

研究課題別評価

1 研究課題名：量子ドット中のキャリアスピン操作

2 研究者氏名：竹内 淳

3 研究の狙い：

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に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。

4 研究成果：

半導体中のキャリアのスピンを自由に操れば、我々は新しい自由度を一つ手に入れることになる。この自由度を応用すれば、新しい機能を持つデバイスを実現する可能性が生まれる。半導体の量子井戸中では電子のスピン偏極は室温で数ピコ秒から数十ピコ秒で緩和して消えてしまうため、観測は容易ではなかった。しかし、時間分解測定技術の進歩により、1990 年ごろから明瞭に電子のスピン偏極を観測できるようになった。^{1,2)}この 10 年あまりで、化合物半導体の中でもっとも代表的な GaAs 系の量子井戸中でのスピンの緩和過程はほぼ明らかになった。^{3,4,5,6)}

量子ドットは、3 次元的に電子波が閉じ込められた構造で、理想的には量子力学の教科書が教えるとおり、離散的なエネルギー準位が形成される。エネルギーの離散化などにより、量子井戸で支配的であったスピン緩和メカニズムが量子ドット内では抑制され、1 ナノ秒より長いスピン緩和時間が観測されている。^{7,8)}応用上は、量子ドット一個に電子一個を閉じ込め、電子スピンの向きをデジタル情報の 0 と 1 に対応させれば、情報処理の可能性が生まれる。その場合、外部入力によるスピンの操作は、スピン緩和時間（スピンのコヒーレンス時間）より速くなければならない。

4. 1. 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ばらつくという欠点があった。このためドットの集団をフォトルミネッセンスで分光計測すると、あるドットの基底準位からの発光と別のドット第一励起準位からの発光エネルギー的に混じるという欠点があった。しかし、現在、電通大の山口らにより極めて高均一な量子ドットの作製が可能になっている。⁹⁾山口研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る。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た。

サンプルは Stranski-Krastanov モードにより GaAs 層上に InAs 量子ドットを成長し、GaAs 層で埋め込んだ高均一量子ドットである。⁹⁾ 図 1 に GaAs のバンド端を円偏光励起した場合のフォトルミネッセンス (PL) スペクトルを示す。基底準位の PL 半値幅は 23 meV であり、基底準位からの発光と第二準位からの発光が明瞭に分離されている。この分離により各準位の発光再結合時間やスピン緩和時間を個別に解析できる。

量子ドットにおけるスピン緩和メカニズムとしては、Bir-Aronov-Pikus (BAP) 効果¹⁰⁾、D'yakonov-Perel' (DP) 効果¹¹⁾や Elliott-Yafet (EY) 効果^{12,13)}が考えられる。この内、DP 効果と EY 効果は、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。BAP 効果は、電子と正孔の交換相互作用によってスピンの反転するという効果であり、キャリア濃度が大きいほど強く作用すると考えられている。そこで、まず、スピン緩和時間の励起光強度依存性を測定した (図.2,10K)。

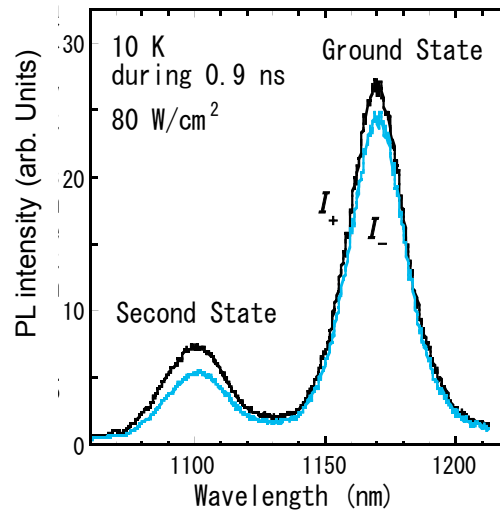


図 1. 高均一量子ドット的光ルミネッセンススペクトル。
光励起後0.9ns間の時間積分。黒と灰色のカーブは、それぞれ
同じ円偏光(I_+)と反対円偏光(I_-)の光ルミネッセンスを表す。

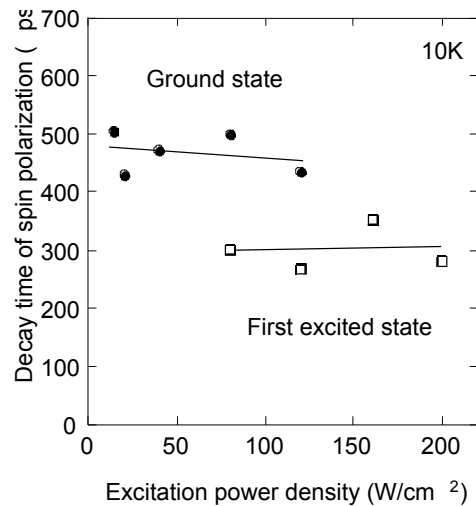


図 2. 基底準位と第一励起準位のスピン偏極の緩和時間の励起光強度依存性。励起光強度を変えてもほとんど変化がないことから、BAP 効果が効いていないことがわかる。

図.2 から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る。よって 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と考えられる。

残された候補には、EY 効果がある。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ある。EY 効果は、キャリアの散乱時間やバンドギャップなどの温度に依存するパラメータを含むので、スピン緩和時間は温度に依存すると考えられる。図 3 に励起光強度 80 W/cm^2 でのスピン緩和時間の温度依存性を示す。図 3 のようにスピン緩和時間は 10 K から 130 K の間で大きく変化する。同様の大きな温度依存性は InGaAs 量子ディスクでも観測されている¹⁴⁾。この大きな温度依存性から、音響フォノンが関与した EY 効果的なスピン緩和が、支配的である可能性が高い。そこで以下のように、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、図 3 のカーブフィッティングを行った。

$$\frac{1}{\tau_s} \propto 1 + \frac{1}{\exp(E/kT) - 1}$$

その結果、図 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た。音響フォノン散乱のエネルギーとしては妥当だが、今後スピンスプリッティングエネルギーとの対応を調べる予定である。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る。

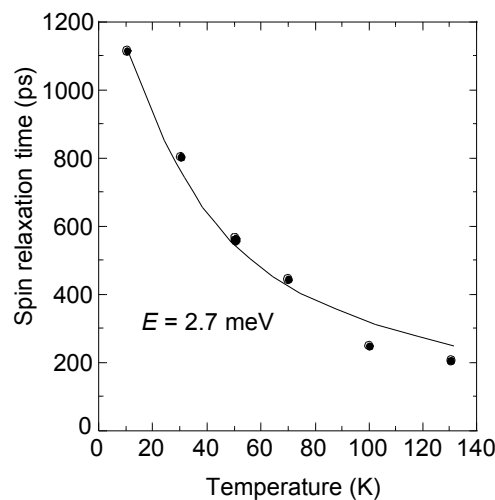


図 3. 量子ドットのスピン緩和時間の温度変化. 10-130K の間で一桁近く変化する。エネルギー 2.7 meV の音響フォノン散乱を仮定するとこの依存性をよく説明できる。

4. 2. 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

4. 2. 1. はじめに

バーゼル大の D. Loss らは、ドット間の交換相互作用を使った量子コンピューティングを提案しているが、¹⁵⁾その提案によれば、隣接するドット間の交換相互作用の大きさを制御することによって、論理動作を実現する。しかし、半導体の量子ドット間で、電子スピンの反転が起こるほど大きな交換相互作用が働くかどうかの実験的検証は従来存在しな

った。理論的には、北大の武藤らがハイトラー・ロンドン近似に基づいて交換相互作用の計算を行い、ドット間で反強磁性結合が形成されること、また、ドット間距離 6 nm の単純立方格子ではネール温度が 300K を越える可能性があることを報告している。¹⁶⁾ あるドットの電子スピンの操作によって隣接するドットの電子スピンを制御できれば、量子コンピューティング以外にも応用の可能性が広がることになる。また、非磁性の半導体量子ドット間で反強磁性結合が形成されるかどうかは、基礎物理学の観点からも極めて興味深い。本研究では、結合した半導体量子ドット内での初めての反強磁性結合の観測^{17,18)}について報告する。反強磁性の形成によってスピンの 80ps 前後に反転する過程が、時間分解フォトルミネセンス測定で直接的に観測された。

4. 2. 2. 結合量子ドット構造と交換相互作用の計算

サンプルには、垂直に並んだ結合量子ドットを用いた。ここでの「結合」は、それぞれのドットの電子の波動関数がもう一方のドット内に染み出していることを意味する。図 4 に、サンプルの横断面の透過型電子顕微鏡(TEM)像を示す。下側の量子ドットは分子線エピタキシー法によって、GaAs 層の上に $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ を成長させたもので、上側の量子ドットは下層の $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ ドットを GaAs 層で埋め込んだ後、その上に InAs を成長させたものである。GaAs と InAs や InAlAs の格子定数の違いから、界面エネルギーが小さくなるように InAs や InAlAs が点状に固まり、ドット構造が自然形成される。一方のドットにのみ Al を入れて $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ ドットにしたのは、一方のドットのバンドギャップを大きくするためである。測定では、両者のドットからのフォトルミネッセンスからスピン偏極の大きさを求める。この構造では二種類のドットのバンドギャップが異なるため、フォトルミネッセンスの波長が異なり、どちらのドットの発光であるか区別できる。

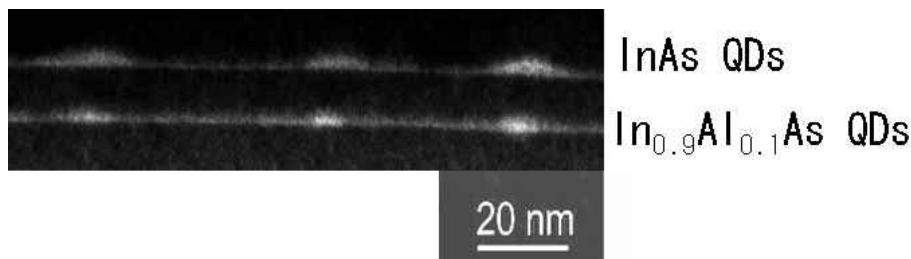


図 4. 結合量子ドット断面の電子顕微鏡像。

下部の $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットの上に InAs 量子ドットが垂直に並んで形成されている。

TEM の暗視野像から求めた非対称結合量子ドット A と非対称結合量子ドット B の GaAs 層の厚さ L_B はそれぞれ 10 nm と 8 nm である。ここでの厚さは、InAlAs ドットの頂上から InAs ドットの底までの距離である。ドット密度は、約 $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ であった。量子ドットを二層以上積層させる場合、GaAs 層の厚さが 13 nm 以下の場合には 90%以上の確率で上下方向にそろことが知られている。TEM 像から、見られるように、上部の InAs 量子ドットは $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットの上に並んで形成されている。なおレファレンスサンプルとして二層構造ではない独立した InAlAs 量子ドットと InAs 量子ドットも別に成長した。

ドット間交換相互作用の大きさについては、武藤らによるハイトラー・ロンドン近似の計算に従って大きさを見積もった。ドットの結合方向である z 方角では矩形の井戸型ポテンシャルを仮定し、 xy 平面中は放物線型のポテンシャルを仮定した。正孔のスピンは Γ 点以外ではよい量子数ではないので、スピン緩和時間は電子スピンよりかなり速いと予想される。¹⁹⁾したがって、実験で観測される時間領域では、正孔のスピン偏極は存在しないと

仮定し計算に含めなかった。実際の InAs ドットの直径と InAlAs ドットの直径は異なり、サンプル A と B でも違いが認められるが、計算では簡単のために両方のドットの xy 平面中の直径は 14nm であると仮定した。各ドットの電子の基底準位の深さは、次節で述べるフォトルミネッセンス測定の結果²⁰⁾を考慮して求めた。計算に用いた InAs ドットの基底準位と GaAs 層の伝導帯底の間のエネルギー差は 140 meV (z 方向の閉じ込めエネルギー分だけだと 160 meV)、In_{0.9}Al_{0.1}As 量子ドットと GaAs 層の伝導帯底のエネルギー差は、70 meV とした。なお、武藤らの計算では、簡単のために正孔をドットの中に局在した点電荷として扱っているが、我々の計算では正孔の波動関数の広がりも考慮した。

図 5 に計算で求めた交換相互作用の大きさ J_{eff} を、バリア層厚の関数としてプロットした。反強磁性のシングレット状態と強磁性のトリプレット状態間のエネルギー差はこの 2 倍の $2J_{\text{eff}}$ である。障壁厚さ 6 nm, 8 nm, 10 nm の $2J_{\text{eff}}$ はそれぞれ -1.61 meV, -0.34 meV, -0.07 meV であり、温度に換算すると 18.7 K, 3.9K, 0.8K に相当する。したがって、反強磁性結合は低温で観測可能であると予想される。

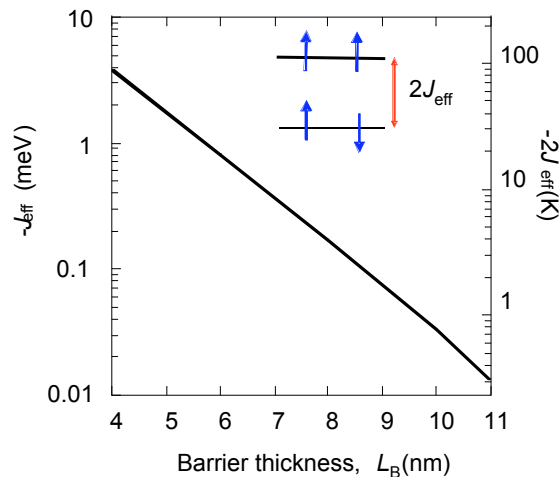


図 5. 交換相互作用の大きさ J_{eff} のバリア層厚依存性。

4. 2. 3. 時間分解測定

スピン偏極の過渡的な振る舞いはスピン依存のフォトルミネッセンス測定によって時間分解測定した。サンプルは、10K と 300K の間で温度可変のクライオスタットにセットした。光源には、繰り返し 100MHz で時間幅 100fs の光パルスが発生する Ti サファイア・レーザーを用いた。各量子ドットのスピン偏極の生成と観測には、キャリアスピンと円偏光の間の遷移選択則を利用した。⁴⁾円偏光の回転電場は、スピン軌道相互作用により実効的な磁場の役割をはたし、光軸と平行か反平行のスピンキャリアを光励起する。このため励起光は 4 分の 1 波長板を使用して、右円偏光とした。励起光はサンプル表面に垂直に入射させ、サンプル表面にほぼ垂直なルミネッセンス光が集められた。励起レーザー波長は GaAs のバンドギャップ近傍に合わせた。GaAs では、右円偏光の照射によって、重い正孔準位からはダウンスピンの電子が励起され、軽い正孔準位からはアップスピンの電子が励起される。重い正孔と軽い正孔準位から伝導帯への遷移の割合は 3 対 1 なので、バルク GaAs 中の電子のイニシャルのスピン偏極率は 50% である。ここでスピン偏極率は、 $(n_+ - n_-) / (n_+ + n_-)$

で定義されており、 n_+ と n_- は、それぞれアップスピンとダウンスピンのキャリア密度である。GaAs 層中に生成されたスピンのそろったキャリアは、スピン緩和しながら量子ドット中へエネルギー緩和し、基底準位で発光再結合する。正孔のスピン緩和は十分早いと考えられるので、電子のスピン偏極が測定できる。このルミネッセンスの円偏光成分を検出するために、4 分の 1 波長板(CVI ACWP シリーズ)と偏光子を用いた。集光された光は、分光器を経て、ストリークカメラ(浜松ホトニクス C4334-04)で測定された。この測定系の最高時間分解能は 15ps である。

4. 2. 4. 実験結果と議論

図 6 は光励起後の 0.3-0.6ns 間を時間積分した PL スペクトルである。平均の励起パワー密度は、 $2 \times 10^2 \text{ W/cm}^2$ である。 $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットと InAs 量子ドットは、910nm と 1020nm にピークがある。黒いカーブと灰色のカーブは、励起光と同じ円偏光(I_+)と、反対の円偏光(I_-)の PL 強度を示す。黒いカーブと灰色のカーブ間の違いがスピン偏極に相当する。

GaAs 量子井戸では、正孔のスピン緩和時間は電子より非常に短い値が測定されている。^{2,21-23)}たとえば Damen らは、²⁾正孔のスピン緩和時間を 4ps、電子 150ps、励起子 50ps と報告している。したがって、我々が観測したスピン偏極も、電子スピンあるいは励起子スピンによると考えられる。非対称結合量子ドットでは、910nm のピークの相対的な PL 強度は、1020nm のピークより弱い。これは、 $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットから InAs 量子ドットへキャリアがトンネルにするためである。トンネル時間は、Wentzel-Kramers-Brillouin 近似に従ってバリア層幅が薄くなるほど早くなる。²⁴⁾ $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットから InAs 量子ドットへの電子のトンネル時間は、 $L_B = 10\text{nm}$ と $L_B = 8\text{nm}$ で、それぞれ 850ps と 360ps であった。ちなみに、このトンネル過程は非共鳴トンネルであり、InAlAs ドットの基底準位から InAs ドットの基底準位へのエネルギー緩和はフォノン散乱によって支配されるが、量子準位の離散化によりフォノン散乱が抑制され、量子井戸間の非共鳴トンネル時間より約一桁遅くなる。

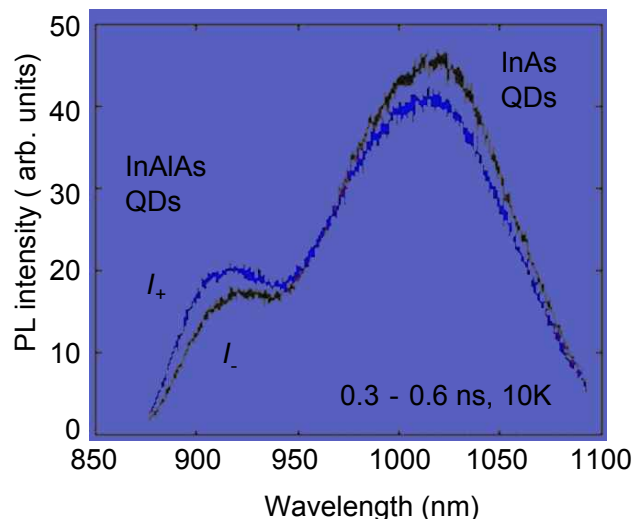


図 6. 非対称結合量子ドットの PL スペクトル。光励起後 0.3-0.6 ns 間の時間積分。励起レーザと同じ円偏光(I_+)と反対の円偏光(I_-)の PL カーブの差がスピン偏極に相当する。

このスペクトルの最も興味深い特徴は、波長 1020nm 付近で I_+ は I_- より大きく、910nm では逆に小さいことである。これは、910nm と 1020nm のスピンの偏極が反対であることを示している。すなわち、反強磁性秩序が、非磁性の半導体の結合量子ドットに引き起こされた直接的な実験的証拠になっている。温度を上げると磁気秩序は減少すると予想されるが、これを確認するために、我々は 10~100K まで温度を変えて測定した。反強磁性的振る舞いは非対称結合量子ドット A と非対称結合量子ドット B の両方で 50K と 80K の間で消えた。

反強磁性が形成される過程での過渡的な振る舞いを図 7 に示した。図は波長 910 nm 付近と波長 1020 nm 付近のスピンの偏極の時間変化である。光励起直後の最初のスピンの偏極は、InAs 量子ドットより $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットの方が大きい、向きは両方とも同じである。非対称結合量子ドット A 中の $\text{In}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$ 量子ドットの初期の偏極率は 40% であり、InAs 量子ドットの初期のスピンの偏極率は 20% であった。この初期のスピンの偏極率の差の起源は明らかではないが、基底準位のエネルギー深さが異なるため、GaAs 層の伝導帯底からのエネルギー緩和の間に電子のスピンの緩和を起こす散乱回数が異なる可能性がある。図 4 に見られるように、InAs 量子ドットのスピンの偏極は、80 ps 程度で反転する。初期のスピンの偏極率 S_A と S_B が異なる ($S_A > S_B$ とする) 二つのドットで、交換相互作用によるスピンの反転が同じ確率で起こるとすると、磁気秩序形成後のスピンの偏極率は $(S_A - S_B) / 2$ と $(S_B - S_A) / 2$ となり、見かけ上、一方のドットにのみ反転が観測される。

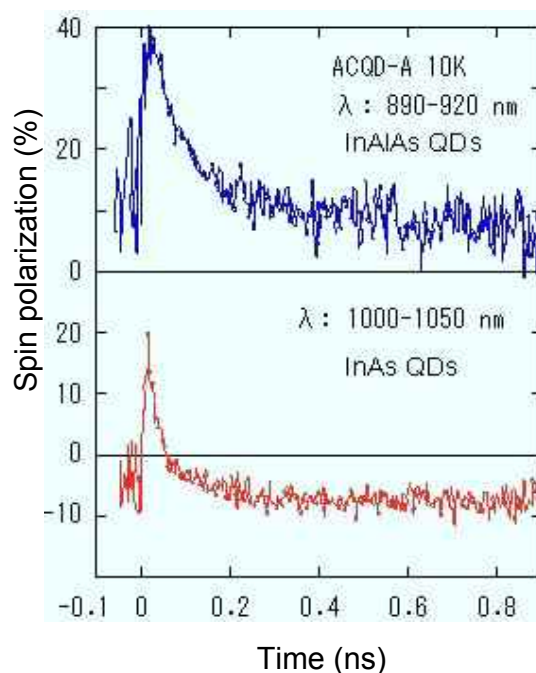


図 7. InAlAs 量子ドット(波長 890-920 nm)のスピンの偏極率の経時変化と
InAs 量子ドット(波長 1000-1050 nm)のスピンの偏極率の経時変化

InAs 量子ドットの反転後のスピンの偏極率は光励起後 0.8 ns で最大になる。その後、反転したスピンの偏極は緩和する。光励起後 0.8~2 ns 間の緩和に単一指数関数近似を用いると、10 ns のスピンの緩和時間が得られた。同じ時間領域の InAs 量子ドットのスピンの偏極は、12 ns のスピンの緩和時間を与える。PL 光の強度が弱くなる時間領域で得られた緩和時間なので信

頼性は若干劣るが、これらの長い緩和時間は、独立した InAs 量子ドット⁷⁾中の 1.2 ns のスピン緩和時間と対照的である。反強磁性秩序下では、交換相互作用によるスピンの整列が、他のスピン緩和メカニズムによる減少を償うことを示している。応用上は、ドット内にホールが存在せず、電子の寿命が再結合時間に制限されない構造にすれば、反強磁性秩序下でスピンを情報として保存することが可能である。

4. 2. 5. まとめ

本研究では、量子ドット間のスピンの反強磁性的秩序が生じ、スピンの反転する過程を直接的に観測することに成功した。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る。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る。

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、高均ー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。

参考文献

- 1) A. Tackeuchi, S. Muto, T. Inata and T. Fujii, Appl. Phys. Lett. **56** (1990) 2213.
- 2) T. C. Damen, L. Vina, J. E. Cunningham, J. Shah and L. J. Sham, Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 3432.
- 3) A. Tackeuchi, T. Kuroda, S. Muto, Y. Nishikawa and O. Wada, Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 4680.
- A. Tackeuchi, T. Kuroda, S. Muto, and O. Wada, Physica B, **272** (1999) 318.
- 4) 竹内 淳, 和田 修, 応用物理, **66** (1997) 960.
- 5) M. Z. Maialle, E. A. de Andrada e Silva, and L. J. Sham, Phys. Rev. B **47** (1993) 15776.
- 6) Y. Ohno, R. Terauchi, T. Adachi, F. Matsukura, and H. Ohno, Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 4196.
- 7) A. Tackeuchi, Y. Nakata, R. Sasou, K. Mase, T. Kuroda and N. Yokoyama, Physica E **10** (2001) 32.
- 8) H. Gotoh, H. Ando, H. Kamada A. Chavez-Pirson, and J. Temmyo, Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 1341.
- 9) K. Yamaguchi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L1245.
- 10) G. L. Bir et al., Zh. Eksp. Teor. Fiz. **69** (1975) 1382; Sov. Phys. JETP **42** (1976) 705.
- 11) M. I. D'yakonov et al., Zh. Eksp. Teor. Fiz. **65** (1973) 362; Sov. Phys. JETP **38** (1974) 177.
- 12) R. J. Elliott, Phys. Rev. **96** (1954) 266.
- 13) Y. Yafet, Solid State Phys. **14** (1963) 1.
- 14) H. Gotoh et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) 3340.
- 15) D. Loss and D. P. Divincenzo, Phys. Rev. A. **57** (1998) 120.
- 16) S. Itoh, S. Muto, Y. Ebiko, H. Sasakura and K. Shiramine, Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L917.
- 17) A. Tackeuchi, T. Kuroda, R. Sasou, Y. Nakata N. Yokoyama, Physica B, **314** (2002) 25.
- 18) A. Tackeuchi, T. Kuroda, Y. Nakata, M. Murayama, T. Kitamura and N. Yokoyama, Jpn. J. Appl. Phys., 42, Part 1, 7A (2003) 4278.
- 19) T. Uenoyama and L. J. Sham. Phys. Rev. Lett. **64** (1990) 3070.
- 20) N. Horiguchi, T. Futatsugi, Y. Nakata, N. Yokoyama, T. Mankad and P. M. Petroff, Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) 2559.
- 21) S. Bar-Ad and I. Bar-Joseph, Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 349.

- 22) T. Kawazoe, Y. Masumoto and T. Mishina, Phys. Rev. B. **47** (1993) 10452.
 23) S. Adachi, T. Miyashita, S. Takeyama, Y. Takagi and A. Tackeuchi, J. Luminescence **72-74** (1997) 307.
 24) A. Tackeuchi, T. Kuroda, K. Mase, Y. Nakata and N. Yokoyama, Phys. Rev. B. **62** (2000) 1568.

5 自己評価：

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が当初の目標であった。極めて高均一な量子ドットを用いて、スピン緩和時間が1 ns と長いことを明らかにしたことや、量子ドット間での反強磁性結合によるスピンの反転を実証できたことなど、目標に対して一定の成果が得られた。当初の課題を越えて今後克服すべき研究課題はまだあるが、それらを解決すべく引き続き、努力したい。

6 研究総括の見解：

量子情報デバイスを実現する可能性を持つ数多くの候補物質のうち、半導体量子ドットは、電子を外から制御できること、スピン自由度を用いることによって比較的長いデコヒーレンス時間が期待できることなどの利点が予想されるが、情報操作を司ることが期待されるスピン間相互作用に関する実験的知見は貧弱であった。本研究では垂直方法に整列した2個の量子ドットを含むGaAs試料に対して時間分解ポンププローブ分光法を適用し、相互作用が理論的に予想される反強磁性相互作用であること、その強さが3 meV以上であること、などの新しい知見を得ている。半導体量子物性の基礎への重要な貢献であることは本研究論文に対して2004年度JJAP論文賞が授与されていることにもあらわれている。

量子情報デバイスに関する材料選択の議論が白熱化する中で、量子ドットのスピン物性がどの程度の潜在能力を持つかを今後の研究でさらに明らかにすることを要望したい。特に、半導体においてはさまざまな粒子間相互作用が存在し、量子位相の劣化の問題は樂觀を許さない。本研究で得られた知見から物質構造の改良への示唆を汲み取ることができればさらに良かった。全体として予想された程度の達成度と評価します。

7 主な論文等：

[論文]

竹内淳、黒田剛正、中田義昭、横山直樹

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

日本物理学会誌, 第57巻 12号 (2002) 904.

M. Murayama, R. Ohtsubo, T. Kitamura, T. Kuroda, K. Yamaguchi, and A. Tackeuchi
 “Observation of spin Pauli blocking in InAs high-uniform quantum dots”
 phys. stat. sol. (c) 0, No. 4, (2003) pp. 1145-1148.

A. Tackeuchi, T. Kuroda, Y. Nakata, M. Murayama, T. Kitamura and N. Yokoyama
 “Electron Spin Flip by Antiferromagnetic Coupling between Semiconductor Quantum Dots”
 Jpn. J. Appl. Phys., 42, Part 1, 7A (15 July 2003) pp. 4278-4281.

A. Tackeuchi, R. Ohtsubo, K. Yamaguchi, M. Murayama, T. Kitamura, T. Kuroda, and T. Takagahara,
 “Spin relaxation dynamics in highly uniform InAs quantum dots”,
 Appl. Phys. Lett. 84 (2004) pp.3576-3578.

[招待講演]

A. Tackeuchi,

“Electron spin flip in III-V semiconductor quantum confined structures”,

Ultrafast Phenomena in Semiconductors VIII (SanJose, USA, 2003 年 1 月)

[受賞]

第 26 回応用物理学会論文賞 JJAP 論文賞 (2004 年度)

論文名: Electron Spin Flip by Antiferromagnetic Coupling between Semiconductor Quantum Dots

著 者: Atsushi Tackeuchi, Takamasa Kuroda, Yoshiaki Nakata, Masahiro Murayama, Takamitsu Kitamura and Naoki Yokoyama

掲載号: Jpn. J. Appl. Phys., 42, Part 1, 7A (2003) pp. 4278-4281.