

「超高速・超省電力高性能ナノデバイス・システムの創製」

平成 14 年度採択研究代表者

新田 淳作

(東北大学大学院工学研究科 教授)

「半導体スピンエンジニアリング」

1. 研究実施の概要

半導体の電子のスピンに関連した特性として交換相互作用、スピン軌道相互作用、 g -因子に着目し、これらをゲート電極により電氣的に制御し、半導体中のキャリアスピンを自在に操作、制御する手法を開発することを目的とする。

交換相互作用の電氣的な制御として、金属磁性で知られている RKKY 相互作用を半導体量子ドット中で実現することを目指している。半導体量子ドットデバイスではドット間距離を伝導電子のフェルミ波長よりも小さく設計できるため、ドット中スピン間に強磁性 RKKY 相互作用が期待でき、ゲート電圧を変化させることにより強磁性・反強磁性スイッチングが可能である。多ドット列に拡張できれば、スイッチ可能な磁性体が半導体材料だけで実現する可能性が広がる。これまで我々は、2つのドットスピンに近藤効果を生じさせ、RKKY 相互作用による近藤効果の変化を電気伝導測定してきた。これまでの測定では片方のドットで発生した近藤効果をもう片方のドットで非局所的に制御できるという効果を見いだした。この効果は、RKKY 相互作用によるという解釈とファノ反共鳴によるという解釈の2通りがあり、それらを区別する必要がある。今後はファノ反共鳴の効果を減らすようにデバイス構造を改良して、RKKY 相互作用の確証をつかむことを目標とする。

量子ドット列デバイスにおける強磁性を光学特性から検出するためには、(i)幾何学的に正確な格子型構造を作成すること、(ii)格子型ゲートによって一電子状態、例えば状態密度や電子スピンの制御され、そのことが円偏光依存光特性から検出可能であること、(iii)量子ドット一個あたりの電子数を制御可能であること、(iv)以上の課題を合わせて強磁性転移温度以下の電子温度で実現可能であること、が必要であると考えられる。現在までにこれらの課題を順に実行してきた。現時点で(i)～(iii)の個々の課題は達成されている。今後、格子型ゲートによってポテンシャルが変調された試料の円偏光依存発光特性を電子数が量子ドットあたり1個から数個の領域において極低温で測定し、課題(iv)の達成を目指す。

半導体二次元電子ガス中のスピン軌道相互作用を用いたデバイスとしてスピン干渉計を作製し、ゲート電界によりスピン回転角度を制御することに成功した。今後は、磁性体電

極からのスピン注入やスピントリカールによりスピントリカールの電氣的な生成・検出方法の確立を目指す。

2. 研究実施内容

(1) ゲート電界によるRKKY交換相互作用の制御

本研究では、量子ドット中の電子スピンの極低温で半導体伝導電子系と強く結合することにより起こる近藤効果を利用して、離れた電子スピンの状態を電氣的に遠隔制御できることを示した。これまではデバイスにかかる電圧条件を変えずに近藤効果のオン・オフ制御を行うことは困難だったが、本方法ではそれを遠隔的に行えるため、近藤効果のメカニズム理解を深めることにつながる。また、離れた2つのスピン間の相互作用を電氣的に遠隔制御できる可能性も明らかにし、半導体スピントロニクス of 新しい応用が期待される。

我々は2つの半導体量子ドットを電流の流せる量子細線の両脇に結合した構造を用いた。電子が閉じ込められている半導体ドットを、電流を流せる半導体に結合すると、伝導する電子が量子ドットの中に入り出すことができるようになる。このときドット中のスピンと伝導電子のスピンとの間には、スピンの向きを反対にそろえようとする反強磁性的な磁気相互作用が働く。近藤効果によりドット中のスピンを反対向きのスピンを持った伝導電子系が取り囲んで、低温になるにつれてスピンの大きさを消し隠してしまう。半導体中での近藤効果の観測にはドット中電子スピンと伝導電子系との結合を最適な強さに保つため、量子ドットを形成するためにかけるゲート電圧を繊細に調節しておく必要がある。そのため、伝導電子系の電子濃度などを変えると、ドットとの結合の強さも変わってしまい、近藤効果が消えてしまうという不都合があった。

本年度は、量子ドット1のそばに別の量子ドット2を配置し、2つの量子ドットで同時に近藤効果を生じさせることで、量子ドット2の近藤効果を量子ドット1の位置から遠隔的に制御できることを示した(図1)。これによると、量子ドット1の中の電子数が奇数のときにだけ、量子ドット2の近藤効果が抑制されている。すなわち、空間的に離れた場所から遠隔的に近藤効果のオン・オフ制御することに成功した。

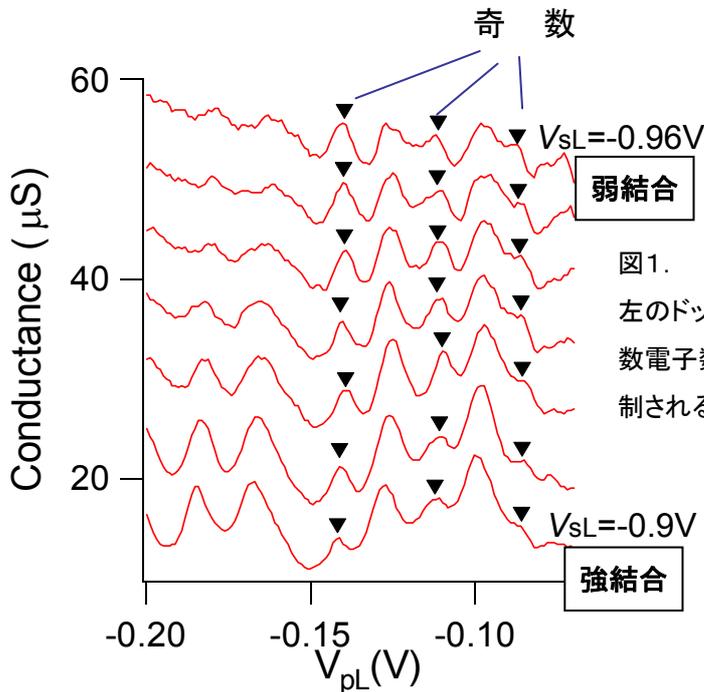


図1. 右のドット-2 が近藤状態にあるとき、左のドット-1 と細線の結合を強くしていくと、奇数電子数に対応する近藤ピーク (▼印) が抑制される。

(2) 量子ドット列の光学特性

電子線リソグラフィを用いてGaAs量子井戸構造上に作成したドット間100 nm周期から500 nm周期の格子型ゲート構造中電子系の状態の研究を行った。100 nm x 100 nmの量子ドットに電子1個存在する場合の電子密度は $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ に相当する。この低電子密度領域で電子密度を制御するために、非ドープの量子井戸の井戸層にオーミックコンタクトを取り、裏面ゲートとの間に電圧を印加する方法で電子密度を制御する手法を採用した。電子状態の評価には、電子占有数 ν が整数や分数の時に見られる光遷移エネルギーの異常、電子系の圧縮率と相関のあるキャパシタンススペクトル、および円偏光発光分光法を用いたスピン分極度、スピン分裂エネルギーの測定を用いた。電子密度の低下に伴い、電子間相互作用により電子と正孔の有効質量が増大することを見いだした。また、整数電子占有数においてスピン分裂エネルギーが極大値を持ち、その値が電子占有数に依存することを見いだした。電子密度を連続的に低下させてキャパシタンススペクトル測定を行った結果、金属絶縁体転移点の直前に電子圧縮率の異常を観測した。これらの現象は電子間相互作用に起因したもので、強磁性転移の前駆的現象であると考えられる。

また、低温強磁場中局所光励起を用いて二次元電子系の端状態の電子スピンの偏極度のイメージングを行うことに成功した。この結果は光励起された電子が量子ホール系のバルク状態を介して端状態に流れ込み、光電流としての寄与がホール電圧の増加として観測されることにより理解される。さらに、円偏光励起により円偏光度のイメージの観測を行い、電子スピン偏極度と対応するものと考えられるイメージを取得した。

(3) スピン軌道相互作用を用いたスピンの回転制御

InAlAs/InGaAs/InAlAs エピ量子井戸中に、電子線描画とドライエッチングを駆使した微細加工技術により正方形、三角形ループ配列構造を作製し、そこで見られるスピン干渉が、理論モデルより予測される Rashba 効果と定量的に一致するかを検証することに主眼を置いて研究をすすめた。また、結晶反転非対称性に起因する Dresselhaus 項を含めた解析も行った。「任意多角形におけるスピン軌道相互作用に基づくスピン干渉効果」についての基礎理論的な検討を行った。また、以前より得られていた実験結果である「InGaAs/InAlAs 量子井戸を用いた正方形ループ配列におけるスピン干渉効果」についての解析をするとともに、理論的にも、(1)構造反転非対称性に基づく Rashba 効果、(2)結晶反転非対称性に基づく Dresselhaus 項、双方の効果を取り入れた詳細な解析を行い、実験結果を準定量的に説明することに初めて成功した。

3. 研究実施体制

(1)「スピン伝導特性」グループ

①研究者名

新田 淳作 (東北大学 教授)

②研究項目

量子ドット超格子強磁性、スピン機能デバイスの特性

量子ドット間の交換相互作用制御や量子ドット超格子構造の作製、強磁性実現のための構造の最適化を行い、主に伝導特性からスピン特性を調べる。また、スピン軌道相互作用や g -因子のゲート電圧制御のための半導体ヘテロ構造の設計と伝導特性評価を行い、ゲート電圧によるスピン制御方法の確立を行う。このスピン制御技術をベースに、スピフィルターやスピン FET などスピン機能デバイスの作製を行いスピン伝導特性、デバイス特性の評価と最適化を行う。

(2)「スピン光特性」グループ

①研究者名

野村晋太郎 (筑波大学 助教授)

②研究項目

光学的手法により半導体量子ドット中電子系の状態観測、特に偏向分光法を用いたスピン状態の観測を行なう。具体的には (1)円偏向発光分光、ファラデー効果、カー効果測定による半導体量子ドット中電子系の強磁性状態の検出、(2)発光分光を用いた化学ポテンシャル測定による半導体量子ドット中電子系の状態密度解析を実施する。

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

- T. Bergsten, T. Kobayashi, Y. Sekine, and J. Nitta
“Experimental Demonstration of the Time Reversed Aharonov-Casher Effect”
Phys. Rev. Lett. **97**, 196803 (2006)
- T. Miyawaki, T. Toyoda, M. Kohda, A. Fujita, and J. Nitta
“Magnetic interaction of submicron-sized ferromagnetic rings in one-dimensional array”
Appl. Phys. Lett. **89**, 122508 (2006).
- M. van Veenhuizen, T. Koga, and J. Nitta
“Spin-orbit interaction of ballistic electrons in polygon structures”
Phys. Rev. B **73**, 235315 (2006).
- T. Koga, Y. Sekine, and J. Nitta
“Experimental realization of a ballistic spin interferometer based on the Rashba effect using a nanolithographically defined square loop array”
Phys. Rev. B Rapid Communications **74**, 041302 (2006).
- T. Koga, H. Okutani, Y. Sekine, and J. Nitta
“Spin interference effect based on the Rashba and Dresselhaus terms”
Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4220 (2006).
- T. Nihei, Y. Suzuki, M. Kohda, and J. Nitta
“Gate controlled crossover from weak localization to weak antilocalization in a narrow gap InGaAs/InP heterostructure”
Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4239 (2006).
- M. Abe, M. Kohda, and J. Nitta
“Magnetoresistance oscillations induced by spin orbit interaction and intersubband scattering in a gated InP/InGaAs heterostructure”
Phys. Stat. Sol. (C) **3**, 4243 (2006).
- Y. Sekine and J. Nitta
“Measurements of magnetic-domain wall velocity detected by local Hall”
Inst. Phys. Conf. Ser. **187**, 461 (2006).
- S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, and H. Takayanagi
“Non-local control of the Kondo effect in a double quantum dot-quantum wire coupled system”
Phys. Rev. **B 73**, 161303(R) (2006)
- S. Sasaki, S. Kang, K. Kitagawa, M. Yamaguchi, S. Miyashita, T. Maruyama, H. Tamura, T. Akazaki, Y. Hirayama, H. Takayanagi
“Spin correlation in a double quantum dot-quantum wire coupled system”

- J. Vac. Sci. Technol. B **24**, p2024 (2006)
- H Tamura, S Nomura, M Yamaguchi, T Akazaki, H Takayanagi, P Mohan, J Motohisa and T Fukui
"Magneto-Optics of GaAs Quantum Wire Lattices Grown by Selective-Area MOVPE"
J. Phys.: Conf. Ser. **38**, p130-133 (2006)
 - S. Nomura, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, and Y. Hirayama,
"Electron-hole states in the fractional quantum Hall regime probed by photoluminescence"
Physica E **34**, 292 (2006).
 - M. Yamaguchi, S. Nomura, K. Miyakoshi, T. Akazaki, H. Tamura and H. Takayanagi,
"Electric-field control of electron-hole wave functions in a wide quantum well"
Physica E **34**, 300 (2006).
 - K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and J. Nitta,
"Infrared magneto-photoluminescence spectra and electron-hole g-factor of an
InAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure"
Physica E **34**, 315 (2006).
 - H. Ito and S. Nomura
"Fabrication of highly ordered arrays of nanoparticles by mechanical process"
Jpn. J. Appl. Phys. 45, (11) 8997-8999 (2006).
 - M. Yamaguchi, S. Nomura, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi
"Controlling electric field and electron density in a double-gated GaAs/AlGaAs quantum well"
J. Appl. Phys. **100**, 113523 (2006)
 - S. Nomura and K. Tsumura
"Neutral and charged excitons in a quantum tube"
Surf. Sci. **601** (2) 441-449 (2007).

(2) 特許出願

平成 18年度特許出願:0件(CREST 研究期間累積件数:6件)