

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30日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656381

研究課題名（和文） スピン偏極のユニバーサルな定量化技法

研究課題名（英文） Universal approach to estimating spin polarization

研究代表者

谷山 智康 (Taniyama Tomoyasu)

東京工業大学・応用セラミックス研究所・准教授

研究者番号：10302960

研究成果の概要（和文）：

本研究では、パルスレーザーを磁性体に照射することで励起される電子のスピン緩和過程を計測することで、強磁性体のスピン偏極率を定量化することを目的としている。まず、スピン偏極率が異なると考えられる種々の強磁性金属薄膜試料を作製した。次に、半導体量子井戸構造を用いてポンプ-プローブ法によりスピン緩和を測定する手法を確立し、本手法を強磁性金属薄膜に適用した。その結果、強磁性金属薄膜のスピン緩和過程が観測された。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to estimate the spin polarization of conduction electrons in ferromagnetic metals by using pump probe technique. Firstly, we have grown various ferromagnetic metal thin films with different spin polarization. Spin relaxation of electrons in a semiconductor quantum well, which was excited by irradiating with circularly polarized light, was then measured using pump-probe magneto-optical Kerr effect technique. We have also made an attempt at measuring the spin relaxation of ferromagnetic 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	3,000,000	900,000	3,900,000

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：電子・磁気物性・スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

スピントロニクスデバイスの創成に向け、新たなスピン注入源の開発が激化している。研究代表者らはこれまでに、酸化物磁性金属材料として高スピン偏極率を有する Fe_3O_4 に着眼し、スピン源としての可能性を探求する研究を推進してきた。その際、研究代表者のアプローチは、半導体量子井戸にスピン偏極電子を注入し、結果生じる円偏光発光からスピン偏極率を定量化するものであり、極めて

精密な定量化ができる反面、半導体量子井戸との接合デバイスを材料毎に作製する必要があるという点で、汎用的な評価手法として最適とは言えない欠点を有する。一方、従来より用いられているAndreev反射法は簡便であるが低温という厳しい適用条件が課せられている。このような背景から、研究代表者は、より柔軟に且つ迅速な評価が可能なスピン偏極率の定量化法の開発が必要と考え、本研究を着想した。

2. 研究の目的

本研究は、時間分解スピン緩和計測法を利用することで環境を選ばない様々な条件下において利用可能なスピン偏極率の定量化法の礎を確立することを目的としている。具体的には、強磁性体におけるスピン緩和過程を利用する。一般に磁性体の電子スピンの偏極率は、フェルミ準位におけるスピニアップ、スピンドアウンに対する状態密度の比に基づいて定義され、その比が1のときはスピン非偏極状態となり、スピニアップ、スピンドアウンのいずれか一方の状態密度しか持たない場合はスピン偏極率が100%（完全スピン偏極）となる。ここで、完全スピン偏極したいわゆるハーフメタル物質に対して、パルスレーザー光で電子スピンを励起する場合を考える。通常はこの励起された電子スピンは電子系との相互作用によりスピン緩和し、数ピコ秒の後に初期状態に戻るが、スピン偏極率が100%のハーフメタルでは、スピンドアウン状態がフェルミ準位上に存在しないためにスピン緩和時間が数100ピコ秒に達すると予想される。この特性を逆に利用しようというのが本研究で目指すスピン偏極率の定量化法である。すなわち、スピン偏極した物質においてはスピンの緩和時間がスピン偏極率に依存することから、スピン緩和時間の計測に基づいて逆に物質のスピン偏極率を推定する。

3. 研究の方法

- (1) スピン偏極率が異なる種々の磁性薄膜をMBE装置を用いて成長する。具体的には、ハーフメタルと理論的に予測されている Fe_3O_4 、遷移金属規則合金 FeRh 、 FePd 、典型的な強磁性金属 Fe 、および垂直磁化 Cu/Ni 多層膜を成長するための条件を精査した。
- (2) ポンプ-プローブ法を用いた磁気光学 Kerr 効果測定装置により、磁気光学 Kerr 効果の時間分解測定を行う。初めに、 GaAs 量子井戸に円偏光励起されたスピン偏極電子のスピン緩和過渡過程を計測することで、励起したスピン偏極電子を磁気光学 Kerr 効果により計測可能であることを確認する。その後、(1)により作製した種々の強磁性薄膜に対してポンプ-プローブ法により磁気光学 Kerr 効果の時間分解計測を行う。

4. 研究成果

- (1) Fe 薄膜を現有のMBE装置により $\text{MgO}(001)$ 基板上に成長した。RHEED観察により、製膜した Fe 薄膜はエピタキシャル成長していることが確認された。 FeRh 規則合金薄膜に関しては、 Fe および Rh の2源同時蒸着に

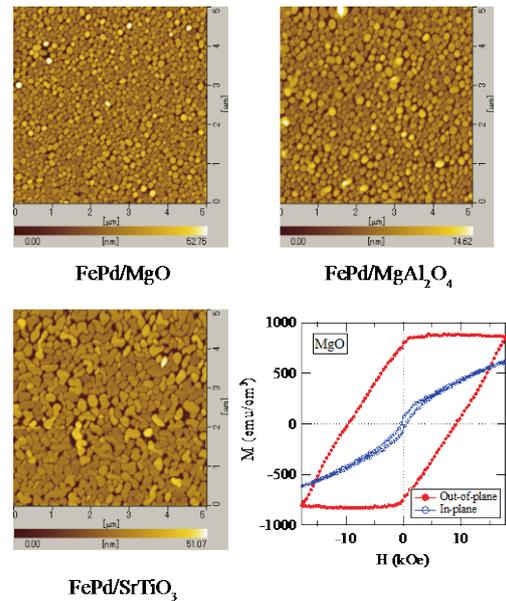


図1 MgO、 MgAl_2O_4 、 SrTiO_3 上にエピタキシャル成長した FePd 膜膜のモルフォロジーおよび磁気特性

より Fe 、 Rh の組成比が1対1でかつ CsCl 構造に規則化したエピタキシャル薄膜を $\text{MgO}(001)$ 基板上に得ることができた。実際、磁化の温度依存性を評価したところ、 CsCl 構造に規則化した FeRh に特有の反強磁性-

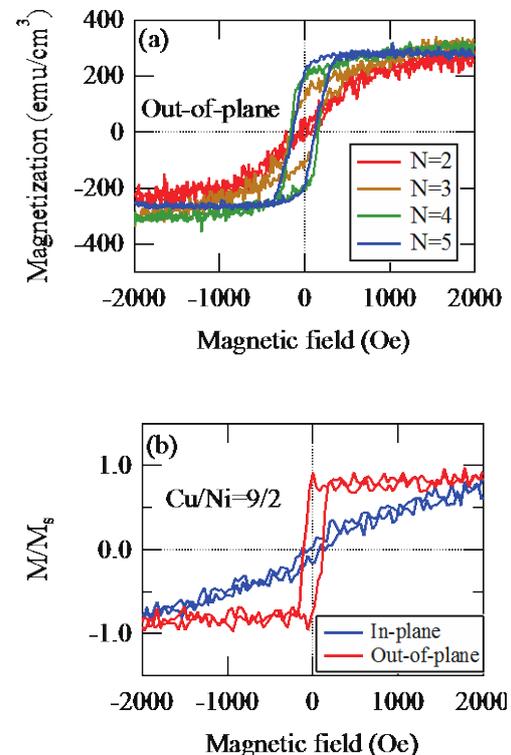


図2 Ni/Cu 多層膜の(a)積層回数と垂直磁気異方性との関係、(b) Ni 膜厚2nmの際の明瞭な垂直磁気異方性

強磁性磁気相転移を確認することができた。また、L1₀構造に規則化したFePdに関しては、MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃, BaTiO₃, GaAs単結晶基板上に成長し、磁気異方性と格子歪みとの関係について詳細に調査した。その結果、図1に示すように基板に依存して明瞭な島状構造を持つことがわかった。MgO, MgAl₂O₄, SrTiO₃はそれぞれFePdと格子不整合が8.6%、4.7%、1.4%であることから、基板と大きな格子不整合が生じるとFePdの島の大きさが小さくなることわかる。この傾向は格子緩和の観点から理解される。また、磁気特性についても、図1に示すようにMgO基板を用いたときに垂直磁気異方性をもち、大きな保磁力が発現することがわかった。さらに、磁気異方性の異なる垂直磁化膜についてスピン緩和を計測することを想定してNi/Cu多層膜をGaAs基板上に成長した。その結果、図2(a)に示すように層数の増加に伴って垂直磁気異方性が顕著となることわかった。また、Niの膜厚が2nmの時に明瞭な垂直磁気異方性が得られた(図2(b))。

- (2) GaAs/AlGaAs 量子井戸を用いてポンププローブ法による時間分解磁気光学効果測定を行った。GaAs 量子井戸に円偏光を照射することで光学遷移の選択則に基づいてスピン偏極電子を励起することができる。励起されたスピン偏極電子を磁気光学 Kerr 効果により時間分解計測した結果を図3に示す。照射光の偏光状態を右回り円偏光(σ^+)とした時と左回り円偏光(σ^-)とした時とで Kerr 回転の符号反転が明瞭に観測されている。このことは、円偏光照射によりスピン偏極電子が励起されたことを明示している。

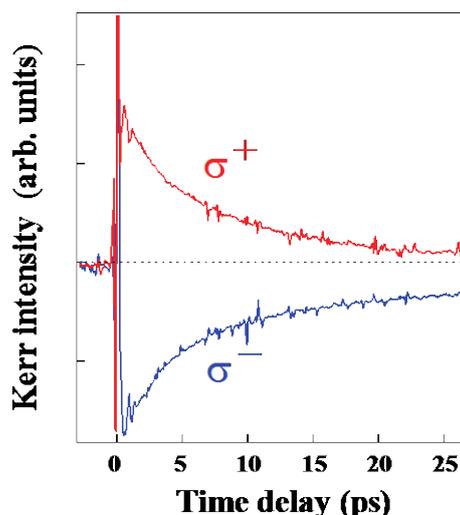


図3 GaAs 量子井戸中に励起されたスピン偏極電子のスピン緩和過程

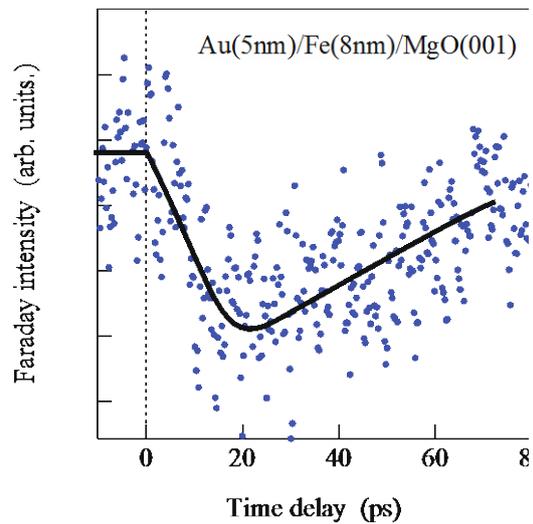


図4 Fe/MgO 試料に対して時間分解 Faraday 効果により測定したスピン緩和過程

次にFe/MgOへテロ構造に対して磁気光学 Kerr効果を用いてスピン緩和の計測を行ったが、明瞭なスピン緩和過程を計測することができなかった。そこで、磁気光学 Faraday効果によりスピン緩和過程の計測を行った結果を図4に示す。Pump光が照射後、約20ps程度でスピン偏極率が最大となり、その後、緩和する過程が捉えられている。このようなスピン緩和過程はCrO₂において観測されており、スピン偏極率と関連したスピン緩和過程によるものと推察される。以上により、スピン緩和過程の測定に基づいてスピン偏極率を定量化できる可能性が示された。今後さらに(1)において作製した他の強磁性薄膜に対して同様の測定を行うことで、スピン緩和時間とスピン偏極率との関係を明確化する必要がある。

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)

[学会発表] (計10件)

- ① Y. Shirahata, M. Itoh, and T. Taniyama, Correlation between Cu/Ni layer thickness and magnetic properties of Cu/Ni Multilayers on GaAs(001)、8th International Symposium on Metallic Multilayers (MML2013)、2013. 5. 20、Kyoto, Japan
- ② E. Wada, Y. Shirahata, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, Electron spin transmission due to spin-filtering effect in Fe₃O₄-based spin-LED structure、11th International Conference on Ferrites (ICF11)

2013. 4. 16、Okinawa, Japan
- ③ R. Shiina, I. Suzuki, Y. Shirahata, M. Itoh, and T. Taniyama, Structural phase transition induced magnetic anisotropy of FePd/BaTiO₃, 11th International Conference on Ferrites (ICF11) 2013. 4. 16、Okinawa, Japan
- ④ 椎名 亮太, 鈴木 一平, 伊藤 満, 谷山 智康, FePd/BaTiO₃ (001)における構造相転移と磁性との相関、日本物理学会第 68 回年次大会 (2013 年)、2013. 3. 26、東広島市・広島大
- ⑤ 白幡 泰浩, 伊藤 満, 谷山 智康、スピン注入源としてのCu/Ni多層膜の作製と磁気特、第 17 回半導体スピン工学の基礎と応用 PASPS-17、2012. 12. 19、福岡市・九州大
- ⑥ 椎名 亮太, 鈴木 一平, 白幡 泰浩, 和田 詠史, 伊藤 満, 谷山 智康, FePd薄膜における磁氣的性質と秩序パラメータ及

び格子ミスマッチとの相関、日本物理学会 2012 年秋季大会、2012. 9. 18、横浜市・横浜国立大

[その他]
ホームページ等
<http://www.msl.titech.ac.jp/~itohlab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

谷山 智康 (TANIYAMA TOMOYASU)
東京工業大学・応用セラミックス研究所・
准教授
研究者番号 : 10302960

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者