

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01012

研究課題名（和文）モアレ超構造における協力的量子光学現象の開拓

研究課題名（英文）Pioneering Cooperative Quantum Optical Phenomena in Moire Superlattices

研究代表者

篠北 啓介 (Keisuke, Shinokita)

京都大学・エネルギー理工学研究所・助教

研究者番号：60806446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、二次元半導体のモアレ超構造における励起子の基礎光学特性の解明と、励起子間相互作用を利用した新たな光学現象の探索を行った。高品質なモアレ超構造の作製技術と多様な分光測定を駆使することで、モアレ励起子の光学応答、微細構造、ダイナミクス、量子コヒーレンスなど、これまで未知であった基礎光学特性を明らかにした。特に、モアレ励起子の精密な自在配列と、それによる励起子間相互作用の増大を実現し、新たな量子光学現象の観測に成功した。これらの成果は、モアレ超構造における励起子物理の理解を大きく深化させ、二次元半導体における新たな光科学の開拓に寄与するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、モアレ超構造における励起子物理の理解を大きく深化させ、二次元半導体における新たな光科学の開拓に貢献するものである。モアレ励起子の長いコヒーレンス時間や励起子間相互作用を利用した量子多体現象は、量子情報処理や新たな光デバイスへの応用が期待される。また、モアレ超構造における励起子の電荷制御は、高効率な光電変換デバイスの実現に繋がる可能性がある。本研究で得られた知見は、基礎物理の発展だけでなく、将来の量子技術や光エレクトロニクスの発展に大きく寄与すると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study investigated the fundamental optical properties of excitons in moire superlattices and explored novel optical phenomena utilizing inter-exciton interactions. We unveiled the basic optical characteristics of moire excitons. Precise and flexible arrangement of moire excitons was achieved, leading to the enhancement of inter-exciton interactions and the observation of new quantum optical phenomena. The findings have deepened the understanding of exciton physics in moire superlattices and contributed to the development of new optical science. The long coherence times of moire excitons and the quantum many-body phenomena arising from inter-exciton interactions show promise for applications in quantum information processing and novel optical devices. These achievements advance fundamental physics and have significant implications for the future development of quantum technologies and optoelectronics, paving the way for exploring new frontiers in optical science and technology.

研究分野：光科学

キーワード：光物性 半導体物性

1. 研究開始当初の背景

わずか原子数層からなるグラフェン類縁物質である二次元物質は、“*beyond graphene*”と呼ばれ、新しい物質科学・物性物理学の研究対象となっている。これら二次元物質の中でも特に、二次元単層遷移金属ダイカルコゲナイド(MX_2 ; $\text{M}=\text{Mo}, \text{W}$, $\text{X}=\text{S}, \text{Se}$)は、直接遷移型バンドギャップを有する半導体であることから、その光学的性質や光機能性が注目を集め盛んに研究がなされている。その二次元半導体では、極限的な量子閉じ込めと誘電遮蔽により、光で生成された電子と正孔がクーロン束縛した励起子が室温でも安定に存在する。さらに、クラマース縮重の破れに起因するバレースピンの量子自由度を有するなど、従来の半導体ナノ構造とは質的に異なる特異な光学特性を示す。

二次元半導体のもう一つの大きな特徴は、ファンデルワールス力で積層することで、人工ヘテロ構造を作製可能なことである(図1左上)。それにより、単独の物質では実現困難な新しい光機能が発現する。さらに、角度をつけ積層すると、AA, BA, AB積層の原子配列が規則的に並んだモアレ縞(超構造)が現れる(図1右上)。この特異な原子配列は、励起子がそれぞれの原子位置で感じるエネルギーの違いを生じさせ、量子閉じ込めポテンシャル(モアレポテンシャル)として機能するため、このモアレ原子配列を用いることで、励起子を0次元的に局在化させ規則的に配列させることができる(図1下)。この原子配列は積層角度で自在制御でき、角度によってモアレポテンシャルの深さや間隔、つまり励起子間距離を調整し、相互作用を著しく増大しかつ可変であるという、他の系にはない量子システムと見做せる。すなわち、モアレ超構造を利用し励起子間相互作用を自在に制御し、同位相の多数の励起子で巨視的な分極を生じさせることで、巨大な量子協力現象が発現する可能性を秘めていることから、新しい光科学の舞台として注目されている。

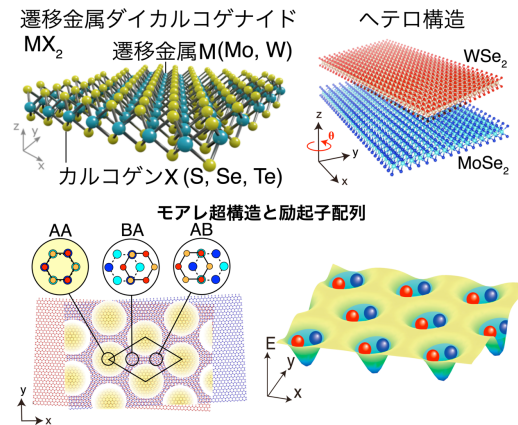


図 1. 遷移金属ダイカルコゲナイドの結晶構造(左上)と角度をつけ原子層物質を積層したモアレ超構造(右上)、モアレポテンシャルによる励起子配列(下)

しかし、研究開始当初は、モアレ超構造による励起子の閉じ込めが2019年に実験的に確認されたばかりで(K. L. Seyler, *et. al.*, *Nature* **567**, 66 (2019)他)、国内外で研究がスタートしたばかりであった。そのため、モアレ励起子の基礎的な光学応答や、ダイナミクス、モアレ励起子間相互作用などについてはほとんど分かっていなかった。

我々は、これまで研究活動スタート支援や若手研究の支援を受けて、遷移金属ダイカルコゲナイドをはじめとする二次元物質の光科学の研究に進めてきた。特に、二次元物質の持つバレースピンの量子自由度の緩和現象の解明や制御を通して、新たなバレースピン光科学の学理を構築し研究成果を上げてきた。さらに、異なる二次元物質を積み重ねた人工ヘテロ構造に関する研究へと発展させる過程で、こうしたモアレ超構造の重要性にいち早く注目し、世界にさきがけて研究を開始した。本研究では、このモアレ超構造における励起子の特異な性質を解明し、新しい光科学の開拓を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、モアレ超構造を利用して励起子を精密に自在配列し、その相互作用を利用することで、新しい光学現象を探求し、それらを支配する普遍的な物理を明らかにすることである。モアレ励起子を制御するためには、これまで未知であったモアレ励起子の光学応答や、光学選択則、ダイナミクス、量子コヒーレンスといった基礎光学特

性の解明が不可欠である。そのため本研究では、まずこれらの基礎光学特性の解明を目指した。

さらに、モアレ超構造の最大の特徴である励起子間相互作用を利用することで、新たな光学現象の実現を目指した。励起子間相互作用を増大させることで、励起子が集団的に振る舞い、巨視的な量子協力現象が発現すると期待される。このような現象は、基礎物理学的に興味深いだけでなく、新たな光機能の実現にも繋がる可能性がある。

3. 研究の方法

本研究では、高品質なモアレ超構造の作製と、その光学特性の精密測定が鍵となる。まず、ヘテロ構造の作製方法の高度化に取り組んだ。図 2 に示すように、ポリマーと温度制御を用いて基板上的二次元物質を持ち上げ、別の二次元物質上に積層するドライ転写法を採用した。この方法により、不要な圧力や界面の空気混入を低減し、高い均一性を有する人工ヘテロ構造の作製を実現した。

さらに、試料の不均一性を低減するため、リアクティブイオンエッチング(RIE)や収束イオンビーム(FIB)による微細加工を行った。これにより、単一モアレ励起子からの鋭い発光ピークを観測することが可能となった(図 3)。また、角度分解第二高調波発生(SHG)装置を構築し、試料の結晶構造を評価し、ヘテロ構造の積層角度を決定した(図 4)。

モアレ励起子の電荷状態を制御するために、電界効果トランジスタ(FET)デバイス構造を作製し、電子や正孔のドーピングを可能にした。これにより、モアレ励起子の電荷状態に依存した光学応答の測定が可能となった。

モアレ励起子の光学特性を明らかにするために、様々な分光測定を行った。従来の発光測定に加えて、励起発光分光法を用いることで、モアレ励起子の吸収スペクトルの情報を取得した。また、準共鳴状態の励起発光分光法により、モアレ励起子の 0 次元的な状態密度を計測した。円偏光分解発光測定を行うことで、バレー分極したモアレ励起子や、スピンの依存した一重項状態、三重項状態といった微細構造の情報を得た。

さらに、発光の時間分解測定により、発光の寿命やダイナミクスを調べた。また、発光の干渉測定を行うことで、量子コヒーレンスの評価を行った。

これらの高度な試料作製技術と多様な分光測定を組み合わせることで、モアレ励起子の基礎光学特性の包括的な理解を目指した。また、励起子間相互作用が増大する条件を探索し、新たな光学現象の観測を試みた。

4. 研究成果

(1) モアレ超構造の基礎光学特性の解明

まず、モアレ励起子の基礎光学応答の解明を目指して研究を進めた。単層二セレン化モリブデン MoSe_2 と単層 WSe_2 を 10° 角度をずらして積層した原子層ヘテロ構造のモアレ励起子の光学特性を測定した。発光スペクトルに複数の鋭い発光ピーク(線幅:4meV)が観測されており、 MoSe_2 と WSe_2 側に分離した電子と正孔からなる層間励

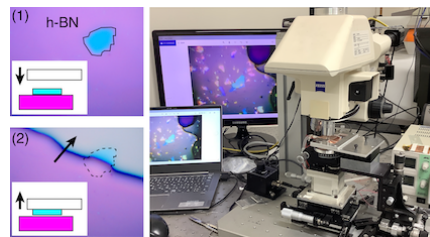


図 2. 人工ヘテロ構造の作製手順(左)と積層試料作製装置(右)

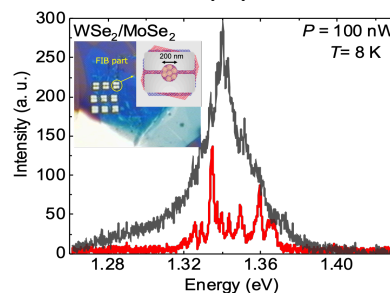


図 3. FIB 加工を用いた不均一広がり
の抑制による狭線幅の発光ピーク

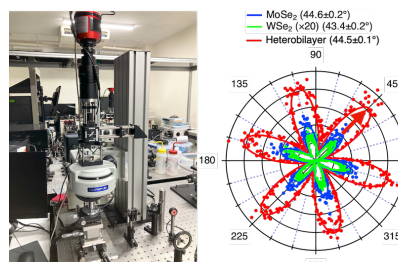


図 4. 角度分解 SHG 装置(左)とヘテロ
構造の SHG 信号(右)

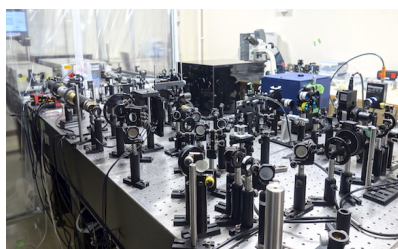


図 5. 構築した実験システム

起子がモアレポテンシャルにより捕捉され局在化し、モアレ励起子が生成していることを表している (図 10 左)。励起発光分光法を用いて、電子と正孔が空間的に分離することで、光との相互作用の強さを表す振動子強度が 4 桁程度小さいことを明らかにした。さらに準共鳴条件では、離散的な共鳴ピークが観測され、モアレポテンシャルに閉じ込められたモアレ励起子の選択励起やゼロ次元的な状態密度、閉じ込めポテンシャルの観測に初めて成功した。この結果は、モアレ超構造における励起子の基礎光学特性を明らかにし、研究目的の一つである励起子の精密な自在配列に大きく近づいたといえる。

(2)モアレ励起子の微細構造と円偏光選択則の解明

次に、モアレ励起子のスピン状態を明らかにするために発光の円偏光分解測定を行なった。電子と正孔のスピン状態に応じて、モアレ励起子には一重項状態や三重項状態が存在しており、それぞれの光学選択則から円偏光に対して異なる応答を示すことを実験的に明らかにし、異なるモアレ励起子の微細構造が明らかになった。

さらに、励起光強度依存性から、低励起強度ではモアレ励起子からの発光に大きな円偏光度が観測されたが、高励起強度では円偏光度が大きく減少することがわかった。これは、ゼロ次元的なモアレポテンシャルに起因する状態占有効果(パウリブロッケード)により、励起子の谷間緩和が促進されたためと考えられる。時間分解測定から、谷間緩和時間は数百ナノ秒と非常に長いことも明らかになった。

一方、共鳴励起分光からは、モアレ励起子の一重項状態と三重項状態間のエネルギー差(約 25meV)に対応する鋭い発光ピークが観測された。これは、フォノンを介した一重項-三重項間の谷内緩和過程の存在を示唆している。

これらの結果は、モアレ励起子のスピン状態と光学選択則、さらにはその緩和ダイナミクスを明らかにしたものである。

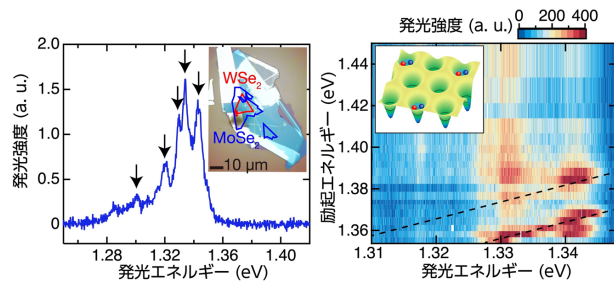


図 6. 作製した $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ ヘテロ構造とモアレ励起子に由来する複数の鋭い発光ピーク(左)と、ゼロ次元的な状態密度に由来する励起発光スペクトル (右)。

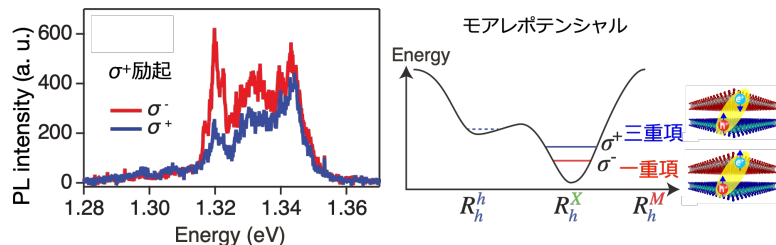


図 7. 円偏光分解発光スペクトル(左)と、モアレ励起子の微細構造 (右)。

(3)モアレ励起子のダイナミクス

さらに、モアレ励起子の緩和ダイナミクスを詳細に調べた。温度依存性の測定から、最低の明るい一重項励起子状態の上に、運動量の暗い励起子状態が約 8meV のエネルギー差で存在することが明らかになった。時間分解分光と速度方程式による解析から、モアレ励起子のダイナミクスは低温(<20K)では明るい励起子の放射再結合過程に支配され、高温(>30K)では明るい励起子から暗い励起子へのフォノン支援遷移過程により決まることがわかった。

さらに、高励起強度下では高エネルギー側に新たなピークが出現し、これは寿命が 700 ナノ秒と長い三重項励起子状態からの発光に帰属された。

このように、モアレポテンシャル内の明るい励起子と暗い励起子の量子状態を実験的に明らかにすることができた。これらの結果は、モアレ励起子のダイナミクスを詳細

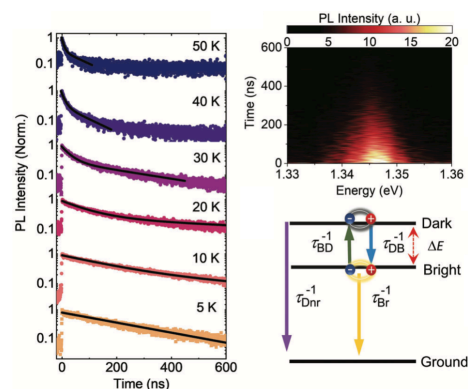


図 8. 発光緩和ダイナミクスの温度依存性とモアレ励起子の微細構造

に解明したものであり、モアレ超構造における励起子の物理的理解を大きく深化させたといえる。

(4)モアレ励起子の荷電状態の光学応答

モアレ超構造において、集束 Ga⁺イオンビームを用いた FIB 加工技術を適用することで、モアレポテンシャルに起因する不均一な発光ピークを大幅に減らすことに成功した。さらに電解効果トランジスタ構造を施し、中性なモアレ励起子、および、モアレ励起子に電子あるいは正孔が結合した荷電状態であるモアレトリオンの固有の光学特性を明らかにすることができた。

モアレトリオンの発光スペクトルは温度上昇に伴って急激に減少したが、発光寿命はほとんど変化しなかった。この振る舞いは、モアレポテンシャル内の明るいトリオン状態の上に、4meV の分裂エネルギーを持つ運動量に関連する暗いトリオン状態が存在することを示唆している。時間分解分光と速度方程式を用いた詳細な解析から、モアレトリオンのダイナミクスは低温では明るい状態の初期分布に支配され、高温では暗い状態に高く分布することが明らかになった。

さらに、この特徴的な温度依存性を示す初期トリオン分布は、700 ナノ秒という非常に長い温度に依存しない谷緩和過程を伴うモアレトリオンの負の円偏光発光をもたらすことを明らかにした。これらの結果は、モアレ超構造における荷電励起子の光学応答を初めて明らかにしたものであり、モアレ励起子の電荷制御の可能性を示すものである。

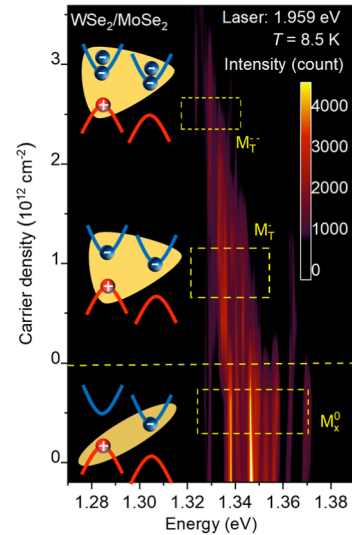


図9. 発光スペクトルのドーピング依存性と、モアレ励起子の帯電状態

(5)励起子からの量子コヒーレンスとモアレ励起子の相互作用

RIE 加工を施したモアレ超構造に対して、発光の干渉測定を行い量子コヒーレンスを測定した。単一モアレ励起子のコヒーレンス時間は 4K の低温で 12 ピコ秒以上と非常に長く、温度上昇や励起強度増大に伴い、モアレ励起子-フォノンおよびモアレ励起子間相互作用によりコヒーレンスが低下することがわかった。これは単層半導体中の励起子と比べて格段に長いコヒーレンス時間である。

さらに、量子干渉実験から、異なるモアレポテンシャル間に捕捉されたモアレ励起子間の結合が明らかになった。干渉波形にはビート信号が観測され、そのビート周期からモアレ励起子間のエネルギー分裂が 18meV と求められた。このように、モアレ励起子が相互作用することで、新しい量子光学現象を実現することができた。

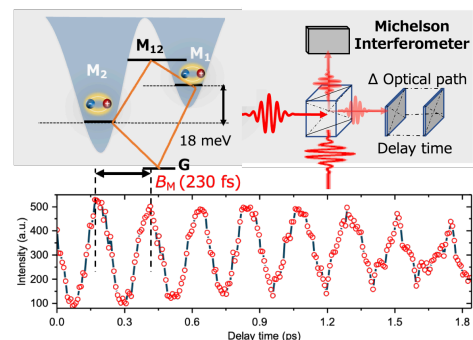


図 10. 2つのモアレ励起子の相互作用によるコヒーレントな量子ビート信号

本研究課題では、モアレ超構造における励起子の基礎光学特性の解明と、励起子間相互作用を利用した新たな量子光学現象の探索を目指した。高品質なモアレ超構造の作製技術と多様な分光測定を駆使することで、モアレ励起子の光学応答、微細構造、ダイナミクス、量子コヒーレンスなど、これまで未知であった基礎光学特性を明らかにすることができた。特に、モアレ励起子の精密な自在配列と、それによる励起子間相互作用の増大を実現し、新たな量子光学現象の観測に成功した。これらの成果は、当初の研究目的を達成するものであり、モアレ超構造における励起子物理の理解を大きく深化させたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shinokita Keisuke, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Matsuda Kazunari	4. 巻 16
2. 論文標題 Valley Relaxation of the Moire Excitons in a WSe ₂ /MoSe ₂ Heterobilayer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 16862 ~ 16868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.2c06813	査読の有無 無
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 Pu Jiang, Ou Hao, Yamada Tomoyuki, Wada Naoki, Naito Hibiki, Ogura Hiroto, Endo Takahiko, Liu Zheng, Irisawa Toshifumi, Yanagi Kazuhiro, Nakanishi Yusuke, Gao Yanlin, Maruyama Mina, Okada Susumu, Shinokita Keisuke, Matsuda Kazunari, Miyata Yasumitsu, Takenobu Taishi	4. 巻 34
2. 論文標題 Continuous Color Tunable Light Emitting Devices Based on Compositionally Graded Monolayer Transition Metal Dichalcogenide Alloys	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2203250 ~ 2203250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202203250	査読の有無 無
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 Shinokita Keisuke, Miyauchi Yuhei, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Matsuda Kazunari	4. 巻 21
2. 論文標題 Resonant Coupling of a Moire Exciton to a Phonon in a WSe ₂ /MoSe ₂ Heterobilayer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 5938 ~ 5944
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.1c00733	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 Zhang Yan, Kim Heejun, Zhang Wenjin, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Gao Yanlin, Maruyama Mina, Okada Susumu, Shinokita Keisuke, Matsuda Kazunari	4. 巻 -
2. 論文標題 Magnon Coupled Intralayer Moire Trion in Monolayer Semiconductor-Antiferromagnet Heterostructures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2200301 ~ 2200301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202200301	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 Kim Heejun, Aino Kumpei, Shinokita Keisuke, Zhang Wenjin, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Matsuda Kazunari	4. 巻 11
2. 論文標題 Dynamics of Moire Exciton in a Twisted MoSe2/WSe2 Heterobilayer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 2300146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.202300146	査読の有無 無
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 Chang Yih Ren, Nanae Ryo, Kitamura Satsuki, Nishimura Tomonori, Wang Haonan, Xiang Yubei, Shinokita Keisuke, Matsuda Kazunari, Taniguchi Takashi, Watanabe Kenji, Nagashio Kosuke	4. 巻 35
2. 論文標題 Shift Current Photovoltaics Based on a Non Centrosymmetric Phase in In Plane Ferroelectric SnS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2301172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adma.202301172	査読の有無 無
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 Kim Heejun, Dong Duanfei, Okamura Yuki, Shinokita Keisuke, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Matsuda Kazunari	4. 巻 17
2. 論文標題 Dynamics of Moire Trion and Its Valley Polarization in a Microfabricated WSe2/MoSe2 Heterobilayer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ACS Nano	6. 最初と最後の頁 13715 ~ 13723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsnano.3c02952	査読の有無 無
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 Zhang Yijin, Kamiya Keisuke, Yamamoto Takato, Sakano Masato, Yang Xiaohan, Masubuchi Satoru, Okazaki Shota, Shinokita Keisuke, Chen Tongmin, Aso Kohei, Yamada-Takamura Yukiko, Oshima Yoshifumi, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Matsuda Kazunari, Sasagawa Takao, Ishizaka Kyoko, Machida Tomoki	4. 巻 23
2. 論文標題 Symmetry Engineering in Twisted Bilayer WTe2	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nano Letters	6. 最初と最後の頁 9280 ~ 9286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.nanolett.3c02327	査読の有無 無
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33件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 篠北啓介, 渡邊賢司, 谷口尚, 松田一成
2. 発表標題 WSe ₂ /MoSe ₂ ヘテロ二層におけるモアレ励起子の円偏光分解発光励起スペクトル
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 Daiki Murase, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Fabrication of artificially designed two-dimensional material and van der Waals heterostructure by fully dry transfer method
3. 学会等名 64回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Keisuke Kamiya, Yijin Zhang, Takato Yamamoto, Masato Sakano, Keisuke Shinokita, Shota Okazaki, Satoru Masubuchi, Rai Moriya, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Takao Sasagawa, Kazunari Matsuda, Kyoko Ishizaka, Tomoki Machida
2. 発表標題 Symmetry control of twisted bilayer WTe ₂ using van der Waals assembly
3. 学会等名 64回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Koshi Oi, Jiang Pu, Hao Ou, Rei Usami, Takahiko Endo, Yasumitsu Miyata, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Taishi Takenobu
2. 発表標題 Fabrication of highly strained monolayer light-emitting devices
3. 学会等名 64回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名	Jiang Pu, Hao Ou, Tomoyuki Yamada, Naoki Wada, Hibiki Naito, Hiroto Ogura, Takahiko Endo, Zheng Liu, Toshifumi Irisawa, Kazuhiro Yanagi, Yusuke Nakanishi, Yanlin Gao, Mina Maruyama, Susumu Okada, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Yasumitsu Miyata, Taishi Takenobu
2. 発表標題	Continuous color-tunable light-emitting devices based on compositionally graded monolayer transition metal dichalcogenide alloys
3. 学会等名	64回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Haonan Wang, Heejun Kim, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題	Observation of a single moire exciton in nano-fabricated twisted MoSe ₂ /WSe ₂ heterobilayers
3. 学会等名	64回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	Kumpei Aino, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda
2. 発表標題	Bayesian optimization for the mechanical exfoliation of monolayer WSe ₂
3. 学会等名	64回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年	2023年

1. 発表者名	篠北啓介, 宮内雄平, 松田一成
2. 発表標題	WSe ₂ /MoSe ₂ ヘテロ二層の発光スペクトルの強度依存性
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 Keisuke Shinokita, Yuhei Miyauchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Moire exciton-phonon resonance in a WSe2/MoSe2 heterobilayer
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 JSAP-OSA Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Shinokita, Yuhei Miyauchi, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Novel excitonic features of moire exciton in twisted van der Waals heterostructures
3. 学会等名 第61回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Heejun Kim, Keisuke Shinokita, Wenjin Zhang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Dynamics of Moire Exciton in MoSe2-WSe2 Heterstructure
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 JSAP-OSA Joint Symposia (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Keisuke Shinokita, Kunpei Aino, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Negative circularly polarization of moire exciton luminescence in WSe2/MoSe2 heterobilayers
3. 学会等名 62回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Duanfei Dong, Wenjin Zhang, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Electrically tunable moiré trions in twisted WSe ₂ /MoSe ₂ heterobilayers
3. 学会等名 62回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuichi Asada, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Spontaneous photocurrent of WSe ₂ /CrPS ₄ hetero-interface with in-plane polarization and highly air-stability.
3. 学会等名 62回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Okamura, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 A small number of moiré exciton photoluminescence in nanofabricated MoSe ₂ /WSe ₂ heterobilayers
3. 学会等名 62回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠北啓介, 相野薫平, 渡邊賢司, 谷口尚, 松田一成
2. 発表標題 WSe ₂ /MoSe ₂ ヘテロ二層におけるモアレ励起子の円偏光発光分光
3. 学会等名 62回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岡村 勇輝、篠北 啓介、渡邊 賢司、谷口 尚、松田 一成
2. 発表標題 微細加工した MoSe ₂ /WSe ₂ ヘテロ二層の少数モアレ励起子による光学特性
3. 学会等名 2022年第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 Sho Shomura, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Valley polarized hybridized excitons in MoSe ₂ /WS ₂ heterobilayers
3. 学会等名 第65回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Heejun Kim, Duanfei Dong, Yuki Okamura, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Dynamic of moire trion in microfabricated WSe ₂ /MoSe ₂ heterobilayer
3. 学会等名 第65回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hao Ou, Koshi Oi, Rei Usami, Takahiko Endo, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Yasumitsu Miyata, Jiang Pu, Taishi Takenobu
2. 発表標題 Strain Modulation to Moire Superlattices in Two-Dimensional Material van der Waals Heterostructures
3. 学会等名 第65回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 村瀬 大騎、篠北 啓介、若藤 祐育、小野寺 桃子、町田 友樹、谷口 尚、渡邊 賢司、松田 一成
2. 発表標題 エッチングフリー金剥離法による二次元半導体作製手法の確立
3. 学会等名 2023年第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 平林 弘暉、篠北 啓介、渡邊 賢司、谷口 尚、松田 一成
2. 発表標題 面内分極を持つMoS ₂ /SnSヘテロ界面による自発的光起電力
3. 学会等名 2023年第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 篠北啓介, 渡邊賢司A, 谷口尚A, 松田一成
2. 発表標題 ツイストWSe ₂ /WSe ₂ ホモ二層における混成励起子の光学特性
3. 学会等名 日本物理学会2023年秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 篠北啓介
2. 発表標題 ツイスト二次元ヘテロ構造におけるモアレ励起子の光科学
3. 学会等名 2023年第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 篠北啓介
2. 発表標題 Moire excitonic states in a twisted WSe ₂ /MoSe ₂ heterobilayers
3. 学会等名 JSAP-OPTICA joint symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hao Ou, Koshi Oi, Rei Usami, Takahiko Endo, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Yasumitsu Miyata, Jiang Pu, Taishi Takenobu
2. 発表標題 Strain Modulation to Moire Superlattices in Transition Metal Dichalcogenide van der Waals Heterostructures
3. 学会等名 2023年第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 Wataru Idehara, Fan Yang, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Efficient robotic fabrication of large area monolayer semiconductors
3. 学会等名 第66回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yanlin Wang, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Strain-influenced optical properties of moire excitonic states in MoSe ₂ /WSe ₂ van der Waals heterostructures
3. 学会等名 第66回 フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yubei Xiang, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Dynamic of defect-localized excitons in monolayer WSe2 under in-plane magnetic field
3. 学会等名 第66回 フラールン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 呉 柊斗, 篠北 啓介, 杉本 泰, 藤井 稔, 松田 一成
2. 発表標題 Mie 共鳴を示すシリコンナノ粒子と結合した単層 WSe2 の光学特性
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 朝田 秀一, 篠北 啓介, 松田 一成
2. 発表標題 MoS2/CrPS4 人工ヘテロ構造デバイスにおける磁気光起電力特性
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 出原 渉, 篠北 啓介, 松田 一成, Yang Fan
2. 発表標題 ロボット技術支援による高効率・大面積な単層半導体作製システムの構築
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 Wang Haonan, Heejun Kim, Duanfei Dong, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazunari Matsuda
2. 発表標題 Observation of quantum coherence of a single moire exciton in nano-fabricated twisted MoSe2/WSe2 heterobilayers
3. 学会等名 2023年第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

原子層ヘテロ構造WSe2/MoSe2におけるモアレ励起子のバレー緩和の解明 http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/new-iae/NewsRelease/JP/2022/09/28-150000.html
--

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

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
---------	---------