

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月15日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23710136

研究課題名（和文） レーザー誘起光電子顕微鏡による磁性薄膜のフェムト秒イメージング

研究課題名（英文） femto second imaging of magnetic thin films using laser photoemission microscope

研究代表者

中川 剛志（NAKAGAWA TAKESHI）

九州大学・総合理工学研究院・准教授

研究者番号：80353431

研究成果の概要（和文）：

フェムト秒の時間分解能とナノメートル空間分解能を併せ持つレーザー誘起閾値磁気円二色性光電子顕微鏡(MCD-PEEM)により磁性薄膜の動的挙動を研究した。当初の研究目標である磁化の歳差運動の空間分解測定はその変化が小さいために観測に辿りつけなかった。しかし、研究過程でエネルギーフィルター導入や円偏光度精度向上により 10 倍以上の磁気検出向上と時間安定性を達成した。その結果、これまで観測できなかった分子吸着による高速な磁区変化を初めて捉えることに成功した。

研究成果の概要（英文）：

I have studied dynamics of magnetic ultra thin films using laser threshold magnetic circular dichroism photoelectron emission microscope, which has femtosecond time resolution as well as ~ 50 nm spatial resolutions. Direct observation of the precession motion of magnetic thin films has not been achieved due to its subtle change. However I have enhanced the magnetic sensitivity and time stability of the microscope, which is ten times better than those before this project. This development enables us to make the first observation of magnetic domain dynamics about the molecular adsorption on to magnetic ultra thin films.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学 ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ計測

1. 研究開始当初の背景

強磁性体スピンの超高速分光研究は磁化のコヒーレント応答などの物理現象だけでなく磁気媒体メモリなどの応用対象でもあることから急速に発展している分野である。磁化のナノ秒以下の動的な振る舞いは大きく分けて、1) 電子励起とそれに伴う熱励起による磁化の大きさそのものが一時的にする減磁現象(時定数 ps 以下)、2) 磁化が歳差運動や大きく回転する現象(時定数数 10~100

ps、磁気異方性等に依存)がある。1990 年度後半のポンププローブ法による超高速磁気光学効果測定(Beaurepaire et al., Phys. Rev. Lett., 76, 4250(1996))を皮切りに、フェムト秒~ピコ秒での磁化過程の測定は活発な分野となっている。

2. 研究の目的

磁気異方性(磁化エネルギーの方位依存性)は磁区形状、保磁力、磁壁の幅などに影

響するが、スピンの高速ダイナミクスを支配する主要因でもある。本研究では申請者らが開発を進めている紫外レーザー磁気二色性閾値光電子顕微鏡により磁気異方性の効果が著しい原子数層程度の磁性薄膜構造での超高速応答をフェムト秒ナノメートル分解能で明らかにする。磁性薄膜ロッド内に磁気異方性の非常に小さい、磁化方向の不安定な領域をマイクロメートルオーダーで挿入した試料を作製する。磁化方向の不安定な領域での弱い光による光誘起磁化変化とそれに連動した強い磁気双極子相互作用を利用した、微細超高速スピンスイッチの発現と観察を研究目的とする。

3. 研究の方法

自ら考案したレーザー誘起磁気円二色性光電子顕微鏡 (MCD-PEEM) を用いて磁性超薄膜の磁区観測を行う。実験試料は超高真空槽にて分子線蒸着により作成した。成果で述べるように水晶振動子膜厚計とピエゾステージを用いて、空間分解能でマイクロメートル精度、膜厚で 0.1nm 以下の精度を同時に達成している。

4. 研究成果

①レーザー-MCD-PEEM の感度向上

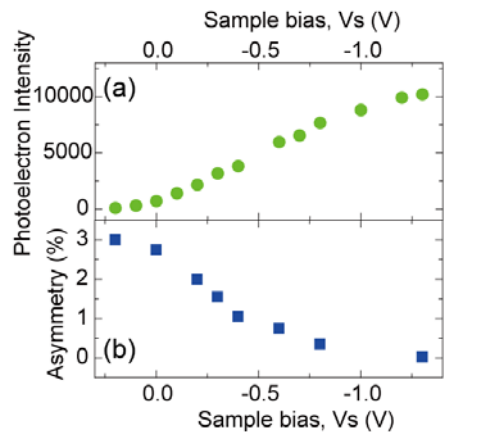
レーザー-MCD-PEEM による感度を向上させた。エネルギーフィルターの導入により、励起波長を固定させ、Fermi 準位近傍から励起された電子のみを測定するように変更した。この手法は従来の仕事関数と励起波長を調整する方法に比べ、仕事関数の多少の変化に非対称度が依存しないため、数時間もの長時間の安定測定に有用である。また気体吸着による磁区変化等の観測にも MCD-PEEM 手法を適応できるようになった。

図 1 に Ni 薄膜において MCD-PEEM により測定した円二色性非対称度を示す。エネルギーフィルターを Fermi 準位付近場合、非対称度は 3%程度であるが、エネルギーフィルターを Fermi 準位から 0.8 eV の位置に設定すると 0.5%以下の小さい値になった。

ただし、0.1%程度の非対称度でも十分に磁区は測定できる。これは励起光の左右円偏光度の精度向上が大きな要因である。左右円偏光度を等価になるように波長板、偏光子を微調する機構を取り付け、迅速に円偏光度を評価できる光学系を PEEM 装置に取り付け、レンズや真空窓など重要な光学部品全般に複屈折のなるべく少ない部品を使用した。

②超高真空下でのその場マイクロ蒸着

マイクロメートルでの蒸着精度の向上と検出感度向上を行った。マイクロメートル精



(c) Vs = 0 V (d) Vs = -0.8 V (e) no filter

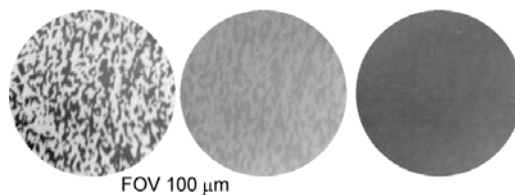


図 1. Ni10ML 薄膜の磁気円二色性と磁区測定。(a) エネルギーフィルターを変化させたときの光電子強度の変化。0 V が Fermi 準位に相当する。(b) エネルギーフィルターを変化させたときの磁気円二色性非対称度の変化。(c) Fermi 準位近傍で MCD-PEEM にて測定した磁区。(d), (c) Fermi 準位から 0.8 eV 離れたとき、およびエネルギーフィルターなしでの磁区測定。

度の蒸着はピエゾと自作したレーザー加工機による蒸着マスクを組み合わせで行った。実験の結果から、位置分解能 10 μm の精度で蒸着膜を成長させることができた。この蒸着装置により作成した Ni 薄膜を用いて、水素吸着による磁気相転移観測をすることができた。精度をさらに向上させて、1 μm 精度での磁気ロッドの製作を継続中である。

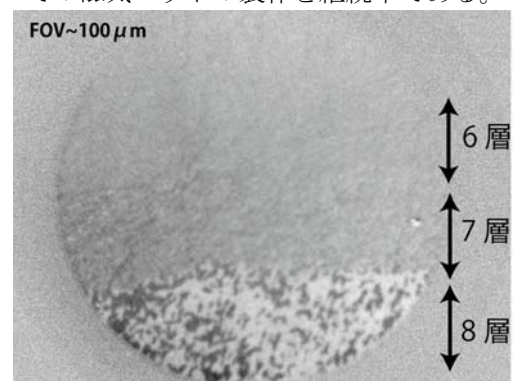


図 2 マイクロ蒸着機を使用して作成した Ni 磁性薄膜。10 μm 精度で真空蒸着膜を作成できる。

③分子吸着による磁区変化のダイナミクス

ビデオレート測定の際の感度は実験前の非対称度 1%程度から 0.1%程度へと向上さ

せることができた。そのため一秒以下の磁区のダイナミクスを追跡できるようになった。その例として、水素分子吸着による Ni 薄膜の磁区変化を研究した。

水素吸着前後の磁区像を図 3 に示す。水素が吸着していない Ni 清浄膜では $5\mu\text{m}$ 程度の小さい磁区が多数観測できる。水素を吸着させるとこの小さい磁区が徐々に変化し、大きな磁区へと統合されていく。高速測定から小さい磁区ほど少量の水素吸着で磁区反転され、大きな磁区が変化するにはより多量の水素吸着が必要であることがわかった。

この磁区の単純化は磁壁エネルギーと水素吸着による Ni 薄膜の磁気異方性の増加から説明することができる。

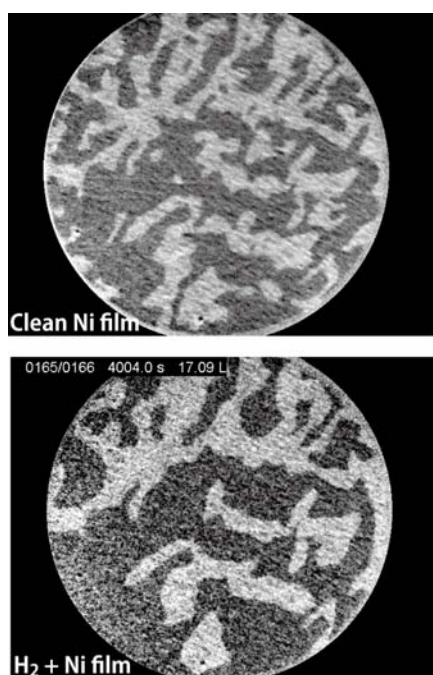


図 3. 水素吸着前後の Ni 薄膜の磁区変化

時間分解測定では水素吸着により磁気ドメインの大きさが大きく変化し、磁壁が短くなることを MCD-PEEM により明らかにした。この現象は水素吸着により磁気異方性が大きくなり、それに伴い磁壁エネルギーを減少させるべく磁気ドメインの大きさが変化し、ものと解釈した。

フェムト秒の超高速測定では有意な変化は観測できなかった。その原因としては検出感度の不足および磁気異方性制御が不十分であると考えている。今後は異方性を高めるためにさらに精密なマイクロメーターサイズの Ni ロッドの作成、そしてそこでの超高速磁化測定を継続していく。

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 5 件)

① T. Nakagawa, and T. Yokoyama, “Laser induced threshold photoemission magnetic circular dichroism and its application to photoelectron microscope”, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 186, 356~364 (2012) 査読有
DOI:10.1016/j.elspec.2012.02.009

② Keitaro Eguchi, Yasumasa Takagi, Takeshi Nakagawa, and Toshihiko Yokoyama, “Growth process and magnetic properties of iron nanoparticles deposited on Si₃N₄/Si(111)-(8×8)”, *Phys. Rev. B* 85, 174415-1~8 (2012) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevB.85.174415

③ T. Nakagawa, Y. Takagi, T. Yokoyama, T. Methfessel, S. Diehl, H. J. Elmers
“Giant Magnetic Anisotropy Energy and Coercivity in Fe island and atomic wire on W(110)”, *Phys. Rev. B* 86, 144418-1~5 (2012) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevB.86.144418

④ Yoshihiro Matsumoto, Seiji Sakai, Shiro Entani, Yasumasa Takagi, Takeshi Nakagawa, Hiroshi Naramoto, Pavel Avramov and Toshihiko Yokoyama
“Ferromagnetic interlayer coupling in C₆₀-Co compound/Ni bilayer structure”, *Chemical Physics Letters*, 511, 68~72 (2011) 査読有
DOI:10.1016/j.cplett.2011.05.038

⑤ K. Hild, G. Schoenhense, H. J. Elmers, T. Nakagawa, T. Yokoyama, K. Tarafder and P. M. Oppeneer
“Dominance of the first excitation step for magnetic circular dichroism in near-threshold two-photon photoemission”
Phys. Rev. B 85, 014426-1~10 (2011) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevB.85.014426

[学会発表] (計 7 件)

① Takeshi Nakagawa, Energy Filtered Magnetic Circular Dichroism PEEM for Magnetic Domain Observation, 8th International workshop on LEEM-PEEM, 2012 年 11 月 13 日, Hong-Kong, China

② Takeshi Nakagawa, Huge Magnetic Anisotropy and Coercivity in Fe island and

atomic wire on W(110), International colloquium on Magnetism Films and Surfaces, 2012年9月25日, Shanghai, China

③ Takeshi Nakagawa, Huge Magnetic Anisotropy and Coercivity in Fe island and atomic wire on W(110), International Conference on Magnetism, 2012年7月10日, Busan, Korea

④横山利彦、Fe/W(110)における XMCD による巨大保持力観測と Ni/Cu(001)の水素吸着過程における UV MCDPEEM による磁区変化観測, 平成24年度放射光表面科学研究部会・顕微ナノ材料科学研究会合同シンポジウム、2012年11月16日、慶応大学(神奈川県)

⑤中川剛志, 巨大保磁力を有する Fe/W(110)の X 線磁気円二色性による研究, 日本物理学会秋季, 2012年1月9日, 鳥栖市民文化会館 (佐賀県)

⑥中川剛志, Fe/W(110)における巨大保磁力の XMCD による研究, UVSOR ユーザーズミーティング, 2011年11月19日, 分子科学研究所 (愛知県)

⑦中川剛志, 巨大保磁力を有する Fe/W(110)の X 線磁気円二色性による研究, 第25回日本放射光学会, 2011年9月21日, 富山大学五福キャンパス (富山県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 剛志 (NAKAGAWA TAKESHI)

九州大学大学院総合理工学研究院・准教授
研究者番号：80353431

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし