

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760460

研究課題名（和文）交換磁気異方性によるナノ粒子の磁性制御

研究課題名（英文）Control of magnetic properties of ultrathin film using exchange anisotropy

研究代表者

白土 優（SHIRATSUCHI YU）

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70379121

研究成果の概要： Tbit/inch² 級（Tは 10¹²）の超高密度磁気記憶素子への応用を目指して、ナノサイズの磁性体の磁化方向（磁化方向とは、磁石の N 極・S 極の向き）の安定化手法について検討した。結果として、強磁性体である Co 超薄膜の磁化の熱的安定性は、下地層として、反強磁性体である α -Cr₂O₃(0001) 薄膜を用いることで、非磁性体である α -Al₂O₃(0001) 基板上へ成長させた場合と比較して、200 度以上も安定化されることを見出した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	390,000	3,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学，金属物性

キーワード：磁性超薄膜，交換磁気異方性，超常磁性

1. 研究開始当初の背景

ハードディスクドライブ（HDD）などの磁気記憶デバイスの記録密度は、年々上昇しており、研究開始当初の 2007 年度において、約 100Gbit/inch² を達成していた。当初の（現在でも大半の）HDD では、磁性ナノ粒子の磁化方向を膜面内方向に向けてデジタル情報を記録する方式（面内磁気記録方式）を採用しており、この方式では、上記の磁気記録密度が物理的な限界値であるとされている。一方、記録密度の上昇を目指して、現在では、磁化方向を膜面垂直方向に改良した垂直磁気記録方式が採用されつつあるが、本方式においても、400-500Gbit/inch² が記録密度の

限界とされている。このような状況において、本研究は、Tbit/inch² 級の超高密度磁気記録を実現するための要素技術となる基礎研究を行った。具体的には、上記の磁気記録の限界は、記録密度の上昇に伴う記録媒体、すなわち磁性ナノ粒子のサイズ低下と、サイズ低下に伴う磁化の熱的不安定化によるとされていることに着目し、ナノ磁性体の磁化の熱安定性の改善を目的として研究を行った。

2. 研究の目的

前述の背景に基づき、本研究では、ナノサイズの磁性体の磁化の熱安定性を改善することを目的として、ナノサイズの磁性体に対

する実効的な磁気異方性の制御を試みた。特に、ナノサイズの磁性体では、表面・界面の効果が顕著になることに着目し、デジタル情報を担う強磁性体を、反強磁性層上に積層することで、強磁性体/反強磁性体界面に生じる交換磁気異方性を用いて、ナノ磁性体の磁化の熱安定性を改善することを目的とした。

特に、本研究では、次々世代型超高密度磁気記録として期待される、ディスクリット磁性体を念頭に、膜厚が数原子層の磁性超薄膜を研究対象とした。また、磁性超薄膜をディスクリット化させる際に有利とするため、超薄膜を作製する下地層には酸化物を用いることが適切であると考え、反強磁性体/強磁性体界面の創出がキーポイントで有る本研究の目的を考慮して、下地層に酸化物反強磁性体である $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ を用いることとした。

3. 研究の方法

(1) 高品位反強磁性酸化物 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜の作製

$\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜は、Cr(110)薄膜を酸化させることで作製した。 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜の下地層には、今後のスピネレクトロニクスデバイスなどへの応用を可能にするため、Si(111)/Ag(111)/Au(111)層を用いた。 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜を形成させるためのCr薄膜の作製には、原子レベルでの構造制御が可能であり、単結晶薄膜などの高品位薄膜の作製が可能な分子線エピタクシー法を用いた。

(2) 磁化の熱安定性の評価方法

ナノ磁性体には、膜厚が1.0 nmのCo超薄膜を用いた。膜厚1.0 nmは、原子層にして約5原子層に対応する。Co超薄膜の磁化の熱安定性は、液体ヘリウム温度(4K)から室温(300K)に至る広範囲での磁化の温度依存性を種々の温度・磁場履歴で測定することにより、評価した。なお、本評価手法は、研究代表者らにより提案された手法であり、後述の学術論文により、その新規性と学術的重要性が認められる。

(3) 磁気光学カー効果による直交磁化挙動の評価手法

磁気光学カー効果には、磁化方向とレーザー光の入射方向により、複数の測定配置があり、それぞれの測定配置は、異なる磁化方向に敏感に計測可能である。このことを利用して、研究代表者は、一つの試料に対して、複数の光学配置を同時に満たす計測装置を開発し、磁場方向と平行方向および、垂直方向の磁化成分を同時に計測する技術を構築することとした。

本手法を用いて、ナノ磁性体の磁化反転を詳細に検討した。本手法の確立には、あらかじめ磁気異方性の方位が明確となっている、

磁性超薄膜を素子構造内に含むCo/Cr人工格子膜を用いた。この手法は、ナノ磁性体の磁化の熱安定性を決定するために必要となる、磁化反転プロセスを解明する手法となる。

4. 研究成果

(1) 高品位反強磁性酸化物 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜の作製

酸化物は、金属薄膜の表面に数原子層程度の厚さで一般的に存在するが、金属表面に自然酸化膜として形成する酸化物は結晶化していないことが多く、また、結晶化した場合でも結晶方位がランダムである。本研究の目的達成のためには、結晶化し、また、結晶方位の揃った高品位な酸化物薄膜を作製することが必要である。本研究の主要な成果の一つとして、図1に示すように、Cr薄膜を参加させることにより、結晶化に加えて、結晶方位の揃った $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 薄膜を作製することに成功した。

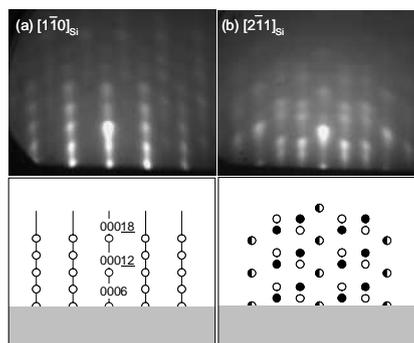


図1 作製した $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜の電子線回折像。結晶化していない場合、散漫な回折パターンが観察されることに対して、ここに示した回折パターンには、明確に回折スポットが観察される。さらに、回折スポットが規則的に配列していることは、 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜の結晶方位が揃っていることを示している。

(2) 高品位反強磁性酸化物 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ (0001)薄膜によるCo超薄膜の磁化の熱安定性の改善

反強磁性 $\alpha\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 薄膜上に作製した磁性超薄膜(ここでは、Co超薄膜)は、非磁性である $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板上に作製した場合と比較して、約200度以上も、熱的に安定化されることを見出した。この結果は、当初の目的に有るよう、強磁性体/反強磁性体界面での交換磁気異方性によるものとして説明される。交換磁気異方性によるナノ磁性体の磁化の熱安定性の改善は、特に、酸化物反強磁性下地層上での磁性超薄膜に対しては、これまでに報告された例は無く、極めて新規性の高い結果である。さらに、酸化物反強磁性下地層上での磁性超薄膜は、前述のように磁性体のディスクリット化が期待される系であることが

ら，工学的応用上も極めて重要な成果として位置付けられる．

以上の(1)，(2)の研究成果は，下記の業績にも見られるように，多数の論文発表・学会発表として学術的に認められると共に，国内外に情報発信している．また，特許からも分かるように，本技術の工学的重要性も認められる．さらに，本成果は平成 20 年度開催の国際シンポジウムにおける招待講演（下記，学会発表，）に加え，平成 21 年 6 月に開催される国際会議(MORIS 2009)において，招待講演を依頼されるなど，国内外においてもその重要性が認められている．

(3) 磁気光学カー効果を用いた直交磁化挙動評価手法の構築

図 2 に，開発した磁気光学カー効果測定装置の概観図を示す．図には，前述の異なる光学配置に対応する 2 種類の光源・受光系が設置されており，直交磁化挙動の検討が可能である．



図 2 開発した直交磁化挙動評価用磁気光学カー効果測定装置．本装置は，試料を超高真空中に保ったままの計測が可能であり，本研究の目的である界面効果の詳細を明確にすることが可能となる．

得られた結果の一例を，図 3 に示す．図中の赤線・青線で示したように，磁場方向の磁化成分と磁場に垂直方向の磁化成分が明確に分離されており，磁化反転機構の詳細を明確にすることに成功した．

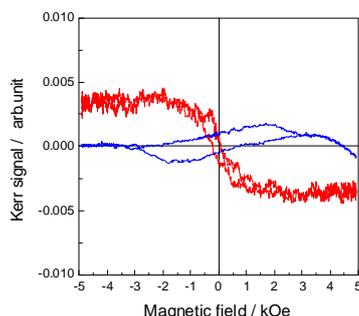


図 3 図 2 に示した装置により得られた計測例．赤線は磁場に平行方向の磁化成分，青線は磁場に垂直方向の磁化成分を示している．

本研究で構築した磁気光学カー効果による直交磁化挙動評価手法は，特に，超高真空中でのその場観察に対応した装置で有る点において，他に例を見ない．本手法が構築されたことにより，磁性超薄膜の磁化挙動をより詳細に明らかにすることが可能となる．

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 7 件)

白土優，中谷俊博，中谷亮一，山本雅彦，Fabrication of Cr oxide thin film and its influence on magnetic properties of ultrathin Co film, Journal of Physics: Conference Series, in-press, 査読有．

白土優，中谷亮一，山本雅彦，Contribution of Langevin behavior to the low temperature maximum of ZFC magnetization of the discontinuous Fe films, Journal of Applied Physics, 103, 07B503-1-07B503-3, 2008 査読有．

中谷亮一，白土優，遠藤恭，磁場スイープ MFM 法の原理と磁化過程の観測，金属，78, 30-35, 2008 査読有．

白土優，Cr-O 薄膜上に積層した Co 超薄膜の構造と磁気特性，日本金属学会「スピントロニクス・ナノ磁性材料の進展と将来展望」，29-32, 2008, 査読無．

白土優，久富和郎，中谷亮一，SrTiO₃(001) 基板上に積層した Co 超薄膜の構造と磁性，ICICE Technical Reports, 108, 1-4, 2008, 査読無．

白土優，山本雅彦，Dominant factor of zero-field-cooled magnetization in discontinuous Fe films, Physical Review B, 76, 144432-1-144432-10, 2007, 査読有．

佐藤純一，遠藤恭，白土優，川村良雄，山本雅彦，村上善照，高橋明，Trapping of Magnetic Domain Wall in Nickel Constriction, Japanese Journal of Applied Physics, 46, 4117-4120, 2007, 査読有．

[学会発表](計 20 件)

Au(111) 表面上に作製した Cr₂O₃(0001)/Co 超薄膜の磁気特性
白土優，中谷俊博，河原信一，中谷亮一

日本金属学会 2009 年春期大会 東京工業大学 (東京), 2009 年 3 月 .

白土優, 久富和郎, 中谷亮一, SrTiO₃(001) 基板上に作製した Co 超薄膜の構造と磁性, 日本金属学会 2009 年春期大会, 東京工業大学 (東京), 2009 年 3 月 .

白土優, Cr-O 薄膜上に積層した Co 超薄膜の構造と磁気特性, 日本金属学会分科会シンポジウム「スピントロニクス, ナノ磁性材料の進展と将来展望」, 東北大学金属材料研究所 (仙台), 2009 年 1 月 .

久富和郎, 白土優, 中谷亮一, SrTiO₃(001) 基板上に積層した Co 超薄膜の構造と磁性, 電気情報通信学会 MR 研究会, 松下電器産業, 2009 年 1 月 .

白土優, Fabrication of Cr₂O₃(0001) thin film toward the electronic control of magnetism, Osaka University-Kookmin University Joint Symposium on Advanced Materials Science and Engineering 2009, February 12, 2009, Osaka, Japan.

白土優, 中谷俊博, 中谷亮一, 山本雅彦, Superparamagnetism of Ultrathin Co Film on Antiferromagnetic Cr₂O₃ Layer, International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, November 11-12, 2008, Osaka, Japan.

白土優, Improvement of magnetic thermal stability of ultrathin film using antiferromagnetic underlayer Osaka University - NIMS Yong Scientist Symposium on Advanced Structural and Functional Materials Design, November 10, 2008, Osaka Japan

白土優, 中谷俊博, 中谷亮一, 山本雅彦, Effect of antiferromagnetic Cr₂O₃(0001) layer on superparamagnetic properties of ultrathin Co films, Gordon Research Conference: Magnetic Nanostructures, August 31-September 5, 2008, Aussois, France.

白土優, 島状成長した Fe 超薄膜の超常磁性, 日本磁気学会ナノマグネティクス専門研究会, 中央大学 (東京), 2008 年 5 月 .

白土優, 三浦純幸, 秋田総理, 遠藤恭, 中谷亮一, 山本雅彦, 中川敦司, 月原富武, Ni²⁺イオンと反応させた蛋白質 PfV の磁氣的性質, 日本金属学会 2008 年春期大会, 武蔵工業大学 (東京), 2008 年 3 月 .

中谷亮一, 遠藤恭, 白土優, 微小磁性体を使ったデバイスの検討, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 東北大学 (仙台), 2008 年 2 月 .

白土優, 中谷亮一, 山本雅彦, Contribution of Langevin behavior to the low temperature maximum in ZFC magnetization of the discontinuous Fe films, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, November 5-9, 2007, Tampa, USA.

白土優, 中谷俊博, 中谷亮一, 山本雅彦, Superparamagnetism of discontinuous ultrathin Co film on antiferromagnetic Cr₂O₃ layer, International Conference on Fine Particle Magnetism 2007, October 9-12, 2007, Roma, Italy.

白土優, 中谷俊博, 加瀬隆, 中谷亮一, 山本雅彦, Thermal stability of magnetization of ultrathin Co film on antiferromagnetic Cr₂O₃, 2nd International Symposium on Atomic Technology, October 1-2, 2007, Awaji, Japan.

白土優, 三浦純幸, 秋田総理, 東俊祐, 遠藤恭, 中谷亮一, 山本雅彦, 中川敦, 月原富武, Magnetic properties of *Pyrococcus furiosus* virus-like particles (PfVs) reacted with Ni ions, 2nd International Symposium on Atomic Technology, October 1-2, 2007, Awaji, Japan.

白土優, 中谷俊博, 中谷亮一, 山本雅彦, Cr-O/MgO(001)上に作製した Co 超薄膜の磁気特性, 日本金属学会 2007 年秋期講演大会, 岐阜大学 (岐阜市), 2007 年 9 月 .

白土優, 中谷俊博, 加瀬崇, 中谷亮一, 山本雅彦, 結晶配向性の異なる Cr-O 薄膜上に積層した Co 超薄膜の磁気特性, 第 31 回日本応用磁気学会学術講演会, 学習院大学 (東京), 2007 年 9 月 .

白土優, 中谷俊博, 加瀬崇, 中谷亮一, 山本雅彦, Effect of antiferromagnetic Cr₂O₃ layer on the magnetic properties of ultrathin Co film, Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, September 26-28, 2007, Suita, Japan.

白土優, 三浦純幸, 秋田総理, 東俊祐, 遠藤恭, 中谷亮一, 山本雅彦, 中川敦, 月原富武, Implantation of magnetic ion into *Pyrococcus furiosus* virus-like particles (PfVs), Handai Nanoscience and Nanotechnology International Symposium, September 26-28, 2007, Suita, Japan.

白土優, Superparamagnetism of nanoparticles fabricated by the island growth of ultrathin film, ICYS-ICMR Summer School 2007, July 22-27, 2007, Tsukuba, Japan.

〔産業財産権〕

出願状況（計1件）

名称：電圧誘起磁化反転を用いた磁気メモリ
とその製造方法

発明者：白土優，中谷亮一

権利者：大阪大学

種類：特許権

番号：特願 2009 - 54827

出願年月日：2009年3月9日

国内外の別：国内

取得状況（計0件）

6．研究組織

(1)研究代表者

白土 優 (SHIRATSUCHI YU)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：70379121

(2)研究分担者

(3)連携研究者