

2014年11月13日

新奇材料トポロジカル絶縁体中のスピン流を電气的に取り出すことに成功

～次世代情報デバイスの実現に向けて大きく前進～

京都大学大学院工学研究科電子工学専攻の安藤裕一郎[あんど う ゆういちろう]助教・白石誠司[しらいし まさし]教授のグループは大阪大学産業科学研究所の安藤陽一[あんど う よういち]教授のグループらと共同で、半導体でも金属でもない新奇な材料として近年大きな注目を集めている3次元トポロジカル絶縁体なる材料の中で流れるスピン流を電气的に取り出すことに成功しました。3次元トポロジカル絶縁体とは材料内部は半導体の性質を示す一方、材料表面は金属の性質を示す新奇な物質です。この表面金属部分では電子が極めて早く移動できるほか、情報伝播にエネルギーを消費しない永久スピン流が流れていると予測されています。更に電流の印加方向によってスピンの向きを制御できるスピン流も生成できると期待されており、スピンを用いた新しいエレクトロニクスデバイスへの応用が期待されています。今回の研究ではトポロジカル絶縁体の金属状態に電流を流して生成したスピン流を通常の金属薄膜内（ニッケル鉄合金）に電气的に取り出すことに成功しました。また電流の印加方向によってスピンの向きを制御することにも成功しました。スピンを用いた次世代情報デバイスの実現に向けた極めて重要な成果です。

本研究成果は米国化学会科学誌 Nano Letters 誌の電子版に11月1日に公開されました。

論文タイトル

Electrical detection of the spin polarization due to charge flow in the surface state of the topological insulator $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$

トポロジカル絶縁体 BiSbSeTe の表面状態における電流誘起スピン偏極の電气的観測

Yuichiro Ando, Takahiro Hamasaki, Takayuki Kurokawa, Kouki Ichiba, Fan Yang, Mario Novak, Satoshi Sasaki, Kouji Segawa, Yoichi Ando, and Masashi Shiraishi

安藤裕一郎[1], 濱崎嵩宏[2], 黒川孝幸[2], 市場昂基[2], 楊帆[3], マリオ・ノヴァック[3], 佐々木聡[3], 瀬川耕司[3], 安藤陽一[3], 白石誠司[1]

[1] 京都大学大学院工学研究科

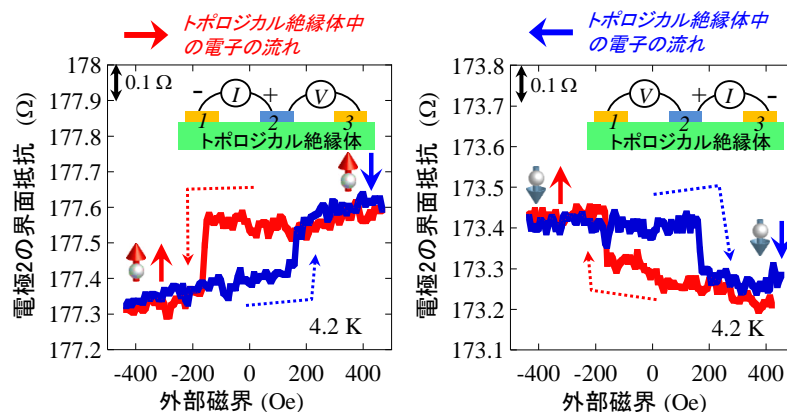
[2] 京都大学特別研究学生（大阪大学大学院基礎工学研究科所属）

[3] 大阪大学産業科学研究所

1. 研究の背景と意義

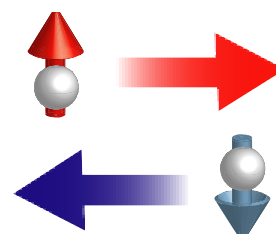
現代のエレクトロニクス産業はトランジスタに代表される半導体素子により支えられていますが、近年の地球環境問題の深刻化に伴い低消費エネルギー論理素子の開発の重要性が増しています。素子の消費エネルギーを抑えるには、電子が物質の中を運動するときに発生するジュール熱を減らす必要がありますが、1つのアイデアとして電気信号の代わりに電子がもつ磁石としての性質(スピン)を使う「スピントロニクス(*1)」という新しい技術に大きな注目が集まっています。磁石にN極S極があるように、電子のスピンには上向きと下向きの状態があり、これがデジタル信号の「0」と「1」に対応させることが可能です。スピントロニクスデバイスの実現のためには、素子構成材料の開発が非常に重要ですが、最近の研究によってスピントロニクス素子の実現に資する新規材料として「トポロジカル絶縁体(*2)」という新しい性質を持った物質があることが分かってきました。トポロジカル絶縁体は、材料表面は金属、内部(バルク)は半導体という風変わりな性質をもった新しい材料ですが、表面の金属部分には純スピン流(*3:電荷の流れを伴わないスピン角運動量のみの流れ)が永久に流れている、いわゆる永久スピン流が存在することが理論的に予想されています。更に表面状態に電流を流した場合には、電流の方向によってスピンの向きを制御することが可能なスピン流が生成されることが期待されていました。これらは低消費エネルギー論理素子の実現において非常に魅力的な特性であり、トポロジカル絶縁体中のスピン流を電気的に取り出すことが強く希求されてきました。

研究グループは大阪大学で育成した3次元トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$ (BSTS, Bi:ビスマス, Sb:アンチモン, Te:テルル, Se:セレン)の単結晶試料を用いて電気的にスピン流の取り出しが可能な素子を作製しました。このBSTS試料は他のトポロジカル絶縁体に比べて材料表面のスピン流を生成しやすいという特徴を有しており、本実験に最も好適な材料になります。実験では、下図に示すようにスピン流の取り出しに起因する磁気抵抗効果(スピン流のスピンの向きと観測する電極のスピンの向きに対応する抵抗の変化)が明瞭に観測されました。また電流の印加方向によってスピンの向きを制御することにも成功しました。



2. 今後の展望

今回の研究成果は、トポロジカル絶縁体が有するスピン流が情報伝播や演算などの電氣的論理素子に利用可能であることを示す結果であり、この新材料が本質的に次世代の情報デバイスの創出に好適な材料であることが示されたことに大きな意義があります。この成果により次世代の省エネ技術であるスピントロニクスデバイスの実現可能性がさらに高まると期待されます。



本成果は、文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究「ナノスピン変換科学」(研究総括:大谷義近・東京大学物性研究所教授) A02 班「電氣的スピン変換」(研究代表:白石誠司), 文部科学省科学研究補助金・新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」(研究総括:前野悦輝・京都大学教授), 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(S)「トポロジカル絶縁体・超伝導体における新奇な量子現象の探求」(研究代表:安藤陽一), によって得られました。

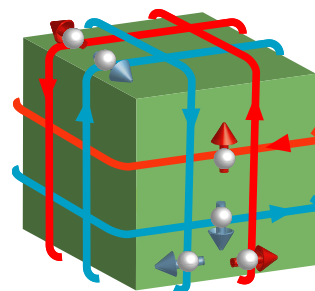
<用語解説>

*1 スピントロニクス

電子の磁氣的性質であるスピンを利用して動作する全く新しい電子素子(トランジスタやダイオードなど)を研究開発する分野のことです。電子スピンの上向き/下向き状態を、電気信号の「0」と「1」に置き換えて信号処理を行います。電子スピンは応答が早く、熱エネルギーの発生も非常に少ないので、これを利用したスピントロニクス素子は、超高速、超低消費電力の次世代電子素子の最有力候補とされています。

*2 トポロジカル絶縁体

固体は物質内の電子状態によって、金属、半導体、超伝導体と分ける事ができますが、位相幾何(トポロジー)の概念を物質の電子状態の解析に取り入れる事で、これまでの絶縁体とは一線を画す新しい絶縁体物質として 2005 年に提唱されました。3次元トポロジカル絶縁体では表面に、2次元トポロジカル絶縁体では試料の端に純スピン流が永久に流れます(右図)。これまでの物質にはないスピンの応答や制御ができることで、新しい量子現象やスピントロニクス素子開発へのアプローチが可能な材料として、国内外で精力的に研究されている材料です。



*3 純スピン流

電子には電荷という属性に加えてスピンという属性があり、スピンにはアップスピンとダウンスピンの2値を取ることが知られています。今、アップスピンを持つ電子は右へ、ダウン

スピンを持つ電子は左へ流れる状況（右図）を考えると、電子の有する電荷は左右に1つずつ流れるので全体では電荷の流れはありません。一方、スピンは「右に流れるアップスピンと左に流れるダウンスピンは物理的に等価＝同じものとみなせる」という特徴があるために、図のような運動ではアップスピンは2個右に流れる、とみなすことができます（これはダウンスピンが2個左に流れる、とみなしても差し支えありません）。つまり、電荷は流れなくてもスピンは流れる、という状況が実現します。従来のエレクトロニクスは電荷の流れ＝電流を制御して発展してきましたが、電荷の流れは抵抗の存在によりエネルギー消費を伴います。一方、この純スピン流は電荷の移動がないために理想的には情報伝播にエネルギー消費を伴いません。そのためこの純スピン流を創出・制御することで超低消費電力情報素子が実現できることが期待され、現在非常に盛んに研究されています。