

自立GaN基板上高耐压縦型pn接合ダイオードの研究

太田, 博 / 三島, 友義 / 林, 賢太郎

(出版者 / Publisher)

法政大学イオンビーム工学研究所

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Report of Research Center of Ion Beam Technology, Hosei University / 法政大学イオンビーム工学研究所報告

(巻 / Volume)

37

(開始ページ / Start Page)

8

(終了ページ / End Page)

13

(発行年 / Year)

2018-02-20

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030295>

2. 自立GaN基板上高耐圧縦型pn接合ダイオードの研究

林 賢太郎*、太田 博**、三島 友義***

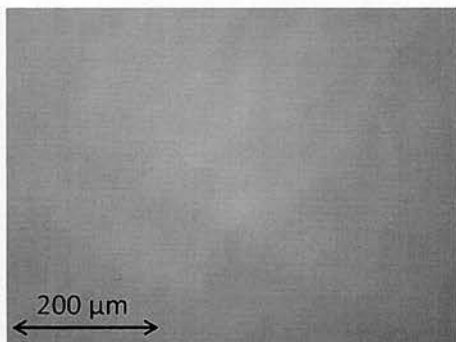
1. はじめに

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。GaNを用いた縦型のパワーデバイスは究極の効率が得られるとして注目を集め、国内外で国家プロジェクト体制での研究開発も進められている。本研究は環境省の委託を受け、GaN pn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1000V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、3000V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pn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。法政大学はこの分野におけるリーダー的存在であり、逆方向耐圧の世界記録を毎年のように更新続け、

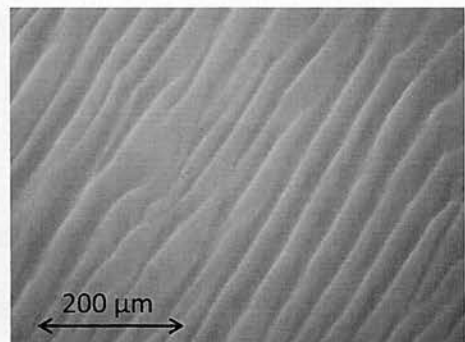
合わせて順方向のオン抵抗の低減も行っている⁶⁾。2016年度はダイオードの順方向の大電流化に向けた検討も行った。ダイオードの電流注入時の電極下の電流密度分布を直接反映する少数キャリアの再結合による発光強度分布の観察に初めて成功し、電極周辺部の電流集中や結晶起因の分布があることなどを見出すことにも成功した。

2. 実験

まず、pn接合領域の発光を利用したGaNエピタキシャルウエハの評価方法について述べる。GaN基板の表面の法線と結晶軸のc軸とのなす角度をオフ角と呼ぶ。製品の基板ではMOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) 成長で平坦なエピタキシャル成長が得やすい0.数度のオフ角を設けているが、製法上±50%以上の分布とばらつきを有している。この分布によって2インチ径GaN基板上的エピタキシャル層には平坦性の良い部分とすじ状の凹凸を有する領域が併存する。図1は同一エピタキシャルウエハ表面の微分干渉顕微鏡写真である。(a)は平坦性の良い部分、(b)はすじ状のモフォロジーを有する個所の顕微鏡像である。このような2つの領域に



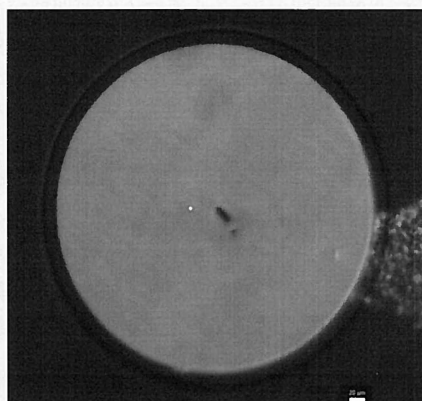
(a) 平坦性の良い部分



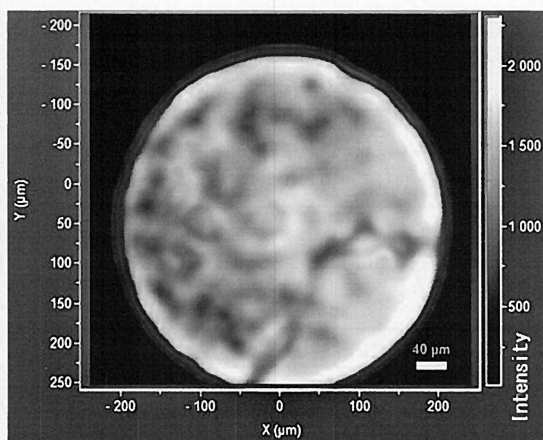
(b) すじ状のモフォロジーがある部分

図1 GaNエピタキシャルウエハ表面のノマルスキー干渉顕微鏡像

*法政大学大学院理工学研究科、**法政大学、***イオンビーム工学研究所

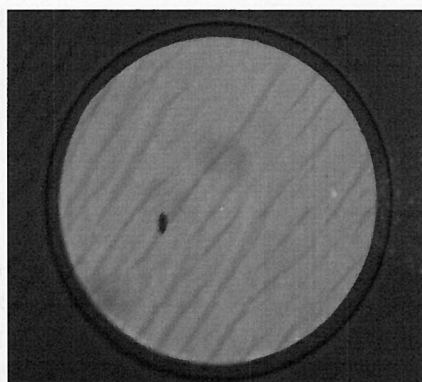


(a) 光学顕微鏡像

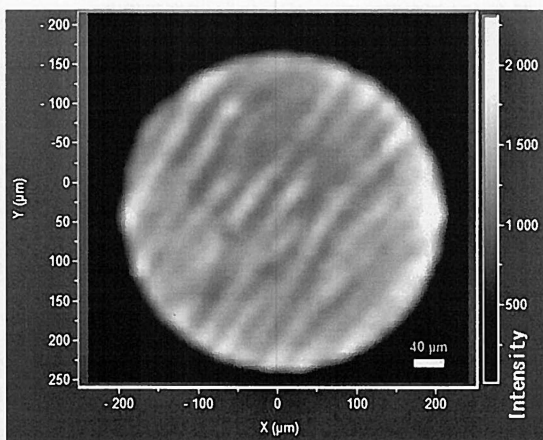


(b) 顕微ELマッピング像

図5 表面平坦性の良い領域上に作製したダイオード

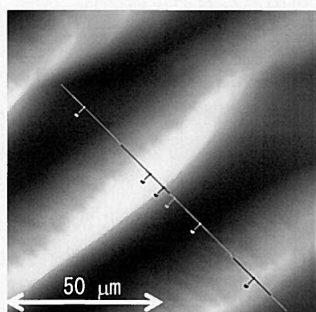


(a) 光学顕微鏡像

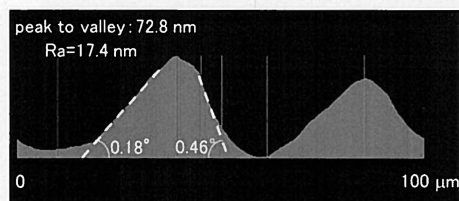


(b) 顕微ELマッピング像

図6 すじ状のモフォロジーを有する領域上に作製したダイオード



(a) 表面



(b) 断面形状

図7 すじ状のモフォロジーを有するウエハのAFM像

(b)である。このAFM像から指示の断面はほぼ三角形をしており、かつ、2つの異なる傾斜を持つ斜面から形成されていることがわかる。図6 (b)のELマッピング像では緩斜面の方で発光が強いことが分かった。そこで緩斜面と急斜面でエピタキシャル結晶においてどのような違いがあるか明らかにするためにTOF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry) でGaN中の主な不純物マッピング分析を行った。その結果、Mg以外の不純物ではモフォロジーに関係なく均一な分布を示したが、Mgは図8に示すようにAFM像での緩斜面に相当する位置で濃度が高い傾向が見られた。この部分ではアクセプタ濃度が高くなるため正孔の注入が増えてEL強度が高くなったと推定される。なお、TOF-SIMSきわめて小さな領域を評価しながら位置をスキャンしてマッピングするため取得原子数が少なくなり低濃度の元素 (今回はCやOなど) に関して検出限界以下になっていた可能性がある。評価手段に改善の余地は残る。

以上は光学的な評価であったが、平坦な表面を有する領域 (AFM像で凹凸の頂点と谷の高低差が20 nm以下) とすじ状のモフォロジーを有する領域 (同50 nm以上) 上に作製したダイオードの電流-電圧特性 (I-V特性) の評価も行った。図9は順方向のI-V特性と電流の微分によるオン抵抗のグラフである。Logスケールでの電流において両者に大きな違いは見えないが、オン抵抗は平坦性の良い領域上のダイオードの方が低い。さらに同一チップ上の他のダイ

オードのオン抵抗を評価しその値を比較した結果を図10に示す。明らかに平坦性の良い領域上のダイオードの方がオン抵抗が低くばらつきも小さいという結果が得られた。以上により、今後、大型の大電流ダイオードを開発するにはGaNウエハはどこにおいても平坦性の良いことが求められることが明らかになった。その目安はすじ状のモフォロジーの高低差が20 nm以下である。これを実現するためには、MOVPE成長でこのようなモフォロジーが発生しないように、GaN基板のオフ角分布を大幅に改善する

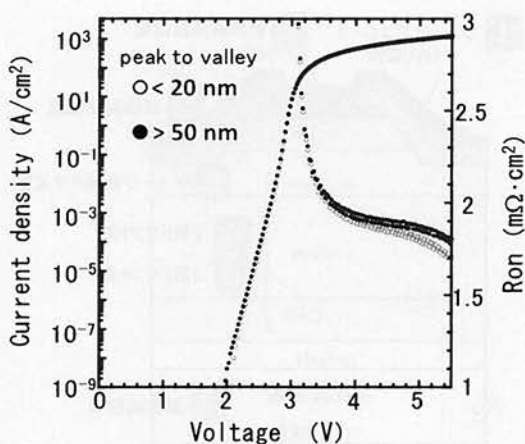


図9 順方向電流とオン抵抗Ronの電圧依存

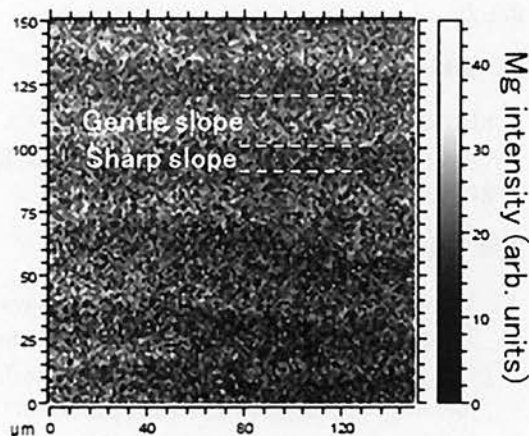


図8 TOF-SIMSによるGaN pnダイオードウエハ面内のMg濃度分布

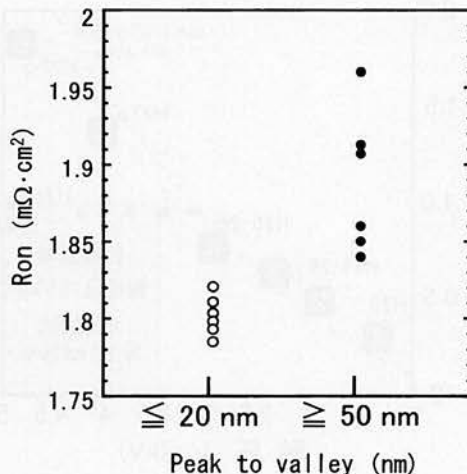


図10 ウエハ表面の粗さとオン抵抗Ronの関係

必要がある。

これまで、筆者らはGaN基板上縦型pnダイオードの高耐圧化と低オン抵抗化で世界をリードしてきた。環境省のプロジェクトで目標としてきた高いハードルも今年度になってクリアできた。ここではこれまでの年度ごとに開発してきた項目とそれに対応する性能の向上について総括する。図11はダイオードの断面構造にこれまでの研究で開発した技術項目を記載したものであり、図12はそれに対応したオン抵抗と耐圧による性能指標をプロットしたものである。メサ構造のpn接合露出部の電界強度緩和

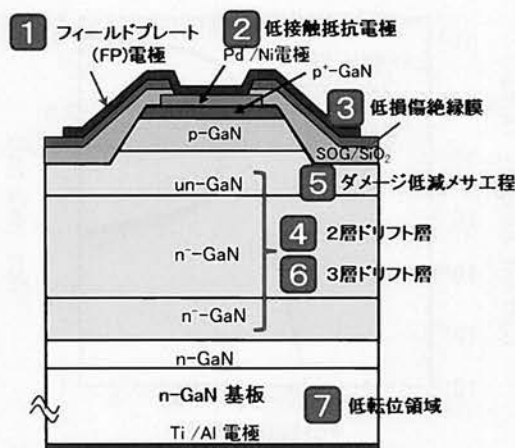


図11 GaN pnダイオードの高性能化に向けて開発された技術

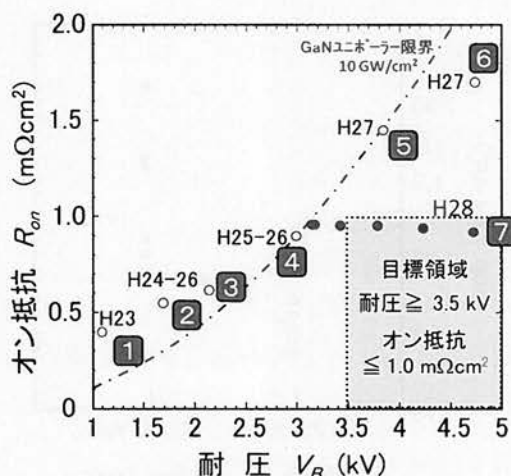


図12 GaN pnダイオードの高性能化の推移

を目的としたフィールドプレート電極、高濃度Mgドープ p^+ -GaN層とPdの組合せによる低接触抵抗電極、GaNへのイオン照射ダメージを回避する低損傷絶縁膜、pn接合面の高電界を緩和する2層および3層ドリフト層構造、メサ形成ドライエッチング工程のダメージ低減技術を順次開発することでH27年度は世界記録の4.7 kVの耐圧を達成できた。今年度はこれまで3 kVの耐圧に留まっていたウエハを用いて、基板結晶の転位欠陥密度が低い領域を選んで（実際には60 μm 径の小型ダイオードを多数作製し欠陥密度分布の局所的な違いを利用）試作したダイオードを評価した。その結果、これまでの最高耐圧と同じ4.7 kVのものがさらに低いオン抵抗0.93 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ とともに得られた。これらの数値によるパワーデバイスの性能指数（Baliga指数 V_B^2/Ron ）は23.7 GW/cm^2 とそれまでの世界記録⁵⁾の約2倍に到達した。以上により、今後大面積の低転位GaN基板の開発が進むことによって、高性能パワーデバイスが作製できることを実証した。

4. 結論

以上、GaN自立基板上縦型pnダイオードの研究成果について述べた。今年度は基礎となるGaN結晶の課題を洗い出すことを目的とした研究も進めるなか、Baliga指数の世界記録を更新する性能のダイオード試作にも成功した。ダイオード特性における基板結晶の品質の重要性を改めて明らかにした。基板のオフ角分布の低減によるエピタキシャル層の平坦化と転位欠陥密度低減がそれぞれダイオードの順方向特性と耐圧に明確な改善効果があることを示した。

5. 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 pn-junction diodes on GaN substrates", Journal of Crystal Growth Vol.298, p.875 (2007)
2. 加地徹、兼近将一、成田哲生、上杉勉、"GaN縦型pn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, Vol.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 pn diodes", IEEE Electron Devices Letters, vol.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, vol.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. K. Mochizuki, T. Mishima, K. Nomoto, A. Terano, and T. Nakamura, "Optical-Thermo-Transition Model of Reduction in On-Resistance of Small GaN p-n Diodes", Jpn. J. Appl. Phys., vol.52, p. 08JN10 (2013).

