

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02910

研究課題名（和文）光初期化したデルタバレー偏極の空間輸送制御

研究課題名（英文）Transport control of delta-valley polarized electrons under photo-injection

研究代表者

中 暢子（Naka, Nobuko）

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：10292830

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、間接型半導体における長寿命のキャリアに着目し、デルタバレー（結晶の 001 軸に等価な 6 方向の伝導帯の谷）にキャリアを選択的に光注入する手法を開拓した。励起波長の適切な選択によりシリコン結晶で高いバレー偏極度が保持されること、ダイヤモンドの定常光励起下で生成される低密度のバレー偏極キャリアが 2 次元電子系の移動度を上回る高移動度を示すこと、バレー偏極キャリアのミリメートルスケールに迫る空間輸送が実際に起きていることを示唆する画期的な成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

直接型半導体は高い光再結合確率を持つ一方でキャリアの寿命は数ピコ秒と非常に短いため、情報保持に適する長いコヒーレンス時間を持つようなバレー偏極が強く求められている。本研究では、光遷移過程の複雑さのためにこれまで敬遠されてきた間接型半導体に注目し、バレー偏極キャリアの選択的光注入法を新たに開拓した。本研究を通してデルタバレー偏極電子の注入法およびダイナミクスに関する理解を大きく進歩させることができたことは、次世代半導体材料のデバイス応用においても重要な意義を持つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project is to demonstrate selective photo-injection of electrons at conduction band valleys of indirect bandgap semiconductors. We have shown that a high valley polarization degree is maintained in silicon under photo-injection at an appropriate wavelength and that a high mobility value exceeding those in two-dimensional electron gases is achieved in diamond under continuous-wave photo-injection. A model for carrier lifetimes limited by capture at dislocations was established, which indicated the spatial transport of valley polarized electrons over sub-millimeter distance.

研究分野：光物性物理学

キーワード：バレー偏極 光配向 間接型半導体

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の遷移金属ダイカルコゲナイドの単一原子層化による直接型ギャップ形成を契機として、円偏光励起によるバレー偏極の研究が目覚ましい発展をみせている。また、光注入によるスピン配向の研究はヒ化ガリウムなどの直接遷移型半導体で古くから行われている。これらの物質は直接型ギャップに由来する高い光再結合確率を持つが、一方でキャリアの寿命は数ピコ秒と非常に短いため、情報保持に適する長いコヒーレンス時間を持つようなバレー偏極が強く求められている。申請者は半世紀の課題であったダイヤモンドの励起子微細構造を2014年に解明したことから、同物質においてバレーを選択的に光励起する具体的な方策を群論計算によって検討することが可能となった。そこで、未活用の励起光の状態を制御することでバレーを選択的に励起する光初期化の手法を開拓すれば、バレー間散乱等を抑えた長寿命のキャリアや励起子の長距離空間輸送を実現できる、という新しいアイデアに至った。最近のダイヤモンドの結晶成長技術の進歩によって不純物トラップの影響を除去できるようになったことから、サブマイクロ秒のキャリア寿命が実現されるようになり、本アイデアを実行に移す機が熟した。

### 2. 研究の目的

本研究では、長いバレーコヒーレンス時間が期待されるIV族半導体のデルタバレー(結晶の001方向の伝導帯の谷)に着目する。フォノンサイドバンド吸収を利用してデルタバレーを選択的に光励起する手法、すなわちデルタバレー偏極の光初期化の技術を確認することを目的とする。これにより、デルタバレーに偏極した電子および励起子の輸送特性を明らかにし、サブマイクロ秒の保持時間を有するバレー偏極の長距離空間輸送を実証することを狙う。従来の直接型半導体における光初期化法とは質的に異なるフォノン介在の基礎光学過程を用いることで、バレー寿命の限界を打破できる可能性は十分にある。また、本研究で真性半導体への光励起キャリアの注入技術を高めることは、高純度化が進む次世代半導体材料のデバイス応用において重要な意義を持つ。

### 3. 研究の方法

シリコンとダイヤモンドの高純度単結晶を中心に、デルタバレー偏極に関する以下の研究を行う。

- ・時間分解サイクロトロン共鳴によるキャリアのバレー分離検出を行い、光励起のバレー選択則を検証する。
- ・光励起の条件を変えてバレー偏極の緩和時間の測定を行い、コヒーレンス緩和機構を解明する。
- ・パルスレーザー光により初期化したデルタバレーの電子と励起子に対して、それぞれ、時間分解サイクロトロン共鳴法と時間分解発光イメージング法により空間輸送の可視化および制御を行う。

### 4. 研究成果

平成29年度は、高純度シリコン結晶を主に対象として、デルタバレー偏極の光注入経路の解明を行なった。その原理検証の知見をもとに、平成30年度は、より長いバレーコヒーレンス時間が期待されるダイヤモンドにおいて、デルタバレー偏極の光注入経路および緩和過程に関する研究を行った。令和元年度は、光励起により注入されるデルタバレー偏極電子の多体散乱効果に

関する研究課題とキャリア輸送のモデル構築に取り組み、着実な成果を得た。最終年度は実験を進めつつ、研究の総括と成果発信に重点をおいた。4年間の研究期間を通して国内外の学会での成果発表と投稿論文の出版を多数行ったほか、一般への成果発信として科研費 NEWS において本課題に関する成果の一部を紹介した。以下、具体的な研究項目ごとの成果を示す。

#### (1) デルタバレー偏極電子の光注入経路の解明

シリコンには波数空間内の6つのデルタ点にバレーが存在し、結晶の  $110$  軸方向の磁場印加のもとでは等価なバレーが4:2の割合で存在する。従って、バレー間緩和が頻繁に起きる運動エネルギーの大きな電子に対して、バレー偏極度は2に等しくなると考えられる。しかし、励起波長依存性を詳しく調べると、吸収端直上での低温キャリア生成の場合のみ、バレー偏極度が2を超える高い値を保持することを見出した。この成果は Applied Physics Express 誌のスポットライト論文に選ばれ注目を集めた。

上記、シリコンで明らかにしたバレー選択励起に関する知見に基づき、ダイヤモンドにおけるキャリアの光注入経路についても詳細な実験を行った。特に、温度変化に注目し、サイクロトロン共鳴信号を利用した室温までの励起スペクトルの測定に初めて成功した。間接遷移型半導体であるダイヤモンドでは、広い温度領域でフォノン介在遷移によるデルタバレーへのキャリア注入経路が主要になることを明らかにした。この成果を含めたレビュー論文の共同執筆を本課題の分担者とともに行った。

#### (2) 定常光によるダイヤモンドのキャリア励起法の開拓

試料をより低温にすればバレー緩和時間が長くなることが期待されるため、極低温の専門家と相談して新たに真空ポンプを設置し、最低到達温度をこれまでの7ケルビンから2.8ケルビンに改善した。極低温では温度が安定に保たれる時間が限られ、より短時間でスペクトルを取得する手法が必要となったため、定常深紫外光源を用いる新たなキャリア励起法を開拓した。試行錯誤の結果、重水素ランプによる励起のもとで、真性ダイヤモンドの定常光励起キャリアのサイクロトロン共鳴信号を捉えることにはじめて成功した。

定常光励起によるダイヤモンドのキャリア移動度測定では、従来のパルス光励起法に比べて、非常に密度の低いキャリアからの信号が得られていることが分かった。特に、低密度極限で得られたキャリア移動度は、これまでの報告値の16倍という大きな値となった。この値は、いわゆる高移動度物質と呼ばれる半導体の二次元電子系で実現される移動度を上回り、3次元のバルク結晶では他に例を見ないダイヤモンドの極めて優れた性質を直接観測したことを意味する画期的な成果である。一方、パルス光励起の場合には、キャリアが高密度状態にあるためにキャリアキャリア散乱が起こり、散乱時間が短縮していることを明らかにした。

#### (3) バレー偏極の空間輸送の可視化と制御のための外場印加法の検討

間接型半導体で予想される長いバレー緩和時間を考慮し、ナノ秒領域でスイッチング可能な電場印加によりキャリアの空間輸送を行う実験系を検討した。新たな電場印加装置として2枚のITO電極の間に単結晶試料を挟み込む構造を考案し、そのプロトタイプを試作した。実際の電場印加実験に向けて低温耐性を確認し、直流電場下サイクロトロン共鳴実験を行なった。

一方、歪みによるキャリア移動度の変化について詳しい実験研究を行った。数ミリ角のダイヤモンド結晶の試料全体にわたる複屈折像を解析し、試料内の残留歪みの空間分布を得ることに成功した。残留歪みの大きさの異なる複数の試料、および、同一試料内で歪みの大きさの異なるスポットに光励起でキャリアを生成し、移動度および寿命測定を行った。残留歪みはその大きさが  $1 \times 10^{-5}$  と微小であっても、残留不純物の影響を大きく上回るような効果をもたらすことを明らか

にした。実測した極低温から室温までのキャリア寿命および移動度寿命積の温度依存性を理解するために、キャリアダイナミクスを定量的に記述するモデルを初めて構築した。このモデルを用いることで、転位密度と不純物密度が既知のダイヤモンド試料における輸送特性パラメータ、および転位を含まない理想的な真性ダイヤモンド結晶における物性値の予測が初めて可能となった。従来、ダイヤモンドにおけるキャリアの寿命は、再結合過程と非再結合過程で決まるバルク寿命、および、表面再結合寿命により制限されると考えられてきた。しかし、本研究で、拡散定数により決定される転位や表面までの到達時間が電子寿命に大きく影響することが明らかになった。これは当初予想していなかった成果であるが、空間輸送の観点からも、極めて重要な意味を持つ。すなわち、キャリア寿命として到達時間 100-1000 ナノ秒、走行距離として2つの転位間の実効距離である 0.48 mm が導かれ、サブマイクロ秒オーダーのバレー偏極の緩和とミリメートルスケールに迫る空間輸送が実際に起きていると結論できる。

以上の成果についての論文出版や国際会議口頭発表では、関係者より高い評価を得た。選択則の複雑さのためにこれまで敬遠されてきた間接型の光遷移過程であるが、その基礎特性を物理的に理解し活用する新しい道筋を拓くことができた。本研究を通してデルタバレー偏極電子のダイナミクスに関する理解を大きく進歩させることができたことは、次世代半導体材料のデバイス応用においても重要な意義を持つと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Y. Kubo, S. Temgoua, R. Issaoui, J. Barjon, and N. Naka	4. 巻 114
2. 論文標題 Radiative lifetime of boron-bound excitons in diamond	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 132104-1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5089894	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 該当する
1. 著者名 I. Akimoto and N. Naka	4. 巻 1
2. 論文標題 Intrinsic carrier parameters and optical carrier injection method in high-purity diamonds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IntechOpen	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5772/intechopen.86002	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 S. Hamabata, I. Akimoto, and N. Naka	4. 巻 1220
2. 論文標題 Temperature-dependent carrier injection routes under optical excitation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 012023-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1220/1/012023	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 濱端沙耶香, 秋元郁子, 中暢子	4. 巻 30
2. 論文標題 高純度ダイヤモンド結晶における励起子解離によるキャリア生成の温度依存性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第30回光物性研究会論文集	6. 最初と最後の頁 117-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 中暢子, 下村尊明, 秋元郁子	4. 巻 135
2. 論文標題 科学解説 光物性計測からわかるダイヤモンドのキャリア特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 NEW DIAMOND	6. 最初と最後の頁 8-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 中暢子, 高畑光善	4. 巻 35
2. 論文標題 リュードベリ励起子の分光研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学物性科学センター誌	6. 最初と最後の頁 3-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Mitsuyoshi Takahata, Koichiro Tanaka, and Nobuko Naka	4. 巻 97
2. 論文標題 Nonlocal optical response of weakly confined excitons in Cu2O mesoscopic films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205305-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.97.205305	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 Takaaki Shimomura, Yoshiki Kubo, Julien Barjon, Norio Tokuda, Ikuko Akimoto, and Nobuko Naka	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantitative relevance of substitutional impurities to carrier dynamics in diamond	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Materials	6. 最初と最後の頁 173604-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevMaterials.2.094601	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 Mitsuyoshi Takahata, Koichiro Tanaka, and Nobuko Naka	4. 巻 121
2. 論文標題 Superradiance-to-polariton crossover of Wannier excitons with multiple resonances	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 173604-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.121.173604	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 Mitsuyoshi Takahata and Nobuko Naka	4. 巻 98
2. 論文標題 Photoluminescence properties of the entire excitonic series in Cu2O	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195205-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.98.195205	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 久保 佳希, S. Temgoua, R. Issaoui, J. Barjon, 中 暢子	4. 巻 29
2. 論文標題 ボロンドープダイヤモンドにおける束縛励起子の輻射寿命	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第29回光物性研究会論文集	6. 最初と最後の頁 217-220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 Akimoto Ikuko, Naka Nobuko	4. 巻 10
2. 論文標題 Two optical routes of cold carrier injection in silicon revealed by time-resolved excitation spectroscopy	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 061301 ~ 061301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.061301	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 Kitamura Tatsuya, Takahata Mitsuyoshi, Naka Nobuko	4. 巻 192
2. 論文標題 Quantum number dependence of the photoluminescence broadening of excitonic Rydberg states in cuprous oxide	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Luminescence	6. 最初と最後の頁 808 ~ 813
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jlumin.2017.07.060	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 Schoene Florian, Stolz Heinrich, Naka Nobuko	4. 巻 96
2. 論文標題 Phonon-assisted absorption of excitons in Cu <sub>2</sub> O	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 115207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.96.115207	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 小西一貴, Ian Friel, J. Isberg, 中暢子	4. 巻 28
2. 論文標題 極低温のダイヤモンドにおける励起子-フォノン散乱の抑制	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第28回光物性研究会論文集	6. 最初と最後の頁 28 ~ 31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 該当する

1. 著者名 濱端沙耶香, 秋元郁子, 中暢子	4. 巻 28
2. 論文標題 高純度ダイヤモンド結晶における光キャリア生成経路	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 第28回光物性研究会論文集	6. 最初と最後の頁 187 ~ 190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kubo Yoshiaki, Takahata Mitsuyoshi, Tengoua Solange, Issaoui Riadh, Barjon Julien, Naka Nobuko	4. 巻 101
2. 論文標題 Phonon-assisted transitions of bound excitons in diamond: Analysis by mirror symmetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 205204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.205204	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 Ichii T., Hazama Y., Naka N., Tanaka K.	4. 巻 116
2. 論文標題 Study of detailed balance between excitons and free carriers in diamond using broadband terahertz time-domain spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 231102 ~ 231102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0006993	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 Konishi K., Akimoto I., Isberg J., Naka N.	4. 巻 102
2. 論文標題 Diffusion-related lifetime and quantum efficiency of excitons in diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 195204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.102.195204	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 Konishi K., Akimoto I., Matsuoka H., Djurberg V., Majdi S., Isberg J., Naka N.	4. 巻 117
2. 論文標題 Low-temperature mobility-lifetime product in synthetic diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 212102 ~ 212102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0031600	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

〔学会発表〕 計56件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 21件）

1. 発表者名 Nobuko Naka and Mitsuyoshi Takahata
2. 発表標題 Photoluminescence of Rydberg excitons in Cu <sub>2</sub> O
3. 学会等名 3rd international workshop on Rydberg excitons in semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nobuko Naka and Mitsuyoshi Takahata
2. 発表標題 Rydberg excitons in semiconductor Cu <sub>2</sub> O with bulk and mesoscopic dimensions
3. 学会等名 Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Takahata, K. Tanaka, and N. Naka
2. 発表標題 Excitonic superradiance to polariton crossover observed in cuprous oxide thin films
3. 学会等名 Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小西一貴, 秋元郁子, 松岡秀人, Ian Friel, J. Isberg, 中暢子
2. 発表標題 ランダウ準位の不均一広がりを考慮したダイヤモンドの真性キャリア移動度の抽出
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱端沙耶香, 秋元郁子, 中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド結晶における励起子からのキャリア生成機構
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市井智章, 中暢子, 田中耕一郎
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光によるダイヤモンドの電子正孔液滴の観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋元郁子, 中暢子, 松岡秀人
2. 発表標題 Q-band ESR装置を用いた光キャリアのサイクロトロン共鳴
3. 学会等名 58回電子スピンサイエンス学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 濱端沙耶香, 秋元郁子, 中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド結晶における励起子解離によるキャリア生成の温度依存性
3. 学会等名 第30回光物性研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Takahashi, K. Konishi, Y. Kubo, R. Issaoui, J. Barjon, and N. Naka
2. 発表標題 High-resolution absorption study on boron-bound excitons in diamond
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop SBDD XXV (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Kubo, M. Takahata, S. Tengoua, R. Issaoui, J. Barjon, and N. Naka
2. 発表標題 Phonon replicas of bound excitons in boron-doped diamond
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop SBDD XXV (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, J. Isberg, N. Naka
2. 発表標題 Surface recombination model for electron lifetime in intrinsic diamond
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop SBDD XXV (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 市井智章, 中暢子, 田中耕一郎
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光によるダイヤモンドの励起子微細構造の解明
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 小西一貴, 秋元郁子, Ian Friel, J. Isberg, 中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンドにおける励起子寿命に対する表面再結合モデル
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 久保佳希, 高畑光善, Solange Temgoua, Riadh Issaoui, Julien Barjon, 中暢子
2. 発表標題 弱結合の束縛励起子における鏡映対称スペクトル
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 片桐佳来, 高畑光善, 中暢子
2. 発表標題 白色コヒーレント光源を用いたCu20励起子の和周波分光
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 T. Ichii, N. Naka, and K. Tanaka
2. 発表標題 Photo-excited carrier dynamics in intrinsic diamond studied by terahertz spectroscopy
3. 学会等名 International school and symposium on ultrafast control of materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nobuko Naka and Ikuko Akimoto
2. 発表標題 Optical injection of valley-polarized electrons in group IV semiconductors
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Takahata, K. Tanaka, and N. Naka
2. 発表標題 Excitonic response beyond the long-wavelength approximation in Cu <sub>2</sub> O mesoscopic films
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Kubo, Solange Temgoua, Julien Barjon, and Nobuko Naka
2. 発表標題 Ultraviolet absorption by boron-bound excitons in diamond
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Ichii, N. Naka, and K. Tanaka
2. 発表標題 Photo-excited carrier dynamics in intrinsic diamond studied by terahertz spectroscopy
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, Ian Friel, J. Isberg, and N. Naka
2. 発表標題 Evaluation of the exciton effective mass in intrinsic diamond
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hamabata, I. Akimoto, and N. Naka
2. 発表標題 Two routes of optical carrier injection in high-purity diamond
3. 学会等名 The 12th International Conference on Excitonic and Photonic Processes in Condensed Matter and Nano Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小西 一貴, 小原 慧一, Ian Friel, J. Isberg, 松岡 秀人, 秋元 郁子, 中 暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンドにおける励起子寿命に対する歪みの影響
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱端 沙耶香, 秋元 郁子, 中 暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド中に生成した励起子とキャリアの化学平衡
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保 佳希, S. Tengoua, J. Barjon, 中 暢子
2. 発表標題 ポロンドープダイヤモンドにおける束縛励起子の輻射寿命
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松山 恭大, 久保 佳希, 高畑 光善, R. Gillet, M.-A. Pinault-Thaury, 中 暢子, J. Barjon
2. 発表標題 リンドープダイヤモンドにおける束縛励起子の高分解発光スペクトル解析
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年) 九州大学 (伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高畑 光善, 森 正光, 古川 雄規, 中 暢子
2. 発表標題 Cu20における偶パリティ励起子のSHG分光
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年) 九州大学 (伊都キャンパス)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市井 智章, 中 暢子, 田中 耕一郎
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光によるダイヤモンドの励起子形成過程の観測
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高畑 光善, 田中 耕一郎, 中 暢子
2. 発表標題 亜酸化銅における励起子超放射から励起子ポラリトンへのクロスオーバー
3. 学会等名 日本物理学会 2018年 秋季大会 (同志社大学京田辺キャンパス)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保 佳希, S. Temgoua, R. Issaoui, J. Barjon, 中 暢子
2. 発表標題 ポロンドープダイヤモンドにおける束縛励起子の輻射寿命
3. 学会等名 第29回光物性研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tomoaki Ichii, Nobuko Naka, Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Time-resolved excitonic Lyman spectroscopy in diamond
3. 学会等名 The 8th International Conference on Optical Terahertz Science and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kubo, S. Temgoua, R. Issaoui, J. Barjon, and N. Naka
2. 発表標題 Radiative lifetime of boron-bound excitons in diamond studied by ultraviolet absorption
3. 学会等名 Hasselt Diamond WorkshopSBDD XXIV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, Ian Friel, J. Isberg, N. Naka
2. 発表標題 Influence of internal strain on the carrier transport properties in diamond
3. 学会等名 Hasselt Diamond WorkshopSBDD XXIV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuji Hazama, Kazuki Konishi, Judy G. Cherian, Stephen A. McGill, and Nobuko Naka
2. 発表標題 Dark excitons in diamond revealed by high-field magnetospectroscopy
3. 学会等名 Hasselt Diamond WorkshopSBDD XXIV (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小西一貫、中暢子、Ian Friel、J. Isberg
2. 発表標題 極低温のダイヤモンドにおける励起子拡散係数の増大
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(岩手大)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 秋元郁子、中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド結晶における光キャリア生成過程の励起波長依存性
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(岩手大)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高畑光善、中暢子、田中耕一郎
2. 発表標題 Cu <sub>20</sub> 薄膜における双極子許容な励起子の非局所光応答
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(岩手大)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 市井智章、中暢子A、田中耕一郎
2. 発表標題 テラヘルツ時間領域分光法を用いたダイヤモンドにおける光励起キャリアの密度評価
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会(岩手大)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小西一貫、Ian Friel、J. Isberg、中暢子
2. 発表標題 極低温のダイヤモンドにおける励起子-フォノン散乱の抑制
3. 学会等名 第28回光物性研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 濱端沙耶香、秋元郁子、中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド結晶における光キャリア生成経路
3. 学会等名 第28回光物性研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Naka, S. Hamabata, K. Konishi, J. H. Kaneko, I. Akimoto
2. 発表標題 Time-resolved spectroscopy on intrinsic diamond for reassessment of the exciton binding energy
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop SBDD XIII (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, I. Friel, J. Isberg, N. Naka
2. 発表標題 Enhanced mobility of excitons under inelastic phonon scattering in intrinsic diamond
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop SBDD XIII (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小西一貫, Ian Friel, J. Isberg, 中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンドの吸収測定による励起子-フォノン散乱機構の研究
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会 (東京理科大)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高畑光善, 秋元郁子, 中暢子
2. 発表標題 Cu <sub>2</sub> Oにおける非放物線バンドの時間分解サイクロトロン共鳴
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会 (東京理科大)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱端沙耶香、秋元郁子、中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド結晶における光キャリア生成経路の温度依存性
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会（東京理科大）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保佳希、Tengoua Solange、Barjon Julien、中暢子
2. 発表標題 ボロンドープダイヤモンドにおける束縛励起子の紫外吸収スペクトル
3. 学会等名 物理学会第73回年次大会（東京理科大）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片桐佳来、高畑光善、中暢子
2. 発表標題 和周波分光によるCu20の青・紫色励起子の観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小西一貴、J. Isberg、中暢子
2. 発表標題 高純度ダイヤモンドにおける励起子の拡散係数・寿命と内部量子効率
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 草場哲, 片桐佳来, 渡邊賢司, 谷口尚, 柳和宏, 中暢子, 田中耕一郎
2. 発表標題 和周波分光を用いた単層WSe2におけるp励起子の観測
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋伸弥, 小西一貴, Riadh Issaoui, Julien Barjon, 中暢子
2. 発表標題 ポロンドープダイヤモンド中の束縛励起子の微細構造
3. 学会等名 日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoshi Kusaba, Yoshiki Katagiri, Kenji Watanabe, Takashi Taniguchi, Kazuhiro Yanagi, Nobuko Naka, and Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Energy splitting between 2s and 2p excitons in hBN-encapsulated monolayer WSe2
3. 学会等名 THE 45TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES (IRMMW-THz2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoaki Ichii, Nobuko Naka, and Koichiro Tanaka
2. 発表標題 Fine structure of excitonic excited states in diamond studied by broadband terahertz time-domain spectroscopy
3. 学会等名 THE 45TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFRARED, MILLIMETER, AND TERAHERTZ WAVES (IRMMW-THz2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 片桐 佳来, 高畑 光善, 中 暢子
2. 発表標題 Cu20 における青・紫色励起子の和周波分光
3. 学会等名 第31回光物性研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Konishi, I. Akimoto, H. Matsuoka, V. Djurberg, S. Majdi, J. Isberg, and N. Naka
2. 発表標題 高純度ダイヤモンド中の転位における光励起キャリアの再結合効果
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 戸田倫太郎, R. Gillet, M.-A. Pinault-Thaury, 中暢子, J. Barjon
2. 発表標題 リンドープダイヤモンド中の束縛励起子の精密分光
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 片桐佳来, 高畑光善, 渡邊雅之, 中暢子
2. 発表標題 Cu20における青・紫色励起子の和周波スペクトル
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻光物性研究室  
<http://www.hikari.scphys.kyoto-u.ac.jp/jp/index.php?Nobuko%20Naka>

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	秋元 郁子  (Akimoto Ikuko)  (00314055)	和歌山大学・システム工学部・准教授    (14701)	

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			
スウェーデン	Uppsala University			
英国	Element Six			
米国	National High Magnetic Field Laboratory			
フランス	University of Paris-Saclay UVSQ	CNRS	University of Sorbonne Paris Nord	