

平成21年3月31日現在

研究種目： 基盤研究 (A)  
研究期間： 2006~2009  
課題番号： 18206001  
研究課題名 (和文) 磁性半導体・半導体ハイブリッド構造におけるスピン三端子デバイス  
研究課題名 (英文) Spin based three terminal device using magnetic semiconductor/  
Non-magnetic semiconductor hybrid structures  
研究代表者  
新田 淳作 (NITTA JUNSAKU)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号： 00393778

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎・応用物性・結晶工学

キーワード： 半導体

## 1. 研究計画の概要

次世代半導体スピントロニクスデバイスの実現を目指して①スピン偏極キャリアの生成、②スピン制御、③スピン検出、以上の要素技術を統合しスピン機能化三端子デバイスの動作原理の検証とスピントランジスタ化技術の構築を目的として研究を行う。また、スピン軌道相互作用を用いた電氣的スピン制御に着目し、半導体ヘテロ界面のスピン緩和、スピン伝導機構を解明しスピン物性物理における学術的貢献を行う。さらに希薄磁性半導体電極を用いたスピン注入と検出を実現し縦型スピン三端子構造におけるスピン機能デバイス化を図る。

## 2. 研究の進捗状況

## (1). スピン軌道相互作用によるスピン依存伝導特性の解明

スピン軌道相互作用は電氣的にスピンを制御する手段となるが、その一方でスピン緩和をもたらす。そこで、スピン軌道相互作用の強い系で、いかにスピン緩和を抑制するかが重要な課題となる。InGaAs をチャンネルとする二次元電子ガスを細線化することによりスピン緩和が抑制されることを見出した。さらにゲート電圧によりスピン軌道相互作用の強さを制御することにより、起源の異なるスピン軌道相互作用との競合により二次元電子ガスの場合と比べて 65 倍スピン緩和長が増加することを実験的に確認した。

起源の異なるスピン軌道相互作用の強さを定量的に評価することがスピン緩和の抑制に不可欠である。そこで、細線構造のスピン軌道相互作用とゼーマン効果を組み合わせることにより、2つのスピン軌道相互作用

の強度比を伝導実験から求める手法を新たに提案した。

## (2). 微細加工した希薄磁性半導体の磁化反転機構の解明

希薄磁性半導体をスピン注入電極とするための磁気特性を評価するため微細加工した GaMnAs の磁化反転機構の解明を進めた。線幅の異なる GaMnAs 細線構造を作製し、磁気抵抗測定により、磁気異方性定数及び磁化反転過程を評価した。その結果、最線幅を 1 $\mu$ m 程度まで小さくすることにより磁気異方性エネルギーを評価し人工的に磁気異方性を導入できることを示した。また、微細加工により生じた弱い一軸磁気異方性が磁化反転に大きな影響を及ぼすことを解明することに成功した。

## (3). GaMnAs を用いたスピン依存三端子素子の磁気伝導特性

3層 GaMnAs ダブルバリアトンネルトランジスタ構造の作製条件を最適化し、3層独立に電氣的コンタクトをとり磁気輸送特性を調べた。その結果、コレクタ電流  $I_c$ 、ベース電流  $I_b$ 、電流増幅率を各層間のバイアス電圧によって容易に制御できることを確認した。さらに、電流増幅率  $\beta = I_c/I_b$  が適当なバイアス条件化で 1 以上となり増幅機能を得ることに成功した。増幅率  $\beta = 2$  の近傍では GaMnAs の磁化方向を変えることにより、 $\beta$  がスピンの向きに応じて 15%程度まで変調できることを実験的に示した。これによりスピン依存のトランジスタ動作を確認することに成功した。

### 3. 現在までの達成度

#### ②おおむね順調に進展している

我々の研究は、半導体ヘテロ界面のスピントロニクス機構の解明とスピントロニクス緩和の抑制について新たな知見を提供し、スピントロニクス研究分野の多くの注目を集めている。半導体の分野で最も歴史と権威のある「半導体物理国際会議」や「半導体二次元電子ガスに関する国際会議」では基調講演を行うなど、スピントロニクス軌道相互作用を用いた半導体中の電子スピンの電界制御とスピントロニクス緩和の抑制について世界をリードする研究成果をおさめつつある。特に、スピンの電界制御とスピントロニクス緩和の抑制が同時に達成できたことは今後のスピントロニクスの進展に大きな影響をもたらすことが期待できる。

微細加工を用いた形状効果により希薄磁性半導体 GaMnAs の磁化反転過程を制御できることを示した。この結果は、ゲート電界により結晶磁気異方性が大きく制御できれば、形状効果によって付加された磁気異方性により電界効果磁化反転制御ができる可能性を示唆している。また、希薄磁性半導体 GaMnAs を用いたダブルバリア・スピン三端子デバイスでは電流増幅を確認し、スピントロニクスに依存した増幅率を得ることに成功した。磁性体金属を用いた3層ダブルバリアトンネル素子では増幅率を得ることが困難であり、本研究により希薄磁性半導体を用いた優位性を出すことができた。

以上により当初の目的をほぼ達成し順調に研究が進展していると判断できる。

### 4. 今後の研究の推進方策

我々の先駆的な研究成果であるゲート電界で制御可能なスピントロニクス軌道相互作用の特徴を活かしてスピントロニクス伝導制御とスピントロニクス緩和の抑制を同時に満たすヘテロ構造の最適化を行う。さらに、電界に依存したスピントロニクス伝導・緩和機構のより精密な解明を行いスピントロニクス伝導物理の学術的な貢献とスピントロニクス応用に貢献する。

ゲート電界による磁化反転が可能か否か調べるため細線方向の依存性、温度依存性などより詳細な検討を行う。これまで希薄磁性半導体を用いたスピントロニクス依存三端子素子のプロトタイプを完成した。今後は GaMnAs の成長条件をより最適化し①エミッタ抵抗を下げる、②ベース抵抗を上げる、ことによりさらに増幅率の向上とスピントロニクスの向きに依存した増幅率変化の増大を図りスピントロニクスデバイスとしての高性能化を目指す。

### 5. 代表的な研究成果

[雑誌論文] (計 15 件(全て査読有))

(1) “All-Electrical Detection of the Relative Strength of Rashba and Dresselhaus Spin-Orbit Interaction in Quantum Wires”, M. Scheid, M. Kohda, Y. Kunihashi, K. Richter, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. **101**, 266401 (2008)

(2) “Manipulating spin orbit interaction in semiconductors”, M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031008 (2008).

(3) “Control of interlayer magnetostatic coupling in submicron-sized Fe/Au/Fe rings”, T. Miyawaki, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta, Appl. Phys. Lett. **92**, 32502 (2008).

以下省略

[学会発表] (計 33 件) 招待講演

(1) “Electrical Manipulation of spins in the Rashba 2DEG systems”, J. Nitta (Plenary Talk) 29th International Conference on the Physics of Semiconductors, July 27<sup>th</sup> August 1<sup>st</sup> Rio de Janeiro, Brazil (2008).

(2) “Electrical manipulation of spin precession based on the Rashba spin-orbit interaction”, J. Nitta (Plenary Talk) 17th Electronic Properties of Two-dimensional Systems and Modulated Semiconductor Structures, July 15<sup>th</sup>-20<sup>th</sup> Genova, Italy (2007).

(3) “Spin Transport in Semiconductors”, J. Nitta (Invited Talk), 4th International School and Conference on Spintronics and Quantum Information Technology, June 17<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> Maui, U. S. A. (2007).

以下省略

[図書] (計 1 件)

“Controllable Quantum States- Mesoscopic Superconductivity and Spintronics” H. Takayanagi, J. Nitta, and H. Nakano, World Scientific p.1-420 (2009).

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]