



## 半導体における最大効率のスピン生成法を提案

### 研究成果のポイント

- ・半導体二重量子井戸をサブミクロンスケールで加工することにより、電流誘起のスピン数密度が従来観測値の1万倍以上に増大することが判明。これにより、スピン自由度に基づく将来電子デバイス開発が新たに展開。
- ・量子井戸の面内に磁場を加えることにより、「完全スピントロック状態」が成立することを半導体バンド工学（\*1）に基づき図解例証的に提示。
- ・半導体二重量子井戸における「スピン軌道相互作用」が、パリティの異なる2つの波動関数を結びつけることに注目。

### 研究成果の概要

北海道大学大学院情報科学研究科の古賀貴亮准教授の研究グループは、神戸大学、慶応大学、NTTと共同で、インジウム、ガリウム、ヒ素をベースとした半導体二重量子井戸（図1）において、「スピン軌道相互作用」（\*2）を効果的に活用し、電子の持つスピン状態（\*3）に応じて伝導電子をふるいにかける新手法を理論的に考案しました（図2）。この研究では、特に、量子井戸面に平行に外部磁場を印加することで、伝導電子のスピン選別の機構が明確に示されました。具体的には、想定される電子の実空間での軌跡をスピン毎に解析することにより、100%の効率でのスピン選別メカニズムを図解例証的に明らかにしました（図3）。

「スピン軌道相互作用」は、トランジスタの「ゲート」を用いた電子スピンの制御／操作のしやすさを表す指標で、本研究に用いた半導体での正確な値は、数年前に初めて明らかにされたばかりです（\*4）。今回の研究は、半導体二重量子井戸において「スピン軌道相互作用」がパリティ（\*5）の異なる2つの波動関数を結びつける事実に着目して進められました。その結果、半導体二重量子井戸系をサブミクロンスケールで加工することにより、「エデルシュタイン効果」（\*6）と呼ばれる電流誘起によるスピン生成効果が、従来半導体での観測値の少なくとも1万倍に達することが理論的に明らかにされました。

半導体デバイスにおけるスピン自由度の活用は、電界効果型スピントランジスタ、量子コンピュータ、超低消費電力デバイスといった次世代電子デバイス開発の鍵となると考えられています。本研究では、スピンホール効果（\*7）と並ぶ、非磁性半導体中での二大スピン生成法の一つである「エデルシュタイン効果」を飛躍的に増大させる具体的手法を示したもので、将来スピデバイス開発の方

向を一つ明確にしたことに相当し、今後のデバイス開発研究に大きなインパクトを与えます。

本研究は、科学研究費補助金 基盤研究（B）No. 23360001を受けて実施されました。

## 論文発表の概要

研究論文名：Spin blocker using the interband Rashba effect in symmetric double quantum wells

（対称二重量子井戸におけるインターバンド・ラシュバ効果を用いたスピントロッカー）

著者：相馬聡文<sup>1</sup>，澤田 淳<sup>2</sup>，陳 杭<sup>2</sup>，関根佳明<sup>3</sup>，江藤幹雄<sup>4</sup>，古賀貴亮<sup>2</sup>

所属：<sup>1</sup>神戸大学大学院工学研究科，<sup>2</sup>北海道大学大学院情報科学研究科，<sup>3</sup>日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所，<sup>4</sup>慶應義塾大学理工学部物理学科

公表雑誌：Physical Review Applied 4, 034010 （DOI: 10.1103/PhysRevApplied.4.034010）

公表日：米国東部時間 2015年9月29日（火） （オンライン公開）

## 研究成果の概要

### （背景）

既存の半導体デバイスは、電子が電場によって加速するという、電子の「電荷自由度」により動作します。一方で、電子は、「電荷」と共に「スピン」の自由度を持っており、それにより、電子一個一個は小さな磁石としての性質を有しています。そのため、固体中電子のスピンは状況に応じて、ある向きに揃ったり、特定の軸に対して回転したりします（\*3の図）。量子コンピュータや超低消費電力論理デバイスといった、スピンを利用した次世代電子デバイスを実現するには、電子の「スピン自由度」を半導体デバイス中でいかに制御するかが鍵となります。本研究で用いる半導体量子井戸には「ラシュバ効果」（\*8）と呼ばれるスピン軌道相互作用が存在し、その具体的大きさは2011年になって初めて明らかになりました（\*4）。ラシュバ効果存在下では、ある特定の向きのスピンは、電子の運動方向が変わらない限り、同じ向きのままです（\*3の図(c)(d)）。そして、このような固定されたスピンは、その向きに応じて「上向き」と「下向き」の2つに分けられます。本理論提案の根拠となる重要な基礎物理概念は、「半導体二重量子井戸では、パリティの異なる波動関数はスピン軌道相互作用（ラシュバ効果）によって混成する」という2007年に発表された事実で、インターバンド・ラシュバ効果（\*8）と呼ばれます。

### （研究手法）

本研究で具体的に想定した「半導体二重量子井戸」の構造は、厚さ10nm程度のインジウム、ガリウム、ヒ素の化合物（InGaAs）の膜を原子レベルの制御でインジウム、アルミニウム、ヒ素の化合物（InAlAs）の間に2枚挟み込んだものです。このような構造に、リモートドーピング（\*9）という手法を施すと、電子はInGaAsの部分（二重量子井戸部分）に束縛され、運動の自由度が量子井戸面内の2次元空間に制限されます。ラシュバ効果発見以前は、このような二重量子井戸では、ドーピングをうまく調整することにより、パリティの異なる2つの波動関数が安定して存在すると信じられていました。我々は、同材料でのラシュバ効果が定量的に解明されたことを契機に、インターバンド・ラシュバ効果による波動関数の混成（\*8の図）を積極的に利用して新機能を発現するデバイス開発を模索してきました。その過程で、同じく量子力学から予測される「試料の面内に磁場を印加すると電子波動関数の波数シフトが生じる」という効果を組み合わせることにより、スピン選別の具体的メカニズムが成立することを明らかにしました。結果の定量的な理論予測には、強結合のモデル、及び、コヒーレント多重反射のモデルが使われ、どちらを用いても完全に同一の計算結果が得られました。

### (研究成果)

図4に本研究で提案するデバイスに電流を流した際のスピンのコンダクタンス（電気伝導度）が、外部磁場とともにどう変化したかの理論結果を示します。磁場が正の場合は下向きスピンのコンダクタンス  $G_{\downarrow}$  が強く抑制され 0.2 テスラ付近でほぼゼロとなっています。磁場が負の領域では上向きスピンのコンダクタンス  $G_{\uparrow}$  が強く抑制され、-0.2 テスラ付近で値がほぼゼロになることは、対称性からも予測されます。この結果から、 $P=(G_{\uparrow}-G_{\downarrow})/(G_{\uparrow}+G_{\downarrow})$  の式で計算されるスピン偏極度は、1次元の理想的なモデルでは  $\pm 0.2$  テスラ付近で  $|P|=1$ （100%のスピン偏極）となることがわかります。より現実的な、電子の運動方向が量子井戸面内あらゆる方向を向いていることを考慮する二次元的モデルでは、 $|P|=0.4$ （40%のスピン偏極）が得られました。最後に、図3(b)のような明確なスピントロッキング機構が存在しない、電場だけを用いたデバイス制御の場合でも  $P > 0.1$  という大きなスピン偏極率が得られることも明らかになりました。

### (今後への期待)

現在、エデルシュタイン効果の直接観測には、非常に高度な実験技術が必要です。例えば、通常状態の半導体では、体積  $1\mu\text{m}^3$  当たり 1~10 個程度のスピンの電流によって誘起されることが知られています。実用デバイス開発のためには「電流誘起のスピン数」を飛躍的に増大させる技術革新が必要です。本研究でのスピン偏極度  $P$  は、試料中の体積  $1\mu\text{m}^3$  当たりのスピンの数にも換算可能で、例えば、 $P = 0.1$  は体積  $1\mu\text{m}^3$  当たり 10 万個のスピンの数に換算されます。このように、本研究でなされた発明は、スピンドevice実用化のために求められてきた技術革新の手法を具体的に提示したことに相当し、スピン自由度に基づく次世代革新電子デバイス開発の道を大きく広げるものであると言えます。

### お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学大学院情報科学研究科 准教授 古賀 貴亮（こが たかあき）

TEL：011-706-6539 FAX：011-706-7803 E-mail：koga@ist.hokudai.ac.jp

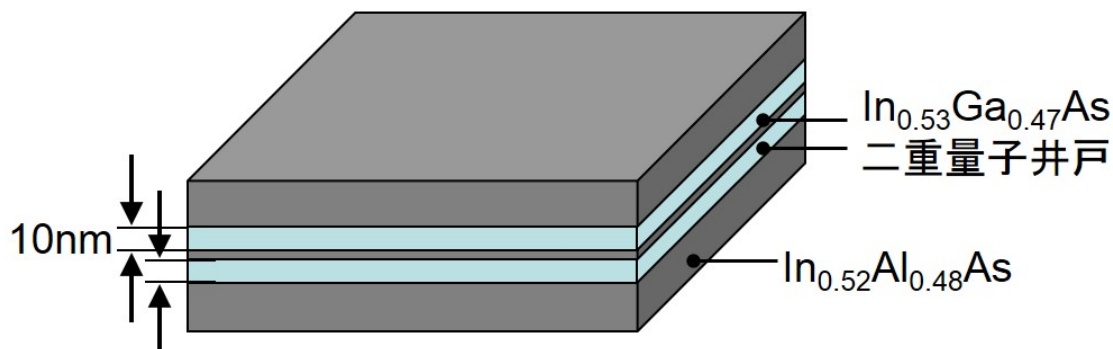


図1 「半導体二重量子井戸」の模式図

水色で示した量子井戸部分に電子が集まり、電流はそこを流れる。2つの量子井戸の間の「障壁層」の厚さは2~3nmを仮定している。2つの量子井戸は、量子力学の「トンネル効果」で結合している。下の量子井戸をQW1、上の量子井戸をQW2と呼ぶ。

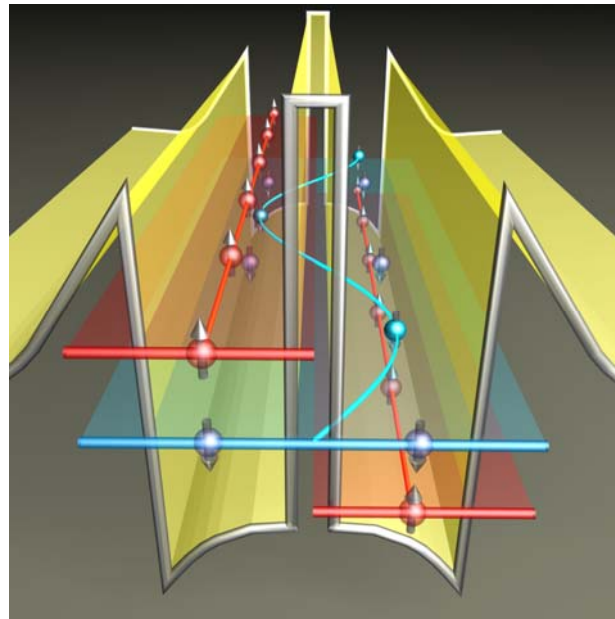


図2 提案デバイスにおけるスピン選別メカニズムの模式図

インターバンド・ラッシュバ効果 (\*7) により, 下向きスピン (青色で表示) のみが2つの量子井戸間を往き来 (トンネル) するので, このスピンのみをふるいにかけることができる。

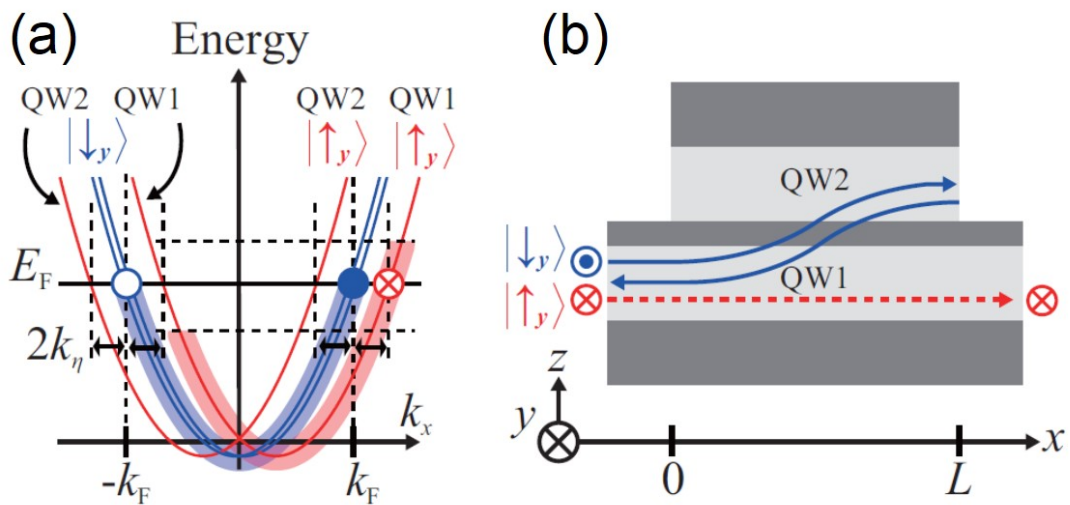


図3 提案デバイスにおけるスピン選別メカニズムの図解例示的説明

(a) 量子井戸面内磁場 (y 方向) 存在下における, スピン状態ごとの電子エネルギーの分散関係。半透明の赤, 青の帯は, x 方向に電子流 (電流) を流した定常状態での電子占有状態を表す。

(b) 「(a)」に示した電子状態を利用してスピン選別が行われる具体的メカニズムの図解。二重量子井戸の内, QW2 の部分は  $L=1\mu\text{m}$  程度のサイズに微細加工されている。左から右へ QW1 の部分に電子流 (電流) を流した場合, 流された電子はそのスピン状態 (⊙ 又は ⊗) に応じてふるいにかえられる。

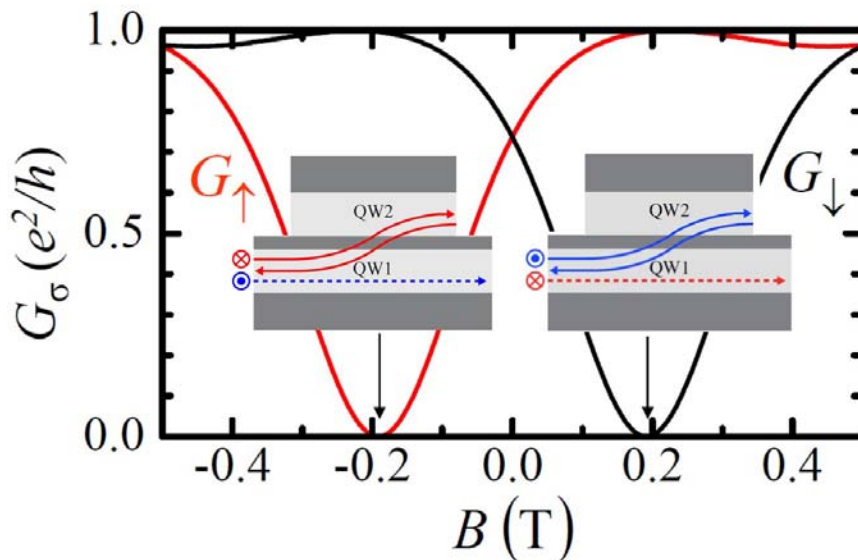


図4 本研究で提案するデバイスに電流を流した際のスピンのコンダクタンス（電気伝導度の外部磁場依存。外部磁場（紙面に垂直方向）が±0.2T 付近で「下向き⊙」（+0.2 T）または「上向き⊗」（-0.2T）のスピンの電子が完全にブロックされることが理論的に明らかとなった。

〔用語解説〕

### \*1 半導体バンド工学

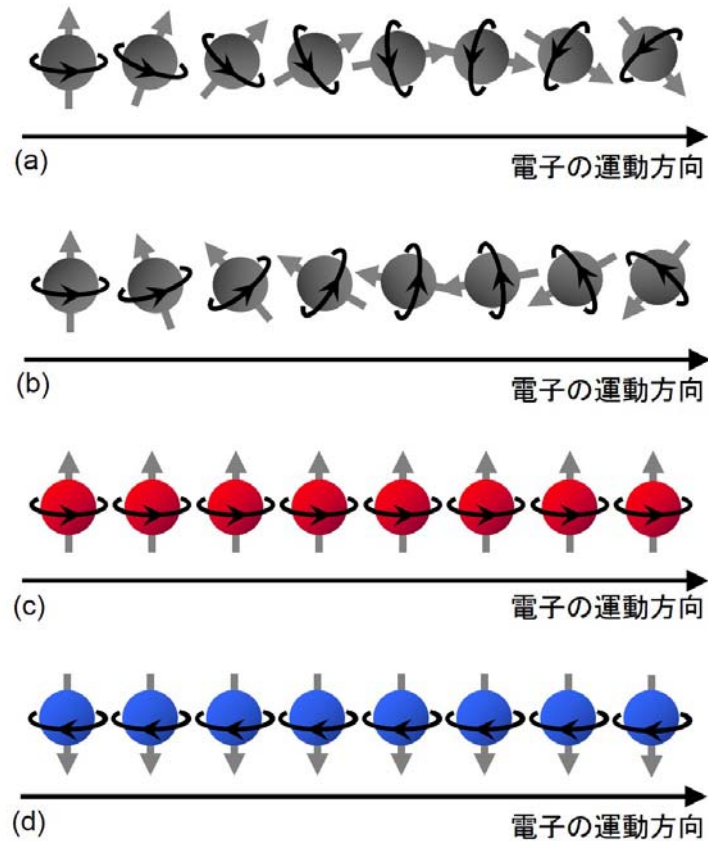
異種半導体をナノスケールで接合した材料で、量子力学に基づく比較的簡単な理論計算により物性予測を行い、目的とする物性や機能を持った半導体材料やデバイスを設計・開発する手法のこと。この手法の有効性は、ノーベル物理学賞を受賞した江崎玲於奈博士により提唱された。

### \*2 スピン軌道相互作用

静電場の中を高速で運動している電子は、磁場がゼロの環境でも、「電場」から「磁場」を感じ、スピンの持つ磁気モーメントが力を受けるという効果。運動している電子が「電場」から「磁場」を感じるのは、相対論的効果である。本研究で用いたInGaAsなどの狭ギャップ半導体では、この効果は真空中での効果に比べ100万倍程度の大きなものになることがある。

### \*3 電子のスピン

「電子スピン」の「スピン」の語源は、「自転」を意味するspinである。「スピンの向き」とは、「自転軸の向き」を意味し、「スピンの回転」とは「自転軸が回転する」という意味。下図(a)は、電子の運動と共に「スピンの向きが紙面に垂直な方向を軸にして回転している状態」、(b)は「スピンの向きが(a)とは逆方向に回転している状態」、(c) (d)は電子の運動に際して、それぞれ、「スピンの向きが上向き、下向きに固定された状態（赤、青で色付け）」を模式的に示している。(c) (d)が表すスピンを選別する手法を開拓したのが本研究である。



\*4 「スピン軌道相互作用，大きさ精密に決定。北大とNTT 次世代素子の開発加速」  
 日刊工業新聞 2011 年 3 月 15 日；  
 北海道大学プレスリリース： [http://www.hokudai.ac.jp/bureau/topics/press\\_release/110315\\_pr\\_ist.pdf](http://www.hokudai.ac.jp/bureau/topics/press_release/110315_pr_ist.pdf)

\*5 パリティ  
 偶奇性。ナイブには波動関数が偶関数か奇関数かということ。

\*6 エデルシュタイン効果  
 異なる物質の接合面や物質の表面などに形成される電子系（二次元電子ガス）に電流を流すことによって，試料が非磁性であるにも関わらず，試料全体に磁化を生じさせる効果。**エデルシュタイン効果の実際の観測**は，2004 年に加藤らによって行われている。“Current-Induced Spin Polarization in Strained Semiconductors”, Y. K. Kato, R. C. Myers, A. C. Gossard and D. D. Awschalom, Physical Review Letters **93**, 176601 (2004).

\*7 スピンホール効果  
 非磁性体の金属や半導体に電流を流すと，電流と垂直の方向に電子スピンの流れ（磁気の流れ）が発生する現象。電流の代わりにスピン流を利用するスピントロニクスへの応用が期待されている。

### \*8 ラシュバ効果, インターバンド・ラシュバ効果

半導体量子井戸中でのスピン軌道相互作用。電子は量子井戸中に閉じ込められているので、その方向（面直方向）の運動は抑制される。そのため、面直方向に強い電場をかけても電子が加速されることがなく、強力なスピン軌道相互作用を発現させることができる。二重量子井戸等で、パリティの異なる波動関数を結びつけるラシュバ効果を特に「インターバンド・ラシュバ効果」という。

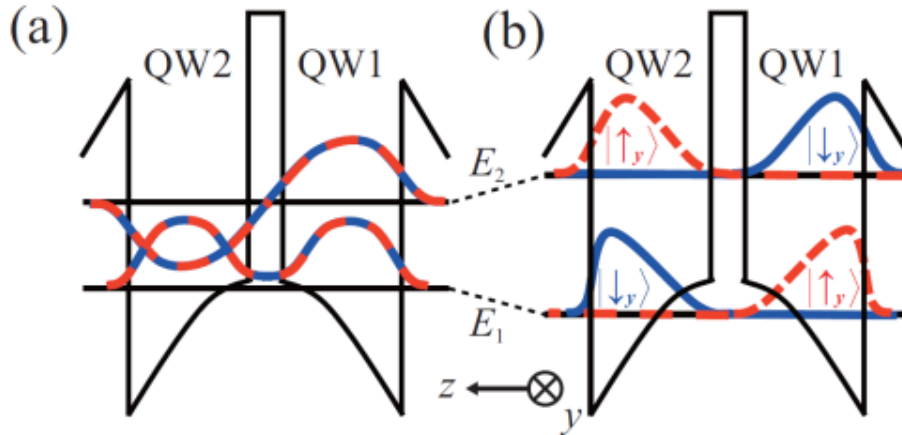


図 二重量子井戸中での電子の波動関数。

- (a) インターバンド・ラシュバ効果がない場合。波動関数には偶奇性がある。最低エネルギー ( $E_1$ ) の波動関数は偶関数、励起エネルギー ( $E_2$ ) の波動関数は奇関数である。
- (b) インターバンド・ラシュバ効果がある場合。パリティの異なる波動関数が結びつき、混成した結果、最低エネルギー ( $E_1$ )、励起エネルギー ( $E_2$ ) 共に、波動関数はスピン状態ごとに異なるものになる。

### \*9 リモートドーピング

半導体でのドーピング（結晶の物性を変化させるために少量の不純物を添加すること）を量子井戸から離れた場所で行うこと。量子井戸に集まる電子と、ドーピング層（ドーピングを行う層）に留まるイオン化不純物を空間的に分離することで、量子井戸に集まる電子は不純物散乱などの影響を受けにくくなり、電気伝導度が上昇する。半導体工学において用いられる既存技術。