

## 論文内容の要旨

論文題目                    **Detection of spin states and spin relaxation  
in a single lateral quantum dot**

(横型単一量子ドットにおける  
スピン状態とスピン緩和の検出)

氏名     日達 研一

量子ドットとは、ドブロイ波長程度の微小領域に電子を 1 つずつ閉じ込めることのできる人工的な構造であり、その電氣的性質は、量子力学的な閉じ込めに起因するエネルギーの離散性と相互作用の効果に左右される。これを反映して、量子ドットの電気伝導特性はドットの電子配置やドットとリードとのトンネル結合、電子相関の程度に強く影響される。特に、これまで、特有のスピン配置やスピンの優れた量子性に起因して、興味深いスピン関連現象、例えば、パウリスピンブロッケードや近藤効果などが観測されてきた。

また、最近ではスピンを用いた量子情報処理を目指して、電子スピン二準位系からなる量子ビットの研究が行われている。そこでは単一の電子スピンをコヒーレントに制御、読み出すことが重要な要素とされ、これまでに、近傍の量子ポイントコンタクト(QPC)電荷計を用いた単一電子スピン読み出し、電子スピン共鳴(ESR)を原理とする電子スピンのコヒーレント操作、などが実現されている。また、量子ドットのスピンがよい量子数であることを直接示す例として、1、ないし2電子のドットでスピン緩和時間が msec 程度以上であることが確認されている。これらの結果は、量子ドットの電子スピンの、量子物性のユニークな研究対象であり、また、量子計算への応用に適することを示している。

本論文では、GaAs/AlGaAs 半導体 2 次元電子系試料表面にショットキーゲートを配置することで作製した横型単一量子ドットにおけるスピン状態・スピン緩和の検出、および電子スピン動的性質 (スピン緩和、コヒーレンス) について研究を行った。研究の前半では、比較的多電子での電子占有率が  $2 < \nu < 4$  における電子スピン状態とその磁場による遷移、電子スピン緩和、及び電気伝導との関連に焦点をあてた。その結果、量子ドットが比較的多数の電子を含む場合でも、電子スピンのよい量子数であり、またそのスピン状態が磁場と電場でよく制御できることを確認した。これらの知見に基づき、後半では、量子情報への

応用を念頭において、スピニコヒーレンスを中心とする研究、即ち単一量子ドットにおける新しいESRのスピ読み出し方法の提案と近傍のQPCによる量子ドットのスピニコヒーレンスへの影響を取り上げた。なお、本研究を通して、実験は希釈冷凍機を用いて行い、電気伝導の測定には、直流および交流の電圧源をソース、ゲートに印加して、ドレインへと流れるドット電流( $I_{\text{dot}}$ )、またはドット近傍に静電的に結合したQPCに流れるQPC電流( $I_{\text{QPC}}$ )を用いた。

まず、2種類のスピフィルターデバイスを作製した。一つは我々が開発したもので、スピフィルター用電極として量子細線のスピ分裂サブバンド状態(Device A)、他方は2次元電子ガスのスピ分裂エッジ状態の電極(Device B)を利用する。それぞれのデバイスで、電子占有率 $\nu$ が $2 < \nu < 4$ の領域でのスピ状態を特定し、また、クーロンピークの高さが量子ドットのスピ配置に依って変化することを見出した(図1a, b)。特にDevice Aでは、量子細線をスピ分裂プラトー( $n=1$ )およびスピ縮退プラトー( $n=2$ )に合わせたときの結果を比較することにより、スピ状態を決定した。その結果、 $n=2$ の細線では、ピークの高さはドットの異なるランダウ軌道間の遷移を反映するのに対して(図1c)、 $n=1$ の細線では、同一のランダウ軌道の異なるスピ状態を反映することが分かった(図1d)。得られたスピ状態の遷移は、Fock-Darwin状態と交換エネルギーを考慮した解析により、電子数が奇数個のときはスピ一重項( $|S\rangle$ )-三重項( $|T\rangle$ )遷移に、偶数個のときはスピ二重項-二重項遷移に対応させることができた(図1e)。さらに、クーロンピークの高さを解析することによって電極のスピ偏極を求めることにより、各デバイスのスピフィルター効果の特徴を抽出した。

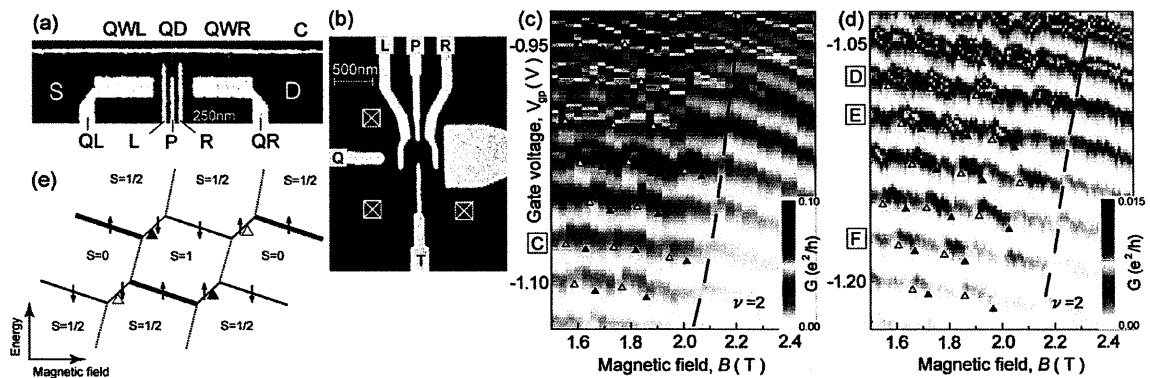


図1. 量子細線を用いたスピフィルター効果 (a)Device A, (b) Device B. (c) $n=2$ , (d) $n=1$  のときのクーロン振動のゲート電圧( $V_p$ )および磁場に対する依存性のカラープロット。(e) $2 < \nu < 4$ でのスピ配置の模式図。

次に我々は $\nu=2$ 付近で $N$ 電子( $N=10$ 程度)における $|T\rangle$ から $|S\rangle$ への緩和時間を実時間QPC電流により測定した。まず $|S\rangle$ と $|T\rangle$ が交差する磁場領域においてトンネル障壁を透過する電子の時間的挙動を測定し、 $|T\rangle$ のトンネル時間が $|S\rangle$ のトンネル時間の11倍程度となることを確認した。次に、この結果を踏まえて、ポンプアンドプローブ法によって単一電子スピ

ンの同定および緩和時間の測定を行った。 $|S\rangle$ が基底状態、 $|T\rangle$ が励起状態となる磁場領域 ( $1.25T < B < 1.29T$ )で、励起状態に上向きスピンとして入った電子が待ち時間( $t_{\text{wait}}$ )の後に、スピン緩和をして $|S\rangle$ から下向きスピンとして抜けるか、緩和をせずに $|T\rangle$ から上向きスピンとして抜けるかを調べた(図 2a)。同図で 0 msec のステップに続く電流の変化は終状態が $|S\rangle$ の場合に現れる(図 2b)。このような時間分解測定の平均を取ると、ステップ後の QPC 電流の変化分は指数関数的に減少する(図 2c)。この指数関数を 0 msec に外挿して得られる値 (図中  $A$ ) を様々な  $t_{\text{wait}}$  について測定することにより、プロットすることにより、 $|T\rangle$ から $|S\rangle$ への緩和時間を 0.3msec と見積もった(図 2d)。この結果は、比較的電子数が多い場合でも電子スピンの量子数であることを示す (従来のスピン緩和の実験は電子数 1, 2 が中心)。この  $T_1$  は $|S\rangle$ と $|T\rangle$ のエネルギー間隔  $\Delta_{ST}$  が大きくなるとともに減少する。その振る舞いはスピン軌道相互作用と結合したフォノン密度の増加で説明できることが分かった。

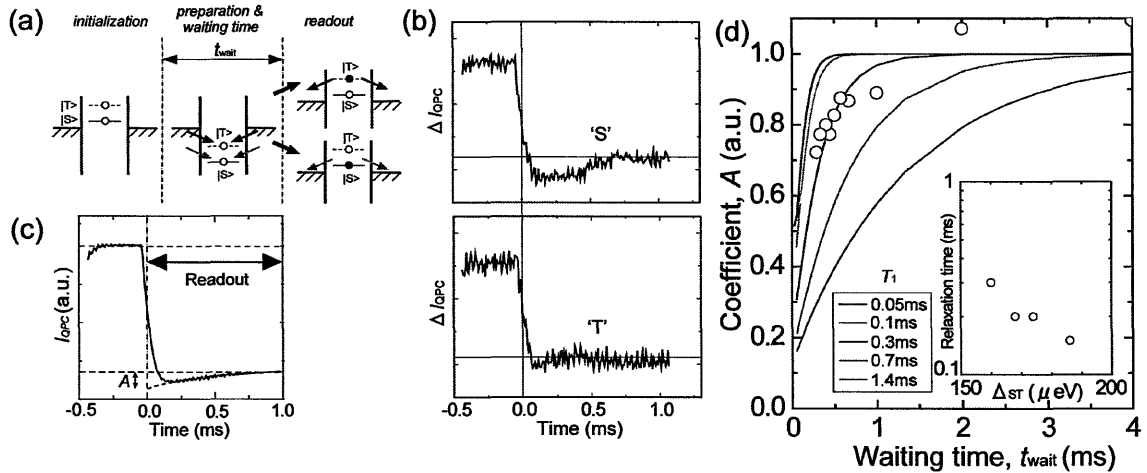


図 2. (a),ポンプアンドプローブ法を模式的に示した図。(b),(c)スピンの読み出し。readout での QPC 電流の変化(b)と 512 個の data の平均(c)。(d)ステップの大きさ  $A$  の  $t_{\text{wait}}$  依存性。実線は  $T_1$  を変えたときの計算結果。

以上の知見に基づき、我々はスピンのコヒーレンス問題に着手した。従来量子ドットの電子スピンの ESR の検出には二重量子ドットのパウリスピンブロッケードが利用されていた。我々は単一量子ドットを用いた、より簡便な ESR の検出法を提案した。そのための基礎実験として、まず基底状態(GS)と励起状態(ES)の 2 状態が関与するときの有限バイアス下での電気伝導特性を上記 Device B と同様な試料を用いて調べた。スピン上向き(下向き)のエッジチャネルがドットと大きく(小さく)トンネル結合しているとき(図 3a, b)、我々は a 図のように、伝導ウィンドー内に ES が入ると、GS のみ入った時と比べて電流が減少する負性微分磁気コンダクタンス(NDC)が現れることを確認した(図 3c)。さらに NDC の条件は、エッジ状態だけでなく、左右のトンネル結合の比に依ることを明らかにした。これらの知見をもとに理論計算を行い、GS と ES が電極と非対称に結合しているときほど( $s > 1$ )、NDC が ESR によって解除することを示した(図 3d)。

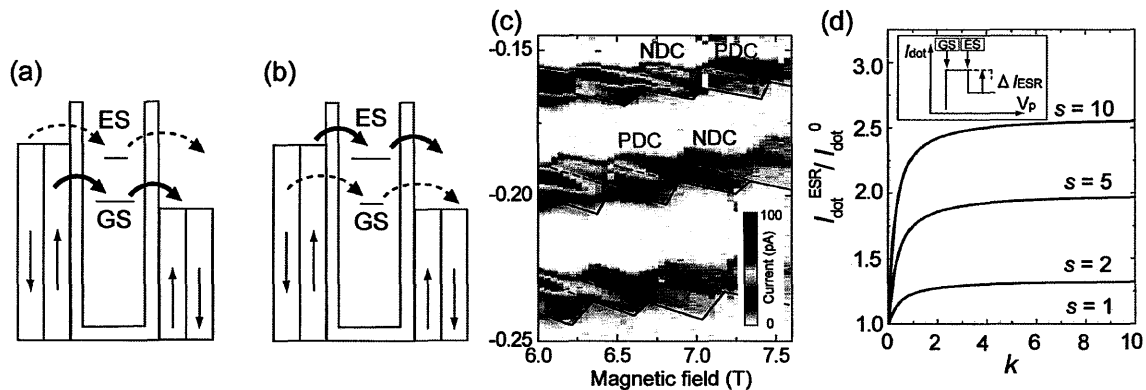


図 3. (a), (b)GS, ES とエッジ状態の結合関係を示した図。(c)ドット電流の励起スペクトル。NDC は電流ストライプ中の電流値の減少として観測される。(d)ESR が起きた時の電流変化を左右のバリアの非対称性  $k$  および結合の非対称性を表すパラメータ  $s$  の関数としたときの計算結果。

最後にドット近傍の QPC に電圧を加えたときのドット中の電子のコヒーレンスへの影響について、近藤効果を用いて調べた。QPC はドットの単一電荷、スピンを検出するのに頻繁に使われるが、一方で高電圧を印加することによる弊害も報告されている。我々はまずトンネル結合の小さいドットでクーロン振動を測定し、クーロンピークの FWHM から、QPC に電圧を印加すると電子温度が上昇することを見出した。また QPC 電圧 ( $V_{QPC}$ ) が  $|V_{QPC}| > 1\text{mV}$  でクーロンピークの高エネルギー側に小さいピークが (これについては既報)、 $|V_{QPC}| > 3\text{mV}$  ではクーロンブロッケード内で余剰電流が出現することを観測した。これらはすべて、QPC からの光子放出によるドット-電極間での光子介在トンネルで説明できる。次にトンネル結合の大きい場合のクーロン振動と近藤効果を測定し、非近藤谷でコンダクタンス ( $G$ ) の上昇 (1) と、近藤谷で  $G$  の減少 (2) をそれぞれ観測した (図 4a)。この結果をクーロン振動の熱浴温度依存性 (図 4b) と比較して、QPC 電圧をかけたときの温度上昇を定量的に見積もり、近藤谷の  $G$  の減少が QPC 電圧による電子温度  $T_e'$  の上昇で説明できることを示した (図 4c)。これは QPC 電圧による近藤コヒーレンスの減少をはじめて明らかにした実験である。

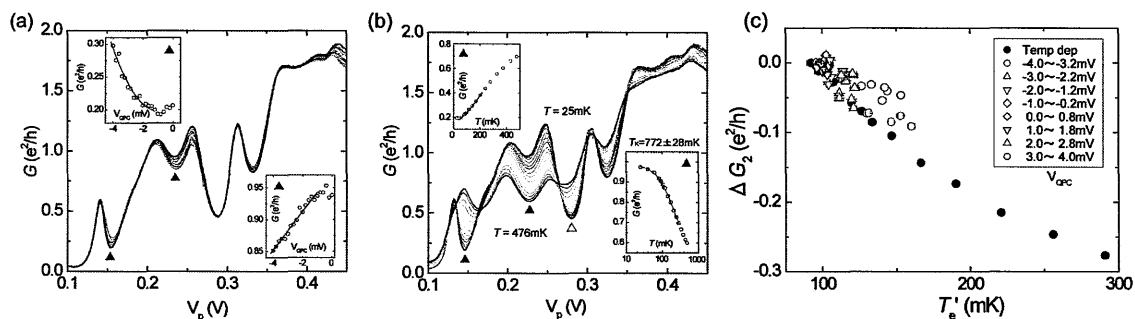


図 4.(a)QPC 電圧を  $-0.4\text{mV}$  から  $-4.0\text{mV}$  まで変化させたときの  $G$  の測定。電圧印加とともに近藤谷 ( $\blacktriangle$ ) の  $G$  減少、非近藤谷 ( $\blacktriangle$ ) の  $G$  上昇が観測される。これは (b) 近藤効果の温度依存性のグラフと一致。(c) 見積もられた電子温度  $T_e'$  に対する (a), (b) での近藤谷の  $G$  の変化。