

磁石のNSの向きを世界最小の電流密度で反転させることに成功
～強磁性半導体単層薄膜における超高効率スピン軌道トルク磁化反転～

1. 発表者：

- Miao Jiang (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)
浅原 弘勝 (東京大学 大学院工学系研究科電気系工学専攻 博士課程学生)
佐藤 彰一 (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)
大矢 忍 (東京大学 大学院工学系研究科附属総合研究機構／電気系工学専攻／附属スピントロニクス学術連携研究教育センター 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／附属スピントロニクス学術連携研究教育センター 教授)

2. 発表のポイント：

- ◆強磁性半導体の単層薄膜を用いて、電流を流すことによって生じるスピン軌道トルクという力を利用して、世界最小の電流密度 4.6×10^4 A/cm² で磁化反転に成功しました。これは広く行われている金属多層膜におけるスピン軌道トルクによる磁化反転で必要とされる電流密度 (約 10^7 A/cm²) よりも3桁程度小さな値です。
- ◆従来の金属多層膜におけるスピン軌道トルクによる磁化反転の研究とは異なり、強磁性半導体の単層薄膜に電流を流すだけで、磁化が 180° 反転します。結晶軸に対する電流の方向と薄膜の膜厚を最適化することにより、磁化反転を阻害しているトルク成分を抑制できることが明らかとなり、それにより磁化反転電流密度を大幅に低減できました。
- ◆本研究の成果は、磁化反転に必要な電力を低減できる新たな材料開拓や素子構造探索の契機となることが期待されます。

3. 発表概要：

東京大学大学院工学系研究科の Jiang Miao (姜淼) 特任研究員、大矢忍 准教授、田中雅明 教授のグループは、強磁性半導体 GaMnAs の単一薄膜を用いて、電流を流すことにより生じる「スピン軌道トルク」という力を利用して、世界最小の電流密度 4.6×10^4 A/cm² で磁化反転に成功しました。

現在、強磁性体の電子のスピン自由度 (注1) を用いて新たな省エネルギーデバイスを実現する試みが盛んに行われています。「スピン軌道トルク」を利用した磁化反転方式は、これらのデバイスにおける次世代のデータの書き込み方式として有望視されています。しかし、従来の研究では、 10^7 A/cm² 程度の大きな電流密度が磁化反転に必要であり、それが問題となっていました。スピン軌道トルクには、磁化の向きに対して、働く方向の異なる2種類の力が存在していることが知られています。そのうちの片方の成分が磁化反転を阻害する方向に働きます。今回、研究グループは、GaMnAs の薄膜内において Mn 濃度の不均一さに起因して電流が不均一に流れており、GaMnAs の膜厚を変えることにより電流により生じる磁場の空間分布が変化することに着目しました。GaMnAs 薄膜結晶の面内 [110] 方向に電流を流し、さらに膜厚を最適化することにより、電流で生じる磁場によって磁化反転を阻害するトルク成分を抑制し、極微小電流密度での磁化反転に成功しました。本研究の成果により、低電力での磁化反転が可能な新たな強磁性材料開拓や素子構造探索が加速することが期待されます。

4. 発表内容：

① 背景

近年、情報量の増加に伴い、より高度で高速な情報処理技術が必要とされるようになってきました。それに伴い、トランジスタなどの半導体デバイスの需要が飛躍的に増大しています。トランジスタは、パソコン、スマートフォン、家電、自動車など、日常生活の至るところに利用されているだけでなく、近年は、モノのインターネット化(IoT)や人工知能(AI)技術の実現において欠かすことのできない存在となっています。このような変化に伴い、情報処理に必要な消費エネルギーが劇的に増大しています。今後、持続可能な社会を実現していくためには、トランジスタの消費電力を低減することが極めて重要です。現在のトランジスタにおいては、電源を切るとデータが失われてしまうこと（揮発性）が大きな問題です。情報を維持するためだけに、常に電力を供給し続ける必要があります。一方で、近年、電子のもつスピン自由度（注1）を利用して、現在のトランジスタに長期記憶の機能（不揮発性）を持たせる研究が進んでいます。このような技術を用いて新たなデバイスが実現できれば、大幅な消費電力の削減が可能となります。実際に、磁石の磁化の向きを電子のスピンを用いて読み書きする不揮発性の磁気抵抗メモリデバイスが商用化されつつあり、情報を磁化の向きとして蓄えて高速に読み取ることができるようになってきました。これにより、電力を使わずにデータを保持できるようになってきています。

一方で、これらの不揮発性磁気デバイスの大きな問題点は、磁化の向きを変えるために大きな電力が必要であることです。現在、磁石となる金属材料に非磁性の金属を接合させた二層構造に電流を流すことによって生じる「スピン軌道トルク」という力を利用した磁化反転の方法が、次世代の磁化反転技術として期待されています。この方式では、スピン軌道相互作用（注2）という相対論的量子効果の大きな非磁性金属を、強磁性金属層にきれいに接合する必要があります。しかし、金属多層膜において磁化反転を起こすには 10^7 A/cm² 程度の大きな電流密度が必要で、消費電力が大きいことが最大の課題となっていました。スピン軌道トルクには「アンチダンピングトルク」と「フィールドライクトルク」という2種類の成分（図）が存在することが分かっていたのですが、このうち、「フィールドライクトルク」が磁化反転を阻害する方向に働くことが分かっており、この成分を低減することが課題でした。

② 研究内容

研究グループは、以前の研究で、半導体ガリウム砒素にマンガン原子を数%加えた強磁性半導体 GaMnAs からなる垂直方向に磁化した材料を用いることにより、その単層の極薄膜に電流を流すだけで、スピン軌道トルクにより、磁化の向きが反転することを発見していました。この結果から、この材料そのものに、磁石としての性質とともに大きなスピン軌道相互作用が存在していることが分かっていました。今回、研究グループは、GaMnAs の薄膜においては、スピン軌道相互作用の性質から [110] 方向に電流を流すことがスピン軌道トルクを用いた磁化反転に有効であること、さらに、Mn 濃度の不均一性に起因して電流分布が不均一になっており、GaMnAs の膜厚を変えることにより電流により生じる磁場の空間分布が変わることに着目しました。磁化反転の妨げとなりうるフィールドライクトルク成分を、電流によって生じる磁場により最適化できるように GaMnAs の膜厚を調整した結果、世界最小の電流密度である 4.6×10^4 A/cm² の微小電流密度で 180° の磁化反転を実現することができました。

③ 社会的意義・今後の予定

本研究により、物質の内部に大きなスピン軌道相互作用が存在し、かつ電流が不均一に流れる磁石物質を用いて、その膜厚を制御することにより、磁化反転の妨げとなりうるフィールドライクトルクを大幅に抑制できることが明らかになりました。今回の研究は40 K程度の低温で行われていますが、それは、研究グループが用いた材料の強磁性転移温度（注3）が室温以下であることが理由であり、本質的な問題ではないと考えられます。室温で強磁性を示し、その内部に大きなスピン軌道相互作用が存在し、電流が不均一に流れる物質が存在すれば、同様の効果が室温で得られることが期待されます。本研究により、今後、より低電力で磁化反転できる新たな材料開発および素子開発が加速していくことが期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：*Nature Electronics*

論文タイトル：Suppression of the field-like torque for efficient magnetization switching in a spin-orbit ferromagnet

著者：M. Jiang, H. Asahara, S. Sato, S. Ohya, and M. Tanaka

DOI 番号：10.1038/s41928-020-00500-w

アブストラクト URL：<https://www.nature.com/articles/s41928-020-00500-w>

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科

附属総合研究機構／電気系工学専攻／附属スピントロニクス学術連携研究教育センター
准教授 大矢 忍（おおや しのぶ）

東京大学 大学院工学系研究科

附属スピントロニクス学術連携研究教育センター センター長／電気系工学専攻
教授 田中 雅明（たなか まさあき）

7. 用語解説：

（注1）スピン自由度：電子の磁石としての向きの自由度。スピンは古典的には電子の自転により生じる角運動量と考えることが可能である。磁石の磁力の主な起源となっている。

（注2）スピン軌道相互作用：電子の進む方向に対して、スピンの向きやすい方向が決まる物質の性質。物質や多層膜の構造の非対称性や、原子の質量によりその強さが変わることが知られている。

（注3）強磁性転移温度：物質が磁石となる限界の温度。物質によって異なる。

8. 添付資料：

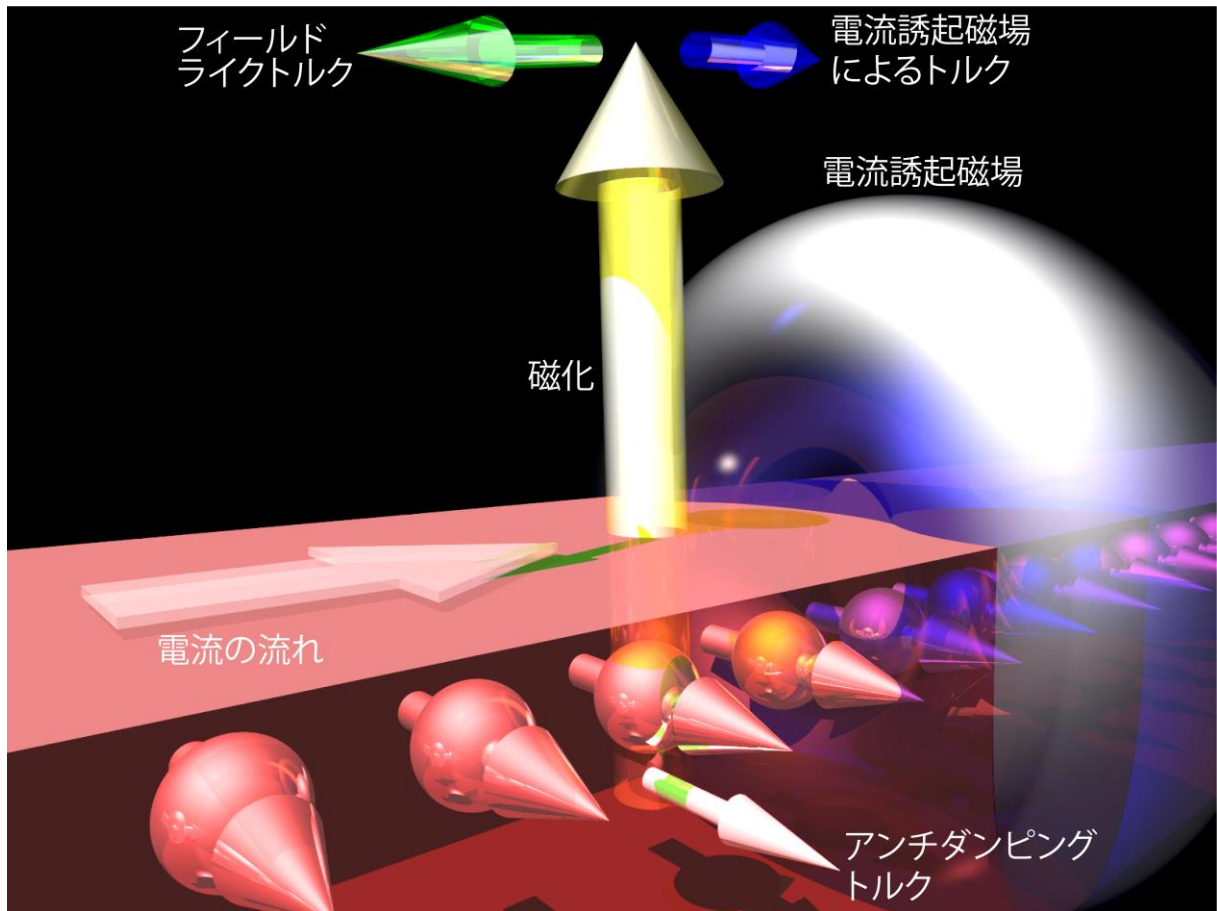


図 垂直方向に磁化した強磁性半導体 GaMnAs の単層の薄膜に極低電流密度の電流を流した際の磁化の様子。Mn の不均一分布に起因して、電流は薄膜の表面近くの方が流れやすい。スピン軌道相互作用により、流した電流（キャリア）のスピンは手前側を向いている。磁化反転過程に寄与するスピン軌道トルク（アンチダンピングトルク、フィールドライクトルク）のうち、フィールドライクトルクを電流誘起の磁場によって低減することにより、高効率の磁化反転を実現した。