

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、東北大学電気通信研究所 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。この人工微小系は各種パラメータを人工的に操作することができ、電子輸送やそのゆらぎをミクロに調べる上での理想的な実験系となっている。従来からのマクロな電極による伝導測定に加え、半導体量子ドット等を活用したミクロな電子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。

本研究では高速量子プローブの作製と評価、微小系における局所電子状態ダイナミクスの測定、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作製と評価

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、単電子効果や量子閉じ込め効果によって、内部に離散的なエネルギー準位が形成される。このエネルギー準位は量子ドットの電極に印加する電圧によって操作できるため、人工的に制御可能な人工量子準位として利用できる。この人工量子準位への電子のトンネルを解析することにより、量子ドットが結合している領域の局所的な電子状態を高精度かつ低擾乱に測定できる。また高周波を用いた高速電気測定手法と組み合わせることにより、プローブ動作を高速化して、局所電子状態のダイナミクスまで測定できる高速量子プローブを実現できる。

本研究では高速量子プローブ試料を作製し、その動作評価を行った。半導体微細加工により、半導体量子ドットからなる量子プローブ試料を作製した。この試料をノイズの少ない極低温に冷却し、プローブにおける単一電子検出感度の評価を行った。測定積分時間を変化させながら、電子数が1つのみ異なる電荷状態の信号を評価し、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等についても評価を行い、微小系の電子輸送を測定するのに十分な安定度を持つことを確認した。

2. 微小系における局所電子状態ダイナミクスの測定

微小系における局所電子状態は、物性科学等の基礎科学や、エレクトロニクスデバイ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。さらに外部環境と切り離された孤立微小系だけでなく、外部環境と強く結合した微小系のダイナミクスは、開放系の物理や外界中での現実的なデバイス開発等の観点からも重要となっている。半導体量子ドットを用いた微小系は、内部状態や外部環境との結合等を電圧によって人為的に制御可能な微小系であり、これらの研究を行う上で有用な実験系となる。

本研究では微小系における局所電子状態について高速マイクロプローブを用いた測定を行い、半導体量子ドット中の電荷状態のゆらぎ測定、外部環境との相互作用による電荷・スピン状

態変化のダイナミクス測定を行った。半導体量子ドットを外部電極に結合させた微小系では、量子ドット内の電荷状態は、量子ドットと外部電極との電子のトンネルにより変化する。この時間変化を高速マイクロプローブで測定し、電荷状態ゆらぎの測定解析を行った。この結果、量子ドット内準位と外部電極のエネルギー差や、量子ドットと外部電極のトンネル結合強度に依存して電荷状態が変化する様子をマイクロに解明した。

また電荷状態だけでなく、スピン状態変化についても測定を行った。量子ドット内にはスピンに依存した準位があり、この準位を用いることによってスピン状態の初期化や読み出しを行うことができる。そこで半導体量子ドットが外部電極に結合した系において電荷状態とスピン状態変化のダイナミクスを調べた。まず量子ドット内準位と外部電極のフェルミエネルギーの差が熱エネルギーと同程度の場合には、電荷状態とスピン状態が同時に外部電極との相互作用時間の増大とともにマイクロ秒程度の時間スケールで減衰していく様子が観測された。電荷状態の時間変化をより詳細に調べたところ、量子ドット内の電荷が外部電極へのトンネルにより減少する様子が観測され、一次のトンネル過程によるものであることが分かった。さらに測定を進めたところ、量子ドット内準位と外部電極のフェルミエネルギーの差が熱エネルギー以上に大きくなると、スピン状態のみ減衰が観測され、電荷状態には変化が見られないことが分かった。この過程は二次のトンネル過程によるものであり、量子ドット内準位のエネルギーを変化させた際の減衰時間の変化を理論式と照合することによりこれを検証した。また量子ドットと外部電極とのトンネル結合を電圧により操作し、減衰の時間スケールを操作できることを実証した[1]。

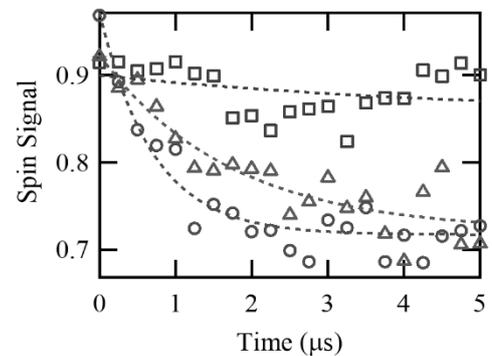


図1. トンネル結合操作による減衰時間の変化

3. 量子微小系の局所電子状態測定

量子微小系は基礎物理における興味だけではなく、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。半導体量子ドット中の電子スピンは量子ビットとしての研究が進められており、1量子ビット操作、2量子ビット操作などの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の技術を活用して微小量子系における局所電子状態操作を行った。局所電子状態の高精度、高速測定を行うことにより、半導体量子ドット中の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現に貢献した[2, 3, 4等]。

参考文献：

- (1) T. Otsuka *et al.*, *Scientific Reports* **7**, 12201 (2017).
- (2) J. Yoneda *et al.*, *Nature Nanotechnology* **13**, 102 (2017).
- (3) T. Ito, T. Otsuka *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 39113 (2016).
- (4) T. Otsuka *et al.*, *Sci. Rep.* **6**, 31820 (2016).