

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 森川 生

超高移動度を示す二次元電子系においては、キャリアがバリステック(直進しながら)かつコヒーレント(位相を保って)に伝搬し、電子の流れをあたかも光波の流れのように捉えることができる。このことは、電子波の屈折や干渉などをあたかも光波を操るように制御することも意味しており、この概念を利用したいわゆる電子光学(“Electron optics”)と呼ばれるフィールドでは、電子系におけるレンズや干渉計など「光学デバイス」の実現が報告されてきた。

本研究は、この概念を新規二次元電子系として注目を集めているグラフェンにおいて実現することを目的として行われた。グラフェンにおける電子光学は、通常の半導体二次元電子系におけるそれよりもはるかに広範な可能性を有する領域として注目を集めている。なぜなら、Dirac 電子系という性質を反映して、pn 界面における負の屈折現象や Klein tunneling などグラフェン特有の電子の「光学的」な性質を示すことが知られているからだ。このような特異な性質を電子光学のコンセプトを利用して操ることにより、Veselago lensing や Cloaking など通常の光学の領域においても実現が難しい現象や機能の観測が可能になりうると理論的に予測されている。

一方で、実験的にグラフェンを用いて電子光学を実現するには、以下に挙げる基礎的な技術や知見が不足していた。

- ・高移動度試料の作製とそれに伴うバリステックおよびコヒーレントな伝導の実現
- ・電子波制御を行うためのナノ構造の選定と作製
- ・屈折・反射・干渉など基本的な「光学」機能のデモンストレーション

本論文は、これらの点を整備すべく取り組んだ研究結果をまとめたものである。主に以下の六つの章で構成されている。

第1章では、序論として、グラフェン以前の高移動度二次元電子系の先行研究をまとめた後、グラフェンの基本的な物性や、「光学」の概念を用いて量子輸送を制御することの意味や意義について概観しながら、グラフェンにおいて「電子光学的」に量子輸送を制御するという本研究の目的を明示している。

第2章では、グラフェンとの相互作用が小さい絶縁膜 h-BN を、基板やゲート絶縁膜として用いることで高移動度なグラフェン、特にバリステックおよびコヒーレントな伝導が実現した系の作製に成功した結果について報告している。また、局所ゲート変調を用いた高品質な pn 接合の作製についても報告し、グラフェンにおいて電子光学が実現する実験系の整備が整ったことを示している。

第3章では、楕形 npn 接合において電子波のコリメーションや全反射を制御することで、接合の透過率を制御可能であることを示している。また、**Klein tunneling** という相対論的透過現象によって、磁気抵抗の符号にゲートの幾何学構造の依存性が見られることも示している。ゲート構造がデザインされた接合においてバリスティックキャリアの軌道を光学のように制御しながら、機能を発現できることを意味する研究成果である。

第4章では、電子フォーカシング効果によって観測されるサイクロトロン運動をするバリスティックキャリアの軌道を、**Scanning gate microscopy (SGM)** という局所プロービング技術によって制御した結果を示している。**SGM** チップがもたらす 100 nm オーダーの極めて局所的なポテンシャル変調領域に反射させられることで、バリスティックなキャリアの軌道が制御されていることを示す。

第5章では、高品質グラフェン npn 接合において観測される特異な磁気抵抗振動現象が、pn 界面を貫く磁束の **Aharonov-Bohm** 干渉条件を考えることで良く説明できることを示している。グラフェンの量子ホール pn 接合においては、p 型由来のエッジチャネルと n 型由来のエッジチャネルが同じ方向に伝搬するという特異なエッジチャネル配置が実現しているが、このエッジチャネルがコヒーレンスを保ちながら天然に干渉計を形成することを示唆した結果である。

第6章では、結論として、以上の結果の要約がまとめられている。

以上の結果は、グラフェンにおける量子輸送現象を、電子のバリスティックおよびコヒーレントな性質を利用することで、制御可能なことを実証した結果である。理論的に様々な提案がなされている **Dirac** 電子系における電子光学、いわゆる”**Dirac fermion optics**”と呼ぶべきこの概念を、実験的に実証することでその実現可能性を示した点に大きな意義があり、物理工学の発展への寄与は大きい。

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。