

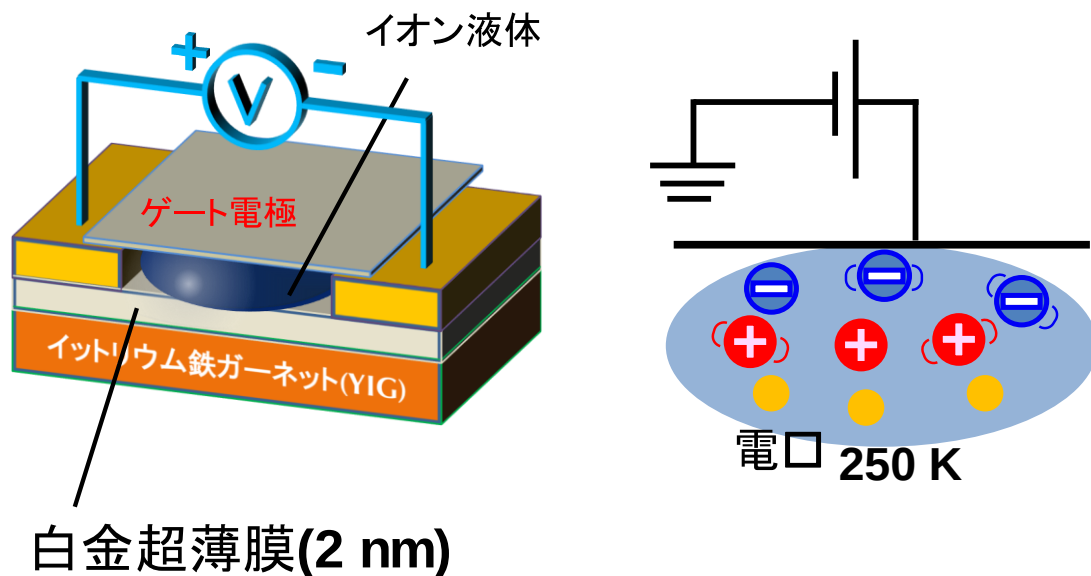
金属が半導体に化ける可能性

—超薄膜の白金がトランジスタ特性を発揮することを発見—

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻 白石誠司教授、セルゲイ・ドゥシェンコ同博士研究員（研究当時、現：米国標準化研究所及びメリーランド大学研究員）、外園将也同修士課程学生らは三重大学大学院工学研究科物理工学専攻 中村浩次准教授と共同で、金属である白金を極めて薄い膜（超薄膜）にしたとき、シリコンなどの半導体で実現されるトランジスタ特性（材料の抵抗を外部電圧で制御する特性）が現れること、更にそれに伴って白金がスピンを電流に変換する「スピン軌道相互作用」という機能を大幅に変調・制御ができることを初めて発見しました。これは従来の「金属材料を使ってトランジスタを作ることはいくつかできない」という理解と「スピン軌道相互作用は材料固有である」という固体物理学における理解を共に覆す発見であり、特にエレクトロニクスやスピントロニクス分野の新しい発展に繋がる成果です。

本成果は、2018 年 8 月 7 日に英国の国際学術誌「Nature Communications」にオンライン掲載されます。



今回の研究で用いた素子の構造図と実験の概念図：

白金の極めて薄い膜（超薄膜：厚さ 2 ナノメートル）をイットリウム鉄ガーネット（YIG）基板の上に作成し、そこにイオン液体を用いたゲート電極を搭載し強い電圧をかけると、白金に電子が多数注入されるため、白金の電気抵抗が変化する。

1. 背景

中世に錬金術がヨーロッパを席卷したように、人類はある元素になにか工夫を加えることで別の元素に（多くの場合は価値の高い金のような元素に）変換することを目指してきました。もちろん錬金術はエセ科学であることはすでに広く理解されていますが、現代の材料科学や固体物理、また化学はある意味では錬金術的スピリット（のよい部分を）を継承して発展してきたといえます。すなわち、様々な元素をうまく組み合わせることでこれまではない新しい、価値のある、多くの場合は役に立つ性質を持つ新材料を開発し、その基礎物性を理解しようとする試みがこれらの分野に共通するスピリットなのです。

固体材料には極めて多くの種類が存在します。そのために、何らかの視点でこれらの材料を分類・区別すること（たいていは共通の性質を見出して）が求められます。よく知られた区別が金属と半導体という区別です。金属とは一般に電流をよく流す（＝抵抗が低い）ことができますが、半導体は何も工夫を凝らさなければ絶縁体という電流を流さない（＝抵抗が高い）材料です。そんな半導体に不純物を添加することで電流を流せるようにし、さらにゲート電圧をかけることで電流量＝抵抗を制御できるような素子を作製したことが、今日の情報社会の隆盛をもたらしました。この発明は 1948 年に Bardeen らによって達成され、これが今言うトランジスタです。

トランジスタの動作原理は単純で、半導体（現在はシリコンが一般に用いられる）中のキャリアと呼ばれる電子ないし正孔の数が比較的少ないため、そこにゲート電圧によってキャリアを誘起することで抵抗の大きさを制御し、それによって情報のオンとオフを操作します。ここで重要なことは、金属は一般にキャリアの数が非常に多いため、ゲート電圧によってキャリアを誘起しても抵抗を変えることは困難なことです。例えて言えば、海にコップ一杯の水を加えても水の総量が増えたようには見えない（金属の場合）が、小さなバケツにコップ一杯の水を加えると明らかに水の総量は増えることがわかる（半導体の場合）、ということになります。つまり、金属を使ってトランジスタのように情報のオンとオフを操作することは不可能だ、とこれまでは信じられてきました。

ところで、近年のイオン液体を用いた強電界ゲート電圧の活用は、例えば強磁性体と呼ばれる磁石の性質を変化させたり、新しい超伝導体の発見をもたらしたりするなど、新しい物理を開拓する強力なツールとなっています。このイオン液体による強電界の生成は、上の例でいえばコップの大きさを大きくできることに繋がります。つまり、たとえ金属材料であっても、そのキャリアの数を相当に減らすことが何らかの方法ででき、かつイオン液体による強電界ゲート電圧によって多くのキャリアを金属に誘起することができれば、金属の抵抗を変えることができ、まるで半導体のように振る舞うことができるのではないかと考えました。更にもし抵抗を変えられるなら、抵抗の本質はキャリアである電子の移動のしやすさなので、キャリアである電子の持つスピンの移動のしやすさも変えられるはずである、という発想に到達し、今回の研究を開始しました。

2. 研究手法・成果

今回実験に用いたのは白金(Pt)という重い金属です。Ptはこのままでは電流をよく流すため、今回の研究では 2 ナノメートルという極めて薄い膜（超薄膜）を、磁性絶縁体であるイットリウム鉄ガーネット(YIG)の上に作製しました。この Pt 超薄膜にイオン液体をのせて強い電界（ゲート電圧）をかけたところ、Pt 超薄膜の抵抗が最大で 50%程度減ることがわかりました（図 1 a）。通常の Pt（厚さ 10 nm 以上）に同様の手法を用いても抵抗の変化は観測されないことから、今回の発見は Pt を超薄膜状態にすることがポイントであると結論できます。

さらに今回の実験では、抵抗を変化させることができたことから、Pt の持つスピン流を電流に変換する機

能（逆スピンホール効果）を司る、スピントロニクスで非常に重要な相互作用であるスピン軌道相互作用も制御できるのではないかと予想し、基板である YIG からスピン流を Pt 超薄膜に注入しました。（結果は図 1b 及び 1c）驚くべきことにスピン流を電流に変換する機能は最大で 280% も変調できることがわかりました。このスピン流を変換する機能もまた、Pt の厚さが 10 nm 程度になると消失するため、やはり超薄膜ならではの性質であること、つまり金属材料を非常に薄くしていくと中に存在する電子の総数が減少することが、上記の効果をもたらす源であることが理解できました。

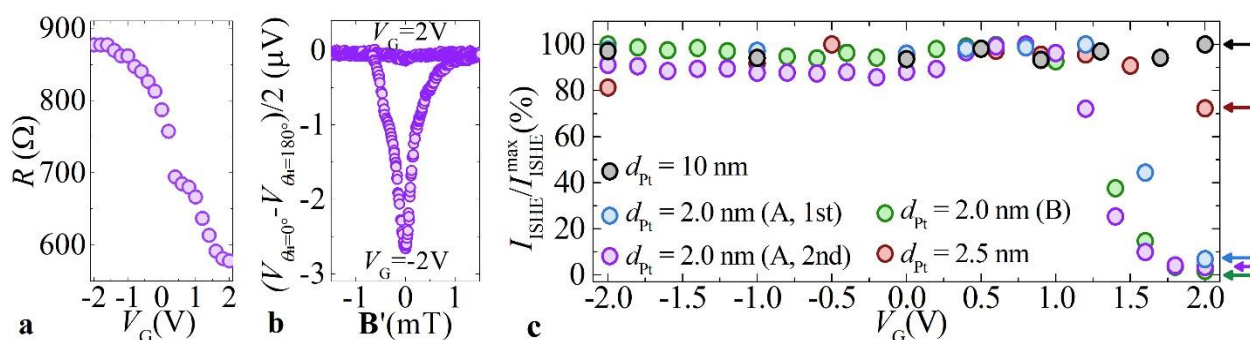


図 1 本研究の実験結果(a)Pt 超薄膜の抵抗のゲート電圧依存性。最大で 50% の変調がある。(b)Pt 超薄膜でスピン流が電流に変換されたことで生じる起電力のゲート電圧依存性。+2V ではほとんど信号がない一方で、-2V では大きな信号が観測される。(c)(b)の実験結果の詳細と Pt の膜厚依存性。Pt が厚くなるとゲート電圧による変調が著しく小さくなる。

3. 波及効果、今後の予定

今回の発見は、従来の「金属材料を使ってトランジスタを作ることはいかなるわけでもない」という理解と「スピン軌道相互作用は材料固有である」という固体物理学における理解を共に覆す発見であり、特にエレクトロニクスやスピントロニクス分野の新しい発展に繋がる成果といえます。原理自体はある意味で「コロンブスの卵」であり、これまでに気づかれていなかった超薄膜金属ならではの性質を用いており、決して「錬金術」のような怪しさはありません。本研究では、例えばトランジスタ特性としてはまだ既存の半導体のそれよりは性能としては低く、すぐに半導体を置き換えるものではありません。しかし、スピントロニクス分野では、スピン軌道相互作用を用いたスピン流の電流への変換は、たとえば磁化反転メモリ素子などへの応用が視野に入っており、本研究で見出したスピン軌道相互作用の制御によって、新しいタイプのメモリやスピン素子の開発が可能となることが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は科学研究費補助金・基盤研究(S)「半導体スピンカレントロニクス」及び新学術創成型研究「ナノスピントロニクス」の補助を受けて実施されました。

<用語解説>

イオン液体

液体で存在する塩（えん）のこと。用途として最も期待されている分野は電解質です。コンデンサーやリチウムイオン電池などから、燃料電池や太陽電池などの開発を促進する素材として注目されていますが、近年の固体物理学では、イオン液体を介して強い電界をかけて多数の電子を固体に注入することでそれまで知られていなかった新しい超伝導の発見や、磁石の機能を持つ強磁性体という材料の磁石

の強さを変えたりすることが可能となり、新しい物性開拓の重要なツールとなっています。

スピン流

電子の2つの自由度である電荷自由度とスピン自由度のうち、従来エレクトロニクスでは、電荷の自由度（プラスか、マイナスか）のみを制御し、産業応用してきました。一方、スピン自由度のみ（スピン角運動量のみ）を制御することができれば、実質的に電流は流れないため、例えば情報伝搬において、究極の省エネにつながる可能性があります。このスピン自由度のみの流れのことを「スピン流」と呼びます。電子の電荷とスピンの2つの自由度を制御するスピントロニクス分野において、様々な材料におけるこの純スピン流の自在な生成と制御は、分野のホットトピックです。

逆スピンホール効果

物質中のスピン流を電流に変換する効果を指し、物質のスピン軌道相互作用がこの効果を生み出します。逆スピンホール効果による変換電流は、一般に物質の抵抗を介して電圧として検出されます。尚、「逆」とは、スピンホール効果（電流をスピン流に変換する効果）の逆過程を意味します。

スピン軌道相互作用

物質中でスピンを曲げる効果の源であり、専門的には電子のスピンと軌道の角運動量の間の相互作用を言います。一般的傾向として原子番号の大きな元素のほうが、強いスピン軌道相互作用を有します。例えば金属ならば、パラジウム(Pd)や白金(Pt)、タンタル(Ta)ではこの相互作用が大きく銅(Cu)や銀(Ag)は小さいことが知られています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Tunable inverse spin Hall effect in nanometer-thick platinum films by ionic gating
(イオン液体を用いた白金超薄膜における逆スピンホール効果の制御)

著 者：Sergey Dushenko(1)*, Masaya Hokazono(1)*, Kohji Nakamura(2), Yuichiro Ando(2),
Teruya Shinjo(1) and Masashi Shiraishi(1)
(1) Kyoto University, (2) Mie University

掲 載 誌：Nature Communications