

5. 高破壊耐量 GaN p-n 接合ダイオードの研究

太田 博*、浅井 直美*、三島 友義**

1. はじめに

地球温暖化対策・CO₂排出削減に向けて、ワイドバンドギャップ半導体を用いた電力変換用の超高効率パワーデバイスの研究・開発が活発化している。材料物性の観点から、既存のSiやSiCに比べてGaNがパワーデバイス応用において秀でていることは広く認知されるようになった。また、電流の流れる方向をウエハに垂直にした縦型構造を用いることによって理想的なパワーデバイス特性が得られるため、低欠陥・低抵抗自立GaN基板に始まる各種パワーデバイスの開発が国内外において国家プロジェクト体制で進められている。本研究は環境省の委託を受け、GaN p-n接合ダイオードの高耐圧化と低オン抵抗化を検討してきた。この研究分野の現状であるが、GaN自立基板の結晶品質が徐々に向上してきたため、それまでは1 kV程度に留まっていた耐圧¹⁻²⁾が、本研究所を中心としてサイオクス（旧日立電線-日立金属）との協同研究で高耐圧ダイオードの開発を進め、3 kV級の高耐圧ダイオードを作製し得る技術を先駆的に開発した³⁾。この研究成果を手本としてこの数年で海外勢、特に米国のAvogy社や法政大学の卒業生による研究でコーネル大学など

が高耐圧GaN縦型p-n接合ダイオードについて報告し⁴⁻⁵⁾、日本を追撃している。2015年度以降、本学では3層構造のドリフト層を有するp-n接合エピタキシャル結晶を用いて4.7~5.0 kVの耐圧を実証し、トップランナーを維持している⁶⁻⁷⁾。しかし、上述のようなメサ構造p-nダイオードを含め、これまで他の研究機関から報告された耐圧が3 kV以上のダイオードでは耐圧（降伏電圧）で破壊が生じてしまうという問題点があった。こうした急激な破壊は、信頼性を要する電力変換システムでは敬遠されている。2019年度はこの問題を根本的に解決するため、独自に2段メサ構造を開発し、実験・評価を行った。

2. 実験

図1に2段メサ構造ダイオードの模式図を示す。その特徴は、同図の右側に比較として示した従来の1段メサ構造ダイオードに対して、p-GaN層の一部を薄くエッチングして残したもう1つのメサ構造が追加された2段メサ構造である。アノード電極に近い方を第1メサと呼び、ドライエッチングによって正確にエッチング量を制御して、表面から400 nmエッチングしている。p⁺-GaN/p-GaN層の合計の厚さ

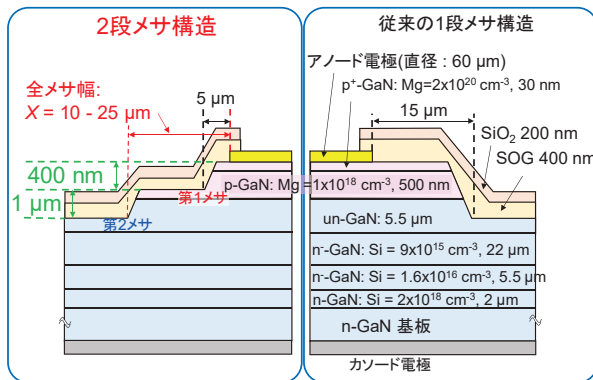


図1 2段メサ構造ダイオードと従来の1段メサ構造ダイオードの構造図

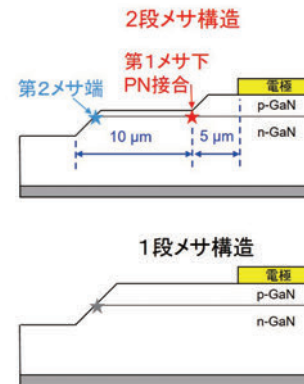


図2 T-CADを用いた電界強度シミュレーションで着目した解析ポイント

*法政大学、**法政大学イオンビーム工学研究所

が530 nmであることから、p-GaN層の残りの厚さは130 nmと見積られる。この第1メサの外側に第2のメサを形成する。そのエッチング量は1 μm である。したがって、p-n接合面はこの第2メサの側壁に露出することになる。このような構造を採用することによって、逆方向電圧を加えていくとp-GaN層に空乏層が広がり、薄く残したp-GaN層が全て空乏化するとその部分は絶縁層となり、さらに電圧を高くしていくと電界の集中部は空乏化が半ばのp-GaNに導電性が残る第1メサ端下のp-n接合部に移るはずである。この部分は薄いp-GaN層に覆われているためエッチング工程でのダメージがなく、かつ、メサ側壁のマイクロな凹凸からも離れているため、リング状に均一な電界がかかっている。したがって、従来の1段メサ構造のような局所的な電界集中と破壊を免れることが期待される。これをある程度定量的に確かめるため、市販のT-CADシミュレーターを用いて解析を行った。電界強度の計算において着目したポイントを図2の模式図で示す。電界強度を算出したポイントは、2段メサ構造のダイオードにおいては、第1メサ下のp-n接合部と第2メサ端である。比較として従来の1段メサ構造でのメサ端のp-n接合露出部分の電界強度も計算した。図3に各ポイントでの電界強度の逆方向電圧依存を解析した結果を示す。2段メサ構造の第2メサ端での電界強度は緩やかな上昇を示したのに対し、第1メサ下の電界強度は1 kVでもすでに薄く残したp-GaN層の空乏化が進み始めたとみられ電界強度は単調に増加している。さらに、耐圧に近い4 kV以上では1段メサ構造の値と同等になっている。この解析により、目論見通りに最高電界点をプロセスダメージのない第1メサ下に設ける見通しを得た。参考に実

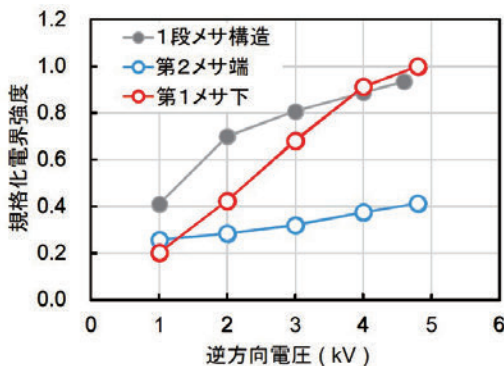


図3 電界強度の計算結果

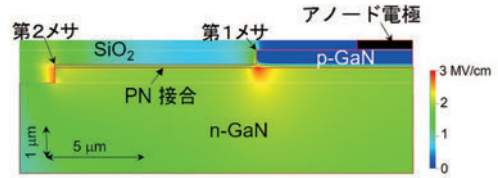


図4 TCADによる2段メサ構造p-nダイオード内の電界強度分布計算例 (逆方向電圧1.6 kV)

際のT-CADシミュレーターの出力図を図4に示す。逆方向電圧は1.6 kVの場合であり、第1メサ下の電界強度が第2メサ端のそれを超えた様子がわかる。このようにT-CADシミュレーターは近似的な計算ではあるが、物理的傾向を把握するためには有効なツールである。

3. 実験結果と考察

まず順方向I-V特性を図5に示す。2段メサ構造の評価結果は1段メサ構造とほぼ完全に一致した。エピタキシャル層の構造が同じで、アノード電極径も同じであるので当然の結果である。

一方、図6に示す逆方向I-V特性においては、途中の電流値まで1段メサ構造も2段メサ構造もほぼ同一の特性を示したが、電流が急激に上昇する降伏電圧(耐圧)において1段メサ構造のダイオードでは途中で完全に破壊してしまうの対して、2段メサ構造では測定の制限電流値でも破壊には至らないという明瞭な違いが現れた。なお、同図の右側は評価したダイオードのメサ構造を示したものであるが、全メサ幅は両ダイオードで同一で15 μm としておりダイオードの面積は同一である。

再現性の確認も含めて、2段メサ構造ダイオード

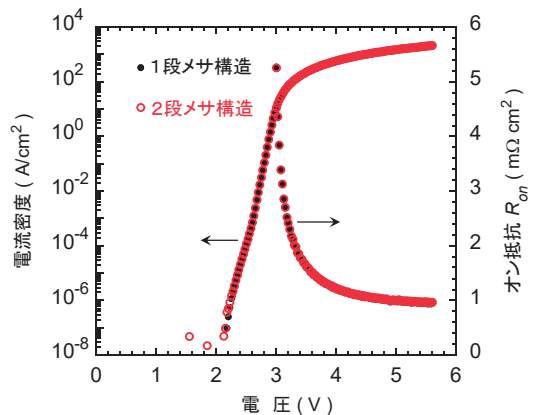


図5 順方向I-V特性

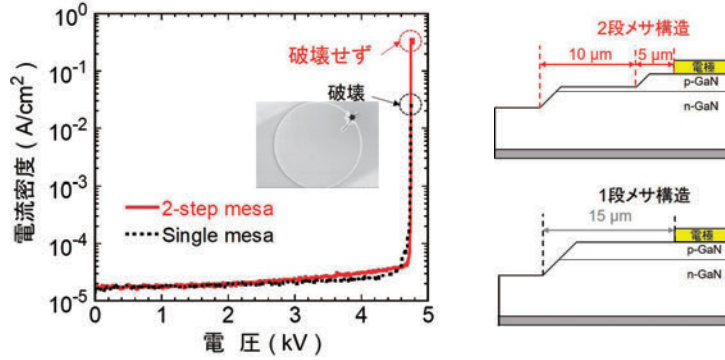


図6 逆方向I-V特性と比較したダイオードのメサ構造図(挿入した写真はメサ端で破壊したダイオードのSEM像)

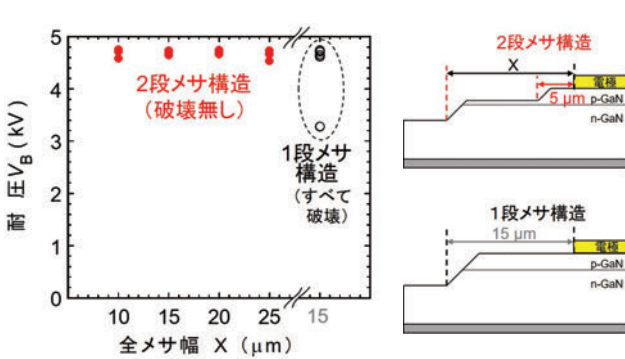


図7 ダイオードの耐圧の全メサ幅依存

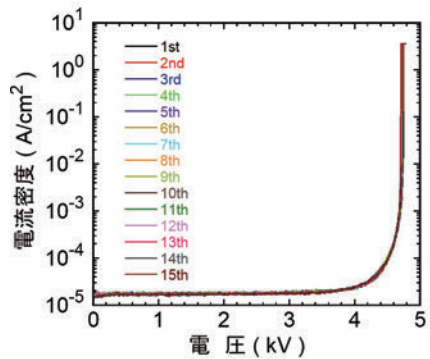


図8 逆方向I-V特性の15回繰返し評価結果

において全メサ幅 X を $10\sim 25\ \mu\text{m}$ の範囲で変化させ耐圧の評価を行った。図7にその結果を示す。1段メサ構造のダイオードで1つだけ耐圧の低いものが見られたが、両構造のダイオードにおいて耐圧はほぼ同じであった。しかし、評価した2段メサ構造のダイオード全12個において、全メサ幅に依存することなく全て破壊のない可逆性が得られたの対し、1段メサ構造のダイオードでは測定器の制限電流に到達する前に全て破壊した。2段メサ構造では全メサ幅が僅か $10\ \mu\text{m}$ でも可逆性を維持し、従来のダイオードより小面積でも優れた破壊耐量を示している。次に、同じ素子を繰返し評価し、劣化することなく同じ破壊耐量が維持されるか実験を行った。図8に15回の繰返し評価を行った結果を示す。15回とも同じトレースを示し、いわゆる可逆特性を有していることが分かった。本研究の2段メサ構造を持ちることによってGaNパワーデバイスの大きな課題とされた「信頼性」を獲得できることが示された。なお、設計耐圧が $3\ \text{kV}$ のp-n接合エピタキシャルウェハを用いて再現性の実験も行ったが、正常動作した47個

のダイオード全てで可逆特性が確認できた。

以上のように2段メサ構造のダイオードで高い耐圧で優れた破壊耐量を示すことが確認された。2段メサ構造ではデバイスプロセスでフォト工程1つ追加される負担が増えるが全体では微々たる負担であり、オン抵抗の増加のような性能上のトレードオフはない。このような $5\ \text{kV}$ に近い世界最高レベルの耐圧のGaNダイオードで優れた破壊耐量を実現した例は他にはなく、本研究における大きな成果と言える。

4. 結論

高耐圧・低オン抵抗GaNパワーダイオードの課題とされた高破壊耐量(可逆特性)の獲得を2段メサ構造の考案と適用により実現した。本研究は従来にない高い変換効率と優れた信頼性を有する電力変換システムの構築に寄与できるものである。

謝辞

本研究は環境省「未来のあるべき社会・ライフス

「タイルを創造する技術イノベーション事業」の委託を受けてなされた。

参考文献

- 1) Yusuke Yoshizumi, Shin Hashimoto, Tatsuya Tanabe and Makoto Kiyama, "High-breakdown-voltage p-n-junction diodes on GaN substrates", *Journal of Crystal Growth* **298**, p.875 (2007).
- 2) 加地徹、兼近将一、成田哲生、上杉勉、"GaN 縦型 p-n ダイオードの評価"、電気学会研究会資料（平成21年10月29～30日）EFM-09-41.
- 3) Yoshitomo Hatakeyama, Kazuki Nomoto, Akihisa Terano, Naoki Kaneda, Tadayoshi Tsuchiya, Tomoyoshi Mishima, and Tohru Nakamura, "High-Breakdown-Voltage and Low-Specific-on-Resistance GaN p-n Junction Diodes on Free-Standing GaN Substrates Fabricated Through Low-Damage Field-Plate Process", *Japanese Journal of Applied Physics* **52**, p. 028007 (2013).
- 4) I. C. Kizilyalli, A. P. Edwards, H.Nie, D. Bour, T. Prunty, and D. Disney, "3.7 kV vertical GaN p-n diodes", *IEEE Electron Devices Letters* **35**, no.2, pp.247-249 (2014).
- 5) K. Nomoto, M. Zhu, B. Song, Z. Hu, M. Qi, R. Yan, V. Protasenko, E. Imhoff, J. Kuo, N. Kaneda, T. Mishima, T. Nakamura, D. Jena, H. Xing, "GaN-on-GaN p-n Power Diodes with 3.48 kV and $0.95 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$: A Record High Figure-of-Merit of 12.8 GW/cm^2 ", *Proceedings of the 2015 IEEE International Electron Devices Meeting* **15**, pp. 237-240 (2015).
- 6) Hiroshi Ohta, Naoki Kaneda, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Takehiro Yoshida, Tomoyoshi Mishima, and Tohru Nakamura, Vertical GaN p-n junction diodes with high breakdown voltages over 4 kV, *IEEE Electron Device Letter* **36**, 11, pp. 1180-1182 (2015).
- 7) Hiroshi Ohta, Kentaro Hayashi, Fumimasa Horikiri, Michitaka Yoshino, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, "5.0 kV Breakdown-Voltage Vertical GaN p-n Junction Diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, No. 4S, p. 04FG09 (2018).