

「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。

本テーマにおいては、量子ドット列デバイスにおける強磁性の理論的予測および実験的検証を目指している。具体的には、量子ドット中の電子スピンを相互作用させることにより、電子スピンを強磁性的に揃えるスピントロニクスを目標とする。半導体においては、ゲート電圧をかけることによって電子濃度をコントロールできるために、強磁性の様な電子相関効果をオン・オフするなどの制御性が期待できる。

強磁性発現のための一つの方法として、量子ドットと伝導電子系とを結合させることにより生じるRKKY間接交換相互作用を利用して強磁性を発生させるやりかたがある。2つの異なるドット中にスピンが別々に存在するとき、伝導電子系を中継地として伝導電子がこれら異なる量子ドット間に入出入りすると、ドット中の局在スピン間に強磁性なRKKY相互作用が生じ得る。このRKKY相互作用を利用して、ドットを多数並べることによりドット列中の局在スピンをすべて同じ向きにそろえて強磁性を発現させようというアイデアである。

強磁性発現のためのもうひとつの方法として、量子ドットを格子上に配列し結合させることにより、量子ドット超格子と呼ばれる人工結晶が構成される。半導体加工技術を用いれば任意の格子構造が作製できるので、自然には存在しないような結晶構造が実現され、様々な電子相関効果を発現させることが可能となる。これまでに、均一なドット形成が期待される高移動度試料や、細線型ドット格子が実現可能な選択成長MOVPE法により作成された量子細線ネットワーク試料などの試料に対して光学測定を行った。

カゴメ格子等の量子ドット超格子において平坦バンド強磁性を半導体中に発現させることをねらいとしている。平坦バンド強磁性は量子ドット超格子による平坦バンドが半分つまった状態で発現し、これはドット一個あたりのフィリングが $5/3$ と低電子密度領域にあ

る。平坦バンド強磁性観測のためには、(1) 電子密度制御性が低電子密度領域で優れていること、かつ(2) 低電子密度領域で高品質な電子系が実現されていることが必須となる。本年度までに、 $10^9\text{cm}^{-2}\sim 1\times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ の低密度領域で分数量子ホール効果の発光による観測に成功しており(1)、(2)は達成された。今後、電子線リソグラフィ法によりカゴメ格子表面ゲート構造を形成した試料の測定により、平坦バンドの観測が達成されると見込まれる。

スピン軌道相互作用は電子スピンに対して有効な磁場として働く。Rashba効果に起因したInGaAsヘテロ構造のスピン軌道相互作用がゲート電圧で制御可能であることを利用して、有効磁場に空間的な勾配を設けることにより、外部磁場、磁性体を一切使用しないスピンフィルターが可能であることを提案し、デバイスの試作を開始した。

2. 研究実施内容

- 1) 量子ドットが半導体中の伝導電子系と結合したときにドット中の電子スピンが磁性不純物として働くことを利用して、ドット間にRuderman-Kittel-Kasuya-Yosida (RKKY) 交換相互作用を生じさせ、半導体材料だけを用いて強磁性の実現・制御が可能となることを理論的に提案した。半導体では伝導電子濃度がゲート電極により制御できるので、RKKY相互作用の大きさや符号を自在に調節することが出来る。量子ドット間距離が3nm程度であれば交換エネルギーの大きさは室温にも達する。

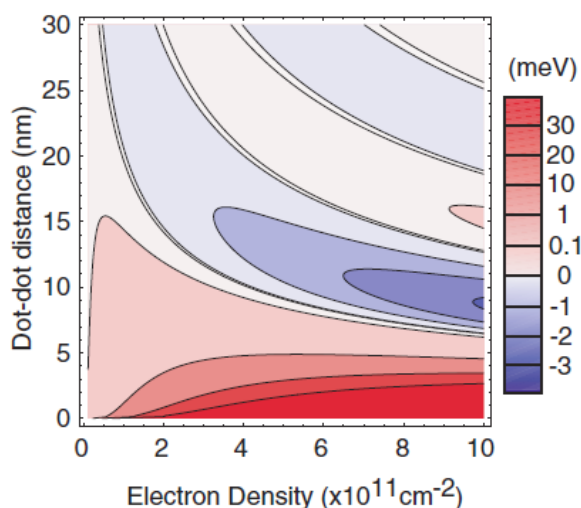


図1 量子ドット間の距離と2次元伝導電子系 (GaAs)の電子濃度に対するRKKY相互作用結合定数の強さ

- 2) 2次元周期ポテンシャル中の電子バンド構造の磁場依存性は、ホフシュッターバタフライと呼ばれるフラクタル的な構造を持つ。これまで正方格子の計算例はあったが、我々は現実の様々な人工格子系を再現できるようにプログラムを拡張し、三角格子やカゴメ格子のバタフライ計算を行った。

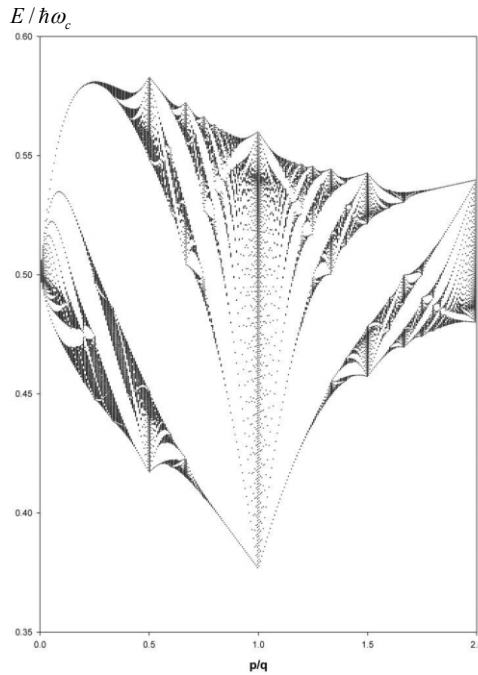


図2 三角格子のホフシュタッター・エネルギーバンドの磁場依存性の計算例

- 3) 非ドープ量子井戸構造に裏面電極を形成した試料の発光スペクトルを50 mK -100 mKの低温で測定した。各発光ピークの強度とエネルギーが磁場中での分数電子占有数が異常を示すことを観測し、分数量子ホール効果を示すことを明らかにした。また、最低励起状態が分数荷電励起子であることを示唆する実験結果を初めて得た。

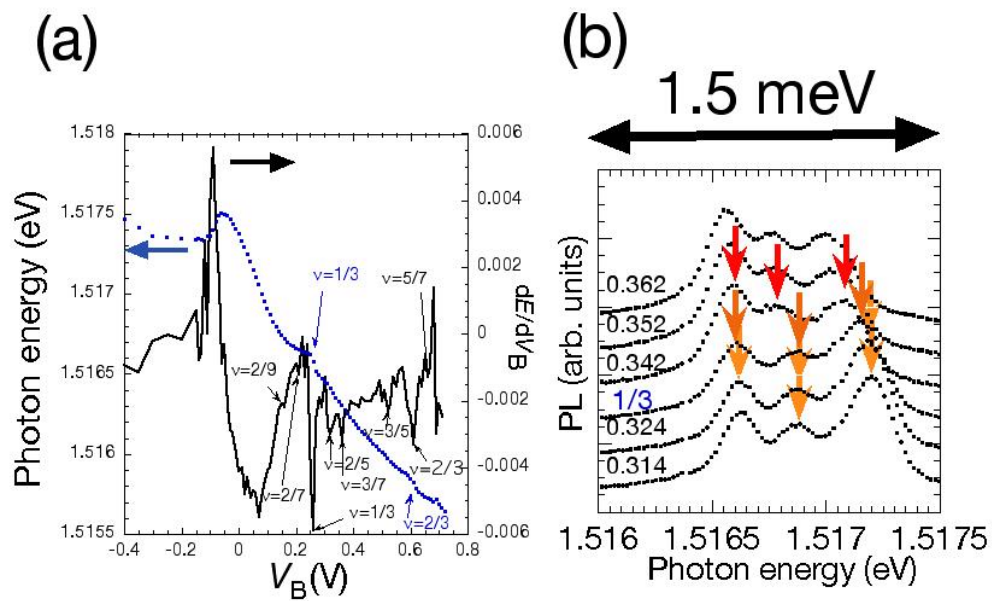


図3 (a) 5 Tにおける発光エネルギーおよびその I_B についての一次微分のバイアス電圧依存性。(b) $\nu=1/3$ 近傍の発光スペクトル。

Be-デルタドープ量子井戸構造に裏面電極と表面電極を形成した試料の発光スペクトルの測定により、井戸内の電子密度とポテンシャルを広い範囲でコントロール可能であることを示した。

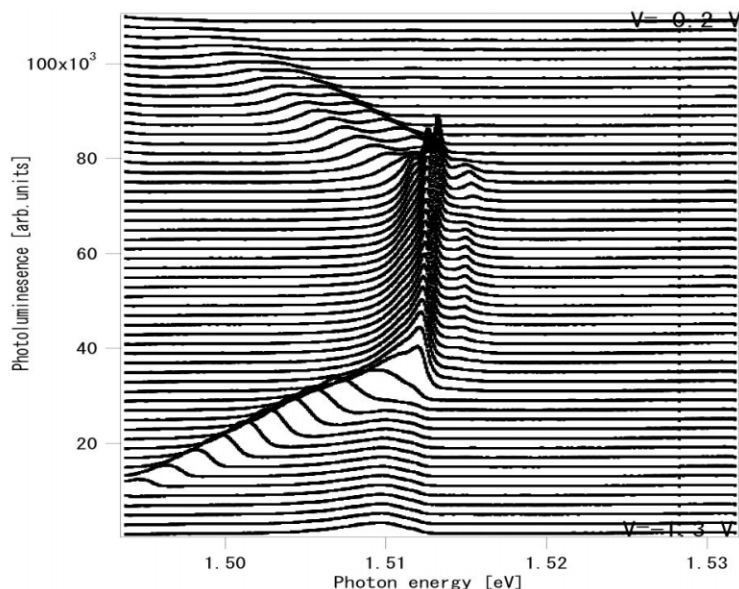


図4 Be-デルタドープ量子井戸構造試料の温度約100 mKにおける発光スペクトルのバイアス電圧依存性

- 4) Rashbaスピン軌道相互作用が大きいとされるIn系の量子井戸の磁場中光学評価システムを整備した。InAs/InGaAs量子井戸の赤外発光スペクトルを磁場中で初めて測定し、各ランダウ準位の有効質量とg値を得た。
- 5) スピン軌道相互作用とゼーマン効果の競合について調べた結果、平行磁場を印加することによりスピン緩和時間が増加することを実験的に確認した。この結果は、ゼーマン効果によりスピンの歳差運動軸が固定化することによるもので最近の理論とほぼ定量的に一致する。

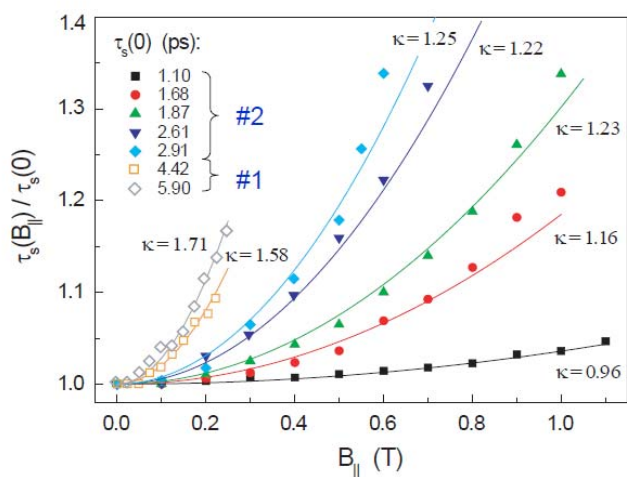


図5. スピン緩和時間の平行磁場依存性。磁場はInGaAs 2次元電子ガスチャネルに平行に印加し軌道運動には影響を与えていない。

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-磁気特性測定

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

- “Tunable Exchange Interaction in Quantum Dot Devices”, H. Tamura, K. Shiraishi, and H. Takayanagi, Jpn J. Appl. Phys. **43**, L691-693 (2004).
- “Conductance oscillations of a quantum wire with a side-coupled quantum dot”, M. Yamaguchi, A. Richter, H. Tamura, T. Akazaki, and H. Takayanagi, Proceedings of XXXIXth Rencontres de Moriond, Italy, The GIOI publishers, 294-300 (2004)
- “Transport properties of a lateral semiconductor quantum dot defined by a single connected metallic front-gate”, A. Richter, K. Matsuda, T. Akazaki, T. Saku, H. Tamura, Y. Hirayama, and H. Takayanagi, Physica **E 25**, 472-478 (2005)
- “Single-electron charging effects in a semiconductor quantum wire with side-coupled quantum dot”, A. Richter, M. Yamaguchi, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. **43**, pp.7144-7149 (2004)..
- “Theoretical design of a semiconductor ferromagnet based on quantum dot

superlattices”, K. Shiraishi, H. Tamura, and H. Takayanagi, *Physica E* **24**, 107-110 (2004).

- “Optical probing of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels”, S. Nomura, and Y. Aoyagi, *Phys. Rev. Lett.* **93** No. 9 096803-1-4 (2004).
- “Magnetic transitions of permalloy rings in hybrid devices”
M. Steiner, G. Meijer, U. Merkt and J. Nitta, *Physica E* **24**, 124-128 (2004)
- “Stern-Gerlach spin filter using surface acoustic waves”
P. Santos, J. Nitta, and K. H. Ploog, *Solid State Comm.* **132**, 631-634 (2004)
- “Competition between Spin-orbit Interaction and Zeeman Coupling in Rashba 2DEGs”
F. E. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, T. Koga, and J. Nitta, *Phys. Rev.* **B70**, 210307(R)-210310 (2004)
- “Effect of an InP/InGaAs Interface on Spin-orbit Interaction in InAlAs/InGaAs Hetrostructures” Y. Lin, T. Koga, and J. Nitta, *Phys. Rev.* **B71**, 045328-045331 (2005)

(2) 特許出願

H16年度特許出願件数：3件（CREST研究期間累積件数：7件）