

# 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム平成 29 年度秀でた利用成果 超低損失酸化ガリウムトレンチ MOS 型ショットキーバリアダイオード

株式会社ノベルクリスタルテクノロジー/株式会社タムラ製作所 佐々木 公平物質・材料研究機構 大里 啓孝,津谷 大樹



(左) 株式会社ノベルクリスタルテクノロジー 佐々木 公平,(右) 物質・材料研究機構 大里 啓孝,津谷 大樹

# **ぎ**1. はじめに

これまで我々は、より良い世界の実現のため、化石燃 料を大量に消費しながら科学技術を発展させてきた.し かしながら、従来のやり方で今後の更なる人口増加およ び発展途上国の近代化に対応していった場合、地球上の 資源の枯渇は免れない.この世界を持続させるためには、 我々は省エネルギー社会へ転換していく必要がある.

省エネルギー化のために様々な方法が検討されている が、電気エネルギーの有効利用はその中核を担う技術開 発課題である.我々は発電施設で生成した電気エネルギー を、送配電設備によって様々な電気機器へ送り届け、消 費している.送配電の際、それぞれの電気機器に適した 電圧・電流・周波数へ適宜変換を行っているが、その変 換損失が無視できないほど大きく、より一層の低損失化 が求められている.電気エネルギーの変換を行う部品は パワーデバイスと呼ばれ、半導体シリコン (Si)によって 作られてきた.これまで、変換損失の低減のために、Si パワーデバイスはそのデバイス構造および製造プロセス が高度に改良されてきた.しかし、そのデバイス性能は すでに Si の材料物性限界まで達しており、これ以上の大 幅な低損失化は難しい.そこで、Si に変わる新しい半導 体材料の利用が世界中で検討されている.

新材料の候補として,Siよりも材料物性に優れる炭化 ケイ素(SiC)が注目され,その実用化を目指した多くの 国家プロジェクトが各国で進められてきた.我々はその SiCよりも材料物性に優れ,かつ量産性にも優れた酸化ガ リウムに関する研究を進めている.本稿では,その最前 線の研究成果を紹介する.

本研究を開始した直後,デバイス試作のために必要な 設備が足りないという事態に直面した.その時,ナノテ クプラットフォーム事業の存在を知り,酸化ガリウムの 加工に適した装置を多く保有している物質・材料研究機 構へ協力を依頼したところ,相談開始からわずか数ヶ月 という短期間で本成果を得ることができた.我々と同様 に試作設備が不足して困っている特に若手研究者の方々 へ,本稿がナノテクプラットフォーム利用のきっかけと なったら幸いである.



酸化ガリウムは酸素とガリウムの化合物であり,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ といった複数の結晶構造を取ることが知られている [1]. これらの中で  $\beta$  型酸化ガリウムが最安定相であり, 他の準安定相は加熱することでβ型へと変化する.その ため、酸化ガリウムに関する研究は主にβ型酸化ガリウ ムに対して行われている.なお、本稿では特に断らない 限り、酸化ガリウムと言った場合にはβ型酸化ガリウム を指す.

図1に, β型酸化ガリウムの結晶構造模式図を示す. 本結晶構造は単斜晶系の β-gallia 構造と呼ばれている.表 1に、各種半導体材料の材料物性値比較表を示す [2][3]. 酸化ガリウムのバンドギャップは、光学評価により 4.5-4.9eVと推定されている [4][5][6][7][8][9][10][11][12]. 酸化ガリウムの絶縁破壊電界強度は、各種半導体材料の バンドギャップと絶縁破壊電界強度の関係から推定した. 電子移動度は実験結果からの推定値である [13]. 半導体 材料のパワーデバイス用材料としての潜在能力を比較す る指標として、バリガ指数が広く用いられている [14]. 酸化ガリウムは、その大きな絶縁破壊電界強度から、バ リガ指数が Si の約 3,000 倍, SiC の 10 倍になる. このバ リガ指数を図示したものが図2である.図2は材料物性 から決まるユニポーラデバイスの理論オン抵抗と耐圧の 関係である. 図中の直線は各種半導体の材料物性から決 まる理論限界を示しており、右下に行くほど低損失高耐 圧デバイスを実現可能であることを表している. 図の通 り, SiC と同じ耐圧のデバイスを酸化ガリウムで作った場 合,そのオン抵抗は SiC の 1/10 になる.よって,酸化ガ リウムパワーデバイスの実現により,大きな省エネルギー 効果が期待できる.

酸化ガリウムが SiC よりも優れている他の特徴として、 大気圧下での融液成長法により, 大型で高品質のバルク 結晶を育成可能であることが挙げられる.現状,SiC 基 板は昇華法で製造されているが、製造コストが高く、ま た高品質な結晶を得にくいという課題があるために、SiC デバイスの広い普及を妨げる大きな障害となっている. 酸化ガリウムの融液成長については様々な手法が試み られているが、もっとも大型化が進んでいるのは edgedefined film-fed growth (EFG) 法である.図3に EFG法 の模式図を示す. EFG 法の場合, るつぼの中央にダイと 呼ばれるスリットが形成されたブロックを配置し、その スリットを毛細管現象で上昇してきた酸化ガリウム融液 に単結晶酸化ガリウムの種結晶を接触し、上方へ引き上 げて結晶育成を行う.図4に,EFG法を用いて作製した(a) 2インチ及び(b)4インチの酸化ガリウム単結晶基板の 写真を示す [15]. 2018 年 3 月現在,当社では 2 インチ 酸化ガリウム単結晶基板を市販しており、2018年度中の 4インチ基板の販売に向けた開発を進めている.



図1 β型酸化ガリウムの結晶構造模式図





	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	Diamond	β-Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
バンドギャップ: E <sub>g</sub> (eV)	1.1	1.4	3.3	3.4	5.5	4.5-4.9
絶縁破壊電界強度: <i>E</i> <sub>c</sub> (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	10	8.0(est.)
電子移動度: μ (cm²/Vs)	1,400	8,000	1,000	1,200	2,000	300(est.)
比誘電率: <i>ɛ</i> s	11.8	12.9	9.7	9	5.5	10
バリガ指数: <i>εμE</i> <sub>c</sub> <sup>3</sup>	1	15	340	870	24,661	3,444

#### 表1 各種半導体材料の材料物性値比較表



図 3 EFG 法模式図

このように,酸化ガリウムは他の材料を上回る優れた 材料物性を有し,かつ高品質な単結晶基板を安価に製造 できることから,超低損失パワーデバイスを低コストで 作製できる可能性がある.よって,酸化ガリウムパワー デバイスが実用化されれば,世界中での大きな省エネ効 果が期待できる.

# 3. トレンチ MOS 型ショットキーバリア ダイオードの特徴

前項で解説した通り,酸化ガリウムはその非常に大き な絶縁破壊電界強度から,低損失高耐圧パワーデバイス を作製できると期待される.しかしながら,これまでパ ワーデバイスは Si の物性値を念頭に開発されてきたため, 従来構造をそのまま酸化ガリウムに適用しても,酸化ガ  $\begin{array}{c} \beta \mbox{-}Ga_2 O_3 & \beta$ 

(a)

 a) (b)
図 4 EFG 法で作製した(a) 2 インチ及び (b) 4 インチ酸化ガリウム単結晶基板

リウムのポテンシャルを発揮することができない. 例え ば、パワーデバイスのキーデバイスの一つであるショッ トキーバリアダイオード (SBD) の場合, Si で用いられ てきた従来構造だと、図5(a)に示した通り、ショット キー電極と酸化ガリウムの界面にもっとも大きな電界が 印加される.実はその界面がある実効的な耐圧限界を有 しており、いかに半導体材料が大きな絶縁破壊電界強度 を有していても、その界面の特性でデバイス性能を制限 されるという現象が生じる。例えば、1.0eV 程度の標準的 なバリアバイトのショットキー電極を酸化ガリウムへ形 成した場合、その界面におおよそ 1-2MV/cm 程度の電界 を印加すると、ショットキー接合を流れるリーク電流が 無視できないほど大きくなり,酸化ガリウム自体は絶縁 破壊していないのに、そのリーク電流による発熱によっ て素子が燃え尽きてしまうのである. そのため、従来構 造では酸化ガリウムの大きな絶縁破壊電界強度のメリッ



図 5 ショットキーバリアダイオードの電界強度分布板 (a)従来構造 (b)トレンチ MOS 構造

トを発揮できない. その制限を打破するための方法とし て,我々は,図5(b)に示したトレンチ Metal-oxidesemiconductor(MOS)型 SBDを見出した.トレンチ MOS構造を設けると,図5(b)の通り,デバイス中の最 大電界はトレンチの底で発生する.この時,その MOS 界 面は絶縁膜を挟んでいるため,上述のリーク電流の問題 は解消され,酸化ガリウムへその材料物性限界まで電界 を印加することができるようになる.よって,本構造を 用いることで,酸化ガリウムのポテンシャルをフルに発 揮したデバイスの設計が可能となる.



本アイディアの実現のため、そのトレンチの最適な寸 法をシミュレーションしたところ,メサの幅は 2-3um 程 度まで微細化しなければならないことがわかった. しか しながら、当時我々はそのような微細加工のための設備 を保有していなかった. そこで, 試作を代行してくれる いくつかの民間企業にトレンチの形成を依頼し、数100 万円かけて予備実験を行ったのだが、どこも酸化ガリウ ムに適した設備を保有しておらず、良い結果が得られな いまま数ヶ月が経過した、このままでは埒が明かないと 考え, 改めて試作代行先を探し, ナノテクプラットフォー ムのホームページに辿り着いた.ホームページの内容を 読むと, 共同研究契約がなくても企業が大学や研究所の 最先端の設備を利用できるとのことだったため、早速酸 化ガリウムの加工に良さそうな設備を多く保有していた 物質・材料研究機構へ協力を依頼した. すると、そこか らわずか1ヶ月という短期間で, さらにわずか数十万の 費用で,所望の微細トレンチの形成に成功してしまった. このような短期間で成果が得られたのは、民間企業に比 べて大学や国研が、常日頃から様々な新材料の難しい加 工を幅広く行っており、特殊な加工に対するノウハウを 多く有しているためと考えられる.(誤解のないように申 し上げておくと、決して民間企業の技術レベルが低いと いうことではなく、得意不得意の問題である.)トレンチ 形成に成功したので、次にトレンチ内部の絶縁膜の形成 に適した設備を保有している東工大へ成膜を依頼し、こ の工程も1ヶ月程度で確立することができた.これによ り、大きな課題がクリアされ、当初最初の試作が完了す るまで1年程度を見込んでいたところ、4ヶ月程度でデ バイスの動作実証に成功し、1年経たずに市販 SiC デバイ スを凌駕する世界最高性能を実証することができた.そ の成果を次項で紹介する.

# **5.酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD** の試作 [16][17][18]

#### 5.1 デバイス構造とプロセスフロー

図6 (a), (b), に試作したデバイスの (a) 断面模式 図と (b) 外観写真を示す.また,プロセスフローを図7 に示す.最初に, EFG 法を用いて作製した Sn ドープ酸 化ガリウム基板上に, Si をドープした酸化ガリウム膜を Halide vapor phase epitaxy 法によりホモエピタキシャル 成長させた.基板およびエピ膜のドナー濃度と厚さは6 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>,570µm と6×10<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup>,5µm である.次 に,エピ膜の表面に,NIMS ナノテクプラットフォーム の設備を用いてメサとトレンチの周期構造を形成した. トレンチ幅は4µm,メサ幅は2µm とした.トレンチ深 さは2-3µm 程度である.トレンチ形成後,エピ膜全面 に東工大ナノテクプラットフォームの原子層堆積装置を 用いて厚さ50nmのHfO<sub>2</sub>膜を設けた.その後,メサ上





図7 酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD のプロセスフロー

部の HfO<sub>2</sub> 膜のみ,化学機械研磨により除去した.そし て,NIMS ナノテクプラットフォームにて厚さ 400nmの フィールドプレート用 SiO<sub>2</sub> 膜を形成し,フォトリソグラ フィとウェットエッチングによりパターニングを行った. SiO<sub>2</sub> の開口部の直径はおよそ 300µm である.最後に, カソード電極として Ti/Au,アノード電極として Mo/Au/ Niを形成した.酸化ガリウムと接触しているのは Mo で ある.作製したデバイスの電気特性評価は,早稲田大学 ナノテクプラットフォームの高耐圧デバイス測定システ ムを用いて行った.

#### 5.2 酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD の特性

図8(a)に、酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD と、 市販されている中耐圧(~600V)SiC SBD の逆方向電流 - 電圧特性を示す.一般的にダイオードは、順方向特性と 逆方向特性にトレードオフの関係があり、デバイス構造 によって調整することができる.本研究では、市販SiC SBD と同程度の逆方向特性になるように酸化ガリウムト レンチ MOS 型 SBD の構造を設計し,順方向特性によりデ バイス間の特性比較を行った.図8(a)を見ると,設計 通り,酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD と市販 SiC SBD は同等の逆方向特性になっている.酸化ガリウムトレン チ MOS 型 SBD のデータが -400V 程度までなのは,そこ で局所的なブレークダウンを起こしたためである.この ブレークダウンは酸化ガリウムの材料物性限界に起因す るものではなく,トレンチ表面の平坦性の悪さによるも のと推測される.今後トレンチ形成プロセスを改良する ことにより,破壊電圧の改善が可能と考えられる.

図8(b)に順方向電流密度 - 電圧特性比較図を示す. 酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD は SiC SBD よりも立 ち上がり電圧を半分程度と大幅に低減できており,動作 電流において最大で 40% 低損失化することに成功した. 本研究により,SiC デバイスよりも低損失で動作する酸化 ガリウムデバイスを世界で初めて実証することができた. 今後,基板抵抗などの余分な抵抗成分を取り除き,さら なる低損失化に取り組んで行く.



図8 酸化ガリウムトレンチ MOS 型 SBD および市販 SiC SBD の(a) 逆方向特性と(b) 順方向特性



本稿では,酸化ガリウムのパワーデバイス用材料とし ての優位性と,最新の研究成果として SiC を超える性能 の実証結果について紹介した.本研究で試作したデバイ スは,数年以内のサンプル出荷を目指して量産技術開発 へと進んでいる.また本稿では,ナノテクプラットフォー ムを利用した背景についても詳細に記した.ナノテクプ ラットフォームは,我々のような,アイディアはあるが 実行するための設備が足りない若手研究者や中小企業な どに特に最適な仕組みであると感じる.本稿がナノテク プラットフォームを利用する上での参考になれば幸いで ある.



本研究の一部は, 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業 (NIMS 微細加工プラットフォーム), 12025014 (F-17-IT-0002) の支援を受けて実施した.



- R. Roy, V. G. Hill, and E. F. Osborn: J. Am. Chem. Soc. 74 (1952) 719.
- [2] 松波弘之,大谷昇,木本恒暢,中村孝:半導体 SiC 技術と応用 第2版(日刊工業新聞社,2011).
- [3] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi: Appl. Phys. Lett. 100 (2012) 013504.
- [4] H. H. Tippins: Phys. Rev. 140 (1965) A316.
- [5] T. Matsumoto, M. Aoki, A. Kinoshita, and T. Aono: Jpn. J. Appl. Phys. **13** (1974) 1578.
- [6] M. Passlack, E. F. Schubert, W. S. Hobson, M. Hong, N.

Moriya, S. N. G. Chu, K. Konstadinidis, J. P. Mannaerts, M. L. Schnoes, and G. J. Zydzik: J. Appl. Phys. **77** (1995) 686.

- [7] J. Åhman, G. Svensson, and J. Albertsson: Acta Crystallogr: C 52 (1996) 1336.
- [8] N. Ueda, H. Hosono, R. Waseda, and H. Kawazoe: Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 933.
- [9] M. Orita, H. Ohta, M. Hirano, and H. Hosono: Appl. Phys. Lett. 77 (2000) 4166.
- [10] E. G. Villora, K. Shimamura, K. Kitamura, and K. Aoki: Appl. Phys. Lett. 88 (2006) 031105.
- [11] T. Oshima, T. Okuno, and S. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys.46 (2007) 7217.
- [12] T. Onuma, S. Fujioka, T. Yamaguchi, M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Masui, and T. Honda: Appl. Phys. Lett. 103 (2013) 041910.
- [13] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. G. Villora, K. Shimamura, and S. Yamakoshi: Appl. Phys. Express 5 (2012) 035502.
- [14] B. Jayant Baliga: IEEE Electron Device Lett. 10(1989) 455.
- [15] A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi: Jpn. J. Appl. Phys. 55 (2016) 1202A2.
- [16] K. Sasaki, D. Wakimoto, Q. T. Thieu, Y. Koishikawa, A. Kuramata, M. Higashiwaki, and S. Yamakoshi: IEEE Electron Device Lett. 38, 783 (2017).
- [17] K. Sasaki, Q. T. Thieu, D. Wakimoto, Y. Koishikawa,A. Kuramata, and S. Yamakoshi: Ext. Abstr. The 78thJSAP autumn meeting (2017).
- [18] K. Sasaki, Q. T. Thieu, D. Wakimoto, Y. Koishikawa, A. Kuramata, and S. Yamakoshi: Ext. Abstr. IWGO (2017).

(株式会社ノベルクリスタルテクノロジー 開発部長 佐々木 公平)

Nanofabrication Platform	【お問い合わせ】 微細加エプラットフォーム NIMS 微細加エプラットフォーム ☎ 029-859-2797 E-mail NIF-office(at)nims.go.jp				
	ホームページ https://www.nims.go.jp/nfp/				