

令和 4 年 5 月 3 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：19K03700

研究課題名(和文)量子中継器に向けた1.5 $\mu\text{m}$ 帯且つ常温動作する固体中の単一Er欠陥中心の機構解明

研究課題名(英文)The elucidation of mechanism of defect centers in solid on quantum telecommunication by the ion-plantation at room temperature toward quantum repeater

研究代表者

田嶋 俊之(Tashima, Toshiyuki)

京都大学・工学研究科・特定研究員

研究者番号：40437356

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)：光量子情報通信では、1.5 $\mu\text{m}$ 帯域が情報の損失が少ないことから情報の伝送で使用される。現在、情報伝送間を中継する装置では可視光波長域を発光するイオンや原子が使用される。そのため、通信上に情報を送るためには可視光と1.5 $\mu\text{m}$ 帯域で光波長変換が必要となる。本研究では、1.5 $\mu\text{m}$ 帯域で動作が期待される固体中の単一Er欠陥中心が持つ機構の解明やこれらを量子中継器として活用できないかという課題解決に向けた研究を行っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安全で安心な生活を築くうえで、情報化社会における正確な情報伝送が行えるシステムの構築は重要な課題である。情報伝送間の損失は少ない方がよく1.5 $\mu\text{m}$ 帯で直接且つ常温で動作する長距離間を繋ぐ量子中継器は、量子情報通信において重要な課題である。本研究において行った中継器として役立つ可能性がある欠陥中心に対して、1.5 $\mu\text{m}$ 帯での発光の確認は、この課題解決に向けて進展したことを意味している。

研究成果の概要(英文)：On optical quantum information network, telecom wavelength is very important because of low loss of the information via the network. Currently, the media for quantum repeater uses ion or atom with visible optical wavelength and then optical conversion from visible to telecom wavelength is needed. In this research, we study the media with telecom wavelength and how to use the media for the quantum repeater.

研究分野：量子情報

キーワード：固体中の欠陥中心

## 1. 研究開始当初の背景

量子情報通信は、従来の通信と比べて物理法則に基づいた暗号通信など高い安全性が期待されている。量子情報通信では、 $1.5\mu\text{m}$  帯域の波長の光が使用されるが、長距離通信になるとこの帯域でも情報の伝送損失が大きくなるため、情報の伝送損失を如何に低減するかということが重要な課題としてある。

この課題の解決に向けて、量子中継器がある。現在、この量子中継器の情報担体としてイオンや原子を用いた研究が盛んである。これらの多くは、可視光波長域( $0.6\sim 0.8\mu\text{m}$  帯)での発光を持つ。また、一時的に情報を保存するのに使用する量子スピン状態に対して高度な量子情報処理操作を行える一方で、イオンや原子における量子スピン操作には低温または、極低温が必要とされ、実社会でのインフラ設備を考慮したとき装置の大型化、コストの増大を生む。

近年、量子中継器として期待されているダイヤモンド中の窒素複合欠陥中心(以下、NV 中心)が着目されている。常温動作且つ量子スピンのコヒーレンスが長いという特長を持ち有望視されている。光波長域は、上述のように可視域の  $0.6\mu\text{m}\sim 0.75\mu\text{m}$  である。しかしながら、これらの可視光波長での発光は、 $1.5\mu\text{m}$  帯域へ光波長変換を中継器において行う必要がある。これは、スピンと光の間の情報の転写や光波長変換時の損失が懸念される。

それゆえ、 $1.5\mu\text{m}$  帯域且つ常温で動作する原子やイオンなどによる量子中継器が期待されるが、現在、 $1.5\mu\text{m}$  帯域の光波長を持つ Er 原子は、量子スピン操作時に低温や極低温が必要とされる [1, 2]。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、 $1.5\mu\text{m}$  帯域且つ常温動作する固体中の欠陥中心の作製を行い、上述した課題解決を目指す。

常温において  $1.5\mu\text{m}$  帯の発光ができるダイヤモンド中にイオン注入されたアンサンブルの Er 欠陥中心(以下、ErV 中心)が作製された [3]。これは、量子中継器の新たな候補になると考えている。現在、ErV 中心の発光強度の弱さが原因で単一 ErV 中心における発光が確認されておらず未解明な部分が多い。

本研究では、常温且つ光通信波長帯域 ( $1.5\mu\text{m}$  帯域) で中継器として動作する可能性が期待される Er 原子をダイヤモンド中にイオン注入して得られる Er 欠陥中心を作製し、この欠陥中心が持つ光子やスピンの特性を明らかにして Er 欠陥中心の機構を解明することで中継器としての可能性を検証する。ダイヤモンド中に Er 原子をイオン注入しアニールして作製されたアンサンブルの Er 欠陥中心の作製条件を検討する。また、単一欠陥中心を作製する。そして、アンサンブルの Er 欠陥中心の光学特性評価、欠陥中心が持つ量子スピンの光磁気共鳴現象 (ODMR) の観測を目指す。

また、欠陥中心の効率的な光励起や量子スピン配向性の効率的な選定に関する研究、量子情報通信上で必要となる光ファイバとの結合などの研究を行い、中継器の実現に向けた基盤研究を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、ダイヤモンド中に Er 原子をイオン注入し、ErV 中心を作製した。まず、SRIM によりイオン注入量や深さのシミュレーションを行った。これらの結果をもとにダイヤモンド中の欠陥中心を作製する上で重要となるイオン注入条件は、イオン注入量(加速度等)、イオン注入時の温度、アニールの温度と時間を検討した。ダイヤモンド基板は、サイズが  $2\text{mm}\times 2\text{mm}\times 1\text{mm}$  で、面方位 [100] を持つダイヤモンドを使用しイオン注入を行った。ダイヤモンド基板は、表裏がわかるように角に切り欠けを入れて行った。それぞれの条件に対して、ダイヤモンド基板を 2 枚ずつ用いてアンサンブルの欠陥中心の作製を行った。イオン注入量は、 $1\sim 2\times 10^{13}/\text{cm}^3\sim 1\sim 2\times 10^{15}/\text{cm}^3$  オーダーで行い、最後にアニールを行いアンサンブルの欠陥中心を作製した。

表面の洗浄を、熱混酸等で行った。発光は、確認できたが非常に弱くそれ以上の評価を行うことは困難であった。また、最近、NV 中心のイオン注入温度により発光特性が変わることが確認されており [4]、イオン注入時の温度を変えて、上記で用いたイオン注入量、アニール温度と時間を用いてアンサンブルの欠陥中心を作製した。

イオン注入は、イオンテクノセンターなどを利用した。作製したサンプルの光学特性評価は、自作のシンプルな共焦点レーザー顕微鏡を構築し行った。励起光は  $980\text{nm}$  レーザーを使用し、励起光強度は  $30\text{mW}$  とした。

#### 4. 研究成果

図1(a)と(b)に、アニール後のダイヤモンド基板の写真と基板全体の光学顕微鏡写真を示す。イオン注入時の温度を高温(温度1と2、1は2より少し低温)で行った。図1(a)の1と2は、温度1の結果を示す。図(b)の3と4は、温度2の結果を示す。ダイヤモンド基板は、表面が黒くなっているのが確認された。温度2で行ったサンプルは、温度1で行ったサンプルの表面と比べて表面でのダイヤモンド基板の炭化が非常に激しかった。一方で、イオン注入時の温度2のダイヤモンド基板は、炭化は少ないが若干黄色味がかっていた。イオン注入時、温度変化を与えることをしなかったサンプルと比べてほとんど表面に関しては変わらないことがわかった。しかしながら、高温でも、イオン注入量( $10^{16}/\text{cm}^3$  オーダー)を多くして起こっていた表面の炭化が、イオン注入量が  $10^{15}/\text{cm}^3$  オーダーでも起こることが分かった。共焦点レーザー顕微鏡により欠陥中心の評価を行うために、熱混酸により表面の炭化の除去を行った。その結果を図1(c)に示す。温度1でイオン注入を行った方が、温度2に比べてイオン注入した場所の有無により、差がより確認された。

次に、共焦点レーザー顕微鏡を用いて、発光の確認を行った。光波長が980nmを持つCWの励起光(最大強度: 30mW)を温度1と温度2でイオン注入したサンプルに照射した。温度2のサンプルは、ダイヤモンド基板中に作製したErV中心からの発光は観測できなかった。一方で、温度1のサンプルは、ErV中心を作製した場所から発光を観測した。また、イオン注入時の温度変化をしなかったサンプルと比べて、高温にしたサンプルは、欠陥中心からの発光増強したことでパワーメータにより微弱な強度を観測できた。ErV中心からの発光を確認するため、励起光の偏光を変化させることで、発光強度を測定した。発光強度の変化が確認されたことから欠陥中心からの発光であると考えられる。

イオン注入時の温度変化でも、イオン注入量を減少させても表面での炭化が激しく起こることが確認された。これは、イオン注入時における表面層が荒くなることだけでなく、イオン注入時の温度を変化させることで起こる炭化が影響していると推察される。そのため、単一のEr欠陥中心の作製に向けて、イオン注入量の調整に加えて、イオン注入時の温度を調整することでアンサンプルのEr欠陥中心の発光が増強できる可能性がある。

上記、主研究に加えて量子情報通信で用いられる光ファイバと欠陥中心(ここでは、hBNによる二次元多層薄膜中の欠陥中心)との結合に関する研究や光ファイバ上で如何に効率的に光励起(ここでは、NV欠陥中心)を行うか、量子スピン配向性の効率的な選定という研究を行った。また、欠陥中心作製に関して他の欠陥中心の作製も試みることで、主研究の欠陥中心作製の条件等の検討に役立てた。

#### <引用文献>

- [1] B. Lauritzen et al., "Telecommunication-Wavelength Solid-State Memory at the Single Photon Level" Phys. Rev. Lett. 104, 080502 (2010).
- [2] C. Yin et al., "Optical addressing of an individual erbium ion in silicon" Nature 497, 91 (2013).
- [3] J. Cajzl et al., "Erbium ion implantation into diamond - measurement and modelling of the crystal structure" Chem.Phys. 19, 6233 (2017).
- [4] G. Kucsko et al., "Critical Thermalization of a Disordered Dipolar Spin System in Diamond" Phys. Rev. Lett. 121, 023601(2018).

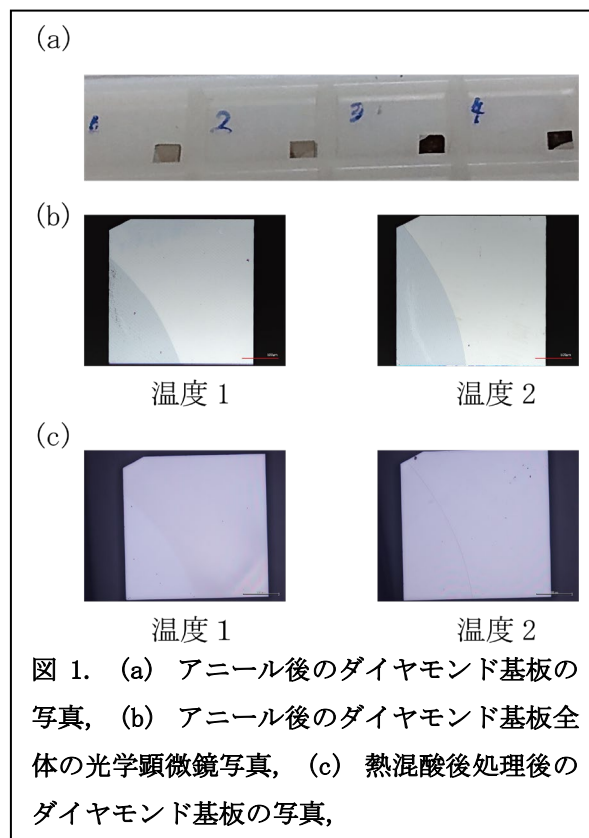


図1. (a) アニール後のダイヤモンド基板の写真, (b) アニール後のダイヤモンド基板全体の光学顕微鏡写真, (c) 熱混酸後処理後のダイヤモンド基板の写真,

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Fukushige Kazuki, Kawaguchi Hiroki, Shimazaki Konosuke, Tashima Toshiyuki, Takashima Hideaki, Takeuchi Shigeki                  | 4. 巻<br>116                   |
| 2. 論文標題<br>Identification of the orientation of a single NV center in a nanodiamond using a three-dimensionally controlled magnetic field | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>264002 ~ 264002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0009698   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                           |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名<br>Takashima Hideaki, Maruya Hironaga, Ishihara Keita, Tashima Toshiyuki, Shimazaki Konosuke, Schell Andreas W., Tran Toan Trong, Aharonovich Igor, Takeuchi Shigeki | 4. 巻<br>7                 |
| 2. 論文標題<br>Determination of the Dipole Orientation of Single Defects in Hexagonal Boron Nitride   | 5. 発行年<br>2020年           |
| 3. 雑誌名<br>ACS Photonics   | 6. 最初と最後の頁<br>2056 ~ 2063 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsp Photonics.0c00405  | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Tashima Toshiyuki, Takashima Hideaki, Takeuchi Shigeki  | 4. 巻<br>27                  |
| 2. 論文標題<br>Direct optical excitation of an NV center via a nanofiber Bragg-cavity: a theoretical simulation | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>Optics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>27009 ~ 27016 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OE.27.027009  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名<br>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<br>11                |
| 2. 論文標題<br>Creation of silicon vacancy color centers with a narrow emission line in nanodiamonds by ion implantation   | 5. 発行年<br>2021年           |
| 3. 雑誌名<br>Optical Materials Express  | 6. 最初と最後の頁<br>1978 ~ 1978 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1364/OME.424786   | 査読の有無<br>有                |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する              |

|   |                   |
|---|-------------------|
| 1. 著者名<br>Tashima Toshiyuki、Takashima Hideaki、Schell Andreas W.、Tran Toan Trong、Aharonovich Igor、Takeuchi Shigeki | 4. 巻<br>12        |
| 2. 論文標題<br>Hybrid device of hexagonal boron nitride nanoflakes with defect centres and a nano-fibre Bragg cavity  | 5. 発行年<br>2022年   |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>1-7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-021-03703-z  | 査読の有無<br>有        |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する      |

[学会発表] 計4件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>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<br>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<br>第81回 応用物理学会秋季学術講演会            |
| 4. 発表年<br>2020年                          |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田嶋 俊之、高島 秀聡、Andreas Schell, Trong Toan Tran, Igor Aharonovich, 竹内 繁樹 |
| 2. 発表標題<br>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<br>日本物理学会 2019年秋季大会   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

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

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田島 俊之、 高島 秀聡、竹内 繁樹               |
| 2. 発表標題<br>NFBC結合ダイヤモンドNV中心のファイバ経由光励起・検出の実現 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会 第75回年次大会（2020年）           |
| 4. 発表年<br>2020年                             |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(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 |
|---------|---------|
|---------|---------|