

Title	ダイヤモンド量子制御による高感度核磁気共鳴イメージング
Sub Title	Highly-sensitive NMR imaging by quantum control of diamond
Author	早瀬, 潤子(Hayase, Junko) 渡邊, 幸志(Watanabe, Hideyuki) 松崎, 雄一郎(Matsuzaki, Yuichiro)
Publisher	
Publication year	2018
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2017.)
JaLC DOI	
Abstract	<p>微細加工テンプレート基板と窒素ドーピング同位体制御化学気相成長を組み合わせるNVペア生成技術を開発し、NVペアの配向・位置を同時に制御することに成功した。広視野光検出磁気共鳴顕微鏡を開発し、生成した高配向率NVペア集合体を用いて、微小な交流磁場(窒素核スピン由来のものを含む)のセンシングに成功した。多周波数マイクロ波を用いた新規量子プロトコルを開発し、交流磁場感度を向上させることに成功した。</p> <p>We succeeded in creation of nitrogen-vacancy (NV) centers with simultaneously-controlled orientations and positions using nitrogen-doped isotopically-enriched chemical vapor deposition on microfabricated diamond substrate. We demonstrated high-sensitive AC magnetic field sensing with the preferentially-oriented NV ensemble using home-build wide-field optically-detected magnetic resonance microscope. We proposed and experimentally demonstrated highly-sensitive AC magnetic field by simultaneous quantum control of electric spins of NV centers using multi-frequency microwave.</p>
Notes	研究種目：基盤研究(B)(一般) 研究期間：2015～2017 課題番号：15H03996 研究分野：量子エレクトロニクス・光物性
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_15H03996seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03996

研究課題名(和文)ダイヤモンド量子制御による高感度核磁気共鳴イメージング

研究課題名(英文)Highly-sensitive NMR imaging by quantum control of 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)・准教授

研究者番号：50342746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：微細加工テンプレート基板と窒素ドーブ同位体制御化学気相成長を組み合わせるNVペア生成技術を開発し、NVペアの配向・位置を同時に制御することに成功した。広視野光検出磁気共鳴顕微鏡を開発し、生成した高配向率NVペア集合体を用いて、微小な交流磁場(窒素核スピン由来のものを含む)のセンシングに成功した。多周波数マイクロ波を用いた新規量子プロトコルを開発し、交流磁場感度を向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We succeeded in creation of nitrogen-vacancy (NV) centers with simultaneously-controlled orientations and positions using nitrogen-doped isotopically-enriched chemical vapor deposition on microfabricated diamond substrate. We demonstrated high-sensitive AC magnetic field sensing with the preferentially-oriented NV ensemble using home-build wide-field optically-detected magnetic resonance microscope. We proposed and experimentally demonstrated highly-sensitive AC magnetic field by simultaneous quantum control of electric spins of NV centers using multi-frequency microwave.

研究分野：量子エレクトロニクス・光物性

キーワード：量子計測 スピントロニクス 結晶工学 ダイヤモンド

1. 研究開始当初の背景

固体中の電子やスピンの量子状態を高度に制御し、古典限界を超える高感度な「量子センサー」へ応用する研究が急速に進んでいる。なかでも、ダイヤモンド中の発光中心である窒素-空孔 (NV) ペアの発見により、室温大気下で動作可能な量子センサーの実現が現実味を帯びてきた。その理由は、NV ペアに局在した「電子スピン」の量子状態が、固体系で唯一、室温大気下で長時間安定、光やマイクロ波による制御・検出が容易などの優れた性能を有することによる。特に NV スピンが超高感度な「ナノ核磁気共鳴 (NMR) センサー」に有用であると示されて以来、世界中で NV ペアの研究開発競争が激化している。

NMR センシングは、ダイヤモンド表面に配置された核スピンによる NV スピンの量子状態変化を発光で検出することにより行なう。NV スピン NMR センサーは、検出感度と空間分解能の両方において、他のあらゆる磁気センサー (ホール素子、MEMS、SQUID など) よりも優れた性能を有し、室温大気下で単一原子や分子の NMR イメージングを可能にする次世代センサーとして期待される。

しかしながらその実現は容易ではなく、研究開始当初においては、我々の研究グループを含む世界の数グループのみが NMR のデモンストレーションに成功していた。その理由は、NV 特性を制御しダイヤモンドサンプルを作製する高度な結晶成長技術、NV スピンと環境スピンの相互作用を制御する高度な量子制御技術、NV からの微弱な発光を高 S/N で検出する微弱光検出技術、これら全てについて最先端の技術を駆使し融合しなければならないためであり、現在もそれぞれの技術を高度化するための研究が進められている。

2. 研究の目的

本研究では、我々のグループが開発した窒素ドーピング同位体制御化学気相成長 (CVD) 法による NV 生成技術により高密度 NV 集合体を生成し、少数個の核スピン NMR イメージングを実現するための基礎技術を開発することを目的とする。そのために必要な以下の研究項目を進めていく。

(1) ダイヤモンドサンプル作製と光学・スピン特性評価および電子スピン量子制御によるコヒーレンス時間制御

(2) 磁場検出感度の理論計算および高感度化に向けた新規量子プロトコル開発

(3) パルス光検出磁気共鳴 (ODMR) 顕微鏡の構築と交流磁場センシング

3. 研究の方法

(1) ダイヤモンドサンプル作製と光学・スピン特性評価および電子スピン量子制御によるコヒーレンス時間制御

微細加工された(001)テンプレート基板と窒素ドーピング同位体制御化学気相成長 (CVD) を組み合わせる手法により、高密度 NV 集合体

を含むダイヤモンド薄膜を成長する。基板微細加工およびダイヤモンド成長条件と、NV ペアの光学・スピン特性との相関を明らかにし、高密度・高配向率・長寿命コヒーレンス時間 T_2 を有する NV ペアの生成を目指す。またマイクロ波パルス列を用いた電子スピン量子制御により実効的に T_2 を延伸し、センシング感度の向上を目指す。

(2) 磁場検出感度の理論計算および高感度化に向けた新規量子プロトコル開発

NV 集合体で NMR 測定する際の磁場検出感度 (スピン検出感度) を理論的に計算し、感度を最大化するための NV 集合体の空間分布や特性を明らかにする。さらに高感度化するための新しい量子プロトコルを提案・実証する。

(3) パルス光検出磁気共鳴 (ODMR) 顕微鏡の構築と交流磁場センシング

NMR イメージングに必要なパルス光検出磁気共鳴 (ODMR) 顕微鏡を構築し、交流磁場センシングのデモンストレーションと磁場検出感度の見積もりを行なう。

4. 研究成果

(1) ダイヤモンドサンプル作製と光学・スピン特性評価および電子スピン量子制御によるコヒーレンス時間制御

1次元あるいは2次元溝構造 (幅: 0.5 ~ 20 μm 、深さ: 0.3 ~ 7 μm) を施したダイヤモンド基板上に、窒素ドーピング同位体制御化学気相成長 (CVD) 法によりダイヤモンド薄膜を成長し、ダイヤモンドサンプルの作製を行なった。図1に作製したサンプルの発光マッピング像および配向マッピング像の一例を示す。その結果、溝構造内部に選択的に NV ペアが生成されることを見出した。これにより、CVD 法を用いて初めて NV ペアの生成位置を制御することに成功した。また NV ペアの配向方向 (N と V が並ぶ方向) を測定し、通常4種類取り得る NV 配向方向の内、特定の配向方向を有する NV ペアが 80% 程度の高い配向率で選択的に生成されることを初めて見出した。配向率を高めることは、センシング感度の向上につながる重要な成果である。さらに微細加工基板形状や CVD 成長条件を変化させたサンプルを作製・評価した。その結果、溝内に局所的に (113) 面が形成されることが、NV ペアの位置・配向制御に大きく関わっていることを明らかにした。またサンプル作製条件の最適化を進め、配向率を高い値に保ちつつ、センサー感度を決定する NV ペア密度とコヒーレンス時間 T_2 の積の値を $10^{11} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ まで向上させることに成功した。この値は、CVD 法で生成された NV 集合体において報告された最高値に匹敵している。この結果は、我々の開発した NV 生成技術により高密度・高配向率を有する高品質 NV 集合体を生成可能になったこと、同位体制御技術によりコヒーレンスを乱す ^{13}C を排除したことにより得られ

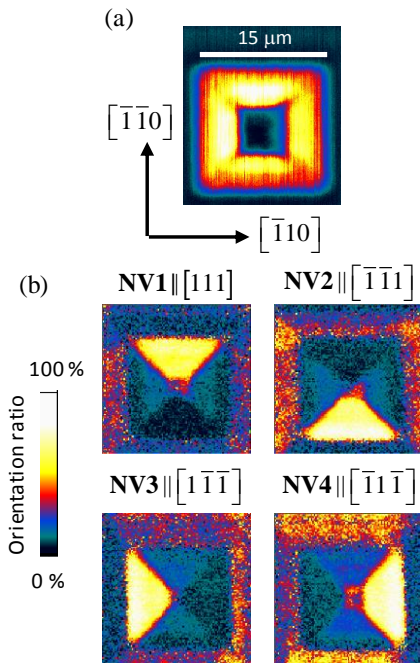


図1 矩形溝を施した(001)基板の上に CVD 成長したダイヤモンド薄膜。(a)発光マッピング像と(b)配向マッピング像。

たものであり、我々の開発した技術の有用性を示す結果である。また複数のマイクロ波パルス照射するダイナミカルデカップリング法を用いることで、コヒーレンスを乱す磁場ノイズの影響を除去し、実効的な T_2 を室温で 1 ms まで延伸することに成功した。これにより、さらなる高感度化が可能となることが示された。

(2) 磁場検出感度の理論計算および高感度化に向けた新規量子プロトコル開発

NV 集合体では、センサーとなる NV 数増加による高感度化が期待される。しかしながら NV 数を増加させることは、信号を増強するだけではなく、ノイズも増強する。信号とノイズの大きさは、磁場源と NV ペア間の距離に依存するため、感度を向上させるためには NV ペアの存在する空間配置を最適化する必要がある。そこで本研究では、NMR 測定する際の磁場検出感度（スピン検出感度）の理論計算を行ない、感度向上のために最適な NV 集合体の空間配置の見積もりを行なった。その結果、測定距離 1 μm の場合、NV 集合体の存在する円柱の半径および高さがそれぞれ 0.93 μm 、1.87 μm の際に感度が最大化されることがわかった。この結果は、NMR センサー感度を向上させるためのサンプル設計指針を与える重要な成果である。

さらなる高感度化のために、新しい量子プロトコルの開発を行なった。具体的には、単一周波数のマイクロ波による電子スピン制御に代わり、4 つの異なる周波数のマイクロ波による電子スピン制御を行ない、交流磁場検出感度を向上させる（図 2 参照）。本手法では、複数のマイクロ波を用いて異なる配向を有す

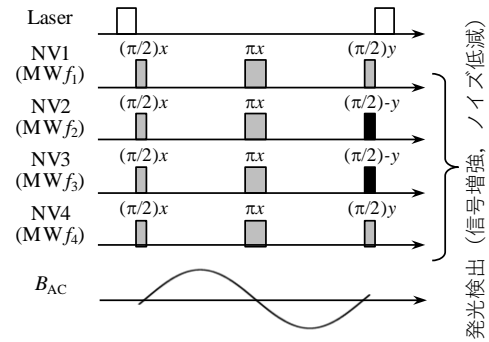


図2 多周波数マイクロ波を用いたスピンエコー交流磁場センシングのためのパルスシーケンスの一例。

る NV 集合体の電子スピンを同時に制御することで、信号増強・ノイズ低減し、感度を向上させる。このとき重要なことは、照射するマイクロ波の位相を適切に制御することで、各配向からの信号が相殺されないようにすることである。

我々は詳細な理論計算を行い、多周波数マイクロ波を用いた交流磁場検出感度と、従来の単一周波数マイクロ波を用いた交流磁場検出感度との比較を行なった。その結果、配向がランダム（配向率 25 %）な NV 集合体を用いた場合、我々の提案した多周波数磁場センシングでは、従来法より最大 4 倍感度が向上することがわかった。さらにスピンエコー交流磁場センシングに対して本手法を適用することで、従来の単一周波数マイクロ波を用いた手法よりも感度が向上することを実験的に実証した。本手法はスピンエコー法のみならず、あらゆるパルス ODMR に適用可能であるため、NMR 感度向上を可能にする有用な手法であると言える。

(3) パルス光検出磁気共鳴 (ODMR) 顕微鏡の構築と交流磁場センシング

自作の光検出磁気共鳴 (ODMR) 顕微鏡の改良を行ない、広視野での磁場イメージングに適した ODMR 顕微鏡を構築した。広範囲に渡って、均一かつ高強度マイクロ波を照射可能なマイクロ波アンテナを設計・作製し、ODMR 顕微鏡に組み込んだ。その結果 80 μm 四方の広視野で ODMR スペクトルおよびパルス ODMR 信号を取得することに成功した。

我々が作製した高密度・高配向率 NV 集合体を用いて、微小回路に流れる電流（磁場）のセンシングを行なった（図 3 参照）。スピンエコー法および CPMG 法を用いることで、微小電流により発生した微弱な交流磁場を検出することに成功した。スピンエコー法による検出可能最小磁場（感度）は、検出体積 0.126 μm^3 において 28 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の高感度を達成した。検出感度は、検出体積や集光効率を増加させることで改善可能であり、我々のサンプルが高感度化を可能にする高品質なサンプルであることを示す結果である。さらにスピンエコー法による交流磁場センシングにおいて、ダイ

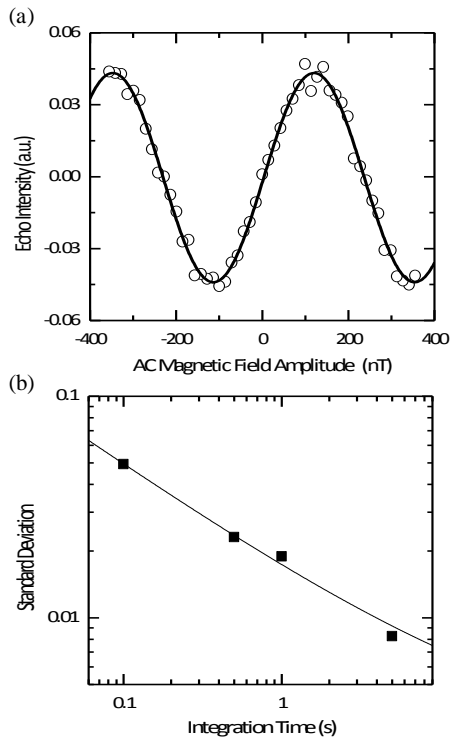


図3 スピンエコー法による交流磁場センシングの実験結果の一例。(a) 磁場振幅 vs. スピンエコー信号変化量。(b) 測定時間 vs. 読み出し揺らぎ。

ダイヤモンド中に存在する窒素核スピンにより生じた局所交流磁場を検出することに成功した。この結果は、窒素核スピンのNMR測定をデモンストレーションしたことに相当する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

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”, *Physical Review A*, Vol.96, issue 4, 042115-1-11, 2017.(査読有) DOI:10.1103/PhysRevA.96.04211
2. K. Ito, H. Saito, K. Sasaki, H. Watanabe, T. Teraji, K. M. Itoh, and E. Abe, “Nitrogen-vacancy centers created by N⁺ ion implantation through screening SiO₂ layers on diamond”, *Applied Physics Letters*, Vol.110, Issue 21, 213105/1-5, 2017. (査読有) DOI: 10.1063/1.4984060
3. K. Sasaki, E. E. Kleinsasser, Z. Zhu, W.-D. Li, H. Watanabe, K.-M. Fu, K. M. Itoh, and E. Abe, “Dynamic nuclear polarization enhanced magnetic field sensitivity and decoherence spectroscopy of an ensemble of near-surface nitrogen-vacancy centers in diamond”, *Applied Physics Letters*, Vol.110, Issue 19, 192407/1-5, 2017. (査読有) DOI: 10.1063/1.4983350
4. K. Sasaki, Y. Monnai, S. Saijo, R. Fujita, H.

Watanaba, 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”, *Review of Scientific Instruments*, Vol.87, Issue5, 053904/1-5 (2016). (査読有) DOI: 10.1063/1.4952418

5. E. E. Kleinsasser, M. M. Stanfield, J. K. Q. Banks, Z. Zhu, W.-D. Li, V. M. Acosta, H. Watanabe, K. M. Itoh, and K.-M. C. Fu, “High density nitrogen-vacancy sensing surface created via He⁺ ion implantation of 12C diamond”, *Applied Physics Letters*, Vol.108, Issue 20, 202401/1-4, 2016. (査読有) DOI: 10.1063/1.4949357
6. H. Watanabe, H. Umezawa, T. Ishikawa, K. Kaneko, S. Shikata, J. Ishi-Hayase, and K. M. Itoh, “Formation of Nitrogen-Vacancy Centers in Homoepitaxial Diamond Thin Films Grown via Microwave Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition”, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol.15, Issue 4, 614-618, 2016. (査読有) DOI: 10.1109/TNANO.2016.2528678

[学会発表] (計 38 件)

1. 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド NV 中心を用いた AC 磁場センシング」, 第 147 回微小光学研究会「光と××の相互作用」, 2018 年 (招待講演)
2. 北村 卓也, 上杉 周平, 松崎 雄一郎, 齊藤 志郎, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中 NV 中心 集合体 を用いた スピン検出の感度計算」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年
3. 矢幡 健, 松崎 雄一郎, 齊藤 志郎, 渡邊 幸志, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中 NV 中心を用いた多周波ベクトル磁場センシング」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年
4. Y. Matsuzaki, S. Saijo, H. Morishita, T. Shimooka, T. Tashima, K. Kakuyanagi, K. Semba, W. J. Munro, H. Yamaguchi, S. Saito, K. Hayashi, I. Hanano, H. Watanabe, N. Mizuochi, and J. Ishi-Hayase, 「Characterization and use of an ensemble of NV centers in diamond」, 日本学術振興会「先端ナノデバイス・材料テクノロジー」151 委員会 平成 29 年度第 5 回研究会, 2018 年 (招待講演)
5. S. Saijo, Y. Matsuzaki, S. Saito, H. Watanabe, N. Mizuochi and J. Ishi-Hayase, “AC magnetic field sensing using continuous-wave optically detected magnetic resonance of NV centers in diamond”, *International Symposium on Hybrid Quantum Systems 2017*, 2017.
6. 織部 優也, 西條 蒼野, 渡邊 幸志, 松崎

- 雄一郎, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中空素空孔中心を用いた電流センシングの感度計算」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年
7. 西條 蒼野, 松崎 雄一郎, 齊藤 志郎, 渡邊 幸志, 水落 憲和, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中空素空孔中心の連続波光検出磁気共鳴を用いた交流磁場センシング」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年
 8. I. Hanano, R. Fujita, H. Watanabe, K. Akahane, and J. Ishi-Hayase, “Large-area two-dimensional array of preferentially-oriented nitrogen-vacancy centers in diamond”, 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 2017.
 9. K. Yahata, S. Kitazawa, S. Saijo, Y. Matsuzaki, S. Saito, J. Ishi-Hayase, “Multi-frequency vector magnetic field sensing using nitrogen-vacancy centres in diamond”, 28th International Conference on Diamond and Carbon Materials, 2017.
 10. I. Hanano, R. Fujita, H. Watanabe, K. Akahane and J. Ishi-Hayase, “Orientation and Position-controlled Nitrogen-Vacancy Centers in CVD Diamond on Micropatterned Substrate”, 29th International Conference on Defects in Semiconductors, 2017.
 11. K. Yahata, S. Kitazawa, S. Saijo, Y. Matsuzaki, S. Saito and J. Ishi-Hayase, “Multi-frequency Vector magnetic field sensing using nitrogen-vacancy centers in diamond”, Gordon Reserch Conferences Quantum Sensing 2017, 2017.
 12. S. Saijo, H. Uchiyama, H. Watanabe, Y. Matsuzaki, Y. Ohno, J. Ishi-Hayase, “Current sensing with an ensemble of nitrogen vacancy centers in diamond”, Gordon Reserch Conferences Quantum Sensing 2017, 2017.
 13. 北澤 清香, 松崎 雄一郎, 矢幡 健, 西條 蒼野, 角柳 孝輔, 齋藤 志郎, 早瀬 潤子, 「多周波数制御によるダイヤモンド中空素空孔中心高感度ベクトル磁場センサ」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年
 14. 藤田 留士郎, 花野 郁也, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 早瀬 潤子, 「微細加工基板上に生成したダイヤモンド中 NV 中心の特性評価」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017 年
 15. 西條 蒼野, 渡邊 幸志, 松崎 雄一郎, 早瀬 潤子, 「集合体 NV 中心を用いた微小電流センシング」, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会, 2016 年
 16. 早瀬 潤子, 「半導体中 2 準位系の量子制御 - 高感度光検出磁気共鳴顕微鏡の開発 -」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年 (**招待講演**)
 17. 花野 郁也, 藤田 留士郎, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 早瀬 潤子, 「微細加工基板上に生成されたダイヤモンド中 NV 中心 - 微細加工法による特性の違い -」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年
 18. 藤田 留士郎, 花野 郁也, 上杉 周平, 渡邊 幸志, 松崎 雄一郎, 早瀬 潤子, 赤羽 浩一, 「ダイヤモンド中 NV 中心のコヒーレンス - 窒素核スピンの影響と同位体効果 -」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年
 19. 岡崎 睦, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 門内 靖明, 佐々木 健人, 伊藤 公平, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中 NV 中心集合体のパルス光検出磁気共鳴イメージング」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年
 20. 西條 蒼野, 藤田 留士郎, 花野 郁也, 北澤 清香, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 松崎 雄一郎, 早瀬 潤子, 「配向制御されたダイヤモンド NV 中心を用いた交流電流センシング」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016 年
 21. M. Okazaki, R. Fujita, I. Hanano, H. Watanabe, K. Akahane, Y. Monnai, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, “Wide-field orientation imaging of nitrogen-vacancy centers in diamond”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related phenomena in Solids, 2016.
 22. R. Fujita, S. Saijo, I. Hanano, H. Watanabe, K. Akahane, Y. Monnai, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, “Preferentially-oriented nitrogen-vacancy centers in diamond created using chemical vapor deposition on a micropatterned (001) substrate” 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related phenomena in Solids, 2016.
 23. S. Saijo, H. Watanabe, Y. Monnai, S. Kitazawa, R. Fujita, Y. Matsuzaki, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, “Magnetic field sensing using preferentially-oriented nitrogen-vacancy centers in diamond”, 9th International Conference on Physics and Applications of Spin-Related phenomena in Solids, 2016.
 24. 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド NV 中心の生成制御と量子センシング」, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 (**招待講演**)
 25. 岡崎 睦, 藤田 留士郎, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 門内 靖明, 伊藤 公平, 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中電子スピンの光検出磁気共鳴イメージング」, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年
 26. 藤田 留士郎, 西條 蒼野, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 伊藤 公平, 早瀬 潤子, 「微細加

- 工基板上化学気相成長により生成した高配向率を有するダイヤモンド中窒素空孔中心のスピ特性」第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 2016 年
27. 藤田 留士郎, 黒木 諒, 赤羽 浩一, 早瀬 潤子, 「微細加工基板上化学気相成長によるダイヤモンド中窒素空孔中心の特性制御」, 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会, 2015 年
28. 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド量子イメージング-ダイヤモンド中電子スピンのコヒーレンス制御と量子センシング応用-」, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, 2015 年
29. 佐々木 健人, 門内 靖明, 西條 蒼野, 藤田 留士郎, 渡邊 幸志, 阿部 英介, 早瀬 潤子, 伊藤 公平, 「ダイヤモンド量子センシング・イメージのための広帯域・高空間均一性マイクロ波アンテナのデザインと特性評価」, 第 20 回スピン工学の基礎と応用, 2015 年
30. 早瀬 潤子, 「ダイヤモンド中電子スピンのコヒーレンス制御と量子計測応用」, 新しい光科学の創成とナノ情報デバイスへの展開 III」研究会, 2015 年
31. J. Ishi-Hayase, H. Watanabe and K. M. Itoh, “Engineered nitrogen vacancy centers in diamond for quantum sensing”, EMN Meeting on Vacuum Electronics, 2015. (Invited Talk)
32. J. Ishi-Hayase, H. Watanabe, K. M. Itoh, “Spatially selective creation of nitrogen-vacancy centers with preferential orientation in an isotopically-purified diamond thin film”, XIV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, 2015. (Invited Talk)
33. 藤田 留士郎, 黒木 諒, 渡邊 幸志, 赤羽 浩一, 伊藤 公平, 早瀬 潤子, 「微細加工 (001) 基板上化学気相成長によるダイヤモンド中窒素空孔中心の生成と位置・配向制御」, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年
34. J. Ishi-Hayase, “Orientation and Position-controlled Nitrogen-Vacancy Centers in CVD Diamond grown on Micropatterned (001) Substrate”, Diamond Quantum Sensing Workshop 2015, 2015. (Invited Talk)
35. R. Fujita, R. Kuroki, S. Saijo, H. Watanabe, K. Akahane, K. M. Itoh and J. Ishi-Hayase, “Properties of Nitrogen-Vacancy Centers created using Chemical Vapor Deposition on Micropatterned Substrate, Diamond Quantum Sensing Workshop 2015, 2015.
36. M. Okazaki, S. Miyamoto, H. Watanabe, K. M. Itoh, J. Ishi-Hayase, “Wide-Field Orientation Imaging of Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond”, Diamond Quantum Sensing Workshop 2015, 2015.
37. J. Ishi-Hayase, H. Watanabe, K. M. Itoh, “Control of position and orientation of nitrogen-vacancy centers in CVD-grown diamond thin film”, 28th International Conference on Defects in Semiconductors, 2015. (Invited Talk)
38. 藤田 留士郎, 「微細加工上化学気相成長によるダイヤモンド NV 中心の生成と特性制御」, 国際光年シンポジウム, 2015 年
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 2 件)
- 名称: 磁場検出装置および方法
 発明者: 松崎 雄一郎, 角柳 孝輔, 齋藤 志郎, 早瀬 潤子, 北澤 清香, 西條 蒼野
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2017-036176
 出願年月日: 2017 年 2 月 28 日
 国内外の別: 国内
- 名称: ダイヤモンド NV 光学中心を有するダイヤモンド単結晶
 発明者: 渡邊 幸志, 鹿田 真一, 梅澤 仁, 石川 豊史, 伊藤 公平, 富澤 周平, 大橋 康平, 早瀬 潤子
 権利者: 同上
 種類: 特許
 番号: 特許 第 6037387
 出願年月日: 2016 年 11 月 11 日
 国内外の別: 国内
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
 早瀬 潤子 (HAYASE, Junko)
 慶應義塾大学・理工学部・准教授
 研究者番号: 50342746
- (2) 研究分担者
 渡邊 幸志 (WATANABE, Hideyuki)
 国立研究開発法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・主任研究員
 研究者番号: 50392684
- (3) 研究協力者
 松崎 雄一郎 (MATSUZAKI, Yuichiro)
 日本電信電話株式会社 NTT 物性科学基礎研究所・量子電子物性研究部・研究主任
 研究者番号: 10618911