

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 ウワンノー ティーラユット

2次元層状物質は原子層厚さゆえ短チャネル効果に強く Si 系材料に代わる電界効果型トランジスタ(FET)として注目される. 伝導帯/価電子帯が d 軌道で形成される他の 2 次元系に比べてグラフェンは p_z 軌道のためキャリア移動度が高く, 高速性を重視する系統に適する. 2 層グラフェン(BLG)は面直な外部電界印加により最大 0.3 eV までバンドギャップを形成させることが可能であるが, 従来手法の high- k 酸化物ゲートスタックと比較して層状絶縁体 h -BN とのヘテロ構造は基礎的な物性の観点から研究されているのみで, デバイス動作の観点からの研究は非常に限定的である. また, 近年の自動運転技術では高速応答かつ室温動作する長波長赤外検出素子に対する要求が高い. バンドギャップが電氣的に可変な BLG を用いた増幅作用を持つフォトトランジスタ構造により光電流が熱雑音よりも大きくなることで室温動作が可能と理論的に提案されているが, 未だ実験的な報告はないのが現状である.

以上を背景に, 本研究では, BLG に特徴的な電子デバイス及び光応答に関する基礎研究を通して, 最適なデバイス応用を明確にすることを目的としている. まず h -BN/BLG ヘテロ構造の作製手法を確立し, 電子デバイス応用として最も高い電流のオンオフ比が得られること, h -BN/BLG ヘテロ構造において界面準位は測定限界以下となることを示した. また, 光検出に関して, トップゲート長を拡散長以下にすることで増幅作用を有するフォトトランジスタ動作を示唆する挙動を得た. 本論文は, 以上の内容を「Field-effect transistors and photodetectors based on bilayer graphene in all-two-dimensional layered heterostructures」という題目の下まとめたものであり, 10 章から構成されている.

第 1 章から第 4 章は, BLG の歴史的背景から基礎物性, FET における輸送特性及び界面特性, そして光応答機構について概観した後に, 本論文の目的および位置づけを明確化している.

第 5 章では, 有機/無機材料の熱膨張率の違いを利用した乾式の完全二次元ヘテロ構造作製手法を提案している. さらに, h -BN との化学反応性の強い CF_4 プラズマにより h -BN の選択的エッチング性を見出し, 従来のエッジ接合と比較し

て安定な面接合が可能であることを実験的に示した。

第6章では、ヘテロ構造の主要な構成要素である h -BN の誘電率に関して、グラファイトを電極とした容量計測により検討している。 h -BN 極薄化により比誘電率が低下すると理論的に予測されているが、実際に 5 nm 程度の h -BN に対して誘電率は 2.3 程度と SiO_2 の 3.9 と比較しても小さくゲートによる印加可能電界が小さくなることを明らかにした。

第7章では、上記のヘテロ構造作製手法に基づき完全二次元 BLG-FET を作製し電子輸送特性を議論している。外的ポテンシャル揺らぎを 1 meV にまで低減することで 100 meV 程度の空間的に均一なバンドギャップを形成し、最も高い電流のオンオフ比を実現した。一方で、導入可能なギャップは 100 meV が限界であり、FET 動作に適さないことを指摘した。

第8章では、 h -BN/BLG ヘテロ界面のギャップ内準位密度計測から界面特性を議論している。測定可能な周波数範囲においてキャリアの捕獲・放出に起因した周波数依存性は観測されず、欠陥密度が 10^{10} cm^{-2} 以下の BLG/ h -BN 界面では検出限界以下の電氣的に不活性な界面を実現している。

第9章では、BLG/ h -BN ヘテロ構造とバイポーラ型フォトトランジスタ構造の類似性を利用し室温動作可能な長波長赤外検出素子としての可能性を検討している。拡散長よりも短い 250 nm のトップゲート長のデバイスにおいて、Dirac point でのボロメトリックな応答に加えて、ギャップ上部に顕著な光応答を観測した。解析から、光導入により誘起されたキャリアによる光駆動ゲート動作である可能性を指摘している。

第10章は以上の総括および将来展望を述べている。

以上を要するに、本研究では代表的な2次元層状チャネルであるBLGに関し完全2次元ヘテロ構造化により優れた輸送特性を達成したものの、室温でのFET動作に必要なギャップ形成に到達しないことを指摘し、空間的に均一なギャップを利用した室温動作可能な赤外検出器としての可能性を指摘している。理論予測に対して実験的な結果を示した点に大きな意義がある。これらはいずれも本研究において初めて実証された成果であり、電子デバイス分野のみならず材料工学の観点からも意義はきわめて大きい。

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。