

# 超高速量子プローブによるナノデバイス中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

## 要旨

近年研究が進むナノデバイスでは電子輸送ゆらぎの出現が本質的となり、その特性の改善、改良のためにはゆらぎの物理の理解が重要となる。そこで本研究では、ナノデバイスに直接アクセスできる人工量子準位を用いた局所電子状態プローブと微小電荷を高速に測定できる高周波測定技術を組み合わせた超高速量子プローブを実現し、ナノデバイスにおける電子輸送ゆらぎを調べた。

## 1. 背景と目的

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ナノデバイスを人工的に作製し、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。このナノデバイスでは電流量が非常に小さくなり電子輸送ゆらぎの出現が本質的となるため、その特性の改善、改良のためにはゆらぎの物理の理解が重要となる。一方近年、半導体量子ドット等内の人工量子準位を電子状態のミクロなプローブとして用いて、これまでの古典的なマクロなプローブでは不可能であった測定が実現されている。この新しいプローブを用いてナノデバイス中の局所電子状態測定が行われ、その優れた性能（高精度： $\sim 10 \mu\text{eV}$ 、良局所性： $\sim 10\text{nm}$ 、低擾乱： $\sim 100\text{aA}$ ）が実証されてきた。また最近、人工微小系の電気測定において革新技術が開発され、高周波測定により単一電子電荷を従来とは桁違いに高速で読み出すことが可能となっている。

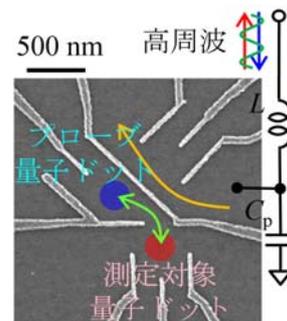
そこで本研究では人工量子準位を利用した局所電子状態プローブと高速電荷測定技術を組み合わせた超高速量子プローブを用いてナノデバイスにおける電子輸送ゆらぎを測定し、これまでの実験では不可能であった時間スケール、および測定パラメータ下で電子輸送ゆらぎを調べる。

## 2. 結果及び考察

### 2. 1. 超高速量子プローブの実現と性能評価

人工量子準位を用いた局所電子状態プローブの動作原理は、測定対象内の局所電子状態の変化によって、測定対象から対象に単一のトンネル障壁を介して結合したプローブ量子ドット内準位への電子のトンネルレートが変化することを利用している。従来の低速プローブにおいては、この電子のトンネルについて  $1\text{kHz}$  程度までの低速電気回路を使って測定がなされてきた。本研究では高周波変調、復調器等の高周波測定系を構築して高周波反射測定を行うことにより、高速に動作する超高速量子プローブを開発した。この新しいプローブの動作時間を評価したところ、プローブ量子ドット内の電子数を単一電荷の精度で  $5 \mu\text{s}$  の積分時間で  $99\%$  以上の確度で測定できることを確認し、これまでの低速プローブの動作スピードに比べ  $1000$  倍以上の高速化を実現した。

また測定対象となる別の量子ドットを形成しプローブの性能を評価したところ、測定対象量子ドット内の軌道励起準位等の



超高速量子プローブ試料の電子顕微鏡写真

各種準位を高精度 ( $\sim 10 \mu\text{eV}$ ) に測定できることが示された。また従来のプローブとは異なり、新プローブではフェルミ面から離れた準位にも感度を持つことが実証された。さらに信号幅のバイアス電圧依存性、温度依存性を調べたところ、従来のプローブに比べて新プローブではこれらの影響が小さいことが分かり、プローブ動作の頑健性が示された。

## 2. 2. 超高速量子プローブを用いた量子ドット内電荷ゆらぎの測定

高速測定手法を用いて、プローブ量子ドット内電荷数のゆらぎを実時間で測定した。この結果、数十から数百  $\mu\text{s}$  の時間スケールで電荷数がゆらいでいる様子が観測された。このゆらぎの出現はドット内準位のエネルギーに依存しており、そのメカニズムについてドット内準位のエネルギーが電極のフェルミエネルギーに近い場合に、熱の影響によって電子がドットから出入りして電荷数の変化がおこるためであることが分かった。

また測定対象の量子ドットについても超高速量子プローブを用いてその内部の電荷数の実時間測定を行った。測定ではプローブ量子ドット内準位を周期的に変調し、12.5kHz のサンプリングレートで対象量子ドット内の電荷数を測定した。この結果、数百マイクロ秒の時間スケールでの電荷数のゆらぎが観測され、その信号の解析より、熱の影響による電子数の変化であることが分かった。以上の結果は超高速量子プローブを用いたナノデバイス中の電子輸送ゆらぎの高速測定を実証したものとなっている。

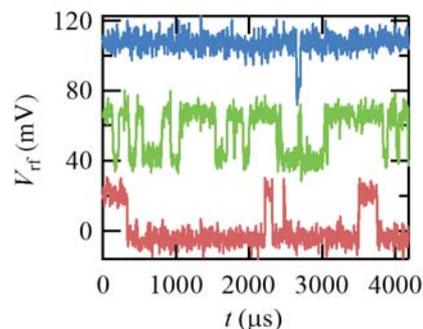
## 3. まとめと課題

人工量子準位を用いた局所電子状態プローブと高周波測定による高速電気測定手法を組み合わせて、超高速量子プローブを実現し、その性能を評価した。またこの新しいプローブを用いて量子ドット中での電子輸送ゆらぎを観測し、新プローブによるナノデバイス中の電荷輸送ゆらぎの高速測定を実証した。

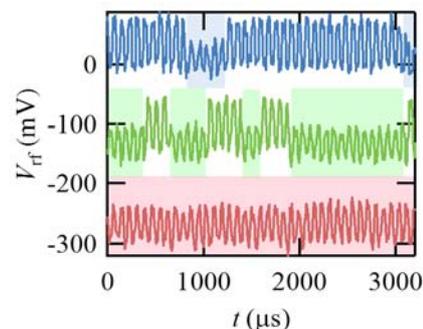
今後の課題としては、今回実証した手法を用いたゆらぎの定理の詳細検証等のさらなる推進、またこれ以外にも多方面への物性研究への応用があげられる。これらの研究を進めることで、新しいナノデバイス創製、改良への貢献ができると考えている。

## 4. 成果発表

1. T. Otsuka *et al.*, arXiv:1510.02547.
2. T. Otsuka *et al.*, Scientific Reports **5**, 14616 (2015).
3. J. Yoneda, T. Otsuka *et al.*, Applied Physics Express **8**, 084401 (2015).
4. T. Otsuka *et al.*, International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Sendai, Japan, July 28, 2015
5. 大塚朋廣 *et al.*, 日本物理学会、新宿、2015年3月23日 等



プローブ量子ドット内電荷ゆらぎの測定結果



測定対象量子ドット内電荷ゆらぎの測定結果 影をつけた部分が電子ありの状態に対応する。