

第 59 回 応用物理学会北海道支部 第 20 回 日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿

C 会場 (B32 講義室)

C - 1 1 月 6 日 (土) 10:30 ~ 12:00 座長 : 足立 智 (北大工)

- C-1-1 Co_2MnAl をスピン源にした垂直磁化膜に作用するスピン軌道トルク ★
○花野直樹, 森田大夢, 山ノ内路彦, 植村哲也
(北大情報科学院)
- C-1-2 Co 基ホイスラー合金 Co_2MnSi によるスピン軌道トルクの特性評価 ★
○森田 大夢¹, 花野 直樹¹, 山ノ内 路彦², 植村 哲也²
(北海道大学大学院情報科学院¹, 北海道大学大学院情報科学研究院²)
- C-1-3 中性子散乱実験による $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_4$ ($x=0.75$) における電荷秩序の観測 ★
○竹内 陸¹, 宮崎 正範¹, 池田 陽一², 藤田 全基², 戎 修二¹
(室蘭工大院工¹, 東北大金研²)
- C-1-4 立方晶 $3d$ 電子系 AVO_3 ($A=\text{Sr}, \text{Ba}$) におけるスピン軌道相互作用の影響 ★
○藤村 佳紀, 宮崎 正範, 戎 修二
(室蘭工大院工)
- C-1-5 Co_2MnGa を用いた交換バイアス型磁気トンネル接合におけるトンネル磁気抵抗★
○徳山星哉, 千葉拓人, 吉田周世, 植村哲也, 山ノ内路彦
(北海道大学大学院情報科学院)
- C-1-6 グラフェン上の Fe_3O_4 薄膜の作成および評価
○岩崎翔大, Subagyo Agus, 石原江瑚, 八田英嗣, 末岡和久
(北海道大学情報科学院)

Co₂MnAl をスピン源にした垂直磁化膜に作用するスピン軌道トルク Spin-orbit torque acting on a perpendicular magnetization layer with a Co₂MnAl spin source.

北海道大学

花野直樹, 森田大夢, 山ノ内路彦, 植村哲也

Hokkaido University

Naoki Hanano, Daimu Morita, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura

1.はじめに

スピン軌道トルク(SOT)による垂直磁化膜の磁化反転は、次世代 MRAM 開発にとって重要な技術の一つである。中でも、強磁性体中で生成されるスピン流による SOT は、無磁場下での垂直磁化膜の磁化反転を可能とするため、注目を集めている[1][2]。最近、我々は Co₂MnAl(CMA) をスピン源としたサンプルで、無磁場下での垂直磁化膜 CoFeB の SOT 磁化反転を実証した[3]。しかし、その SOT 磁化反転の効率は明らかになっていない。本研究では、harmonic Hall 電圧測定法[4]により、CMA の生成するスピン流による SOT 有効磁場の大きさを定量的に評価した。

2.実験方法

MgO(001)単結晶基板上に MgO buffer(15)/CMA(5)/Ti(3)/CoFeB(1.6)/MgO(2)/Ta cap(2) (単位 : nm) からなる積層構造(Fig.1(a))を成膜し、ホールバー形状に加工した。チャンネルに交流電流を印加したときの、1 次の harmonic Hall 抵抗(R_{ω}) および 2 次の harmonic Hall 抵抗($R_{2\omega}$)の大きさから、CoFeB 垂直磁化に作用する damping-like torque と field-like torque の有効磁場 H_{DL} , H_{FL} を評価した。

3.結果と考察

Fig.2(a)に電流密度(j)が 2.1×10^6 A/cm²の交流を印加したときの R_{ω} と $R_{2\omega}$ の面内磁場依存性を示す。 R_{ω} の面内磁場依存性から CMA は垂直磁化膜であることが示され、その異方性磁場の大きさはおよそ 230 mT であった。更に $R_{2\omega}$ の面内磁場依存性により H_{DL} , H_{FL} を算出するとおよそ $H_{DL} = 1.2$ mT, $H_{FL} = 2.5$ mTとなった。

Fig.2(b)に H_{DL} , H_{FL} の j 依存性を示す。 H_{DL} , H_{FL} ともに電流の大きさにほぼ比例して増加していることが分かる。また得られた有効磁場を電流密度で割った量を SOT 生成効率と定義すると、今回得られた効率は、近年報告された Co₂MnGa をスピン源に用いた場合[2]と比較して、 H_{DL}/j はおよそ 6 倍、 H_{FL}/j はおよそ 64 倍の大きな値が得られた。

[1] Baek, Sh.C., Amin, V.P., Oh, YW. et al. Nature Mater **17**, 509–513 (2018).

[2] Ke Tang et al., Appl. Phys. Lett. **118**, 062402 (2021).

[3] D. Morita, T. Hara, M. Yamanouchi, T. Uemura, AIP Advances **13**, 015037 (2023).

[4] M. Hayashi, J. Kim, M. Yamanouchi, and H. Ohno, Phys. Rev. B **89**, 144425 (2014).

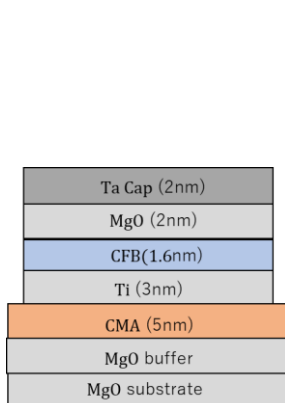


Fig.1. Schematic of the stacking structure used in this study.

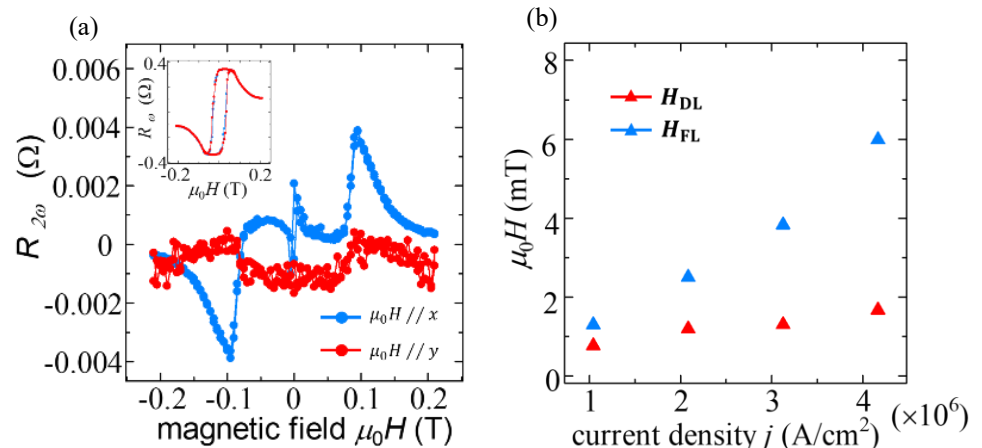


Fig.2. (a) The second harmonic Hall resistance when sweeping the magnetic field in the +x and -x directions where x-axis takes along the channel direction. The inset shows the first harmonic Hall resistance.

(b) Effective magnetic field due to damping-like torque and field-like torque for the direction of the CoFeB magnetization pointing to the +z direction.

Co 基ホイスラー合金 Co_2MnSi によるスピン軌道トルクの特性評価

Evaluation of spin-orbit-torque induced by Co-based Heusler alloy Co_2MnSi

北海道大学

森田大夢, 花野直樹, 山ノ内路彦, 植村哲也

Hokkaido University

Daimu Morita, Hanano Naoki, Michihiko Yamanouchi, and Tetsuya Uemura

1.はじめに

スピン軌道トルク(SOT)による磁化反転は、次世代の磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の情報書き込み方式として期待される技術である。特に近年、強磁性スピン源から生成されたスピン流により、現在主流の垂直磁化膜に対して無磁場での SOT 磁化反転が可能であることが示され、注目を集めている[1,2]。そのメカニズムの一つとして、spin-orbit precession (SOP) 効果が提唱され、その効率は強磁性スピン源のスピン偏極率に依存することが知られている[1]。Co 基ホイスラー合金 Co_2MnSi (CMS)は高いスピン偏極率を有する強磁性体であり、SOP 効果を発現するスピン源として期待される。本研究では、CMS 層から垂直磁化膜 CoFeB にスピン流を注入した際に誘起される SOT を調べた。

2.実験方法

MgO(001)単結晶基板上に基板側から MgO buffer(10)/CMS(5)/Ti(3)/CoFeB(1.2)/MgO(2)/Ta(2) (単位: nm) からなる積層構造を成膜した。Ti層は CMS と CoFeB の磁氣的結合を防ぐために、また、MgO層は CoFeB に垂直磁気異方性を誘起するためにそれぞれ成膜した。この積層構造を Fig.1 に示すようなチャンネル幅 $5\mu\text{m}$ のホールバー構造に加工し、CoFeB に作用する SOT 由来の有効磁場を評価した。

3.結果と考察

まず、CoFeB 層と CMS 層の磁化容易軸方向を評価するために、ホールバーの横抵抗 $R_{yx}(=V_y/I)$ の面直磁場 $\mu_0 H_z$ 依存性を測定した。その結果、CoFeB(CMS)層は膜面垂直(膜面内)方向に磁化容易軸を有する垂直磁化膜(面内磁化膜)であることが分かった。

次に CMS により誘起される SOT を調べるため、 $R_{yx}-\mu_0 H_z$ ヒステリシスループの電流依存性を測定した。Fig. 2(a)にホールバーに流す電流 I が 6 mA と 12 mA の場合のヒステリシスループを示す。ここで、初期条件として CMS の磁化 M_{CMS} を $+x$ 方向とした。 $I = 6$ mA の場合は印加磁場の極性に対してほぼ対称的なヒステリシスループとなるのに対し、 $I = 12$ mA の場合にはヒステリシスループが $-\mu_0 H_z$ 側にシフトした。これは、 $+z$ 方向の有効磁場が CoFeB に作用したことを意味しており、その起源は CMS からのスピン流による SOT であると考えられる。 Fig. 2(b)に示すように、このシフト量 H_{shift} および向きは I の大きさや CMS の磁化方向に依存することが分かった。特に、ある閾値以上の I を印加した際にヒステリシスループのシフトが起こることから、SOP 効果の発現が示唆される。講演では、 H_{shift} の電流依存性およびその起源についても議論する。

[1] Baek, S. C., et al., *Nature Mater* **17**, 509–513 (2018).

[2] D. Morita., et al., *AIP Advances* **13**, 015037 (2023).

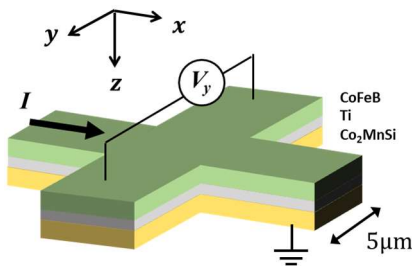


Fig.1. Schematic of the Hall-bar device.

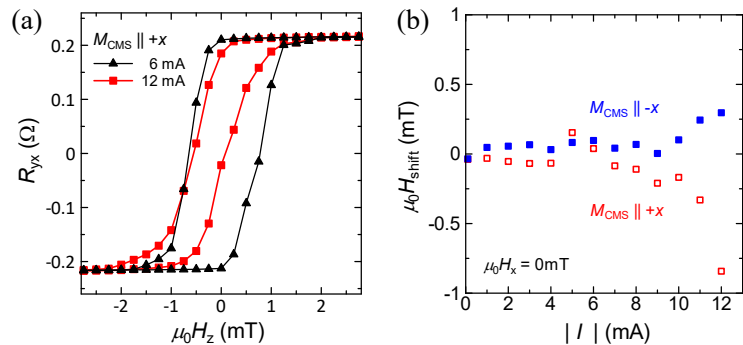


Fig.2. (a) R_{yx} as a function of $\mu_0 H_z$ under $I = 6$ and 12 mA for M_{CMS} pointing to the $+x$. (b) $\mu_0 H_{\text{shift}}$ as a function of $|I|$ for M_{CMS} pointing to the $+x$ direction.

中性子散乱実験による $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_4$ ($x=0.75$) における 電荷秩序の観測

Observation of charge ordering in $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_4$ by neutron scattering

室蘭工大院工¹、東北大金研²、○竹内 陸¹、宮崎 正範¹、池田 陽一²、藤田 全基²、戎 修二¹

¹Grad. Sch. of Eng. Muroran Inst. of Tec., ²IMR, Tohoku Univ.

○¹R. Takeuchi, ¹M. Miyazaki, ²Y. Ikeda, ²M. Fujita, and ¹S. Ebisu

【序論】

K_2NiF_4 型の構造を持つ $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_4$ (LSCoO) ($x=0.5$) は、電気抵抗からは $T_{\text{CO}}=825(20)$ K で、中性子散乱実験からは約 800 K 以下で $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ のチェッカーボード型の電荷秩序することが知られている[1]。さらに格子非整合な反強磁性が 60 K 以下で観測されることからストライプ秩序との関連が示唆されている[1-5]。また、Sr を Ca に置換した $\text{La}_{2-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_4$ の $x=0.4, 0.6$ においても、ラマン散乱測定から電荷秩序に伴う対称性の変化が報告されているが、これ以降の濃度における高温側の電荷秩序やゆらぎについては明らかにされていない[3-6]。我々は、これまで LSCoO ($x=0.7\sim 0.9$) の多結晶試料について、AC 電気抵抗測定を行い、200~340 K 以下で電気抵抗率が周波数依存することを示し、電荷秩序または電荷ゆらぎの可能性を報告した[7]。今回、単結晶 LSCoO ($x=0.75$) 試料を用いて、中性子散乱実験から間接的に電荷秩序の観測を試みた。

【実験方法】

固相反応法で合成した多結晶 LSCoO ($x=0.70, 0.75, 0.80$) を原料に浮遊帯域溶融法により $\langle 110 \rangle$ 方向に単結晶育成を行った。試料は、X 線ラウエ法により結晶化していることを確かめた。また、磁化測定、AC 電気抵抗測定で物性評価を行った。中性子散乱実験は JRR-3 の 6G TOPAN で $x=0.75$ の組成について行った。

【結果・考察】

図 1 に $x=0.75$ 試料に対して行った中性子弾性散乱の測定結果を示す。 $(h\ 0\ -7)$ 周りで h 方向のスキャンをしたところ、核反射や磁気ブラッグピークは現れず、もし $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ のチェッカーボード型の電荷秩序があれば原子変位により、 $h=-1$ に超格子反射が現れることが期待される。ピークは $h=-1$ を中心におよそ ± 0.3 ずれた位置に現れ、格子非整合な電荷秩序弾性散乱の可能性を示唆した。また、磁気反射が見えるブラッグ反射位置では、2-4 meV の非弾性散乱で磁気励起と思われるピークが観測された。講演では、電荷ゆらぎとストライプ秩序との関係についても議論を行う。

【参考文献】

[1] M. Cwik *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 057201 (2009). [2] I. A. Zaliznyak *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 4353 (2000). [3] I. A. Zaliznyak *et al.*, Phys. Rev. B **64**, 195117 (2001). [4] N. Sakiyama *et al.*, Phys. Rev. B **78**, 180406(R) (2008). [5] M. Yoshida *et al.*, Phys. B **536**, 338 (2001). [6] R. C. Williams *et al.*, Phys. Rev. B **93**, 140406 (2016). [7] 竹内陸ほか、第 58 回応用物理学会北海道支部学術講演会 C-III-4 (2023).

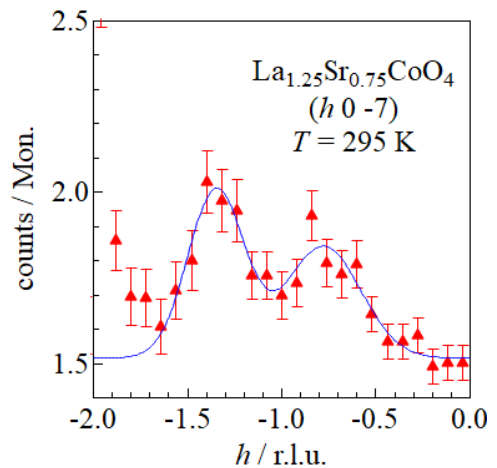


図 1. LSCoO($x=0.75$)の弾性散乱による $(h\ 0\ -7)$ の h -scan の結果。実線は、ガウス関数による fit 曲線。

立方晶 $3d$ 電子系 AVO_3 ($A = \text{Sr}, \text{Ba}$)におけるスピン軌道相互作用の影響

Effect of spin-orbit interaction in cubic $3d$ electron system AVO_3 ($A = \text{Sr}, \text{Ba}$)

室蘭工大院工 ○藤村 佳紀, 宮崎 正範, 戎 修二

Grad. Sch. of Eng. Muroran Inst. of Tec. ○Y. Fujimura, M. Miyazaki and S. Ebisu

【序論】

近年、スピントロニクスで注目されているスピン流の制御は、異常ホール効果を応用したものであり、スピン軌道相互作用(SOI, Spin-Orbit Interaction)によって生じる現象であることから SOI の有無が鍵となっている。一方、一般的に d 電子系では、周囲のイオンによる結晶電場(結晶場)の影響を受けて SOI は消失していると考えられている。しかし、G. Jackeli らの理論研究^[1]によると、正方格子のように対称性が高く、結晶場が小さく基底状態に軌道縮退が残る場合、 Sr_2VO_4 の $3d^1$ で λ が 20 meV 程度の場合でもスピン軌道相互作用は消失されないと予想しているが、実験による先行研究からは SOI は消失していると考えられている^[2]。そこで本研究では、新たな物質系候補として立方晶ペロブスカイト型 V 酸化物 AVO_3 ($A = \text{Sr}, \text{Ba}$)に着目し、第一原理によるバンド計算から SOI の影響を見積もり、 $3d$ 電子系で SOI が残る可能性について検討した。

【実験方法】

第一原理計算パッケージ VASP6.3.2 を用いて、密度汎関数法(DFT)によるバンド計算を行った。交換相関汎関数に PAW(Projector Augmented Wave)法の LDA(Local Density Approximation)を用いて、さらに相互作用として、Hubbard モデルの U や SOC(Spin-Orbit Coupling)を考慮した場合としなかった場合など、これらを組み合わせた条件で計算を行い比較検討した。k 点サンプリングは $12 \times 12 \times 12$ のメッシュで行った。

【結果・考察】

AVO_3 ($A = \text{Sr}, \text{Ba}$)の LDA+SO+ U (1 eV)によるバンド計算の結果を図 1 に示す。SOC を考慮しない場合は、 $t_{2g}(d_{xy}, d_{yz}, d_{zx})$ 軌道は三重縮退しているが、SOC を考慮すると、図 1(b)に示すように Γ 点において SrVO_3 では 48 meV、 BaVO_3 では 54 meV 程度のギャップが開き分裂することが分かった。これは、立方対称の結晶場では SOI が消失されず、その寄与が残る可能性を示唆している。

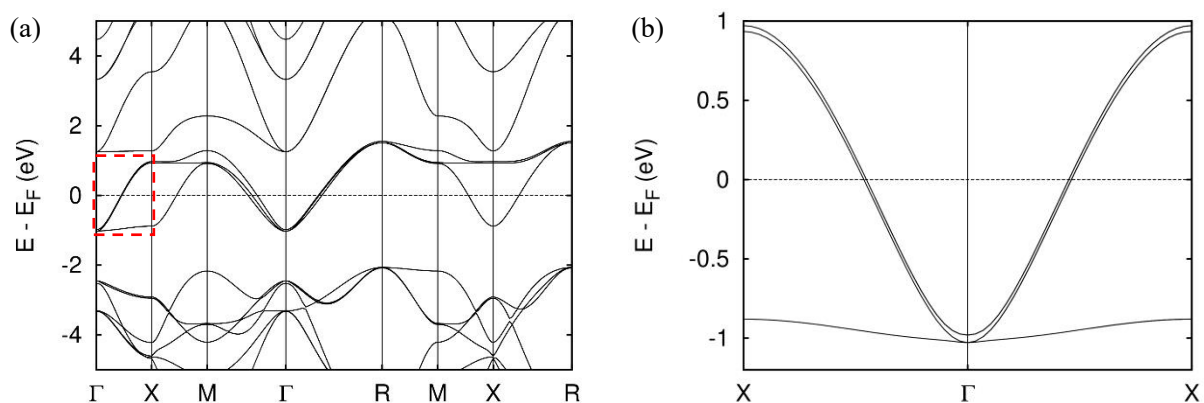


図 1 SrVO_3 のバンド構造(a)SOC を考慮した場合の計算結果、および(b) Γ 点付近の t_{2g} 軌道の拡大図

[1] G. Jackeli, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 017205 (2009).

[2] I. Yamauchi, *et al.*, Phys. Rev. B **92**, 064408 (2015).

Co₂MnGa を用いた交換バイアス型磁気トンネル接合における トンネル磁気抵抗

Tunnel magnetoresistance in exchange-biased magnetic tunnel junction using Co₂MnGa

北海道大学

徳山星哉, 千葉拓人, 吉田周世, 植村哲也, 山ノ内路彦

Hokkaido University

Seiya Tokuyama, Takuto Chiba, Shusei Yoshida, Tetsuya Uemura, Michihiko Yamanouchi

1. はじめに

磁気トンネル接合(MTJ)は、ハードディスクの読取りヘッドや、車載センサ、磁気抵抗メモリなどへ応用されており、それらの高性能化のためにトンネル磁気抵抗(TMR)比のさらなる向上が求められている。そのような中で、磁性ワイル半金属を強磁性電極とする MTJ においては 10⁴%を超える巨大な TMR 比[1]を実現できることが理論的に予想されている。しかし、磁性ワイル半金属と考えられている Co₂MnGa(CMG)を強磁性電極とする保磁力差型 MTJ においては、理論値よりも低い 50%程度の TMR 比が報告されている[2]。この原因の1つとして、高抵抗状態において反平行磁化配置を実現できていないことが考えられる。そこで、本研究では、CMG を強磁性電極とし、かつ交換バイアスにより反平行磁化配置を安定化させた交換バイアス型 MTJ を作製し、TMR 効果を調べた。

2. 実験方法

MgO(001)基板に、基板側から MgO buffer (10 nm) / CoFe buffer (30 nm) / CMG (5 nm) / MgO (3.5 nm) / CMG (5 nm) / CoFe (1.1 nm) / IrMn (10 nm) / Ru (5 nm)を成膜した。MgO 層の成膜には電子線蒸着法を用い、その他の層の成膜にはマグネトロンスパッタリング法を用いた。また、CoFe 層、CMG 層については、室温で成膜した後に真空中でそれぞれ、500°C、400°Cで熱処理した。続いて、作製した積層構造をフォトリソグラフィと Ar イオンミリングを用いて接合サイズ 10 μm × 10 μm の MTJ 素子に加工した後、交換バイアスにより上部 CMG/CoFe 層の磁化方向を固定するため、真空中にて 500 mT の磁場印加のもと 350°Cで熱処理した。そして、交換バイアスに沿う方向の面内磁場を掃引して TMR 効果を調べた。

3. 結果及び考察

Fig.1 に作製した MTJ の抵抗の面内磁場依存性を示す。典型的な交換バイアス型 MTJ における抵抗の磁場依存性を示し、TMR 比は室温で 97%であった。ここで、低磁場、高磁場における抵抗変化は、それぞれ下部 CoFe/CMG 層、上部 CMG/CoFe 層の磁化反転に対応する。この TMR 比の大きさは CMG を強磁性電極とする保磁力差型 MTJ における TMR 比よりも高いが[2]、磁性ワイル半金属 MTJ における TMR 比の理論値よりも低い。この原因として、今回作製した交換バイアス型 MTJ は、CMG から MgO 障壁への Mn 拡散や、CMG の組成ずれ、及び膜厚が薄いことなどによって理想的な磁性ワイル半金属 MTJ とは異なっていることが考えられる。

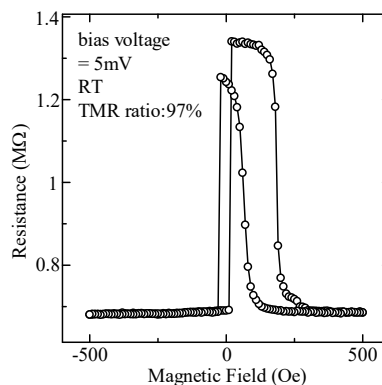


Fig.1 抵抗の面内磁場依存性

参考文献

[1] D. J. P de Sousa *et al.*, Phys. Rev B **104**, L041401 (2021).

[2] T. Chiba *et al.*, 第 58 回応用物理学会北海道支部学術講演会, 室蘭, 2023 年 1 月.

グラフェン上の Fe₃O₄ 薄膜の作製および評価

Preparation and characterization of Fe₃O₄ thin films on graphene
北大院情 ○(M1)岩崎翔大, Subagyo Agus, 石原江瑚, 八田英嗣, 末岡和久
Graduate School of IST, Hokkaido Univ.

○S. Iwasaki, A. Subagyo, E. Ishihara, E. Hatta and K. Sueoka
E-mail: siwasaki@eis.hokudai.ac.jp; agus_subagyo@ist.hokudai.ac.jp

グラフェンへのスピン流の注入・検出が報告された 2007 年以來^[1,2], グラフェンがスピントロニクス材料の理想的な選択肢として浮上してきた。グラフェンは, その弱いスピン軌道相互作用に由来する室温でのスピン拡散長がマイクロメートルオーダーに達する非常に長い^[1-4]ことや, スピン緩和時間がマイクロ秒〜ミリ秒と長く, さらに単分子層まで高い移動度と卓越したスケールビリティを示すためである。これらの特性により, 純粋なスピン流を長距離伝送できるため, グラフェンスピンデバイスではジュール発熱損失が大幅に低減でき, ラテラル (横型) スピンバルブ, MTJ, スピントネルトランジスタにおけるスピンフィルターなど, 様々な画期的な次世代デバイス開発に火をつけている^[5,6]。グラフェンにスピン偏極電子の注入, またグラフェン中のスピン流の制御をおこなうためにはグラフェンを磁性材料等に接触・接合させるが, 一般的な有機・分子デバイスと同様にグラフェンと磁性材料の界面物性がデバイス特性に大きな役割を担う^[7]。本研究では, グラフェンへのスピン偏極電子の注入電極としてハーフメタルである Fe₃O₄ を検討し, グラフェン上に良質な単結晶 Fe₃O₄ の作製を目的とした。

まず, HOPG 表面を用いて Fe₃O₄ の成膜を試みた。我々は報告した MgO(001) 基板上的のエピタキシャル Fe₃O₄(001) 膜の作製条件を用いて成膜をおこなった。HOPG 基板の温度を 250°C にし, 酸素雰囲気中 (真空度が 7.7×10^{-7} mbar) で Fe を約 0.1 nm/min のレートで蒸着した。XPS 結果は酸素不足の Fe₃O₄ を示唆したため, 成膜後に酸素雰囲気中で 30 分間ポストアニールした。XPS 結果より, 化学量論的な Fe₃O₄ の組成が得られた。同様な条件で市販の Cu フォイル上に成長させているグラフェン上に Fe₃O₄ の成長を試みた。HOPG と比較して若干アモルファスカーボンの汚染物があり, ドメインも複数あるが, HOPG 基板上と同じく良質な組成の Fe₃O₄ の成膜が可能であった。LEED の回折パターン強度が弱く Fe₃O₄(111) 面の成長を裏付けるほど明瞭ではないことが分かった。今後は XRD などを用いる Fe₃O₄ の評価をおこない, グラフェンスピンデバイスの作製を進める予定である。

References :

- [1]. N. Tombros *et al.*, Nature **448**, 571 (2007).
- [2]. M. Ohishi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, L605 (2007).
- [3]. M. Drögeler *et al.*, Nano Lett., **16**, 3533 (2016).
- [4]. J. Panda *et al.*, ACS Nano **14**, 12771 (2020).
- [5]. E. C. Ahn, 2D Mater. Appl. **4**, 17 (2020).
- [6]. G. Hu, Nanoscale Res. Lett. **15**, 226 (2020).
- [7]. M. Cinchetti *et al.*, Nat. Mat. **16**, 507 (2017).
- [8]. A. Subagyo *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 5447 (2005).

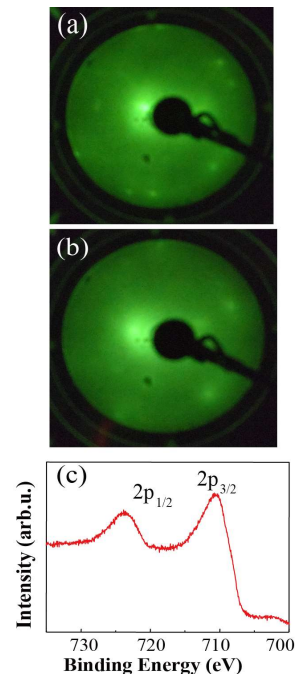


Fig. 1 LEED patterns of (a) graphene/Cu, Fe₃O₄ thin films. (c) Fe2p3 XPS spectrum