オペランド X 線顕微分光によるグラフェントランジスタの界面電荷分析

Interface dipole layer observation in graphene field effect transistors by synchrotron soft X-ray *operando* spectromicroscopy

物材機構 [1]，JST さきがけ [2]，東北大 [3]，東大 [4] ○永村直佳 [1,2]，吹留博一 [3]，長汐晃輔 [4]，尾嶋正治 [4]
NIMS[1], JST Presto[2], Tohoku Univ.[3], The Univ. of Tokyo[4] ○Naoka Nagamura[1,2], Kazuhiro Fukidome[3], Kosuke Nagashio[4], Masaharu Oshima[4]
E-mail: NAGAMURA.Naoka@nims.go.jp

原子層物質の代表格であるグラフェンは、その特異な電子物性から THz デバイスやセンサーへの応用研究が進んでおり、最近ではねじれ積層やヘテロ積層による多彩な物性制御が提案されている。グラフェンは二次元材料であるが故、周囲の環境つまり表界面の影響を顕著に受ける。そこで本研究では、グラフェンをチャネルとする電界効果トランジスタ(FET)構造について、グラフェン/基板 SiO_2 界面およびグラフェン/金属電極界面の電子状態とデバイス輸送特性の関係を、放射光軟 X 線オペランド顕微分光観測により評価した。

試料は、剥離グラフェンを p^+-Si(100)/SiO_2(90 nm)基板上に転写し、電子線リソグラフィーで Ni 電極を形成した。グラフェン転写前に基板を酸素プラズマ処理した SiO_2 表面が親水性の試料と、グラフェン転写前に基板を酸素ガス中でアニール処理して SiO_2 表面をシロキサン結合にした疎水性の試料について比較を行った[1](Fig. 1)。顕微分光は SPring-8 の 3D nano-ESCA 装置[2]にて行い、空間分解能 70 nm、入射光エネルギー1000 eV で C 1*s*、Si 2*p*、O 1*s* の内殻光電子スペクトルのマッピングを測定した。

ゼロバイアスにおけるグラフェンチャネル上の C 1*s* スペクトルのピーク位置は、親水性基板では疎水性基板と比較して明確に低 binding energy 側にシフトしており(Fig. 2)、親水性基板からグラフェンのホールドープが示唆される。埋もれたグラフェン/基板 SiO_2 界面に由来する Si 2*p* と O 1*s* のピーク位置・形状は親水性基板と疎水性基板で大きく異なり、界面の電荷状態や結合状態の基板による違いを可視化できた。輸送特性については親水性基板では R-V_G 特性にヒステリシスが存在する一方、疎水性基板ではヒステリシスは認められなかった(Fig. 3)。これらの結果より、特にグラフェン/親水性基板界面では電気双極子が発生し、FET 特性に影響を与えていることが明らかになった。さらに、C 1*s* スペクトルのピークシフトの空間分布を観測した結果、疎水性基板と親水性基板では、グラフェン/金属電極界面における電荷移動領域の状態も異なることが実証された[3](Fig. 4)。

この解析手法は、今後様々なヘテロ原子層デバイス構造への展開が期待できる。講演では、本測定結果の詳細について、分析技術の紹介や理論計算との比較も交えて議論する。

[1] K. Nagashio *et al*. J. Appl. Phys. **110** 024513 (2011).
[2] K. Horiba *et al*., Rev. Sci. Instrum. **82** 113701 (2011).
[3] N. Nagamura *et al*. Carbon **152** 680 (2019).

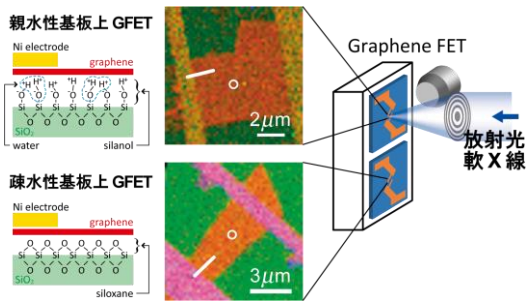

Fig. 1 測定と試料の模式図、実際の顕微分光像(光電子強度マッピング)

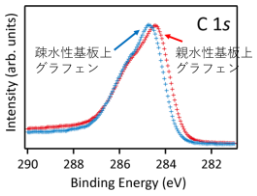

Fig. 2 グラフェンチャネル上の C 1*s* 内殻スペクトル

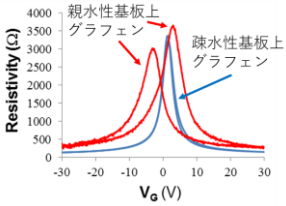

Fig. 3 R-V_G 特性

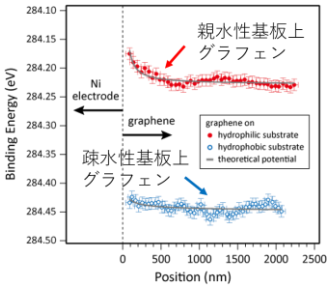

Fig. 4 グラフェン/金属電極界面近傍における C 1*s* ピーク位置(binding energy)の空間分布