

平成 2 6 年 5 月 1 4 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760262

研究課題名（和文）電界操作型次世代磁気記録デバイスの動作可能温度の向上に関する研究

研究課題名（英文）Enhancement of thermal stability of magnetoelectric material toward voltage controlled magnetic recording devices

研究代表者

野崎 友大（Nozaki, Tomohiro）

東北大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：10610644

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000 円、（間接経費） 1,050,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、電界操作型の低消費電力磁気記録デバイスの実現に向けて、電気磁気材料Cr2O3の動作可能温度（ネール温度とブロッキング温度）を向上させることを目的とした。磁場印加方向を磁化容易軸から意図的にずらすことによって、ブロッキング温度を増加させることができるというユニークな知見が得られたとともに、Cr2O3/Fe2O3積層体を作製すると、格子歪と磁気的な相関の両方の効果で動作可能温度を上げられることを実験的に示した。ネール温度とブロッキング温度を個々に制御することに成功したため、今後さらなる動作温度の向上が可能である。

研究成果の概要（英文）：We enhanced the Neel temperature T_N and blocking temperature T_B of magnetoelectric (ME) Cr2O3 film, toward the realization of voltage controlled magnetic recording devices. We found T_B can be increased by forming relative angles between spin easy axis direction of Cr2O3 and direction of applied magnetic field. We also demonstrated the control of T_N and T_B experimentally by making Fe2O3/Cr2O3 hetero-structure, which achieved by multiple effects of both lattice distortions and magnetic correlations between Cr2O3 and Fe2O3 antiferromagnet. Since we succeeded to demonstrate the control of T_N and T_B individually, enhancement of both T_N and T_B would be possible.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気記録デバイス 電界操作 電気磁気効果 動作可能温度 交換バイアス

1. 研究開始当初の背景

近年の急激な情報量の増加に伴い、主にデータセンターで使われている HDD(ハードディスクドライブ)には、高記録密度化と省エネルギー化がますます求められてきている。しかし、現在の磁界操作による磁化反転を利用する磁気記録原理は記録ビットの極小化がもはや限界に近く、新しい原理の磁気記録方式が求められている。我々は、 Cr_2O_3 の持つ電気磁気(Magnetoelectric:ME)効果を利用した全く新しいストレージデバイスを提案している。これは、電界と磁界の向きが平行と反平行の場合で磁化の方向が反転するという性質を利用し、磁界でアシストしながら電界で磁化の方向を制御するというコンセプトである。この方式は、記録ビットの極小化の壁を破る可能性を秘めていることに加え、従来の磁界記録時に生じていたジュール発熱を抑え、低消費電力大容量記録を狙えるという点で注目を集めている。実用化に向けての課題の一つとして、熱安定性が不十分である点があげられる。ME 効果が発現する温度(ブロッキング温度)は動作温度より十分高くなければならないが、 Cr_2O_3 のネール温度は 307K であり、ブロッキング温度はネール温度よりもさらに低く、実用化のためにはブロッキング温度とネール温度の両方の向上が不可欠であった。

2. 研究の目的

本研究では、 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 極薄酸化物層で本研究者のグループが観測した転移温度の向上を抛り所に Cr_2O_3 薄膜の温度特性(ブロッキング温度とネール温度)の向上を図り、350K 以上まで電気磁気効果を示す Cr_2O_3 薄膜を作製することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究で使用する Cr_2O_3 薄膜は、 Cr_2O_3 または Cr ターゲットを用いたスパッタリング法によって作製した。 Cr_2O_3 薄膜は、温度特性の結晶配向性依存性や下部層依存性を調べるために、 $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上、 $\text{Al}_2\text{O}_3(1-102)$ 基板上、Pt(111)バッファ層上、 $\text{Fe}_2\text{O}_3(0001)$ バッファ層上に製膜した。 Cr_2O_3 薄膜上に Co または Co-Pt 合金強磁性層を成膜し、強磁性層の磁気特性を評価することで交換結合を介して Cr_2O_3 の温度特性を評価した。

Cr_2O_3 の結晶構造、配向性の評価には X 線回折を、薄膜の表面状態の評価には原子間力顕微鏡を用いた。また、断面構造評価には透過型電子顕微鏡を用いた。

磁気特性の評価には超電導量子干渉磁力計(SQUID)を用い、10K から 340K までの磁化曲線を測定し、磁化曲線のシフト(交換バイアス)と保磁力の評価から、ブロッキング温度とネール温度を見積もった。

4. 研究成果

(1)交換バイアスの得られる Cr_2O_3 /強磁性体積層構造の作製

本研究では、 Cr_2O_3 /強磁性体界面に働く交換バイアスの温度依存性を調べることでブロッキング温度とネール温度を調べる。そのため、種々の配向性、バッファ層を持つ Cr_2O_3 において、交換バイアスを発現させることが最初のステップとなる。我々は、 Al_2O_3 基板の配向・成膜条件を変えることで、配向性の異なる Cr_2O_3 薄膜を作製し、そのうち、(0001)配向膜、(1-102)配向膜、ランダム配向膜において、交換バイアスを得ることに成功した。図 1 に、それぞれの試料の交換バイアスとブロッキング温度の関係を示す。(1-102)配向膜やランダム配向膜で高いブロッキング温度が得られているという特徴も見られた。

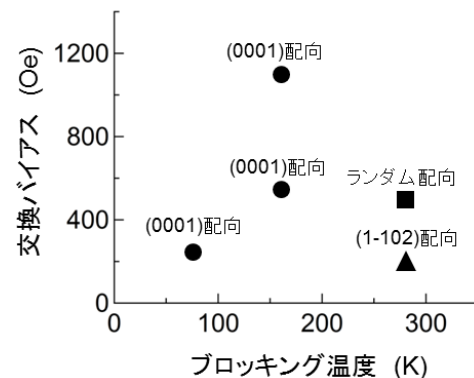


図 1. 種々の結晶配向性を持つ Cr_2O_3 薄膜の交換バイアスとブロッキング温度の関係。

(2)磁場印加方向によるブロッキング温度の制御

図 1 に示したような、(1-102)配向膜やランダム配向膜で得られた高いブロッキング温度の原因を明らかにするため、磁場印加方向と Cr_2O_3 のスピンの容易軸方向([0001]方向)との相対角度依存性を調べた。相対角度依存性を調べる試料として、(1-102)配向 Cr_2O_3 薄膜を用いた。(1-102)配向 Cr_2O_3 薄膜の容易軸はほぼ薄膜面内の方向を向いているため、面内の磁場印加方向を変えることで Cr_2O_3 の容易軸方向の相対角度を変えることができる。本研究では、磁場印加方向と[-1101]方向(容易軸方向)のなす角を θ として、 $\theta=0, 30, 60, 90\text{deg.}$ のときの交換バイアスの大きさとブロッキング温度を調べた。 $\theta=90\text{deg.}$ が磁場印加方向が Cr_2O_3 の困難軸方向[11-20]に平行となる。図 2 に、 $\theta=0, 30, 60\text{deg.}$ の場合の交換バイアス磁界の温度依存性を示す。そもそも、 Cr_2O_3 /強磁性体積層膜のブロッキング温度は、 Cr_2O_3 反強磁性体の磁気異方性と Cr_2O_3 /強磁性体界面の交換結合(一方向異方性)の競合によって決まっており、 Cr_2O_3 反強磁性体の磁気異方性の方が大きい領域でのみ、交換バイアスが現れる。この考えに基づくと、交換バイアスが小さい場合は、ブロッキング温度はネール温度とほぼ等しくな

るが、交換バイアスが大きくなると、ブロッキング温度は急激に低下する。事実、(0001)配向 Cr_2O_3 薄膜では、この傾向によく一致する結果が得られている。図 2 の結果を見ると、 $\theta=0\text{deg.}$ の場合は、このようなブロッキング温度の低下がみられ、ブロッキング温度は 250K 程度であった。30deg の場合は 0deg. の場合よりも高い交換バイアスが得られているにもかかわらず、ネール温度とほぼ等しいブロッキング温度が得られた。つまり、 $\theta=30\text{deg.}$ では $\theta=0\text{deg.}$ と比べて Cr_2O_3 自体の磁気異方性には変化がなく、交換バイアスが大きくなっているにもかかわらず、ブロッキング温度が増加するという傾向がみられた。この結果は磁場の印加方向を変えることで Cr_2O_3 が感じる交換バイアスの大きさを変えられることを示唆している。このような、外因的な要因によるブロッキング温度の制御はこれまで報告がなく、デバイス化を考える上でも有望な手段となり得る。

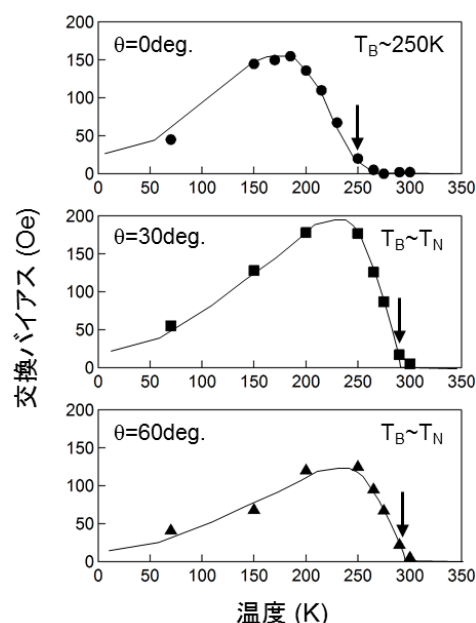


図 2. Cr_2O_3 の磁気異方性の方向と磁場印加方向の相対角度が小さい場合($\theta=0\text{deg.}$)と大きい場合($\theta=30, 60\text{deg.}$)の交換バイアスの温度依存性。ブロッキング温度を矢印で示す。

(3) $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ 積層体の作製によるブロッキング温度とネール温度の制御

Cr_2O_3 薄膜のネール温度と Cr_2O_3 /強磁性体界面のブロッキング温度を上げるためには、それぞれ異なるアプローチが必要となる。ネール温度は Cr_2O_3 中の Cr-Cr 間の結合を強化することで、ブロッキング温度は Cr_2O_3 の磁気異方性を向上させることで増加させられる。我々は、研究協力者の理論計算の結果を踏まえて、ネール温度とブロッキング温度をそれぞれ向上させるための指針を立てた。ネール温度向上の指針： c/a が大きくなるような格子ひずみを Cr_2O_3 に導入する。厚い Fe_2O_3 (ネール温度 $T_N \sim 950\text{K}$) の上に薄い

Cr_2O_3 ($T_N \sim 307\text{K}$) を接合させ、スピン相関によって Cr_2O_3 のネール温度を Fe_2O_3 のネール温度に近づける。ブロッキング温度を向上させるための指針： c/a が小さくなるような格子ひずみを Cr_2O_3 に導入する。反強磁性体/ Cr_2O_3 積層構造を作製し、磁気体積を増加させることによって磁気異方性を増加させる。我々はさらに、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ 積層膜を作製することで、と の複合的な効果でブロッキング温度が大幅に増加することを実験的に示すことに成功した。図 3 に $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ と $\text{Pt}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ の交換バイアスの温度依存性を比較する。交換バイアスの大きさ自体は変化がないにもかかわらず、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ の方がかなり高いブロッキング温度を示すことが分かる。これによって、20nm という非常に薄い Cr_2O_3 薄膜において、260K という高いブロッキング温度を得ることに成功した。同時に、 c/a が小さくなることでネール温度が減少する傾向もみられ、についても実験的に検証することができた。本研究では、目標であった 350K を超えるブロッキング温度とネール温度を達成することはできなかったが、ブロッキング温度とネール温度をそれぞれ制御できることを実験的に示すことができた。(2)と(3)の効果を複合させ、膜構成をうまく選ぶことで、現状の温度安定性の限界を超える Cr_2O_3 薄膜を達成できるものと考えられる。

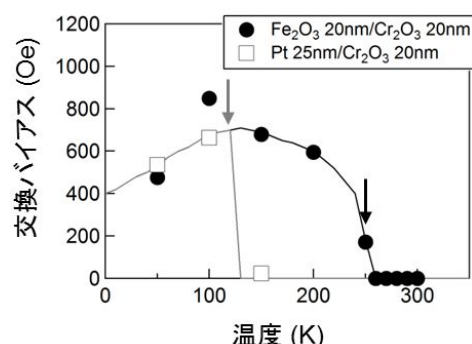


図 3. Fe_2O_3 バッファの挿入によるブロッキング温度の変化。20nm の Cr_2O_3 薄膜で室温付近のブロッキング温度を達成。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

芦田拓也, 笈田陸弘, 下村直樹, 野崎友大, 柴田竜雄, 佐橋政司, “Observation of magnetoelectric effect in $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{Co}$ thin film system”, Applied Physics Letters, 査読有, 104 巻, 2014 年, 152409-1-3. (DOI:10.1063/1.4871515)
野崎友大, 笈田陸弘, 芦田拓也, 下村直樹, 佐橋政司, “Temperature-dependent perpendicular magnetic anisotropy of

Co-Pt on Cr_2O_3 antiferromagnetic oxide”, Applied Physics Letters, 査読有, 103 巻, 2013 年, 242418-1-4. (DOI: 10.1063/1.4850533)
 芦田拓也, 佐藤祐司, 野崎友大, 佐橋政司, “Pt buffer layer effect on perpendicular exchange bias based on collinear/non-collinear coupling between Co_3Pt and Cr_2O_3 interface” Journal of Applied Physics, 査読有, 113 巻, 2013 年, 17D711-1-3. (DOI: 10.1063/1.4797472)
 野崎友大, 下村直樹, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司 “Grain growth effect of Cr_2O_3 thin film layer on exchange coupling of $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Co}$ interface” IEEE Transactions on Magnetics, 査読有, 48 巻, 2012 年, 4359-4362 (DOI: 10.1109/TMAG.2012.2195718)

[学会発表](計 10 件)

野崎友大, 筈田陸弘, 芦田拓也, 佐橋政司, “Origin of perpendicular magnetic anisotropy of Co-Pt film on Cr_2O_3 antiferromagnetic oxide”, 58th Annual Conference on MMM, 2013 年 11 月 5 日, Sheraton Denver Downtown (アメリカ, デンバー).
 野崎友大, 筈田陸弘, 芦田拓也, 佐橋政司, “ Cr_2O_3 上の Co-Pt 薄膜の垂直磁気異方性の温度変化”, 第 37 回日本磁気学会学術講演会, 2013 年 9 月 5 日, 北海道大学 (北海道).
 野崎友大, 筈田陸弘, 芦田拓也, 佐橋政司, “Temperature dependent Perpendicular Magnetic Anisotropy at $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Co-Pt}$ interface”, The 18th Joint Interlaboratory Workshop on Nano-Magnetics, 2013 年 8 月 22 日, Club Fish Resort (Gapyeong, 韓国).
 野崎友大, 筈田陸弘, 芦田拓也, 佐橋政司, “Perpendicular Magnetic Anisotropy Originated from $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Pt}$ Interface”, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications 2013, Taichung, Taiwan, 2013 年 7 月 23 日, Widsor Hotel (台湾, 台中).
 野崎友大, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “Orientation Control of Cr_2O_3 Thin Film Crystallized by Post-annealing”, The 11th International Conference on Ferrites, 2013 年 4 月 16 日, 沖縄コンベンションセンター (沖縄).
 野崎友大, 佐藤祐司, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “In-plane angular dependent exchange bias and blocking temperature of Cr_2O_3 (1-102)”, The 17th Joint interlaboratory workshop on nano-magnetics, Sendai, Japan, 2013 年 2 月 1 日, 岩松旅館 (仙台).

野崎友大, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “アニールで結晶化した Cr_2O_3 薄膜の配向制御と磁気特性”, 平成 24 年度スピニクス特別研究会, 2012 年 11 月 26 日, 秋田大 (秋田).

野崎友大, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “Effect of Crystal Orientation of Cr_2O_3 Layer on Magnetic Properties of Ferromagnetic/ Cr_2O_3 interface”, International Conference of the Asian Union of Magnetic Societies, 2012 年 10 月 4 日, 奈良県新公会堂 (奈良).

野崎友大, 下村直樹, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “Fabrication of $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ Lamination Structure for Increasing Blocking Temperature”, The 16th Joint Inter laboratory Workshop on Nano-magnetics, Jeju, Korea, 2012 年 9 月 20 日, White Beach Hotel (済州島, 韓国).

野崎友大, 下村直樹, 芦田拓也, 佐藤祐司, 佐橋政司, “Exchange Bias in Post-annealed $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ferromagnetic}$ Bilayer system for Low Energy Consumption Spintronic Device”, International Conference on Electronic Materials and Nanotechnology for Green Environment, 2012 年 9 月 18 日, Ramada Plaza jeju Hotel (済州島, 韓国).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野崎 友大 (NOZAKI TOMOHIRO)
 東北大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号: 10610644