

1. 研究ノート

1. 低転位密度基板を用いた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

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り、GaN自立基板の量産によって電流の流れる方向を基板に垂直にした縦型構造を有する理想的なパワーデバイスの開発が活発に行われている。本学はGaN p-n接合ダイオードの特性において、独自設計の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 (V_B) を実証し、トップランナーを維持している¹⁻²⁾。

基板の高品質化も着実に進められており、貫通転位欠陥の低減化が量産品においても適用されつつある。今回、従来品³⁾より約1桁転位欠陥密度が低い高品質基板⁴⁾をSCIOCS社からいち早く入手し、p-n接合ダイオードを試作して、その順方向および逆方向の電流-電圧特性に低転位化が及ぼす影響を詳細に調べた。

2. 実験

図1に試作したダイオードの模式図を示す。逆方

向耐圧 V_B の設計値はGaNの破壊電界強度とポアソンの方程式から約2 kVとした。用いた基板は、SCIOCS社の標準品であるVoid-Assisted Separation (VAS)法によるGaN基板 (転位密度: $\sim 3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$) と新規に開発されたMask-less 3-Dimensional growth (M-3D) 法による低転位基板 (転位密度: $\leq 4 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$) である。これらの基板上に、多数枚処理が可能なバッチ式MOVPE (Metal-Organic Vapor-Phase Epitaxy) 炉を用いて基板より上のp-nエピタキシャル層を同時に成長した。M-3D基板でも転位欠陥の分布は完全に均一ではないため、ミクロな領域ではほとんど転位のない部分と平均値より多い部分が存在する。このため直径が $60 \mu\text{m}$ の小型ダイオードを多数配置すると、ダイオードに内包する転位の数がゼロから数十の範囲でバラつきが発生する。これを利用して、ダイオード内の転位の数と電流-電圧特性の関係を系統的に調べることができる。ダイオードの作製工程の途中で、カソードルミネッセンス (CL) 法で全てのダイオードの転位数と位置を記録し、その後完成したダイオードの電気的特性との対応を行った。なお、作製工程の条件等は昨年度以前のこの研究ノートで述べているので省略する。

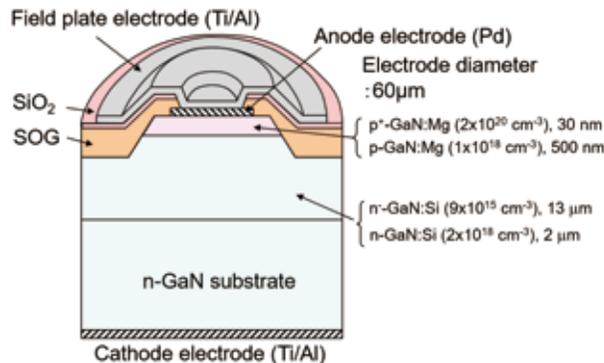


図1 GaN p-nダイオードの構造図

*法政大学、**法政大学イオンビーム工学研究所

3. 実験結果と考察

図2に、M-3DおよびVAS基板上に成長したエピタキシャル層の典型的なCL像を示す。M-3D基板の方が低転位密度であることがはっきりとわかる。図3に、測定したすべてのダイオードのアノード電極下の転位数に対するオン抵抗 (R_{on}) の変化を示す。 R_{on} と転位数の間に正の相関が見られた。転位は、高分解能2光子励起フォトルミネッセンス (TPPL) マッピング像でもCLと同様にダークスポットとして観察された。ダークスポットのサイズは、図4に示すように、直径が約 $3 \mu\text{m}$ であった。ダークスポット領域では、フォトンリサイクリング効果 (PRE) が小さくなると思われる。(PREは、少数キャリア

の放射再結合で発生した光子によって、深い準位の中性のMgアクセプターから伝導ホールを生成する現象⁵⁾。) 転位線及びその周囲には空孔などの点欠陥による非放射再結合中心の存在によりキャリア寿命が低下することが報告されている⁶⁾。これらの効果により、導電率変調が減少し、転位が増えることで R_{on} が高くなると考えられる。一方、 V_B と転位数の間に相関関係は見られなかった (図5)。光学顕微鏡による破壊点とCLによる転位位置の正確な比較を行った結果、ほとんどの場合、転位では破壊が起こらなかった (図6)。この結果、GaNの場合は、SiCデバイスとは異なり、転位が破壊の主要因となっていないことを伺わせる。

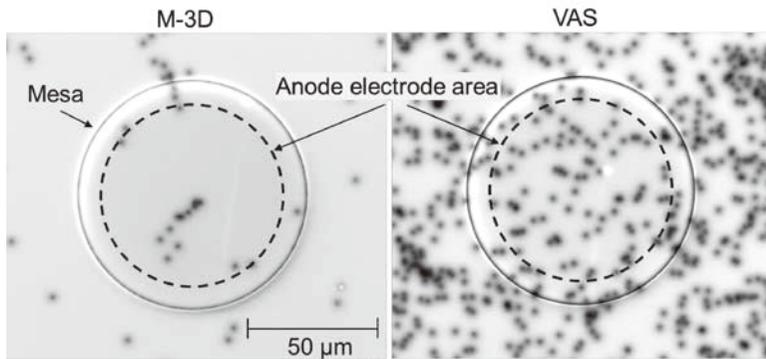


図2 メサ構造形成後のp-nエピタキシャル層のCL像 (左: M-3D基板上、右: VAS基板上)

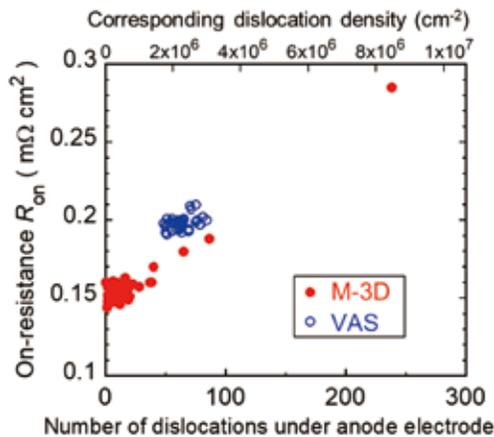


図3 オン抵抗のダイオード内転位数依存

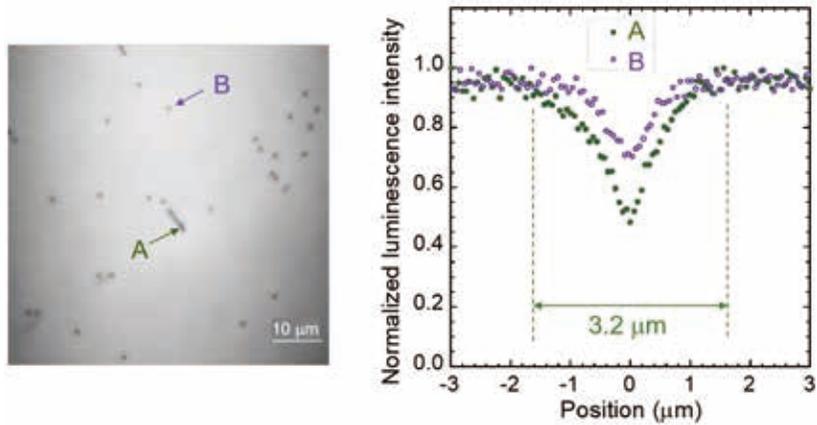


図4 2光子励起フォトルミネッセンスマッピング像と典型的な暗点の発光強度分布

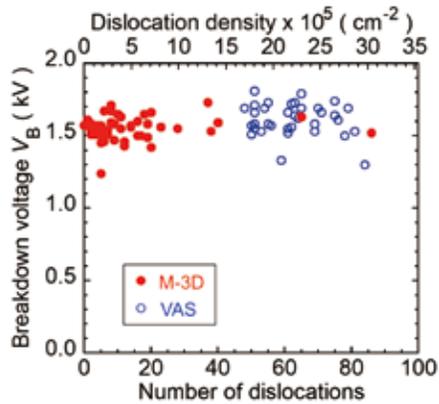


図5 逆方向耐圧のダイオード内転位数依存

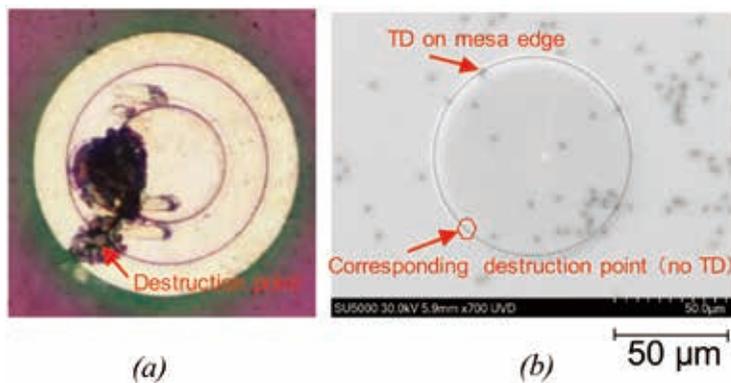


図6 耐圧測定で破壊したダイオードの光学顕微鏡像 (a) と当該素子のメサ工程直後のCL像 (b) (破壊した24個のダイオードの22個で同様の破壊箇所と転位の不一致が見られた。残り2個のダイオードでは転位密集領域で破壊したため判定は不可。)

4. 結論

縦型GaN p-nダイオードの順方向の R_{on} は素子内の転位数と明瞭な相関があり、基板の低転位化は R_{on} の低減とそれによるパワーシステムの低損失化に有効である。一方で、転位は逆方向特性にはほとんど影響がなく、破壊自体も転位位置では起こりにくいという興味深い知見が得られた。

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) 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, 1180-1182 (2015).
- 2) 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, 4S, 04FG09 (2018).
- 3) T. Yoshida, Y. Oshima, T. Eri, K. Ikeda, S. Yamamoto, K. Watanabe, M. Shibata and T. Mishima, Fabrication of 3-inch GaN substrates by hydride vapor phase epitaxy using void assisted separation method, J. Crystal Growth, 310, 5-7 (2008).
- 4) Takehiro Yoshida and Masatomo Shibata, GaN substrates having a low dislocation density and a small off-angle variation prepared by hydride vapor phase epitaxy and maskless-3D, Jpn. J. Appl. Phys., 59, 071007 (2020).
- 5) Kazuhiro Mochizuki, Kazuki Nomoto, Yoshitomo Hatakeyama, Hideo Katayose, Tomoyoshi Mishima, Naoki Kaneda, Tadayoshi Tsuchiya, Akihisa Terano, Takashi Ishigaki, Tomonobu Tsuchiya, Ryuta Tsuchiya, and Tohru Nakamura, Influence of Surface Recombination on Forward-Current/Voltage Characteristics of Mesa GaN p+n Diodes Formed on GaN Free-Standing Substrates, IEEE Tans. on Electron Devices, ED-59, 4, 1091-1098 (2012).
- 6) S. F. Chichibu, A. Uedono, and T. Onuma, Limiting factors of room-temperature nonradiative photoluminescence lifetime in polar and nonpolar GaN studied by time-resolved photoluminescence and slow positron annihilation techniques, Appl. Phys. Lett. 86, 021914 (2005).