

半導体の基礎物理学における新たな発見
～半導体中に磁性をもつ原子を加えて強磁性にすることにより、伝搬する電子の散乱が抑えられ秩序が回復する特異な現象を初めて観測～

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：

- ◆磁性不純物マンガン（Mn）を半導体ガリウムヒ素中に添加してその濃度を増加させた際に、半導体の強磁性転移に伴い電流を担うキャリア（正孔）の散乱が抑えられコヒーレンスが增大する特異な現象を観測した（図1）。
- ◆通常の半導体では、添加した不純物の濃度の増加に従い電子や正孔の散乱が強くなりコヒーレンスが低下すると理解されてきたが、本研究ではこの半導体物理学の常識とは全く逆の現象を発見した。
- ◆本研究の結果は、電子や正孔の散乱が強く高速動作が難しいとされてきた磁性不純物を含む半導体を用いて、高速で動作する量子スピントロニクスデバイスを実現できる新たな可能性を示している。

3. 発表概要：

半導体デバイスにおいて、電流の担い手であるキャリア（電子または正孔、注1）の波（波動関数）の乱れを抑えることは、デバイスの特性を向上させる上で極めて重要な課題です。半導体では、素子に電流を流すために、不純物を添加して抵抗を下げる方法が広く用いられていますが、不純物濃度の増加に伴い半導体中の電子や正孔の波動関数は強く乱され、デバイスの特性は劣化します。これは、半導体では古くから知られている大きな問題で、固体物理学や半導体物理学の常識でした。今回、東京大学大学院工学系研究科の宗田伊理也特任研究員、大矢忍准教授、田中雅明教授らの研究グループは、半導体ガリウム砒素（GaAs）に磁性不純物マンガン（Mn）を添加して、共鳴トンネル分光法（注2）という手法を用いて、キャリアの波動関数がどの程度乱されるかを詳細に調べました。その結果、Mn濃度が0.9%よりも低いときは、予想通りMn濃度の増大に伴い単調に波動関数の乱れが大きくなるのに対して、Mn濃度が0.9%に達し強磁性転移が起こると、波動関数の乱れが突如として強く抑制され、正孔のコヒーレンス（注3）が増大することが明らかになりました（図1）。この特異な現象は、将来、高速で動作する量子スピントロニクスデバイスの実現につながるものと期待されます。

4. 発表内容：

<研究の背景>

半導体デバイスにおいて、電子または正孔の波（波動関数）の乱れを抑えることは、デバイスの特性を向上させる上で極めて重要な課題となっています。波の乱れ具合は移動度という物理量でも表現されており、移動度を向上させることが高性能デバイスを実現する上での重要な課題となっています。通常、半導体に電流を流すために、不純物を添加して抵抗を下げることが広く用いられていますが、不純物濃度の増加に伴い半導体中の電子や正孔は散乱を受けやすくなるため、移動度は低下し、波動関数もこれに伴い強く乱されるようになります。そのため、これまで高い移動度を得るために、変調ドーピング法（注4）や、結晶の歪みを利用する方法が広く用いられてきました。しかし、これらの多くの試みは、不純物を添加すると波動関数が乱れるという半導体の基礎物理の理解に基づくものでした。波動関数の乱れを防ぎながら不純物を添加することが困難であることは、半導体では古くから知られている根本的な問題でした。

<研究内容>

本研究では、半導体 GaAs に磁性不純物であるマンガン原子 Mn を添加して、電流を担うキャリアである正孔の波動関数がどの程度乱されるかを調べました。GaAs は、Mn 濃度が 0.9% 以上になると低温で強磁性転移を起こす（半導体が磁石のような強磁性を示す）ことが知られています。本研究では、Mn を添加した GaAs に 20~300 meV 程度のエネルギーを持つ正孔を注入して、共鳴トンネル分光法という手法を用いて測定を行いました。その結果、Mn 濃度が 0.9% よりも低いときは、予想通り Mn 濃度の増大に伴い単調に波動関数の乱れは大きくなることが分かりました。しかし、Mn 濃度が 0.9% に達し強磁性転移が起こると、波動関数の乱れが突如として強く抑制され正孔のコヒーレンスが增大することが分かりました（図1）。高い Mn 濃度の領域で観測されたこの振る舞いは、従来の固体物理学から予測される通常の半導体で起きる現象とはまったく逆の予想外の現象でした。この現象の起源はまだ完全には解明されていませんが、強磁性転移に伴いスピンの向きが揃うことにより生じた、強い交換相互作用を介して引き起こされる特異な現象であると考えられます。

<社会的意義・今後の予定など>

本研究グループが発見したこの現象は、不純物添加と相転移を利用した波動関数の制御をする新しい方法につながることで期待されます。さらに、将来の高速で動作する量子スピントロニクスデバイスの実現につながるものと期待されます。

5. 発表雑誌：

雑誌名：「Nature Communications」

論文タイトル：Sudden restoration of the band ordering associated with the ferromagnetic phase transition in a semiconductor

著者：Iriya Muneta*, Shinobu Ohya*, Hiroshi Terada, and Masaaki Tanaka*

DOI 番号：DOI: 10.1038/ncomms12013

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

東京大学大学院工学系研究科

准教授 大矢 忍

7. 用語解説：

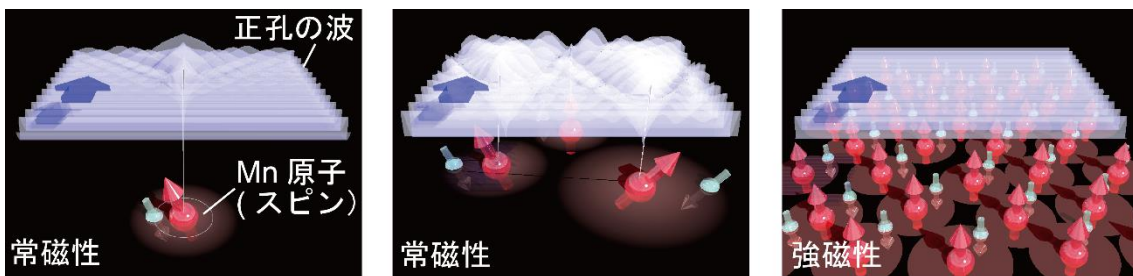
(注1) キャリア：固体中で電荷の流れを担うもの。電荷の流れ（電流）に寄与する伝導電子、正孔（ホール）、伝導イオンなどの総称。電子が抜けた穴が正孔で、正の電荷をもつ粒子のようにふるまう。

(注2) 共鳴トンネル分光法：数 nm 程度の二層の絶縁層（ポテンシャル障壁）で挟まれた数 nm~数十 nm の薄い領域（量子井戸）では、電子（または正孔）の波としての性質が顕著にあらわる。電子波（波動関数）は定在波となるため、そのエネルギーは離散化（量子化）され、共鳴準位が形成される。このような構造に電圧を印加すると、電極の電子のエネルギーと共鳴準位が一致したところでのみ大きな電流が流れる。この現象を共鳴トンネル効果という。この共鳴トンネル効果を利用して、バイアス電圧を変えながらトンネル電流を精密に測定し、そのデータを解析することにより、二層のポテンシャル障壁で挟まれた量子井戸層の電子状態（状態密度、バンド構造、キャリアのコヒーレンスなど）を測定することができる。この手法を共鳴トンネル分光法という。本研究では、量子井戸層に Mn を添加した GaAs を用いてその電子状態やキャリアのコヒーレンスを明らかにした。

(注3) コヒーレンス：波の持つ性質の一つで、干渉のしやすさを表す指標。ここでは半導体中のキャリア（正孔）の波が乱されるまでにどれくらい伝搬できるかを表す。コヒーレンスが長いほど波としての性質を使いやすく、量子スピントロニクスデバイス実現可能性が高まる。

(注4) 変調ドーピング法：半導体の積層構造に不純物を添加した場所から離れたところに電子や正孔を生じさせる手法。高移動度トランジスタなどに応用されている。

8. 添付資料：



(a) Mn 濃度が薄いとき (b) Mn 濃度が 0.9% 未満のとき (c) Mn 濃度が 0.9% 以上のとき

(図 1)

- (a) 半導体(GaAs)に添加された磁性不純物マンガン(Mn)の濃度が 0.9%より小さいときは、電流の担い手である正孔の波（波動関数）は Mn 原子によって乱されます。
- (b) Mn 濃度の増加によって正孔の波の乱れはより大きくなります。
- (c) Mn 濃度が 0.9%以上になり半導体が強磁性への相転移を起こすと、現在の固体物理学における一般的な理解とは逆に、正孔の波の散乱が強く抑えられて、波のコヒーレンスが増大し、秩序が回復することが分かりました。