



東北大学

平成 24 年 9 月 7 日

報道機関 各位

東北大学大学院工学研究科

電子スピン永久旋回状態の電氣的制御に成功

—次世代省電力・高速半導体デバイス実現へ期待—

【発表のポイント】

- ◆ 半導体中で電子スピンの向きを長時間保持できる状態を実現
- ◆ トランジスタ構造を用いた電氣的制御によりスピン永久旋回状態を実現
- ◆ 次世代省電力・高速半導体トランジスタにおけるスピン制御の新手法として期待

【成果概要】

東北大学大学院工学研究科 好田 誠 准教授、同研究科 国橋 要司 博士後期課程学生、同研究科 新田 淳作 教授、レーゲンスブルク大学（ドイツ）らの研究グループは、半導体トランジスタ構造を利用して電子スピンの向きを揃えたまま永久的に回転できる状態（スピン永久旋回状態）を作り出すことに世界で初めて成功しました。

電子は「電荷」と「スピン」^{注1)}の性質を持っています。スピンには上向きスピンと下向きスピンが存在し、微小磁石の上向きと下向きに対応させることができます。ハードディスクはこの微小磁石の向きを利用して情報を記録してきました。半導体でもこのスピンの向きを制御できれば、電荷の持つ演算機能とスピンの持つ記録機能を一つの素子で兼ね備える省電力・高速半導体デバイスの実現が期待できます。ところが、半導体中では、スピンの向きがばらばらになる「スピン緩和」^{注2)}が生じ、スピンの持つ情報を長い間保持することが困難な問題を抱えていました。

2003年にドイツの理論研究者らが、スピンの向きを電氣的に制御することができ、かつスピン緩和が全く起こらないスピン永久旋回状態^{注3)}が存在することを予言しました。2009年に米国カリフォルニア大のグループはスピン永久旋回状態を報告しましたが[1]、スピン軌道相互作用^{注4)}の異なったいくつかの試料を用意する必要があり電氣的に制御することはできませんでした。しかし、電子スピンを利用した次世代半導体デバイスには、広く利用されているトランジスタ構造を用いてスピン永久旋回状態を実現することが求められていました。

今回の研究では、トランジスタ構造を用いてゲート電界によるスピン軌道相互作用の精密制御により、電子スピンの向きを揃えたまま永久的に回転できる状態（スピン永久旋回状態）を作り出すことに世界で初めて成功しました。本成果は、電子スピンを利用した次世代省電力・高速半導体トランジスタ実現に向けたブレークスルーとなります。

本研究成果は、2012年8月27日に、米国科学誌『Physical Review B』の速報版(Rapid Communications)に掲載されました。

<研究背景>

今日の情報社会を支えているトランジスタなどの半導体デバイスは、電子の持つ「電荷」を利用して様々な機能を生み出してきました。本来電子には「電荷」と共に「スピン」と呼ばれる磁石の性質も持ち合わせていましたが、双方を同時に利用することはありませんでした。スピンには上向きスピンと下向きスピンが存在し、微小磁石の上向きと下向きに対応させることができます。よって、半導体において電荷とともにスピンを利用することができれば、電荷の持つ演算機能とスピンの持つ記録機能を一つの素子で兼ね備える、次世代半導体デバイスが可能となります。その実現には、電子スピンの向きを精密に制御し、かつスピンの向きを長い間保持する必要があります。半導体において電氣的にスピン制御を行うには、スピン軌道相互作用を利用します。このスピン軌道相互作用は、外部から磁場を印加しなくても電子スピンに対し有効的な磁場^{注5)}として働くため、スピンの向きを自在に制御することが可能になります。このことから、スピン軌道相互作用は電氣的スピン制御に必要不可欠です。ところが、スピンの向きを制御できるこの相互作用は、同時にスピンの向きをばらばらにするスピン緩和の原因でもありました。よって、これまで電氣的スピン制御を実現しながらスピン緩和を抑制することは困難であると考えられてきました。

<研究経緯>

2003年ドイツの理論グループが、スピン軌道相互作用が存在してもスピン緩和が完全に抑制できるスピン永久旋回状態の存在を予言しました。図1にその模式図を示します。通常、電子はいろいろな方向に動くため、隣り合うスピンの向きもそれに合わせてばらばらになり、スピン緩和が生じます(図1(a))。一方、スピン永久旋回状態では(図1(b))、隣り合う電子が別々に動いても電子スピンは常に互いに同じ向きを保持しており、スピン緩和が生じません。このスピン永久旋回状態を実現するには、半導体に存在する2種類のスピン軌道相互作用(ラシュバ・スピン軌道相互作用^{注6)}とドレッセルハウス・スピン軌道相互作用^{注7)})を同時に制御して互いの強さを等しくする必要があります。2009年にカリフォルニア大学のグループは、異なる試料をいくつも用意した上で光学的な観測手法を用いて、スピン永久旋回状態を観測しました。しかし、次世代半導体デバイスを実現する上では、現在広く用いられているトランジスタ構造を利用して、スピン永久旋回状態を実現することが求められていました。

<研究内容>

東北大学の好田准教授らは、図2に示した実験結果により、トランジスタ構造を用いたスピン永久旋回状態の電氣的制御を実現しました。2種類のスピン軌道相互作用を精密に制御するため、化合物半導体インジウムガリウムヒ素^{注8)}を用いた2次元電子ガス構造^{注9)}を設計し、図2(a)に示すトランジスタを作製しました。トランジスタにはゲート電極が取り付けられ、このゲートに印加する電圧の強さによりラシュバ・スピン軌道相互作用の強さを自在に変化させることができます。スピン軌道相互作用の強さが変わると、トランジスタの磁気伝導特性が変わることを利用して、2種類のスピン軌道相互作用の相対的な強さがどのように変化するかを系統的に調べました(図2(b))。ゲート電極に-7.0Vを印加すると、スピン永久旋回状態で観測される弱局在状態^{注10)}があらわれ、トランジスタ構造を用いてスピン永久旋回状態の電氣的制御に成功しました。

さらにドイツのレーゲンスブルク大学において、2種類のスピン軌道相互作用の強さを光学測定により精密に測定し、ラシュバ・スピン軌道相互作用とドレッセルハウス・スピン軌道相互作用の強さの比が1.08であることが分かりました。これは、理論予想である1(=ラシュバおよびドレッセルハウス・スピン軌道相互作用が等しい状態)にかぎりなく近い値です。一般的に利用されるトランジスタ構造を用いて永久スピン旋回状態の電氣的制御が実現できたことから、次世代省電力・高速半導体トランジスタ実現に向けたブレークスルーになると考えられます。

<今後の展望>

今回の研究により、電氣的スピン制御が可能な状態でスピン緩和が抑制できる状態を生み出すことに成功しました。このスピン永久旋回状態を利用することで、スピンを用いたインバーター回路の実現が可能となります。図3に本研究グループが提案している構造を示します。このようなインバーター回路は、これまで

CMOS トランジスタにより実現され、集積回路を構成する基本要素となっていました。今後はスピンを利用した低消費電力トランジスタや集積回路へと発展させることができます。

<謝辞>

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構 JST-DFG プログラム「トポロジカルエレクトロニクス」、戦略的創造研究推進事業 個人型研究（さきがけ）「界面の構造と制御」研究領域（研究総括：川合 眞紀 理化学研究所 理事）における研究課題「半導体ヘテロ界面のスピン軌道相互作用制御による電気的スピン生成・検出機能の創製」（研究者：好田 誠、研究期間：2008 年～2012 年）、科学研究費補助金基盤研究(S)および科学研究費補助金若手研究(A)の助成を受けて行われました。

参考文献

[1] J. D. Koralek *et al.*, Nature **458**, 610-613 (2009).

<論文名、著者名>

“Gate-controlled persistent spin helix state in (In,Ga)As quantum wells”

M. Kohda, V. Lechner, Y. Kunihashi, T. Dollinger, P. Olbrich, C. Schönhuber, I. Caspers, V. V. Bel'kov, L. E. Golub, D. Weiss, K. Richter, J. Nitta, and S. D. Ganichev.

PHYSICAL REVIEW B **86**, 081306(R) (2012).

<問い合わせ先>

好田 誠（コウダ マコト）

東北大学 大学院工学研究科 量子材料物性学分野

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6 - 6 - 0 2

Tel : 022-795-7317 Fax : 022-795-7317

E-mail : makoto@material.tohoku.ac.jp

東北大学 大学院工学研究科 情報広報室 馬場

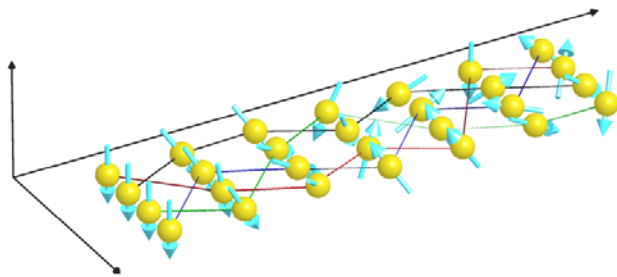
〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6 - 6

Tel : 022-795-5898 Fax : 022-795-5898

E-mail : eng-pr@eng.tohoku.ac.jp

<参考図>

(a)



(b)

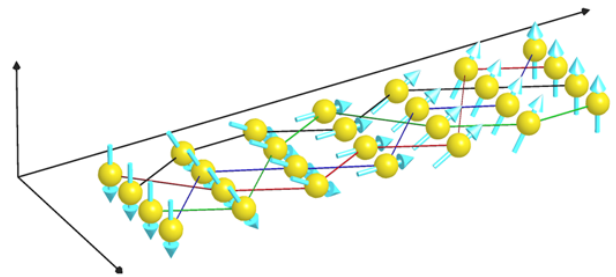


図1. 半導体における(a)通常のスピンの緩和と(b) スピン永久旋回状態

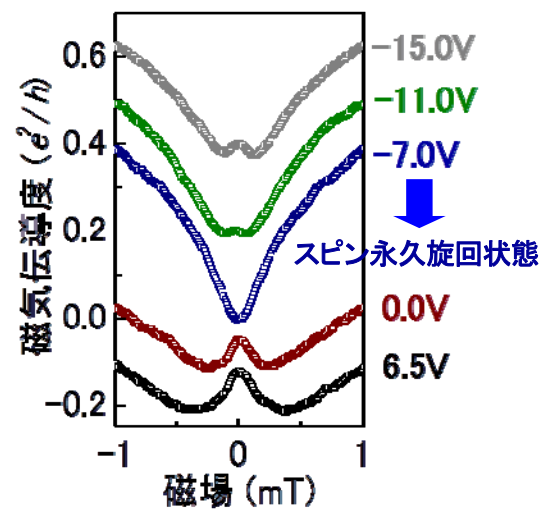
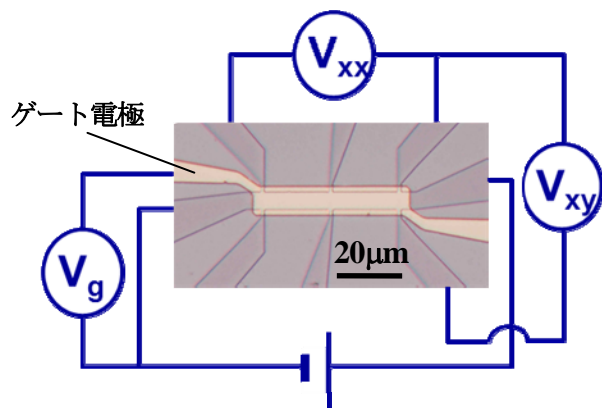


図2. (a)本研究で用いたトランジスタ構造の模式図 (b)異なるゲート電圧における磁気伝導特性測定結果

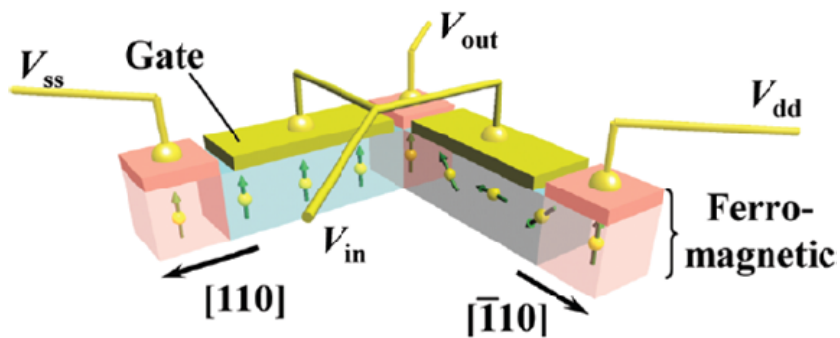


図3 スピン永久旋回状態を用いたインバーター回路の模式図

<用語解説>

注1) スピン

電子の持つ自由度の一つで磁石が発する磁場の起源。磁石にN極とS極があるように、電子スピンの状態には上向きと下向きという2つの状態があり、物質中でスピンの性質を利用するには電子スピンの向きを揃えることが必要不可欠となる。

注2) スピン緩和

スピンの向きが一方向に揃っている状態から互いにその向きがばらばらの状態へと変わることを言う。

注3) スピン永久旋回状態

互いのスピンの向きが空間的に変わらずスピンの緩和が生じない状態のこと。

注4) スピン軌道相互作用

電子スピンの電界中を高速に運動することにより、電界が有効な磁場に変換される相対論的効果のこと。この効果を利用すれば、外部から磁場を印加しなくても、電子スピンをコントロールすることが出来る。

注5) 有効磁場

実際には外部からは磁場を印加していないが、スピンの軌道相互作用により、電子スピンに対し実効的な磁場として作用すること。

注6) ラッシュバ・スピンの軌道相互作用

異なる半導体材料を用いて作製した構造において生じるスピンの軌道相互作用。構造の対称性を変えるとスピンの軌道相互作用の強さを変調できる特徴を有する。

注7) ドレッセルハウス・スピンの軌道相互作用

化合物半導体などの材料自体が有するスピンの軌道相互作用。材料が決まればその大きさはほぼ決まってしまう。

注8) インジウムガリウムヒ素

半導体の一種で、インジウムとガリウムとヒ素の組成を制御して作られたもの。通信波長帯のレーザーや受光源として広く利用されている半導体。一方で、スピンの軌道相互作用が強い半導体でもあり、スピンを利用する半導体デバイスを実現するためには重要な半導体である。

注9) 2次元電子ガス構造

異なる半導体材料を組み合わせその界面に電子を閉じ込めた構造のこと。閉じ込め効果により電子が膜面内方向に高速に動くことが出来る特徴を持つ。

注10) 弱局在状態

電子の局在状態の一つ。電子の持つ波の性質により干渉効果が生じ元の場所に留まる確率が增大する。スピンの緩和が生じていない場合、留まる確率が增大し弱局在状態となる。一方スピンの緩和が生じる場合には留まる確率が減少することから、スピンの緩和の状態を電氣的に評価することができる。