

強磁性/重金属界面における動的スピンの注入の圧力効果

飯森陸、大日方初良、光田暁弘、木村崇
(九大院理)

Pressure effects on dynamical spin injection at ferromagnet/heavy metal interface

R. Iimori, S. Obinata, A. Mitsuda, T. Kimura
(Dept. of Phys, Kyushu Univ.)

はじめに

近年、強磁性(FM)/非磁性重金属(HM)二層膜におけるスピン軌道相互作用に起因した電流とスピン流の相互変換が注目されている。FM/HMにおける電流-スピン流変換の起源として、バルクのスピンホール効果や界面のラシュバ・エデルシュタイン効果が知られているが、電流-スピン流変換効率は数パーセントと極めて小さい。一方で、FM/HM界面におけるラシュバ型スピン軌道相互作用や交換相互作用は界面の原子間距離に極めて敏感であることが予想され、界面状態を何らかの外的作用により制御できれば、スピン流生成効率の飛躍的増大が期待され、スピン流のデバイス応用に向けて極めて重要な結果となる。そこで最近我々は、高圧力下において強磁性共鳴によるスピン流注入を行う手法を新たに開発した^{1,2}。今回の発表では、この手法を用いて、FM/HM二層膜におけるスピンホール信号の圧力依存性について議論する。

実験方法

本研究で用いた試料は、CoFeB(10 nm)/Pt(5 nm)およびCoFeB(10 nm)/Ag(5 nm)/Bi(10 nm)であり、DCスパッタリング法により成膜した。圧力印加にはピストンシリンダー型圧力セルを用いて、数GPa程度の圧力下において動的スピン流注入による逆スピンホール信号を測定した(図1)。加えて、圧力印加前後の膜質・界面状況を断面TEMやX線反射率法を用いて解析した。

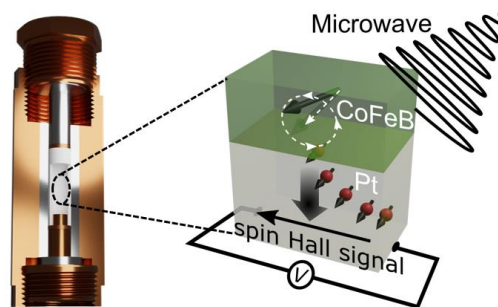


図1：圧力セルを用いた動的スピン注入測定

実験結果

図2に、CoFeB(10 nm)/Pt(5 nm)二層膜における動的スピン流注入による逆スピンホール信号の圧力依存性の結果を示す。1 GPaまでの圧力印加により、逆スピンホール信号が約10%増加した。また、同時に強磁性層のダンピング定数の増大も確認した。これらの増強効果の起源として、界面スピンミキシングコンダクタンスの増強やPt層のスピンホール角の増強効果が予想される。そこで、これらの起源を解明するため、同積層構造における磁気抵抗効果やトンネル接合を用いたPt層のスピンホール角の精密測定、更には、スピンホール伝導度の圧力依存性に関するDFT計算を行い、界面の交換相互作用の圧力増強が支配的であると結論付けた。

当日はこの結果に加え、CoFeB(10 nm)/Ag(5 nm)/Bi(10 nm)におけるラシュバ型スピン軌道相互作用の圧力変調を狙った研究についても紹介する。

参考文献

- 1) S. Obinata *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 152401 (2021)
- 2) R. Iimori *et al.*, Appl. Phys. Express **15**, 033003 (2022)

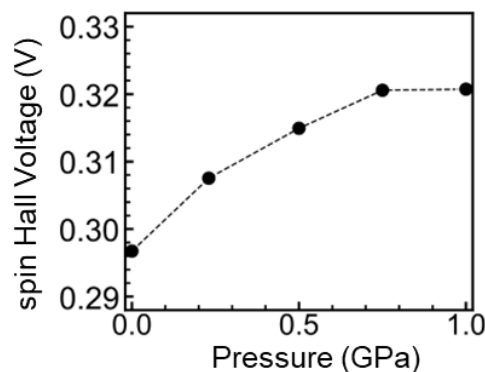


図2：逆スピンホール信号の圧力依存性

ST-FMR 測定における周波数依存アーティファクト

洞口泰輔¹、山野井一人¹、松尾衛²、能崎幸雄^{1,3}

(¹慶大理工、²中国科学院大学 Kavli-ITS UCAS、³慶大スピン研)

Frequency-dependent Artifact in ST-FMR Measurements

T. Horaguchi¹, K. Yamanoi¹, M. Matsuo², Y. Nozaki^{1,3}

¹Keio Univ., ²Kavli-ITS UCAS, ³CSRN Keio Univ.

はじめに

スピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法[1]は、非磁性体(NM)/強磁性体(FM)二層膜におけるスピントルク効率の評価に広く用いられる手法である。二層膜に交流電流を印加すると、スピンホール効果等により NM が生成するスピン流のスピントランスファートルクと、電流のエルステッド磁場由来のトルク協奏により FMR が誘引される。その際、それぞれのトルクに由来する FMR スペクトルを対称成分と反対称成分として分離できるため、単位電流あたりのスピントルク効率を求めることができる。しかし、NM/FM 二層膜では NM から FM へのスピン流注入と同時に、逆スピンホール効果や縦型スピンゼーベック効果に起因する起電力などのアーティファクト信号がスペクトルに重畳するため、これがスピントルク効率の評価を阻害することが指摘されており、その分離手法についてこれまで精力的に研究されてきた[2,3]。

われわれは、これまでの ST-FMR 測定ではほとんど無視されてきた周波数依存性に着目して FMR スペクトルの分析をしたところ、NM/FM 二層膜に印加した交流電流の周波数に依存した大きなアーティファクト電圧を発見した。本発表では、この周波数依存アーティファクトの起源を検討した結果を報告する。

実験方法・結果

マグネトロンスパッタリングを用いたリフトオフ法により、Si 基板上に NM(10 nm)/Ni₉₅Cu₅(10 nm)二層膜の細線を作製し、これに交流電流印加用のコプレーナ線路を取り付けた。このような素子にマイクロ波信号発生器を接続し、外部磁場を細線から 45°方向に印加しながら、交流電流印加時に発生する整流電圧をバイアステー経由で測定した。NM 層としてスピン軌道相互作用(SOI)の強い Pt と、弱 SOI の Al, Cu を用いた場合について、 $f=5\sim 30$ GHz の周波数領域でスピントルク効率を評価した。

実験結果

図1に NM = Pt, Al, Cu の NM/Ni-Cu 細線について測定したスピントルク効率の周波数依存性を示す。30 GHz でのスピントルク効率は、Pt : 0.07、Al : 0.02、Cu : 0.006 であり、先行研究の報告値と矛盾しない。しかし、10GHz 以下の低周波数領域を見ると、スピントルク効率が周波数の低下にしたがって急激に増加しており、Cu では 5 GHz で 30 GHz の時の 4 倍にも達した。ST-FMR 理論によると、スピントルク効率は周波数に依存しないと考えられるため、何らかのアーティファクト信号が重畳していると考えられる。本発表では、低周波数領域でみられたアーティファクトの原因として、(1) FM 層からのスピンポンピングによる逆スピンホール電圧、(2) 磁化ダイナミクス誘引による発熱が膜厚方向に作る温度勾配によって生じる熱スピン起電力、(3) 低磁場領域での磁化未飽和の影響、および(4) 非線形マグノン散乱によるポンピングスピン流増大について、それぞれの可能性を定量的に検討した結果を報告する。

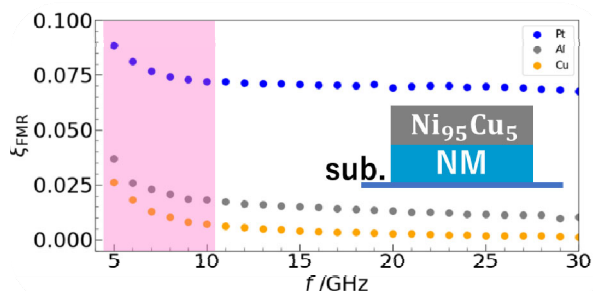


図1 スピントルク効率の周

波数依存性

参考文献

- [1] L.Liu *et al.* Phys. Rev. Lett., **106**, 036601 (2011).
 [2] Kondo *et al.* APEX **9** 023002 (2016)
 [3] Karimeddiny *et al.* PRAppl. **14** 024024

Ti/W 傾斜材料におけるスピントルク効率の成膜条件依存性

中山颯人¹, 洞口泰輔¹, Thomas Scheike¹, 山野井一人¹, 能崎幸雄^{1,2}
(慶大理工¹, 慶大スピン研²)

Sputtering condition dependence of spin-torque efficiency in Ti/W composition graded material

H. Nakayama¹, T. Horaguchi¹, T. Scheike¹, K. Yamanoi¹, and Y. Nozaki^{1,2}

(Dept. of Phys., Keio Univ.¹, CSRN, Keio Univ.²)

はじめに

近年、新奇なスピン流生成機構としてスピン渦度結合(SVC)が注目を集めている。しかし、SVCにおけるスピン軌道相互作用(SOI)の寄与など、その微視的機構には未解明な点が多い。われわれは、異種材料の接合界面をナノスケールで組成変調させた材料(傾斜材料)を作製し、界面構造と生成されるスピン流の相関を調べることで、組成傾斜部の電気伝導度勾配が作る電流渦のSVC由来のスピン流に関する研究を行っている。今回、SOIの大きさや符号が違うTiとWからなる傾斜材料を異なる成膜条件で作製し、そのスピントルク効率の成膜条件依存性を調べたので報告する。

実験方法

マグネトロンスパッタリングとフォトリソグラフィを用いたリフトオフ法により、Si基板上にTi(10)/W($t_i/2$)/Ti($t_i/2$)/W(10)/Ni₉₅Cu₅(10)/SiO₂(20)多層膜を成膜した(膜厚の単位はnm)。Ti(10)とW(10)の間に挿入した極薄のW/Ti層の厚さ t_i は、0から2.0nmまで0.5nm刻みで変化させた。本実験では、TiとWのスパッタ成膜レートが異なる2種類の条件(F: 0.99 Å/s (W), 0.82 Å/s (Ti)とS: 0.46 Å/s (W), 0.22 Å/s (Ti))で多層膜を作製した。これらの試料に対し、原子間力顕微鏡(AFM)で表面観察を行い、ラフネスの成膜条件依存性を調べた。さらに、スピントルク強磁性共鳴(ST-FMR)法[1]を用いて、各々のTi/W傾斜材料のスピントルク効率 ξ_{FMR} を評価し、 ξ_{FMR} の t_i 依存性が成膜条件によりどのように変化するかを調べた。

実験結果

Fig.1に成膜条件(F)と(S)で作製した多層膜表面の二乗平均平方根粗さ R_{ms} の t_i 依存性を示す。スパッタリング速度を遅くすることにより、試料表面の粗さが大きく低減されている様子がわかる。また、成膜条件(F)の表面には、高さ1.5nm程度の島状の析出物が見られたのに対し、成膜条件(S)の表面には全く見られなかった。Fig.2は、成膜条件(F)と(S)で作製した多層膜について測定した ξ_{FMR} の t_i 依存性である。成膜条件(S)の場合、Si/Al傾斜材料を用いた先行研究の結果[2]と同様に、 t_i の減少に伴い ξ_{FMR} が正方向に増加する傾向が見られた。一方、成膜条件(F)では、 t_i に対する ξ_{FMR} 変化にばらつきが大きい。したがって、組成傾斜幅によるスピントルク効率の制御には、傾斜界面の凹凸を抑えることが重要であると考えられる。

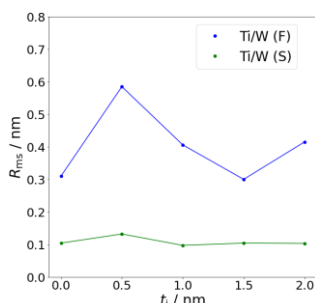


Fig.1 Root mean square roughness R_{ms} as a function of insertion layer thickness t_i

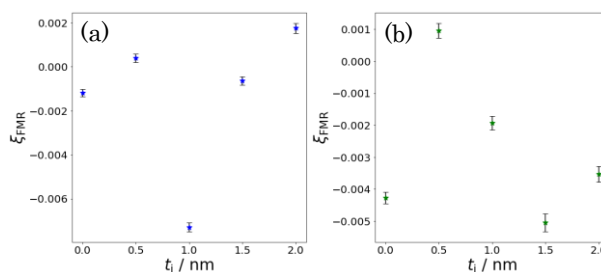


Fig.2 (a) t_i dependence of spin-torque efficiency ξ_{FMR} for samples prepared under sputtering condition (F)
(b) t_i dependence of ξ_{FMR} for samples prepared under sputtering condition (S)

参考文献

[1] L. Liu et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 036601 (2011).

[2] T. Horaguchi et al., submitted (<https://www.researchsquare.com/article/rs-955888/v1>).

反強磁性絶縁体 NiO を介した熱スピン効果の光学測定

山崎匠, 関剛斎, 窪田崇秀, 高梨弘毅
(東北大金研)

Optical measurement of thermo-spin effects through antiferromagnetic insulator NiO

T. Yamazaki, T. Seki, T. Kubota, and K. Takanashi
(IMR, Tohoku Univ.)

はじめに

スピнкаロリトロニクス進展に伴い、磁性材料が新たな熱電発電・熱マネジメント技術のコア材料として注目を集めている。熱流とスピン流の相互変換現象である熱スピン効果はスピнкаロリトロニクス現象の一種であり、熱流を出力とする熱スピン効果にはマグノンや伝導電子により駆動する2種類の効果がある[1]。非磁性金属/強磁性金属という金属接合系においては複数の熱スピン効果が同時に発現する上、強磁性金属層において磁気熱電効果である異常エッチングスハウゼン効果 (AEE) [2]による熱流も生成される。このように、金属接合系における温度変化は複数の物理的起源が寄与しており、温度変化の詳細を理解するためには、これらの寄与を分離することが不可欠である。そこで本研究では、非磁性金属 (Pt) /強磁性金属 ($\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$) 間に反強磁性絶縁体 NiO を挿入し、強磁性金属層を電氣的に絶縁することで、AEE の寄与を排除した熱スピン効果の測定を試みた。

実験結果

Pt/NiO/ $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{60}\text{B}_{20}$ (CoFeB) 三層構造において Pt に電流を流すと、スピホール効果によりスピン流が生成される。このスピン流は反強磁性絶縁体である NiO を介して CoFeB に注入され、最終的に熱スピン効果による熱流が生じる。NiO はマグノンやスピン揺らぎによってスピン角運動量を輸送する一方、Pt-CoFeB 間を電氣的に絶縁するため、CoFeB における AEE を排除した測定が可能となる。マグネトロンスパッタリング法により MgO(111)基板上に Pt(10 nm)/NiO(t)/CoFeB(20 nm) を作製した後、Al-O(20 nm)/Cr(5 nm)/Au(100 nm) をイオンビームスパッタリング法により成膜した。ここで Au 層は測温用トランスデューサーとなる。そして薄膜試料を幅 400 μm 、長さ 2.5 mm の矩形状に微細加工した。熱スピン効果による温度変化の測定には、反射率の温度依存性 (サーモリフレクタンス) を利用した光学的測温技術とロックイン検出を組み合わせたロックインサーモリフレクタンス法[3]を用いた。ロックインサーモリフレクタンス法では試料の温度振幅 A と位相 ϕ の温度変化情報を取得できる。 $t = 10$ nm のデバイスにおいて、入力電流の位相での温度変化を表す $\Delta T (= A \cos \phi)$ の磁場 H 依存性を測定したところ、CoFeB の磁化曲線と同じ挙動を示した。Pt 層と CoFeB 層の間の抵抗測定により NiO 層が絶縁体であることは確認されており、熱スピン効果は強磁性層の磁化に比例することから、 ΔT が熱スピン効果に由来することが示された。続いて、熱スピン効果の信号強度を最大化する最適な t を決定するため、 $t = 5 - 50$ nm の範囲で A_{odd} の t 依存性を調査した。ここで A_{odd} は、 $A_{\text{odd}} = |A(+H)e^{i\phi(+H)} - A(-H)e^{i\phi(-H)}|/2$ で定義され、 H に依存しないバックグラウンド信号が除去された温度振幅を表す。 A_{odd} は $t = 10$ nm で最大値を示し、 t の増加とともに単調に減少した。この結果から、本研究で用いた三層構造において AEE の寄与を排除し熱スピン効果を最大化できる最適な NiO 層厚さは、 $t = 10$ nm であることがわかった。また、 A_{odd} の t 依存性から NiO のスピン透過長を見積もったところ、得られた値は先行研究[4,5]と同じオーダーであり、 A_{odd} の t 依存性が NiO 中のスピン輸送を反映した結果となった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP18H05246, JP21K20392) の支援を受けて行われた。

参考文献

- 1) K. Uchida, Proc. Jpn. Acad., Ser. B **97**, 69 (2021).
- 2) T. Seki *et al.*, Appl. Phys. Lett. **112**, 152403 (2018).
- 3) T. Yamazaki *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **54**, 354001 (2021).
- 4) Y. Wang *et al.*, Science **366**, 1125 (2019).
- 5) T. Ikebuchi *et al.*, Appl. Phys. Express **14**, 123001(2021).