

2025年5月27日



分野:自然科学系

キーワード:スピントロニクス、ゲルマニウム、スピンデバイス、スピン流、SDGs

室温で半導体 pn 接合を介したスピン伝導を初観測！

—消費電力の増大に歯止めをかける次世代スピントロニクスデバイス開発に期待—

【研究成果のポイント】

- ◆ ほとんど全ての半導体デバイスには、電流の ON/OFF 制御のために pn 接合^{※1} が搭載されている。
- ◆ 半導体 pn 接合を用いたスピントロニクスデバイス構造では「室温」での実証例はない。
- ◆ 本研究では、次世代半導体であるゲルマニウム(Ge)の pn 接合を有するスピントロニクスデバイス構造において、室温でスピン伝導を観測することに成功。
- ◆ 優れた ON/OFF 特性を有する半導体スピントロニクスデバイスの要素技術を構築。

❖ 概要

大阪大学大学院基礎工学研究科の大木健司さん(博士後期課程)、上田信之介さん(博士前期課程)、浜屋宏平教授、同大学先導的学際研究機構 スピン学際研究部門 宇佐見喬政講師、熊本大学半導体・デジタル研究教育機構の山本圭介教授、東京都市大学総合研究所の澤野憲太郎教授らの共同研究グループは、半導体 pn 接合を有するデバイス構造において、世界で初めて室温でスピン伝導を観測することに成功しました(図1)。

現在、AI(半導体)の普及により大規模データセンターの消費電力は深刻な増大を続けています。そこで、低消費電力演算機能と不揮発メモリ機能を併せ持つ次世代の半導体スピントロニクスデバイスの開発が進められています。この不揮発メモリ機能の実現には、電子が持つ磁石としての性質(スピン)を保持したまま、半導体中を電子が伝導する「スピン伝導」の実証が不可欠です。これまで共同研究グループは、半導体ゲルマニウム(Ge)と高性能スピントロニクス磁性材料(強磁性ホイスラー合金^{※2})を高品質に直接接合した構造を独自に開発し、「室温スピン伝導」を実証してきました。しかし、一般的な半導体デバイスには、電流の ON/OFF 制御を担う pn 接合が存在しているため、この pn 接合を有するデバイス構造における「室温スピン伝導」を観測する必要があります。これまでの先行研究では、極低温のみで動作する III-V 族強磁性半導体^{※3} を利用した知見のみしか存在せず(図1)、 pn 接合がスピンデバイスの室温動作にどのような影響を与えるのかさえも不明でした。

共同研究グループは今回、量子力学的バンド間トンネル(band-to-band tunneling; BTBT)伝導^{※4}

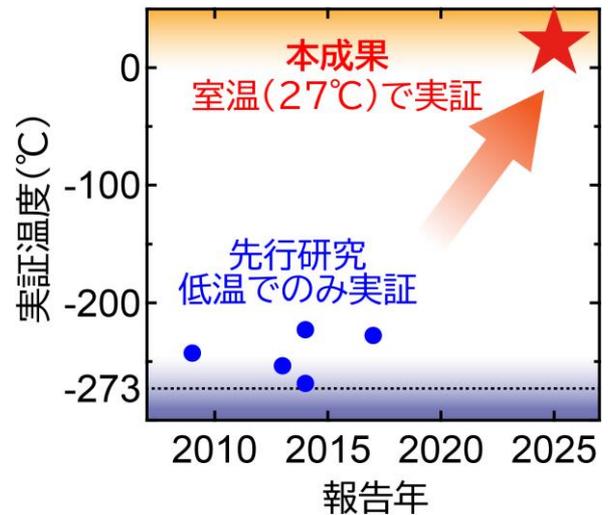


図1. 半導体 pn 接合を有するデバイスにおけるスピン伝導観測温度の歴史。先行研究においては、低温環境での実証に限定されていたが、本研究では室温(27°C)環境で十分に動作することを確認。

を利用して電流変調を行うトンネル FET (TFET)^{※5}の技術
を、半導体スピントロニクスデバイスに応用するという新た
なアプローチを着想しました(図 2)。本研究では、新型の半
導体スピントロニクスデバイスである「スピン TFET」の実
現に向けた第一歩として、半導体 Ge と強磁性ホイスラー
合金を高品質に直接接合した構造に pn 接合を取り入れ、
 pn 接合における BTBT 伝導を介した室温スピン伝導を観
測することに成功しました。

本研究成果は、スピン TFET の実現に向けた重要な一歩
として評価され、米国物理学会の学術論文誌「Physical
Review Applied」に Letter として掲載(オンライン:2
025 年5月23日)されました。

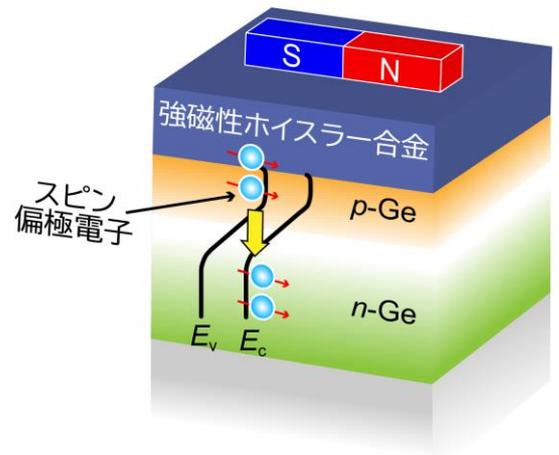


図 2. Ge pn 接合を介したスピン注入技術の
模式図。今回研究では、上部の高性能磁性体
(強磁性ホイスラー合金)から下部の n -Ge 半
導体層へ、スピン偏極電子が量子力学的バンド
間トンネル伝導を介して高効率に注入され、室
温においてスピン伝導が観測された。

❖ 研究の背景

AI 技術や IoT 技術の進展に伴い、半導体を用いた演算
素子およびメモリ素子には、さらなる低消費電力化が強く
求められています。こうした要求を満たす次世代省電力デ
バイスとして、低消費電力演算機能と不揮発メモリ機能を
併せ持つ次世代の半導体スピントロニクスデバイスの研究
開発が進められています。これまで共同研究グループは、半導体 Ge と高性能スピントロニクス磁性材料
(強磁性ホイスラー合金)を直接接合した低接合抵抗電極構造を用いることで、Ge スピンデバイス構造に
おける高効率な「室温スピン伝導」の観測に成功してきました[NPG Asia Materials 12, 47
(2020)]。しかしながら、多くの半導体デバイスに搭載されている pn 接合を有する構造では、世界中で
これまで誰も「室温スピン伝導」を観測することはできませんでした。

❖ 研究の内容

低消費電力動作が期待されている半導体デバイスとして、トンネル FET (TFET)が知られています。今
回、この TFET の構造と半導体へのスピン注入技術を融合した新構造を提案しました(図 2)。この方式で
はこれまで、III-V 族強磁性半導体を利用した知見が存在していましたが、極低温での研究成果のみが存
在している状況でした(図 1)。今回、共同研究グループがこれまで蓄積してきた IV 族半導体 Ge への高
効率なスピン注入技術と室温スピン伝導観測技術を活用することで、世界で初めて Ge pn 接合における
BTBT 伝導を介した「室温スピン伝導」を観測することに成功しました。本研究成果は、TFET の低消費電
力演算とスピンデバイスの低消費電力不揮発メモリを併せ持つ「スピン TFET」を実現するための要素技
術を室温で実証した重要な成果といえます。

❖ 本研究成果が社会に与える影響(本研究成果の意義)

低消費電力演算と低消費電力不揮発メモリ機能を併せ持つ「スピン TFET」の実現は、大規模データセ
ンターにおける消費電力の増大に歯止めをかける新しいスピントロニクスデバイスとして期待されます。本
研究成果をさらに発展させることで、日本初の革新的な半導体デバイスの実現と、2050 年カーボンニュ
ートラル社会の実現に貢献できると考えています。

❖ 特記事項

本研究成果に関する情報は、米国物理学会の学術論文誌「Physical Review Applied」に Letter として掲載(オンライン:2025年5月23日)されました。

タイトル: Room-temperature spin transport through band-to-band tunneling at semiconductor *pn* junctions

著者名: K. Oki, S. Ueda, T. Usami, S. Fujii, S. Kikuoka, K. Yamamoto, K. Sawano, and K. Hamaya

DOI : <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.23.L051005>

雑誌 : Physical Review Applied (Letter 版)

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 基盤研究(S)(No. 24H00034)、基盤研究(S)(No. 21H05000)、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST (No. JPMJCR23A5)、文部科学省 次世代 X-nics 半導体創生拠点形成事業 (No. JPJ011438)、スピントロニクス学術研究基盤と連携ネットワーク拠点(大阪大学大学院基礎工学研究科スピントロニクス学術連携研究教育センター)の補助を受けて行われました。

❖ 用語説明

※1 *pn* 接合

半導体には、電気伝導を担うキャリアとして電子と正孔の 2 種類が存在する。キャリアとして電子が多い半導体を *n* 型半導体、正孔が多い半導体を *p* 型半導体と呼び、*n* 型半導体と *p* 型半導体を積層した構造は *pn* 接合と呼ばれている。*pn* 接合は、電流を一方向に流す整流性や、電流注入による発光などの特性を持ち、半導体デバイスの基盤技術として広く利用されている。

※2 強磁性ホイスラー合金

ホイスラー合金は構成原子が規則正しく配列した規則合金のことであり、その構成元素や規則性に依存して様々な特性を示す。特に、強磁性ホイスラー合金では完全にスピン偏極した状態の材料が理論的に予想されており、高性能なスピントロニクス材料として注目を集めている。

※3 III-V 族強磁性半導体

半導体と磁性の両方の性質を併せ持つ材料を指す。代表的な強磁性半導体としては、GaAs などの III-V 族半導体に Mn などの不純物元素を添加したものが挙げられる。従来の半導体技術を基盤としつつ、磁性を活用したデバイスへの応用が可能であり、スピントロニクス材料として研究されている。

※4 バンド間トンネル(band-to-band tunneling:BTBT)伝導

半導体の *pn* 接合は、電流を一方向に流す整流性と呼ばれる性質がある。しかし、*pn* 接合の幅を適切に設計することで、量子力学的なトンネル効果が生じ、伝導が制限される方向にもキャリアの伝導が可能となる。この現象をバンド間トンネル(BTBT)伝導と呼ぶ。後述のトンネル FET における急峻なスイッチング特性の実現に重要な役割を果たす。

※5 トンネル FET(TFET)

バンド間トンネル(BTBT)伝導を利用して、急峻な ON/OFF 動作を実現する新型トランジスタのこと。ゲート電圧の印加によって電子のトンネル確率を制御でき、この原理によりデバイスの ON/OFF 動作が

可能となる。従来の MOSFET と比較して低電圧での動作が可能であり、低消費電力動作が期待されている。

【浜屋教授のコメント】

本成果は、いわゆる「流行の最先端」を追った分野の研究成果ではなく、10 年以上前から存在する課題を当研究室の技術で克服したという研究成果です。これは、10 年以上前から地道にコツコツと積み上げてきた科学と技術の融合が、最近になって花を咲かせ始めている結果だと思えます。今回、Physical Review Applied 誌がこのような地道な研究でも Letter (速報)として取り上げてくださいましたことに感謝申し上げます。

❖ SDGs目標**❖ 参考 URL**

浜屋 宏平 教授

大阪大学 研究者総覧 URL

<https://rd.iai.osaka-u.ac.jp/ja/0dd095b8b5e7f0cc.html>

澤野 憲太郎 教授

東京都市大学 研究者情報データベース URL

<https://www.risys.gl.tcu.ac.jp/Main.php?action=profile&type=detail&tchCd=5001636000>

山本 圭介 教授

researchmap URL

<https://researchmap.jp/yamakei?lang=ja>

❖ 本件に関する問い合わせ先

<研究に関するお問い合わせ>

大阪大学 大学院基礎工学研究科 附属スピントロニクス学術連携研究教育センター

教授 浜屋 宏平(ハマヤ コウヘイ)

TEL:06-6850-6330 または 06-6850-6331 FAX:06-6850-6330

E-mail: hamaya.kohei.es@osaka-u.ac.jp

<広報に関するお問い合わせ>

大阪大学 基礎工学研究科 庶務係

TEL:06-6850-6131 FAX:06-6850-6477

E-mail: ki-syomu@office.osaka-u.ac.jp

東京都市大学 総合企画局 企画・広報部 企画・広報課

E-mail: toshidai-pr@tcu.ac.jp

熊本大学 総務部 総務課 広報戦略室

TEL:096-342-3271 FAX:096-342-3110

E-mail: sos-koho@jimuu.kumamoto-u.ac.jp

❖ **発信先 報道機関**

大阪大学から 大阪科学・大学記者クラブ、文部科学記者会、科学記者会

熊本大学から 熊本県内報道機関