

世界初！超ワイドバンドギャップ半導体ルチル型 GeO_2 による縦型ショットキーバリアダイオードの開発に成功

1. 発表者：

西中浩之（京都工芸繊維大学電気電子工学系 教授）
鐘ヶ江一孝（京都工芸繊維大学電気電子工学系 助教）

2. 発表のポイント：

- ◆ルチル型二酸化ゲルマニウム ($r\text{-GeO}_2$) を用いた縦型ショットキーバリアダイオードの開発に世界で初めて成功しました。
- ◆安定相制御技術により成長した高品質な $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層をデバイスに用いることで、理想に近い整流特性と低オン抵抗を実現しました。
- ◆本成果は 4.6 eV の超ワイドバンドギャップを持つ $r\text{-GeO}_2$ の高効率パワーデバイスへの応用可能性を示す重要な一歩です。

3. 発表概要：

京都工芸繊維大学電気電子工学系鐘ヶ江一孝助教、日本学術振興会特別研究員(PD)島添和樹（現名古屋工業大学工学専攻電気電子プログラム助教）、博士前期課程学生清家一郎、電気電子工学系西中浩之教授の研究チームは、超ワイドバンドギャップ半導体である「ルチル型二酸化ゲルマニウム($r\text{-GeO}_2$)」^{※1}を用いた縦型ショットキーバリアダイオード (SBD) ^{※2}の開発に世界で初めて成功しました。この $r\text{-GeO}_2$ は約 4.6 eV と非常に大きなバンドギャップを持ち、n 型ドーピング制御が実証されており、p 型ドーピング制御も理論予測からその可能性が示唆されており、炭化ケイ素(SiC)や窒化ガリウム(GaN)に続く次々世代パワーデバイス半導体材料として有望視されています。研究チームは独自のミスチ化学気相成長法^{※3}と n 型ドーパントとしてアンチモン(Sb)をドーピングした傾斜 $\text{Ge}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$ バッファ層上に、高品質な単相 $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層を形成しました。この $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層を用いて、理想に近いダイオード特性（理想因子^{※4} $n = 1.14$ ）と低オン抵抗（ $9 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ）を有する縦型ショットキーバリアダイオードの作製に成功しました。この成果は、電気自動車や再生可能エネルギーシステムなどで必要とされる高効率電力変換素子の新たな選択肢を提供するものであり、超省エネ社会の実現に貢献する可能性をもっています。

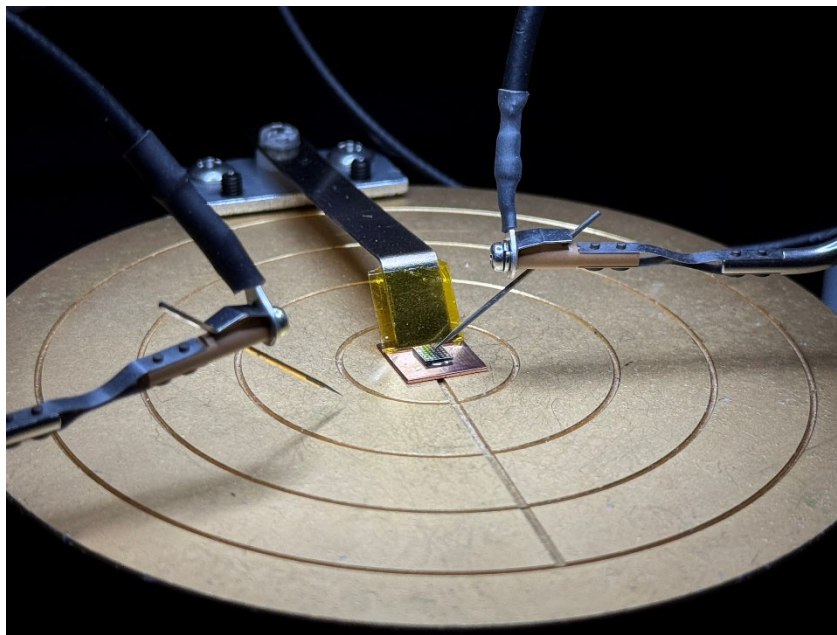
4. 発表内容：

研究の背景

電気自動車や再生可能エネルギーシステムの普及に伴い、高効率かつ高耐圧のパワー半導体デバイスへの需要が高まっています。現在、シリコン（Si）に代わる次世代パワー半導体として炭化ケイ素（SiC）や窒化ガリウム（GaN）の実用化が進んでいますが、さらなる低損失化を目指して、酸化ガリウム（ β -Ga₂O₃）、窒化アルミニウム（AlN）、ダイヤモンドなどの超ワイドバンドギャップ半導体の研究も進められています。

こうした中、ルチル型二酸化ゲルマニウム（r-GeO₂）は4.6 eVという超ワイドバンドギャップを持ち、高い絶縁破壊電界強度、両極性ドーピング能力が理論計算で示唆されるなど、パワーデバイスに適した特性を有しています。また、ネイティブ基板が作製できることも実用化に向けた大きな利点となっています。しかし、これまで r-GeO₂ の安定相制御が困難であったため、半導体デバイスとしての動作実証がなされていませんでした。

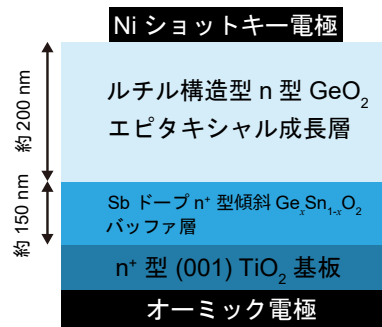
当研究グループでは以前、ミスト化学気相成長法（ミスト CVD）と傾斜 Ge_xSn_{1-x}O₂ バッファ層技術により、TiO₂ 基板上に単相の r-GeO₂ エピタキシャル層を成長させることに成功していました。今回、この技術を応用して r-GeO₂ 縦型ショットキーバリアダイオード（SBD）を作製し、その電気的特性を評価しました。



試作したルチル型 GeO₂ 縦型 SBD の電気的特性評価の様子。

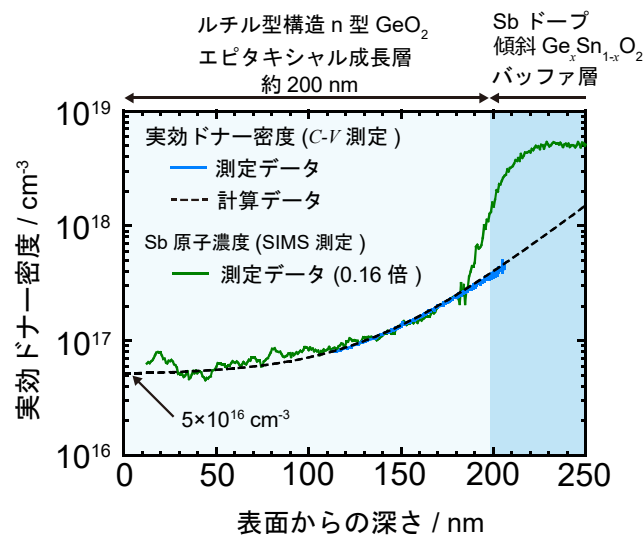
研究内容

本研究では、ミスト CVD を用いて、非意図的にドーピングされた n 型単相 r-GeO₂ エピタキシャル層（膜厚：約 200 nm）と Sb ドープ n⁺型傾斜 Ge_xSn_{1-x}O₂ バッファ層（膜厚：約 150 nm）を Nb ドープ n⁺型(001) TiO₂ 基板上に成長させました。試料表面に Ni ショットキー電極を、裏面に Ti/Al オーミック電極を形成し、r-GeO₂ 縦型 SBD を作製しました。



試作したルチル型 GeO_2 縦型 SBD の断面模式図。

作製した Ni/ $r\text{-GeO}_2$ 縦型 SBD の容量-電圧 (C - V) 特性と電流-電圧 (I - V) 特性を測定しました。 C - V 特性から、ショットキー障壁高さを定量することに成功しました。ショットキー障壁高さは、SBD のデバイス特性を決定づける最も重要な物性値のひとつです。得られたショットキー障壁高さは、Ni の仕事関数と $r\text{-GeO}_2$ の電子親和力から予想される値に近く、理想的に近いショットキー界面の形成が確認されました。さらに、 C - V 特性の詳細な解析から、 $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層中の実効ドナー密度プロファイルが得られました。同一試料の二次イオン質量分析 (SIMS) 測定から得られた $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層中の Sb 原子濃度プロファイル形状と実効ドナー密度プロファイルが良い一致を示したことから、作製した非意図的にドーピングした $r\text{-GeO}_2$ エピタキシャル層において、支配的な n 型ドーパントがバッファ層から拡散した Sb であることがわかりました。

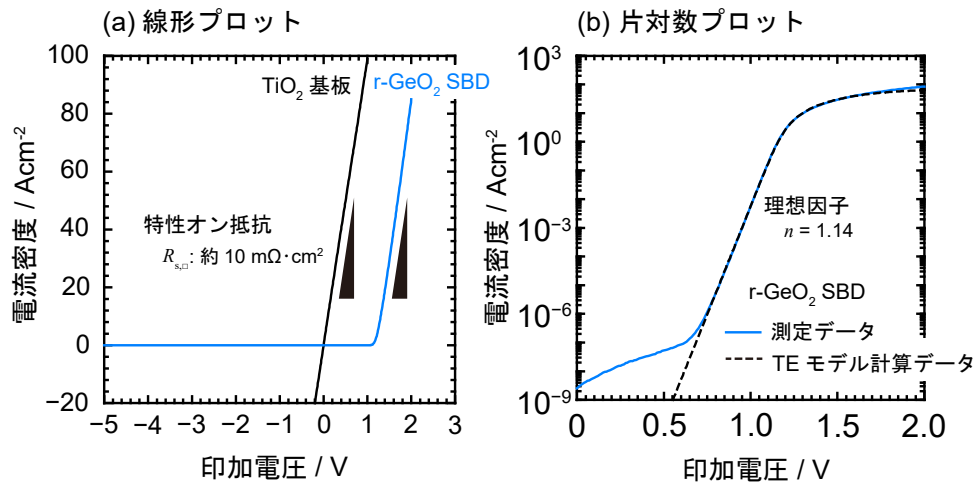


ルチル型 GeO_2 SBD の C - V 特性から得られたルチル型 GeO_2 エピタキシャル層の実効ドナー密度プロファイル。実効ドナー密度プロファイルと SIMS 測定から得られた Sb 濃度プロファイルの形状が一致したことから、非意図的にドーピングしたルチル型 GeO_2 エピタキシャル層において、バッファ層から拡散した Sb 原子の一部が n 型のドーパントとして働いていることがわかった。



京都工芸繊維大学
KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY

I - V 特性から、作製した Ni/ r-GeO₂ 縦型 SBD が明瞭な整流性を有することが示されました。オン時の抵抗は、初期試作段階において非常に小さな値を示し、導電性 TiO₂ 基板の抵抗成分が支配的であることがわかりました。順方向 I - V 特性は、理想因子が 1 に近い指数関数的な急峻な電流の立ち上がりを示しました。Ni/ r-GeO₂ 縦型 SBD の支配的な電流輸送機構として、熱電子放出(thermionic emission: TE)モデル^{※5}による初期的な解析が適応できることがわかりました。



ルチル型 GeO₂ 縦型 SBD の電流密度-電圧特性。(a)線形プロットでは、明瞭な整流性と低いオン抵抗が確認された。特性オン抵抗の大きさ(左図中の黒色の三角形の傾きに対応)が一致したことから、支配的な抵抗成分が導電性 TiO₂ 基板であることがわかった。(b)順方向特性の片対数プロットから、試作した SBD の理想因子が 1 に近く、支配的な電流輸送機構として TE モデルによる初期的な解析が適応できることがわかった。

今後の展開

本研究は、超ワイドバンドギャップ半導体 r-GeO₂ を用いたデバイスの初めての動作実証であり、次世代パワー半導体の新たな選択肢を提供するものです。初期段階の試作デバイスでありながら、理想的なダイオード特性と低オン抵抗を示したことは、r-GeO₂ の半導体デバイス材料としての高いポテンシャルを示しています。

今後は、結晶品質の向上や均一なドーピング制御技術の確立、厚膜成長技術の開発などを進めることで、r-GeO₂ デバイスの特性をさらに改善していく予定です。また、r-GeO₂ 自立基板の利用も検討し、r-GeO₂ 半導体の本質的な物性解明と高性能デバイス開発を目指します。

現在は基礎研究段階ですが、5~10 年程度のスパンで実用化に向けた産学連携研究へと発展させることを目指しています。将来的には、電気自動車や再生可能エネルギーシステムなどで使用される電力変換器の高効率化・小型化に貢献することが期待されます。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) 創発的研究支援事業 (JPMJFR222M)、日本学術振興会 (JSPS) 科学研究費若手研究 (JP24K17308) の支援を受けて行われました。

5. 発表雑誌：

雑誌名：Applied Physics Express

論文タイトル：**Ni/rutile GeO₂ vertical Schottky barrier diode on Nb-doped TiO₂ substrate using Sb-doped graded Ge_ySn_{1-y}O₂ buffer layers**

著者：Kazutaka Kanegae, Kazuki Shimazoe, Ichiro Seike, and Hiroyuki Nishinaka

DOI 番号：10.35848/1882-0786/adc3e8

アブストラクト URL：<https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1882-0786/adc3e8>

※本研究成果は2025年3月21日にオンライン公表済です。

6. 用語解説：

※1 ルチル型二酸化ゲルマニウム (r-GeO₂)

二酸化ゲルマニウム (GeO₂) の結晶多形の一つ。ルチル型構造を持ち、4.64 eV の超ワイドバンドギャップ半導体として機能する。

※2 ショットキーバリアダイオード (SBD)

金属と半導体の接合により形成されるダイオード。pn接合ダイオードに比べて順方向電圧降下が小さく、高速動作が可能のため、パワーエレクトロニクスでの応用が期待されている。

※3 ミスト化学気相成長法 (ミスト CVD)

原料溶液を超音波によって霧状にし、キャリアガスで反応室に運び、加熱された基板上で化学反応させて薄膜を形成する方法。安全で環境負荷が低く、大面積成長が可能な特長を持つ。

※4 理想因子

ダイオードの電流-電圧特性の理想性を表す指標。SBDの場合、理想因子が1に近いほど、急峻な電流の立ち上がりを有する理想的なダイオード特性を示す。

※5 熱電子放出モデル

電子が熱エネルギーを得てショットキーバリアを越え、金属と半導体の間を移動する現象を記述するモデル。