

触媒金属凝集を利用した転写フリーグラフェンFETの作製

名古屋工業大学 電気・機械工学科 准教授

久保 俊晴

1. テーマ設定の背景

グラフェンは炭素原子が蜂の巣状に結合した二次元的材料であり、高速トランジスタや配線材料、透明導電膜等の種々の分野への応用が期待されている。しかし、グラフェンのデバイス応用において、絶縁性基板に層数や形状を制御して直接成膜する方法が確立しておらず、現在研究が進められている。

本研究では、触媒金属の凝集現象を利用して絶縁基板上に直接グラフェンを形成し、さらに意図した箇所に意図した層数、形状のグラフェンを集積させ、高性能デバイスを作製することを目標として研究を進めている。

2. 素形材分野との関連性

グラフェンは材料として非常に優れたポテンシャルを有しているが、デバイス応用においては、結晶性に優れたグラフェンを絶縁性基板上に形状を制御して直接成膜できることが望ましい。グラフェンを設計した通りに自由な形状で成膜することができれば、新たな電子デバイスの作製に展開していくことができ、本研究は今後の電子材料、デバイス分野の発展に大きく寄与する研究である。

3. 研究開発の成果

現在、グラフェン形成の触媒金属であるNiに対して、極微細パターンをサファイア基板上に形成し、このパターンに沿って金属凝集するよう誘導し、意図した箇所に意図した層数、形状のグラフェンを集積させ、高性能グラフェンデバイスを作製する研究を進めている。微細パターンの形成には電子ビーム露光によるサブミクロン幅のデバイスの形成を試みている。

3. 1 Ni膜の加熱処理によるグラフェン膜の結晶性向上

微細パターン形成に先立ち、Niの金属凝集により形成されるグラフェン膜とNi膜の結晶性との関係性を評価した。Ni膜の結晶性は、サファイア基板上にNi膜を形成する際に、Ni成膜時および成膜後に加熱処理を行うことにより結晶性を変化させ、その後金属凝集法によりグラフェン膜を形成した。

Ni膜の結晶性の評価にはXRD (X-ray diffraction)、EBSD (Electron backscatter diffraction) を用い、グラフェン膜の評価には、ラマン分光を用いた。結果として、加熱処理を行ったNi膜は結晶子サイズが5倍程度になり、EBSDにより評価したNiの結晶性を示すIQ (Image Quality) 値は最大で9倍程度と向上した。また、形成したグラフェンに対するラマン分光測定では、グラフェン中の欠陥に起因するピーク強度が1/4程度に減少した。さらに、このグラフェンが

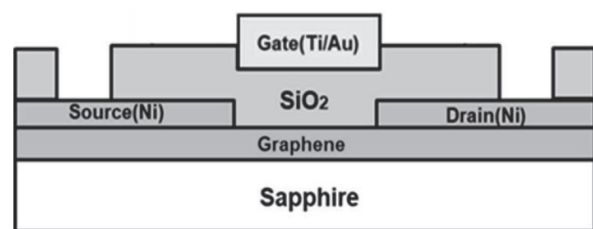


図1 作製したグラフェンFETの断面模式図

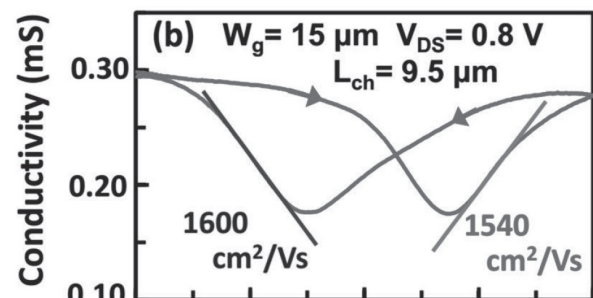


図2 グラフェンFETの伝達特性

ら作製したFETの特性の1つである電界効果移動度はこれまでの研究の2倍程度の値を示した。図1に作製したグラフェンFETの断面模式図、図2にグラフェンFETの伝達特性を示す。図2から分かるように、グラフェンFETのキャリアの動き易さを示す電界効果移動度は電子に対して $1540 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ 、正孔に対して $1600 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ という値が得られ、高電子移動度トランジスタと呼ばれるデバイスと同等の値が得られている。

3.2 触媒Niの微細パターンを用いたグラフェン膜の形成

Ni膜の成膜中および成膜後の加熱処理がグラフェン膜の結晶性、およびグラフェンFETの特性向上についても有効であることが分かったため、この結果を踏まえ、金属パターンを用いた金属凝集法の研究を進めている。

金属凝集を利用した絶縁基板上へのグラフェン直接形成において、触媒金属をパターン化することで、パターンに沿ったグラフェン形成が可能であり、現在、図3のように、設計したNiパターン間の微細スペースに結晶性の良いグラフェンを形成する研究を行っている。図3左図に示したように、 $1 \mu\text{m}$ 幅のNiパターン間にグラフェン膜を形成し、ラマン分光を行った結果、図3右図の結果が得られ、図中赤の領域で示されているように、欠陥の少ないグラフェンが形成できている。

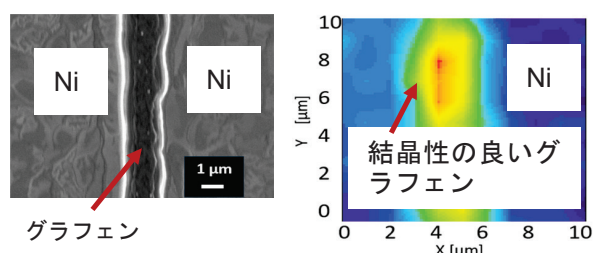


図3 微細構造Niパターンとグラフェンの結晶性

4. 訴求点

グラフェンはその発見後、様々な研究がなされてきたが、絶縁基板上への層数および形状を制御した直接形成は困難なことから、未だにグラフェンを用いた電子デバイスは広く普及していない。

本研究開発はグラフェンを用いた低消費電力の集積回路へと進展するものであり、今後のエネルギー消費を考える際に顕著に増大すると考えられるデータセンターなどのコンピュータシステムにおける消費電力量を減らし、持続可能な社会の構築に貢献する研究開発である。また、本研究により極微細な形状を有するグラフェンを任意の形状、層数で作製することにより、その電子的な性質が理論的な予測と一致するのかどうか検証することができ、電子材料について多くの新しい学術的な知見が得られるものと期待される。

参考文献

- 1) M. Miyoshi, M. Mizuno, Y. Arima, T. Kubo, T. Egawa, T. Soga, Transfer-free graphene synthesis on sapphire by catalyst metal agglomeration technique and demonstration of top-gate field-effect transistors, Appl. Phys. Lett. Vol.107, pp.073102-1 - 073102-4 (2015).
- 2) M. Miyoshi, Y. Arima, T. Kubo, T. Egawa, Self-forming graphene/Ni patterns on sapphire utilizing the pattern-controlled catalyst metal agglomeration technique, Appl. Phys. Lett. Vol.110, pp.013103-1 - 013103-4 (2017).
- 3) T. Kubo, A. Takahashi, M. Miyoshi, and T. Egawa, Improved field-effect mobility in transfer-free graphene films synthesized via the metal agglomeration technique using high-crystallinity Ni catalyst films, Appl. Phys. Express, Vol.14, pp.116503-1 - 116503-3 (2021).