

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04281

研究課題名（和文）光でゲート制御するGaN縦型パワーデバイスの開発

研究課題名（英文）Development of an optically-gated GaN power device

研究代表者

大森 雅登（Omori, Masato）

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：70454444

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）：本研究ではGaN自立基板を用いて縦型npnフォトトランジスタ素子を作製し、光ゲート制御パワーデバイスとしての動作実証を行った。波長325nmのHe-Cdレーザーを素子に照射することで、6桁程度の高いエミッタ・コレクタ間電流のON/OFF比を得られた。また、耐電圧1kV設計の素子において、オン抵抗は22m $\Omega$ /cm<sup>2</sup>であった。入射光強度により非線形に電流が増加する拡散電流の効果を確認し、種々の特性評価からさらなる低オン抵抗化のための素子設計の指針を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素社会の実現のためには電力利用の高効率化が必要不可欠である。本研究では電力消費の1割を節約できると期待される窒化ガリウムを用いたパワーデバイスの実現を目指す研究を行った。本研究の成果はこのような省エネ用パワーデバイスの発展と普及を加速させることができ、社会的な意義は大きい。また、従来の構造とは異なる全く新しいパワーデバイスを提案し動作実証と特性解明を行った成果は学術的に大きな意義を持つ。

研究成果の概要（英文）：Gallium nitride (GaN) is a next-generation power semiconductor material that is expected to save a great deal of energy in power conversion devices. In this study, we fabricated GaN-npn transistors grown on GaN freestanding substrates and evaluated the characteristics of power phototransistors with gate operation by light irradiation. As a result, we confirmed the photo-induced ON/OFF of the current between emitter and collector by UV light irradiation to the surface aperture, and the ON/OFF ratio was large enough to be more than six orders of magnitude. The on-resistance of the device designed with a breakdown voltage of 1 kV was about 22 m $\Omega$ /cm<sup>2</sup>.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：パワーデバイス 窒化ガリウム 光ゲート フォトトランジスタ

### 1. 研究開始当初の背景

GaN は次世代パワー半導体材料として、素子の高出力化と高周波化において高い性能指数を有することから、電力変換装置の大幅な低損失化や高耐圧化、小型化による省エネルギー化への多大な貢献が期待されている。特に近年、GaN 自立基板の高品質化が急速に進展していることから、これまで難しかった高出力用の縦型パワーデバイスの作製が可能となり、耐圧 4kV の PN ダイオード (Kizilyalli ら 2015) や耐圧 1.2kV オン抵抗 1.8mΩ/cm<sup>2</sup> のトレンチ MOSFET (Oka ら 2015) などが実証されるなど、国内外で研究開発が活発化している。しかし、従来の MOSFET 構造ではエッチング加工や絶縁膜形成などの素子作製プロセス工程において結晶表面や内部に様々な欠陥が導入されるため、耐圧やチャネル移動度の低下、しきい値電圧のばらつき、電流リークなど性能劣化が著しく、現状では実用化の目処は立っていない。この問題を解決するためには、スイッチング素子の構造自体を根本的に見直し、欠陥導入要因となるプロセス工程を回避した今までにない新しい構造の縦型パワートランジスタを開発することも重要となってくる。

### 2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究では従来の MOSFET 構造とは異なり、複雑なゲート電極加工やゲート絶縁膜を必要としないフォトリソグラフィ構造に着目し、光照射でゲート制御できるパワートランジスタを試作し性能評価を行うことで、高耐圧・低損失な GaN 縦型パワートランジスタを開発することを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究で用いる光ゲート制御 GaN 縦型パワートランジスタの素子構造と動作の概略を図 1 に示す。図 1 (a) の光を照射していない OFF 状態では、電圧を印可しても p 型層が障壁となりエミッタからコレクタには電子は流れない。また、エミッタ・コレクタ間電圧の大部分は膜が厚くドーパ濃度の薄い基板側 n 型層に印加されるため、高い耐圧性能を有する。一方、図 1 (b) のように表面開口部に紫外光を照射すると、表面側 n 型層と p 型層との界面付近で発生したフォトキャリアが空乏層に蓄積し、内部電界を弱め順方向バイアス印加と同じ効果を得る。それにより、表面側 n 型層から p 型層に電子が注入され拡散し基板側の n 型層に到達することでエミッタ・コレクタ間に電流が流れ ON 状態となる。本素子は、素子構造が単純で作製が容易かつプロセス導入ダメージによる性能劣化が少ない、ノーマリーオフ、高電圧部とゲート制御部を電気的に絶縁できるためノイズと誤動作に強い、というパワーデバイスとしての重要な利点を備えている。

試料は転位密度が 10<sup>6</sup>cm<sup>-2</sup> 程度の低転位 n 型 GaN 自立基板上に n 型および p 型 GaN を結晶成長させたウエハを用いた。図 1 に示すような面内に選択的に n 型ドーパした npn 構造は、フォトリソグラフィにより表面をパターンニングし、n 型ドーパントである Si をイオン注入し活性化アニール処理を施すことで作製した。

### 4. 研究成果

実際に作製した素子の断面構造の概略図を図 2 に示す。試料は Si イオン注入前に Mg をアクセプタとして活性化させるため約 1000 Å で脱水素アニール処理を行っている。その後二次イオン質量分析法 (SIMS) により水素が検出加減以下であることを確認した。ウエハにはプロセスによりホール効果測定用のホールパターンも作製しており、まず Si イオン注入層に対してドナーの活性化率評価を行った。ホール効果測定の結果から、Si 注入量に対するドナー活性化率は 20% 以上と高く、素子動作には支障のない値を得た。また、フォトルミネッセンス (PL) 法による結晶性の評価も行ったが、注入前の発光強度と比較して 10 分の 1 以下と弱かったため、まだ結晶回復が十分ではないと言える。したがって、結晶回復のためのアニール条件を最適化させることが今後の課題となる。

次に、表面開口部への紫外光照射による電流電圧特性評価を行った。紫外光には He-Cd レーザー (325nm) を用いた。レーザー光強度を変化させて測定したエミッタ・コレクタ間の電流電

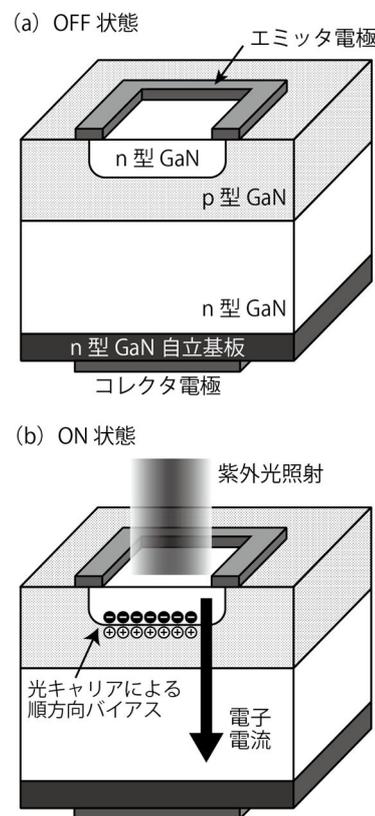


図 1. 光ゲート制御 GaN 縦型パワートランジスタの素子断面模式図。(a)エミッタ・コレクタ間に電圧を印可しても電流が流れない OFF 状態、(b)紫外光照射によって電流が流れる ON 状態

圧特性を図3に示す。光を照射していないときの暗電流と比較したON/OFF比は6桁以上と十分大きな差を得ることができた。レーザー光強度が $14.9\text{ kW/cm}^2$ の時のオン抵抗は約 $22\text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ であった。これは一般的なSiCの縦型パワーデバイスのオン抵抗である数 $\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ と比較してまだ高く、十分とは言えない。この原因として、p型ベース層の厚さとアクセプタ濃度が影響していると考えられるため、今後は素子構造をさらに最適化しオン抵抗の低減を目指す。

次に、エミッタ-コレクタ間電圧が1Vの時に流れる電流の入射光強度依存性を図4に示す。図から、比較的強度が弱い領域では電流増加は線形に近い特性を示し、光強度が強い領域では非線形特性を示すことが分かる。光強度が弱いときは表面側np界面をバンド変化が小さく、電流は主としてp型ベース層で吸収された光電流が支配的であると考えられる。光強度が強くなるとnp界面のバンドが十分順方向にバイアスされて表面n型層からの電子注入による拡散電流の影響が強くと表れていると考えられる。したがって、バイポーラトランジスタのベースに電圧を印可したときと同様の効果を光照射により得られたことが分かる。同様の実験を波長365nmのLEDを用いても行った結果、光強度に対してほぼ線形な特性となり、光電流の効果が支配的であった。これは波長365nmではGaNのバンドギャップとほぼ同等のエネルギーとなるため、光の侵入長が約 $2\mu\text{m}$ と長く、表面np界面での吸収が少ないためである。したがって、表面np界面に十分なキャリアを蓄積させるためには光の吸収長を考慮し、入射光波長や構造を設計する必要がある。

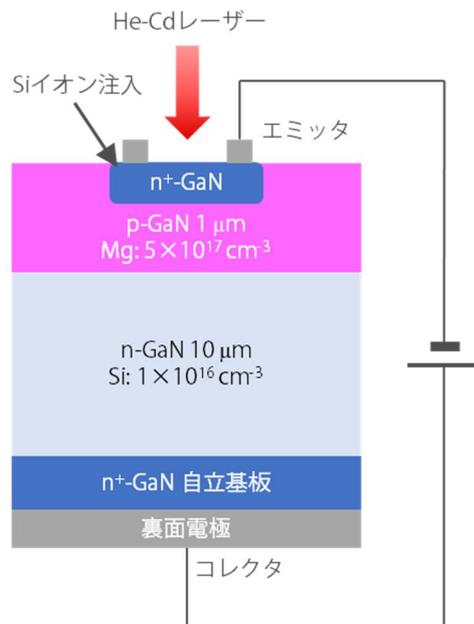


図2. 作製したGaNフォトトランジスタ素子の断面概略図

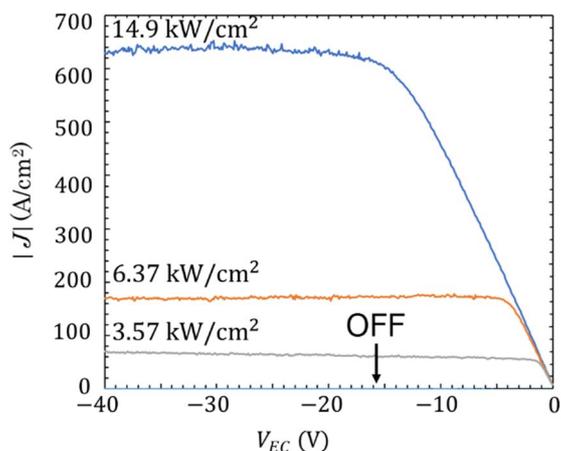


図3. GaNフォトトランジスタ素子のHe-Cdレーザー照射時と暗状態における電流電圧特性

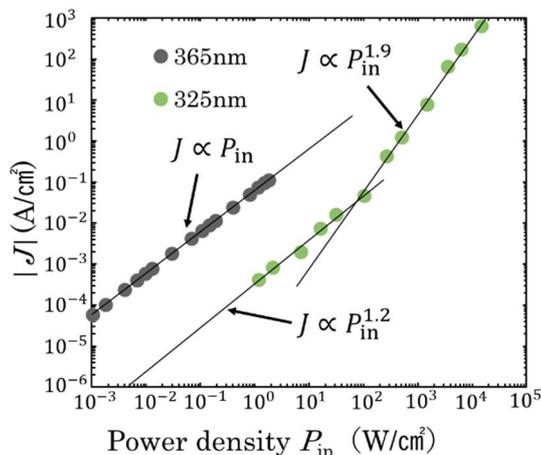


図4. GaNフォトトランジスタ素子のエミッタ-コレクタ間電流の入射光強度依存性

最後に、作製した素子の耐電圧測定結果を図5に示す。素子のドリフト層の厚さとp型ベース層の厚さおよびアクセプタ濃度を基に算出できる耐圧の計算値は約1kVであるが、図では-450Vから電流が増加しており、設計通りの耐圧となっていないことがわかる。これは、これは転移の影響やエッチングしたメサ壁面への電流リークの可能性が考えられ、より高耐圧化のためにはさらに素子構造や作製プロセスの改善が必要である。

以上まとめると、本研究では光でゲート操作するGaNパワートランジスタを作製し、その動作実証を行った。その結果、耐圧450V、オン抵抗 $22\text{ m}\Omega/\text{cm}^2$ という比較的GaN材料では比較的良好な特性を得ることができ、パワーデバイスとしての高い有効性を示すことができた。今後は本研究の知見をもとに素子の改良を行うことでさらなる高性能化を進めていく。

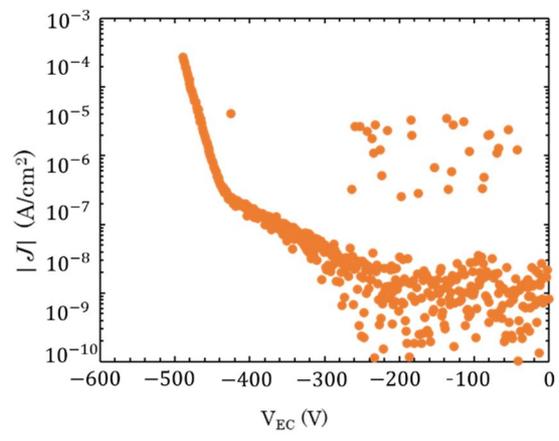


図5. GaN フォトトランジスタ素子の暗状態における電流電圧特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田竜垂, 白石舞翔, 宮崎泰成, 大森雅登
2. 発表標題 GaN フォトトランジスタにおける光照射特性の評価
3. 学会等名 2020年応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田竜垂, 白石舞翔, 宮崎泰成, 大森雅登
2. 発表標題 縦型GaNフォトトランジスタの特性評価
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 白石舞翔, 宮崎泰成, 和田竜垂, 大森雅登
2. 発表標題 Mg イオン注入GaN のフォトルミネッセンス特性の温度依存性
3. 学会等名 2020年応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎泰成, 白石舞翔, 和田竜垂, 大森雅登
2. 発表標題 フォトルミネッセンス法による GaN 中の Mg 濃度定量に関する研究
3. 学会等名 2020年応用物理学会九州支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎泰成, 白石舞翔, 和田竜垂, 渡邊健太, 大川峰司, 大森雅登
2. 発表標題 PL 法による Mg イオン注入 GaN のアクセプタ活性化率の評価
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 白石舞翔, 宮崎泰成, 和田竜垂, 渡邊健太, 大川峰司, 大森雅登
2. 発表標題 超高压熱処理を施したMgイオン注入GaNのPL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

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 窒化物半導体装置の製造方法	発明者 大森雅登、加地徹、 須田淳、ボコウスキ ミハウ スタニスワフ	権利者 名古屋大学、ト ヨタ自動車株式 会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-049952	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体装置の製造方法	発明者 大森雅登、加地徹、 須田淳、ボコウスキ ミハウ スタニスワフ	権利者 名古屋大学、ト ヨタ自動車株式 会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-049963	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体装置の製造方法	発明者 大森雅登、加地徹、 須田淳、ボコウスキ ミハウ スタニスワフ	権利者 名古屋大学、ト ヨタ自動車株式 会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-049981	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体層の不純物濃度を測定する測定方法及び測定装置	発明者 大川峰司, 渡邊健 太, 大森雅登	権利者 (株)デンソー、ト ヨタ自動車(株)、 (株)ミライズテク
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-024635	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

#### 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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------