

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360265

研究課題名（和文） スピン流を介した量子構造の磁気秩序化ダイナミクス

研究課題名（英文） Magnetic ordering induced by spin polarized electrons  
in quantum structures

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、磁性量子ナノ構造と半導体とのヘテロ構造に円偏光を照射することで、ヘテロ界面近傍の半導体中にスピン偏極した電子群を形成し、量子構造の磁気特性を光学的に制御することを目的としている。研究の結果、円偏光照射によりスピン偏極した電子群を半導体中に形成することができることが実証され、さらに、磁性量子構造の磁気特性が光照射により励起されたスピン偏極した電子群により変調可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：

In this work, the effect of spin-polarized electrons on the magnetic properties of magnetic quantum structures on semiconductors was investigated by irradiating with circularly polarized light. The irradiation of circular polarized light was found to be able to generate spin-polarized electrons efficiently in the semiconductor near the interface, and as a result, the generated spin-polarized electrons could modulate the magnetic properties of the quantum structures in this approach.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2011年度	3,200,000	960,000	4,160,000
2012年度	3,200,000	960,000	4,160,000
年度			0
年度			0
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

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

細線や量子ドットに代表される量子ナノ構造の磁性は、量子サイズ効果を統計力学的に解釈する恰好のターゲットであり、その強磁性転移温度や臨界指数のサイズ依存性等はスケール理論に基づいて理解されている。例えば、これまでに W(110) 傾斜基板

のステップエッジに Fe(110) 量子細線を自己組織化形成し、その強磁性転移温度をモンテカルロシミュレーションの結果と対応させた報告等がなされている。一方、最近になりスピントロニクス分野においてスピン偏極した電流やスピン角運動量の流れ（スピン流）とその制御に関する研究が精力的に推進

されている。その中で、研究代表者らは、磁性体/半導体ヘテロ構造において、磁性体から半導体にスピン偏極電流を高効率に注入する研究やスピン偏極電流の近藤効果への影響に関する研究を推進してきた。これらのナノ磁性とスピン偏極電流の注入に関する独立した研究を推進する中で、磁性量子ドット集合体の近傍にスピン偏極した電子系を配置することで、磁性量子ドットとスピン偏極した電子系との間にスピン相関を誘起することができれば、磁性量子ドット集合体の磁性を変調・制御することが可能であるのではないかとこの着想に至った。

## 2. 研究の目的

上記の通り、磁性量子ドットの集合系において、その近傍にスピン偏極した電子系を配置することが可能であると、スピン偏極した電子系（もしくはスピン流）を介したスピン相関により、その磁氣的挙動が大きく変調されると期待される。このことは、スピン相関を外的に顕在化させることで、従来にはないアプローチによる量子系の磁気デザインが可能であることを意味する。本研究では、磁性量子ナノ構造と半導体とのヘテロ構造において、円偏光スピン励起手法を利用することで上記の指針に立脚した光学的磁性制御の可能性について探求することを目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 種々の強磁性ドット（薄膜）/半導体 GaAs ヘテロ構造を MBE 法およびマグネトロンスパッタリング法を併用して作製した。強磁性材料としては、Fe, Co, Ni,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , FePd 等を用いた。ドット形態は島状成長法に基づいて制御した。
- (2) 作製した試料に対して、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した電子系を GaAs 中に形成できることを確認するために、強磁性薄膜/GaAs 界面を介したスピン依存電子伝導

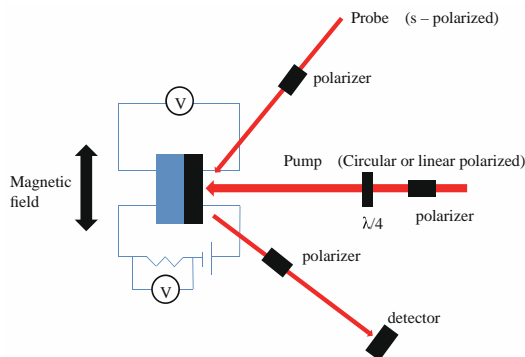


図1 円偏光励起磁気変調測定系

特性を評価した。

- (3) 円偏光照射により形成されるスピン偏極した電子系が GaAs 上の強磁性ドット（薄膜）の磁気特性に与える影響を磁気光学 Kerr 効果を用いて評価した。具体的には、図1に示すように円偏光 pump 光を GaAs に照射しスピン偏極電子を励起し、直線偏光プローブ光により磁気ヒステリシス測定を室温で行った。

## 4. 研究成果

- (1) 強磁性ドットの GaAs(001) 上での形成を試み、原子間力顕微鏡によってドット形状の評価を行った。その結果、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  においては薄膜形状がより安定となりドットを形成することができなかったが、Co の場合にはドット形成が確認された。一方、Fe の場合には成長の初期段階においてドット形状が確認された。
- (2) 円偏光照射によりスピン偏極した電子系が GaAs 中に形成されることを確認するために  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$  量子井戸ヘテロ構造を作製し、円偏光励起により GaAs 中に形成される伝導電子が  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$  界面を伝導する際にスピン依存性を示すかどうかについて調査した。図2に200Kにおける円偏光を照射した際の円偏光度依存光電流のバイアス電圧依存性を示す。磁場を GaAs 基板面に垂直に-5T から 5T までの範囲で印加したところ、印加磁場の大きさおよび方向に依存して円偏光度依存光電流が大きく変化していることがわかる。このことは  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  薄膜の磁化方向に依存して界面を介した電気伝導度が変化したことを意味しており、円偏光照射により GaAs 中にスピン偏極した電子系が励起されたことの直接的な証拠となっている。また、円偏光度依存光電流のバイアス電圧依存性には 0V および-0.7V 付近に明瞭なピーク構造が観測されている。これらのピーク構造はそれぞれ熱励起伝導とトンネル伝導

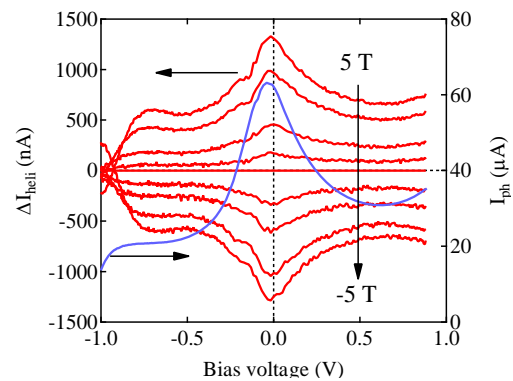


図2  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$  ヘテロ構造における円偏光依存光電流のバイアス電圧依存性

に伴う界面電子伝導と関連していると推察されている。さらに、室温においても熱励起伝導に関連する同様な振舞が観測されている。そのため、室温においても界面付近にスピン偏極電子が形成され、それによって、磁性ドット間に磁気変調が生じ磁性ドット系の磁気特性を制御可能であると期待できる。

- (3) 膜厚 0.67nm に相当する Fe をマグネトロンスパッタリング法により GaAs 基板上に成長した Fe ドット/ GaAs (001) ヘテロ構造に対して、界面に電圧 0.5V を印加した時と印加しない時の円偏光照射時における磁気ヒステリシス曲線を測定した結果を図 3(a) に示す。電圧を印加する場合と印加しない場合とで保磁力が明瞭に変化することがわかる。この保磁力の変化は、円偏光によって励起されたスピン偏極した電子が Fe ドット近傍に注入されることによって誘起された現象であると考えられる。さらに、pump 照射光の偏光状態を円偏光、直線偏光と変化させた際に、電圧を印加した時と印加しない時の保磁力変化

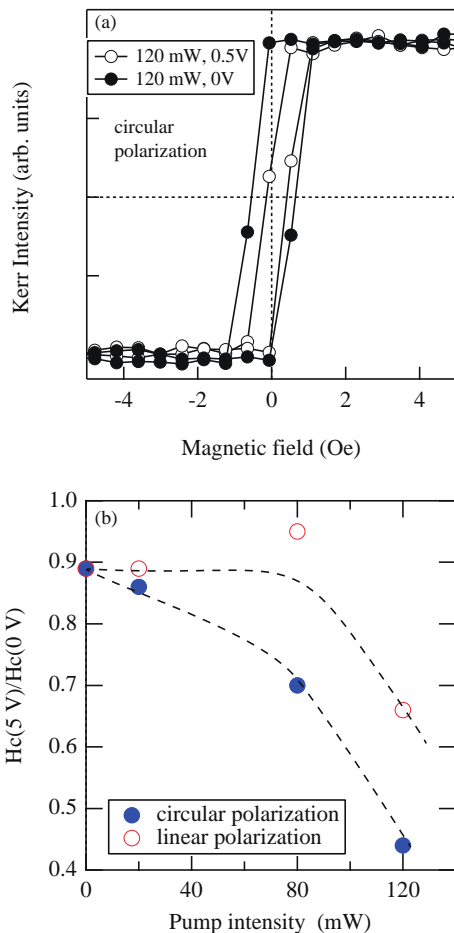


図 3 (a) 円偏光照射時におけるヒステリシス曲線の印加電圧効果、(b) 保磁力変化率の pump 光強度依存性

量を pump 照射光強度に対してプロットした結果を図 3(b) に示す。照射光の偏光状態によって保磁力変化量が明瞭に変化し、特に円偏光を照射した際に大きな保磁力変化が発現していることが観測される。GaAs に円偏光を照射したときにはスピン偏極電子が、直線偏光を照射したときにはスピン非偏極電子が励起することから、保磁力が Fe ドット近傍に励起された電子のスピン偏極度と密接に関連していることが示唆される。

- (4) 次に pump 照射光の偏光状態を左回り円偏光-直線偏光-右回り円偏光と系統的に変化させた際の磁気秩序への影響を検討するために、印加磁場の方向を基板面から  $45^\circ$  傾斜させた Hanle 配置にて測定を行った。印加磁場の符号が正の時には、照射光の偏光が右回り円偏光の場合と左回り円偏光の場合とで半導体中に励起されるスピンの基板面内成分と Fe ドットの磁化の面内成分との関係がそれぞれ平行、反平行となる。一方、印加磁場の符号が負の時には、この関係が反平行、平行と逆転する。このことは、印加磁場が正の時の磁気光学 Kerr 信号の pump 照射光偏光状態依存性と印加磁場が負の時の磁気光学 Kerr 信号の pump 照射光偏光状態依存性とを差をとると、その値は pump 照射光が右回り円偏光のときと左回り円偏光のときとで反転すると考えられる。図 4 は膜厚 1nm に相当する Fe ドットに対して測定した印加磁場が正の時と負の時とでの Kerr 信号の差を光の偏光状態に対してプロットした結果である。Retardation が  $45^\circ$  と  $135^\circ$  の時がそれぞれ右回り円偏光、左回り円偏光状態に対応する。明らかに右回り円偏光を照射したときと左回り円偏光を照射したときとで極性の反転が観測されている。このことは、pump 照射光の円偏光度、すなわち励起さ

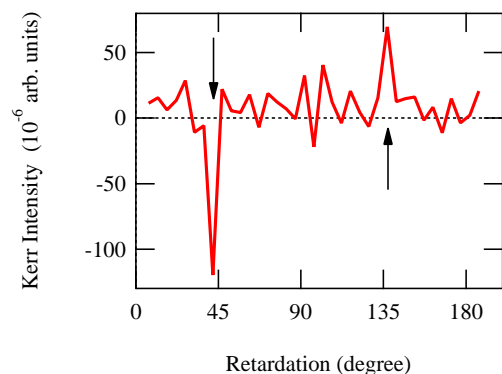


図 4 印加磁場が正の時と負の時との Kerr 信号強度の差の pump 照射光偏光状態依存性

れる電子のスピン偏極方向に依存して Fe ドットの磁気特性に変化が現れたことを意味している。

#### 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 5 件)

- ① T. Taniyama, I. Suzuki, E. Wada, Y. Shirahata, T. Naito, M. Itoh, and M. Yamaguchi, Optically oriented electron spin transmission across ferromagnet/semiconductor interfaces, Proceedings of SPIE, 査読有、8100 巻、2011 年、8100A-1-8
- ② T. Taniyama, E. Wada, M. Itoh, and M. Yamaguchi, Electrical and optical spin injection in ferromagnet/semiconductor heterostructures, NPG Asia Materials, 査読有、3 巻、2011 年、65-73
- ③ Y. Shirahata, E. Wada, M. Itoh, and T. Taniyama, Inversion of spin dependent photocurrent at  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ /modulation doped GaAs heterointerfaces, Journal of Applied Physics, 査読有、109 巻、2011 年、07E105-1-3
- ④ E. Wada, Y. Shirahata, T. Naito, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, Spin polarized electron transmission into GaAs quantum well across  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ : Optical spin orientation analysis, Applied Physics Letters, 査読有、97 巻、2010 年、172509-1-3
- ⑤ E. Wada, Y. Shirahata, T. Naito, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, Inversion of spin photocurrent due to resonant transmission, Physical Review Letters, 査読有、105 巻、2010 年、156601-1-4

[学会発表] (計 2 6 件)

- ① R. Shiina, I. Suzuki, E. Wada, Y. Shirahata, M. Itoh, and T. Taniyama, Correlation between magnetic anisotropy, lattice mismatch, and chemical order in  $\text{L1}_0$ -FePd thin films、

International Conference of the Asian Union of Magnetism Societies (ICAUMS 2012)、2012.10.4、Nara, Japan

- ② Y. Shirahata, T. Isozaki, I. Suzuki, E. Wada, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, Transmission of spin polarized photoelectrons across ferromagnet/semiconductor interfaces using oblique Hanle effect, 19th International Conference on Magnetism (ICM2012)、2012.7.10、Busan, Korea
- ③ T. Taniyama, Optically oriented electron spin transmission across ferromagnet/semiconductor interfaces, SPIE Optics + Photonics 2011, 2011.8.21、San Diego, USA (招待講演)
- ④ E. Wada, K. Watanabe, Y. Shirahata, M. Itoh, M. Yamaguchi, and T. Taniyama, Efficient spin injection from  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  into GaAs triggered by Verwey transition, 55th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials (MMM2010)、2010.11.15、Atlanta, USA
- ⑤ 谷山 智康、異種材料複合化によるナノ磁性スピントロニクス、日本磁気学会第 34 回ナノマグネティックス専門研究会、2010.5.14、東京 (招待講演)

[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

なし

##### (3) 連携研究者

なし