

平成21年6月16日現在

研究種目：若手研究(A)  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18686050  
 研究課題名（和文）磁性体／半導体接合におけるスピン注入・検出過程の  
 ダイナミックイメージング  
 研究課題名（英文）Spin injection and detection at ferromagnet/semiconductor interfaces  
 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：

本研究では、電子のスピンを利用した新しいエレクトロニクス（スピネレクトロニクス）の実現を目指し、磁性体／半導体接合界面における電子スピンの注入および検出過程について、主として光学的手法を用いて調査した。その結果、磁性体としてマグネタイトを用いることで、高効率なスピン注入が可能であることを示し、そのメカニズムに関する知見を得たことができた。さらに、その逆効果としてのスピン検出過程についても同様に検討した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2007年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2008年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	22,400,000	6,720,000	29,120,000

研究分野：ナノ磁性、スピネレクトロニクス  
 科研費の分科・細目：材料工学・金属物性  
 キーワード：スピネレクトロニクス、磁性

## 1. 研究開始当初の背景

磁性体中のスピン偏極した電子を半導体に注入し（スピン注入）、それを操作、検出する技術の開発は、スピネレクトロニクス分野における最重要課題の一つであり、その早期実現が求められている。そのため、我々を含め国内外の多くのグループによりスピン注入・検出の実証研究が試みられてきた。しかし、従来の研究ではその注入効率が高々数%程度であるばかりか、その計測手法が電気信号を介した間接的なものであるため、実験結果の解釈に疑問点も少なくなかった。その原因の一つとして、スピン検出の手法が未

確立であり、スピン注入の定量化ができない点を挙げることができる。

## 2. 研究の目的

本研究では、主として光学的アプローチからスピン検出の手法を確立し、磁性体から半導体に注入された電子スピンの挙動を議論することで、高効率なスピン注入を実現するための基礎的知見を収集することを目的とした。

## 3. 研究の方法

本研究で用いたスピン検出の手法は、主と

して以下の2手法に分類できる。第一は、半導体量子井戸における発光の円偏光度解析に基づく手法である。磁性体/半導体量子井戸接合において磁性体から半導体量子井戸にスピン偏極電子が注入されると、電子と正孔が再結合し発光が生じる。この発光の円偏光度は、光学遷移の選択則に基づいて、注入された電子のスピン偏極度と直接関係する。そのため、発光の円偏光度を解析することで、電子スピンを検出することができる。一方、第二の手法は、上記の光学遷移の選択則の逆過程を利用する手法である。円偏光を半導体に照射すると、その際に励起される電子が最大でスピン偏極率50%を持つ。この電子が界面を通して磁性体に透過する際に、磁性体の磁化方向と励起された電子のスピン偏極方向との相対的な関係によって、電子の透過率が変化する（スピフィルター効果）。そのため、電子の透過率の磁化方向依存性を検出することで、スピン偏極を定性的に求めることが可能である。以上、2手法により得られたスピン検出に関する研究成果について以下に示す。

#### 4. 研究成果

##### (1) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$ 量子井戸接合におけるスピン注入とスピン検出

MBE法を用いて成長した  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  量子井戸構造上に膜厚10nmの  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  をMBE成長し、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$  量子井戸スピンLEDヘテロ構造を作製した。作製した試料を用いて、各温度、磁場において  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  層から量子井戸にスピン偏極電子を注入し、エレクトロルミネッセンス (EL) を計測し、ELの円偏光度を温度、磁場の関数として算出した。

図1に磁場3Tにおける各温度でのELスペクトルを示す。120Kにおいて1.51eVに見られるピークが  $\text{GaAs}$  量子井戸からの発光に対応する。量子井戸からのELスペクトルでは、温度の低下とともに右回り円偏光成分と左回り円偏光成分との差が顕著となる。図2上図に10Kにおける円偏光度の磁場依存性を示す。1.5Tまで磁場の増加とともに急激に円偏光度が増加し、その後円偏光度の増加率は小さくなる。この1.5Tまでの円偏光度の増加は、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  エピタキシャル層の磁化曲線と対応しており、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  から量子井戸にスピン注入がなされた結果として理解される。以上により得られた円偏光度は、ハーフメタル特性を示すスピン源を用いたスピンLED構造における値としては最大であり、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  がスピン源材料として有望であることを示している。また、図2下図に示すように、円偏光度は温度の増加とともに低下し、約120K以上で一定

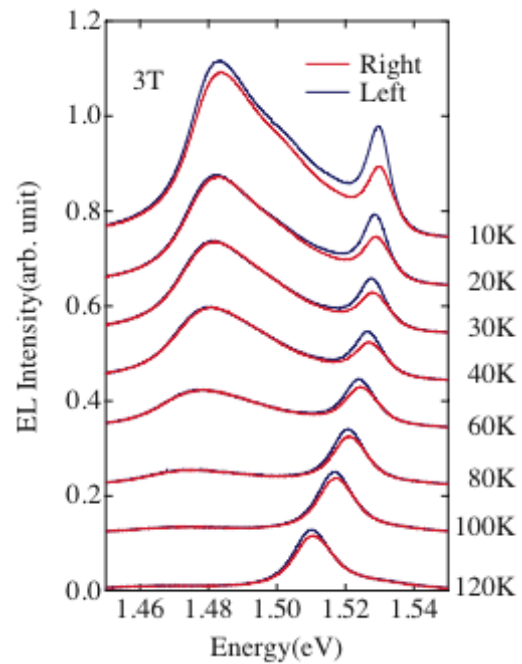


図1  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  から  $\text{GaAs}$  量子井戸へのスピン注入によるELスペクトル

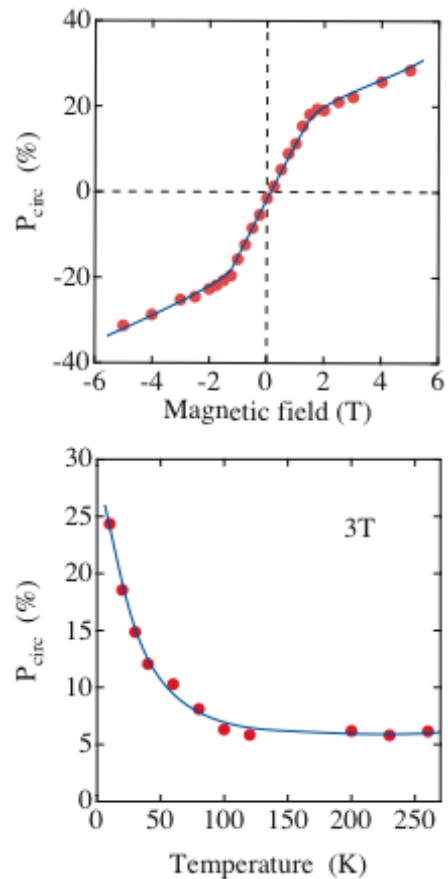


図2 スピン注入によるELスペクトルの磁場および温度依存性

値となる。この温度は  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の Verwey 転移温度と対応している。そのため、低温側での円偏光度の上昇は、金属-絶縁体転移である Verwey 転移に起因しており、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  がスピフィルター役を果した結果として定性的に理解される。

## (2) $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$ 接合における円偏光励起スピン偏極電気伝導測定

膜厚 5nm の  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  を MBE 成長し、 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}(001)$  を作製した。作製した試料に対して円偏光を照射し、接合界面を流れる光電流  $I_{\text{ph}}$  およびヘリシティ依存光電流  $\Delta I_{\text{heli}}$  を測定した。具体的には、光学チョッパーを用いて 293 Hz で変調された直線偏光を光弾性変調器(Photo elastic modulator:PEM)を用いて周波数 50kHz で円偏光に変調し、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  薄膜側から GaAs に照射しスピン偏極電子を励起した。この際、励起された電子の伝導に伴う  $I_{\text{ph}}$  および  $\Delta I_{\text{heli}}$  をロックイン計測した。十分に大きな逆バイアス側での  $\Delta I_{\text{heli}}$  は、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  を通した円偏光照射時に生じる磁気円二色性 (MCD) に起因すると考えられるため、スピフィルター効果を定量化するに際しては、-1.5V における  $\Delta I_{\text{heli}}$  が MCD に起因すると考え、純粋な  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  によるスピフィルター効果  $\Delta I_{\text{SF}}$  を

$$\Delta I_{\text{SF}} = \Delta I_{\text{heli}} - \alpha I_{\text{ph}}$$

と定義した。ここで、 $\alpha$  は -1.5V において  $\Delta I_{\text{heli}}$  がゼロになるように取られた定数である。この  $\Delta I_{\text{SF}}$  のバイアス電圧依存性を図 3 に示す。ゼロバイアス付近にいずれの磁場方向に対しても特徴的なピークが観測される。これは、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  によるスピフィルター効果がゼロバイアス付近で顕著なることを示唆している。一方で、バルク  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  はハーフメタル特性を示すと予想されているにもかかわらず、ハーフメタル特性から期待されるような大きなスピフィルター効果を得ることはできていない。この原因として、接合界面における格子歪みにより  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の電子状態が変化し、ハーフメタル特性が消失した可能性を挙げることができる。実際、膜厚 100nm の  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}(001)$  では Verwey 転移が散漫になり、転移温度も変化することが確認されている。これは  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  と  $\text{GaAs}(001)$  の格子の不整合によるものと考えられ、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  薄膜の電子状態がバルクのハーフメタル的特性とは著しく異なることを意味している。

## (3) まとめ

以上の結果より、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$  の Verwey 転移以下において顕著となる絶縁性フェリ磁性が

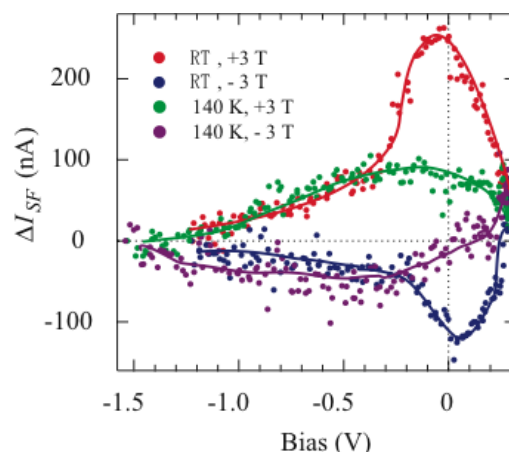


図3 磁場 3T における  $\Delta I_{\text{SF}}$  のバイアス電圧依存性

スピン注入および検出において極めて有効であると結論付けられる。また、ハーフメタル特性を利用する際には、格子歪みを十分配慮する必要があることも指摘された。

## 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 2 件)

- ① T. Taniyama, T. Mori, K. Watanabe, E. Wada, M. Itoh, H. Yanagihara, "Optically spin oriented electron transmission across fully epitaxial  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}(001)$  interfaces", J Appl. Phys. **103**(7) (2008) 07D705-1-3. 査読有
- ② E. Wada, M. Itoh, and T. Taniyama, "Crossover of electron transmission mechanism and spin filtering effect at  $\text{Fe}/\text{GaAs}(001)$  interfaces", J Appl. Phys. **103**(7) (2008) 07A702-1-3. 査読有

[学会発表] (計 15 件)

- ① E. Wada, K. Watanabe, Y. Shirahata, M. Itoh, T. Taniyama, M. Yamaguchi, "Temperature dependence of spin injection efficiency in  $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GaAs}$  quantum well heterostructures", 3rd International Conference on Science and Technology for Advanced Ceramics, 2009年6月16日, Yokohama
- ② E. Wada, M. Itoh, T. Taniyama, M. Yamaguchi, "Spin polarization of electrons injected from Fe into GaAs quantum well characterized using oblique Hanle effect", 2009 MRS Spring Meeting, 2009年4月15日, San Francisco

- ③ 和田詠史, 伊藤満, 谷山智康, 山口雅史, 「Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>からGaAs量子井戸へのスピン注入と円偏光発光」, 第56回応用物理学関連連合講演会, 2009年4月1日, つくば
- ④ 和田詠史, 渡邊和典, 伊藤満, 谷山智康, 山口雅史, “Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>を介したスピン注入と円偏光発光”, 日本物理学会第64回年次大会, 2009年3月28日, 東京
- ⑤ 和田詠史, 伊藤満, 谷山智康, 山口雅史, “Fe強磁性電極からGaAs/AlGaAs量子井戸構造へのスピン注入”, 日本物理学会2008年秋季大会, 2008年9月21日, 盛岡
- ⑥ T. Taniyama, T. Mori, K. Watanabe, E. Wada, M. Itoh, and H. Yanagihara, “Magneto- transport properties of epitaxial Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> layer on GaAs(001)”, 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2007年11月12日, Tokyo
- ⑦ E. Wada, M. Itoh, T. Taniyama, “Spin filtering effect at Fe/GaAs(001) Schottky interfaces”, 9th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures, 2007年11月12日, Tokyo
- ⑧ T. Taniyama, T. Mori, K. Watanabe, E. Wada, M. Itoh, and H. Yanagihara, “Optically spin oriented electron transmission across fully epitaxial Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GaAs(001) interfaces”, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2007年11月8日, Tampa
- ⑨ E. Wada, M. Itoh, T. Taniyama, “Crossover of electron transmission mechanism and spin filtering effect at Fe/GaAs(001) Interfaces”, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2007年11月7日, Tampa
- ⑩ 和田詠史, 伊藤満, 谷山智康, “Fe/MgO/GaAs(001)接合における電子伝導とスピントラップ効果”, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 札幌
- ⑪ 谷山智康, 渡邊和典, 森拓志, 和田詠史, 柳原英人, 伊藤満, “GaAs(001)基板へのFe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>のエピタキシャル成長と磁気・伝導特性”, 日本物理学会第62回年次大会, 2007年9月21日, 札幌
- ⑫ 和田詠史, 伊藤満, 谷山智康, “スパッタリング法によるFe/MgO/GaAs(001)スピントネル接合の作製”, 日本物理学会2007年春季大会, 2007年3月18日, 鹿児島
- ⑬ 森拓志, 伊藤満, 谷山智康, “Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/GaAsハイブリッド構造の磁気特性と界面を介した電気伝導”, 日本物理学会2007年春季大会, 2007年3月18日, 鹿児島
- ⑭ 森拓志, 伊藤満, 谷山智康, “強磁性体/半導体接合界面におけるスピン偏極電子伝導”, 日本物理学会2006年春季大会, 2006年9月23日, 鹿児島
- ⑮ T. Taniyama, E. Wada, and Y. Yamazaki, “Spin filtering effect at ferromagnetic wires/GaAs interfaces under optical spin orientation”, 4th International Conference on Physics and Application of Spin-Related Phenomena in Semiconductors, 2006年8月17日, Sendai

[その他]

ホームページ

<http://t2r2.star.titech.ac.jp/>

## 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