

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82502

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03526

研究課題名(和文)電子スピンの量子状態変化を検出原理に持つカロリメータの開発

研究課題名(英文)Development of calorimeter based on change in quantum state of electron spin

研究代表者

小野田 忍 (Onoda, Shinobu)

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 先端機能材料研究部・上席研究員(定常)

研究者番号：30414569

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンド中の窒素・空孔(NV)センターは、超高感度量子センサとして知られている。本研究では、NVセンターを高感度温度計として利用し、X線検出器の一種であるカロリメータへ適用するための基礎研究を行った。具体的には、(1) NVセンターによる温度計測をさらに高感度化するためのアプローチとして量子もつれ状態に着目し、量子もつれ状態を生成するために不可欠な「NVセンターの多量子ビット化」技術の開発に成功した。また、(2) 硼素添加の単結晶ダイヤモンドが数K領域で超伝導を示す特徴に着目し、ダイヤモンドカロリメータ開発に必要な数K動作の超伝導量子干渉計(SQUID)の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

NVセンターを利用した量子センサは、社会実装を目指した研究開発が盛んに進められている。SQUIDも超高感度センサ等の製品に利用されている。本研究で成功したNVセンターの多量子ビット化や数K動作ダイヤモンドSQUIDは、実用化フェーズの既存技術をさらに高感度化できると期待され、社会的な意義は高いといえる。NVセンターの多量子ビットやダイヤモンドSQUIDの成果は、双方ともに世界で初めて成功した事例であり、これらを用いて新しいセンシング技術の研究が進むものと考えられ、学術的な意義も高い。

研究成果の概要(英文)：Nitrogen-Vacancy (NV) centers in diamond are known as highly sensitive quantum sensors. In this study, we carried out basic research to utilize the NV center as a highly sensitive thermometer and apply it to a calorimeter which is one of X-ray detectors. We have found following results; (1) Focusing on the entangled state as an approach to further increase the sensitivity of temperature measurement by the NV center, and the "multi-quantum bit based on NV center" technique that is indispensable for generating the entangled state was successfully developed. In addition, (2) focusing on the characteristic that boron-doped single crystal diamond exhibits superconductivity in the several K regions, we succeeded in developing Superconducting QUantum Interference Device (SQUID) of several K operations required for diamond calorimeter development.

研究分野：放射線工学

キーワード：ダイヤモンド NVセンター 超伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

X線天文学では、宇宙の主要な元素が放出するK線、L線を観測し、その起源に迫る試みがなされている。それには、2 eV以下のエネルギー分解能(E)を持つX線検出器が必要である。検出器の歴史を見ると、 ^{55}Fe 線源からの5.9 keVに対する E は、ガス検出器で0.5~1 keVであったが、半導体検出器で120 eVに改善し、カロリメータの出現で2 eV以下に達している。世界的な目標は $E < 2$ eV且つ、1000以上の多素子化と検出信号多重化の実現である。カロリメータは、吸収体に入射したX線のエネルギーを温度上昇として測定する検出器である。図1は遷移端温度計(Transition Edge Sensor: TES)型カロリメータの概略図である。TESは超伝導から常伝導に移る際に急激な抵抗変化を示す。それに伴いコイルを流れる電流が変化し、同時に磁束も変化する。磁束の変化をSQUID(Superconducting Quantum Interference Device)で検出する。吸収体の温度上昇(ΔT)はX線エネルギー(E)と比熱(C)から $\Delta T = E/C$ で与えられる。エネルギー分解能向上には大きな ΔT (つまり、小さな C)にすれば良い。動作温度(T)とデバイ温度(T_D)に対して $C \propto (T/T_D)^3$ となるため、通常は極低温(約100 mK)で動作するように設計される。

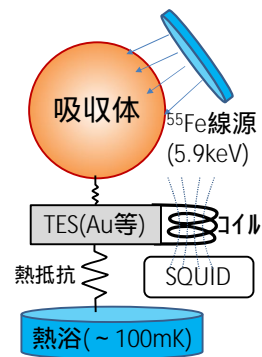


図1.カロリメータの動作原理

極低温で動作するカロリメータを数Kで動作させることができれば、従来よりも遥かに簡便・安価に人工衛星等に実装できるようになる。我々は次に挙げる理由により、カロリメータの構成材料・デバイスとしてダイヤモンドに着目した。

- ダイヤモンドは、一般的な吸収体よりデバイ温度が1桁以上も大きく、数Kで既存吸収体と同等の比熱となり、数K動作カロリメータに利用可能と考えられる。
- ダイヤモンド中の点欠陥の一種である窒素・空孔(NV)センターは、超高感度量子センサとして利用できることが知られている。特に室温動作の高感度磁気センサとしての研究例が多い。磁気センサは、NVセンターの持つ電子スピンの状態が磁場強度に依存することを利用して実現される。磁気センサとしての性能はSQUIDに匹敵すると言われており、NVセンターを含有するダイヤモンド粒子で $0.9 \text{ pT}/(\text{Hz})^{1/2}$ の感度が報告されている(Wrachtrup, J. Mag. Reson. 2016)。NVセンターを利用した磁気センサをSQUIDの代わりに利用することで、SQUIDの動作温度域よりも高い数Kにおける高感度計測が期待できる。
- 硼素添加の単結晶ダイヤモンドは数K領域で超伝導を示す特徴を持つ。超伝導の臨界温度を5~10 Kの範囲で自由に制御できることから、数Kで動作するカロリメータに利用できると考えられる。開発を目指すカロリメータの概略図を図2(a)に示す。従来のカロリメータの一部をダイヤモンドで置き換えることから、置換型構造と称する。
- NVセンターは磁場だけでなく、温度、歪み、電場等にも感度がある。NVセンターを温度計として利用すれば、TES及びSQUIDで検出する微小温度変化計測を代替できる可能性がある。開発を目指すカロリメータの概略図を図2(b)に示す。TES及びSQUIDから成る既存のカロリメータと異なる方式であることから新型構造と称する。

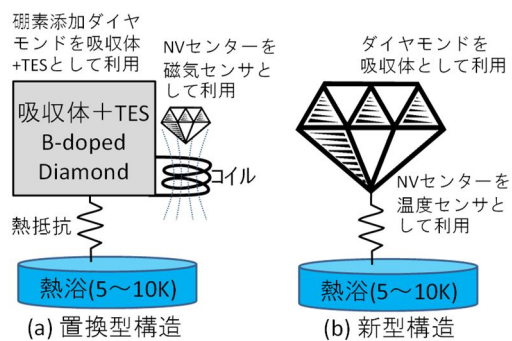


図2.提案する電子スピン型カロリメータの概略図

2. 研究の目的

既存のカロリメータは、吸収体、TES、SQUID、熱浴等から成り、吸収体の極微小な温度変化をTES・SQUIDで計測する。本研究では、NVセンターの電子スピンの磁場・温度特性を利用して微小な温度変化を捉えことのできる「電子スピン型カロリメータ」の開発を最終目標とした。大別して、(1)電子スピンを利用するために不可欠なNVセンター形成に係る研究、及び(2)硼素添加の単結晶ダイヤモンドが数K領域で超伝導を示す特徴に着目し、数K動作のダイヤモンドTESやSQUIDをカロリメータに適用するため、ダイヤモンドSQUIDの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 高感度計測を目指したNVセンターの多量子ビット化技術の開発

NVセンターは室温において利用されることが多いが、カロリメータでは極低温における磁場・温度計測が求められる。NVセンターは100 Kを下回ると温度計測の感度が鈍化するため、従来よりも高感度な計測が必要とされる。温度測定に限らず、磁場測定においても従来の磁気感度よりも高い感度を目指す必要がある。そこで、NVセンター間の量子もつれを利用して高感度計測する方法に着目した。そのためには、量子もつれ状態を生成し得るNVセンターの多量子ビット化が不可欠である。そこで、多量子ビット化へ向けて以下の実験を行った。

多量子ビット化に関する過去の経緯

2010年にNVセンターの持つ電子スピンの双極子双極子相互作用を用いる方式で2量子ビットが報告された (Neumann, Nat. Phys. 2010)。これは窒素原子(N)イオン注入によって実現されている。Nが物質を進む際、ストラッグリングと呼ばれるランダムな現象により、停止位置がバラついてしまう。2量子ビットを実現するには、nmオーダーの距離にNVセンターを配置させなければならないが、ストラッグリングに起因する停止位置の不確実性が問題となる。加えて、可能な限り同じ位置にNイオンを注入することが求められる。これを実現するため、ダイヤモンド上に電子線描画法で穴を開けたレジストマスクを介したNイオン注入が採用されている (Jakobi, J. Phys. 2016)。電子線描画法による穴の直径は数十nm程度であり、さらに小さな穴が求められている。この問題を解決するために、窒素分子(N₂)が用いられる (Yamamoto, Phys. Rev. B, 2013)。N₂イオンをダイヤモンドに照射すると、衝突した瞬間にN₂が2つのNに分かれる。その後、Nはダイヤモンド中を進み、ストラッグリングの範囲で停止する。これは、電子線描画法による穴の大きさが限りなくゼロに近い状態に相当する。N₂イオン注入法を拡張し、窒素のみから成る窒素クラスターが利用できれば、さらなる多量子ビット化が可能となる。しかし、その形成が困難であることから、今まで取り組まれてこなかった。本研究では、窒素のみから成る窒素クラスターに拘らず、窒素を含む有機化合物イオンを使用することで、今までよりも多い数のNVセンターを集積することに取り組んだ。

多量子ビット化に向けた新しいイオン源の開発

我々は、有機化合物の1つであるアデニン(C₅N₅H₅)に着目した。アデニンはNを5個含む有機化合物分子である。アデニンの粉末を原料とし、C₅N₄H_nイオンを加速してイオン注入に使用した。加速エネルギーは65 keV、照射フルエンスは10⁸ /cm²とした。試料はマイクロ波プラズマ化学気相成長(CVD)法によって、高温高压合成Ib型(100)単結晶基板上に成長した¹²C濃縮ダイヤモンド薄膜(¹²C:99.95%)を使用した。イオン照射後、1000℃で2時間の熱処理を施すことでNVセンターを形成した。NVセンターの観察は共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡(CFM)を用いて行った。軸の異なるNVセンターの数を、光検出磁気共鳴(ODMR)スペクトル法を用いて同定した。最後に近接したNVセンター間の双極子双極子相互作用を電子電子二重共鳴(DEER)法によって調べ、相互作用の強さとNVセンター間の距離を評価し、量子もつれ状態を生成し得るNVセンターの多量子ビットであるかを検証した。

(2) ダイヤモンド SQUID の作製技術の開発

超伝導ダイヤモンドは、硼素濃度・結晶面方位により超伝導転移温度 T_C を0-10 Kの範囲で制御可能で、かつ高い上部臨界磁場(>10 T)を有し、酸処理などの過激な酸化や大電流に対して特性が劣化せず、物理接触に強い。この優れた特性から超伝導デバイス応用が期待されている。一方、デバイス応用に関する報告は一件 (Mandal, ACS Nano, 2011) に留まり、かつ多結晶体を用いていたため動作温度(<1 K)や臨界磁場(<4 T)に課題があった。特に動作温度は、図2のような複合システムの構築には重要であり、液体ヘリウム温度4.2 K以上での動作が望まれる。超伝導ダイヤモンドでこの温度以上の T_C が得られるのは(111)単結晶体のみである。そこで本研究では、(111)単結晶体に適した微細加工技術・ジョセフソン接合の作製技術を確認し、高性能ダイヤモンド SQUID の開発に取り込んだ。

単結晶超伝導ダイヤモンドの微細加工

金属マスク(Ti/Au)を用いた選択エッチングおよび選択成長を利用して超伝導ダイヤモンドのマイクロ・ナノパターンを形成し、形成プロセスの加工性能や超伝導特性に対する影響を評価した。エッチングには酸素ガスによる誘導結合型プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE)結晶成長には、トリメチルボロンを硼素源としたMPCVD法を用いた。走査型電子顕微鏡(SEM)原子間力顕微鏡(AFM)により形状を評価し、低温4端子測定により超伝導特性を評価した。

単結晶ダイヤモンド SQUID の開発

本研究では、単結晶を活かした2種類のジョセフソン接合・SQUIDを作製した。その1つはステップエッジ構造ジョセフソン接合型 SQUID である (図3)。この接合では、 T_C の異なる(111)面(10 K)と(001)面(4 K)との境界面に弱結合ができる。この作製には、で確立した選択エッチング・選択成長法を活用した。もう1つのSQUIDは、収束イオンビーム(FIB)ナノトレンチ上への成長により形成される結晶粒界を弱結合とする SQUID である。両接合形成には、ステップエッジ角度、トレンチ深さが重要なパラメータであり、それらと超伝導特性、ジョセフソン接合特性の相関を解明することで、SQUID の特性向上に取り組んだ。

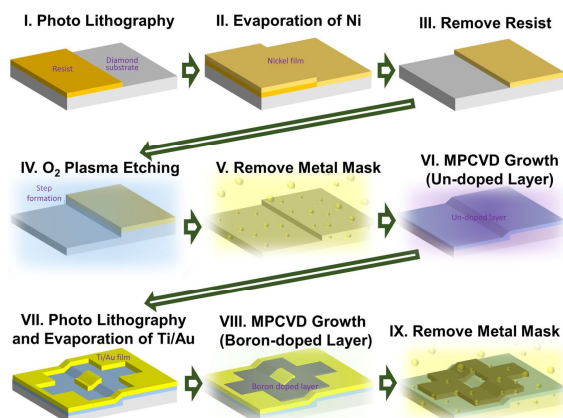


図3. 単結晶ダイヤモンド SQUID の作製フロー
詳細: T. Kageura, et al., Sci. Rep. 15214 (2019).

4. 研究成果

(1) 高感度計測を目指した NV センターの多量子ビット化

$C_5N_4H_n$ イオンを注入した後、1000 °C で 2 時間の熱処理を施し、CFM 測定を行った。CFM 像を図 4(a) に示す。□ は 1 つ、○ は 2 つ、△ は 3 つの NV センターがスポットに含まれることを示す。NV センターの数は、ODMR スペクトル法を用いて同定した。図 4(b) に ODMR スペクトルを示す。上から順にスポットに含まれる NV センターの数が 1 つ、2 つ、3 つの場合の測定例を示す。ディップの数が 2 の時が 1 つの NV センター、4 つの時が 2 つの NV センター、6 つの時が 3 つの NV センターを意味する。

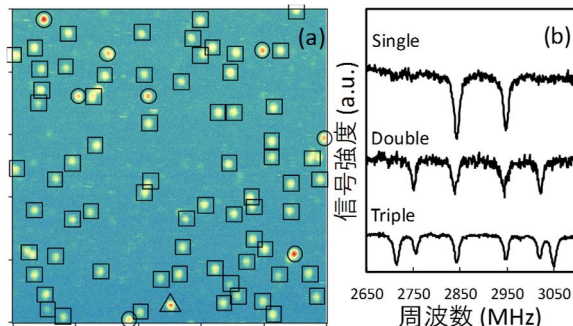


図 4. (a)CFM 像 (20 μ m \times 20 μ m), (b)ODMR スペクトル

スポット内に含まれる 3 つの NV センター (NV_A , NV_B , NV_C) 間の距離を、電子電子二重共鳴 (DEER) 法を用いて同定した。図 5(a) に 3 つの近接した NV センターの模式図を示す。図 5(b) に DEER 法のパルスシーケンス、図 5(c) に NV_A - NV_C 間の DEER 測定結果を示す。DEER 法では、1 つの NV センターをセンサとして利用し、相手の NV センターからの磁場を測定することにより、2 つの NV センター間の相互作用の強さを測定できる。図 5(c) では NV_A をセンサとして NV_A - NV_C 間の相互作用の強さを測定した結果である。振動数が大きいほど相互作用が強いといえる。 NV_A - NV_C 、 NV_C - NV_B 、 NV_A - NV_B 間の相互作用の強さは 53.0 kHz、24.1 kHz、4.6 kHz であると観測された。相互作用の強さから NV センター間の距離を求めることができる。計算の結果、 NV_A - NV_C 、 NV_C - NV_B 、 NV_A - NV_B 間の距離 (中央値) は 8.8 nm、11.5 nm、19.9 nm であった。以上のように、NV センター同士は凡そ 20nm 以下の範囲に形成され、量子もつれ状態を作り出し得る条件を満たしていることが分かった。

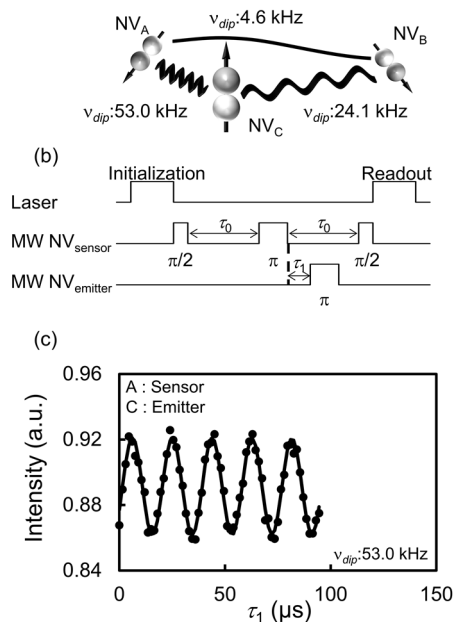


図 5. (a)3 つの近接した NV センターの概略図, (b)DEER 法のパルスシーケンス, (c) NV_A - NV_C 間の DEER 測定結果
詳細: M. Haruyama, S. Onoda et al., Nat. Comm. (2019).

(2) ダイヤモンド SQUID の作製技術

単結晶ダイヤモンドの微細加工

選択エッチングを用いることで、硼素添加ダイヤモンド細線を幅 50 nm までパターンが崩れることなく加工できることを示した。また、選択成長・選択エッチング共に線幅 1 μ m であっても転移温度が 10.2 K を維持することを明らかにした (図 6)。この温度は、バルク体を含め報告されている中でダイヤモンドとしては最も高い T_c であり、膜中の硼素濃度も $2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ と最も高い値であった。またその臨界電流密度 J_c は線幅の減少と共に増加することが明らかとなり、幅 2 μ m で最大 J_c 917,000 Acm^{-2} @ 2 K が得られた。この値はこれまでに報告されたダイヤモンドで最も高い値であった。上記で得られた高い超伝導転移温度、臨界電流密度は、マイクロ SQUID をはじめとする超伝導微細デバイスに本技術が適していることを示した。

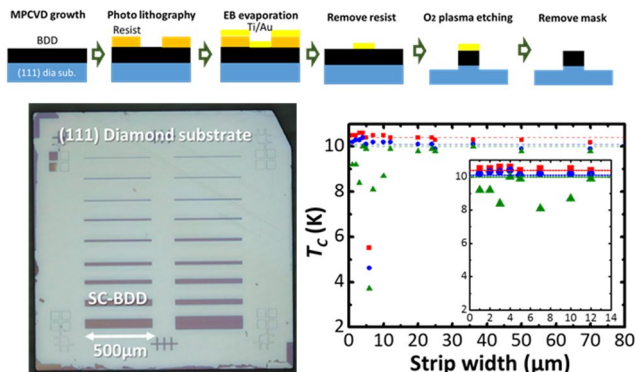


図 6. 選択エッチングによる超伝導ダイヤモンドの微細加工
詳細: T. Kageura, et al., DRM 90, 181 (2018).

高い超伝導転移温度、臨界電流密度は、マイクロ SQUID をはじめとする超伝導微細デバイスに本技術が適していることを示した。

単結晶ダイヤモンド SQUID 動作実証

ステップエッジ構造ジョセフソン接合において、ステップ角度は再成長層のMPPCVD条件によって制御できることを実証した(図7(a))。ステップ角度が高い($>80^\circ$)場合、上面と下面の超伝導体間にクラックが生じ、超伝導層が接触しないためにジョセフソンが形成されなかった。一方、ステップ角度が低い場合($<20^\circ$)、上部と下部の超伝導体がコヒーレントに結合し、1つの超伝導体としてふるまった(接合にならなかった)。ステップ角度が 50° 前後において、二段階の超伝導転移が得られ、ジョセフソン接合が形成された。この角度は、111面と100面がなす角度(55°)と概ね一致している。実際、この角度における2段階の超伝導転移はそれぞれ10 Kと4 Kで起きており(図7(b))、この温度はバルクにおける(111)面と(100)面の T_C と一致する。この角度において形成された接合は、ヒステリシスのない超伝導-弱い超伝導-超伝導(SNS)型の振る舞いと 5800 Acm^{-2} の高い臨界電流密度を示している。この接合を2つ並列に接続したDC-SQUIDは、磁束-電圧特性から2.6 Kにおいて動作が実証された(図7(c))、この温度は多結晶の先行例($<1 \text{ K}$)をはるかに上回っている。一方、ステップエッジ構造を作製する場合は自然と100面が形成されてしまい、その T_C の上限4 KにSQUIDの動作温度が律速されることも明らかとなった。そこで、次に示す111面を活かしたSQUIDの形成に取り組んだ。

FIBナノトレンチ型ジョセフソン接合では、トレンチ深さが浅い場合超伝導体がコヒーレントに接続し、トレンチが深い場合、超伝導体間が断裂して残留抵抗が観測された。これはステップエッジ角度と類似した振る舞いである。トレンチ深さを最適化することで、 $\sim 10 \text{ K}$ でジョセフソン接合の形成が達成され、この接合を用いて10 KでのSQUID動作を達成した(論文投稿中)。この値はダイヤモンドSQUIDの中で最高値であり、Nbなど他の超伝導材料を用いたSQUIDに匹敵する。また、動作温度が液体ヘリウム温度4.2 Kを上回ったことで、図2に示すような複合システムなどを含む、様々な応用へダイヤモンドを用いる研究基盤が整った。

以上の様に、本研究では単結晶超伝導ダイヤモンドSQUID動作を世界で初めて実現し、動作温度を10 Kまで向上させた。このように10 Kで動作するダイヤモンドSQUIDが開発できたことにより、ダイヤモンドカローリメータ開発が大きく進展した。

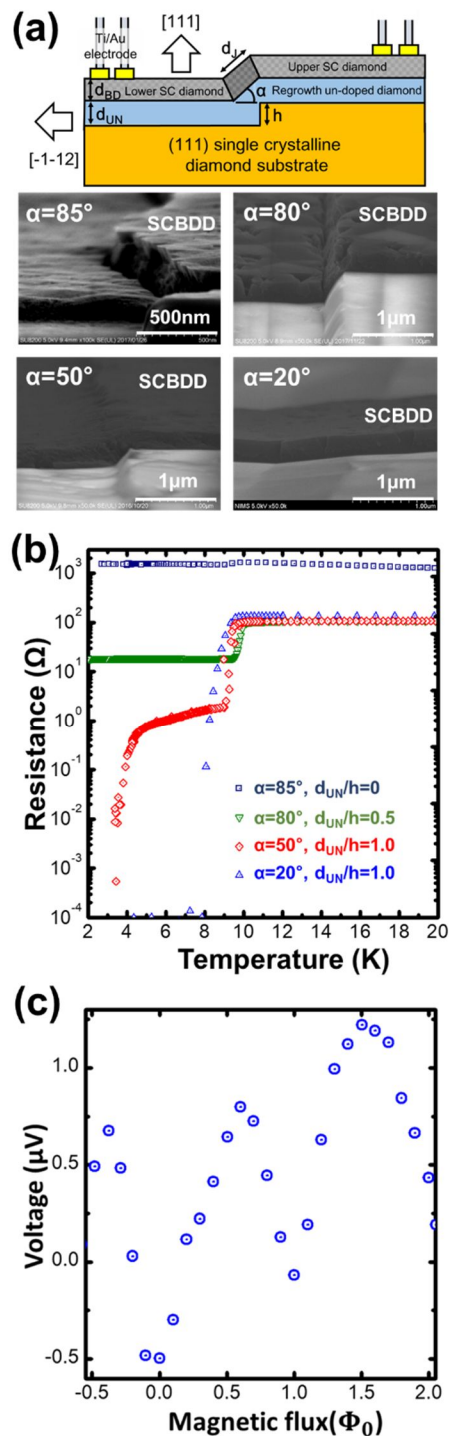


図7.ステップエッジ構造ジョセフソン接合

(a)構造模式図とSEM像 (b)抵抗-温度特性

(c)SQUIDの電圧-磁束特性

詳細: T. Kageura, et al., Sci. Rep. 15214 (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kageura Taisuke, Hideko Masakuni, Tsuyuzaki Ikuto, Morishita Aoi, Kawano Akihiro, Sasama Yosuke, Yamaguchi Takahide, Takano Yoshihiko, Tachiki Minoru, Ooi Shuuichi, Hirata Kazuto, Arisawa Shunichi, Kawarada Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Single-crystalline boron-doped diamond superconducting quantum interference devices with regrowth-induced step edge structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15214(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-51596-w	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 Haruyama Moriyoshi, Onoda Shinobu, Higuchi Taisei, Kada Wataru, Chiba Atsuya, Hirano Yoshimi, Teraji Tokuyuki, Igarashi Ryuji, Kawai Sora, Kawarada Hiroshi, Ishii Yu, Fukuda Ryosuke, Tanii Takashi, Isoya Junichi, Ohshima Takeshi, Hanaizumi Osamu	4. 巻 10
2. 論文標題 Triple nitrogen-vacancy centre fabrication by C5N4Hn ion implantation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 2664(1-9)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-019-10529-x	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 小野田 忍、大島 武、磯谷 順一、寺地 徳之、川原田 洋、谷井 孝至、加田 渉、波多野 睦子	4. 巻 EDD-20
2. 論文標題 ワイドバンドギャップ半導体を利用した量子センサ開発	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会研究会資料	6. 最初と最後の頁 17-22
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 Kawai Sora, Yamano Hayate, Sonoda Takahiro, Kato Kanami, Buendia Jorge J., Kageura Taisuke, Fukuda Ryosuke, Okada Takuma, Tanii Takashi, Higuchi Taisei, Haruyama Moriyoshi, Yamada Keisuke, Onoda Shinobu, et al.	4. 巻 123
2. 論文標題 Nitrogen-Terminated Diamond Surface for Nanoscale NMR by Shallow Nitrogen-Vacancy Centers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 3594 ~ 3604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.8b11274	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 Kageura Taisuke, Hideko Masakuni, Tsuyuzaki Ikuto, Amano Shotaro, Morishita Aoi, Yamaguchi Takahide, Takano Yoshihiko, Kawarada Hiroshi	4. 巻 90
2. 論文標題 Superconductivity in nano- and micro-patterned high quality single crystalline boron-doped diamond films	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Diamond and Related Materials	6. 最初と最後の頁 181 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.10.013	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 6件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 木村 晃介、樋口 泰成、小野田 忍、加田 渉、園田 隆弘、川原田 洋、渡邊 幸志、磯谷 順一、花泉 修、大島 武
2. 発表標題 C5N5H5イオン注入によるNVセンターの形成
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 Onoda Shinobu
2. 発表標題 Electron beam irradiation and annealing to enhance the creation yield of NV centres
3. 学会等名 QST IRI Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Onoda Shinobu, Haruyama Moriyoshi, Higuchi Taisei, Kada Wataru, Chiba Atsuya, Hirano Yoshimi, Teraji Tokuyuki, Igarashi Ryuji, Kawai Sora, Kawarada Hiroshi, Ishii Yu, Fukuda Ryosuke, Tanii Takashi, Isoya Junichi, Ohshima Takeshi, Hanaizumi Osamu
2. 発表標題 Implantation of nitrogen compound ion beam for fabricating coupled triple NV centres
3. 学会等名 Hasselt Diamond Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春山 盛善、小野田 忍、樋口 泰成、加田 渉、千葉 敦也、平野 貴美、寺地 徳之、五十嵐 龍治、河合 空、川原田 洋、石井 邑、福田 諒介、谷井 孝至、磯谷 順一、大島 武、花泉 修
2. 発表標題 C5N4Hnイオン注入による双極子結合したNVセンターの形成
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田 忍、磯谷 順一、寺地 徳之、川原田 洋、谷井 孝至、加田 渉、波多野 睦子、大島 武
2. 発表標題 ワイドバンドギャップ半導体を利用した量子センサ開発
3. 学会等名 電子デバイス研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田忍
2. 発表標題 ダイヤモンド中のNVセンターを多量子ビット化する技術
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田忍
2. 発表標題 量子ビームにより作製する量子センサの形成技術
3. 学会等名 第70回放射線科学研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Onoda Shinobu
2. 発表標題 Engineering colour centres with various beam technologies: from single to ensemble NV centres in diamond
3. 学会等名 30th International Conference on Diamond and Carbon Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田 忍
2. 発表標題 量子ビームにより作製した量子センサによる量子センシング技術
3. 学会等名 日本原子力学会創立60周年シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田 忍
2. 発表標題 電子線照射・イオン注入によるNV中心の作製技術
3. 学会等名 技術情報協会セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小野田忍, 春山盛善, 樋口泰成, 加田渉, 千葉敦也, 平野貴美, 寺地徳之, 五十嵐龍治, 河合空, 川原田洋, 石井邑, 福田諒介, 谷井孝至, 磯谷順一, 花泉修, 大島武
2. 発表標題 有機化合物イオン注入によるNVセンターの多量子ビット形成
3. 学会等名 第32回ダイヤモンドシンポジウム
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 S. Onoda, M. Haruyama, T. Higuchi, W. Kada, A. Chiba, Y. Hirano, T. Teraji, R. Igarashi, S. Kawai, H. Kawarada, Y. Ishii, R. Fukuda, T. Tanii, J. Isoya, T. Ohshima, O. Hanaizumi
2 . 発表標題 Fabrication of coupled NV centers by adenine ion beam implantation
3 . 学会等名 The 1st International Forum on Quantum Sensing (IFQS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S. Kawai, T. Sonoda, T. Kageura, H. Kawarada
2 . 発表標題 Nanoscale NMR detection using shallow NV center in nitrogen-terminated diamond
3 . 学会等名 The 3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLim-3) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Kageura, I. Tsuyuzaki, S. Amano, A. Morishita, M. Tachiki, S. Ooi, S. Arisawa, Y. Takano, H. Kawarada
2 . 発表標題 Diamond Josephson Junctions and SQUID for Superconducting Q-bit
3 . 学会等名 The 1st International Forum on Quantum Sensing (IFQS2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Kageura, I. Tsuyuzaki, S. Amano, A. Morishita, T. Sasagawa, H. Kawarada
2 . 発表標題 Superconductivity in fine patterned single crystalline boron-doped diamond films
3 . 学会等名 The 3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLIM-3) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kageura, I. Tsuyuzaki, T. Yamaguchi, Y. Takano and H. Kawarada
2. 発表標題 Superconductivity in high quality single crystal boron-doped diamond films with Tc above 10K
3. 学会等名 29th International Conference on Diamond and Carbon Materials (ICDCM 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kageura, M. Hideko, I. Tsuyuzaki, Y. Takano, M. Tachiki, S. Ooi and H. Kawarada
2. 発表標題 Superconductivity in Thin- and Micro-Structured Boron-Doped Diamond
3. 学会等名 The 12th New Diamond and Nano Carbons Conference (NDNC 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 ダイヤモンド単結晶およびその製造方法	発明者 小野田忍、春山盛善、大島武、千葉敦也、平野貴美、他	権利者 量子科学技術研究開発機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-155987	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	蔭浦 泰資 (Kageura Taisuke) (20801202)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・NIMSポスドク研究員 (82108)	
研究分担者	加田 渉 (Kada Wataru) (60589117)	群馬大学・大学院理工学府・助教 (12301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	川原田 洋 (Kawarada Hiroshi) (90161380)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	
研究 協力者	春山 盛善 (Haruyama Moriyoshi)	群馬大学・大学院理工学府・博士課程 (12301)	