

電流を流すと N 極と S 極が反転する磁石を実現 ～強磁性半導体単層極薄膜における低電流密度磁化反転現象～

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 博士課程2年生)
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3年生)
佐藤 彰一 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 博士研究員)
金木 俊樹 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 博士課程3年生：研究当時)
山崎 浩樹 (東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻 修士課程2年生：研究当時)
大矢 忍 (東京大学大学院工学系研究科総合研究機構／電気系工学専攻 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)

2. 発表のポイント：

- ◆強磁性半導体を用いることにより、強磁性の単一の極薄膜に小さな電流を流すだけで N 極と S 極（磁化の向き）が反転する現象を発見しました。
- ◆磁化反転に必要な電流密度は $3.4 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 程度で、この値は磁化反転の研究で一般的に用いられている強磁性金属薄膜と非磁性金属薄膜からなる二層構造で必要とされる典型的な電流密度（約 10^7 A/cm^2 ）よりも 2桁程度小さな値です。
- ◆本研究は、磁化反転に必要な電流を低減できる新たな材料探索のきっかけ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) 大学院生（博士課程2年）、大矢忍 准教授、田中雅明 教授のグループは、小さな電流を流すだけで N 極と S 極（磁化の向き）が反転する磁石を実現しました。研究グループが作製したのは、ガリウム砒素(GaAs)という半導体にマンガン原子を数%ドーピングした強磁性半導体 GaMnAs という物質からなる膜厚 7 nm の極薄膜です。この薄膜に電流を流すだけで、しかも $3.4 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ という非常に小さな電流密度で磁化が反転することが分かりました。

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。通常、磁化反転には、電子のスピンを磁化に受け渡す方法や、強磁性金属薄膜と非磁性金属薄膜を接合させた2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方法などが用いられています。しかし、これらの方法では、一般的には 10^7 Acm^{-2} 程度の大きな電流が必要です。

強磁性半導体 GaMnAs には、物質内に相対論的量子効果であるスピン軌道相互作用が存在しており、それにより、低電流密度での磁化反転が起こっているものと考えられます。本成果により、低電力での磁化反転が可能な新たな強磁性材料探索が加速することが期待されます。

4. 発表内容：

近年、IoT や人工知能の重要性が増すにつれ、より高度な情報処理技術がますます必要とされています。特に、情報処理に必要なエネルギーを低減することは極めて重要な課題です。その中でも特に、パソコンはもとより、スマートフォンや家電、自動車など日常生活の至るところに利用されている「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

ランジスタは、電源を切るとデータが失われてしまうことが大きな問題で、そのため、情報を維持するためだけに、常に大量の電力が消費されています。一方で、電子のもつスピン自由度を利用して、現在のトランジスタに長期記憶の機能を持たせる研究が進んでおり、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、大幅な電力の削減が可能になると期待されています。特に最近では、磁石の磁化の向きを電子のスピンを用いて読み取ることができるようになってきています。この技術を用いることにより、情報を磁化の向きとして蓄えて高速に読み取ることが可能となり、電力を使わずにデータを保持できるようになります。一方で、磁化の向きを変えるには、大きな電力が必要であり、この電力を低減することがこのような技術を実用化する上での、大きな課題となっています。現在、スピン輸送トルクという電子のスピンを磁化に受け渡す手法や、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実用的だと考えられています。金属の二層構造を用いる方法の場合は、スピン軌道相互作用という相対論的量子効果が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、これらの方法では、 10^7 Acm^{-2} 程度の大きな電流が必要で、この電流を減らすことが大きな課題となっていました。

① 研究内容

今回研究グループは、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** という材料の垂直方向に磁化した単層の極薄膜に、 $3.4 \times 10^5 \text{ Acm}^{-2}$ の小さな電流密度の電流を流すだけで、磁化の向きが反転することを初めて発見しました（図1）。この物質には、磁石としての性質（強磁性）とともに、物質内部に比較的大きなスピン軌道相互作用が存在することが分かっており、それが低電流密度での磁化反転を可能にしていると推測されます。また、この物質は、分子線エピタキシー法という原子レベルで平坦な薄膜を形成する手法で作られた高品質な単結晶できており、電流が流れる際にスピンの散乱が少ないことも、今回の低い電流密度での磁化反転の実現につながっているものと考えられます。さらに、スピン軌道相互作用を十分に活かすためには物質の電子構造も重要で、大きな波数（注2）をもつ電子（または正孔（注3））が伝導に寄与している必要があることが分かりました。**GaMnAs**では、不純物バンドと呼ばれる波数の大きな正孔が集まるエネルギー帯を電流が流れることが分かっており、それが効率的な電流誘起磁化反転を引き起こしている要因となっていると考えられます。

② 社会的意義・今後の予定

本研究により、磁石となる物質の内部に大きなスピン軌道相互作用が存在すれば、電流により磁化を反転できる可能性があることが分かりました。この場合、単層膜に単純に電流を流せば良く、従来のように二層構造を精密に制御して作製する必要がありません。従って、デバイス構造がより単純になります。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4）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と大きな波数（運動量）を持つ電子が存在すれば、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 Communications*

論文タイトル: Efficient full spin-orbit torque switching in a single layer of a perpendicularly magnetized single-crystalline ferromagnet

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

DOI 番号：<http://www.nature.com/ncomms>

アブストラクト URL：10.1038/s41467-019-10553-x

6. 問い合わせ先：

東京大学 大学院工学系研究科

総合研究機構、電気系工学専攻、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

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) 波数：長さ 2π あたりの波の数。波長の逆数および結晶中の電子や正孔の運動量に比例する。

(注3) 正孔：半導体において、電子で満たされているべき状態に電子がない状態。正孔はあたかも正の電荷をもった粒子として振る舞う。P型半導体ではおもに正孔が電流を運ぶ。

(注4) 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：

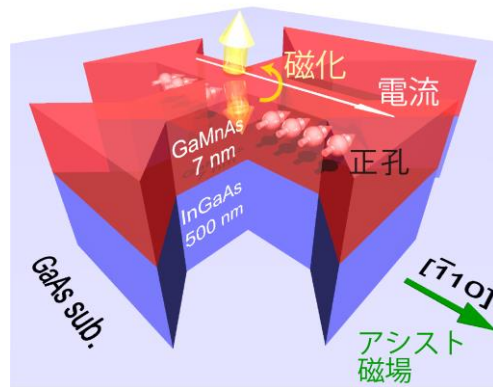


図1 強磁性半導体 GaMnAs の極薄膜に電流を流すことにより、スピン軌道相互作用により、正孔が面内方向のスピン成分をもつ。これがトルクとして磁化に働き、磁化が反転する。なお、InGaAs 層は絶縁層であり、この層には電流は流れない。InGaAs 層は、GaMnAs 層に歪を与え垂直磁化を実現するために用いられている。実験では、磁化がわずかに傾くよう弱いアシスト磁場を印加している。