

「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

(NTT物性科学基礎研究所 グループリーダー)

「半導体スピンエンジニアリング」

1. 研究実施の概要

半導体の特徴は、第三電極を用いた電氣的な制御（三端子動作）が可能であるところにある。本研究は、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。これにより、従来にはないスピンの自由度に起因した新しい機能を創出し、将来の超高速、超省電力、高機能化が可能な量子情報処理デバイスの基本素子として貢献することを目指す。

量子ドット列と伝導電子系が結合した系における強磁性スピンの発現を理論的に検討し、この系においてはRKKY相互作用によりドット内の局在スピンが強磁性的に揃う効果を予言した。このRKKY相互作用に基づいた強磁性を検証するために、GaAs/AlGaAs二次元電子系を用いて、基板表面の金属ゲートに電圧を印加することにより形成された量子細線の側面に量子ドットが結合した構造を作製し、そこでの電気伝導特性を測定した。量子ドットの電子数を変えながら量子細線のコンダクタンスを測定し、電子がドット・細線間をトンネリングする様子や、トンネリングの強さを制御出来ることが確認できた。

InAs層挿入InGaAs二次元電子ガスチャネルの g -因子がゲート電圧により、制御可能であることを実験的に確認した。さらに、これまで、逆HEMT構造を用いたInGaAsチャネルでは、スピン軌道相互作用は、正のゲート電圧を印加することにより減少することを確認してきたが、順HEMT構造を用いることにより、正のゲート電圧によりスピン軌道相互作用の値は増加することを見出した。これらの、スピンに依存したパラメータのゲート制御性をもちいてスピフィルターやスピンFETなどのスピデバイスへの展開を図る。

2. 研究実施内容

半導体中の微小構造中に電子を閉じ込めた量子ドットは、人工原子としての振る舞いを示すことが多くの研究によって明らかになっている。我々はそのような量子ドットを多数並べて量子ドット列を構成して人工結晶・人工物質を実現し、半導体の特性を利用して物性をコントロールすることを目指している。特に、このような人工物質において強磁性を実現することが我々の主要な目標である。そのために我々は二つの方法からアプローチし

ている。一つは、量子ドットをカゴメ格子と呼ばれる周期構造上に並べて人工結晶を作成し、そこで強磁性を発現させようとするものである。もう一つは、量子ドット列を伝導電子系と結合させて、RKKY相互作用により量子ドット中の電子スピンを揃えて強磁性を発生させようとするものである。前者のアプローチにおいて周期性の良い量子ドット列を得るためには、非常に高い移動度を持った高品質の半導体基板が不可欠であり、量子ドットを作り込む前の二次元電子系の特性を十分しっかり把握しておくことが極めて重要である。また、基礎特性を精密に測定するためにはフォトルミネッセンス測定が最適であり、しかも低温での光測定系を構築することが望ましい。我々はそのような高移動度基板を実際に作製し、100mK程度の極低温でフォトルミネッセンスを測定した。

また、RKKY相互作用に基づいた強磁性を発現させるためには、まず一つの量子ドットと伝導電子系との結合を制御出来ることを確認する必要がある。そのために、GaAs/AlGaAsヘテロ接合面の二次元電子系を用いて、基板表面の金属ゲートに電圧を印加することにより形成された量子細線の側面に量子ドットが結合した構造を作製し（図1）、そこでの電気伝導特性を測定した。量子ドット中の電子数、細線の幅、およびドットと細線の結合の度合いは自在に変えられるようにした。量子ドットの電子数を変えながら量子細線のコンダクタンスを測定し、電子がドット・細線間をトンネリングする様子や、トンネリングの強さを制御出来ることが確認できた（図2）

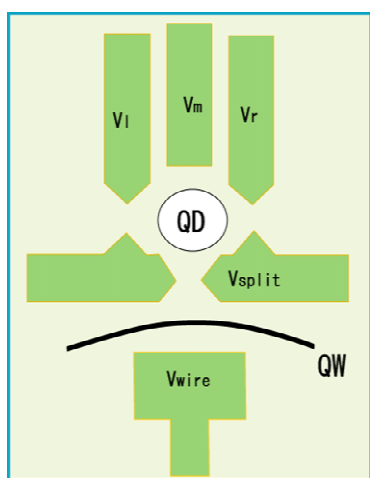


図1 量子ドットー量子細線が並列につながれた構造。V_r、V_l、V_{split}の間にドットを形成しV_mによってドットをクーロン振動をさせたときの量子細線の電気伝導の

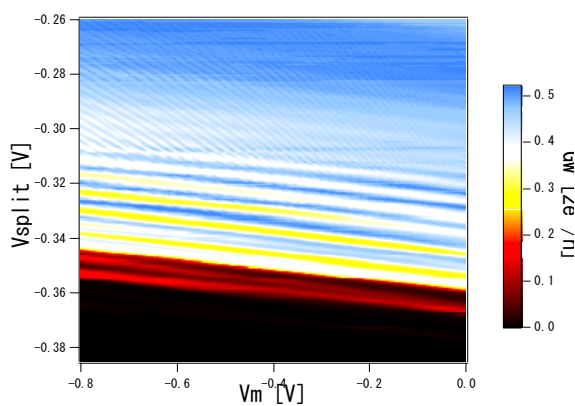


図2 V_{split}を変えていったときの細線のコンダクタンス振動の変化 (B=6T)。上半分に見える細かい縞模様が結合したドットのクーロン振動であり、グラフ上部では細線中のドットによる振動は消滅し細線とドットとの結合が観測されて

InGaAs二次元電子ガスチャネルでは、ラッシュバ効果によりスピン軌道相互作用がゲート制御可能であることを確認してきた。この効果は構造反転対称性の破れに起因した電界

の方向に依存するため、逆HEMT構造を用いたInGaAsチャネルでは、スピン軌道相互作用は、正のゲート電圧を印加することにより減少し、順HEMT構造を用いることにより、正のゲート電圧によりスピン軌道相互作用の値は増加することを見出した。

InAs層挿入InGaAsチャネルは、InAlAsに比べバンドオフセットが小さいため、ゲート電圧により電子波導関数がg-因子の異なったInAsからInGaAsへとしみだすことが容易で、g-因子の大きな変化が期待できる。g-因子を評価する方法として、角度変調磁場中での磁気抵抗測定を行い、InAs層挿入InGaAsチャネルのg-因子を評価した（図3）。その結果、g-因子の絶対値はバルクInAsに比べ小さく、InGaAsに近い4から3までゲート電圧により制御可能であることを確認した（図4）

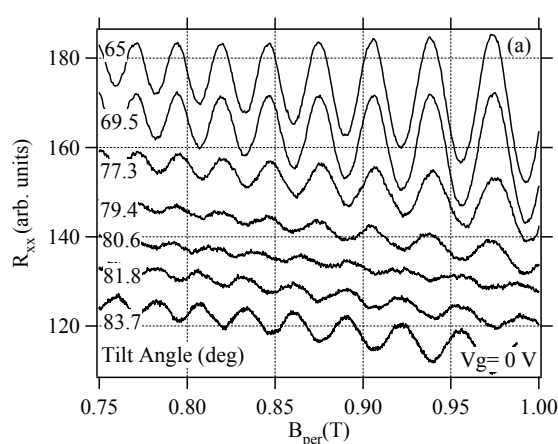


図3 シュブニコフ・ドハース振動の角度依存性。振動が最小となる角度は、スピン分離したランダウ準位が等間隔になる場合に対応しこの角度よりg-因子を求める。

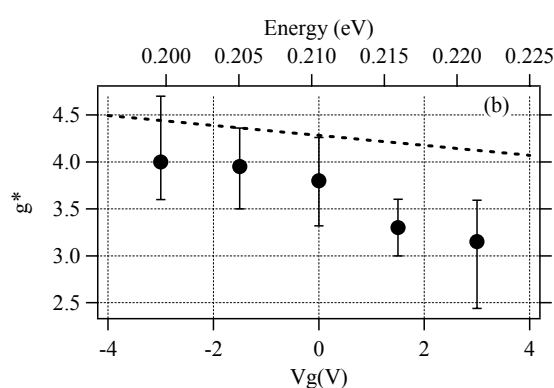


図4 g-因子のゲート電圧依存性。図中点線はk·p摂動理論による計算結果を示す。

3. 研究実施体制

スピン伝導特性研究グループ

- ① 研究分担グループ長：新田 淳作（NTT物性科学基礎研究所、グループリーダー）
- 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伝導特性

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、スピニ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。

スピン光学特性研究グループ

- ① 研究分担グループ長：野村 晋太郎（筑波大学 物理学系、助教授）
- ② 研究項目：スピン光物性測定及び量子ドットの光-磁性測定

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. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文発表

- Gate controlled electron g-factor in an InGaAs/InAlAs heterostructure
J. Nitta, Y. Lin, T. Koga and T. Akazaki
Appl. Phys. Lett. **83**, 4565 (2003)
- Electron g-factor in a gated InGaAs channel with double InAs-inserted Wells
Y. Lin, J. Nitta, T. Koga and T. Akazaki
Physica E **21**, 656 (2004)
- Electron g-factor in a gated InGaAs-inserted-channel InGaAs/InAlAs heterostructure
J. Nitta, Y. Lin, T. Koga and T. Akazaki
Physica E **20**, 429 (2004)
- Experiments on Aharonov-Bohm conductance oscillations: a statistical analysis of the averaged Fourier spectrum
F. Meijer, J. Nitta, T. Koga, A. F. Morpurgo and T. M. Klapwijk
Physica E **22**, 402 (2004)
- Quantum dot array prepared with self-organized nanopore and its photoluminescence spectra
T. Imai and S. Nomura
Physica E **21**, (2-4) 1093-1097 (2004)
- Near-field optical mapping of exciton wave functions in a GaAs quantum dot
K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, M. Mihara, Y. Aoyagi, S. Nair and H. Takagahara
Phys. Rev. Lett. **91**, (24) 177401-1-1-4 (2003)
- Magnetic Properties of Submicrometer p-In_{0.97}Mn_{0.03}As
Y. Sekine, J. Nitta, T. Koga, A. Oiwa, S. Yanagi, T. Slupinski, H. Munekata
Jpn. Appl. Phys. **43**, 2097 (2004)
- Control of magnetization states in micro-structured permalloy rings,
M. Steiner and J. Nitta
Appl. Phys. Lett. **84**, 939 (2004)

○ On the significance of fine structure in the frequency spectrum of Aharonov-Bohm conductance oscillations

F. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, T. Koga, J. Nitta,

Phys. Rev. **B69**, 035308 (2004)

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：6件