

# 6H-SiC 基板のマクロファセットにできた 1 次元ナノリップルグラフェンの 電子状態と電子格子相互作用

## Electronic states and electron-phonon coupling in one-dimensionally nanorippled graphene on a macrofacet of 6H-SiC

小森文夫<sup>1,\*</sup>、家永紘一郎<sup>1</sup>、飯盛拓嗣<sup>1</sup>、矢治光一郎<sup>1</sup>、宮町俊生<sup>1</sup>、中島修平<sup>1</sup>、高橋文雄<sup>1</sup>、  
福間洗平<sup>2</sup>、林信吾<sup>2</sup>、梶原隆司<sup>2</sup>、Anton Visikovskiy<sup>2</sup>、間瀬一彦<sup>3,4</sup>、中辻寛<sup>5</sup>、田中悟<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学物性研究所, 〒277-8581 柏市柏の葉 5-1-5

<sup>2</sup> 九州大学大学院工学研究院エネルギー量子工学部門, 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

<sup>3</sup> 物質構造研究所放射光科学研究施設, 〒305-0801 つくば市大穂1-1

<sup>4</sup> 総研大, 〒305-0801 つくば市大穂1-1

<sup>5</sup> 東京工業大学物質理工学院, 〒226-8502 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259

Fumio Komori<sup>1,\*</sup>, Koichiro Ienaga<sup>1</sup>, Takushi Iimori<sup>1</sup>, Koichiro Yaji<sup>1</sup>, Toshio Miyamachi<sup>1</sup>,  
Shuhei Nakashima<sup>1</sup>, Yukio Takahashi<sup>1</sup>, Kohei Fukuma<sup>2</sup>, Shingo Hayashi<sup>2</sup>, Takashi Kajiwara<sup>2</sup>,  
Anton Visikovskiy<sup>2</sup>, Kazuhiko Mase<sup>3,4</sup>, Kan Nakatsuji<sup>5</sup>, and Satoru Tanaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa,  
Chiba 277-8581, Japan

<sup>2</sup>Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University,  
Fukuoka 819-0395, Japan

<sup>3</sup>Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization,  
Tsukuba 305-0801, Japan

<sup>4</sup>Department of Materials Structure Science, SOKENDAI (The Graduate University for  
Advanced Studies), 1-1 Oho, Tsukuba 305-0801, Japan

<sup>5</sup>Department of Materials Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology,  
Yokohama 226-8502, Japan

### 1 はじめに

グラフェンの電子状態に関する研究として、ナノスケールで 1 次元的にポテンシャル変調されたグラフェンのディラックバンドには、ギャップが現れたり、分散関係が異方的になるなどの理論的予想がなされてきた。[1] そこで、ナノリップル構造をもつグラフェンを SiC 傾斜基板上に作製し、そのバンド構造を角度分解光電子分光(ARPES)で測定した。同じ試料について、ディラック電子と格子振動との相互作用を非弾性走査トンネル分光(STS)を用いて測定したところ、相互作用の強さがナノリップル構造の周期で変調されていた。これによりこの研究で用いたナノリップルグラフェンの構造を明らかにした。[2]

### 2 実験

ARPES 測定は、Photon Factory BL13B で SES200 分光器を用いて行った。グラフェンの測定には、低エネルギーの直線偏光光が適しており、50eV 付近の光を用いた。この他に、ヘリウム放電管を用いた ARPES および 80K における STS を行った。

グラフェンは、4 度傾斜の SiC(0001)基板を Ar 雰囲気中での熱分解によって作製した。大気中を運ばれたグラフェンは、測定前に超高真空中でアニールを行い、表面を清浄化した。

### 3 結果および考察

図 1 に STM 像および LEED 像を示した。図 1 (a)のように、表面はステップと 27°のマクロファセットからなる。テラスの一部には図 1 (b)のようなグラフェンと、 $6\sqrt{3}$  超構造バッファ層からなり、ファセット部には、ファセット方向に 1 次元的な凹凸のあるグラフェンが観察される。LEED 像は、図 1 (c)のように、ファセット部のナノリップル 1 次元構造を反映してサテライトスポットが観察される。

マクロファセット部の拡大した STM 像を図 2 に示した。ファセットに周期構造があり、連続したグラフェンがあることがわかる。変調周期は 3.4nm であ周期であり、LEED 像のサテライトスポット間隔から求めた周期に一致している。

このファセットからのディラックバンドの ARPES イメージを図 3 に示した。図 3(a)のように 1

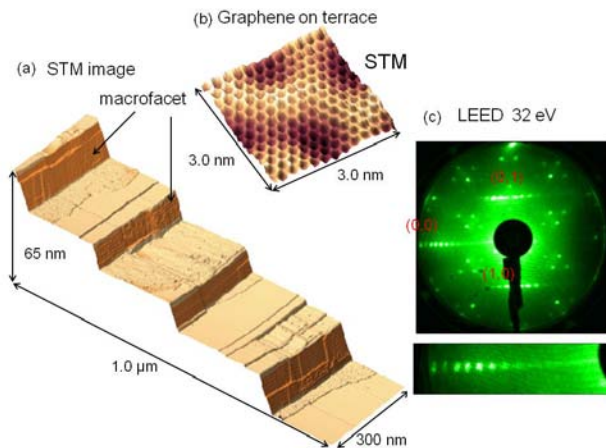


図1 試料のSTM像(a,b)とLEED像(c). テラス表面の一部には、(b)のような下地バッファ層の超構造によって変調されたグラフェンがある。マクロファセット表面にはファセット方向に1次元的なナノ周期構造があるグラフェンがある。LEED像には、このナノ周期構造を反映したスポット列があり、(c)下段はその拡大図。

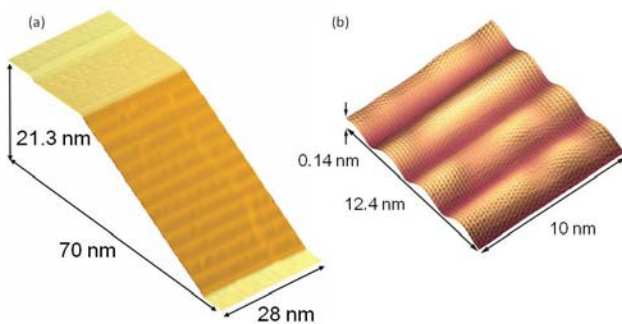


図2 拡大したSTM像。

次元超周期を反映して、サテライトバンド信号が観察された。このグラフェンのディラック点はフェルミエネルギーから0.8 eV下にあり、テラスのグラフェンに比べてドーパ量が少ない。一方、バンドギャップは明確に観察されず、分散速度もテラス上のものと有意な差はなかった。また、40.8 eVで測定した場合、2層目のグラフェンからの信号も図3(b)のように明確に観察された。

さらに、STS測定を行った結果、面垂直方向のフォノンによる非弾性信号が観察された。この信号強度は、グラフェンの凹凸にそって周期的に振動している。このことは、電子格子相互作用の強度が、グラフェンの凹凸にそって振動していることを意味する。表面のSTM像は一様にみえることから、その振動の原因は、表面のグラフェンにではなく表面下にある二層目のグラフェンにあると結論した。

これにより、図4に示すグラフェンの構造モデル

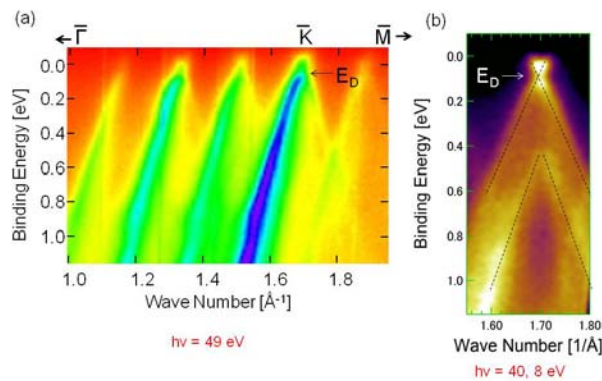


図3 ARPES測定の結果。

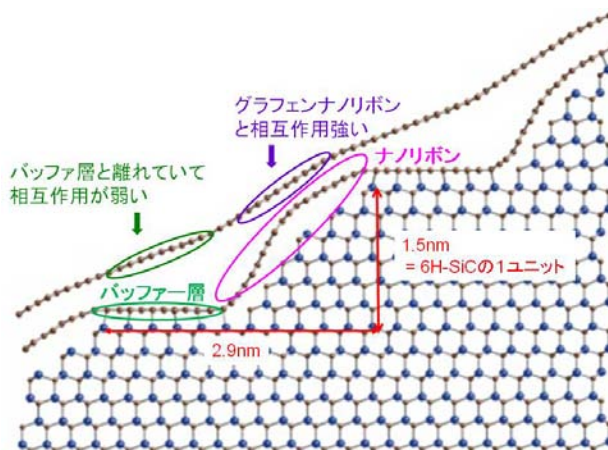


図4 マクロファセット上のナノリップルグラフェンの構造モデル。

を提案した。基板との界面にグラフェンナノリボンとバッファ層があり、前者の部分では層間を電子が移動しやすいが、後者では層間距離が長いために電子が移動しにくい。この違いによって、トンネル電子が格子系と相互作用する確率が異なっていると考えられる。

#### 4 まとめ

1次元ナノリップルグラフェンを6H-SiC基板のマクロファセット上に作製した。ARPES測定によりグラフェンディラックバンドを確認した。この測定とSTM/STS測定とにより、このグラフェンの構造モデルを提案した。

#### 謝辞

この研究はJSPS科学研究費(一般B 26287061、若手B 15K17675)の補助を受けて行われた。

#### 参考文献

- [1] C.-H. Kim *et al.*, *Nature Phys.* **4**, 213 (2008).
- [2] K. Ienaga *et al.*, *Nano. Lett.* **17**, 3527 (2017).

\* komori@issp.u-tokyo.ac.jp