

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19740177

研究課題名（和文） 表面・界面でのスピホール効果の特異な物性の研究

研究課題名（英文） Research on novel physics of spin Hall effect on edges and interfaces

研究代表者

村上 修一（MURAKAMI SHUICHI）

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：30282685

研究代表者の専門分野：物性理論

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：物性理論、磁性、スピエレクトロニクス、表面・界面物性

1. 研究計画の概要

スピホール効果における試料の形状や電極の効果について研究し、電荷の物理にはない、スピンの非保存性に根ざした新しい伝導現象の学理、スピンの物理を確立する。金属・半導体でのスピホール効果については、スピンの電極・界面付近での変化を解明し、境界条件（試料界面、電極など）のコントロールにより、電極に誘起されるスピンを大きくするという、「実空間でのデザイン」を行う。これと、ベリ位相の考察による「波数空間のデザイン」と併用してスピホール効果の巨大化を目指す。また量子スピホール相において、バルクで隠れていたトポロジカルな性質を、試料形状や界面の効果を利用して解明し、実証実験を提案する。

2. 研究の進捗状況

(1) (111)1-bilayer と {012}2-monolayer の2種類のビスマス薄膜における量子スピホール系の可能性について、第一原理計算により研究した。この2種の薄膜のうち前者は量子スピホール系、後者は通常の絶縁体になることが分かった。また量子スピホール系のエッジ状態・表面状態の侵入長について、バンド構造との関係を明らかにした。特に侵入長の短い例としてビスマス薄膜をとりあげ、その侵入長が格子間隔程度の短いものであることを明らかにした。

(2) 量子スピホール系のエッジ状態による熱電輸送について研究した。幅がナノメートルサイズのリボン状の系を考えて、バルクキャリアとエッジのキャリアが共存する状況で計算を行ったところ、低温になるとエッジ状態が優勢になってきて、エッジ状態によ

る熱電輸送が十分観測にかかることを理論的に見出した。こうしたエッジ状態による熱電輸送は、エッジ状態の非弾性散乱長が長くなるほど顕著になってくることを見出した。

(3) 金属の白金における巨大なスピホール効果の起源を探るため、バンド構造に起因する内因性スピホール伝導率を第一原理計算により計算し、実験で観測されたものと同程度の大きなスピホール伝導率が得られた。またこの巨大なスピホール効果は、フェルミエネルギー付近に存在するバンド交差によるものであることが分かった。

(4) 量子スピホール系の物質探索等のために、量子スピホール相と通常の絶縁相との間の量子相転移を一般的な枠組みで議論した。その結果、3次元の量子スピホール系においては一般に、絶縁相との間で直接相転移が起こらずに、その間に金属相がはさまることが分かった。2次元の場合はそのようなことは起こらないことも分かった。

3. 現在までの達成度

①当初の計画以上に進展している。

（理由）

本研究期間中にスピホール効果の特別な場合とも言える「量子スピホール効果（トポロジカル絶縁体）」の研究が国内外で盛んになってきて、顕著な研究結果が次々発表されてきている。それに触発される形で本研究課題でも、量子スピホール系を中心に研究を進め、顕著な研究結果を出すことができた。特に上記の(1)(2)(4)などはそうした研究による重要な成果で、本研究計画の立案段階では予想していなかった形で研究が進展して得られた結果であり、計画以上に進展してい

ると考えている。

量子スピンホール系では系の表面・界面での物理が主要な役割を果たしており、本研究課題と合致している。現在も国内外で盛んに研究されており、今後とも発展が期待されるといえ、本研究成果の重要性は高まってくると考えている。

4. 今後の研究の推進方策

本研究の最終年度前年度応募として、基盤研究(C)「量子スピンホール効果の新奇物性探索とデザイン」(2010年-2014年)を応募して採択された。そのため、若手研究(B)の本研究課題は2009年度で終了となり、残った課題は発展的に基盤研究(C)の方へ受け継がれる形となる。その基盤研究(C)へ受け継がれる研究の推進方策について以下に述べる。

この基盤研究では(i)量子スピンホール系での新奇な物性現象の予言・観測方法の提案、(ii)量子スピンホール系の候補物質の探索とデザイン、の2つに関して研究を行う。

(i)に関しては、(A)トポロジカル保護、(B)強いスピン軌道相互作用と表面ディラック電子、の2要素があり、これらに起因する現象を追求する。(A)については、2次元量子スピンホール系では、エッジ状態はトポロジカルに保護されている。そのため、非磁性の不純物等があってもエッジ状態は後方散乱を受けずギャップレスであり続けるため、量子的にコヒーレントな伝導が保たれ、実際に多端子のコンダクタンス測定で実証されている。この性質により出てくる新しい性質について調べる。例を挙げると、スピン輸送・熱輸送などであり、またエッジ状態の伝導によるスピンの非可換性の実証も面白い可能性と考えられる。特に後者は量子ホール効果ではなく量子スピンホール効果特有のものである。(B)では、例えば物質表面のRashba系において知られる諸現象を応用するなど、ギャップ程度に大きなスピン軌道相互作用に起因する現象について探索する。

(ii)に関しては、膨大な数の非磁性絶縁体の中から探すために指針を立てて行う。従来とは違った観点から物質探索を進めて、よりギャップの大きい物質、また他の秩序との関係によって興味深い物性が期待できる物質を探す。こうした研究を通じて、量子スピンホール系において、室温でも残る顕著な現象、マクロなサイズの系でも観測できる現象、新奇で興味深い現象などを実際の物質で理論的に予言することが目的である。

こうした研究計画は、本研究課題の成果に基づいている。

5. 代表的な研究成果

(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6件)

①Shuichi Murakami and Shun-ichi Kuga, “Universal phase diagram for the quantum spin Hall systems”, *Physical Review B*, 78, 165313-1-- 165313-10, 2008, 査読有

②Guang-Yu Guo, Shuichi Murakami, Tsung-Wei Chen, and Naoto Nagaosa, “Intrinsic Spin Hall Effect in Platinum: First-Principles Calculations”, *Physical Review Letters*, 101, 096401-1-096401-4, 2008, 査読有

〔学会発表〕(計20件)

①村上修一、「半導体および金属でのスピンホール効果の理論」、第70回応用物理学会学術講演会、2009年9月9日、富山大学

②Shuichi Murakami, “Quantum spin Hall phases and topological surface states”, Annual meeting of German Physical Society, 2009年3月26日, Germany

③Shuichi Murakami, “Quantum spin Hall phase in bismuth ultrathin film”, 421st Wilhelm and Else Heraeus Seminar on Spin Hall Effect, 2008年10月20日, Germany

〔図書〕(計1件)

①村上修一、シーエムシー出版、スピントロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線(監修:高梨弘毅)、2009年、149頁-158頁