

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 増淵 寛

本論文は、グラフェンナノ構造の作製とその量子デバイス実現に向けた基礎研究に関するものである。新たなグラフェンナノ構造作製技術を確立するとともに、グラフェン量子ドット・グラフェン結合二重量子ドット・ナノ構造スピバルブ素子などの新たな量子機能素子が実現可能であることを実験的に示している。論文は以下の内容の7章から構成されている。

第1章では序論として、研究の背景と目的が記述されている。炭素原子が蜂の巣格子状に結合した単分子膜「グラフェン」は、線形なエネルギー分散関係を有し、有効質量ゼロの相対論的粒子が電気伝導を担う特殊な系である。長年の間、机上の産物と考えられていたが、近年、劈開法という驚くほど原始的な手法でその形成が確認され、特異な電子輸送特性から物性的な興味を集めるとともに次世代エレクトロニクス材料としても期待されている。グラフェンナノ構造作製技術の確立と、グラフェンナノ構造を利用した量子デバイス実現が本研究の目的である。

第2章ではグラフェン素子作製技術として、単層グラフェンの作製法・評価法について記述されている。論文執筆者が研究を開始した当時、グラフェン素子作製に成功した研究グループは世界でも非常に限られていた。本研究ではメカニカル劈開法を利用してグラフェン電界効果型トランジスタ素子を作製し、両極性電界効果・半整数量子ホール効果を観測している。

第3章ではグラフェンナノ構造作製技術として、原子間力顕微鏡を用いたグラフェンナノ構造の作製技術開発について記述されている。原子間力顕微鏡を利用した陽極酸化法に着目し、幅55 nm程度のナノリボン素子が作製されている。ナノリボン素子の電気伝導測定によりコンダクタンスの顕著な温度依存性と非線形性が観測され、トランスポートギャップの形成が確認されている。この結果は陽極酸化法を利用したはじめてのグラフェンナノデバイス作製例である。

第4章では電子線リソグラフィ法とプラズマエッチングの組み合わせによる量子ドット素子の作製技術の開発について記述されている。グラフェンナノリボンを基本構造として利用し、単一量子ドット素子および結合二重量子ドット素子が作製されている。単一量子ドット素子において単電子トンネリング現象・クーロンブロックード現象を観測している。さらに結合二重量子ドット素子の電荷安定度ダイアグラム測定において、ハニカム状の電流抑制領域が観測されている。この結果は、グラフェン結合二重量子ドット素子が「人工分子」として動作していることを示している。さらに、量子ドット間に設置されているサイドゲート電圧の調整により電荷安定度ダイアグラムの電流抑制領域がストライプ状・ドット状に変化する様子が観測され、量子ドット間結合がゲート電圧により変調可能であること示している。以上の結果は、グラフェンを用いて様々な量子回路が作製可能であることを示しており、グラフェンの幅広い応用可能性を示している。

第5章はグラフェンナノ構造へのスピン注入として、グラフェンにおけるスピン伝導とその制御について記述されている。近年、電子の電荷だけでなくスピンをも操作することで、さらなる高機能デバイスの実現を目指す「スピントロニクス」が注目を集めている。とくに、スピン依存伝導現象をゲート制御する素子は半導体デバイスの機能を飛躍的に進歩させる可能性を有する。

グラフェンに強磁性ナノギャップ電極を接合したスピバルブ素子において磁気抵抗曲線が明瞭なヒステリシスを示し、スピン依存伝導が観測されている。さらにナノギャップ電極を有するグラフェン素子においては、ファブリーペロー干渉効果に起因すると考えられるコンダクタンス振動と、それに同期した磁気抵抗効果の変調が観測されており、グラフェンにおいてファブリーペロー干渉効果を利用することによるスピン依存伝導制御の可能性を示している。

第6章はパルス強磁場を利用した半整数量子ホール効果の測定について記述されている。非破壊型ロングパルスマグネットを利用することにより、最大磁場 53 T、パルス幅 80 ms のパルス強磁場を発生させ、輸送現象測定を行っている。電子・ホールのどちらのキャリアを注入した場合でも半整数量子ホール効果が観測されており、パルス強磁場技術がグラフェンの量子ホール効果研究に適用可能であることを示している。本測定はパルス強磁場技術を利用した半整数量子ホール効果の初めての観測例である。

第7章は結論として、本研究をまとめている。本研究では新たなグラフェンナノ構造作製技術を確立するとともに、ナノ構造における離散的エネルギー準位形成効果とグラフェンの特長を利用することで、グラフェン結合二重量子ドット・ナノ構造スピバルブ素子などの新たな量子機能素子が実現可能であることを実験的に示した。これらの結果は、グラフェンナノ構造を利用した応用素子実現に向けた重要な一歩であるとしている。

以上、本研究ではグラフェンナノ構造の作製技術の開発と、その量子輸送現象特性に関する研究がまとめられている。審査員からは、二重量子ドットの量子輸送現象に関する実験結果の詳細な議論、本研究で世界に先駆けて実現した AFM リソグラフィのメリットのアピール、グラフェンにおけるディラックフェルミオン特有の現象が観測されている部分の説明、グラフェンという新規材料の研究をゼロから立ち上げる上での困難であった点など、より詳細な説明と議論を加えるべきという指摘があったが、本研究はグラフェンという新規材料系の物性解明と素子応用への展開を拓く点で大きな意義があり、学位論文として十分な水準にあることが審査員全員によって認められた。よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。