

KS 研究会セッション | 一般セッション(ポスター講演) : KS 研究会セッション (ポスター)

[16p-P08-1~6] KS 研究会セッション (ポスター)

[16p-P08-1]

{111}面逆ピラミッド型ホール上CVD成長で生成した高配向NVセンターの特性評価

○(M1)伊牟田 航基^{1,2}、及川 耀平^{1,2}、徳田 規夫³、早瀬 潤子^{1,2} (1.慶大理工、2.慶大CSR、3.金沢大ナノマリ)

[16p-P08-2]

熱エッチング法を用いたNV中心ダイヤモンドピラープローブの作製

○(M2)青木 悠真¹、Wang Yifei¹、林 都隆¹、Prananto Dwi¹、Ma Yingshu¹、金 聖祐²、小山 浩司²、赤堀 誠志¹、安 東秀¹ (1.北陸先端大、2.Orbray (株))

[16p-P08-3]

NVセンタを用いた量子計測における最尤法の活用

○(B)小林 由佳¹、Chanuntranont Akirabha¹、太田 智基¹、齋藤 大樹¹、三宅 悠斗¹、関口 顕¹、品田 高宏²、川原田 洋¹、谷井 孝至¹ (1.早大理工、2.東北大CIES)

[16p-P08-4]

Relaxometry Imaging of Conducting Magnetite Layers on a Core-Shell Superparamagnetic Particle Using Ensemble Nitrogen-Vacancy in Diamond

○(D)Thitinun Gasosoth¹、Kunitaka Hayashi¹、Dwi Prananto¹、Toshu An¹ (1.JAIST)

[16p-P08-5]

NVセンタを用いたニトロキシドラジカルとP1センターの電子二重共鳴計測

○織田 有咲¹、関口 顕¹、臼井 俊太郎¹、齋藤 大樹¹、三宅 悠斗¹、田中 学²、品田 高宏³、寺地 徳之⁴、小野田 忍⁵、安 東秀⁶、川原田 洋¹、谷井 孝至¹ (1.早大理工、2.都立大都市環境、3.東北大CIES、4.物材機構、5.量研、6.北陸先端大)

[16p-P08-6]

Bubble domain imaging via scanning NV center probe microscope

○Ekihi Ou¹、Prananto Dwi¹、Kunitaka Hayashi¹、Toshu An¹ (1.JAIST)

{111}面逆ピラミッド型ホール上 CVD 成長で生成した 高配向 NV センターの特性評価

Characterization of preferentially oriented NV centers generated by CVD growth on diamond {111} facets in inverted pyramid shaped holes

慶大理工¹, 慶大 CSRN², 金沢大ナノマリ³

○(M1)伊牟田 航基^{1,2}, 及川 耀平^{1,2}, 徳田 規夫³, 早瀬 潤子^{1,2}

Keio Univ.¹, Keio CSRN², NanoMaRi, Kanazawa Univ.³

○(M1)Koki Imuta^{1,2}, Yohei Oikawa^{1,2}, Norio Tokuda³, and Junko Ishi-Hayase^{1,2}

E-mail: Koki_Imuta_0510@keio.jp

【背景・目的】ダイヤモンド中空素空孔中心(NV センター)は、常温大気圧下での高感度・高空間分解能な磁場センサとしての応用が期待されている^[1]。磁場センサの高感度化には N と V の結合方向(配向方向)が揃った高配向な NV センターを生成することが重要である。我々の研究グループでは、Ni 異方性エッチング^[2]により形成した{111}面逆ピラミッド型ホール構造を有する(100)基板の上に窒素ドーピング CVD 成長を施すことで、配向方向が選択可能かつ各面での配向率 95% 以上の高配向 NV センターの生成に成功した^[3,4]。しかし、従来の配向率評価手法では多数点の測定に多大な時間と手間がかかり、基板上的限定的な測定点を評価するに留まっていた。そこで本研究では、基板全体の統計的な配向率評価について、迅速かつ簡便な測定プログラムを実装し、上記手法にて生成された NV センターの特性評価を行ったので報告する。

【方法】本研究におけるサンプル作製手順の概略を Fig. 1 に示す。(100)ダイヤモンド基板上に Ni をパターンニングして蒸着し、高温水蒸気雰囲気下でアニールすることで、Ni を触媒として水蒸気とダイヤモンドの炭素原子を反応させ、4 つの{111}面を斜面に持つ逆ピラミッド型ホール構造を作製した。この上に窒素ドーピング CVD 成長を施して NV センターを生成した。評価について、配向率の算出には連続波光検出磁気共鳴(CW-ODMR)測定の結果を用いた。従来の評価測定では、CW-ODMR 測定において印加するマイクロ波の周波数を幅広く掃引していたが、本研究では特定のマイクロ波周波数のみの CW-ODMR スペクトルを利用して、迅速に広範囲の配向をマッピングできる測定プログラムを実装し、ホール全体の配向率の統計的な評価を行った。

【結果】ホールのレーザー顕微鏡像と斜面中腹での発光マッピング像を Fig. 2 (a)(b)に示す。CW-ODMR の測定結果から、4 つの{111}斜面において、面ごとに異なる方向の優先配向が得られていることが確認された。発表ではホール斜面の配向率分布など、配向マッピングの測定結果についてより詳細に報告するとともに、ホールのサイズや{111}斜面の表面状態と生成される NV センターの特性の相関性についても検討し発表する予定である。

【謝辞】本研究の一部は、科研費(No. 20H05661, 22H01558)、Q-LEAP(No. JP-MXS0118067395)の支援を受けて行われた。また、サンプルは NIMS 微細加工プラットフォームの支援の下で作製された。

[1] L. Childress, *et al.*, *Science* **314**, 281 (2006). [2] M. Nagai, *et al.*, *Scientific Report* **8**, 6687 (2018). [3] 及川耀平他, 第 68 回応用物理春季学術講演会, 18p-Z13-4 (2021). [4] H. Ishiwata, *et al.*, *Applied Physics Letters* **111**, 043103 (2017).

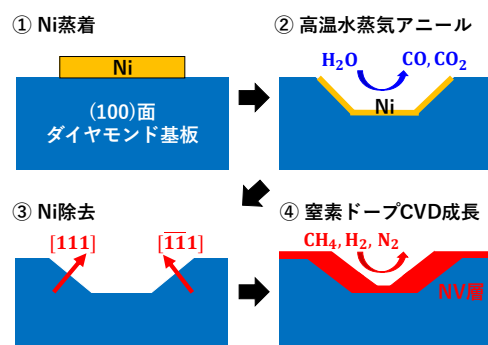


Fig. 1 サンプル作製手順の概略

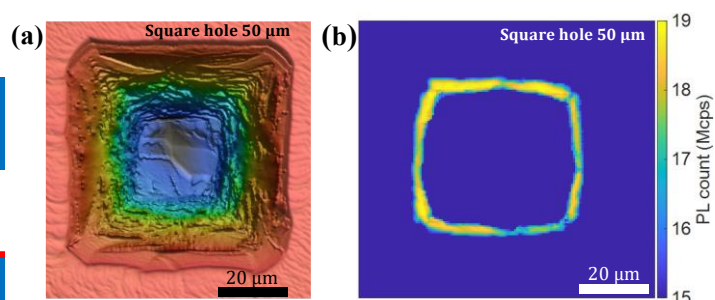


Fig. 2 測定したホールの (a) レーザー顕微鏡像と (b) 斜面中腹における発光マッピング像

熱エッチング法を用いた NV 中心ダイヤモンドピラープローブの作製

Fabrication of an NV-center diamond pillar probe using thermal etching

北陸先端大¹, Orbray (株)² ○(M2)青木 悠真¹, (D)Wang Yifei¹, 林 都隆¹,
Prananto Dwi¹, (M2) Ma Yingshu¹, 金 聖祐², 小山 浩司², 赤堀 誠志¹, 安 東秀¹
JAIST¹, Orbray Co.,Ltd.², °Yuma Aoki¹, Yifei Wang¹, Kunitaka Hayashi¹, Dwi Prananto¹,
Yingshu Ma¹, Seong-Woo Kim², Koji Koyama², Masashi Akabori¹, Toshu An¹
E-mail: s2310001@jaist.ac.jp

近年、高品質なダイヤモンドの人工合成が可能となり、ダイヤモンドを用いた新規デバイス実現への期待が高まっている。特にダイヤモンド中の NV 中心は、炭素が置換された窒素と隣接炭素欠損による空孔からなる複合欠陥であり、単一 NV 中心の計測感度があることより磁場、電場、温度、圧力などの高感度・高空間分解能センサーとしての応用が期待されている[1]。特に、ピラー構造のダイヤモンドをプローブとして用いる走査 NV 中心プローブ顕微鏡は数十ナノメートルの磁場計測分解能が報告され[2,3]、より高性能で簡便なプローブ作製法の確立が求められている。

本研究では、熱エッチング法によるダイヤモンドピラーの作製と、走査 NV 中心プローブへの応用を目的とする。ダイヤモンドピラーの作製方法は、まず、フォトリソグラフィによりダイヤモンド(001)基板上に Ni パターンを形成する。続いて、水素中での熱エッチングにおいて Ni/ダイヤモンド界面での化学反応により CH_4 として気化することでダイヤモンドピラーが形成される (Fig. 1)[4]。今回、ダイヤモンドピラー作製法の確立、続いてピラー (Fig. 2) 先端へ窒素イオン注入法より NV 中心を作製した際の (ODMR (Optically Detected Magnetic Resonance) 等の性能評価を行った内容について報告する (Fig. 3)。

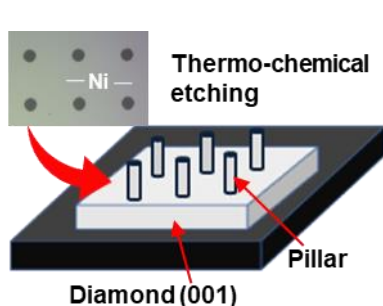


Fig. 1. A schematic of diamond-pillars fabrication.

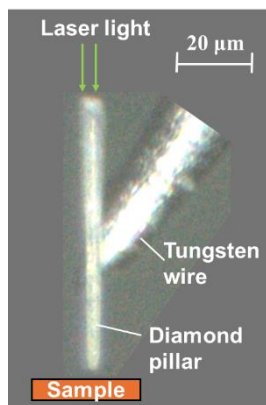


Fig. 2. A scanning diamond pillar probe.

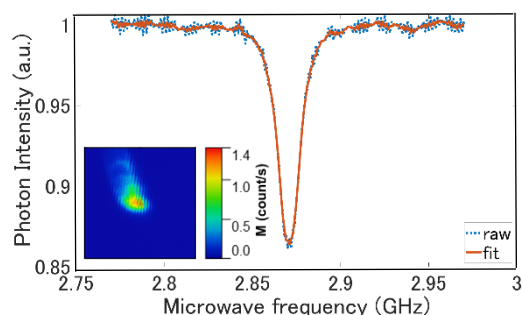


Fig. 3. An ODMR spectrum obtained from a diamond pillar.

参考文献

- [1] L. Rondin, et al., Rep. Prog. Phys., **77**, 056503, 26pp, (2014).
- [2] Y. Kainuma, et al., J. Appl. Phys., **130**, 243903 (2021).
- [3] P. Maletinsky, et al., Nat. Nanotechnol. **7**, 320-324 (2012).
- [4] H. Aida, et al., Appl. Phys. Express, **9**, 035504 (2016).

NV センタを用いた量子計測における最尤法の活用

Application of maximum likelihood estimation method to quantum sensing using nitrogen-vacancy centers

早大理工¹, 東北大 CIES², [○]小林 由佳¹, Akirabha Chanuntranont¹, 太田 智基¹,
齋藤 大樹¹, 三宅 悠斗¹, 関口 顕¹, 品田 高宏², 川原田 洋¹, 谷井 孝至¹
Waseda Univ.¹, CIES Tohoku Univ.², [○]Y. Kobayashi¹, A. Chanuntranont¹, T. Ota¹,
D. Saito¹, Y. Miyake¹, K. Sekiguchi¹, T. Shinada², H. Kawarada¹, T. Tanii¹
E-mail: yuka@tanii.nano.waseda.ac.jp

【研究背景と目的】ダイヤモンド中の窒素-空孔中心 (NV センタ) を活用した局所交流磁場計測の応用が期待されている [1, 2]。しかしながら、実測定では、計測値を積算していく過程で SN 比や周波数分解能の低下が起こり、長時間の積算やその後の FFT において何らピークが得られないことも多い。統計的推定の1つである最尤法 (MLE) は量子計測と高い整合性を有し、FFT に比べて、より少ないデータ数で所望通りの計測が実行されているかを判定できる特長をもつ。さらに、計測結果を積算していくにあたって、尤度を逐次更新できる特長をもつ。本研究では、量子ヘテロダイン (Qdyne) 計測などの NV センタを用いた量子計測が所望どおりに実行されているかどうかの判定を、MLE を用いてリアルタイムに評価した。

【実験方法と結果】計測交流磁場の位相に対応する NV センタからの放出光子数の期待値について、Poisson 分布を仮定した揺らぎも含めた数式モデルを立てた。最尤法では、この数式モデルに対する計測データの尤度が逐次更新される。例えば Qdyne 計測では、時間スロット (23.516 μ s) 毎の検出光子数と検出時間 (スロット番号) が GPU 搭載の高速 PC に送信され、この高速 PC を用いて尤度が更新されるようにした。この結果、更新間隔は 1 秒以下となり、ほぼリアルタイム表示となる。FFT と MLE の結果をそれぞれ Fig.1(a) および (b) に示す。FFT では視認できるピークが現れていないのに対し、MLE では、測定開始後 0.3 秒で周波数 2 MHz の交流磁場が計測されていることの尤度が高いことが示されている

(このまま計測を継続してよいことを計測者に示唆している)。また、測定時間が長くなるにつれ、FFT の結果でも 2 MHz の交流磁場に対応するピークが見え始めているが (計測時間 150 s では未だフロアレベルが高いものの、2 MHz に FFT ピークが現れ始めている)、MLE では、尤度のピーク高さが更新されて大きくなっていくようすが示されており、所望の計測が安定して実行されている可能性が高いことを示唆している。なお、本研究は科研費 (22H01921, 23H00169) の助成を受けた。

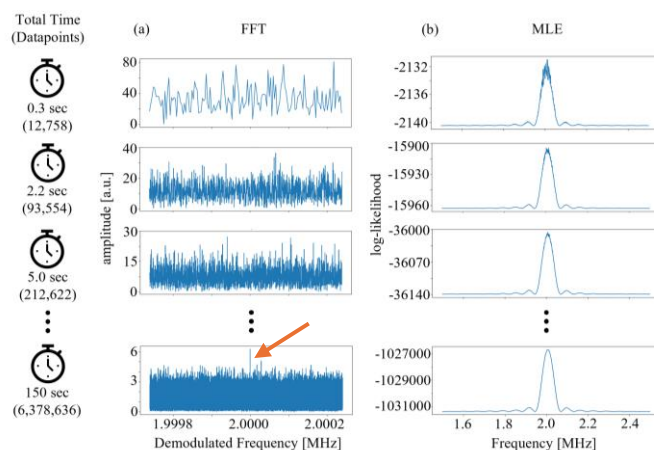


Fig. 1 Qdyne spectrum (a) FFT spectrum. (b) MLE spectrum.

参考文献: [1] S. Schmitt *et al.*, *Science* **356**, 832 (2017). [2] T. Staudacher *et al.*, *Science* **339**, 561 (2013).

Relaxometry Imaging of Conducting Magnetite Layers on a Core-Shell Superparamagnetic Particle Using Ensemble Nitrogen-Vacancy in Diamond

JAIST.¹, [○]Thitinun Gas-oso¹, Kunitaka Hayashi¹, Dwi Prananto¹, Toshu An¹

E-mail: thitinunphysics@gmail.com

Magnetic particles, especially superparamagnetic particle microbeads which consist of a magnetite (Fe_3O_4) layer covering the shell of the particle, have been used in many medical applications and biological separations. However, Fe_3O_4 is a conductive material where the electrons in the conductor are excited by thermal energy and produce fluctuating magnetic noise in the environment [1]. Although randomly diffusing electrons exhibit a zero average field, in a plane layer, the magnetic noise projected in the vertical direction is non-zero [1]. The Nitrogen vacancy (NV) center in diamonds is one of the most sensitive quantum sensors for magnetometry in many nanoscale applications. In this work, we demonstrate relaxometry imaging, based on the reduced lifetime of longitudinal spin relaxation time, T_1 , of a proximal ensemble NV center in a diamond [2]. An electronic grade (100)-oriented diamond was implanted with 1×10^{12} ion/cm² of $^{14}\text{N}^+$ at the energy of 30 keV and annealed at 900 °C for 1 hour to create the NV defect center about 30 nm below the sample. The diamond sample was polished to 50 μm thick and cut into about 100 μm x 100 μm rectangular shape by a high-power laser [3]. 3 superparamagnetic particles with 3 μm diameter were prepared on a glass slide, separated and covered by the rectangular NV diamond sample with the NV layer side down. (Fig. 1(a) upper inset). The NVs in the diamond with magnetic particles were evaluated by a home-built confocal microscope. The shortened relaxation time T_1 of the NV ensemble, due to random magnetic noise in high electrical conductivity of the superparamagnetic magnetite shell layer with about 200 nm in a spherical core-shell structure, was measured and imaged. The spatial dependence of spin relaxation time T_1 with proximity dependence modeling was shown in Fig. 1(c).

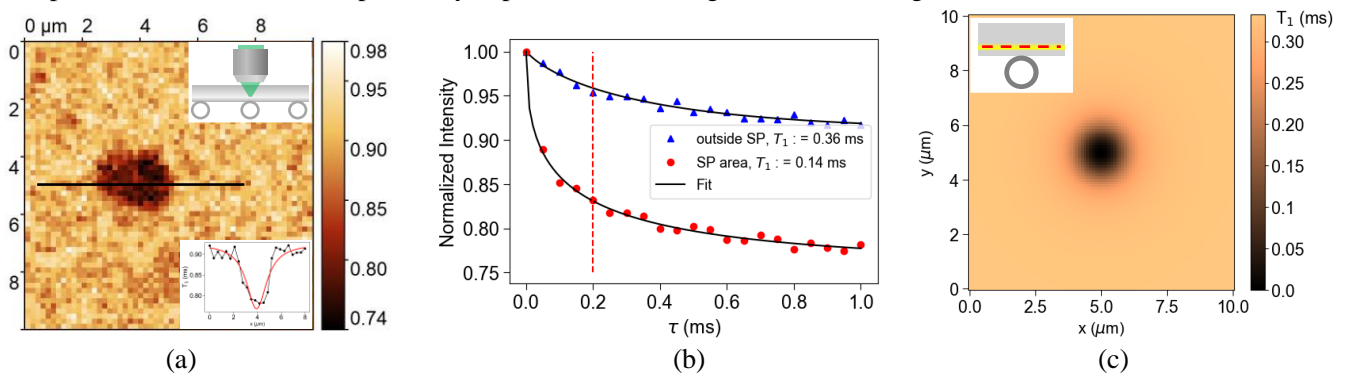


Fig. 1 (a) The T_1 decay image at an evolution time, $\tau = 0.2$ ms. (b) Normalized spin relaxation spectra at near and far particle area. (c) Simulated T_1 relaxation time with NV-particle proximity dependence where a particle is positioned at the center.

[1] Kolkowitz, S., et al. *Science* **347**.6226 (2015): 1129-1132. [2] Ariyaratne, Amila, et al. " *Nature communications* **9**.1 (2018): 2406. [3] Kainuma, Yuta, et al. *Journal of Applied Physics* **130**.24 (2021).

NV センターを用いたニトロキシドラジカルと P1 センターの 電子二重共鳴計測

Double Electron-Electron Resonance measurement of nitroxide radicals and P1 centers with NV centers

早大理工¹, 都立大都市環境², 東北大 CIES³, 物材機構⁴, 量研⁵, 北陸先端大⁶
○織田有咲¹, 関口顕¹, 白井俊太郎¹, 齋藤大樹¹, 三宅悠斗¹, 田中学², 品田高宏³, 寺地徳之⁴,
小野田忍⁵, 安東秀⁶, 川原田洋¹, 谷井孝至¹

Waseda Univ.¹, Tokyo Metropolitan Univ.², CIES Tohoku Univ.³, NIMS⁴, QST⁵, JAIST⁶,
○A. Oda¹, K. Sekiguchi¹, S. Usui¹, D. Saito¹, Y. Miyake¹, M. Tanaka², T. Shinada³, T. Teraji⁴,
S. Onoda⁵, T. An⁶, H. Kawarada¹, T. Tani¹

E-mail: oda@tani.nano.waseda.ac.jp

【緒言】ダイヤモンド中の浅い窒素-空孔中心 (NV センター) は優れたコヒーレンス特性をもち、ナノスケールの高分解能磁気プローブとして注目されている。NV センターのデコヒーレンス源の1つに表面ダングリングボンドの電子スピンがある。一方、このような表面電子スピンの加え、ダイヤモンド表面に固定したフリーラジカルの電子スピンを利用した高感度センサー系の構築を目指した研究も行われている[1, 2]。私たちは単一細胞計測への応用を目指し、ダイヤモンド基板表面に固定したニトロキシドラジカル中電子スピンを、NV センターによる電子二重共鳴 (Double Electron-Electron Resonance, DEER) 計測で検出することに取り組んでおり、ニトロキシドラジカルを吸着させた場合の DEER 信号を検出した (Fig.2)。しかしながら、ダイヤモンドの CVD 成長時に 10 ppb 未満で混入する ¹⁴N および NV センター作製時に注入した ¹⁵N が置換窒素 (P1 センター) として基板内部に存在しており[3], これら P1 センター由来の DEER 信号が重畳することが予想される。本発表では、熱混酸処理後、および酸素プラズマ処理後の計測結果を比較しながら、ニトロキシドラジカルと P1 センターの識別について議論する。

【実験】¹²C 濃縮 CVD ダイヤモンド層に窒素イオン注入 (2.5 keV, 10¹² cm⁻²) と熱処理 (1000 °C, 2 h) を施して[4], 表面近傍に NV センターを形成した。熱混酸処理後、基板表面に 1 mM の TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl) 水溶液 10 μL を滴下し、ダイヤモンド表面にニトロキシドラジカルを吸着させた (Fig.1)。これと TEMPO を吸着させていない (熱混酸処理後/酸素プラズマ処理後の) DEER ODMR 計測を実施した。これにより NV センターと相互作用する電子スピンの共鳴周波数を計測した。Lab-made の共焦点顕微鏡を用いて同様の測定を単一/アンサンブルの NV センターで行った。これらの結果の詳細を発表する。なお、本研究は文科省科研費 (22H01921, 23H00169, 24K01286) による助成を受けた。

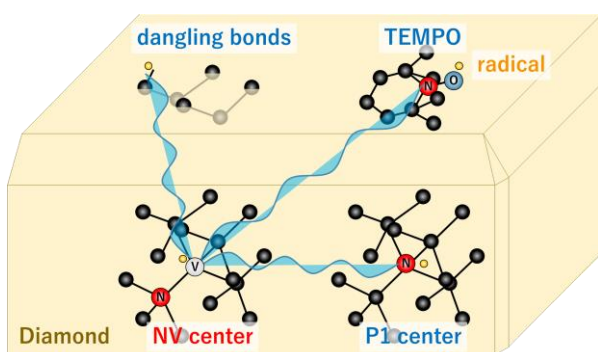


Fig.1 Detection of electrons with NV center

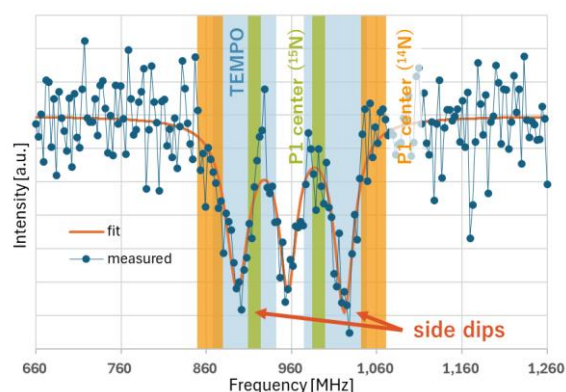


Fig.2 DEER ODMR spectrum
(Blue band: expected regions of side dips from TEMPO, Green band: ¹⁵N, Orange band: ¹⁴N)

- [1] A. O. Sushkov et al, *Phys. Rev. Lett.*, 113 (2014) 197601.
[2] B. Grotz et al., *New J. Phys.* 13 (2011) 055004.

- [3] T. Teraji et al., *J. Appl. Phys.* 118 (2015) 115304.
[4] R. Fukuda et al., *New J. Phys.* 20 (2018) 083029.

Bubble domain imaging via scanning NV center probe microscope

Yifei Wang, Dwi Prananto, Kunitaka Hayashi, Toshu An

School of Materials Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

Email: s2220010@jaist.ac.jp

The spin states in the negatively charged NV (Nitrogen-Vacancy) center in diamond can be excited by a laser to generate fluorescence and their magnetic resonances split by the external magnetic fields are detected via the ODMR (Optically Detected Magnetic Resonance) (Fig. 1). Therefore, NV center can be used as a probe to measure stray magnetic fields from magnetic materials and to elucidate magnetic structures. Especially, when a diamond probe containing NVs is used as a scanning probe microscopy, this fabricated scanning NV probe can be used to image the magnetic structures with about 100 nm spatial resolution by using FIB (Focused Ion Beam) (Fig. 2). [1]

In this study, first, a magnetic bubble structures [2] in the YIG (Yttrium Iron Garnet) magnetic sample were prepared and monitored by the MOKE (Magneto-optic Kerr Effect) microscope (Fig. 3). Then, the scanning NV probe was used to image the bubble structures. The observed PL image applying fixed microwave frequency of 2.82 GHz on the bubble structures is shown in Fig. 4. The position-dependent ODMR spectra around the bubble structures are measured (Fig. 5) and the magnetic structure of the bubble domain will be discussed.

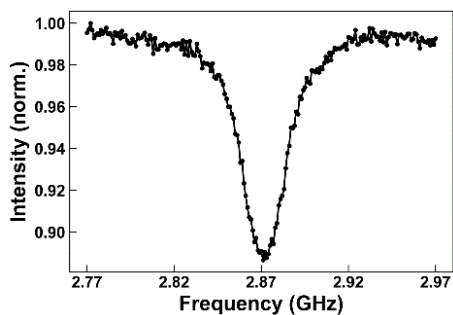


Fig. 1 An NV probe ODMR spectrum

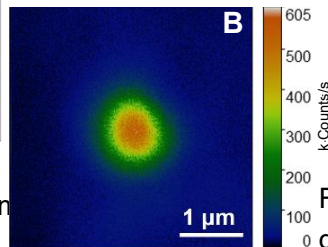


Fig.2 A scanning NV center probe (A) and the PL image from the probe (B)

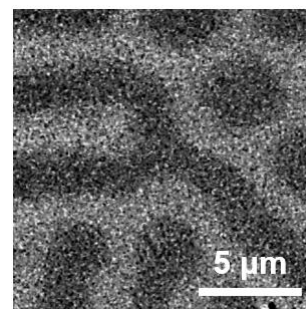


Fig. 3 A Kerr image of bubble domains from the YIG

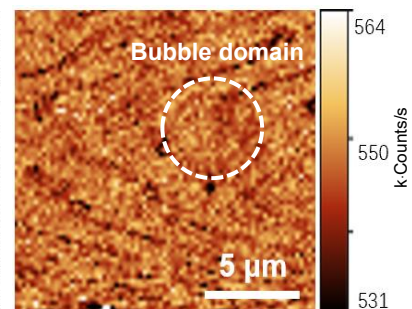


Fig. 4 A PL image of the bubble domains from the YIG

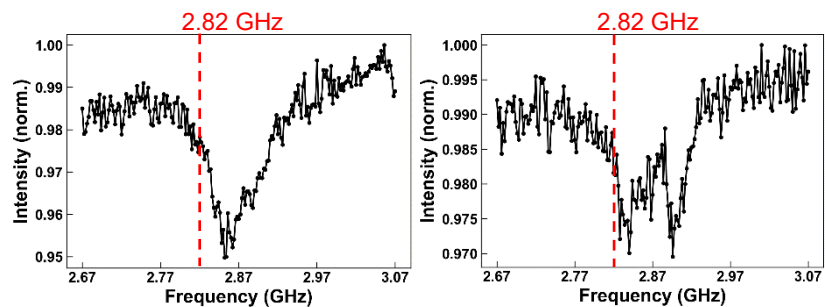


Fig. 5 The position dependent ODMR spectra

Reference:

- [1] Y. Kainuma, et al, *J. Appl. Phys.* **130**, 243903 (2021).
- [2] J.-P. Tetienne, et al, *J. Appl. Phys.* **115** (17): 17D501 (2014).

KS 研究会セッション | 一般セッション(口頭講演) : KS.1 固体量子センサ研究会

[19a-A24-1~10] KS.1 固体量子センサ研究会

[19a-A24-1]

[分科内招待講演] NV中心の超高密度化とその相互作用

○川原田 洋^{1,2}、早坂 京祐¹、浅野 雄大¹、小野田 忍³ (1.早大理工、2.早大材研、3.量研機構)

[19a-A24-2]

ダイヤモンドNV中心マイクロ波強RF波同時照射下でのパルス光学検出磁気共鳴スペクトルの線幅について

○小野寺 駿太¹、大久保 義克¹、東 勇佑¹、塙 和真¹、渡邊 幸志²、柏谷 聡³、野村 晋太郎¹ (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.名古屋大工)

[19a-A24-3]

スピン位相緩和がもつれNV対量子センサの感度に与える影響

○(D)木村 晃介^{1,2}、小野田 忍^{2,3}、大門 俊介²、加田 渉⁴、寺地 徳之^{3,5}、磯谷 順一⁶、蓮沼 倫弥¹、新谷 一騎¹、川崎 愛理¹、花泉 修¹、大島 武² (1.群馬大、2.量研、3.横国大QIC、4.東北大、5.物材機構、6.筑波大)

[19a-A24-4]

ダイヤモンド量子センサの高感度化に向けたバイアス磁場の均一性の向上

○李 則含¹、藤崎 伊久哉¹、波多野 雄治¹、関口 武治¹、岩崎 孝之¹、波多野 睦子¹ (1.東工大工)

[19a-A24-5]

¹⁴N核スピンを考慮したダイヤモンド電子スピン二重共鳴信号の解析○(M2)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} (1.慶大理工、2.慶大 CSRN、3.中大理工、4.金大ナノマリ)

[19a-A24-6]

ダイヤモンドリング構造による高分解能・高感度量子磁気センシング

○高田 晃佑¹、勝見 亮太^{1,2}、河合 健太¹、佐藤 大地¹、板垣 拓杜¹、野崎 大地¹、八井 崇^{1,2} (1.豊橋技科大、2.東大)

[19a-A24-7]

ドライファントムを用いた高感度ダイヤモンド量子センサの評価

○(P)貝沼 雄太¹、伏見 幹史²、関口 直太¹、眞榮 力⁴、宮川 仁³、谷口 尚³、寺地 徳之³、阿部 浩之⁵、小野田 忍⁵、大島 武⁵、関野 正樹²、岩崎 孝之¹、波多野 睦子¹ (1.東工大、2.東大、3.NIMS、4.筑波大、5.量研)

[19a-A24-8]

量子センシングに向けたメタサーフェスによる光学フィルターの設計

○(M2)清水 克哉¹、勝見 亮太^{1,2}、八井 崇^{1,2} (1.豊橋技科大、2.東大院工)

[19a-A24-9]

ダイヤモンドNVセンタを用いたコンパクトでポータブルなパルス量子センサによる磁界計測

○出口 洋成^{1,2}、林 司¹、済藤 紘矢¹、西林 良樹¹、小林 豊¹、藤原 正規²、森下 弘樹³、水落 憲和²、辰巳 夏生¹ (1.住友電工(株)、2.京大化研、3.東北大学)

[19a-A24-10]

ナノスケール高周波交流磁場イメージングに向けた走査ダイヤモンドNVセンタ顕微鏡の開発

○大倉 和真^{1,2}、小室 俊太郎^{1,2}、林 都隆³、安 東秀³、早瀬 潤子^{1,2} (1.慶大理工、2.慶大CSRN、3.北陸先端大)

NV 中心の超高密度化とその相互作用

High-Density NV centers and their interaction

○川原田洋^{1,2} 早坂京祐¹, 浅野雄大¹, 小野田忍³

(1. 早大理工, 2. 早大材研, 3. 量研機構,)

Hiroshi Kawarada^{1,2}, Kyosuke Hayasaka¹, Yudai Asano¹, Shinobu Onoda³

(1. Waseda Univ., 2. Waseda ZAIKEN, 3. QST)

E-mail: kawarada@waseda.jp

ダイヤモンド中の NV アンサンブルの磁気感度は、センシングに寄与する NV センター密度 N_V とコヒーレンス時間 T_2 の積 $\sqrt{N_V T_2}$ に比例する[1]が、ある密度以上で飽和するとされる。この窒素密度限界に関する窒素密度の実験は少ない。 T_2 を $1 \mu s$ 以上に保ちつつ高密度 NV センターを作製することで磁気感度が向上するはずだが、高密度窒素ドープダイヤモンドで高い結晶性が維持される必要がある。高温高压 (HPHT) 法および化学気相堆積(CVD)法の両者での高密度窒素ドープダイヤモンドを比較した。高密度 NV には高密度の空孔導入が不可欠だが、 10^{20} cm^{-2} 以上の空孔導入にはシングルエンド型加速器で 100 時間以上必要である。しかし、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いると、局所的だが、1 時間程度で可能である。

マイクロ波が導波管厚み方向に完全に閉じ込められる自己開発したマイクロ波プラズマ化学気相成長(MPCVD)装置を用い、ダイヤモンド(111)基板上に高密度窒素の $\text{CH}_4(2\%)$ 、 $\text{CO}_2(2\%)$ 、 $\text{N}_2(8\%)$ 、 $\text{H}_2(88\%)$ の条件で、ホモエピタキシャル成長を行った。この方式は高密度不純物が導入に優れ、ホウ素では $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 導入し、世界最高超伝導転移温度のダイヤモンドを合成している。二次イオン質量分析(SIMS)の結果、窒素密度 $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ を得た。ダイヤモンドでの世界最高密度である。また、HPHT ダイヤモンドは窒素密度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ を利用した。加速電圧 300keV の TEM(JEM-3010)を用いて dose 量 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2} \sim 1.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ の電子線照射をし、 1000°C で 2 時間真空アニール処理を行った。

NV 密度の測定は 1) 発光強度からの算出[3]と、2) NV 間の相互作用からの算出の二通りを行った。発光強度から算出した電子照射量ごとの NV 密度を Fig 1 に示す。窒素密度 $8 \times 10^{20} [\text{cm}^{-3}]$ の CVD ダイヤモンドにおいて HPHT に匹敵する NV 密度を得ることができた。

NV 間の相互作用から NV 密度算出は、同時に操作する NV 電子スピンの 4 つの配向の数を増加させ、操作する数毎の各グループでのコヒーレンス時間を測定し、それぞれの NV 相互作用に由来するコヒーレンス時間から NV 濃度の測定を行った。本実験では 1,3,4 方向の配向を同時に操作した。4 方向の配向を一度に操作には DEER 法を利用した。Fig.2 に示すように 1,3,4 方向の配向の 3 プロットの傾きから dipole coupling strength を求め、これと NV 密度との相関関係[4]を参照し、NV 密度を算出した。(Fig.3)。Fig.3 の直線は[4]の引用で、NV 密度と dipole coupling strength (Fig.2 の傾き) の関係で、その上に本実験の HPHT、CVD ダイヤモンドをプロットした。HPHT 及び CVD への局所的な高線量の照射によって、世界最高 NV 濃度 $45[\text{ppm}] = 8.0 \times 10^{18} [\text{cm}^{-3}]$ [5]を超える密度を得た。また HPHT ダイヤ及び CVD ダイヤへの同一照射量 ($1 \times 10^{20,21} [\text{cm}^{-2}]$) において、窒素濃度 $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の CVD ダイヤ中の NV 濃度が窒素濃度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の HPHT ダイヤよりも高い値を得る事が確認された[2]。X線回折やラマン散乱の半値幅では CVD は HPHT と遜色ないが、NV 収率は、まだ低い。さらなる改善の余地がある。

[謝辞]本研究は文部科学省・量子飛躍フラグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118068379 の助成を受けた。

[1] D. Budker, M. Romalis, Nature Phys 3, 227–234 (2007).

[2] K. Hayasaka, HK et al. (submitted)

[3] S.A. Bogdanov, A.V. Akimov et al., Materials Today Comm, 24, 101019 (2020).

[4] G. Kucsko, M. D. Lukin, et al., Phy. Rev. Letters, 121, 023601 (2018).

[5] H. Zhou, M. D. Lukin, et al., Phs. Rev. X 10, 031003 (2020).

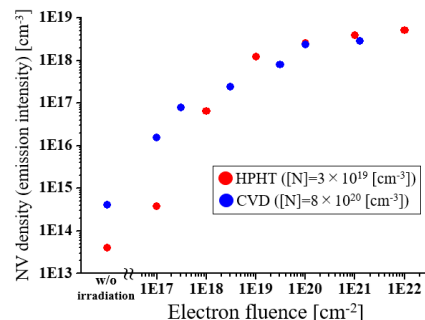


Fig.1 Electron doses and NV density in HPHT diamond ($\sim 3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) and CVD diamond ($\sim 8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$).

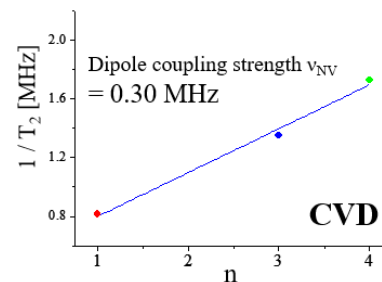


Fig.2 $1/T_2$ of each resonance group of NV orientations. [$e:1\text{E}21 [\text{cm}^{-2}]$]

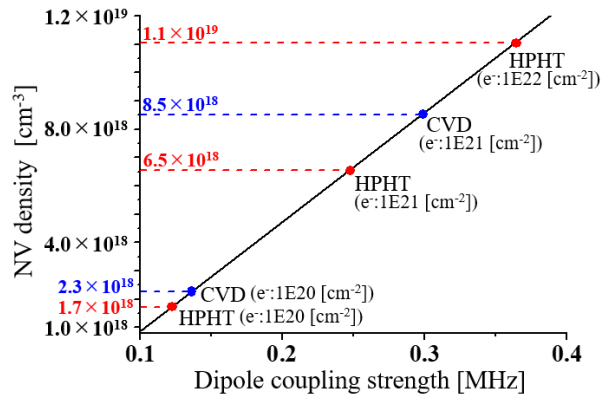


Fig.3 Simulated line relating the intensity of the NV dipole coupling strength to the NV density[4] and our NV ensemble's slope of CVD and HPHT diamond at different electron doses ($10^{20-22} [\text{cm}^{-2}]$)

ダイヤモンド NV 中心マイクロ波強 RF 波同時照射下での パルス光学検出磁気共鳴スペクトルの線幅について

Spectral Widths of Pulsed-Optically Detected Magnetic Resonance Spectra
of Ensemble NV Centers in Diamonds

筑波大数理物質¹, 産総研², 名古屋大工³

○(M2) 小野寺 駿太¹, 大久保 義克¹, 東 勇佑¹, 埜 和真¹,
渡邊 幸志², 柏谷 聡³, 野村 晋太郎¹

Univ. of Tsukuba¹, AIST², Nagoya Univ.³

○(M2) Shunta Onodera¹, Yoshikatsu Ohkubo¹, Yusuke Azuma¹, Kazuma Hanawa¹
Hideyuki Watanabe², Satoshi Kashiwaya³, and Shintaro Nomura¹

E-mail: s2320162@u.tsukuba.ac.jp

ダイヤモンド中の窒素空孔 (NV) 中心にマイクロ波と強いラジオ波 (RF) を同時に照射すると多光子遷移や Coherent destruction of tunneling (CDT) 等の興味深い現象が現れることが知られている。前回の講演では、パルス光学検出磁気共鳴 (ODMR) を用いて、RF 駆動振幅と RF 周波数の比が特定の条件の場合に遷移確率が 0 となる CDT がマイクロ波ラビ周波数 (Ω_{MW}) に依らずに生じ、これをマイクロメートルスケール RF 電磁波イメージングの定量性を担保するために用いることを Floquet 理論に基づき議論した。[1] マイクロ波強 RF 波同時照射によって多光子遷移がパルス ODMR に見られるが、これを量子センシングに活用するためには、多光子遷移の振幅と共にそのスペクトル線幅が RF 駆動振幅にどのように依存するかが重要である。そこで、今回、私たちは多光子遷移の振幅の RF 駆動振幅依存性を調べた結果について報告する。

¹²C 層に ¹⁵N をドーピングした CVD ダイヤモンド試料 ($T_2^* = 4.5 \mu s$) を用い、パルス ODMR によって多光子遷移のスペクトルを測定した。マイクロ波継続時間 $\tau = 7.2 \mu s$, RF 周波数 $\omega_{RF}/2\pi = 0.857 \text{ MHz}$ の場合について、 n -多光子遷移の線幅の RF ラビ周波数 (Ω_{RF}) 依存性を調べたところ、 $\Omega_{RF}/2\pi < 1.2 \text{ MHz}$ の範囲で線幅は $n = 0, 1, 2$ の場合について Ω_{RF} と n に関わらずほぼ一定であることがわかった。一方、文献 [2] の議論では、線幅は $\delta\omega \sim \Omega/|n|$ と n に依存することが示されている。また、Floquet 理論により、連続波 ODMR に対応するパルス幅について平均化した場合 [3] についてスペクトル線幅の Ω_{RF} 依存性を調べたところ、線幅は Ω_{RF} と n に依存し、いずれの場合においても測定結果を説明しないことがわかった。

そこで、Floquet 理論に基づき、有限のマイクロ波継続時間を取り入れて改めて多光子遷移のスペクトルの計算を行なった。その結果、 $\tau = 7.2 \mu s$ の場合においても得られた結果は連続波 ODMR についての結果と大きく異なり、線幅の Ω_{RF} と n に対する依存性が小さいことがわかった。本講演では、これらの結果について実験との比較を行い、議論する。

- [1] 小野寺 駿太, 大久保 義克, 中川 茉莉, 東 勇佑, 渡邊 幸志, 柏谷 聡, 野村 晋太郎, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, 24a-1BB-6.
- [2] S. Ashhab *et al.*, Phys. Rev. A 75, 063414, (2007).
- [3] J. H. Shirley, Phys. Rev. 138, B979, (1965).

スピン位相緩和がもつれ NV 対量子センサの感度に与える影響

Effects of decoherence on the sensitivity of quantum sensor based on entangled NV pair.

群馬大¹, 量研², 横国大 QIC³, 東北大⁴, 物材機構⁵, 筑波大⁶

○(D) 木村晃介^{1,2}, 小野田忍^{2,3}, 大門俊介², 加田渉⁴, 寺地徳之^{5,3}, 磯谷順一⁶,
蓮沼倫弥¹, 新谷一騎¹, 川崎愛理¹, 花泉修¹, 大島武²

Gunma Univ.¹, QST², YNU-QIC³, Tohoku Univ.⁴, NIMS⁵, Univ. of Tsukuba⁶

○K. Kimura¹, S. Onoda^{2,3}, S. Damon², W. Kada⁴, T. Teraji⁵, J. Isoya⁶,
T. Hasunuma¹, I. Shingai¹, A. Kawasaki¹, O. Hanaizumi¹, and T. Ohshima²

E-mail: t222d002@gunma-u.ac.jp, kimura.kosuke@qst.go.jp

量子センシングによる微小磁場の測定は、様々な科学分野で応用が期待されている。しかしながらその感度は、標準量子限界(Standard Quantum Limit : SQL)で制限されてしまう。SQL を超えた感度を実現する手法として、量子もつれ状態を用いたセンシングが提案されている。量子もつれ状態によるセンシングでは、磁場に起因する位相蓄積が量子ビットの数(N 個)だけ増幅され、単一量子ビットのセンシングと比較し N 倍の感度を示す[1]。我々は、有機化合物イオン注入によって形成された NV 対にもつれ状態(Bell 状態)を生成し[2]、もつれによる位相蓄積を実証した。しかしながら、その感度はエラーやノイズの影響を受け、SQL($\sim nT/\text{Hz}^{1/2}$)を超えることができずに $\sim \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ レベルに制限されてしまう。特に、量子もつれ状態はスピン位相緩和の影響に弱いため現実的なノイズ環境における NV 対では、SQL を超えた感度が実現できるかは明らかではない。そこで本研究では、実際に NV 対の位相緩和過程を測定し、SQL を超えた感度の実現性について議論する。

位相緩和がガウシアンな過程で生じると仮定すると、NV 対の蛍光信号は発展時間 τ を用いて $(1 + e^{-\chi(\tau)})/2$ と記述できる。ここで、 $\chi(\tau)$ は位相緩和関数であり、環境ノイズの自己相関関数 $G(t_1 - t_2)$ で特徴づけられる。本研究では、自己相関関数は環境ノイズの相関時間 τ_c を用いて $2/\sqrt{\pi} \exp(-(t_1 - t_2/\tau_c)^2)$ と仮定し、 $\chi(\tau)$ を次式で記述した[3]。

$$\chi(\tau) = \frac{2\lambda^2\tau_c^2}{\sqrt{\pi}} \left(e^{-\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)^2} - 1 \right) + 2\lambda^2\tau_c \text{erf}\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)$$

ここで、 λ は環境との結合定数を示し、 $\text{erf}(x)$ はガウスの誤差関数を示す。 $\tau \ll \tau_c$ の時、NV 対の電子スピンは 2 次の指数減衰を示し、 $\tau \gg \tau_c$ になるにつれて 1 次の指数減衰にて緩和過程が進行することを示す[3]。Fig. 1 に緩和過程の一例を示す。Matsuzaki らは、緩和過程が 1 次の指数減衰へ移行する前に測定を行うならば、SQL を超えた感度を実現できることを明らかにした[3]。

現実的な環境ノイズの 1 つは静磁場の揺らぎが考えられる。静磁場の揺らぎがある場合、結合定数 λ は電子の磁気回転比 γ_e であり、マルコフなホワイトノイズとなるため現実的な位相緩和は $\chi(\tau) = \gamma_e^2\tau_c\tau$ と近似できる。このような指数減衰で緩和が生じる場合、SQL を超えた感度を実現できず、もつれ状態を用いたセンシングの優位性は失われてしまうことがわかっている[4]。他の環境ノイズとして、周囲の核スピンや表面などの存在する電子スピンによる局所磁場の熱揺らぎが考えられ、緩和過程は 2 次の指数減衰を示す[5]。これらの結果より、静磁場の揺らぎが非常に小さく、局所的な熱揺らぎによって位相緩和が進行する環境においては、SQL を超えた感度が実現できることを示す。発表では、ノイズスペクトロスコピーによるノイズ源の探索と合わせて、位相緩和影響について議論する。

謝辞

本研究は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2146、JSPS KAKENHI・No. 21H04646、20H02187、20H05661、JST ムーンショット型研究開発事業・JPMJMS2062、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、JPMXS011806837、及び総務省グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発(JP MI00316)の支援を受けた。

参考文献

- [1] C. L. Degen, *et al.*, Rev. of Mod. Phys. 89, 035002 (2017).
[2] 木村晃介他、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会[21a-C402-5], 2023/9/21 (熊本城ホール開催)
[3] Y. Matsuzaki, *et al.*, Phys. Rev. A 84, 012103 (2011).
[4] S. F. Huelga, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 79, 3865 (1997). [5] G. Q. Liu, *et al.*, Sci. Rep. 2, 432 (2012).

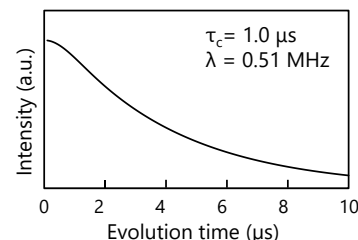


Fig. 1 Example of decoherence.
($\tau=1.0 \mu\text{s}$, $\lambda=0.51 \text{ MHz}$)

ダイヤモンド量子センサの高感度化に向けたバイアス磁場の均一性の向上

Mitigation of magnetic inhomogeneity for highly sensitive ensemble quantum sensors

東工大工¹ ○(M1)李 則含¹, (D1)藤崎 伊久哉¹, 波多野 雄治¹, 関口 武治¹, 岩崎 孝之¹,
波多野 睦子¹

Tokyo Tech.¹, °Zehan Li¹, Ikuya Fujisaki¹, Yuji Hatano¹, Takeharu Sekiguchi¹, Takayuki Iwasaki¹,
Mutsuko Hatano¹

E-mail: li.z.ba@m.titech.ac..jp

アンサンブル NV センタを用いた量子センサの高感度化へ向けて、長い位相緩和時間 T_2^* と位相コヒーレンス時間 T_2 が望まれる。アンサンブルスピンの T_2^* を実験的に制限している要因として、バイアス静磁場の空間不均一性が挙げられる。各スピンに印加される磁場強度の不均一性は T_2^* を劣化させ、信号蓄積時間の上限を短くする。従来はバイアス磁場の印加には、ヘルムホルツコイルや永久磁石が利用されてきた。ヘルムホルツコイルでは、径を大きくすることで不均一性を抑制することができるが、電流源による AC ノイズや発熱による時間的不安定性により、センサの AC 感度や長時間安定性を低減させる[1]。一方、永久磁石は電気信号を介さない為に高周波ノイズが少ない利点がある。しかし、比較的広い範囲内($\sim 1 \text{ mm}^2$)の均一性をとるために必要な大きなサイズの磁石は、取り扱いが困難になるだけでなく、磁束密度が高くなるため、返って磁場不均一性が増加してしまうこともある。

本研究では、先行研究を参考に小さい永久磁石を円周状に配置した磁石アレイを構築し、アンサンブル量子センサにかかるバイアス磁場の均一性の向上と AC、DC 磁場ノイズを同時に抑えることを目的とした[1]。構築した磁石アレイを Fig.1(a)に示す。複数の円柱状の小さい磁石をリング状に配置したアレイをサンプルから等距離になるよう両側に配置した。磁石アレイの直径は 170 mm であり、その円周に直径 12 mm、高さ 12 mm の SmCo 磁石が一定の間隔を開けて配置されている。この磁場系をダイヤモンドアンサンブル量子センサ((HPHT {111}, NV濃度 0.20 ppm, 励起体積 $\sim 1.1 \times 10^7 \mu\text{m}^3$)で評価した。DC 帯域の評価は Ramsey 法で、AC 帯域は Hahn-echo で評価を行った。実測した T_2^* は 5.7 μs , T_2 は 88 μs に達しており、どちらもヘルムホルツコイルと比べて改善され、特に T_2 からは AC ノイズの除去が顕著と言える。

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。

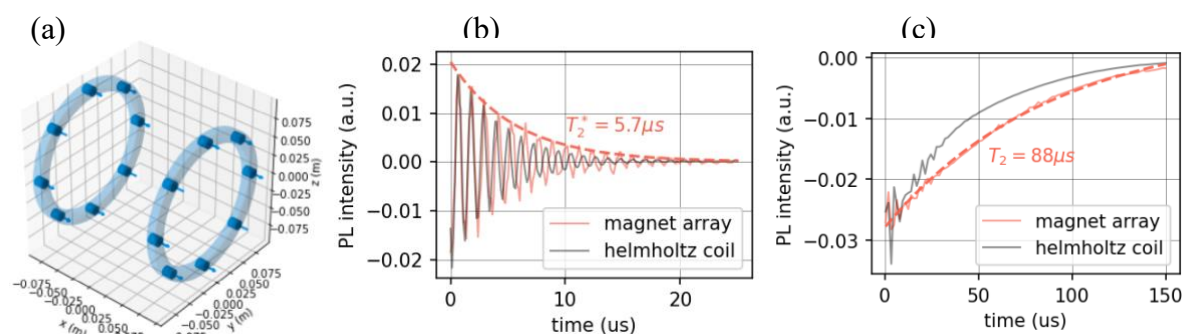


Fig. 1 (a) Permanent cylindrical magnet array(pair) used in this research. (b), (c) Performance comparison of DC(Ramsey) & AC(Hahn-echo) dephasing time between magnet array and Helmholtz coil.

[1] J. F. Barry *et al.*, arXiv:2305.06269(2023)

¹⁴N 核スピンを考慮したダイヤモンド電子スピン二重共鳴信号の解析

Analysis of Electron Spin Double Resonance Signal in Diamond

Considering ¹⁴N Nuclear Spin

慶大理工¹, 慶大 CSRN², 中大理工³, 金大ナノマリ⁴

○(M2) 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

○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、室温・大気圧下で長いコヒーレンス時間を有し、微小な外場変化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、連続波光検出磁気共鳴 (CW-ODMR) 法がある。この手法は実験操作が簡便であり、CCD カメラを用いた二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、我々のグループでは、二周波の共鳴駆動場下で生じる「電子スピン二重共鳴現象 (ESDR)」を利用した CW-ODMR による RF の測定手法^[1,2]を開発した。しかし、これまで ESDR 信号の解析に用いられてきた「調和振動子モデル^[2,3]」はマイクロ波 (MW) による励起が非常に弱い場合に成り立つモデルであり、非弱励起下で特有の信号の振る舞いを説明できなかった。そこで、本研究ではこれまで、電子スピン系のみに着目し、MW 励起強度に事実上の制限を課さない解析モデルを提案し、非弱励起下での信号の振る舞いを定性的に説明してきた。本発表では新たに隣接 ¹⁴N 核スピン系も考慮することで定量的に信号の振る舞いを説明できたため、報告する。

【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加した場合、零磁場下での固有状態 $|0\rangle, |B\rangle = (|+1\rangle + |-1\rangle)/\sqrt{2}$, $|D\rangle = (|+1\rangle - |-1\rangle)/\sqrt{2}$ に近似できる。

$(|0\rangle, |\pm 1\rangle; |m_s\rangle)$ 解析対象の ESDR 信号は、MW 周波数を $|0\rangle - |B\rangle$ ($|0\rangle - |D\rangle$) 準位間、RF 周波数を $|B\rangle - |D\rangle$ 準位間の共鳴周波数に固定し、RF 振幅を変化させつつ NV センターからの蛍光強度を測定して得た (Fig. 1(a))。非弱励起下での ESDR 信号の解析モデル構築のため、緩和を理論的に取り扱える Lindblad 型のマスター方程式^[4]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考慮した。さらに、各パラメータの不均一性も取り入れた。また、ESDR 信号の定量的な再現には隣接 ¹⁴N 核スピンとの相互作用 (HF) の考慮が必要となる。そこで、二重共鳴下で支配的となる HF の特定成分を取り入れ、解析を行った。

【結果】様々な MW (励起) 強度で取得した ESDR 信号を、上記 Lindblad マスター方程式を用いたモデルでフィッティングしたところ (Fig. 1(b) 上)、調和振動子モデルでは再現できなかった非弱励起下で特異に起こるコントラストの一時的な向上を定量的に再現できた。この定量性の向上は、異なる ¹⁴N 核スピン状態からの寄与を考慮した結果であると考えられる (Fig. 1(b) 下)。また、この解析で得られる電子スピン $|B\rangle, |D\rangle$ 準位の占有確率の情報から、非弱励起下での非自明なコントラストの振る舞いは、RF 印加による MW 非共鳴準位への占有確率の遷移の効果と、RF 振幅の増大に伴う MW 駆動力の減衰の効果が拮抗した結果であると考えられる。次に、上記モデルを用い、MW (励起) 強度を変化させながら ESDR 信号の傾きを計算したところ (Fig. 1(c))、コントラストが一時的に向上する領域に傾き (測定感度) の最大値が存在する場合があることが分かった。このように、本提案モデルは ESDR による RF 測定精度・感度の向上や測定条件最適化、複数駆動場下での三準位系の振る舞いの理解に有用であるため、基礎・応用問わず重要なものとなる。

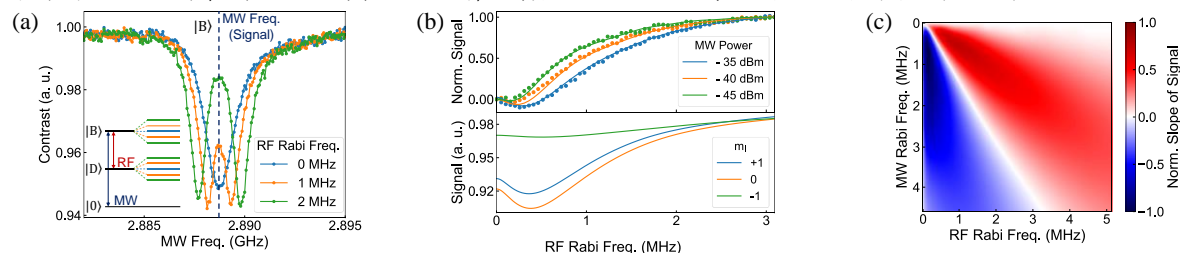


Fig 1. (a) Experimental ESDR spectra and energy diagram. (b) (Upper) Fitting result of ESDR signals. (Lower) Calculated ESDR signals for each nuclear spin states. (c) Slope of calculated ESDR signals under various MW intensity.

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] R. Okaniwa, *et al.*, J. Appl. Phys. **135**, 044401 (2024). [4] G. Lindblad, Commun. Math. Phys., **48**, 119-130 (1976).

ダイヤモンドリング構造による高分解能・高感度量子磁気センシング

Compact and high-sensitive quantum magnetometer based on a diamond microring

¹豊橋技科大, ²東大, [○]高田晃佑¹, 勝見亮太^{1,2}, 河合健太¹, 佐藤大地¹, 板垣拓杜¹, 野崎大地¹, 八井 崇^{1,2}

¹TUT, ²UT, [○]K. Takada¹, R. Katsumi^{1,2}, K. Kawai¹, D. Sato¹, T. Itagaki¹, D. Nozaki¹, and T. Yatsui^{1,2}

E-mail: takada.kosuke.wu@tut.jp

はじめに 単結晶ダイヤモンド中に含まれる窒素－空孔（NV）中心は、室温における固体量子磁気センサとして注目されている。同センサは高感度・高分解能・生体適合性などの優れた諸特性が期待され、多分野において既に実用化への検討が進められている¹。しかし、 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ オーダーの感度達成には NV 中心を高密度に含んだバルク基板（数 mm 角）が必要な現状であり²、感度と空間分解能の両立が課題である。今回我々は、微小光共振器を利用した高効率な NV 中心の発光により、同課題の解決を目指した。同構造の光回路上集積により、オンチップでのパッケージ化も可能であり、高感度かつ高空間分解能化が期待される。今回、NV 中心密度が 0.3 ppm のダイヤモンドマイクロリング共振器構造に対して高い共振器 Q 値の観測とチップ上における量子操作に成功したので報告する。

実験 リング共振器の作製フローとして、斜めエッチングを用いて単結晶ダイヤモンドをリング型に削り出した後、反転操作を加えた転写プリント法³により同構造をシリコン酸化膜上へ集積した（Fig.1a）。構造上部に設置した対物レンズを通じて励起光（532 nm）の入力と発光読み出しを行ったところ、Fig.1b のスペクトルが得られ、共振器の Q 値としては 1,200 であった。また、ストリップラインを介したマイクロ波の入力により、Fig.1c に示す NV 中心のスピン共鳴スペクトルを得た。また μm オーダーの構造サイズによりマイクロ波強度の空間的な不均一性を抑制することで、スピン状態間の発光コントラストは 25 % と理論提案とほぼ同等の値を得た。さらに同構造に対して、励起光とマイクロ波を連続的に照射しながら交流磁場に対する発光量変化をロックイン検出したところ、 $1 \mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ の感度評価に至った。スピン特性の評価結果など、その他詳細は当日報告する。

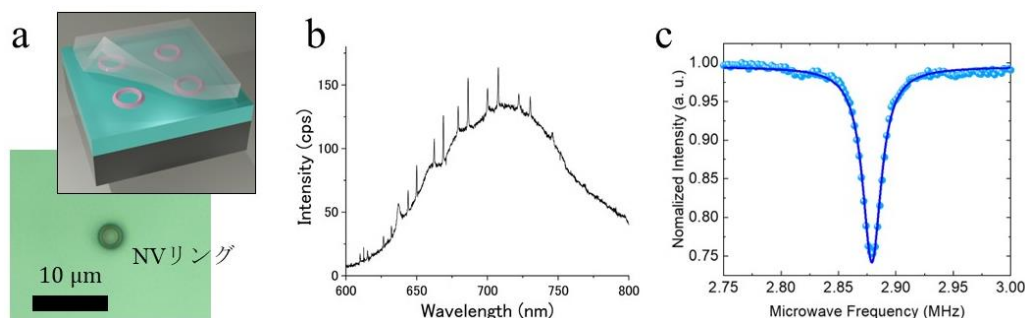


Fig. 1. (a) Fabricated microring structure. (b) PL spectrum above the ring. (c) Measured ODMR spectrum with high contrast $C \approx 25\%$.

参考文献 ¹Y. Bormuth, *et al.*, J. Innov. Manag. **12**, I (2024). ²N. Sekiguchi, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **21**, 064010 (2024). ³R. Katsumi, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **123**, 111108 (2023). **謝辞** MEXT Q-LEAP (JPMXS0118067395)、科研費(22K14289、23K22795、23KK0268)、東電記念財団、村田学術振興財団、旭硝子財団、内藤科学振興財団、池谷科学技術振興財団、日本板硝子材料工学助成会

ドライファントムを用いた高感度ダイヤモンド量子センサの評価

Evaluation of high sensitivity diamond quantum sensor with dry phantom

東工大¹, 東大², NIMS³, 筑波大⁴, QST⁵ ○貝沼 雄太¹, 伏見 幹史², 関口 直太¹,
眞榮 力⁴, 宮川 仁³, 谷口 尚³, 寺地 徳之³, 阿部 浩之⁵, 小野田 忍⁵, 大島 武⁵,
関野 正樹², 岩崎 孝之¹, 波多野 睦子¹

Tokyo Tech.¹, Tokyo Univ.², NIMS³, Tsukuba Univ.⁴, QST⁵, ○Yuta Kainuma¹, Motofumi Fushimi²,

Naota Sekiguchi¹, Chikara Shinei³, Masashi Miyagawa³, Takashi Taniguchi³

Tokuyuki Teraji³, Hiroshi Abe⁵, Shinobu Onoda⁵, Takeshi Ohsima⁵,

Masaki Sekino², Takayuki Iwasaki¹, Mutsuko Hatano¹

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

ダイヤモンド中の NV(Nitrogen-vacancy)中心は、広い動作温度範囲やダイナミックレンジを有する高感度量子センサとして注目されており、脳磁計測に向けた研究が行われている[1]。脳磁計測に使用されるセンサは、疑似脳磁信号を発生可能なファントムを用いて評価している[2,3]。本研究では、我々のグループで開発したダイヤモンド量子センサ[1]の評価を、小動物を仮定したドライファントム(DP)を用いて評価した。DP を XY ステージで走査し[Fig. 1(a), センサとの DP の距離 d は約 3 mm]、ダイヤモンド量子センサにより各位置で DP が作る磁場を計測した。DP には信号発生器(FG)から正弦波を入力した。計測した正弦波磁場信号から得られた磁場振幅値の分布[Fig. 1(b)]に対して、等価電流双極子モーメント(ECD)の大きさ、向きおよび位置をパラメータにして Sarvas の式[4]でフィットした[Fig. 1(c)]。フィッティングから推定した ECD の位置は DP の位置とミリメートル程度の不確かさで一致することが示唆された。また、微小信号を DP に印加し、1 万回ほど加算平均を行った。

推定される小動物の脳磁相当である数 pT の磁場信号を検出した[Fig. 1(d)]。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, JPMXS0118068379)より研究助成を受けたものである。

References [1] N. Sekiguchi *et al.*, *Phys. Rev. Applied* **21**, 064010 (2024), [2] D. Oyama *et al.*, *J. Neurosci. Methods* **251**, 24-36 (2015), [3] S. Taue *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 3635 (2010), [4] J. Sarvas, *Phys. Med. Biol.* **32**, 11 (1987)

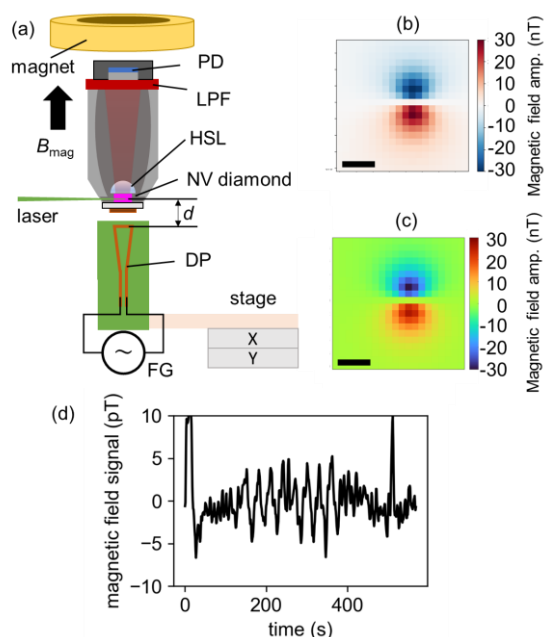


Fig. 1 (a) Schematic of experimental setup. PD: photodiode, DP: dry phantom, FG: function generator, LPF: long-pass filter, HSL: hemispherical lens, B_{mag} : biased magnetic field, d : distance (b) Extracted and (c) theoretical magnetic field distributions generated by the DP. Scale bars in b, c shows 5 mm. (d) Averaged magnetic signal generated by the DP

量子センシングに向けたメタサーフェスによる光学フィルターの設計

Design of Optical Filters with Metasurface for Quantum Sensing

¹豊橋技科大, ²東大院工, [○]清水克哉¹, 勝見亮太^{1,2}, 八井崇^{1,2}

¹TUT, ²Univ. Tokyo, [○]K. Shimizu¹, R. Katsumi^{1,2}, and T. Yatsui^{1,2}

E-mail: shimizu.katsuya.wb@tut.jp

はじめに ダイヤモンド中の窒素－空孔(NV)中心は、光検出磁気共鳴(ODMR)による磁力測定の量子センサーとして応用される¹。しかし、ODMRによる量子センシングの実現にはダイヤモンドに加えてマイクロ波発生器、光学フィルター、光検出器など多くの特殊な素子が必要である。センサーの実用的な応用に向けて、これら素子をパッケージ化したコンパクトなデバイスの作製が重要である²。本研究では、ダイヤモンド基板をシリコン(Si)フォトダイオードによる光検出器と一体化するコンパクトな量子センサーデバイスの作製に向けて、極めて薄く作製可能なメタサーフェスをベースに低ノイズな量子センシングに必要な励起光除去用光学フィルターを設計したので報告する。

実験 本研究は、FDTD法を用いてメタサーフェスフィルターの設計を行った。図1(a)のようなSiのナノシリンダー構造³を用いて、NV中心の励起光源である波長532nmの光を減衰させ、NV中心の発光波長である700nm近傍の光を透過させることを目的とし設計した。Siナノシリンダー構造の直下にシリコン酸化膜(SiO₂)

の層を設けることで、光学特性を損なわず、光検出器を想定したSiへの集積を可能とした。設計パラメータをそれぞれSiナノシリンダー直径 d : 121nm、構造周期 p : 200nm、Siナノシリンダー高さ h_1 : 160nm、SiO₂高さ h_2 : 120nmとした場合の計算結果を図2に示す。計算では、設計したフィルターを図1(a)の様な厚さ10nmのダイヤモンドおよびSi光検出器を想定した集積時の光学特性である。波長532nmでの光学濃度(OD値)が約

3.0、700nmでの透過率が約97%となった。また、入射光の入射角度の変化に対する透過率、OD値変化の検証も行った。その他詳細は当日報告する。

参考文献 ¹J. M. Taylor, *et al.*, Nat. Phys. **4**, 810 (2008). ²D. Kim, *et al.*, Nat. Electron. **2**, 284 (2019). ³J. Berzins, *et al.*, arXiv, 2004.06423 (2020).

謝辞 本研究はMEXT Q-LEAP(JPMXS0118067395)、科研費(22K14289, 23K22795, 23KK0268)、東電記念財団、村田学術振興財団、旭硝子財団、内藤科学振興財団、池谷科学技術振興財団、日本板硝子材料工学助成会により遂行された。

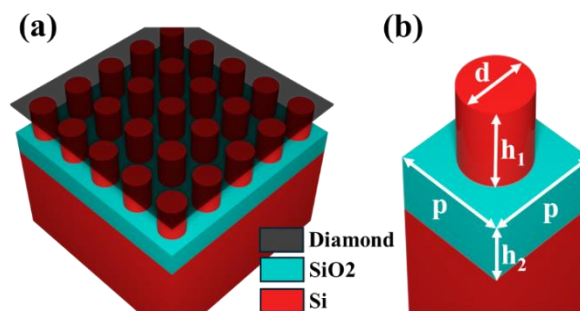


Fig. 1 (a) Overall view of the metasurface. (b) Structural parameters.

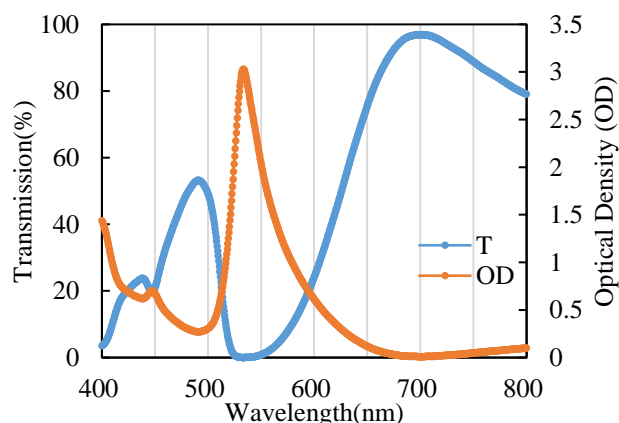


Fig. 2 Characteristics of the designed filter.

ダイヤモンド NV センターを用いたコンパクトでポータブルな パルス量子センサによる磁界計測

Compact and portable diamond NV Pulse magnetic sensor module

住友電気工業(株)¹, 京大化研², 東北大³ ○出口 洋成^{1,2}, 林 司¹, 済藤 紘矢¹,

西林 良樹¹, 小林 豊¹, 藤原 正規², 森下 弘樹³, 水落 憲和², 辰巳 夏生¹

Sumitomo Electric industries, Ltd.¹, ICR Kyoto Univ.², Tohoku Univ.³,

○Hiroshige Deguchi^{1,2}, Tsukasa Hayashi¹, Hiroya Saito¹, Yoshiki Nishibayashi¹, Yutaka Kobayashi¹, Masanori Fujiwara², Hiroki Morishita³, Norikazu Mizuochi², Natsuo Tatsumi¹

E-mail: deguchi-hiroshige@sei.co.jp; tatsumi-natsuo@sei.co.jp

量子コンピュータや量子暗号通信など活発に研究されている量子アプリケーションの中で、より近い将来に社会実装が期待できる具体的な用途が多数提案されている量子センサとして特にダイアNVセンターが着目されている。この度は、ノートパソコンの USB3.0 電源で 4W の低消費電力で動作するダイヤモンド NV センターを用いたコンパクトでポータブルなパルス計測の量子センサモジュールを開発し(Fig.1)⁽¹⁾、連続ラムゼー法により磁界を計測しノイズレベルと感度を評価した(Fig.2)。超高圧合成技術により製作された高品質なダイヤモンドに電子線照射の処理を行い、高感度の NV センサを製作し、以前報告した CW 計測の量子センサモジュール⁽²⁾⁽³⁾に、 μ 波のオンオフ⁽⁴⁾と位相シフト⁽⁵⁾を行う μ 波回路と、それらを正確なタイミングで動作させるデジタル回路を追加し、パルス計測の量子センサモジュールを実現し、CW-ODMR、Rabi 振動、Pulse-ODMR、Ramsey 法、Hahn 法によるアンサンブルのダイヤモンド NV の評価や計測を可能にし、さらに連続 Ramsey 法による磁界測定を可能にした。ダイヤモンドセンサーの社会実装に資するべく、これらの技術成果を報告する。

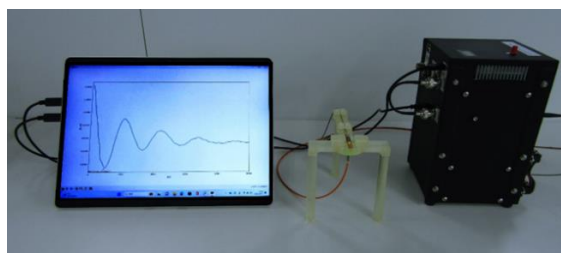


Fig. 1. The sensor module and laptop computer.

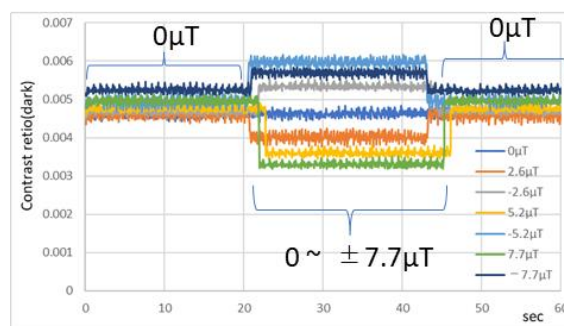


Fig. 2. Continues Ramsey sequence. $0 \sim \pm 7.7 \mu T$

【謝辞】本研究は、部分的に MEXT Q-LEAP(No. JPMXS0118067395)の支援を受けて行なった。森下は東北大学 CSIS の CSRN の支援を受けた。

1) 日新電機(株)2024 年 3 月 29 日ニュース
リリース

2) 左 亦康他, 住友電工テクニカルレビュー
第 198 号, 67 (2021)

3) H. Deguchi et al., Appl. Phys. Express 16,
62004 (2023).

4) G. Mariani et al., AIP Adv. 12, 065321 (2022).

5) E. D. Herbschleb et al., Phys. Rev. Applied 18,
034058 (2022).

ナノスケール高周波交流磁場イメージングに向けた 走査ダイヤモンド NV センター顕微鏡の開発

Development of a Scanning Nitrogen-Vacancy Centers Magnetometer for Nanoscale RF Magnetic Field Imaging

慶大理工¹, 慶大 CSRN², 北陸先端大³

○(M2)大倉 和真^{1,2}, 小室 俊太郎^{1,2}, 林 都隆³, 安 東秀³, 早瀬 潤子^{1,2}

Keio Univ.¹, Keio CSRN², JAIST³

○(M2)Kazuma Okura^{1,2}, Shuntaro Komuro^{1,2}, Kunitaka Hayashi³, Toshu An³, and Junko Ishi-Hayase^{1,2}

E-mail: kazumaokura200715@keio.jp

【背景・目的】微小領域の交流電流やナノ構造中の電子輸送等をイメージングする技術はエレクトロニクスや通信デバイスの発展に寄与する。ダイヤモンド中の窒素空孔中心 (NV センター) は、室温下で高感度・高空間分解能を有することから有用な磁場センサとして期待されている。近年、原子間力顕微鏡 (AFM) のプローブ先端に NV センターを含むダイヤモンドを配置し、パルス制御を用いることで MHz 帯の交流電流のナノスケールイメージングが実証された^[1]。しかし、複雑なパルス制御と走査ダイヤモンド NV センター顕微鏡との統合は困難である。そこで、本研究ではパルス制御を用いずに高周波交流磁場を簡便に検出できる、走査ダイヤモンド NV センター顕微鏡の開発を行う。電子スピン二重共鳴下で観測される RF-Dressed 状態^[2,3]を用いた CW-ODMR 法により、高感度な磁場測定を可能にするだけでなく、温度測定への応用も期待される^[4]。

【方法】ゼロ磁場もしくは NV 配向に対して垂直な静磁場下での NV 電子スピンの固有状態は $|0\rangle$, $|B\rangle = (|+1\rangle + |-1\rangle)/\sqrt{2}$, $|D\rangle = (|+1\rangle - |-1\rangle)/\sqrt{2}$ と表される。 $|B\rangle$ - $|D\rangle$ 間遷移に共鳴するラジオ波を印加すると、RF-Dressed 状態が生成され、 $|B\rangle$, $|D\rangle$ 準位はそれぞれラジオ波の振幅に比例して 2 つに分裂する (Fig. 1(a))。レーザー・マイクロ波・ラジオ波同時照射時によって得られる CW-ODMR スペクトル上では、4 つの dip が観測されるため dip 間隔から磁場振幅が算出できる。ダイヤモンドプローブの作製は音叉型水晶振動子にケミカルエッチングしたタンゲステンワイヤを接着し、その先端にダイヤモンドを接着する。最後に、ラジオ波を印加したダイヤモンドプローブでピエゾステージ上に置かれた測定対象をスキャンしながら CW-ODMR 測定を行う。

【結果】予備実験として行ったラジオ波印加時のバルクダイヤモンドの CW-ODMR スペクトルを Fig.1 (b) に示す。分裂幅の周波数差から印可したラジオ波の交流磁場振幅が算出できる。また、自作した AFM プローブのフィードバック制御結果を Fig. 2 に示す。固定の励振周波数を使用する振幅変調モードにより振幅の変化を一定に保ち、プローブ-サンプル間の距離を制御した。本実験で用いた AFM コントローラは検知した電圧が 0 V になるように制御するため、水晶振動子の振幅電圧に適切なオフセットを印可した。図から適当なタイミングで外部から振動を与えた際に 1.5 秒以内に安定化することが確認できた。発表では磁気イメージングから微細回路の交流電流イメージングの結果まで発表する予定である。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 (No. 20H05661, 22H01558)、Q-LEAP (No. JP-MXS0118067395) の支援を受けて行われた。

[1] M. L. Palm, *et al.*, Phys. Rev. Appl. **4**, 49 (2022). [2] S. Saijo, *et al.*, Appl. Phys. Lett., **113**, 082405 (2018). [3] T. Yamaguchi, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **58**, 100901 (2019). [4] H. Tabuchi, *et al.*, J. Appl. Phys. **133**, 24401 (2023).

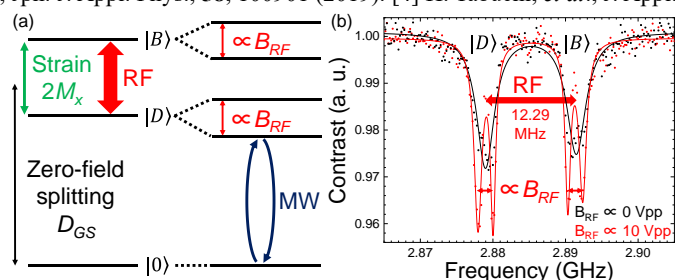


Fig. 1 (a) Energy diagram and (b) CW-ODMR spectra w and w/o B_{RF}

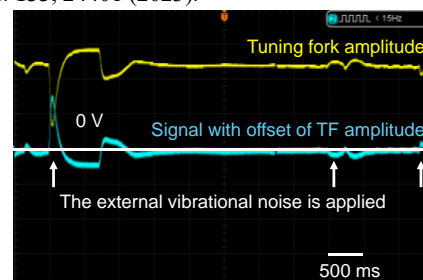


Fig. 2 AFM feedback control result

KS 研究会セッション | 一般セッション(口頭講演) : KS.1 固体量子センサ研究会

[20p-A41-1~8] KS.1 固体量子センサ研究会

[20p-A41-1]

エアギャップ付き磁性体コアおよびダイヤモンド量子センサを用いた電流計測の原理実証

○村松 秀和^{1,2}、貝沼 雄太²、波多野 雄治²、天谷 康孝¹、加藤 宙光¹、坂本 憲彦¹、山田 達司¹、浦野 千春¹、金子 晋久¹、阿部 浩之³、小野田 忍³、大島 武³、波多野 睦子²、岩崎 孝之² (1.産総研、2.東工大、3.量研)

[20p-A41-2]

Using the standard deviation for robust quantum sensing

○Ernst David Herbschleb¹, So Chigusa^{2,3}, Riku Kawase¹, Hiroyuki Kawashima¹, Masashi Hazumi^{4,5,6,7,8}, Kazunori Nakayama^{9,4}, Norikazu Mizuochi^{1,10,4} (1.Kyoto Univ., 2.UC Berkeley, 3.LBNL, 4.QUP/KEK, 5.IPNS, 6.JAXA/ISAS, 7.Kavli IPMU/WPI, 8.SOKENDAI, 9.Tohoku Univ., 10.CSRN)

[20p-A41-3]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターからの同一光子生成

○阿部 棕太郎¹、汪 鵬¹、谷口 尚²、小野田 忍³、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS、3.QST)

[20p-A41-4]

爆轟ナノダイヤモンド中のSnV中心の発光スペクトル測定

○(M1)大堀 真尚¹、蘇 梓傑²、藤原 正規¹、牧野 有都³、鶴井 明彦³、西川 正浩³、水落 憲和^{1,4} (1.京大化研、2.量研機構、3.(株)ダイセル、4.京大スピンセンター)

[20p-A41-5]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターの非共鳴レーザによる電荷状態遷移

○陳 溢暘¹、阿部 棕太郎¹、谷口 尚²、小野田 忍³、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS、3.QST)

[20p-A41-6]

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターにおけるコヒーレントポピュレーショントラッピング

○池田 翔¹、陳 溢暘¹、汪 鵬¹、阿部 棕太郎¹、谷口 尚²、波多野 睦子¹、岩崎 孝之¹ (1.東工大、2.NIMS)

[20p-A41-7]

炭化ケイ素シリコン空孔荷電状態安定性の定量的解析

○山崎 雄一¹、明石 遼介¹、花輪 雅史²、村田 晃一²、佐藤 真一郎¹、宮脇 信正¹、圓谷 志郎¹、増山 雄太¹、西谷 侑将^{3,4}、松下 雄一郎^{1,3,4}、土田 秀一²、好田 誠^{1,5}、大島 武^{1,5} (1.量研、2.電中研、3.Quemix、4.東大、5.東北大)

[20p-A41-8]

室温における4H-SiC中V2中心蛍光の偏光特性

○(P)西川 哲理¹、森岡 直也^{1,2}、阿部 浩之³、大島 武^{3,4}、水落 憲和^{1,2,5} (1.京大化研、2.京大スピンセンター、3.量研、4.東北大、5.QUP KEK)

エアギャップ付き磁性体コアおよびダイヤモンド量子センサを用いた 電流計測の原理実証

Demonstrating current measurement by the diamond quantum sensor
using an air-gapped magnetic core

産総研¹, 東工大², 量研³ ○村松 秀和^{1,2}, 貝沼 雄太², 波多野雄治², 天谷 康孝¹,
加藤 宙光¹, 坂本 憲彦¹, 山田 達司¹, 浦野千春¹, 金子 晋久¹, 阿部 浩之³, 小野田 忍³,
大島 武³, 波多野 睦子², 岩崎 孝之²

AIST¹, Tokyo Tech.², QST³ ○Hidekaizu Muramatsu^{1,2}, Yuta Kainuma², Yuji Hatano²,
Yasutaka Amagai¹, Hiromitsu Kato¹, Norihiko Sakamono¹, Tatsuji Yamada¹, Chiharu Urano¹,
Nobu-Hisa Kaneko¹, Hiroshi Abe³, Shinobu Onoda³, Takeshi Ohshima³, Mutsuko Hatano²,
and Takayuki Iwasaki²

E-mail: muramatsu.h@aist.go.jp

電流比較器は、磁性体コアに巻きつけられた一次巻線と二次巻線を通る電流がコア中に生成する磁束を打ち消し、わずかにコア中に残留する磁束（残留磁束）をゼロとなるよう調整することで電流比を巻線比から決定することができる精密計測機器である。電流比を高精度に決定するためには、残留磁束を高感度に検出する必要があり、従来の電流比較器では電磁誘導現象を利用した検出巻線が用いられてきた。しかし、検出巻線では高磁場感度を得るために多数の巻線が必要であり、また原理的に直流電流比の測定が行えない、といった問題を抱えている。

そこで、本研究では室温で高感度な磁気センサとして利用可能なダイヤモンド量子センサを電流比較器の検出器に用いることで、電流計測の高精度化と広帯域化を目指している。Fig. 1 はノイズフロアが $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であるセンサヘッド[1]をエアギャップに実装し、53 Hz の交流電流を巻線に流して得られたノイズスペクトルである。一次と二次の巻線はそれぞれがコア中に発生させる磁束の位相が反転するように巻かれており、打ち消し合った後の残留する電流成分を磁束として計測した。得られたノイズスペクトル (Fig. 1) から、ダイヤモンド量子センサにより残留磁束を検出していることを確認した。

[1] 村松秀和ら: 第 71 回応用物理学会春季学術講演予稿集, 24p-1BB-3 (2024).

謝辞: 本研究の一部は、文部科学省 光・量子飛フラグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118067395、内閣府 SIP「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」の支援を受けて行われました。

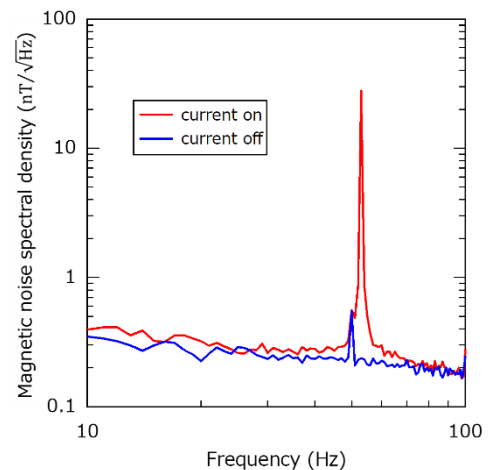


Fig. 1 The signal of residual magnetic flux generated by a 53 Hz current detected by the diamond quantum sensor.

Using the standard deviation for robust quantum sensing

Kyoto Univ.¹, UC Berkeley², LBNL³, QUP/KEK⁴, IPNS⁵, JAXA/ISAS⁶, Kavli IPMU/WPI⁷,
SOKENDAI⁸, Tohoku Univ.⁹, CERN¹⁰

○Ernst David Herbschleb¹, So Chigusa^{2,3}, Riku Kawase¹, Hiroyuki Kawashima¹,
Masashi Hazumi^{4,5,6,7,8}, Kazunori Nakayama^{9,4}, Norikazu Mizuochi^{1,10,4}

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

Various periodic signals can be detected with different techniques, for example low-frequency signals [1] or high-frequency signals [2]. However, when there are facets of randomness about the signal, e.g. a changing phase, such methods become less sensitive, as long measurements average the signal to zero. Here, we propose and analyse a robust technique to detect the amplitude of these signals.

In our method, instead of measuring the amplitude of a signal directly as in conventional methods, we measure the standard deviation, which is a different global property. Phase and frequency changes do not affect the result, and it is possible to account for amplitude distributions. For a high signal-to-noise ratio (SNR), this method has the same sensitivity as conventional techniques [1]. However, as opposed to our method, conventional techniques are not robust against the mentioned instabilities. For a low SNR, the behaviour is quite different, resulting in a worse sensitivity. These regimes are both analytically analysed, and numerically simulated for various parameters. Finally, we perform an example measurement with a single nitrogen-vacancy centre (see Figure 1).

We expect that our method is useful for the detection of light dark matter [3], and for mineral search under harsh conditions. For the dark photon and axion candidates, the dark matter field is effectively a periodic magnetic field with a limited coherence time when measured with nitrogen-vacancy centres [3]. Given the rather small signals to detect due to the small coupling to dark matter, long measurement times are a necessity, thus making the proposed method ideal for this kind of experiment.

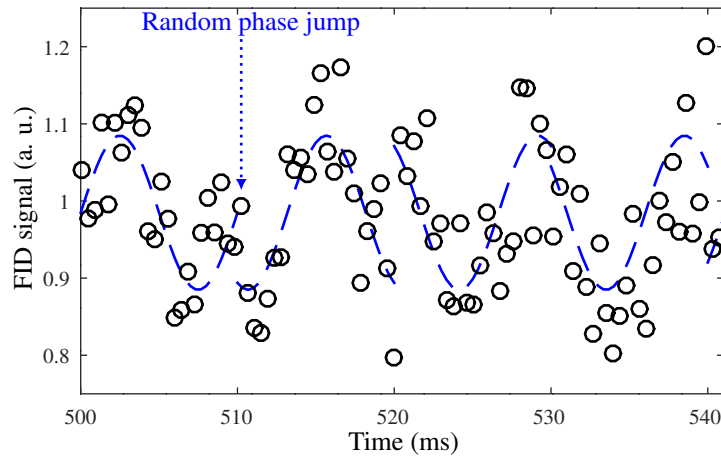


Figure 1: Measurement of an ac signal with random phase jumps (data with black circles). The blue dashed line is a guide-to-the-eye.

- [1] E. D. Herbschleb et al., Low-frequency quantum sensing, *Physical Review Applied* 18, 034058 (2022).
- [2] G. Wang et al., Sensing of arbitrary-frequency fields using a quantum mixer, *Physical Review X* 12, 021061 (2022).
- [3] S. Chigusa et al., Light dark matter search with nitrogen-vacancy centers in diamonds, *arXiv:2302.12756* (2023).

The research is supported by KAKENHI (No. 22K14560), MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0118067395), CREST (No. JPMJCR23I5), and the Collaborative Research Program of ICR, Kyoto University (2021-114).

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターからの同一光子生成

Generation of Nearly Identical Photons from Lead-Vacancy Centers in Diamond

東工大¹, NIMS², QST³ ○阿部 椋太郎¹, 汪 鵬¹, 谷口 尚², 小野田 忍³, 波多野 睦子¹,
岩崎 孝之¹Tokyo tech¹, NIMS², QST³ ○R. Abe¹, P. Wang¹, T. Taniguchi², S. Onoda³, M. Hatano¹, T.
Iwasaki¹,

E-mail: abe.r.ag@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の鉛-空孔(PbV)センターはその優れた光学・スピン特性から量子ネットワーク中のノードとして期待されている[1, 2]。離れた2点間で量子もつれを形成するためには複数のPbVから放出される区別不可能な同一光子を用いた2光子干渉を観測する必要がある。しかし、発光波長および線幅が同一な光子を見つけるためには狭い不均一分布および光源の電荷安定性が不可欠である。本研究では、異なるアニール温度で形成したPbVの不均一分布および電荷安定性を調べ、複数のPbVから同一光子を観測することに成功した。

IIa(001)単結晶ダイヤモンド基板に鉛イオンを12 MeVで注入後、2100 °Cまたは2300 °Cの高温高压アニールを施すことで2種類のPbV試料を作製した。サンプルはクライオスタットで6 Kに冷却し、波長可変レーザーを用いて共鳴励起計測を行った。

PLE測定から両サンプルとも不均一分布は約15 GHzであったのに対し、電荷安定性において顕著な違いが見られた。Fig. 1は異なるアニール温度の2種類のサンプルにおいて、ターゲットであるPbVから約4 μm離れた位置に非共鳴である532 nmレーザーを5秒間照射した直後にPLEスペクトルを測定する工程を10回繰り返した際に発光が消失する確率を示している。2300 °Cアニール試料では、532 nmレーザーパワーを上昇させても、照射がないときと同様の消失確率(30%以下)であるのに対し、2100 °Cアニール試料では75 μWを超えると消失確率が高くなり、150 μW以上では発光が一度も観測されなかった。これは、2100 °Cアニール試料で残存していた欠陥から532 nmレーザー励起によって放出されたキャリアをPbVが捕獲することで暗状態に遷移している一方、2300 °Cアニール試料ではその欠陥の生成が抑制されているためであると考えられる。Fig. 2(a, b)は2300 °Cサンプルにおける共鳴励起による共焦点顕微鏡像および発光点のPLEスペクトルである。PLEスペクトルが重なり合っており、ほぼ同一な光子を複数のPbVから検出できていることがわかる。本結果は、PbVセンターを用いた2光子干渉の観測に繋がる成果である。

本研究はJSPS 科研費JP22H04962、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)の助成により行われた。

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

[2] P. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 132, 073601 (2024)

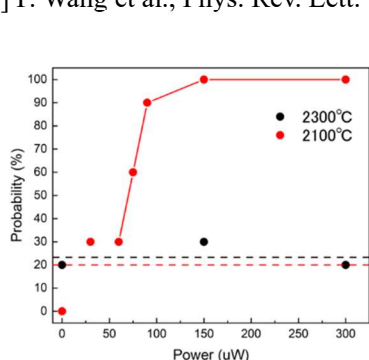


Fig.1 Vanishing probability of PLE spectrum

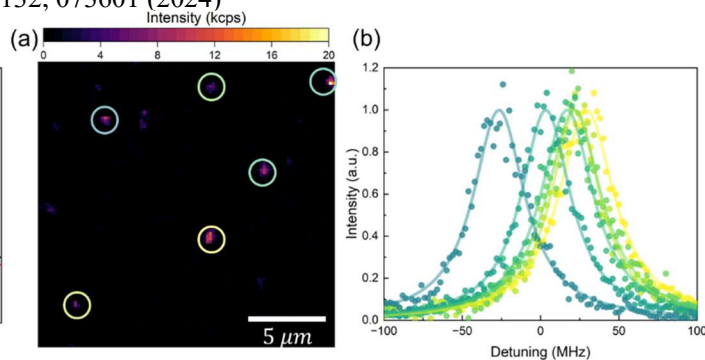


Fig.2 (a) Resonant confocal mapping (b) PLE spectra of multiple PbVs

爆轟ナノダイヤモンド中の SnV 中心の発光スペクトル測定

Photoluminescence Spectrum of SnV Center in Detonation Nanodiamond

京大化研¹, 量研機構², (株)ダイセル³, 京大スピンセンター⁴ (M1)大堀 真尚¹, 蘇 梓傑^{1,2},
藤原 正規¹, 牧野 有都³, 鶴井 明彦³, 西川 正浩³, 水落 憲和^{1,4}

ICR, Kyoto Univ.¹, QST², Daicel Corp.³, CSRN, Kyoto Univ.⁴ [○]M. Ohori¹, F. T. K. So^{1,2}, M. Fujiwara¹,
Y. Makino³, A. Tsurui³, M. Nishikawa³, and N. Mizuochi^{1,4}

E-mail: ohori.masanao.27s@st.kyoto-u.ac.jp

[背景] 色中心を含むナノダイヤモンド (ND) は、細胞等の生体試料に適用できる有力な蛍光プローブである。数ある色中心の中で、シリコン-空孔 (SiV) 中心に代表される IV 族色中心は、室温でも鋭いゼロフォノン線 (ZPL) を示し、IV 族原子に応じてピーク波長が異なるため、マルチカラーイメージング用の蛍光プローブとして利用できる。加えて、ピーク波長が温度で変化するため、光で検出可能な温度センサとしても注目される。このような色中心を含む ND を細胞内の様々な小器官に導入するには、小粒径かつ大量の ND が必要だが、爆轟法はこれらの条件を満たす優れた合成法である。これまで SiV 中心、ゲルマニウム-空孔 (GeV) 中心を含む爆轟ナノダイヤモンド (DND) の合成が報告され^[1]、DND を用いた温度感度計測も報告された^{[2][3]}。その際、スズ-空孔 (SnV) 中心を含む DND の合成も試みられたが、スズ原子は原子半径が大きく、取り込み効率の低さから実験的にはこの存在が確認されなかった。DND 中の SnV 中心を見つけることは、新規の DND 蛍光プローブの発見に加えて、爆轟法による色中心合成のメカニズムへの理解にも重要である。本研究では、72 時間熱混酸洗浄による表面不純物除去と、高い検出効率を持つ共焦点顕微鏡により、DND 中 SnV 中心からの発光スペクトルの測定に成功したので、これを報告する。

[実験・結果] ダイセル社合成の Sn ドープ DND(粒径 ~ 10 nm)^[1]を熱混酸で洗浄後 (HNO₃: H₂SO₄ = 1:3, 130°C, 72 時間)^[4]、1 mg/mL 懸濁液をスライドガラス上に 10 µg 滴下、乾燥塗布した。この試料の発光画像及び発光スペクトルを自作の共焦点顕微鏡で観察した。発光画像測定の際には SnV 中心の ZPL ピーク波長 620 nm を中心に ±10 nm のバンドパスフィルタを用いて SnV 中心からの発光を示す輝点を効率良く探索した。次に画像上の輝点に対して発光スペクトルを測定した。代表例を図 1 に示す。波長 600–850 nm に窒素-空孔(NV)中心由来のブロードなフォノンサイドバンドが存在し、その中に SnV 中心の ZPL である 620 nm のピークを確認した。発表では測定の詳細と DND 中 SnV 中心の発光に関する考察を紹介する。

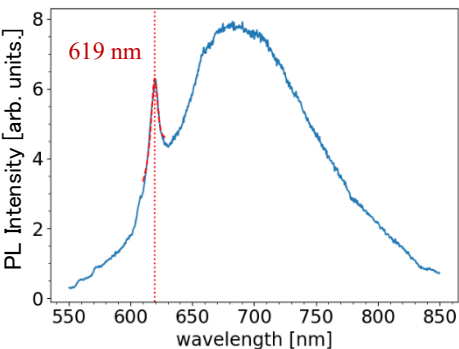


図 1 Sn ドープ DND の発光スペクトル

波長 600–850 nm に窒素-空孔(NV)中心由来のブロードなフォノンサイドバンドが存在し、その中に SnV 中心の ZPL である 620 nm のピークを確認した。発表では測定の詳細と DND 中 SnV 中心の発光に関する考察を紹介する。

[謝辞] 本研究は MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0120330644)の支援を頂いて行われました。ここに深く感謝致します。

[参考文献] [1] Makino, Y. *et al. Diam. Relat. Mater.* **130**, 109493 (2022) [2] Fujiwara, M. *et al. Carbon* **198**, 57-62 (2022). [3] Fujiwara, M. *et al. Appl. Phys. Lett.* **123**, 181903 (2023). [4] Terada, D. *et al. Nanoscale Adv.* **4**, 2268 (2022)

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターの非共鳴レーザによる電荷状態遷移

Charge state transition of lead-vacancy centers in diamond by non-resonant laser irradiation

東工大¹, NIMS², QST³, [○]陳溢暘¹, 阿部椋太郎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, R. Abe¹, 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 IV 族-空孔センターは安定した発光と鋭いゼロフォノン線を示すために量子情報通信応用での固体量子光源として期待されている。その中で鉛-空孔 (PbV) センターは最も大きな基底状態分裂を有するため、同じ測定温度条件でより長いスピンコヒーレンス時間が期待できる[1]。我々はこれまでに共鳴励起を用いて PbV センターの自然幅に近い発光の測定に成功しているが、共鳴励起時に暗状態へ遷移することで発光が消失する現象も観察している[2]。非共鳴の緑色レーザ照射で PbV の発光は回復するが[2]、電荷状態遷移は非共鳴レーザの波長に依存すると考えられる。実際、スズ-空孔センター (SnV) では、緑色よりも青色レーザが発光を効率的に回復させることがわかっている[3]。本研究では異なる波長の非共鳴レーザを PbV センターに照射することで、電荷遷移に大きな影響を与えることを見出した。

Ila 型の単結晶ダイヤモンド(001)に 12 MeV の加速電圧で Pb イオンを注入し、2100–2300°C/7.7 GPa の高温高压アニールを施すことで PbV センターを形成した。試料はクライオスタットで 5 K まで冷却した。波長可変レーザを用いることで負電荷 PbV センターの共鳴励起を行い、非共鳴励起には波長 532 nm (20 μ W) または 445 nm (10 μ W) のレーザを用いた。レーザの照射時間を制御するために 445 nm レーザはレーザ本体搭載の変調機能を用い、共鳴レーザと 532 レーザの変調には AOM を用いた。

Fig. 1 に 532 nm レーザ照射時の負電荷 PbV センターの発光強度の時間変化を示す。PbV センターを暗状態にした後に (後述するように 445 nm レーザ照射による消失を利用)、2 ms 間 532 nm レーザを照射してから共鳴励起で電荷状態を計測するパルスシーケンスを 15 回繰り返した。532 nm レーザを照射するほど共鳴励起による蛍光が増加しており、532 nm レーザは PbV を明状態に回復させている。Fig. 2 の緑プロットは横軸を非共鳴レーザ照射時間のみにしたものであり、フィッティングから発光回復レートとして 84 Hz が得られた。次に、非共鳴レーザを 445 nm にしたパルスシーケンスを照射し、結果を示したのが Fig. 2 の青プロットである。532 nm レーザとは対照的に、445 nm レーザを照射するほど負電荷 PbV からの発光が減少していることがわかる。消失レートは 293 Hz であり、532 nm レーザよりも弱いレーザパワーにも関わらず高いレートが得られた。本結果は、非共鳴レーザは PbV センターの発光を回復させるだけでなく、波長によっては直接暗状態に遷移させることを示している。青色レーザで回復が促進させる SnV センター[2]とは全く異なる挙動であり、PbV センターの電荷状態制御にとって重要な知見となるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、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] P. Wang et al., ACS Photonics 8, 10, 2947–2954 2021.[2] P. Wang et al., Phys. Rev. Lett. 132, 073601 2024 [3] J. Görlitz et al., npj Quantum Information, 8, 45, 2022.

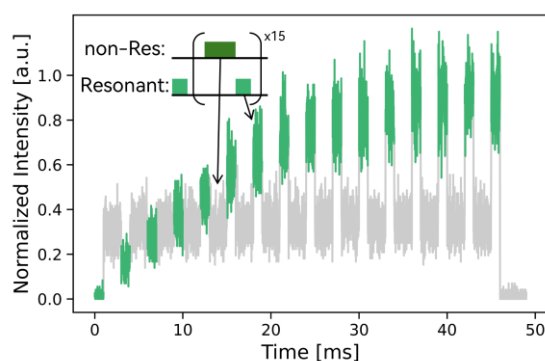


Fig. 1 Recovery of fluorescence of PbV upon 532 nm laser irradiation.

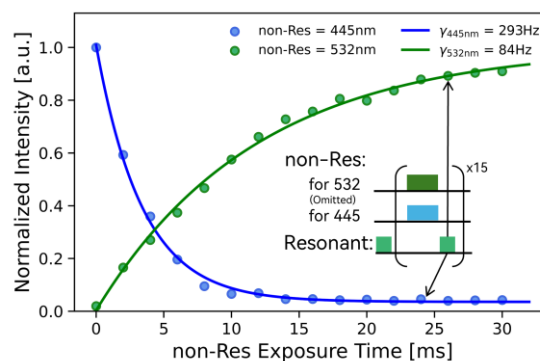


Fig. 2 Decay rates of recovery and termination of fluorescence of PbV.

ダイヤモンド中の鉛-空孔センターにおける コヒーレントポピュレーショントラッピング

Coherent Population Trapping of a Lead-Vacancy Center in Diamond

東工大¹, NIMS² ○池田翔¹, 陳溢暘¹, 汪鵬¹, 阿部椋太郎¹, 谷口尚², 波多野睦子¹, 岩崎孝之¹

Tokyo Tech.¹, NIMS.², °K. Ikeda¹, Y. Chen¹, P. Wang¹, R. Abe¹, T. Taniguchi², M. Hatano¹,

T. Iwasaki

E-mail: ikeda.k.bp@m.titech.ac.jp

ダイヤモンド中の IV 族カラーセンターは、発光がゼロフォノン線に集中しており、外部ノイズに対して高い耐性を持つことから、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-空孔(PbV)センターは、IV 族カラーセンターの中でも基底状態分裂幅が広く、他の IV 族カラーセンターと比べてより高い温度下でも長いスピンコヒーレンス時間が得られることが予測されている[1]。我々はこれまでに PbV センターの自然幅に近い発光[2]およびスピン緩和時間(T_1)の測定[3]を報告しているが、量子状態の保存のためにはスピンのコヒーレント状態生成が必要である。本研究では、コヒーレント状態の観測方法としてコヒーレントポピュレーショントラッピング(CPT)を行い、PbV で初めてスピンのコヒーレント状態の観測に成功した。

IIa (001) 単結晶ダイヤモンド基板に鉛イオンを注入し、2100°C、7.7 GPa のアニール処理を行った高品質な PbV センターサンプル[1]を使用した。このサンプルに表面に対して垂直に磁場を印加し、サンプルは 11.5 K に冷却した。共鳴レーザー (300 nW) を電気光学変調器 (EOM) に通して PbV に照射した。

Fig. 1 に示す 3 準位間での Λ スキームを用いることで CPT 測定を行った。共鳴レーザーをスピン保存遷移を励起するためのポンプ光とし、EOM でプローブ光の周波数を変化することでスピン反転遷移を同時に励起させた。Fig. 2 にプローブ光の detuning (Δ) に対する PbV センターの発光強度の変化を示す。ピークの中央付近に発光強度が減少する谷を観測した。これは、あるレーザー周波数で $\Delta = 0$ となることによって基底状態の 2 準位から同時に励起が起これ、コヒーレントな重ね合わせ状態にトラップされることで発光が失われる現象が観測できていることを示している。本成果は PbV センターにおいて初めてコヒーレント状態を観測したものであり、今後、スピンディフェージング時間およびスピンコヒーレンス時間の評価につながるものである。

本研究は JSPS 科研費 JP22H04962、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ある。

[1] P. Wang, *et al.*, ACS Photonics 8, 2947, 2021. [2] P. Wang, *et al.*, Phys. Rev. Lett. 132, 073601, 2024.

[3] 大羽一輝. 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会. 22p-A601-17. 2023.

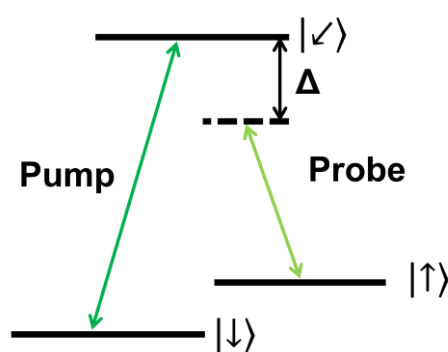


Fig. 1 Λ scheme for CPT.

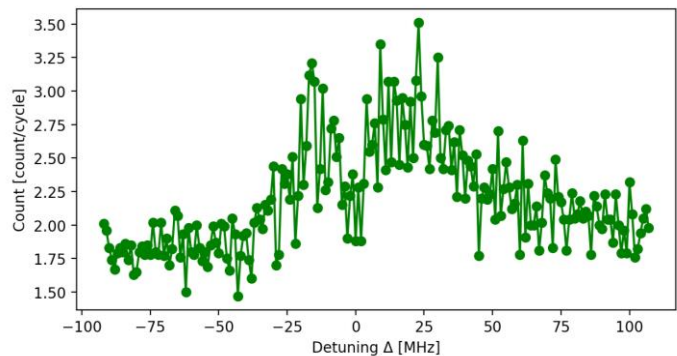


Fig. 2 CPT on a PbV center.

炭化ケイ素シリコン空孔荷電状態安定性の定量的解析

Quantitatively charge-state-stability analysis of silicon vacancies in SiC

QST¹, 電中研², Quemix³, 東大⁴, 東北大⁵ ○山崎 雄一¹, 明石 遼介¹, 花輪 雅史²,
村田 晃一², 佐藤 真一郎¹, 宮脇 信正¹, 圓谷 志郎¹, 増山 雄太¹, 西谷 侑将^{3,4},
松下 雄一郎^{1,3,4}, 土田 秀一², 好田 誠^{1,5}, 大島 武^{1,5}
QST¹, CRIEPI², Quemix Inc.³, Univ. of Tokyo⁴, Tohoku Univ.⁵, ○Y. Yamazaki¹, R. Akashi¹,
M. Hanawa², K. Murata², S.-I. Sato¹, N. Miyawaki¹, S. Entani¹, Y. Masuyama¹, Yusuke Nishiya^{3,4},
Y. Matsushita^{1,3,4}, H. Tsuchida², M. Kohda^{1,5}, T. Ohshima^{1,5}

E-mail: yamazaki.yuichi@qst.go.jp

【研究背景】

炭化ケイ素(SiC)中のシリコン空孔(V_{Si})を機能させるには荷電状態を負の1価(V_{Si}⁻)にする必要がある[1]。我々の研究目標である SiC-V_{Si} 量子センサによる SiC パワーデバイス内部直接観察に向けて、前回の発表[2]ではドーピング条件および V_{Si} 濃度を広範囲に変化させて体系的な V_{Si}⁻安定性調査結果について報告した。本研究では、得られた V_{Si}⁻安定性の定量的な解析を行なった。

【実験方法】

n⁺基板上に様々なドーピング条件(p および n 型、10¹⁵-10¹⁹cm⁻³)で作製した 4H-SiC エピタキシャル膜(5-6μm)および p/n⁺-sub 界面に形成される空乏層(i 層模擬)中に、粒子線描画法(PBW)(イオン種: He, エネルギー: 0.5 MeV(空乏層に対しては 2.5MeV)、照射量: 3×10³⁻⁶/φ1μm (=3×10¹¹⁻¹⁴cm⁻²))により V_{Si} ドット(5x5 μm²)パターンを形成した。V_{Si}⁻の光励起には波長 785nm のレーザーを用いた。

【実験結果】

図中のマーカーは規格化発光強度のドーピング条件および照射量依存性である。中～高濃度 p, n 層で観察される発光強度の急減はドーパント補償有無による V_{Si}⁻から V_{Si}⁰ or 2- or 3- への変化が原因と考えられる。しかし、n 層で観察された発光強度増加領域での一定発光強度や低濃度 p 層での発光強度急減(中濃度 p 層では発光確認)は補償効果では説明できない。光無照射下では V_{Si}⁻がほぼいない一方、V_C⁺は安定に存在[3]することから、我々は光照射下における V_C⁺から V_{Si}⁰への伝導帯を経由した電子移動がこれらの挙動を説明できる機構と考えている。この機構では、照射量が多いほど電子を捕獲する正味の V_C 量が減少していく(NV_{Si}/NV_C が大きくなる)。これを考慮した定量的解析を行ったところ、実験結果を概ね再現することができた。詳細は当日報告する。

【謝辞】 本研究は科研費(21H04553, 20H00355)、MEXT Q-LEAP(JPMXS0118067395)、安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 の助成を受けたものである。

【参考文献】 [1] M. Widmann et al., Nat. Mater. **14** 164 (2015). [2] 山崎ら、第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 24a-1BB-10. [3] N. T. Son et al., J. Appl. Phys. **129** 215702 (2021).

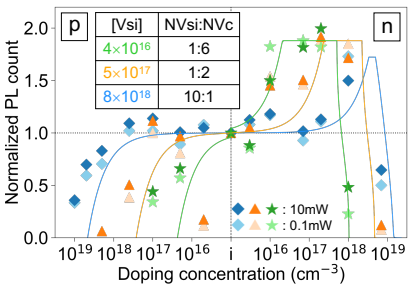


Fig.1 Comparison of experimentally obtained and theoretically calculated PL intensity (≡fraction of V_{Si}⁻) on doping conditions and fluence.

室温における 4H-SiC 中 V2 中心蛍光の偏光特性

Polarization properties of fluorescence from V2 centers in 4H-SiC at room temperature

京大化研¹, 京大スピンセンター², 量研³, 東北大⁴, QUP KEK⁵ ○西川 哲理¹, 森岡 直也^{1,2},

阿部 浩之³, 大島 武^{3,4}, 水落 憲和^{1,2,5}

ICR Kyoto Univ.¹, CSRN², QST³, Tohoku Univ.⁴, QUP KEK⁵ ○Tetsuri Nishikawa¹, Naoya Morioka^{1,2},

Hiroshi Abe³, Takeshi Ohshima^{3,4}, and Norikazu Mizuochi^{1,2,5}

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

4H 型の炭化ケイ素(4H-SiC)中のシリコン空孔(V_{Si})は非等価な格子位置により二種類存在し、六方晶位置($V_{Si}(h)$):V1 中心)と立方晶位置($V_{Si}(k)$):V2 中心)で異なる発光・スピン特性を有する[1]。このうち V2 中心は室温で観測可能なスピンを有し、量子センサ等への応用が期待されている。 V_{Si} は 4A_2 、 4E の二つの電子励起配置を有し、これらの混合状態が励起状態(ES)となるが、第一及び第二励起状態(ES1, ES2)はそれぞれ 4A_2 および 4E を主成分とする[3]。V1 中心では低温下で二つのゼロフォノン線(ZPL)発光 V1(E||c)および V1'(E⊥c)が知られ、2 つの遷移は波長と偏光特性で区別できる(図 1)[1]。低温では ES1 に起因する E||c 蛍光の強度が強いが、70 K 以上では熱励起によって ES2 の占有が増加し、E⊥c 蛍光が増強する[2]。しかし、V2 中心の発光スペクトルには E||c の ZPL(V2)のみが存在し、E⊥c ZPL(V2')の観測は報告されていない。V2 中心における ES2 の存在は共鳴光学遷移幅の温度依存性と DFT 計算によって示唆されたが[3]、推定された ES1,2 間のエネルギー差が 22 meV と大きい[3]。したがって ZPL を弁別可能な低温領域では ES2 の占有が顕著でなく、V2 中心における ES2 がもたらす発光特性への影響は未だ詳細が明らかでない。V2 中心は発光強度の低さに課題があり、量子応用に向けて光学特性の詳細を明らかにすることは非常に重要である。本研究では、V2 中心における 2 つの ES が光学特性に与える影響を調べるため、室温における V2 中心の蛍光強度の偏光特性を、単一欠陥を用いて(0001)面及び(1 $\bar{1}$ 00)面から評価した。

4H-SiC (0001) 4°オフエピ成長試料に電子線照射によって単一 V2 中心を作製し、へき開によって(1 $\bar{1}$ 00)面を露出した。波長 730 nm のレーザーを励起光源とした共焦点顕微鏡装置を用いて V2 中心発光の偏光特性を検出角を変えながら評価した。図 2 に示すように(0001)面測定では蛍光強度が E⊥c 方向において等方的であるが、(1 $\bar{1}$ 00)面測定では E||c 成分で強い蛍光を観測し、トータルの飽和蛍光強度も(0001)面測定と比較して増加することが分かった。また、(1 $\bar{1}$ 00)面測定におけるトータルの飽和強度は励起レーザーの偏光方向に影響されないと思われたが、実際には偏光方向に依存することが分かった。本発表では、この内容を含め、詳細な議論を行う。

本研究は MEXT QLEAP (JPMXS0118067395)、科研費 (JP22H01526, JP21K20502, JP23K19120)、京大ナノハブ拠点の支援を受けた。

[1] V. Ivády *et al.*, *Phys. Rev. B* **96**, 161114 (2017).

[2] R. Nagy *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **9**, 034022 (2018)

[3] P. Udvarhelyi *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **13**, 054017 (2020)

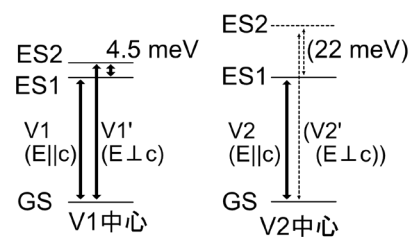


図 1 4H-SiC 中 V_{Si} のエネルギー準位図

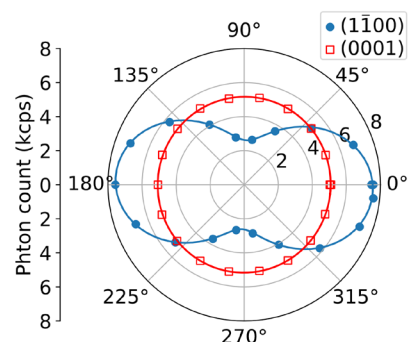


図 2 (1 $\bar{1}$ 00)および(0001)面から観測した V2 中心蛍光の検出角依存性。
(1 $\bar{1}$ 00)面: 0° = [0001], 90° = [1 $\bar{1}$ 20]
(0001)面: 0° = [1 $\bar{1}$ 20], 90° = [1 $\bar{1}$ 00]

KS 研究会セッション | 一般セッション(口頭講演) : KS.2 量子情報工学研究会

[17a-A22-1~12] KS.2 量子情報工学研究会

[17a-A22-1]

誘電体を用いた光-マイクロ波ハイブリッド共振器の極低温動作

濱元 樹¹、Bhunia Amit¹、Bhattacharya Rupak¹、高橋 優樹¹、○久保 結丸¹ (1.沖縄科技大)

[17a-A22-2]

共振器型超伝導増幅器の低消費電力化に向けた新規構造の提案と検証

○森 俊祐¹、沓間 弘樹^{1,2}、岸本 康宏³、山下 太郎¹ (1.東北大院工、2.JSTさきがけ、3.東北大RCNS)

[17a-A22-3]

積層基板構造における量子ビット集積系の設計

○田淵 豊¹、玉手 修平¹、政岡 文平¹、萬 伸一¹ (1.理研)

[17a-A22-4]

量子ビットの3次元集積化に向けた超伝導サファイア貫通電極の開発

○向笠 清隆¹、藤江 和之¹、塗木 佑介¹、久保 隼人¹、檜原 賢英¹、梅原 幹裕¹ (1.京セラ)

[17a-A22-5]

超伝導transmon型量子ビットの集積化における周波数衝突解析

○井ノ上 慎一¹、白井 菖太郎^{2,3}、渡辺 柊¹、松浦 康平¹、Li Rui²、玉手 修平²、野口 篤史^{2,3,4}、中村 泰信^{1,2} (1.東大工、2.理研RQC、3.東大先進、4.InaRIS)

[17a-A22-6]

量子ビット応用に向けたsidewall spacer構造を有するNbN/AlN/NbNジョセフソン接合

○本田 浩輝¹、栗原 大輝¹、Duong Pham¹、沓間 弘樹^{1,2}、寺井 弘高³、山下 太郎¹ (1.東北大院工、2.JSTさきがけ、3.情通機構)

[17a-A22-7]

TiN/MgO/TiN接合の10 mKにおける特性評価

○寺井 弘高¹、高木 佳寿代¹、瀬戸浦 真衣¹、美馬 覚¹、三木 茂人¹ (1.情通機構)

[17a-A22-8]

Construction of Adaptive Quantum Circuit for Enhanced VQAs

○Shanchuan Li¹、Daisuke Tsukayama¹、Jun-ichi Shirakashi¹、Tetsuo Shibuya²、Hiroshi Imai² (1.Tokyo Univ. Agr. & Tech., 2.Univ. Tokyo)

[17a-A22-9]

Higher Order Binary Optimization: Advanced Encoding for Larger Scale Traveling Salesperson Problems through Variational Quantum Eigensolver

○Juncheng Wang¹、Daisuke Tsukayama¹、Takumi Kanezashi¹、Jun-ichi Shirakashi¹、Tetsuo Shibuya²、Hiroshi Imai² (1.Tokyo Univ. Agr. & Tech., 2.Univ. Tokyo)

[17a-A22-10]

Parallel-VQEにおける量子ビットスケールと並列度の検討

○津嘉山 大輔¹、李 山川¹、汪 俊誠¹、白樫 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

[17a-A22-11]

Conditional Value at Riskを用いた変分量子固有値法によるAu原子接合作製における実験パラメータ最適化

○金刺 拓海¹、津嘉山 大輔¹、汪 俊誠¹、白樫 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

[17a-A22-12]

SGD-QAOAによる量子フィードバックアルゴリズムの効率化

○草 孝祐¹、津嘉山 大輔¹、白樫 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

誘電体を用いた光-マイクロ波ハイブリッド共振器の極低温動作 Dielectric Microwave-Optical Hybrid Resonator Operating at millikelvin Temperatures

沖縄科技大, 濱元樹, Amit Bhunia, Rupak Bhattacharya, 高橋優樹, ○久保結丸
Okinawa Inst. Sci. Tech., Tatsuki Hamamoto, Amit Bhunia, Rupak Bhattacharya,
Hiroki Takahashi, ○Yuimaru Kubo
E-mail: yuimaru.kubo@oist.jp

極低温で動作する量子コンピュータをネットワーク化するために、マイクロ波と光を双方向にかつ単一光子レベルで変換できる量子トランスデューサーが必要の開発を進めている。我々は固体中のスピン集団を用いた量子トランスデューサーの実現に向けて、マイクロ波-光ハイブリッド共振器を設計および試作し、極低温下において安定的に動作することを確認した。図 1 (a) に概要を示す。円筒型のルチル型酸化チタン (TiO_2) 結晶が無酸素銅の筐体内に置かれていて、ループアンテナを通して外部とマイクロ波信号の入出力を実現する。また、共振器の上下は開放されており、ここに光共振器を導入するためのミラーを取り付けることが可能である。ルチルの誘電率は低温で約 110 となり、マイクロ波の電場が結晶内に集中する。これにより伝導体の有限の抵抗損失の影響が極めて小さくなる。したがって、このような構造にもかかわらず、高い内部 Q 値を保つことが可能である [1]。講演では、光共振器を導入した最新の結果についても報告する。

[1] T. Hamamoto et al., Appl. Phys. Lett. 124, 234001 (2024).

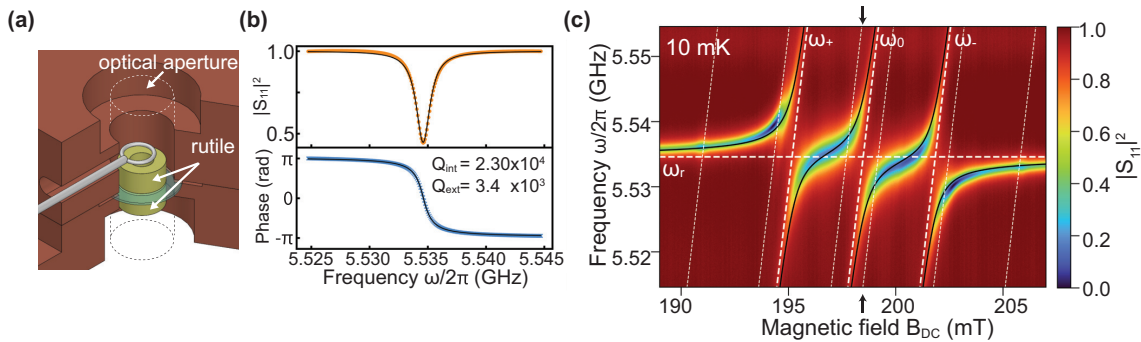


Figure 1: 誘電体ハイブリッド共振器. (a) デザインイメージ. 黄色がルチル結晶, 茶色が無酸素銅, 薄緑がサンプルを設置するサファイア基板を表している. (b) 極低温における共振器の測定結果の一例. 内部 Q 値 $Q_{\text{int}} = 2.3 \times 10^4$ が得られた. (c) ダイヤモンド結晶中の窒素不純物中心スピンとの強結合. 破線 ($\omega_r, \omega_0, \omega_{\pm}$) が本来の固有エネルギーを表しており, 実線は結合系における固有エネルギーである. 点線は最近接に位置する ^{13}C の核スピンとの超微細相互作用によって分裂したスピンの固有エネルギーが示されている.

共振器型超伝導増幅器の低消費電力化に向けた新規構造の提案と検証

Proposal and verification of new structures to reduce the power consumption in resonator-based superconducting parametric amplifiers

東北大院工¹, JST さきがけ², 東北大 RCNS³ ○(M1)森 俊祐¹, 沓間 弘樹^{1,2}, 岸本 康宏³, 山下 太郎¹

Dept. of Appl. Phys. Tohoku Univ.¹, JST PRESTO², RCNS Tohoku Univ.³, °Shunsuke Mori¹,

Hiroki Kutsuma^{1,2}, Yasuhiro Kishimoto³, Taro Yamashita¹

E-mail: mori.shunsuke.t6@dc.tohoku.ac.jp

Kinetic-Inductance Parametric Amplifier (KIPA)は、力学的インダクタンスの非線形性を利用した超伝導増幅器である。アクション探索実験などの分野では、高磁場下で安定して動作する増幅器が求められている。KIPA に大きな臨界磁場を有する窒化物等の超伝導材料を用いることで、数 T 程度の高磁場下でも動作可能である [1]。従来の KIPA [1, 2]は、力学的インダクタンスが大きな Coplanar Waveguide (CPW)で構成される。しかし CPW ではキャパシタンスの調整範囲に限界があるため、インピーダンスを 50Ω に整合することが困難である。そのため反射による損失が大きくなり、信号増幅に要求されるポンプ電力が大きくなる課題がある。

Fig. 1(a)に示すように、KIPA は異なる 2 つのインピーダンスを有する導波路を周期的に配置した Stepped Impedance Filter (SIF)と呼ばれるフィルター回路の間に共振器を配置した構造をもつ。今回我々は、従来のインピーダンス整合の問題を解決するため、スタブ構造を CPW の両端に配置した Fishbone 構造 [3]を採用した (Fig.

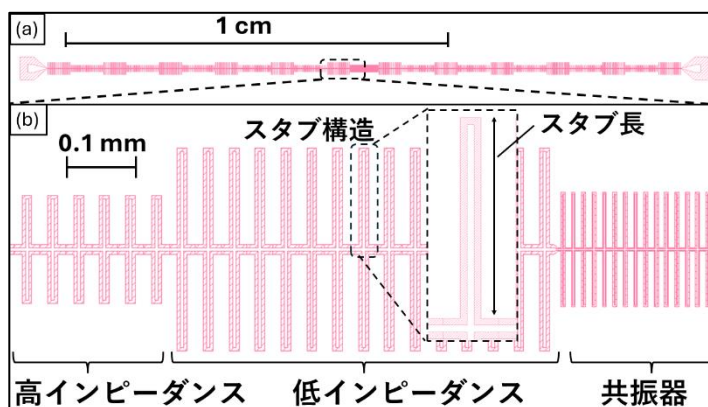


Fig. 1 (a) Designed KIPA. (b) Geometry of fishbone structure.

1(b)). Fishbone 構造は、スタブ長によってキャパシタンスの大きさを調整できるため、反射による損失低減が期待される。本研究では、窒化ニオブ(NbN)超伝導共振器を評価することで設計に必要な回路パラメータを決定し、インピーダンス中心が 50Ω の Fishbone 型 SIF 構造と共振器の構造を電磁界シミュレーションにより設計・最適化した。その結果、ポンプ周波数における反射を抑制できることを実証した。また、本設計に基づき KIPA の試作を行った。

本研究の一部は、科研費・若手研究(JP22K14304)、学術変革領域研究(A)(JP24A205)の支援により行われた。

[1] S. Frasca *et al.*, *Physical Review Applied* **21**, pp. 024011 (2024).

[2] D. J. Parker *et al.*, *Physical Review Applied* **17**, pp. 034064 (2022).

[3] S. Chaudhuri *et al.*, *Applied Physics Letters* **110**, pp. 152601 (2017).

積層基板構造における量子ビット集積系の設計

Integrated superconducting quantum circuit design in stacked substrates

理研 RQC, ○ 田渕 豊, 玉手 修平, 政岡 文平, 萬 伸一

RIKEN RQC, ○Yutaka Tabuchi, Shuhei Tamate, Bunpei Masaoka,
Shinichi Yorozu

E-mail: yutaka.tabuchi@riken.jp

超伝導量子コンピュータの集積化研究が進んでいる [1]。我々は、符号に並進対称性を持つ場合に省線化の可能性があることを示し [2], 並進対称性を維持しながら超伝導量子ビットを集積化する手法を実証した [3]。拡張性のさらなる向上のため、素子基板の積層化と透過型入出力構造を研究している [4]。本研究では、積層基板上

の超伝導量子ビット集積系の設計について報告する。

図 1 に 300 μm のシリコン基板を 3 枚, 基板 1 枚あたり表裏面 2 層の超伝導電極パターン 6 層 (実効 4 層) による回路構造を示す。8.14 GHz にて共振する同心円型トランズモン型超伝導ビットを採用し、最下層基板に設計した。共振周波数 10.04 GHz の内層に設計された読み出し共振器により超伝導量子ビットは読み出される。読み出し共振器は基板垂直方向に設けられた疑似同軸導波路へ入出力を持ち、基板上下方向の電界の重なりを用いて量子ビットと結合する。量子ビットと他の読み出し共振器との不要な結合を小さくするため同軸形状電極を採用し、量子ビットの導波路への輻射崩壊率を考慮して結合強度を 44 MHz に設計した。講演では量子ビット集積系の漏話・不要伝搬輻射モード・フットプリント面積について議論する。

■参考文献 [1] Google Quantum AI, Suppressing quantum errors by scaling a surface code logical qubit, *Nature* **614**, 676–681 (2023). [2] Y. Tabuchi *et al.*, Superconducting quantum computer: a hint for building architectures, 2021 Symposium on VLSI Circuits, 1-2 (2021). [3] S. Tamate *et al.*, Scalable packaging design for large-scale superconducting quantum circuits, APS March Meeting 2021, C30.00009 (15, Mar, 2021) [4] 田渕 豊他, 透過型積層基板構造における広帯域信号伝搬特性, 第 71 回 応用物理学会 春季学術講演会 (2024)

■謝辞 この研究は JST ムーンショット型研究開発制度 (JPMJMS2067) の支援を受けて行われた。

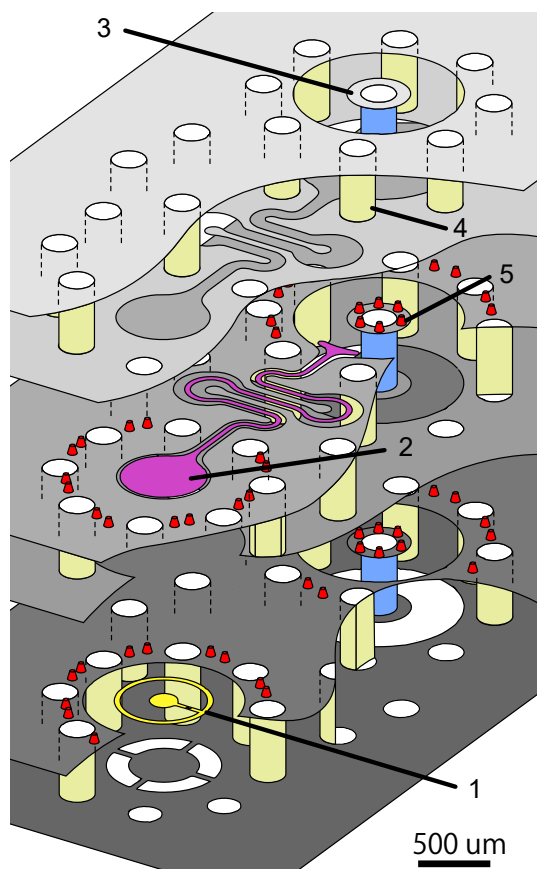


図 1 透過型積層構造における超伝導量子ビット集積系。図中の番号を用いて (1) 同心円形状超伝導量子ビット, (2) 読み出し共振器, (3) 透過型疑似同軸構造, (4) 基板貫通電極, (5) インジウム突起電極を示す。

量子ビットの3次元集積化に向けた超伝導サファイア貫通電極の開発

Development of superconducting through-sapphire vias for 3D-integration of qubits

京セラ¹ ○向笠 清隆¹, 藤江 和之¹, 塗木 佑介¹, 久保 隼人¹, 檜原 賢英¹, 梅原 幹裕¹Kyocera¹, [○]Kiyotaka Mukasa¹, Kazuyuki Fujie¹, Yuusuke Nuruki¹,Hayato Kubo¹, Yoshihide Narahara¹, Motohiro Umehara¹

E-mail: kiyotaka.mukasa.hs@kyocera.jp

超伝導量子ビットを用いた量子コンピュータの計算能力を向上させるため、量子ビットの高集積化及びコヒーレンス時間の向上が求められている。高集積化という観点では、現在超伝導量子ビットの基板として主に用いられているシリコン基板に貫通電極を作製し、基板垂直方向に超伝導体で配線を行うシリコン貫通電極が提案されている^[1]。また、コヒーレンス時間の向上という観点では、シリコン基板の代わりに単結晶サファイア基板を用いることにより、量子ビットのコヒーレンス時間が向上することが報告されている^[2]。これは、単結晶サファイア基板と超伝導体界面における誘電損失がシリコン基板と比較して低減するためであると考えられている。

このような背景の下我々は、単結晶サファイア基板に対して貫通ビアを作製し、超伝導体の成膜を行うことで、高集積化とコヒーレンス時間の向上の両方に寄与することを目指す。超伝導体としては、近年単結晶サファイア基板上に成膜して量子ビットを作製することにより約 300 μ s というコヒーレンス時間が報告されている^[2] TiN を用いた。また成膜方法としては、段差被覆性に優れた化学気相成長法を用いた。

Fig.1 に TiN の成膜を行った後のビアの断面 SEM 像を示す。ビア内部まで断線することなく成膜できていることが確かめられた。また、Fig.2 に成膜した TiN の電気抵抗率の温度依存性を示す。基板表面の TiN については約 5 K、ビア内部の TiN については約 4.5 K で超伝導転移を示すことがわかった。この超伝導転移温度は、先行研究におけるシリコン貫通電極の TiN の転移温度よりも約 3 K 高く^[1]、我々の成膜により純良な TiN が得られていると考えられる。

[1] D. R. W. Yost *et al.*, npj Quantum Information **6**, 59 (2020).

[2] H. Deng *et al.*, Physical Review Applied **19**, 024013 (2023).

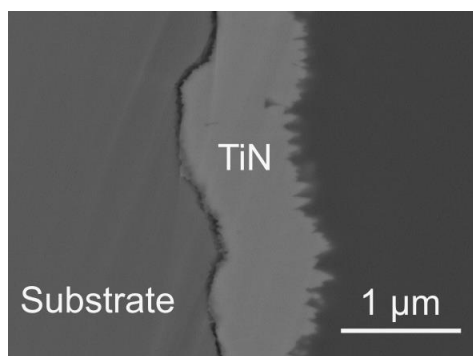


Fig. 1. Cross-sectional view of a through-substrate via with TiN film.

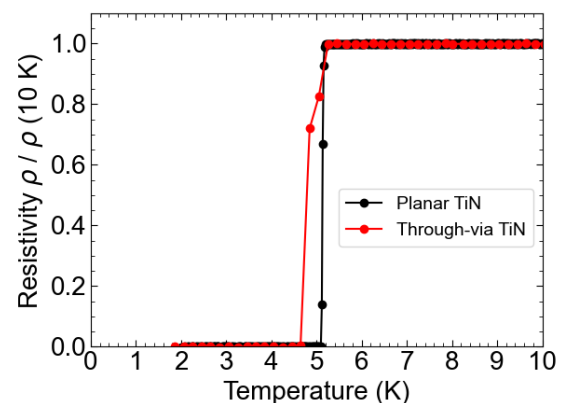


Fig. 2. Superconducting transitions of planar and through-via TiN films.

超伝導 transmon 型量子ビットの集積化における周波数衝突解析

Frequency collision analysis for scalable quantum computation

based on superconducting transmon qubits

東大工¹, 理研 RQC², 東大先進³, InaRIS⁴, ○(M2)井ノ上 慎一¹, (P)白井 昌太郎²³,

(D)渡辺 柊¹, 松浦 康平¹, (P)Li Rui², 玉手 修平², 野口 篤史²³⁴, 中村 泰信¹²

UTokyo.¹, RIKEN RQC.², InaRIS³, °Shinichi Inoue¹, Shotaro Shirai²³, Shu Watanabe¹,

Kohei Matsuura¹, Rui Li², Shuhei Tamate², Atsushi Noguchi^{1,2,3}, and Yasunobu Nakamura^{1,2}

E-mail: inoue@qipe.t.u-tokyo.ac.jp

実用的な量子計算の実現に向け、量子ビット集積化の研究が盛んに行われている。超伝導量子ビットの実装方式の一つである周波数固定型 transmon 型量子ビットはシンプルな構造と高い磁場ノイズ耐性から、集積化可能な量子ビットとして広く研究されてきた。しかし、量子ビット数の増加に伴い、制御下において近接する量子ビット間に望ましくない遷移を生じさせる「周波数衝突」の問題が表面化し、集積化に向けた大きな課題となっている[1]。従来まで用いられてきた交差共鳴ゲート方式は straddling regime[2]と呼ばれる周波数関係を満たす必要があり、量子ビット周波数の製造時ばらつきに対する許容範囲が小さく、周波数衝突の問題が顕著であった。

近年、周波数衝突に高い耐性を持つ方式としてカプラー駆動によるゲート方式[3]が提案された。本方式は高強度の駆動マイクロ波を必要とする代わりに straddling regime の制約を回避することを可能にし、集積化に適していると期待される。これまでの研究で、本方式は2～3の量子ビット系では周波数衝突を回避できる一方、より大きな系 (Fig. 1) では、複数量子ビット間で強ドライブに起因する高次の周波数衝突が発生し得ることが確認された。本講演では、強ドライブ条件下で起こり得る周波数衝突過程について数値的・解析的なアプローチで定量的な評価を試み、周波数衝突を回避するための量子ビットのパラメータ条件を示す。また量子ビットの周波数配置を数値最適化し、周波数衝突が生じない量子ビット集積回路チップが得られる歩留まりを算出する。

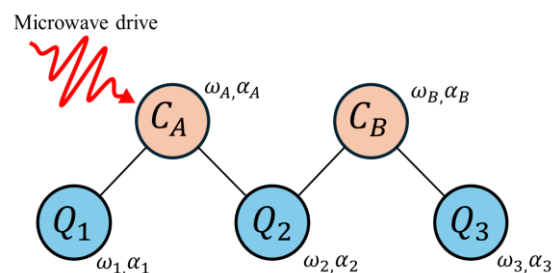


Fig 1. Schematic of a qubit lattice for frequency collision analysis for the coupler-driven gate [3].

Q1, Q2 and Q3 denote data transmons. C_A and C_B denote coupler transmons.

[1] J. B. Hertzberg *et. al.*, *npj Quantum Information* **7**, 129 (2021).

[2] J. M. Chow *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 080502 (2011).

[3] S. Shirai *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 260601 (2023).

量子ビット応用に向けた sidewall spacer 構造を有する NbN/AlN/NbN ジョセフソン接合 NbN/AlN/NbN Josephson Junctions with Sidewall Spacer Structure for Superconducting Qubits

東北大院工¹, JST さきがけ², 情通機構³ ○(M1)本田 浩輝¹, (M2)栗原 大輝¹,
Duong Pham¹, 沓間 弘樹^{1,2}, 寺井 弘高³, 山下 太郎¹
Tohoku Univ.¹, JST PRESTO², NICT³, °Koki Honda¹, Daiki Kurihara¹,
Duong Pham¹, Hiroki Kutsuma^{1,2}, Hirotaka Terai³, Taro Yamashita¹
E-mail: koki.honda.s6@dc.tohoku.ac.jp

現在主流の超伝導量子ビットはアルミニウム(Al)ベースのジョセフソン接合によって構成されているが、絶縁層の非晶質酸化アルミニウムには多くの欠陥二準位系が含まれており、デコヒーレンス源となることが知られている。最近では、Al 以外の接合材料を用いた量子ビットにおけるコヒーレンス特性の向上が報告されている [1, 2]。その中で、エピタキシャル成長させた窒化ニオブ(NbN)ジョセフソン接合は、絶縁層に結晶化した窒化アルミニウム(AlN)を用いるため欠陥二準位系の低減が期待されている [1]。一方で、層間絶縁膜 SiO_2 の平坦化を含む複雑な素子作製プロセスにより、本来のコヒーレンス特性が抑制されている可能性が指摘されている。

そこで我々は、最近コヒーレンス特性の改善が報告された Nb 量子ビットに用いられた sidewall spacer 構造 [2, 3]に着目し、同構造を有する NbN/AlN/NbN ジョセフソン接合の作製を試みた。Sidewall spacer 構造では、 SiO_2 が接合側壁近傍のみに存在するため、基板全面に SiO_2 が存在する従来構造に比べその体積が圧倒的に少ない。そのため、接合完成後に行うフッ酸による SiO_2 の除去が容易となり、デコヒーレンス源となる SiO_2 残渣の低減が期待される。

Fig. 1 に sidewall spacer 構造を用いた接合作製プロセスを示す。(a) MgO(100)基板に NbN/AlN/NbN 膜を成膜し、(b) 反応性イオンエッチング(RIE)によりパターンニングを行う。次に、(c) 化学気相成長法により SiO_2 を成膜後、(d) 試料全面を異方的にエッチングすることで sidewall spacer 構造を形成させる。その後、(e) ワイヤリング NbN を成膜し、(f) パターンニングにより接合が完成する。本研究では AlN 膜厚 0.8 – 2.0 nm の接合を作製し、2.2 K における電流-電圧特性を評価した。その結果 Fig. 2 に示すように、膜厚 1.2 nm の接合において、量子ビットに適用可能な 21 A/cm²の低臨界電流密度を得ることに成功した。

発表では、臨界電流密度の AlN 膜厚依存性や、フッ酸を用いた SiO_2 エッチング(Fig. 1 中、工程(g))による接合特性への影響についても議論する。

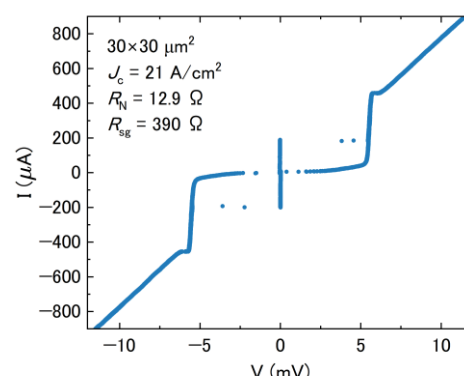
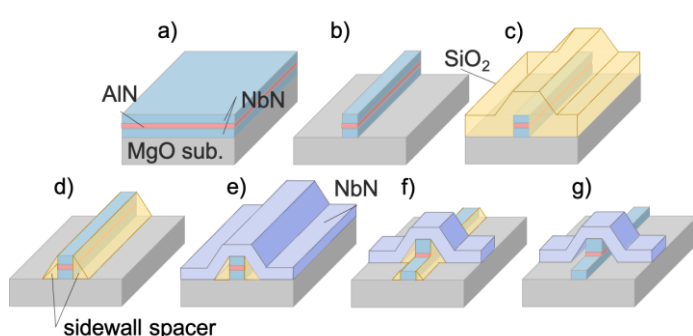


Fig. 1 Fabrication process of NbN-based Josephson junctions with the sidewall spacer structure. Fig. 2 Current-voltage characteristics of the junctions at 2.2 K.

謝辞 本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2067) , ならびに文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業 (課題番号: JPMXP1224TU0095)の支援を受けた。

[1] S. Kim *et al.*, Commun. Mater. **2**, 98 (2021). [2] A. Anferov *et al.*, Phys. Rev. Appl. **21**, 024047 (2024). [3] L. Grönberg *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **30**, 125016 (2017).

TiN/MgO/TiN 接合の 10 mK における特性評価

Electrical properties of TiN/MgO/TiN junctions at 10 mK

情通機構¹ ○寺井 弘高¹、高木 佳寿代¹、瀬戸浦 真衣¹、美馬 寛¹、三木 茂人¹NICT¹ ○H. Terai¹, K. Takaki¹, M. Setoura¹, S. Mima¹, S. Miki¹

E-mail: terai@nict.go.jp

はじめに 超伝導量子ビットのエネルギー緩和時間 T_1 は、電極由来の誘電損失を低減するための材料プロセス等の進展により、現在 500 μ s 程度にまで向上しており[1]、集積化も 100 量子ビット規模に到達している。しかし、 T_1 の時間揺らぎの低減、回路パラメータの緻密な制御等、意味のある量子計算の実現に向けて、作製プロセス面での解決すべき課題は多い。電極材料についての検討が精力的に行われている一方、超伝導量子ビットのもうひとつの重要な構成要素であるジョセフソン接合については、Al/ AlO_x /Al 接合以外に選択肢がないという状況で、我々は Al/ AlO_x /Al 接合に替わる新たなジョセフソン接合として NbN/AlN/NbN エピタキシャル接合をベースとした超伝導量子ビットの開発に取り組んでいる。トンネル障壁に結晶化した AlN を用いることで非晶質の AlO_x に起因したデコヒーレンスの抑制が期待される。これまでに、TiN をバッファ層とした Si 基板上への高品質 NbN/AlN/NbN エピタキシャル接合の作製技術を開発し[2]、超伝導量子ビットにおいて 20 μ s を超えるコヒーレンス時間の観測に成功している[3]。しかしながら、NbN が立方晶であるのに対して、AlN は六方晶が安定で、AlN の膜厚増大にともない、上部 NbN 電極に結晶性の劣化が観測されている[4]。我々は AlN に替わるトンネル障壁として立方晶が安定で窒化物超伝導体との格子整合性に優れた MgO に注目している[5]。表 1 に窒化物ジョセフソン接合の候補となる材料系について結晶構造、格子定数等をまとめた。今回、MgO と最も格子定数の近い TiN を電極とした、TiN/MgO/TiN 接合を作製し、希釈冷凍機を用いて 10 mK における特性評価を行った。

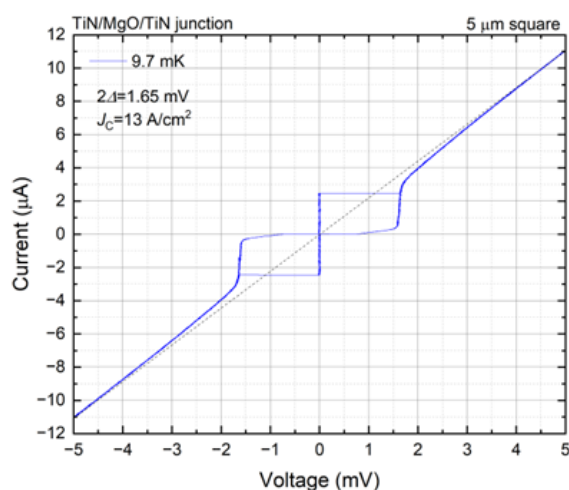
実験結果 図 1 に TiN/MgO/TiN 接合の電流-電圧特性を示す。観測されたエネルギーギャップ 2Δ は 1.65 meV で、TiN の超伝導転移温度 T_c を 5.4 K とすると $2\Delta/k_B T_c$ は 3.54 と、BCS 理論の予測値と近い値が得られた。接合の抵抗-温度特性を調べたところ、AlN トンネル障壁の場合、接合抵抗は室温に比べて 20 K で 350%程度増加し強い温度依存性が観測されるが、MgO では 20 K における抵抗は室温に比べて 10%程度の増加で強い温度依存性は見られなかった。詳細は当日報告する。

謝辞 本研究の一部は、MEXT Q-LEAP (JPMXS0118068682)、JST【ムーンショット型研究開発事業】グラント番号【JPMJMS2067】の支援により行われた。

[1] C. Wang *et al.*, *npj Quantum Information* **8**, 3, 2022, [2] W. Qiu *et al.*, *Appl. Phys. Exp.* **13**, 126501, 2020, [3] S. Kim *et al.*, *Commun. Mater.* **2**, 98, 2021, [4] Z. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 142604, 2013, [5] 寺井ら, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 21p-C301-5.

Table 1 Material parameters for Josephson junctions with nitride superconductors

Material	Crystal structure	Lattice constant	T_c
NbN	Cubic	4.444 Å	~ 16 K
TiN	Cubic	4.217 Å	~ 5.6 K
AlN	Hexagonal	-----	Insulator
MgO	Cubic	4.212 Å	Insulator

Fig. 1 I - V Characteristics of TiN/MgO/TiN junctions with a critical current density of 13 A/cm².

Construction of Adaptive Quantum Circuit for Enhanced VQAs

¹Tokyo University of Agriculture & Technology, ²The University of Tokyo

^oS. Li¹, D. Tsukayama¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s235597v@st.go.tuat.ac.jp

EHA in Sequential-ADAPT-VQE (Entanglement-variational Hardware-efficient Ansatz in Sequential-ADAPT-VQE) [1] significantly enhances variational quantum algorithms (VQAs) for optimizing Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) devices. By dynamically selecting single-qubit gates and reducing reliance on CNOT gates [2], this method constructs more efficient quantum circuits, reducing quantum resource demands and improving computational accuracy. EHA [3] notably improves Sequential-ADAPT-VQE, showing strong robustness across different initial states.

Figure 1 illustrates EHA in Sequential-ADAPT-VQE, a key advancement in VQE algorithms. This method optimizes variational parameters by dynamically selecting single-qubit gates from an operator pool. The initial state is chosen based on a problem guess; the closer it is to the target function, the more streamlined the resulting circuit. Although in terms of accuracy and efficiency, this approach faces challenges like high quantum resource consumption and CNOT gate reliance, EHA (a strategy in quantum computing for efficiently generating and optimizing quantum states by leveraging hardware characteristics and variational methods) addresses these issues by constructing efficient circuits and reducing CNOT gate dependence, thereby lowering resource requirements and improving accuracy.

We validated this method through computational experiments for calculating the ground state energy of an 8-qubit one-dimensional transverse-field Ising model using the Hamiltonian in [4]. We optimized variational parameters using the BFGS method. For a precision level of 10^{-3} , traditional Sequential-ADAPT-VQE requires significantly more iterations and resources. In contrast, the EHA entanglement strategy showed substantial improvements, especially with the $|+\rangle$ state as the initial state. The EHA method averaged 14 iterations (each with 34 parameters and 42 CNOT gates), compared to traditional methods requiring up to 127 iterations (each with 127 parameters and 105 CNOT gates). This demonstrates higher computational efficiency and robustness. These results highlight the EHA method's advantages in iteration efficiency and stability, proving its improvements in the variational quantum eigensolver framework.

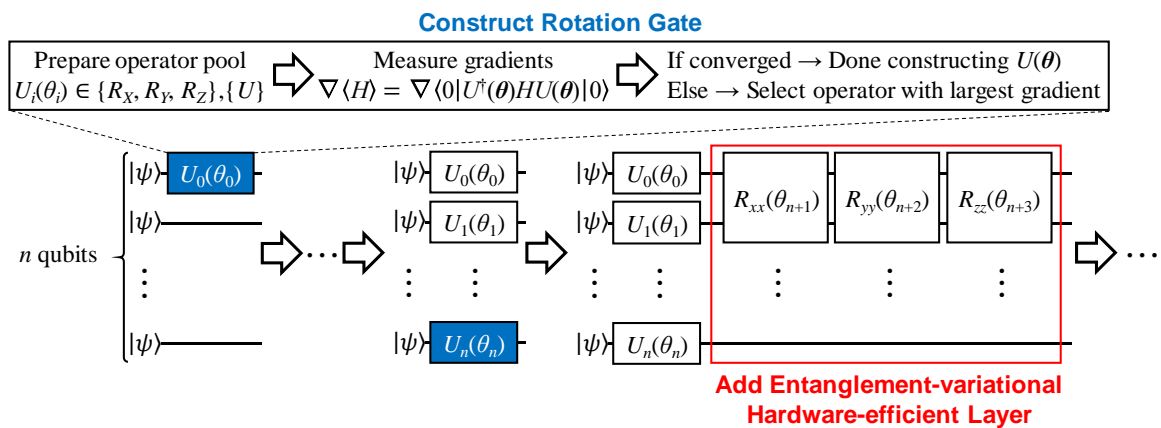


Fig. 1 Schematic depiction of EHA in Sequential-ADAPT-VQE algorithm.

References

- [1] S. Li, D. Tsukayama, J. Wang, J. Shirakashi, and H. Imai: 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 23p-A302-5 (2023).
- [2] X. Wang, B. Qi, Y. Wang, D. Dong, arXiv:2311.01120.
- [3] S. Li, D. Tsukayama, J. Shirakashi, and H. Imai: 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 23p-22B-5 (2024).
- [4] S. Tamiya and H. Yamasaki, Npj Quantum Inf. 8 (2022) 90.

Higher Order Binary Optimization: Advanced Encoding for Larger Scale Traveling Salesperson Problems through Variational Quantum Eigensolver

¹Tokyo University of Agriculture & Technology, ²The University of Tokyo

◦J. Wang¹, D. Tsukayama¹, T. Kanezashi¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya² and H. Imai²

E-mail: s239547u@st.go.tuat.ac.jp

Quadratic unconstrained binary optimization (QUBO) is a well-known formulation that can represent a wide range of combinatorial optimization problems. For solving traveling salesperson problem (TSP) over N cities, QUBO requires N^2 qubits [1]. In recent years, higher-order binary optimization (HOBO) was used with quantum approximate optimization algorithm (QAOA) [2] for solving TSP [3]. HOBO reduces the number of qubits from $O(N^2)$ to $O(N \log N)$, however, the number of gates needed is $O(N^3)$ [3]. We previously proposed that variational quantum eigensolver (VQE) [4], which has a lower circuit cost compared to QAOA, can solve combinatorial optimization problems with higher accuracy [5]. Unlike our previous presentation [6], this time we have improved the penalty function related to HOBO and conducted experiments on larger-scale problems, comparing the experimental results between QUBO and HOBO encodings.

Figure 1(a) show the encoding of QUBO and HOBO for the TSP over 4 cities, we assumed a route that cycles through four cities as $C_0 \rightarrow C_1 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow C_0$. In QUBO, each city is represented by a one-hot vector with 4 qubits. On the other hand, in HOBO, spin states for each order encode the city in a binary numbering system, this allows for a reduction in the number of qubits from 16 to 8. As shown in Fig. 1(b), we refined the penalty function; for instance, although a 2-bit binary number can represent four cities, when calculating for three cities, the fourth city “City 3” becomes invalid and is therefore penalized.

In this experiment, we used “aer_simulator_matrix_product_state” implemented in Qiskit [7] for using VQE. To optimize variational parameters in quantum circuits, we selected the NFT method [8]. For solving TSP, we prepared 10 instances of fully connected graph with random edge weight $w_{ij} \in [1, 9]$ (integers), w_{ij} denotes the weight of the edge connecting the i th and j th nodes. For the TSP, even at a scale of up to 10 cities, HOBO maintains an accuracy of 0.64, which is three times that of QUBO, which has an accuracy of 0.21. Moreover, HOBO reduced qubits from 100 in QUBO to 40. Therefore, it is suggested that HOBO can reduce the number of qubits used in solving TSP while maintaining computational accuracy in VQE.

(a) Encoding Four Cities with QUBO and HOBO (b) Encoding Three Cities with HOBO

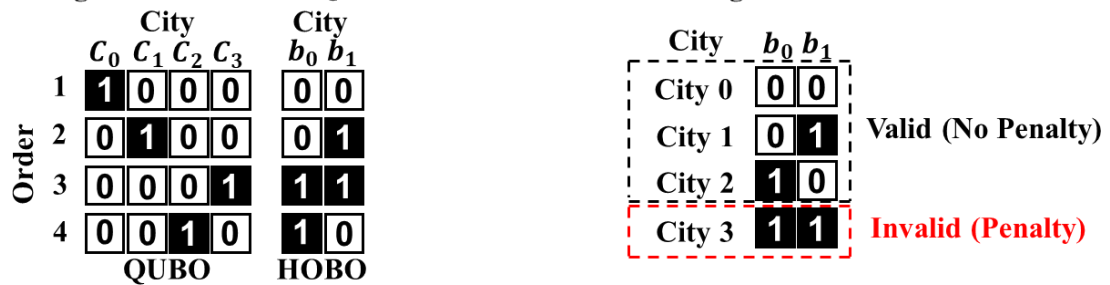


Fig. 1 (a) Example TSP solution for 4 cities with QUBO and HOBO encodings. HOBO uses binary b_0b_1 to represent each city. (b) An improved penalty function to constrain invalid cities across three locations.

References

- [1] A. Lucas, Front. Phys. 2 (2014) 5.
- [2] E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann, arXiv:1411.4028.
- [3] A. Glos, A. Krawiec, and Z. Zimborás, Npj Quantum Inf. 8 (2022) 39.
- [4] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.-H. Yung, X.-Q. Zhou, P. J. Love, A. Aspuru-Guzik, and J. L. O’Brien, Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [5] T. Miki, R. Okita, M. Shimada, D. Tsukayama, and J. Shirakashi, AIP Adv. 12 (2022) 035247.
- [6] J. Wang, D. Tsukayama, S. Li, J. Shirakashi, and H. Imai: The 84th JSAP Autumn Meeting 23p-A302-4 (2023).
- [7] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111> (2019).
- [8] K. M. Nakanishi, K. Fujii, and S. Todo, Phys. Rev. Res. 2 (2020) 043158.

Parallel-VQE における量子ビットスケールと並列度の検討

Investigation of Relationship between Qubit Scaling and Parallelism for Parallel-VQE

東京農工大学¹、東京大学²

○津嘉山大輔¹、李山川¹、汪俊誠¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

¹Tokyo University of Agriculture & Technology, ²The University of Tokyo

○D. Tsukayama¹, S. Li¹, J. Wang¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s241403q@st.go.tuat.ac.jp

ゲート型量子計算機(QPU)は Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイスとして広く認識されている[1]。誤り訂正機能を持たない NISQ だが、QPU での量子計算と古典計算機上でのパラメータ最適化を組み合わせた量子・古典ハイブリッドアルゴリズムが注目されている。そのうち、変分量子固有値法(VQE)はハミルトニアン基底エネルギーを求める手法である。前回の報告では、複数の量子回路を並列に実行してパラメータの並列最適化を行う Parallel-VQE を提案し、20 量子ビット規模の Max-Cut 問題にて演算精度の向上を確認した[3]。今回は、より大規模な問題に Parallel-VQE を適用し、量子ビットスケールと並列度に対する演算性能について検討した。

図 1 (a)に Parallel-VQE のシムテムを示す。量子計算機では、異なるパラメータ組 $\theta_1, \dots, \theta_N$ が適用された N Unit の q 量子ビット量子回路 $U(\theta_1), \dots, U(\theta_N)$ を用意し、同一 QPU 上で並列に実行する。これにより、1 回のみの QPU 実行で、各パラメータ組に対応するハミルトニアン H の期待値 $\langle H(\theta_1) \rangle, \dots, \langle H(\theta_N) \rangle$ が推定可能となる。古典計算機では、Unit に対応する期待値に基づいて各パラメータ組を更新する。以上の過程を繰り返し、期待値の最小値が得られるパラメータを探索する。Parallel-VQE では、図 1 (b)のように、同一のエネルギーランドスケープ上にて N 個のパラメータ組を並列に最適化する。このため、初期パラメータによる演算精度の悪化を防止する。本手法を Qiskit[4]から利用可能な “aer_simulator_matrix_product_state” 上に実装し、最大量子ビット数を 120 量子ビットとして、60 ノード完全グラフの Max-Cut 問題を求解した。NFT 法[5]を Optimizer として、 $q = 60$ 、 $N = 2$ の Parallel-VQE (120 量子ビット)で求解した結果、20 instances の平均残留エネルギーは 3.9×10^{-2} となった。これは、従来の VQE (60 量子ビット)で得られた平均残留エネルギー (5.8×10^{-2})に対して 1.5 倍の改善を示している。以上より、より大規模な量子ビット数を要する問題においても、Parallel-VQE により演算精度が改善可能であることが示唆された。

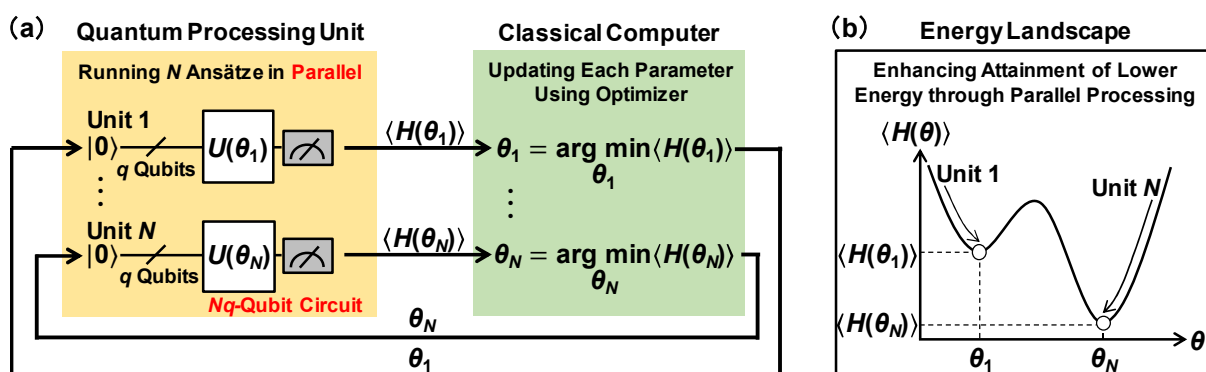


Fig. 1 (a) Schematic diagram of Parallel-VQE. N units of q -qubit circuits with different parameters are run on a quantum processing unit. Parameters are updated on classical computer in parallel. (b) Example illustrates energy landscape of Parallel-VQE. In this method, multiple parameters are optimized to explore lower energy expectation values.

References

- [1] J. Preskill, Quantum 2 (2018) 79.
- [2] A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [3] 津嘉山、李、汪、白樫、今井: 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 23p-22B-4 (2024).
- [4] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. (2019).
- [5] K. M. Nakanishi, K. Fujii, and S. Todo, Phys. Rev. Res. 2 (2020) 043158.

Conditional Value at Risk を用いた変分量子固有値法による Au 原子接合作製における実験パラメータ最適化 Optimizing Experimental Parameters for Fabrication of Au Atomic Junctions Using Variational Quantum Eigensolver with Conditional Value at Risk

東京農工大学¹、東京大学²

○金刺拓海¹、津嘉山大輔¹、汪俊誠¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

¹Tokyo University of Agriculture & Technology, ²The University of Tokyo

○T. Kanazashi¹, D. Tsukayama¹, J. Wang¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s249961t@st.go.tuat.ac.jp

現在、ゲート型量子計算機は Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイス[1]と呼ばれており、誤り訂正機能を持たない。この NISQ を活用すべく、NISQ による量子状態の生成・測定、古典計算機による期待値計算及び変分パラメータ最適化を組み合わせた量子・古典ハイブリッドアルゴリズムが研究されている。その一種に変分量子固有値法 (Variational Quantum Eigensolver: VQE) [2]がある。一方これまで我々は、原子接合の作製手法であるフィードバック制御型エレクトロマイグレーション (Feedback-Controlled Electromigration: FCE) 法での実験パラメータ探索を組合せ最適化問題として定式化し、イジングマシン[3]および量子アニーラ[4]、VQE[5]を用いて印加電圧のフィードバック量 V_{FB} (%) のスケジュール最適化を行ってきた。図 1 (a) に V_{FB} スケジュールを示す。 V_{FB} スケジュールは各順序においてバイナリー変数 {0, 1} のうち 1 となる V_{FB} を選択する。例えば、図 1 (a) では、 V_{FB} が 50%→90%→30%→…→90%を繰り返すスケジュールを意味している。前回の報告では、 V_{FB} を 9 段階に設定し、 V_{FB} の適用スケジュール周期を $N \in [2, 9]$ で変化させた。 $N=9$ のとき、VQE から得られた解の Approximation Ratio (AR) は 0.75 を得た[5]。今回は、AR の向上を目的とし、Conditional Value at Risk (CVaR) を使用した VQE (CVaR-VQE) [6]を導入した。

図 1 (b) に CVaR-VQE の最適化過程を示す。量子計算機では、期待値を推定するためにパラメータ付き量子回路を K 回実行する。古典計算機では、観測された K 個の状態 $\{X_1, \dots, X_K\}$ に対応するエネルギーを計算する。それらのエネルギーを昇順に並び替え、並び替えたエネルギー $\{E_1, \dots, E_K\}$ を得る。信頼水準 $\alpha \in [0, 1]$ として、 $[\alpha K]$ 個までの低いエネルギー $\{E_1, \dots, E_{[\alpha K]}\}$ のみを使用して期待値を計算し、変分パラメータの最適化を行う。本実験では、Qiskit[7]から利用可能な “aer_simulator_matrix_product_state” 上に CVaR-VQE を実装した。 $N=4$ (36 量子ビット)、 $K=8192$ 、 $\alpha \in \{0.1, 1\}$ の条件で求解を行った。その結果、従来手法の VQE を意味する $\alpha = 1$ のときの AR は 0.73、 $\alpha = 0.1$ のときの AR は 0.86 となり従来手法の VQE を上回った。以上より、CVaR-VQE を用いることで、FCE 法における実験パラメータ最適化における演算精度の向上が示唆された。

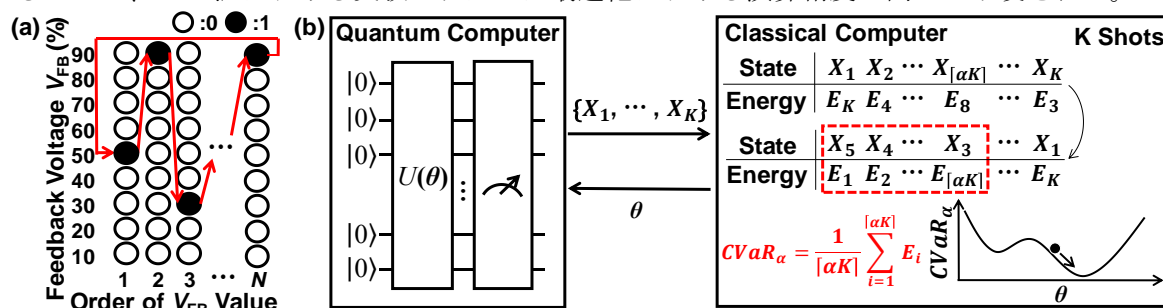


Fig. 1 (a) Graphical examples of the V_{FB} scheduling. (b) Optimization process using CVaR-VQE.

References

- [1] J. Preskill, Quantum 2 (2018) 79.
- [2] A. Peruzzo, et al., A. Aspuru-Guzik, and J. L. O'Brien, Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [3] S. Sakai, Y. Hirata, M. Ito and J. Shirakashi, Sci. Rep. 9 (2019) 16211.
- [4] Y. Yoneda, M. Shimada, A. Yoshida, and J. Shirakashi, Appl. Phys. Express 16 (2023) 057001.
- [5] 金刺、津嘉山、白樫、今井: 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 23p-22B-6 (2024).
- [6] P. K. Barkoutsos, G. Nannicini, A. Robert, I. Tavernelli, and S. Woerner, Quantum 4 (2020) 256.
- [7] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111> (2019).

SGD-QAOA による量子フィードバックアルゴリズムの効率化

Feedback-based Quantum Optimization Using SGD-QAOA

東京農工大学¹、東京大学²

○草孝祐¹、津嘉山大輔¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

¹Tokyo University of Agriculture & Technology, ²The University of Tokyo

○K. Kusa¹, D. Tsukayama¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s241104u@st.go.tuat.ac.jp

現在のゲート型量子計算機は誤り訂正機能を持たない Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイスが主流であり、さらにエラー訂正機能を持つ量子計算機 Fault-Tolerant Quantum Computer (FTQC) デバイスの開発が鋭意進められている。それに伴い、FTQC デバイス上で効率的に動作する量子アルゴリズムの研究が盛んに行われている。Feedback-based Algorithm for Quantum Optimization (FALQON) [1] は FTQC に向けた量子アルゴリズムの一つであり、量子断熱計算と Quantum Lyapunov Control に基づいて組合せ最適化問題の求解を行う手法である。FALQON は、初期状態として重ね合わせ状態を生成した後、量子断熱計算に対応する量子回路を測定結果に応じて逐次的に追加することで目的の量子状態を得る。パラメータの学習が不要である一方で、より上質な量子状態を得るために莫大な量子回路層数が必要となる。これまで我々は、量子・古典ハイブリッドアルゴリズムの一つである Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) [2] において、解空間の類似する特徴を確率的勾配降下法 (Stochastic Gradient Descent : SGD) を用いて学習し、量子回路の実行回数を低減してきた [3]。今回は、SGD を用いた QAOA 回路を FALQON の初期状態として使用し、上質な量子状態を得る際に必要な量子回路層数を低減することを検討した。

図 1 に実装したアルゴリズムを示す。はじめに、学習データからランダムに抽出したグラフについて、問題のハミルトニアン H_C について期待値の勾配を求め、期待値が減少する方向に QAOA 回路のパラメータを更新する。この処理を全学習データについて行い、QAOA 回路のパラメータを学習する。学習済み QAOA 回路から出力される量子状態を初期状態として FALQON を実行し、測定結果 β に応じて量子回路 U_p, U_d を逐次的に追加する。ここで、 U_p は H_C の時間発展演算子、 U_d は量子ゆらぎに対応する時間発展演算子である。本実験では、Qiskit から利用可能な “aer_simulator” 上に SGD-QAOA を用いた FALQON を実装した。今回は、6 ノードの Max-Cut 問題を H_C としてマッピングした。評価指標として、厳密解が得られた割合 (Success Probability) を用いた。50 層の FALQON 回路による結果、SGD を用いた QAOA を採用した場合と採用しない場合の Success Probability はそれぞれ 0.46、0.37 となった。以上の結果より、SGD を用いた QAOA 回路を採用することで限られた量子回路層数においても解の質が向上することが示唆された。

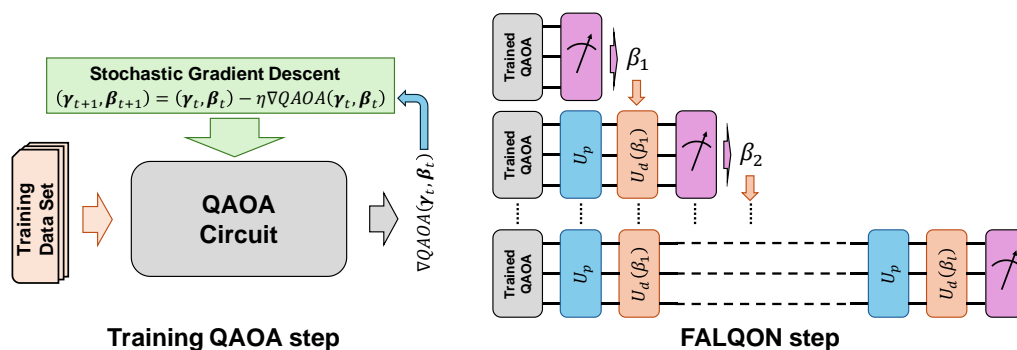


Fig. 1 Implementation of FALQON with trained QAOA. Parameters of QAOA are trained using SGD. As initial state for FALQON, the quantum state generated from a trained QAOA circuit is used.

References

- [1] A. B. Magann, K. M. Rudinger, M. D. Grace, and M. Sarovar, Phys. Rev. Lett. 129 (2022) 250502.
- [2] E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann, arXiv: 1411.4028v1.
- [3] 草、津嘉山、白樫、今井: 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 23p-22B-7 (2024).

KS 研究会セッション | 一般セッション(口頭講演): KS.2 量子情報工学研究会

[18a-A32-1~10] KS.2 量子情報工学研究会

[18a-A32-1]

[分科内招待講演] 電子量子光学に基づく新しい量子計算

○山本 倫久^{1,2} (1.理研CEMS、2.東大工)

[18a-A32-2]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] バイポーラ型シリコン量子ドットの高周波反射測定

○太田 俊輔¹、近藤 知宏¹、土屋 龍太²、峰 利之²、久本 大²、水野 弘之²、溝口 来成¹、米田 淳¹、小寺 哲夫¹ (1.東工大、2.日立研開)

[18a-A32-3]

並列量子ドットチャネルの電流同時測定に基づく電荷ノイズの相関評価

○松田 達也¹、松岡 竜太郎¹、高橋 一斗¹、土屋 龍太²、峰 利之²、久本 大²、水野 弘之²、溝口 来成¹、小寺 哲夫¹、米田 淳¹ (1.東工大、2.日立研開)

[18a-A32-4]

二重量子ドットを流れる電流を用いた隣接シリコン量子ビット間の電荷ノイズ相関測定

○松岡 竜太郎¹、松田 達也¹、高橋 一斗¹、土屋 龍太²、峰 利之²、久本 大²、水野 弘之²、溝口 来成¹、小寺 哲夫¹、米田 淳¹ (1.東工大、2.日立研開)

[18a-A32-5]

発光吸収型ダイヤモンド量子中継器の実現に向けた中継動作の実証

○(D)レイエス ラウスティン¹、関口 雄平^{2,3}、伊藤 大輔¹、藤原 太朔¹、渡辺 幹成¹、加藤 宙光^{2,4}、牧野 俊晴^{2,4}、味村 裕^{2,5}、小坂 英男^{1,2,3} (1.横国大院理工、2.横国大QIC、3.横国大IAS、4.産総研、5.古河電工)

[18a-A32-6]

量子インターフェースの実現に向けたダイヤモンドオプトメカニカル結晶の評価

○(DC)山本 萌生¹、佐藤 清貴¹、黒川 穂高^{2,3}、石田 悟己⁴、松清 秀次⁴、飯嶋 航大⁴、池 尚玟⁴、大槻 秀夫⁴、西岡 政雄⁴、関口 雄平^{2,3}、小野田 忍^{2,5}、岩本 敏^{2,4}、小坂 英男^{1,2,3} (1.横国大院理工、2.横国大QIC、3.横国大IAS、4.東大生産研、5.量研)

[18a-A32-7]

ファイバー接続型ダイヤモンドブルズアイ共振器の設計

○JI SANGMIN¹、岩本 敏^{1,2} (1.東大生産研、2.東大先端研)

[18a-A32-8]

SiN エッチングマスクを用いたエアブリッジ型ダイヤモンドフォトリソニック結晶共振器の作製及び光学評価

○JI SANGMIN¹、石田 悟己²、松清 秀次¹、西岡 政雄¹、飯嶋 航大²、岩本 敏^{1,2} (1.東大生産研、2.東大先端研)

[18a-A32-9]

ダイヤモンド量子系の任意磁場下での核スピン偏極

○木村 詠吉¹、Lee Junghyun²、荒井 慧悟¹ (1.東工大工、2.韓国科学技術研究院)

[18a-A32-10]

損失のある通信路における量子ネットワークセンシング

○上田 悦大¹、石原 誠¹、ロガ ヴォイチェフ¹、武岡 正裕¹ (1.慶大理工)

電子量子光学に基づく新しい量子計算

Quantum Computation Based on the Electron Quantum Optics

理研 CEMS¹, 東大工² ○山本 倫久^{1,2}

RIKEN CEMS¹, The University of Tokyo, °Michihisa Yamamoto^{1,2}

E-mail: michihisa.yamamoto@riken.jp

現在開発が進められている固体の量子計算機は、局在した量子二準位系で構成され、制御系の大きさが物理量子ビット数 N に比例して増大する。有用な量子コンピューターでは、多数の物理量子ビットの高い精度での制御が必要であり、その実現には巨大な制御ハードウェアと運用コストが必要となる。本講演では、半導体の量子回路を変形、緩和なく伝搬する電子波束の量子ビットを用いて、小さなハードウェアで大規模な量子計算を実現する提案を紹介する。

本提案は、伝搬する電子を制御する「電子量子光学」の実験手法をベースとする。量子計算実現に必要な技術開発として、単一伝搬モードから構成されるゲート型の量子干渉計の実現、電子波束を用いた電流注入による干渉の可視度の大幅な増大の実証に関する実験結果も報告する。

バイポーラ型シリコン量子ドットの高周波反射測定 Radio-Frequency Reflectometry on Bipolar Silicon Quantum Dots

東工大¹, 日立研開² ○太田 俊輔¹, 近藤 知宏¹, 土屋 龍太²,

峰 利之², 久本 大², 水野 弘之², 溝口 来成¹, 米田 淳¹, 小寺 哲夫¹

Tokyo Tech.¹, R&D Group, Hitachi Ltd.², ○Shunsuke Ota¹, Chihiro Kondo¹, Ryuta Tsuchiya²,

Toshiyuki Mine², Digh Hisamoto², Hiroyuki Mizuno²,

Raisei Mizokuchi¹, Jun Yoneda¹, Tetsuo Kodera¹

E-mail: ota.s.ab@m.titech.ac.jp

近年、量子コンピューティングは飛躍的な進展を遂げている。なかでもシリコン量子ビットは既存の半導体技術と親和性が高く、スケーラブルな量子コンピュータの実現に向けた有望な候補とされている。シリコン量子ドット中の電子スピンは、核スピン由来の超微細相互作用の影響が小さいため、長いコヒーレンス時間を持つことが魅力であり、盛んに研究されてきた。一方、正孔スピンは強いスピン軌道相互作用により、微小磁石などの追加構造なしで電場駆動の高速なスピン操作が可能であり[1]、集積化において有利な点があることから、こちらも近年注目を集めている。本研究では、これらの系のベンチマークを目的として、拡散層への接続をスイッチゲートでオンオフすることで、n型(電子)とp型(正孔)の特性を同一チャンネル上で切り替え可能な構造を有するバイポーラ型シリコン量子ドット (Figure 1) の高周波反射測定を行った。高周波反射測定とは、高周波信号 (100 MHz~1 GHz 程度) をデバイスに印加し、そのデバイスのインピーダンスに応じて反射される信号を解析する手法である[2]。低周波雑音の影響軽減や数 MHz の測定帯域幅といった特徴から高精度で高速な測定が可能である。講演では、高周波反射測定法を用いて同一デバイス上で電子スピン系と正孔スピン系の試料特性の比較を行った結果について議論する予定である。

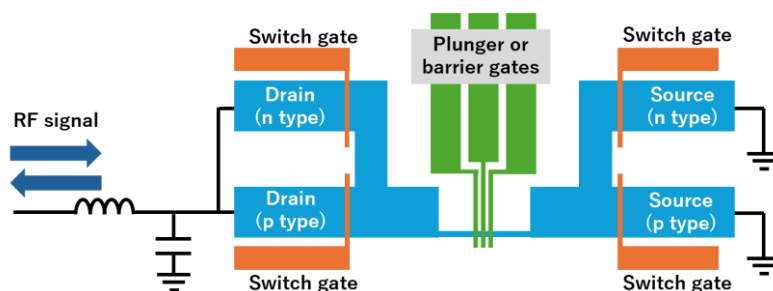


Figure 1. Schematic of a bipolar silicon quantum dot device. Plunger and barrier gates for forming quantum dots are placed on the channel. The polarity of the channel can be switched by adjusting the switch gates. A resonant circuit for radio-frequency reflectometry is connected to the channel.

本研究は JST Moonshot R&D Grant Number JPMJMS2065, MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT QLEAP) Grant No. JPMXS0118069228, JST さきがけ(JPMJPR21BA), 科研費(JP23H05455, JP23H01790, JP23K17327)の支援を受けて遂行された。

[1] R. Maurand, et al., *Nat. Commun.* **7**, 13575-1-6 (2016).

[2] D. J. Reilly, et al., *Appl. Phys. Lett.* **91**, 162101 (2007).

並列量子ドットチャネルの電流同時測定に基づく電荷ノイズの相関評価 Evaluation of charge noise correlation based on simultaneous current measurements of parallel quantum dot channels

東工大¹, 日立研開² ○松田 達也¹, 松岡 竜太郎¹, 高橋 一斗¹, 土屋 龍太², 峰 利之²,
久本 大², 水野 弘之², 溝口 来成¹, 小寺 哲夫¹, 米田 淳¹

Tokyo Tech.¹, R&D Group, Hitachi Ltd.², °Tatsuya Matsuda¹, Ryutaro Matsuoka¹,
Kazuto Takahashi¹, Ryuta Tsuchiya², Toshiyuki Mine², Digh Hisamoto², Hiroyuki Mizuno²,
Raisei Mizokuchi¹, Tetsuo Kodera¹, Jun Yoneda¹

E-mail: matsuda.t.ap@m.titech.ac.jp

シリコン量子ドットを用いたスピン量子ビットは、高い操作忠実度や既存の半導体加工技術を利用した高集積化の点で注目を集めている。他の系に比べてビットの占有面積が小さいシリコンスピン量子ビットを集積化するにあたって大きな問題となりうるのが、量子誤り訂正効率に影響するノイズ相関である。実際に、近接する量子ビット間で強いノイズ相関があることが近年報告されている[1]。

本研究では、シリコンスピン量子ビットで支配的な電荷ノイズに注目し、電流測定に基づく簡易的なノイズ相関測定手法を確立することを目指した。複数チャネルのそれぞれにおいて量子ドットを形成し、各チャネルを流れる直流電流 (I_{Ch1} , I_{Ch2}) のゆらぎの同時測定を行った (Fig. 1)。そのノイズ相関を (自己相関ノイズスペクトルの幾何平均によって) 規格化された相互相関スペクトルを用いて評価測定したところ、Fig. 2 に示す周波数依存性が観測された。その概形は電荷ノイズ源とされる二準位系 (TLF) を少数個仮定したモデルで説明可能であると分かった。さらに、測定対象となる量子ドットの形成位置を制御して同様の測定を行うことで、ノイズ相関強度が量子ドット間距離に対し、従来報告[2]と矛盾しない指数関数的な減衰を示すことを見出した。本手法は、従来手法のスピン干渉効果を利用する方法よりも、短時間で効率的に測定でき、より多彩な条件下で適用可能であるという特徴を有する。講演では、従来法では難しいと考えられる二重量子ドット準位差の直接的な相関測定や、その温度依存性について測定した結果についても議論する予定である。

本研究は、JST Moonshot R&D Grant Number JPMJMS2065, MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT QLEAP) Grant No. JPMXS0118069228, JST PRESTO Grant Number JPMJPR21BA, 科研費 (JP23H05455, JP23H01790, JP23K17327) の支援を受けて遂行された。

[1] J. Yoneda *et al.*, *Nature Physics* **19**, 1793 (2023). [2] J. S. Rojas-Arias *et al.*, *Physical Review Applied* **20**, 054024 (2023).

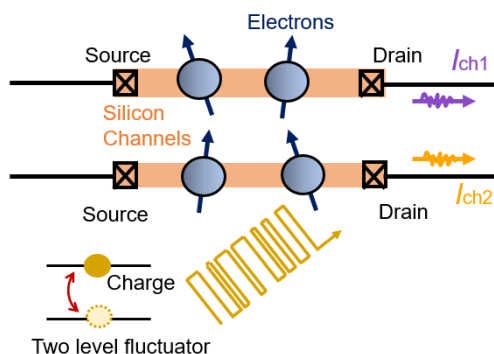


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement method. We form quantum dots and confine electrons in individual channels.

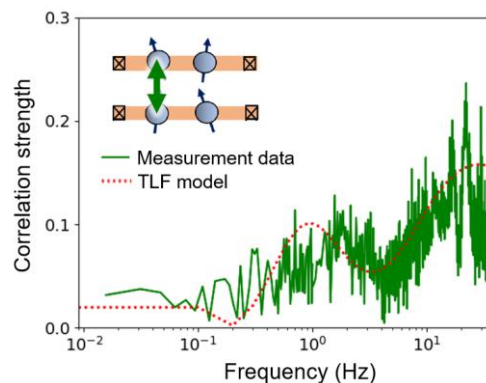


Fig. 2 Noise correlation strength (green trace) along with a TLF model result (red dotted line).

二重量子ドットを流れる電流を用いた 隣接シリコン量子ビット間の電荷ノイズ相関測定

Assessment of charge noise correlation between neighboring silicon qubits
based on the current through a double quantum dot

東工大¹, 日立研開² ○松岡 竜太郎¹, 松田 達也¹, 高橋 一斗¹, 土屋 龍太², 峰 利之²,
久本 大², 水野 弘之², 溝口 来成¹, 小寺 哲夫¹, 米田 淳¹

Tokyo Tech.¹, R&D Group, Hitachi Ltd.², ○Ryutaro Matsuoka¹, Tatsuya Matsuda¹,
Kazuto Takahashi¹, Ryuta Tsuchiya², Toshiyuki Mine², Digh Hisamoto²,
Hiroyuki Mizuno², Raisei Mizokuchi¹, Tetsuo Kodera¹, Jun Yoneda¹

E-mail: matsuoka.r.ac@m.titech.ac.jp

シリコンスピン量子ビットの量子誤り訂正において、複数の量子ビットに加わるノイズの相関特性（相互相関特性）を理解することは重要である。先行研究では、隣接するシリコンスピン量子ビットに対して電荷ノイズによる強いノイズの相互相関が報告されている^[1,2]。これらの研究では、ノイズ測定にスピン干渉効果を利用しており、評価に時間がかかっていた。より迅速・簡便な相互相関の測定手法が利用できれば、量子ビットの集積化に向けた統計的な特性評価が可能になると期待される。

本研究では、シリコン量子ビットデバイス中の電荷ノイズに焦点を当て、従来手法より簡易な電流測定手法を用いてその相互相関を評価した。実験には 300 mK の極低温下に設置された n-MOS 型シリコン二重量子ドットを用い、ゲート電圧(V_L , V_R)を掃引してデバイスを流れる電流(I_{SD})を測定した(Fig. 1)。パルス信号を印加することで、各量子ドットに加わるノイズに選択的に敏感な測定点 M_L , M_R における電流を交互に測定し、各量子ドットにおける電荷ノイズの時系列データを同時測定した。同データを解析することで数 Hz 以下の周波数領域で量子ドット間の電荷ノイズ相関を評価し、最大で 0.5 程度の相関強度を観測した(Fig. 2)。講演では、本測定手法の正確性について検証した結果についても議論する予定である。

本研究は JST Moonshot R&D Grant Number JPMJMS2065, MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT QLEAP) Grant No. JPMXS0118069228, JST PRESTO Grant Number JPMJPR21BA, 科研費 (JP23H05455, JP23H01790, JP23K17327) の支援を受けて遂行された。

[1] J. Yoneda *et al.*, *Nat. Phys.* 19, 1793 (2023). [2] J.S. Rojas-Arias *et al.*, *Phys. Rev. Applied* 20, 054024 (2023).

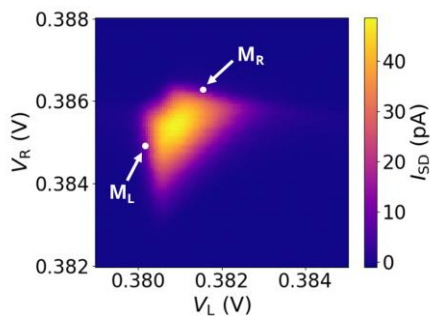


Fig. 1. Current (I_{SD}) through the device as a function of gate voltages (V_L , V_R). The two legs of the trapezoid current region are respectively sensitive to noise acting on the individual quantum dots.

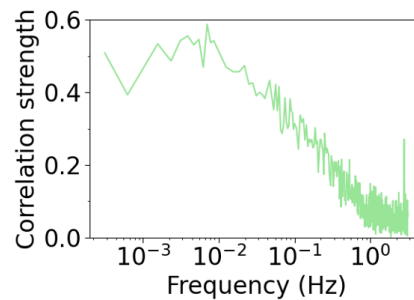


Fig. 2. Correlation strength of charge noise in the double quantum dot. It reaches about 0.5 at around 10^{-2} Hz.

発光吸収型ダイヤモンド量子中継器の実現に向けた中継動作の実証

Demonstration of repeater operations

towards the realization of emission-absorption type diamond quantum repeater

横国大院理工¹, 横国大 QIC², 横国大 IAS³, 産総研⁴, 古河電工⁵

○(D) レイエスラウスティン¹, 関口雄平^{2,3}, 伊藤大輔¹, 藤原太朔¹, 渡辺幹成¹,
加藤宙光^{2,4}, 牧野俊晴^{2,4}, 味村裕^{2,5}, *小坂英男^{1,2,3}

Grad. Sch. Eng., Yokohama Natl. Univ.¹,

QIC, Yokohama Natl. Univ.², IAS, Yokohama Natl. Univ.³, AIST⁴, Furukawa Electric Co., Ltd.⁵

○(D) Raustin Reyes¹, Yuhei Sekiguchi^{2,3}, Daisuke Ito¹, Taichi Fujiwara¹, Kansei Watanabe¹,
Hiromitsu Kato^{2,4}, Toshiharu Makino^{2,4}, Yu Mimura^{2,5}, and *Hideo Kosaka^{1,2,3}

*E-mail: kosaka-hideo-yp@ynu.ac.jp

量子通信を光ファイバ中の損失で制限される伝送距離を超えた二者間で実用的に実行するには、量子中継器の存在が有効であると考えられている。我々は量子中継器を実現できる物理系としてダイヤモンド中の窒素空孔中心(以下、NV 中心)に着目し研究を行なっている。

近年、NV 中心から放出された光子を干渉させ量子中継を実行する研究が行われているが、この手法は固体系で問題となる周波数散乱によって忠実度が劣化してしまう。一方で我々は光子の発光と吸収を用いた量子中継の実現を目指している。

本研究では NV 中心に入力した光子偏光状態を窒素核スピンに保存し、さらに量子テレポーテーションを行うことで NV 中心から放出される光子に状態が転送されることを確認し、発光吸収スキームを用いた量子中継の部分的な実証を行った。入力光子と出力光子の間の偏光状態の忠実度はおよそ 65%(Fig. 1)であり、平均 1 光子以下で機能することも示した。本講演ではこれらの実験結果について詳細な議論を行う。

日頃からご講論、ご協力いただき、寺地徳之

氏、松崎雄一郎氏に感謝します。本研究は JST 「ムーンショット型研究開発事業」(JPMJMS2062)、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」(JPMI00316)、JST-CREST(JPMJCR1773)、科研費基盤研究 (S)、挑戦的研究 (開拓)、科研費特別研究員奨励費 (23KJ0983) の支援を得た。

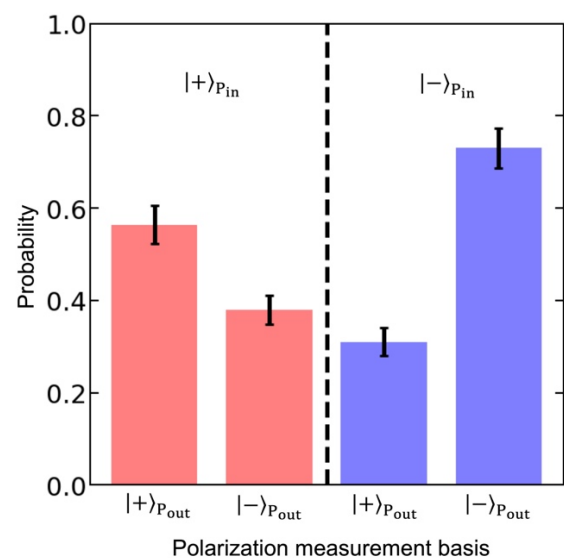


Fig. 1 The Polarization state of the output photon is transferred by quantum teleportation. The measured fidelity of the photon's polarization state was around 65%.

量子インターフェースの実現に向けた ダイヤモンドオプトメカニカル結晶の評価

Evaluation of diamond optomechanical crystals

for the realization of quantum interfaces

横国大院理工¹, 横国大QIC², 横国大IAS³, 東大生産研⁴, 量研⁵

○(D)山本萌生¹, 佐藤清貴¹, 黒川穂高^{2,3}, 石田悟己⁴, 松清秀次⁴, 飯嶋航大⁴,
池尙孜⁴, 大槻秀夫⁴, 西岡政雄⁴, 関口雄平^{2,3}, 小野田忍^{2,5}, 岩本敏^{2,4}, *小坂英男^{1,2,3}

Grad. Sch. Eng., YNU¹, QIC, YNU², IAS, YNU³, IIS, UTokyo⁴, QST⁵

○(D)Moyuki Yamamoto¹, Kiyotaka Sato¹, Hodaka Kurokawa^{2,3}, Satomi Ishida⁴,
Hidetsugu Matsukiyo⁴, Koudai Iijima⁴, Sangmin Ji⁴, Hideo Otsuki⁴, Masao Nishioka⁴,
Yuhei Sekiguchi^{2,3}, Shinobu Onoda^{2,5}, Satoshi Iwamoto^{2,4}, *Hideo Kosaka^{1,2,3}

*E-mail: kosaka-hideo-yp@ynu.ac.jp

誤り耐性を持つ量子コンピュータは 100 万以上の量子ビットを必要とすると考えられており、超伝導量子ビットは有力なハードウェアの候補である。しかし、希釈冷凍機内に収容可能な超伝導量子ビット数は、制御配線で生じる熱流入やクロストークなどによる制約を受ける。その問題を解決するため、冷凍機間での量子通信により量子ビットを複数の冷凍機に分散させる分散型量子計算が近年注目を集めている。ただし、超伝導量子ビットと直接結合可能な数 GHz の周波数を持つマイクロ波(MW)光子は室温中でノイズに埋もれてしまうため、冷凍機間の通信に用いることができない。そのためMW光子を室温でのノイズが少ない数百 THz 以上の通信用光子へと変換する量子インターフェースが必要となる。

先行研究では、シリコンで作製されたオプトメカニカル結晶(OMC)と呼ばれる通信用光子とフォノンの微細共振器を用いることで、超伝導量子ビットから放出された MW 光子を通信用光子に変換する実証実験が行われたが、共振器中に熱ノイズが蓄積されてしまう影響により、変換効率が制限されている。我々は熱伝導率が高いダイヤモンドで OMC を作製することで熱ノイズ蓄積の解決を試みている。さらに通信用光子とフォノンの両方と強い相互作用が可能なダイヤモンド中の色中心を用いることで、更なる変換効率の向上を目指している。

我々のグループでは、量子インターフェース実現に向けた取り組みの一步として、色中心を含むダイヤモンド OMC の作製に成功した。更にダイヤモンド OMC を温度変化させることで共振周波数を調整し、色中心と OMC の共振周波数が一致したときに発光が増強されることを確認した。本講演では、発光増強と共振器-色中心結合の関連や低温における OMC と色中心の評価の詳細について述べる予定である。

本研究は JST「ムーンショット型研究開発事業」(JPMJMS2062)、総務省「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」(JPMI00316)、JST-CREST(JPMJCR1773)、科研費基盤研究(S)、挑戦的研究(開拓)、科研費特別研究員奨励費(23KJ0983)の支援を得た。

ファイバー接続型ダイヤモンドブルズアイ共振器の設計

Design of Fiber Coupled Diamond Bullseye Cavity

東大生産研¹, 東大先端研², ○池 尚玟¹, 岩本 敏^{1,2}

IIS Univ. Tokyo¹, RCAST Univ. Tokyo², ○Sangmin Ji¹, and Satoshi Iwamoto^{1,2}

Email: smji@iis.u-tokyo.ac.jp

色中心と結合したダイヤモンドナノ共振器は、高効率な量子光インターフェースを可能にし、量子光ネットワークの構成要素の一つとして重要である [1]。一方、長距離にわたるネットワークの構築のためには光ファイバーとの高効率結合 [2] が不可欠である。特に、高品質のスピン欠陥をサポートできるバルク単結晶ダイヤモンド [3] に形成した光ナノ構造と光ファイバーの接続は重要な課題である。ダイヤモンド基板上に直接 [4]、もしくは薄膜を用いて形成 [5] した集光グレーティングなどの報告がある中、モノリシックなファイバー接続型素子にすることで、さらなる小型化、高効率結合が実現できると期待される。本発表では、光ファイバーの端面にバット・カップリングで結合したスラブ型ダイヤモンドブルズアイ型光共振器の設計について報告する。

図 1 に、今回提案するデバイスの概略図及び 3 次元電磁界シミュレーションを用いた計算結果を示す。光ファイバー (HP630) の端面に、穴型ブルズアイ共振器 [6] がバット・カップリングした構造である。設計パラメータの詳細については当日報告する。図 1(a) 及び (b) にそれぞれ、ブルズアイの中央に配置した x -方向ダイポールの共振器共鳴波長 ($\lambda_0 = 637$ nm) における光ファイバーへのカップリング・伝搬及び共振器モード ($|\mathbf{E}|^2$ at $z = 0$) の様子を示す。共振器によるダイポール放射レートの増強 (パーセル増強) は $F_p = 75$ (共振器 Q 値 1200、モード体積 $V_{\text{eff}} = 1.2(\lambda_0/n_{\text{dia}})^3$) であった。また、ダイポールから放射した全パワーに対して最終的にファイバーモードとして伝搬するカップリング効率 (η_{tot}) は 0.28 であり、同じブルズアイ共振器 (孤立) における対物レンズ ($\text{NA} = 0.9$) を用いた集光およびファイバーカップリングした際の効率 0.055 ($\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{top}} \times \eta_{\text{NA}} \times \eta_{\text{fiber}}$) よりも 5 倍以上高くなっている。今後、バルクダイヤモンドの等方性エッチングによるエアブリッジ化及び転写プリント技術を利用しデバイスの実証を目指す。

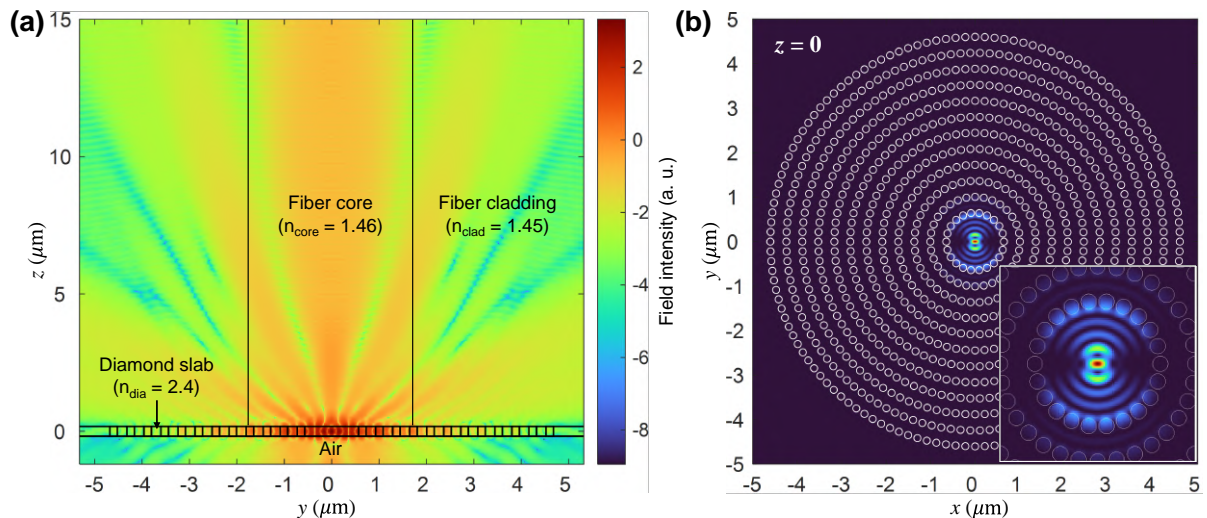


Fig. 1. (a) Coupling and propagation of light from an x -dipole positioned at the center of the bullseye cavity to an optical fiber at the resonant wavelength of the cavity. (b) Spatial distribution (inset: magnified) of the cavity mode ($|\mathbf{E}|^2$) at $z = 0$.

参考文献 [1] P. K. Shandilya *et al.*, *J. Light. Technol.* **40**, 7538 (2022). [2] M. J. Burek *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **8**, 024026 (2017). [3] A. Faraon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 033604 (2012). [4] J. Zheng *et al.*, *Opt. Express* **25**, 32420 (2017). [5] R. Katsumi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **121**, 161103 (2022). [6] W. B. Jeon *et al.*, *Adv. Quantum Technol.* **5**, 2200022 (2022).

謝辞 本研究は村田科学技術振興財団研究助成 (M23 自 152)、JST Moonshot R&D (JPMJMS2062)、科研費 (22H04962、23H05458、23K19197) の支援を受けて遂行された。

SiN エッチングマスクを用いた エアブリッジ型ダイヤモンドフォトニック結晶共振器の作製及び光学評価

Fabrication and Optical Characterization of

Air-bridge Diamond Photonic Crystal Cavity Using SiN as an Etching Mask

東大生研¹, 東大先端研², ○池 尚玟¹, 石田 悟己², 松清 秀次¹, 西岡 政雄¹, 飯嶋 航大², 岩本 敏^{1,2}

IIS Univ. Tokyo¹, RCAST Univ. Tokyo², ○S. Ji¹, S. Ishida², H. Matsukiyo¹, M. Nishioka¹,

K. Iijima², and S. Iwamoto^{1,2}

Email: smji@iis.u-tokyo.ac.jp

ダイヤモンド中に作製した光ナノ共振器は、量子系（NV 中心など）におけるスピンと光子の相互作用を増強し、高効率な光量子インターフェスを可能にする [1]。しかしながら、その作製技術の難易度が高く、これまでの報告は限られた海外グループによるものがほとんど [2][3] であった。我々は、より優れた量子系の特性を有する単結晶バルクダイヤモンド [4] 上で平坦な裏面形状を持つエアブリッジ構造を作製可能な等方性エッチングを用い、国内では初めてエアブリッジ型フォトニック結晶共振器（PhC）の作製に成功 [5][6] した。今回さらに作製技術の改善を検討したので、その結果を報告する。

図 1(a) に今回作製したナノビーム型 PhC の電子顕微鏡像を示す。側壁の粗さが少々現れているものの、はっきりしたエアブリッジ型 PhC の様子が観察できる。ダイヤモンドにおける PhC パターンのエッチングのためのマスクとして、PECVD で形成した 100 nm の SiN 膜を用いた。また、酸素プラズマによる垂直エッチングの条件を改善し、より垂直で平坦な側壁を実現した。等方性エッチングに対する側壁の保護には前回の報告 [5] と同様に ALD で形成した 20 nm の Al₂O₃ 膜を使用している。図 1(b) に、波長 375 nm の励起レーザーを用いたフォトルミネセンス（PL）スペクトルを示す。PL 測定から、波長 593.4 nm において Q 値 Q ~ 1000 を有し、ナノビームの縦方向に偏光した共振器モードピークが観測できた。共振器モードの詳細な分析については当日報告する。現在の Q 値は側壁や裏面の粗さなどの構造における不均一性要因に律速されていると考えられ、今後さらなるプロセス条件の最適化により改善すると期待している。

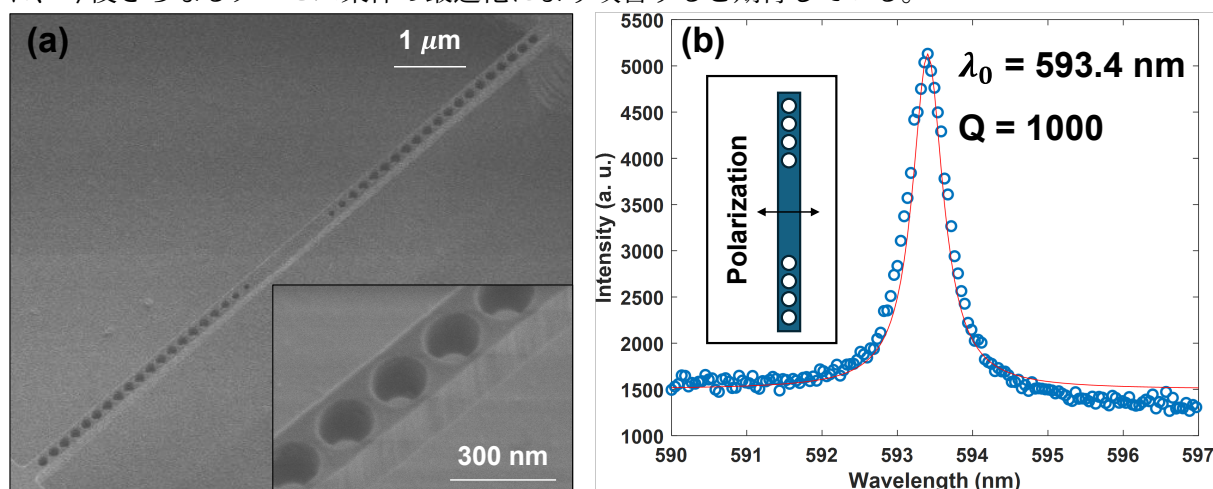


Fig. 1. (a) Scanning electron microscopic (inset: magnified) image of the fabricated air-bridge diamond PhC cavity. (b) Measured photoluminescence spectrum from the fabricated PhC. Inset describes the polarization of the cavity mode.

参考文献) [1] P. K. Shandilya *et al.*, *J. Light. Technol.* **40**, 7538 (2022). [2] S. Mouradian *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 021103 (2017). [3] K. Kuruma *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 230601 (2021). [4] A. Faraon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 033604 (2012). [5] 石田 悟己 他, in 第 84 回秋季応用物理学会 (2023), 21p-A302-5. [6] 飯嶋 航大 他, in Photonic device workshop (2023), P-8.

謝辞) 本研究は、JST Moonshot R&D (JPMJMS2062) および総務省グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発 (JPMI00316) の支援を受けて遂行された。

ダイヤモンド量子系の任意磁場下での核スピン偏極

Polarization of nuclear spins in the diamond quantum system

under arbitrary magnetic fields

東工大¹, 韓国科学技術研究院², ○木村 詠吉¹, Junghyun Lee², 荒井 慧悟¹

Tokyo Institute of Technology¹, Korea Institute of Science and Technology²

E-mail: kimura.e.ab@m.titech.ac.jp

複数の量子ビットからなる系の高忠実度な操作は、量子計算だけでなく、量子もつれを利用した量子計測や量子センシングを行う上で重要な要求のひとつである。量子ビットを実現するプラットフォームの一つであるダイヤモンド中の窒素-空孔欠陥(NV センター)は、室温で動作する量子ビットとして開発されてきた。一方、量子ビット間の量子もつれの制御にあたっては、ダイヤモンド中の他の欠陥からのノイズが避けられない。そのため、制御の忠実度は、2014 年に 82.4 % [1] が実証されて以来おおきく進展できていなかった。しかし 2024 年、制御パルスに動的減結合を適用してノイズを低減することで、操作の忠実度を 96.0 % まで上昇できることが示された [2]。今後、誤り訂正の可能な水準まで忠実度を向上していくには、NV センターを構成する窒素の核スピンを偏極することが重要な課題として残されている。ところが、核スピンの状態は、任意の磁場下で混合してしまうために、定常的に偏極されることは困難であった。

そこで本研究は、定常磁場に対して任意の方向を向いた NV センターの ^{14}N 核スピンを制御することを目的とした。複数の NV センターを選択的に制御するためには定常磁場でエネルギー準位を分ける必要がある。しかし、ダイヤモンドの結晶構造により NV センターの方向は 4 通り存在するため、定常磁場と平行でない NV センターを操作することが避けられない。横磁場による核スピン状態の混合に対処するために、状態混合の周期を理論的・実験的に解析した。解析した周期を使って、従来の核スピン偏極方法に混合 1 周期分の待機時間を加えるという新たな方法で、任意の定常磁場に対して核スピンを偏極できることを示した。

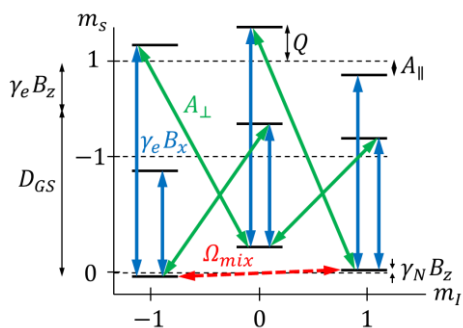


Fig. 1 Transitions between nuclear spin caused by off-axis magnetic field

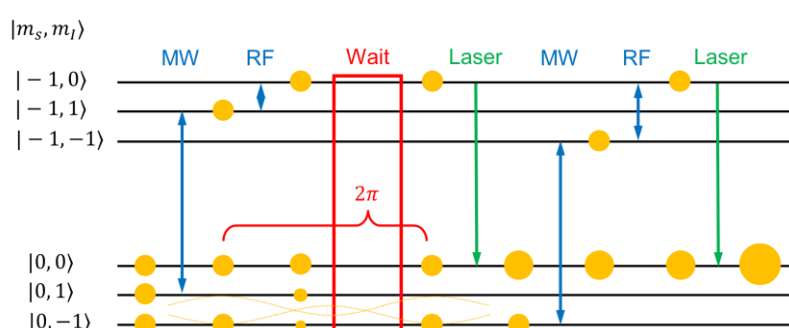


Fig. 2 Our nuclear spin polarization idea with waiting time

*This research was supported by JSPS Bilateral Program (JPJSBP120238803), JST PRESTO (JPMJPR20B1), 2020 research grant program of Izumi Zaidan (Japan), Suematsu Fund (Suematsu Award "Fundamentals and Developments of Innovative Value Creation"), NRF program (2U06630), and KIST research program (2E32241).

[1] F. Dolde *et al.*, *Nat. Comm.* **5**, 3371 (2014), [2] T. Joas *et al.*, *arXiv*:2406.04199 (2024)

損失のある通信路における量子ネットワークセンシング

Quantum network sensing with lossy channels

慶大理工, 上田 悦大, 石原 誠, ロガ ヴォイチェフ, 武岡 正裕

Keio Univ., Yoshihiro Ueda, Makoto Ishihara, Wojciech Roga and Masahiro Takeoka

E-mail: yoshihiro_u@keio.jp

量子ネットワークセンシングは多体エンタングルメントを用いることで、遠隔地のパラメータを古典的手法に比べて精度良く推定できるため注目を集めている。近年では、光の GHZ 状態[1]やマルチモードの N00N 状態[2]を使用した原理実証実験も行われている。一方、現実の応用では、多体エンタングルメントを損失のある通信路を通じて遠隔地に分配する効率も含めたうえで、パラメータの推定性能を議論する必要があるが、そうした研究はまだほとんど行われていない。

そこで、本研究では、近年提案された W 状態及び GHZ 状態を効率的に分配するプロトコル[3, 4]を応用した、新たな量子ネットワークセンシング方式を提案し、その理論解析を行った(Fig.1(a))。センシングの性能（パラメータの推定精度）は、量子クラメル・ラオ限界により評価を行い、局所的にエンタングルメントを生成してから分配する直接伝送方式と提案方式の性能を比較した。その結果、直接伝送方式に比べて、提案方式ではより遠く離れたパラメータについても精度良く推定できることがわかった(Fig.1(b))。

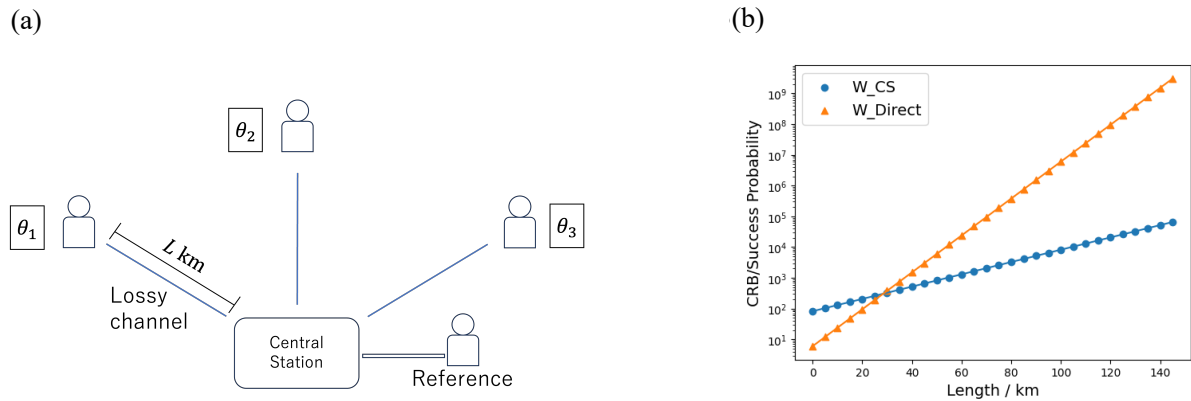


FIG. 1. (a) Schematic of our quantum network sensing protocol. (b) Performance comparison between our protocol and direct transmission protocol.

参考文献

- [1] L.-Z. Liu, Y.-Z. Zhang, Z.-D. Li et al., *Nat. Photon.* **15**, 137 (2021).
- [2] S. Hong J.Rehman, Y.-S. Kim et al., *Nat. Commun.* **12**, 5211 (2021).
- [3] W. Roga, R. Ikuta, T. Horikiri, and M. Takeoka, *Phys. Rev. A* **108**, 012612 (2023).
- [4] H. Shimizu, W. Roga, D. Elkouss, and M. Takeoka, arXiv:2404.19458.