挙動をMgアクセプター濃度分布と欠陥準位分布の観点から系統的に調べ、プラズマ処理時間や紫外線照射依存性を明確にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた成果は電氣的ダメージを排除する方向でプラズマ処理条件にフィードバックし、デバイスの高品質化・高信頼性化に向けたブレークスルーとなり得ることで学術的価値および実用上の価値が大きい。また、ノーマリーオフ動作のGaN縦型パワーMOSトランジスタの早期実用化へ繋がる。更に、欠陥準位の観点からプラズマ処理とデバイス特性・信頼性を結びつける研究成果であるため、材料・デバイス設計に実効的なボトムアップ提案が可能となり、GaN系電子デバイス分野の発展に大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In order to operate a GaN vertical power MOS transistor, which is expected as a next-generation power device, with a large current, it is needed to fabricate a three-dimensional device structure by reactive dry etching technology using plasma ions. In this case, however, electrical damage occurs due to the physical impact of plasma ions. In this study, we have systematically investigated the generation behavior of electrical damage caused by plasma ion impact on p-type GaN from the viewpoint of Mg acceptor concentration distribution and deep-level defect distribution, and clarified the plasma treatment time and UV irradiation dependence.

研究分野：半導体工学

キーワード：p型GaN プラズマイオン衝撃 電氣的ダメージ 欠陥準位 光容量過渡分光法

## 1. 研究開始当初の背景

近年、エネルギー資源の有効活用の観点から、パワーデバイスの超低損失化が省エネルギー化の中核技術の1つとなっている。現在、モーター駆動に代表される高耐圧・大電流用パワーデバイスは絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ(IGBT)に代表されるSiが主流であるが、次世代のポストSiとして4H-SiCをベースとした縦型パワーMOSトランジスタが実用化に入りつつある。近い将来には、より優れた物性値(バンドギャップ、絶縁破壊耐圧、飽和電子速度など)を有するGaNが、高耐圧・大電流・高速動作・小型化が可能なパワー半導体として期待されている。ここでは、Si-IGBTと同様にノーマリーオフ動作可能なGaN縦型パワーMOSトランジスタの実現を目指し、GaN自立基板・ゲート絶縁膜・p型GaNの局所的な使用・RIEなどの要素技術の開発が急ピッチに進められている(図1)。特に、ノーマリーオフ動作の実現にはp型GaNを局所的に用いたデバイス構造が必須となる。更に、大電流動作化にはプラズマイオンを用いた反応性ドライエッチング(RIE)技術による3次元的なデバイス構造の作製が必要不可欠となるが、プラズマイオンの物理的衝撃により誘発する点欠陥がバンドギャップ内に電氣的に活性な欠陥準位を形成し、デバイス特性に悪影響を及ぼす『電氣的ダメージ』となる。現状では、その詳細はほとんど明らかにされていない。したがって、プラズマイオン衝撃による電氣的ダメージの原因解明とその対策が最重要課題の1つとなっている。特に、深いMgアクセプター準位のため電氣的評価が困難なp型GaNにおける電氣的ダメージに関する研究例はほとんどなく、デバイス特性に直結する欠陥準位の観点から精査する必要がある。

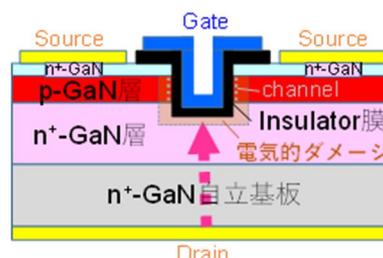


図1. ノーマリーオフ動作可能なGaN縦型パワーMOSトランジスタ(エンハンスモード)

## 2. 研究の目的

縦型GaNパワーMOSトランジスタ構造においてnチャンネル反転層を形成するp型GaNを対象として、種々のプラズマイオン衝撃で発生する支配的な欠陥準位の生成挙動を系統的に調べ、プラズマイオン衝撃による電氣的ダメージの全容を解明することを本研究の目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>基板上にMOCVD結晶成長したMgドープGaN(GaN:Mg)膜(膜厚:~5μm, Mg濃度:~1x10<sup>19</sup>cm<sup>-3</sup>)を窒素中800℃10minでp型活性化アニールして評価用サンプルとした。Au蒸着してリング状オーミック電極を形成後、直流グロー放電によりArプラズマ、CF<sub>4</sub>プラズマをそれぞれ1, 3, 10, 30, 60min照射した。ガス圧、放電電圧、イオン化電流はそれぞれ200mTorr, 280V, 2.55x10<sup>-4</sup>A/cm<sup>2</sup>とした。その後、Al蒸着してドット状ショットキー電極(1.5mm<sup>2</sup>)を形成しプレーナー型ショットキーバリアダイオード(SBD)を作製した。これらのSBDサンプルを用いて、Mgアクセプターが十分に追従可能な1kHzで静電容量-電圧(C-V)測定と光容量過渡分光(SSPC)測定を行い、ArプラズマとCF<sub>4</sub>プラズマのイオン衝撃によるp型GaNの有効アクセプター濃度|Na-Nd|分布と導入された欠陥準位濃度分布のプラズマ処理時間依存性を評価した。

(2) 同様のp型GaN膜にAuを蒸着してリング状オーミック電極を形成後、直流グロー放電によりArプラズマを10min照射した。Arガス圧、放電電圧、イオン化電流はそれぞれ200mTorr, 280V, 2.55x10<sup>-4</sup>A/cm<sup>2</sup>とし、Arプラズマ処理中に外部からUV光(365nm)を照射した(図2)。UV光照射強度は0, 0.8, 2.5, 8.4mW/cm<sup>2</sup>の4水準とした。その後、Al蒸着してドット状ショットキー電極(1.5mm<sup>2</sup>)を形成し評価用SBDsを作製した。これらの評価用SBDサンプルを用いて、C-V測定とSSPC測定を行い、有効アクセプター濃度|Na-Nd|分布と欠陥準位濃度分布の外部UV光照射強度依存性を評価した。

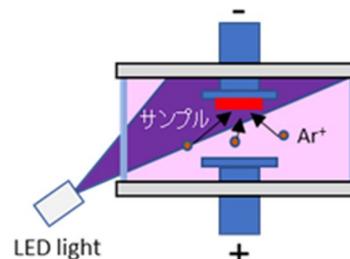


図2. 外部UV光照射機能を有した直流グロー放電実験装置

## 4. 研究成果

(1) Arプラズマ処理の場合、有効アクセプター濃度|Na-Nd|が膜表面では大きく減少し、膜内部

では大きく増加し、膜厚深さ方向に対してピーキーな濃度分布を示した。プラズマ処理時間が増加する程、Mgアクセプターが顕著に内方拡散していることが分かった(図3)。また、Arプラズマ処理により価電子帯上 $\sim 2.0\text{eV}$ 、 $\sim 3.2\text{eV}$ 付近に存在する2つの欠陥準位(T1, T2)が顕在化することが分かった(図4)。GaNでは物理的なイオン衝撃により多量のGa空孔( $V_{\text{Ga}}$ )とN空孔( $V_{\text{N}}$ )が生成し、それぞれ内方拡散, 外方拡散する傾向を有することを考慮すると、 $V_{\text{Ga}}$ は内方拡散し残存水素と結合し水素化Ga空孔( $V_{\text{Ga}}\text{-H}_n$ )複合欠陥を形成していると考えられる。この $V_{\text{Ga}}$ の内方拡散に伴いMgア

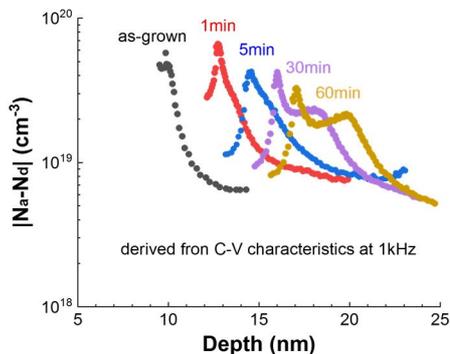


図3. 有効アクセプター濃度|Na-Nd|膜厚深さ方向分布のArプラズマ処理時間依存性

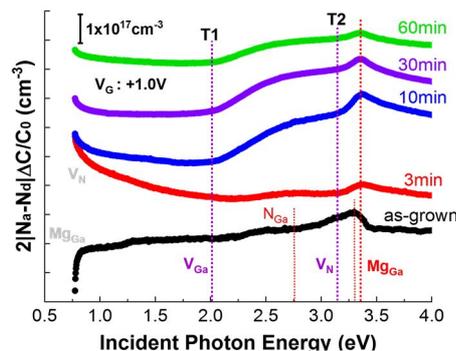


図4. SSPCスペクトルのArプラズマ処理時間依存性

クセプターも追従して内方拡散していると推測される。一方、 $\text{CF}_4$ プラズマ処理の場合、プラズマ処理時間に関わらずMgの有効アクセプター濃度|Na-Nd|は膜厚深さ方向に対してフラットな濃度分布のまま内方拡散していることが分かった。また、Arプラズマ処理で顕在化した2つの欠陥準位(T1, T2)は見られず、未処理サンプルの欠陥準位濃度よりも1桁程度低い濃度分布を有することが分かった。これは、 $\text{CF}_4$ プラズマイオンの物理的衝撃により生成したGa空孔やN空孔は、Fイオンの表面吸着により膜表面で強く終端されるため、膜内部への $V_{\text{Ga}}$ の内方拡散が抑制されていることを示唆しており、p-GaN膜内部に元々あった $V_{\text{Ga}}$ 関連の欠陥準位を介して、Mgアクセプターは内方拡散していると推定される。

(2)Ar プラズマ処理中の外部 UV 光照射強度が増加する程、Mg アクセプターが内方拡散すると同時に、価電子帯上 $\sim 2.0\text{eV}$ 、 $\sim 3.2\text{eV}$ 、伝導帯下 $\sim 3.35\text{eV}$  付近に 3 つの準位 (T1: $V_{\text{Ga}}$  関連, T2: $V_{\text{N}}$  関連, T3: $\text{Mg}_{\text{Ga}}$ ) が顕在化することが分かった(図 5,6)。特に、UV 光照射強度が増加する程、これらの準位も内方拡散しているこ

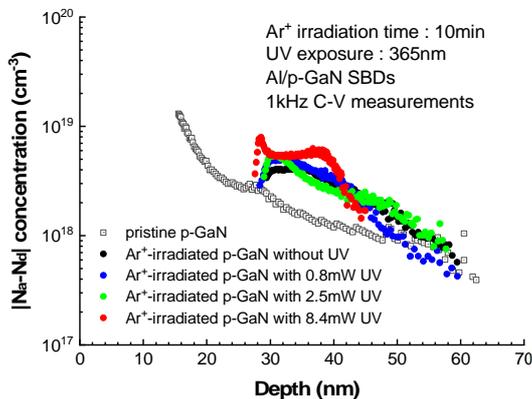


図5. 有効アクセプター濃度|Na-Nd|膜厚深さ方向分布のArプラズマ処理中の外部UV光照射強度依存性

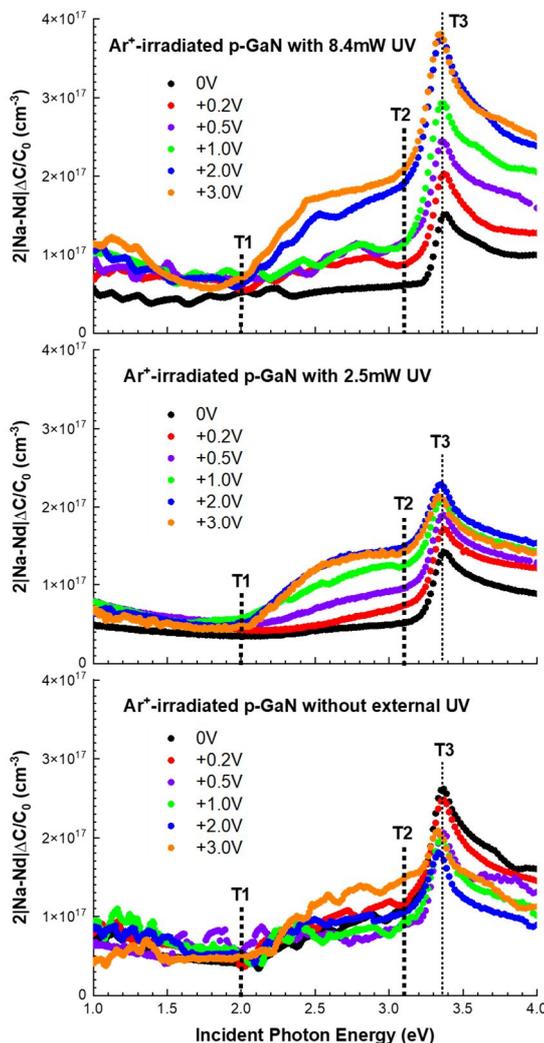


図6. SSPCスペクトルのArプラズマ処理中の外部UV光照射強度依存性

とを確認した。したがって、UV 光照射はイオ

ン衝撃による  $V_{Ga}$ ,  $V_N$  欠陥の導入を促進すると同時に、 $V_{Ga}$  の内方拡散に伴い Mg アクセプターが追随し内方拡散するための駆動力として機能していると推定される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kawakami Retsuo, Yoshitani Yuki, Shirai Akihiro, Yanagiya Shin-ichiro, Koide Hirofumi, Mimoto Yuki, Kajikawa Kosuke, Niibe Masahito, Nakano Yoshitaka, Azuma Chisato, Mukai Takashi	4. 巻 526
2. 論文標題 Effects of nonequilibrium atmospheric-pressure O <sub>2</sub> plasma-assisted annealing on anatase TiO <sub>2</sub> nanoparticles	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 146684 ~ 146684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apsusc.2020.146684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kawakami Retsuo, Yoshitani Yuki, Mitani Kimiaki, Niibe Masahito, Nakano Yoshitaka, Azuma Chisato, Mukai Takashi	4. 巻 509
2. 論文標題 Effects of air-based nonequilibrium atmospheric pressure plasma jet treatment on characteristics of polypropylene film surfaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Surface Science	6. 最初と最後の頁 144910 ~ 144910
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.apsusc.2019.144910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kato Masashi, Ichikawa Naoto, Nakano Yoshitaka	4. 巻 254
2. 論文標題 Characterisation of defects in p-type 4H-, 6H- and 3C-SiC epilayers grown on SiC substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Letters	6. 最初と最後の頁 96 ~ 98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.matlet.2019.07.043	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akira Toyotome, Yoshitaka Nakano, Retsuo Kawakami, Masahito Niibe
2. 発表標題 Electrical Damage Introduced into p-GaN Films by Ar Plasma Treatments
3. 学会等名 12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Hiroki Suzuki、Shigeomi Hishiki、Keisuke Kawamura、Yoshitaka Nakano
2. 発表標題	Electrical Investigation of Turn-On Capacitance Recovery Characteristics in Auto or External Carbon-doped AlGaIn/GaN/SiC/Si
3. 学会等名	12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	Yoshitaka Nakano、Akira Toyotome、Riku Suzuki、Yuki Yasuda
2. 発表標題	Annealing behavior of deep-level defects in unintentionally doped n-type b-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> single crystal
3. 学会等名	12th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 13th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	中野 由崇、豊留 彬、鈴木 陸、安田 優綺
2. 発表標題	高温度アニール処理したSiドープb-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (010)単結晶の電気特性評価
3. 学会等名	第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	味元 勇樹、川上 烈生、柳谷 伸一郎、新部 正人、中野 由崇、向井 孝志
2. 発表標題	大気圧低温O <sub>2</sub> プラズマ支援熱処理したアナターゼ/ルチル混晶型TiO <sub>2</sub> ナノ粒子の紫外/可視光触媒活性
3. 学会等名	第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2021年

1. 発表者名 中野 由崇、豊留 彬
2. 発表標題 Ar+イオン照射により生成するp型GaNの電氣的ダメージ評価
3. 学会等名 第80回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野 由崇、豊留 彬
2. 発表標題 CF4プラズマ処理したp型GaNの電氣的ダメージ評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nakano Yoshitaka, Akira Toyotome
2. 発表標題 Electrical Damage Introduced into p-GaN Films by Ar Plasma Treatments
3. 学会等名 7th International Symposium on Organic and Inorganic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakano Yoshitaka, Akira Toyotome
2. 発表標題 Deep-Level Defect Investigation of Si-Doped b-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Homoepitaxial Films Grown by Halide Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 2019-edition of Compound Semiconductor Week (CSW2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

中野研究室（物性デバイス）  
[https://www3.chubu.ac.jp/faculty/nakano\\_yoshitaka/#header](https://www3.chubu.ac.jp/faculty/nakano_yoshitaka/#header)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川上 烈生  (Kawakami Retsuo)		
研究協力者	新部 正人  (Niibe Masahito)		
研究協力者	角谷 正友  (Sumiya Masatomo)		
研究協力者	色川 芳宏  (Irokawa Yoshihiro)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------