

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：12608
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2014
課題番号：23740236
研究課題名(和文)トポロジカル絶縁体のスピン物性

研究課題名(英文)spin physics of topological insulators

研究代表者
横山 毅人(Yokoyama, Takehito)

東京工業大学・理工学研究科・助教

研究者番号：30578216
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年発見されたトポロジカル絶縁体は、物質の新しい状態として注目を集めている。その特徴は、表面電子が低エネルギーでディラック方程式に従うことである。ディラック方程式に従う電子の運動量とスピンは結合しており、トポロジカル絶縁体を用いたスピントロニクスが発展が期待されている。申請者は強磁性体をトポロジカル絶縁体に接合した系において、磁化と表面の輸送現象の関係について種々の現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Topological insulators are new states of matter where the surface electrons obey the Dirac equation at low energy. The spin and momentum of the Dirac fermions are locked, and hence with topological insulators, one can expect interesting spintronics effects. I have investigated spin related phenomena in topological insulators with ferromagnets attached and clarified the relation between the magnetization and surface transports.

研究分野：物性理論

キーワード：トポロジカル絶縁体

1. 研究開始当初の背景

近年発見されたトポロジカル絶縁体は従来知られているバンド絶縁体とトポロジカルな意味で異なる状態であり、物質の新しい状態として注目を集めている。その特徴は時間反転対称性を破らない摂動に対してロバストな表面状態の存在であり、表面の電子は低エネルギーで Dirac 方程式に従うことが知られている。Dirac 方程式は従来の金属系でスピン軌道相互作用が強い極限に対応し、この方程式に従う電子は、運動量とスピンの間に 1 対 1 の対応があり、電荷とスピンの自由度の結合により新奇な物性を目指すスピントロニクス分野への応用が期待されている。実際に申請者はこのような観点から先駆的な研究を行ってきた。

2. 研究の目的

トポロジカル絶縁体に特有の物性として、新奇なスピン物性を明らかにする。実際、トポロジカル絶縁体に固有の現象は今現在観測されておらず、このような予言が望まれている。しかし、国内外を問わずスピントロニクスという観点からトポロジカル絶縁体を研究しているグループは少ない。そこで、申請者はトポロジカル絶縁体のスピン物性について、以下の 4 つの系を調べることにする。

(1) トポロジカル絶縁体上の強磁性体接合における熱輸送の研究。

トポロジカル絶縁体であることが発見された Bi 系の物質は熱電効率が良いことが知られており、スピンと熱流の結合による高性能デバイス実現を目指すスピントロニクスという観点からも重要な物質である。そこで、本研究ではトポロジカル絶縁体上に強磁性体/強磁性体接合を作り、接合を流れる熱流が 2 つの磁化の向きによりどのように制御できるか調べることを目的とする。

(2) トポロジカル絶縁体の逆ファラデー効果の研究。

金属に円偏光を照射すると、その偏光の向きに依存した磁化が生成されることが知られており、逆ファラデー効果と呼ばれている。近年のレーザー技術の発達により円偏光したレーザー光を用いて磁性体のスピンを制御することが可能となった。トポロジカル絶縁体表面の電子はスピンの運動量の向きに直交しており、特異な逆ファラデー効果が期待される。そこで、本研究ではトポロジカル絶縁体表面に光を照射し、逆ファラデー効果を調べることを目的とする。

(3) トポロジカル絶縁体を用いたマグノン流の研究。

近年、絶縁体を用いたスピントロニクスの

研究が盛んである。絶縁体では電流が流れないため、ジュール熱を発生しない。これにより散逸のない輸送現象が期待されるためこのような研究が注目を集めている。また、最近磁性絶縁体を流れるスピン波によりスピン流が運ばれることが実験的に確認された。そこで、本研究ではトポロジカル絶縁体に強磁性(絶縁)体を載せた系においてトポロジカル絶縁体表面に交流電流を流した時、強磁性体に誘起されるマグノン流を調べることを目的とする。

(4) トポロジカル絶縁体の電流誘起磁壁移動の研究。

最近、磁性元素をドーブしたトポロジカル絶縁体において質量項をもつ Dirac 電子が観測された。これはトポロジカル絶縁体の表面 Dirac 電子と磁性の結合が実際に実験的に検証可能になったことを意味する。一方、スピントロニクス分野において、電流による強磁性体中の磁壁の駆動が盛んに研究されている。最近申請者はトポロジカル絶縁体の表面電子と結合した磁化の従う運動方程式(Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式)を導出した。本研究ではこの方程式を用いてトポロジカル絶縁体に磁化のドメイン構造がある場合の電流誘起磁壁移動を調べることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) トポロジカル絶縁体上の強磁性体/強磁性体接合における熱流を散乱行列法により計算する。Dirac 方程式に交換場を取り込み、波動関数を求めることで散乱行列が解析的に求まり、熱流が計算できる。また、連続体モデルである Dirac 方程式と相補的である格子模型を用い、リカーシブ Green 関数法に基づいて熱輸送を調べる。

(2) 円偏光を照射したトポロジカル絶縁体表面を円偏光の電磁場を含む Dirac 方程式でモデル化する。非平衡現象を扱うのに適した手法である Keldysh Green 関数法を用いて磁化を計算する。

(3) トポロジカル絶縁体に強磁性(絶縁)体を載せた系においてトポロジカル絶縁体表面に交流電流を流したとき、強磁性体に誘起されるマグノン流を調べる。Dirac 方程式に電流と、磁化とトポロジカル絶縁体表面の Dirac 電子の相互作用である s-d 相互作用を取り込み、Keldysh Green 関数法に基づいてスピン流を計算する。

(4) 申請者はトポロジカル絶縁体の表面電子と結合した磁化の従う運動方程式(Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式)を導出した。この方程式を用いてトポロジカル絶縁体に磁化のドメイン構造がある場合の電流誘起磁壁移動を調べる。申請者が導出した

Landau-Lifshitz-Gilbert 方程式を数値的に解き、電流下でのドメイン構造のダイナミクスを調べる。

4. 研究成果

トポロジカル絶縁体表面電子は低エネルギーでディラック方程式に従う。ディラック方程式に従う電子の運動量とスピンは結合しており、トポロジカル絶縁体を用いたスピントロニクスが発展が期待されている。申請者は強磁性体をトポロジカル絶縁体に接合した系における種々のスピン物性を明らかにした：この系における熱流を計算しベリ位相や表面ギャップとの関係性を明らかにした。またトポロジカル絶縁体表面の電流誘起スピン偏極による強磁性体の磁化のダイナミクスを調べ電流誘起磁化反転の可能性を見出した。また、光によるスピン偏極や強磁性体の磁化のダイナミクスによる整流効果、トポロジカル絶縁体表面における磁気抵抗効果やスピンの拡散現象などを明らかにした。以上の成果によりトポロジカル絶縁体に特徴的なスピン物性を明らかにすることに成功したと言える。

また、トポロジカル結晶絶縁体は結晶の対称性により定義されたトポロジカル数で特徴づけられる物質の新しい状態として近年注目を集めている。申請者はトポロジカル結晶絶縁体に磁性不純物をドーピングし強誘電体を接合することで、トポロジカル結晶絶縁体表面に磁性と歪みを誘起した場合の輸送現象を明らかにした。磁性と歪みによりトポロジカル結晶絶縁体表面に現れるディラック電子にゲージ場および質量項を与えることができる。トポロジカル結晶絶縁体 SnTe 表面には4つのディラック電子が存在することが知られているが、磁性と歪みにより4つのディラック電子を独立に制御し、スピンと4つのディラック電子の間の輸送現象における相関を明らかにした。特に磁化の方向によって支配的なディラック電子の寄与を制御できることを示した。この成果によりトポロジカル結晶絶縁体を用いたスピントロニクスの分野の今後の展開が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 8 件)

Spin and valley transports in junctions of Dirac fermions, T. Yokoyama, New J. Phys. 16, 085005 (2014)、査読有
DOI:10.1088/1367-2630/16/8/085005

Giant magnetoresistance in the

junction of two ferromagnets on the surface of diffusive topological insulators, K. Taguchi, T. Yokoyama and Y. Tanaka, Phys. Rev. B 89, 085407 (2014)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.085407

Spin diffusion and magnetoresistance in ferromagnet/topological-insulator junctions, T. Yokoyama and Y. Tserkovnyak, Phys. Rev. B 89, 035408 (2014)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.035408

Josephson and proximity effects on the surface of a topological insulator, T. Yokoyama, Phys. Rev. B 86, 075410 (2012)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.075410

Topological charge pumping effect by the magnetization dynamics on the surface of three-dimensional topological insulators, H. T. Ueda, A. Takeuchi, G. Tatara, and T. Yokoyama, Phys. Rev. B 85, 115110 (2012)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.85.115110

Electromagnetic spin polarization on the surface of topological insulator, T. Misawa, T. Yokoyama, and S. Murakami, Phys. Rev. B 84, 165407 (2011)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.165407

Current-induced magnetization reversal on the surface of a topological insulator, T. Yokoyama, Phys. Rev. B 84, 113407 (2011)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.113407

Transverse magnetic heat transport on the surface of a topological insulator, T. Yokoyama and S. Murakami, Phys. Rev. B (Rapid Communications) 83, 161407(R) (2011)、査読有
DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.161407

[学会発表](計 4 件)
"Spintronics with topological

insulators", T. Yokoyama,
Topological Aspects of Quantum
Matter, Hsinchu(Taiwan), December 11,
2014

"Spin and valley transports in Dirac
systems: graphene, topological
insulators, and silicene", T.
Yokoyama, 9th International Workshop
on Nanomagnetism and
Superconductivity at the Nanoscale
(Coma-ruga 2013), Coma-ruga (Spain),
July 5, 2013

"Spintronics using topological
insulators and triplet
superconductors", T. Yokoyama, IAS
Asia Pacific Workshop on Condensed
Matter Physics, Hong Kong (China),
December 15, 2012

"Spintronics with topological
insulators and triplet
superconductors", T. Yokoyama, The
8th International Workshop on
Nanomagnetism and Superconductivity
(Coma-ruga 2012), Coma-ruga (Spain),
July 3, 2012

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横山 毅人 (YOKOYAMA, Takehito)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：30578216

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：