

論文審査の結果の要旨

氏名 池 震 棟

電子は電荷とスピンという2つの自由度を持つ。その両方、特にスピンの性質を巧みに使うことによって新しいエレクトロニクスを生み出そうとする研究分野をスピントロニクスと呼ぶ。その中で重要な目標となっているのは、強磁性体の磁化方向を、磁場ではなく、電流あるいは電場で制御する技術の開発と応用である。このような技術は、低消費電力・高速・高密度のデバイスの実現を可能にする。中でも、電流誘起スピントランスファートルクは、強磁性金属薄膜の磁化を電流で制御する手法として注目されてきた。

近年、重金属と強磁性薄膜との接合や、トポロジカル絶縁体と強磁性薄膜との接合のようなヘテロ構造において、スピン軌道トルクと呼ばれる、スピントランスファートルクとは異なる新しい種類の電流誘起トルクが報告されている。このトルクは、スピンホール効果やラシュバ・エデルシュタイン効果によって生み出されるヘテロ構造界面における電流誘起スピン蓄積によって引き起こされる。したがって、電流-スピン流変換効率の高い材料を探索し、その起源を明らかにすることは、これらの材料の理解を深め、応用可能なスピン軌道トルクを実現する上で重要である。

本論文は、ビスマス (Bi) を含む材料と強磁性薄膜から構成されるヘテロ構造において、スピン軌道トルクを評価することによって、電流-スピン流変換効率を系統的に調査したものである。本論文は6章からなる。

第1章は導入部であり、スピントランスファートルクの説明の後、スピン軌道トルクとその例が示される。さらに、Bi とその合金についての紹介が行われる。Bi は、重元素であるためスピン軌道相互作用が大きいことと、バンド構造のL点において有限の質量を持つディラック電子 (massive Dirac 電子) が存在するという2つの特徴を持っている。その後、本論文の目的と概要が示される。

第2章では、Bi およびその合金材料と強磁性薄膜のヘテロ構造薄膜の作製方法、薄膜の特性評価、磁気特性の測定、素子の作製、電氣的なスピン軌道トルクの評価など、実験手法を紹介する。本研究では、Bi 合金において幅広い組成比を実現するために、独自開発の交互超薄膜蒸着法 (alternating ultrathin layer deposition) を用いた。また、スピン軌道トルクの評価には「高調波ホール電圧測定法」を用いており、本論文で議論される中心的な内容はこの手法によって

得られた測定結果である。この手法の原理が詳しく紹介される。

第3章では、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金薄膜と CoFeB 強磁性薄膜からなる接合における電流ースピン流変換について調査した結果を議論している。 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金薄膜では、室温で効率が1を超える電流ースピン流変換を観測した。さらに、 $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ 合金薄膜の膜厚・組成・面方向・温度を系統的に変えながら効率を調べた。その結果、大きな変換効率が Bi のバンド構造に基づく内因性スピンホール効果によることが示唆された。この結果は理論計算とも整合する。一方、トポロジカルな表面状態については、たとえ存在したとしても、電流ースピン流変換効率にはほとんど寄与しないことも分かった。さらに、合金のスピンホール伝導率の温度依存性を調べ、 Bi のバンド構造の L 点における有限質量を持つディラック電子が変換効率に重要な役割を果たしていることを明らかにした。

第4章では、ノンドープの Bi 薄膜およびキャリアドープされた Bi 薄膜と CoFeB 強磁性薄膜との接合における電流ースピン流変換効率を調べた。 Bi へのキャリアドーピングは、 Bi を Te または Sn で置換することで行われる。単体 Bi では約 2.7 というこれまでで最大の変換効率を記録した。また、 Bi 薄膜のスピンホール伝導率は、フェルミ準位がディラック点に近いときにプラトーを示し、電子またはホールドーピングによって急激に低下することがわかった。一方、単体 Bi のスピンホール伝導率は、薄膜の結晶方位や抵抗率の変化に対して影響をうけにくいことが示された。これらの結果は、 Bi における電流ースピン流変換がフェルミ準位の位置と連動していることを意味しており、内因性スピンホール効果が重要であることの証拠である。

第5章では、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Bi}_x/\text{Co}/\text{MgO}$ 三層膜において、 Bi ドープ量 x を変化させながら、膜構造、磁気異方性、電流ースピン流変換を調べた。 Pt が多い場合、 $\text{Pt}_{1-x}\text{Bi}_x$ の抵抗率はドープ量とともに増加するのに対し、スピンホール伝導率がドープ量の影響をほとんど受けないことから、 Bi ドーピングは Pt の電流ースピン流変換効率を高める戦略として有効であることが示唆された。

第6章はまとめと展望が述べられている。

本論文は、有限のベリー曲率を持つ系のスピンホール効果とディラック性の相関を初めて実験的に明らかにした。今後、より広い範囲のディラック系物質におけるスピンホール効果の研究に新たな可能性を開くものである。

この研究の物性物理学としての価値と独創性は十分と認められ、博士(理学)の学位論文としてふさわしい内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断した。

したがって、博士(理学)の学位を授与できると認める。