

論文内容の要旨

論文題目 横結合型量子ドットにおける電子輸送現象

(Electron Transport in Side Coupled Quantum Dots)

氏名 大塚 朋廣

本研究は横結合型量子ドットにおける電子輸送現象を実験を通して調べたものである。量子ドットは電子を微小な領域に閉じこめた人工量子系であり、任意の加工ができるという人工系の特性を生かして、原子や分子などの自然界の量子系とは異なり、直接リードを取り付けて電気伝導により内部の状態を測定することが可能である。この伝導現象においては量子ドットに直接電子が入り出すため、量子ドットとリードとは不可分となり、その結合系が研究の対象となる。これまでの量子ドットの伝導測定においては、測定量を量子ドットを通過して流れる電流とするために、二つのリードを量子ドットに結合させる手法がよく用いられてきた。この場合、量子ドットと二つのリードの電子系との結合系を扱うことになる。しかし、結合系という視点で見て物理的に最も単純な系は、量子ドットと一つの電子系との結合系である。この系が、本研究で扱う、量子ドットが単一のリードに結合した横結合型量子ドットである。

まず、横結合型量子ドットにおける量子干渉効果であるFano効果を、電子状態の良く定まった少数電子量子ドットを用いて測定した。図 1(a)のように量子細線と呼ばれる一次元伝導チャンネルの側面に単一トンネル障壁を介して量子ドットを結合させると、量子ドットを経由する経路と経由しない経路が生じ、これらがFano効果と呼ばれる量子干渉効果を引き起こす。Fano効果による量子細線の伝導度 G_{QWR} の変化を、量子ドットの電気化学ポテンシャルを操作するゲート電圧 V_P と量子細線の幅を操作するゲート電圧 V_W の関数として

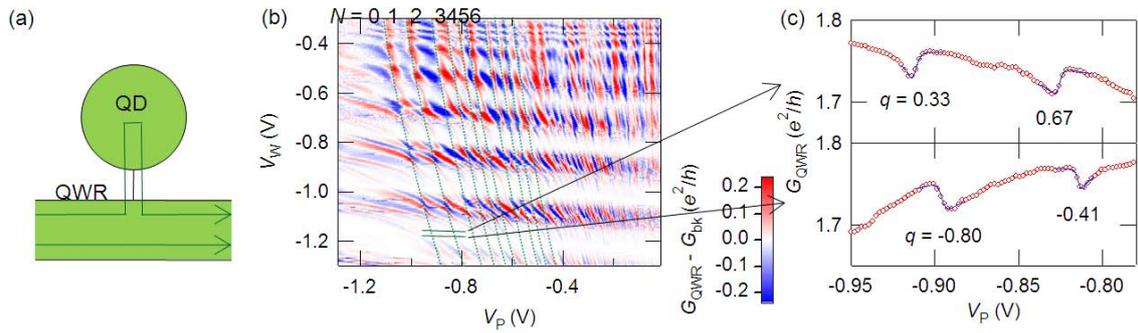


図 1 (a) 横結合型量子ドットの模式図。量子ドットを経由する経路と経由しない経路が量子干渉を引き起こす。(b) G_{QWR} の変化を V_P と V_W の関数としてプロットしたもの。図中の破線は Fano 曲線の中心を結んだものを示す。(c) 図(b)中の実線に沿って Fano 曲線をプロットしたもの。 V_W とともに Fano 曲線が変化する様子が見える。

測定した結果を図 1(b)に示す。図中の破線は量子ドットの共鳴の位置を示す Fano 曲線の中心を結んだものであり、これが量子ドット内の電子数 N が変化する V_P の値を示している。また図中の左端の領域では Fano 曲線が観測されず、 N が 0 となったことを示しており、少数電子量子ドットが実現できたことが確認された。さらに $N = 2$ と 6 の領域での Fano 曲線の中心間距離の増大は量子ドットにおける殻構造を反映している。図 1(b)中の実線に沿った Fano 曲線の形状を図 1(c)に示す。 G_{QWR} のプラトー上で V_W によって Fano 曲線の形状が変化する様子が見える。これは量子細線と量子ドットの結合部の有限幅に起因しており、実験結果を有限の結合幅を取り入れたモデル計算により再現した。

次に横結合型量子ドットにおける励起状態を、方形波電圧を量子ドットのゲートに印加する手法を用いて調べた。 V_P に方形波電圧を印加すると、図 2(a)のように量子ドットの電気化学ポテンシャルが電極の Fermi 準位に対して変化する。この際に生じる量子ドットへの電子の流出入を、静電的な効果を通して、近傍に設置した量子ポイントコンタクトの電流の方形波に同期した成分 I_{sync} の変化として測定する。ここで方形波電圧の DC オフセット V_{PDC} と振幅 V_{amp} によって電子の流入する量子ドット内の準位が変化するため、図 2(b)のように V_{PDC} と V_{amp} の関数として I_{sync} を測定すると励起状態についての情報を得られる。図中には基底状態への電子の流出入を示す浅いディップと、基底状態と軌道励起状態双方への電子の流出入を示す深いディップが生じている。ディップの浅い部分の幅が軌道励起エネルギーを反映しており、これより励起エネルギーを求めることができる。ただ実際にエネルギーを求めるには、 V_{PDC} からエネルギーへの変換係数 α が必要となる。そこでバイアス電圧 V_{bias} を印加した短い量子細線をリードとして用いることにより、 α を正確に求める手法を提案した。 V_{bias} を印加すると量子細線内は非平衡状態となり、二つの擬似的な Fermi 準位が形成される。量子ドットはこれらと結合し、それぞれの Fermi 準位に対応した I_{sync} のディップが生じる。そこで図 2(c)のように V_{bias} を変化させながら測定を行い、これをエネルギー校正の指標として用いることにより α を評価し、軌道励起エネルギーを正確に求めた。また、

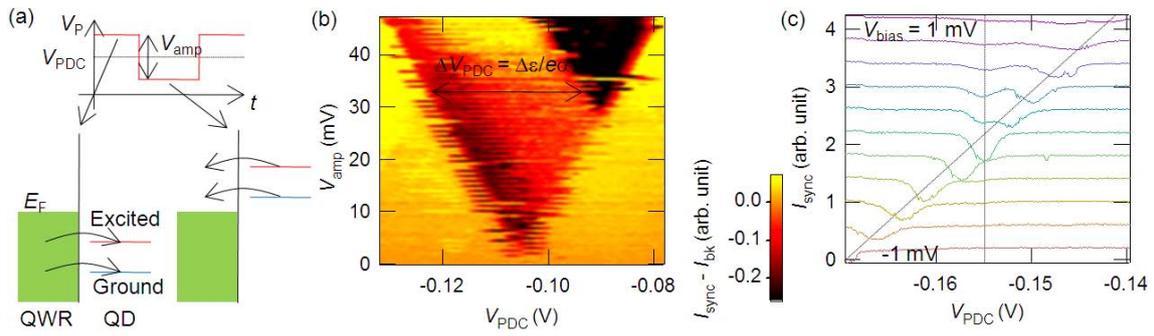


図 2 (a) 方形波電圧および量子ドットの電気化学ポテンシャルの模式図。方形波に同期した電子の流出入が起こる。(b) I_{sync} の変化を V_{PDC} と V_{amp} の関数としてプロットしたもの。基底状態への電子の流出入を示す浅いディップと、基底状態と軌道励起状態双方への電子の流出入を示す深いディップが生じている。(c) 様々な V_{bias} において I_{sync} を V_{PDC} の関数としてプロットしたもの。 V_{bias} とともに移動するディップが観測される。

この手法を磁場をかけた際のスピン励起状態の観測に適用した。Zeemanエネルギーの磁場依存性を調べ、量子ドット中でのg因子を求め、この値がこれまで報告されている値とコンシステントであることより、この手法の妥当性を確認した。

量子ドット内準位を正確に調べられるようになると、逆に量子ドット内準位を利用して量子ドットに結合しているリード内の電子状態を調べることが可能となる。特に横結合型量子ドットは正味電流の流出が完全にゼロのため、擾乱の小さい優れたプローブとして動作する。また、量子ドット中の準位がスピン状態に依存するので、このプローブはスピンに対して感度を持つ。そこで横結合型量子ドット中のZeeman分裂した準位を利用して、リード内に生じたスピン偏極を検出する手法を提案した。リードがスピン無偏極である場合には量子ドット中のアップ、ダウンスピン双方の状態へ電子が流出入するが、スピン偏極している場合は一方の状態にしか流出入しない。この違いは電子のトンネルの信号に反映される。そこで実際に磁場下でのスピン分裂したチャンネルを持つ量子細線を操作可能なスピン偏極源として用いて、横結合型量子ドットのスピン偏極の検出器として動作を調べた。図 3 に測定されたスピン偏極 P (a) および G_{QWR} (b) を V_{W} の関数としてプロットしたものを示す。 V_{W} の操作とともに P が 0 と 1 の間を振動する様子を見ること

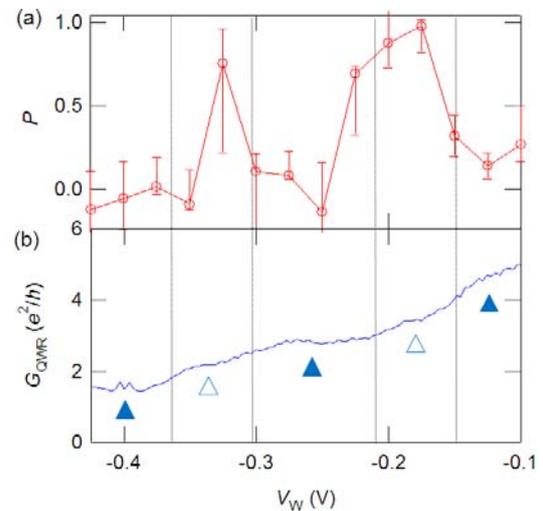


図 3 (a) P を V_{W} の関数としてプロットしたものの。 P は 0 と 1 の間を振動している。(b) G_{QWR} を V_{W} の関数としてプロットしたもの。塗りつぶし三角はスピン無偏極の幅の広いプラトーを、白抜き三角はスピン偏極の幅の狭いプラトーを示す。

ができる。また G_{QWR} との対応関係を見ると、スピン無偏極状態を示す G_{QWR} の幅の広いプラトーで P は 0 に近くなり、スピン偏極状態を示す幅の狭いプラトーで P は 1 に近づいている。これは横結合型量子ドットがスピン偏極の検出器として動作していることを示している。また、 V_w が大きい領域でも 1 に近い P が観測されており、この検出手法が量子細線内のチャンネル選択性を持つことを反映している。さらにゼロ磁場でのスピン偏極についても、量子ドット内のスピン一重項、三重項状態を用いて観測する手法を提案した。

局所的な電子状態が重要な役割を果たす系として量子Hall系がある。そこで、横結合型量子ドットを局所プローブとしてホールバーに結合させ、その内部電子状態を測定した。量子ドットへの電子のトンネルはFermi準位付近の電子状態を反映する。このためトンネルを利用してホールバー内の局所的な電気化学ポテンシャルや電子温度を調べられる。図 4 にホールバーにバイアス電圧を印加した際の電気化学ポテンシャルの変化 δ (a)、電子温度の上昇 ΔT_e (b) を磁場 B の関数として測定した結果を示す。灰色で示した量子Hall領域においては負の B において δ が 1 に近くなっており、エッジ状態が形成され、これがバイアスをかけたコンタクトと平衡にあることを示している。また B を正にすると δ が 0 となり、エッジ状態の向きが変わりグラウンドに接続されたコンタクトと平衡となることを示している。 ΔT_e がほぼ 0 であることは、量子Hall領域におけるエネルギー緩和の抑制を反映している。電子状態の場所依存性については、図中の丸で示されたホールバーの中心の量子ドットで観測された結果と、四角で示されたコンタクト近くの量子ドットで観測された結果が一致しており、量子Hall領域においてはホールバーに沿って一様な電子状態となっていることが示された。一方、非量子Hall領域においては、 δ が 0 や 1 からずれ、 ΔT_e が有限の値となっており、エネルギー緩和が生じていることを示している。場所依存性について見ると、ホールバーの中心の量子ドットにおいて観測された結果と、コンタクトに近い量子ドットにおいて観測された結果が異なっており、非量子Hall領域においては非一様な電子状態が形成されていることを示している。さらにエッジ状態におけるスクリーニングの効果についても横結合型量子ドットへの電子のトンネルの信号を用いた手法により観測し、磁場の増大とともにスクリーニングが強くなる様子を観測した。

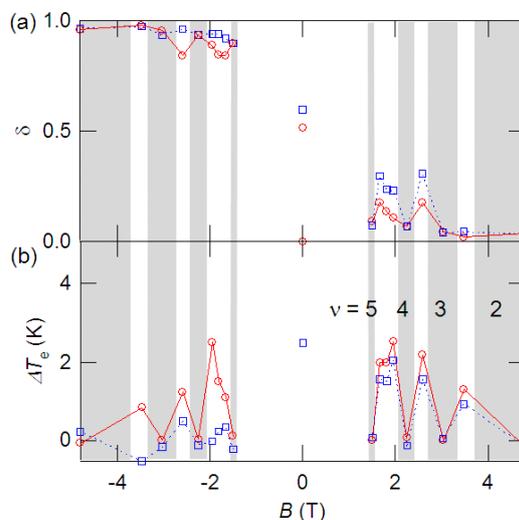


図 4 (a) δ を B の関数としてプロットしたもの。灰色の領域が量子 Hall 領域を示す。丸はホールバーの中心の量子ドットにおいて観測された結果を、四角はコンタクト近くの量子ドットにおいて観測された結果を示す。(b) ΔT_e を B の関数としてプロットしたもの。