

# 絶縁性強磁性体を用いた磁気層間結合の電圧制御

日高 温志、柳原 英人

(筑波大学)

Voltage control of magnetic interlayer coupling using insulating ferromagnets

Atsushi Hidaka<sup>1</sup>, and Hideto Yanagihara<sup>1</sup>

(University of Tsukuba)

## 【背景】

磁気層間結合(IEC)の電圧制御(VCIEC)は、これまでに様々な試みがなされているものの未だ明確な実証に至っていない[1]。強磁性金属薄膜の IEC が一般的であるが、絶縁性強磁性体を用いた系では容易に大きな電圧を印加することができるため、我々は VCIEC を検証する系として負の IEC が確認されている Fe/Co<sub>0.75</sub>Fe<sub>2.25</sub>O<sub>4</sub>(CFO)/MgO(001)[2]に電圧印加することを考えている。CFO の下部電極層には、逆位相境界の発生を抑えるためスピネル構造を有し、かつ CFO に適切な歪を導入するために MgO ( $a = 4.212\text{\AA}$ )との格子不整合が小さいものが望ましい[3]。導電性スピネル型酸化物のなかで、我々はCoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(CVO)について着目した。CVO は室温で  $65\text{ m}\Omega\text{cm}$  であり、その格子定数は  $8.407\text{ \AA}$ [4]であることから、上記の系の下部電極層として期待できる。そこで本研究では Fe/CFO/CVO/MgO(001)における VCIEC の測定を目指し、IEC の結合強度評価を試みた。

## 【実験・結果】

試料構造は Pt(2 nm)/Fe(1 nm)/CFO(30 nm)/NiO(0, 5 nm)/CVO(50 nm)/MgO(001)とした。NiO 層は CVO の過酸化を防ぐための緩衝層として挿入した。CFO, NiO, CVO は反応性 RF マグネトロンスパッタリング法、Fe, Pt は DC スパッタリング法によりそれぞれ作製した。作製した積層膜に対して XRD による結晶構造解析、VSM による磁気特性評価を行った。

図 1 に CFO/NiO/CVO/MgO(001)に対する面内方向の XRD 結果を示す。74°付近に 1 つのピークのみ観測されたことから、CVO, CFO にはいずれも引っ張り歪みが生じ、面内の格子定数が MgO 基板に拘束されていることが示唆される。図 2 に同試料の M-H 曲線を示す。この結果から、作製された膜は CFO 単層と同様に PMA を示すことが分かり、NiO/CVO 挿入に伴う CFO の磁気特性への影響は小さいことが確認できる。講演では IEC の結合強度評価など詳細な実験結果について議論する。

## 【参考文献】

- [1] D. Zhang, *et al.*, Nano. Lett. **22**, 622-629 (2022) [2] H. Koizumi *et al.*, AIP Adv. **10**, 015108 (2020)  
 [3] A. Kismarhardja, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 056602 (2011)  
 [4] S. Mesoraca, *et al.*, J. Phys.:Condens. Matter. **30**, 015804 (2018)

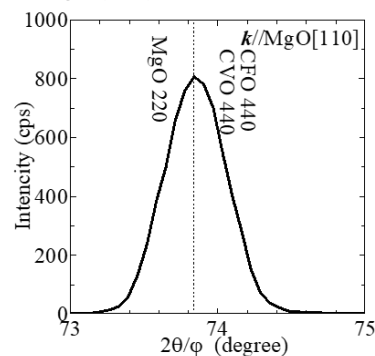


Fig.1 X-ray diffraction patterns of the films.

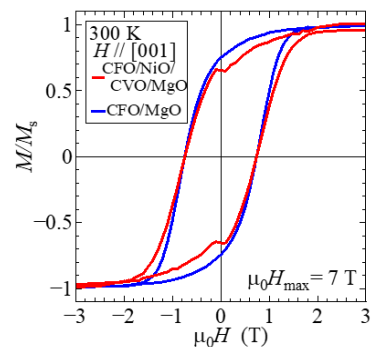


Fig.2 Magnetic hysteresis loops.

# 電圧制御磁気異方性測定に向けた Fe/NiO(001)薄膜の作製

嶋山潤、日高温志、柳原英人  
(筑波大学)

Fabrication of Fe/NiO(001) thin films for voltage-controlled magnetic anisotropy measurements.

J. Shimayama, A. Hidaka, and H. Yanagihara  
(Univ. of Tsukuba)

## はじめに

スピントロニクスデバイスの低消費電力化を実現しうる新たな界面現象として、電圧制御磁気異方性 (VCMA) が報告されている[1]が、電圧印加時の磁気異方性の変化効率 (単位電界あたりの異方性エネルギー変化量) の低さが課題として挙げられている。実用的には少なくとも 300 fJ/Vm 以上が必要とされているが、これまでに多くの研究が行われている Fe/MgO 構造や CoFeB/MgO 構造の変化効率は 100 fJ/Vm に留まっており[2]、より大きな変化効率を示す材料が求められている。そこで、最近本研究グループによって垂直磁気異方性の発現が確認された Fe/NiO(001)界面に着目し、NiO(001)上の Fe 極薄膜における磁気異方性の電圧制御の検証を目指している。電圧印加に向けて、下部電極層には基板である MgO と格子ミスマッチが小さく、導電性を示すスピネル型酸化物である CoV<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(CVO)に注目した。本研究では、下部電極層に CVO を用いた Fe/NiO(001)薄膜を作製し、結晶構造および磁気特性について検討した。

## 実験方法

CVO 薄膜を MgO(001)基板に Co と V の金属ターゲットを用いた 2 元同時反応性 RF マグネトロンスパッタリング法により作製した。その後、CVO(50 nm)/MgO 薄膜上に Cr cap(2 nm)/Fe(0.6 nm)/NiO(10 nm) 多層膜を成膜し、X 線回折法(XRD)により結晶構造解析、振動試料型磁力計(VSM)により試料の磁化過程を評価した。Cr cap 層成膜後、Fe 層の平坦化をするために 450°C で 1 時間の熱処理を施した。

## 実験結果

Fig.1(a)に多層膜試料の膜面垂直方向の XRD、(b)に膜面内方向の XRD の結果を示す。(a)から CVO の膜面垂直方向の格子定数が小さくなっていることがわかった。一方、(b)ではピークが一つしか現れなかったことから、膜面内方向の格子定数が MgO 基板に拘束されていることが確認された。

次に、Fig.2 に多層膜試料の VSM の結果を示す。膜面垂直方向に磁場を印加した際にすぐに飽和していることから、膜面垂直方向に磁化容易軸を持つことが確認された。このことから、CVO を下部電極層として用いることで、垂直磁化膜である Fe/NiO(001)薄膜に電圧印加が可能になることが示唆される。講演では試料作製条件や電圧印加に向けた詳細な実験結果について報告する。

## 参考文献

- [1] T. Maruyama, *et al.*, Nat. Nanotechnol., **4**, 158 (2009).  
[2] W. Skowronski, *et al.*, Appl. Phys. Exp., **8**, 053003 (2015).

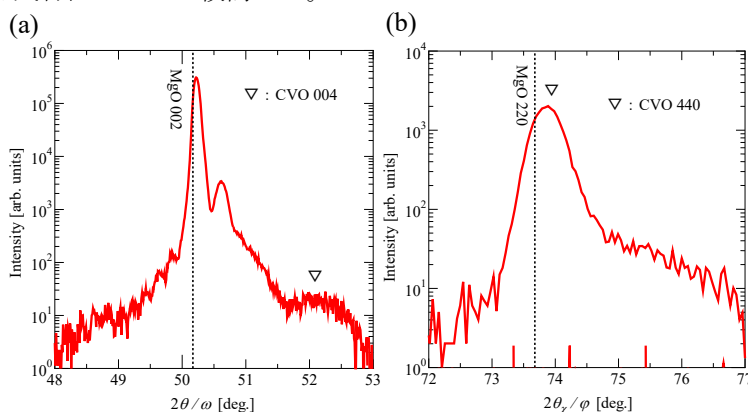


Fig.1 XRD patterns of multilayer sample. (a) Out-of-plane direction  
(b) In-plane direction

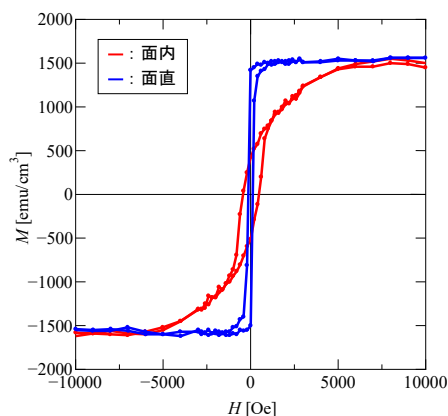


Fig.2 Magnetic hysteresis loop of multilayer sample.

## 水素吸蔵による CoPd 合金薄膜の磁気特性変調

河野佑二<sup>1</sup>、小嶋隆幸<sup>2</sup>、宮町俊生<sup>1</sup>、水口将輝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>名古屋大、<sup>2</sup>信州大)

Modulation of magnetic properties of CoPd alloy thin films by hydrogen absorption

Yuji Kono<sup>1</sup>, Takayuki Kojima<sup>2</sup>, Toshio Miyamachi<sup>1</sup>, Masaki Mizuguchi<sup>1</sup>

(Nagoya Univ.<sup>1</sup>, Shinshu Univ.<sup>1</sup>)

### はじめに

パラジウム、白金、ロジウムなどの貴金属はアルケンの水素化反応に優れた触媒作用を示すことが知られている。これまでの研究でもこの性質を利用した水素センサーを開発しようという試みはなされてきたが、水素吸収によるパラジウムの体積の変化を利用したものが多く、パラジウムの磁化過程を利用した水素センサーに関する報告はあまりない。そこで、本研究では強磁性体の磁化変化を用いた水素センサーの開発を目的として、CoPd 合金薄膜を用い、その水素吸着による磁気特性の変調を目指した。

### 実験方法

スパッタリング法により、熱酸化膜付き Si 基板上に CoPd 合金薄膜を成膜した。Co は DC マグネトロン方式で、Pd は RF マグネトロン方式でスパッタし、それぞれのターゲットに印加するパワーを調整することにより、組成を変化させた試料を室温で作製した。Co:Pd = 65:35、Co:Pd = 70:30、Co:Pd = 75:25 の組成となるように作製した。試料の結晶構造を X 線回折 (XRD) により調べた。アルゴンに水素を 3% 混合したガスを試料に暴露することにより、水素吸着処理を行った。作製後および水素吸着後の試料の磁気特性を、振動試料型磁力計 (VSM) により測定した。また、それぞれの試料の電気抵抗も測定し、水素吸着が CoPd の物性に与える影響を調査した。

### 結果

VSM による磁気特性の評価の結果、全ての組成の試料で水素吸着処理をした試料としていない試料の間で磁化曲線に差異が見られた。図 1 に、Co:Pd = 70:30 の組成比を有する試料の磁化曲線を示す。飽和磁化および保磁力の大きさは、水素を吸着した試料で大幅に減少した。この結果から、水素の吸着により CoPd 合金の磁気状態が変化したことが示唆され、同合金の水素センサーへの応用に向けた手がかりが得られた。講演では、水素吸着による結晶構造の変化や、電気伝導特性などについても詳細に議論する。

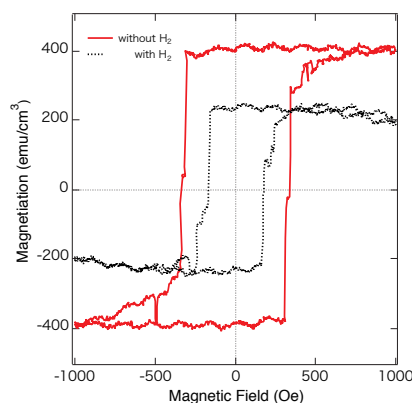


Fig. 1 Magnetization of a CoPd thin film (Co:Pd = 70:30) as a function of magnetic field before and after H<sub>2</sub>-absorption.

### 謝辞

本研究の一部は、名古屋大学未来材料・システム研究所の 2022 年度共同利用・共同研究による助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] Jaw-Yeu Liang *et al.*, Appl. Phys. Lett., **111**, 023503 (2017).

# MgO/CoFe/Pt 積層膜の磁気異方性とダンピング定数の熱処理による変化

小西愉真, 加藤剛志, 大島大輝  
(名古屋大)

Effect of annealing on magnetic anisotropy and damping constant of MgO/CoFe/Pt trilayer films

Y. Konishi, T. Kato, D. Oshima  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)は、不揮発性、高速書き込み、高い書き換え耐性といった特徴を有し、DRAMを置き換えるユニバーサルメモリとして期待されているが、書き込み時の消費電力の低減が課題となっている。電圧トルク磁化反転<sup>1)</sup>は、電界印加時の磁性薄膜の磁気特性変化を利用した磁化反転方式で、現在主流であるスピン移行トルク(STT)磁化反転と比べて大幅に消費電力を低減できると注目されている。電圧トルク磁化反転は磁化の歳差運動を利用した反転方式であり、安定した書き込みの実現には磁性膜のダンピング定数が重要であると報告されている<sup>2)</sup>。本研究では、垂直磁気異方性を示すMgO/CoFe/Pt積層膜の磁気異方性とダンピング定数のCoFe層厚およびアニールによる変化を、時間分解磁気光学 Kerr 効果(TRMOKE)を用いて調べた。

## 実験方法

RFマグネトロンスパッタリング装置を用いて、SiN(50 nm) / MgO(10 nm) / Co<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>(0.8~1.2 nm) / Pt(3 nm) / Ta(10 nm) / 熱酸化膜付き Si 基板を成膜した。また、真空アニール装置を用いて同サンプルを 200°C, 300°Cで熱処理した。熱処理時間は 30 min とした。積層膜の実効異方性磁界  $H_{\text{keff}}$  は、交番磁界勾配型磁力計(AGM)により測定した  $M$ - $H$  ループより算出した。また、ダンピング定数評価のための TRMOKE では、中心波長 1040 nm, パルス幅 500 fsec., 繰り返し周波数 100 kHz のファイバーレーザーを光源とした。pump 光として波長 1040 nm, probe 光として 520 nm のレーザー光をそれぞれ試料に入射した。測定の際は外部磁界をサンプル膜面法線方向から 60° の角度で、10~14 kOe の範囲で印加した。測定した磁化の歳差運動を減衰振動関数  $\exp(-t/\tau)\sin(\omega t)$  でフィッティングし、角周波数  $\omega$  と緩和時間  $\tau$  の関係から実効ダンピング定数  $\alpha_{\text{eff}}$  を算出した。

## 実験結果

Fig. 1 は、AGM から算出した成膜後、熱処理後の MgO/CoFe/Pt の  $H_{\text{keff}}$  の CoFe 層厚依存性である。CoFe 層厚減少に伴い垂直磁気異方性が増加しているほか、熱処理によって垂直磁気異方性が増加している。Fig. 2 は成膜後、熱処理後の MgO/CoFe/Pt の  $\alpha_{\text{eff}}$  の CoFe 層厚依存性である。 $H_{\text{keff}}$  同様、 $\alpha_{\text{eff}}$  も CoFe 層厚減少に伴い増加している。また、アニールにより  $\alpha_{\text{eff}}$  は増加したが、CoFe 層厚 1.1 nm では磁気異方性が大きく上昇したのに対し、 $\alpha_{\text{eff}}$  は 25%程度の上昇となった。これは磁気異方性が界面由来なのに対し、 $\alpha_{\text{eff}}$  はバルク由来の効果が大きいためと考えられる。

## 参考文献

- 1) W. Wang, et al., Nat. Mater. **11**, 64 (2012).
- 2) R. Matsumoto, et al., Appl. Phys. Express **12**, 053003 (2019).

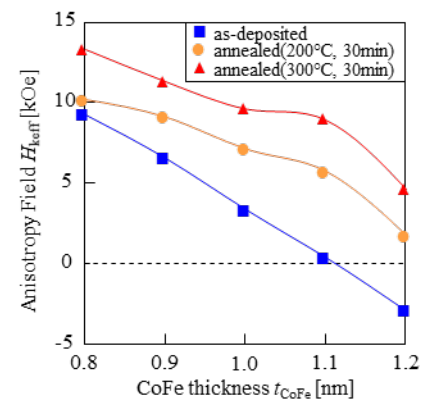


Fig.1 CoFe thickness dependence of effective magnetic anisotropy field of MgO/Co<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Pt trilayer films

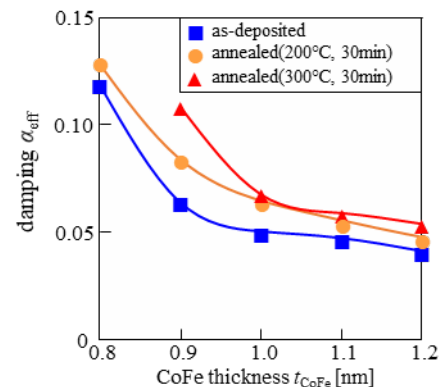


Fig.2 CoFe thickness dependence of effective damping constant of MgO/Co<sub>80</sub>Fe<sub>20</sub>/Pt trilayer films

# 超短パルス光により励起した FeCo/Cu/GdFeCo 三層膜の 磁化ダイナミクス

瀬口和也, 大島大輝, 加藤剛志  
(名古屋大)

Magnetization dynamics of FeCo/Cu/GdFeCo trilayers triggered by ultrashort pulse laser

K. Seguchi, D. Oshima, T. Kato  
(Nagoya Univ.)

## はじめに

近年, 磁性薄膜に超短パルス光を照射することによるスピンの生成が報告されている<sup>1)</sup>. この超短パルス光誘起スピン流は短時間に巨大なスピン流を生成できる可能性があり, 高効率で高速な磁化反転手法となることが期待される. 本研究では, FeCo/Cu/GdFeCo 三層膜において, FeCo 層を超短パルス光励起させることで生成されたスピン流によるフェリ磁性 GdFeCo 層の磁化ダイナミクスを光学的に観察した.

## 実験方法

超高真空マグネトロンスパッタ装置により, SiO<sub>2</sub> 基板 / FeCo (2) / Cu ( $t_{Cu}$ ) / Gd<sub>21</sub>(Fe<sub>90</sub>Co<sub>10</sub>)<sub>79</sub> (10) / SiN (5) (膜厚は nm) を成膜した. Cu 層厚は  $t_{Cu}=40, 80, 120, 160$  nm と変化させた. 試料の磁化ダイナミクスは, パルス幅 500 fs の超短パルスファイバレーザを用いた時間分解磁気光学 Kerr 効果 (TRMOKE) により観測した. probe 光は GdFeCo 膜面側から, pump 光はその逆側から入射 (裏面 pump) し, GdFeCo 膜の歳差運動周波数, 振幅などを調べた.

## 実験結果

Fig. 1 は FeCo / Cu (80) / GdFeCo, および Cu (80) / GdFeCo の裏面 pump の TRMOKE の結果である. 印加磁界は膜法線から  $\theta_H=15^\circ$  の方向に  $H_{ext}=5$  kOe を印加した. pump 光のパワーは,  $4.4$  mJ/cm<sup>2</sup> とした. Fig. 1 より, FeCo 層の存在により, GdFeCo の歳差運動振幅が大きくなることが分かる. また, 歳差運動周波数が FeCo 層がない場合の 17 GHz から 14 GHz 程度に低下した. Fig. 2 は, FeCo / Cu (80, 120) / GdFeCo および Cu (80, 120) / GdFeCo について, 裏面 pump の TRMOKE 測定から見積った歳差運動角周波数  $\omega$  の外部磁場印加角度  $\theta_H$  依存性を示している. なお,  $H_{ext}=5$  kOe, pump 光は  $1.5$  mJ/cm<sup>2</sup> である. Cu/GdFeCo では  $\theta_H$  の増加とともに,  $\omega$  が単調減少し, 膜法線方向を容易軸とする磁気異方性が存在していることが分かる. 一方, FeCo/Cu/GdFeCo 三層膜では,  $\theta_H \sim 30^\circ$  において,  $\omega$  が最大を示した. この傾向は Cu 層厚が薄い場合により顕著となる. この原因として, 超短パルス光で誘起された FeCo の歳差運動から生じたスピン流が GdFeCo 層に注入されたことにより生じる有効磁界が考えられる.

## 参考文献

- 1) T. Kampfrath *et al.*, Nat. Nanotech. **8**, 256 (2013).

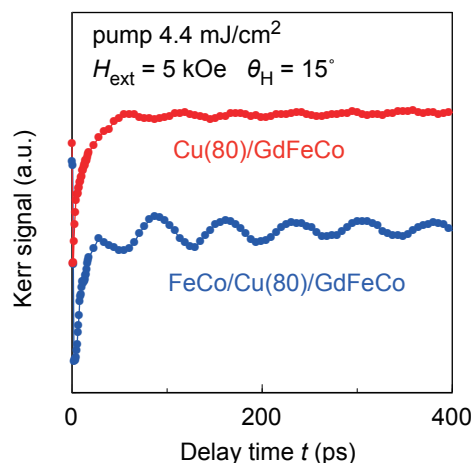


Fig. 1 TRMOKE waveforms of FeCo / Cu(80) / GdFeCo and Cu(80) / GdFeCo.

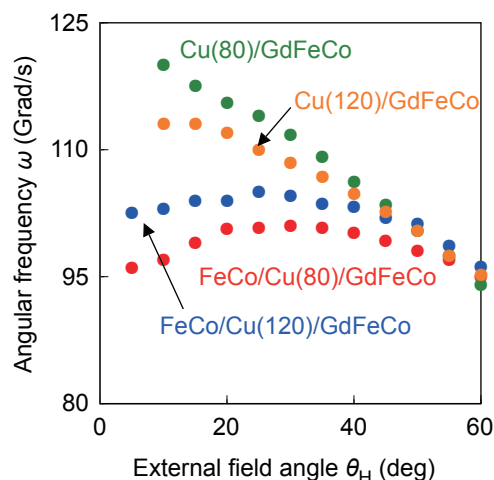


Fig. 2 External field angle  $\theta_H$  dependence of the precession angular frequency  $\omega$  of the GdFeCo layer.



## $L1_0$ -FePt 薄膜における磁化ダイナミクスの温度依存性

佐々木 悠太<sup>1</sup>, 鈴木 一平<sup>1</sup>, Ruma Mandal<sup>1,2</sup>, 葛西 伸哉<sup>1</sup>, 高橋 有紀子<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup> 物材機構, <sup>2</sup>WPI-AIMR)

Temperature dependence of magnetization dynamics in  $L1_0$ -FePt thin film

Y. Sasaki<sup>1</sup>, I. Suzuki<sup>1</sup>, R. Mandal<sup>1,2</sup>, S. Kasai<sup>1</sup>, Y. K. Takahashi<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>NIMS, <sup>2</sup>WPI-AIMR)

### はじめに

ハードディスクドライブ(Hard-Disk-Drive : HDD)は製造コスト・記録容量の観点からデータセンターにおけるメインストレージとして採用されている。高速・大容量通信や Society5.0 の実現にあたりデータ使用量のさらなる増大が見込まれるため、HDD の記録密度の向上が求められている。 $L1_0$ -FePt は、高い結晶磁気異方性を有するため、HDD の記録密度向上に必須な磁気記録媒体材料として研究・開発が進められている。[1,2] 一方で、高い結晶磁気異方性のために磁場印加による磁化反転が困難であることから、熱アシスト磁気記録方式(Heat assisted magnetic recording : HAMR)を用いた磁化反転が検討されている。しかしながら、高温加熱時の磁化ダイナミクスに関する実験的研究はほとんどなく、特にダンピング定数の温度依存性はこれまで報告されていなかった。そこで本研究では、全光学的手法を用いて  $L1_0$ -FePt 薄膜における磁化ダイナミクスの温度依存性を調べた。

### 実験方法

MgO(001)基板上にマグネトロンスパッタ法を用いて試料を作製した。薄膜構成は基板側から、FePt(30)/C(5) (膜厚単位 nm)である。基板加熱温度を 400°Cとして FePt 層を成膜した。構造及び規則度は XRD, 磁気特性は SQUID-VSM を用いてそれぞれ評価した。磁化ダイナミクスの測定には全光学的ポンプ・プローブ法による時間分解分光法(TRMOKE)を用いた。光源には中心波長 1030 nm, 繰り返し周波数 10 kHz, パルス幅 230 fs の Yb:KGW レーザーを用いた。ポンプ光を 365 Hz に変調し、ウォラストンプリズムを用いた差動方式でプローブ光のカー回転角  $\Delta\phi_K$  を測定した。測定時には膜面垂直方向から 80°の角度で外部磁場  $\mu_0 H$  を印加した。また、セラミックヒーターを用いて試料を加熱し、試料表面温度  $T$  は熱電対を用いて計測した。

### 実験結果および考察

図 1(a), 1(b)に試料表面温度  $T=530$  K とした際の TRMOKE 測定結果と磁化歳差シグナルの周波数スペクトルをそれぞれ示した。いずれの  $\mu_0 H$  においても磁化歳差シグナルを観測できている。図 1(a)の実験結果を解析すると、特に  $\mu_0 H=7.0$  T では実効的なダンピング定数  $\alpha_{\text{eff}}$  が 0.034 であった。既に報告されている、 $L1_0$ -FePt における室温での  $\alpha_{\text{eff}}$  が 0.05 程度であるため、[3] 加熱することで  $\alpha_{\text{eff}}$  の値が小さくなることが示唆された。発表ではダンピング定数の温度依存性についてその詳細を議論する。

本研究は JSPS 科研費(21K14218, 18H03787)および IDEMA-ASRC の助成を受けて行われた。

### 参考文献

- [1] J. Wang, *et al.*, *Acta Mater.* **166**, 413-423 (2019).
- [2] I. Suzuki, *et al.*, *J. Magn. Magn. Mater.* **500**, 166418 (2020).
- [3] X. Ma, *et al.*, *Phys. Rev. B* **91**, 014438 (2015).

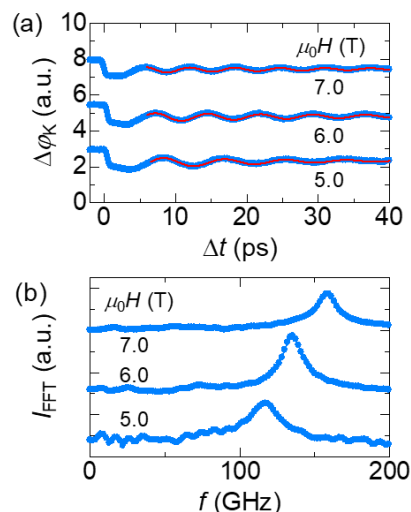


図 1. (a)磁場角度を 80°とした際の TRMOKE 測定データおよび(b)磁化歳差シグナルの周波数スペクトル。外部印加磁場  $\mu_0 H$  を変化させて測定を行った。図中の実線は解析結果を示す。

# 人工反強磁性三層構造における表面弾性波の非相反伝搬

松本啓岐、川田拓弥、石橋未央、河口真志、林将光  
(東大理)

Nonreciprocal propagation of surface acoustic waves in a tri-layer synthetic antiferromagnet

H. Matsumoto, T. Kawada, M. Ishibashi, M. Kawaguchi, and M. Hayashi

(Dept. of Phys., The Univ. of Tokyo)

## はじめに

表面弾性波は固体表面に局在する振動モードであり、強誘電体基板にくし型電極を作製したデバイスに交流電圧を印加することで励起できる。表面弾性波の遅延線上へ作製された強磁性体薄膜へ表面弾性波を印加すると、磁気弾性結合により強磁性体中にスピン波が励起される<sup>1,2)</sup>。このような系では、表面弾性波とスピン波のヘリシティミスマッチ<sup>3-6)</sup>や、スピン波の非対称な分散関係<sup>6-10)</sup>により、表面弾性波の振幅が正方向と負方向で異なる非相反伝搬が生じることが報告されている。中でも、強磁性体/非磁性体/強磁性体から成る三層構造では、層間磁気双極子相互作用によりスピン波の分散関係に顕著な非対称性が現れ、これを利用した表面弾性波の巨大な非相反伝搬が報告されている<sup>8-10)</sup>。本研究では、CoFeB/Ru/CoFeB から成る人工反強磁性三層構造において表面弾性波の非相反伝搬を観測し、その起源について解析的に考察した。

## 実験方法

128° Y カットニオブ酸リチウム基板上へ、Ta/Cu(50nm)/Pt からなるくし型電極をリフトオフ法によって作製した。その後、電極間に長方形のパターンを作製し、そこへ Ta/Ru/CoFeB(5 nm)/Ru( $t_{Ru}$ )/CoFeB(5 nm)/Ru という構造をリフトオフ製膜した。製膜には rf マグネトロンスパッタリングを、パターニングにはフォトリソグラフィを用いた。ベクトルネットワークアナライザによる散乱行列測定から、5 次高調波である 2.3 GHz の表面弾性波が励起され電極間を伝搬していることを確認した。試料へ外部磁場を印加し、磁場を掃引しながら 2.3GHz の表面弾性波における正方向・負方向の透過率をベクトルネットワークアナライザによって測定した。外部磁場は表面弾性波の正方向と 45 度をなす方向へ印加した。

## 実験結果

Figure に、 $t_{Ru} = 0.5$  nm の試料における測定結果を示す。縦軸は表面弾性波の透過パワーの変化率をプロットしており、正方向及び負方向において顕著な吸収ピークが現れている。正方向と負方向で透過パワーの磁場依存性が異なっており、非相反伝搬が確認できた。ピークにおける磁場の大きさが表す共鳴磁場も異なっており、人工反強磁性三層構造における非対称なスピン波の分散関係を反映している。マクロスピンモデルとランダウ-リフシッツ-ギルバート方程式を用いた記述<sup>2,11)</sup>に基づき、表面弾性波の吸収パワーを数値計算で求めた結果、実験結果と同様の曲線が得られた。

## 参考文献

- 1) M. Weiler *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 117601 (2011).
- 2) L. Dreher *et al.*, *Phys. Rev. B* **86**, 134415 (2012).
- 3) R. Sasaki *et al.*, *Phys. Rev. B* **95**, 020407(R) (2017).
- 4) S. Tateno and Y. Nozaki, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 034704 (2020).
- 5) A. Hernández-Mínguez *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 044018 (2020).
- 6) M. Xu *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eabb1724 (2020).
- 7) M. Küß *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 217203 (2020).
- 8) P.J. Shah *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eabc5648 (2020).
- 9) M. Küß *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **15**, 034060 (2021).
- 10) H. Matsumoto *et al.*, *Appl. Phys. Express.* **15**, 063003 (2022).
- 11) Y. Shiota *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 017203 (2020).

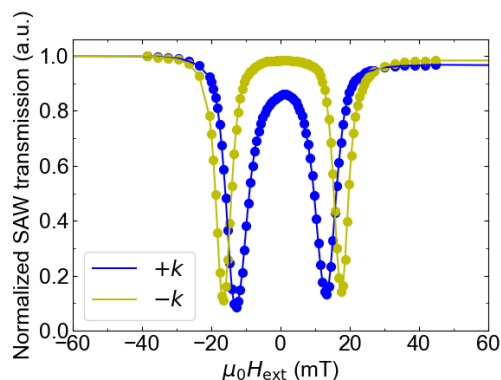


Figure: External magnetic field  $\mu_0 H_{\text{ext}}$  dependence of normalized SAW transmission for each direction.