

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 22 日現在

機関番号：82108

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22710108

研究課題名（和文） 多探針走査プローブ顕微鏡によるナノリボンエッジの電気伝導機構の解明

研究課題名（英文） Elucidation of conduction mechanism induced by edges of nanoribbon using multiple-probe scanning probe microscopes

研究代表者

久保 理 (KUBO OSAMU)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA 研究者

研究者番号：70370301

研究成果の概要（和文）：グラフェンデバイス開発を促進することを目指し、エッジなど局所構造に起因した電気伝導特性を、多探針原子間力顕微鏡を用いて実験的に検証した。剥離法でシリコン酸化膜上に作成した単層グラフェンのリボンでは、エッジ散乱による抵抗率の増大が確認された。また、大面積化が期待される微傾斜シリコンカーバイド表面上に昇華法で形成したグラフェンでは、段差部分にて通常グラフェンの 10 倍以上の抵抗率を持つことが分かり、デバイス応用に対する課題を明示した。

研究成果の概要（英文）：Electrical conduction property of graphene originated in local structures, such as the edge of ribbons, was verified using multiple-probe atomic force microscopes to promote the development of graphene devices. Increase of the resistivity by electron scattering at edges was confirmed in the ribbon of monolayer graphene exfoliated on a silicon dioxide film. Moreover, in a graphene formed on a vicinal silicon carbide surface by the sublimation method, which is expected as a template method to form large-area graphene, it turned out that the step part has more than ten times as much as conventional graphene, specifying the challenges for device application.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：ナノ計測、多探針、走査プローブ顕微鏡、エッジ伝導

1. 研究開始当初の背景

低次元ナノ構造では、欠陥やステップなどの局所構造が作り出す電子状態が、時にナノ構造全体の特性を大きく左右する。例えばグラ

フェンではナノサイズ幅の短冊状に切り出されたナノリボン構造を形成することが知られており、理論研究によってリボンの長辺（エッジ）に起因した特異な電子状態を発現

することが予測されていた。特にアームチェア型エッジを持つナノリボンでは元来バンドギャップを持たないグラフェンに半導体的な電子状態が予測されたことで、高移動度の電界効果トランジスタのチャンネルへの応用が期待されていた。ナノリボンは配線材料としても注目される等、ボトムアップデバイスとして期待される材料である。一方、トップダウン的手法でのデバイス作成において必要である大面積グラフェンの作成手法として期待されている微傾斜シリコンカーバイド (SiC) では、局所構造による抵抗増大が懸念されていた。このため、グラフェンデバイス開発を促進するには、様々な局所構造に起因したグラフェンの電気伝導特性を実験的に解明する必要がある。

2. 研究の目的

局所構造に起因したグラフェンの電気伝導特性を、多探針原子間力顕微鏡 (MP-AFM) を用いて実験的に解明することを目的とする。対象として、(1) 剥離法を用いてシリコン酸化膜 (SiO₂ 膜) 上に作成したリボン状グラフェン、および (2) 微傾斜 SiC 表面に昇華法を用いて作成したグラフェンを取り上げ、局所構造がその抵抗率に及ぼす影響を検証し、グラフェンのデバイス応用への知見を示す。

3. 研究の方法

(1) 剥離法を用いてシリコン酸化膜上に単層グラフェンのリボン (幅 290 nm) を作成した。このリボン上に MP-AFM の 2 本の導電性 AFM 探針を接触させて、接触 2 点間の電流 - 電圧特性から抵抗値を測定した。同様の測定を探針間距離を変えながら行い、抵抗値の距離依存性を計測し、エッジに起因したシート抵抗の変化を評価した。

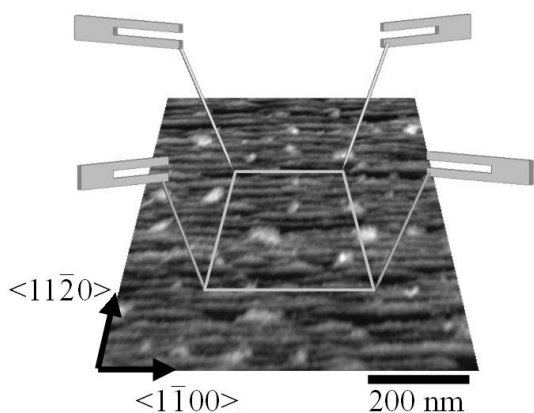


図 1 4 探針 AFM によるシート抵抗異方性の計測

(2) 微傾斜 SiC 表面に昇華法を用いて作成されたグラフェンは 3 層程度の厚さを持っており、ステップ構造が元基板の微傾斜方向 ($\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向) に沿って周期的に形成されている。このグラフェン上に、MP-AFM の 4 本の導電性 AFM 探針を正形状に配置し (図 1)、隣り合う 2 本に電流を流した状態で、残りの 2 本間の電圧降下を測定する Van der Pauw 法ベースの計測を行うことで、ステップに対して水平、垂直方向でのシート抵抗をそれぞれ測定した。この結果から、ステップに起因したシート抵抗の変化を評価した。

4. 研究成果

(1) 図 2 にシリコン酸化膜上で 2 探針 AFM を用いて測定したリボン状グラフェンの AFM 像と、測定した抵抗値の距離依存性のグラフ

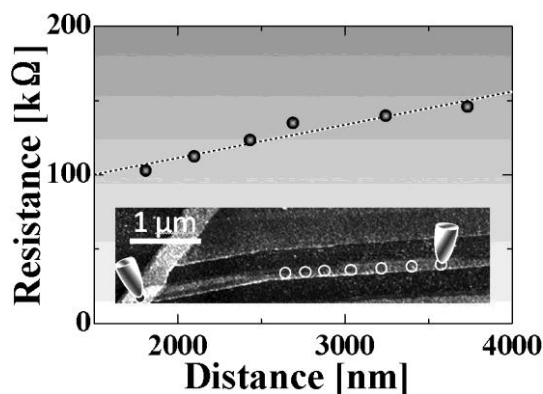


図 2 剥離法によるリボン状グラフェンの 2 探針 AFM による電気抵抗計測結果

を示す。

このグラフの傾きとリボン幅からシート抵抗を見積もったところ、従来報告されている単層グラフェンの値に比べ 1.3~1.5 倍程度大きい値が測定され、エッジに起因した抵抗増大を示す結果が得られた。

バンドギャップの発現が電気特性に顕著に表れると理論予測される幅 (20-30 nm) に比べて 10 倍の幅を持つリボンにおいてもシート抵抗の増大が現れたことから、電子状態変化だけでなくエッジ散乱による抵抗増大がデバイスや配線利用に大きな問題となることを示唆している。

(2) 図 3 に微傾斜シリコンカーバイド表面上に昇華法によって形成したグラフェンに対して、ステップに水平、および垂直方向に電流を流した場合についての四端子抵抗計測の結果を示す。このデータは、計測試料の異方性伝導を示しており、ステップ水平、お

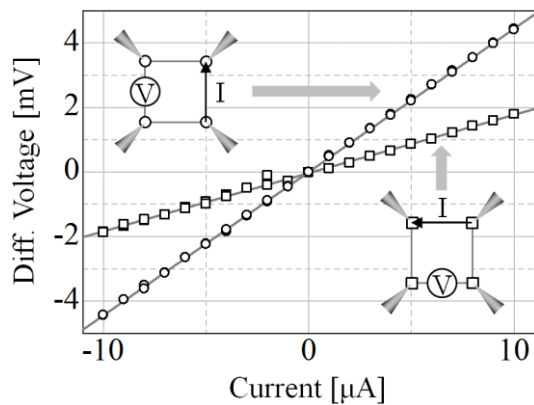


図3 SiC昇華法で作成したグラフェンの四端子抵抗計測結果。(A) ステップ平行、および(B) 垂直方向への電流に対する電圧降下を計測

および垂直方向でのシート抵抗がそれぞれ約1.7 k Ω /□、約4.3 k Ω /□と見積もられた。さらに、AFMおよびTEM観察の結果からステップとテラスそれぞれの平均間隔を5 nm、および25 nmとして、上記の異方性シート抵抗から、ステップ、テラスそれぞれのローカルなシート抵抗を見積もったところ、テラス部分のシート抵抗が約1.4 k Ω と、従来の3層グラフェンのシート抵抗と同等の値が得られた。一方、ステップ部分ではテラス部分に比べて10倍以上もの値を示すことが分かった。SiC昇華法では、シリコンの昇華によって残留炭素がグラフェン構造を形成するが、その際にステップ部分から優先的にシリコン原子が脱離することが報告されている。本結果は、そのステップ部分に欠陥が多く形成されていることを示すものであり、昇華法グラフェンをデバイスに応用する上で、解決すべき課題を明示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Tomonobu Nakayama, Osamu Kubo, Yoshitaka Shingaya, 他7名、Development and application of multiple-probe scanning probe microscopes、Advanced Materials、査読有、Vol. 24、2012、1675–1692
- ② Seiji Higuchi, Osamu Kubo, Hiromi Kuramochi, Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、A quadruple-scanning-probe force microscope for electrical property measurements of microscopic materials、Nanotechnology、査読有、

Vol. 22、2011、285205_1–285205_6

- ③ Jianxun Xu, Yoshitaka Shingaya, Hiroyuki Tomimoto, Osamu Kubo, Tomonobu Nakayama、Irreversible and Reversible Structural Deformation and Electromechanical Behavior of Carbon nanohorns Probed by Conductive AFM、SMALL、査読有、Vol. 7、2011、1169–1174
- ④ Seiji Higuchi, Hiromi Kuramochi, Osamu Kubo, Shintaro Masuda, Yoshitaka Shingaya, Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、Angled long tip to tuning fork probes for atomic force microscopy in various environments、Review of Scientific Instruments、査読有、Vol. 82、2011、043701_1–043701_6

[学会発表] (計9件)

- ① Osamu Kubo, Hiromi Kuramochi, Seiji Higuchi, Kouhei Morita, Satoru Tanaka, Kazuhito Tsukagoshi, Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、Electron transport of graphene measured by multiple-probe atomic force microscopes、MANA International Symposium 2012、2012年3月2日、つくば国際会議場(茨城県)
- ② Osamu Kubo, Jianxun Xu, Seiji Higuchi, Hiromi Kuramochi, Yoshitaka Shingaya, Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、Electrical transport in graphene flakes measured by multiple-scanning-probe force microscope、6th International Symposium on Surface Science (ISSS-6)、2011年12月14日、タワーホール船堀(東京都)
- ③ 久保理、倉持宏実、樋口誠司、森田康平、田中悟、塚越一仁、青野正和、中山知信、グラフェン伝導特性の走査4探針原子間力顕微鏡による計測、第72回 応用物理学学会学術講演会、2011年8月30日、山形大学(山形県)
- ④ 久保理、樋口誠司、倉持宏実、青野正和、中山知信、走査4探針原子間力顕微鏡によるグラフェン電気抵抗率計測、第58回 応用物理学関係連合講演会、2011年3月27日、神奈川工科大学(神奈川県)
- ⑤ Osamu Kubo, Seiji Higuchi, Hiromi Kuramochi, Shintaro Masuda, Yoshitaka Shingaya, Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、Application of tuning fork probe for multiple-scanning-probe measurement in various environments、MANA International Symposium 2011、2011年3月3日、つくば国際会議場(茨城県)
- ⑥ Osamu Kubo, Seiji Higuchi, Hiromi Kuramochi, Yoshitaka Shingaya,

Masakazu Aono, Tomonobu Nakayama、
Development and application of
multiple-scanning-probe microscope
for characterization of nanomaterials
on insulator、The 9th Japan-France
Workshop on Nanomaterials、2010年11
月25日、CEMES-CNRS (フランス・トゥ
ールーズ)

- ⑦ 久保理、樋口誠司、倉持宏実、新ヶ谷義
隆、榊田真太郎、中山知信、チューニン
グフォーク探針を用いたマルチモード
原子間力顕微鏡観察、第71回 応用物理
学会学術講演会、2010年9月16日、長
崎大学 (長崎県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保理 (KUBO OSAMU)

(独) 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテ
クトニクス研究拠点 MANA 研究者

研究者番号：70370301

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし