

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01017

研究課題名（和文）原子層モアレ超格子系におけるフォノン物性の解明と制御

研究課題名（英文）Elucidation and control of phonon properties in moire superlattices

研究代表者

毛利 真一郎（MOURI, SHINICHIRO）

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：60516037

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：顕微ラマン分光を用いて、グラフェンモアレ超格子系の熱伝導度の角度依存性を調べた。架橋ツイスト2層グラフェンでは積層角度が大きいと熱伝導度が低下する傾向にあることが示された。また、グラフェン/h-BNモアレ超格子系では、わずかな積層角度の変化で熱伝導度が大きく変化することが観測された。フォノン物性変調を目指し、モアレ超格子系への金属ガリウムナノ粒子の蒸着を行ったところ、積層角度によってフォノン物性の变化に違いが出ることが分かった。さらに、周期分極反転構造を利用した原子層材料へのリモートキャリアドーピングにおいて、h-BN中間層の厚みの影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子層材料は次世代の省エネ電子デバイス応用のキーになる材料であり、そのフォノン物性や熱物性の解明は、省エネ性能向上に資する点で社会意義が大きい。本研究で、積層角度によって熱伝導度が変化する様子を実験的に明らかにすることができた点は、基礎科学的観点から大きな意義があると同時に、今後の省エネデバイスの設計指針を与える成果でもある。また、金属ナノ粒子の蒸着によりフォノン物性を制御できる可能性を見出した点も応用上重要な成果であると考えている。また、分極反転構造を用いたキャリアドーピングの成果は、低損失な原子層半導体デバイス応用への道を開く成果であり、今後そのデバイス応用にも取り組んでいきたい。

研究成果の概要（英文）：This study investigates the angle dependence of thermal conductivity in graphene moire superlattices using micro-Raman spectroscopy. It has been demonstrated that in suspended twisted bilayer graphene, the thermal conductivity tends to decrease with an increase in the stacking angle. Additionally, in graphene/h-BN moire; superlattices, a significant change in thermal conductivity was observed with even a slight variation in the stacking angle.

To modulate phonon properties, the deposition of metallic gallium nano particles onto the moire; superlattice system was conducted. The results indicated that the changes in phonon properties differed according to the stacking angle. Furthermore, in remote carrier doping of atomic layer materials using periodically poled ferroelectric substrates, the impact of the h-BN intermediate layer thickness was elucidated.

研究分野：ナノ材料物性

キーワード：モアレ超格子 フォノン物性 熱伝導 グラフェン 原子層材料

### 1. 研究開始当初の背景

グラフェンや MoS<sub>2</sub>, h-BN などの原子層材料を積層した『ファンデルワールスヘテロ構造』では、ナノスケールのポテンシャル変調構造である『モアレ超格子構造』が現れ、その電子状態を反映したさまざまな特異物性が発現することで大きな注目を集めている。特に、2018年に、Y.Caoらによりマジック角度と呼ばれる特殊角度でツイスト 2 層グラフェンが超電導を示すことが報告されて[1]から、積層角度の自由度を活用した物性探索とその工学的応用を目指した研究が世界中で展開されている。

フォノン物性は、こうした特異物性発現の鍵となる要素の一つであるが、その積層角度依存性には不明な点が多い。特に研究開始直後(2021年ごろ)は、電子物性を中心とした実験的研究の報告が多く、フォノン物性は理論計算の報告が中心であり、その実験的な検証が求められている状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、架橋ツイスト原子層材料を用いて、積層角度に応じたフォノン物性計測を同時に行える実験系を構築し、『原子層の積層とツイストによるナノスケールのポテンシャル変調が新しいフォノン物性発現の場となりうるか?』という課題の解決を目指して研究を行った。特に、積層角度による熱伝導の測定や、その制御を目指した研究を進めてきた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 架橋ツイスト 2 層グラフェンの作製

具体的手法としては、TEM グリッド上に、CVD 法などで作製した原子層材料を PMMA を用いた wet プロセスで 2 枚順次転写することで架橋ツイスト原子層を作製し、基板の影響を排してツイスト角度の変化に依存した光学特性を解明する。TEM グリッドには、直径 2.5 μm もしくは、5 μm の孔(図 1(a))が多数整列しており、図 1(b)のように TEM 電子線回折パターンを観察することで、各孔での積層角度を決定することができる。原子層材料のドメインは~10 μm 四方程度であることから、一つのグリッド上に積層角度の異なる場所を複数用意できる点がこの手法のメリットである。孔の位置を座標化して記録することで、同じ孔に対して積層角度を決めた上で、ラマン分光や発光測定などの光学評価が可能となる。

#### (2) ラマン分光による架橋ツイスト 2 層グラフェンの評価

フォノン物性の観測には、主にラマン分光を用いた。ツイスト架橋 2 層グラフェン系(グラフェンモアレ超格子)を例にとると図 1(c)のようにラマンピークが観測される。グラフェンの場合、積層角度によって G モードと 2D モードの強度比(2D/G 比)が大きく変化していることがわかる。これは、モアレ超格子の形成による電子状態やひずみの変化を反映していると考えられる。また、積層角度の異なるグラフェンの場合 2D ピークの線幅と 2D/G 強度比に強い相関がある。図 1(d)は、様々な孔に対し、2D ピークの線幅に対する 2D/G 強度比をプロットしたものである。さまざまな試料について測定した結果、積層角度が大きい試料は 2D ピークの線幅が小さく 2D/G 強度比が大きいものに対し、積層角度が小さい試料は、2D ピークの線幅が大きく 2D/G 強度比が小さい傾向にあることがわかった。こうしたグラフェンの物性は、基板の上に担持した試料ではすでに観測されていた[2]が、wet プロセスで作製した架橋ツイスト 2 層グラフェン系でも同じような効果がみられることを確認できた点で意義がある。

#### (3) ラマン分光による熱伝導計測

この系に対して、フォノン物性の影響を強く受ける物性である熱伝導の計測を行った。熱伝導の計測にはラマン分光を用いた。レーザー加熱によるラマンピークのシフトから、投入したレーザーパワーに対する温度上昇を見積り、2 次元熱伝導方程式による解析と合わせることで熱伝導

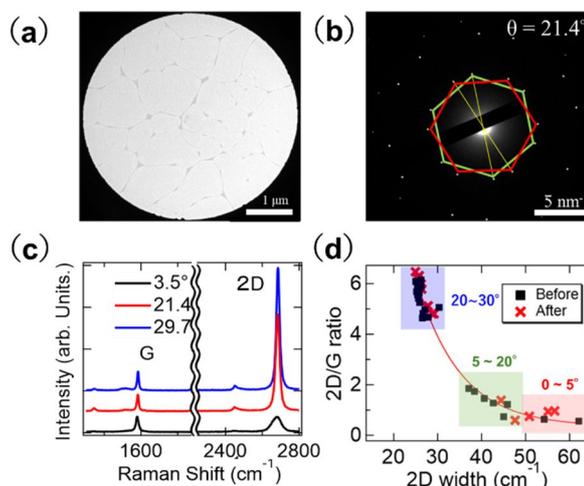


図 1 (a)ツイスト架橋 2 層グラフェンの TEM 像(b)ツイスト架橋 2 層グラフェンの TEM 電子線回折パターン(c)ラマンスペクトルの角度依存性(d)ラマンピークの線幅と強度比の関係

度を求めることができる。積層角度の異なる孔に対し、熱伝導計測を行った。この研究は、ツイスト2層グラフェンに加えて、ツイストしたグラフェン/h-BN についても実験を行った。

#### (4) 金属 Ga 蒸着によるモアレ超格子のフォノン物性制御

さらに、フォノン物性を制御する方法についても検討を進めた。具体的には、MBE 装置などを利用した金属 Ga ナノ粒子の蒸着を試みた。金属を蒸着することで G モードや 2D モードがシフトすることが分かったが、積層角度によってシフトの量や向きが異なることがわかってきた。

#### (5) その他

これらの研究に加え、当該研究費を活用して整備した実験系を用いて、さまざまな原子層材料の物性を解明してきた。また、原子層材料の合成についての研究も進めてきた。以下にこれらの研究成果の概要を記す。

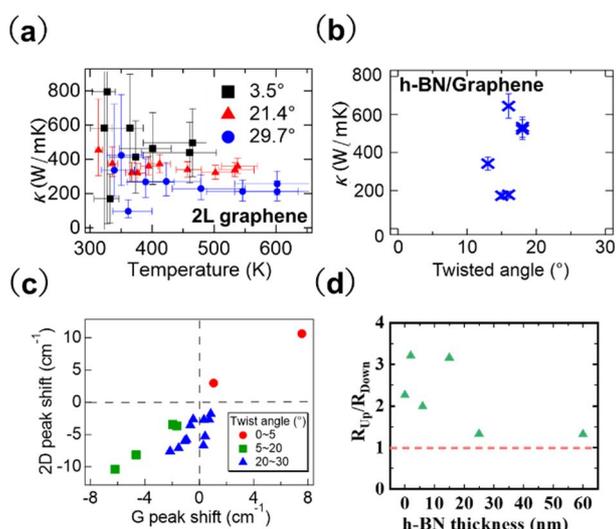


図 2 (a)ツイスト架橋 2 層グラフェンの熱伝導度の温度依存性(b)ツイスト h-BN/グラフェングラフェンの熱伝導度の角度依存性(c) 金属 Ga 蒸着によるツイスト架橋 2 層グラフェンのラマンシフト(d)分極反転向きに応じた MoS<sub>2</sub> の発光強度比の h-BN 厚み依存性

### 4. 研究成果

#### (1) ツイスト架橋 2 層グラフェン (グラフェンモアレ超格子) の熱伝導度測定

図 2(a)に、顕微ラマン分光を用いて測定した積層角度の異なるツイスト架橋 2 層グラフェンの熱伝導度の温度変化を示す。図中の黒■が積層角度 3.5°、赤▲が積層角度 21.4°、青●が積層角度 29.7°の試料に対して測定した熱伝導度になり、積層角度によらず、昇温とともに熱伝導度が低下していくことがわかった。この結果は、報告されている単層グラフェンや 2 層グラフェンの熱伝導度の測定結果と矛盾しない。また、積層角度が小さい試料ほど熱伝導が大きくなることも分かった。これもいくつかの理論研究で計算されている結果と傾向が一致する。積層角度により低波数フォノン物性が大きく影響を受けることが予想されており、その影響を実測できたものと考えられる。

#### (2) グラフェン/h-BN モアレ超格子系の熱伝導計測

図 2(b)に、ラマン分光を用いて測定したグラフェン/h-BN 系の熱伝導の熱伝導度の角度依存性を示す。300K 付近のデータを平均したものと考えるとよい。積層角度のわずかな違いで熱伝導度が大きく変化するという結果が得られている。グラフェン/h-BN 系の電子状態が積層角度のわずかな違いで大きく変化するということが EELS 実験で示されており[3]、それを反映した結果である可能性が考えられる。また、市販の h-BN 試料を用いているが、あまり質が良くなく、AFM 測定したところ多層領域を含んでいる場所があることもわかってきており、論文化に向けては、その影響についても評価していく必要もある。

#### (3) Ga 蒸着によるグラフェンモアレ超格子のフォノン物性の変化

図 2(c)に、架橋ツイスト 2 層グラフェン (グラフェンモアレ超格子) の金属ガリウム蒸着による G モード、2D モードのラマンシフトをプロットしたものを示す。MBE 法における蒸着時間を制御することで 10 ~ 100 nm 前後の直径金属ガリウムが 10<sup>8</sup> cm<sup>-2</sup> 程度の密度で蒸着されることを見出した。図からわかるように、積層角度によってラマンシフトのふるまいに違いがみられることがわかる。積層角度が低い領域では、もともと試料に引っ張りひずみが入っており、それが蒸着により緩和され、G モード、2D モードとも高波数方向にシフトする。一方で、積層角度の中程度の試料では、単純に蒸着による曲率の変化が引っ張りひずみをもたらし、G, 2D ピークともラマンシフト が低波数側にシフトする。さらに、30°に近い積層角度では、ひずみの変化に加え電子状態の変化があるため、2D モードのみが低波数方向にシフトし、G モードの変化は小さいことがわかる。このように積層角度によってフォノン物性の変化に違いが生じることから、金属蒸着はモアレ超格子系の物性変調に有効な方法だといえる。

#### (4) その他の成果

その他の成果としては、強誘電体周期分極反転構造上での MoS<sub>2</sub> へのキャリアドーピング効果を調べる研究を進めた。この手法は、強誘電体分極によって、MoS<sub>2</sub> へのキャリアドーピングを行うことを狙っている。我々は、特に、h-BN を中間層として導入した場合に、どこまでキャリアドーピングが持続できるかを初めて明らかにした。図 2(d)は、キャリアドーピングの指標として励起子と荷電励起子の比を用い、この比が基板分極の向きでどう変わるかを示したものを  $R_{Up}/R_{Down}$  として h-BN 厚さに足してプロットしたものである。この値が 1 から離れるとドーピン

グ効果が大きいことを示している。図からわかるように、h-BN が 20 nm 以下の領域でドーピング効果が顕著に持続することがわかる。また 60 nm の領域でもドーピング効果がわずかではあるが持続している。この効果は、h-BN を介したキャリアトンネリングでは説明できないものであり分極によって誘起される電荷がドーピングをもたらしていることを示しており、ナノスケールでのリモートドーピングに対する新しい知見を与える成果といえる。一方で、h-BN の厚さによってドーピング効果が減るのは遮蔽効果によるものと考えている。

この研究の他にも、CVD 法を用いた窒化物半導体上へのグラフェン、MoS<sub>2</sub> の大面積結晶成長へ向けた研究や、窒化物半導体や酸化物半導体のリモートエピタキシーの研究、THz エリブソメトリによるグラフェンの電気伝導特性評価などの研究に、本予算で整備した実験系や消耗品を使用した。

(参考文献)

- [1] Y. Cao *et al.*, *Nature* **556**, 43 (2018).
- [2] P. Solís-Fernández *et al.*, *ACS Appl. Nano Mater.* **5**, 135 (2022).
- [3] B. Liu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 016201 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatsuya Nakamoto, Keigo Matsuyama, Masahiro Sakai, Chieh-Ting Chen, Yu-lun Cheuch, Shinichiro Mouri, Takeshi Yoshimura, Norifumi Fujimura, Daisuke Kiriya	4. 巻 18
2. 論文標題 Selective Isolation of Mono- to Quadlayered 2D Materials via Sonication-Assisted Micromechanical Exfoliation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 2455-2463
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsnano.3c11099	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 該当する

1. 著者名 毛利真一郎、荒木努	4. 巻 93
2. 論文標題 原子層モアレ超格子系におけるフォノン物性制御	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 174-177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11470/oubutsu.93.3_174	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48件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kaipeng Rong, Ryosuke Noro, Hayato Nishigaki, Mingda Ding, Yao Yao, Taiki Inoue, Ryuji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Kazunari Matsuda, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Modulation of carrier density of 1L-MoS2 using periodically polarization-inversed structure
3. 学会等名 The 23th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 植野 康大、藪田 翔平、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 二酸化炭素をエッチングガスとして用いた窒化ガリウム上へのグラフェンCVD成長
3. 学会等名 第15回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 流石 新生,河瀬 流星,荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 GaN上形成ビットを活用したMoS2のCVD成長
3. 学会等名 第15回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Kuddus, K. Yokoyama, K. Ueno, H. Shirai, S. Mouri
2. 発表標題 Few-Layer MoS2 and WS0.3Se1.7 on AlN and AlTiO/P+-Si for Energy Device Applications
3. 学会等名 Graphene 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Kuddus, K. Yokoyama, K. Ueno, S. Mouri, H. Shirai
2. 発表標題 Mist CVD Atomic Few-Layer 2D Transition Metal-Dichalcogenides: MoS2,WS2 and WS2Se2-x for Electronic and Photovoltaic Devices
3. 学会等名 2D Transition metal dichalcogenides (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Kuddus, K. Yokoyama, K. Ueno, S. Mouri, H. Shirai
2. 発表標題 Few-Layer WS2Se2-x on High- AlxTi1-xOy Dielectric Using Consistent Mist CVD and Applied in MOSFETs Devices
3. 学会等名 第65回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム(FNTG)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaipeng Rong, Ryosuke Noro, Hayato Nishigaki, Mingda Ding, Yao Yao, Taiki Inoue, Ryuji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Kazunari Matsuda, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Remote charge density modulation of monolayer MoS2 using periodically polarization-inversed ferroelectric substrate
3. 学会等名 第65回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム(FNTG)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 利根川 舜、河瀬 裕太、毛利 真一郎
2. 発表標題 CVD法による架橋2層h-BN上へのグラフェンナノ構造成長
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 Kaipeng Rong, Ryosuke Noro, Hayato Nishigaki, Mingda Ding, Yao Yao, Taiki Inoue, Ryuji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Kazunari Matsuda, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Remote charge modulation effect of monolayer MoS2 using periodically polarization-inverted structure and hBN spacer layer
3. 学会等名 JSPA-QSA jyooint symposia 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 A. Kuddus, K. Yokoyama, K. Ueno, S. Mouri, H. Shirai,
2. 発表標題 Decomposition and Size Distribution Monitoring of AlTiO and MoS2 Precursor Mist Particles using a Fast-Scanning Mobility Particle Sizer
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 Y. Kodama, J. Doi, S. Mouri
2 . 発表標題 Thermal conductivity of graphene/h-BN moire superlattice
3 . 学会等名 The 42nd Electronic Materials Symposium
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Kaipeng Rong, Ryosuke Noro, Hayato Nishigaki, Mingda Ding, Yao Yao, Taiki Inoue, Ryuji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Kazunari Matsuda, Shinichiro Mouri
2 . 発表標題 Spatial and remote charge density modulation methodfor MoS2 using periodically polarization inversed MgO: LiNbO3
3 . 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Abdul Kuddus, Kojun Yokoyama, Keiji Ueno, Shinichiro Mouri, Hajime Shirai
2 . 発表標題 Direct Synthesis of MoS2 and WS2Se2-x on High- AlxTi1-xOy Using Mist CVD Toward Transfer-free MOSFETs Devices
3 . 学会等名 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Abdul Kuddus, Kojun Yokoyama, Keiji Ueno, Shinichiro Mouri, Hajime Shirai
2 . 発表標題 Mist CVD Modulated High- a-Al1-xTixOy Films for p-WS0.3Se0.7-channel MOSFETs
3 . 学会等名 MRS Fall Meeting & Exhibit ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 河瀬 流星, 流石 新生, Kuddus Abdul, 三宅 秀人, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 CVD成長による窒化物半導体上へのMoS <sub>2</sub> 直接成長における基板アニーリング効果
3. 学会等名 第52回結晶成長国内会議
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Riku Nambu, Shota Hattori, Tsutomu Araki, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Van der Waals epitaxy of Transferable InGaN Thin Film by RF-MBE Method
3. 学会等名 第66回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム(FNTG)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinichiro Mouri, Yuta Kawase, Riku Nanbu, Kosei Beniya, Yusuke Kodama, Tsutomu Araki
2. 発表標題 Impact of Twist Angle for Raman Shift of Suspended Twisted Bilayer Graphene by Metal Deposition
3. 学会等名 第66回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム(FNTG)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Koshiro Kawakami, Syunsuke Yamamura, Abdul Kuddus, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Growth of MoS <sub>2</sub> on Al <sub>1-x</sub> Ti <sub>x</sub> O <sub>y</sub> by Chemical Vapor Deposition
3. 学会等名 第66回フラーレンナノチューブグラフェン学会総合シンポジウム(FNTG)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yeasin Arafat Pritom, Abdul A Kuddus, Jaker Hossain, Md Rasidul Islam, Shinichiro Mouri, Mainul Hossain
2. 発表標題 Performance Analysis of MoS <sub>2</sub> /WSe <sub>2</sub> Complementary Field-Effect Transistors
3. 学会等名 2024年春季第71回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 神田 将熙、金子 健太郎、毛利 真一郎
2. 発表標題 ミストCVD法による -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> のリモートヘテロエピタキシー
3. 学会等名 2024年春季第71回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Abdul A Kuddus, Kojun Yokoyama, Mainul Hossain, Jaker Hossain, Rasidul Islam, keiji Ueno, Shinichiro Mouri, Hajime Shirai
2. 発表標題 Nanolaminated Mist CVD High- AlO <sub>x</sub> /Ti <sub>x</sub> Al <sub>1-x</sub> O <sub>y</sub> /TiO <sub>2</sub> films on P+-Si for TMDCs-MOSFETs
3. 学会等名 2024年春季第71回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 南部 利矩、服部 翔太、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 MBE法を用いたファンデルワールスエピタキシーによる転写可能なInGa <sub>N</sub> 成長
3. 学会等名 2024年春季第71回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 河瀬 流星、流石 新生、Rong Kaipeng、Kuddus Abdul、三宅 秀人、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 Ar/O <sub>2</sub> キャリアガスを用いた窒化物半導体上へのMoS <sub>2</sub> のCVD成長
3. 学会等名 2023年春季第70回応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Abdul A Kuddus、Kojun Yokoyama、Shinichiro Mouri、Hajime Shirai
2. 発表標題 Synthesis of Few-layer 2D Transition Metal-Dichalcogenides for Electronics and Optoelectronics: A
3. 学会等名 2023年春季第70回応用物理学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shun TONEGAWA, Yuta KAWASE, Tomohiro ASADA, Shinichiro MOURI
2. 発表標題 Growth of Nanographene on the Suspended Bilayer h-BN Membrane
3. 学会等名 The 64st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kaipeng Rong, Ryosuke Noro, Hayato Nishigaki, Mingda Ding, Yao Yao, Taiki Inoue, Ryuji Katayama, Yoshihiro Kobayashi, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Doping effect of MoS <sub>2</sub> using periodically polarization-inversed structure
3. 学会等名 The 64st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河瀬 流星, 流石 新生, Rong Kaipeng, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 CVD法によるGaN上への原子層半導体MoS <sub>2</sub> 成長 における基板極性の影響
3. 学会等名 第14回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Rong, T. Araki, and S. Mouri
2. 発表標題 Surface Potential Measurement of MoS <sub>2</sub> on Ga-face and N-face GaN substrates by KFM
3. 学会等名 41th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅田 智浩, 植野 康大, 薮田 翔平, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 二酸化炭素を炭素源とする窒化ガリウム上へのグラフェン成長へ向けた検討
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 河瀬 裕太, 多田村 充, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 金属ナノ粒子の蒸着による架橋2層グラフェンラマンスペクトルの変調
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 宋 凱蓬、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 KFMによる+c面及び-c面GaN基板上MoS2の表面電位測定
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 中山 大輝、今村 涼、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 自立GaN基板上にRF-MBE法で再成長したGaNの発光特性
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 Kaipeng Rong, Tsutomu Araki, Shinichiro Mouri
2. 発表標題 Surface Potential Measurement of MoS2 on +c-plane and -c-plane GaN substrates by KFM
3. 学会等名 The 63st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 RONG KAIPEG、小路 悠馬、荒木 努、毛利 真一郎
2. 発表標題 KPFMによるGaN基板上MoS2の表面電位測定
3. 学会等名 応用物理学会関西支部講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Mouri, K. Matsushima, Y. Kawase, T. Araki
2. 発表標題 Effect of Supported Substrate on van der Waals Epitaxy of Nitride Semiconductors on Graphene by MBE
3. 学会等名 NT21: International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浅田 智浩, 藪田 翔平, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 アルコールCVD法を用いたnon-Bernal積層グラフェンの作製
3. 学会等名 日本材料学会 2021年度第2回半導体エレクトロニクス部門委員会第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田 邑一, 黒田 悠弥, 栢本 聖也, 後藤 直樹, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 白石 裕児, 福田 承生, 荒木 努
2. 発表標題 透過電子顕微鏡を用いたScAlMgO4基板上RF-MBE 成長GaN の極微構造評価
3. 学会等名 日本材料学会 2021年度第2回半導体エレクトロニクス部門委員会第1回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Kawase, K. Matsushima, J. Doi, T. Araki, S. Mouri
2. 発表標題 Metal Deposition on a Suspended Graphene Surface
3. 学会等名 The 61st Fullerenes-Nanotubes-Graphene General Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木 拓輝, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 岩本 敏志, 上田 悠貴, 成塚 重弥, 中嶋 誠, 荒木 努
2. 発表標題 THz-TDSエリブソメトリを用いたグラフェンの電気的特性評価
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土井 惇太郎, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 ラマン分光を用いた架橋ツイスト2層グラフェンの熱伝導測定
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 中山 大輝, 毛利真一郎, 福田安莉, 高林佑介, 正直花奈子, 三宅秀人, 荒木努
2. 発表標題 AlNテンプレート基板上にRF-MBE法で成長したInNの発光特性
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 河瀬裕太, 松島健太, 土井惇太郎, 荒木努, 毛利真一郎
2. 発表標題 架橋グラフェン上における窒化インジウムのファンデルワールスエピタキシー
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Asada, S. Yabuta, T. Araki and S. Mouri
2. 発表標題 Growth and Raman Characterization of Non-Bernal Stacking Few-Layer Graphene by Alcohol CVD Method
3. 学会等名 40th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 D.Nakayama, R. Imamura, T. Araki, S. Mouri
2. 発表標題 Photoluminescence Properties of MBE-Regrown GaN on Free-Standing GaN Substrate
3. 学会等名 40th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Kaipeng, Y. Komichi, T. Araki and S. Mouri
2. 発表標題 Surface Potential of MoS2 Depending on the Polarity of GaN Substrate Measured by Kelvin Probe Force Microscope
3. 学会等名 The 12th Recent Progress in Graphene and Two-dimensional Materials Research Conference (RPGR 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松島健太、土井惇太郎、荒木努、毛利真一郎
2. 発表標題 グラフェン上での InN MBE 成長における窒素プラズマ照射時間の検討
3. 学会等名 第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 数田翔平, 河瀬流星, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 アルコールCVD法を用いたGaN上への酸化グラフェン成長
3. 学会等名 2022年春季第69回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木 拓輝, 渡邊 迅登, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 岩本 敏志, 福西 康寛, 成塚 重弥, 荒木 努
2. 発表標題 THz-TDSEを用いたr面サファイア基板上グラフェンの電気的特性評価
3. 学会等名 2022年春季第69回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 毛利真一郎 (分担執筆: 第7章、第8節)	4. 発行年 2022年
2. 出版社 株式会社技術情報協会	5. 総ページ数 405
3. 書名 ラマン分光 スペクトルデータ解析事例集 ~高分子、電池、電子デバイス、炭素材料、ガラス、医薬品、食品、細胞・組織~, 第7章, 第8節	

〔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	荒木 努  (Araki Tsutomu)  (20312126)	立命館大学・理工学部・教授   (34315)	

6. 研究組織（つづき）

	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	藤井 高志  (Fujii Takashi)  (60571685)	立命館大学・総合科学技術研究機構・教授    (34315)	

	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
連 携 研 究 者	クドス アブドゥル  (Kuddus Abdul)  (10976137)	立命館大学・総合科学技術研究機構・専門研究員    (34315)	

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