

A01 高速量子プローブを用いた微小系の電子輸送ゆらぎの研究

理化学研究所創発物性科学研究センター 大塚朋廣

半導体微細加工技術の進歩により、単電子効果や量子効果が現れる微小な系を人工的に作製し、そのミクロな特性を電気測定で明らかにすることが可能となっている。従来からのマクロな電極による測定に加え、半導体量子ドット等を活用したミクロなプローブと高周波技術を活用した高速測定を組み合わせた高速量子プローブを用いることにより、微小系における電子輸送、ゆらぎを局所的、高精度、低擾乱で測定することができる。

本年度は高速量子プローブの性能評価、微小系における電荷・スピンドायナミクス測定、量子微小系の局所電子状態測定を行った。

1. 高速量子プローブの性能評価

半導体量子ドットは電子を微小領域に閉じ込めた構造であり、内部に離散的なエネルギー準位が形成される。またこの準位のエネルギーを外部からの電圧で操作できるため、人工量子準位として利用できる。量子ドットを測定対象となる微小構造に結合させ、測定対象から人工量子準位への電子のトンネルを調べることにより、測定対象内の局所電子状態を高精度かつ低擾乱に測定できる。さらに量子ドットを用いた局所電子状態プローブを高周波共振器に組み込み、高周波反射測定を行うことにより、プローブ動作を高速化して高速量子プローブを実現し局所電子状態のダイナミクスまで測定が可能となる。

本研究では高速量子プローブ試料を作成し、その性能評価を行った。まず半導体微細加工により、量子ドットを用いた高速量子プローブ試料を作製した。そしてこの試料を低温に冷却し、プローブの動作に伴う単一電子移動の検出感度を評価した。測定積分時間を変化させながら、量子ドット内の単一電荷による高周波信号を評価すると、積分時間が長くなるにつれて単一電荷信号を分離できるようになり、マイクロ秒程度の積分時間で単一電荷を検出できることを確認した。またプローブ動作の安定性についても検証を行い、微小系の電子輸送現象を測定するのに十分な安定度を持つことを確認した。

2. 微小系における電荷・スピンドायナミクスの測定

微小系における電荷状態、スピン状態は、基礎科学やエレクトロニクス等への応用の両面から注目を集めており、局所的な電荷・スピン現象や、そのダイナミクスまで含めた説明が重要となっている。また外界との相互作用が弱い孤立微小系だけでなく、外界と強く結合した微小系のダイナミクスは、開放系の物理等の観点からも興味を持たれている。半導体量子ドットを用いた微小系は、内部状態や外界との結合等を制御性よく操作可能な微小系であり、これらの実験を行う上で有用な系である。

本研究では半導体量子ドットと外部電極が結合したハイブリッド系における電荷・スピン状態のダイナミクスについて、高速量子プローブを用いて測定を行った。電極との結合による電荷・スピン状態の変化を調べるために、二重量子ドットが外部電極に結合した微小系を用意した。量子ドット内の電荷状態は高周波電荷測定により測定し、スピン状態は二重量子

ドットのスピン状態によって電荷遷移が変化するスピン閉塞を利用して測定した。ここで量子ドット内電子と外部電極との間の相互作用時間を電圧制御により操作し、相互作用時間に応じた電荷・スピン状態の変化を調べた。まず量子ドット内準位のエネルギーと電極のフェルミ面が近い条件（電荷遷移線近傍）で、電荷およびスピン状態変化を調べたところ、電荷・スピン状態のいずれも相互作用時間の増大とともに変化する様子が観測された。この変化の時間スケールが、電荷が 2 マイクロ秒程度、スピンが 3 マイクロ秒程度と同程度であることより、量子ドットから電子が入り出す電子の一次のトンネル過程によるものであることが分かった。次に量子ドット内準位のエネルギーとフェルミ面が離れている条件（クーロン閉塞条件）で、さらに電極との結合を強くして同様に電荷・スピン状態の変化を観測したところ、電荷状態は変化しないが、スピン状態は 5 マイクロ秒程度で変化する様子が観測された。両者の時間スケールが異なることより、量子ドットから電子が流出する過程と流入する過程が同時に起こる二次のトンネル過程によるものであることが示唆され、量子ドット内準位のエネルギーを変化させた際のスピン状態変化を理論式と照合することにより、これを確認した[1]。

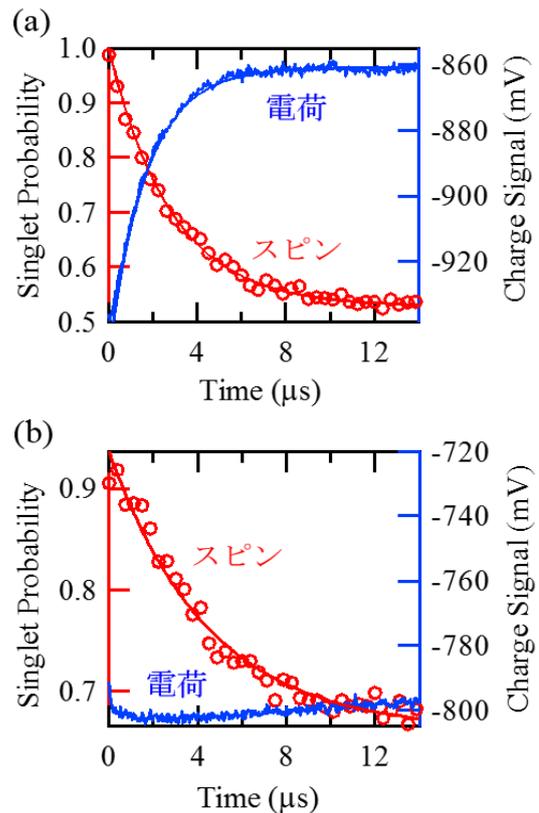


図 1. 観測された電荷、スピン状態の時間変化。(a) 電荷遷移線近傍。(b) クーロン閉塞条件。

3. 量子微小系の局所電子状態測定

量子微小系は量子エレクトロニクスデバイス、量子情報処理等への応用に向けても研究が進められている。一例が半導体量子ドット中の電子スピンを用いた量子ビットデバイスであり、これまでに基本的な量子状態操作が実現されている。この中で量子微小系内に発現した量子状態を高精度かつ高速に測定する重要性が高まっている。

本研究では高速量子プローブ技術を用いて量子微小系における局所電子状態測定を行った。局所電子状態の高速測定を行うことにより、半導体量子ドット中電子スピンの高精度回転操作、多重量子ドット系における電荷、スピン状態の精密制御等の実証を行った[2, 3, 4]。

参考文献：

- (1) T. Otsuka *et al.*, in preparation.
- (2) T. Ito*, T. Otsuka* *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 39113 (2016), (*equal contribution).
- (3) T. Otsuka *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 31820 (2016).
- (4) K. Takeda *et al.*, *Sci. Adv.* **2**, e1600694 (2016).