

## H<sub>2</sub> 処理した SiC 基板上に作製したグラフェンの解析 The Analysis for The Graphene of SiC Substrates with Surface Cleaning using H<sub>2</sub>

三橋 史典<sup>a</sup>, 舘野 泰範<sup>a</sup>, 豊島 遼<sup>a</sup>, 吹留 博一<sup>b</sup>  
Fuminori Mitsuhashi<sup>a</sup>, Yasunori Tateno<sup>a</sup>, Ryo Toyoshima<sup>a</sup>, and Hirokazu Fukidome<sup>b</sup>

<sup>a</sup>住友電気工業株式会社, <sup>b</sup>国立大学法人東北大学  
<sup>a</sup>Sumitomo Electric Industries, Ltd., <sup>b</sup>Tohoku University

水素処理した SiC 基板上に作製したグラフェンについて、グラフェンをチャネル層に用いたトランジスタ特性の改善が確認され、水素処理によるグラフェン形成、結晶状態への影響を LEEM/PEEM により評価した。その結果、水素処理によるグラフェン形成、結晶状態への影響はない事が判明し、水素処理による影響が SiC 基板表面の不従物等への効果と考えられる。また、トランジスタ作製に有利な幅の非常に広いグラフェンが形成可能性あることを確認できた。

**キーワード：** グラフェン、グラフェン/基板界面、SiC、光電子顕微鏡

### 背景と研究目的：

グラフェンをチャネル層に用いたグラフェントランジスタ (GFET) は、非常に高いキャリア移動度を活かし、テラヘルツ帯などの無線通信用途などへの活用するキーデバイスとして期待されている。

我々は、この GFET で使用するグラフェンをいくつか存在する製造方法内、転写工程を必要としない SiC 上にグラフェンを形成する熱昇華法を選択し研究を進めている。昇華法で作製したグラフェンは、Hall 移動度にて 30,000 cm<sup>2</sup>/Vs (シートキャリア濃度 1E<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup>) と従来の半導体材料 (GaAs, GaN や Si 等) と比べ高い性能を持つことを実証したが、理論的に期待されているグラフェンのキャリア濃度に対し、一桁程度低い値となっている。

我々はこの要因について、グラフェン/SiC 基板、グラフェン/ゲート絶縁膜界面におけるキャリア散乱によるものと考えている。この要因の内、グラフェン/SiC 基板界面の状態を改善するため、グラフェンを形成する前に SiC 基板表面の水素処理を実施した結果、GFET における移動度、高周波特性に改善傾向が確認された。

そこで BL17SU の SPELEEM 装置を利用し、SiC 基板表面の水素処理によるグラフェン形成へ影響を評価するため、グラフェンの形成、結晶状態について解析を行った。

### 実験：

今回の実験では、Si 面の半絶縁性 6H-SiC 基板にグラフェン形成前に比較的低温 (500°C 程度) での水素処理を実施しないサンプルと実施したサンプルを用意し、それぞれ同条件でグラフェン形成を行い、サンプルを用意した。

### 結果および考察：

まず、グラフェンの形成状態を比較するため、Si 面上のグラフェンについて、LEEM 評価を実施した。この際、視野径 15 μm にて反射率の入射電子エネルギー依存性評価を実施し、その他の視野径については任意のエネルギーにて観察を実施している。

水素処理を実施していない基板上的グラフェン (図 1) と水素処理を実施した基板上的グラフェン (図 2) についてそれぞれ LEEM 像と反射率の入射電子エネルギー依存性示す。

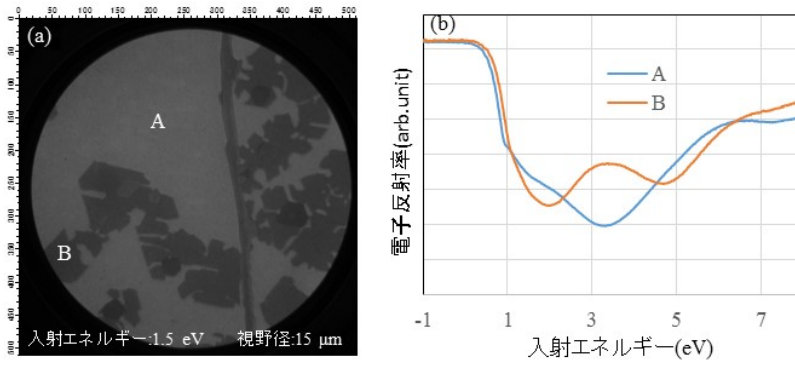


図 1. 水素処理していない基板から作製したグラフェンの (a)LEEM 像および (b) 反射率の入射電子エネルギー依存性

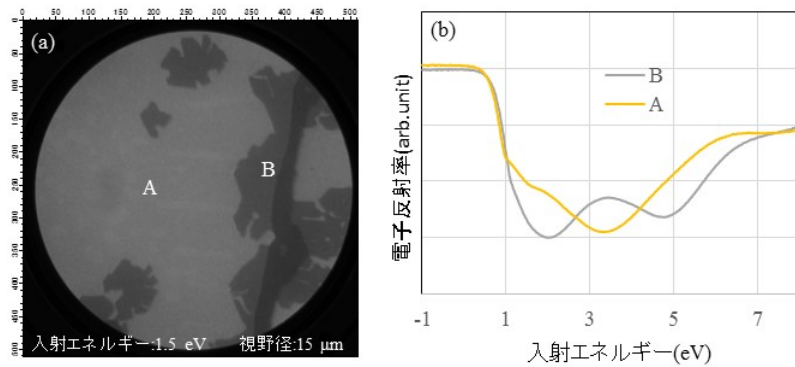


図 2. 水素処理した基板から作製したグラフェンの (a)LEEM 像および (b) 反射率の入射電子エネルギー依存性

図 1, 2 に示すように、どちらの LEEM 像も明るいコントラスト部分では、1 回の反射を示し、暗い部分では 2 回の反射を示していることから、明るい部分のグラフェンが 1 層、暗い部分が 2 層を示していることが分かる[1]。また、それぞれのサンプルともに 1 層のグラフェンがテラス上に形成され、ところどころ指状構造が確認される 2 層のグラフェン部分が点在し、2~3 層のグラフェンが線状にステップ端に形成されていることが確認出来る。これらのグラフェン形成は、従来から報告されている Si 面上グラフェンの形成で特徴的に確認される形成構造と同じ構造となっており、基板の水素処理の有無にかかわらず、一般的な Si 面上のグラフェン形成が行われていることが分かる[1,2]。

その一方、従来のグラフェン形成と異なる部分としてテラス幅が大きい事が確認された。図 3 にそれぞれの視野径 75 μm での LEEM 像を示す。

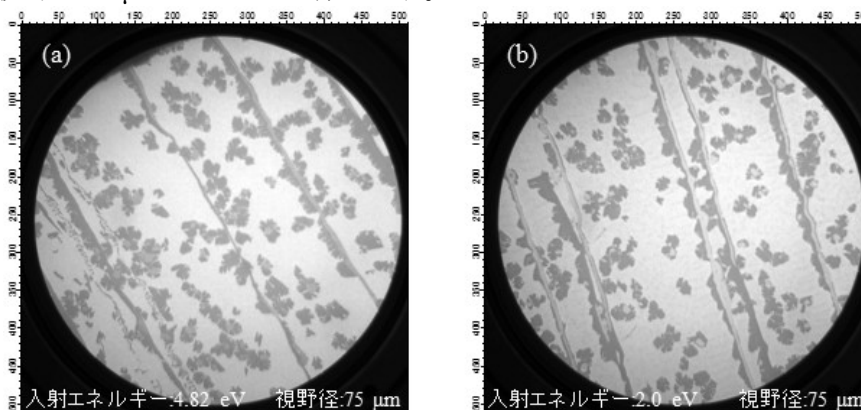


図 3. (a)水素処理していない基板から作製したグラフェンと (b)水素処理した基板から作製したグラフェンの LEEM 像

図 3 から分かるようにどちらのサンプルについても最大 20 μm 程度のテラス幅でグラフェン

が形成していることが分かる。これは従来のテラス幅がサブミクロン程度であることに比べ非常に広い[1]。

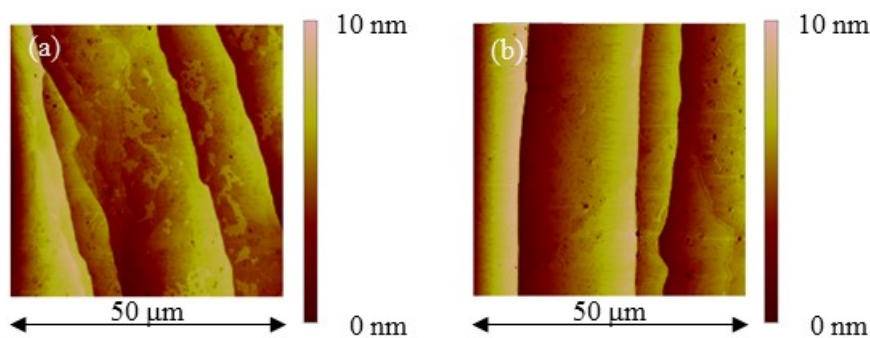


図 4. (a)水素処理していない基板から作製したグラフェンと(b)水素処理した基板から作製したグラフェンの AFM 像

(a) 従来のSi面グラフェン

(b) 今回のSi面グラフェン



図 5. (a)従来の Si 面上グラフェンと(b)今回の Si 面上グラフェンのグラフェン形成模式図

このテラス構造について、図 4 にそれぞれのサンプルの AFM 像を示す。どちらの AFM 像からのステップ端の高さが高い部分で 7~8 nm の高さであることを確認することが出来る。これは、従来のグラフェンにおけるステップ高さが約 1 nm 程度で形成される事に比べ、非常に高くなっている[3]。つまり、図 5 の模式図に示すようにグラフェン形成時により、通常であれば均等に存在しているはずのステップが複数重なりあうことにより、幅の広いテラスが形成されたものと考えられる。現在、このステップが重なる現象については、解析中である。もしこの形成現象が解明できれば、GFET のチャンネル部分をこのテラス内で作製出来れば電気特性の阻害要因となるステップ端等を含むことなくデバイスを作製することが可能になると期待できる。

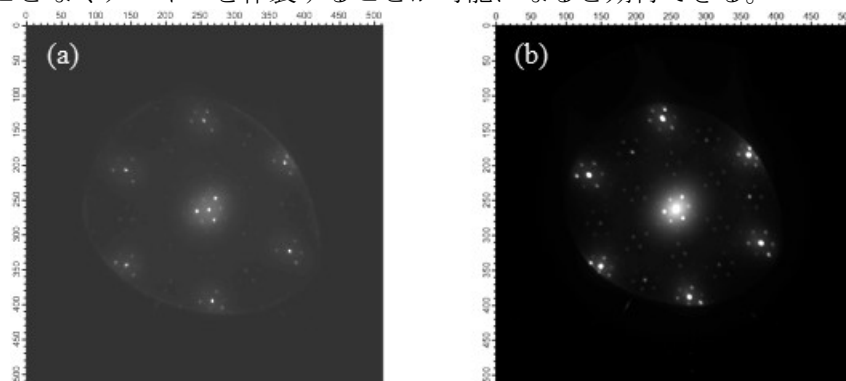


図 6. (a)水素処理していない基板から作製したグラフェンと(b)水素処理した基板から作製したグラフェンの LEED 像

次に結晶の状態について比較する。図 6 にそれぞれの LEED 像を示す。図 6 から分かるように基板の水素処理有無にかかわらず、グラフェンのスポット形状が確認できることから良好な結晶品質を有するグラフェンが形成できていることが分かる。また、グラフェン下部の SiC 構造を確認するため、Si K-edge の XAS スペクトル(図 7)を示す。図 7 から分かるように 6H-SiC 構造に起因した XAS スペクトルがそれぞれのサンプルから確認することが出来、そのスペクトル形状にも差がない事が分かる[4]。また、それぞれのサンプル面内での変化を示す PEEM 像からも面内で

の変化はほぼ確認されず、表面近傍の SiC 構造も均一な構造が保たれていることが PEEM 像より確認された。

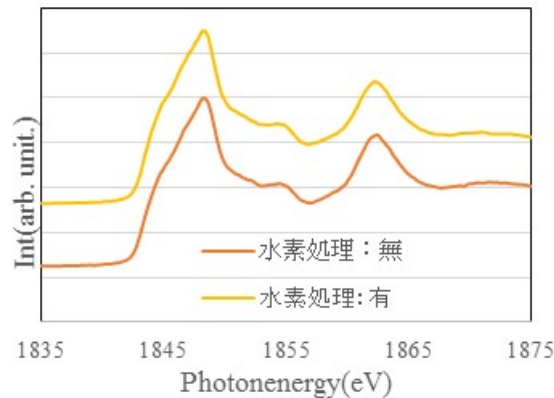


図 7. 水素処理していない基板から作製したグラフェンと水素処理した基板から作製したグラフェンの Si-Kedge XAS スペクトル

このことから、基板の水素処理技術は、グラフェンの形成、結晶状態には影響を与えておらず、GFET の電気特性に効果を及ぼした要因は SiC 基板表面に存在する不純物元素等への影響と考えられる。

#### まとめと今後の課題：

今回、GFET の電気特性に改善が見られた水素処理した基板から作製したグラフェンについて、グラフェンの形成および結晶状態について水素処理の影響がないか解析を実施した。その結果、水素処理をしていない基板から作製したグラフェンと形成状態、結晶状態には大きな差がない事が確認でき、H<sub>2</sub> 処理による効果は、SiC 表面に存在する不純物元素等に影響を与えているものと考えられる。また、今回の評価にて非常に幅の広いテラス構造を持ったグラフェン形成の可能性を発見することが出来た。

今後、さらに解析を進め GFET の電気特性向上に必要な要素を見極めるための実験、評価を進めたい。

#### 参考文献：

- [1] H. Hibino, et al., *J.Phys.D: Appl. Phys* **45**, 154008 (2012)
- [2] V. Borovikov, et al., *Phys. Rev.* **B80**, 121406 (2009)
- [3] M.Kruskopt, et al., *J.Phys.: Condens.Matter* **27**, 185303 (2015)
- [4] 馬場祐治 他 表面科学 23(7), 417(2002)