

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04846

研究課題名(和文)バルクラシュバ半導体の分極反転を利用したスピン電荷変換の極性制御

研究課題名(英文)Polarity control of spin-charge conversion in bulk Rashba semiconductor

研究代表者

吉見 龍太郎 (Yoshimi, Ryutaro)

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員

研究者番号：40780143

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,900,000円

研究成果の概要(和文)：強誘電性によって空間反転対称性が破れた強磁性バルクラシュバ半導体(Ge,Mn)Teに着目して、電場印加による強誘電反転を通じて電荷スピン変換の極性制御を試みた。分子線エピタキシー法によって作製した(Ge,Mn)Te薄膜において電流誘起磁化反転を観測し、スピン偏極したバルクバンドのスピン트로ニクス特性を明らかにした。また、薄膜成長技術を詳細に調べることで試料内のキャリア濃度を制御する方法を確立し、電場による強誘電分極反転に筋道をつけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伝導電子によってスピン角運動量を生成するスピン電荷変換はこれまで数多く研究がなされてきたが、スピン角運動量の向きを電場によって変換する試みはこれまで行われてこなかった。本研究は強磁性ラシュバ半導体に着目してそのスピン트로ニクス特性を開発しただけでなく、上述の電場制御にまでアプローチした点において社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We have attempted to control the polarity of charge-spin conversion through ferroelectric inversion by applying an electric field to ferromagnetic bulk Rashba semiconductor (Ge,Mn)Te, in which spatial inversion symmetry is broken by ferroelectricity. We have fabricated thin films of (Ge,Mn)Te by molecular beam epitaxy and demonstrated current-induced magnetization switching, which is a clear indication of spintronics functionality based on spin-polarized bulk bands of the material. Furthermore, we also established a method to control the carrier concentration in the sample by studying the thin film growth technique in detail, which is an important step to control the ferroelectric polarization by electric field.

研究分野：物性物理学

キーワード：ラシュバ半導体 強磁性 電流誘起磁化反転 スピン트로ニクス 異常ホール効果

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

電流によるスピンの生成やその検出は、スピントロニクス素子の基本要素として重要な概念である。近年、ラシュバ - エデルシュタイン効果というバンドのスピンの偏極性に由来する機構によってスピン流と電荷の変換が可能であることが明らかになった。典型的なスピン偏極バンドであるラシュバ型バンドは反転中心対称性が破れた系で発現し、界面や表面などの積層金属薄膜や量子井戸になどのスピン電荷変換が報告されていた。これらの系では空間反転対称性が破れる向き（極性）は系に固有のものであり、スピン電荷変換の外場制御は基本的に難しいという特徴があった。それに対し、バルクの強誘電性に由来するラシュバ系では、スピン偏極バンドの極性が強誘電分極と一対一に対応するため、電界によってスピン偏極方向を反転することが原理的に可能であると指摘されてきた。

2. 研究の目的

ラシュバ半導体 GeTe を対象に電場印加によるスピン電荷変換の極性反転を行う。反転対称性の破れた系に発現するラシュバ型バンドは、スピン偏極性からラシュバ - エデルシュタイン効果によるスピン電荷変換が可能である。また、スピン偏極の向きは反転対称性の破れの向きと一対一に対応する。以上の原理に着目し、外部電界によって誘電分極の制御が可能なラシュバ半導体において、スピン電荷変換の極性反転を電界によって行う。更に、ドーピングによるフェルミ準位制御と強磁性発現によってスピン電荷変換の効率を最大化する。スピンの極性を電界により制御することで、スピン流生成・検出、磁化反転などのあらゆるスピン操作に磁場を必要としない新規スピントロニクス素子の動作原理を目指す。

3. 研究の方法

(1) GeTe 薄膜を分子線エピタキシー法によって合成する。GeTe の分極方向は[111]で薄膜面直方向になる。単一強誘電ドメインを実現するために  $Sb_2Te_3$  バッファ層を用いる。 $Sb_2Te_3$  は Sb と Te 原子が交互積層した構造を持ち各層は必ず Te で終端する。そのため  $Sb_2Te_3$  上の GeTe は必ず Te から積層が始まり、上下反転した結晶ドメインに由来する誘電分極ドメイン生成を抑制できると考えられる。また  $Sb_2Te_3$  は GeTe(111)面と同様に三角格子で格子定数も近いので、ヘテロ接合を容易に構成できる。基板は GeTe,  $Sb_2Te_3$  の両者と格子整合する InP の(111)面を用いる。作製した GeTe 薄膜は X 線回折の逆空間測定によって面内と面直の格子定数を測定し、強誘電性を持つ菱面体晶構造であることを確認する。また、同様の手法で、後述する電流誘起磁化反転のために磁性元素 Mn をドーピングした(Ge,Mn)Te も作製する。

(2) 電流誘起磁化反転の実証を行う。(Ge,Mn)Te 薄膜試料を UV リソグラフィーによって幅 10um のホールバー形状に加工し、電流パルスを印加しスピントルクを発生させる。続けて微小電流によってホール抵抗を測定する。する。ラシュバ - エデルシュタイン効果によって磁化反転が生じていれば、ホール抵抗が変化する。

(3) 電場印加による強誘電分極反転を行う。電場印加によって GeTe を誘電分極反転し、スピン電荷変換の極性反転を観測する。電場印加はピエゾ応答顕微鏡(PFM)によって探針走査を用い分極ドメインを書き込み・観測を行うことで、分極反転領域を実空間観測する。

4. 研究成果

(1) 分子線エピタキシー法による(Ge,Mn)Te 薄膜の合成

3. で上述したように分子線エピタキシー法を用いて(Ge,Mn)Te 薄膜の合成を行い、条件を精緻化した。図 1 に X 線回折の逆空間マッピングのデータを示す。 $Sb_2Te_3$  バッファ層を用いた試料では空間反転対称性を破らない立方晶の(Ge,Mn)Te が生じているが、バッファ層を用いることで、菱面体晶構造が安定化していることが確認できた。以後の実験はこの試料を用いて行った。

(2) 電流誘起磁化反転

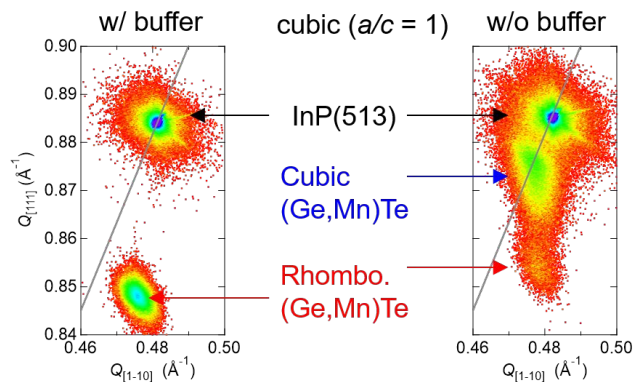


図 1 (Ge,Mn)Te 薄膜 X 線回折の逆空間マッピング。  
 $Sb_2Te_3$  バッファ層有り(左)と無し(右)。

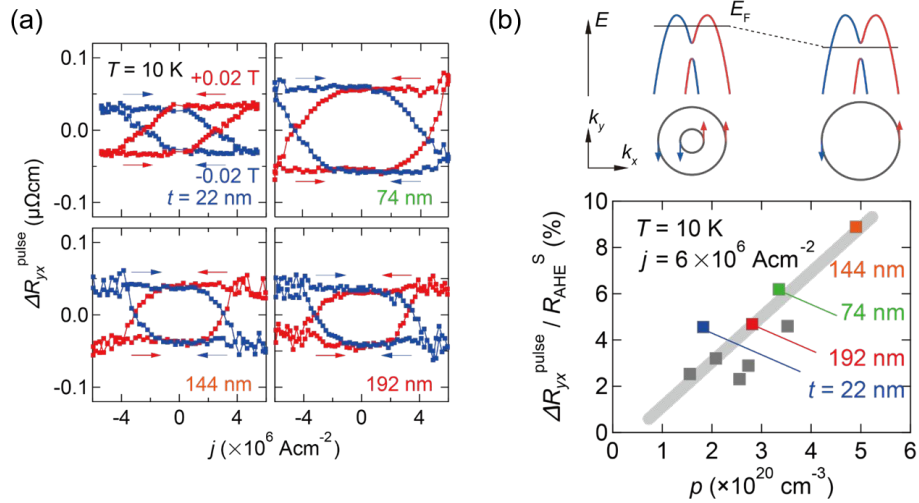


図 2(a)さまざまな膜厚の(Ge,Mn)Te 薄膜に対して行った電流誘起磁化反転測定。電流パルスの強度に対するホール抵抗の変化。(b)磁化反転比率の正孔濃度に対する変化。

膜厚の異なる試料について電流誘起磁化反転を行い、磁化反転率を調べた。図 2 に電流パルス強度に対するホール抵抗の変化を示す。膜厚 22 ~ 192 nm の全ての試料でホール抵抗が変化し、また微小面内磁場に対して反転方向が変化していることから、バルクバンド由来のラシュバ-エデルシュタイン効果によって電流誘起磁化反転が実現していることを確かめた。加えて、磁化反転効率を試料内の正孔濃度に対してプロットしたところ、正孔濃度に対して正の相関があることを見出した(図 2(b))。この振舞いは、バルクラシュババンドに強磁性相互作用が導入されバンド縮退点にギャップが開いた結果、内側のバンドが消えて内側と外側のフェルミ面におけるラシュバ-エデルシュタイン効果が相殺しなくなったためだと考えられる。角度分解光電子分光法によるバンド測定に基づいて正孔濃度からフェルミ準位位置を推定したところ、フェルミ準位は確かに縮退点直上~やや上程度に位置することがわかり、上述の推論と整合する状況が実現していることを確かめた。

### (3)電場印加による強誘電ドメイン反転

PFM によって GeTe 試料における強誘電分極の電場反転を試みた。しかし、再現性の良い結果を得ることが難しく、電場強度や試料膜厚を変化させても同様であった。原因は試料の導電性が高いためであると考えられたため、より絶縁性の高い(導電性の低い)試料を作製することに実験計画を切り替えた。分子線エピタキシー法の成長条件をより詳細に調べ、試料成長時の Te と Ge の供給比率を変えることで 100 倍程度導電性を小さくすることが出来た。今後、導電性の低い試料について強誘電ドメイン反転の試みを続けていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki, and Y. Tokura	4. 巻 4
2. 論文標題 Current-driven magnetization switching in ferromagnetic bulk Rashba semiconductor (Ge,Mn)Te	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.aat9989	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, M. Kawamura, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura
2. 発表標題 Unidirectional magnetoresistance in a bulk Rashba ferromagnet
3. 学会等名 American Physical Society（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉見龍太郎, 安田憲司, 塚崎敦, 高橋圭, 川崎雅司, 十倉好紀
2. 発表標題 極性強磁性半導体Ge <sub>1-x</sub> MnxTeにおける電流誘起磁化反転
3. 学会等名 日本物理学会2018年年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura
2. 発表標題 Current-induced magnetization switching in bulk Rashba ferromagnet
3. 学会等名 CEMS Symposium on Trends in Condensed Matter Physics
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Yoshimi, K. Yasuda, A. Tsukazaki, K. S. Takahashi, M. Kawasaki and Y. Tokura
2. 発表標題 Current-driven magnetization reversal in a Rashba bulk ferromagnet
3. 学会等名 American Physical Society, March Meeting
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>マルチフェロイクス材料における電流誘起磁化反転を実現 - 低消費電力エレクトロニクスへの新原理を構築 -  <a href="http://www.riken.jp/pr/press/2018/20181208_1/">http://www.riken.jp/pr/press/2018/20181208_1/</a></p>
--

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考