

Oral presentation | CS Code-sharing session : 【CS.9】 Code-sharing Session of 6.2 & KS

📅 Fri. Sep 22, 2023 1:00 PM - 5:45 PM JST | Fri. Sep 22, 2023 4:00 AM - 8:45 AM UTC | 🏠 A601 (KJ Hall)

[22p-A601-1~17] CS.9 Code-sharing Session of 6.2 & KS

Hiroki Morishita(Tohoku Univ.), Hiromitsu Kato(AIST), Kento Sasaki(The Univ. of Tokyo)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[22p-A601-1] Design and fabrication of a diamond racetrack resonator with high quality-factor

○Shun Naruse¹, Ryota Katsumi¹, Takeshi Hizawa¹, Daichi Sato¹, Kenta Kawai¹, Kosuke Takada¹, Takashi Yatsui¹ (1.TUT)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[22p-A601-2] Development of 3D microwave resonators for applications in nanodiamond thermometry

○Hiromu Nakashima¹, Keisuke Oshimi¹, Masazumi Fujiwara¹ (1.Okayama Univ)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[22p-A601-3] Improvement of NV center's detection in detonation nanodiamond for biological applications

○Nene Hariki¹, Frederick Tze Kit So^{1,2}, Masaya Nemoto¹, Masanori Fujiwara¹, Izuru Ohki^{1,2}, Naoya Morioka^{1,3}, Ming Liu⁴, Akihiko Tsurui⁴, Taro Yoshikawa⁴, Yuto Makino⁴, Masahiro Nishikawa⁴, Norikazu Mizuochi^{1,3} (1.ICR, Kyoto Univ., 2.QST, 3.CSRN, Kyoto Univ., 4.Daice Corp.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[22p-A601-4] Comparison of Frequency Response of Nitrogen-Vacancy Center in Diamond with Scalar-mode Optically Pumped Magnetometer

○(M2)Saori Ikeda¹, Yosuke Ito¹ (1.Kyoto Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[22p-A601-5] Analysis of Electron Spin Double Resonance Spectra in Diamond Using Lindblad Master Equation

○Rui Suzuki^{1,2}, Takumi Mikawa^{1,2}, Ryusei Okaniwa^{1,2}, Yuichiro Matsuzaki³, Norio Tokuda⁴, Junko Ishi-Hayase^{1,2} (1.Keio Univ., 2.Keio CSRN, 3.Chuo Univ., 4.Kanazawa Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[22p-A601-6] Sensitivity improvement of Diamond Quantum Sensors by Continuously Excited Ramsey Method

○Yuta Araki¹, Ikuya Fujisaki¹, Zehan Li¹, Yuji Hatano¹, Takeharu Sekiguchi¹, Takayuki Iwasaki¹, Mutsuko Hatano¹ (1.Tokyo Tech.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[22p-A601-7] Quadrature detection method for two dimensional NV-NMR toward single cell measurement

○Kohki Morita¹, Izuru Ohki^{1,2}, Norio Tokuda³, Norikazu Mizuochi^{1,4} (1.ICR, Kyoto Univ., 2.QST, 3.Kanazawa Univ., 4.CSRN Kyoto Univ.)

◆ English Presentation

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[22p-A601-8] Coherence-based quantum sensing of low-frequency fields

○Ernst David Herbschleb¹, Izuru Ohki², Kohki Morita¹, Yoshiharu Yoshii³, Hiromitsu Kato⁴, Toshiharu Makino⁴, Satoshi Yamasaki⁵, Norikazu Mizuochi¹ (1.Kyoto university, 2.QST, 3.Sumida Corporation, 4.AIST, 5.Kanazawa university)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[22p-A601-9] Diamond NV magnetometer sensor head for high sensitivity and miniaturization

○Yuta Kainuma¹, Yuji Hatano¹, Takayuki Shibata², Hiromitsu Kato³, Shinobu Onoda⁴, Takeshi Ohshima⁴, Mutsuko Hatano^{1,4}, Takayuki Iwasaki¹ (1.Tokyo Tech, 2.DENSO CORPORATION, 3.AIST, 4.QST)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[22p-A601-10] Verification of Robustness in Electric Vehicle Battery Monitoring with Diamond Quantum Sensor

○Yuji Hatano¹, Junya Tanigawa², Akimichi Nakazono², Takeharu Sekiguchi¹, Yuta Kainuma¹, Abe Hiroshi³, Onoda Shinobu³, Ohshima Takeshi³, Iwasaki Takayuki¹, Hatano Mutsuko¹ (1.Tokyo Tech, 2.YAZAKI Corp., 3.QST)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[22p-A601-11] Developing a sensitive diamond quantum sensor system for detecting the brain magnetic field of a living rat

○(M1)Atsumi Yoshimura¹, Naota Sekiguchi¹, Motofumi Fushimi², Atsuhiko Kitada¹, Chikara Shinei³, Masashi Miyakawa³, Takashi Taniguchi³, Tokuyuki Teraji³, Shinobu Onoda⁴, Takeshi Ohshima⁴, Masaki Sekino², Takayuki Iwasaki¹, Mutsuko Hatano¹ (1.Tokyo Tech., 2.Univ. of Tokyo, 3.NIMS, 4.QST)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[22p-A601-12] Mapping of the RF field by optically detected magnetic resonance in diamond NV centers

○Yoshikatsu Ohkubo¹, Shunta Onodera¹, Mari Nakagawa¹, Yusuke Azuma¹, Hideyuki Watanabe², Satoshi Kashiwaya³, Shintaro Nomura¹ (1.Univ. Tsukuba, 2.AIST, 3.Nagoya Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[22p-A601-13] Imaging of magnetization dynamics of soft magnetic thin film for power electronics by diamond quantum sensors

○(D)Ryota Kitagawa¹, Shunsuke Nagata¹, Teruo Kohashi², Aoi Nakatsuka¹, Takeyuki Tsuji¹, Honami Nitta¹, Kosuke Mizuno¹, Yota Takamura¹, Takayuki Iwasaki¹, Shigeki Nakagawa¹, Mutsuko Hatano¹ (1.Tokyo Tech, 2.Hitachi, Ltd.)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[22p-A601-14] High Sensitivity of Temperature Measurement using ODMR Method with Lock-in detection Method

○(M1)Shotaro Kawai¹, Yosikazu Simeno¹, Yoshiaki Nagao¹, Yuji Kuwamura¹, Takeo maruyama¹ (1.Kanazawa Univ.)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[22p-A601-15] Evaluation of Annealing Time Dependence for Efficient Creation of Group IV-V Center

○(M2)Tomoya Baba^{1,2}, Shinobu Onoda^{2,3}, Kosuke Kimura^{1,2}, Wataru Kada¹, Takashi Taniguchi⁴, Masashi Miyakawa⁴, Takeshi Ohshima², Osamu Hanaizumi¹ (1.Gunma Univ., 2.QST, 3.YNU-QIC, 4.NIMS)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[22p-A601-16] Charge state dynamics of a tin-vacancy center in diamond

○(B)Yiyang Chen¹, Keita Ikeda¹, Peng Wang¹, Takashi Taniguchi², Shinobu Onoda³, Mutsuko Hatano¹, Takayuki Iwasaki¹ (1.Tokyo Tech, 2.NIMS, 3.QST)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[22p-A601-17] Spin Selective Excitation of a PbV Center in Diamond

○(M2)Kazuki Oba¹, Peng Wang¹, Takashi Taniguchi², Mutsuko Hatano¹, Takayuki Iwasaki¹ (1.Tokyo Tech, 2.NIMS)

高 Q 値ダイヤモンドレーストラック共振器の設計及び作製の検討

Design and fabrication of a diamond racetrack resonator with high quality-factor

¹豊橋技科大, [○]鳴瀬 駿¹, 勝見亮太¹, 飛沢 健¹, 佐藤大地¹, 河合健太¹, 高田晃佑¹, 八井 崇¹

¹TUT, [○]S. Naruse¹, R. Katsumi¹, T. Hizawa¹, D. Sato¹, K. Kawai¹, K. Takada¹, and T. Yatsui¹

E-mail: naruse.shun.uu@tut.jp

はじめに 単結晶ダイヤモンド中の集団窒素－空孔(NV)センタ－を利用する量子センサは、高感度な磁気検出が室温で可能なことが理論上知られており、次世代の高性能磁気センサとして注目されている¹。しかし、今までに報告された集団 NV センタ－に基づく磁気検出感度は既存の磁気センサと比べて数桁劣っている。これは、ダイヤモンドの高い屈折率(2.4)に起因する全反射により、ダイヤモンド基板から NV センタ－の発光を効率的に取り出せないからである²。そこで我々は、光閉じ込め効果による高効率な NV 発光の利用とチップ上の集積性や機能性が期待されるレーストラック共振器に着目した³。レーストラック構造は通常のリング共振器と異なり直線構造を有しているため、複数光源のダイポールに合わせた共振器電場の設計が可能になる。今回、電磁界シミュレーションを通じて高 Q 値レーストラック共振器実現の可能性を見出し、単結晶ダイヤモンドからなるレーストラック共振器の作製を行ったので報告する。

実験 本研究では、電磁界シミュレーションを用いて、ダイヤモンドレーストラック共振器の設計を行った(半径 1,400nm, 直線部の長さ 2,578nm)。図 1(a)に導波路の断面図を示す。量子センシングには集団の高密度な NV センタ－が用いられるが、お互いの発光を吸収してしまうため、発光の高効率な利用が難しい。そこで、NV センタ－の吸収がない場合の Q 値(Q_0)と吸収がある場合の Q 値(Q_{NV})を求めたところ(波長 678 nm、NV 密度 300 ppb)、 $Q_0 \sim 1.3 \times 10^5$, $Q_{NV} \sim 2.7 \times 10^4$ となり、NV センタ－の吸収がある場合でも高い Q 値を持つレーストラック共振器の構造を見出した。シミュレーションで得られた電場分布の一例を図 1(b)に示す。

続いてレーストラック共振器の作製を行った。単結晶ダイヤモンド基板上的 SiO₂ 膜を加工後、ダイヤモンドにレーストラック構造パターンを転写した。その後、ファラデーケージを用いた斜めエッチングを行うことにより⁴、図 1(c)に示すように中空化されたレーストラック共振器構造を作製した。集団 NV センタ－を含むダイヤモンドに対して同加工技術を適用することで設計した共振器の作製が可能になると考える。その他詳細は当日報告する。

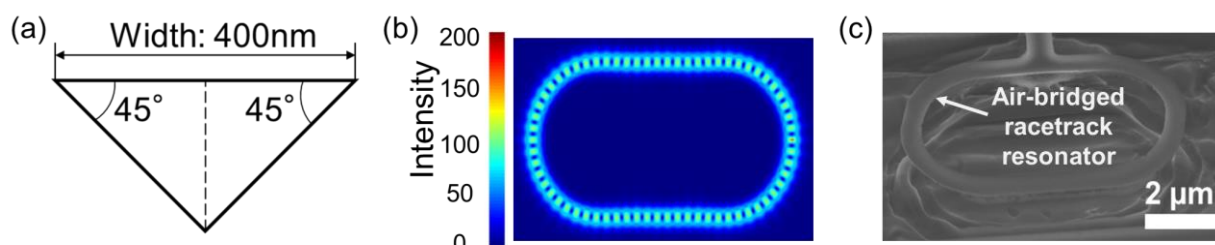


FIG.1. (a) Cross section of the designed racetrack resonator. (b) Calculated electric field distribution in the racetrack resonator. (c) SEM image of the fabricated air-bridged racetrack resonator.

参考文献 ¹J. M. Taylor, *et al.*, Nat. Phys. **4**, 810 (2008). ²D. Le Sage, *et al.*, Phys. Rev. B **85**, 121202 (2012).

³M. J. Burek, *et al.*, Nat. Commun. **5**, 5718 (2014). ⁴P. Latawiec, *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **34**, 041801 (2016).

謝辞 MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067395)、科研費補助金(21K20428、22H01525、22K14829)、東電記念財団、村田学術振興財団、松尾学術復興財団。

ナノダイヤモンド温度計測への応用を目指した 3次元マイクロ波共振器の開発

Development of 3D microwave resonators for applications in nanodiamond thermometry

岡山大院 環

○中島大夢, 押味佳裕, 藤原正澄

Okayama Univ.

Hiromu Nakashima, Keisuke Oshimi, Masazumi Fujiwara

蛍光ナノダイヤモンド(FND)が示す光検出磁気共鳴(ODMR)現象は、ナノ領域の磁場・温度測定に利用される。ODMRはFNDの窒素欠陥中心に、励起光とマイクロ波を照射した時にみられる、蛍光強度の変化を観察する。この測定技術には、マイクロ波の広範囲かつ均一な照射が求められる。これまで、マイクロ波照射機構として様々なものが開発され、我々も生体試料に向けたガラスチップ集積化型アンテナを開発した[1]。我々は温度測定のさらなる応用に向け、新たなマイクロ波照射機構に注目した。それが広範囲に磁場領域を持ち、電場と磁場がきり分けられる3次元共振器である[2]。この機構を用いてナノダイヤモンドの温度計測を行った[3]。しかし、生体応用に向けいくつかの課題が生じた。1つ目は操作性が低い点である。サンプルの位置を変えるたび、共振器並びに測定に必要な要素をすべて調整しなければならない。2つ目にスペクトルのコントラストの低さが、多点ODMR温度測定における精度を下げる恐れがある。

新たな課題を解決するため我々は測定環境を効率化し、装置の最適化を行った。まず、複雑な測定環境を、コンパクトなシステムへと変更した(図1(a))。サンプルを共振器に組み込み、位置によって生じる共振周波数の再調整や再現性の低下を減らした。これにより、共振器の検出エリア3mmの範囲で均一なODMRスペクトルが得られた(図1(b))。マイクロ波照射を安定させるため、共振器と同軸ケーブルの相対位置が固定される仕組みを構築し、照射条件の再調整を行った。これにより、同条件でODMRのコントラストが0.03上昇した(図1(c))。講演では、追加で行ったシステム構築や温度測定の実際について報告する。

[1] K. Oshimi et al., Lab Chip **22**, 2519 (2022).

[2] E. Eisenach et al., Rev. Sci. Instrum. **89**, 094705 (2018)

[3] 中島ら, 第70回応用物理学会春季学術講演会, 16p-A408-14 (2023年3月16日)

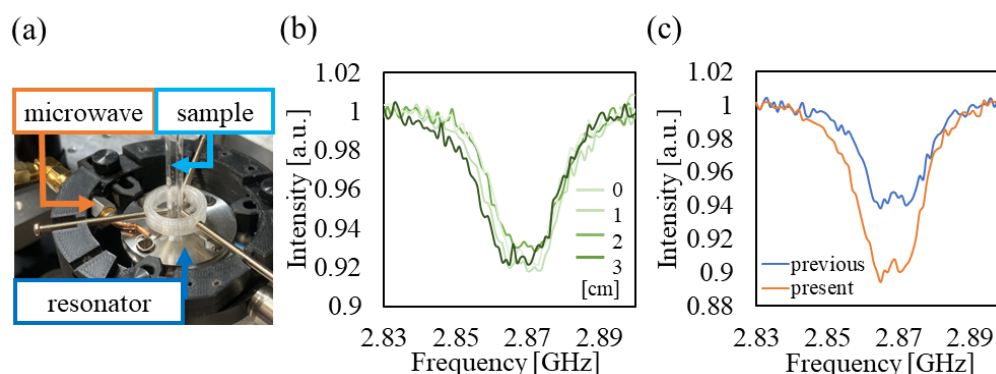


Fig. 1 (a) Photograph of the 3D resonator. (b) contrast uniformity of ODMR spectra (c) difference ODMR contrast between previous system from present

生体応用に向けた爆轟法ナノダイヤモンド中の NV 中心の高効率観測

Efficient detection of NV center in detonation nanodiamond for biological applications

京大化研¹, 量研機構², 京大スピンセンター³, (株)ダイセル⁴○(M2)張木 音々¹, 蘇 梓傑^{1,2}, 根本 雅也¹, 藤原 正規¹, 大木 出^{1,2}, 森岡 直也^{1,3},劉 明⁴, 鶴井 明彦⁴, 吉川 太朗⁴, 牧野 有都⁴, 西川 正浩⁴, 水落 憲和^{1,3}ICR, Kyoto Univ.¹, QST², CSRN, Kyoto Univ.³, Daicel Corp.⁴○N. Hariki¹, F. T. K. So¹, M. Nemoto¹, M. Fujiwara¹, I Ohki², N. Morioka^{1,3},M. Liu⁴, A. Tsurui⁴, T. Yoshikawa⁴, Y. Makino⁴, M. Nishikawa⁴, and N. Mizuochi^{1,3}

E-mail: hariki@dia.kuicr.kyoto-u.ac.jp

[研究背景] 近年、細胞内生命現象を可視化するためのプローブが盛んに研究されている。その有力な候補として、発光中心を含むナノダイヤモンド(ND)が挙げられる。特に発光中心の一種である NV 中心は、室温で操作可能な電子スピン $S=1$ を持つため、NV を含有する ND は多機能なバイオセンサへの応用が期待されている。ND の生体応用には、細胞内に入るサイズで、且つ高濃度な NV を持つ ND が必須となる。本研究では粒径 10 nm 未満の ND を安価かつ大量に得られる爆轟法に注目して、発光中心を多く含む爆轟法 ND(DND)の合成を試みた^[1]。しかし、開発当初は爆薬中の窒素から形成が期待される NV が検出できないという問題があった。今回、我々は熱混酸処理により、NV を高効率に観測できることを見出したので報告する。

[実験・結果] 熱混酸前後の DND に対して、電子スピン共鳴(ESR)測定と光検出磁気共鳴(ODMR)測定から NV の検出を試みた。ESR 測定では、NV 基底状態の禁制遷移におけるマイクロ波の磁場共鳴吸収を観測して、非破壊的に試料中の NV を観測できる。図 1 に黒線で示したように、熱混酸前の DND には大きなバックグラウンド信号が観測され、DND 表面に金属不純物が残っていることが示唆された。そこで先行研究^[2]より DND 表面の金属不純物を除去する 72 時間の熱混酸処理が有用と考え、これを行った。図 1 に赤線で示したように、熱混酸後の DND ではバックグラウンドが小さくなり、NV 濃度が既知の参照試料との比較が可能になった。その結果、本研究の DND の NV 濃度が約 1 ppm であると見積もった。本研究の DND では電子線照射やアニール処理をしなくても高い NV 濃度が観測できた。また、この値は同様の熱混酸処理を実施した DND^[3]と比較して約 10 倍高い。ODMR 測定では、NV のスピン磁気量子数 $m_s=0 \leftrightarrow \pm 1$ 間のエネルギー差に相当するマイクロ波を照射し、NV を観測できる。図 2 のように、熱混酸後の DND からは NV に由来する信号が観測できた。また、ND としては高コントラストな 10%以上の輝点も複数確認した。本研究は、MEXT Q-LEAP(No.JPMXS0120330644)の支援を受けて行われた。

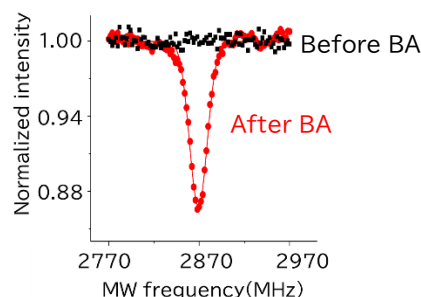
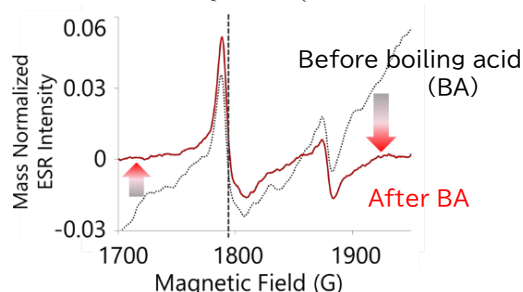


Fig.1 X-band ESR spectra of DNDs before/after boiling acid. Fig.2 CW-ODMR spectra of DNDs before/after boiling acid.

[参考文献] [1] Y. Makino *et al.*, *Dia. Relat. Mater.*, **112**, 108248 (2022). [2] D. Terada, F. T. K. So, *et al.*, *Nanoscale Adv.*, **4**, 2268 (2022). [3] F. T. K. So *et al.*, *J. Phys. Chem. C*, **126**, 5206 (2022).

ダイヤモンド中窒素空孔中心とスカラー型光ポンピング磁気センサ における周波数特性の比較

Comparison of Frequency Response of Nitrogen-Vacancy Center in Diamond with Scalar-mode Optically Pumped Magnetometer

京大院工 [○](M2)池田 早織, 伊藤 陽介

Kyoto Univ., [○]Saori Ikeda, Yosuke Ito

E-mail: ikeda.saori.47s@st.kyoto-u.ac.jp

【はじめに】

ダイヤモンド中窒素空孔中心 (Nitrogen-Vacancy Center: NVC) とは、室温・大気圧下で高感度に磁場・電場・温度を計測できる量子センサであり、近年注目されている。生体磁気計測において用いられる磁気センサには超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID) や光ポンピング磁気センサ (Optically Pumped Magnetometer: OPM) などがあるが、その中でもスカラー型 OPM[1] はダイナミックレンジが広く、周波数領域で磁場を算出するなど NVC と類似する点が多い。

そこで本発表では、NVC とスカラー型 OPM の特徴を理論的・実験的に明らかにし、生体磁気計測に対する有効性について比較検討する。

【原理】

NVC を用いた磁気計測では、光検出磁気共鳴 (Optical Detection Magnetic Resonance: ODMR)[2] を用いる。NV 軸に平行な磁場 B が印加されると ODMR スペクトルが $2\gamma_e B$ (γ_e : 電子の磁気回転比) の大きさで分裂することを利用し、磁場を計測する。スカラー型 OPM は、アルカリ金属原子をパルス光によりスピン偏極させ、その自由誘導減衰の周波数から磁場を計測するものである[1]。

【方法】

NVC による磁場計測系として、Figure 1 に示す実験系を構築した。磁気シールド外に NVC を有するダイヤモンドを設置し、ダイヤモンドから 7 cm 離れた位置にフェライト磁石を 5 個設置した。NVC を波長 532 nm の光で励起しつつ、周波数をスイープさせながらマイクロ波を照射した。ダイクロイックミラーやロングパスフィルターを通過させ不要なバックグラウンド光を除去し、NVC から発される赤色蛍光の強度をフォトダイオードにより計測した。最後に、得られた蛍光スペクトルのピーク幅から磁場の大きさを求めた。スカラー型 OPM については文献[3]に示す実験系を用い計測を行った。

【結果および検討】

Figure 2 は ODMR 計測を行った結果である。磁石を置かない場合は、NVC のゼロ磁場分裂にあたる 2.87 GHz 付近で蛍光が減少する様子

が見られた。また、ピークが 2 つに分裂しており、これらの周波数は 2.8676 GHz および 2.8744 GHz であった。この結果から磁束密度を推定すると 121.43 μT と求められる。

一方、磁石を配置した場合は、6 本のピークが観測され、ピークから各磁束密度を推定すると 514 μT 、5.57 mT、6.23 mT となった。蛍光強度が、地磁気のみの場合の蛍光強度より小さいため、NVC の各軸方向のスペクトルの重なりが、磁石からの磁場によって分離したものと考えられる。現状では、蛍光強度のピークの半値幅から 6.80 MHz の分裂までは計測でき、その磁束密度は 121 μT であった。

発表では、OPM を用いた磁気計測結果についても報告し、それぞれの計測感度について比較検討をする。

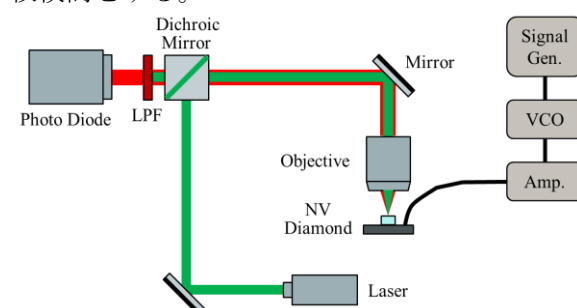


Figure 1: Experimental system for ODMR measurements.

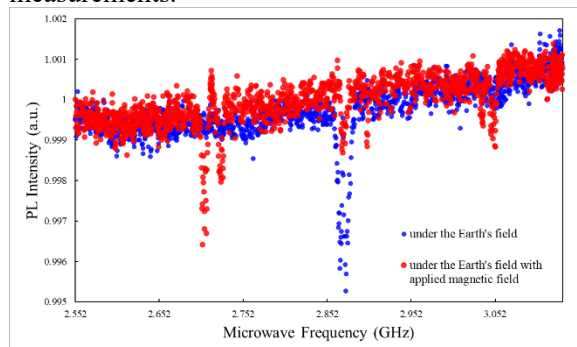


Figure 2: ODMR measurement results.

- [1] M. Limes, *et al.*, *Phys. Rev. Appl.*, **14** (2020) 11002.
- [2] E. Abe and K. Sasaki, *J. Appl. Phys.*, **123** (2018) 161101.
- [3] 堀, 伊藤, 電気学会マグネティックス研究会資料 (2022) MAG-22-170.

Lindblad マスター方程式を用いた ダイヤモンド電子スピン二重共鳴スペクトルの解析 Analysis of Electron Spin Double Resonance Spectra in Diamond Using Lindblad Master Equation

慶大理工¹, 慶大 CSRN², 中大理工³, 金大ナノマリ⁴

○(M1) 鈴木 琉生^{1, 2}, 見川 巧弥^{1, 2}, 岡庭 龍聖^{1, 2}, 松崎 雄一郎³, 徳田 規夫⁴, 早瀬 潤子^{1, 2}

Keio Univ.¹, Keio CSRN², Chuo Univ.³, Kanazawa Univ.⁴

○(M1) Rui Suzuki^{1, 2}, Takumi Mikawa^{1, 2}, Ryusei Okaniwa^{1, 2}

Yuichiro Matsuzaki³, Norio Tokuda⁴, and Junko Ishi-Hayase^{1, 2}

E-mail: rui.0322@keio.jp

【背景・目的】 ダイヤモンド中の窒素空孔中心(NV センター)に局在する電子スピンは、常温・常圧下で長いコヒーレンス時間を有し、磁場や電場、温度変化等による量子状態の変化を光学的に読み出せることから、量子センサへの応用が期待されている。代表的なスピン状態の読み出し手法として ESR 信号を光学的に読み出す連続波光検出磁気共鳴(CW-ODMR)がある。この手法は実験上の操作が簡便であり、CCD カメラを用いた 2 次元イメージングにも適しているが、MHz 帯の交流磁場(RF)の測定は難しかった。そこで、我々のグループは 2 周波の共鳴磁場により生じる「電子スピン二重共鳴現象(ESDR)」を用いた CW-ODMR による RF 磁場の測定手法^[1, 2]を開発した。しかし、これまで ESDR スペクトルの解析に用いられてきた「調和振動子モデル^[2, 3, 4]」は励起マイクロ波(MW)が非常に弱い場合に成り立つモデルであり、中強度以上の MW 下特有のスペクトルの挙動を説明できなかった。そこで、本研究では中強度以上の MW 下でも適用可能な解析モデルとして Lindblad マスター方程式を用いたモデルを提案し、そのモデルが様々な MW 強度におけるスペクトルの再現に有効であることを明らかにした。

【方法】 NV センターの電子スピンの固有状態は、配向軸に対し垂直に静磁場を印可した場合、及び零磁場下では $|0\rangle, |B\rangle = (|+1\rangle + |-1\rangle)/\sqrt{2}$, $|D\rangle = (|+1\rangle - |-1\rangle)/\sqrt{2}$ と表される ($|0\rangle, |\pm 1\rangle$ は $|m_s\rangle$ を表す)。解析対象となる ESDR スペクトルは、 $|B\rangle, |D\rangle$ 状態間に共鳴する RF を印可しつつ、印可 MW 周波数を掃引しながら NV センターからの蛍光強度を測定することで得られる(Fig. 1(a))。中強度以上の MW 下での ESDR スペクトルを説明するモデルを構築するため、理論的に散逸を取り扱える Lindblad 型のマスター方程式^[5]を用いた。ここでは、LASER による初期化を縦緩和としてモデル化し、各準位間の純位相緩和も取り入れた。また、本研究ではアンサンブル NV サンプルを用いるため、NV センターのゼロ磁場分裂 D_{gs}' 、歪 E_x' 、RF 振幅 J に対し不均一性を考慮した。

【結果】 まず、Lindblad マスター方程式を用いたモデル(LB)の弱 MW 下での近似解が調和振動子モデル(HO)と一致することを確認した(Fig. 1(b))。これを利用して、弱 MW 下での測定データを近似解(調和振動子モデル)でフィッティングすることにより D_{gs}' 、 E_x' の不均一幅を推定した。次に、(中強度以上の)MW 強度や RF 強度を変化させながら取得した ESDR スペクトルを不均一性を考慮した上記モデルでフィッティングし、得られたパラメータから MW 周波数を固定し、RF 強度を変化させた場合のコントラストの振る舞い(シグナル)を計算したところ(Fig. 1(c))、調和振動子モデルでは再現できなかった中強度以上の MW 下で特異に起こるコントラストの一時的な向上を再現することができた。この直観に反する現象は、RF 印加による MW 非共鳴準位へのポピュレーションの移動が原因であると考えられる。また、この現象の理解は ESDR による RF 測定精度・感度の向上や、理論面からの RF 測定条件最適化に用いることができるため、重要となる。

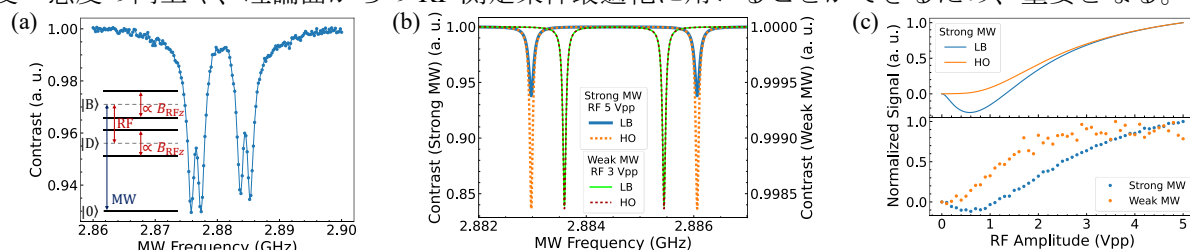


Fig. 1 (a) Experimental ESDR spectrum and energy diagram. (b) Comparison of two models under strong / weak MW. (c) (Lower) Experimental Signal under strong / weak MW. (Upper) Signal reproduced by two models under strong MW.

本研究の一部は、Q-LEAP (No. JP-MXS0118067395)、科研費 (No. 20H05661, 22H01558)、卓越研究員事業 (No. JR-MJPR1919)、金沢大超然プロジェクト 2022 の支援を受けて行われた。

[1] S. Saijo, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **113**, 082405 (2018). [2] T. Yamaguchi, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **58**, 100901 (2019).

[3] H. Tabuchi, *et al.*, J. Appl. Phys. **133**, 024401 (2023). [4] T. Mikawa, *et al.*, Phys. Rev. A (in press).

[5] D. Manzano, AIP Adv. **10**, 025106 (2020).

ダイヤモンド量子センサの連続光励起 Ramsey 法による高感度化

Sensitivity improvement of Diamond Quantum Sensors by Continuously Excited Ramsey Method

東工大¹, [○](M2) 荒木裕太¹, (D1) 藤崎伊久哉¹, (B4) 李則含¹, 波多野雄治¹, 関口武治¹,
岩崎孝之¹, 波多野睦子¹

Tokyo Tech¹, [○]Yuta Araki¹, Ikuya Fujisaki¹, Li Zehan¹, Yuji Hatano¹, Takeharu Sekiguchi¹,
Takayuki Iwasaki¹, Mutsuko Hatano¹

E-mail: araki.y.aj@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の窒素-空孔欠陥(NV センタ)は、室温で動作可能な磁場センサとして、生体磁場計測等への応用が報告されている[1]。ヒトの脳磁計測に応用するにはサブ pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ の磁場感度が必要であるが、Continuously Excited (CE) Ramsey は、CW-ODMR よりも高感度な磁場計測の可能性がある[2]。CE-Ramsey は、NV センタを光で励起しながら磁場信号を蓄積させるため、光によるスピン偏極が起こり、量子力学的なダイナミクスが複雑である(Fig. 1)。本研究では、CE-Ramsey の感度に直接影響するコントラストと位相緩和がレーザーパワーおよびロックイン周期によりどのように変化するかを明らかにし、高感度化への指針を得ることを目的とする。

7 準位モデルの CE-Ramsey シミュレーションから、レーザーパワーを大きくすると、発光レートが増加する一方で、光初期化により位相緩和レートの増加とコントラストの減少が起きることが予測される。ロックイン周期を短くすると、オーバーヘッド時間が短縮される一方で、スピンの初期化が不十分になるためコントラストは減少する。したがって、CE-Ramsey においては、これらの感度パラメータの最適点が存在する。依存性を実験から明らかにするために、ダイヤモンド試料 (HPHT, NV⁻濃度 0.06 ppm) に対して直径 20 μm のレーザー光を照射し、入射光パワーに対する蛍光強度の飽和曲線を得た(Fig. 2)。さらに入射パワーを変えて CE-Ramsey 測定を行ったところ光初期化による位相緩和レートの増加が見られ、シミュレーションとの定性的な一致を示した(Fig. 3)。更にロックイン周期調整によるコントラスト最大化も組み合わせることで、光ショットノイズ限界感度をスピン射影雑音限界に近づけることができ、高感度化が期待される。

本研究は MEXT, Q-LEAP(JPMXS0118067395)の支援を受けています。ダイヤモンド試料の作製は (NIMS) 寺地グループと (QST) 大島グループにご協力いただきました。

[1] K. Arai et al., *Commun. Phys.* **5**, 200 (2022). [2] C. Zhang et al., *Phys. Rev. Appl.* **15**, 064705 (2021).

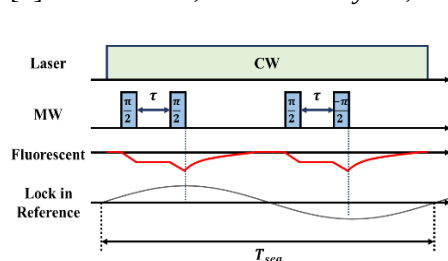


Fig. 1. CE-Ramsey pulse sequence.

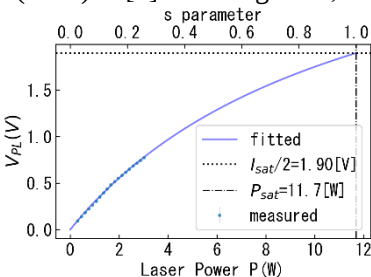


Fig. 2. Photoluminescence saturation behavior. $s = P/P_{\text{sat}}$.

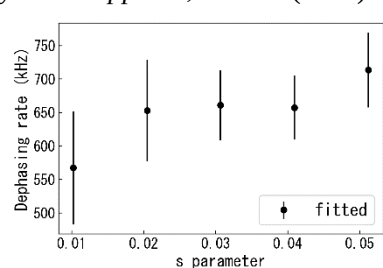


Fig. 3. s-parameter dependence of the dephasing rate in CE-Ramsey experiments.

NV 中心による二次元 NMR を目指した直交検波手法の開発

Quadrature detection method for two dimensional NV-NMR

京大化研¹, 量研², 金沢大³, 京大スピンセンター⁴

○(D3) 森田 航希¹, 大木 出^{1,2}, 徳田 規夫³, 水落 憲和^{1,4}

ICR, Kyoto Univ.¹, QST², Kanazawa Univ.³, CSRN, Kyoto Univ.⁴

○Kohki Morita¹, Izuru Ohki^{1,2}, Norio Tokuda³, Norikazu Mizuochi^{1,4}

E-mail: morita.koki.22v@st.kyoto-u.ac.jp

核磁気共鳴分光法(NMR)は、生体分子を生体系が生きたまま測定可能な数少ない構造解析手法である。反面感度が低く、測定に多量の試料を必要とするため、単一細胞など局所的な測定は困難であった。そこで近年注目されているのがダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心であり、量子センサとしてNMRのプロブに用いることで極少量試料からの構造解析を可能にしつつある。NV 中心は室温下で超高感度かつ超高空間分解能な磁場センサとして利用可能であり、単一分子や単一プロトンの NMR 信号検出、ヒト単一細胞と同様のピコリットルスケールの試料からの構造解析も実証されている[1]。我々の研究室でも、新規量子センシング手法を考案し、NV 中心を用いた NMR で世界最小線幅を実証していた[2]。先行研究における手法

の課題として、ヘテロダイン検波を元になっているものの、単相検波であることが挙げられる。したがって、基準周波数からのずれが測定値として得られるが、高低どちらにずれているかは原理的に不明である。NMR においては構造情報を割り出すために周波数の絶対値が必要であり、市販の NMR 装置ではすべて直交検波が行われている。また、より複雑な分子の分析で必要不可欠な多次元 NMR と呼ばれる核種の相関測定では、目的信号の抽出のために「位相回し」という直交検波を応用した手法が使用される。NV 中心を用いた NMR では測定した時点でヘテロダイン検波されており、直交検波を導入するためには量子測定手法そのものを新たに開発する必要があった。

そこで本研究では、受信機位相を任意に設定可能な量子測定手法を新たに考案した。これにより、NV 中心を用いた極少量NMR(NV-NMR)において初めて直交検波が可能となり、更に従来NMRにおいて使用される全ての位相系手法の NV-NMR への導入が実現する。まず、交流磁場測定を行い直交検波を実証した(Fig.1)。またわずかな位相、振幅ずれによる誤差を修正する CYCLOPS として知られる位相系手法を導入して補正を検証した。更に、二次元 NMR での位相回しによるコヒーレンス選択を行い、シミュレーション結果との比較も発表予定である。

この研究は JSPS 科研費 (N. 21H04653, 22J15804, 22KJ1907)、及び京都大学化学研究所の国際共同利用・共同研究(grant # 2023-85)の支援を受けています。

[1] I. Lovchinski et al. *Science* (2016). ; K. S. Cujia et al. *Nature* (2019).; D. R. Glenn et al., *Nature* (2018).

[2] E. D. Herbschleb, Y. Ohki, K. Morita, Y. Yoshii, H. Kato, T. Makino, S. Yamasaki, N. Mizuochi, *Physical Review Applied*, (2022).

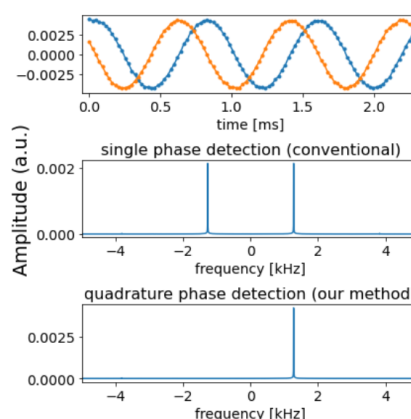


Figure 1: Detected oscillation by using novel method and fourier transform of single phase and quadrature phase

Coherence-based quantum sensing of low-frequency fields

Kyoto Univ.¹, QST², Sumida Corp.³, AIST⁴, Kanazawa Univ.⁵,

○Ernst David Herbschleb¹, Izuru Ohki², Kohki Morita¹, Yoshiharu Yoshii³,
Hiromitsu Kato⁴, Toshiharu Makino⁴, Satoshi Yamasaki⁵, Norikazu Mizuoichi¹

E-mail: herbschleb@dia.kuicr.kyoto-u.ac.jp

For a broad range of applications, high sensitivity and resolution give quantum sensing an important edge. Given its operation under ambient conditions, nitrogen-vacancy centres are considered suitable quantum sensors for example for medical applications. Measuring nuclear magnetic resonance (NMR) spectra of molecules is one example. Fourier-based algorithms have been implemented for measuring such NMR signals [1]. However, their limitation is in the frequency range: it works at high frequencies only (over ~ 1 kHz) since dynamical decoupling sequences are applied. On the other hand, studying low-frequency signals is important for chemical structure analysis [2] and for searching new particles beyond the standard model [3].

In earlier studies, optically detected magnetic resonance techniques were used to detect low-frequency signals [4], which are not as sensitive as coherence-based methods [5]. Here, we demonstrate a fitting-based algorithm to measure low-frequency fields with an over two orders of magnitude higher sensitivity, which is frequency independent in the low-frequency range [6]. Besides in-depth simulation and measurement of the fundamental properties of our algorithm, we study the possibility to measure at ultra-low fields, essential for example for low-field NMR, as well. Finally, as proof-of-concept measurement, we detect low-frequency NMR signals, giving a narrow line width for the free nuclear precession of water of 1.6 Hz.

- [1] D. R. Glenn et al., High-resolution magnetic resonance spectroscopy using a solid-state spin sensor, *Nature* 555, 351-354 (2018).
- [2] D. A. Barskiy et al., Zero-field nuclear magnetic resonance of chemically exchanging systems, *Nature Communications* 10, 3002 (2019).
- [3] S. Chigusa et al., Light dark matter search with nitrogen-vacancy centers in diamonds, *arXiv:2302.12756* (2023).
- [4] C. Zhang et al., Diamond magnetometry and gradiometry towards subpicotesla dc field measurement, *Physical Review Applied* 15, 064075 (2021).
- [5] A. Dreau et al., Avoiding power broadening in optically detected magnetic resonance of single NV defects for enhanced dc magnetic field sensitivity, *Physical Review B* 84, 195204 (2011).
- [6] E. D. Herbschleb et al., Low-frequency quantum sensing, *Physical Review Applied* 18, 034058 (2022).

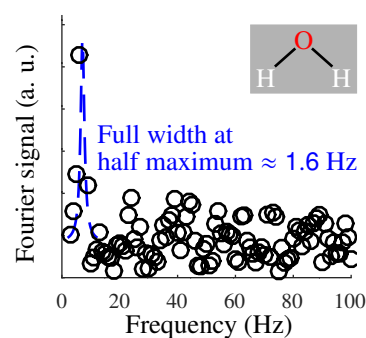


Figure 1: Fourier transform of a measured low-frequency NMR signal of water (data with circles, Lorentzian fit with blue dashed line) giving a full width at half maximum of 1.6 Hz.

Acknowledgements

The research is supported by JST OPERA (No. JPMJOP1841), KAKENHI (No. 21H04653) and the Collaborative Research Program of ICR, Kyoto University (2023-86).

高感度小型化に向けたダイヤモンド NV 磁気センサヘッド

Diamond NV magnetometer sensor head for high sensitivity and miniaturization

東工大¹, 株式会社デンソー², 産総研³, 量研⁴, ○貝沼 雄太¹, 波多野 雄治¹, 柴田 貴行²,
加藤 宙光³, 小野田 忍⁴, 大島 武⁴, 波多野 睦子^{1,4}, 岩崎 孝之¹

Tokyo Tech¹, DENSO CORPORATION², AIST³, QST⁴, ○Yuta Kainuma¹, Yuji Hatano¹,
Takayuki Shibata¹, Hiromitsu Kato¹, Shinobu Onoda¹, Takeshi Ohshima¹, Mutsuko Hatano¹,
Takayuki Iwasaki¹,

E-mail: kainuma.y.aa@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の窒素－空孔 (NV) 中心は優れた磁場感度を有することから磁気センサとして応用が進んでいる[1]。社会実装のためにはセンサの高感度かつ小型化を実現することが重要である。集光率および NV 中心の励起体積の向上は磁場感度向上の課題の一つである。本研究はダイヤモンド基板側面より NV 中心を連続波法により励起し、高い集光率を可能とする複合放物面型集光器(CPC)を有するダイヤモンド NV 磁気センサヘッド作製し、その磁気感度を評価した。

NV 中心は、¹²C 濃縮した CVD 層に電子線($5 \times 10^{17} / \text{cm}^2$)を照射し、真空中で加熱(1000°C , 2 時間)することで生成した。ダイヤモンド基板は CPC の先端に光学接着剤で固定した(Fig. 1(a), (b-i))。ダイヤモンド基板側面から偏光制御したレーザを照射し (Fig. 1(b-ii))、ダイヤモンド中の NV 中心を励起し、フォトダイオード(PD) で蛍光を検出した(Fig. 1(b-iii))。外部磁場はダイヤモンドの結晶軸[111]方向に調整した。[111]方向の NV 中心の低周波側と高周波側に共鳴周波数を合わせ、ロックインアンプの出力から磁場ノイズを計測した[2]。検出した蛍光電流(約 4.0 mA)は先行研究の光ファイバ先端に実装する方法[2]に比べて約 80 倍向上を示した。磁気感度評価から、磁場ノイズ(magnetic sensitive)およびレーザノイズ(magnetic insensitive)のフロアレベルは約 $38 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ および約 $22 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ であり、ショットノイズ限界は約 $19 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ と見積もられた(Fig. 1(c))。また、ダイヤモンド基板側面に蛍光が明るい領域(Fig. 1(b-iii))が観測されているため、今後、CPC へ蛍光を誘導することで集光効率および磁気感度のさらなる向上が期待できる。これらの結果から本研究で開発したセンサヘッドの構成は高感度な磁気センサヘッド実現の可能性が示唆された。本研究は文部科学省光・量子飛躍フラグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118067395 の助成を受けています。

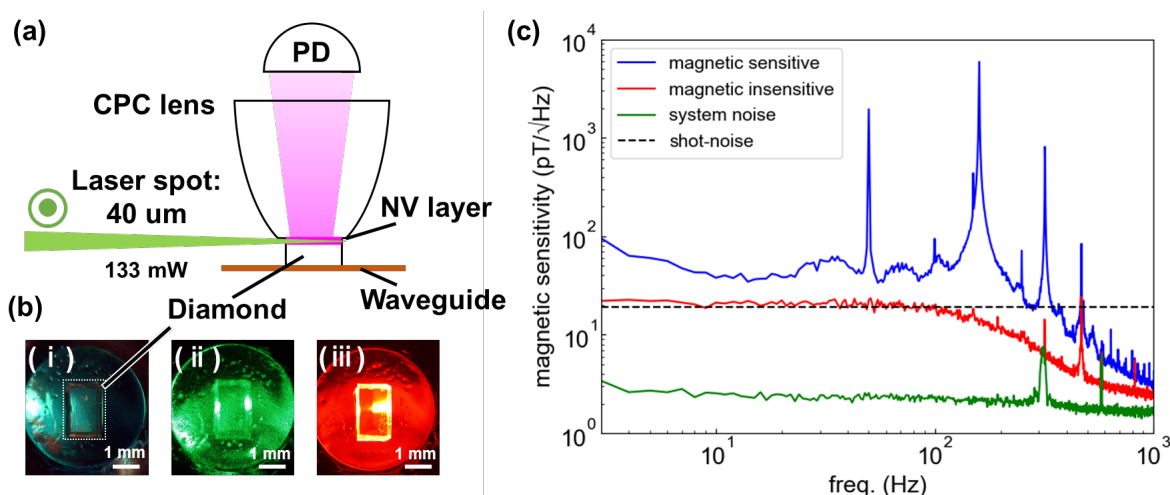


Figure 1: Diamond NV magnetometer with CW method.

(a) Schematic of a diamond sensor head, (b) Optical image of diamond sensor. (i) without laser, (ii) with laser, and (iii) fluorescence image from NV diamond (c) Magnetic sensitive and insensitive noise spectra. Measurements were performed in a one-layer magnetic shield.

[1] K. Arai et al., Commun. Phys. **5**, 200 (2022). [2] Y. Hatano et al., Appl. Phys. Lett. **118**, 034001 (2021).

EV 電池電流計測用のダイヤモンド量子センサのロバスト性実証 Verification of Robustness in Electric Vehicle Battery Monitoring with Diamond Quantum Sensor

東工大¹, 矢崎総業(株)², 量研³, ○波多野雄治¹, 谷川純也², 中國晃充², 関口武治¹,
貝沼雄太¹, 阿部浩之³, 小野田忍³, 大島武³, 岩崎孝之¹, 波多野睦子^{1,3}
Tokyo Tech¹, YAZAKI Corp.², QST³, ○Yuji Hatano¹, Junya Tanigawa², Akimichi Nakazono²,
Takeharu Sekiguchi¹, Yuta Kainuma¹, Hiroshi Abe³, Shinobu Onoda³, Takeshi Ohshima³,
Takayuki Iwasaki¹, Mutsuko Hatano^{1,3}
E-mail: hatano.y.aa@m.titech.ac.jp

電動車(EV)における電池モジュールの充放電電流を高精度かつ広いダイナミックレンジで計測可能なダイヤモンド量子センサを提案してきた[1]。一方、実際の車載ノイズ環境下で計測が可能なことも実証必要である。EV 車の電池モジュール周辺の磁場雑音を模した 80 μT の磁場雑音の中でも動作可能なことを確認したので報告する。

実験に使用したダイヤモンド量子センサは、 $2 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ の HPHT-Ib (111) 結晶に $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射及び 1000 $^{\circ}\text{C}$ 2 時間のアニールを行ったものであり、5~6 ppm の NV⁻ 濃度を有する。このダイヤにコア径 400 μm のマルチモードファイバを接着し、励起光入力・蛍光検出を行う[1]。差動計測は、バスバの上下にセンサ A, B を配置することで実現する(Fig.1(a))。センサ A, B では [111] の NV 軸の高周波側および低周波側の二つの共鳴周波数 R_H , R_L の差(Resonance Frequency Difference (RFD) $\equiv R_H - R_L$)の変化($\Delta RFD = \Delta(R_H - R_L)$)として磁場を検出することができる(Fig.1(b))。センサ A, B 対の差動出力 $\Delta RFD_B - \Delta RFD_A$ として外部磁場雑音を同相雑音として除く。このセンサ A, B 対に印加する外部磁場雑音を変化させた時の差動出力を計測した(Fig.2)。バスバには 1 A から 1 mA までの異なる振幅の電流パルス列を 10 s オン-5 s オフの間隔で印加した(Fig.2(a))。外部磁場は計測開始後 470 s までは印加せず、470 s より 80 μT_{pp} を周期 10 s の正弦波で印加する(Fig.2(b))。センサ A, B 対の差動出力 $\Delta RFD_B - \Delta RFD_A$ として、外部磁場が無い場合には 10 mA の電流パルスを検出可能であるが、外部磁場 80 μT_{pp} の環境下であっても、20 mA と 10 mA の電流パルスは識別可能であることを確認した。A, B のセンサ単独では外部磁場印加時には数百 mA の電流パルスも識別困難であるため、今回開発した差動計測の有効性が示された。

なお、それぞれのセンサは $-150^{\circ}\text{C} \sim +150^{\circ}\text{C}$ の範囲で一定の感度を有することが示されている[2]。これらにより EV 車電池電流計測用ダイヤモンド量子センサのロバスト性が実証されたと考える。本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395 の助成を受けています。

[1] Y. Hatano et al., Sci. Rep. **12**, 13991 (2022). [2] K. Kubota et al., Diam. Relat. Mater. **135** 109853 (2023).

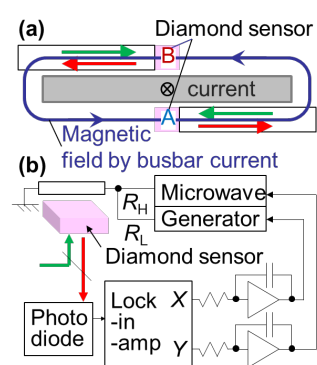


Fig. 1 EV battery monitor to measure busbar current. (a) Dual diamond sensor for differential detection. (b) Control circuit to detect busbar current as relative resonance frequency difference ΔRFD .

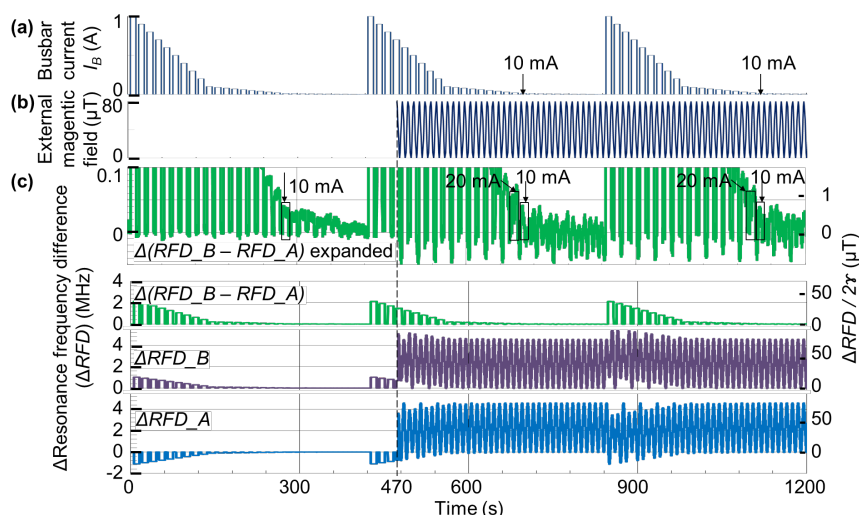


Fig. 2 Suppression of magnetic field noise effect by differential detection. (a) Current pulse train from 1 A to 1 mA. (b) 80- μT_{pp} 0.1-Hz magnetic field noise starting at 470 s. (c) Diamond sensor output as relative resonance frequency difference ΔRFD .

ラット脳磁検出に向けた高感度ダイヤモンド量子センサシステムの構築

Developing a sensitive diamond quantum sensor system

for detecting the brain magnetic field of a living rat

東工大¹, 東大², NIMS³, QST⁴, °吉村 厚美¹, 関口 直太¹, 伏見 幹史², 北田 純大¹,

眞榮 力³, 宮川 仁³, 谷口 尚³, 寺地 徳之³, 小野田 忍⁴, 大島 武⁴,

関野 正樹², 岩崎 孝之¹, 波多野 睦子¹

Tokyo Tech.¹, Univ. of Tokyo², NIMS³, QST⁴, °Atsumi Yoshimura¹, Naota Sekiguchi¹, Motofumi

Fushimi², Atsuhiko Kitada¹, Chikara Shinei³, Masashi Miyakawa³, Takashi Taniguchi³,

Tokuyuki Teraji³, Shinobu Onoda⁴, Takeshi Ohshima⁴, Masaki Sekino², Takayuki Iwasaki¹,

Mutsuko Hatano¹

E-mail: yoshimura.a.ac@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の窒素－空孔（NV）中心を利用したダイヤモンド量子センサは微小磁場を室温で測定が可能のほか空間分解能も高いという利点があり、生体磁場測定への応用に向けた研究が盛んに行われている[1, 2]。特に脳磁の測定は医療診断や脳機能の理解といった応用で極めて重要である。しかし、磁場感度は脳磁の測定にまだ十分でなく、さらなる高感度化が求められており、さらに実際の生体磁場測定に適した系の開発も課題である。本研究では、ラット脳磁検出を目標に、生きているラットの頭に近づけられる非侵襲で高感度なダイヤモンド量子センサを開発した。

Figure 1 に測定系の模式図を示す。NV 中心を含む HPHT ダイヤモンド[3]を麻酔をかけたラットの頭上に設置し、532 nm のレーザー光を入射しダイヤモンドからの蛍光を PD に集光した。レーザー光を参照用 PD_{ref}に入力し、蛍光用 PD との出力電流の差分をとって光強度ノイズを低減した。

実際の生体測定ではラットに刺激を与えて脳磁を誘発し、刺激に合わせて信号を積算する。誘発脳磁の帯域である数 Hz から数十 Hz において、ラットがいない状態ではあるが 30 pT Hz^{-1/2} より高い磁場感度を得た(Fig. 2)。30 から 80 Hz では 17 pT Hz^{-1/2} のノイズフロアである。誘発脳磁はセンサ位置で 1 から 10 pT と見積もられ、2 Hz の刺激に誘発された 10 pT の磁場であれば帯域 50 Hz にて約 1 分の積算で検出可能と見込まれる。本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）JPMXS0118067395 および JPMXS0118068379 の助成を受けたものである。

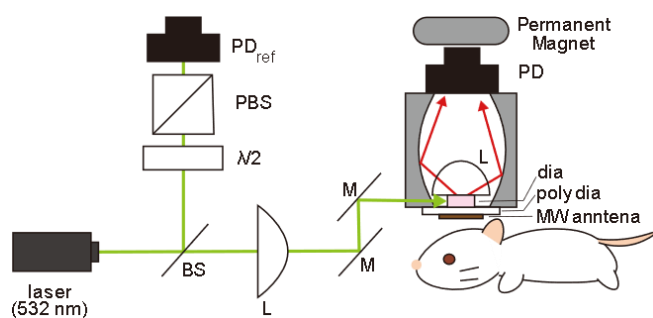


Fig. 1 Diamond quantum sensor system.

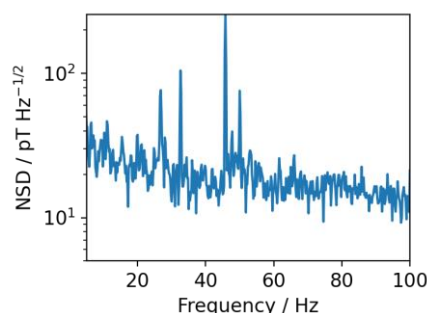


Fig. 2 Noise spectrum.

[1] J. F. Barry *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **113**, 14133 (2016). [2] K. Arai *et al.*, Comm. Phys. **5**, 200 (2022).

[3] M. Miyakawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **61**, 045507 (2022).

ダイヤモンド NV センター光検出磁気共鳴スペクトルの RF 電磁波照射効果とその空間分布

Mapping of the RF field by optically detected magnetic resonance in diamond NV centers

筑波大数理物質¹, 産総研², 名古屋大工³

大久保 義克¹, 小野寺 駿太¹, 中川 茉莉¹, 東 勇佑¹,

渡邊 幸志², 柏谷 聡³, 野村 晋太郎¹

Univ. of Tsukuba¹, AIST², Nagoya Univ.³

°Yoshiktsu Ohkubo¹, Syunta Onodera¹, Mari Nakagawa¹, Yusuke Azuma¹,

Hideyuki Watanabe², Satoshi Kashiwaya³ and Shintaro Nomura¹

E-mail: s2320159@u.tsukuba.ac.jp

ダイヤモンド中の負電荷を持つ窒素-空孔(NV) センター中は、室温で長い量子コヒーレンス時間を持ち、高感度の RF 電磁波センサーとしても注目されている[1-3]。今回私たちは、ダイヤモンド NV センターに RF 電磁波を照射し、光検出磁気共鳴スペクトルの RF 照射効果を調べ、その空間分布を得た結果について報告する。

¹⁵Nをドーピングした CVD 成長高品質ダイヤモンド NV センター試料にマイクロ波パルスとレーザーパルスと RF 電磁波を照射して、光検出磁気共鳴スペクトル(ODMR)を取得した。NV センターからの発光は sCMOS カメラでイメージとして取得した。図 1 に RF 4 MHz を照射した場合の ODMR スペクトルを示す。2.755 GHz と 2.758 GHz の 2 つのディップは¹⁵Nの超微細相互作用による分裂である。そのほか、この 2 つのディップから 4 MHz の整数倍離れたディップが見られる。これらの振幅は、RF 電磁波の振幅に依存して変化する。文献[1,2]のモデルに従って解析を行った。ローレンツ関数へのフィットで得たディップの線幅はほぼ一定で、ディップの振幅はベッセル関数を用いて表される。この解析から RF 電磁波のラビ振動数は、図の場合 1.77 MHz が得られた。さらに、サイドバンドの振幅の空間マッピングから RF 電磁波の振幅の空間分布が得られた。この手法は簡便で定量的な RF イメージング法として有用である。

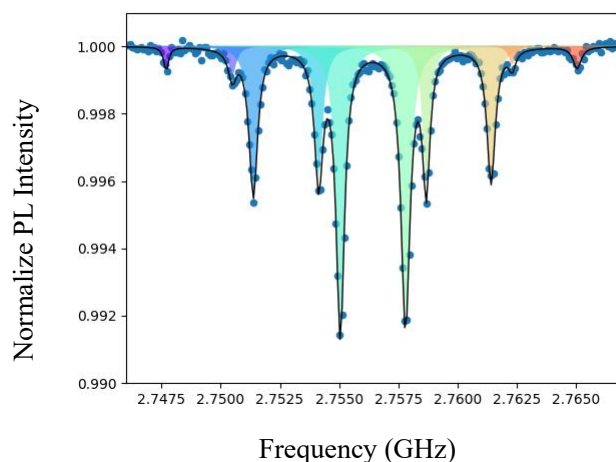


図 1: RF 4 MHz 照射下における光検出磁気共鳴
スペクトル

[1] S. Ashhab, J. R. Johansson, A. M. Zagorin, and Franco Nori, Phys. Rev. A **75**, 063414 (2007).

[2] L. Childress and J. McIntyre, Phys. Rev. A **82**, 033839 (2010).

[3] S. Nomura, K. Kaida, H. Watanabe, and S. Kashiwaya. J. Appl. Phys., **130**, 024503, (2021).

ダイヤモンド量子センサを用いたパワエレ用軟磁性薄膜の 磁化過程のイメージング

Imaging of magnetization dynamics of soft magnetic thin film for power electronics by diamond quantum sensors

○(D)北川 涼太¹, 永田 俊典¹, 孝橋 照生², 中司 碧¹, 辻 趙行¹, 仁田 帆南¹, 水野 皓介¹,
高村 陽太¹, 岩崎 孝之¹, 中川 茂樹¹, 波多野 睦子¹ (1. 東工大, 2. 日立製作所)

○Ryota Kitagawa¹, Shunsuke Nagata¹, Teruo Kohashi², Aoi Nakatsuka¹, Takeyuki Tsuji¹,
Honami Nitta¹, Kosuke Mizuno¹, Yota Takamura¹, Takayuki Iwasaki¹, Shigeki Nakagawa¹,
and Mutsuko Hatano¹ (1. Tokyo Tech., 2. Hitachi, Ltd.)

E-mail: kitagawa.r.ab@m.titech.ac.jp

近年, パワーエレクトロニクス回路において大容量化とキャリア周波数の高周波化の需要が高まっているものの, 重要な受動素子であるインダクタなどに使われる軟磁性材料の高周波における鉄損が大きいために高周波動作化のボトルネックとなっている[1]. 低鉄損の軟磁性材料の開発には, 磁化-磁場特性の空間分布から計算される鉄損の空間分布を計測し, 磁壁移動や材料中の欠陥などの局所的な要因との相関を明らかにすることは有効である. そこで, 我々が構築してきた幅広い周波数レンジ(DC, 1 kHz-10 MHz), 高空間分解能(~500 nm)で磁場の強度・位相同時イメージングが可能なダイヤモンド量子センサ[2]を, 磁化-磁場特性のイメージングに適用することを目的とした. 本研究では, 直流におけるダイヤモンド量子センサを用いたパワエレ用軟磁性薄膜の磁化過程のイメージングについて報告する.

ナノ磁性粒子が絶縁体マトリックス中に分散した構造に由来する導電率の低さから, 高周波用軟磁性薄膜として開発されている CoFeB-SiO₂ 薄膜[3]の磁化過程を, 高感度に磁場イメージングが可能な[111]完全配向窒素-空孔(NV)センサ[4]を用いて計測した(Fig. (a)). 対向ターゲット式スパッタリングによって熱酸化 Si 基板上に CoFeB-SiO₂ 薄膜が 150 nm 堆積された. 化学気相合成法によって Ib (111)ダイヤモンド基板上に膜厚 1 μm の [111]完全配向 NV センサが製膜された. NV センサは CoFeB-SiO₂ 層の直上に配置された. 電磁石によって CoFeB-SiO₂ 薄膜に印加する磁場を変えながら, 光検出磁気共鳴イメージング像を撮影した. 比較のため類似の条件で磁気光学カー効果(MOKE)イメージング像も撮影した.

印加磁場に対して磁場像は大きく変化した(Fig. (b)). +(-) 10 Oe 以上印加時は正(負)の磁気飽和が見られた. 0 Oe の時は磁化履歴に依存しエッジの磁極の符号が変化した. さらにこの時エッジから膜の内側に細く伸びる模様が観察された. 同様の条件・視野で撮影した MOKE 像でもエッジから三角形に伸びる逆磁区が観察された(Fig. (c)). 2 つの像で, 逆磁区の密度はおおよそ 9 個/100 μm, 長さは 30 μm 程度と逆磁区の特徴が一致した. 一方で, ダイヤモンドセンサで撮影した像は逆磁区の先端が強調されている. これは, 磁区の先端に磁極が集中しているためだと考えられる.

本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395 および, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2106 の助成を受けたものです.

[1] J. M. Silveyra et al., *Science* **362**, 6413 (2018) [2] K. Mizuno et al., *Sci. Rep.* **10**, 1 (2020)

[3] Y. Takamura et al., *IEEE Trans. Magn.*, to be published in 2023. [4] T. Tsuji et al., *Diam. Relat. Mater.* **123**, 108840 (2022).

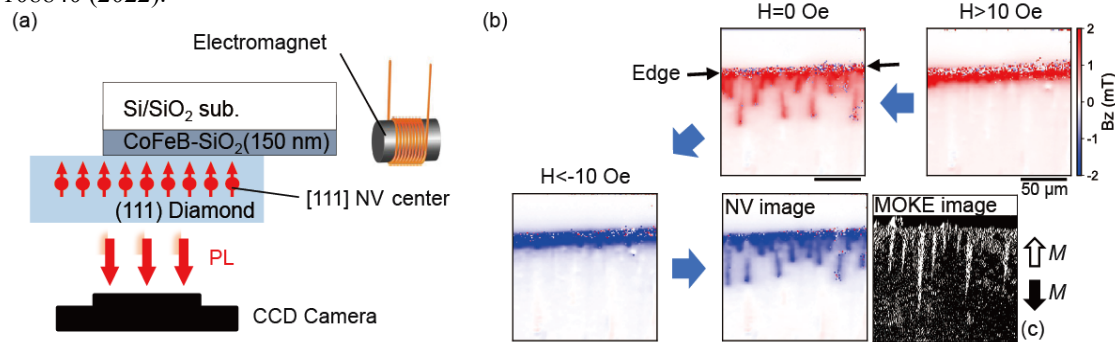


Fig. (a) Experimental setup. (b) Magnetization-magnetic field characteristics imaged by diamond quantum sensor. (c) MOKE image at H=0 Oe. Black and white arrow indicate the directions of the magnetization.

ODMR 法を用いた温度測定のロックイン検出法による高感度化

High Sensitivity of Temperature Measurement

using ODMR Method with Lock-in detection Method

金沢大 ○(M1)河合 勝太郎, 示野 義和, 長尾 祥亮, 桑村 有司, 丸山 武男

Kanazawa Univ. ○S. Kawai, Y. Shimeno, Y. Nagao, Y. Kuwamura, and T. Maruyama

E-mail: best96@stu.kanazawa-u.ac.jp

【はじめに】

近年、高感度磁気センサーとしてダイヤモンド NV センターによる光検出磁気共鳴(ODMR)が盛んに研究されている。ダイヤモンド NV センターでは波長 532 nm で励起すると波長 637 nm 付近に NV センターに起因するピークが観測できる。この NV センターに 2.87GHz のマイクロ波を照射することで共鳴吸収が生じ、外部磁界により吸収周波数が分裂する。この分裂幅は磁界強度に比例するため、分裂幅を測定することで磁界強度が測定できる。さらに共鳴周波数の変動を測定することで温度が測定できる。

これまでに測定の高感度化を目指しマイクロ波源にロックイン法を導入し磁界強度を測定した[1]。今回、同手法で温度測定を試みたので、以下に報告する。

【実験方法】

Fig. 1にODMR測定システムを示す。励起レーザー(波長532 nm)をダイクロイックミラーを介してNVセンター試料に入射する。NVセンターによる発光はDMで反射しPDで検出する。またDMで反射後のロングパスフィルターは励起光をカットするために挿入している。マイクロ波はアンテナから照射する。このマイクロ波信号を5kHzでAM変調し、ロックインアンプでPDからの信号と同期させた。

【結果と考察】

Fig. 2 にロックインアンプから得られた差分信号のマイクロ波周波数依存性を示す。ヒーター温度を 20°C から 60°C に変化させることで、2.87GHz 付近の NV センターに起因するピークの変化が得られた。また共鳴周波数の温度変化を Fig. 3 に示す。本測定系において温度測定が可能であることがわかった。

【まとめ】

ロックイン法を用いた ODMR 法による温度センサー測定系を構築し、共鳴周波数の温度依存性を観測した。

【参考文献】

[1] 示野ら, 第 70 回応物春, 16p-A408-15, 2023.

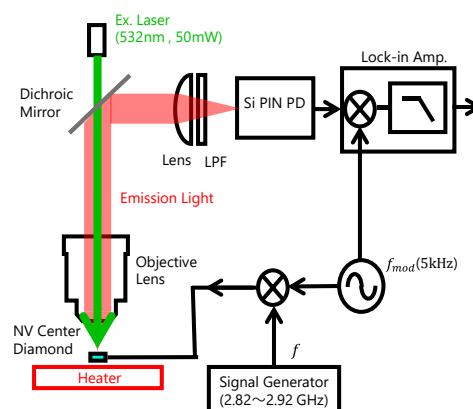


Fig. 1 Measurement System.

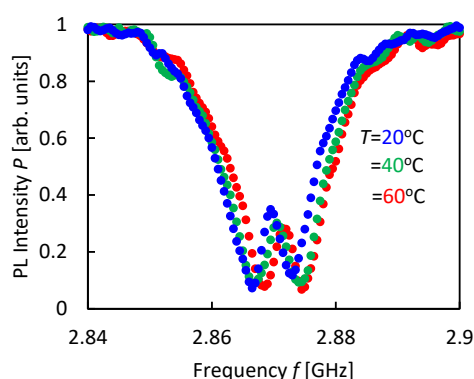


Fig. 2 Microwave frequency dependence of PL intensity.

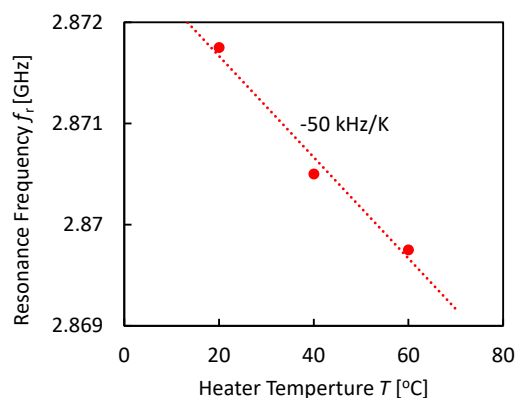


Fig. 3 Temperature dependence of resonance frequency.

効率的な IV 族-V センター形成のための熱処理時間依存性評価

Evaluation of Annealing Time Dependence for Efficient Creation of Group IV-V Center

群馬大¹, 量研², 横国大 QIC³, 物材機構⁴

○(M2) 馬場智也^{1,2}, 小野田忍^{2,3}, 木村晃介^{1,2}, 加田渉¹, 谷口尚⁴, 宮川仁⁴, 大島武², 花泉修¹

°Gunma Univ.¹, QST², YNU-QIC³, NIMS⁴

°Tomoya Baba^{1,2}, Shinobu Onoda^{2,3}, Kosuke Kimura^{1,2}, Wataru Kada¹, Takashi Taniguchi⁴,

Masashi Miyakawa⁴, Takeshi Ohshima², Osamu Hanaizumi¹

E-mail: t221d069@gunma-u.ac.jp, baba.tomoya@qst.go.jp

[はじめに]

ダイヤモンド中の蛍光欠陥である窒素-空孔(NV: Nitrogen-Vacancy)センターは、量子情報デバイスや量子センサへの応用が注目されている。NV センター以外にも、IV 族イオンのシリコン(Si)、ゲルマニウム(Ge)、スズ(Sn)と原子空孔(V)で構成された蛍光欠陥(IV 族-V センター)も量子情報デバイスへの応用が期待されている。IV 族-V センターは、ゼロフォノン線(ZPL: Zero Phonon Line)からの発光が数十パーセント以上もあり、NV センターの ZPL(約 4%)と比べて高効率であるために、容易に観察可能な単一光子源として量子情報通信応用へ向けた研究が進められている¹。それに加えて、極低温においてミリ秒単位の長いスピン緩和時間が期待できるという点で、NV センターと同様に量子情報デバイスへの応用にも期待が集まる^{1,2,3}。IV 族-V センター形成するためには、イオン注入時に形成された空孔を IV 族イオンと結合させるための高温熱処理が必要である。しかし、IV 族-V センター形成のための熱処理条件に関する研究は十分とは言えない。そこで我々は、IV 族-V センターを形成するための熱処理プロセスに着目し、高速昇温可能な高温熱処理装置を使用して熱処理時間依存性評価を行い、効率的な IV 族-V センター形成条件を調べた。

[実験及び結果]

本研究では、高温高压(HPHT)ダイヤモンド試料を用いた。Si、Ge、及び Sn イオンを 3MV タンデム加速器により 18 MeV で加速させ、試料表面からの深さ約 3 μm に注入した。次に、Ar 中で高速熱処理 (RTA: Rapid Thermal Annealing) 炉を用いて熱処理を施した。熱処理プロセスは次の通りである。まず、1 分で 300°C に昇温し、300°C を 10 分保持、30 秒で 1750°C に昇温し、30 秒で 1800°C まで昇温させた。1800°C で 1 分~10 分で熱処理を行った。熱処理後、フォトルミネッセンス(PL: PhotoLuminescence)測定を行った。PL 測定は、堀場製作所の顕微レーザーラマン分光測定装置 LabRAM HR Evolution を使用し、532 nm のレーザー(CW)で測定を行った。熱処理と PL 測定を交互に繰り返す行う事によって熱処理時間と蛍光欠陥の PL 強度の関係を調べた。

Fig.1 に 1800°C で 20 分の熱処理を行った試料の PL スペクトルを示す。IV 族イオンを注入したすべての試料において、それぞれの蛍光欠陥を形成することに成功した。Fig.2 に熱処理温度を 1800°C に固定した際の各蛍光欠陥からの PL 強度の熱処理時間依存性を示す。Si 注入試料では、1 分の熱処理で PL 強度が最大となった。Ge 注入試料では、10~20 分で PL 強度が最大となった。Sn 注入試料では、40 分で PL 強度が最大となった。すべての蛍光欠陥は PL 強度が最大になった後に減少した。1800°C の熱処理において、IV 族イオンの質量数が増加すると PL 強度の最大となる熱処理時間が長くなることが分かった。発表では、熱処理時間と IV 族-V センター形成の関係について議論する。

[参考文献]

¹T. Iwasaki et al., PRL 119, 253601 (2017), ²L. Rogers et al., PRB 89, 235101 (2011),

³T. Iwasaki et al., Sci. Rep., 5, 12882 (2015)

[謝辞]

本研究は JST ムーンショット型研究開発事業・JPMJMS2062 の支援を受けた。

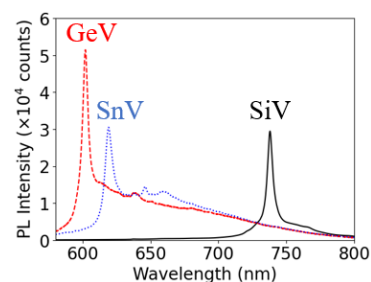


Fig.1 PL spectrum of SiV, GeV and SnV after annealing at 1800°C for 20 minutes in Ar ambient.

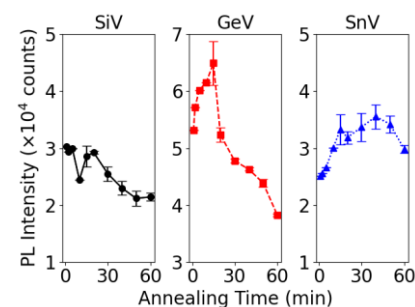


Fig.2 PL Intensity of SiV, GeV and SnV as a function of annealing time.

ダイヤモンド中のスズ-空孔センターの電荷状態ダイナミクス

Charge state dynamics of a tin-vacancy center in diamond

東工大¹, NIMS², QST³ ○(B) 陳溢暘¹, (M2) 池田啓太¹, (D3) 汪鵬¹, 谷口尚², 小野田忍³,
波多野睦子¹, 岩崎孝之¹

Tokyo Tech¹, NIMS², QST³ ○Y. Chen¹, K. Ikeda¹, P. Wang¹, T. Taniguchi², S. Onoda³,
M. Hatano¹, T. Iwasaki¹

E-mail: chen.y.be@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中のスズ-空孔 (SnV) センターは安定した発光および鋭いゼロフォノン線を示し、さらにケルビン温度での長いスピンコヒーレンス時間が予測されているため量子ネットワークへの応用が期待されている[1]。スピン-フォトンインターフェースでは、2 準位間のエネルギーに一致する共鳴励起を行うが、負電荷状態の SnV は共鳴励起によって異なる電荷状態 (暗状態) に遷移することが分かっている[2, 3]。しかしながら、暗状態への遷移条件など、そのダイナミクスは明らかになっていない。本研究では、共鳴レーザおよび非共鳴レーザの照射時間・タイミングを制御することで、負電荷 SnV センターの光学的な電荷遷移について研究した。

加速エネルギー18 MeV のイオン注入および 2100 °C/7.7 GPa の高温高压アニールによって単結晶ダイヤモンド中に形成した SnV センター[4]を用いた。共鳴・非共鳴レーザの照射タイミングは AOM を用いて制御し、SnV センターからの蛍光は APD およびタイムデジタルコンバーターで計測した。

Fig. 1 は、非共鳴レーザによる電荷状態の初期化後に共鳴レーザを照射したときの負電荷 SnV からの発光強度の時間依存性である。発光は 20 ms 間安定であるが、inset に示す通り、秒スケールでは時間とともに発光強度が減衰していることがわかる。一方、非共鳴レーザを常時照射している状態で共鳴レーザを加えるシークエンス[5]では、数 ms で急激に発光が減少することが分かった (Fig. 2)。これは共鳴レーザのみならず、非共鳴レーザによっても暗状態への遷移が促進される証拠であり、暗状態の制御や電荷ダイナミクスの解明につながるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、東レ科学振興会、文部科学省 Q-LEAP フラッグシッププログラム (No. JPMXS0118067395)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2062) の助成を受けたものである。

[1] T. Iwasaki et al., Phys. Rev. Lett. 119, 253601, 2017. [2] J. Görlitz et al., npj Quantum Information, 8, 45, 2022. [3] 池田啓太 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 23p-A202-7 [4] Y. Narita et al., Phys Rev. Appl. 19, 024061, 2023. [5] D. Chen et al., Phys. Rev. Lett. 123, 033602, 2019.

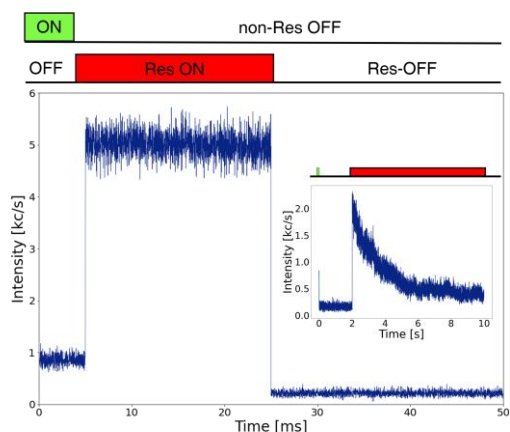


Fig. 1 Fluorescence from a negatively charged SnV under resonant excitation. Inset: longer time scale.

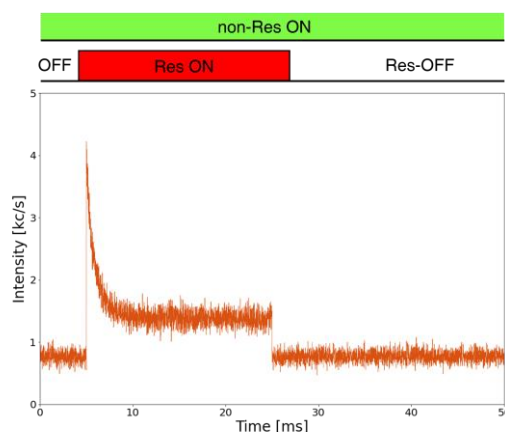


Fig. 2: Spontaneous exposure to resonant and non-resonant laser.

ダイヤモンド中の鉛一空孔センターのスピン選択励起

Spin Selective Excitation of a PbV Center in Diamond

東工大¹, NIMS² (M2) 大羽一輝¹, Wang Peng¹, 谷口尚², 波多野睦子¹, 岩崎 孝之¹

Tokyo Tech¹, NIMS² (M2) K. Oba¹, P. Wang¹, T. Taniguchi², M. Hatano¹, T. Iwasaki¹

E-mail: oba.k.ab@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の IV 族一空孔カラーセンターは、反転対称性による外部ノイズ耐性や鋭いゼロフォノン線を有することから量子ネットワークへの応用が期待されている。その中でも鉛一空孔 (PbV) センターは、最も大きい基底状態分裂幅を持つ[1]ことから、主なデコヒーレンス源とされるフォノンの影響を低減できることが予想されるため、より高い温度において長いスピンコヒーレンス時間が期待される。スピン特性評価には、磁場印加によるスピン状態のゼーマン分裂および基底一励起状態間でのスピン選択励起が必要となる。本研究では、磁場下での PbV センターの共鳴励起分光(PLE)により、スピン状態を選択した共鳴光学遷移を観測した。

PbV センターは、IIa(001)単結晶ダイヤモンドに Pb イオンを注入後、高温高压アニールを行い作製した。磁石は磁力方向が[100]となるよう設置し、サンプル表面で約 60 mT の静磁場強度である。計測温度はクライオスタットにより 8.8 K から 24.9 K まで変化させた。狭線幅の波長可変レーザーによる励起波長掃引およびフォノンサイドバンドの蛍光検出により PLE 測定を行った。

PbV センターは、スピン軌道相互作用による分裂のために基底状態および励起状態がそれぞれ 2 つに分裂したエネルギー構造を有しており、ゼロ磁場下では A-D の 4 つの光学遷移が存在する (Fig. 1(a))。磁場印加により、スピン 1/2 のために縮退していたスピンレベルがゼーマン分裂することで、スピン状態を選択した光学遷移が可能となる。本研究では、蛍光強度の高い C ピークに注目し計測を実施した。

Fig. 1(b)に各温度における PLE スペクトルを示す。観測されている 2 つのピークは Fig. 1(a)の C2 および C3 に対応しており、スピン状態を保存したスピン選択励起を示している。この 2 つのピークのエネルギー差 (約 400 MHz) は、基底状態と励起状態のゼーマン分裂のエネルギー差である。また、8.8 K まで冷却を行うとこのピークが消失した。これは、スピン保存遷移で励起された電子がスピン反転により、暗状態へ存在確率が偏るためであると考えられる。高い温度の際には、フォノン吸収によるスピン緩和によって明状態の電子の存在確率が増加するためにピークが観測できる。この結果は、8.8 K において PbV センターの基底状態間でのフォノン吸収が抑制されていること示しており、今後のスピン特性評価において重要な知見となるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、東レ科学振興会、文部科学省 Q-LEAP フラッグシッププログラム(No.JPMX0118067395)の助成を受けたものです。

[1] P.Wang *et al.*, *ACS Photonics* 8, 2947 (2021).

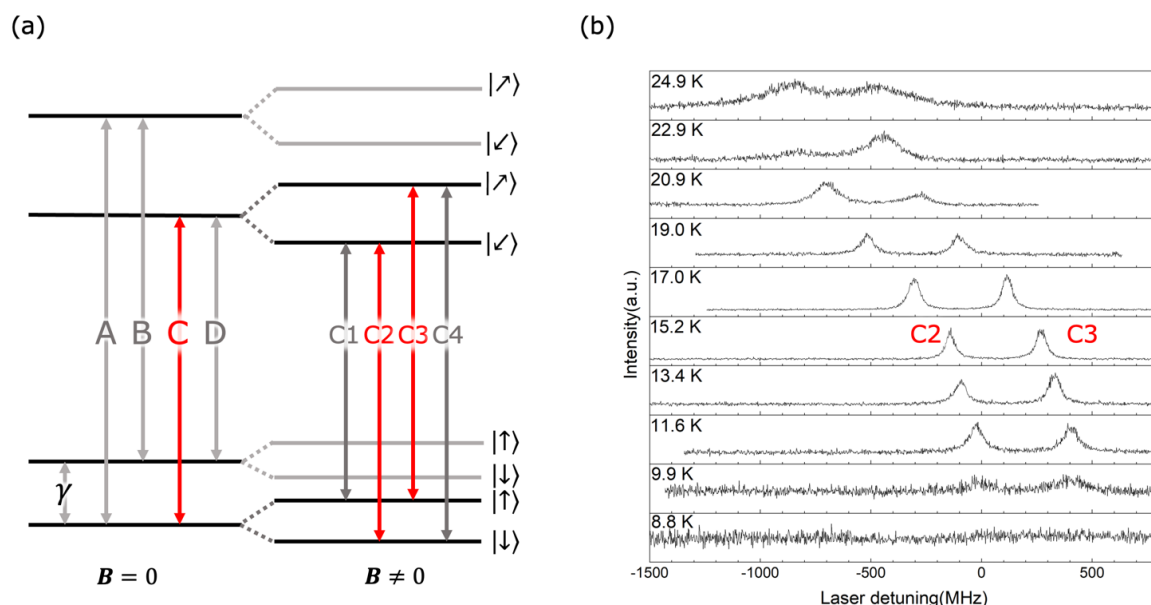


Fig. 1 (a) Electronic structure of PbV center. Zeeman splits under a magnetic field (right panel). (b) PLE spectra at various temperatures.