

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04590

研究課題名（和文）硼素イオン注入による絶縁性GaN結晶層を用いた超低損失パワー素子の高破壊耐量化

研究課題名（英文）Study of boron-implanted resistive crystal layers to enhance avalanche ruggedness of ultra-low loss GaN power devices

研究代表者

三浦 喜直 (Miura, Yoshinao)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員

研究者番号：90828287

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：縦型GaNパワー素子の高破壊耐量化のために、硼素イオン注入でp型GaNエピ結晶が絶縁化～高抵抗化する現象を調べ、このp型結晶層の伝導特性を評価し、これを組み込んだpn接合終端構造（JTE）の最適化設計を検討した。p型層伝導性の硼素イオン注入条件依存性およびシミュレーションによる最適化設計をもとに、JTE構造を含む縦型pnダイオードを自立GaN基板上に試作した。ダイオード耐圧は硼素イオン注入のドーズ量最適化で理論値に近づき、良好なアバランシェ耐性を示すことを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GaNエピ結晶への硼素イオン注入によるpn終端構造の高耐圧化設計は、本研究の実験で性能実証したpnダイオードだけでなく、パワーMOSFETなど他の縦型GaNパワー素子にも適用可能である。提案したプロセスは、比較的良好的なプロセス制御性と小さなプロセス負荷を特長としており、電力変換の損失を大幅に低減すると期待される縦型GaNパワー素子の実用化を加速させる可能性があり、社会的意義が大きい。また、硼素元素を含有させたGaN結晶の素子応用はこれまでにほとんど報告されておらず、素子性能の向上および特性の安定性を明らかにした点で、学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：To enhance avalanche ruggedness of vertical GaN power devices, we investigated resistivity modulation phenomena of boron-implanted p-type epitaxial GaN layers to control acceptor concentration of the p-layer, and studied optimization of junction-termination-extension (JTE) structures using the p-layer. We fabricated vertical pn diodes with the JTE structures on free standing GaN substrates, based on the results of surface conductivity measured for the boron-implanted p-layer and simulated design of the devices. We demonstrated that breakdown voltage for the fabricated devices approached to theoretical value for ideal pn junctions by tuning the boron-implantation conditions. It was also found that the optimized devices showed high avalanche immunity.

研究分野：パワー半導体デバイス

キーワード：窒化ガリウム 縦型パワーデバイス 高耐圧 終端構造 電界緩和 硼素イオン注入

### 1. 研究開始当初の背景

GaN 半導体の優れた物性は低損失パワー素子に好適であり、GaN パワー素子を電力変換機器に適用することで達成できる超省エネ効果は、近い将来、低炭素社会の構築に結びつくものと期待されている。高速スイッチング性能を特長とする 650 V 耐圧クラスの横型 GaN-HEMT が Si 基板上の GaN エピ結晶を用いて製品化され、高周波駆動で大幅に小型化された携帯機器用電源が市場に普及している。一方、近年では結晶成長技術の進展に伴って自立 GaN 基板の品質が向上し、この基板に耐圧 1kV を超える縦型 GaN パワー素子が試作可能になってきた。この縦型素子は、横型では難しい高耐圧化、大電流化、低オン抵抗化が可能であり、幅広いパワーエレクトロニクス分野への応用が期待されている。しかし高い堅牢性を備えた縦型素子を実現するためには、GaN の pn 終端構造の設計・プロセス技術が未確立であるという課題があった。

理想的な pn 終端構造では、逆バイアス印加時に終端部の電界集中が十分緩和されており、アバランシェブレイクダウン時でも終端部にアバランシェ電流は流れない。Si を始めとする従来のパワー素子の終端構造では、p 型不純物のイオン注入により半導体表面に低アクセプタ濃度の p 型領域を設けているが、GaN 半導体では、イオン注入した p 型不純物 (Mg) の活性化が難しいという課題があった。一方最近では、比較的高不純物濃度の p 型エピ結晶層表面に窒素や水素などの不純物を添加することで pn 終端構造を高耐圧化できるとの結果が報告されていた。我々は、窒素や水素より GaN 結晶中での熱的安定性が高いと期待される硼素に着目し、硼素イオン注入で p 型 GaN 結晶が絶縁化～高抵抗化するという独自の知見に基づき、この現象を用いた p 型アクセプタ濃度制御および終端構造の高耐圧化を明らかにしようとした。

### 2. 研究の目的

硼素イオン注入で p 型 GaN エピ結晶が高抵抗化～絶縁化する新現象を利用することで、pn 終端構造の高耐圧化に必要な低アクセプタ濃度の制御性を探るとともに、この構造を用いた縦型 pn ダイオードの設計・試作によって終端構造の高耐圧化を検証する。さらに硼素イオン注入による p 型結晶の高抵抗化機構を明らかにし、縦型 GaN パワーデバイスの高破壊耐量化に向けた終端構造の設計指針を提示することを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究で検討した終端構造のうち、設計概念を示す基本構造を図 1 に示す。メサ構造によってダイオードを電気的に周囲からアイソレートするとともに、メサエッジに沿った領域に硼素イオンを注入して GaN 結晶表面を高抵抗化させた。特にメサエッジ内側の p 型領域を適度に不活性化することで pn 接合のチャージバランスを取り、逆バイアス印加時の電界集中を緩和することを意図しており、これは SiC パワー素子などで報告されている JTE (Junction Termination Extension) 構造に対応する。JTE を高耐圧化するにはメサエッジ内側の p 型層のアクセプタ濃度制御が重要であることから、本研究では、硼素イオン注入およびポストアニールによってこれを制御できるとの仮説に基づき、プロセス条件振りなどによってこの仮説を検証する実験を進めた。なお図 1 で、メサエッジ外側へのイオン注入はドライエッチによるダメージ起因表面準位の不活性化を意図している。

上記終端構造の耐圧を評価するため、1.2 kV 級の耐圧をターゲットとした円形 pn ダイオード (200  $\mu\text{m}$   $\phi$ ) を試作した。典型的なプロセスでは、n 型の自立 GaN 基板に、MOVPE 成長法によって n-型 GaN エピ層 10  $\mu\text{m}$  ( $[\text{Si}] \sim 1.5\text{E}16 \text{ cm}^{-3}$ )、p-型 GaN エピ層 1.0  $\mu\text{m}$  ( $[\text{Mg}] \sim 1.5\text{E}18 \text{ cm}^{-3}$ )、p++型 GaN エピ層 50 nm ( $[\text{Mg}] \sim 1\text{E}20 \text{ cm}^{-3}$ ) をこの順に堆積した。円形 pn ダイオードは、深さ 2.5  $\mu\text{m}$  のメサをドライエッチで形成後、メサエッジに沿った領域に厚さ 3  $\mu\text{m}$  のフォトレジストをマスクとした硼素イオン注入 (最大 400 keV の多段注入) を行い、さらに窒素中でのポストアニールを行って硼素が n 型 GaN 層に十分届く矩形プロファイルとした。メサエッジ内側の硼素イオン注入領域の長さ ( $L_{\text{ext}}$ : JTE 長) は終端構造の主要なパラメータであり、13~65  $\mu\text{m}$  の範囲で水準振りした。アノード電極は、SiO<sub>2</sub> 保護膜形成後の Ni デポにより、カソード電極は、裏面 TiN/Al/Ti デポにより形成した。

本終端構造の設計ガイドラインとして、TCAD シミュレーションを用いて耐圧および電界分布

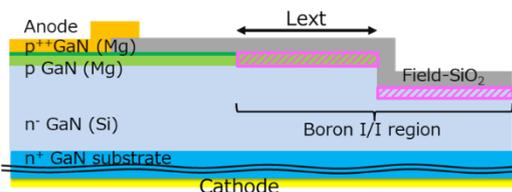


図1 試作したpnダイオード終端構造の断面図

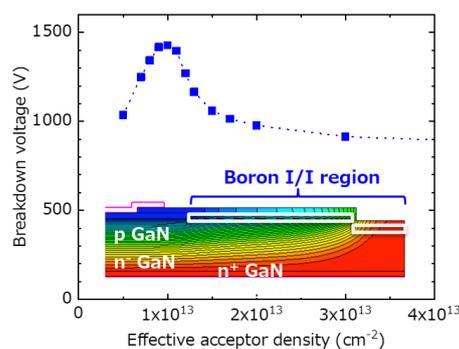


図2 シミュレーションによるpnダイオード耐圧のJTE領域アクセプタ面密度依存性

を調べた。素子の寸法および不純物濃度を試作 pn ダイオードに合わせて設定し、高抵抗 p 型領域のアクセプタ面密度  $N_A^{ext}$  および JTE 長  $L_{ext}$  をパラメータとして水準振りした。図 2 は  $L_{ext}=20 \mu m$  での耐圧の  $N_A^{ext}$  依存性の計算例である。最大耐圧 1350 V が得られる最適条件  $N_A^{ext}=1.0E13 \text{ cm}^{-2}$  付近では、図 2 の挿入図に示すように、等ポテンシャル面は  $L_{ext}$  の延在方向に広がって電界集中が緩和しているのに対し、 $N_A^{ext}$  不足では高抵抗領域内側エッジへの電界集中、 $N_A^{ext}$  過剰ではメサエッジへの電界集中により、それぞれ耐圧が低下することがわかった。この結果から、耐圧の硼素イオン注入条件依存性の評価実験を手掛かりに、本終端構造を有効化するプロセス条件を探索するとともに、構造最適化に欠かせない、実効アクセプタ面密度と硼素イオン注入プロセス条件との対応関係を明らかにすることを目指した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 硼素イオン注入による p 型 GaN 層の高抵抗化

予備実験として硼素イオン注入後の窒素中のポストアニールが p 型層の伝導性に及ぼす影響を評価した。図 3 のように、簡易プロセスにより作成した円形 TLM 素子により、硼素イオン注入した p 型層を流れる電流の I-V 特性のアニール温度依存性を測定した。高ドーズ ( $[B]=8.1E13 \text{ cm}^{-2}$ ) のイオン注入直後は、p 型層が高抵抗であるのに対し、1000°C、30 min アニールでは大幅に伝導度が回復し、800°C、30 min アニールでは中間的な伝導度となった。本実験では、JTE 構造を最適化する  $\sim 1.0E13 \text{ cm}^{-2}$  のアクセプタ面密度をカバーする可能性のある暫定条件として、800°C、30 min のポストアニール条件を採用した。

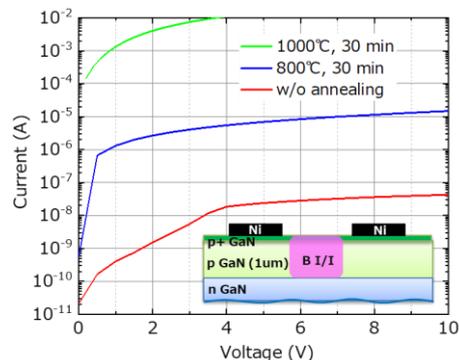


図3 硼素イオン注入p型GaNエピ層の熱処理による伝導特性の変化(円形TLM測定)

##### (2) 硼素イオン注入終端構造の高耐圧化

「研究の方法」で述べた pn ダイオードの試作によって、提案する硼素イオン注入終端構造による耐圧上昇効果を検証した。図 4 は、硼素イオン注入有りおよび硼素イオン注入無し(単純なメサ終端)での逆バイアス印加によるアバランシェ電流 J-V 波形の比較である。イオン注入無しでは、メサ終端部に電界集中して耐圧が 1000 V 以下にとどまったのに対し、イオン注入有りでは、硼素ドーズ量  $[B]=8.1E12 \text{ cm}^{-2}$  で最大耐圧 1400 V に達し(耐圧は電流密度  $1 \text{ mA/cm}^2$  で定義)、大幅な高耐圧化を確認できた。

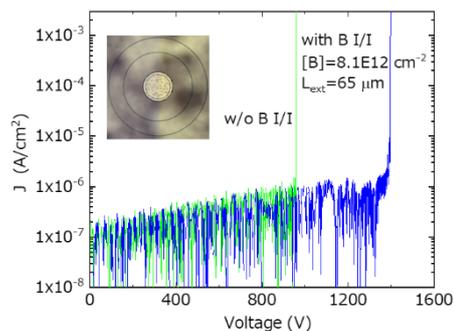


図4 pnダイオード逆バイアスJ-V波形

図 5 は、3 水準の硼素ドーズ量に対する耐圧の  $L_{ext}$  依存性である。 $[B]=8.1E12 \text{ cm}^{-2}$  では、耐圧が  $L_{ext}$  とともに増加した後、飽和する傾向を示した。一方、低ドーズ ( $[B]=2.4E12 \text{ cm}^{-2}$ )、高ドーズ ( $[B]=2.4E13 \text{ cm}^{-2}$ ) での耐圧は 1000 V 以下であり、 $L_{ext}$  依存性は見られなかった。これらの結果は、シミュレーションで得られた JTE 構造耐圧の  $N_A^{ext}$  依存性および  $L_{ext}$  依存性の特徴と良く対応しており、提案した終端構造の高耐圧化が硼素イオン注入による JTE 機構によってもたらされたことを強く示唆している。アバランシェブレイクダウン時のフォトエミッション分布を観察したところ、低ドーズ ( $[B]=2.4E12 \text{ cm}^{-2}$ ) ではメサエッジに沿った発光が、高ドーズ ( $[B]=2.4E13 \text{ cm}^{-2}$ ) では高抵抗 p 型領域の内側エッジに沿った発光が、それぞれ観測された。発光箇所は、JTE 構造の電荷バランスが崩れた際の電界集中箇所(シミュレーションによる)と対応しており、最適ドーズ量での高耐圧化が JTE 機構によるとする予想を支持している。

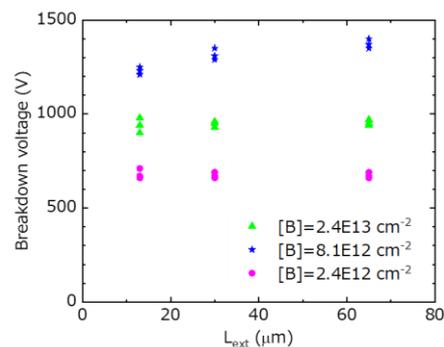


図5 3水準の硼素ドーズ条件に対するpnダイオード耐圧のJTE長( $L_{ext}$ )依存性

試作した水準のうち最大耐圧 1400 V が得られた pn ダイオード ( $[B]=8.1E12 \text{ cm}^{-2}$ ,  $L_{ext}=65 \mu m$ ) のアバランシェブレイクダウン特性を調べた。図 6 は、アバランシェ電流波形の温度依存性である。耐圧は温度とともに上昇しており ( $\sim 1.3 \text{ V/K}$ )、インパクトイオン化は GaN 結晶内部で生じていると推定される。さらに同水準の pn ダイオードに対し、アバランシェ電流密度が  $3 \text{ A/cm}^2$  に達するまでの逆バイアス掃引を 5 回繰り返したが、J-V 波形に変化は見られなかった。このことは、

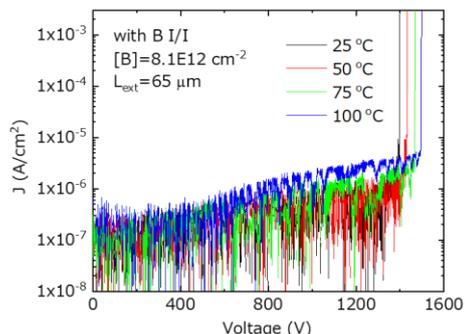


図6 pnダイオード逆バイアスJ-V波形の温度依存性

高耐圧特性に加えて高いアバランシェ耐量を備えていることを示しており、終端構造での電界集中が十分緩和しているためと考えられる。本チップの n 型ドリフト層の実効ドナー濃度は C-V 特性の解析から  $N_D - N_A = 8E15 \text{ cm}^{-3}$  と求められ、対応する 1 次元単純 pn 接合の理想耐圧は 1500 V と計算された。このことは試作した pn ダイオードの耐圧が、提案する終端構造によって理想値に近い耐圧まで押し上げられたことを示している。

### (3) 硼素イオン注入 p 型 GaN エピ層の伝導度評価

提案する終端構造を高精度に設計するためには、硼素イオン注入で高抵抗化した p 型 GaN エピ層のアクセプタ濃度を把握する必要がある。そこでまず、硼素イオン注入した p 型 GaN 層の伝導特性を評価する Hall 効果測定を行った。硼素イオン注入なしでは、室温のホール濃度として  $[h] = 1.0E17 \text{ cm}^{-3}$  が得られ、ホール濃度の温度依存性から求めた活性化エネルギーは  $E_A \sim 200 \text{ meV}$  で、p 型エピ層の Mg 不純物濃度 ( $[Mg] \sim 1.5E18 \text{ cm}^{-3}$ ) と矛盾しない結果が得られた。しかし、硼素イオン注入のドーズ量とともに p 型エピ層の伝導度は指数関数的に低下し、最適条件の  $[B] = 8.1E12 \text{ cm}^{-2}$  では十分な精度でホール濃度を決定できなかった。これは、硼素ドーズ量と共にイオン注入ダメージ起因の深い準位が増加し、ホール移動度が極端に低下したためと推定された。

そこで pn 接合の逆バイアス印加によって p 型層が空乏化する際のホール伝導度変化からアクセプタ濃度を評価する手法を考案し、メサ構造でアイソレートした p+/p-/p+ の表面伝導評価素子を作成した。図 7 は、硼素イオン注入なし水準および最大耐圧が得られたドーズ量  $[B] = 8.1E12 \text{ cm}^{-2}$  の水準での、p+ 電極間を流れる I-V 特性のバックバイアス ( $V_{back}$ ) 依存性である。前者では電流の  $V_{back}$  依存性が小さいのに対し、後者では  $V_{back}$  とともに電流が大幅に減少し、p 型層中の実効アクセプタ濃度が低下して p 型層が空乏化し易くなったことを示している。伝導度変化率の  $V_{back}$  依存性から、硼素イオン注入なし水準のアクセプタ面密度は  $N_A \sim 1.5E14 \text{ cm}^{-2}$ 、硼素イオン注入有り水準は  $N_A \sim 1.2E13 \text{ cm}^{-2}$  と見積もられた。後者のアクセプタ面密度がシミュレーションによる JTE 最適化設計値  $N_A = 1.0E13 \text{ cm}^{-2}$  に近いことから、本終端構造での理想耐圧に近い高耐圧化は、硼素イオン注入による p 型エピ層のアクセプタ濃度の最適化によってもたらされたと考えられる。また本評価法は、硼素イオン注入後のアクセプタ面密度評価および終端構造設計に有効である期待される。

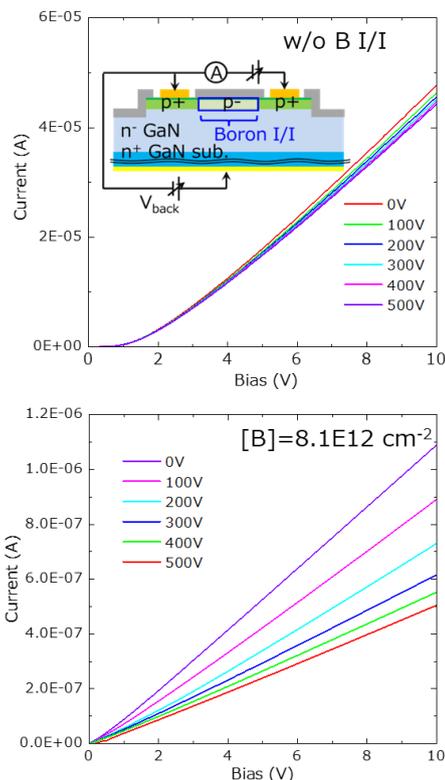


図7 表面伝導度評価素子によるp型層伝導度のバックバイアス依存性

### (4) 傾斜 JTE 構造 (graded-JTE) による耐圧設計マージンの拡大

図 1 に示す一様なアクセプタ濃度を持つ終端構造 (single-JTE) で、シミュレーション設計に近い耐圧が得られたことから、本終端構造設計をメサエッジに近づくほどアクセプタ濃度が減少する graded-JTE 構造に発展させることで、電界緩和設計およびアクセプタ濃度制御性のマージン拡大を試みた。硼素イオン注入領域をリング状に分割して終端部外側に近づくほど開口幅を拡げるマスク設計とし、アクセプタ濃度に実効的な勾配をつけることで一回のイオン注入で graded-JTE 構造を形成できるようにした。シミュレーションによって終端レイアウトの絞り込みを行い、10 種以上の終端レイアウトによる pn ダイオードのチップ試作を行って、耐圧の硼素ドーズ量依存性を評価した。図 8 は最も効果の得られた graded-JTE 構造での結果である。同一チップ上に試作した single-JTE に比べて、graded-JTE の硼素ドーズ量依存性は小さく、本構造によって設計マージンの拡大を確認できた。

次に 4 インチ自立 GaN 基板上に、上記 graded-JTE 構造を備えた pn ダイオードを試作した。室温でのアバランシェブレイクダウン波形評価により、ウェハ全面で、図 6 と同様の良好な J-V 特性が得られることを確認した。耐圧分布は、ウェハ中央が最も高く (1450

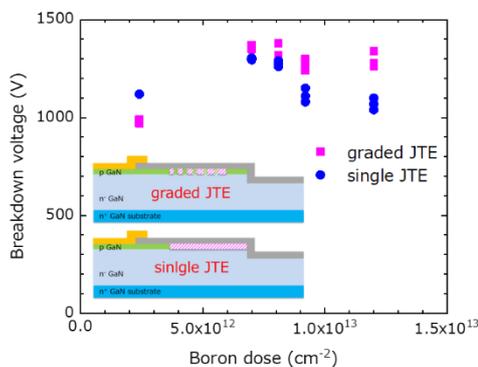


図8 graded-JTEおよびsingle-JTE構造のpnダイオード耐圧の硼素ドーズ量依存性

V)、ウェハ周縁部に近づくにつれて～1000 Vまで減少した。これはnドリフト層の実効ドナー濃度 $N_D$ が、ウェハ中央で低くウェハ周縁部で高くなる円対称の分布(C-V解析による)に対応しており、耐圧と実効ドナー濃度との間に図9のような相関関係が得られた。実験で得られた相関プロットの上限は、文献のインパクトイオン化係数をもとにシミュレーション計算した1次元pn接合での耐圧-ドナー濃度の関係を示すオレンジライン(実験でのドリフト層厚 $10\mu\text{m}$ を仮定)に近づくことから、本提案のgraded-JTE構造を備えたpnダイオードの耐圧は、素子の出来栄が良好であれば理論耐圧に近づくと考えられる。

以上のように、提案する硼素イオン注入を用いたプロセスによれば、JTE機構によって良好な耐圧特性を示すpn終端構造が設計可能であると期待される。

本プロセスは $1000^\circ\text{C}$ 以上の高温熱処理を必要としないことからプロセス負荷が小さく、他のGaNプロセス工程との親和性が高いと考えられる。一方で、硼素イオン注入による高抵抗化p型領域は深い準位の密度が高い可能性があり、スイッチング波形や、堅牢性への影響を評価する必要がある。今後は、大面積ダイオードの試作によってスイッチング特性や破壊耐量特性を評価するとともに、縦型パワーMOSなどの終端構造にも適用して実用性検証を進めていく予定である。

#### <引用文献>

- ① Y. Miura, H. Hirai, A. Nakajima, and S. Harada, “A new JTE technique for vertical GaN power devices by conductivity control using boron implantation into p-type layer”, ISPSD, pp. 343 (2021).
- ② Y. Miura, H. Hirai, A. Nakajima, and S. Harada, “Wafer-scale fabrication of vertical GaN p-n diodes with graded JTE structures using multiple-zone boron implantation”, ISPSD, pp. 329 (2022).
- ③ 三浦喜直、平井悠久、中島昭、原田信介、“硼素イオン注入による伝導度制御p型GaNエピ層を用いた縦型素子用JTE構造の設計”，第9回先進パワー半導体分科会，pp. 205 (2022).

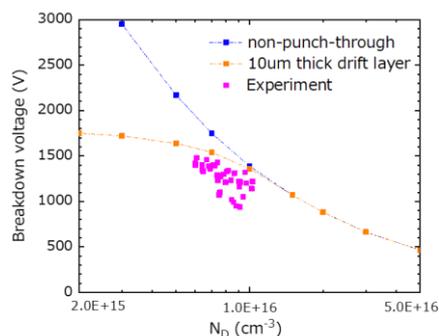


図9 4インチウェハ試作によるgraded-JTEを備えたウェハ面内全体でのpnダイオードの耐圧とドナー濃度の相関。点線は、1次元pnダイオードのシミュレーション計算結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miura Yoshinao, Hirai Hirohisa, Nakajima Akira, Harada Shinsuke	4. 巻 -
2. 論文標題 A New JTE Technique for Vertical GaN Power Devices by Conductivity Control Using Boron Implantation into p-Type Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC' (ISPSD)	6. 最初と最後の頁 343-346
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISPSD50666.2021.9452219	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Miura Yoshinao, Hirai Hirohisa, Nakajima Akira, Harada Shinsuke	4. 巻 -
2. 論文標題 Wafer-scale Fabrication of Vertical GaN p-n Diodes with Graded JTE Structures Using Multiple-zone Boron Implantation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC' (ISPSD)	6. 最初と最後の頁 329-332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISPSD49238.2022.9813654	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshinao Miura, Hirohisa Hirai, Akira Nakajima, and Shinsuke Harada
2. 発表標題 A New JTE Technique for Vertical GaN Power Devices by Conductivity Control Using Boron Implantation into p-Type Layer
3. 学会等名 Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC' (ISPSD) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinao Miura, Hirohisa Hirai, Akira Nakajima, and Shinsuke Harada
2. 発表標題 Wafer-scale Fabrication of Vertical GaN p-n Diodes with Graded JTE Structures Using Multiple-zone Boron Implantation
3. 学会等名 Int. Symp. Power Semiconductor Devices and IC' (ISPSD) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三浦喜直、平井悠久、中島昭、原田信介
2. 発表標題 硼素イオン注入による伝導度制御p型GaNエピ層を用いた縦型素子用JTE構造の設計
3. 学会等名 第9回先進パワー半導体分科会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 半導体装置および半導体装置の製造方法	発明者 三浦喜直 中島昭 沈旭強 平井悠久 原田信介	権利者 国立研究開発法 人産業技術総合 研究所
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2022/017898	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

〔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
研究 分担者	沈 旭強  (Shen Xu-Qiang)  (50272381)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・上級主任研究員   (82626)	
研究 分担者	中島 昭  (Nakajima Akira)  (60450657)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員   (82626)	

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