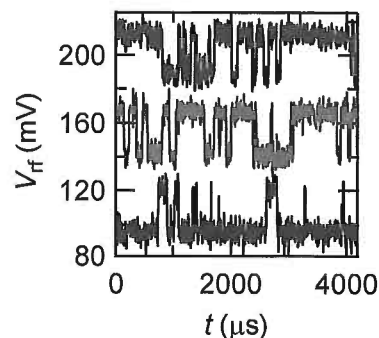


氏名	大塚朋廣
所属機関	国立研究開発法人理化学研究所
研究題目	超高速量子ドットプローブを用いた固体微細デバイス中の局所電子状態のダイナミック計測
<p><b>1. 研究の目的</b></p> <p>近年、情報処理デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向け、特異な電子物性を示すナノメートルスケールの固体微細構造の重要性が高まっている。固体微細構造を用いて有用な電子デバイスを創り出すためには、その微細構造内部の局所的な電子状態およびそのダイナミクスを調べ、マイクロで動的な観点から微細構造内部での物理現象を理解することが重要である。そこで本研究では、微細デバイス中での局所電子状態を高精度、高分解能で調べるための半導体量子ドットを用いた新しい局所プローブ、ダイナミクスを高時間分解能で明らかにするための高周波を用いた量子ドット内電荷の超高速読み出し手法を組み合わせ、新しい超高速量子ドットプローブを実現する。そして固体微細構造を用いた革新デバイスの創成に向けた電子状態の新しい局所、高速計測技術を確立する。</p> <p>そしてこの新しいプローブを用いて、固体微細デバイス中での局所電子状態を高速に測定し、マイクロで動的な観点から物理現象を明らかにする。これによりスピントロニクスデバイス、量子情報処理デバイス等の新デバイス設計、改良に役立つ物理現象の解明、またこれにより現行の半導体情報処理デバイスの限界を打ち破り、情報処理能力の向上に寄与することを目指す。</p>	
<p><b>2. 研究の内容(手法、経過、評価など)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>手法</b></li> <p>本研究では固体微細デバイス中での局所電子状態を高精度、高分解能で測定するために、半導体量子ドットを用いた局所プローブを使用する。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、操作性の良い人工量子準位として振る舞う。この制御された準位への測定対象からの電子の流入を単一電子レベルで観測することにより、測定対象内の局所電子状態(局所状態密度、電気化学ポテンシャル、電子温度等)の高感度、低擾乱な測定を実現できる。またこの電子の流入の測定に高周波測定を用いることにより、プローブの動作スピードを大幅に改善し、局所電子状態のダイナミクスまで調べられる高速測定を実現できる。</p> <li>● <b>経過、評価</b></li> <li>i. <b>超高速量子ドットプローブの開発</b></li> <p>固体微細デバイス中の局所電子状態の高速測定に向けて、これまで独自に開発してきた半導体量子ドットを用いた局所電子状態プローブと、近年開発されてきた高周波反射測定による量子ドット中電荷状態の高速電気測定手法を組み合わせ、超高速量子ドットプローブを開発した。</p> <p>半導体量子ドット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。従来の低速量子ドットプローブにおいては、この電子のトンネル現象を低ノイズで測定する</p> </ul>	

## 2. 研究の内容(続き)(書ききれない場合には、同一形態のページを追加しても結構です)

ために 1kHz 程度までの低速電気回路により測定がなされてきた。一方近年、微小デバイスに数百 MHz 程度の高周波を印加してその反射信号を測定することにより、量子ドット内の単一電荷を高速に読み出す技術が開発され、この技術は量子ドットプローブの高速化にも応用できると考えられた。

そこで半導体量子ドットプローブの構造を高周波反射測定を利用できるように改良し、さらに高周波変調、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、高速に動作する局所電子状態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マイクロ秒の積分時間で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。またこの高速電気測定を用いてプローブ量子ドットへの電子のトンネルを実時間で測定し、右図のように数十マイクロ秒の高速イベントを実時間で観測できることを示した。

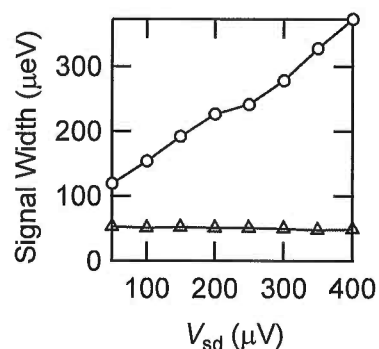


この新しい高速局所電子状態プローブは固体微細デバイス中の局所電子状態の高速測定に広く用いることができる。これにより微細材料中の電子物性、そのダイナミクスの解明、またこれらを利用した新デバイスの開発に寄与できる。

### ii. 超高速量子ドットプローブを用いた量子ドット内状態の精密測定

半導体量子ドット内には電界閉じ込めの効果により、よく定まった量子準位が形成され、この準位は電圧等により高精度に制御できる。そこで、新しく開発した高速局所電子状態プローブの動作、性能の実証のため、別の半導体量子ドットをコントロール可能な測定対象として用いて、新プローブによる局所電子状態の測定を行った。

測定対象の量子ドットからプローブ量子ドットへの電子のトンネルを高速測定により実時間で調べたところ、ターゲット量子ドット内部の状態に応じてトンネルレートが変化する様子が観測された。特に、双方の量子ドット内準位のエネルギーが揃った条件でトンネルレートの増加を観測し、量子ドットプローブの動作原理が確認された。またこれを用いてターゲット量子ドット内の局所電子状態を評価したところ、軌道励起準位等の各種励起準位を高精度( $\sim 10 \mu\text{eV}$ )に測定できた。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右図(赤印)のように分かり、プローブ動作の頑健性が示された。またプローブの高速性を活かして、ターゲット量子ドット内の電荷状態の高速実時間測定を実現した。



これらの結果は新しい高速局所プローブの確立、その優れた特性(フェルミ面から離れた状態の測定、頑健な動作特性、高速動作)を示しており、またこれを用いた局所電子状態観測を実証している。この新しいプローブは微細材料におけるミクロな物理の解明を通して、固体微細構造デバイスの発展に寄与できる。

## 2. 研究の結論、今後の課題

### ● 研究の結論

本研究では、半導体量子ドットを用いた局所電子状態プローブと、高周波反射測定による量子ドット中電荷状態の高速電気測定手法を組み合わせ、固体微細デバイス中の局所電子状態を高精度、低擾乱、高速に測定できる新しい超高速量子ドットプローブを実現することができた。この新しいプローブの動作スピードは従来手法の低速プローブに比べ1000倍程度の改善がなされている。これにより、固体微細デバイス中電子状態の新しい局所、高速計測技術を確立することができた。

またこの新しいプローブを測定対象として用いた別の半導体量子ドット中の局所電子状態の測定に応用したところ、フェルミ面から離れた電子状態の測定、バイアス電圧や温度等に影響されない頑強な動作特性、高速現象も測定できる実時間動作という優れた特性が観測された。これにより新しいプローブ特性の評価、また新プローブを用いた局所電子状態観測の有効性を実証することができた。

### ● 今後の課題

今後の進展としては、今回開発に成功した超高速量子ドットプローブの多方面への物性実験研究への応用が考えられる。新しいプローブではフェルミ面から離れた電子状態の精密測定、バイアス電圧や温度等に影響されない頑強な動作特性といった、従来の電気伝導測定では実現できない特性を実現できる。この特性を活かすことにより、これまで電気測定の難しかった局所電子状態の直接測定が可能になると考えられる。

例としては、非平衡バイアス電圧条件下での近藤状態の精密測定や、半導体量子ドットを用いたスピン量子ビットの温度によらない高忠実度読み出し等があげられる。半導体量子ドットにおける近藤状態は量子ドット中の局在スピンとリード中の伝導電子の相互作用により形成される興味深い量子多体状態で、これまで積極的に研究がなされてきた。バイアス電圧のかかっていない平衡条件下での近藤状態については多くの実験結果によりその物理現象が明らかとなってきたが、バイアス電圧のかかった非平衡条件下についても新しいプローブを用いてフェルミ面から離れた局所電子状態を精密に測定することにより、先行している理論との比較を進め、その物理現象を解明できると期待できる。またスピン量子ビットの読み出しについては、新しいプローブでの測定を利用して温度の影響を抑制することにより高い忠実度での読み出しを実現できる可能性がある。これにより読み出し精度を高め、スピン量子ビットを用いた量子情報処理の実現への寄与が期待できる。

このような新しいプローブを用いて興味深い固体微細デバイス中局所電子状態の解明を進めることにより、スピントロニクスデバイス、量子情報処理デバイス等の新しいデバイス設計、改良に役立つ知見を得て、またこれにより、新デバイスによる情報処理能力の向上への寄与が期待できる。

#### 4. 成果の価値(とくに判りやすく書いて下さい)

##### 4. 1. 社会的価値

本研究で実現した超高速量子ドットプローブにより、興味深い固体微細デバイス中の局所電子状態の研究を進めることができる。これにより固体微細構造を利用した新しいデバイス、例えば電子のスピンを利用したスピントロニクスデバイス、電子の量子性を利用した量子情報処理デバイスといった従来の電子の電荷のみを用いた半導体デバイスとは動作原理の異なる新しいデバイスの設計、性能の改良等に寄与することができる。これにより、従来の半導体デバイスの限界を超えて情報処理能力を大幅に向上させる種の一つとなることが期待できる。

##### 4. 2. 学術的価値

本研究により実現された新しい超高速量子ドットプローブは、固体微細構造中の局所電子状態を高精度、低擾乱、高速に測定することができる。またフェルミ面から離れた電子状態の測定、バイアス電圧や温度等に影響されない頑強な動作特性といった優れた特性を持っている。これらの特性は固体微細デバイス中での繊細な局所電子状態の直接測定に適したものとなっており、これまでにないパラメータ下での測定実施、測定した局所電子状態と理論との直接比較等を可能とし、興味深い現象のマイクロで動的な測定を通して、固体物性物理、量子物理の進展に寄与できる。

##### 4. 3. 成果論文(本研究で得られた論文等を年代順に書いて下さい。未発表のものは公表予定を書いて下さい)

1. M. R. Delbecq, T. Nakajima, T. Otsuka, S. Amaha, J. D. Watson, M. J. Manfra, and S. Tarucha, "Full control of quadruple quantum dot circuit charge states in the single electron regime" , Applied Physics Letters 104, 183111 (2014).
2. S. Chesi, Y. Wang, J. Yoneda, T. Otsuka, S. Tarucha, and D. Loss, "Single-spin manipulation in a double quantum dot with micromagnet" , Physical Review B 90, 235311 (2014).
3. J. Yoneda\*, T. Otsuka\*, T. Nakajima, T. Takakura, T. Obata, M. Pioro-Ladrière, H. Lu, C. Palmstrøm, A. C. Gossard, and S. Tarucha, "Fast Electrical Control of Single Electron Spins in Quantum Dots with Vanishing Influence from Nuclear Spins" , Physical Review Letters 113, 267601 (2014), (\*equal contribution).
4. J. Yoneda, T. Otsuka, T. Takakura, M. Pioro-Ladrière, R. Brunner, H. Lu, T. Nakajima, T. Obata, A. Noiri, C. J. Palmstrøm, A. C. Gossard, and S. Tarucha, "Robust micromagnet design for fast electrical manipulations of single spins in quantum dots" , Applied Physics Express, 掲載決定済.
5. T. Otsuka, S. Amaha, T. Nakajima, M. R. Delbecq, J. Yoneda, K. Takeda, R. Sugawara, G. Allison, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, " Fast probe of local electronic states in nanostructures utilizing a single-lead quantum dot" , 投稿中.
6. T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, S. Amaha, J. Yoneda, K. Takeda, R. Sugawara, G. Allison, A. Noiri, T. Ito, A. Ludwig, A. D. Wieck, and S. Tarucha, " Single-electron Spin Resonances in a Quadruple Quantum Dot" , 作成中.