

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：34504

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01768

研究課題名（和文）結晶成長による2Dヘテロ構造のデザイン

研究課題名（英文）Design of 2D heterostructures by crystal growth

研究代表者

日比野 浩樹（Hibino, Hiroki）

関西学院大学・工学部・教授

研究者番号：60393740

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,900,000円

研究成果の概要（和文）：我々は、Cu表面にグラフェン（Gr）と六方晶窒化ホウ素（h-BN）の横型および縦型ヘテロ構造を成長順序によって作り分けられることを報告してきた。本研究では、縦型ヘテロ構造形成において課題となっていたGr成長中のh-BNのエッチングを、成長雰囲気や炭素源ガスの種類によって抑制できることを示した。また、Grまたはh-BNで部分的に覆われたCu表面での各種成長前駆体の吸着エネルギーを第一原理計算し、横型と縦型の成長様式の切り替わりがGrおよびh-BN島のエッジが水素終端されているかどうかによって決定されることを解明した。さらに、Grやh-BNを直接成長させたサファイア上でのMoS₂の成長も実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

グラフェンの発見以来、数多くの二次元（2D）物質が作製され、その広範なライブラリが構築されている。2D物質はそれぞれが得意の応用分野を持つだけでなく、ヘテロ構造による新しい物理や機能の発現に大きな期待がある。本研究により得られた2Dヘテロ構造の結晶成長機構に関する知見は、デザインされた2Dヘテロ構造を作製する技術の確立を通して、2D物質の産業応用に貢献する。

研究成果の概要（英文）：We have so far reported that lateral and vertical heterostructures of graphene (Gr) and hexagonal boron nitride (h-BN) can be selectively formed on Cu surfaces depending on the growth sequence. In this study, we demonstrated that the etching of h-BN during the growth of Gr, which was a challenge in forming vertical heterostructures, can be suppressed by adjusting the growth atmosphere and the type of carbon source gas. Additionally, we performed first-principles calculations of the adsorption energy of various growth precursors on Cu surfaces partially covered with Gr or h-BN and elucidated that the transition between lateral and vertical growth modes is determined by whether the edges of Gr or h-BN islands are hydrogen-terminated. Furthermore, we achieved the growth of MoS₂ on sapphire directly grown with Gr or h-BN.

研究分野：表面科学

キーワード：グラフェン 六方晶窒化ホウ素 化学気相成長 ヘテロ構造 第一原理計算 二硫化モリブデン

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

炭素の二次元(2D)シートであるグラフェンが2004年に発見されて以来、六方晶窒化ホウ素(h-BN)やMoS₂等の遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)などを含む数多くの2D物質が作製され、研究開発当初には既に、2D物質の広範なライブラリが構築されていた。これらの2D物質は幅広い特性をもち、それぞれが得意の応用分野をもつだけでなく、それらを垂直方向に積み重ねたり(縦型)、水平方向に繋ぎ合わせたり(横型)して形成される原子レベルで薄い2Dヘテロ構造に対して新しい物理や機能が次々と発見されていた。ところが、これらのほとんどの2Dヘテロ構造は、バルクから機械的に剥離した小片が作製に用いられていた。この機械的剥離法は、確かに縦型ヘテロ構造の基礎研究とデバイス実証に有益であるが、低生産性、小面積、界面汚染などの欠点により産業応用には適さない。しかも、この手法では横型ヘテロ構造を製造できない。これらの課題を解決すべく、研究開始当初にも既に、化学気相成長(CVD)などの気相成長法による2Dヘテロ構造の作製が試みられていたが、局所的にできている例がほとんどであり、残念ながら高品質でスケラブルな作製技術には程遠かった。

2. 研究の目的

上記の背景の下、本研究では、2Dヘテロ構造の結晶成長機構の解明を目的とした。そして、その理解の上に、2Dヘテロ構造の三つの異なる成長様式であるエッジ成長、表面成長、界面成長を自在に組み合わせることで、デザインされた2Dヘテロ構造を結晶成長させる技術確立することを目指した。

3. 研究の方法

グラフェンとh-BNはともに蜂の巣格子で構成され、その格子不整合も1.7%と小さく、最も代表的な2Dヘテロ系である。加えて、グラフェンとh-BNはそれぞれゼロギャップ半金属とワイドバンドギャップ絶縁体であり、電気伝導特性が全く異なるため、それらのヘテロ構造に多様な物性や応用が期待できる。そこで、グラフェンとh-BNの2Dヘテロ構造に重点を置き、その成長機構を解明することに取り組んだ。そのために、CVD成長条件に応じてグラフェン/h-BNヘテロ構造の成長様式がどう変化するかを実験的に調べ、また、特にエッジ構造が果たす役割に着目して、成長機構を理論的に考察した。さらに、2Dヘテロ構造の多機能化を目的に、半導体であるMoS₂をグラフェンまたはh-BNと複合化することにも取り組んだ。この際、グラフェンおよびh-BNのCVD成長基板として最も一般的なCuは、硫化されやすくTMDCの成長基板として不適格であるため、グラフェンおよびh-BNをサファイア基板に直接CVD成長させる技術確立し、引き続きMoS₂をCVD成長させることを試みた。

4. 研究成果

(1) 高品質なグラフェン/h-BNヘテロ構造のCVD成長条件の探索

我々はこれまで既に、グラフェンとh-BNの横型および縦型ヘテロ構造を成長順序によって作り分けられることを報告してきた[1]。しかし、縦型ヘテロ構造の作製においては、h-BNの成長後にグラフェンを成長させるため、グラフェン成長中にh-BNが水素によりエッチングされる問題があった。そこで、グラフェン成長中のキャリアガスをAr/H₂からN₂に変更することで、グラフェン成長のh-BNのエッチングの抑制を試みた。Fig. 1は、h-BN成長後にN₂雰囲気下でグラフェンを成長したCu表面の走査電子顕微鏡(SEM)像である。三角形の明るい領域がh-BN島で、周囲の暗い領域がグラフェンであり、グラフェン成長後もh-BNがエッチングされた形跡は見られない。また、低エネルギー電子顕微鏡(LEEM)による観察から、グラフェンがCu表面だけでなくh-BN島とCu基板の界面にも成長し、縦型ヘテロ構造を形成したことが示された。このヘテロ構造の結晶性を調べるために、Cu基板上からSiO₂/Si基板に転写した後、グラフェンのラマンスペクトルを取得した。グラフェンのGバンドと2Dバンドの強度比のマッピングから、グラフェンは主に多層であるが、h-BN/Cu界面でより薄く、部分的に単層グラフェンも確認された。グラフェンの成長速度は表面よりも界面で遅いことがわかる。また、Dバンドのラマンマップから、h-BN/Cu界面のグラフェンは欠陥由来のDバンドがCu表面上のグラフェンに比べはるかに小さく、表面よりも界面により結晶性の良いグラフェンが成長することが示された。

次に、炭素源ガスとして一般的なCH₄の代わりにC₂H₄を用いた結果を述べる。これまでに、炭素源ガスとして炭素/水素比が高いC₂H₂を用いることで、グラフェン成長中のh-BNのエッチングを抑え、基板全面にh-BN/グラフェン縦型ヘテロ構造を作製できることが報告され

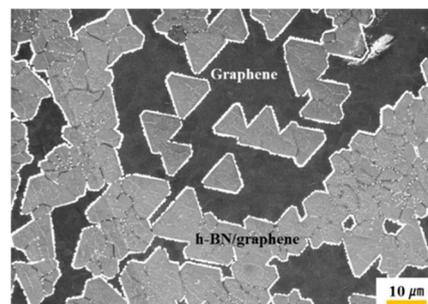


Fig. 1. h-BN成長後にグラフェンをN₂雰囲気下で成長させたCu箔のSEM像

ていた[2]。しかし、この手法では、h-BN エッジへの水素吸着を目的に、h-BN 成長後からグラフェン成長までの間に、試料冷却から、水素雰囲気での加熱、再昇温という付加的なプロセスが不可欠であった。そこで、本研究では、炭素/水素比が CH_4 と C_2H_2 の中間にある C_2H_4 を炭素源ガスとして用い、付加的な水素雰囲気加熱なしでの h-BN/グラフェン縦型ヘテロ構造の作製を試みた。その結果、Cu 箔上に h-BN を 1050 で成長後、連続してグラフェンを成長させた場合、キャリアガスの Ar/H_2 の流量を抑えることで、h-BN を基板全面に保持したまま縦型ヘテロ構造を形成可能であることがわかった。ただし、この条件では、成長初期に層数分布のあるグラフェンが形成され、多層のグラフェンが成長した。一方、成長時間を伸ばすと、グラフェンの層数が減少し、欠陥密度も低下する傾向が見られた。結晶性の悪いグラフェンが水素によってエッジや欠陥からエッチングされることで、薄層化と結晶性の向上が進行したと考えられる。ただし、さらに結晶性を向上させる目的で Ar/H_2 流量を増加すると、h-BN のエッチングが生じた。このため、次に、 CH_4 に比べ低温成長が可能な C_2H_4 の特性を生かして、h-BN 成長後に基板温度を 900 に下げてからグラフェンを成長させた。 Ar/H_2 流量を高く保つことで、グラフェンの結晶性を 1050 の場合と同程度に保ちつつ、単層グラフェンと h-BN の縦型ヘテロ構造を作製できることを確認した (Fig. 2)。しかしながら、グラフェンの成長速度が遅い欠点があり、その改善が今後の課題である。

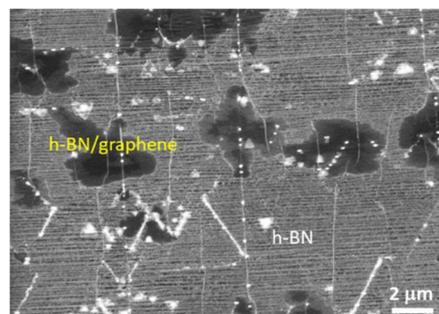


Fig. 2. 1050 で h-BN 成長後に C_2H_4 を原料に 900 でグラフェンを成長させた Cu 箔の SEM 像

(2) グラフェン/h-BN ヘテロ構造形成機構の理論的考察

これまで我々は、Cu 基板上でグラフェンと h-BN の成長順序によって、横型と縦型の異なるヘテロ構造が形成される理由として、グラフェンと h-BN のエッジ構造の違いを提案してきた[1]。すなわち、グラフェンのエッジは Cu 表面原子で終端されるため、h-BN がエッジから成長するのに対し、h-BN のエッジは水素原子で終端されるため、炭素源が界面に拡散し、グラフェンを形成するというモデルである。しかし、このように成長様式が異なる理由は不明であった。そこで、グラフェンまたは h-BN で部分的に覆われた Cu(111)表面での各種成長前駆体の吸着エネルギーを第一原理計算により評価した。

まず、グラフェンおよび h-BN のエッジ構造の最適化計算を行った。それによれば、グラフェンおよび h-BN のエッジが水素で終端されていない場合、ともにエッジが凸型に丸まり、エッジ原子は Cu 表面原子と化学結合した。一方、エッジが水素原子で終端された場合、グラフェン、h-BN とともに基板表面に平行なままであった。エッジ形状は水素の有無によって大きく変化することがわかる。

次に、このようなエッジ構造をもつグラフェンまたは h-BN で部分的に覆われた表面において、C、B、N のモノマーおよび、C と BN のダイマーの吸着エネルギーを計算した。以下では、h-BN で部分的に覆われた表面での C のモノマーとダイマーの結果を説明する (Fig. 3)。

h-BN で覆われていない Cu(111)表面での C モノマーの最安定位置は、Cu 表面第一層と第二層間のサブサーフェス (SS) サイトであった。その吸着エネルギーを基準として相対的な吸着エネルギーを位置の関数としてプロットしたものが Fig. 3(a)である。ここで、h-BN は中央部に存在し、破線位置がエッジに対応する。青点と赤点は水素終端されていない場合とされている場合に対応し、四角が SS サイトにある場合、丸が表面にある場合の結果である。エッジ位置を除き、水素終端の有無にかかわらず SS サイトがより安定であり、炭素モノマーは SS に沿って拡散することが分かる。

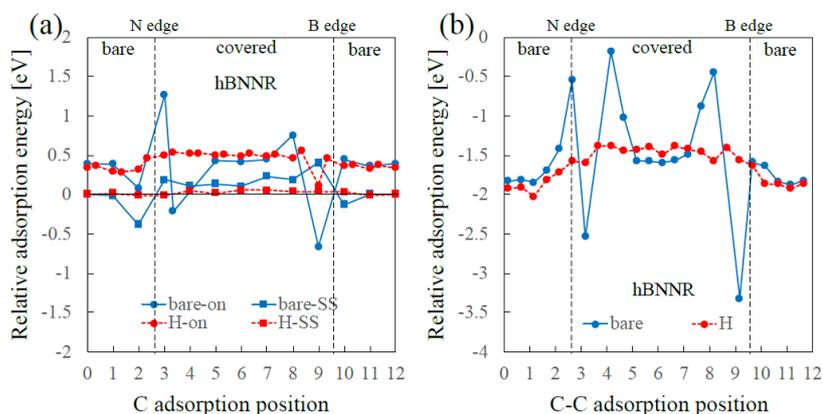


Fig. 3. h-BN で部分的に覆われた Cu(111)表面での(a)C モノマーと (b)C ダイマーの吸着エネルギーの吸着位置依存性

一方、先行研究からグラフェン成長にはCダイマーの寄与が大きいことが報告されており[3]、Cダイマーの吸着エネルギーも調べた。その結果、CダイマーはSSサイトでは形成されず、必ずCu表面に形成されることが示された。Fig. 3(b)は、Cダイマーの吸着エネルギーの位置依存性である。水素終端されていない場合、エッジと化学結合することで大きなエネルギー利得が得られる。その一方で、水素終端されたエッジでは、界面に比べ表面で若干安定で、しかもエッジに近づくにつれ安定性が増すことがわかる。

以上から、水素終端されていないh-BNでは、拡散種がモノマーかダイマーかにかかわらず、C原子はh-BNエッジに化学結合することで安定化し、そこから面内にグラフェンが成長すると考えられる。一方、水素終端されたh-BNでは、SSを拡散したCモノマーもしくは表面を拡散したCダイマーがエッジ付近で凝集することで、グラフェン核を形成し、その後、h-BNの界面へと成長することで縦型ヘテロ構造が形成されると考えられる。水素終端されたh-BNでのヘテロ構造形成プロセスをFig. 4に模式的に示す。ここまでh-BNで部分的に覆われた場合の計算結果を説明してきたが、グラフェンで部分的に覆われた場合も、水素終端の有無により、成長様式に同様の変化が生じると予測された。

つまり、実験で観察されたように、グラフェン成長後にh-BNを成長させると横型ヘテロ構造が形成され、順序が逆ならば縦型ヘテロ構造が形成されるためには、グラフェンのエッジは水素終端されていない一方で、h-BNエッジは水素終端されている必要がある。しかし、実験的にはキャリアガスであるAr/H₂の供給量を変化させているわけではない。このため、H終端のされ方がグラフェンとh-BNで自動的に切り替わっていると想定される。そこで、H終端によるエネルギー利得を第一原理計算によって詳細に検討したところ、これまで金属表面に吸着したグラフェンやh-BNでファンデルワールス力の再現に実績のあるファンデルワールス力補正方法を適用することで、h-BNエッジのH終端によるエネルギー利得がグラフェンエッジに比べ若干大きくなること示された。今後は、モノマーやダイマー以外の成長前駆体も検討することで、エッジ終端の違いが現れるメカニズムをより深く理解する。

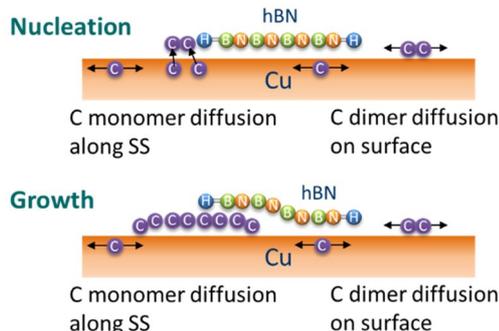


Fig. 4. グラフェン/h-BN 縦型ヘテロ構造の形成メカニズム

(3) TMDC/グラフェンおよび TMDC/h-BN ヘテロ構造の作製

TMDC とのヘテロ構造作製の基板に用いるため、サファイア基板上にグラフェンおよびh-BNを直接CVD成長させる技術を確認した。以下ではグラフェン成長に関する結果を述べる。

さまざまな面方位(c面、a面、m面、r面)のサファイア上に、CH₄を原料として基板温度1500でグラフェンをCVD法で直接成長させ、構造や特性を比較した。その結果、4種類の面方位のサファイアすべてに、単層で多結晶のグラフェンが成長することが分かった。一方、その結晶粒サイズは面方位に依存し、m面が最大であり、a面とr面が中間的で、c面が最小であった。Fig. 5はこれに対応した実験結果であり、c面およびm面上に成長させたグラフェンの暗視野LEEM像を示す。個々の明るい領域が結晶粒に対応し、最大の粒径はそれぞれ0.5×1および3×5 μm程度と見積もられ、顕著な面方位依存性を示す。さらに、c面とm面でのグラフェンの成長時間依存性から、両者で成長機構が大きく異なることも見出しした。c面ではグラフェン島が徐々に拡大し基板全面を覆いつくす一方、m面では短時間でグラフェンが基板全面を覆った後、単層のまま結晶粒が粗雑化した。この成長過程の違いも、グラフェン粒径の面方位依存性に寄与していると考えられる。

また、Fig. 6は4種類の面方位のサファイアに成長させたグラフェンに対して、キャリア移

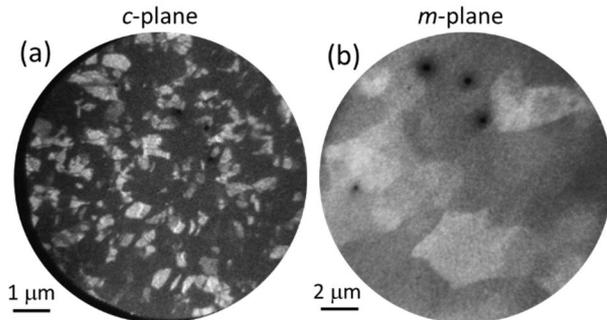


Fig. 5. (a)c面および(b)m面サファイア上に成長させたグラフェンの暗視野LEEM像

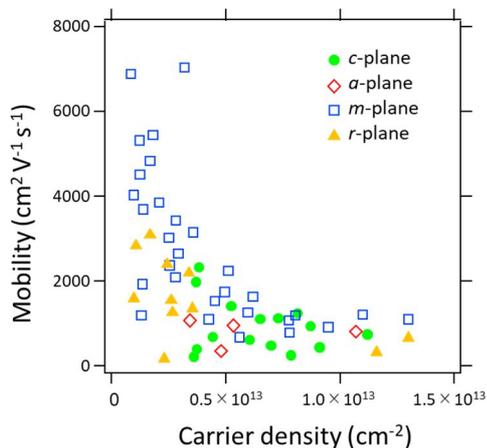


Fig. 6. サファイア上に直接成長させたグラフェンのキャリア移動度のキャリア密度依存性

動度をキャリア密度の関数として示したグラフである。キャリア密度が高いほど移動度が低い傾向は、キャリア散乱要因として格子欠陥の寄与が大きいことを示している。Fig. 6はm面上に成長させたグラフェンに最も高いキャリア移動度が得られており、結晶粒界がキャリア散乱源として電気伝導特性に大きな影響を及ぼすことが推定される。

我々はさらに、サファイア上でのグラフェン成長温度の低減に向けて、 CH_4 に代えて C_2H_4 による成長も試み、同じ結晶品質のグラフェンが CH_4 よりも約200 低い温度で成長できることを明らかにした。

次に、サファイア基板に直接 CVD 成長させたグラフェンおよび h-BN の上に、 MoS_2 を成長させることに取り組んだ。最初に、グラフェン上での MoS_2 成長における Mo 原料の影響を調べた。その結果、Mo 原料に MoO_3 を使用した場合、 MoS_2 成長中にグラフェンがエッチングされる一方、 MoCl_5 を原料に使用するとグラフェンが成長後も存在し、 MoS_2 /グラフェン縦型ヘテロ構造を作製できることが示された。さらに、h-BN 上においても、Fig. 7 の原子間力顕微鏡 (AFM) 像に示されるように、 MoS_2 成長に成功した。シワの存在から h-BN が維持されていることが確認できる。ただし、h-BN 上の単層 MoS_2 のフォトルミネッセンス (PL) 強度は、サファイア上に成長させた MoS_2 に比べ弱いことが示された。サファイア上と h-BN 上に成長させた MoS_2 のラマンピーク位置を比較すると、h-BN 上の MoS_2 はより大きな歪みを受けていることが明らかとなり、歪みが PL 強度低下の原因である可能性がある。今後、詳細な原因解明が必要である。

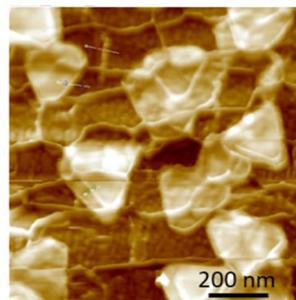


Fig. 7. MoS_2 を成長させた h-BN/ サファイア基板の AFM 像

- [1] R. Makino, S. Mizuno, H. Kageshima, and H. Hibino, Appl. Phys. Express **13**, 065007 (2020).
- [2] S. Wang, J. Crowther, H. Kageshima, H. Hibino, and Y. Taniyasu, ACS Nano **15**, 14384 (2021).
- [3] H. Chen, W. Zhu, and Z. Zhang, Phys. Rev. Lett. **104**, 186101 (2010).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kawai Yoshikazu, Nakao Takuto, Oda Takato, Ohtani Noboru, Hibino Hiroki	4. 巻 62
2. 論文標題 Influence of substrate sapphire orientation on direct CVD growth of graphene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085503 ~ 085503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acea0b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sakakibara Ryotaro, Bao Jianfeng, Hayashi Naoki, Ito Takahiro, Hibino Hiroki, Norimatsu Wataru	4. 巻 35
2. 論文標題 Control of rotation angles of multilayer graphene on SiC (000-1) by substrate off direction and angle	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 385001 ~ 385001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/acdebf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiaki Sekine, Katsuya Oguri, Hiroki Hibino, Hiroyuki Kageshima, Yoshitaka Taniyasu	4. 巻 16
2. 論文標題 Polarized Raman scattering spectroscopy of array of embedded graphene ribbons grown on 4H-SiC(0001)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 065001 ~ 065001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acd0f1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kageshima Hiroyuki, Wang Shengnan, Hibino Hiroki	4. 巻 21
2. 論文標題 Theoretical Study on Origin of CVD Growth Direction Difference in Graphene/hBN Heterostructures	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 251 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2023-031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hibino Hiroki、Kageshima Hiroyuki	4. 巻 7
2. 論文標題 Carbonization-driven motion of Si islands on epitaxial graphene	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 054003 ~ 054003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.7.054003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 影島 博之、Shengnan Wang、日比野 浩樹	4. 巻 50
2. 論文標題 hBN-グラフェンヘテロ構造のCVD成長機構	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 50-1-01 ~ 50-1-01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19009/jjacg.50-1-01	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yi Hsin、Solis-Fernandez Pablo、Hibino Hiroki、Ago Hiroki	4. 巻 4
2. 論文標題 Surface etching and edge control of hexagonal boron nitride assisted by triangular Sn nanoplates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nanoscale Advances	6. 最初と最後の頁 3786 ~ 3792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2NA00479H	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kageshima Hiroyuki、Wang Shengnan、Hibino Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Theoretical study on role of edge termination for growth direction selectivity in chemical vapor deposition of hBN/graphene heterostructure on Cu surface	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 085502 ~ 085502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac0ece	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Mizuno Shogo, Ohta Akio, Suzuki Toshiaki, Kageshima Hiroyuki, Yuhara Junji, Hibino Hiroki	4. 巻 14
2. 論文標題 Correlation between structures and vibration properties of germanene grown by Ge segregation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 125501 ~ 125501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac3185	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Imamura Ryo, Kageshima Hiroyuki	4. 巻 63
2. 論文標題 First-principles study on shape of intrinsic hBN island nucleated during CVD initial growth on Cu(111)	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 04SP39 ~ 04SP39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ad2bbe	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計38件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 奥田 留奈、横澤 翔太、日比野 浩樹
2. 発表標題 Cu基板へのAg不純物添加がグラフェンCVD成長に及ぼす影響
3. 学会等名 第71回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 小田 昂到、川合 良知、日比野 浩樹
2. 発表標題 エチレンによるサファイア上でのグラフェン直接CVD成長の低温化
3. 学会等名 第71回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 横澤 翔太、野島 翼、日比野 浩樹
2. 発表標題 多層h-BNのCVD成長における冷却速度の影響
3. 学会等名 第71回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 影島 博之、Wang Shengnan、日比野 浩樹
2. 発表標題 グラフェン/hBNヘテロ構造CVD成長における前駆体の理論検討
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroyuki Hibino, Akio Ohta, Hiroyuki Kageshima, Junji Yuhara
2. 発表標題 Growth mechanism and vibrational properties of germanene fabricated through Ge segregation
3. 学会等名 Annual Meeting of the Japan Society of Vacuum and Surface Science 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小田 昂到、川合 良知、佐々木 拓生、横澤 翔太、日比野 浩樹
2. 発表標題 グラフェンを直接成長させたサファイア基板上でのGaNリモートエピタキシーのリアルタイムX線回折
3. 学会等名 応用物理学会関西支部 2023年度 第2回講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小田 昂到、川合 良知、佐々木 拓生、横澤 翔太、日比野 浩樹
2. 発表標題 グラフェンを直接成長させたサファイア基板上的GaNリモートエピタキシーのリアルタイムX線回折
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日比野 浩樹
2. 発表標題 表面顕微鏡法を用いた二次元物質のナノスケール構造解析
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Kageshima, S. Wang, and H. Hibino
2. 発表標題 Theoretical study on origin of CVD growth direction difference in graphene/hBN heterostructures
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (ALC'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kawai, T. Nakao, and H. Hibino
2. 発表標題 Comparison of graphene grown on sapphire with different orientations by atmospheric-pressure CVD
3. 学会等名 14th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '22 (ALC'22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日比野 浩樹
2. 発表標題 2次元層状物質とヘテロ構造の結晶成長
3. 学会等名 日本学術振興会 光電相互変換第125委員 第260回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 影島 博之、Wang Shengnan、日比野 浩樹
2. 発表標題 hBN/グラフェンヘテロ構造CVD成長におけるエッジ終端機構
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川合 良知、小田 昂到、中尾 拓登、日比野 浩樹
2. 発表標題 c、m面サファイア上でのグラフェンCVD成長メカニズムの比較
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日比野 浩樹、大田 晃生、影島 博之、柚原 淳司
2. 発表標題 Ag(111)薄膜上でのゲルマネン偏析のその場LEEM観察
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 影島 博之、Wang Shengnan、日比野 浩樹
2. 発表標題 Cu表面上グラフェン・hBNヘテロ構造CVD成長におけるエッジ終端起源の理論探求
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中尾 拓登、川合 良知、友本 巧朗、横澤 翔太、日比野 浩樹
2. 発表標題 炭素源をC ₂ H ₄ としたCVD法によるh-BN/グラフェン縦型ヘテロ構造作製
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川合 良知、中尾 拓登、小田 昂到、日比野 浩樹
2. 発表標題 CVD法により各種面方位のサファイア上に成長させたグラフェンの比較
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 影島 博之、Wang Shengnan、日比野 浩樹
2. 発表標題 hBN/グラフェンヘテロ構造CVD成長におけるエッジ終端の起源
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 影島 博之、Wang Shengnan、日比野 浩樹
2. 発表標題 Cu表面上グラフェンリボン・hBNリボンのエッジH終端とファンデルワールス力補正効果
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hibino, S. Wang, and H. Kageshima
2. 発表標題 Controlled growth of heterostructures of graphene and hexagonal boron nitride
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma2022) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Hibino, S. Wang, and H. Kageshima
2. 発表標題 Controlled Growth of Hexagonal Boron Nitride and Heterostructures with Graphene
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2021)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hibino, S. Wang, and H. Kageshima
2. 発表標題 Growth mechanism and structural control of hexagonal boron nitride and its heterostructures with graphene
3. 学会等名 Global Summit and Expo on Graphene and 2D Materials (2DMAT2021)(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Kageshima, S. Wang, and H. Hibino
2 . 発表標題 Theoretical Study of hBN/Graphene Heterostructure CVD Growth
3 . 学会等名 The International Symposium on Novel maTerials and quantum Technologies 2011 (ISNTT2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y. Harada, Y. Kawai, R. Yagi, and H. Hibino
2 . 発表標題 Controlling synthesis of h-BN films on c-plane and r-plane sapphire substrates
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Fuke, T. Sasaki, Y. Kawai, and H. Hibino
2 . 発表標題 In-situ X-ray diffraction analysis of GaN growth on epitaxial graphene with AlN buffer layer
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 H. Kageshima, S. Wang, and H. Hibino
2 . 発表標題 Theoretical Study on Role of Edge Termination in CVD Growth of hBN/Graphene Heterostructure on Cu Surface
3 . 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 日比野浩樹
2. 発表標題 LEEMによる表面現象のリアルタイム観察
3. 学会等名 阪大産研テクノサロン「表面・界面現象の分析技術」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日比野浩樹、Shengnan Wang、影島博之
2. 発表標題 単原子層物質の成長機構と構造制御
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影島博之、Shengnan Wang、日比野浩樹
2. 発表標題 hBN/グラフェンヘテロ構造CVD 成長におけるエッジ終端の役割
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川合良知、福家聖也、原田哲匡、中尾拓登、日比野浩樹
2. 発表標題 c面とr面サファイア上への常圧CVD法を用いたグラフェンの直接成長
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福家聖也、佐々木拓生、川合良知、日比野浩樹
2. 発表標題 c面サファイア上に成長させたグラフェン上におけるGaNリモートエピタキシーのその場XRD解析
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 原田哲匡、八木龍斗、川合良知、佐々木拓生、日比野浩樹
2. 発表標題 CVD法を用いたサファイア基板上h-BNの合成制御
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福家聖也、佐々木拓生、川合良知、日比野浩樹
2. 発表標題 AlNバッファ層を用いたグラフェン/SiC基板上におけるGaN成長
3. 学会等名 応用物理学会関西支部2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影島博之、Shengnan Wang、日比野浩樹
2. 発表標題 グラフェン/Cu およびhBN/Cu 表面C 吸着におけるファンデルワールス力補正効果
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影島博之、Shengnan Wang、日比野浩樹
2. 発表標題 CVD におけるhBN/グラフェン積層ヘテロ構造成長の起源
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中尾拓登、福家聖也、川合良和、日比野浩樹
2. 発表標題 N ₂ 雰囲気下でのグラフェン成長によるh-BNとのヘテロ構造作製
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福家聖也、佐々木拓生、川合良知、日比野浩樹
2. 発表標題 グラフェン/SiC基板上GaN成長におけるAlNバッファ層の影響
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影島博之、Wang Shengnan、日比野浩樹
2. 発表標題 hBN/グラフェンヘテロ構造のCVDにおける成長方向選択性の起源
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	影島 博之 (Kageshima Hiroyuki) (70374072)	島根大学・学術研究院理工学系・教授 (15201)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------