

半導体表面上で電子のコマ回し - スピントロニクスにブレークスルー! -

【概要】次世代半導体デバイスとして、電子スピンを利用したスピントロニクスが注目されていますが、千葉大学の坂本一之准教授は、金沢大学の小田竜樹准教授と広島大学の木村昭夫准教授とともに、半導体表面の面内に寝ていると考えられていた電子スピンの、回転するコマが立ち上がるように突如垂直に屹立することを世界で初めて観測しました。坂本准教授らの研究結果はこれまで報告のない新しい量子効果であるのみでなく、この結果を用いることによりスピントロニクスにおいて電子スピンの輸送効率を飛躍的に高めることが出来、デバイスの高速化・多機能化および低エネルギー消費化を実現することが可能となります。

【背景】

ナノメートルの世界に飛び込むと、物質の次元の低下に起因した新奇の物理現象が現れることがあります。次世代半導体スピントロニクス※1 デバイスに利用される、二次元非磁性体での電子のスピン偏極※2 の発現もその1つです。このスピン偏極の起源はラシュバ効果※3 と呼ばれ、“理想”二次元電子系※4 においては面内のみスピンの向きが向きます。また、電子スピンの輸送効率と密接に関連するラシュバ効果の大きさは、軽元素基板の上に重元素を吸着させるなど、軽元素と重元素を組み合わせることによって大きくなることが知られています。しかしながら、“半導体”スピントロニクスへの利用が期待されるにもかかわらず、ラシュバ効果のこれまでの研究は金属を対象としたもののみでした。そこで同研究グループは軽元素であるシリコンの上に重元素のタリウムを吸着させた半導体的な特性を示す二次元電子系※5 での研究を行いました。

【研究手法と成果】

研究グループはスウェーデンの放射光施設 MAX-lab および広島大学の放射光科学研究センターにおいて角度分解光電子分光※6 とスピン分解光電子分光※7 という2つの実験手法と、第一原理計算※8 による理論的手法を用いてタリウム吸着シリコン表面での電子バンド※9 と電子スピン※2 を調べました。その結果、これまで固体物理学において、どのような二・三次元物質でも観測されたことのない不思議な電子バンド分裂※10 を観測し、この不思議なバンド分裂のところのみ電子スピンの向きが表面に垂直な方向※10 を向くことがわかりました。これらは、“現実の”二次元電子系においては、ある特定の波長をもつ電子のスピンが面に垂直に屹立することを世界で初めて観測した結果です。また、元素の特性を加えた“拡張ラシュバ効果”を理論的に考察することにより、表面の対称性※11 が電子スピンの屹立の要因であることがわかりました。この現象は、電子をコマ・電子スピンをコマの軸に例えると、氷のように滑らかな表面上では回転していても立ち上がることができなかったコマが、周期的な凹凸のある表面を用意することにより、ある地点で急激に立ち上がることが出来たとイメージすることができます。

【研究成果の意義】

1. 対称性により理解できる；この研究結果が（特殊なものではなく）普遍的な新しい量子効果であることを意味しています。つまり、今回用いた系と同じ対称性を有する系であれば、電子バンドの分裂に大小の差はあるものの、同様の屹立するスピンの得られます。
2. 通常のラシュバ効果では面内の様々な方向を向いているスピンの存在し、異なる向きのスピンによる散乱のためにスピン輸送効率が悪くなっていますが、屹立したスピンはそのような散乱を受けにくいことからスピン輸送効率が飛躍的に向上することが期待されます。例えば重元素基板上にグラフェン※12 を吸着させ、本研

究と同じ対称性を持つような系を作成することにより、これまで考えられていたものより**高移動度・高効率・低エネルギー消費のスピントランジスター**の作成が期待できます。

3. 面内スピンと屹立スピンを別々に抽出することができれば、**デバイスのさらなる高速化・多機能化**が期待できます。

本研究は、科学研究費補助金、基盤研究(A) 20244045、の助成を受けて実施されました。

また、本研究成果は、平成21年3月3日（金）発行の米科学誌「Physical Review Letters」にオンラインで掲載されました。（米国時間）

「Physical Review Letters 102, 096805-1-4 (2009)」

つきましては、下記のとおり記者発表を行いました。

記

<日時> 平成21年2月28日（土）16時00分

<場所> 千葉大学 工学系総合研究棟1階会議室（別紙参照）

<説明者>

千葉大学 大学院融合科学研究科 准教授 坂本 一之

金沢大学 理工学研究域 准教授 小田 竜樹

広島大学 大学院理学研究科 准教授 木村 昭夫

<発表形式> 資料配付（レク付き）

【本研究に関するお問い合わせ先】

千葉大学 大学院融合科学研究科 ナノサイエンス専攻

准教授 坂本一之（さかもと かずゆき）TEL 043-207-3893 FAX 043-207-3896

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33 E-mail kazuyuki_sakamoto@faculty.chiba-u.jp

【報道に関するお問い合わせ先】

千葉大学 工学部総務グループ

塚瀬幸雄

TEL 043-290-3043 FAX 043-290-3039

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33 E-mail tsuka@office.chiba-u.jp

【解説】

※1 スピントロニクス

スピンとエレクトロニクスを合わせた造語。電子の有する電荷の自由度のみでなく、スピンの自由度も利用する分野（図1）。

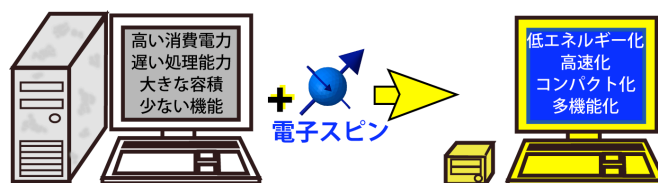


図1 スピントロニクスとは？ パソコンの場合

※2 スピン偏極・電子スピン

電子がもつ量子力学的な自由度の1つである電子スピンがある特定の方向に偏ること。電子スピンは電子の自転に由来すると例えることができる。通常、非磁性体物質ではスピンは偏極していない。

※3 ラッシュバ効果

1960年にE. Rashbaによって提唱された効果。二次元電子系において、面直方向に電位勾配を与えることによって非磁性体であってもスピン偏極電子が生じ、縮退していた電子バンド（※9）が分裂する（図2）。波数は表面平行方向であり、スピン偏極ベクトルは二次元面内のみを向いている。凹凸のない表面や界面などの理想的な二次元系においては、面直方向の対称性が破れていることによって電位勾配が生じ、スピン偏極電子が生じる。

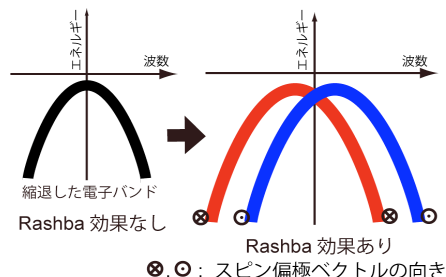


図2 ラッシュバ効果による電子バンドの分裂

※4 二次元電子系

固体では原子が三次元に配列していることにより、電子も三次元的な構造を有するが、物質表面や界面、超薄膜などでは原子が二次元的な周期性しか持たないため、電子も二次元構造を有する。理想二次元系は、完全に等方的な系を指し、現実的な二次元とは擬二次元的な原子配置により二次元面内に異方性を有する系を指す。

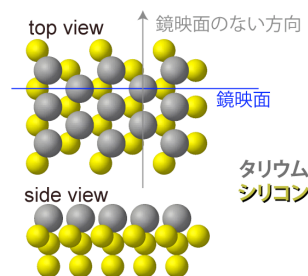


図3 タリウム吸着シリコン表面

※5 タリウム吸着シリコン表面

シリコン表面にタリウムを1原子層吸着させた時の原子構造を図3に示す。タリウム原子層とタリウム原子と結合しているシリコン原子1層を合わせた擬二次元系での鏡面对称性の有無が方向により異なる。

※6 角度分解光電子分光

物質に光を当て、物質外に飛び出してくる光電子の放出角を変えながら運動エネルギーを測定することによって、電子バンドを求める手法。

※7 スピン分解光電子分光

物質に光を当て、物質外に飛び出してくる光電子の運動エネルギーとスピン状態を測定することによって、電子スピンに関する情報を求める手法。

※8 第一原理計算

計算対象となる系を構成する元素の原子番号と系の構造を入力パラメータとし、実験結果を参照しないで系の電子状態を求める最新的手法。

※9 電子バンド

固体中の電子のエネルギーと波数の関係で、電子輸送など固体の物性を特徴づけるもの。

※10 不思議な電子バンド分裂

図4に示すように、通常ラッシュバ効果のような波数方向の分裂（図2）ではなく、ある狭い波数領域でエネルギー方向の分裂が観測された。スピンはこの不思議な分裂のところでのみ表面垂直方向に屹立し、他の波数領域では面内に寝ている。

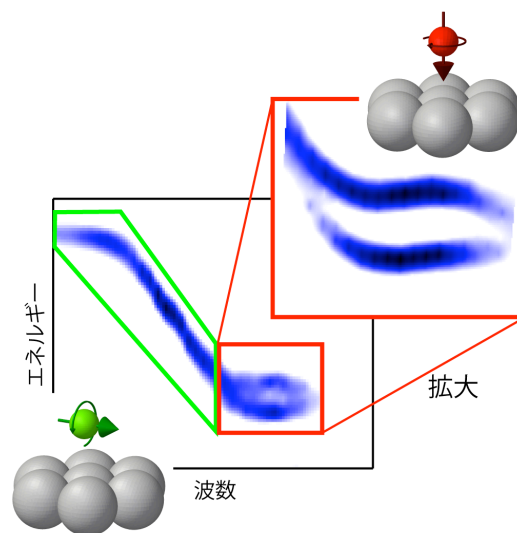


図4 タリウム吸着シリコン表面の電子バンド。

→ ↓ はスピンの向きを示す。

※11 表面の対称性

研究対象の表面は図3に示すように三回対称性（120°回転すると元の構造と同じになる）を有するが、スピンの屹立するのは図中の鏡映面とならない方向（鏡映対称性のない方向）のみである。このような“高度に制御された対称性”がスピンの屹立の要因である。

※12 グラフェン

ベンゼン環を2次元平面に敷き詰めた6員環シート（単層グラファイト）で、高い電荷移動度を有する。