

■受領No.1328

高速マイクロプローブを用いた省エネルギー環境固体ナノデバイスの研究

代表研究者

大塚 朋廣

東北大学電気通信研究所 准教授



1. 研究目的

化石資源の使用に伴う環境破壊や、資源枯渇等に関連するエネルギー問題等が、人類の経済活動と環境保全とを両立する上で問題となってきている。この解決に向けて様々なアプローチがなされているが、この中で微小なエネルギーを有用活用する省エネルギー技術や、熱運動やノイズ等の環境中の励起や擾乱から電流等を取り出して利用し、環境中のエネルギーを有効活用する環境発電等は、これらの問題を科学的観点から解決する際に重要なテクノロジーとして注目を集めている。これらのテクノロジーを実際に実現するための物理デバイスとして、固体ナノ材料を利用した固体ナノデバイスは、ナノテクノロジー技術を活用することにより、内部の電子運動の高度な制御や観測が可能であるため、新しいデバイスの創製や原理検証に適した系であると考えられている。

そこで本研究では、固体ナノデバイス中の電子状態を高度に制御する技術、ナノデバイス中の局所的な電子状態を精密に観測する技術等を改良、発展させて、ナノデバイス内での電子移動に関する物理現象をマイクロな観点から解明する。そしてこの知見を活用することにより、固体ナノデバイスを利用した省エネルギー、環境発電技術等について、その基礎学理の構築や基礎技術の開発に貢献することを目指す。

2. 研究内容

本研究ではまず省エネルギー、環境発電技術等に関する新しいエレクトロニクスデバイスを創製する際に重要となると考えられる固体ナノデバイスについて、その内部の電子状態を精密に測定し、物理現象をマイクロな観点から解明するための、固体ナノ材料中局所電子状態測定手法の改良を行った。

エレクトロニクスデバイス応用で重要となる固体ナノ材料中の電子状態を調べるためには、電気伝導測定が有用な手法となる。従来の電気伝導測定においては、測定を行いたい対象が固体ナノ材料中の局所電子状態であっても、比較的マクロな電極を試料に取り付けて、試料全体を流れる電流を測定する手法が用いられてきた。この手法は比較的簡便ではあるが、電流が試料全体を流れるため、局所電子状態の情報が平均化されてしまう可能性があるという弱点があった。これに対して、半導体量子ドット等の人工ナノ構造を用いたマイクロなプローブを固体ナノ材料に直接結合させれば、ナノ材料内部の局所電子状態について直接的に調べることができる。ナノ材料から半導体量子ドットへの電子のトンネル等には、量子ドット近傍の局所電子状態のみが反映されるため、この信号を解析することにより、固体ナノ材料中の局所電子状態についての情報を単一電子のレベルまで得ることができるようになってきている。

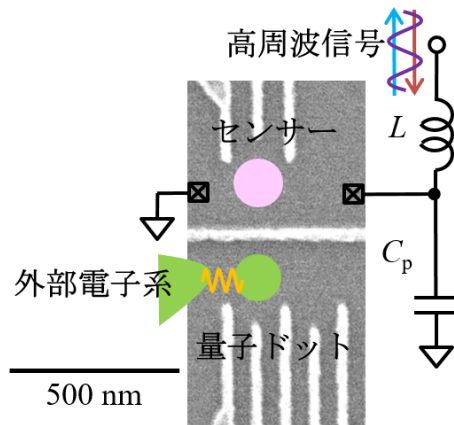


図 1. 半導体量子ドットを用いた高速マイクロプローブ試料の電子顕微鏡写真

また半導体量子ドットへの電子のトンネルについて、高周波を用いて測定することにより、測定動作の高速化を行うことができる。半導体量子ドットプローブを高周波の共振器回路に埋め込むことにより、量子ドットの状態変化を高周波共振器の共振変化に結びつけ、共振器からの高周波信号反射強度の変化として観測することが可能となる。この高周波測定手法を用いることで、ノイズの影響を低減することができ、固体ナノ材料中での単一電子の移動について、マイクロ秒程度の時間分解能で検出することができることを確認した。

この高速マイクロプローブの手法を活用して、固体ナノ材料中での熱に起因する電子の移動現象について測定を行った。有限の温度を持つ電子系に結合した半導体量子ドットにおいては、量子ドット内準位が電子系のフェルミエネルギーの近傍に電子温度広がり以下にある場合には、電子のトンネル現象が生じる。これにより半導体量子ドット内の電子の電荷状態、スピン状態が変化することになる。実際に高速測定手法を活用して測定を行ったところ、量子ドット内の電荷状態とスピン状態が電子系との相互作用の結果、マイクロ秒程度で変化の様子が観測された。またこの際の時間変化の詳細を調べたところ、電荷状態とスピン状態の時間変化には差があり、単一電子レベルの電

子のトンネル現象において、両者の間には差があることが明らかとなった。

この電荷状態とスピン状態の時間変化の差について、量子ドットのエネルギー依存性を調べたところ、フェルミエネルギー近傍で電子温度広がり程度変化させると、スピン状態の時間変化が実効的に遅くなる様子が観測され、差異が大きくなることが分かった。これらの現象について、熱と電子のトンネルを考慮したマイクロな理論モデルを構築し、状態変化を計算した。この結果、観測された実験結果を再現することに成功した。これらの結果は、固体ナノ材料における有限の温度効果による電子の移動について、マイクロな観点から測定、解明した結果であり、今後のデバイス応用等においても重要となると考えられる。[2, 5]

また将来の高性能かつ省エネルギーデバイスとして、電子の電荷の自由度だけでなく、スピンの自由度や、量子力学的状態を活用した、スピントロニクスや量子情報処理デバイスが注目を集めている。これらの研究においても、固体ナノ材料中の局所電子状態の測定、解明が重要な役割を果たす。これらの新しいエレクトロニクスデバイスについても高速マイクロプローブの測定手法を応用し、測定の面から研究推進に貢献した。[1, 3, 4]

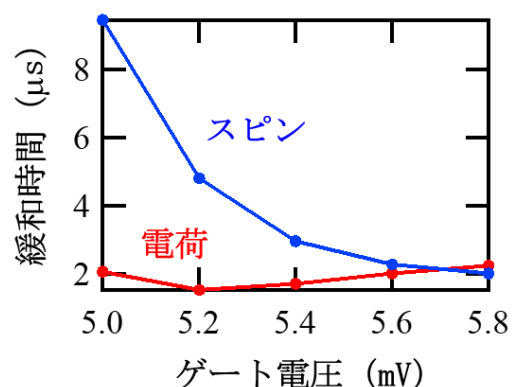


図 2. 観測された電荷状態とスピン状態の時間変化の量子ドット準位依存性

3. 発表 (研究成果の発表)

1. “Spin-orbit assisted spin funnels in DC transport through a physically defined pMOS double quantum dot”,
Marian Marx, Jun Yoneda, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Yu Yamaoka, Takashi Nakajima, Sen Li, Akito Noiri, Tetsuo Kodera, and Seigo Tarucha,
Japanese Journal of Applied Physics 58, SBBI07 (2019).
2. “Difference in charge and spin dynamics in a quantum dot-lead coupled system”,
Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Peter Stano, Shinichi Amaha, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Giles Allison, Sen Li, Akito Noiri, Takumi Ito, Daniel Loss, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha,
Physical Review B 99, 085402 (2019).
3. “A fast quantum interface between different spin qubit encodings”,
Akito Noiri, Takashi Nakajima, Jun Yoneda, Matthieu R. Delbecq, Peter Stano, Tomohiro Otsuka, Kenta Takeda, Shinichi Amaha, Giles Allison, Kento Kawasaki, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha,
Nature Communications 9, 5066 (2018).
4. “Four single-spin Rabi oscillations in a quadruple quantum dot”,
Takumi Ito*, Tomohiro Otsuka*, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Shinichi Amaha, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Giles Allison, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha,
Applied Physics Letters 113, 093102 (2018),
(*equal contribution).
5. “Charge and Spin Dynamics in a Quantum Dot-Lead Hybrid System”,
Tomohiro Otsuka, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Peter Stano, Shinichi Amaha, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Giles Allison, Sen Li, Akito Noiri, Takumi Ito, Daniel Loss, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha,
International Symposium on Frontiers of Quantum Transport in Nano Science, Kashiwa, Japan, Nov. 9, 2018 (Invited).