

「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

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。

半導体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方法を理論的に提唱してきた。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。我々はこの 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ることを実験的に行った。2つのドットを量子細線を介して結合した系では、片側のドットを近藤状態にしたときには、もう一方のドットに印加するゲート電圧によって、近藤効果を非局所的に制御できることを見出した。このような非局所制御は RKKY 相互作用に基づくものである可能性が高く、今後デバイス構造を工夫することにより、この非局所制御のメカニズムの検証を目指す。

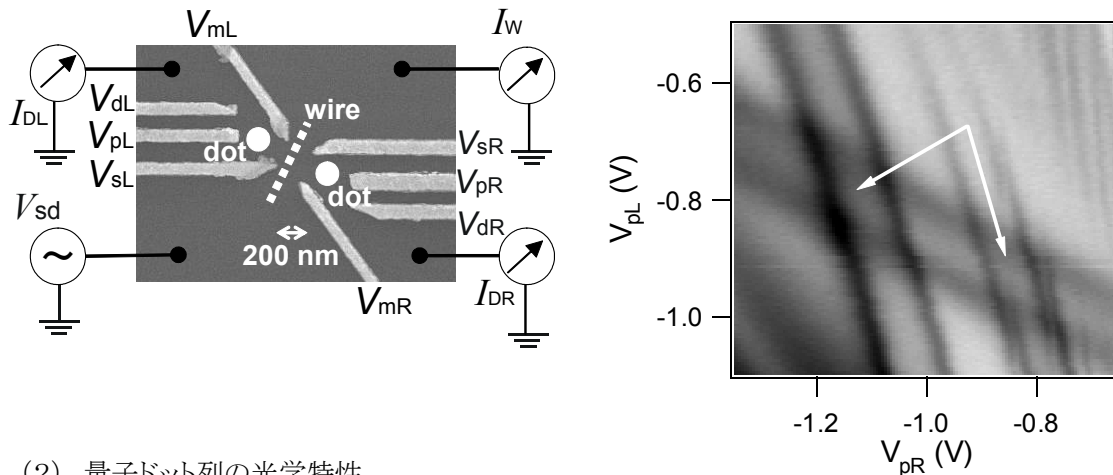
量子ドット列デバイスにおける強磁性を光学特性から検出するためには、(i)幾何学的に正確な格子型構造を作成すること、(ii)格子型ゲートによって一電子状態、例えば状態密度や電子スピンの制御され、そのことが円偏光依存光特性から検出可能であること、(iii)量子ドット一個あたりの電子数を制御可能であること、(iv)以上の課題を合わせて強磁性転移温度以下の電子温度で実現可能であること、が必要であると考えられる。現在までにこれらの課題を順に実行してきた。現時点で(i)～(iii)の個々の課題は達成されている。今後、格子型ゲートによってポテンシャルが変調された試料の円偏光依存発光特性を電子数が量子ドットあ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

2つのドットを一次元量子細線と結合させて、それぞれのドット中に局在したスピンを相互作用させることを試みた。今回我々は、下左図のSEM写真に示すように、AlGaAs/GaAs 2次元電子ガス（深さ 90nm）の表面にショットキーゲートをつけた2重量子ドット - 量子細線結合系試料を作製し、100mK 以下で電気伝導度の交流ロックイン測定 ($V_{sd}=3\mu V$) を行った。4ヶ所のオーミック電極を使い分けることにより、細線のみを流れる電流、あるいは細線を経由してドットを流れる電流などを個別に、あるいは同時に測定することが可能である。下右図は、左右のドットのプランジャーゲート V_{pL}, V_{pR} を変えながら測定した細線の伝導度 G をグレースケールプロットしたものである（黒： $G=2e^2/h$ 、白： $G=3e^2/h$ ）。ドットの出口は V_{dL}, V_{dR} で完全に閉じて、ドット電流 I_{DL}, I_{DR} が流れない条件で測定を行っている。それぞれのドットが奇数個の電子を含んでいると考えられるゲート電圧領域で Fano-近藤効果による伝導度の減少が観測され、特に両方のドットがともに奇数個の電子を含んでいる領域（図中矢印）では、両者の寄与が重なってさらに伝導度が小さくなっている。また、測定系の配置を変えて細線電流 I_w を観測せずに、 I_{DR} が流れる条件で右側のドットを近藤状態にしたときには、左側のドットに印加するゲート電圧 V_{pL} によって、右側のドットの近藤効果を非局所的に制御できることもわかった。このような非局所制御は RKKY 相互作用に基づくものである可能性が高いが、今後デバイス構造を工夫することにより、この非局所制御のメカニズムの検証を目指す。



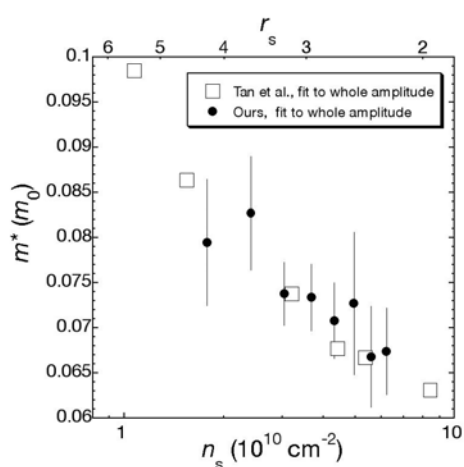
(2) 量子ドット列の光学特性

電子線リソグラフィを用いて、ドット間 100 nm 周期から 500 nm 周期の格子型ゲート構造を GaAs 量子井戸構造上に作成し、その発光特性を評価した。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った。電子密度の評価には、光シュブニコフドハース振動と電子占有数 ν が整数や分数の時に見られる光遷移エネ

ルギーの異常を用いた。この試料表面に格子状ゲート構造を形成することを想定して、表面ゲート構造と裏面ゲート構造の両方を形成した試料を用いてその特性を明らかにした。

3 T以上の磁場領域において、バックゲート電圧によって発光特性の電子密度依存性を測定することにより、分数占有率において発光エネルギーに異常が見られることを示した。分数量子ホール効果が比較的低磁場において観測されたことは、我々の試料が低電子密度領域でも十分高い電子移動度を持っている証であり、ドット間電子相互作用に起因する現象の観測へ向けて実現可能性が増したと考えられる。従来、報告されている発光ピークの他にさらに低エネルギー側に新たなピークが観測された。このピークは分数占有率に依存して遷移エネルギーと発光強度が変化することが観測された。この結果はこの新たに観測されたピークが分数電荷荷電励起子であることを示唆している

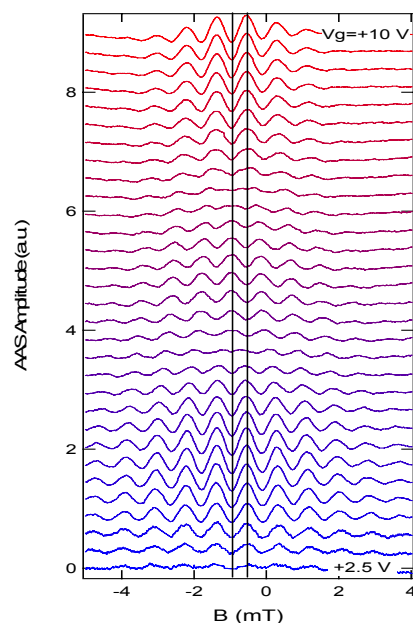
低磁場（約1 T以下）において、有効質量の電子密度依存性を測定し、低電子密度領域で有効質量が増大することを示した。シュブニコフドハース振動の温度依存性から電子の有効質量を見積もり、発光ピークから電子-正孔換算質量の増大を示した。この結果は、電子間相互作用および電子-正孔間相互作用が有効質量に影響を与えていることを示す。



電子の有効質量の電子密度依存性

(3) スピン軌道相互作用を用いたスピンの回転制御

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。スピン軌道相互作用はキャリアに有効な磁場として作用するため、この有効な磁場を軸としてスピンは歳差運動を行う。スピン軌道相互作用の制御可能な InGaAs 二次元電子ガスを設計するとともに、微細加工により多重スピン干渉ループ構造を作製し、AAS振動のゲート電圧依存性を調べた（右図）。AAS振動は、時間反転対称な干渉効果であり、電子軌道による位相変化による干渉は無視でき、スピンの位相干渉によりその振幅が変化する。右の結果は、弱反局在から求めたスピン軌道相互作用のゲート電圧依存性とコンシステントであり、キャリアスピンの歳差回転角度がゲート電界により制御できることを示している。



AAS振動のゲート電圧依存性

3. 研究実施体制

「スピン伝導特性」グループ

①研究分担グループ長：新田 淳作（東北大学大学院工学研究科、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、スピンスピン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。

「スピン光特性」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（原著論文）発表

- F. E. Meijer, A. F. Morpurgo, T. M. Klapwijk, and J. Nitta
“Universal spin-induced time reversal symmetry breaking in two-dimensional electron gases with Rashba spin-orbit interaction”, Phys. Rev. Lett. **94**: 186805 (2005).
- J. Ohe, M. Yamamoto, T. Ohtsuki T, and J. Nitta
“Mesoscopic Stern-Gerlach spin filter by nonuniform spin-orbit interaction” Phys. Rev. B **72**: 041308 (2005).
- A. K. M. Newaz, W. Song, E. E. Mendez, Y. Lin, and J. Nitta
“Shot-noise characteristics of triple-barrier resonant-tunneling diodes”, Phys. Rev. B **71**: 195303 (2005)
- J. Nitta and M. Steiner
“Semiconductor/ferromagnet hybrid devices to probe magnetisation states in microstructured NiFe rings” IEE PROCEEDINGS-CIRCUITS DEVICES AND SYSTEMS **152**: 297-300 (2005)

- J. Nitta and M. Steiner
 “Magnetization properties of microstructured NiFe rings investigated using semiconductor/ferromagnet hybrid structures” *Journal of Superconductivity* **18**, 331-334 (2005).
- M. Yamamoto, J. Ohe, T. Ohtsuki, and J. Nitta
 “Spin-polarization in a 3-terminal conductor induced by Rashba spin-orbit coupling” *PHYSICA E* **29**: 490-494 (2005)
- K. Matsuda, T. Saiki, S. Nomura, and Y. Aoyagi
 "Local density of states mapping of a field-induced quantum dot by near-field photoluminescence microscopy", *Appl. Phys. Lett.* **87**, 043112 (2005).
- M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi,
 "Photoluminescence measurements in Be-d-doped back-gated quantum well", *Surf. Science*, **583**, 94-99 (2005).
- S. Nomura,
 "Detecting spin polarization of electrons in quantum dot edge channels by photoluminescence", in "Realizing Controllable Quantum States", eds. H. Takayanagi and J. Nitta, (World Scientific Publishing, New Jersey, 2005) pp. 457.
- S. Nomura, M. Yamaguchi, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, H. Takayanagi, T. Saku, and Y. Hirayama,
 "Negatively charged excitons in a back-gated undoped heterostructure", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G.Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 1162.
- S. Nomura and Y. Aoyagi,
 "Optical detection of spin polarization of electrons in quantum dot edge channels", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G.Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 571.
- M. Yamaguchi, S. Nomura, D. Sato, T. Akazaki, H. Tamura, and H. Takayanagi,
 "Magneto-optics in Be-d-doped GaAs quantum wells with a back gate", *Physics of Semiconductors*, Ed. J. Menendez, and C.G.Van de Walle, (American Institute of Physics, New York, 2005) pp. 397.
- H. Tamura and L. I. Glazman,
 “Tunable Kondo Screening in a Quantum Dot Device”, *Phys. Rev. B* **72**, 121308 (R) (2005).

(2) 特許出願

H17 年度出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 6 件)