

量子ドット中のキャリアスピン操作

竹内 淳

早稲田大学 理工学部

1. 研究のねらい 電子のスピンは、人為的に操作しうる新しい自由度になる可能性があります。とくに量子ドット中では三次元量子閉じ込めによって、コヒーレントにスピンをナノ秒間維持させられるため、「情報としてのスピン」を記憶させたり演算させる場を利用できる可能性があります。本研究では、量子ドット中でのスピンの振る舞いや、隣接するドットの間でのスピンの移動や、相互作用によるスピンの反転操作を調べ、スピンという未開拓の自由度を将来の工学応用、とくに量子コンピューティングなどの情報処理に利用することを目指します。

2. 研究成果と考察

半導体量子ドット間の反強磁性結合による電子スピンの反転

半導体中の電子スピンを操ることが可能になれば、新しい自由度が一つ手に入ることになり、新しい応用の可能性が開けます。特に、3 次元的に電子を閉じ込めるナノ構造である量子ドットに電子を注入してコヒーレンス時間を長くし、スピン間の相互作用を制御できれば、量子情報処理の可能性が生まれます。スイスの D. Loss らは、隣接するドットのスピンドうしで交換相互作用を制御することにより量子コンピューティングを実現できると提案し、大きな注目を浴びてきました。しかし、これまでドット間のスピンの相互作用は実験的にはほとんど調べられていませんでした。

本研究では、量子ドット間のスピんに反強磁性的秩序が生じ、スピンの反転過程を直接的に観測することに成功しました。MBE成長により縦方向に量子力学的に結合した InAlAs/InAs 半導体量子ドットの作製に成功し、加えて時間分解測定技術により、円偏光により生成されたスピンの InAs 量子ドット中では 80ps 前後で反転する過程を実測しました。さらにこの反強磁性秩序が 50-80 K 以下の温度で存在することを明らかにした。人工的なナノ構造で、交換相互作用によるスピンの反転が可能になったことは、今後のスピンの応用可能性を広げるものと期待できます。交換相互作用の大きさは、ドット間の距離を小さくするほど大きくなるので、ナノ構造の作製技術の向上によって、今後室温での観測ならびに応用が予想されます。

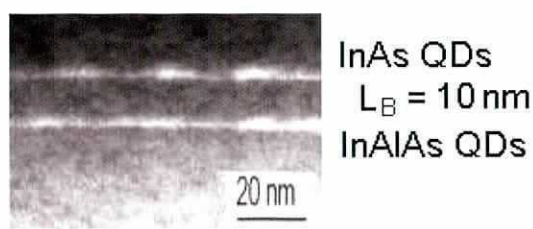


図1. 結合量子ドット断面の電子顕微鏡像。下部の $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットの上部に InAs 量子ドットが垂直に並んで形成されている。

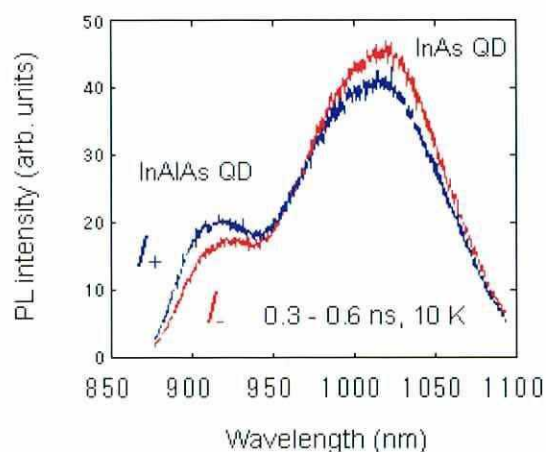


図2. 非対称結合量子ドットの PL スペクトル。光励起後 0.3-0.6 ns 間の時間積分。励起レーザーと同じ円偏光 (I_+) と反対の円偏光 (I_-) の PL カーブの差がスピン偏極に相当する。

高均一量子ドット中のスピン緩和

従来の量子ドットでは、多数のドットの大きさが均一ではないため、量子化エネルギーが異なるという欠点がありました。高均一量子ドットでは、各エネルギー準位からの発光スペクトルがきれいに分離されるため、単一ドットに近い物性情報を光学的な時間分解計測によって得られるという利点があります。そこで本研究では、スピン緩和時間の励起光強度依存性、温度依存性を測定し、量子ドット内でのスピン緩和のメカニズムを調べました。

その結果、スピン偏極の緩和時間は励起光強度に依存しないことがわかりました。一方、温度依存性は 10 K から 130 K の間で Fig.3 のように大きく変化しました。量子ドットにおけるスピン緩和メカニズムとしては、量子ドットの 0 次元構造により抑制されると予想される D'yakonov-Perel' (DP) 効果の他に、キャリア濃度依存性を持つ Bir-Aronov-Pikus (BAP) 効果、や温度依存性を持つ Elliott-Yafet (EY) 効果があります。実験結果から、10 K においては、BAP 効果はスピン緩和メカニズムとして支配的でないことが明らかとなり、EY 効果が候補として残りました。EY 効果は、キャリア散乱によってスピンの反転するメカニズムですが、この大きな温度依存性から、音響フォノンが関与している可能性が高いと考えられます。そこでスピン緩和レートが音響フォノンの放出レートに比例すると仮定したところ、Fig.3 に示すように音響フォノンのエネルギーを 2.7 meV としたとき、最も良いフィッティング結果が得られました。本研究によりスピン緩和の起源についての重要な知見が得られたので、今後、スピン緩和時間の制御のための手がかりが得られるものと期待されます。

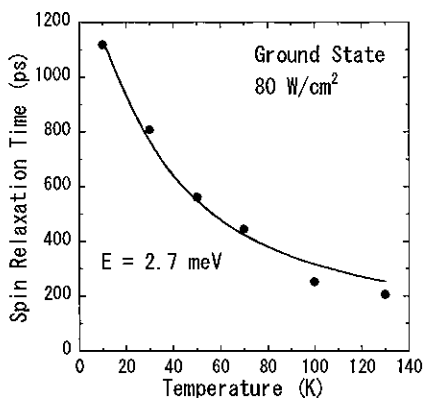


図3. 量子ドットのスピン緩和時間の温度変化. 10-130Kの間に一桁近く変化する。エネルギー2.7meVの音響フォノン散乱を仮定するとこの依存性をよく説明できる。

3 謝辞 結合量子ドットの作製では、富士通研究所の中田義昭氏、横山直樹氏、また、高均一ドットの作製では電通大の山口浩一助教授の御協力を得ました。また、時間分解測定全般にあたっては、早稲田大学黒田剛正助手(現京大)、スピン緩和メカニズムの解析では、京都工繊大の高河原俊秀教授の御助力を得ました。

4 主な論文

“Spin relaxation dynamics in highly uniform InAs quantum dots”,

A. Tackeuchi, R. Ohtsubo, K. Yamaguchi, M. Murayama, T. Kitamura, T. Kuroda, and T. Takagahara, Appl. Phys. Lett. 84 (2004) pp.3576-3578.

“Electron Spin Flip by Antiferromagnetic Coupling between Semiconductor Quantum Dots”,

A. Tackeuchi, T. Kuroda, Y. Nakata, M. Murayama, T. Kitamura and N. Yokoyama, Jpn. J. Appl. Phys., 42, Part 1, 7A (2003) pp. 4278-4281.

「半導体量子ドット間の反強磁性結合による電子スピンの反転」,

竹内 淳, 黒田剛正, 中田義昭, 横山直樹

日本物理学会誌, 第 57 巻 12 号 (2002) 904.

5 その他 第 26 回応用物理学会論文賞 JJAP 論文賞(2004 年度)受賞