

酸化物絶縁体の界面で室温スピン輸送を達成 —シリコンを凌駕する半導体素材の発掘が進展—

概要

白石誠司（しらいし まさし） 京都大学大学院工学研究科電子工学専攻教授、大島諒（おおしま りょう）博士課程学生・日本学術振興会特別研究員と東京工業大学、独 ワルター・マイスナー研究所、大阪市立大学などの研究グループは、異なる酸化物絶縁体を貼り合わせた境目に現れ、電子が高速で運動できる特殊な「2次元電子系」と呼ばれる系において室温でスピンを輸送できることを発見しました。

今回の研究では、ランタンアルミネート (LaAlO_3 (LAO)) とストロンチウムタイタネート (SrTiO_3 (STO)) という 2 種の酸化物を貼り合わせた素材を用いました。この 2 つの酸化物は共に電気を通さない絶縁体であるにも関わらず、貼り合わせるとその間にのみ電子が高速で運動できる 2 次元的な層 (2 次元電子ガス) が現れることが 2004 年に発見されました。シリコンには無い特徴を持つ次世代エレクトロニクス材料として応用的にも大きく期待されており、強い関心が寄せられています。基礎物理の面でも超伝導や強磁性など様々な興味深い物性が発現することが知られていましたが、スピントロニクスの観点からの機能開拓は遅れており、研究の進展が待たれていました。共同研究グループはこの LAO/STO 界面に存在する 2 次元電子ガスに室温でスピンを注入し、スピンを輸送することに世界で初めて成功しました。この魅力的な酸化物 2 次元系にスピントロニクス機能を搭載することを可能とした点で大きな意義をもつ研究であり、今後この材料を用いた研究の進展が期待されます。

本研究成果は 2 月 14 日 1 時(英国時間 2 月 13 日 16 時)、英国学術誌 *Nature Materials* の電子版に掲載されました。

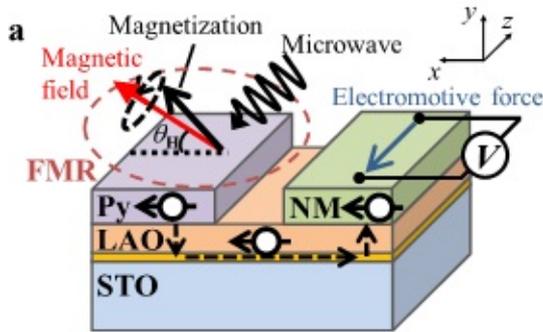
1. 背景

人類社会の発展とともに、省資源、省エネルギーにつながる極微のサイズの機能性材料開発が期待されています。それに伴い、希少元素の消費をなるべく抑え高度な機能を持つ材料の開発が進められています。本研究で対象とした $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ (LAO/STO)界面は酸素をベースにしており、更に希少元素の利用も最低限に抑えた材料であるため、上記の観点から大きな期待を背負っている物質です。2 つの酸化物はともに典型的な絶縁体ですが、 SrTiO_3 単結晶基板上に LAO 薄膜を成長させると、境目に、2 次元的な電子の層が出現することが知られていました。このような 2 次元的な電子の層を 2 次元電子ガス(以下、2DEG)と呼び、電子が非常に高速で運動できることが知られています。現在の携帯電話に必須の素子にもガリウムヒ素(GaAs)系材料で発現する 2DEG が用いられており、応用面でも重要な物性を持っています。更に LAO/STO 界面には磁性のみならず極低温で超伝導性を示すこと、さらに電場をかけると金属-絶縁体転移を起こしたり、超伝導-絶縁体転移を起こしたりするなど機能性材料として魅力的な性質を持つため、多くの研究が進んできています。

エレクトロニクスにおける情報伝搬にはこれまで電荷電流(電流)が用いられてきたため、微細化の限界や、発熱などのエネルギーロスといった問題が発生しており、全く新しい発想に基づく新規情報処理素子の創出が期待されています。スピントロニクスは電子の情報伝搬にスピン自由度を用いる点に特徴があり、超低消費電力素子や従来のエレクトロニクスでは実現できない新機能素子の実現が期待されています。ポストエレクトロニクスという点で極めて有力な候補技術であり、現在世界的に活発に研究されています。これらの新機能素子の実現には高速でスピンを移動させることが重要な要素の 1 つであるため 2DEG で実現できる電子の高速移動は極めて魅力的な物性です。しかしながらこの LAO/STO を含

め、2DEG のスピントロニクス応用は技術的な困難さから遅々として進んでおらず、応用的にも重要な室温でのスピン輸送はどの材料を用いた 2DEG においても成功していないのが現状だったため、ブレイクスルーが強く期待されていました。

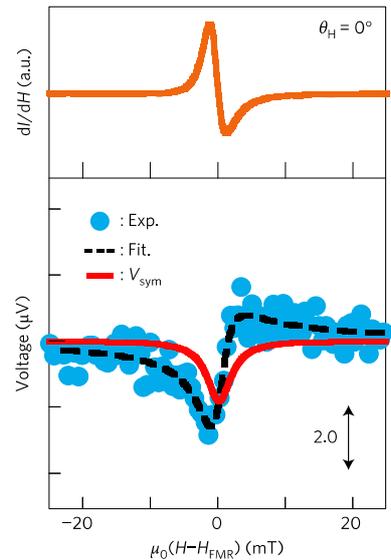
2. 研究手法・成果



今回、研究グループが実験に用いた構造では、2DEG が形成されている層の上に強磁性電極として NiFe(Py)を、スピン輸送信号の計測のために非磁性電極(NM)を一定の距離を離して形成しています。NM には白金(Pt)など重い元素を用います。室温でこの Py に強磁性共鳴と呼ばれる現象を誘起すると、LAO/STO 界面の 2DEG にスピン角運動量が注入されます。これをスピンプンピング現象¹と呼びます。注入されたスピン角運動量は純スピン流²という

流れとして 2DEG を室温で伝播します。伝播した純スピン流は Pt 電極に吸収されますが、そこで逆スピンホール効果³と呼ばれる効果で電圧に変換されます。この仕組みを用いると、Pt 電極での電圧を測ることでスピンのどの程度伝播したのか計測可能です。

実験結果をみてみると、Pt 電極での信号は逆スピンホール効果に特徴的な外部磁場依存性を持って観測されました。右上図は Py の強磁性共鳴スペクトルを示していますが、共鳴点(横軸が 0 の位置)で右下図に示すように Pt から起電力が観測されます(赤線)。これは強磁性共鳴条件下で 2DEG にスピンが注入されて 2DEG 中を伝搬し、そのスピンが Pt 電極の逆スピンホール効果によって電流に変換されて電圧として計測されたことを意味しています。つまり、このグラフは 2DEG における室温スピン輸送に成功したことを示しています。更に Py と NM の距離を変えながら信号を測定することでスピンの 2DEG を流れる指標であるスピン拡散長を求めた結果、スピンは室温で 300 nm 程度移動していることがわかりました。現在の LSI の電極部分は 10nm 単位で設計されていることから、今回達成した移動距離は応用のうえでも十分だと言えます。



¹ 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 (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ぶ。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る。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。

² 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、従来のエレクトロニクスでは、電荷の自由度 (+) のみを制御してきた。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、究極の省エネにつながる可能性がある。スピン自由度のみの流れを「純スピン流」と呼び、様々な材料で純スピン流を自在に生成・制御する研究が盛んに行われている。

³ 物質中の純スピン流を電流に変換する効果。物質の中でスピンを曲げる作用がこの効果を生み出す。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る。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) の逆過程を意味する。

3. 波及効果、今後の予定

今回の成果は携帯電話などに応用できる 2DEG において室温で初めてスピンを輸送できた点、更に希少元素を用いることなくあるいは最小限の希少元素利用で高度の機能を実現できた点に意義があります。今後は様々な 2DEG を対象にしてスピンの輸送に最適な材料を探索していくこと、更にスピンの輸送できる長さを伸ばすこと、またこのスピン機能を活かした高周波スピン素子などの応用素子に展開していくことが期待できます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究成果は文部科学省・新学術領域創成型研究「ナノスピン変換科学」、科学研究費補助金・基盤研究(S)「半導体スピントロニクス」、同・基盤研究(B)「酸化物半導体および絶縁体積層構造を用いた表面仕事関数制御」、日本学術振興会特別研究員プログラム(DC1)「二次元電子系におけるラッシュバ型スピン軌道相互作用の制御とスピン輸送物性の研究」、京都大学ナノテクノロジーハブ拠点などの支援によって行われました。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Strong evidence for d-electron spin transport at room temperature at a $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ interface

著者 : 大島諒、安藤裕一郎、松崎功佑、須崎友文、マティアス・ヴァイラー、
シュテファン・クリングラー、ハンス・ヒューブル、仕幸英治、新庄輝也、
セバスティアン・ゲネンヴァイン、白石誠司

掲載誌 : *Nature Materials*

DOI: 10.1038/nmat4857