

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01502

研究課題名(和文)ダイヤモンド電子スピン多周波数量子制御による超高感度ベクトル磁場センサ

研究課題名(英文) Highly-sensitive vector magnetic field sensor using multi-frequency quantum manipulation of electric spins in diamond

研究代表者

早瀬 潤子(伊師潤子)(HAYASE, Junko)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：50342746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：ダイヤモンド窒素-空孔(NV)中心は次世代の量子センサとして注目されている。本研究では、多周波数マイクロ波(MW)に用いることで、異なる電子スピン共鳴周波数を有するNV中心の電子スピン状態を独立かつ同時に制御する、「多周波数MW制御量子センシング技術」を提案し、実験的に実証することに成功した。その結果、本研究で提案した多周波数MW制御法が、磁場や温度センシングの高感度化・高機能化に非常に有効であることが示された。本手法は、あらゆる種類のパルス光検出磁気共鳴法に適用可能な汎用性の高い技術であり、NV量子センサの発展に大きく寄与すると期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、NV中心に多周波数MW制御法を適用することで、他のあらゆる磁場センサや温度センサと一線を画す優れた性能をもつベクトル磁場センサや磁場・温度複合センサを実現できる可能性が示された。この技術は、バイオ・医療・環境・エネルギー、基礎科学に渡る広範な分野で革新をもたらすと期待されるため、社会的・学術的に大きな意味をもつ。また本研究成果は、より高度なダイヤモンド電子スピンの量子制御技術や、ユニークかつ高性能なダイヤモンドサンプル作製技術の創出につながる成果であり、学術的にも価値が高い。

研究成果の概要(英文)：Nitrogen-vacancy (NV) centers in diamond have been promising candidate for realizing next-generation quantum sensors. In this study, we propose and demonstrate “the multi-frequency microwave(MW)-controlled quantum sensing technique” where electronic spin states of NV centers with different electronic spin resonance frequencies are individually and simultaneously manipulated using multi-frequency MWs. As a result, it is found that the multi-frequency MW-controlled quantum sensing technique enables us to improve the measurement sensitivities of vector magnetic field and temperature. This result clearly shows that the multi-frequency MW-controlled quantum sensing technique contributes to the development of quantum sensors using NV centers, because this technique is applicable to various type of pulse sequences for quantum sensing.

研究分野：量子エレクトロニクス

キーワード：量子センサ ダイヤモンド NV中心 電子スピン共鳴 多周波数マイクロ波制御

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) 中心は、室温大気下で動作可能な「量子磁場センサ」の最有力候補として注目されている。その最大の特長は、光やマイクロ波 (MW) を用いることで、「電子スピンの量子状態」の初期化・制御・読み出しが容易に可能なこと、室温でも安定に量子状態を保持できることであり、外部磁場による電子スピン状態変化を読み取ることで、古典限界を超える超高感度・超高空間分解能磁場センサを実現できる点である。このことからダイヤモンド磁場センサは、バイオ・医療・環境・エネルギー、基礎科学に渡る広範な分野で革新をもたらす次世代センサとして期待されており、世界中で研究開発競争が激化している。

ダイヤモンド磁場センサの優れた点の一つは、ベクトル磁場センシングが可能であることである。ダイヤモンド磁場センサでは、N と V の並ぶ方向 (配向方向) に対する磁場射影成分を測定可能である。ここで単一周波数 MW で特定方向の配向を有する NV スピンを制御することで、交流磁場の NV 配向成分が測定できる。ダイヤモンド結晶中で取り得る NV 配向方向は 4 種類存在するため、ランダムな配向を有する NV 中心集合体を磁場センサとして用いることで、一つのセンサでベクトル磁場センシングが可能となる。

しかしながら、ベクトル磁場センシングにおいては、交流磁場感度が低いということが、研究開始当初に問題となっていた。その理由は、従来の単一周波数 MW を用いた手法では、一度の測定で信号に寄与するのは特定配向を有する NV スピンのみであり、他の配向を有する NV スピンからの発光がノイズになってしまうためである (図 1 参照)。この問題は従来の単一周波数 MW を用いた磁場センシングにおいて解決することは原理的に困難であり、NV 中心を用いた高感度・高空間分解能ベクトル磁場センサ実現に向けて問題となっていた。

2. 研究の目的

本研究では、ダイヤモンド NV 中心を対象として、多周波数 MW によって複数の電子スピン量子状態を独立かつ同時に制御する、「多周波数制御ベクトル磁場センシング」技術を提案し、実験的に実証することを目的とする (図 1 参照)。本提案手法を用いることで、単一周波数 MW を用いた従来手法の問題点を解決し、MW によって高感度方向が自在に制御可能な高感度ベクトル磁場センサを実現する (理論提案 PRA2017[1]、特許第 6616342 号[2])。

具体的には、以下の研究テーマを推進していく。

- A) ランダム配向・高密度・長コヒーレンス時間を有するサンプル作製・評価
- B) 多周波数 MW 回路を組み込んだ光検出磁気共鳴顕微鏡の開発
- C) 多周波数 MW 制御ベクトル磁場センシングのデモンストレーション
- D) 多周波数 MW 制御温度センシングのデモンストレーション

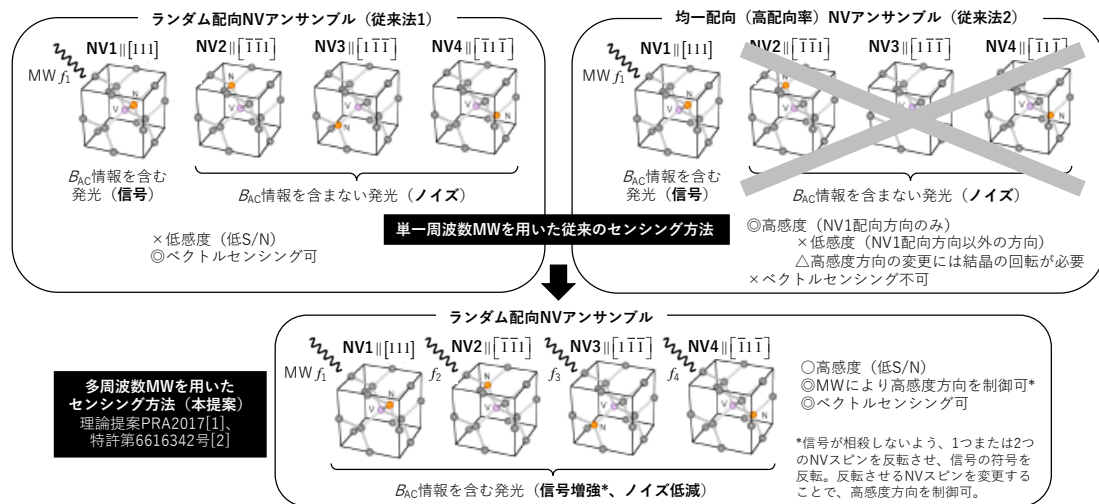


図 1. 単一周波数マイクロ波を用いた従来のベクトル磁場センシング方法と、本研究で提案する多周波数マイクロ波を用いた新規ベクトル磁場センシング方法の比較。

3. 研究の方法

A) サンプル作製・評価

提案手法の実現とさらなる高感度化のために、ランダム配向かつ高密度・長コヒーレンス時間を有する NV 集合体サンプルを作製する。本研究では、窒素ドーピング CVD 成長、イオン注入、アニーリングを組み合わせ、サンプル作製を行なう。

## B) 多周波数 MW 光検出磁気共鳴顕微鏡の開発

図 2 に、構築する光検出磁気共鳴顕微鏡の概要と、用いる MW パルス列の一例を示す。本手法では、4 つの異なる周波数の MW を用いて、異なる配向を有する NV1-4 を独立かつ同時に制御する。MW の位相やパルス幅を変えることで、NV1-4 のうちいずれか 2 つの配向の向きを実効的に反転させ、信号の合成・増強による高感度化と、MW による高感度方向の制御を行なう。そのために、MW の位相・パルス幅・強度を独立かつ精密に制御可能な多周波数 MW 回路を構築し、自作済の光検出磁気共鳴顕微鏡に組み込む。代表者らが開発した広帯域かつ空間均一性の高い MW アンテナ (Rev. Sci. Instrum. 2016[3]) を用いることで、異なる周波数の MW に対しても同程度の MW 強度が得られるようにする。

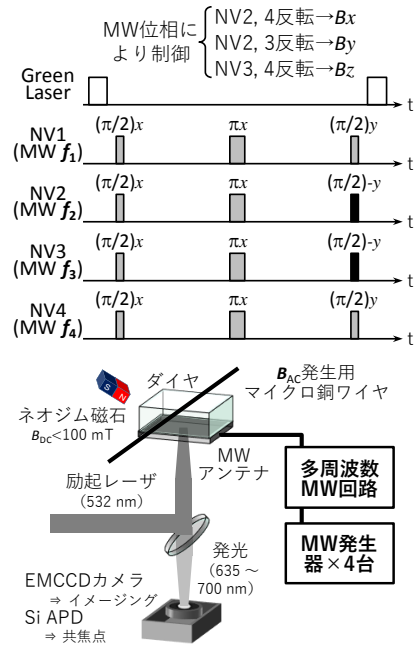


図 2. 構築する顕微鏡の概要と多周波数 MW パルス列の一例 (上図)。異なる 4 つの周波数の MW で NV1-4 を独立かつ同時に制御する。MW パルスの位相もしくはパルス幅を制御することで、NV1-4 のうちいずれか 2 つの配向の向きを実効的に反転させる。信号の合成・増強による高感度化と、MW による高感度方向の制御が可能となる。

## C) 多周波数 MW 制御ベクトル磁場センシングのデモンストレーション

マイクロ銅ワイヤに流れる交流電流を交流磁場源として、本提案手法による交流磁場センシングのデモンストレーションを行なう。従来の単一周波数 MW 制御による交流磁場センサと比較して高感度化が可能になること、MW 照射法を変えることでサンプルを回転することなく高感度方向を変更できベクトル磁場の各成分を測定可能になることを示す。

## D) 多周波数 MW 制御温度センシングのデモンストレーション

研究を進める中で、本研究で提案する多周波数 MW 制御の手法が温度センシング感度の向上にも有効であることがわかってきた。そこで本研究では、温度センシングに良く用いられているラムゼー干渉測定に多周波数 MW 制御の手法を適用することで、温度センサ感度が向上可能であることを実験的に実証する。

## 4. 研究成果

### A) ランダム配向・高密度・長コヒーレンス時間を有するサンプル作製・評価

本研究で実証する多周波数 MW 制御磁場センサに適した NV サンプル作製プロセスの検討を進めた。その結果、本研究に適したランダム配向を有する NV サンプル作製には、窒素ドーパ CVD 成長・He イオン注入後に高温アニーリング (1200°C) を施すことが有効であることを見出した。各作製条件の最適化を進め、配向率がほぼ 25% に等分配された NV 集合体サンプルの作製に成功した。さらに電子線照射を組み合わせる手法を開発し、従来よりも高密度かつ比較的長いコヒーレンス時間を有する NV 集合体サンプルの作製に成功した。

### B) 多周波数 MW 回路を組み込んだ光検出磁気共鳴顕微鏡の開発

### C) 多周波数 MW 制御ベクトル磁場センシングのデモンストレーション

4 つの異なる周波数の MW の位相・パルス幅・強度を独立かつ精密に制御可能な多周波数 MW 回路を構築し、自作済の光検出磁気共鳴顕微鏡に組み込んだ。研究を進める中で、4 つの異なる周波数の MW を同時に印加した際に生じる MW の減衰や歪が問題になることがわかったので、マイクロ波回路の改良を進めた。

自作した装置を用いて、4 つの異なる周波数を有する MW を用いてスピンエコー測定を行ない、多周波数 MW 制御ベクトル磁場センシングのデモンストレーションを行なった。その結果、従来の単一周波数 MW 制御スピンエコー測定と比較して、信号を増強することができ、交流磁場感度を 2 倍以上向上させることに成功した (図 3 参照)。また位相反転させる MW の組み合わせを変えることで、磁場測定の高感度方向を制御し、ベクトル磁場の  $x, y, z$  成分をキャリブレーションなしに直接測定することに成功した。以上の結果から、我々が提案した多周波数 MW 制御磁場センシングの手法が、磁場センサの高感度化・高機能化に有効であることを初めて見出した。

### D) 多周波数 MW 制御温度センシングのデモンストレーション

我々が提案・実証した多周波数 MW 制御法は、交流磁場センシングに用いられるスピンエコー法のみならず、あらゆる種類のパルス光検出磁気共鳴法に適用可能である。そこで本研究では、温度センシングに良く用いられているラムゼー干渉法に、多周波数 MW 制御の手法を適用した。その結果、多数波数 MW 制御ラムゼー干渉法を用いることで、単一周波数 MW 制御法と比較し

て、温度センサ感度が 1.8 倍以上改善することがわかった。また、サンプルや実験系を変えることなく、パルスシーケンスを多周波数 MW 制御スピンエコー法に変えることで、従来の単一周波数 MW 制御法よりも 2.7 倍以上高感度なベクトル磁場センシングが可能であることを示した。これらの結果は、我々の提案した多周波数 MW 制御法を適用することで、同一のサンプルかつ同一の実験系を用いて、ベクトル磁場と温度の両方を高感度にセンシング可能であることを示しており、本手法が複合センサの高感度化にも寄与することが明らかとなった。

以上の結果から、本研究で提案した多周波数 MW 制御法が、磁場や温度センシングの高感度化・高機能化に非常に有効であることが示された。本研究成果は、研究期間内において国際論文誌 7 件、国際会議 21 件・国内会議 24 件（うち招待講演 13 件）にて成果発表しており、国内外で高い評価を得ている。多周波数 MW 制御法は、あらゆる種類のパルス光検出磁気共鳴法に適用可能な汎用性の高い技術であり、NV 量子センサの発展に大きく寄与すると期待される。

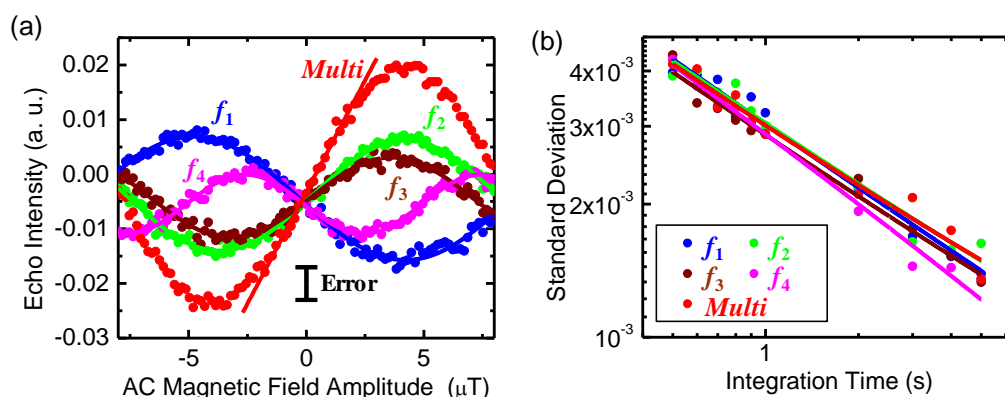


図 3. (a) スピンエコー信号強度変化の交流磁場振幅依存性。(b) 読み出しノイズ（発光カウンターの標準偏差）の測定時間の依存性。(a)におけるゼロ磁場付近の傾きと、(b)におけるノイズの値によって交流磁場感度が決まる。(a)におけるゼロ磁場付近の傾きが、単一周波数 MW 制御法よりも多周波数 MW 制御法の方が大きくなっており、磁場感度が向上したことがわかる。

<参考文献>

- [1] S. Kitazawa, Y. Matsuzaki, S. Saijo, K. Kakuyanagi, S. Saito, and J. Ishi-Hayase, “*Vector-magnetic-field sensing via multifrequency control of nitrogen-vacancy centers in diamond*”, Phys. Rev. A **96**, 042115 (2017).
- [2] 松崎雄一郎, 角柳孝輔, 齊藤志郎, 早瀬潤子, 北澤清香, 西條蒼野, “磁場検出装置および方法”, 特許第 6616342 号 (2018 年 9 月公開).
- [3] K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H. Watanba, J. Ishi-Hayase, K. M. Itoh and E. Abe, “*Broadband, large-area microwave antenna for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond*”, Rev. Sci. Instrum. **87**, 053904 (2016).

## 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 5件）

1. 著者名 H. Uchiyama, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase, and Y. Ohno	4. 巻 59
2. 論文標題 Effect of metal electrodes on optically detected magnetic resonance of nitrogen vacancy centers in diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 122002 ~ 122002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc3d7	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 T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saijo, H. Watanabe, N. Mizuochi, J. Ishi-Hayase	4. 巻 59
2. 論文標題 Control of all the transitions between ground state manifolds of nitrogen vacancy centers in diamonds by applying external magnetic driving fields	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 110907 ~ 110907
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/abc399	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 T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saito, S. Saijo, H. Watanabe, N. Mizuochi and J. Ishi-Hayase	4. 巻 58
2. 論文標題 Bandwidth analysis of AC magnetic field sensing based on electronic spin double-resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 100901 ~ 100901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab3d03	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 H. Uchiyama, S. Saijo, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase and Y. Ohno	4. 巻 4
2. 論文標題 Operando Analysis of Electron Devices Using Nanodiamond Thin Films Containing Nitrogen-Vacancy Centers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 7459 ~ 7466
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.9b00344	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 Ken Yahata, Yuichiro Matsuzaki, Shiro Saito, Hideyuki Watanabe and Junko Ishi-Hayase	4. 巻 114
2. 論文標題 Demonstration of simultaneous vector magnetic field sensing with nitrogen-vacancy centers in diamond via multifrequency control of microwave pulses	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 022404/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5079925	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 Saijo Soya, Matsuzaki Yuichiro, Saito Shiro, Yamaguchi Tatsuma, Hanano Ikuya, Watanabe Hideyuki, Mizuochi Norikazu, Ishi-Hayase Junko	4. 巻 113
2. 論文標題 AC magnetic field sensing using continuous-wave optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 082405/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5024401	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 Hallbaeck Karl Joel, Yamaguchi Tatsuma, Matsuzaki Yuichiro, Watanabe Hideyuki, Mizuochi Norikazu, Ishi-Hayase Junko	4. 巻 11700
2. 論文標題 Wide-field AC magnetic field imaging using continuous-wave optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 117004A
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2577024	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45件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 21件)

1. 発表者名 Y. Nakamura, H. Watanabe, K. M. Itoh, K. Sasaki, K. Kobayashi, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Optimizing optical readout of a nitrogen-vacancy center with spin relaxation model
3. 学会等名 11th Workshop on Semiconductor / Superconductor Quantum Coherence Effect and Quantum Information (国際学会)
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 中村 祐貴, 渡邊 幸志, 伊藤 公平, 佐々木 健人, 小林 研介, 早瀬 潤子
2. 発表標題 スピン緩和モデルを用いた窒素空孔中心スピンの光学的読み出し最適化
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 五十川 拓哉, 松崎 雄一郎, 早瀬 潤子
2. 発表標題 参照マイクロ波によるダイヤモンド中単一 NV 中心を用いたベクトル直流磁場センシング
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 祐貴, 渡邊 幸志, 伊藤 公平, 佐々木 健人, 小林 研介, 早瀬 潤子
2. 発表標題 スピン緩和モデルを用いたダイヤモンドスピンの光学的読み出し最適化
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Tabuchi, Y. Matsuzaki, N. Furuya, Y. Nakano, H. Watanabe, N. Tokuda, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Continuous-Wave Temperature Sensing using RF-Dressed States of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond
3. 学会等名 The 4th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Isogawa, Y. Matsuzaki, and J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Vector DC magnetic-field sensing with reference microwave field using a single nitrogen-vacancy center in diamond
3. 学会等名 The 4th International Forum on Quantum Metrology and Sensing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Nakahashi, Y. Matsuzaki, N. Mizouchi, K. Hayashi, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Temperature sensing by simultaneous control of electronic spins of nitrogen-vacancy centers in diamond using multi-frequency microwaves
3. 学会等名 31st International Conference on Diamond and Carbon Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Oikawa, R. Chiji, M. Nagai, N. Tokuda, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Preferentially-oriented nitrogen-vacancy centers on (100) diamond substrate with {111}-facet inverted pyramid structure
3. 学会等名 31st International Conference on Diamond and Carbon Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Ishikawa, A. Yoshizawa, Y. Mawatari, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase, and K. M. Itoh
2. 発表標題 Quantum Sensors Along the Cylindrical Walls of Diamond Microwells
3. 学会等名 14th International Conference on New Diamond and Nano Carbons 2020/2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 K. J. Hallbeck, T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, H. Watanabe, N. Mizuochi, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Wide-field AC magnetic field imaging using continuous-wave optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. J. Hallbeck, T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, H. Watanabe, N. Mizuochi, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Wide-field AC Magnetic Field Imaging using Continuous-Wave Optically Detected Magnetic Resonance of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 及川 耀平, 千地 遼平, 長井 雅嗣, 中野 裕太, 徳田 規夫, 早瀬 潤子
2. 発表標題 ピラミッド型{111}面を露出した(100)基板における高配向窒素空孔中心の生成と高密度化
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中橋 克弥, 松崎 雄一郎, 林 寛, 水落 憲和, 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド中NV中心の電子スピン多周波マイクロ波制御による温度センシングの高感度化
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山口 達万, 松崎 雄一郎, 渡邊 幸志, 水落 憲和, 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド中NV中心電子スピン三準位系の全遷移における外部磁場制御ラビ振動およびスピンエコー測定
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千地 遼平, 長井 雅嗣, 吉本 智貴, 中野 裕太, 徳田 規夫, 早瀬 潤子
2. 発表標題 逆ピラミッド型{111}面を形成した(001)基板上CVD成長による高配向NV中心の生成
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 千地 遼平, 織部 優也, 渡邊 幸志, 早瀬 潤子
2. 発表標題 優先配向された窒素空孔中心集合体を含むピラーの作製
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 山口 達万, 松崎 雄一郎, 渡邊 幸志, 水落 憲和, 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド中NV 中心の電子スピン三準位系における全遷移の外部磁場による量子制御
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 M. Gotoh, T.An, and J.Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Development of Scanning Probe Quantum Sensing System using Nitrogen-Vacancy Center in Diamond
3 . 学会等名 Industry-UCB-UEC-keio Workshop 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Saito, A. Asahara, K. Akahane, K. Minoshima, J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Improvement and Quantitative Evaluation of Dual-Comb based Asynchronous Optical Sampling Method
3 . 学会等名 Industry-UCB-UEC-keio Workshop 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Ishi-Hayase, T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe, and N. Mizuochi
2 . 発表標題 Electronic spin manipulation of NV centers in diamond for highly-sensitive magnetic field sensing
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saito, S. Saijo, H. Watanabe, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Fundamentals and applications to magnetic field sensing of electronic spin double-resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Uchiyama, S. Saijo, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase, and Y. Ohno
2 . 発表標題 Contrast enhancement in optically-detected magnetic resonance of diamond nitrogen-vacancy centers in the vicinity of electrode
3 . 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2019 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K.Nakahashi, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe, and J. Ishi-hayase
2 . 発表標題 Highly-Sensitive Vector Magnetic Field Mapping by Multi-Frequency Simultaneously Electron Spins controlled in Diamond
3 . 学会等名 4th Photonics WorkShop 2019
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Magnetic field sensing using NV centers in diamond
3 . 学会等名 Mini-Workshop on Biological Sensing and its Application ( 招待講演 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 AC Magnetic Field Sensing using Nitrogen-vacancy Centers in Diamond
3 . 学会等名 応用物理学会量子グループ研究会 ( 招待講演 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Saito, A. Asahara, K. Akahane, K. Minoshima, J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Improvement and Quantitative Evaluation of Asynchronous Optical Sampling Method using Dual-comb towards Semiconductor Physics
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 K. Yahata, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Highly-sensitive vector magnetic field sensing by simultaneous control of nitrogen-vacancy centers in diamond using multi-frequency microwave pulses
3 . 学会等名 30th International Conference on Diamond and Carbonmaterials ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 R. Chiji, Y. Oribe, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase
2 . 発表標題 Fabrication of diamond pillar structure including preferentially-oriented NV centers for highly-sensitive magnetometry
3 . 学会等名 30th International Conference on Diamond and Carbonmaterials ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 H. Uchiyama, S. Saijo, S. Kishimoto, J. Ishi-Hayase, Y. Ohno
2 . 発表標題 Simultaneous operando measurement of magnetic field and temperature of electron devices under operation using nitrogen-vacancy centers
3 . 学会等名 30th International Conference on Diamond and Carbonmaterials ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi, M. Matsuzaki, S. Saito, S. Saijo, H. Watanabe, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Analysis of the bandwidth of AC magnetic field sensing using CW-ODMR of NV centers in diamond
3. 学会等名 30th International Conference on Diamond and Carbonmaterials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Quantum Protocols for AC Magnetic Field Sensing using Nitrogen-vacancy Centers in Diamond
3. 学会等名 Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Yamaguchi, S. Saijo, Y. Matsuzaki, N. Mizouchi, H. Watanabe, K. Akahane, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 AC Magnetic Field Sensing using CW-ODMR of NV Centers in Diamond
3. 学会等名 Frontiers in Quantum Materials & Devices Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Highly-sensitive AC Magnetic Field Sensing based on Electric Spin Manipulation of Nitrogen-vacancy Centers in Diamond
3. 学会等名 XVI International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心の生成制御と超高感度量子センシング
3. 学会等名 量子センサの開発動向と高感度化技術セミナー（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Ishi-Hayase, S. Saijo, T. Yamaguchi, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe , N. Mizuochi
2. 発表標題 Continuous-Wave Double Resonance of Electric Spin Triplet of NV Centers in Diamond and Its Application to High-Frequency AC Magnetic Field Sensing
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Yahata, Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, S. Saito, H. Watanabe, J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 High-Sensitive Vector Magnetic Field Sensing by Simultaneous Control of Spin State of NV Center Ensemble in Diamond Using Multi-Frequency Microwaves
3. 学会等名 2018 MRS Fall Meeting & Exhibit（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 AC magnetic field sensing using NV centers in diamond
3. 学会等名 14th International Conference on Atomically Controlled Surfaces, Interfaces and Nanostructures（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド中空素 - 空孔中心を用いた高感度量子センサ
3. 学会等名 第32回光科学分野横断セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Ishi-Hayase
2. 発表標題 Highly-sensitive Quantum Sensor based on Electric Spin Manipulation in Diamond
3. 学会等名 The 13th Japan-US Joint Seminar on Quantum Electronics and Laser Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山口 達万, 松崎 雄一郎, 齊藤 志郎, 渡邊 幸志, 水落 憲和, 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド中NV中心の電子スピン三準位系における二重共鳴現象の周波数特性
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 早瀬 潤子
2. 発表標題 ダイヤモンド量子センサによる高感度磁場計測
3. 学会等名 独立行政法人日本学術振興会産業計測第36委員会研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊 幸志
2. 発表標題 ダイヤモンドNV中心を用いた量子磁気センサーの開発とその応用
3. 学会等名 ナノエレクトロニクス計測分析技術研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊幸志
2. 発表標題 超高感度磁気センサー、量子コンピュータ応用を目指したダイヤモンドNVセンター素子の開発
3. 学会等名 第3回 研究産業技術懇談会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊幸志
2. 発表標題 ダイヤモンドセンシング技術について
3. 学会等名 第4回浜松ホトニクス技術交流会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渡邊幸志
2. 発表標題 従来の開発技術の延長線上では越えられない超高感度分析装置の実現に向けて
3. 学会等名 産総研テクノブリッジフェア2018inつくば（招待講演）
4. 発表年 2018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
研究 分担者	渡邊 幸志  (WATANABE Hideyuki)  (50392684)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・ 製造領域・主任研究員   (82626)	

	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 協力者	松崎 雄一郎  (Matsuzaki Yuichiro)		

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