

シリコンの新しいスピン物性を発見

—半導体スピン素子の小型化に道筋：

従来の理解を超えた磁場なしでのスピン操作が可能に—

概要

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の李垂範 博士課程学生・日本学術振興会特別研究員（研究当時、現：京都大学特定研究員）、白石誠司 同教授らのグループは TDK 株式会社、大阪大学と共同で、産業のコメとも言えるシリコンにおける、従来の物性理解を超越する新奇なスピン物性の発見に成功しました。

現在のシリコンベースのトランジスタは微細化の限界や膨大な発熱・廃熱による技術的限界に直面しつつあるため、これらの限界を突破するために電子の有するスピン機能を新たな情報担体とした研究が極めて盛んになっています。スピンは磁性の起源であるためにスピン情報担体を操作しスピンを用いた演算を実現するためには一般に外部磁場が必要ですが素子構造が大掛かりになるという問題があります。一方近年、スピン軌道相互作用という物質中の相対性理論効果を活用して、人工的に磁場を物質中に創発させることが可能となっており、この効果を用いたコンパクトな情報素子の創出が期待されています。シリコンでもこのような機能が発現できることが待望されてきましたが、シリコンは本質的にこのスピン軌道相互作用が小さいためにこの機能発現は不可能だ、というのが従来の理解でした。

今回、白石教授らは巧妙かつ人工的にこの SOI をシリコンに発現させ、外部磁場を全く用いずにシリコン中の流れるスピンを操作することに成功しました。この成功により、情報素子の産業応用上最適な材料であるシリコンを用いてスピン演算をよりコンパクトな素子で実現できる道程を開拓することができました。

本成果は 2021 年 6 月 4 日 0 時（日本時間）に英国科学雑誌「Nature Materials」誌にオンライン掲載されました。

1. 背景

CMOS(相補型金属酸化膜半導体)トランジスタ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、多くの電力を投入する必要があり、更に投入した電力の多くが廃熱として無駄に環境中に放出されることから、年々 1 チップあたりの消費電力も増加し続け、省エネルギーの観点からも大きな課題を抱えています。この課題を根本的に解決可能な革新的デバイスの 1 つが、電子の有する磁石機能である スピン自由度を情報担体として活用したスピン MOSFET(金属酸化膜半導体型電界効果トランジスタ)です。スピン MOSFET は電極に磁性体を用いて、メモリ機能とトランジスタ機能を 1 つのデバイスに同時に搭載した新型デバイスであり、不揮発記憶機能や高速動作と高集積化の可能性、高い記憶の繰り返し耐性を有することが期待されます。このデバイスを用いれば、不揮発かつ再構成可能な論理回路が組めるため、低消費電力情報処理の面で大きなインパクトを社会に与えることも可能です。特にシリコンを用いたスピン MOSFET は、シリコンがほぼ無尽蔵（ユビキタス）に自然界に存在し無毒であること、シリコンでは情報担体であるスピンの比較的長時間保持できることが期待されること、さらに従来のシリコンエレクトロニクスにおける技術面・インフラ面での蓄積のまま利用可能であることから、2007 年頃から世界中でその実現に向けて活発に研究が進められてきました。京都大学・TDK 株式会社などの共同研究グループは 2014 年にこのシリコンスピン MOSFET を世界に

先駆けて室温動作させることに成功し、2016年にはその性能を大きく向上させることにも成功しています。

一方で、スピンを操作するには、スピンの磁石機能の源であることからわかるように一般に外部から磁場をかけることが必要です。情報演算素子には MOSFET の例でもわかるようにできるだけコンパクトなサイズにすることが求められており、外部磁場をかける機能を別に備えることは素子のコンパクト化に逆行します。そこでスピン軌道相互作用と呼ばれる物質中の相対性理論に基づく効果を活用して、物質中に「有効磁場」と呼ばれる磁場を人工的に創出し、スピンを操作するという研究が近年盛んになっています。この効果を使えば外部から磁場をかけることが不要になるためにスピン情報素子の大幅なコンパクト化につながります。

しかしながらシリコンにこのスピン軌道相互作用を利用して有効磁場を創出し、スピン操作機能を搭載させることは原理的に不可能とされてきました。その理由は主に2つあります。1つはスピン軌道相互作用の大きさが概ね原子番号の4乗に比例するため、原子番号が14番のシリコンは本質的に小さなスピン軌道相互作用しか持ちえないことがあります。更に2つめの理由として、反転対称性が低い物質ではこのスピン軌道相互作用が発現するのですが、シリコンはこの反転対称性が高く、その面でもスピン軌道相互作用が発現できないことが挙げられます。そのため、シリコンはスピン情報素子の産業応用上最適な半導体材料であるにも関わらず、このスピン操作性の問題をクリアできないことが応用上の大きな障害であるとみなされてきました。

2. 研究手法・成果

そこで私達の研究グループでは、シリコンスピン MOSFET の構造に着目しました。実はスピン軌道相互作用を発現させるにはもう1つ別のアプローチがあり、2つの物質の接合部分（界面、と呼びます）に発生する内部電場（ラッシュバ場と呼ばれます）及び外部からかける電場とスピンを運ぶ電子の速度を利用する、という手法があります。アインシュタインが確立した特殊相対性理論によると、物質が非常に早く運動する場合、物質の運動方向と電場方向の双方に垂直な方向に「有効磁場」と呼ばれる磁場が（外部磁場を一切かけていないにも関わらず自発的に）創発されます。この有効磁場をうまく利用することで、シリコン中を運動するスピンを外部磁場を用いずに操作する、というのが今回のアイディアの根幹です。

実験的にはシリコンスピン MOSFET においてスピンを運ぶ層である、厚さ100ナノメートルのシリコン層とその直下にある酸化シリコン層の界面に存在すると期待される内部電場であるラッシュバ場を利用しました。更にこの酸化シリコンを介して最大100ボルトの強い電場を印加しました。この2種類の電場の組み合わせによって、シリコンに人工的に磁場を創発し、シリコンを流れるスピンの操作に成功しました。また外部電場をチューニングすることでラッシュバ場を完全に消すことにも成功し、シリコンを流れるスピン情報を自在に操作できることも実証しました。この成功は、従来のシリコンに関するスピン物性理解、すなわち、シリコンはスピン軌道相互作用を本質的に持たないので、内部を流れるスピン情報の操作には外部磁場を用いるしかない、という「常識」を超越したことを意味します。

3. 波及効果、今後の予定

今回の成功によって、外部磁場を一切用いずに電場のみでシリコンを流れるスピン情報を操作できることが実証されました。これによってシリコンスピン MOSFET を中心とするシリコンスピン情報素子の開発に新しい視点が提供され、それらの素子群の開発が更に加速されることが期待されます。一方で、今回の一連の実験ではスピン情報操作の程度は最大30%と、応用展開に十分な効率ではありません。将来的にはより効率よく強い電場をかける手法の開拓と素子構造の最適化が必要で、引き続き研究を推進していく予定です。

4. 研究プロジェクトについて

本研究の推進にあたり、科学研究費補助金・基盤研究 (S)「半導体ナノスピントロニクス」の支援を受けました。また筆頭著者の李垂範君は日本学術振興会・特別研究員プログラム(DC1)の支援を受けると共に、共同研究者の1人である安藤裕一郎・京都大学特定准教授は JST 戦略的創造研究推進事業・さきがけ「シリコン中の電子スピンを用いた論理演算素子の創成」の支援を受けました。ここに謝意を表します。

<用語解説>

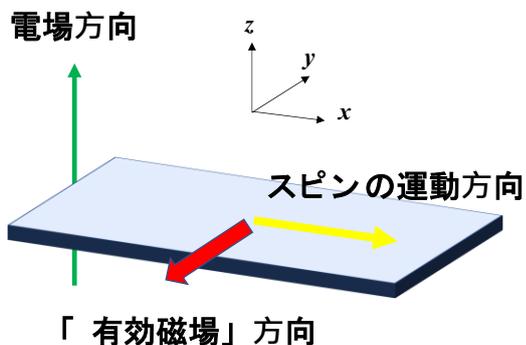
・ CMOS : CMOS(シーモス)は Complementary Metal Oxide Semiconductor の略で、日本語では相補型金属酸化膜半導体といいます。これは MOS-FET(金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ)を相補形に配置した情報処理構造を意味し、CMOS トランジスタとは CMOS 構造を組み合わせた情報処理素子を指します。CMOS トランジスタは他のトランジスタに比べると消費電力をかなり抑えられるため、半導体素子において標準的に用いられています。一方で近年、半導体への更なる微細化の要求により、リーク電流の問題が発生し、結果的に電力消費が増えています。

・ スピン : スピン角運動量とも言われ、電子の持つ電荷と並んで重要な内部自由度であり、磁石の持つ磁性の源でもあります。スピンはアップとダウンの2値を持つため、情報を担うことが可能です。

・ スピン軌道相互作用 : 物質中でスピんに磁場をかけることに相当する効果の起源であり、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。

・ 反転対称性 : 例えば立方体を考えると、上下左右、どの方向にも 90° 回すと同じ形にできます。直方体では 90° 回して同じ形にする方法はありませんが 180° 回せば可能です。正四面体では、ある軸の周りで 60° 回す操作であれば同じ形にできますが、他には 360° (1回転)まわすしか同じ形にする方法はありません。このように3次元の物体には、ある回転操作によって、もと同じ形にしやすいもの/しにくいもの、があり、しやすいものを「反転対称性の高い物体」と呼びます。

・ 有効磁場 : 特殊相対性理論では電場と磁場が相互に連環するため、強い電場と大きな運動速度を同時に実現すると、その両者に垂直な方向にいわば人工的に磁場を発生させることが可能です。左図がそのイメージ図に



なりますが、板(今回のケースではスピンを運ぶシリコン薄膜)の垂直方向(z方向)に強い電場があり、スピンを大きな速度で面内方向(x方向)に運動させると、両者に垂直な方向(-y方向、符号は特殊相対性理論によりこのケースではマイナスと決定されます)に人工的に磁場が発生します。これが「有効磁場」と呼ばれる磁場です。

<研究者のコメント>

「コロンブスの卵」がその典型であるように、意外性のある発見は常に人々を魅了します。今回の発見は、その物理機構の全貌を理解した現在となっては少なくとも私

達には「物理的に当たり前だ」と思いますが、研究開始当初は「こんなことがあるのか!？」と新鮮な驚きと知的興奮をもたらしてくれました。これからも従来理解を超越できる新鮮な驚きを物理学と広く社会にもたらしたいと思っています。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Synthetic Rashba spin-orbit system using a silicon metal-oxide semiconductor

(シリコン MOS 構造を用いた人工ラッシュバスピ軌道相互作用系)

著者： Soobeom Lee¹, Hayato Koike², Minoru Goto³, Shinji Miwa^{3,\$}, Yoshishige Suzuki³, Naoto Yamashita¹, Ryo Ohshima¹, Ei Shigematsu¹, Yuichiro Ando^{1,4} and Masashi Shiraishi¹

1. 京都大学、2. TDK 株式会社、3. 大阪大学、4. JST さきがけ、\$ 現・東大物性研

掲載誌： Nature Materials

DOI： <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01026-y>