

## 論文の内容の要旨

論文題目 電場と歪みによるグラフェンの物性制御に関する研究

氏 名 塩谷 広樹

グラフェンは炭素原子からなる層状物質であり、発見以来物理的興味と工学的応用の両面から多くの興味を集め、様々な分野でグラフェンに関する研究が盛んに行われて来ている。2010年のノーベル物理学賞がグラフェンの研究者に与えられたことも、その注目度を反映していると言えるだろう。

本研究はこのように近年興味を集めているグラフェンにおける対称性とそれに対応する物性の関係を実験的に解明することを目的に行われた。また、対称性と物性という物理的な興味のみならず、対称性によって制御された物性の工学的応用も興味の対象に含まれる。グラフェンにおける対称性として検討したものは、グラフェンに対して印加する外部電場の対称性とグラフェンにおける歪み印加状態の対称性である。

外部電場の対称性に関する研究は2層グラフェンを対象にして行われた。2層グラフェンに対して、それを構成する2つの層におけるon site energyが非等価になるように外部電場が印加されると2層グラフェンが外部電場により調節可能なbandgapを形成することが理論的に予言されていた。この理論予測は後に赤外吸収の実験により確認されていたが、bandgapを形成した2層グラフェンを用いたデバイス応用の研究成果は報告されない状態が続いていた。また本研究の以前に半導体素子として最も基本的かつ重要なpn接合デバイスの動作が2層グラフェンを用いて、調節可能なbandgapの特性と共に研究されてもいなかった。そこで電子デバイス応用の観点から、外場によって可変なbandgap値形成という特性を活用したpn接合デバイスを研究するに至った。pn接合を形成させるためにデバイス支持基板をback gateとし、チャンネル部分の半分をtop gateで覆い、他の半分の領域をtop gateで覆わない2重ゲート構造を採用した。さらに、従来型の半導体における不純物ドーピングとは異なり電界効果ドーピングの手法を用いデバイスの極性制御を行った。この電界効果ドーピングの利点はチャンネルの極性がゲート電圧により変更可能な点である。本研究では一定のソースドレイン電圧印加の下でtop gateとback gateに与える入力電圧のみを独立な入力パラメータとして扱った結果、2重ゲート構造デバイスのチャンネルの極性をPp, Pn, Np, Nn(大文字はtop gate無しの領域の極性、小文字はtop gate有りの領域の極性にそれぞれ相当)の組み合わせに制御することに成功した。この実験結果はゲート電圧の調節のみで、チャンネルの極性の組み合わせを自由に制御出来ることを意味している。続いてゲート電圧の調節により制御されたチャンネル極性の下で、電流-電圧特性の測定を行った。電流-電圧特性の測定においては特に以下の2点に着目した。1点はチャンネル極性の組み合わせによる電流-電圧特性の違いである。もう1点は同一チャンネル極性における電流-電圧特性のゲート電圧依存性である。測定の結果、チャ

ネル極性の組み合わせの違いにより電流-電圧特性に違いが現れた。例えば極性の組み合わせがPnの場合とNpの場合とで、微分コンダクタンスが抑制される範囲がソースドレイン電圧0Vに対して反対の符号の電圧領域に現れることが分かった。これはソースドレイン電圧方向に対する整流性の方向の制御に成功したことを意味する。つまり入力ゲート電圧を調節することによりダイオードの整流方向を可変にしたデバイスの作製に成功したと言えよう。更に、微分コンダクタンスの極小値がback gate依存を示すことからpn接合界面でのband構造を提唱した。このband構造を用い、電流-電圧特性のデータを元に微分コンダクタンスの解析を進めたところ、ソースドレイン電圧において微分コンダクタンスの傾きが変わる2点の間隔がゲート電圧依存性を持つ事が分かった。ここで2層グラフェンにおいてゲート電圧依存性を持つ物理量として適切なものとして、ゲート電圧値依存、印加される電界強度依存を持つ、外場印加の結果形成されるbandgapが挙げられる。微分コンダクタンスの傾きが変わるソースドレイン電圧間隔幅に電荷素量 $e$ を掛け合わせたものと、先行研究における2層グラフェンのbandgap値を、様々なゲート電圧の組み合わせに対して系統的に検討したところ、bandgap値のゲート電圧依存の振る舞いや大きさがよい一致を示した。これよりソースドレイン電圧における傾きが変わる2点が、外部電場印加によって開かれたbandgapの端に相当すると類推し、微分コンダクタンスの解析によって2層グラフェンのbandgapの大きさを見積もる方法を提唱した。以上のように、電場を用いて2層グラフェンの極性やbandgapを制御し、pn接合デバイスを作製して、非線型非対称な電流-電圧特性（整流性）を実現した。また、電流-電圧特性の解析を通じ外場によって開かれたbandgap値の見積り方法を提唱するに至った。

歪み印加状態の対称性の研究は、グラフェンに与えるストレスを外部より制御することにより実施された。グラフェン上にストレスの大きな金属薄膜や10%以上の大きな収縮性を有する有機絶縁膜を塗布することによってグラフェンに2種の歪みを導入することに成功した。1つは1軸性歪みであり、もう1つは2次元面内等方性圧縮歪みである。歪み状態の確認はラマン分光測定を通じ行われた。1軸性歪みの確認はG-bandが分裂したことにより確認した。また、2次元等方性圧縮歪みはG-bandのblue shiftによって確認された。本研究が歪みに関する先行研究に対して優れる点は、歪み印加の方法が電気伝導測定に拡張可能な方式を採用している点にある。1軸性歪み印加の実現自体は、先行研究において既になされていたが、先行研究の方法は歪み印加グラフェンのデバイス応用を検討した場合に集積化等の観点から困難な方法と言える。本研究で提唱した手法は平坦化プロセスにも耐え、かつ電極の設置も可能にした方法であり、発展性があると言える。例えば1層の一軸性歪みの印加されたグラフェンではbandgapが開くことも報告されており、歪み印加技術はグラフェンの電子デバイス応用の観点からも基幹技術になりうる点で重要である。本研究では歪んだグラフェンに電極を設置し、電界効果移動度の温度依存性を解析した。解析の結果、歪みグラフェンの電界効果移動度は温度依存性を持つ事が分かった。これは歪み印加の結果、歪み無しの状態に比べて電子-格子相互作用が変化したためと思われる。以上のようにグラフェンに歪みを導入し、先行研究とは異なる歪み印加手法を確立した。また、これらの手法はデバイス応用可能な方法であり、更なる研究の発展が期待出来る。

本研究ではグラフェンに対して外部電場と歪み印加というグラフェンの対

称性を破る操作を導入し、物性の制御を行った。またそれらの制御方法はデバイス応用等に拡張可能であり、今後更に電子デバイス応用や基礎物理の研究に発展可能なものである。