

2015 年 4 月 27 日

次世代半導体材料ゲルマニウムにおける 室温スピン伝導を世界で初めて実現

京都大学（大学院工学研究科電子工学専攻教授・白石誠司[しらいし まさし]、及び大学院博士学生 Sergey Dushenko[セルゲイ・ドゥシェンコ、大阪大学からの特別研究学生]）、及びイギリス Warwick 大学（Department of Physics, Maksym Myronov[マクシム・ミロノフ] 博士）のグループは共同で、次世代半導体材料として大きな注目を集めているゲルマニウム(Ge)中に室温でスピンを流すことに世界で初めて成功しました。シリコン(Si)を基幹材料とした現在のエレクトロニクスは微細加工の限界に直面しつつあり、その限界を突破するための様々な技術的挑戦が行われています。Ge は Si を大きく凌駕する高い移動度（電子などの動きやすさの指標）を達成している材料であり、Si を超える次世代エレクトロニクス材料として大きな注目を集めています。Si エレクトロニクスの限界を超えるもう 1 つのキーテクノロジーがスピントロニクスと呼ばれる技術であり、電子の電荷自由度に加えスピン自由度を同時に制御する技術です。今回の成果はポスト Si 材料である Ge とポスト Si エレクトロニクス技術であるスピントロニクスの融合により、現在のエレクトロニクスが直面している技術限界を突破できた、という大きな意義を持ちます。

本研究成果は物理分野において最高の権威を有する米国物理学会科学誌 *Physical Review Letters* 誌の電子版に近日中に公開の予定です。

論文タイトル：

An experimental demonstration of room-temperature spin transport in n-type Germanium epilayers

n 型ゲルマニウムエピ層における室温スピン輸送の実験的実証

著者：

S. Dushenko, M. Koike, Y. Ando, T. Shinjo, M. Myronov and M. Shiraishi

S・ドゥシェンコ[1]、小池真利子[1]、安藤裕一郎[2]、新庄輝也[2]、M・ミロノフ[3]、白石誠司[2]

[1] 京都大学大学院特別指導学生（大阪大学大学院基礎工学研究科所属） [2] 京都大学大学院工学研究科 [3] Department of Physics, Univ. Warwick, England.

1. 研究の背景と意義

CMOS(相補型金属酸化膜半導体)トランジスタ(*1)の微細化によって低消費電力化と高速動作を可能としてきたシリコンベースの集積回路は、微細加工の限界に起因するスケールリング則の限界に直面しつつあります。また、CMOS トランジスタを用いた集積回路は一般に情報が揮発性であり情報の維持に常に電力が必要であるために、省エネルギーの観点からも大きな課題を抱えています。そのため、次世代の高度情報化社会の中核を担う革新的情報デバイスの実現のために様々な角度から鋭意研究が進められています。

このような革新的情報デバイスを実現するためには主に①材料面、②技術面という2つのアプローチが存在します。①の材料面では、シリコンが本質的に実現できる移動度(電子またはホールがデバイス中を移動する速さ)の限界に近づきつつあるため、シリコンに変わる材料開発が希求されています。その中でゲルマニウムはシリコンを凌駕する移動度が実験的にも実現されており、ポストシリコン材料の中でも最も有力な材料と期待されています。②の技術面では、スピントロニクスと呼ばれる電子の有する電荷自由度とスピン自由度を同時に制御する技術が有力な技術の1つと考えられており、半導体材料を対象とした半導体スピントロニクスという分野では世界中で活発な研究が進められています。

上記の背景からシリコンエレクトロニクスの限界を突破するための強力な戦術は「ゲルマニウムを用いたスピントロニクス」、ということになります。これまでシリコンを用いたスピントロニクスでは、室温でのスピン伝導やシリコンスピン MOS トランジスタ動作が我々のグループによって実現していたものの(2014年9月4日のプレス発表など)、この次世代半導体材料であるゲルマニウムにおいては応用可能性を広く開拓する室温でのスピン輸送は実現しておらず、半導体スピントロニクス分野において次に達成すべき重要なマイルストーンとなっていました。

2. 室温でのスピン輸送実現の詳細

今回、研究グループで作製した素子構造と、観測した現象を、図1、図2に示します。 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 程度の不純物ドーピングを行ったn型ゲルマニウム上にNi-Fe合金薄膜(磁性体)を形成し、強磁性共鳴を用いたスピンプンピング(*2)という手法によりNi-Fe合金からゲルマニウムにスピンを注入しました。注入されたスピンは純スピン流(*3)と呼ばれるスピン自由度の流れを生み、それが室温でゲルマニウム中を伝導していきます。生成された純スピン流は同じゲルマニウム上にNi-Fe合金から離して形成したパラジウム(Pd)金属薄膜に吸収させ、そのPdにおける逆スピンホール効果(*4)による起電力とし

て検出することにより、ゲルマニウム中のスピン伝導が実現されたことを世界で初めて実証しました。今回の実験ではスピンはゲルマニウム中を 600 nm (ナノメートル: 1 nm は 1 m の 10 億分の 1) もの長距離を伝導できています。現在の MOS トランジスタのゲート長サイズが 10-20 nm であることを考えれば応用には十分な長さを伝導していると言えます。

今回の実験では、スピンを伝導させるために電流を用いていないこともまた大きな特徴です。通常、スピンを伝導させるためには、スピンは電子の属性であるために電流を流すことでスピンを運ぶことが一般的でした。しかし、電流で情報を運ぶことはオームの法則 ($V=R \times I$) から簡単にわかるように必ず電圧を消費することに繋がります。電圧の消費は熱の発生に直結しますが、現在のシリコンエレクトロニクスが膨大な熱発生の問題にも直面しているのはこのような理由からです。純スピン流は電流の動きはないまま ($I=0$) スピン自由度のみを運ぶことができるため、上記のような熱発生の問題を回避できると期待されています。

3. 研究成果の展望

今回の成果により室温におけるゲルマニウムスピントロニクス素子の創出が達成されました。今後はこのようなスピン素子を用いた論理演算を実現するための回路設計の指針を得ることを目指していきます。またスピン伝導実現のための効率を更に向上していくための素子構造の最適化なども行っていきます。

実は 1947 年に人類が初めて手にしたトランジスタはゲルマニウムで出来ていました。ゲルマニウムはその後 1960 年代ごろまではトランジスタの基幹材料でしたが大規模集積回路 (LSI) が登場した 1970 年代以降は主役をシリコンに奪われてしまい、現在ではシリコンが半導体の代名詞となってしまっています。今回の成果は一種の「温故知新」とも言える成果です。再びゲルマニウムがその栄光を取り戻すことができるようにこれからも鋭意研究を進めていくつもりです。

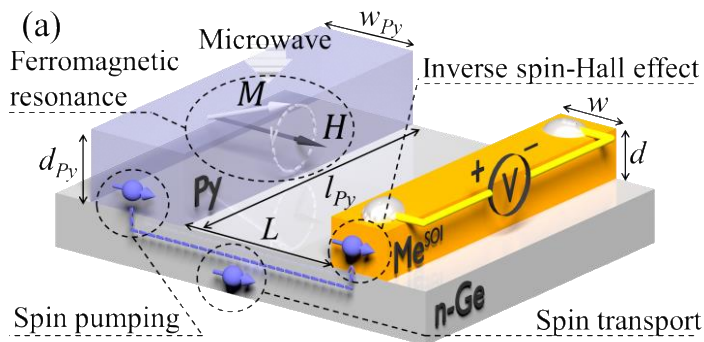


図 1：今回の実験で用いた素子構造。n 型ゲルマニウム(n-Ge)上に NiFe(Py)合金とパラジウム（図中には Me^{SOI} と表記）を一定の距離 L 離して作製します。Py に静磁場 H を印加した状態でマイクロ波(micro wave)を照射すると強磁性共鳴という現象が Py 中で生じます。この条件下で n-Ge 中にスピンの強制的に注入（ポンプ）されます。ポンプされたスピンは純スピン流として n-Ge を伝導しパラジウムに吸収されますが、パラジウムにおける逆スピンホール効果により純スピン流は電流に変換され、電圧が観測されます。実験ではこの電圧を観測することで室温スピン伝導の証明を行いました。

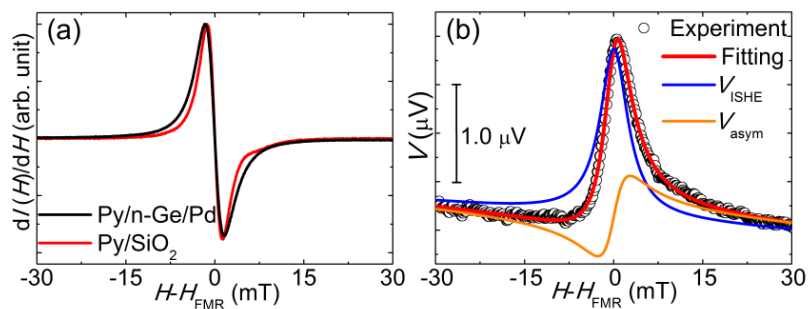


図 2：左は Py における強磁性共鳴スペクトル、右はパラジウムから発生した電圧を示しています。横軸が 0 の点、即ち強磁性共鳴が生じている点で電圧がピークを示しています。つまり強磁性共鳴によるスピンの注入が n-Ge に注入されて純スピン流となり、純スピン流がパラジウムに吸収された後に逆スピンホール効果によって電流（電圧）に変換されたことを直接的に示しています。

【用語解説】

*1 CMOS

CMOS(シーモス)は Complementary Metal Oxide Semiconductor の略で、日本語では相補型金属酸化膜半導体といいます。これは MOS-FET(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)を相補形に配置した情報処理構造を意味し、CMOS トランジスタとは CMOS 構造を組み合わせた情報処理素子を指します。CMOS トランジスタは他のトランジスタに比べると消費電力をかなり抑えられるため、半導体素子において標準的に用いられています。一方で近年、半導体への更なる微細化の要求により、リーク電流の問題が発生し、結果的に電力消費が増えています。

*2 強磁性共鳴を用いたスピンプンピング

強磁性体に強磁性共鳴等を用いて外部からトルクを与えることにより、強磁性体からスピンを(スピン角運動量を)外部に強制的に流し出す現象をスピンプンピングと呼びます。強磁性体に非磁性体を接合する場合、スピンプンピングにより非磁性体中にスピン流を生成できます。強磁性体に外部トルクを与える主な方法として、強磁性共鳴を用いる方法が一般的でして、例えば、電子スピン共鳴装置による高周波磁場を印加する方法や、伝送線を用いてパルス磁場を強磁性体に印加する方法などがあります。

*3 純スピン流

従来エレクトロニクスでは、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、電荷の自由度(プラスか、マイナスか)のみを制御してきました。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ります。このスピン自由度のみの流れのことを“純スピン流”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。

*4 逆スピinhall効果

物質中の純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(後述)がこの効果を生み出します。逆スピnhall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nhall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指標であり、専門的には電子のスピンと軌道の角運動量と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)、金(Au)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。