

# 低転位GaN基板を用いた縦型ショットキー バリアダイオードの高速スイッチング特性

## Fast Recovery Performance of Vertical Schottky Barrier Diodes on Low Dislocation Density Freestanding GaN Substrates

吉本 晋\*  
Susumu Yoshimoto

岡田 政也  
Masaya Okada

三橋 史典  
Fuminori Mitsuhashi

石塚 貴司  
Takashi Ishizuka

上野 昌紀  
Masaki Ueno

低炭素社会の実現に向けて、高効率な電力変換器の実現要求が高まっており、窒化ガリウムは電力用半導体としての高いポテンシャルが期待されている。我々は、当社のGaN基板上に縦型ショットキーバリアダイオードを作製し、これまで高耐圧・低抵抗を実証してきた。今回、スイッチング特性に着目しデバイス単体および整流回路を用いて評価を行い、高速なスイッチング特性と低消費電力での動作が可能であることを示した。また長期通電試験を行い、実用的なレベルの信頼性を有していることを実証した。

For the realization of a “low-carbon society,” there is an increasing demand for high efficiency power conversion. Gallium Nitride (GaN) is expected as a semiconductor with high potential for power devices. We have developed vertical GaN Schottky barrier diodes on free-standing GaN substrates and demonstrated high breakdown voltage and low on-resistance. In this paper, we demonstrated the advantage of GaN SBDs in terms of the switching characteristics and long-time reliability.

キーワード：GaN、ショットキーバリアダイオード、逆回復特性

## 1. 緒 言

限りある資源の有効活用が叫ばれるようになって久しく、省エネルギーは各分野で希求されている。省エネルギーは、節電やエコなど消費分野での努力に加えて、発生させたエネルギーをいかに無駄なく消費するかという観点も重要である。数100kVという超高電圧で発電された電力を、消費形態の低電圧にまで如何に低損失で変換するか、即ち電力変換効率が一つの指標となり、高効率電力変換の果たす役割は非常に大きい。電力変換器は、太陽光発電システムなどの電力を家庭用に変換するパワーコンディショナや、パソコンや携帯機器などのACアダプタなど、非常に多くの場所で使用されていることから、近年では小型化への要求も高い。

窒化ガリウム (GaN) は、電力変換器のキーデバイスの一つである半導体素子、パワーデバイス<sup>\*1</sup>の材料として、注目されている<sup>(1)</sup>。GaNは表1に示すように、従来材料であるシリコン (Si) と比較して、約3倍の広いバンドギャップ、約10倍の高い絶縁破壊電界、約2.5倍の飽和電子速度などをもち、パワーデバイスの性能を示すバリガ指数<sup>\*2</sup>では、従来のシリコンと比較して1,000倍近い性能の改善が見込まれている。またバリガ高周波指数<sup>\*3</sup>でも、シリコンの100倍以上の高い性能が予測されている。高周波化することで組み合わせる受動部品<sup>\*4</sup>が小型化できるメリットがあるため、2つの性能指数で高い値をもつGaNは高いポテンシャルを有している。

ここで、半導体デバイスは、その電流の流れる方向によって、縦型デバイスと横型デバイス<sup>\*5</sup>の2つに大別できる。

GaNにおいては、シリコン基板やサファイア基板など異なる基板上でのデバイス作製が先行しており、その界面の結晶性が不十分であることから、横型デバイスが主に開発・採用されてきた。当社では、低転位GaN基板を開発<sup>(2)</sup>、製造しており、これを用いることでデバイスと基板の界面品質を非常に良好に形成することが可能となるため、縦型デバイスが実現可能である。縦型デバイスは、配線、パッケージの容易さ、また面積効率の高さから大電流・高耐圧デバイスに有利である。

表1 Si、SiC GaNの物性値比較

	Si	SiC	GaN
バンドギャップ $E_g$ (eV)	1.1	3.3	3.4
絶縁破壊電界 $E_c$ ( $10^6$ V/cm)	0.3	2.3	3.3
飽和電子速度 $v_{sat}$ ( $10^7$ cm/s)	1.0	2.0	2.5
バリガ指数 $\epsilon\mu E_c^3$ (Siを1)	1	565	957
バリガ高周波指数 $\mu E_c^2$ (Siを1)	1	31	104

半導体技術研究所では、当社の低転位GaN基板を用いた縦型GaNデバイスの優位性を実証するために、基本的な構造であるショットキーバリアダイオード<sup>\*6</sup> (SBD: Schottky Barrier Diode) を製作し、評価を行ってきた<sup>(3)~(5)</sup>。本稿では、GaNの特長の一つである高速性能の検証として、逆回復時間を評価し、同容量のSiやSiCのダイオードと比較して最も速い値が得られた。さらに、整流回路にそれぞれ組み込

んで比較評価を行ったところ、最も低い損失で駆動できたので、それらの内容について報告する。さらに長期通電試験の結果についても述べる。

## 2. 実験方法

### 2-1 構造

実験に用いた縦型GaN SBDの構造を図1に示す。n型導電性GaN基板は、ハイドライド気相成長 (HVPE: Hydride vapor phase epitaxy) 法で作製し、転位密度は $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下である。このGaN基板上に、OMVPE (Organic metal vapor phase epitaxy) 法で、トリメチルガリウムとアンモニア、モノシランを用いて、n型導電性GaN層を7 $\mu\text{m}$ 成膜した。ショットキー電極は、その上に形成したNi/Auを用い、さらにパッドとしてAlを成膜し、フォトリソグラフィを用いたパターニングを行って1.1mm $\times$ 1.1mmの四角形としている。また電極端の電界集中を緩和させるために、プラズマCVD法<sup>\*7</sup>を用いて成膜したSiN<sub>x</sub>膜に、斜面を形成したフィールドプレート構造を用いた<sup>(3)</sup>。基板側のオーミック電極は、Ti/Al/Ti/Auを形成した。

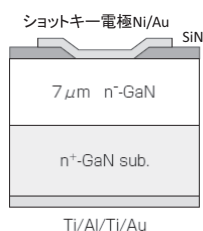


図1 縦型GaN SBDの構造模式図

続いて、素子ごとに分離し、樹脂を用いて封止した。ここで、高周波駆動での性能を高めるためには、寄生インダクタンスをできるだけ低減する必要がある。パワーデバイスで一般的なTO-220等では配線による寄生インダクタンスの影響が無視できないため、新たに配線を極力減らしたパッケージを作製した。写真1は作製したGaN SBDの外観写真である。

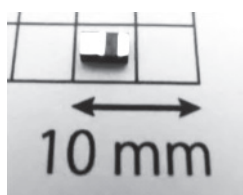


写真1 GaN SBDの外観写真

り、3.8 $\times$ 1.2 $\times$ 2.0mmと非常にコンパクトな形状である。

### 2-2 評価方法

現在、電力変換を行う一般的な方法として、スイッチング電源が多く採用されている。これは、変換元の電力を所望の値になるように十分に速い周波数のスイッチングで分割し、必要に応じて平滑化することで、変換を行う方法である。スイッチングの周波数は、速ければ速いほど使用する受動部品が小さくて済むため、全体サイズの小型化に有利である。加えて、ワールドワイドの入力電圧である85~264Vに対応するためには、一般的に600Vの耐圧が必要となる。

スイッチング電源で使用する際に発生する損失は、スイッチがON状態に発生する導通損失と、ON $\rightarrow$ OFFもしくはOFF $\rightarrow$ ON時に発生するスイッチング損失である。スイッチング損失はON/OFFする回数、すなわちスイッチングの周波数に比例して増大するため、小型化の利点と損失はトレードオフの関係にある。しかしながら、スイッチング損失のより小さい、つまり高速で動作可能なデバイスを使用することができれば、同程度の損失でより小型化が可能となる。

さらにダイオードでのスイッチング損失は、ON/OFF切り替え時に、ダイオード自体で発生する損失に加えて、切り替え後に電流が逆流する逆回復現象による影響も大きい。これは、ダイオードに流れている電流が急に切れたとしても、ダイオード内部に蓄積されている電荷が流れ出すために、あたかもダイオードから逆方向に電流が流れだしているように見える現象である。

この現象を逆回復特性といい、一度落ち込んだ電流が90%回復に要する時間を逆回復時間 $T_{RR}$  (Reverse Recovery Time)、逆回復時間までの電流を積分した値は素子内に蓄積されている電荷であり容量性電荷 $Q_{RR}$  (Capacitive Charge) という。ここで損失は、電流と電圧を乗算し、時間積分することで得られる。

逆回復現象は、ダイオードそのものだけではなく、他のデバイスにも想定外の電流が流れて、結果として大きな損失が発生することから、今回この特性がダイオードの高速性能を示す指標と考えて、評価を行った。

図2は、逆回復時間を評価するために使用した回路の模式図、図3は評価のタイミングチャートを図示したものである。スイッチ素子に、パルス発生器からゲート抵抗を通して2つのパルスを連続して導入することで、(1)の区間でコイルにエネルギーが蓄積され、(2)の区間ではダイオードとコイルで閉回路を形成するため、コイルのエネルギーが電流となってダイオードを流れる。その後、(3)の区間で再びスイッチをONにすることで、回路の電源電圧 $V_{RR}$ がダイオードに印加される。この時に電流の逆流が生じ、逆回復現象が評価できる。

逆回復特性は、(2)で流れる順方向電流 $I_F$ や、(3)でかかる回路の電源電圧 $V_{RR}$ に加えて、(2) $\rightarrow$ (3)の遷移スピードにも大きく影響を受ける。今回、(2) $\rightarrow$ (3)移行時の単位時間当たりの電流変化量 $di/dt$ を一定にして、比較・評価を行った。

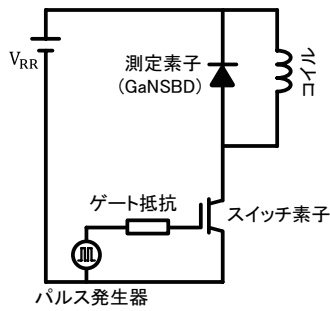


図2 逆回復時間の評価回路

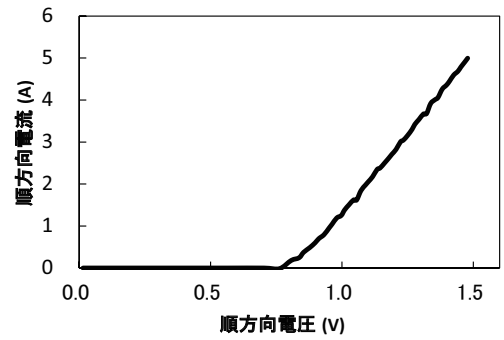


図4 GaN SBDの静特性(順方向)

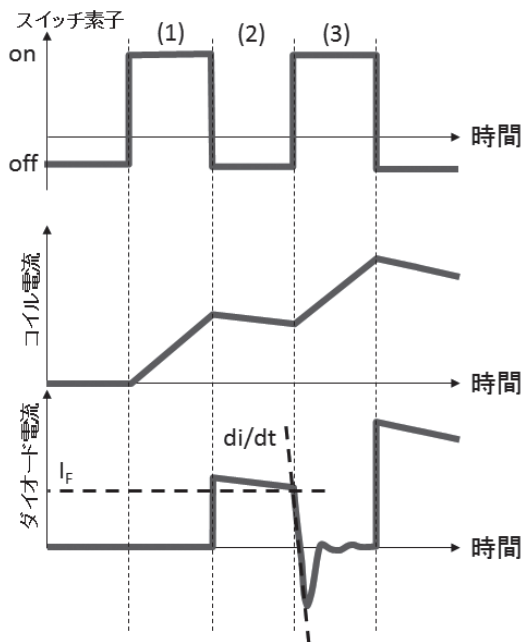


図3 逆回復時間評価回路のタイミングチャート

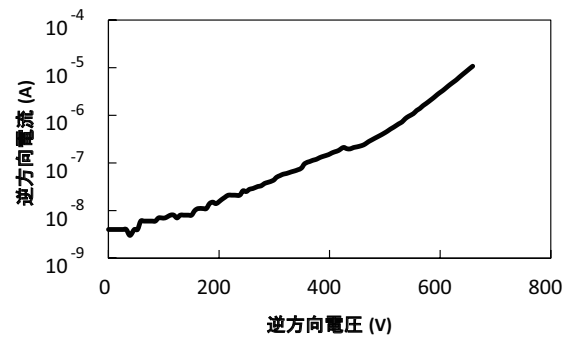


図5 GaN SBDの静特性(逆方向)

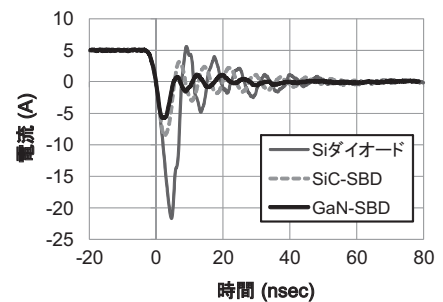


図6 逆回復特性の比較

### 3. 実験結果

今回作製したGaN SBDの静特性として、順方向および逆方向の電流-電圧特性をそれぞれ図4、図5に示す。順方向は5Aまでパルス通電し、電圧降下は1.48Vである。また逆方向は、600V印加時のリーク電流が3.1 $\mu$ Aであり、実用的な600V耐圧のアンペア級デバイスが作製できている。

続いて、2-2に記載の方法で、逆回復特性の評価を行った。条件は、 $I_F=5A$ 、 $V_{RR}=380V$ 、 $di/dt=3.4kA/\mu sec$ である。また条件を同じにして、SiC SBD、Siダイオードも測定・比較を行った結果が図6である。また、各特性を表にしたものが表2である。

図6を見ると、Siダイオードと比較して、電流の落ち込みを非常に小さく抑えられていることがわかる。またSiC SBDと比較すると、落ち込みの程度は近いが、GaN SBDは電流がはやくゼロに収束しており、損失に加えて、ノイズの面で

表2 各素子の逆回復特性

	$T_{RR}(nsec)$	$Q_{RR}(nC)$	損失( $\mu J$ )
GaN SBD	5.2	19.4	0.11
SiC SBD	5.5	29.6	0.25
Si ダイオード	7.6	91.0	0.62

も有利であることがわかる。また表2から、 $T_{RR}$ はSiC SBDと比較してやや速い程度であるが、蓄積されている電荷を示す $Q_{RR}$ はSiダイオードの1/4以下、SiC SBDと比較しても2/3以下であり、いずれと比較しても高速であることを示す結果といえる。さらに、発生した損失を比較すると、Siダイ

オードの1/5以下、SiC SBDと比較しても1/2以下である。

加えて、ここで発生した電流は回路内に逆流し、さらなる損失を発生させる要因となりうることを考慮すると、表2で見られる特性の差以上の効果が得られることが期待でき、GaN SBDの有効性を示す結果であるといえる。

#### 4. 整流回路での検証

ここまでのGaN SBD単体での評価で、高速性の面で優れていることを示した。続いて本節では、整流回路で検証を行った結果を示す<sup>(6)</sup>。

評価には図7に示す回路を用いた。ダイオードにGaN SBDを採用し、入力周波数は30MHzとした。また、ダイオード単体の効果を検証するために、あらかじめダイオードの表面温度と消費電力の関係を明らかにしておき、実験中の温度を測定することで、その関係式からダイオードの消費電力を見積もった。また測定は、比較のためにGaN SBDに加えて、同条件でSiC SBD、Siダイオードでも行った。

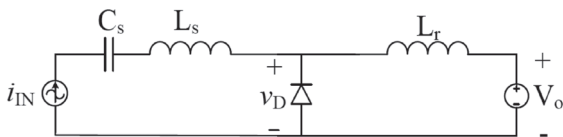


図7 評価に用いた回路

図8に結果を示す。縦軸は、ダイオードでの損失を全体の出力で除算した割合表示としている。Siダイオードは出力を上げると早い段階で駆動不能となっており、30MHzでの動作は困難であることがわかる。対して、GaN SBDとSiC SBDは今回評価した全領域で駆動はできているが、GaN SBDは低い消費電力で駆動できている、出力60Wの時点でSiC SBDと比較しても2/3程度の消費電力に抑えられていることがわかる。

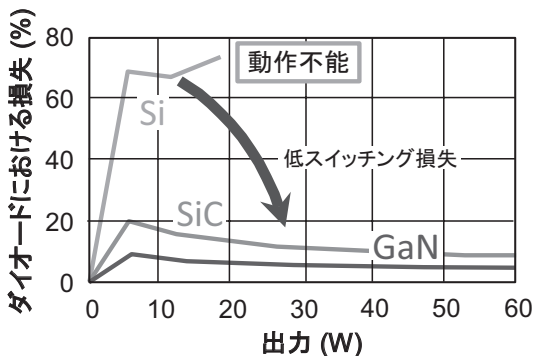


図8 30MHz駆動の整流回路におけるダイオードの損失割合

以上の結果は、GaN SBDが回路に組み込んだ状態で高効率を実現した内容であり、高周波駆動での優位性を示す結果といえる。

#### 5. デバイスの信頼性

本節では、信頼性評価としてデバイスを高温下で長期通電した内容について述べる。図9はGaN SBDに順方向にDC5Aを通電、図10は逆方向にDC600Vを印加した時の、それぞれ順方向電圧、リーク電流の経時変化である。いずれも素子温度が150度になるように設定した恒温槽内で実施した。

順方向については、ほとんど順方向電圧に揺らぎはみられず、非常に安定していると言える。対して、逆方向については、初期に若干の電流増加がみられるも、その後も安定している。いずれも破壊や顕著な特性変動は見られておらず、素子の信頼性として実用的なレベルにあると言える。

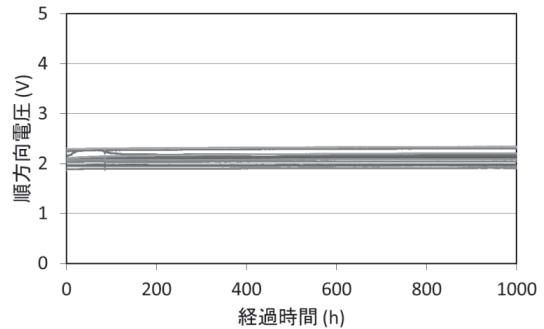


図9 順方向長期通電試験 (DC5A、150度)

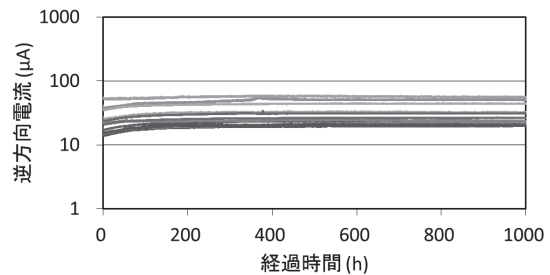


図10 逆方向長期通電試験 (DC600V、150度)

#### 6. 結 言

GaNは、その物性値から高耐圧・低抵抗・高速、というパワーデバイスに非常に有利な特性を有しており、いかにその特性を引き出すかが課題である。今回、当社のGaN基板上に縦型SBDを試作し、高速性能を評価したところ、同条件でSiダイオードやSiC SBDと比較しても高速な逆回復特性

をもつことが確認できた。このことは、スイッチング周波数増加を可能とし、結果として電力変換装置や電源の小型化が期待できる。また30MHzの整流回路を用いて、他のデバイスと比較したところ、消費電力の観点で最も低く、高効率なデバイスとして実用性を示した。さらに、1,000hの通電試験では顕著な劣化は見られず、実用的なレベルの信頼性をもつことを確認した。

## 用語集

### ※1 パワーデバイス

主に電力変換器で用いられる半導体素子。

### ※2 バリガ指数

$\epsilon\mu E^2$  であらわされる指数であり、主に材料が持っている物性値からパワーデバイスとしての能力を比較するために用いられる。

### ※3 バリガ高周波指数

$\mu E^2$  であらわされる指数であり、主に材料が持っている物性値から、高周波デバイスとしての能力を比較するために用いられる。

### ※4 受動部品

供給された電力を消費・蓄積・放出する素子のこと、抵抗やコイル、コンデンサなどを指す。

### ※5 縦型デバイス、横型デバイス

半導体デバイスの構造を大別したもので、電流の流れる方向で区別される。縦型デバイスは電流が表面から裏面など縦方向に流れるのに対して、横型デバイスは表面から表面など横方向に流れる。

### ※6 ショットキーバリアダイオード

半導体と金属の接合により生じるショットキー障壁を利用したダイオードのこと。

### ※7 プラズマCVD法

真空中で材料をプラズマ化し、対象物上に堆積する方法。

## 参考文献

- (1) W. Saito, I. Omura, T. Ogura, H. Ohashi, Solide-state. Electron., 48 (2004) 1555
- (2) K. Motoki, T. Okahisa, R. Hirota, S. Nakahata, K. Uematsu, and N. Matsumoto, J. Cryst. Growth. 305 (2007) 377
- (3) S. Hashimoto, Y. Yoshizumi, T. Tanabe, M. Kiyama, J. Cryst. Growth. 298 (2007) 871
- (4) 堀井拓、宮崎富仁、斎藤雄、橋本信、田辺達也、木山誠、SEIテクニカルレビュー第174号、p.p.77-80 (2009)
- (5) 住吉和英、岡田政也、上野昌紀、木山誠、中村孝夫、SEIテクニカルレビュー第183号、p.p.120
- (6) J. A. Santiago-González, K.K. Afridi, and D.J. Perreault, Proceedings from the IEEE Control and Modeling of Power Electronics (COMPEL), Salt Lake City, UT (June 2013)

## 執筆者

吉本 晋\* : 半導体技術研究所 主査



岡田 政也 : 半導体技術研究所 主査  
博士 (工学)



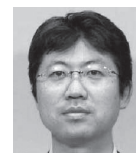
三橋 史典 : 半導体技術研究所



石塚 貴司 : 半導体技術研究所 グループ長  
博士 (工学)



上野 昌紀 : 半導体技術研究所 部長  
博士 (理学)



\*主執筆者