

半導体ナノ構造による量子情報処理の研究

Quantum devices for quantum information processing utilizing semiconductor nanostructures



大塚 朋廣 (Tomohiro Otsuka, Ph. D.)

東北大学 材料科学高等研究所 准教授

(Associate Professor, Tohoku University, Advanced Institute for Materials Research)

日本物理学会

受賞: 文部科学大臣表彰若手科学者賞 (2018年) 日本物理学会若手奨励賞

(2017年) 理化学研究所研究奨励賞 (2017年) 他

研究専門分野: ナノ・マイクロ科学 量子デバイス

あらまし

新しい情報処理デバイスの創出に向けて、電子等の量子力学的状態を活用した量子エレクトロニクス、量子情報処理が注目を集めている。本研究ではこのような量子技術の中でも、半導体集積技術との親和性が高いと考えられる半導体量子ドット等の半導体ナノ構造およびこれを用いた量子情報処理に関する研究を行った。半導体量子ドットを用いて電子を微小領域に閉じ込め、内部に形成される電子の量子状態を利用した量子デバイスの研究を進め、量子状態の制御と観測の高度化、効率化を進めた。また半導体量子ビット等の重要な読み出し技術である高周波反射測定について、その測定データの詳細解析を行い、この測定手法におけるノイズメカニズムや半導体量子デバイス測定への影響等を明らかにした。また半導体量子デバイスの大規模化に向けて、半導体量子ドットを結合させた多重量子ドットデバイスや、その内部における電子状態解明についても研究を行った。

1. 研究の目的

将来の新しい高度な情報処理の実現に向けて、電子等の量子力学的状態を活用した量子エレクトロニクス、量子情報処理が注目を集めている。量子状態を活用し

た量子デバイスに向けては、様々な物理系を用いた研究がなされているが、本研究では量子技術の中でも特に半導体集積技術との親和性が高いと考えられる、半導体量子ドット*1等の半導体ナノ構造による量子デバイスおよびこれを用いた量子情報処理に関する研究を行う。

2. 研究の背景

これまでの情報化社会を支えてきた半導体情報処理デバイスについて、半導体微細化の限界や、デバイス動作に伴う発熱等の物理的な制約により、その発展が限界を迎えるのではないかと指摘されるようになってきている。この限界を超えていくために、様々なアプローチが研究されており、その一例として、従来のエレクトロニクスでは十分に活用されていなかった電子等の量子力学的状態を用いた量子エレクトロニクス、量子情報処理が注目を集めている。量子状態が持つ、重ね合わせや量子もつれの特性を活用することにより、これまでの情報処理手法とは異なる新しい情報処理が期待される [1]。

量子エレクトロニクス、量子情報処理の実現に向けて、現在では量子状態を人工的に制御、観測できる様々な物理系 (超伝導、光、イオントラップ、半導体等) を用いた研究が活発に進められている [2]。現状で研究が進んでいる物理系の一つは、超伝導を用いた量子デバイスである。量子コンピュータの構成要素となる量子ビットやその高精度操作が実現され、さらにこれらを集積した量子系における量子情報処理動作の実証や、動作や集積度の改良等が活発に進められている [3]。

一方で半導体を用いた量子デバイスの研究も始まっている。半導体に微細加工を施すことにより、電子を微小な領域に閉じ込めるための半導体量子ドットと呼ばれる構造を形成できる。閉じ込めのサイズを電子の量子力学的な波の大きさと同程度にすることで、閉じ込められた電子は量子効果を示すため、半導体量子ドットを用いて閉じ込めの様子を制御することで、人工的に電子の量子状態を制御することができる。さらに電子のスピン*2と呼ばれる自由度を利用することで、固体デバイスの中でも量子状態の寿命を比較的長く保つことができ、高精度な量子ビット操作を実現するこ

半導体ナノ構造による量子情報処理の研究

Quantum devices for quantum information processing utilizing semiconductor nanostructures

とができるようになってきた [4]。この半導体を用いた量子デバイスはそのデバイスサイズが小さく、またその作製の際に、既に産業界で活用されている半導体の微細加工技術を利用することができるため、デバイス集積化等の面でメリットがあると考えられている。そして、近年では実際に産業界の参入も始まってきている。

3. 研究の方法

半導体ナノ構造を用いた量子エレクトロニクス、量子情報処理においては、半導体ナノ構造中の量子状態の人工的な制御と観測の高度化、効率化が重要となる。量子状態の制御は、半導体量子ドット等の半導体ナノ構造中に形成された電子の量子状態が、デバイス中の微小電極に印加された電圧により生成される閉じ込めポテンシャルによって変化することを利用して制御される。ただしこの際、半導体ナノ構造内に形成される電子の量子状態のエネルギースケールが $100 \mu\text{eV}$ 程度と小さいことも多いため、熱擾乱や電気ノイズ等の影響を低減したデバイス動作環境を実現する必要がある^{*3}。このため極低温冷凍機を用いてデバイスを冷却し、熱擾乱を低減した極低温環境下で半導体量子デバイスの評価、測定を行えるようにした。さらに、電子量子状態の制御に用いる電圧を生成する電子回路からの電気ノイズも、半導体量子デバイス中の電子量子状態に影響を及ぼすため、制御用電圧印加回路やフィルタ回路についてもノイズ低減等のための改良を行った。さらに半導体ナノ構造中電子の量子状態を高速に制御するためには、電子状態制御用の高速電気信号の生成が重要となる。このために高速電気信号生成プログラムの整備、改良を行い、高速な電子状態制御のための制御電圧パルス列を自由度が高い方法で効率的に生成できるようにした。

また半導体量子ドット等の半導体ナノ構造中の電子の量子状態の観測について、量子状態の観測はナノ構造中の電子の電荷状態を計測することにより実現される。この際、半導体ナノ構造中の電子の電荷を、電子一個レベルかつ高速に計測する必要があり、このために高感度な電荷計が開発されてきた。量子ポイントコンタクト^{*4}や量子ドットといった半導体ナノ構造の電

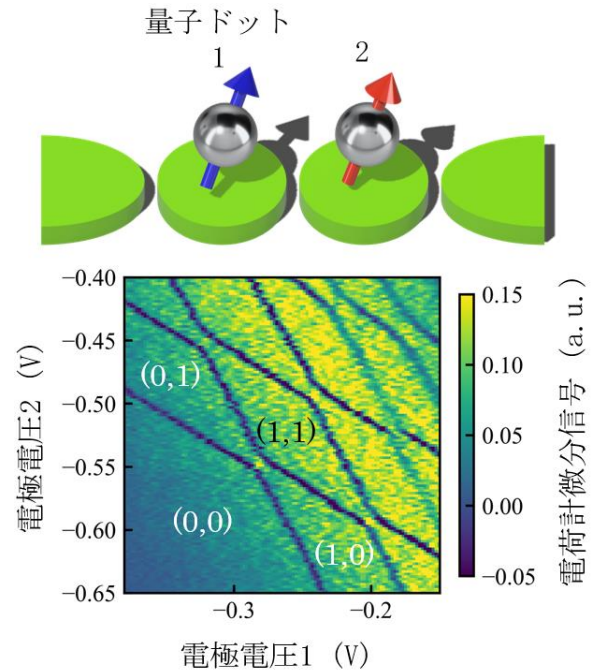


図1 半導体量子ドットデバイスの模式図と、高周波反射測定により観測された半導体量子ドットデバイスの電荷状態測定信号

気伝導は、近傍の静電ポテンシャルを鋭敏に反映する。そこでこれを利用することにより、近傍に存在する電子一個の静電ポテンシャル変化を検出することができる。さらにこの高感度電荷センサを高周波共振器内に組み込み、高周波信号を印加して高周波反射信号を調べ、センサの電気伝導変化について高周波を用いて測定することで半導体ナノ構造中の電子量子状態を高速に読み出すことが可能となる [5,6]。そこでこの半導体ナノ構造の高周波反射測定系についても、整備、改良を行った。

これらをもとに半導体ナノ構造における電子の量子状態の電氣的な制御と観測の実験を行った。まず半導体量子ドットデバイスにおいて電子状態制御の実験を行い、半導体量子ドット中電荷状態の制御と観測を行った。マイナス電圧をデバイス内の金属電極に印加することにより電極近傍の電子を空乏化して、電子の閉じ込めポテンシャルおよび半導体量子ドットを形成した。そして半導体量子ドット中の電子数を一個ずつ制御した。半導体量子ドットを二つ並べたデバイスを用いて、電子状態制御を行った結果の一例を図1に示す。

半導体ナノ構造による量子情報処理の研究

Quantum devices for quantum information processing utilizing semiconductor nanostructures

制御電極電圧の変化とともに半導体量子ドット内の電子数が変化し、高周波反射測定による電荷計微分信号の測定で、電子数が変化する条件において電荷遷移線と呼ばれる信号を観測することができる。さらにこの図の左下の領域では電荷遷移線が消失しており、半導体量子ドット内部の電子数がゼロとなったことを示している。この領域から電荷遷移線を超えるごとに電子が一個ずつ半導体量子ドット内に増えていくため、各領域の電子数を図中の数字のように求めることができる。これにより、半導体量子ビット等の量子デバイスとして活用される少数電子状態を安定的に形成できることを確認した。さらに半導体量子ドット中の電子のスピン状態を活用した量子状態についても、その制御、および観測の実験を行った。これによりスピン量子状態による量子干渉効果等を観測し、さらにこれらの量子状態について、高周波信号依存性等についても調べた。

また半導体ナノ構造中の単一電子状態を検出する高周波反射測定についても、高周波信号の詳細解析を実施した。単一電子状態の測定感度、および単一試行での量子状態読み出しに必要となる測定積分時間は、高周波測定系で生じるノイズの影響を受ける。このノイズについて解析を行った。図2の模式図に示された高周波反射測定系で観測された高周波反射信号に含まれるノイズを調べたところ、周波数依存性を持った特徴的なノイズが観測された。この周波数依存性を解析することで、高周波測定系の各高周波部品、および測定試料となる半導体ナノ構造試料におけるノイズ発生メカニズムについて明らかにした。またこのノイズについて、高感度電荷計の感度を定める動作条件設定電圧への依存性についても調べた。ここで得られた知見をもとに、ノイズについてのモデル計算も活用しながら、測定積分時間の変化に伴って、測定に影響するノイズの主要メカニズムが変化することを明らかにした。特に測定積分時間の増大に伴い、半導体ナノ構造デバイスにおける電荷ノイズの影響が大きくなることが分かった [7]。これらの知見は半導体量子ビット等の半導体量子デバイスの高感度、高速測定において重要となる。

また半導体ナノ構造を活用した量子デバイス、システムの大規模化に向けて、集積可能な量子デバイス方

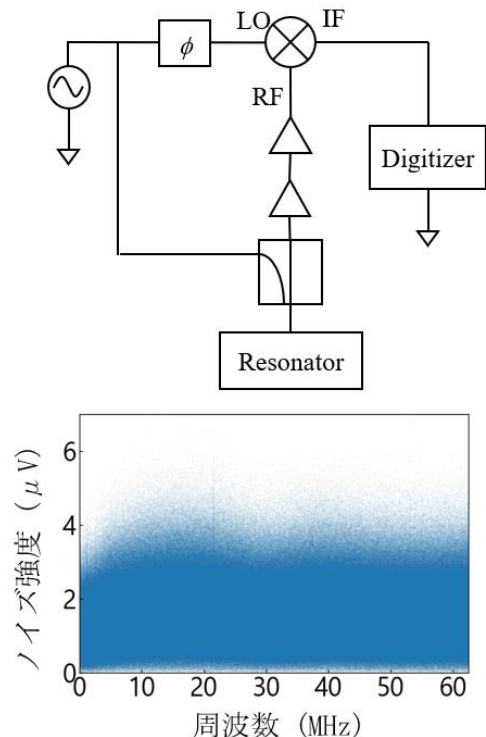


図2 高周波反射測定回路の模式図と、実際の高周波反射測定回路からの信号で観測されたノイズの周波数依存性

式として有望な半導体量子ドット系について、複数の半導体量子ドットを結合させた多重量子ドットデバイスの研究を行った。半導体量子ビットでは単一の半導体量子ドット中にトラップされた電子が量子ビットの構成要素となる。量子ビットの数を増やすためには、半導体量子ドットの数を増やし、結合させていくことがシンプルなアプローチである [8]。このために半導体量子ドット間の結合や、読み出し用の電荷センサ配置等を改良した半導体量子デバイスの基本ユニット構造について研究を行った。さらに半導体多重量子ドットデバイスについて測定を行い、半導体多重量子ドットにおける電子状態制御を行った。図3にこの電子状態制御の測定と観測の一例を示す。制御電極電圧の変化とともに半導体多重量子ドット内の電荷状態の変化が観測され、これに伴う電荷遷移線を観測することができる。また半導体多重量子ドットにおいて生じる電子間相互作用を活用した電子状態制御についても研究を行った。これらは半導体多重量子ドットを用いた半導

半導体ナノ構造による量子情報処理の研究

Quantum devices for quantum information processing utilizing semiconductor nanostructures

体量子デバイス、システムの大規模化に向けて有用となる。

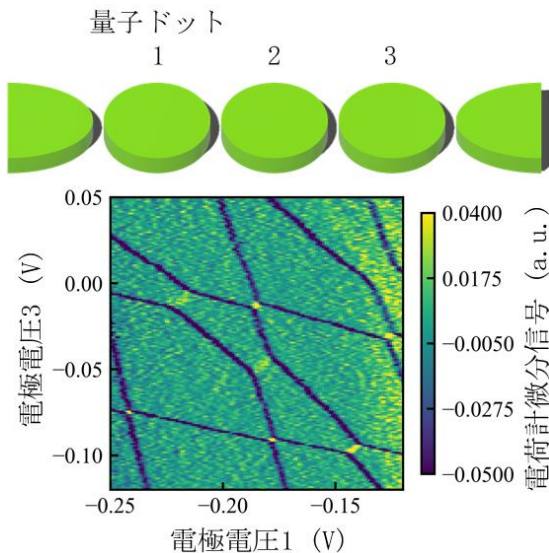


図3 半導体多重量子ドットデバイスの模式図と、多重量子ドットデバイスで観測された電荷状態制御、測定結果

4. 将来展望

本研究では、半導体量子ドット等の半導体ナノ構造およびこれを用いた量子情報処理の研究を行った。これにより半導体ナノ構造中の電子の量子状態の制御と観測の高度化、効率化を進めた。半導体量子デバイスの重要な読み出し技術である高周波反射測定について、ノイズメカニズムやその量子状態測定への影響等を明らかにした。また半導体多重量子ドットデバイスについても研究を行った。今後は本研究で得られた成果をもとに、量子情報処理で重要となる半導体ナノ構造中の量子状態の制御と観測のさらなる高度化を進めていきたい。また半導体多重量子ドットを用いた半導体量子デバイスの集積技術開発を通して、半導体ナノ構造を用いた大規模な量子情報処理の進展に貢献していきたい。さらにこれらの研究の中では、従来からの半導体量子系材料だけではなく、新しい半導体量子系材料の特性解明と活用も重要であり、興味深い研究対象として考えている。

用語解説

- *1 半導体微細加工により形成される電子を微小領域に閉じ込めた構造。電子の量子力学的な波の大きさと同程度（数十 nm）の構造を作ることによって、量子力学的な効果を発現させ、人工的に制御、観測することができる。
- *2 電子は電荷の自由度の他にスピンの自由度を持つ。スピンは電場と直接は相互作用しないため、デバイス中の電荷ノイズ等の影響を受けづらく、その量子力学的状態が保たれやすい。
- *3 室温の温度エネルギーは 25 meV ほどあり、これが量子力学的なエネルギーより大きい状態では、温度の影響により量子状態を観測、制御することが難しくなる。
- *4 電子の伝導路の幅を狭窄した半導体ナノ構造。伝導路の幅が電子の量子力学的な波の大きさと同程度に小さくなると、電子の量子性に起因する特徴的な伝導特性が観測される。半導体量子ドットと同じく、周囲の静電ポテンシャルによって伝導度が変化するため、高感度な電荷計として活用できる。

参考文献

- [1] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press.
- [2] T. D. Ladd, F. Jelezko, R. Laflamme, Y. Nakamura, C. Monroe, and J. L. O'Brien, *Quantum Computers*, Nature **464**, 45 (2010).
- [3] C. Neill et al., *A Blueprint for Demonstrating Quantum Supremacy with Superconducting Qubits*, Science **360**, 195 (2018).
- [4] J. Yoneda et al., *A Quantum-Dot Spin Qubit with Coherence Limited by Charge Noise and Fidelity Higher than 99.9%*, Nature Nanotechnol. **13**, 102 (2018).
- [5] D. J. Reilly, C. M. Marcus, M. P. Hanson, and A. C. Gossard, *Fast Single-Charge Sensing with a Rf Quantum Point Contact*, Appl. Phys. Lett. **91**, 162101 (2007).
- [6] C. Barthel, M. Kjergaard, J. Medford, M. Stopa,

半導体ナノ構造による量子情報処理の研究

Quantum devices for quantum information processing utilizing semiconductor nanostructures

- C. M. Marcus, M. P. Hanson, and A. C. Gossard, *Fast Sensing of Double-Dot Charge Arrangement and Spin State with a Radio-Frequency Sensor Quantum Dot*, Phys. Rev. B **81**, 161308 (2010).
- [7] M. Shinozaki et al., *Gate Voltage Dependence of Noise Distribution in Radio-Frequency Reflectometry in Gallium Arsenide Quantum Dots*, Appl. Phys. Express **14**, 035002 (2021).
- [8] D. Loss and D. P. DiVincenzo, *Quantum Computation with Quantum Dots*, Phys. Rev. A **57**, 120 (1998).

この研究は、令和元年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、令和 2 ～ 3 年度に実施されたものです。