

## バンドエンジニアリングを用いて磁性を人工的に制御できる新たな可能性を開拓 ～量子閉じ込め効果を用いた新たな磁化制御～

1. 発表者：宗田 伊理也（研究当時：東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻特任研究員  
／ 現在：東京工業大学工学院 助教）  
大矢 忍（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻・総合研究機構 准教授）  
田中 雅明（東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 教授  
スピントロニクス連携研究教育センター センター長）

### 2. 発表のポイント：

- ◆強磁性の量子井戸薄膜の膜厚を変えて正孔の量子閉じ込め効果の強さを変えることにより、磁化の向きやすい方向（磁化容易軸）を人工的に制御できる新たな可能性を示した。
- ◆電子や正孔の量子閉じ込めの強さの変化によって磁化容易軸が変化することは、理論的にも予測されていなかった。本研究の実験で初めて明らかとなった。
- ◆将来のスピントロニクスを用いたデバイスにおいて、低い消費電力で磁化を制御できる新たな方式の実現につながる。

### 3. 発表概要：

電子デバイスのさらなる低消費電力化は、IoT/IoE 社会を実現する上で必要不可欠となっています。電子の電荷とともにスピンを用いる「スピントロニクス」は、新しい原理の電子材料、デバイスや情報機器をつくりその消費電力を削減する技術を創出することが可能な分野として期待されています。

スピントロニクスを用いたデバイスにおける最も大きな問題のひとつは、磁化を反転させる時に大きな消費電力を必要とすることです。強磁性材料内の磁化の向きやすい方向（磁化容易軸）を人工的に制御することができれば、この消費電力を大幅に低減できることが期待されます。

本研究で、東京大学大学院工学系研究科の宗田伊理也特任研究員（当時）、大矢忍准教授、田中雅明教授らのグループは、バンドエンジニアリング（注 1）の概念を用いて強磁性材料の磁化容易軸を人工的に制御する新しいコンセプトを提唱し、それが実現可能であることを実験的に実証しました。

半導体でありながら強磁性を示す強磁性半導体というユニークな材料を、ナノメートル程度の非常に薄い量子井戸（注 2）層として用いて、この量子井戸層の膜厚が異なり量子閉じ込めの強さが異なる様々なトンネルダイオード素子（注 3）を作製しました。磁化を様々な方位に向けた状態でバイアス電圧（注 4）を変えてトンネル電流（注 5）を測定しました。量子閉じ込め効果の強さとバイアス電圧によって、磁化容易軸の方向（厳密には状態密度の磁化方位依存性）が大きく変化することを初めて見い出しました。

本研究は、半導体で培われてきたバンドエンジニアリングの概念を強磁性体に応用した非常にユニークな例であり、将来、新しい磁性の制御方法の実現と電子デバイスの低消費電力化につながることを期待されます。

#### 4. 発表内容：

##### <研究の背景・先行研究における問題点>

将来の不揮発性高速デバイスとして期待されているスピントロニクス技術を用いた不揮発性メモリ、スピントランジスタ、不揮発性ロジックデバイス等において、強磁性体の磁化反転に必要なエネルギーを低減することが大きな課題となっています。磁化の向きやすい方向（磁化容易軸）を人工的に制御できれば、消費電力の大幅な低減につながることを期待されます。しかし、磁化容易軸は基本的には材料固有のものであり、人工的に制御することは困難でした。最近の研究により、電界を加えて電子のエネルギーを変化させることにより、磁化容易軸がわずかに変わることが分かっていますが、その変化の仕方は理論的には予測できず、またそれを人工的に制御することは出来ませんでした。一方、現在の高速な情報処理技術を支えている半導体電子デバイスにおいては、電界効果や量子閉じ込め効果によって電流を担うキャリア（電子や正孔）（注 6）の動きを制御するバンドエンジニアリングという概念を用いて、デバイスの電気的特性の設計がなされています。この概念は、現在用いられている半導体材料および半導体多層構造の電子構造を設計する基礎的な技術となっています。しかし、この技術は主に半導体デバイスに対して確立されてきたものであり、強磁性体の磁気的特性の設計には利用されていませんでした。

##### <研究内容>

本研究では、半導体でありながら強磁性を示す非常にユニークな強磁性半導体 GaMnAs という材料を用いて、膜厚が異なり正孔の閉じ込めの強さが異なる GaMnAs 量子井戸を有する様々なトンネルダイオードを作製しました。磁化の方向と印加電圧を系統的に変えながらトンネル電流を測定し、キャリア（正孔）のエネルギー（電圧）に依存して、磁化容易軸が大きく変わることが初めて発見しました。さらに、量子閉じ込め効果の強さを変えることにより、磁化容易軸の方向を制御できることを発見しました。量子井戸の膜厚が厚く量子閉じ込め効果が弱い場合には、磁化容易軸は面内二回対称性を示します [図 1(a)]。量子井戸の膜厚を薄くし量子閉じ込め効果が強まると、量子準位が形成され、それにより 4 回対称性が強まり支配的になることが分かりました [図 1(b)(c)]。この結果は、量子井戸構造の設計により量子閉じ込め効果の強さを変化させることで、磁化容易軸を人工的に制御できることを意味しています。

##### <社会的意義・今後の予定など>

本研究で明らかになった磁化容易軸の制御手法と電界効果を組み合わせることにより、より低い消費電力で磁化を操作できる新たな可能性が生まれると期待されます。このようなバンドエンジニアリングによる磁性の制御は、まだほとんど研究が行われていない未開拓の分野であり、今後、さらに新たな展開が期待されます。

#### 5. 発表雑誌：

雑誌名：Nature Communications (5月22日オンライン版)

論文タイトル：Artificial control of the bias-voltage dependence of tunnelling-anisotropic magnetoresistance using quantization in a single-crystal ferromagnet

著者：Iriya Muneta\*, Toshiki Kanaki, Shinobu Ohya\*, and Masaaki Tanaka\*

DOI 番号：DOI: 10.1038/ncomms15387

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/ncomms15387>

## 6. 問い合わせ先：

東京大学大学院工学系研究科  
教授 田中 雅明 (たなか まさあき)

東京工業大学工学院  
助教 宗田伊理也 (むねた いりや)

東京大学大学院工学系研究科  
准教授 大矢 忍 (おおや しのぶ)

## 7. 用語解説：

(注1) バンドエンジニアリング： 物質中の電子の状態（電子のエネルギーと波数の関係や状態密度）を表すものをバンド構造（エネルギー帯構造）という。バンド構造が物質の基本的性質を決定する。様々な物質設計、混晶やヘテロ構造、量子井戸を含むナノ構造を作製することにより、バンド構造を制御し、その物質の性質を制御することをバンドエンジニアリングと呼ぶ。

(注2) 量子井戸： 薄膜において、その膜厚を電子のドブロイ波長程度（ナノメートルスケール）にまで薄くすると、薄膜中の電子や正孔の波動関数が閉じ込められて定在波となりエネルギーが離散的になる。これを量子サイズ効果という。この量子サイズ効果を起こす薄膜構造を量子井戸構造という。

(注3) トンネルダイオード素子： 電子や正孔などのキャリアが物質中を伝搬する際に、キャリアのもつエネルギーより高いポテンシャル障壁があると障壁を通り抜けることができず反射が起こる。しかし、障壁が数ナノメートル程度以下と十分薄い場合には、量子力学的なトンネル効果が起こり、キャリアはある程度障壁を通り抜けることができ、トンネル電流が流れる（トンネル効果）。そのようなトンネル障壁をもつ素子をトンネルダイオードという。

(注4) バイアス電圧： 電子デバイスにおいては、電極に電圧をかけて動作させる。この電圧をバイアス電圧という。

(注5) トンネル電流： トンネルダイオードのように薄い障壁に電流を流した時に、一部の電流がトンネル効果によって流れる。これをトンネル電流という。

(注6) キャリア： 固体中で電荷の流れを担うもの。電荷の流れ（電流）に寄与する伝導電子、正孔（ホール）、伝導イオンなどの総称。電子が抜けた穴が正孔で、正の電荷をもつ粒子のようふるまう。n型半導体では電子、p型半導体では正孔が電流を担っている。

8. 添付資料 :

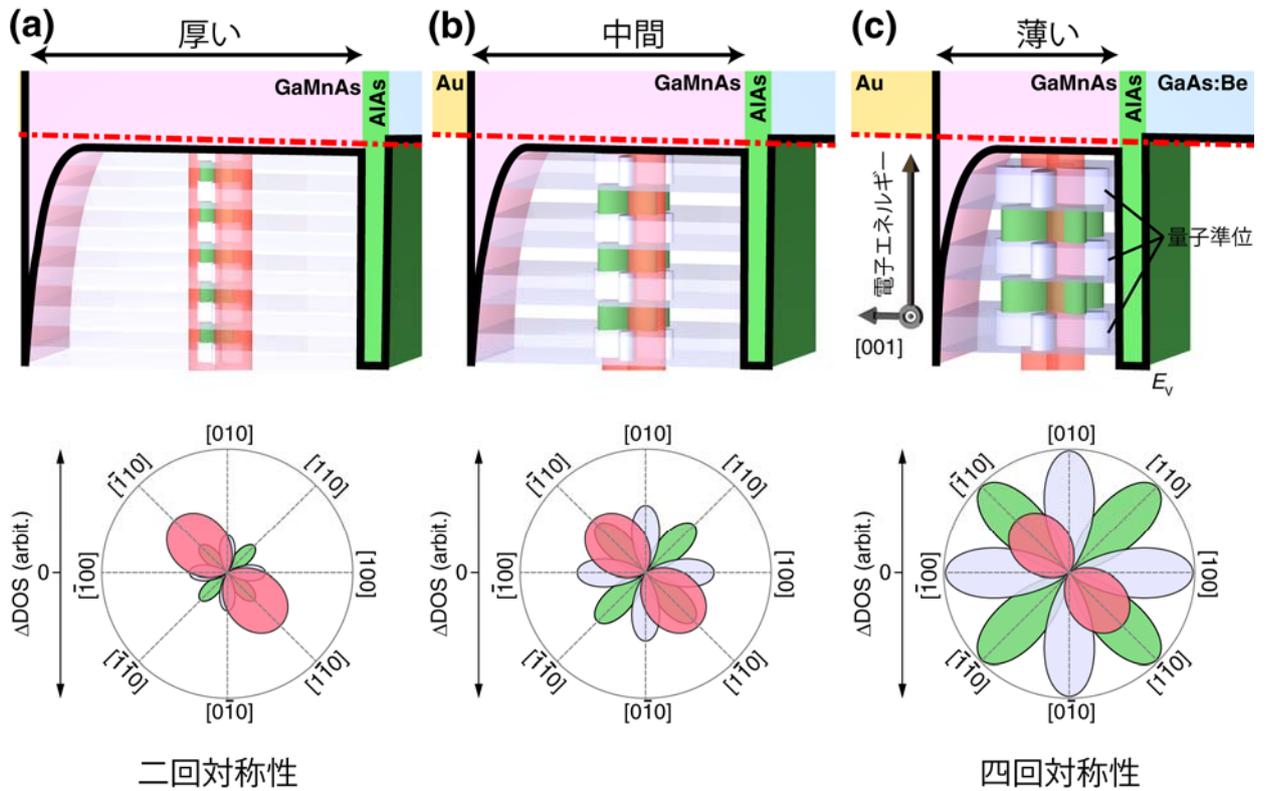


図 1 :

(a) 量子井戸の膜厚が厚い場合、量子閉じ込め効果が弱く、二回対称性が強い。(下図の赤い領域)  
 (b) (c) 量子井戸の膜厚を薄くすると、量子閉じ込め効果が強まり、量子準位の形成とともに 4 回対称性が強まる。(下図の緑と白の領域)