



2025 年 2 月 5 日

分野: 工学系

キーワード: 強相関電子系酸化物、テラヘルツ光、相変化材料、メタマテリアル、光検出器、SDGs

変幻自在な電極材料でダイオードの性能を向上 —材料と光が拓く新しいデバイス技術—

【研究成果のポイント】

- ◆ 独自の精密加工技術を駆使することで、二酸化バナジウム(VO_2)※1の金属ドメイン※2をシリコン(Si)基板上に構築し、温度変化に応じて構造を変化させる「生きた電極」として働くデバイスの作製に成功
- ◆ このダイオードデバイス構造にテラヘルツ(THz)光※3を照射することで、 VO_2 電極間の Si 基板内でキャリアの増幅と電流生成が起こり、光検出機能を持つダイオード特性を実証
- ◆ 微細加工技術、材料特性、光学技術を適切に融合したデバイス設計により、高速かつ高感度な次世代デバイスの実現が期待される

❖ 概要

大阪大学産業科学研究所の大坂藍招へい教員(兵庫県立大学大学院電子情報工学専攻 助教)、服部梓招へい准教授、田中秀和教授、同大学院基礎工学研究科の永井正也准教授らの研究グループは、独自の加工・微細加工技術を駆使することで、高品質な二酸化バナジウム(VO_2)が外場刺激に応じて構造を変化させる「生きた電極」として働くデバイスの作製に世界で初めて成功しました。また、この生きた電極を持つダイオードで、実際にテラヘルツ光の検出器として最大で 1 桁以上の機能向上を実証しました。

私たちの生活を支えるスマートフォンなどの電子デバイスの高速化、省エネルギー化に適応する電子回路小型化には、より効率的な動作を可能にする新しい材料や設計手法の開発が欠かせません。

しかし、従来のデバイス製造過程には、複雑な制御の必要性や重い環境負荷などの課題があります。また、現在使用されている材料には性能上の限界があり、それを超える新しい仕組みを取り入れる必要があります。

こうした背景から、研究グループは「絶縁体から金属へと性質が変化する特性」を持つユニークな材料「二酸化バナジウム(VO_2)」に注目しました。この材料は、温度や電場などの外部刺激に応じて性質が変化するため、電子デバイスに新しい機能を付加する可能性を秘めています。 VO_2 の特性により、サブマイクロ

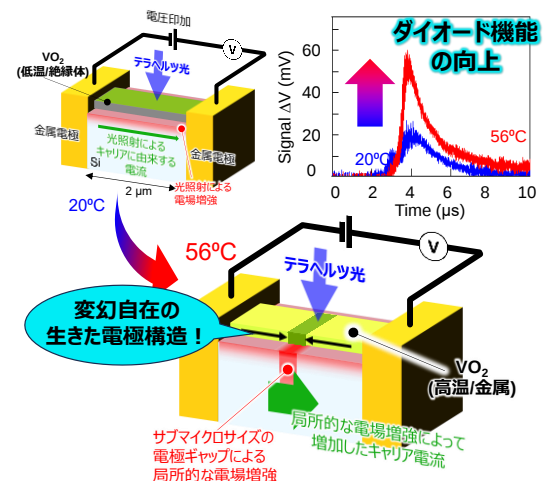


図1

温度制御によってサブマイクロメートル精度で自在に構造を変える「生きた電極」をシリコン基板に組み込んだダイオードを作製し、テラヘルツ光検出器としての性能向上を実証。

Press Release

サイズ(1 ミリメートルの 1,000 分の 1 未満)の金属/絶縁体構造を神経細胞のように張り巡らせることができ、デバイス内部に VO_2 を組み込むと「電場を局所的に増強する仕組み」を作り出し、高速で効率的な動作を可能にできると着想しました。

本研究では、サブマイクロサイズの VO_2 を電極として Si 基板に組み込み、電極構造を温度制御によって変化させる「生きた電極」によってダイオード機能が向上することを実証しました。微細加工技術、材料特性、光学技術を適切に融合したデバイス設計により、開発が期待されている次世代の電子デバイス機能の増強の可能性を示すことができました。

本研究成果は、米国科学誌「ACS Applied Electronic Materials」に、1 月 25 日(土)23 時(日本時間)に公開されました。

❖ 研究の背景

私たちの生活を支えるスマートフォンやコンピュータ、通信機器などの電子デバイスは、ますます高速化し、省エネルギーで動作することが求められています。これらに適応するための電子回路の小型化には、より効率的な動作を可能にする新しい材料や設計手法の開発が欠かせません。

しかし、従来の方法にはいくつかの課題があります。例えば、デバイスの製造過程で必要な表面加工は、多段階の化学処理や研磨プロセスを含み、高精度な制御が求められるため複雑です。また、これらの工程では強酸や強アルカリなどの化学薬品や大量の水を使用するため、廃液処理や環境負荷が課題となっています。また、現在使用されている材料には性能上の限界があり、それを超える新しい仕組みを取り入れる必要があります。

近年、新しい電子デバイスの材料として、既存の材料に微細な金属構造を加えることで、材料特性の限界を超えた既存のダイオードより高性能な新しいデバイスが提案されています。研究グループは、このような新しい技術の基盤材料として、 VO_2 に注目しました。 VO_2 は外部からの刺激で絶縁体から金属に変わる 2 面性を持つ材料で、この絶縁体-金属相転移という特性を利用して、スイッチやセンサーなど、さまざまな用途で用いられています。今回注目したのは、この相転移の際に、神経細胞のようにまるで「生きている」かのように発生する金属ドメインのネットワーク構造です。この VO_2 の「生きた」金属ドメイン構造は、メタマテリアル^{※4}としての機能を持ち、Si デバイスに組み込むことで、電場の増強を生み出し、新しいデバイス機能の開発に貢献できます。しかし、既存の方法で Si 上に作成した VO_2 の金属ドメインの大きさは、メタマテリアルの機能を出すには小さすぎる問題がありました。

❖ 研究の内容

金属ドメインの大きさは VO_2 の品質が良いほど大きくなります。研究グループが持つ独自の基板加工技術と結晶成長技術によって、これまでの約 10 倍以上のサイズの金属ドメインをもつ高品質 VO_2 の作製が可能となり、「生きた」電極を持つ Si ダイオードデバイス構造を実現しました。従来の基板表面処理法である化学機械研磨法では、化学反応と機械研磨のバランスを取る必要があり、基板表面に微細な凹凸や損傷層が残る問題がありました。

これに対し、研究グループが開発した表面処理法は、触媒作用を持つ研磨板を用いることで、基板表面の凸部から優先的にエッチングが進み、粗さやダメージの全くない極めて平坦な表面を実現でき、薄膜の品質向上に貢献します。その結果、従来の基板では数十ナノメートル程度だった VO_2 の金属ドメインのサ

Press Release

イズが約 10 倍にまで拡大しました。

このデバイスでは、VO₂ 電極がメタマテリアル構造として温度に応答し、変幻自在にその形状を変えることができます。したがって、ある条件下では電極間の距離が縮まり、外部から電圧を加えると局所的に電場が増強します。そこで、産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設内において、DC電場に加えて新たにテラヘルツ(THz)光を照射しました。その結果、VO₂ 電極間の Si 基板内でキャリアの増幅と電流生成が強く起こり、光検出機能を持つダイオード特性を実証しました。

本研究は、VO₂ 内の金属ドメインネットワークを調整することで機能を制御できる VO₂/Si メタデバイスを実証した成果であり、光電子デバイスでのメタデバイス開発の第一歩といえます。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

本研究成果により、Si など既存の半導体の材料特性とメタマテリアルデバイスの構造的・機能的特性を組み合わせ、高速かつ高感度な次世代デバイスの実現が期待されます。サイズが固定された一般的な電極ではなく、「生きた」電極をもつデバイスでは、変幻自在性から金属ドメインネットワークで共鳴が起こり、電場を増強して感度をさらに向上させるという、既存のデバイス特性向上のアプローチを超越した挑戦的な開発の可能性が広がります。扱いにくいと敬遠されてきた複雑な振る舞いをする材料を、物理現象をベースにデバイス構造として設計し、既存のデバイスに高度な微細加工技術で組み込むことで、新たな光電子デバイスを生み出し、IoT 社会の発展に貢献します。

❖ 特記事項

本研究成果は、2025 年 1 月 25 日(土)23 時(日本時間)に米国科学誌「ACS Applied Electronic Materials」(オンライン)に掲載されました。

タイトル: “Si-VO₂ Hybrid Materials with Tunable Networks of Submicrometer Metallic VO₂ Domains Provide Enhanced Diode Functionality”

著者名: Ai I. Osaka, Masaya Nagai, Shingo Genchi, Boyuan Yu, Rui Li, Hui Ren, Hiroki Momono, Goro Isoyama, Hidekazu Tanaka, and Azusa N. Hattori

DOI: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.4c01914>

なお、本研究は、物質・デバイス領域共同研究拠点、ライナック、他、科研費など研究の一環として行われ、米子高専 桃野浩樹 講師、大阪大学産業科学研究所 磯山悟朗 名誉教授の協力を得て行われました。

❖ 用語説明

※1 二酸化バナジウム(VO₂)

強相関電子系酸化物の 1 種で、Si 上の薄膜状態では約 55℃を境に低温の絶縁体から高温の金属へと相転移し、大きな電気抵抗などの特性変化を生じます。相転移の過程で、本質的不均一という金属ドメインが絶縁体の中に発生して増えていくという現象が見られます。相転移は熱、磁場、光などさまざまな外場によって引き起こされるため、センサーやメモリーなど実用デバイスへの応用が期待され、多くの研究が行われています。

※2 金属ドメイン

二酸化バナジウム(VO₂)などの強相関電子系酸化物では、温度の変化によって電氣的性質が絶縁体的な特徴から金属的な特徴へと変化します。この変化が起こる最小単位の領域を「ドメイン」と呼びます。絶縁

Press Release

体から金属への変化の過渡状態では金属に変化した領域と絶縁体領域がランダムに共存することが知られています。この時に観察される金属に変化した個々のドメインを「金属ドメイン」といいます。金属ドメインのサイズや分布が変化することで、全体の電気的な性質が大きく変化します。

※3 テラヘルツ(THz)光

電波と赤外線の上に位置する電磁波で、波の振動の速さ(周波数)が 1 秒間に 1 兆回(1 テラヘルツ=1THz)ほどの領域にある電磁波を指します。例えば、テラヘルツ光は、紙やプラスチック、布などの非金属の材料を透過する性質があり、中身を壊さずに調べる技術(非破壊検査)に利用されています。テラヘルツ光は 6G 通信に加えて、医療分野や食品検査、薬剤の品質管理、危険物探知などの応用が期待されるため、世界中で研究が行われています。また、大阪大学産業科学研究所附属量子ビーム科学研究施設にはテラヘルツ領域の光を放射する自由電子レーザーを保有しています。

※4 メタマテリアル

自然界には存在しない特別な性質を持つ人工的な材料です。ミクロやナノスケールの細かな構造を人工的に設計して作ることで、光や音、電磁波などが特定の方法で振る舞うように制御できます。例えば、光を特殊な方向に曲げたり、特定の波長の光を吸収したり反射したりする性質を活用することで、「透明マント」のような光を隠す技術や、高性能な通信デバイスなどの応用が実現できます。

【大坂招へい教員のコメント】

強相関電子系酸化物は外的刺激で特性が劇的に変化する魅力的な材料であり、その巨大な変化を利用したデバイスの開発が数多く試みられています。しかし、本研究では変化の中間地点、金属と絶縁体の状態が混在する過渡的な状態を意図的に作り出し、他の材料や光との融合を通じて、全く新しいデバイスのモデルを提案しました。今後もこのように、物事の見方や組み合わせを変えることで、これまで気づけなかった新たな可能性を切り拓くような研究を継続していきたいと考えています。

❖ SDGs目標



❖ 参考 URL

田中 秀和 教授 研究者総覧 URL

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/965b692969a7c80b.html>

永井 正也 准教授 研究者総覧 URL

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/8ff2456381ad5887.html>



Press Release

❖ 本件に関する問い合わせ先

<研究に関すること>

大阪大学 産業科学研究所 招へい教員

(兵庫県立大学大学院工学研究科 助教) 大坂 藍(おおさか あい)

TEL:06-6879-4281 FAX: 06-6879-4283

E-mail: osakaai@sanken.osaka-u.ac.jp

(osaka@eng.u-hyogo.ac.jp)

<プレスリリースに関すること>

大阪大学 産業科学研究所 広報室

TEL:06-6879-8524

E-mail: press@sanken.osaka-u.ac.jp