

GaN 基板上縦型 SBD の FP 構造による高耐圧化

堀井 拓*・宮崎 富仁・斎藤 雄
橋本 信・田辺 達也・木山 誠

Development of High-voltage GaN Schottky Barrier Diode with SiN_x Field Plate Structure — by Taku Horii, Tomihito Miyazaki, Yu Saito, Shin Hashimoto, Tatsuya Tanabe and Makoto Kiyama — Gallium nitride (GaN) Schottky barrier diodes (SBDs) with a SiN_x field plate (FP) edge termination structure have been designed and fabricated on low-dislocation-density free-standing GaN substrates. The SBDs with FP structure effectively suppressed the increase in leakage current and the breakdown voltage gradually improved along with the increase in FP length, as can be explained by the simulation results. The breakdown voltage (V_b) of the SBD with FP structure was 680 V, while that of the SBD without FP structure was 400 V. The forward current-voltage characteristics of the SBDs with and without FP structure were the same as the specific on-resistance (R_{on}), $1.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$. The figure of merit (V_b^2/R_{on}) for the power device of the SBD with FP structure was 420MWcm^{-2} , which is the highest value for GaN SBDs ever reported to the authors' knowledge. The FP edge termination structure and the high-quality drift layers grown on the low-dislocation-density GaN substrates have greatly contributed to the obtained results.

1. 緒言

窒化ガリウム (GaN) 系半導体材料はシリコン (Si) の約3倍の大きなバンドギャップ、約10倍の高い絶縁破壊電界、さらに大きな飽和電子速度や電子移動度などの優れた特性を持つことから、無線通信分野における高周波・高出力デバイス用材料として活発に研究開発が進められており、既に携帯電話基地局用デバイスでは実用化の段階に入っている⁽¹⁾。

また、従来の Si パワーデバイスでは困難な高耐圧化と低損失化、つまり低オン抵抗化との両立が期待できるため、昨今電力用パワーデバイスへの応用についても非常に着目されている。オン抵抗の理論値は絶縁破壊電界の3乗に反比例することから、GaN を用いたパワーデバイスでは Si パワーデバイスの約1/1000の超低オン抵抗化が期待される。

これまでに研究・開発された GaN を用いたパワーデバイスは、サファイア、シリコンカーバイド (SiC) 等の異種基板上でのエピタキシャル成長しかできなかったため、主に横型のデバイスであった。しかしながら既存の大電力用途のデバイスは、サイリスタ、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、DMOS FET (Double-Diffusion Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 等の縦型のデバイスが用いられている。これは配線、パッケージングの容易さ、面積効率の高さから来るものが大きく、大電流・高耐圧デバイスには縦型デバイスが、大変有利であると言える。GaN で縦型デバイスを実現するには、高品質の導電性基板が必要であるが、我々は、高品質・大口径・低転位 GaN 基板の開発に成功している⁽²⁾。

さらに、当社低転位 GaN 基板上 (転位密度 $\sim 10^6\text{cm}^{-2}$)

にホモエピタキシャル成長した高品質 n-GaN ドリフト層を用いてショットキーバリアダイオード (以下 SBD) を作製したところ、サファイア基板上にヘテロエピタキシャル成長して作製した SBD (n-GaN ドリフト層転位密度 $\sim 10^9\text{cm}^{-2}$) に比べて、大幅な耐圧向上が得られた⁽³⁾。また、GaN 基板上に作製した HEMT (High Electron Mobility Transistor) においてもサファイア基板上に作製した HEMT に比べて大幅なゲートリークの低減を実現できている⁽⁴⁾。これらの結果は、GaN 層中の転位が逆方向バイアス印加時にリークパスになることを示唆している。

パワーデバイスの重要な特性として逆方向耐圧が挙げられるが、逆方向耐圧の高耐圧化の手法として終端構造による電極端の電界集中緩和が一般的に用いられている。しかしながら、GaN 系 SBD に関しては、効果的な終端構造に関する報告はほとんど無い^{(5)~(8)}。これは、異種基板上に成長された高転位密度のドリフト層 (例えばサファイア基板上) を用いていることで逆方向バイアス印加時にリーク電流が増加してしまい、そのリーク電流が大きいため終端構造の効果が見えなくなっているためではないかと考えられる。逆に言うと、低転位密度のドリフト層を用いることで終端構造による電界集中緩和の効果が見える可能性がある。そこで今回我々は、当社低転位 GaN 基板を用いた縦型 SBD に終端構造としてフィールドプレート (以下 FP) 構造を設計・適用し、高耐圧化することを試みた。その結果、FP 構造の適用により、低オン抵抗を維持したまま耐圧を大幅に向上させることに成功したのでここに報告する。これは、低転位 GaN 基板、そしてそれを用いることで得られた

高品質ドリフト層によってもたらされたものであると考えられる。

2. フィールドプレート構造縦型 GaN SBD の実験方法

作製したFP構造と、比較として隣接に作製したFPのない構造（以下それぞれFP構造有り、無し）を図1に示す。GaN基板は転位密度が $\sim 10^5 \text{cm}^{-2}$ 程度のもので使用した。GaNエピタキシャル成長は有機金属気相成長法（MOVPE：Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy）を用いた。ドリフト層の厚みは $7\mu\text{m}$ 、キャリア濃度は $8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ とした。フィールドプレート用絶縁膜としては SiN_x をPE-CVD（plasma-enhanced chemical vapor deposition）により $1\mu\text{m}$ 成膜した。オーミック電極はTi/Al/Ti/Au積層構造を表面に真空蒸着により蒸着し、蒸着後に窒素雰囲気中で約 600°C 、2分の合金化熱処理を行った。次に SiN_x 絶縁膜をウェット処理により選択的にエッチングし、最後にショットキー電極としてAu（ 400nm ）を真空蒸着とリフトオフにより形成した。図2（a）に作製したFP構造縦型SBDの光学顕微鏡像を示す。ショットキー電極径は $200\mu\text{m}$ 、FP長（ SiN_x 絶縁膜と電極とのオーバーラップ長）は $40\mu\text{m}$ とした。上記設計（ドリフト層厚み・キャリア濃度・絶縁膜厚・FP長）

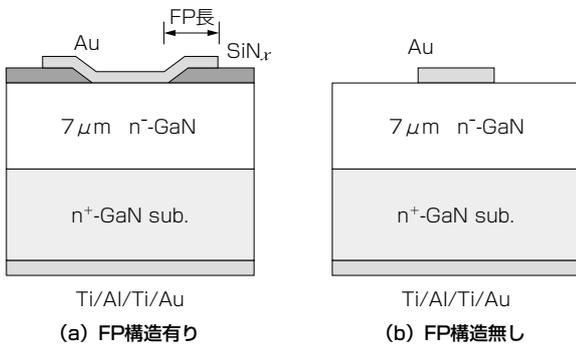


図1 GaN縦型SBD構造

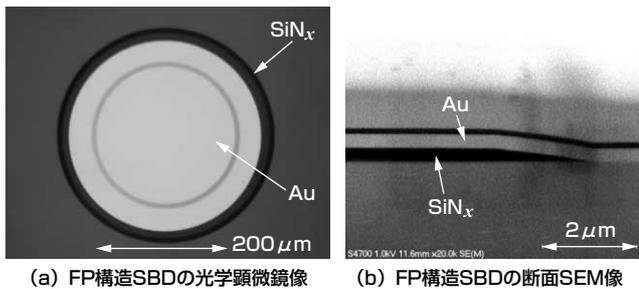


図2 FP構造GaN SBDの写真

は後述する電界強度シミュレーション結果に基づいて設計した。図2（b）はFIB加工したFP構造の断面図のSEM像を示している。この断面図より、Auと SiN_x の界面は良好に形成されていることが分かる。

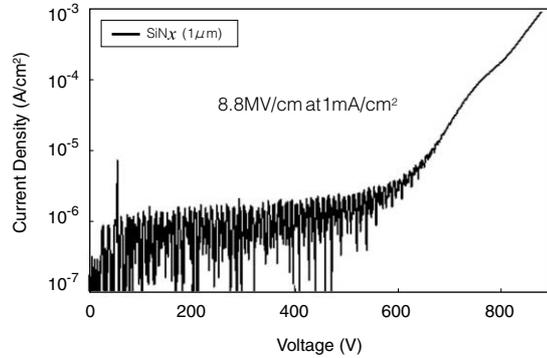


図3 SiN_x の膜耐圧特性

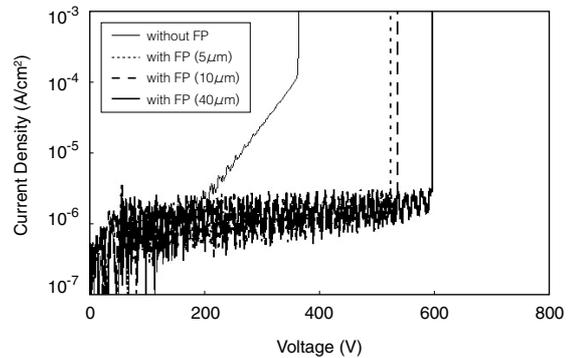


図4 FP構造有り（FP長依存）・無しSBDの逆方向I-V特性

3. 結果と考察

FP構造による高耐圧化のためには、FP用絶縁膜自体の膜耐圧も必要となる。そこでまず我々はFP用絶縁膜として用いた SiN_x の膜耐圧を調査するため、MIS構造を作製した。図3に作製したMIS構造のI-V特性を示す。ここで SiN_x 膜の厚みは $1\mu\text{m}$ である。その結果、 SiN_x 膜の膜耐圧は 8.8MV/cm という結果を得た。この値は、後述するようにFP構造を作製するのに十分な値である。次に、この絶縁膜を用いて作製したFP構造有り・無しSBDのI-V特性を図4に示す。ここでFP構造のFP長は $5\mu\text{m}$ ～ $40\mu\text{m}$ とした。FP構造のないSBDではリーク電流が急激に増加していき、 $V_b = 360\text{V}$ でハードブレイクダウンを起こした。これはショットキー電極端に集中した電界によるものであると考えられる。それに対し、FP構造のあるSBDではリーク電

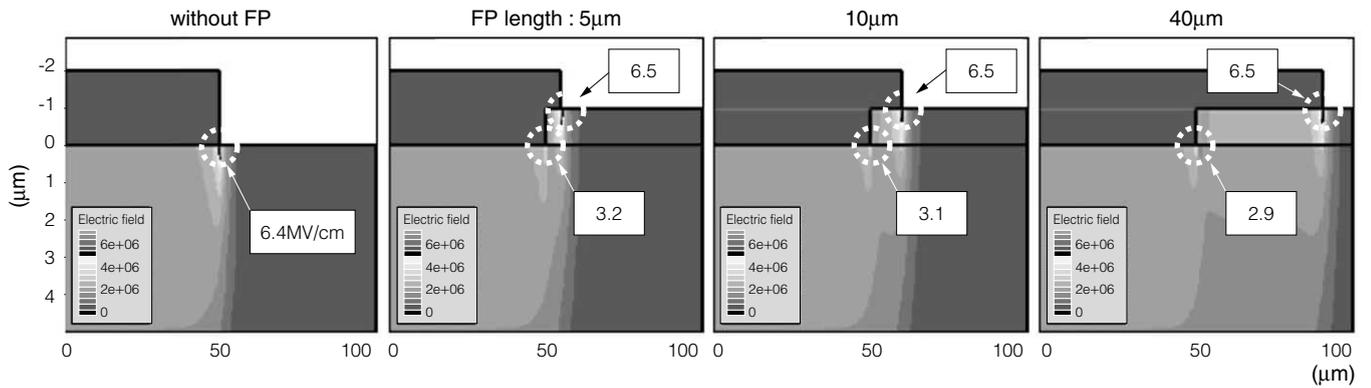


図5 FP長依存性の電界強度分布シミュレーション

流の増加が大幅に抑制されていることが分かる。さらに、FP長の増加により、耐圧が次第に増加するという結果が得られた (FP長 $5\mu\text{m}$: $V_b = 520\text{V}$, FP長 $10\mu\text{m}$: $V_b = 533\text{V}$, FP長 $40\mu\text{m}$: $V_b = 594\text{V}$)。これらの実験結果は次に述べる電界強度分布シミュレーションによって説明することが出来る。図5にFP長依存性の電界強度分布を示す。シミュレーターはSilvaco社のATRAS device modeling softwareを用いた。シミュレーション条件は以下を用いた; (n-GaNドリフト層膜厚: $7\mu\text{m}$, キャリア濃度: $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$, SiN_x 膜厚: $1\mu\text{m}$, 逆方向印加電圧: 1.2kV)。このシミュレーション結果から、エピ中で最も電界が集中するのはショットキー電極端であることが分かる。FP構造がないSBDの電極端での最大電界強度は 6.4MV/cm であり、この値はGaNの絶縁破壊電界 3.3MV/cm を大きく上回ってしまっている。それに対し、FP構造のSBDではショットキー電極端での電界集中が大きく緩和され、FP長が伸びるにつれてさらに緩和されていることが分かる。ショットキー電極端での最大電界強度はそれぞれ 3.2MV/cm (FP長: $5\mu\text{m}$)、 3.1MV/cm (FP長: $10\mu\text{m}$)、 2.9MV/cm (FP長: $40\mu\text{m}$)であり、これらの値は全て我々の意図した通りGaNの絶縁破壊電界 3.3MV/cm 以下に抑制されている。一方、FP絶縁膜で最も電界が集中するのはFP電極端であり、約 6.5MV/cm を示した。つまり絶縁膜の膜耐圧は 6.5MV/cm 以上必要であるということであるが、我々の用いた絶縁膜は上述した通り 8.8MV/cm であり、この条件を十分満たしている。このように、シミュレーション結果と実験結果は定性的に非常に良い一致を見せた。しかしながら実際はシミュレーション条件である 1.2kV を達成できていない。これはGaNという材料自体やプロセス技術が未だ発展途上であることが原因として考えられ、これに関しては今後の課題である。

図6(a)は、典型的なFP構造有り、無しSBDの順方向I-V特性を示している。順方向特性に関してはFP構造有り、無しSBDで差は見られず、 $1.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$ という非常に低い特

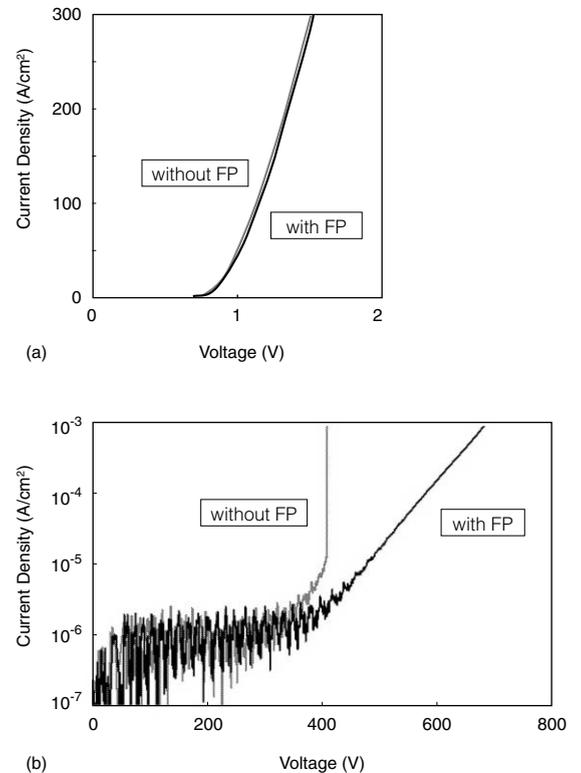


図6 FP構造有り・無しSBDの (a) 順方向特性 (b) 逆方向特性

性オン抵抗を示した。それに対し、逆方向I-V特性に関しては、図6(b)に示すように両者では大きな差異が見られ、FP構造無しSBDが $V_b = 400\text{V}$ でブレイクダウンしてしまうのに対し、FP構造SBDでは $V_b = 680\text{V}$ までブレイクダウンを示さなかった。この耐圧-特性オン抵抗の値はパワーデバイス性能指数に換算すると $V_b^2/R_{on} = 420\text{MWcm}^2$ を達成している。

図7は特性オン抵抗と耐圧の関係を示している。今回作製したSBDはSi限界値を超えているのはもちろんのこと、先行するSiC SBDの開発品とも同等の特性を達成していることが分かる。

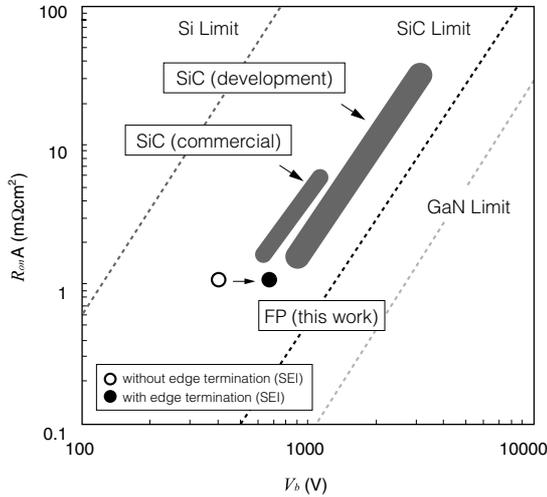


図7 特性オン抵抗と耐圧の関係

4. 結 言

GaNはバンドギャップが大きく絶縁破壊電界が高いことから、従来のSiデバイスを超える（高耐圧・低オン抵抗）次世代パワーデバイス用材料として非常に注目されている。今回我々は、当社低転位GaN基板（転位密度 $\sim 10^5\text{cm}^{-2}$ ）を用いた縦型SBDに終端構造としてFP構造を設計・適用し、高耐圧化することを試みた。FP構造を適用することで逆方向バイアス時のリーク電流を効果的に抑制することに成功し、また、FP長の増加により耐圧が増加することも確認出来た。この結果はシミュレーション結果とも良い一致を見せた。結果として逆方向特性において、FPの無いSBDでの $V_b = 400\text{V}$ に対し、FP構造SBDで $V_b = 680\text{V}$ という値を達成することが出来た。順方向特性に関しては、FP有り・無しで差はなく、 $R_{on} = 1.1\text{m}\Omega\text{cm}^2$ という非常に低い特性オン抵抗が得られた。このように、縦型GaN SBDにおいて、今回初めてFP構造の適用による大幅な耐圧向上を達成することが出来た。これは、低転位GaN基板を用いることで高品質・低転位エピ層が得られ、逆方向バイアス時のリーク電流が低減出来ていることが大きく貢献していると考えられる。

また、特性を性能指数に換算すると $V_b^2/R_{on} = 420\text{MWcm}^{-2}$ となり、この値は、GaN系SBDにおいて世界最高レベルを達成している。

参 考 文 献

- (1) K. Joshin et al. : 2003 IEDM Tec. Digest. (2003). p. 983.
- (2) K. Motoki et al. : Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001). p. L140.
- (3) S. Hashimoto et al. : J. Cryst. Growth Vol. 298 (2007). p. 871.
- (4) 田辺他、[GaN基板上AlGaN/GaN構造エピタキシャル成長と評価] 応用電子物性分科会誌、第12巻 第1号(2006) 32
- (5) Z. Z. Bandic et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 74 (1999), p. 1266.
- (6) T. G. Zhu et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 77 (2000), p. 2918.
- (7) A. P. Zhang et al. : Appl. Phys. Lett. Vol. 79 (2001), p. 1555.
- (8) B. S. Kang et al. : J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 22, No.2 (2004), p. 710.

執 筆 者

堀井 拓* : パワーデバイス開発室
GaNパワーデバイスのデバイス技術開発に従事



- 宮崎 富仁 : パワーデバイス開発室 主席
 斎藤 雄 : パワーデバイス開発室
 橋本 信 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部
 田辺 達也 : 半導体技術研究所 エピ技術研究部 グループ長
 木山 誠 : パワーデバイス開発室 グループ長 (工学博士)

*主執筆者