

機関番号：13901

研究種目：特定領域研究

研究期間：2007～2010

課題番号：19048022

研究課題名（和文） ナノヘテロ構造におけるスピン注入とスピン蓄積の理論

研究課題名（英文） Theory of spin injection and accumulation in nano-hetero structures

研究代表者：

井上 順一郎 (INOUE JUNICHIRO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60115532

研究成果の概要（和文）：電子は電荷とスピンと呼ばれる角運動量を持っている。前者は半導体エレクトロニクスの基礎であり、後者は磁性の起源であり、磁石としての応用分野がある。通常の金属や半導体中ではスピン角運動量は平均としてゼロであるが、強磁性物質中ではスピン角運動量はゼロではなく、その中を流れる電流はスピンの流れ（スピン流）も持っている。本研究では、スピン流のみならず新しい現象—スピンホール効果—が金属において非常に大きくなることを理論的に予言した。さらに、半導体・グラフェンと強磁性金属との接合において、電流注入により半導体（グラフェン）中にスピン流が存在すること、その結果、電流による磁場の効果が非常に大きくなることを見いだした。このことは、半導体・グラフェン/強磁性金属接合を新しいデバイスとして応用できる可能性を示すものである。

研究成果の概要（英文）：Electrons have two degrees of freedom, charge and spin. The former is the basis of semiconductor electronics, and the latter is the origin of magnetism and applied to magnets. In normal metals and semiconductors, the spin angular momentum is zero in average, but in ferromagnets, it is non-zero. As a consequence, the current in a ferromagnet has a flow of spins (spin current). In the present research, we have shown that the novel phenomenon called spin Hall effect becomes large in metals. We also have shown that the spin current can be created by current in ferromagnet /semiconductor (graphene) junctions, and that the effect of magnetic field on the current is large in these junctions. The result indicates an applicability of these junctions to novel devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,600,000	0	3,600,000
2008年度	4,500,000	0	4,500,000
2009年度	4,500,000	0	4,500,000
2010年度	2,100,000	0	2,100,000
総計	14,700,000	0	14,700,000

研究分野：物性理論, スピントロニクス

科研費の分科・細目：物理学・物性II

キーワード：強磁性半導体接合, スピン注入, スピン分極率, スピンホール効果, 強磁性体グラフェン接合, ハーフメタル, 層間交換結合

1. 研究開始当初の背景

1980年代, 金属多層膜における巨大磁気抵抗効果(GMR)と層間交換結合の発見によ

り, 磁性と伝導の関わる現象(スピントロニクス)が注目を浴びることになった。1990年代に強磁性トンネル接合におけるトンネ

ル型磁気抵抗効果が発見され、スピントロニクスに対する基礎的・応用的研究がさらに活発となった。

GMR や TMR は磁場による電流制御である。これに対し、電流による磁性制御（磁化方向の制御）の可能性が理論的に指摘され、その実験的検証が 2000 年代初めに行なわれた。電流による磁性方向変化は電子の持つスピン角運動量が磁性体に移行するために生じる。このことをスピントルクが磁性体に働くと表現する。スピントルクもたらす現象の更なる研究が大きな課題の一つであった。

この現象はスピンの流れ（スピン流）がもたらすものと理解される。スピントルクの研究が活発になったころ、純粋のスピン流によるホール効果（スピンホール効果）が理論的に提案された。これらの研究は半導体に対するものであり、金属におけるスピンホール効果がどのようになるかについても実験的・理論的興味もたれていた。

他方、GMR や TMR はすでにセンサに活用されていた。スピントロニクス分野における新たな応用分野として、半導体へスピンを導入し、半導体と磁性体の機能を併せ持つデバイスの開発に興味を持たれていた。このようにデバイスを開発するためには、半導体中へ効率よくスピンを注入することが必須である。この研究は世界的に始められていたが、結果は不満足なものであった。期待するデバイス開発には、理論指針を必要とする状況であった。

2004 年に、グラファイト単層膜であるグラフェンが簡単な方法で作成されることが報告された。グラフェンは特異な電子状態を有し、相対論効果が現実の物質で検証できるものとして一躍注目されることになった。グラフェンはゼロギャップ半導体とも呼ばれる 2 次元物質であるため、強磁性体と組み合わせると新奇な伝導現象が期待される。

このような背景から、以下の研究計画を提案した。

2. 研究の目的

磁性と伝導に関わるスピントロニクス分野における重要なキーワードは、「磁場による電流制御」と「電流による磁性制御」である。本研究では、スピン偏極電流（スピン流）注入によるスピン制御効果の理論的解明を目的とし、次の研究遂行を計画する。

(1) 強磁性体/GaAs トンネル接合におけるスピン注入の計算を実行し、高効率のスピン注入が実現される条件を明らかにする。

(2) 大きなスピン軌道相互作用を有する金属におけるスピンホール効果の機構を解明する。

(3) 新奇な物質であるグラフェンを用いた

強磁性接合における伝導現象の特徴を明らかにする。

(4) 強磁性絶縁体を用いたトンネル接合におけるスピン注入トルクの計算を行い、TMR との関連を明らかにする。

3. 研究の方法

解析的手法と数値シミュレーションを併用した理論的研究である。対象とする物質・接合系の電子状態としてできるだけ現実的なものを用いる点が特徴である。

2007 年度は、数値シミュレーションに使用するソフト・ハードの整備を行い、2008、2009 年度には PD 研究員を 1 名採用し、数値シミュレーションを実行した。

4. 研究成果

計画された研究課題に対する成果は以下のとおりである。

(1) 強磁性体/GaAs トンネル接合におけるスピン注入

スピン FET の実現に向け、強磁性体/半導体接合、とくに Fe/GaAs 接合におけるスピン注入効率を、ショットキー障壁のある現実的モデルを用いて計算した。その結果 GaAs 側ショットキー障壁内に形成される界面共鳴状態が強磁性 Fe の電子状態と混成することによりスピン分極し、ショットキー障壁を通過する電流のスピン依存性が增强されることが明らかになった。特に Fe 側から GaAs 側に電子が移動する際のスピン分極率が負となるバイアス領域があることを明らかにした。これらの結果は、強磁性体/半導体接合作製に対して大きな指針を与えるものである。

(2) 金属におけるスピンホール効果

① 遷移金属のスピンホール効果を、現実的電子構造と原子内スピン軌道相互作用 (LS 結合) を取り入れて計算を行った。半導体と比較して桁違いに大きなスピンホール伝導度が得られた。これらの結果は、実験結果を良く説明するものとなっている。さらに、遷移金属におけるスピンホール効果や異常ホール効果には、軌道のダイナミクスに由来する軌道ホール効果が本質的役割を果たすことを明らかにした。

② 2 次元系であるグラフェンに対しても同様な解析をおこなった。フェルミ準位でのスピンホール伝導度は小さいものの、グラフェン層の非平坦性を取り入れると、Rashba 的スピン軌道相互作用が生じ、スピンホール伝導度が增强されることを明らかにした。

③ 強磁性微粒子を含む磁性薄膜において、異常ホール抵抗と電気抵抗との間に異常な関係があることが報告されている。非磁性金

属のスピホール伝導度と電気抵抗の関係に対し最近見いだされたクロスオーバーの結果を用いることにより、この異常性を説明することができた。

(3) 強磁性/グラフェン接合における磁気抵抗効果

グラフェンと強磁性体との接合系は、新規磁性/半導体デバイスとして期待される。磁性体の電子状態として単純な模型と現実的模型を採用し、それぞれ量子伝導のシミュレーションを行なった。詳細な解析により、大きな磁気抵抗効果の発現機構として接合界面における電子状態の変化が重要であることが明らかになった。また、電子散乱や界面におけるトンネル伝導は磁気抵抗比を減少させることも明らかになった。

これらの結果は、グラフェンを用いた接合系の作製に対し重要な情報を与える者である。

(4) 強磁性絶縁体におけるスピン注入トルク

強磁性絶縁体接合におけるスピン注入トルクの解析的表式を導出することに成功した。この表式を、TMRや層間交換結合の理論式と比較することにより、それぞれの現象間の関連を調べることができる。

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 29 件)

- ① Bias dependence of spin-polarized tunnel current through Fe/GaAs and Fe/GaAs/Fe junctions, S. Honda, H. Itoh, and J. Inoue, J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 135002~135012 (2010). (査読有)
- ② Magnetoresistance in FM/graphene/FM lateral junctions, S. Honda, A. Yamamura, T. Hiraiwa, R. Sato, J. Inoue and H. Itoh, Phys. Rev. B **82**, 033402 (2010). (査読有)
- ③ Ab-initio study of magnetic structure and exchange coupling in $\text{Co}_2\text{MnSi}/\text{Cr}/\text{Co}_2\text{MnSi}$ trilayers, W. Kakeno, S. Honda, H. Itoh and J. Inoue, Phys. Rev. B **82**, 014413 (2010). (査読有)
- ④ Spin Hall effect in a curved graphene with spin-orbit interaction, T. Kato, S. Onari, and J. Inoue, Physica E, **42**, 729-731 (2010). (査読有)
- ⑤ Numerical simulation of GMR in magnetic multilayers and granular films, Y. Yamagishi, S. Honda, J. Inoue and H. Itoh, Phys. Rev. B **81**, 054445-1~ -5 (2010). (査読有)
- ⑥ 遷移金属における異常ホール効果およびスピホール効果, 紺谷浩, 平島大, 井上順一郎, 日本物理学会誌 **65** No4, 239

- 246 (2010). (査読有)

- ⑦ Giant Orbital Hall effect in transition metals: origin of large spin and anomalous Hall effects, H. Kontani, T. Tanaka, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue, Phys. Rev. Lett. **102**, 016601 (2009). (査読有)
- ⑧ Anomalous and spin Hall effects in magnetic granular films, J. Inoue, T. Tanaka, and H. Kontani, Phys. Rev. B **80**, 020405(R) (2009). (査読有)
- ⑨ Giant Intrinsic Spin and Orbital Hall Effects in Sr_2MO_4 (M=Ru, Rh, Mo), H. Kontani, T. Tanaka, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue, Phys. Rev. Lett., **100**, 096601 (2008). (査読有)
- ⑩ Study of intrinsic spin Hall effect and orbital Hall effect in 4d- and 5d- transition metals, T. Tanaka, H. Kontani, M. Naito, T. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada, and J. Inoue, Phys. Rev. B **77**, 165117 (2008). (査読有)
- ⑪ Intrinsic anisotropic magnetoresistance in spin-polarized two-dimensional electron gas with Rashba spin-orbit interaction, T. Kato, Y. Ishikawa, H. Itoh and J. Inoue, Phys. Rev. B **77**, 233404 (2008). (査読有)
- ⑫ Intrinsic spin Hall effect in graphene, Numerical calculation in a multi-orbital model, S. Onari, Y. Ishikawa, H. Kontani, and J. Inoue, Phys. Rev. B **78**, 121403(R) (2008). (査読有)
- ⑬ Spin polarization control through resonant states in an Fe/GaAs Schottky barrier, S. Honda, H. Itoh, J. Inoue, H. Kurebayashi, T. Trypiniotis, C. H. W. Barnes, A. Hirohata, and J. A. C. Bland, Phys. Rev. B **78**, 245316 (2008). (査読有)
- ⑭ Study of intrinsic spin and orbital Hall effects in Pt based on a (6s,6p,5d) tight-binding model, H. Kontani, M. Naito, D. S. Hirashima, K. Yamada and J. Inoue, J. Phys. Soc. Jpn., **76**, 103702-1, 4 (2007). (査読有)
- ⑮ Anomalous Hall effect in spin-polarized two-dimensional electron gas with Rashba spin-orbit interaction, T. Kato, Y. Ishikawa, H. Itoh and J. Inoue, New J. Phys. **9**, 350-(2007). (査読有)

[学会発表] (計 58 件)

- ① Semiconductor and graphene spintronics, J. Inoue, Progress in Spintronics and Graphene Research, June 7 - 11, (2010) KITP China, Beijing, China.
- ② Theoretical studies on spin injection, J. Inoue, S. Honda, and H. Itoh, 11th Joint MMM-Intermag Conference, Jan. 18-22, (2010) Washington, DC, USA.

- ③ グラフェン/強磁性金属における磁気抵抗 (理論) 井上順一郎, 日本応用物理学会 富山大学, 9/9 (2009).
- ④ Quantum transport in graphene and graphene junctions, J. Inoue, PASPS13, Sendai 1/27 (2009).
- ⑤ Spin and orbital Hall effects in multi-band models, J. Inoue, 421 WE-Heraeus-Seminar on “Spin Hall Effect”, 20-23/Oct. (2008) Bad Honnef, Germany.
- ⑥ Spin and orbital Hall effects in transition metals, J. Inoue, International Workshop on Spin Phenomena in Reduced Dimension, 24-26/Sept. (2008), Regensburg, Germany.
- ⑦ Spin injection and filtering effects in Fe/Semiconductor junctions, J. Inoue, S. Honda, H. Itoh, 日本磁気学会, 東北学院大学 9/12 (2008).
- ⑧ Spin and charge transport in 2DEG with spin-orbit interaction, J. Inoue, Spin and charge flow in nanostructures, June 27-30, (2007), Oslo, Norway.
- ⑨ Novel electron-transport in spintronics, J. Inoue, International Symposium on “Frontiers in Computational Science of Nanoscale Transport”, 7-8, June (2007), Tokyo University of Science, Tokyo.

[図書] (計 4 件)

- ① スピントロニクス基礎編, 井上順一郎, 伊藤博介, 現代講座・磁気工学 3, 共立出版(2010).
- ② Spin-orbit interaction and spin injection in semiconductors, J. Inoue, “Epitaxial Ferromagnetic Films and Spintronic Applications”, chapter 13, p311-333, Eds. A. Hirohata and Y. Otani, Research Signpost, Kerala, India, (2009).
- ③ GMR, TMR and BMR, J. Inoue, “Nanomagnetism and Spintronics”, chapter 2, p15-92, Elsevier, North- Holland, (2009).
- ④ 2次元半導体のスピン軌道相互作用と量子伝導, 井上順一郎, 大成誠一郎, 「スピンエレクトロニクスの基礎と材料・応用技術の最前線」 pp. 105-115, 高梨弘毅監修, シーエムシー出版 (2009).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上 順一郎 (INOUE JUNICHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60115532

(2) 研究分担者

紺谷 浩 (KONTANI HIROSHI)
名古屋大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90272533

伊藤 博介 (ITOH HIROYOSHI)

関西大学・理工学部・准教授

研究者番号：00293671

大成 誠一郎 (ONARI SEIICHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：80402535

(3) 連携研究者 なし