

令和 4 年 4 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03686

研究課題名(和文) 固体発光体結合共振器を用いた超放射に関する研究

研究課題名(英文) Study on superradiance using solid-state microcavity coupled with single light emitters

研究代表者

高島 秀聡 (Takashima, Hidaki)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：00432162

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年、量子コンピュータや量子計測などへの応用をめざし、複数の光子をもつれ合わせた多光子もつれ光子源の実現が期待されている。この光源への応用をめざし、本研究では、ヘリウムイオン顕微鏡を用いてナノ光ファイバブラッグ共振器(NFBC)を開発すると共に、極低温下でのナノダイヤモンド中の窒素欠陥(NV)中心の評価を行った。

その結果、ヘリウムイオン顕微鏡を用いることで、従来よりも16倍以上Q値を向上させたNFBCの開発に成功した。また、極低温(7K)でナノダイヤモンド中のNV中心の光学特性評価を行い、通常のNV中心よりも発光寿命が短いNV中心を含むナノダイヤモンドを発見した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された高Q値NFBCに単一発光体を結合させたハイブリッドデバイスを開発すると、量子暗号通信や光子を用いた量子コンピューターなどの実現に不可欠な高効率単一光子源の実現が期待できる。また、本研究で得られたシリコン欠陥中心内包極微ナノダイヤモンドは、単一光子源などへの応用に加え、近赤外域での新しいバイオマーカーやナノスケールの温度センサーなどへも応用できうる。これらのことから、本研究成果は、量子科学からライフサイエンスまで幅広い研究分野に影響を与えうる成果だと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In recent years, to realize quantum applications such as quantum computers and quantum measurement, it is expected to realize a multiphoton entangled photon source. Toward the realization of this photon source, in this study, we have developed nanofiber Bragg cavities (NFBCs) using helium ion microscope and measured optical properties of nitrogen vacancy centers (NVs) at low temperature.

As a result, we succeeded in the development of a NFBC with high quality factor improved by 16 times or more compared to the NFBC fabricated by Gallium type focused ion beam. We have also discovered NV centers, which have shorter emission lifetime than usual.

研究分野：量子光学

キーワード：ナノ光ファイバ ダイアモンド 窒素欠陥中心

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、量子コンピュータや、古典限界を超える感度を持つ量子計測の光源として、複数の光子をもつれ合わせた多光子もつれ光子源の実現が期待されている。これを実現する方法のひとつが、固体発光体を用いた超放射である。しかし、温度ゆらぎや結晶の不均一性など影響が大きい固体発光体では、超放射は実現が困難な課題のひとつであった。申請者は、これを実現する発光体として、窒素欠陥(NV)中心を多数含む直径数十 nm のダイヤモンド(ナノダイヤモンド)に着目した。そして、この固体発光体を、申請者らが開発してきたナノ光ファイバブラッグ共振器(NFBC)と結合させることで、超放射を実現できうると考え研究を開始した。

### 2. 研究の目的

本研究では、固体発光体による超放射をめざすことを目的とし研究を行った。Meiser らによる理論的な研究によると、超放射の実現には、協同パラメーターが大きい共振器に、複数個のコヒーレンス時間が長い発光体を結合させる必要がある。そこで、本研究では、光共振器として、これまでに開発を行ってきた NFBC に着目した。これは、高い光閉じ込め効率(Q 値)と小さいモード体積を実現できうることから、協同パラメーターを大きくすることが可能となる。また、発光体として、NV 中心を多数含むナノダイヤモンドに着目した。これは、室温で超放射によるものと考えられるバンチングが観測されていることに加え、極低温下でのコヒーレンス時間が長く、発光寿命限界の線幅が実現されているためである。これらのことから、極低温下で NV 中心を含むナノダイヤモンドを NFBC と結合させることができれば、Meiser らの条件を実現することが可能となると考えられた。

### 3. 研究の方法

本研究では、超放射の可能性のある NV 中心含有ナノダイヤモンドを探索し、探索したナノダイヤモンドと NFBC とを結合させる。そして、極低温下で発光の時間分解測定や二次の強度相関測定を行ない、固体発光体での超放射を実現する計画で研究を行った。

令和元年度(平成三十一年度)は NFBC の開発を行った。これまで、NFBC は、ガリウム(Ga)イオンをイオン源とする集束イオンビーム(FIB)装置を用いて開発を行ってきた。しかし、Ga イオンによるサンプルの汚染や、加工分解能のため、NFBC の Q 値は 300 程度に制限されていた。そこで、本研究では、ヘリウム(He)イオンをイオン源とするヘリウムイオン顕微鏡を用いた NFBC の開発に取り組んだ。

令和二年度は、時間領域差分(FDTD)法を用いたシミュレーションによる解析に加え、引き続きヘリウムイオン顕微鏡を用いた NFBC の開発に取り組んだ。また、室温での共焦点顕微分光システムを開発、単一発光体の光学特性評価に取り組んだ。

令和三年度は、極低温での共焦点顕微分光システムの開発を行い、極低温での超放射の可能性を探索した。

### 4. 研究成果

令和元年度(平成三十一年度)は、ヘリウムイオン顕微鏡を用いた NFBC の開発に取り組んだ。その結果、Ga イオン FIB 装置と同じ周期で NFBC を開発した場合、約 1.5 倍 Q 値を向上させることに成功した。また、Q 値を向上させるために、NFBC の構造周期を増やしたところ、約 4000 の Q 値を持つ共鳴ピークを観測することに成功した。なお、この Q 値は分光器の波長分解能により制限されたものであることから、実際の Q 値はさらに高いと考えられる。一方、作製した NFBC をイオン顕微鏡で観察した場合、Ga イオン FIB 装置を用いた場合よりも周期構造が不明瞭に観察された。また、加工後の歩留まりが悪いという課題も生じた。さらに、得られた透過スペクトル中のストップバンド幅が時間領域差分(FDTD)法で得られるバンド幅よりも狭くなるという問題も発生した。

そこで、令和二年度は、時間領域差分(FDTD)法を用いた NFBC の詳細な解析に取り組んだ。最初に、NFBC の表面構造のみを考慮し透過スペクトルを計算した。しかし、この場合、実験結果をシミュレートすることができなかった。そこで、表面構造に加え、イオンビーム照射による屈折率変化も考慮し、透過スペクトルの計算を行った。その結果、実験結果にほぼ一致するストップバンド幅を持つ透過スペクトルを得ることができた。この結果から、ヘリウムイオン顕微鏡で NFBC を作製した場合、注入イオンがガラス内部にまで入り込み屈折率変化を生じさせている可能性があることがわかった。そこで、イオン衝突シミュレーションソフトウェア(SRIM)を用いてヘリウムイオンの注入深さの計算を行った。その計算によると、30 KeV でヘリウムイオンをシリカガラスに注入した場合、ナノ光ファイバの直径に相当する 300 nm の位置までヘリウムイオンが注入されることがわかった。この計算結果は、注入イオンにより屈折率変化が生じているという仮説を強く支持する結果だと考えられる。また、ヘリウムイオン顕微鏡で NFBC を作製した場合の歩留まりの悪さもイオン注入が原因となっていると考えられる。

この解決をめざし、ヘリウムイオンの代わりに、ガラス内部への侵入の影響が小さいネオンイ

オンを用いた NFBC の開発にも取り組んだ。この場合、装置が不安定になるという課題が生じたが、Ga イオンビームを用いた時同様、表面にはっきりとした周期構造を持つ NFBC の開発に成功した。この結果については、現在、論文を準備しているところである。

NFBC の開発に加え、令和二年度は、室温での共焦点顕微分光システムを構築、ナノダイヤモンド中の NV 中心やシリコン欠陥 (SiV) 中心、さらには、六方晶窒化ホウ素 (hBN) 中の単一結晶欠陥の光学特性評価にも取り組んだ。

令和三年度は、極低温での共焦点顕微分光システムを構築、NV 中心を多数含むナノダイヤモンドの評価を行った。サンプルを 7 K まで冷却したところ、複数の輝点を持つ共焦点画像が得られた。その中の輝点について、発光スペクトルを測定したところ、室温と異なり、NV<sup>0</sup> および NV<sup>-</sup> のゼロフォノン線が明瞭に観測された (図 1(a))。また、パルスレーザーを用いて励起し、NV<sup>-</sup> のゼロフォノン線のみをフィルターで切り出し発光寿命を測定したところ、通常ナノダイヤモンド中の NV 中心の発光寿命より短い 7.4 ns の発光寿命を示していることがわかった (図 1(b))。しかしながら、この輝点について二次の強度相関を測定したところ、超放射で観測されるバンチング現象を観測するには至らなかった。その他の輝点についても同様の測定を行ったが、短い発光寿命を示す輝点は得られたが、バンチングを観測するには至らなかった。なお、最終年度、ヘリウムイオン顕微鏡が故障したことにより、NFBC の加工ができなくなったため、ナノダイヤモンドと NFBC との結合を実現することはできなかった。

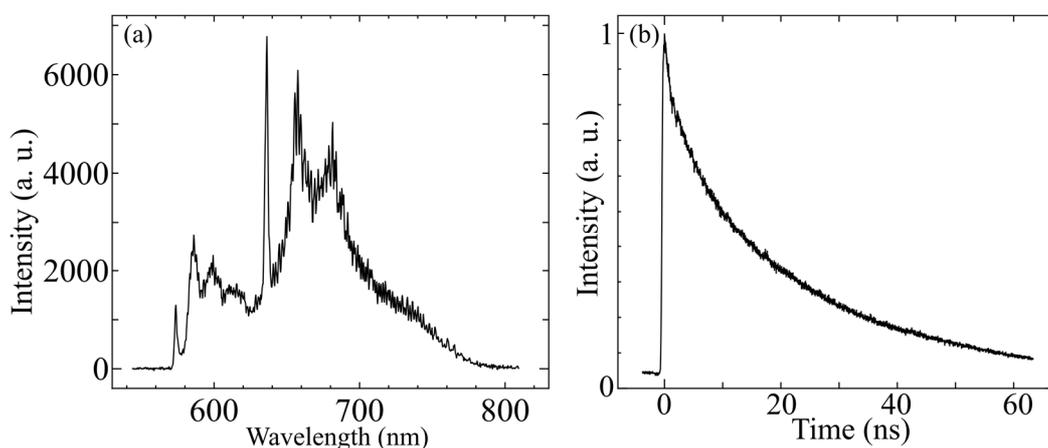


図 1 (a) ナノダイヤモンド中の NV 中心の発光スペクトル。(b) NV 中心の発光寿命

関連する研究として、単一結晶欠陥を含む六方晶窒化ホウ素 (hBN) の双極子方向測定を行った。単一発光体の双極子の方向を三次元で推定することは、ナノフォトニクスデバイスとの結合のために重要な課題である。単一結晶欠陥を含む hBN は、発光強度が非常に強く、かつ、安定であり、さらに、室温でも発光線幅が狭いなど、優れた光学特性を示す単一発光体として注目されている。しかし、その双極子方向を三次元で推定することはこれまで行われていなかった。そこで、本研究では、動径方向に電場が振動するラジアル偏光ビームと、ビームの接線方向に電場が振動するアジマス偏光ビームを用い、hBN 中の双極子方向の測定を行った。

測定には、アルゴン雰囲気中で 850 度でアニールした hBN ナノフレークを用いた。令和二年度に構築した共焦点顕微鏡に、偏光リターダを用いて変換したラジアル偏光ビーム、および、アジマス偏光ビームを導入、100 倍の油浸対物レンズを用いてカバーガラス上に分散させた hBN ナノフレークを励起した。hBN ナノフレークから発生した光子を同じ対物レンズで集光、共焦点顕微鏡像、発光スペクトル、および、二次の強度相関の測定を行った。

図 2(a) に、アジマス偏光ビームで測定した、単一結晶欠陥を内包する hBN ナノフレークの共焦点顕微鏡像を示す。ほぼ同じ強度の二つの輝点が観測された。図 2(b) は、同じ hBN ナノフレークをラジアル偏光ビームで励起した場合の共焦点顕微鏡像である。アジマス偏光ビームで励起した場合と直交する方向に、強度が異なる二つの輝点が観測された。得られた二つの共焦点画像を、理論計算結果と比較したところ、双極子が hBN ナノフレークの面内方向に  $163.0 \pm 2.4$  度、励起光の光軸の向きから  $83.5 \pm 1.7$  度傾いていることがわかった。原子間力顕微鏡を用いた解析より、hBN ナノフレークは光軸に直交する方向に配置されていることから、双極子は hBN ナノフレークの層とほぼ平行に配向していると考えられる。

この測定方法および解析手法を、単一発光体の位置や向きを制御するマニピュレーション手法と組み合わせると、双極子の方向を最適化して、単一発光体をナノフォトニクスデバイスへ結合させることが可能となる。このことから、この研究は、高効率量子情報デバイスを実現するた

めに重要な成果だと考えられる。

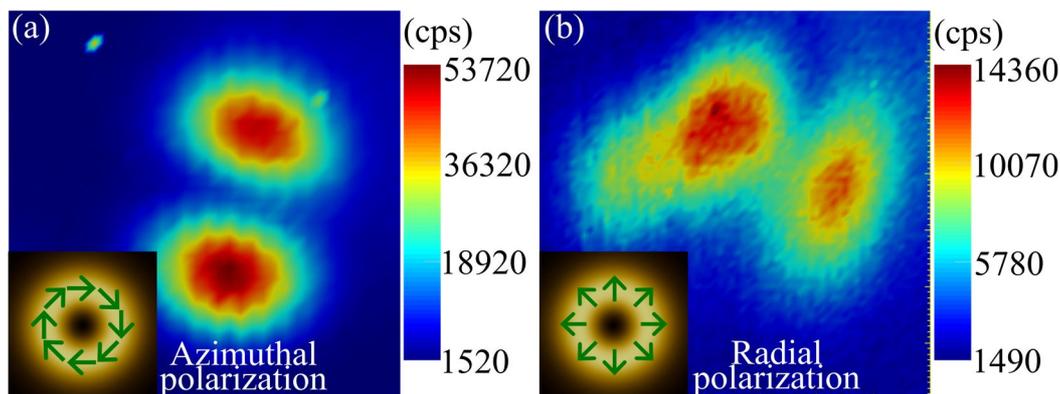


図 2 (a) アジマス偏光ビームで励起した場合の hBN 中の単一結晶欠陥の共焦点画像。(b) ラジアル偏光ビームで励起した場合の hBN 中の単一結晶欠陥の共焦点画像

また、シリコン欠陥 (SiV) 中心内包ナノダイヤモンドの開発にも取り組んだ。近赤外域 (波長 737nm) で安定に発光し、かつ、発光線幅が細い SiV 中心内包ナノダイヤモンドは、バイオイメージング、ナノスケールの温度測定、単一光子源などへの応用で注目を集めている。従来、SiV 中心内包ナノダイヤモンドは、化学蒸着 (CVD) 法により作られたダイヤモンド薄膜を粉砕する方法や、高圧高温 (HPHT) プロセスで作られ作られてきた。しかし、これらの方法では SiV 中心内包ナノダイヤモンドの収率が課題となっていた。高い収率が期待できる方法のひとつが、事前にサイズを選択したナノダイヤモンドへの Si イオン注入である。しかし、従来この方法で作られた SiV 中心は、CVD や HPHT 法により作られた SiV 中心よりも発光線幅が 2 倍以上太くなるという課題があった。そこで、本研究では、イオン注入後のアニール処理を工夫することで、イオン注入により作られた SiV 中心の発光線幅の狭帯域化を目指した。

図 3(a)に、 $10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> の注入量で Si イオンを注入後、高真空下で 1100 度でアニールした平均粒径  $29.9 \pm 16$  nm のナノダイヤモンドの共焦点顕微鏡像を示す。複数の輝点が観測された。その中、矢印で示した輝点の発光スペクトルを測定したのが図 3(b)である。波長 737 nm 付近において、半値全幅 7 nm の SiV 中心のゼロフォノン線が観測された (A-2)。この線幅は、従来イオン注入で観測されていたものより 2 倍以上細く、CVD 合成されたナノダイヤモンドに近いことがわかった。

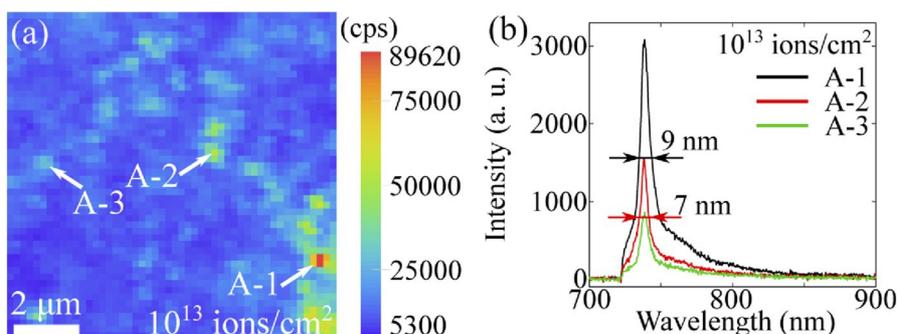


図 3 (a)  $10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> の注入量で Si イオンを打ち込んだナノダイヤモンドの共焦点画像。(b) 図(a)中の輝点 (A-1、A-2、A-3) における発光スペクトル。

我々は、さらに小さいサイズのナノダイヤモンド中への SiV 中心の形成にも取り組んだ。サイズが 10nm 未満のデトネーションナノダイヤモンド (DND) は、ライフサイエンスから量子技術までの多くの研究分野で注目されている発光体である。しかし、従来 DND では、SiV 中心の発光は観測されていなかった。そこで、本研究では、DND を高真空中で 1100 度でアニール処理することにより、SiV 中心の形成を試みた。その結果、SiV 中心のゼロフォノン線と一致する波長 737 nm において線幅 7.7nm の鋭い輝線を観測することに成功した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Fukushige Kazuki, Kawaguchi Hiroki, Shimazaki Konosuke, Tashima Toshiyuki, Takashima Hideaki, Takeuchi Shigeki	4. 巻 116
2. 論文標題 Identification of the orientation of a single NV center in a nanodiamond using a three-dimensionally controlled magnetic field	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 264002 ~ 264002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0009698	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 Takashima Hideaki, Maruya Hironaga, Ishihara Keita, Tashima Toshiyuki, Shimazaki Konosuke, Scheil Andreas W., Tran Toan Trong, Aharonovich Igor, Takeuchi Shigeki	4. 巻 7
2. 論文標題 Determination of the Dipole Orientation of Single Defects in Hexagonal Boron Nitride	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Photonics	6. 最初と最後の頁 2056 ~ 2063
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsp Photonics.0c00405	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 Yin Zhenghao, Sugiura Kenta, Takashima Hideaki, Okamoto Ryo, Qiu Feng, Yokoyama Shiyoshi, Takeuchi Shigeki	4. 巻 29
2. 論文標題 Frequency correlated photon generation at telecom band using silicon nitride ring cavities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 4821 ~ 4821
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.416165	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 高島秀聡、竹内繁樹	4. 巻 37
2. 論文標題 新規室温動作単一光子源：六方晶窒化ホウ素中の単一欠陥中心	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 NEW DIAMOND	6. 最初と最後の頁 17 ~ 20
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 Tashima Toshiyuki、Takashima Hideaki、Takeuchi Shigeki	4. 巻 27
2. 論文標題 Direct optical excitation of an NV center via a nanofiber Bragg-cavity: a theoretical simulation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27009 ~ 27009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.027009	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 Shimazaki Konosuke、Kawaguchi Hiroki、Takashima Hideaki、Segawa Takuya Fabian、So Frederick T.-K.、Terada Daiki、Onoda Shinobu、Ohshima Takeshi、Shirakawa Masahiro、Takeuchi Shigeki	4. 巻 218
2. 論文標題 Fabrication of Detonation Nanodiamonds Containing Silicon Vacancy Color Centers by High Temperature Annealing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 2100144 ~ 2100144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.202100144	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 Tashima Toshiyuki、Takashima Hideaki、Schell Andreas W.、Tran Toan Trong、Aharonovich Igor、Takeuchi Shigeki	4. 巻 12
2. 論文標題 Hybrid device of hexagonal boron nitride nanoflakes with defect centres and a nano-fibre Bragg cavity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-03703-z	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 Takashima Hideaki、Fukuda Atsushi、Shimazaki Konosuke、Iwabata Yusuke、Kawaguchi Hiroki、Schell Andreas W.、Tashima Toshiyuki、Abe Hiroshi、Onoda Shinobu、Ohshima Takeshi、Takeuchi Shigeki	4. 巻 11
2. 論文標題 Creation of silicon vacancy color centers with a narrow emission line in nanodiamonds by ion implantation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 1978 ~ 1978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.424786	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

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hideaki Takashima, Hiroki Kawaguchi, Konosuke Shimazaki, Toshiyuki Tashima, and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Fabrication of nanofiber Bragg cavities using a Neon ion beam
3. 学会等名 2020年 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会（オンライン）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川口洋生, 福重一樹, 田嶋俊之, 高島秀聡, 竹内繁樹
2. 発表標題 ナノダイヤモンド中の窒素欠陥中心におけるラビ振動の測定
3. 学会等名 2020年 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会（オンライン）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田嶋俊之、高島秀聡、Andreas W. Schell、Toan Trong Tran、Igor Aharonovich、竹内繁樹
2. 発表標題 hBN 欠陥中心とナノファイバブラック共振器のカップリング実験
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Takashima, Atsushi Fukuda, Toshiyuki Tashima, Andreas W. Schell, and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Fabrication of nanofiber Bragg cavity with high Q factor using a He ion microscope
3. 学会等名 第38回電子材料シンポジウム 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideaki Takashima, Atsushi Fukuda, Hironaga Maruya, Toshiyuki Tashima, Andreas W. Schell, and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Fabrication of high-Q factor nanofiber Bragg cavity using a helium ion microscope
3. 学会等名 AVS 66th ISE 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田嶋俊之、高島秀聡、竹内繁樹
2. 発表標題 NFBC結合ダイヤモンド中心のファイバ経由光励起・検出の実現
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideaki Takashima, Atsushi Fukuda, Hiroki Kawaguchi, Kazuki Fukushige, Konosuke Shimazaki, Toshiyuki Tashima, and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Fabrication of nanofiber Bragg cavity with lower acceleration voltage to avoid process damage
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hideaki Takashima, Keita Ishihara, Hironaga Maruya, Toshiyuki Tashima, Andreas Schell, Toan. T. Tran, Igor Aharonovich and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Determination of the dipole orientation of a single defect in hexagonal boron nitride using vector beam
3. 学会等名 Cleo/Europe-EQEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiyuki Tashima, Hideaki Takashima and Shigeki Takeuchi
2. 発表標題 Enhanced direct optical excitation of an NV center via Nanofiber Bragg-cavity : A numerical simulation
3. 学会等名 Cleo/Europe-EQEC 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田嶋俊之、高島 聡、Andreas Schell、Toan T. Tran、Igor Aharonovich、竹内繁樹
2. 発表標題 hBN 欠陥中心とナノファイバブラック共振器のカップリング実験
3. 学会等名 2019年日本物理学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福重一樹、川口洋生、田嶋俊之、高島秀聡、竹内繁樹
2. 発表標題 3次元磁場制御によるナノダイヤモンド中単一窒素欠陥中心の軸方向同定
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高島秀聡、石原奎太、丸谷浩永、田嶋俊之、野原紗季、岡本亮、Andreas Schell、Toan Trong Tran、Igor Aharonovich、竹内繁樹
2. 発表標題 六方晶窒化ホウ素中の単一結晶欠陥の双極子方向解析
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 嶋崎幸之介、川口洋生、高島秀聡、Takuya F. Segawa, Frederick T.-K. So, 寺田大紀、小野田忍、大島武、白川昌宏、竹内繁樹
2. 発表標題 極微ナノダイヤモンド中へのSiVセンターの作製
3. 学会等名 第44回量子情報技術研究会 (QIT44)
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
---------------------------	-----------------------	----

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