

90度磁気結合の材料依存性と温度依存性

劉楚寒¹、橋本直樹¹、堀池周¹、黒川雄一郎¹、湯浅裕美¹
(¹九州大学)

Biquadratic magnetic coupling dependence on material of spacer and temperature
Chuhan Liu¹, Naoki Hashimoto¹, Shuu Horiike¹, Yuichiro Kurokawa¹, and Hiromi Yuasa¹
(¹Kyushu-Univ.)

はじめに

反強磁性体は高速ダイナミクスには魅力的であるが、しかし汎用の電流で電流駆動磁化発振を観測することは困難である。そのため、我々は90度の磁気結合を利用して作製した逆平行磁化を交互に持つ磁区からなる人工反強磁性体を提案した。シミュレーションより、スピントルク発振の周波数は90度の磁気結合が増加するにつれて上昇することが示された¹⁾、²⁾。そこで本報告では、より高い90度磁気結合を発現するためスペーサーの材料探索を行い、その起源を説明するため温度依存性を調べた。

実験方法

SiO₂基板上にスパッタリングされたサンプル構造と磁化構成を図1に示す。Co₉₀Fe₁₀(A)の磁化は、IrMnからの交換相互作用によってx方向に均一に固定される。スペーサーを介したCo₉₀Fe₁₀(A)と(B)間の90度磁気結合により、Co₉₀Fe₁₀(B)は疑似反強磁性層になり、Co₉₀Fe₁₀(B)の磁化は+/- y方向に沿っている。Co₉₀Fe₁₀(C)は磁気フリー層である。我々はCr(1nm、2nm、および3nm)とCr-Oを使って磁化曲線を測定した。測定装置はVibrating Sample Magnetometer (VSM)である。

実験結果

図2(a)は、y方向の磁場にさまざまなスペーサー材料を使ったサンプルの磁化曲線を示している。ここで、保磁力の大きさは90度磁気結合の強さに対応する。保磁力はスペーサー材料に強く依存し、高い順に、Cr 1nm、Cr 2nm、Cr 3nm、Cr-O、Fe-Oとなった。Cr-OとFe-Oの保磁力が小さい理由の1つは、Cr-OとFe-Oでは非磁性領域が多く、90度磁気結合に寄与するスピンの連続的に存在しないことが考えられる。これと比較すると、金属Crは層全体にスピンの存在があり、強い90度磁気結合が発現するものと考えられる。スペーサー材料が非磁性であるAlの場合、90度磁気結合の四重極結合定数 B_{12} は温度依存性が大きいことが知られる³⁾。これと比較するため、Cr 1nmスペーサーのサンプルについて、保磁力および四重極結合定数 B_{12} の温度依存性を調べ、図2(b)に示した。まず保磁力に着目すると、温度を下げることで、Co₉₀Fe₁₀(B)の保磁力が大幅に上昇したが、自由層Co₉₀Fe₁₀(C)の保磁力は変化しなかった。これは、Co₉₀Fe₁₀(B)の保磁力の温度依存性が、材料の保磁力ではなく、90度磁気結合によって引き起こされていることを示している。一方、四重極結合定数 B_{12} も温度を下げると増加するものの、その増加量は1.2倍ほどであり、過去に示されたAlスペーサーで2倍以上であると事と比べると温度依存性は小さく、発現機構が異なることを示唆する。

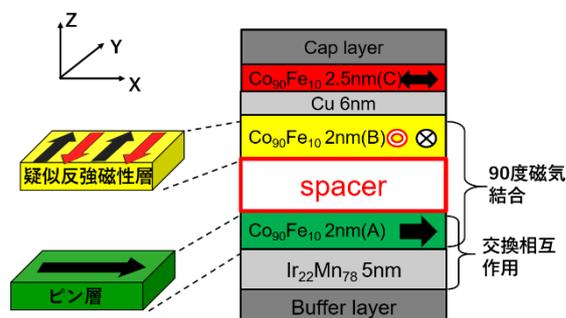


図1 サンプルの構造

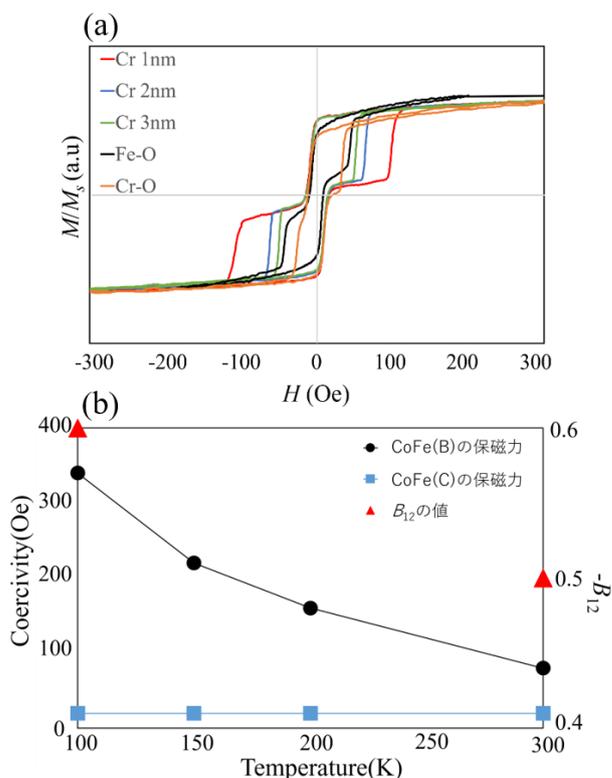


図2 (a) スペーサー層膜厚と材料による磁化曲線形状の変化、(b) 温度によるCoFeの保磁力と B_{12} の変化

参考文献

- 1) G. Nagashima, *et al*, J. Appl. Phys., **126** (2019) 093901.
- 2) S. Horiike *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59** (2020) SGGI02.
- 3) C.J. Gutierrez, *et al*, J. Magn. Magn. Mater. **116** (1992) L305.

強磁性超薄膜／反強磁性薄膜における交換バイアスおよび超常磁性ブロッキング温度に対する反強磁性秩序の影響

白土 優、陶 亦然、豊木研太郎、中谷亮一
(大阪大学大学院工学研究科)

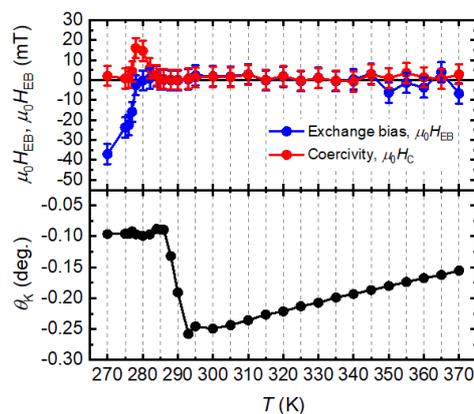
Influence of antiferromagnetic ordering on exchange bias and superparamagnetic blocking temperature in ferromagnetic/antiferromagnetic thin film

Yu Shiratsuchi, Yiran Tao, Kentaro Toyoki and Ryoichi Nakatani
Graduate School of Engineering, Osaka University

【緒言】 超薄膜やナノ粒子などのナノサイズの磁性体においては、磁化反転のエネルギー障壁が熱エネルギーと同程度となる場合に超常磁性が観測される。超常磁性は、磁場を除去した際に正味の磁化が消失することから、多くの磁気デバイスにおいては抑制することが必要とされる。反強磁性体／強磁性体界面における交換磁気異方性は、超薄膜やナノ粒子等の実効的な磁気異方性エネルギーを上昇させる効果として利用されることがある。この系においては、超常磁性ブロッキング温度 (T_{B_SPM}) が反強磁性層のネール温度 (T_N) と一致することが期待され、また、交換磁気異方性によって生じる交換バイアスのブロッキング温度 (T_{B_EB}) も、両者 (超常磁性ブロッキング温度、ネール温度) と一致するものと仮定されることが多い。本研究では、Pt/Co/Au/Cr₂O₃/Pt 積層膜に対して、 T_{B_SPM} 、 T_{B_EB} 、 T_N の対応について検討した。

【実験方法】 試料作製には、DC マグネトロンスパッタリング装置 (到達真空度 $<1 \times 10^{-6}$ Pa) を用いた。作製した積層膜の構成は、Pt(2 nm)/Co(0.25 nm)/Au(1.0 nm)/Cr₂O₃(30 nm)/Pt(20 nm) とし、本構成の薄膜を α -Al₂O₃(0001) 単結晶基板上に作製した。構造評価には、反射高速電子線回折 (RHEED) 法、X 線回折法を用いた。試料作成方法と各層の構造については、別紙 1) を参考して頂きたい。磁気特性評価には、磁気光学 Kerr 効果 (MOKE) 測定、および、交流帯磁率測定を用いた。

【実験結果】 室温 (~297 K) において、膜面内 (縦 Kerr 効果測定) と膜面垂直 (極 Kerr 効果測定) の磁化曲線において、いずれも保磁力と残留磁化は観測されず、作製した薄膜は室温で超常磁性状態にあると考えられる。また、交流帯磁率の温度依存性において、磁化の同期成分 (in-phase) が 285 K でピークを示すことから、 T_{B_SPM} を 285 K とした。右図に、極 Kerr 効果測定において得られた保磁力 (H_C)、交換バイアス磁場 (H_{EB})、および、Kerr 回転角 (θ_K) の温度依存性を示す。保磁力は 285 K 以上ではゼロであるが、温度の低下により 285 K で保磁力が観測され、278 K で最高値を示した後、再度低下する。278 K における保磁力の低下と同時に、交換バイアス磁場が観測され始める。この結果から、交換バイアスに対するブロッキング温度 T_{B_EB} を 278 K とできる。興味深いことに、285 K における保磁力の上昇とほぼ同じ温度領域において、Kerr 回転角が変化する。本研究で使用した積層構造においては、Cr₂O₃ 層内の光学的な干渉効果によって見かけ上の Kerr 回転角は変化する。図に示した Kerr 回転角の変化は、反強磁性秩序の生成にともなう Cr₂O₃ 層における光学定数の変化を反映したものであると考えられ、この結果を基に、 $T_N = 290 \pm 3$ K とすることができる。講演では、以上の結果と基に、 T_{B_SPM} 、 T_{B_EB} に対する反強磁性秩序の影響について議論する。



$\mu_0 H_C$, $\mu_0 H_{EB}$, θ_K の温度依存性

参考文献

- 1) Y. Shiratsuchi, Y. Tao, K. Toyoki, and R. Nakatani, Magnetochemistry, 7, 36 (2021).

光励起超短時間磁化応答の光学干渉層厚依存性

高橋 壽生¹, 田島 大輝¹, 吉川 大貴², 塚本 新²

(¹ 日本大学大学院理工学研究科, ² 日本大学理工学部)

The effects of optical interference layer thickness on photo-excited ultrafast magnetization response

Tokio Takahashi¹, Daiki Tajima¹, Hiroki Yoshikawa², and Arata Tsukamoto²

(¹ Graduate School of Science and Technology, Nihon Univ.,

² College of Science and Technology, Nihon Univ.)

はじめに: 磁性薄膜材料の微細・多層構造化と共に高速化の要請が高まるスピントロニクスデバイスでは, 超短時間領域における高速磁化挙動の詳細な理解と制御技術の進展が求められている. 超短パルス光を用いた実時間分解磁化ダイナミクス計測・光制御において, 積層構造を有する素子内での磁化ダイナミクスを含む光物質作用を明らかにするため, 超短時間における光学干渉特性の考慮・設計が重要となる. 本報告では, 異なる光学干渉構造, 同一金属磁性層を有する SiN 光学干渉層/GdFeCo 磁性層からなる薄膜試料群を用いて, 光学干渉構造・励起光強度が及ぼす超短時間減磁及び磁化回復過程への寄与につき検討を行った.

実験方法: 光励起磁化挙動の光学干渉効果による寄与解明を目的として, 同一金属磁性層を有する SiN (t nm) / Gd₂₅Fe_{65.62}Co_{9.38} (20 nm) / SiN (5 nm) / glass sub. ($t = 20, 40, 60, 100$ nm) 試料群を DC/RF マグネトロニクスパルタ法を用いて作製 (以下試料 A, B, C, D) した. 超短パルスレーザー (半値全幅 35 fs) を励起・観察光源とした全光型 Pump ($\lambda = 800$ nm) - Probe ($\lambda = 400$ nm) 法により, 励起後約 10 ps に渡る磁気光学効果の時間発展を計測した. 同一の光照射強度であり照射後減磁化量に相当する信号強度変化は飽和磁化信号強度比で最大でも 10% 未満の条件である. さらに試料 A ($t = 20$ nm) において励起光強度依存性として, 照射光強度 4~10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ の範囲にて同様の計測を行った. また, 測定環境として室温下にて外部磁場 $\mu_0 H_{\text{ext}} = 282$ mT を膜面法線から 54° の角度で印加した.

実験結果: Fig. 1 に試料 A, B, C, D における同一光強度励起下での超短時間減磁応答特性を示す. 連続光 ($\lambda = 800$ nm) での光吸収率が SiN 膜厚に対し線形に変化する範囲で設計した試料群に対し, 膜厚の増大とともに励起後の準安定状態における信号は減少するが, 約 2 ps の時間領域では, 光吸収による減磁量が非線形かつ特異的に変化することが明らかとなった¹⁾. また, Fig. 2 に試料 A に対し, 励起光強度を 4~10 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ で変化した超短時間減磁及び磁化回復過程を示す. 減磁量は Fig. 1 より大きく約 8~30% であるが, いずれも試料 C に現れる急峻な減磁緩和応答は見られない. 連続光同様の実効的光吸収特性のみならず, 超短パルスレーザー光での光学干渉による, ps スケールの超短時間磁化ダイナミクスへの寄与が示唆された.

謝辞: 本研究の一部は, JST, 未来社会創造事業, JPMJMI20A1 の支援を受けたものである.

参考文献: 1) T. Takahashi, D. Tajima, H. Yoshikawa, A. Tsukamoto, *Technical Meeting on "Magnetics", IEE Japan, MAG-21-008 (2021).*

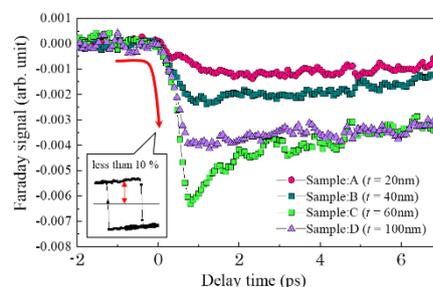


Fig. 1 Ultrafast demagnetization process using ultrashort pulsed laser ($\lambda = 800\text{nm}$) in samples A, B, C and D.

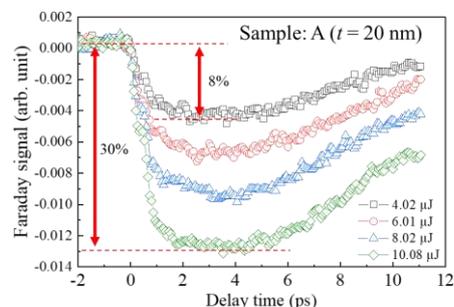


Fig. 2 Laser power dependence of ultrafast demagnetization using ultrashort pulsed laser ($\lambda = 800\text{nm}$) in sample A

強磁性プローブを用いた NiFe-Cu ナノキューブの電気伝導測定

佐久間洋志¹, 竹内亮太¹, 坂倉 響², 竹田真帆人²,

Suko Bagus Trisnanto², 大多哲史³, 竹村泰司²

(¹宇都宮大学, ²横浜国立大学, ³静岡大学)

Electrical conductivity measurements of NiFe-Cu nanocubes with ferromagnetic probes

H. Sakuma¹, R. Takeuchi¹, H. Sakakura², M. Takeda², S. B. Trisnanto², S. Ota³, Y. Takemura²

(¹Utsunomiya Univ., ²Yokohama National Univ., ³Shizuoka Univ.)

はじめに

Cu₇₅Ni₂₀Fe₅の単結晶を特定の条件で時効処理すると, Ni と Fe の含有量が高い, 平均サイズが 70 nm のナノキューブが母相と同じ結晶配向を持って析出することが明らかになっている⁽¹⁾. これまでこの NiFe-Cu ナノキューブに対して, 直流/交流磁化測定⁽²⁾やレーザー励起光電子顕微鏡による観察⁽³⁾が行われてきた. 本研究では, 金属プローブを試料表面に接触させることにより, 表面付近の局所的な電気的特性を測定することを目的とする.

測定方法

試料は, NiFe-Cu ナノキューブを含む Cu₇₅Ni₂₀Fe₅単結晶を一辺約 2 mm の立方体に切り出したものである. 立方体の各面は{100}に平行である. プローブとして, 非磁性の Pt-Ir, 強磁性の Fe, Co, Ni 線を用いた. ピエゾ素子を備えた XY ステージ上に試料を設置し, Z ステージにプローブを設置することにより, 試料とプローブの相対位置を制御した⁽⁴⁾. 試料とプローブ間には電圧源を設置し, 電流をモニターした. 磁場の印加には永久磁石式磁場源⁽⁵⁾を用いた.

測定結果

Fig. 1 に Co プローブを用いて約 4.4×2.4 μm²の領域を走査した結果を示す. 各点において, プローブと試料が離れた状態からスタートし, 徐々にプローブを近づけていった. ある距離でコンダクタンスが最大となるが, その時の高さ (Z) 方向のピエゾ印加電圧を図示したもので, つまり形状像が上段である. 下段はコンダクタンスの最大値を図示したものである. 測定前に-50 mT 以上の磁束密度を印加し, 3~51 mT の間で磁束密度を強くしながら測定を行った. 磁場の変化による強磁性プローブの移動が懸念されたが, 位置の大きなずれはないようである. 一方, 右上に見える山が徐々に低くなっており, プローブを押し当てたことにより形状が変化した可能性がある. コンダクタンスは磁場による変化があるようにも見えるが, 接触状態による変化の可能性もあり, より詳細な実験・解析が必要である.

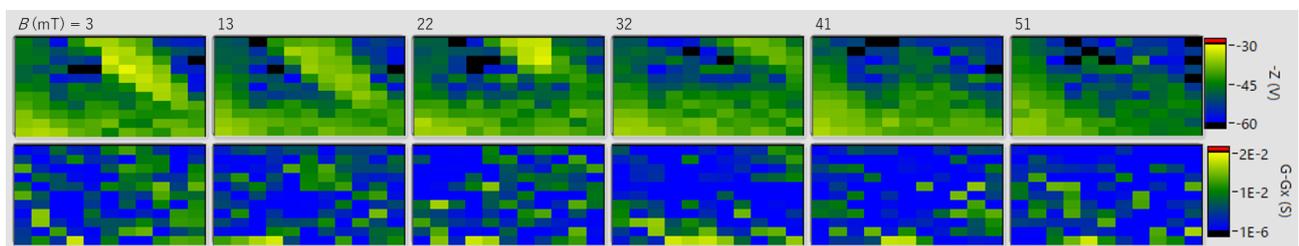


Fig. 1. Topographic images (upper panels) and conductance maps (lower panels) acquired with Co probe.

参考文献

- (1) J.-S. Kim *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 123002 (2016). (2) 例えば, S. Kobayashi *et al.*, *Molecules* **25**, 3282 (2020).
- (3) J.-S. Kim *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 335006 (2016). (4) 佐久間洋志ほか, 電気学会論文誌 A **137**, 380 (2017). (5) H. Sakuma, *J. Magn. Soc. Jpn.* **44**, 21 (2020).

STM/UPS による有機分子磁性金属へテロ構造の研究

山田 豊和

(千葉大学 大学院工学研究院 物質科学コース)

STM and UPS study of Organic Molecule – Magnetic Metal Hetero Structures

Toyo Kazu Yamada

(Chiba University, Graduate School of Engineering, Department of Materials Science)

有機分子と磁性金属の強固な π -d 電子結合：有機分子スピントロニクスを目指して

無機材料によるスピントロニクス替わる、新たな材料として有機分子がある。有機分子は、窒素、炭素、水素など、軽元素からなる。グラフェンのような炭素材料に比べると耐久性には課題があるが、特異な対称性を有する低次元格子膜を人工的に創出できる利点がある。

有機分子は、一般に、350 – 500 K 程度で真空昇華する。多くの単分子の厚さは約 0.2-1.0 nm であり、単分子レベルで昇華制御できるため、エピタキシャル成長で製膜が可能である。分子サイズが大きく昇華する前に熱で壊れてしまう分子は、分子溶液を直接真空スプレーする方法もあるが^{2,3)}、本研究では真空昇華による製膜法を用いた。有機分子の中で比較的耐久性が高い分子として、フタロシアニン(Pc)分子やポルフィリン(TPP)分子がある。これらは、600-700 K まで分子構造が壊れず保持することが分かっている。

我々は、過去 10 年にわたり、Pc / TPP 分子の単分子レベルでの真空昇華技術の確立と¹⁾、3d 磁性金属と分子との電子結合に関して、走査トンネル顕微鏡(STM)および紫外光電子分光(UPS)を用いて研究してきた。右図に、試料作製と STM/UPS 計測の概要を示す。全ての実験は超高真空中で行った。

単一 Pc 分子による磁気伝導計測(4 K)^{4,5)}、強固な p-d 電子結合による Fe(001)上 Pc 分子の室温での熱拡散防止^{6,7)}、そして、Pc / TPP や環状分子の二次元規則配列への磁性原子吸着構造の解明である⁸⁻¹⁰⁾。

これまでの経緯と、有機分子を使った、表面合成ポリマーによる新たな磁気格子創製、に関して報告する。

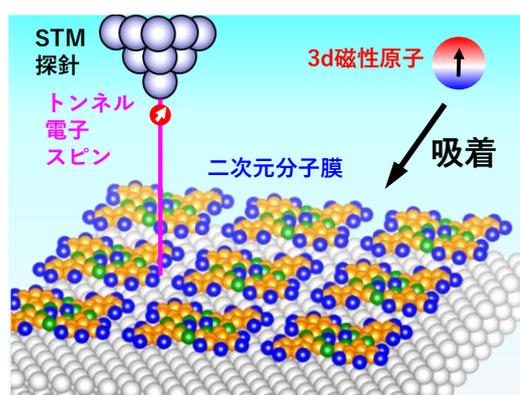


Fig.1 STM による二次元有機分子配列への磁性原子吸着構造の研究。

参考文献

- 1) Analytical Chemistry 90, pp. 8954-8959 (2018).
- 2) Nanotechnology 29, 315705 (2018).
- 3) 表面と真空 64 (No.1) pp.40-46 (2021).
- 4) Nature Nanotechnology, 6, (2011) 185-189.
- 5) Nano Letters, 12, (2012) 5131-5136.
- 6) Scientific Reports 8, 353 (2018).
- 7) Phys. Rev. B 94, 195437 (2016).
- 8) The Journal of Physical Chemistry C 124, 3621-3631 (2020).
- 9) The Journal of Physical Chemistry C 123, 18939-18950 (2019).
- 10) 表面と真空 63 (No.9) pp.465-469 (2020).