

| | | | |
|------|------------|-------|-------|
| 整理番号 | 2020-J-043 | 報告者氏名 | 大塚 朋廣 |
|------|------------|-------|-------|

研究課題名 高速量子ドットセンサを用いた量子系材料の研究

<代表研究者> 機関名： 東北大学 職名： 准教授 氏名：大塚朋廣

<共同研究者> 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：
 機関名： 職名： 氏名：

<研究内容・成果等の要約>

固体微細材料では電子の量子性が発現し、形状や電圧等によってその人工的な制御が可能であるため、これを活用した有用なデバイスの創出が期待されている。例えば、量子性を活用して情報処理を行うことにより既存の情報処理の限界を超える量子コンピュータ等があり、固体微細材料中での電子の量子状態を利用して、性能や集積化等の観点から優れた量子情報処理デバイスを実現できる可能性がある。このような量子状態を活用した量子技術は新しいエレクトロニクス等の観点から近年積極的に研究がなされており、これらの技術をさらに発展させ、有用な量子デバイスを創出していくためには、電子の量子状態を形成、保持するための量子系材料の果たす役割が大きい。量子系材料内部での電子状態についてのミクロな理解とともに、新しい量子系材料の物性解明、利用についての基礎的研究が重要となる。

そこで本研究では、量子デバイスに向けて有用であると考えられる新しい量子系材料について、試料作製技術の開発や、その材料内部での電子物性の解明等の研究を行った。新しい量子系材料では、従来からの半導体量子系材料とは試料作製におけるパラメータや条件が異なるため、量子デバイスを構成する微細構造についての新しい試料作製技術が必要なものがあり、これらの技術について開発を行った。また量子系材料中でのミクロな電子状態を調べるためには、高速量子ドットセンサ等の手法が有用となるが、このような高感度な電気測定手法について改良を進めた。そしてこれらの測定手法を活用することにより、量子系材料における電子輸送特性を調べ、量子系材料内部の電子物性の解明を行った。

<研究発表（口頭、ポスター、誌上別）>

口頭

“Noise analysis of radio-frequency reflectometry for single spin and charge detection in quantum dots”, Tomohiro Otsuka, Motoya Shinozaki, Yui Muto, Takahito Kitada, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takumi Ito, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, and Seigo Tarucha, 1st Online RIEC International Workshop on Spintronics, Online, Nov. 18, 2021 (Invited).

「CVD グラフェンナノリボンにおける単一量子ドット形成」、北田孝仁、阿部峰也、瀬尾瑞樹、佐藤尚郁、篠崎基矢、相澤拓海、武藤由依、金子俊郎、加藤俊顕、大塚朋廣、日本物理学会、オンライン開催、2021年3月15日

「GaN FET 中量子ドット形成のチャネル長依存性」、阿部峰也、北田孝仁、伊藤範和、田中岳利、中原健、大塚朋廣、日本物理学会、オンライン開催、2021年3月13日

ポスター

“Quantum dots formed in GaN/AlGaN FETs and channel length dependence”, Takaya Abe, Takahito Kitada, Norikazu Ito, Taketoshi Tanaka, Ken Nakahara, and Tomohiro Otsuka, International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Online, Nov. 2, 2021.

“Readout noise in radio-frequency reflectometry in gallium arsenide quantum dots”, Motoya Shinozaki, Yui Muto, Takahito Kitada, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takumi Ito, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Seigo Tarucha and Tomohiro Otsuka, International Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, Online, Feb. 24, 2021.

“Quantum Dots in plasma CVD Graphene Nanoribbons”, Takahito Kitada, Mizuki Seo, Takaya Abe, Motoya Shinozaki, Naohumi Sato, Takumi Aizawa, Yui Muto, Toshiro Kaneko, Toshiaki Kato and Tomohiro Otsuka, International Symposium for The Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, Online, Feb. 24, 2021.

誌上

“Gate voltage dependence of noise distribution in radio-frequency reflectometry in gallium arsenide quantum dots”, Motoya Shinozaki, Yui Muto, Takahito Kitada, Takashi Nakajima, Matthieu R. Delbecq, Jun Yoneda, Kenta Takeda, Akito Noiri, Takumi Ito, Arne Ludwig, Andreas D. Wieck, Seigo Tarucha, and Tomohiro Otsuka, Applied Physics Express 14, 035002 (2021).

<研究の目的、経過、結果、考察（5000字程度、中間報告は2000字程度）>

研究の目的

固体微細材料では電子の量子性が発現し、またその制御が可能であるため、これを活用した有用なデバイスの創出が期待されている。例えば、量子性を活用して情報処理を行うことにより既存の情報処理の限界を超える量子コンピュータ等があり、固体微細材料中での電子の量子状態を利用して、性能や集積化等の観点から優れた量子情報処理デバイスを実現できる可能性がある。このような量子状態を活用した量子技術は、新しいエレクトロニクス等の観点から近年積極的に研究がなされている。これらの技術をさらに発展させ、有用な量子デバイスを創出していくためには、電子の量子状態を形成、保持するための量子系材料の果たす役割が重要であり、その材料内部での電子状態のミクロな理解とともに、新しい量子系材料の物性解明、利用についての基礎的研究が重要となる。

そこで本研究では、量子デバイスに向けて有用であると考えられる新しい量子系材料について、試料作製技術の開発や、その材料内部での電子物性の解明等の研究を行う。新しい量子系材料では、量子デバイスを作製するための微細構造形成に関する基礎技術の開発が必要なものがあり、これらについて開発を行う。そして高感度な電気測定手法を活用することにより、量子系材料内部の電子物性の解明を実施する。これまで私たちは、半導体量子ドット等の人工量子系と高周波による電気的高速測定手法を組み合わせ、固体微細材料中での電子状態を高精度に調べる高速量子ドットセンサの手法を開発してきた。本研究ではこれらの精密電気測定技術を活用して、新しい量子系材料における電子物性の解明を進める。

研究の経過、結果、考察

従来からの半導体量子系においては、ガリウム砒素やシリコン等の半導体材料が活用されてきた。これらの材料ではこれまでに多くの研究がなされ、試料作製技術が発達しているため、量子効果を発現させるための量子ポイントコンタクトや量子ドット等の微細構造の作製が可能になっている。一方、新しい量子系材料では試料作製におけるパラメータ、条件が従来半導体とは異なるため、微細構造試料作製技術の新たな開発が必要になるものがある。グラフェンやグラフェンナノリボン等のナノ炭素材料は、欠陥や不純物の少ないクリーンな系を実現でき、電子スピン量子系に対して悪影響を及ぼす核スピンの制御等も可能であるため、電子のスピン量子状態を活用したスピン量子ビット等の量子デバイスに向けて有用な量子系材料と考えられる。一方で新しい材料であるため、安定で制御性の良い量子ポイントコンタクトや量子ドット等の量子微細構造を形成するためには、低温でも安定に動作するコンタクトや量子微細構造の閉じ込めポテンシャルを制御する微小金属電極等についての作製技術の開発が重要となる。そこでまずこれらの試料作製技術の開発を行った。

グラフェンやグラフェンナノリボン等のナノ炭素材料等においては、バルク材料からの剥離により薄膜材料を作製し、これに対して微細加工を施すことにより試料を作製する場合がある。このような試料作製のための基礎技術について研究を実施した。バルク材料からの剥離について温度や剥離回数等の条件の最適化を実施することにより、所望の厚み、大きさを持つ薄膜材料をより高い生成率で作製できるようにした。さらに薄膜材料について位置を制御して配置をするために、薄膜材料の転写装置について開発を行った。光学顕微鏡とマニピュレータ等を組み合わせることにより、顕微鏡観察下で薄膜試料を移動させ、マイクロメートル程度の精度で位置決めをして転写するためのシステムを構

築した。そして、任意形状の薄膜材料に対して、電子線リソグラフィーやフォトリソグラフィーを用いてパターンニングを行う方法を開発し、実際に良好なパターンニングができることを確認した。これらの試料作製技術をもとに、新材料に対してコンタクト電極や静電ポテンシャル制御のためのゲート電極を作製し、電極材料、成膜条件等の最適化を実施した。これらによって量子デバイスに必要なコンタクト電極やゲート電極を実現することができ、新しい量子系材料における試料作製技術を実現することができた。

次に新しい量子系材料を用いて有用な量子デバイスを創出していくためには、量子系材料内部に形成される電子状態をマイクロに解明して利用することが重要となる。そこで、開発した試料作製技術を用いて量子系材料における電子物性を調べるための測定試料を作製し、その基礎電子物性評価を行った。また固体微細材料中の電子物性の解明においては材料体中の電子状態を単一電子のレベルで高感度に測定する測定手法が有用であり、この測定手法の改良についても研究を実施した。そしてこれらを活用することにより、新しい量子系材料における電子輸送現象の解明や、デバイス応用に関する研究を実施した。

半導体量子系においては、量子状態の典型的なエネルギースケールがサブ meV オーダーとなることが多く、明瞭な量子状態の観測のためには、熱ゆらぎを抑えた極低温環境下での測定が重要となる。そこで液体ヘリウムやヘリウムガス循環型の無冷媒冷凍機を用いて測定試料を冷却し、極低温環境下での電子輸送特性を評価した。一般に半導体材料では、温度の減少とともに熱励起キャリアが減少し、室温での特性と比べてキャリア濃度やコンタクト抵抗値の変化等が生じる。そこでグラフェンやグラフェンナノリボンなどのナノ炭素材料等の新しい量子系材料について、極低温環境下でのこれらの特性の評価を行った。この結果、材料作製条件を最適化することにより、極低温環境下でも有限のキャリア密度を有すること、また k Ω m 以下の良好なコンタクト抵抗を実現できることを確認し、量子ポイントコンタクトや量子ドット等の量子微細構造の電気測定に必要な電気伝導特性が実現されていることを確認した。

さらに量子系材料中の局所的な電子状態の解明のためには、試料全体を通して流れるマクロな電流や電圧等の測定だけでなく、材料中での局所的な電子状態を直接的に調べることでできるマイクロな測定手法が有用となる。このような測定手法として、これまで私たちは半導体量子ドット等の中に形成される人工量子系をプローブとして活用し、またこのプローブへの電子の移動を高周波を利用した高速測定手法により単一電子のレベルで検出して局所電子状態を調べる、高速量子ドットセンサの手法を開発してきた。この測定手法について、感度等に影響を及ぼすノイズの解析を行った。測定セットアップからの信号について高速デジタイザを用いて解析用のパソコンに取り込み、その信号について周波数特性解析を実施した。この結果、試料中での電荷ゆらぎ等に対応するノイズ、高周波共振器、増幅器からのノイズ等、測定における各ノイズの寄与を解明し、そのメカニズムを明らかにすることができた。またそれぞれのノイズが測定結果に及ぼす影響を明らかにした。この結果は、新しい量子系材料の電子物性のマイクロな解明に有用であるとともに、新しい量子系材料を活用した量子センサ応用等においても重要となる。

これらの電氣的な高精度測定手法を活用することにより、新しい量子系材料における電子物性の解明を進めた。グラフェンやグラフェンナノリボン等のナノ炭素材料を用いて電界効果トランジスタ試

料の測定を行い、ゲート電圧によるキャリア密度の変調を確認し、キャリアのピンチオフ近傍で形成される量子ドット等の電子輸送特性の観測を行った。グラフェンを細線状に加工した微細構造であるグラフェンナノリボンにおいては、試料端の形状により電子が閉じ込められるポテンシャルが形成される。これにより電子がゼロ次元的に閉じ込められた量子ドットが形成され、ソースドレインバイアス電圧とゲート電圧の関数として電流をプロットすると、電流がひし形に抑制されるクーロンダイヤモンドと呼ばれる量子ドットに特有の電気伝導特性が観測された。はじめは多数の量子ドットが結合した特性が観測されたが、グラフェンナノリボン形状等を最適化することにより、形成される量子ドットの数削減し、単一の量子ドット形成によるものと考えられるゼロバイアス電圧付近で閉じたクーロンダイヤモンド構造を観測することに成功した。この伝導特性を解析することにより、形成された量子ドットの静電エネルギーと軌道量子エネルギーを見積もったところ、それぞれ 10meV、数 meV となり、従来の半導体材料を用いて形成された量子ドットよりも大きなエネルギーが実現されていることが分かった。これはエッジ形状によって小さな領域への強い閉じ込めポテンシャルが形成されることを反映していると考えられる。またこれらの量子ドットの特徴的なエネルギーが大きいことから、試料温度を 20K 程度まで上昇させても量子ドットに特有の電気伝導特性を観測することができた。この結果は、現状では極低温環境が必要な量子デバイスの動作温度の改善に貢献できるものである。またこれらの量子ドットの電気伝導特性について、超伝導磁石を用いて磁場を印加することにより、スピン量子ビットデバイス等に向けて重要となるスピン物性まで調べた。さらにナノ炭素材料微細構造試料の電気伝導特性について、センサ応用等で重要となる試料表面への付着物等による変化についても測定、解析を進めた。

またこれらの精密電気測定手法を活用して、他の量子系材料についても電子輸送特性の測定を行った。窒化ガリウムは直接遷移型の大きなバンドギャップを持ち、パワーデバイスや高周波デバイスにおいて重要な材料であるとともに、量子デバイスにおいても光の量子状態との結合や、高温動作化に向けて有用となる可能性のある量子系材料である。窒化ガリウムとアルミニウム窒化ガリウムのヘテロ構造からなるシンプルな電界効果トランジスタ構造について、伝導チャンネルのピンチオフ条件近傍で材料内部に起因するポテンシャルゆらぎにより量子ドット形成がなされることが明らかとなっており、その内部に形成される量子状態を活用した量子デバイス応用等の可能性がある。この窒化ガリウム電界効果トランジスタ構造における量子ドット形成について、トランジスタの形状を変えた試料を用意し、電気伝導特性のゲート長依存性を測定して、そのメカニズム等を調べた。この結果、ゲート長を短くするにつれて、より少ない数の量子ドットが形成される傾向が観測され、少数量子ドットの形成を確認することができた。またこの少数量子ドットにより生じたクーロンダイヤモンド構造を解析することにより、量子ドットの静電容量、サイズ等のパラメータに関する情報を得ることができ、内部に形成される量子状態について調べることができた。これらの知見は量子デバイス応用に向けて有用となる。

以上のように本研究により、ナノ炭素材料等の新しい量子系材料について、試料作製技術の開発や材料内部での電子輸送現象の解明、デバイス応用等の基礎的研究を進めることができた。今後は本研究で得られた知見を活かし、新しい量子系材料内部での電子の量子状態を活用したデバイス応用の研究をさらに進めていきたい。