

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246002

研究課題名(和文)半導体・磁性体ハイブリッド構造におけるスピン制御とスピンドYNAMIKSの光検出

研究課題名(英文)Control and detection of spin dynamics in semiconductor/ferromagnet hybrid structures

研究代表者

大野 裕三 (Ohno, Yuzo)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：00282012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,300,000円、(間接経費) 9,990,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、垂直磁化を有するCoFeBを強磁性層とするCoFeB/MgO/GaAs磁気トンネル接合を有する3端子阻止を作製し、磁気輸送特性測定、および顕微カー回転測定を行い、半導体GaAsにおけるスピン蓄積とスピン検出を実施した。磁気輸送測定では、スピン注入・蓄積を示唆するHanle効果を確認した。一方で、顕微カー回転測定においては±2Tの強い面内磁界を印加してもカー回転信号が残った。以上の結果から、明瞭なスピン注入・蓄積の光検出はできなかった。本研究を通じて、MgOとGaAs界面が面直スピン注入において重要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：We fabricated three-terminal devices which have a CoFeB/MgO/GaAs magnetic tunnel junction with perpendicular magnetization, and performed magnetotransport and Kerr microscopy measurements to clarify the generation and detection of spin accumulation in GaAs semiconductors. In magnetotransport measurements, we observed typical Hanle effect. However, in Kerr microscopy measurements, the Kerr rotation signal remains even in high in-plane magnetic fields:  $B_x = \pm 2.0$  T. The results suggest that the interface between MgO and GaAs plays crucial role for perpendicular spin injection.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：スピントロニクス GaAs スピン注入 Hanle効果 顕微Kerr測定

### 1. 研究開始当初の背景

原子レベルの結晶成長制御やナノスケールの微細加工技術、さらには金属・半導体など構造・物性の異なる物質の境界を越えた材料科学の進展により、将来の低消費電力 IT 技術を支える機能デバイス材料・物性として、電子のもつ電気的な性質(電荷)と磁気的な性質(スピン)の両方の自由度を活用するスピントロニクス、特に非磁性の半導体をベースとする半導体スピントロニクス研究分野が大きく注目されている。これまでに本申請者らは、非磁性半導体へのスピン偏極電流注入[1]や、量子井戸構造における電子スピンドYNAMIKSの制御[2]など、先駆的な研究成果をあげ、本分野の発展に貢献してきた。一方で、超感度・高空間分解の光を用いたスピン検出など実験技術[3]や、スピン軌道相互作用を活用するスピン制御・スピン操作技術や金属磁性体・(絶縁体)・半導体融合構造の作製技術の研究が近年著しく進展し、半導体量子ナノ構造におけるスピンドYNAMIKSに関する研究は大きく展開しつつある。こうした現象の研究には、物質創成、計測いづれにも世界最高水準の技術が要求されており、国内外を見てもごく限られた実験研究がなされている状況である。これら新奇な物理現象について系統的な実験を積み重ねていくことにより、多くの知見を蓄積し、それを材料(組成)や素子構造の設計に還元することができれば、物理機構が明らかになるだけでなく、金属磁性体・半導体ハイブリッド構造における新しい高効率スピン注入・検出のほか、スピンスイッチング素子など半導体量子スピントロニクスの基礎材料として応用が期待できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、GaAs/AlGaAs 系半導体ヘテロ構造を中心に、(1)電氣的・光学的にスピン伝導・スピン分極状態を制御可能な半導体デバイスの設計・作製、(2)半導体への高効率スピン注入とスピンドYNAMIKSの制御、(3)量子ナノデバイスにおけるスピン分極の実証とスピン依存伝導のイメージング実現、を目標とし、GaAs/AlGaAs 系半導体ヘテロ構造をベースとする強磁性体・半導体ハイブリッド構造の作製技術の確立と、そこにおけるスピン注入およびスピンドYNAMIKS、およびスピン・軌道相互作用によるスピン制御を実験的に解明するとともに、新しい機能の実現とその応用への展開を目的とする。

### 3. 研究の方法

電氣的スピン注入はスピンドバイスの創生やデバイスの特性向上に対し、重要な技術基盤の

一つである。特に光学デバイスへの活用が期待されており spin-vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs)の特性向上が報告されている。このようなデバイスには量子井戸方向のスピン偏極電子を半導体中に生成する面直スピンの生成が望まれる。しかし、これまでの面直スピン注入の報告では面内スピン注入の効率は得られておらず、高効率なスピン注入を可能とする材料・構造が求められる。近年、面直スピン注入を利用した磁気トンネル接合の研究において面直磁化を有する CoFeB/MgO/CoFeB 構造を用いた高い磁気抵抗変化を観測しており、半導体に対してもこの構造は高効率な面直スピン注入を期待することができる。そこで、本研究では CoFeB/MgO/GaAs における面直スピン注入を行った。

### 4. 研究の成果

GaAs(001) 基板上に MBE 法を用いて、GaAs(200 nm)/[AlAs(3 nm)/GaAs(3 nm)] $\times$ 10 周期 /GaAs(200 nm)/n<sup>+</sup>-GaAs(2  $\mu$ m :  $2 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>)/n<sup>-</sup>-GaAs(15 nm :  $1 \times 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>)を成長した。250  $\mu$ m $\times$ 100  $\mu$ m のメサの両端に AuGe オーミック電極(電極サイズ : 20  $\mu$ m $\times$ 90 $\mu$ m)を作製した。また、チャンネル中央にはマグネトロンスパッタ法により、(試料 1) MgO(1.5 nm)/CoFeB(1.3 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm)、(試料 2)MgO(1.2 nm)/CoFeB(1.6 nm)/Ta(5 nm)/Ru(5 nm)を製膜した(電極サイズ : 10  $\mu$ m $\times$ 90 $\mu$ m)。電極間の n<sup>+</sup>-GaAs をウェットエッチングにより除去し、熱処理を行い(300 $^{\circ}$ C $\cdot$ 1 時間・膜面直方向の磁場 : 0.4 T)3 端子素子を作製した。この試料 1 と試料 2 の中央電極と同じ膜構造を有するプロセスを行っていない試料の磁化特性を試料振動型磁力計により測定した(図 1)。両試料の膜構造において面直磁化を発現していることを確認した。

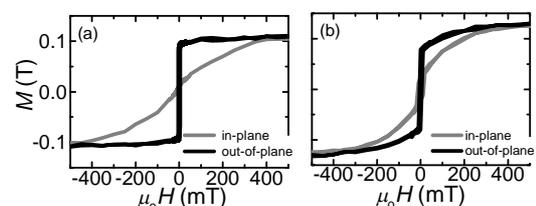


図 1 各膜構造における磁化特性。  
(a) 試料 1 (b) 試料 2

図 2(a)のように試料を配置し、 $T = 10$  K、 $I_{\text{bias}} = \pm 10$   $\mu$ A における両試料の検出電圧の外部磁場依存性を測定した(図 2(b), (c))。図は絶縁膜に起因するバックグラウンド電圧<sup>5)</sup>を差し引いたものである。両試料において検出電圧に外部磁場依存を確認した。しかし、試料 1 の  $I_{\text{bias}} = -10$   $\mu$ A を印加した測定においてはノイズが大きく明瞭な外部磁場依存性を確認できなかった。確認

された電圧変化  $\Delta V(0)$  に対し、  

$$\Delta V(B_x) = \Delta V(0) / (1 + (g\mu_B B_x \tau_s / \hbar)^2) \dots (1)$$
 の Lorentz 関数を用いてフィッティングを行った。 $(g: g$  因子,  $\mu_B$ : ボーア磁子,  $\tau_s$ : スピン緩和時間,  $\hbar$ : プランク定数) 試料 1 において  $I_{\text{bias}} = +10 \mu\text{A}$  のとき  $\Delta V_{3T}(0) = 73 \mu\text{V}$ ,  $\tau_s = 0.8 \text{ ns}$  を得た。また、試料 2 において  $I_{\text{bias}} = +10 \mu\text{A}$  のとき  $\Delta V_{3T}(0) = 29 \mu\text{V}$ ,  $\tau_s = 0.75 \text{ ns}$ ,  $I_{\text{bias}} = -10 \mu\text{A}$  のとき  $\Delta V_{3T}(0) = 20 \mu\text{V}$ ,  $\tau_s = 0.5 \text{ ns}$  を得た。  
 ここで得られたスピン蓄積電圧は GaAs の抵抗率等から求められる理論的な値:  $113 \mu\text{A}$  と近い値が得られた。しかし、スピン緩和時間においては共鳴スピン増幅から求めた基板のスピン緩和時間:  $31 \text{ ns}$  と大きく異なった。

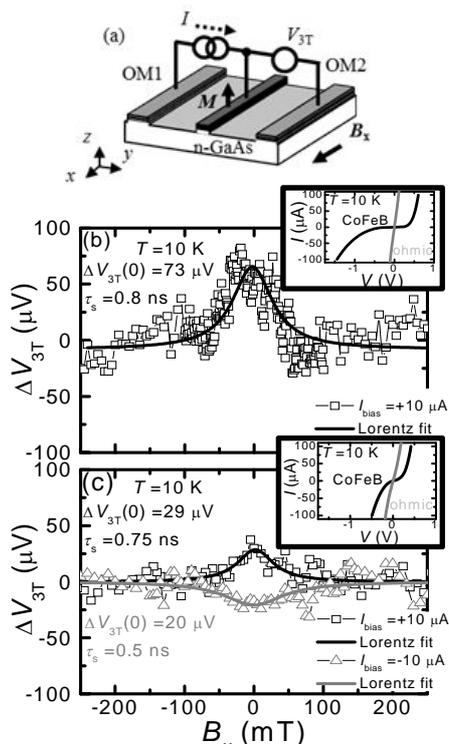


図 2 (a) 3 端子素子の模式図及び電気測定配置。  
 (b) 試料 1 における検出電圧の外部磁場依存性。  
 (c) 試料 2 における検出電圧の外部磁場依存性。  
 (b) 挿入図はそれぞれの試料の  $I$ - $V$  特性 ( $T=10 \text{ K}$ )。

$T=10 \text{ K}$ , 試料 1 に  $V_{\text{bias}} = \pm 0.5 \text{ V}$  を印加したときの Kerr 回転信号の空間依存性を図 3(a) に示す。図中の影は CoFeB 電極の位置を示しており、Kerr 回転信号が CoFeB 電極から離れるにつれ減衰する様子を観測した。また、この Kerr 回転信号の拡散側に対し、 $\theta_K = A_0 \exp(-\lambda_s / y) \dots (2)$  を用いてフィッティングを行った。 $(A_0$ : 比例定数,  $\lambda_s$ : スピン拡散長) この結果、 $V_{\text{bias}} = +0.5 \text{ V}$  のとき  $\lambda_s = 2.5 \mu\text{m}$ ,  $V_{\text{bias}} = -0.5 \text{ V}$  のとき  $\lambda_s = 2.6$

$\mu\text{m}$  が得られた。 $\tau_s = \lambda_s^2 D \dots (3)$  の関係式から求められるスピン緩和時間は  $\lambda_s = 2.55 \mu\text{m}$  を用い

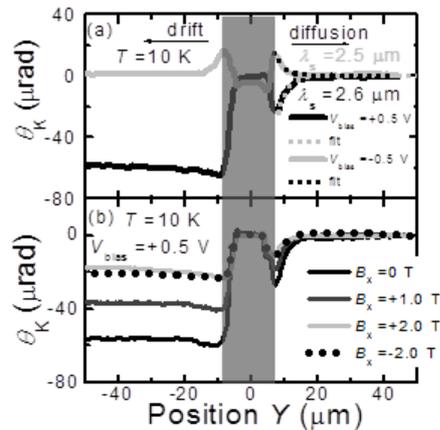


図 3 試料 1 に対して行った Kerr 回転測定結果  
 (a)  $B_x = 0 \text{ T}$  (b) 各  $B_x$  における外部磁場依存性。

て  $\tau_s = 24 \text{ ns}$  と求まり、基板のスピン緩和時間に近い値が得られている。 $(D$ : 拡散定数,  $van$  der Pauw 法より求めており  $T=10 \text{ K}$  で  $2.68 \text{ cm}^2/\text{s}$ ) 更に膜面内方向に  $B_x = +1.0 \text{ T}, \pm 2.0 \text{ T}$  を印加しながら Kerr 回転測定を行った結果を図 3(b) に示す。外部磁場を印加することで Kerr 回転信号の減衰を確認した。しかし、 $B_x = \pm 2.0 \text{ T}$  を印加しても Kerr 回転信号は消失しなかった。図 1(a) の磁化特性からこの信号は面直スピン注入に起因した信号ではない可能性が高いと考えられる。また、試料 2 においては試料 1 のような Kerr 回転信号を検出することができなかった。この原因としては、(1) 電極の磁化特性が図 1(b) から変化した、(2) スピン偏極電子が電極端まで輸送される間に緩和した、ことが考えられるが詳細は明らかにできていない。

## 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 13 件)

M. Ono, J. Ishihara, G. Sato, S. Matsuzaka, Y. Ohno, and H. Ohno, "Strain and origin of inhomogeneous broadening probed by optically detected nuclear magnetic resonance in a (110) GaAs quantum well", *Physical Review B*, Vol. 89, 115308 (4 pages), March 2014. DOI: 10.1103/PhysRevB.89.115308 (査読あり)

Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct mapping of photoexcited local spins in a modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 53, 04EM04 (3

pages), March 2014.  
doi:10.7567/JJAP.53.04EM04 ( 査読あり )

Jun Ishihara, Yuzo Ohno, and Hideo Ohno, "Direct imaging of gate-controlled persistent spin helix state in a modulation-doped GaAs/AlGaAs quantum well", Applied Physics Express, Vol. 7, 013001 (4 pages), January 2014.  
doi:10.7567/JJAP.53.04EM04 ( 査読あり )

J. Ishihara, M. Ono, Y. Ohno, and H. Ohno, "A strong anisotropy of spin dephasing time of quasi-one dimensional electron gas in modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", Applied Physics Letters, Vol. 102, 212402 (4 pages), May 2013. doi: 10.1063/1.4807171 ( 査読あり )

L. R. Fleet, K. Yoshida, H. Kobayashi, Y. Kaneko, S. Matsuzaka, Y. Ohno, H. Ohno, S. Honda, J. Inoue, and A. Hirohata, "Correlating the interface structure to spin injection in abrupt Fe/GaAs(001) flms", Physical Review B, Vol. 87, 022401 (5 pages), January 2013. 10.1103/PhysRevB.87.024401 ( 査読あり )

[学会発表](計 14 件)

J. Ishihara, Y. Ohno, and H. Ohno, "Mapping of photoexcited local spins in a modulation-doped GaAs/AlGaAs wires", 2013 International Conference on the Solid State Devices and Materials (SSDM2013), M-4-2, Hilton Fukuoka Sea Hawk, Fukuoka, Japan, September 24-27, 2013.

Y. Ohno, "Coherent Manipulation of Nuclear Spins in Semiconductors with an Electric Field", (Invited) 2013 Quantum Science Symposium September 4-5, 2013, Waltham, MA.

Y. Ohno, H. Kobayashi, S. Matsuzaka, Y. Kaneko, J. Ishihara, S. Ikeda, and H. Ohno, "Electrical and Optical Detection of Spin Injection in CoFe/MgO/n-GaAs junctions", 31st International Conference on the Physics of Semiconductors, July 29-August 3 ETH Zurich, 2013.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.bk.tsukuba.ac.jp/~oono/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大野 裕三 (OHNO, Yuzo)

筑波大学・数理物質系・教授

研究者番号：00282012

(2) 研究分担者

山ノ内 路彦 (YAMANOUCHI, Michihiko)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40590899