

半導体スピントロニクス

半導体スピントロニクスでは、電子の「電荷」とともに「スピン」が重要な役割を果たします。本稿では、スピン軌道相互作用を用いたいくつかのスピンの関与するデバイスを紹介します。NTT物性科学基礎研究所では、半導体二次元電子ガス中のスピン軌道相互作用がゲート電圧による電界により制御可能であることを実験的に確認しました。この結果は、電界効果スピントランジスタなどスピン機能デバイスへ向けての第一歩となるものです。

にった じゅんさく
新田 淳作

NTT物性科学基礎研究所

エレクトロニクスから スピントロニクスへ

半導体と磁性体は現在のエレクトロニクスにとって欠かせない材料です。磁性体では、電子スピンの重要な役割を果たしています。安定な磁化（マクロなスピンの向き）の履歴特性を示すことからこれを用いた、不揮発性の磁気メモリが開発されてきました。最近では、MRAM（Magnetic Random Access Memory：不揮発性磁気メモリ）が注目されています。これは、2つの磁性体電極を絶縁層を介して接合をつくり、このトンネル磁気抵抗が2つの磁性体電極のスピンの向き（平行か反平行）によって大きく異なることを利用しています。しかしながら、磁性体金属を用いて論理回路のような、能動デバイスをつくることは困難です。

一方、半導体を用いることにより論理機能を構成することが可能です。その理由は、ゲート電極（第三端子）の電界により半導体チャネルの特性を自在に制御できることに由来します。実際、トランジスタはダイオードと異なり、第三端子を持っており、この第三電極によるチャネルの制御性が半導体

エレクトロニクスに大きな進展をもたらしました。また半導体エレクトロニクスは、サイズを小さくすれば浮遊容量が小さくなり集積回路の動作速度が向上する、消費電力が小さくなるというスケールリング則にそって急速に発達してきました。しかしながら早晩このスケールリング則には限界がくることが予想されています。

そこで、従来の延長にない全く異なった方法で、超高速、省電力な機能デバイスを実現することが必要となってきます。半導体エレクトロニクスでは電子の持つ「電荷」、磁気デバイスでは「スピン」が重要な役割を果たしてきました。半導体スピントロニクスは、従来のエレクトロニクスとスピンの効果を結びつけるものです。我々は、このスピンをゲート電極による電界によって制御する方法を確立することが、将来のエレクトロニクスにとって重要と考えました。本稿では、半導体中のスピン軌道相互作用をゲート電圧によって制御した実験結果を紹介するとともに、これをベースとする電界効果スピントランジスタなどの動作原理を説明します。

電界効果スピントランジスタの 動作原理

GMR（Giant MagnetoResistance：巨大磁気抵抗効果）の発見は、スピンの自由度が電気抵抗に大きな影響をもたらすことを示しました。すなわち、2つの磁性体のスピンの向きが、平行か反平行かによって電気抵抗が大きく異なることを発見したのです。このGMRの重要性は、スピンの向きに情報を担わせることが可能であることを示した点にあります。しかしながらこのGMRは、本質的に二端子素子であり磁性体のスピンの向きを磁界によって制御する必要があります。

このように、微小な磁石である電子のスピンはこれまで磁界によって制御されてきました。DattaとDasによって提案された電界効果スピントランジスタ（スピンFET）⁽¹⁾はスピンの向きをゲート電圧によって制御するという画期的なものです。

スピンFETの概念図を図1に示します。このデバイスの特徴は、ソース、ドレイン電極が磁性体からなり半導体二次元電子ガスチャネルは、スピン軌道相互作用の強い材料を用いるところ

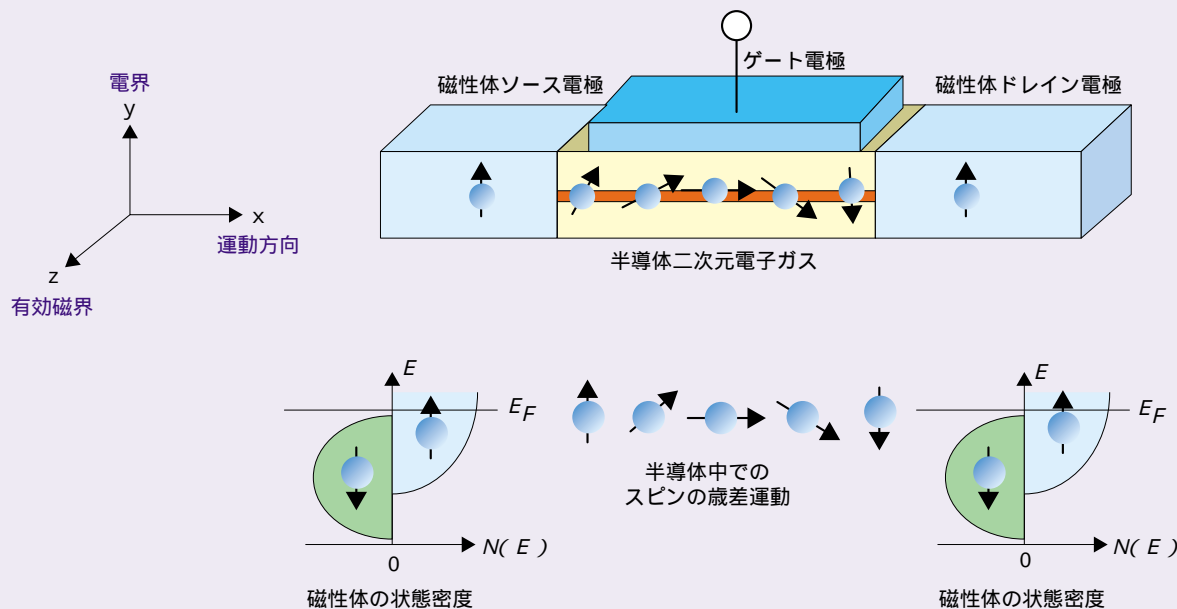


図1 スピンFETの概念図

にあります。磁性体電極からスピン偏極した電子を半導体二次元電子ガスへと注入し、このスピンの向きをスピン軌道相互作用による有効な磁界によって回転させようとするものです。ゲート電極はスピン軌道相互作用の強さを制御するためにあり、この電界により注入したスピンの向きをドレイン電極のスピンの向きと平行にしたり、反平行にしたりすることによりドレイン電流の大きさを変えます。例えば、キャリアスピンの向きが反転すると磁性体ドレイン電極には反転した電子スピンを受け入れる状態密度がないためドレイン電流は流れません。

一方、ゲート電圧によってスピンの向きを360度回転させると磁性体ドレイン電極と同じ向きになり、ドレイン電極に電流は流れこむことができます。すなわちスピンの回転角度によって電流のオン・オフを制御しようとするものです。もし100%スピン偏極したスピンの注入されたとすると、ゲート電圧をピンチオフさせるほど大きな電圧

をかけなくとも、スピンを反転するだけの少ないゲート電圧で電流を遮断することができます。また磁性体電極部は不揮発性のメモリとして使用することも可能と考えられます。あるいは、磁性体ソース・ドレイン電極のスピンの向きを変えることにより、書き換え可能な論理回路ができる可能性もあります。

しかしながら、このスピンFETを実現するためには、まず、ゲート電圧によってスピン軌道相互作用が変化するか否か、次に磁性体電極からスピン偏極した電子をどのくらいの効率で注入できるのか、という2つの点を明らかにする必要があります。

スピン軌道相互作用のゲート電圧による制御

磁界をかけると、スピンの縮退がとけ磁界と平行なスピンと反平行スピンの間にはエネルギー差ができることが知られています。スピン軌道相互作用は相対論的な効果で、電界中を電子が高速に運動することにより、電界

E と運動方向 v に垂直に有効な磁界 B_{eff} を感じるようになります。これは、 $B_{eff} = v \times E$ によって与えられます。したがって、この電界が外部から制御できれば、スピン軌道相互作用の強さを変え、有効な磁界の周りでのスピンの歳差回転運動^{*1}を制御できることになります。III-V族半導体では、この電界の起源として、Dresselhausによって提唱された結晶場による電界を起源とするスピン軌道相互作用と、Rashbaによって提唱されたヘテロ界面における電界を起源とするスピン軌道相互作用が知られています。Dattaらによって提案されたスピンFETはこのRashbaのスピン軌道相互作用を仮定しているのですが、実際にスピン軌道相互作用がゲート電界によって制御できるかどうか示した実験結果はありませんでし

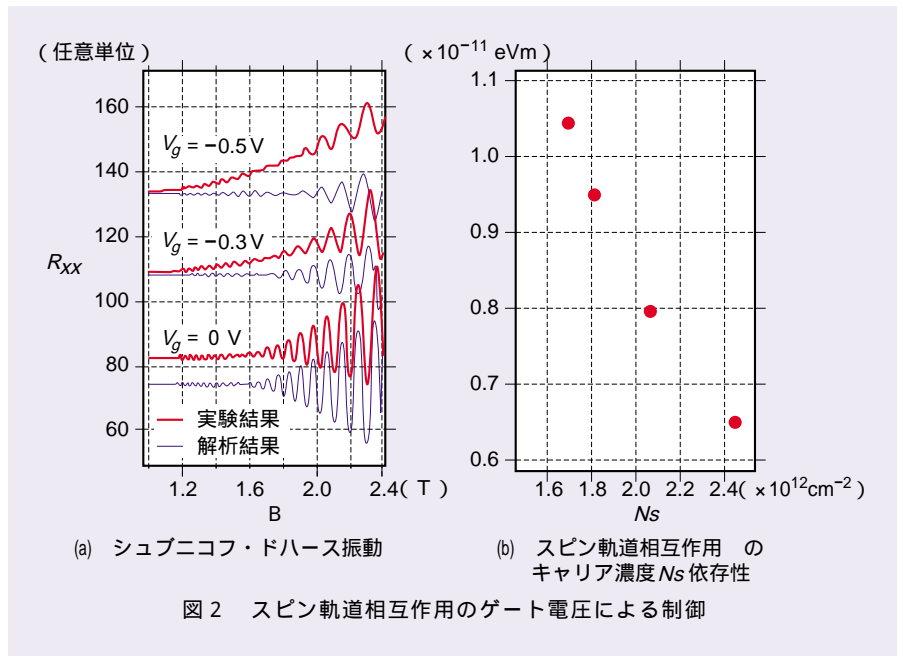
*1 歳差回転運動：こまの回転する軸が地球の重力の方向からずれると首ふり運動しますが、これを歳差運動と呼びます。自転するスピンはその軸が磁界の方向からずれると、磁界の方向の周りにスピンも歳差運動を行います。

た。我々は、InGaAs（インジウムガリウム砒素）/InAlAs（インジウムアルミニウム砒素）ヘテロ構造を最適化し、Rashbaのスピノ軌道相互作用が重要な役割を果たしていることを示すとともに、スピノ軌道相互作用の強さがゲート電圧によって制御可能であることを初めて実験的に確認しました⁽²⁾。

スピノ軌道相互作用の強さは、図2(a)に示すInGaAs二次元電子ガスチャネルで観測したシュブニコフ・ドハース振動と呼ばれる磁気抵抗振動 R_{xx} に現れた、ビートパターンを詳細に解析することにより求めていきます。図2(a)の赤線は実験結果、青線はRashbaのスピノ軌道相互作用を考慮に入れた解析結果を示します。実験結果は理論解析とよく一致し、これらの比較によりスピノ軌道相互作用のゲート電圧依存性を求めました。図2(b)は、スピノ軌道相互作用の強さを表すパラメータをキャリア濃度 N_s でプロットしてありますが、キャリア濃度はゲート電圧 V_g に対応しています。図2(b)から明らかのようにスピノ軌道相互作用の強さが V_g で制御できることが分かります。今まで、スピノ軌道相互作用は物質固有のパラメータと考えられてきたのですが、半導体ヘテロ構造の設計とゲートによる電界によって制御可能なパラメータであることを示すことに成功しました。我々は、弱反局在効果^{*2}を用いた解析からもスピノ軌道相互作用は制御可能なパラメータであることを確認しています⁽³⁾。

上記で求めた、半導体チャネルの長

*2 弱反局在効果：電子は粒子であるとともに波の性質を持っています。低温になると波の性質を持った電子は、半導体中の不純物散乱により干渉し、定在波をつくります。この定在波により電流が流れにくくなる状態を局在効果と呼びます。スピノ軌道相互作用の強い半導体では、スピノによる干渉効果が加わり、局在効果とは反対に電流を流しやすくする弱反局在効果をもちます。



さを L とすると、スピノ軌道相互作用からスピノの回転角度を次式から求めることができます。

$$= \frac{2 m^* L}{h^2}$$

例えばスピノFETの半導体チャネル長を $L = 1 \mu\text{m}$ とすると、ゲート電圧 $V_g = 0\text{V}$ ($N_s = 2.45 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$)でスピノの回転角度 $= 2.4$ となりますが $V_g = -0.5\text{V}$ ($N_s = 1.83 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$)で $= 3.6$ が得られます。

磁性体電極から二次元電子ガスへのスピノ注入

半導体はもともとスピノ偏極していないため、電気的にスピノ偏極をつくり出す手段として磁性体電極からのスピノ注入が目ざされ多くの実験がなされてきました。しかしながら、拡散的な半導体と磁性体の界面では、2つの材料の伝導度の大きな違いがスピノ注入を大きく妨げることが理論的に示されました。一方、磁性体と半導体の間にトンネルバリアを介してスピノ注入することにより、スピノ注入の問題点は解決できるという理論も示されてい

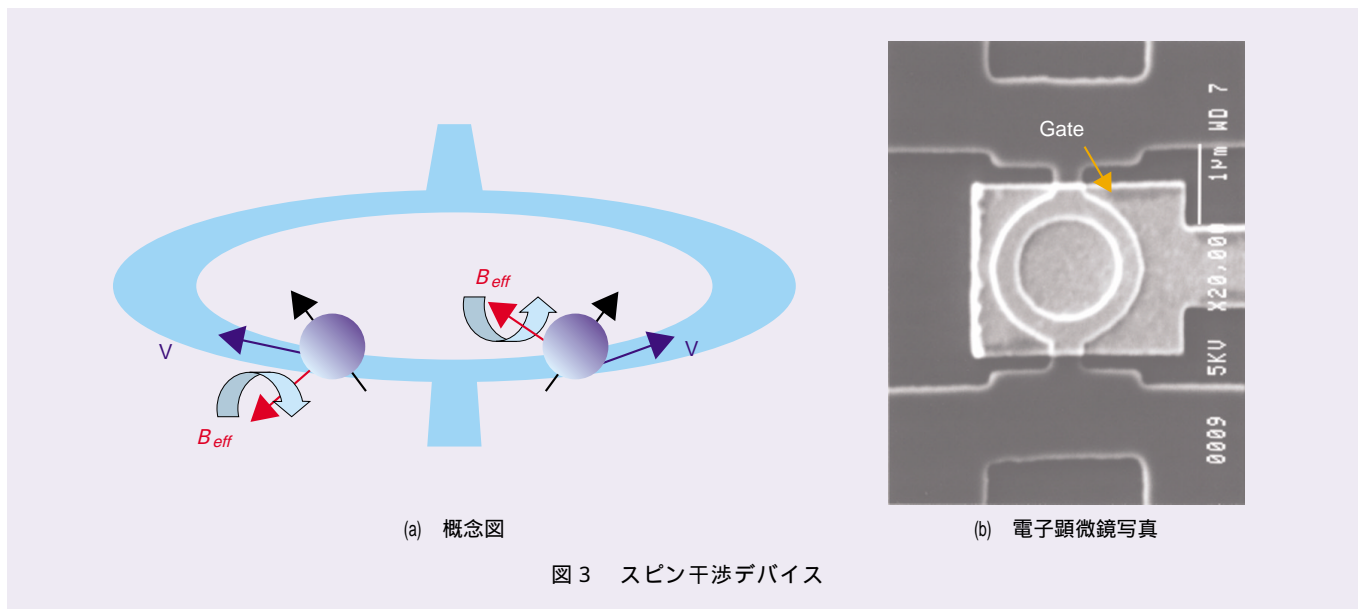
ます。これを受け、磁性体と半導体の間にトンネルバリアを設けることにより、少しずつスピノ注入効率は改善されているのですがまだ十分ではありません。

一方、我々は磁性体電極を一切用いず、三重障壁共鳴トンネルダイオード構造を用いることにより、スピノ軌道相互作用によってスピノ分離した状態とスピノの排他律を用いることにより、100%スピノ偏極した電子を取り出せるスピノフィルタを提案して⁽⁴⁾、実験を行っているところです。

スピノ干渉デバイス

スピノの回転角度は、スピノの位相と密接な関係にあります。スピノ軌道相互作用によりスピノは歳差運動を行います。我々は図3(a)に示すようなリング構造を用いることにより、スピノの干渉を制御するデバイスが構成できることを提案しました⁽⁵⁾。

図3(a)にスピノ干渉デバイスの概念図を示します。電子スピノは、スピノ軌道相互作用により、電界と運動する方向両方に垂直な方向に有効な磁界を感じます。このため分岐点で時計回



(a) 概念図

(b) 電子顕微鏡写真

図3 スピン干渉デバイス

り、反時計回りに分波した電子スピンは、分波した直後、有効磁界の向きが逆向きとなるためそれぞれ逆向きの歳差運動します。この電子スピが出会う干渉ポイントでは、それぞれのスピンの向きは異なっており、このスピンの相対角度をゲート電圧で制御することによりスピンの干渉によりコンダクタンス^{*3}を変調することが可能となります。このデバイスの特徴は、スピン偏極した電子を用いる必要がないため、磁性体からのスピン注入が不要なことです。すべてのキャリアがスピン干渉に関与することを理論的に示すことができます。量子コンピュータでは、量子ビットと呼ばれる情報の担体はスピン上向き下向きの重ね合わせ状態を用いますが、スピン干渉デバイスによりスピンの位相情報をコンダクタンスにより検出することが可能となると考えられます。図3(b)は、実際に作製したスピン干渉デバイスの電子顕微鏡写真です。最近、多数の干渉ループを用いることによりスピン干渉効果を確認したところです。

*3 コンダクタンス：電気伝導度，電気の流れやすさを表す量。

今後の展開

これまで、微小な磁石である電子スピンは磁界によって制御されてきました。我々は、スピン軌道相互作用がゲート電圧による電界によって制御可能であることを示すことに成功しました。このスピン軌道相互作用は電子スピンの有効な磁界として働くため、スピンの回転を電界により制御することが可能となります。この特性を利用すれば、これまで半導体エレクトロニクスでは無視されてきた電子スピンを用いたスピンFETなどの機能デバイスが可能となります。このように、電界によってスピンを制御する方法を確立することが、将来電子スピンを量子ビットとする量子コンピュータにとって重要と考えます。

参考文献

- (1) S.Datta and B.Das : " Electronic analog of the electro-optic modulator ," Appl. Phys. Lett. , 56 , pp. 665- 667 , 1990 .
- (2) J.Nitta, T.Akazaki , H.Takayanagi , and T.Enoki : " Gate control of spin-orbit interaction in an inverted InGaAs/InAlAs heterostructure ," Phys. Rev. Lett. , 78 , pp. 1335-1338 , 1997 .
- (3) T.Koga , J.Nitta, T.Akazaki , and H.Takayanagi : " Rashba spin-orbit coupling probed by the weak antilocalization analysis in InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells as a function of

quantum well asymmetry ," Phys. Rev. Lett. , 89 , pp. 046801-046804 , 2002 .

- (4) T.Koga , J.Nitta , H.Takayanagi , and S.Datta : " Spin-Filter Device Based on the Rashba Effect Using a Nonmagnetic Resonant Tunneling Diode ," Phys. Rev. Lett. , 88 , pp. 126601-126604 , 2002 .
- (5) J.Nitta , F.E.Meijer , and H.Takayanagi : " Spin interference device ," Appl. Phys. Lett. , 75 , pp. 695- 697 , 1999 .



新田 淳作

半導体スピントロニクスの研究は始まったばかりです。従来のエレクトロニクスとは全く異なった動作原理で超高速、省電力化を可能とするスピンデバイスの探求を進めていきます。

問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
 TEL 046-240-3519
 FAX 046-270-2363
 E-mail nitta@will.brl.ntt.co.jp
 URL <http://www.brl.ntt.co.jp/people/nitta/>