

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐田 洋太

層状の結晶構造をもつ物質を機械的劈開法により単原子または単分子層の厚みまで薄片化することが可能になり、二次元物質が着目され世界中で研究が進んでいる。例えばグラフェンは炭素原子が正六角形状の蜂の巣格子をなした単原子層の物質であり、線形の特異なバンド構造を持ち、基礎物性から応用までの様々な視点から興味をもたれている。一方、遷移金属ダイカルコゲナイド（TMD）は遷移金属元素とカルコゲン元素から構成される層状構造を取り、遷移金属とカルコゲン元素を変えることで、半導体（ MoS_2 , WSe_2 等）、第2種超伝導体（ NbSe_2 ）、金属（ WTe_2 , $\beta\text{-MoTe}_2$ ）等、多彩な物性を示す。

数原子層以下に薄片化された二次元物質においては、薄片全体に外部電界を効率よく印加することが可能であるため、顕著な電界効果が発現する。例えばグラフェンにおいては、電界により伝導キャリアを電子から正孔まで自由に変化できる両極性電界効果が実現されている。TMD 半導体 MoS_2 や TMD 超伝導体 NbSe_2 においては、高性能の電界効果型トランジスタ（FET）や超伝導転移温度の電界制御がこれまでに実現されている。

van der Waals 接合は様々な二次元物質同士を van der Waals 力により積層した構造であり、より一般的な半導体ヘテロ接合とは本質的に異なり、接合界面での原子同士の結合を持たないため格子整合が不要であり、様々な物性の二次元物質を組み合わせた接合が実現できる。本博士論文では、グラフェン／遷移金属ダイカルコゲナイド van der Waals 接合を作製し、この系における電界効果を解明することを目標として研究が進められ、以下のような構成でまとめられている。

第1部では、本博士論文の研究で用いた二次元層状化合物の結晶構造と基礎的な電子物性に関する情報を、先行研究を引用しながらまとめている。さらに、二次元層状化合物における電界効果の重要性、ヘテロ接合作製の意義を序論として述べている。第2部では、本博士論文の目的を明確化するとともに、全体の構成を示し、第3部では、本研究で利用した試料の作製方法に関する詳細を述べている。

第4部は本博士論文の主要部であり、グラフェン/TMD 半導体ヘテロ接合における電流のゲート電界変調についての実験と計算を示している。既存の縦型 FET より優れた ON/OFF 比と ON 電流密度の両立に成功した結果が報告されているとともに、電流変調がショットキー障壁高さのゲート電圧による制御に起因するものであることが定量的に確示されている。さらに、異なる TMD 半導体を用いた実験結果とモデルの比較、さらにはヘテロ構造におけるグラフェン Dirac 点の影響も議論されている。縦型 FET 構造を、金属電極とグラフェンを平板電極、バックゲート絶縁膜の SiO_2 と TMD 半導体を誘電体とした平行平板コンデンサー回路と見立てた回路において成立する式の考察から、電流値の巨大変調の様子や、電流電圧特性に対してグラフェンの Dirac 点が及ぼす影響に関して、計算が行われている。結果は実験とよく一致するものであり、実験的に示された縦型 FET 構造の特性を深く理解

することができている。

第5部では、TMD 半導体の一種である WSe_2 に対して、異なる仕事関数を持つ金属 TMD 材料を転写し、ヘテロ接合とした構造の結果がまとめられている。 WSe_2 に対する様々な金属 TMD 物質 (NbSe_2 , $\beta\text{-MoTe}_2$, WTe_2 , グラファイト, NbS_2) をコンタクト電極として試し、どの物質が最適なコンタクトであるかが調べられている。コンタクト抵抗については、 WSe_2 の伝導キャリアが電子の場合はグラファイト電極を付けた場合が最も低く、キャリアが正孔の場合は NbSe_2 電極を付けた場合が最も低かったことが示されている。加えて、電気伝導特性の温度依存から求めた電極とチャネル間のショットキー障壁の高さは、グラファイト電極の場合に 60 meV, NbSe_2 電極の場合に 50 meV 程度であり、蒸着により作製した金属電極の場合よりも低い値を示したことが述べられている。これらことから、金属 TMD を用いた van der Waals 電極が WSe_2 に対して電子／正孔を注入するために有効な手法であることが結論付けられている。

第6部では、グラフェンを低抵抗な van der Waals コンタクトとして用いて電流を印加した場合の電子温度の上昇がデバイス特性に与える影響が述べられている。グラフェンは電子比熱が小さいため電子温度が上昇しやすく、van der Waals 界面からのキャリア注入に付随して熱を伝搬し、チャネルの物性に影響を及ぼす可能性がある。この効果を確かめるため、TMD 超伝導体である NbSe_2 に蒸着法により作製した Au/Ti 電極と van der Waals 接合により作製したグラフェン電極の2種類を付与した素子を作製し、2種類のそれぞれか電極から電流を注入した場合の電気伝導特性が調べられている。グラフェン電極から電流を注入した場合の超伝導臨界電流値は、金属電極から電流を注入した場合の臨界電流値よりも小さく、グラフェン電極から電流を注入した場合にのみ超伝導臨界電流値はゲート電圧により大きく変調されたことが述べられている。

第7部では、上記3つのテーマの結論がまとめられている。

以上の結果は、遷移金属ダイカルコゲナイドとグラフェンのヘテロ接合に対して電界を加えた場合の電気伝導特性への影響を示したものである。原子層のヘテロ接合を用いることで高性能な電子デバイスを実現することができることを示したとともに、グラフェンを電極として用いた場合に熱の影響を考慮せねばならないことを提唱したという点で意義があり、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して認められる。