

## 論文内容の要旨

論文題目: Electronic properties of single InAs self-assembled quantum dots

(単一 InAs 自己形成量子ドットの電氣的性質)

氏名: 五十嵐 悠一

電子を、その波長程度の微小領域に3次的に閉じ込めると、電子の運動は完全に量子化される。この様な零次元電子系は量子ドットと呼ばれ、顕著な電子間の相互作用や量子閉じ込め効果を示すことから、理論実験両面から盛んに研究されている。量子ドットには、材料や構成によって様々な種類があり、その特徴に応じた研究が行われている。大きくは、リソグラフィを駆使して作製されるトップダウン型と、結晶の歪みを種として自発的に形成されるボトムアップ型に分類される。前者では、半導体ヘテロ界面に生ずる2次元電子ガスが静電ポテンシャルによって面内に閉じ込められている。電氣的性質の研究には、多くの場合この型のドットが用いられている。一方、後者のドットの電子は異種材料のヘテロ型のポテンシャルで閉じ込められている。構造的な問題からその電氣的性質を調べるには工夫を要するが、閉じ込めの強さや材料的ユニークさから最近多大な関心を集めている。本論文で扱う InAs ドットは自己形成ドットの典型例であり、GaAs 基板上にウエット層と呼ばれる数モノレイヤー程度の InAs を積層することで作製される。InAs ドットは、上記の特徴に加えて、スピン軌道相互作用の影響が強いことでも興味深い零次元系である。加えて、InAs ドットは、他の材料に埋め込まれたものと表面に露出したものとの大きく性質が異なる。例えば後者で寸法的に数倍大きいものは、閉じ込めは弱いですがスピン軌道相互作用の影響がその分強い、歪みの影響が小さい、また、形状が複数の結晶面から成り異方性が大きい、などの特徴を持つ。しかし、その電子状態は勿論のこと、埋め込み型との相違についてもほとんど知られていない。

InAs ドットの電子状態は従来、光学的手法によって調べられてきた。この光励起には電子正孔対が関与するので、純粋な電子相関やスピン効果を観測するには電氣的手法がより適する。しかしながら試料作成の難しさが災いして、その報告例は少ない。特に、単一の InAs ドットを選択的にプローブするのは難しく、報告例は数えるほどしかない。

本研究では、InAs ドットが基板表面に露出している表面露出型と、ドットがバルクの GaAs に埋め込まれている埋め込み型の2種類のデバイスを作製し、電氣伝導測定を通して、両者の電子状態を比較した。特に、磁場中での電子状態遷移とゼーマン効果、近藤効果、Lande の g 因子とその角度依存性、などの典型的なスピン効果に注目して研究を行った。

埋め込み型のデバイスとしては、InAs ドットを内包した縦型の単電子トランジスタを用いた。ゲート電圧を負側に加えて電氣伝導をピンチオフに近づけると、ドットの電子数は

零個まで 1 個単位で制御することができる。表面露出型のデバイスとしては、比較的大きい InAs ドットに一对の金属電極を数 10nm 離して取り付けられたデバイスを用いた。このデバイスも、下部にある n-GaAs をゲート電極として動作させると埋め込み型と同様な単電子トランジスタとして動作する。

埋め込み型の InAs ドットの非線形コンダクタンス (クーロンダイヤモンド:  $dI/dV_{sd}$  vs.  $V_{sd}-V_g$ ) と線形コンダクタンス (クーロン振動:  $I$  vs.  $V_g$ )、及びクーロン振動の面直磁場依存性を測定した結果、スピン対、殻構造が存在すること、また、少なくとも  $N=6$  電子までは 2 次元調和振動子型で固有状態が近似できることが分かった (図 1)。

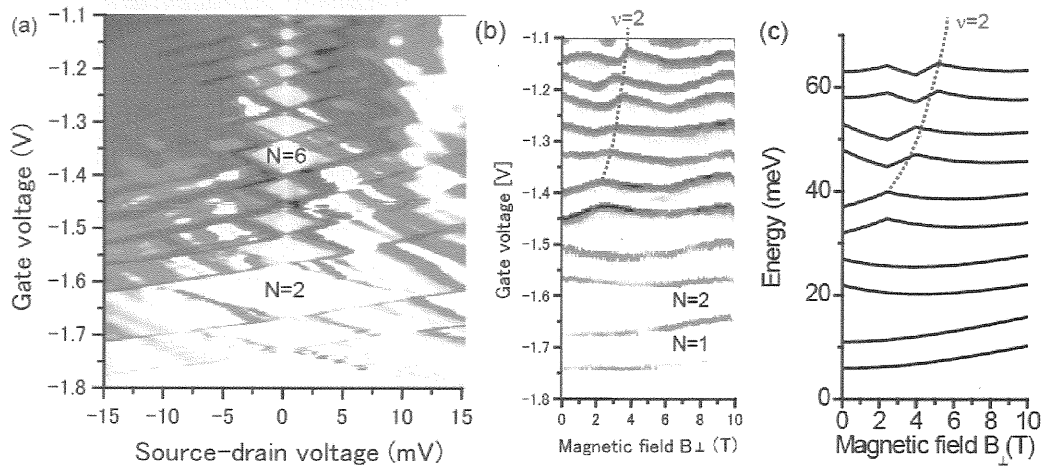


図 1 : (a) 埋め込み型デバイスで測定したクーロンダイヤモンド構造。(b),(c) クーロン振動の面直磁場依存性(b)と、Fock-Darwin 状態から計算された実験に対応する軌道遷移の様子(c)。

一方、表面露出型の InAs ドットについても同様の測定を行った結果、クーロンダイヤモンドから見積もった閉じ込めエネルギーと静電エネルギーは、いずれも埋め込み型よりも小さかった。これは埋め込み型よりもドットサイズが大きいことを反映している。クーロン振動の面直磁場依存性 (図 2c) にはスピン対は見られず、むしろ強いゼーマン分離による状態遷移が起こるなど、埋め込み型とは全く異なった磁場依存性が観測された。ゼーマン効果の影響を調べるため、磁場を面内配置 (軌道の影響が無視できる配置) にして測定した結果 (図 2b)、強いゼーマン効果のために、スピン対をなす 2 本のピークが分裂していく様子を確認できた。

寸法の大きい表面露出型のドットでは、金属電極とドットの接触面積を広く取ることで、ドット-電極間のトンネル結合エネルギー  $\Gamma$  の大きい試料を得ることができた。このような  $\Gamma$  の大きい量子ドットでは近藤効果の発現が期待される。InAs ドットは、スピン軌道相互作用が強いため、近藤効果は見られないと言われていた。私たちは本試料での近藤効果の観測を狙って、まず零磁場でクーロン振動の温度依存性を測定した (図 3a)。

その結果、偶数電子数のクーロン谷の伝導度が温度について一定であるのに対し、奇数電子数では温度が上昇するにつれて対数的に減少していく様子を観測した (図 3b)。また、奇数電子数のクーロン谷で微分伝導度を測定し、鋭い零バイアスアノマリ (近藤状態密度に対応) を確認した。これらは量子ドットにおける SU(2) 近藤効果の典型的な特徴であり、InAs ドットの系における初めての近藤効果の観測例である。なお、温度依存性から見積もられた近藤温度は比較的高く、約 2 K となった。この高い近藤温度は、用いた試料の強いドット-電極間結合を反映している。

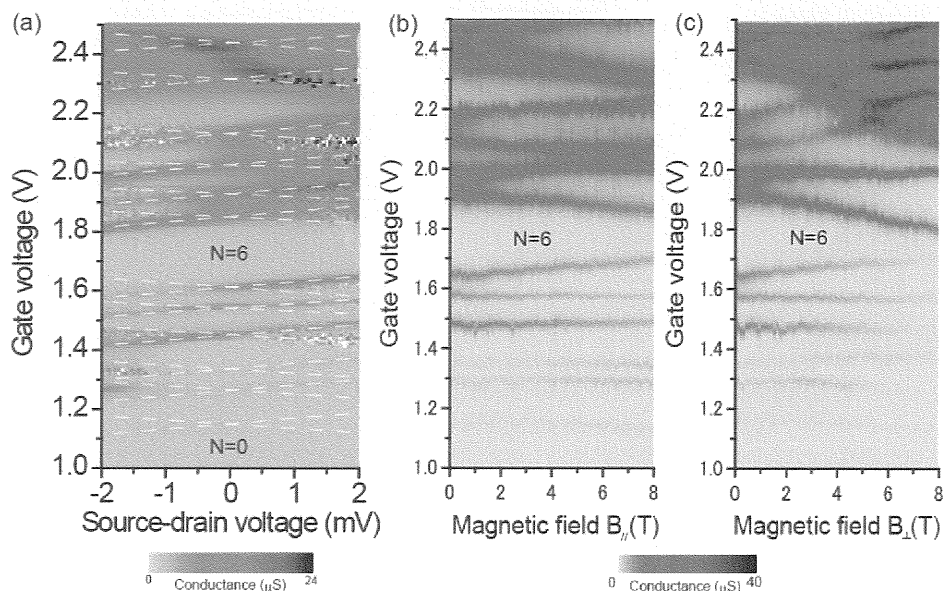


図 2 : (a) 表面露出型デバイスで測定したクーロンドiamond構造。(b),(c) クーロン振動の面内磁場依存性(b)と面直磁場依存性(c)。

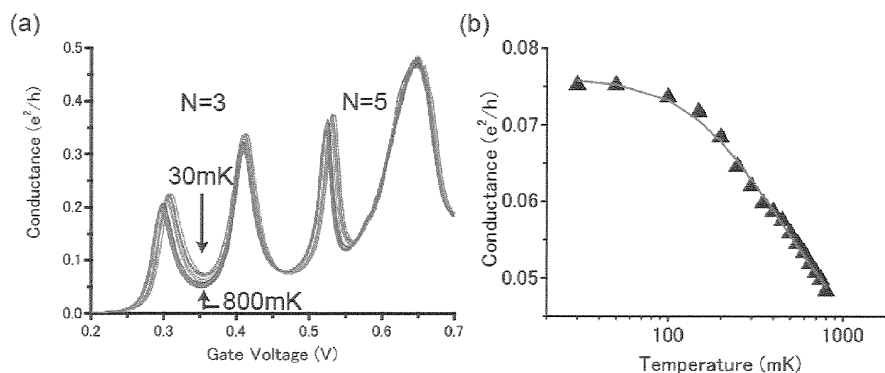


図 3 : (a) クーロン振動の温度依存性。偶数電子数のクーロン谷は温度について変化しないのに対して、奇数電子数のクーロン谷における伝導度は温度と共に減少していく様子が分かる。(b)  $N=3$  クーロン谷伝導度の対数的温度依存性。

図 2 (b)で示した通り、表面露出型 InAs ドットではゼーマン効果の影響で状態遷移が起こる。図 4 (a)は図 2 (b)と同様に測定したクーロン振動の面直磁場依存性を示す。図中、▲点で示した磁場で、いくつもの明瞭な準位反交差が見られる。これは、高磁場領域においては下向きスピンの最低ランダウ状態が、複数の上向きスピンの多くのランダウ状態と次々に交差することに対応する (図 4 (b)参照)。これらの反交差点のうち、7.1 T 付近の反交差点において伝導度が上昇していることに注目し、その磁場でクーロンドiamondを測定した結果 (図 4 (b)、零磁場での近藤効果と同様にクーロンブロッケード内の零バイアス付近に近藤共鳴による伝導度ピークを見出した。この近藤効果は上下向きのスピンの関与する点で、零磁場で観測した SU(2)近藤効果に似ているが、異なるランダウ軌道が関与する点で異なる。なお、この伝導度の温度依存性から見積もられた近藤温度は、零磁場における近藤温度とほぼ一致した。

一般的に軌道縮重はスピン軌道相互作用で解けるので、その縮重点における近藤効果は抑制されると考えられている。実際に、7.1 T より低磁場側の他の反交差点や、面内磁場に

おける反交差点においては磁場下での近藤効果を観測することはできなかった。しかしながら、上記の高磁場近藤効果は、縮重に関与するランダウ状態の軌道角運動量の差が1よりはるかに大きいために、スピン軌道相互作用の影響は弱いと考えられ、従って、近藤効果が観測されるに至ったと考えている。また、ゲート電圧によって、トンネル結合 $\Gamma$ が大きくなったと考えられる点も、近藤温度とスピン軌道相互作用の競合関係において有利に働いたと考えられる。

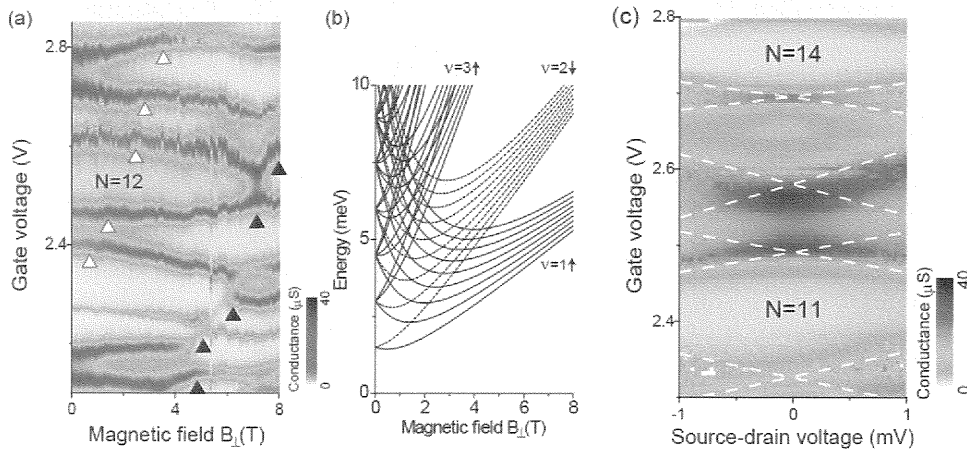


図4 : (a) クーロン振動面直磁場依存性。図2と同じ試料だが、熱サイクルのため特性は変化している。▲で示した反交差点において、異なるスピン状態の関与する軌道縮退が起こっている。(b) 表面露出型ドットの大きなg因子によるゼーマン分裂を取り入れたフォックダーウィン状態の計算。(c) 7.1 Tで観測したクーロンダイヤモンド構造。N=12の偶数電子数のクーロンブロックを破って近藤ピークが現れているのが分かる。

最後に、表面露出型試料について、励起スペクトルの磁場依存性、及び零バイアスアノマリーの磁場分裂 ( $T_K < E_{\text{Zeeman}}$ ) と非弾性コトンネリングピークの磁場分裂 ( $T_K > E_{\text{Zeeman}}$ ) の測定から g 因子を評価した。これにより、面内磁場と面直磁場で g 因子が倍程度異なることを観測した。これは g 因子の異方性を示唆する。そこで、冷凍機中で試料回転機構を利用して、磁場方向を in-situ で面直方向から面内方向に変えながら g 因子の角度依存性を測ったところ、図5(a)のような結果を得た。この角度依存性は、ピラミッド型の InAs ドット構造において歪みの影響を除いて理論計算した結果と定性的に一致している。なお、角度依存性の起源については、スピン軌道相互作用の Dresselhaus 項の影響だと考えられる。

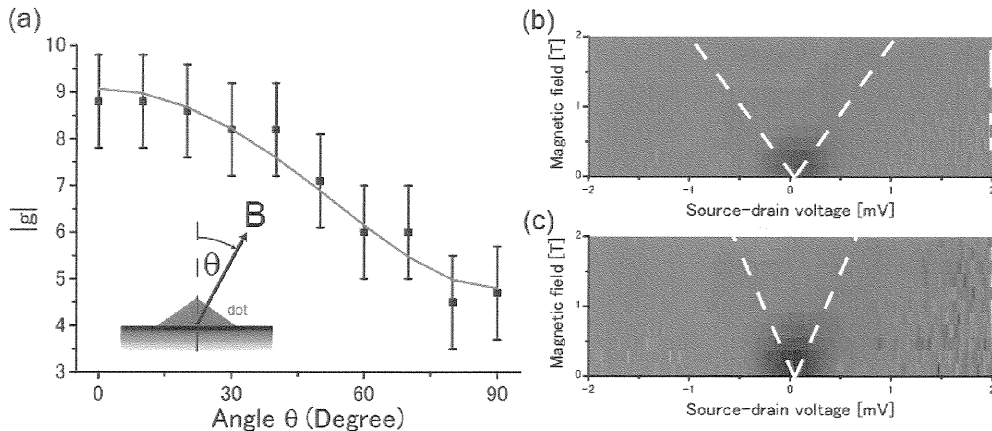


図5 : (a) 見積もられた g 因子の角度依存性。実線は g-tensor モデルを用いたフィッティング。(b), (c) 非弾性コトンネリングピークが(b)面直磁場((c)面内磁場)と共に分裂していく様子が見られる。