

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800173

研究課題名(和文) シングルリード量子ドットを用いた半導体微細構造中のスピン現象の研究

研究課題名(英文) Probing local electronic and spin states in semiconductor microstructures by single-lead quantum dots

研究代表者

大塚 朋廣 (Otsuka, Tomohiro)

独立行政法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員

研究者番号：50588019

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドット等を利用した新しい局所プローブを用いて、半導体微細構造中の局所電子、スピン状態、およびその物理現象を調べた。具体的には、量子ポイントコンタクトを用いた量子ホールエッジ状態におけるエネルギー緩和測定について解析を行い、エネルギー緩和の測定メカニズムを調べた。また局所電子、スピン状態の静的な特性だけでなく、そのダイナミクスまで含めて測定できる高速局所電子状態プローブを、半導体量子ドットを用いた局所プローブと高周波測定技術を組み合わせて実現した。そしてこの新プローブを量子ドット内局所電子状態の測定に適用し、その動作、特性を調べた。

研究成果の概要(英文)：We measured local electronic and spin states in semiconductor microstructures by probes utilizing quantum microstructures. We analyzed experimental results on the measurement of energy relaxation in quantum Hall edge states by quantum point contacts and revealed a possible mechanism of the probe operation. We developed new fast local electronic probes, which can access dynamics of local electronic and spin states, by using the quantum dot probes and high frequency measurement techniques. We applied these new probes to measure local electronic states in quantum dots and confirmed the operation and examined the characteristics.

研究分野：数物系科学

キーワード：量子ドット メゾスコピック系 マイクロ・ナノデバイス 局所プローブ 半導体微細構造 量子細線
量子ホール効果

1. 研究開始当初の背景

半導体微細加工技術の進歩により、量子効果が発現する微小な系を人工的に作製することが可能となっている。この人工量子系を固体中の電子、スピン状態のミクロなプローブとして用いれば、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可能となる。通常電気伝導度測定では試料全体の平均的な性質が見られるのに対して、ミクロなプローブを使うことでその性質を支配している局所的な領域を直接調べることができる。

これまで我々は測定対象系に単一のトンネルバリアを介して量子ドットが結合したシングルリード量子ドットを利用した局所電子、スピン状態プローブを実現してきた。量子ドット内準位を走査しながら電子のトンネルを測定することにより、局所電子、スピン状態を高精度かつ低擾乱に調べられることを実証してきた。

2. 研究の目的

本研究では半導体量子ドット等の人工微小量子系を用いた新しい局所プローブを利用して、半導体微細構造中の局所電子、スピン状態を調べる。特に新しいプローブの良局所性、高精度、低擾乱という微細構造中の繊細な局所電子状態の測定に適した特性を活かして、従来のプローブでは実現できない測定を実施する。

そして新プローブを用いた測定により半導体微細構造中の電子物性をよりミクロな観点から解明する。また半導体微細構造の高い制御性、設計自由度等の特色と組み合わせる新しい機能として利用する。

3. 研究の方法

電子線リソグラフィ等の半導体微細加工技術を駆使して、半導体量子ドット等の人工微小量子系を利用した局所プローブ、測定のターゲットとなる微細構造等、数十 nm スケールの微細構造を形成し、測定試料を作製する。

この試料を希釈冷凍機、ヘリウム3冷凍機等を用いて冷却することにより、熱ゆらぎを抑え、また量子効果が発現する極低温下での精密電気測定を行う。この際、低ノイズ低周波、高周波信号技術を駆使して、高感度、高速電気測定により測定試料の特性を評価する。

4. 研究成果

(1)量子ポイントコンタクトを用いた量子ホールエッジ状態におけるエネルギー緩和測定の解析

二次元電子系に垂直に磁場を印加した際に試料端に形成される量子ホールエッジ状態は、固体中での長い緩和長、よく定まったカイラリティ等の特徴を持ち、固体電子素子

や量子情報処理への応用が提案されている。これらの応用に向けては、量子ホールエッジ状態内の局所電子状態、またその内部のエネルギー緩和を理解することが重要となる。本研究ではこの量子ホールエッジ状態におけるエネルギー緩和について、量子ポイントコンタクトを用いた局所プローブで測定した実験結果の解析を行った。

量子ホールエッジ状態に結合した量子ポイントコンタクトにバイアス電圧を印加することにより、量子ホールエッジ状態内に2つのフェルミ面を持つような非平衡な電子分布を作り出すことができる(図1(a))。この非平衡な電子分布のエネルギー緩和について、局所測定用の別の量子ポイントコンタクトを用いて局所電圧を測定したところ、局所電圧の変化が測定され、その緩和長が $3\mu\text{m}$ であるという測定結果(図1(b))が得られた。この結果は、先行のエネルギー緩和の研究(Le Sueur, PRL 105, 056803 (2010))と合致している。この局所電圧測定によるエネルギー緩和の検出について解析、検討を行ったところ、非平衡電子分布によって測定試料内に形成された電子温度勾配により、局所電位が生成される過程が可能性のあるメカニズムとして明らかになった。

この結果は、エネルギー緩和の測定を量子ポイントコンタクトという比較的簡便な局所プローブ構造を用いて実施できることを示しており、量子ホールエッジ状態のエネルギー緩和測定を通して、量子ホールエッジ状態を用いた新しい固体素子の開発に寄与できる。

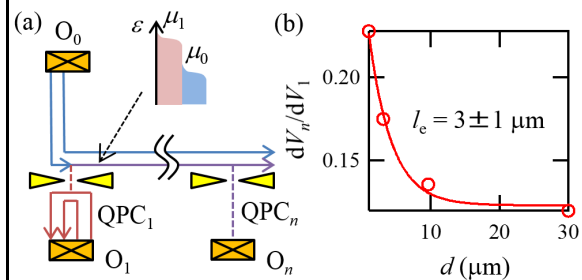


図1 (a)量子ホールエッジ状態内に形成される非平衡電子分布の模式図。(b)量子ポイントコンタクトプローブによって測定された局所電圧の距離依存性。

(2)高速局所電子状態プローブの開発

半導体微細構造を用いたデバイスの高速度化、高効率化のためには、局所電子、スピン状態の静的な特性だけでなく、そのダイナミクスまで含めて物理現象を理解することが重要となる。そこで本研究では、これまで開発してきた半導体量子ドットを用いた局所電子、スピン状態プローブと、近年開発されてきた高周波反射測定による微小デバイス中電荷状態の高速電気測定手法を組み合わせ、半導体微細構造内の局所電子状態を高

速に調べることのできる高速局所電子状態プローブを開発した。

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、測定ターゲット内の局所電子状態によってターゲットから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。従来の低速プローブにおいては、この電子のトンネルを低ノイズで測定するため、帯域幅 1 kHz 程度の低速電気測定回路により観測してきた。一方近年、微小デバイスに高周波信号（ $\sim 100\text{MHz}$ ）を印加し、その反射信号を測定することにより、量子ドット中の単一電荷を高速に高精度に読み出す技術が開発され（Reilly, APL 91, 162101 (2007)）、この技術は量子ドットプローブの読み出し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試料構造を高周波反射測定用に改良し、さらに高周波変調、復調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（図 2(a)）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% 以上のフィデリティで測定できることを確認し、これまで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、数十 μs の高速イベントを実時間で観測できることを示した（図 2(b)）。

この新しい高速局所電子状態プローブは半導体微細構造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。

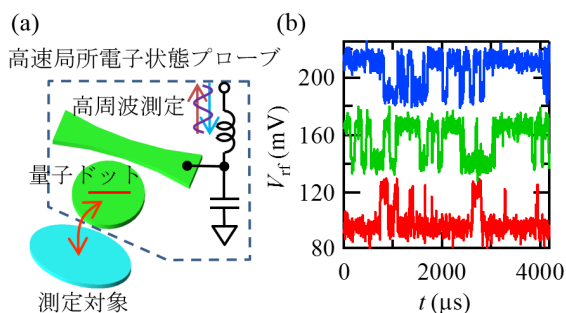


図 2 (a)半導体量子ドットプローブと高周波測定手法を組み合わせる高速局所電子状態プローブの模式図。(b)高速局所プローブを用いて観測されたプローブ量子ドットへの電子のトンネルの実時間測定結果。

(3)高速局所電子状態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る。またこの準位は電圧等により高精度に制御することができる。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ターゲットとして用いて、新プローブによる局所電子状態の測定を行った。

測定ターゲット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大を観測し、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。またこの際、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（図 3）、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。

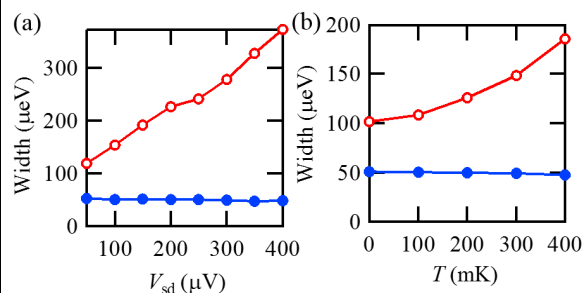


図 3 従来のプローブ(赤)と新しいプローブ(青)の信号幅のバイアス電圧依存性(a)、および温度依存性(b)。従来のプローブに比べて、新しいプローブではバイアス電圧や温度の影響が小さい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Jun Yoneda*, Tomohiro Otsuka*, Takashi Nakajima, Tatsuki Takakura, Toshiaki

Obata, Michel Pioro-Ladrière, Hong Lu, Christopher Palmström, Arthur C. Gossard, and Seigo Tarucha, (*equal contribution),
“Fast Electrical Control of Single Electron Spins in Quantum Dots with Vanishing Influence from Nuclear Spins”,
Physical Review Letters 113, 267601 (2014),
10.1103/PhysRevLett.113.267601
Refereed

Tomohiro Otsuka*, Yuuki Sugihara*, Jun Yoneda, Takashi Nakajima, and Seigo Tarucha, (*equal contribution),
“Measurement of Energy Relaxation in Quantum Hall Edge States Utilizing Quantum Point Contacts”,
Journal of the Physical Society of Japan 83, 014710 (2014),
10.7566/JPSJ.83.014710
Refereed

[学会発表](計4件)

Tomohiro Otsuka, Shinichi Amaha, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Retsu Sugawara, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha,
“Realization of a Fast Single-lead Quantum Dot Probe and Evaluation of the Properties by Probing Quantum Dot States”,
International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Sendai, Japan, July, 2015,
Accepted

大塚朋廣、天羽真一、中島峻、Matthieu Delbecq、米田淳、武田健太、菅原烈、Arne Ludwig、Andreas Wieck、樽茶清悟、
「シングルリード量子ドットプローブの高速化と量子ドット状態測定による性能評価」、
日本物理学会、早稲田大学(東京都新宿区)、2015年3月23日

Tomohiro Otsuka*, Yuuki Sugihara*, Jun Yoneda, Takashi Nakajima, and Seigo Tarucha, (*equal contribution),
“Probing energy relaxation in quantum Hall edge states utilizing quantum point contacts”,
International Conference on Electronic Properties of Two-dimensional Systems, Wroclaw, Poland, July 2, 2013

大塚朋廣、杉原裕規、米田淳、中島峻、樽茶清悟、
「量子ポイントコンタクトを用いた量子ホールエッジ状態におけるエネルギー緩和の観測」、
日本物理学会、徳島大学(徳島県徳島市)、
2013年9月26日

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等
<http://tomootsuka.net>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 朋廣 (OTSUKA Tomohiro)
理化学研究所・創発物性科学研究センター・特別研究員
研究者番号：50588019