

V 族半金属ヘテロ積層薄膜の純スピン流測定

高山 あかり^{*1,2} 後藤 穰^{*3}

Measurement of Spin Currents in Hetero-layered Thin Films with Group-V Semimetals

Akari TAKAYAMA^{*1,2} and Minori GOTO^{*3}

In the development of modern spintronics devices, the generation and control of spin currents are extremely important technologies. The aim of this study is to investigate the spin properties derived from the surface spin state of Bi thin films, focusing on the detection of these spin currents. A Si/Fe/Bi/Si(111) multilayer structure was fabricated and processed into a Hall bar shape for Hall measurement (2ω measurement). The experimental results revealed a Hall voltage behavior that suggests the presence of a nonlinear Hall effect, likely originating from spin-polarized electronic states of Bi. Furthermore, a dip structure in the Hall voltage was observed at a specific angle, and this is implied to be related to the out-of-plane spin component of the Bi.

1. 背景・目的

現代のスピンエレクトロニクス素子開発において、スピン流の生成・制御は重要な技術であり、特に電流を伴わない純スピン流の研究において、スピン軌道相互作用によって自発的にスピン偏極した状態をもつトポロジカル絶縁体の表面状態や Rashba 効果の発現する界面に注目が集まっている。Rashba・トポロジカル系のスピン流測定はこれまでに多くの研究が行われているものの、従来のスピン流測定はバルク結晶や界面構造での研究が主であり、ヘテロ積層構造の研究はそれほど進展していない。新規積層材料から創発される新奇量子現象の学理構築を目指すため、本研究ではこのようなスピン偏極電子状態をもつ V 族半金属 Sb および Bi 薄膜を人工積層させた材料を用いて、3次元で制御可能なスピン流の生成と検出に向けてスピン流検出を行うことを最終目標として設定し、特に本年度は、このヘテロ積層構造の母物質となる Bi 薄膜の表面スピン状態に由来したスピン流の検出を目的として研究を行った。

2. 試料作製と加工

図 1(a) に本研究で作製した多層膜の概略図を示す。Si 基板から順に Bi, Fe, Si と蒸着する。多層膜由来のスピン流を取り出すため、Si 基板は絶縁性の高い ($>1000 \Omega \text{ cm}$) ウエハーを用いた。Bi 薄膜の表面電子状態は Rashba 効果によってスピン分裂しており、電圧を印加すると Rashba-Edelstein 効果によって表面電子状態がスピン偏極する。この偏極したスピンをスピンホール効果へ利用するために、Bi 薄膜上に強磁性体である Fe 薄膜を作製した。Fe の磁化は酸化によって磁化容易軸が擾乱されてしまうため、Fe 薄膜上に Si 薄膜をキャップ層（保護層）として作製した。安定した Bi (111)- 1×1 構造を得るため、Bi 薄膜は 13 BL (約 5 nm) とした。また、Fe 薄膜の厚さは、Fe と Bi の混成効果が無視でき、かつ Fe 自体の磁化の影響が強く発現しないように 2 nm と設定した。また、キャップ層である Si 層は、表面酸化を防ぐため 5 nm とした。試料作製は全て超高真空下で行い、作製した試料は反射高速電子回折 (RHEED) を用いて評価した。

作製した多層膜について、早稲田大学ナノテクノロジーリサーチセンター (NTRC) においてホールバー形状への加工および電極作製を行なった。

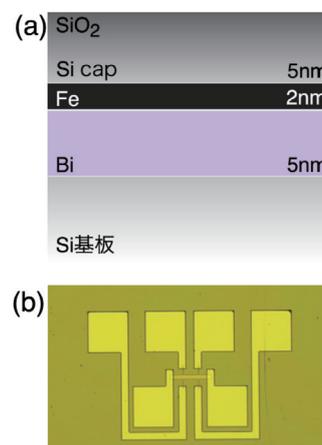


図 1 (a) 作製した多層膜の概略図（側面図）。(b) ホールバー加工形状。

2025年3月1日 受理

*1 早稲田大学理工学術院先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻

*2 東北大学多元物質科学研究所

*3 福井大学学術研究院工学系部門工学領域

具体的な手順として、ホールバー作製ではレーザー直接描画装置を用いてフォトリソグラフィを行った後、イオンミリング装置によるドライエッチング、その後レジスト除去を行った。Au/Cr電極の作製には、レーザー直接描画装置および紫外線露光装置によりリフトオフ用レジストを形成した後、イオンビームスパッタ装置によりAu/Cr膜を成膜した。今回作製した多層膜試料のサイズが15mm×4mmと、一般的な試料サイズより小さくかつ長方形形状であったため、素子加工を行う上でホールバーと電極の位置合わせの困難さやスピンコート処理時のレジスト不均一性が問題として挙げたが、さまざまな試行錯誤の結果、全32個の素子パターン中、6個の素子が使用できることを明暗視野顕微鏡で確認した。

3. ホール測定(2 ω 測定)の結果と考察

ホール測定は、福井大学後藤研究室の全方位磁界プローバーを用いて行った。図2(a)に、加工した素子でのホール測定における端子の配置を示す。まず、印加電圧 V_{out} を2Vに固定し、ホール電圧 V_x の面内磁場角度依存性を測定した(印加磁場範囲:25~250mT)。実験の結果、360°周期の成分(cos成分)に加え、面内磁場角度270°付近でdip構造が観測された。さらに、印加磁場が大きくなるにつれて、cos成分の寄与が大きくなること、電圧 V_x のディップが小さくなることがわかった[図3(c)]。続いて、磁場を100mTに固定し、ホール電圧 V_x の印加電圧 V_{out} の角度依存性を測定した(印加電圧範囲:250~4000mT)。実験の結果、印加電圧が大きくなるにつれて、cos成分が増大し、またディップ構造が深くなることがわかった[図3(d)]。一般的なホール効果の場合、ホール電圧は面直磁場の増加に対して増加するが、本実験で得られた結果では、面内磁場の増加に伴うホール電圧の減少が見られた。また、ホール電圧のcos成分とディップ成分は入力電場や外部磁場に依存していることから、通常のホール効果とは異なる機構が寄与して可能性が考えられる。とりわけディップ成分が磁場の増加に対して減少し、印加電圧の増加に対して増加する性質から、スピン流注入による振る舞いと定性的に一致する。これは、Bi薄膜からのFe層へのスピン注入が行われている可能性を示唆している。

また、印加磁場、印加電圧の増加によって、ホール電圧のcos成分は増大するという結果は、トポロジカル絶縁体 Bi_2Se_3 に対する非線形ホール効果の測定結果[1]と定性的に一致する。 Bi_2Se_3 は表面状態がスピン偏極していること、またBi自体もトポロジカル半金属の可能性が指摘されていることから[2]、本実験で得られたcos成分はスピン偏極した表面電子状態の寄与によるものだと考えられる。一方、ディップ構造は Bi_2Se_3 では報告されておらず、これはBi薄膜の面直方向のスピン偏極が寄与している可能性が考えられる。特に、本実験でディップが観測された270°近傍は、作製したBi試料に対して面直方向のスピン偏極が優勢である方位である。 Bi_2Se_3 は面直方向のスピン偏極が存在しないことから、これが本実験と Bi_2Se_3 の先行研究と結果が異なった要因と考えられる。

4. まとめ

今年度の目標であったBi薄膜の表面スピン状態に由来したスピン流の検出測定を行った。ホール測定の結果、スピン偏極した電子状態に由来すると考えられる非線形ホール効果を示唆する電圧の振る舞いを観測したほか、特定の角度において特異な電圧の変化を観測した。今後、さらなる測定を行い、この現象の詳細について考察を行う予定である。

REFERENCES

- 1) H. Pan, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **123** (2019) 016801.
- 2) T. Hirahara, *et al.*, *Phys Rev Lett.*, **109** (2012) 227401.

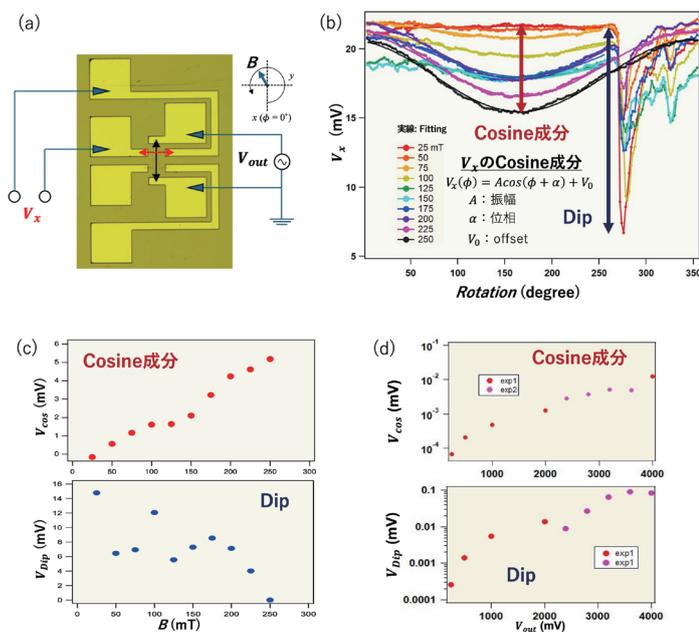


図2 (a) ホール測定時の電極配置. (b) ホール電圧 V_x の面内磁場角度依存性($V_{out} = 2$ V). (c) ホール電圧 V_x のcos成分およびDip構造の磁場依存性. (d) ホール電圧 V_x のcos成分およびDip構造の印加電圧依存性.