

# 半導体量子構造による電氣的電子スピン位相制御/検出技術の開拓と量子情報端末への応用 (072102003)

Electrical spin phase manipulation/detection in semiconductor quantum well structures and its application for quantum information devices

## 研究代表者

好田 誠 東北大学大学院 工学研究科

Makoto Kohda Graduate School of Engineering, Tohoku University

研究期間 平成 19 年度～平成 21 年度

## 概要

本提案課題では、固体量子情報通信の基盤技術創製に向け半導体量子構造における電子スピンを利用し、ゲート電界によるスピンの電氣的位相制御および位相検出素子を実現する。電子スピンの電氣的制御・検出手法の確立は、半導体を用いた量子情報処理における集積化・省電力化に道を拓き量子情報通信に向けた基盤技術を構築するだけでなく、半導体において電荷のみならずスピンの位相情報を活用する新たなエレクトロニクスの開拓へと繋がる重要な研究開発となる。

## Abstract

In this research, we utilize electron spins as quantum information carriers in semiconductor heterostructures and investigate the electrical spin phase manipulation in a spin interference device. Both control and detection of spin phase by electrical means are important not only for realizing novel electronic devices in quantum information processing, but also for developing spintronics devices based on both electron charge and spin in semiconductors.

## 1. まえがき

電子スピンは量子力学的二準位を有することから量子情報処理における量子ビットとして利用可能である。特に半導体量子構造において電子スピンを制御可能となれば、既存の半導体エレクトロニクスにスピンの自由度を付加することができるため、固体量子情報のみならず新規スピントロニクスデバイスの開拓が可能となる。これまで半導体における電子スピン制御には外部磁界を印加する手法が用いられてきたが、局所的なスピン制御が困難であるためデバイス応用には不向きであった。そこで本研究では半導体 2 次元電子ガス (2DEG) を用いて電界効果トランジスタ構造を作製し、ゲート電界による電氣的スピン位相制御及び検出手法の確立を目指し研究を行った。半導体中を動く電子スピンは、スピン軌道相互作用 (相対論的効果) により電界が磁界に変換されて作用する。かつこのスピン軌道相互作用の強さはゲート電界により外部から制御可能であるため、電氣的なスピン操作が可能となる。同時にスピン軌道相互作用を活用したデバイス創製を目指し、電氣的スピン注入・スピン検出技術の構築を行う。

## 2. 研究内容及び成果

### 2. 1 InGaAs 2 次元電子ガス (2DEG) 構造における電氣的スピン制御の実現 [2]

電氣的スピン制御・検出には半導体リング構造を用いる (図 1)。スピン軌道相互作用により生じる有効磁界は電子の進む方向に依存し、半導体リングを右・左回りに伝播する電子波には逆向きの有効磁界が生じる。その結果、リング内を伝播する電子スピンの歳差運動に位相差が生じる。有効磁界に起因するスピン位相差はスピン干渉効果として電気抵抗にあらわれるため、ゲート電界を変調すれば周期的な抵抗振動として観測できるはずである。そこでスピン軌道相互作用の強い InGaAs 2DEG を用いて図 1 に示す外径  $2.06\mu\text{m}$ ・内径  $1.62\mu\text{m}$  リング構造を作製した。ゲート電界制御には、原子層堆積装置 (ALD) を用いて  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ゲート絶縁膜をリング構造上に堆積した。図 2 に  $T = 0.3\text{ K}$  で測定した異なるゲート電界における磁気抵抗の 2 次元

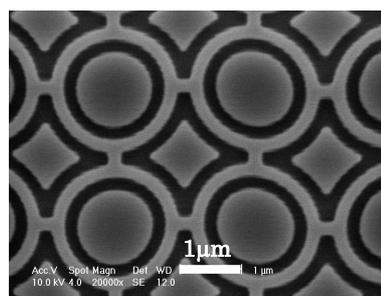


図 1. InGaAs 半導体リング構造の走査電子顕微鏡写真

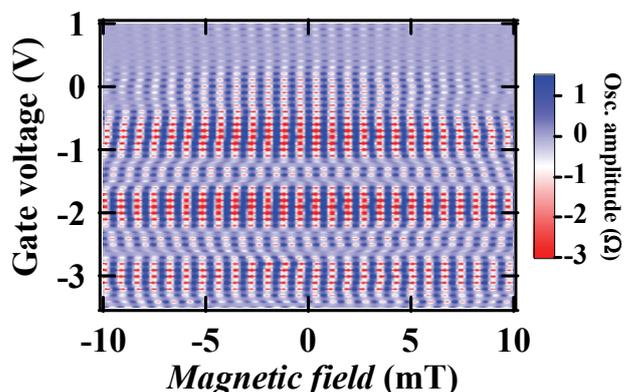


図 2.  $T = 0.3\text{ K}$  で測定した異なるゲート電界における磁気抵抗振動の 2 次元プロット

プロットを示す。外部磁場の変化に伴う周期的抵抗変化は、電子の波数がベクターポテンシャルを介して変調される Al'tshuler-Aronov-Spivak (AAS) 振動である。同時に、ゲート電界を  $+1\text{V} > V_g > -4\text{V}$  まで変化させても周期的な抵抗振動が観測された。これはスピン干渉効果が内部有効磁界により変調されていることを意味し、スピン軌道相互作用による有効磁界を用いてスピン歳差運動の電氣的制御及び電氣的検出が実現されていると言える。ゲート電界増大に伴い AAS 振動振幅は 3 周期以上変調され、電子スピンは電氣的に  $6\pi$  以上回転することを明らかにした。

## 2. 2 InGaAsP/InGaAs ヘテロ構造によるスピノ軌道相互作用の増大[3]

僅かなゲート電界変化により大きなスピノ回転角が得られればスピノ制御の省電力化に繋がる。その実現には、半導体内部において大きなスピノ軌道相互作用を生み出す必要がある。そこで(InP)<sub>0.59</sub>(In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As)<sub>0.41</sub>/In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 2次元電子ガス構造を用いて、価電子帯のバンドオフセットによる電界と量子井戸内の電子確率密度分布双方を同時に制御することでスピノ軌道相互作用の増大を実現した。ゲート電極付きホール素子を作製し  $T=0.3$  K における磁気伝導にあらわれる弱反局在解析から Rashba スピノ軌道相互作用のゲート電界依存性を評価した。図3に得られた Rashba スピノ軌道相互作用パラメータ  $\alpha$  のキャリア濃度依存性を示す。最大値は  $10.4 \times 10^{-12}$  eVm まで増大することを明らかにした。これまで弱反局在解析で得られた Rashba スピノ軌道相互作用の最大値は図3における Ref [1] に示される値であり、今回得られた  $\alpha$  はその値と同程度であることが分かる。有効磁界の大きさに換算すると最大 17.8T を示した。またヘテロ界面における原子拡散を考慮したモデルで定量的にも説明できることを示した。

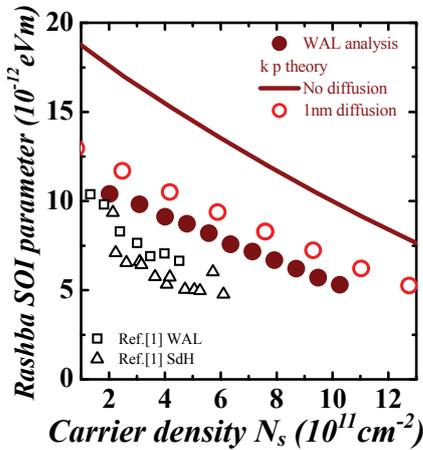


図3. (InP)<sub>0.59</sub>(In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As)<sub>0.41</sub>/In<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 2次元電子ガス構造における Rashba スピノ軌道相互作用パラメータ  $\alpha$  のキャリア濃度  $N_s$  依存性。●が実験結果、○は界面原子拡散を考慮に入れた理論計算。Ref [1] V. A. Guzenko *et al.*, Phys. Rev. B **76**, 165301 (2007).

## 2. 3 電氣的スピノ注入・検出可能な極薄表面層を有する InGaAs 2次元電子ガス(2DEG)の実現

スピノの自由度を活用した新規スピノトロニクスデバイスを創製するには、電氣的スピノ注入後に有効磁界によりスピノ制御し、最後に電氣的検出可能な半導体 2次元電子ガスを設計する必要がある。特に高効率スピノ注入・スピノ検出にはトンネルバリアを併せ持つ必要がある。しかし、表面近傍にチャネル層を位置すると空乏層が広がり電子濃度の低下や、ポテンシャルエネルギー変調に伴いスピノ軌道相互作用の強さ自体も変化し、スピノ注入・検出に適したチャネル層の設計は困難となる。有効磁界により 180 度以上スピノ反転可能でかつトンネルバリアを有する 2DEG を実現することを目的とし、InAlAs/5nm InP/InGaAs 2DEG 構造を用いて InAlAs バリア層を表面エッチングすることで、InGaAs チャネル電子濃度とスピノ軌道相互作用の系統制御を試みた。図4に表面エッチングに伴うキャリア濃度と Rashba スピノ軌道相互作用パラメータ  $\alpha$  の依存性を示す(○印)。5nm InP 極薄表面層となっても  $N_s = 1.06 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup> のキャリア濃度を有し、電氣的に  $2.34 \pi$  スピノ回転可能な  $\alpha = 3.85 \times 10^{-12}$  eVm を示

した。 $k \cdot p$  摂動による理論値(□印)とも良い一致を示したことから、スピノトランジスタに利用できる InGaAs チャネル構造を実現した。

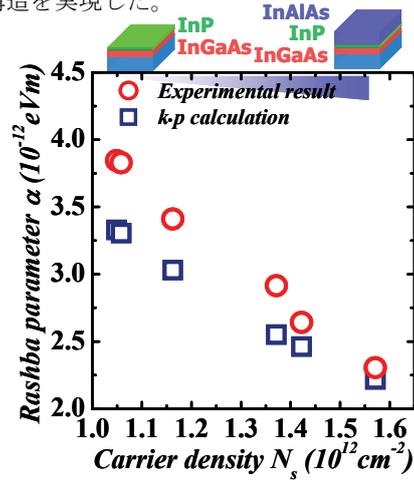


図4. InAlAs 表面エッチングによる Rashba スピノ軌道相互作用パラメータ  $\alpha$  のキャリア濃度  $N_s$  依存性

## 3. むすび

半導体リング構造による電氣的スピノ制御・検出を実現したことは、半導体中でスピノ自由度を活用するスピノ機能デバイスやスピノ位相を制御する量子情報処理に必要な不可欠な基盤技術を確認したことになる。また InGaAsP/InGaAs ヘテロ構造を利用することにより Rashba スピノ軌道相互作用の増大を実現したことは、スピノ軌道相互作用を有効磁場として利用する電子スピノ制御に留まらず、スピノ軌道相互作用を用いたスピノ偏極生成やスピノ検出にも道を拓くものである。強磁性体を用いることなく、全て半導体のみでスピノ生成・制御・検出が実現できる可能性を秘めており、既存の半導体製造技術と整合性の良いスピノ機能デバイス創製に期待できる。今後は各技術を融合したスピノ機能素子の構築を行う。

### 【誌上発表リスト】

- [1] M. Kohda, T. Bergsten, and J. Nitta, “Manipulating spin orbit interaction in semiconductors” (Invited Review), J. Phys. Soc. Jpn. **77**, 031008-1 - 031008-9 (2008年3月10日)
- [2] M. Kohda, J. Takagi, and J. Nitta, “Comparison of gate sensitivity for spin interference effect between Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub> gate insulators” (Invited paper), ECS Trans. **16**, 39 - 49 (2008年10月3日)
- [3] M. Kohda and J. Nitta, “Enhancement of spin orbit interaction and the effect of interface diffusion in InGaAsP/InGaAs heterostructures”, Phys. Rev. B, **81**, 115118-1 - 115118-8 (2010年3月15日)

### 【申請特許リスト】

- [1] 好田 誠、新田 淳作、スピノ軌道相互作用の増大方法、日本、2009年8月13日 特願 2009-189202
- [2] 好田 誠、新田 淳作、スピノ軌道相互作用を用いたゼロ磁場における電子スピノ共鳴、日本、2009年8月14日特願 2009-220161
- [3] 好田 誠、新田 淳作、スピノトランジスタ及び電子回路、日本、2009年10月28日特願 2009-2477942

### 【受賞リスト】

- [1] 好田 誠、第 20 回トーキン科学技術振興財団研究奨励賞、“電氣的スピノ注入・スピノ制御に関する研究”、2010年3月10日

### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~kotaib/kohda.html>