

2016年3月8日

(報道発表資料)

日本電信電話株式会社
国立大学法人東北大学

スピン演算素子の実現につながる電子スピンの長距離輸送に成功

～外部電界を用いて電子スピンの向きを長時間保持～

日本電信電話株式会社（本社：東京都千代田区、代表取締役社長：鶴浦博夫、以下 NTT）と国立大学法人東北大学（宮城県仙台市、総長：里見 進、以下 東北大学）は、スピンの向きが長時間保持されるように構造設計した化合物半導体量子井戸^{※1}を用いることで、これまで難しかった外部電界による電子スピン^{※2}の長距離輸送に世界で初めて成功しました。本技術を用いることで、半導体中の電子スピンの向きをより安定に操作することが可能となり、量子コンピュータ^{※3}や電界効果型スピントランジスタ^{※4}などの、電子スピンを用いた演算素子の実現に大きく貢献すると考えられます。この成果は、2016年3月8日（英国時間 10:00）に英国科学誌「ネイチャー・コミュニケーションズ」で公開されます。

なお、本研究の一部は、独立行政法人 日本学術振興会 科学研究費助成金の助成を受けて行われました。

1. 研究の背景

多くの電子デバイスは電子の持っている「電荷」を電氣的に制御することによって動作しています。一方、電子は磁氣的な「スピン」という性質も持っています。この電子スピンを半導体中で利用することによって、超高速演算が可能となる量子コンピュータや低消費電力で動作するスピントランジスタなど画期的なデバイスが提案されており、電子スピンのデバイス応用が注目を集めています。

しかし、これまでのエレクトロニクスでは一部の記録用の磁気デバイスを除き、スピンが活かされたデバイスはありませんでした。その主な原因は、半導体中において電子スピンの向きがそろった状態を長時間保持し、それを長距離にわたって運ぶことが困難であることです。電子スピン一つ一つは量子力学的なスピン角運動量^{※5}であり、これが失われることはありません。半導体デバイス中でスピンを利用するためには、多数の電子スピンの向きをそろえて、それらを電氣的に運んだり制御したりすることが必要です。しかし、通常の半導体デバイス中では、たとえ全ての電子スピンの向きをそろえたとしても、それらは短時間でばらばらになってしまいます。この現象はスピン緩和と呼ばれています。このスピン緩和が起こると、電子スピンを運ぶことができる距離は短くなってしまいます。電子スピンのデバイス応用を実現するためには、スピン緩和を抑制してスピンの向きを長時間保持し、それをより安定に操作することが大きな課題でした。

2. 研究の成果

今回、NTTと東北大学の研究チームは、スピンの向きが長時間保持されるように設計した半導体量子井戸構造を用いて、その中を移動する電子スピンの向きがバラバラになることなく、長距離にわたって輸送されることを世界で初めて実証しました。さらに、本研究で用いた半導体構造では、ゲート電圧を調整することによってスピンの向きも制御することが可能となります。本研究によって成功した電子スピンの長距離輸送技術と電氣的な回転制御技術とを組み合わせることで、スピン演算素子およびスピン情報処理システムの実現につながるものと期待されます。

3. 技術のポイント

(1) 半導体量子井戸の構造設計

本研究で用いた半導体材料は、電子スピンの緩和を抑制するための特殊な構造を用いています。化合物半導体中を移動する電子スピンにはスピン軌道相互作用^{※6}が働き、あたかも磁界が印加されているようにスピンの向きが回転することが知られています。この見かけ上の磁界を有効磁界と呼びます(図1)。有効磁界の方向は電子の運動方向に依存して変化するため、電子が多くの散乱を受けると様々な方向の有効磁界が働き、スピンの向きは次第にバラバラになってしまいます(図2左側)。NTTは、起源の異なる二つのスピン軌道相互作用が等しい強さになる特殊な半導体量子井戸では、有効磁界の方向が電子の運動方向に依存せず、一定になる現象に注目しました。この特殊な条件では電子スピンの向きが永久スピンらせん(Persistent Spin Helix: PSH)状態と呼ばれる状態になり、スピンの向きがバラバラになることなく量子井戸中を伝搬することができます(図2右側)。NTTではPSH状態を実現するための量子構造を理論計算によって設計しました(図3)。この結果から、ゲート電圧を調整することで、PSH状態から通常の状態まで変化させられることが分かりました。

(2) 磁気光学 Kerr 効果による電子スピンの観測

PSH状態に近い量子井戸と遠い量子井戸の中をドリフト運動する電子スピンの空間分布を磁気光学 Kerr 効果^{※7}を用いて測定しました。実験で用いた試料構造は図4の通りで、量子井戸に対して垂直方向のゲート電界と、x、y方向の面内電界が印加できる構造になっています。PSH条件に近い量子井戸では、図4の電子スピンの空間分布に示すように、電子スピンの向きが直線的に、100 μm 以上離れたところまで輸送されている様子が観測されました。またこの量子井戸では、x方向にはスピンの向きが回転しながら伝搬し、y方向には全く回転することなく伝搬することが分かり、PSH状態における有効磁界の特徴を示しています。ゲート電圧を変化させ、スピン軌道相互作用の強さをPSH状態の近傍で変化させると、電子スピンの到達距離がちょうどPSH状態になったところで最大になることも確認できました(図5)。この実験結果は、PSH状態の実現によって電子全体のスピンの向きが長時間保持され、電子スピンの向きがより遠くまで輸送できたことを示しています。

4. 今後の展開

今回実現した電子スピンの長距離輸送技術および電界による回転制御技術を発展させると、量子コンピュータやスピントランジスタなどのスピン演算素子や、これまで実現不可能だったスピンを利用した新しい素子への応用が可能になります。本成果は、半導体中におけるスピンの流れを自在に制御

する技術につながり、これまで電流を使って行われてきた論理演算をスピンのみで実施するスピン回路への発展が期待できます。今後は、こうしたスピンをういた要素デバイス、スピン回路などに加えて、それらを組み合わせたスピン情報処理システムの実現を目指した研究を進めてまいります。

【論文掲載情報】

Y. Kunihashi, H. Sanada, H. Gotoh, K. Onomitsu, M. Kohda, J. Nitta, and T. Sogawa
“Drift transport of helical spin coherence with tailored spin-orbit interactions”
Nature Communications (2016).

【用語解説】

※1 半導体量子井戸

電子に対するポテンシャルエネルギーが小さな半導体薄膜（量子井戸層）が、ポテンシャルエネルギーが大きな半導体層（障壁層）によって挟まれた半導体構造。量子井戸層の中には電子を効率的に閉じ込めることができる。

※2 電子スピン

電子は負の電荷を帯びた粒子であると共に小さな磁石としての性質をもつ。この磁石としての性質を古典的な球の自転になぞらえて「スピン」と呼ぶ。スピンは量子力学的な状態であり 3次元空間内のベクトルで表現される。

※3 量子コンピュータ

量子力学によって支配される物理量を利用した「量子ビット」に様々な演算をさせることにより情報処理を行うコンピュータ。演算過程で「重ね合わせ」という量子特有の状態を扱えるため、素因数分解やデータベース検索など現状のコンピュータとは桁違いの速さで処理が可能となる。

※4 電界効果型スピントランジスタ

強磁性体のソース・ドレイン電極と半導体チャネルからなるデバイスであり、チャネル中を伝搬する電子スピンと強磁性体電極の磁化の相対的な角度によって電気抵抗が異なる現象を利用している。ゲート電極によってスピンの方向を制御することで、電流の ON-OFF が可能となる。

※5 スピン角運動量

電子などの素粒子が持つ量子力学的な自由度の一つである。電子スピンの場合、スピン角運動量も量子化されており、その最小単位は $\hbar/2$ で与えられる。

※6 スピン軌道相互作用

電界の中を運動する電子が実効的に磁界を感じるという相対論的效果。半導体中では結晶構造や量子井戸などの構造による局所電界が原因でその効果が発現する。

※7 磁気光学 Kerr 効果

直線偏光を磁化した材料の表面に入射した際に、反射光の偏光軸が元の偏光軸に比べて回転する効果。ここでは、Kerr 回転角は電子スピンの面直成分の大きさに比例する。

<本件に関する問い合わせ先>

日本電信電話株式会社
先端技術総合研究所 広報担当
a-info@lab.ntt.co.jp

TEL046-240-5157

国立大学法人東北大学
工学研究科 情報広報室
eng-pr@eng.tohoku.ac.jp

TEL022-795-5898

図1. 有効磁界を用いたドリフトスピン制御

外部磁界によるスピン制御

外部磁場 B_{ext}

歳差運動

スピン
||
磁気モーメント

(スピンデバイス応用への問題点)

- 少数のスピン制御不可
- 磁気発生機構の集積化困難

有効磁界によるスピン制御

スピン軌道相互作用による変換

電界

有効磁界 B_{ext}

電子の運動方向

(有効磁界の利点)

- 局所的なスピンに作用
- 電界による有効磁界の制御可能

図2. 永久スピンらせん状態によるスピンの長寿命化

通常の半導体中の電子スピン

電子スピン

有効磁界の向き

スピンの向きがランダムになる

電子の進行方向

- 電子散乱によって有効磁界の向きが変化
- 電子スピンの向きがばらばらになる

永久スピンらせん状態
(Persistent Spin Helix: PSH)

有効磁界の向き

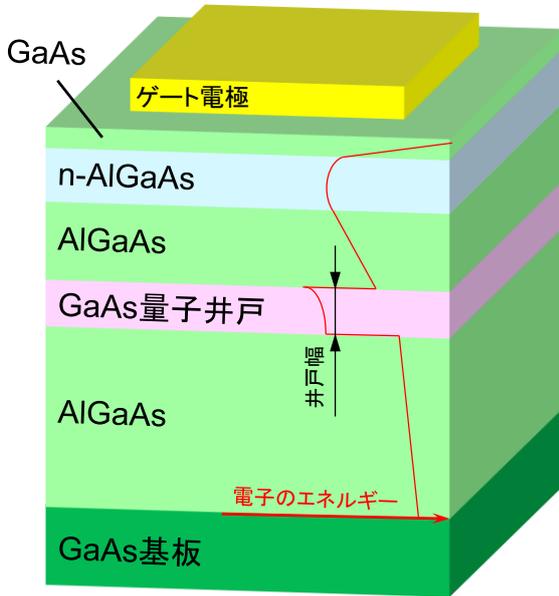
スピンの向きが保たれる

電子の進行方向

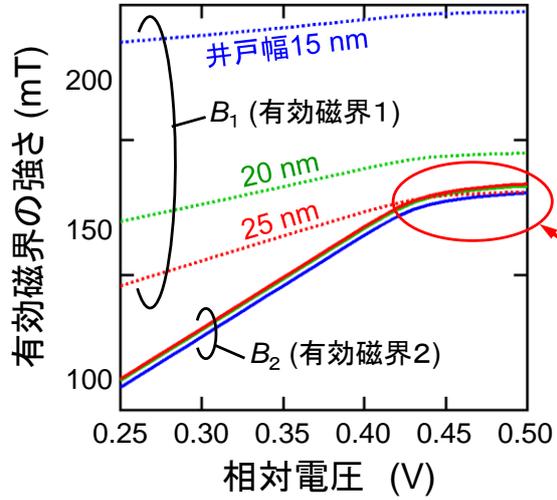
- 有効磁界が常に同じ方向を向いている
- 電子スピンの向きがそろう

図3. 永久スピンらせん状態を実現するための量子井戸構造を設計

● GaAs量子井戸構造



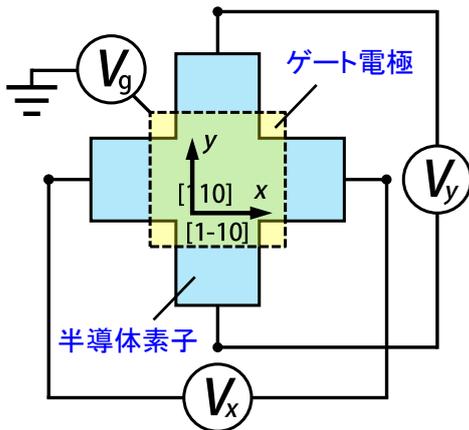
● 有効磁界の理論計算結果



井戸幅 25 nm の量子井戸で PSH状態 ($B_1 = B_2$) を実現できる

図4. 永久スピンらせん状態におけるドリフトスピンの空間分布

● 試料構造



● 電子スピンの空間分布

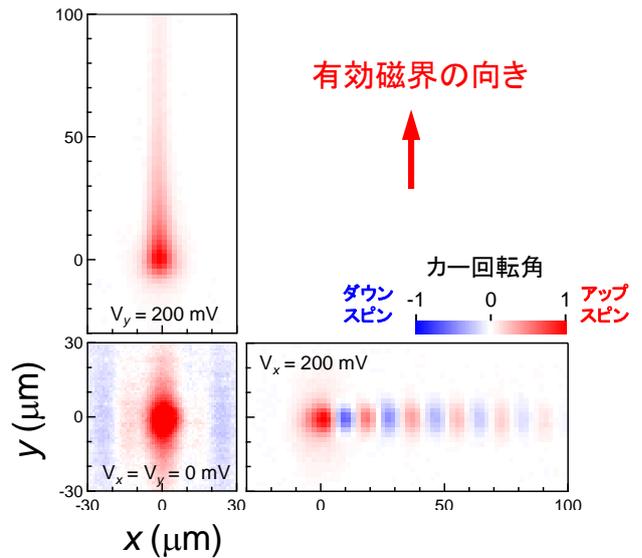


図5. ゲート電圧による電子スピンの回転操作と輸送距離の最長化

