

SiCマクロファセット上のグラフェンナノ構造形成に関する研究

福間, 洸平

<https://hdl.handle.net/2324/6787597>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 福間 洗平

論 文 名 : SiC マクロファセット上のグラフェンナノ構造形成に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

グラフェンは炭素原子で構成される2次元ハニカム構造であり、その電子状態はK点近傍で線形なバンド分散を示すため、キャリアは有効質量ゼロのディラックフェルミオンとして振舞う。そのため非常に高いキャリア移動度を示し、次世代スイッチングデバイスとして期待されている。しかしながら、グラフェンはゼロギャップ半導体であるため、スイッチング動作にはバンドギャップの付与が不可欠である。グラフェンナノリボン(GNR)は、幅方向の狭小化によってキャリアの量子閉じ込め効果が生じギャップが形成されるため、高品質なGNRの形成・作製に関する様々な研究が行われてきた。半導体微細加工技術であるトップダウン手法の電子線リソグラフィは、空間配列やデバイス化に有効であるが、幅の狭小化やエッジへの欠陥導入が大きな課題である。また、ボトムアップ手法である分子前駆体を用いる方法は、高品質化が可能であるが、空間配列が困難であることや基板が金属に限定されるなどの問題がある。

本研究では、上述の課題を解決するためにワイドギャップ半導体であるSiCの表面現象に着目した。SiCはc軸方向の積層に周期性を有する結晶構造(ポリタイプ)であることから、傾斜面にはユニークな周期的表面ナノ構造が現れることが知られており、その表面上のエピタキシャルグラフェンのナノ構造の形成に応用できると考えた。まず、傾斜SiC(0001)におけるステップバンチングやファセッティング現象の基板パラメータ(傾斜角度、傾斜方向)依存性について調べ、その後、それらの結果を元にその表面上へのグラフェンエピタキシーにより、狭小幅(~1.7 nm)で十分な大きさのエネルギーギャップ(0.4-0.5 eV)のGNRを得た結果を示す。

本論文は全7章によって構成されており、以下に各章の概要を示す。

第1章では、研究背景として「More than Moore」の観点からグラフェンを含む2次元物質への期待や有効性について概説した。特に優れた物性を有するグラフェンのデバイス応用の可能性を述べた。更に、スイッチングデバイスへの応用に必要なバンドギャップ付与に有効なGNRについて、様々な先行研究を説明した。

第2章では、本研究で用いたSiCについて、結晶構造と基礎物性、更にGNR形成の基盤となる表面現象(ファセッティングやステップバンチングなど)について説明した。更に、グラフェンの電子状態理論(強結合近似・第一原理計算)とナノリボンの電子状態に関する理論についてまとめた。

第3章では、本研究で使用した成長/評価方法について説明した。まず、SiC表面アニールおよびグラフェン成長(SiC熱分解)に用いた赤外線および高周波加熱炉の概要を示し、その後サンプル評価に用いた、原子間力顕微鏡(AFM)、低速電子線回折(LEED)、走査型トンネル顕微鏡/分光(STM/STS)、顕微ラマン分光、角度分解光電子分光(ARPES)について説明を行った。

第4章では、高温水素アニールによる傾斜SiC表面の構造変化について調べた結果を示した。ここでは特にSiC基板のパラメータとして傾斜角度・傾斜方向に着目した。特殊な傾斜基板は市販さ

れていないため、本研究では集束イオンビーム (FIB) 加工によって様々な傾斜面 (角度 $0\sim 8^\circ$, 方向 $\langle 11-20 \rangle$ および $\langle 1-100 \rangle$) を作製する方法を開発した. $1500\sim 1600^\circ\text{C}$ という高温下での水素アニールによって傾斜面には周期ナノファセット/テラス対構造が現れることが報告されているが, 傾斜角度・方向については系統的に明らかになっていない. 結論として周期距離の傾斜方向依存性はないが, 傾斜角度には大きく依存し, 傾斜角度を変化させるとナノメートルオーダー ($\sim 5\sim 100$ nm) で周期距離を制御できることがわかった. これは SiC 上の GNR の幅や周期を自在に制御できる可能性を示唆する結果である.

第 5 章では, 第 4 章で得られた傾斜 SiC 表面の周期化・ファセッティング現象を利用し, Ar 雰囲気で熱分解を行うことにより SiC 表面へエピタキシャルグラフェンを形成した. (0001) 面に対して約 27 度の角度のマクロファセットが形成され, その面上に約 3.3 nm 周期の狭小幅の GNR (1.75 nm) のアレイ構造が自己形成していることが明らかになった. STM/STS を用いた微細構造・電子状態観察によって, GNR は原子レベルで平滑なアームチェアエッジを有し, $0.4\sim 0.5$ eV という応用上十分に大きなバンドギャップを形成していることがわかった.

第 6 章では, 第 5 章で述べた GNR のエッジは大気暴露によって影響を受けるため, 保護目的として GNR を更に 1 層グラフェンで覆ったサンプルを作製し, その有効性について検討した. 大気暴露後のサンプルの STM による構造評価では, 界面の GNR の存在は明らかにはできないが, 最表面の 1 層グラフェンは周期的 (~ 3.4 nm) なリップル (波状) 構造を有しており, 更に ARPES によりディラックコーンのレプリカが観察された. これらは, 界面における周期的な GNR の形成を示唆する結果であり, 保護膜としてグラフェンが有効であることを明らかにした. 今後, デバイス化には界面 GNR の構造と電子物性を明らかにする必要がある.

第 7 章では, 本研究の結論および今後の展望について述べた.