

令和元年5月15日現在

機関番号：33910

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06276

研究課題名(和文) Si基板上AlGaIn/GaNヘテロ構造の欠陥準位とスイッチング特性の相関解明

研究課題名(英文) Correlation between deep-level defects and turn-on switching characteristics in AlGaIn/GaN hetero-structures grown on Si substrates

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：Si基板上に結晶成長したAlGaIn/GaN/GaN:Cヘテロ構造は低コスト化・大面積化に適した次世代の高周波パワーデバイス用基板として期待されているが、高抵抗化したGaIn:C層に炭素関連の深い欠陥準位が形成されるためターンオン時のスイッチング特性が極めて遅くなる傾向を示す。本研究では、GaIn:C層の欠陥準位とスイッチング特性の相関検討を通してスイッチング特性を支配する欠陥準位を特定した。また、3C-SiC層をヘテロエピタキシャル成長させたSi基板上に形成したAlGaIn/GaN/GaN:Cヘテロ構造はGaIn:C層の炭素ドーピング量に関わらずスイッチング特性が大きく改善できることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Si基板上に結晶成長したAlGaIn/GaNヘテロ構造は低コスト化・大面積化に適した次世代の高周波パワーデバイス用基板として期待されているが、高周波動作時にスイッチング特性が不安定となってしまう。本研究では、Si基板とAlGaIn/GaNヘテロ構造の間に格子整合性の高い3C-SiC層を挿入することで、ターンオン時のスイッチング特性を大きく改善できることやこれらの熱的安定性が優れていることを見出した。これにより、SiC/Si基板上に形成したAlGaIn/GaNヘテロ構造はバルク起因の電流コラプスを抑制でき、高周波パワーデバイスの開発は大きく加速されることが期待される。

研究成果の概要(英文)：AlGaIn/GaN/GaN:C hetero-structures grown on Si substrates are one of the next generation of RF high power devices from a viewpoint of low production costs. At present, however, these GaIn-based devices encounter undesirable bulk-related current collapse issues, where actual device performances at high frequencies can be easily limited by carbon-related deep-level defects in high resistive GaIn:C layers. In this study, we have systematically investigated a detailed correlation between deep-level defects and turn-on switching characteristics in AlGaIn/GaN/GaN:C hetero-structures fabricated on hetero-epitaxially grown 3C-SiC/Si substrates. As the results, these hetero-structures on 3C-SiC/Si substrates were found to expedite the turn-on switching characteristics in addition to the improvement of their thermal stability, compared to the conventional AlGaIn/GaN/GaN:C hetero-structures on Si substrates.

研究分野：電気電子材料工学

キーワード：AlGaIn/GaNヘテロ構造 Si基板 3C-SiC層 ターンオン・スイッチング特性 電流コラプス 炭素 欠陥準位 熱的安定性

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

IT化に伴い爆発的に増大する情報量に対応するため、無線通信システムのキーデバイスである高周波パワーデバイスの高性能化が要求されている。従来のSi系やGaAs系デバイスの限界を打破するため、バンドギャップが大きい窒化物半導体をベースとしたAlGaIn/GaN系の高移動度トランジスタ(HEMT)の実用化が急務となっている。AlGaIn/GaNヘテロ界面では、強力な内部電界により $10^{13}\text{cm}^{-2}$ レベルの極めて高濃度の2次元電子ガス(2DEG)を利用できるため消費電力の超低損失化が可能となる。このような背景のもと、米国・日本・欧州において活発に研究・開発が行われている。しかし、実デバイスでは高周波・高出力動作時に2DEG濃度が変調しスイッチング特性が不安定となる電流コラプスの問題が顕在化しており、実用化への障害となっている。AlGaIn層の表面準位を保護膜形成により不活性化することやゲート電極端をフィールドプレート構造化して電界集中を緩和することで電流コラプス現象を7~8割程度まで大幅に低減できるが、依然として電流コラプスを完全に抑制・排除するには至っていない。したがって、AlGaIn/GaN HEMTの実用化には、残されたバルク起因の電流コラプスの原因解明とその対策が急務となっている。このため、デバイス特性を大きく左右する結晶材料(エピウエハ)の高品質化が最重要課題であり、AlGaIn/GaNヘテロ構造中に存在するバルク欠陥準位に関する基礎的研究をデバイス特性の観点から系統的に行う必要がある。当面のAlGaIn/GaN HEMTの実用化にはコスト面や生産性の観点から大口径化が可能なSi基板上的AlGaIn/GaNヘテロ構造が望まれている。将来的にはGaN自立基板上AlGaIn/GaN HEMTが期待されている。特に、Si基板上AlGaIn/GaNヘテロ構造では、高耐圧化や縦方向リーク電流低減のため、 $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ レベルの高濃度炭素ドーピングによるGaN:Cバッファ層の高抵抗化が積極的に行われている反面、欠陥準位やスイッチング特性からの系統的な検討には未だ至っていない。

### 2. 研究の目的

(1)実用的な高濃度炭素ドーピングしたSi基板上AlGaIn/GaN/GaN:Cヘテロ構造における炭素取り込み関連の欠陥準位の生成挙動の明確化とスイッチング特性を支配する欠陥準位の特定を系統的に行い、欠陥準位とスイッチング特性の相関解明からGaN:Cバッファ層の高濃度炭素ドーピングの効果を精査することを本研究の目的とした。

(2)下地層からGaN:Cバッファ層へのホール注入を促進するために、メルトバックエッチング耐性及びGaNとの格子整合性に優れた3C-SiC層をヘテロエピタキシャル成長させたSi基板上に形成したAlGaIn/GaN/GaN:Cヘテロ構造を作製し、スイッチング特性を詳細に調べた。

### 3. 研究の方法

(1)MOCVD法により窒化物バッファ層を用いてSi(111)基板上に炭素ドーピング量の異なる3種類の $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}(25\text{nm})/\text{uid-GaN}(500\text{nm})/\text{GaN:C}(1000\text{nm})$ ヘテロ構造を作製した。炭素ドーピング量は $1\times 10^{17}$ ,  $1\times 10^{18}$ ,  $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ (サンプルA, B, C)とした。水銀プローブ電極を用いて、 $-30\text{V}\cdot 60\text{s}$ のオフ・ストレス電圧を印加後ゼロバイアスに戻した際のターンオン容量回復特性をC-t法で評価した。また、GaN:Cバッファ層に存在する欠陥準位を評価するため、 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}(25\text{nm})/\text{uid-GaN}(100\text{nm})/\text{GaN:C}(1700\text{nm}, \text{C}:1\times 10^{19}\text{cm}^{-3})$ ヘテロ構造を作製し、半透明Au膜を真空蒸着してプレーナー型ショットキーダイオード(SBD)を作製した。このSBDサンプルを用いて、ハロゲン光源からの単色分光照射を利用した光容量分光測定により室温でGaN:Cバッファ層に存在する欠陥準位を評価した。

(2)新たな試みとして、メルトバックエッチング耐性及びGaNとの格子整合性に優れた3C-SiC層(1~2 $\mu\text{m}$ )をガスソースMBE法によりヘテロエピタキシャル成長させたSi(111)基板上に形成した後、上述と同様の方法で、高濃度炭素ドーピングした $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}(20\text{nm})/\text{uid-GaN}(500\text{nm})/\text{GaN:C}(1\mu\text{m}, 5.4\mu\text{m})$ ヘテロ構造を作製した。GaN:C層の炭素ドーピング量は $1\times 10^{18}$ と $1\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ とした。これらの3C-SiC/Si基板上AlGaIn/uid-GaN/GaN:Cヘテロ構造の $-30\text{V}\cdot 60\text{s}$ のオフ・ストレス電圧印加後のゼロバイアス状態でのターンオン容量回復特性評価を行い、バルク起因の電流コラプス現象に対する3C-SiC層の効果を検討した。

### 4. 研究成果

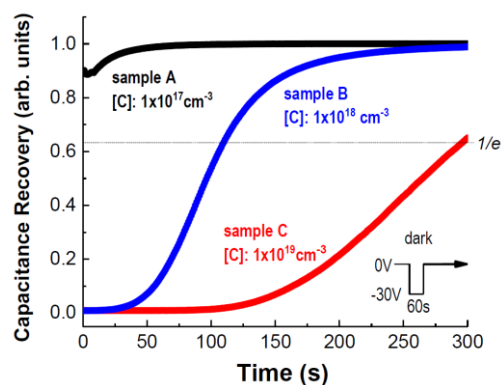


図 1. 炭素ドーピング量が異なる Si 基板上 AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造の $-30\text{V}\cdot 60\text{s}$ のオフ・ストレス印加後のゼロバイアス状態でのターンオン容量回復特性。

(1) 通常の AlGaIn/GaN ヘテロ構造に比べて高濃度炭素ドーピングした AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造ではターンオン時の容量回復が明らかに遅くなることを確認した(図 1)。特に、炭素ドーピング量が多いほど、その傾向は顕著となった。また、光容量分光測定から、通常の AlGaIn/GaN ヘテロ構造と比較して、高濃度炭素ドーピングした AlGaIn/GaN/GaN:C 構造では伝導帯下 2.1, 2.75, 3.25eV の 3 つの欠陥準位濃度が増加することが分かった(図 2)。これらの欠陥準位はサファイア基板上 AlGaIn/GaN ヘテロ構造で見られる炭素取り込み関連の欠陥準位と同様であり、 $V_{Ga-O_N}$ ,  $C_N-O_N$ ,  $C_N$  に帰属すると考えられる。特に、2.75eV と 3.25eV の炭素アクセプター関連の欠陥準位が顕在化することが分かった。次に、炭素ドーピング関連の欠陥準位 2.1, 2.75, 3.25eV の欠陥準位の光吸収エネルギー値に相当するロングパスフィルター(540, 390, 370nm)を用いてキセノン照射下でターンオン時の容量回復特性(ストレス電圧  $-30V$ , 60min)を評価した結果、390nm のフィルターを用いた場合、容量回復特性が著しく短くなり、白色照射時と同程度になることが分かった(図 3)。したがって、3.23eV の  $C_N$  欠陥準位がバルク起因の電流コラプス現象に対して支配的な役割を担っていることが分かった。以上から、GaN:C バッファ層中に存在する深い  $C_N$  欠陥準位がオン状態で 2DEG キャリアを捕獲し負に帯電し、オフ状態でも電荷中和されないため、ターンオン時の容量回復特性が遅くなっていると考えられる。

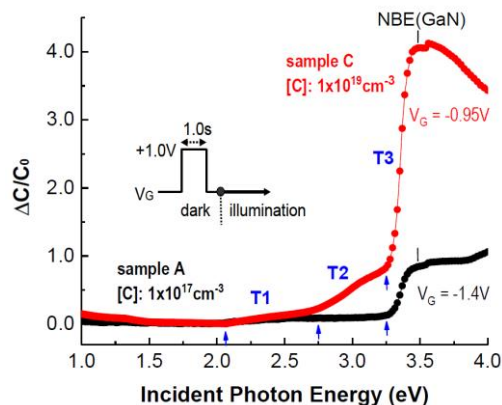


図 2. 炭素ドーピング量が異なる Si 基板上 AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造のゼロバイアス状態での光容量スペクトル。

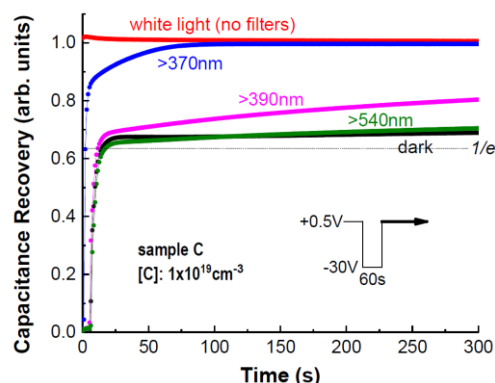


図 3. 高濃度炭素ドーピングした Si 基板上 AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造の  $-30V \cdot 60s$  のオフ・ストレス印加後の  $+0.5V$  状態でのターンオン容量回復特性の光照射波長依存性。

(2) 3C-SiC/Si 基板上の AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造では、GaN:C 層の炭素ドーピング量に関わらずターンオン容量は 3C-SiC 層なしの場合と比較して早く回復することが分かった(図 4)。また、3C-SiC/Si 基板, Si 基板の AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造はどちらの場合でも、窒素中  $150^\circ C$  アニールではターンオン容量は早く回復するが、空气中  $150^\circ C$  以上のアニールではターンオン容量回復は遅くなった。ただし、3C-SiC 層がある場合、特性劣化が大きく抑制されていることを確認した(図 5)。以上から、3C-SiC/Si 基板上 AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造では、GaN:C 層に存在する炭素関連の深い  $C_N$  欠陥準位に捕獲・蓄積された負電荷がターンオン状態で GaN:C/窒化物バッファ層界面からのホール注入により電荷中和されやすいこと及びこのホール注入界面が熱的に安定であることが示唆された[1]。

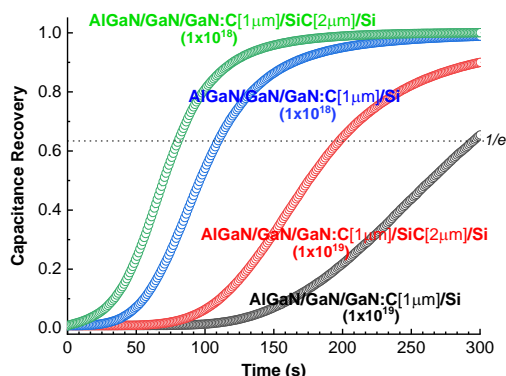


図 4. Si 基板と 3C-SiC/Si 基板上の AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造の  $-30V \cdot 60s$  のオフ・ストレス印加後のゼロバイアス状態でのターンオン容量回復特性。

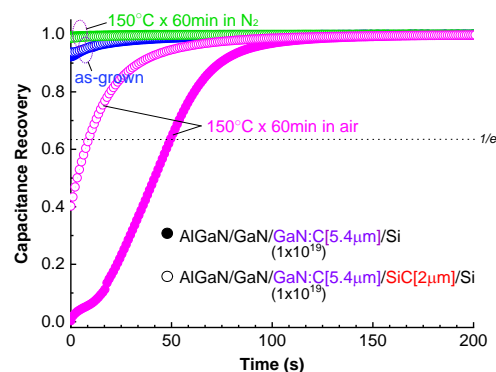


図 5.  $150^\circ C$  アニール前後の Si 基板と 3C-SiC/Si 基板上の AlGaIn/GaN/GaN:C ヘテロ構造の  $-30V \cdot 60s$  のオフ・ストレス印加後のゼロバイアス状態でのターンオン容量回復特性。

<引用文献>

[1] I. Chatterjee, M. J. Uren, S. Karboyan, A. Pooth, P. Moens, A. Banerjee, M. Kuball, IEEE Trans. on Electron Devices **64**, 977 (2017).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① R. Kawakami, M. Niibe, Y. Nakano, S. Yanagiya, Y. Yoshitani, C. Azuma, T. Mukai: Effects of ultraviolet wavelength and intensity on AlGa<sub>N</sub> thin film surfaces irradiated simultaneously with CF<sub>4</sub> plasma and ultraviolet, Vacuum **159**, 45-50 (2019). 査読有 DOI:10.1016/j.vacuum.2018.10.017
- ② Y. Nakano: Deep-level defects in homoepitaxial p-type GaN, Journal of Vacuum Science & Technology A **36**, 023001 (2018). 査読有 DOI:10.1116/1.5017867
- ③ M. Sumiya, N. Toyomitsu, Y. Nakano, J. Wang, Y. Harada, L. Sang, T. Sekiguchi, T. Yamaguchi, T. Honda: Deep-level defects related to the emissive pits in thick InGa<sub>N</sub> films on Ga<sub>N</sub> template and bulk substrates, APL Materials **5**, 016105 (2017). 査読有 DOI:10.1063/1.4974935
- ④ Y. Nakano: Electrical Investigation of Turn-On Capacitance Recovery Characteristics in Carbon-Doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> Hetero-Structures Grown on Si Substrates, ECS Journal of Solid State Science and Technology **6**, 828-831 (2017). 査読有 DOI: 10.1149/2.0191712jss
- ⑤ R. Kawakami, M. Niibe, Y. Nakano, R. Tanaka, C. Azuma, T. Mukai Takashi: Characteristics of N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> Plasma-Induced Damages on AlGa<sub>N</sub> Thin Film Surfaces, physica status solidi (a) **214**, 1700393 (2017). 査読有 DOI:10.1002/pssa.201700393
- ⑥ Y. Nakano, R. Kawakami, M. Niibe: Generation of electrical damage in n-Ga<sub>N</sub> films following treatment in a CF<sub>4</sub> plasma, Applied Physics Express **10**, 116201 (2017). 査読有 DOI:10.7567/APEX.10.116201
- ⑦ Y. Nakano: Electrical Characterization of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Single Crystal Substrates, ECS Journal of Solid State Science and Technology **6**, 615-617 (2017). 査読有 DOI:10.1149/2.0181709jss
- ⑧ R. Kawakami, M. Niibe, Y. Nakano, T. Mukai: AlGa<sub>N</sub> surfaces etched by CF<sub>4</sub> plasma with and without the assistance of near-ultraviolet irradiation, Vacuum **136**, 28-35 (2016). 査読有 DOI:10.1016/j.vacuum.2016.11.016

[学会発表] (計 13 件)

- ① 中野由崇, 北原功一, 大内澄人, 生川満久, 川村啓介: 3C-SiC/Si 基板上に作製した AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>:C ヘテロ構造のターンオン容量回復特性, 第 66 回応用物理学会 春季学術講演会, 2019 年.
- ② 川上烈生, 芳谷勇樹, 新部正人, 中野由崇, 東知里, 向井孝志: AlGa<sub>N</sub> 薄膜表面への CF<sub>4</sub> プラズマ処理中に及ぼす紫外光同時照射効果, 平成 30 年度電気関係学会 四国支部連合大会, 2018 年.
- ③ 中野由崇: HVPE 法で結晶成長したβ-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ホモエピ膜の電気的評価, 第 65 回応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年.
- ④ Y. Nakano: Electrical Investigation of p-Ga<sub>N</sub> Film Homo-Epitaxially Grown on Free-Standing Ga<sub>N</sub> Substrate, The 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS2017), 2017 年.
- ⑤ Y. Nakano, R. Kawakami, M. Niibe: Generation Behavior of Electrical Damage Introduced into n-Ga<sub>N</sub> Films by CF<sub>4</sub> Plasma Treatments, The 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS2017), 2017 年.
- ⑥ Y. Nakano, A. Chikamatsu: Electrical Investigation of Bulk-Related Current Collapses in AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>:C Hetero-Structures Grown on Si Substrates, The 29th International Conference on Defects in Semiconductors (ICDS2017), 2017 年.
- ⑦ Y. Nakano: Electrical Characterization of β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Single Crystal Substrate, The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2017), 2017 年.
- ⑧ A. Chikamatsu, Y. Nakano: Bulk-Related Current Collapses in Carbon-Doped AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>:C Hetero-Structures Grown on Si Substrates, The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO2017), 2017 年.
- ⑨ Y. Nakano: Electrical Damage Introduced into n-Ga<sub>N</sub> Films by CF<sub>4</sub> Plasma Treatments, 9th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2017), 2017 年.
- ⑩ 中野由崇, 新部正人, 川上烈生: CF<sub>4</sub> プラズマ処理した n-Ga<sub>N</sub> 膜の電気的ダメージ, 2016

- 年真空・表面科学合同講演会，2016年.
- ⑪ 近松晃仁，中野由崇：炭素ドーピングした Si 基板上 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造の容量回復特性，2016年真空・表面科学合同講演会，2016年.
  - ⑫ 中野由崇，近松晃仁：Si 基板上 AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>:C ヘテロ構造のターンオン容量回復特性，第77回応用物理学会秋季学術講演会，2016年.
  - ⑬ 中野由崇，浅村英俊，大内澄人，生川満久，稲垣徹，川村啓介：ガスソース MBE 法により作製した 3C-SiC(111) 自立基板の電気的評価，第77回応用物理学会秋季学術講演会，2016年.

〔産業財産権〕

○取得状況（計 2 件）

名称：ワイドギャップ半導体のバンドギャップ電子物性測定方法及びワイドギャップ半導体のバンドギャップ電子物性測定装置

発明者：中野由崇，中村 圭二

権利者：中部大学

種類：特許

番号：特許第 6023497 号

取得年：2016 年

国内外の別：国内

名称：半導体基板の表面モニター方法

発明者：中村 圭二，中野由崇

権利者：中部大学

種類：特許

番号：特許第 5911351 号

取得年：2016 年

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<https://researchmap.jp/y-nakano>

## 6. 研究組織

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：色川 芳宏

ローマ字氏名：(IROKAWA, Yoshihiro)

研究協力者氏名：角谷 正友

ローマ字氏名：(SUMIYA, Masatomo)

研究協力者氏名：新部 正人

ローマ字氏名：(NIIBE, Masato)

研究協力者氏名：川上 烈生

ローマ字氏名：(KAWAKAMI, Retsuo)

※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。