

審査の結果の要旨

氏名 塩谷 広樹

本論文は「電場と歪によるグラフェンの物性制御に関する研究」と題し、2層グラフェンの2重ゲート電極構造を用いたpn接合の形成、及びグラフェンへの歪の導入とその評価、電気伝導との関係について論文提出者が行った研究の成果をまとめたものである。

論文は4章から成っている。

第1章では、グラフェンの構造、物性研究、電子デバイス研究の背景を述べた後、本研究の主題である、電場の印加と歪の導入でグラフェンの対称性を崩すことにより物性を制御する、という狙いの説明と研究の具体的な課題設定を行っている。

第2、3章が本論文の中心的な章で、それぞれ、2重ゲート電極によるpn接合の形成と電気伝導の整流性の検出、新しい歪の印加法の開発と歪の評価、歪と電気伝導との関係について研究成果を書いている。

第2章では、2層グラフェンに電場を印加した時のバンドギャップの変化を説明した後、本研究で採用した2重ゲート電極の作製法と電気伝導の測定手法について述べている。ゲートはグラフェンの下部の一様な電極と上部の部分的な電極で構成され、上下の電極に適当な電圧を加えることで上部電極の境界にpP、pN、nP、nNの接合を形成している。それぞれの接合特性の妥当性は、電気伝導の線形性、整流性の観測によって確認している。ここではグラフェンで作られたpn接合で初めて整流特性を観測しており、電子デバイス応用の新しい可能性を提供している。グラフェンのpn接合には、通常の半導体のようなキャリアの打消しによる空乏層が無く、電子、正孔が境をなして蓄積している。本研究では、このことと電場によるバンドギャップの開きを考慮した、pn接合のモデルを用いて、電気抵抗のバイアス電圧特性を理解し、また、整流性が見られる電圧からバンドギャップの大きさを見積もっている。バンドギャップの導出は、過去に赤外吸収の方法で行われているが、本実験で得られた値はこの文献値と一致している。本研究による電気伝導測定法は赤外吸収測定に比べて精度は劣るものの、遥かに簡便なバンドギャップ計測法を提供している。

第3章では、まずグラフェンへの歪印加と歪評価の報告例、バンドギャップ発生や偽磁場発生などの理論予測を紹介した後、本研究で提案、実現した歪の印加法を説明している。Ni蒸着膜への電子線照射による1軸性引っ張り歪の印加、有機絶縁材料への電子線照射による1軸性引っ張り歪の印加と同材料の一様加熱による面内等方性圧縮歪の印加を、独自のアイデアで試行し、ラマン散乱を

用いた方法で有効性を確認している。これにより、同法は従来のメカニカルな歪印加に比べて簡便であり、また1軸性の歪導入に優れることを定量的に確認している。さらに、歪の電気伝導への影響を調べるために、歪導入用Ni膜（電子線照射後は酸化の影響で電極端子として使用できない）の内側に電気伝導の測定端子用にTi/Au金属蒸着膜を付けたところ、導入したはずの歪が解消されるという問題に遭遇したこと、このため、新たに厚膜のNi電極を使えば、電子線照射することなく歪が導入でき、同時に測定端子としても使うことができることを発見し、これにより同問題を乗り切ったことを紹介している。本研究で工夫しながら実験を進めている様子が伺われる。最終的に歪の影響として、ディラック点近傍の電気伝導度に平坦な広がりが生じることを見出し、これは量子ホール特性、移動度でみる限り、歪による損傷などに起因するものとは考えられず、キャリア密度の空間分布が発生し、結果としてディラック点のゲート電圧が分布するためではないかと議論をしている。ディラック点の分布の存在は、ランダウファン測定で確認しており、議論の妥当性を裏付けている。歪とキャリア密度の因果関係に関しては、細かい皺の発生による基板との界面状態の局所的な変化が原因と推論しているが、確証はなく今後の検討課題として残されている。なお、理論予測に関連して、歪によるバンドギャップ発生の証拠は見られないと結論している。本章で記述されている、歪印加法、歪評価、電気伝導測定のうちいずれについても、詳細で信頼性の高い議論がなされており、当該研究分野に有用な知見を提供している。

第4章は、本研究の結論であり、結果の要約と今後の展望が述べられている。

以上述べたように、本研究は、グラフェンの対称性を崩すことによって物性を制御することを中心概念として、電場効果を利用したpn接合の形成、面内歪の導入とその評価、及び電気伝導への影響を調べたもので、いずれも初めての報告である。その研究は独自性が高く、様々な工夫が盛り込まれている。得られた結果の信頼性は高く、固体物理、ナノ科学の進展、グラフェンの新しい電子デバイス応用に大きな寄与があったと評価できる。また、これらの研究成果は、グラフェンの電子デバイスにおける歪の影響という新しい問題を提起しており、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）の学位申請論文として合格と認められる。