

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301
研究種目：若手研究
研究期間：2019～2020
課題番号：19K14633
研究課題名（和文）二次元遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレースピンの緩和モデルの構築と制御

研究課題名（英文）Clarification and control of valley-spin polarization relaxation in two-dimensional transition metal dichalcogenides

研究代表者
篠北 啓介（Shinokita, Keisuke）
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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、運動量空間のバレー自由度とスピンの自由度が結合した「バレースピンの」による新規な機能が発現する単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおいて、バレースピンの緩和メカニズムを解明し、その緩和の制御を目的とした。単層WSe₂の荷電励起子のバレースピンの緩和がナノ秒の長い緩和時間をもつことが明らかにし、フォノンを介した緩和プロセスが支配的であることを明らかにした。さらに、複数の二次元遷移金属ダイカルコゲナイドを積層した人工ヘテロ構造の特異な基礎光学特性を明らかにし、バレーの自由度の研究を発展していく上で高いポテンシャルを有することを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子の「バレー」の情報をデジタル情報処理の0と1に対応させて利用する概念は「オプトバレートロニクス」と呼ばれ、近年注目されている。その実現にはバレーの情報の長時間保持が必要であるが、実際にはきわめて短時間で情報が失われてしまい、その緩和メカニズムの理解や制御が十分でないため、基礎研究や応用展開を妨げている。本研究で得られた成果は、バレー緩和現象のメカニズムの解明という基礎科学的な意義に加えて、応用展開へのデバイス構造のデザインに新しい指針を与える。本研究で得られたバレー物理の知見をさらに発展させることで、将来の高速・省エネルギーな光電子デバイスの実現につながると期待される。

研究成果の概要（英文）：This project focused on the clarification and control of valley polarization in two-dimensional transition metal dichalcogenides, in which valley degrees of freedom in momentum space is coupled with spin. We showed charged exciton in monolayer WSe₂ has very long relaxation time of nanoseconds, which is governed by phonon scattering process. In addition, we clarified fundamental optical properties of van der Waals heterostructures composed of two transition metal dichalcogenides, which is excellent platform to develop the valleytronics application.

研究分野：光物性

キーワード：光物性 ナノ材料 半導体物性

1. 研究開始当初の背景

○なぜバレーの自由度か？

わずか原子数層からなるグラフェン類縁物質である原子層物質は”*beyond graphene*”と呼ばれ、新しい物性物理・物質科学の研究対象となっている。ハニカム構造を有する原子層物質は波数空間でバレー(谷)の自由度(K と-K)をもち、その中でも特に原子数層の単層遷移金属ダイカルコゲナイド(MX_2 ; M=Mo, W, X=S, Se)(図1左)では、空間反転対称性の破れと強いスピン軌道相互作用によるクラマース縮重の破れに起因し、波数空間でのK と-K バレーにスピンのアップとダウンの電子がそれぞれ分極する(図1右)。その結果、「バレー」と「スピン」が結合し「バレースピン」という新たな量子自由度が自発的に出現する。このバレースピン自由度によって、円偏光した光を用いて一方のバレーだけに電子を選択的に生成・検出さらに制御することが原理的に可能である。光励起された電子や正孔はK バレーにのみ「バレー分極」した状態にある。このバレー分極状態をデジタル信号の0,1に対応させて情報保存・処理を行うことで、今後ますます高速化・大容量化が求められる電子デバイスに対応するための、「バレートロンクス」(バレー+エレクトロニクス)と呼ばれる新しい研究の展開が期待されている。

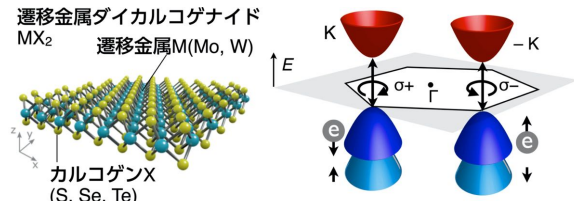


図1. 二次元遷移金属ダイカルコゲナイドの実空間での結晶構造(左)と波数空間でのバレースピン自由度

○どうやってバレー分極した状態が失われるか？

バレートロンクスの実用化にはまだいくつもの課題があるが、その中でも特にバレーの揃ったバレー分極状態をどうやって長時間にわたって保持するかが一番の課題になっている。単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおいてバレー分極状態が見つかった当初は、円偏光した光でつくったバレー分極状態は安定であると考えられていたが、その後の研究において、電子と正孔がクーロン束縛された中性励起子のバレー分極状態がピコ秒で失われてしまうことがわかってきた。

我々はこれまで、研究活動スタート支援を活用して、バレー緩和ダイナミクスの解明や、バレー分極緩和の抑制を目指して研究を進めてきた。まず、中性励起子のバレー分極状態が失われるメカニズムの解明と制御を目指した。代表的な単層遷移金属ダイカルコゲナイドである単層二セレン化タングステン WSe_2 に電界効果トランジスタ(FET)構造を作製し、試料のキャリア濃度を変化させることで、バレー分極度を制御することに成功した(図2)。この結果は、先行研究で理論的に提案された長距離電子正孔交換相互作用を考慮することで理解することができ、中性励起子のバレー分極状態の緩和現象において長距離電子正孔交換相互作用が重要な役割を果たしていることを実証したとともに、交換相互作用の変調によりバレーの緩和現象の制御に成功した。

さらに、中性励起子に加えて、原子層物質で安定に存在している、もう一つのキャリアが束縛された荷電励起子のバレー分極状態の緩和ダイナミクスの解明を目指した。この荷電励起子は、中性励起子と異なるバレー分極率の値をもっていることが発光スペクトルから報告されていたが、バレー緩和ダイナミクスに関する統一的理解が得られていなかった。我々は、時間分解発光測定と過渡反射測定を組み合わせた実験手法を確立し、単層 WSe_2 のバレー緩和ダイナミクスを測定し、荷電励起子のバレー間散乱時間(1 ナノ秒以上)が、中性励起子のバレー間散乱時間(20 ピコ秒)に比べて桁違いに長いことを明らかにした。この結果から、中性励起子のバレー間散乱過程で支配的であった電子正孔交換相互作用が、もう一つのキャリアによって荷電励起子では抑制されているという重要な知見を得ることがで

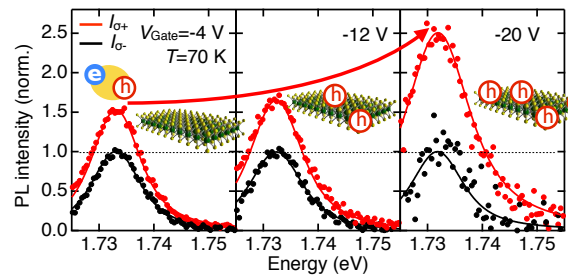


図2. 異なるゲート電圧における単層 WSe_2 の円偏光分解発光スペクトル(右)。ゲート電圧でキャリアを注入することで、右回りと左回りの円偏光の発光強度の差が増大し、バレー分極率が増加するふるまいが観測された。

きた。荷電励起子のバレー緩和ダイナミクスを明らかにすることができたが、どのようなメカニズムでバレー緩和現象が引き起こされるのかについては、この時点では不明であった。これらの研究を通して、バレースピンの物理に関する知見や制御技術を得ることができた。

2. 研究の目的

本研究では、研究活動スタート支援で得られた研究成果を発展させ、荷電励起子の緩和メカニズムの解明を目指した。中性励起子でのバレー緩和において支配的である電子正孔交換相互作用が抑制されている荷電励起子では、どのような緩和プロセスによりバレー分極状態が失われるのかを明らかにすることを目的とした。

さらに、単層遷移金属ダイカルコゲナイドの持つバレーの自由度を活用していく上では、その緩和プロセスを抑制することが重要であり、電界効果トランジスタ構造による光学特性の制御に加えて、大きなブレークスルーが必要である。そこで、バレーの自由度を発展していく上で潜在的に高いポテンシャルを有する原子層ヘテロ構造に着目し、その基礎光学特性の解明を行い、バレーの自由度をさらに発展していくための基盤の構築を目的とした。

3. 研究の方法

まず、励起子状態を制御した際のバレー分極状態の測定を行うため、試料に制御のためのデバイス構造を施した。デバイス構造として、電子線微細加工技術による電界効果トランジスタ構造を採用した(図3左)。これにより、ゲート電圧の印加によりキャリア数の制御が可能になり、励起子の中性状態と荷電状態の自在な切り換えが発光スペクトルの変化から確認できた(図3右)。

デバイス構造を施した試料のバレー分極状態を測定するため、超高速分光測定を行った。具体的には、独自に構築した1MHzの高繰り返し周波数の波長可変のフェムト秒レーザーシステムをもとにした超高速分光システムを用いた(図4左)。これによりバレーでのキャリアダイナミクスをサブピコ秒の分解能で高感度に測定が可能であり、検出の波長を選択し、発光で検出している光学遷移に加えて、深い準位からの光学遷移も検出することで、発光測定では検出できない光学禁制なダーク準位の情報の抽出が可能になった。バレー内およびバレー間のすべての散乱プロセスを調べることができ、バレー分極の緩和メカニズムの統一的理解を目指した(図4右)。

さらに、複数の二次元物質を積層した人工ヘテロ構造を作製した。図5に示すように、ポリマーと温度制御を用いて基板上の二次元物質を持ち上げ、別の二次元物質上に落とし順次積層する方法を採用した。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行った。さらに、積層する際の角度の制御も行い、光学特性を積層角度で制御することも目指した。

4. 研究成果

(1) 荷電励起子のバレー緩和メカニズムの解明

まず、研究活動スタート支援で明らかにしてきた荷電励起子のバレー緩和ダイナミクスに関する成果を発展させ、その緩和メカニズムの解明を目指して研究を進めた。

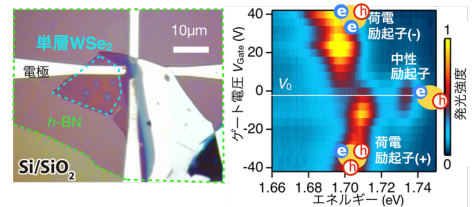


図3. 単層 WSe₂ に施した電界効果トランジスタ構造(左)とゲート電圧を印加した時の発光スペクトル(右)。

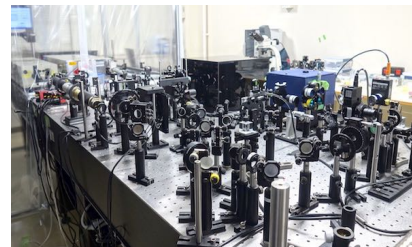


図4. 高繰り返し・波長可変フェムト秒レーザーを用いて構築した実験システム

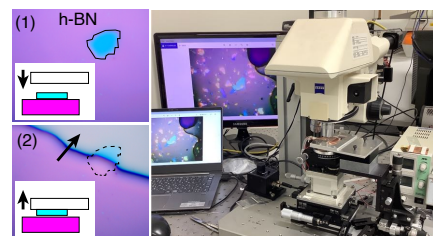


図5. 人工ヘテロ構造の作製手順(左)と積層試料作製装置(右)

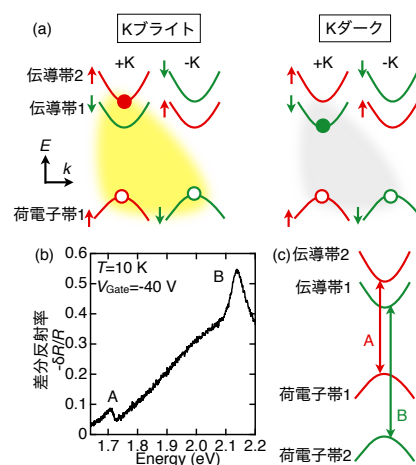


図6. (a) 荷電励起子のブライツとダークな状態。(b) 単層 WSe₂ の差分反射スペクトル。(c) 差分反射スペクトルにおける A と B 遷移の模式図。

その際、ゲート電圧で正孔を注入することで得られる正に帯電した荷電励起子に注目した。正に帯電した荷電励起子は光学許容なブライتنا状態と光学禁制なダークな状態がそれぞれ一つずつしかないために、ブライتنا状態からダークな状態へのバレー内緩和だけを考えればよいシンプルな系である(図6(a))。これまで調べられてきたデバイス構造のない試料において観測される負に帯電した荷電励起子ではブライتنا状態だけでも複数あるため、バレー内散乱が複雑になり、そのダイナミクスの理解やバレー緩和メカニズムの理論的理解を妨げてきた。

まず、ブライتنا状態からダーク状態へのバレー内緩和を調べるために、発光での光学遷移に対応するA遷移に加えて、価電子帯の深い準位からの光学遷移であるB遷移の応答も調べた(図6(b, c))。A遷移とB遷移の緩和ダイナミクスを測定すると、ブライتنا状態をプローブしたA遷移は温度が高いとゆっくり緩和するのに対して、ダーク状態をプローブしたB遷移は温度が低くなるにつれて早く緩和する振る舞いが観測された(図7)。これは、温度が高くなるにつれてフォノン散乱などでダーク準位の荷電励起子がブライتنا状態へと遷移することを示唆している。そこで、フォノンのエネルギーや、ブライتنا準位とダーク準位のエネルギー差を考慮して、レート方程式を計算すると、実験結果をよく再現することができた。この結果から、荷電励起子のバレー内緩和においては、フォノン散乱が重要な役割をはたしていることが明らかにした(論文1, 2)。さらに、荷電励起子のバレー間の散乱時間の温度依存性の測定も行った。低温では1ナノ秒の安定な状態であるのに対して、100Kを超える温度からバレー緩和時間が10ピコ秒以下になることがわかった(図8)。この結果も、フォノン散乱を仮定してバレー緩和時間を計算することで再現することができ、荷電励起子のバレー間緩和においては、長距離電子正孔交換相互作用ではなく、フォノン散乱が重要な役割をしていることを明らかにした。以上の結果より、荷電励起子については、長距離電子正孔交換相互作用が抑制された結果、バレー内、およびバレー間の緩和においてフォノン散乱が大きく寄与していることを明らかにした。

(2) モアレ超構造の基礎光学特性の解明

上記の結果から、中性励起子や荷電励起子のバレー分極した状態は、長距離電子正孔交換相互作用やフォノン散乱によりピコ秒で失われてしまうことが明らかになった。励起子の持つバレーの自由度を活用したバレートロンクス応用へ発展させるには、こうした緩和プロセスを制御する必要がある、大きなブレークスルーが不可欠である。そこで、バレーの自由度を発展していく上で潜在的に高いポテンシャルを有する原子層ヘテロ構造における光科学の研究に取り組んだ(図9)。

原子層ヘテロ構造は複数の二次元遷移金属ダイカルコゲナイドをファンデルワールス力で積層したものであり、単独の物質では実現困難な新しい光機能が発現する興味深いナノ構造である。さらに、角度をつけて積層すると、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。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ポテンシャルの違いを生じさせ、励起子をゼロ次元的に閉じ込め(モアレ励起子)、

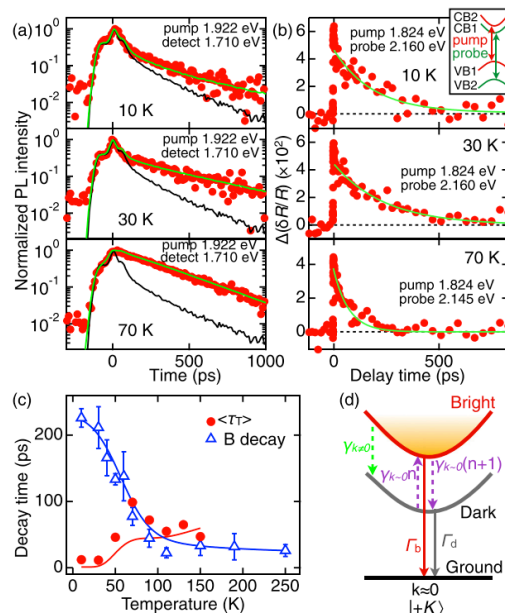


図7. (a) A遷移と(b)B遷移のダイナミクス。(c)緩和の時定数の温度依存性。(d)フォノンを介したバレー内緩和の模式図。

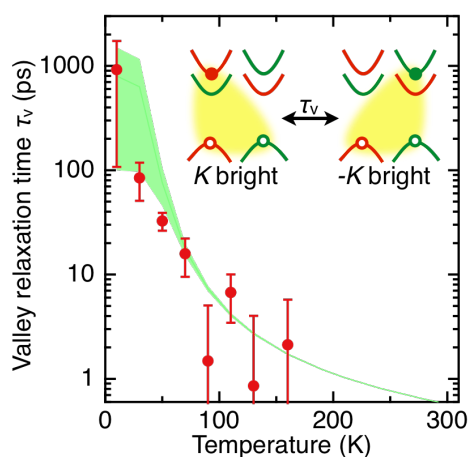


図8. 荷電励起子のバレー間緩和時間の実験結果(赤丸)とフォノン散乱を考慮した計算結果(緑線)。

究極的なゼロ次元量子ドット（量子二準位系）として機能することが期待されている。

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）。さらに準共鳴励起の精密分光手法を用いて、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（図10右、投稿中, arXiv:2012.08720）。

この成果により、モアレ励起子がゼロ次元量子ドットとして機能することを明らかにし、単層遷移金属ダイカルコゲナイドの持つバレーの自由度の研究を発展していく上で高いポテンシャルを有することを実験的に明らかにすることができた。このナノ構造は、ゼロ次元励起子間の相互作用の制御性など潜在的に高いポテンシャルを有しており、さらに、コヒーレンス消失を生じる格子振動(フォノン)も閉じ込めで離散化することで緩和が抑制され、長いコヒーレンス時間が期待されることから、二次元単層遷移金属ダイカルコゲナイドの持つ特徴的なバレースピ量子自由度を活用する上で魅力的な量子システムである。

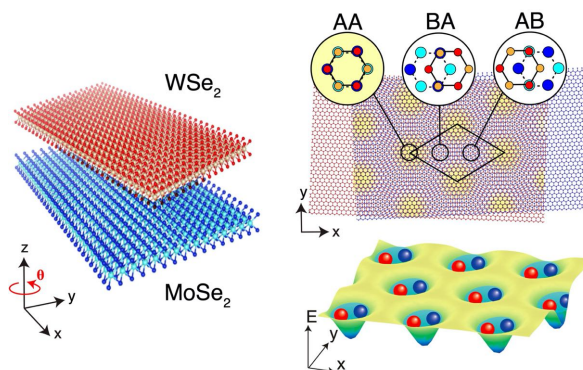


図 9. 複数の原子層物質を積層した原子層ヘテロ構造（左）と積層角度により出現するモアレ超構造と励起子のゼロ次元閉じ込め（右）。

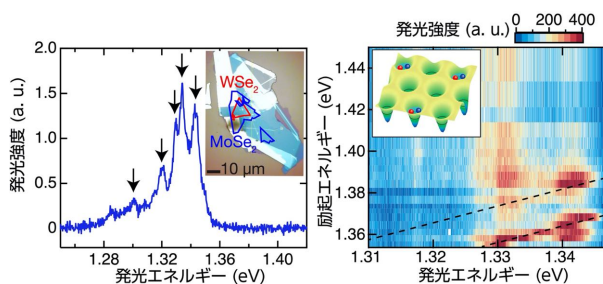


図 10. 作製した $\text{MoSe}_2/\text{WSe}_2$ ヘテロ構造とモアレ励起子に由来する複数の鋭い発光ピーク(左)と、ゼロ次元的な状態密度に由来する励起発光スペクトル (右)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7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 Zhang Yan, Shinokita Keisuke, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Goto Masato, Kan Daisuke, Shimakawa Yuichi, Moritomo Yutaka, Nishihara Taishi, Miyauchi Yuhei, Matsuda Kazunari	4. 巻 32
2. 論文標題 Controllable Magnetic Proximity Effect and Charge Transfer in 2D Semiconductor and Double Layered Perovskite Manganese Oxide van der Waals Heterostructure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Materials	6. 最初と最後の頁 2003501 ~ 2003501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adma.202003501	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, Shinokita Keisuke, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Miyauchi Yuhei, Matsuda Kazunari	4. 巻 31
2. 論文標題 Magnetic Field Induced Inter Valley Trion Dynamics in Monolayer 2D Semiconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2006064 ~ 2006064
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/adfm.202006064	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 Wenjin, Tanaka Kenya, Hasegawa Yusuke, Shinokita Keisuke, Matsuda Kazunari, Miyauchi Yuhei	4. 巻 13
2. 論文標題 Bright and highly valley polarized trions in chemically doped monolayer MoS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035002 ~ 035002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab7485	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 Wenjin, Tanaka Kenya, Hasegawa Yusuke, Shinokita Keisuke, Matsuda Kazunari, Miyauchi Yuhei	4. 巻 13
2. 論文標題 Bright and highly valley polarized trions in chemically doped monolayer MoS2	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 035002 ~ 035002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab7485	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 Shinokita Keisuke, Wang Xiaofan, Miyauchi Yuhei, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Konabe Satoru, Matsuda Kazunari	4. 巻 100
2. 論文標題 Phonon-mediated intervalley relaxation of positive trions in monolayer WSe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 161304 ~ 161304
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.100.161304	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 Wang Xiaofan, Shinokita Keisuke, Miyauchi Yuhei, Cuong Nguyen Thanh, Okada Susumu, Matsuda Kazunari	4. 巻 29
2. 論文標題 Experimental Evidence of Anisotropic and Stable Charged Excitons (Trions) in Atomically Thin 2D ReS ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 1905961 ~ 1905961
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.201905961	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 Shinokita Keisuke, Wang Xiaofan, Miyauchi Yuhei, Watanabe Kenji, Taniguchi Takashi, Konabe Satoru, Matsuda Kazunari	4. 巻 99
2. 論文標題 Ultrafast dynamics of bright and dark positive trions for valley polarization in monolayer WSe2	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 245307 ~ 245307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.99.245307	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17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 篠北啓介, 王曉凡, 宮内雄平, 松田一成
2. 発表標題 単層WSe2におけるトリオンバレー緩和ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠北啓介, 王暁凡, 宮内雄平, 松田一成
2. 発表標題 単層WSe ₂ におけるバレー内緩和ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2020秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yan Zhang, Keisuke Shinokita, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Yutaka Moritomo, Yuhei Miyauchi, Kazunari Matsuda ¹
2. 発表標題 Optical Properties in Van der Waals Heterostructure of Monolayer MoSe ₂ and Perovskite Manganese Oxide
3. 学会等名 第81回応用物理学界秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Wenjin Zhang, Kenya Tanaka, Yusuke Hasegawa, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Yuhei Miyauchi ¹
2. 発表標題 Chemically brightened and highly valley polarized trions in monolayer MoS ₂
3. 学会等名 第81回応用物理学界秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田 悠貴, 吉村 武, 芦田 淳, 藤村 紀文, 篠北 啓介, 松田 一成, 桐谷 乃輔
2. 発表標題 強酸性極薄膜の自発的形成による高発光単層 MoS ₂ の実 現
3. 学会等名 第81回応用物理学界秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 幹旺, 篠北 啓介, 宮内 雄平, 松田 一成
2. 発表標題 異方性のある光学的・電子的特性をもつ二次元シリコンフォスファイド
3. 学会等名 第59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 2020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 ヘテロ二層におけるモアレ励起子の励起発光分光
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠北 啓介, 王 曉凡, 宮内 雄平, 渡邊 賢司, 谷口 尚, 松田 一成
2. 発表標題 単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるトリオンパレー分極緩和ダイナミクス
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 矢野 翔太郎, 篠北 啓介, 宮内 雄平, 松田 一成
2. 発表標題 球状微小共振器付き単層 WSe ₂ の光学特性
3. 学会等名 球状微小共振器付き単層 WSe ₂ の光学特性
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	山田 悠貴, 青木 佑樹, 福井 暁人, 吉村 武, 芦田 淳, 藤村 紀文, 篠北 啓介, 松田 一成, 桐谷 乃 輔
2. 発表標題	山田 悠貴, 青木 佑樹, 福井 暁人, 吉村 武, 芦田 淳, 藤村 紀文, 篠北 啓介, 松田 一成, 桐谷 乃 輔
3. 学会等名	球状微小共振器付き単層 WSe ₂ の光学特性
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	毛利真一郎, 小路悠馬, 篠北啓介, 松田一成, 荒木 努
2. 発表標題	極性に依存した窒化ガリウム基板上の単層遷移金属ダイカルコゲナイドの光学特性
3. 学会等名	第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	篠北啓介, 王曉凡, 宮内雄平, 松田一成
2. 発表標題	単層WSe ₂ におけるトリオンバレー緩和ダイナミクス
3. 学会等名	日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年	2020年

1. 発表者名	S. Mouri, Y. Komichi, K. Shinokita, K. Masuda, and T. Araki
2. 発表標題	Photoluminescence Properties of MoS ₂ /GaN Hetero Structure
3. 学会等名	ICCGE-19 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1 . 発表者名 Shinichiro Mouri, Yuuma Komichi, Keisuke Shinokita, Kazunari Matsuda, Tsutomu Araki
2 . 発表標題 Photoluminescence of Transition Metal Dichalcogenides depending on the Surface Polarity of GaN Support Substrate
3 . 学会等名 RPGR 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Yan Zhang, Keisuke Shinokita, Yuhei Miyauchi, Yutaka Moritomo, and Kazunari Matsuda
2 . 発表標題 Spectroscopic studies of monolayer MoSe2 on strongly correlated manganese oxide
3 . 学会等名 RPGR2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masafumi Shimasaki, Naoki Wada, Yasumitsu Miyata, Keisuke Shinokita, Taishi Nishihara, Kazunari Matsuda, Yuhei Miyauchi1
2 . 発表標題 Exciton Dynamics in a Monolayer WS2/WSe2 Lateral Heterostructure with Wide Alloy Region
3 . 学会等名 RPGR2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Shimasaki , N. Wada , Y. Miyata , K. Shinokita , T. Nishihara , K. Matsuda , Y. Miyauchi
2 . 発表標題 Directional Exciton Transport in a Monolayer WS2-WSe2 Lateral Heterostructure with a Wide Alloy Region
3 . 学会等名 2019 MRS Fall Meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----

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