

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 荒井 美穂

本博士論文は「グラフェンナノ構造の作製と光検出素子への応用」と題し、グラフェンナノ構造の作製技術の確立と量子輸送現象の観測、光検出素子への応用を目指して論文提出者が行った研究成果をまとめたものである。

本論文は7章より編成される。以下にそれぞれの章の要旨を列挙する。

### 第1章

本論文の序論として、グラフェンおよびグラフェンナノ構造の基礎物性が説明され、それに基づいて本研究の目的を記述している。

### 第2章

基礎的な実験技術として、メカニカル劈開法によるグラフェンの作製手法と電気伝導測定手法について記述している。

### 第3章

グラフェンナノ構造として、ナノリボン、単一量子ドット、直列結合二重量子ドット、並列結合二重量子ドットを電子線リソグラフィ法およびプラズマエッチング法を活用して作製した。グラフェンはバンドギャップが存在しないため、従来の半導体において用いられるゲート電圧印加による電子の閉じ込めができないが、幅 100 nm 以下に狭窄化したグラフェンナノリボンを作製し、ディラック点付近で伝導度がゼロとなる伝導ギャップを観測した。さらにグラフェン量子ドットを作製し、クーロンブロック効果と単電子トンネリングを観測した。直列結合二重量子ドットでは、量子ドット間の結合を制御することにより電荷安定度ダイアグラムが系統的に変化する様子を観測した。並列結合二重量子ドットでは、量子ドット間結合の制御により電荷安定度ダイアグラムが系統的に変化する様子とともに、伝導チャンネル上にない量子ドットの電子数変化に起因して、伝導チャンネル上にある量子ドットのクーロンブロック振動のピーク位置がシフトする様子、すなわち単電子スイッチング現象を観測した。この観測は、グラフェン並列結合二重量子ドットを利用した単一光子検出の実現に向けた基礎技術に対応する。

### 第4章

グラフェンおよびグラフェンナノ構造の高移動度化・高品質化のため、劈開法と原子層転写法により六方晶窒化ホウ素 (h-BN) とグラフェンを積層し、下地および絶縁膜として利用した。転写法の技術的説明に続き、グラフェン/h-BN における移動度の向上とバリスティック伝導の観測を示し、h-BN 上グラフェンナノリボンの作製とその伝導特性について記述している。さらに h-BN/二層グラフェン/h-BN 積層構造においてトップゲートおよびバックゲートを利用して垂直電界を印加することにより、二層グラフェンのバンドギャップを制御した。伝導特性の温度依存性を詳細に解析し、低温におけるキャリア伝導のメカニズムを解明した。

### 第5章

グラフェンおよびグラフェンナノ構造の中赤外光検出器への応用として、グラフェンナノリボンを利用したボロメータ素子の実現と、強磁場中グラフェン/h-BNにおけるサイクロトロン吸収に起因する光起電力効果の観測について記述されている。グラフェンは比熱が非常に小さく、また原子層膜でありながら可視光から赤外光という広い波長領域で2%程度の光の吸収率を持つため、広い検出波長領域で高速応答するボロメータとしての利用が期待されている。中赤外光（波長10.7  $\mu\text{m}$ ）をグラフェンナノリボンに照射したところ、レーザ強度の増大に対してクーロン振動の半値幅の単調増加を観測した。光吸収によって電子温度が上昇するボロメトリックな効果であると考えられ、グラフェンナノリボンという新しい素子構造での中赤外光検出を実験的に示した。またグラフェン/h-BNを用いて、量子ホール状態における光起電力効果を観測した。光応答信号は光の波長に共鳴した磁場で観測されており、サイクロトロン共鳴による光応答である。この光応答信号は200 Kという比較的高温域でも観測されており、より実用的な温度領域における高感度中赤外光検出素子への展開が期待される。

## 第6章

グラフェンナノ構造素子をより微小化（10 nm以下）するためには、より分解能の高いプロセスが求められる。原子間力顕微鏡（AFM）を使った陽極酸化により、高い分解能でのナノ構造作製が期待される。そこでAFM陽極酸化によってグラフェンナノリボンを作製し、その電気伝導特性を測定した。AFM陽極酸化を用いて作製した酸化グラフェンにおける電気伝導特性がカンチレバー印加電圧増加に伴い絶縁性が高まることを確認した。伝導度が完全に抑制できる酸化条件を用いて幅40 nm、30 nm、10 nmのグラフェンナノリボンを作製したところ、ディラック点付近で伝導ギャップが明瞭に観測された。幅10 nmのグラフェンナノリボンはAFMリソグラフィーによって作製されたグラフェンナノ構造の中で最も微小な構造である。従来のEBLを使用した方法より分解能が高いリソグラフィー手法として、AFM局所酸化法によるナノ構造作製法を確立したことを示している。

以上のように、本論文ではグラフェンナノ構造の作製と量子輸送現象の観測、中赤外光検出を実現したこれらの知見はグラフェンの物性解明と応用可能性の提示、特に高感度光検出への展開可能性を示しており、グラフェンナノ構造素子という最先端分野の発展に大きく寄与する結果であると評価でき、特に複数の分野を融合した研究という意味で物理工学としての貢献が大きい。

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。