

Oral presentation | CS Code-sharing session : 【CS.8】 Code-sharing Session of 6.2 & KS.1

📅 Fri. Sep 20, 2024 9:00 AM - 12:00 PM JST | Fri. Sep 20, 2024 12:00 AM - 3:00 AM UTC 🏢 A41 (TOKI MESSE 4F)

## [20a-A41-1~10] CS.8 Code-sharing Session of 6.2 & KS.1

Masazumi Fujiwara(Okayama Univ.), Maki Shimizu(Saitama Univ.)

9:00 AM - 9:30 AM JST | 12:00 AM - 12:30 AM UTC

[20a-A41-1]

[INVITED] Nanodiamond Quantum Sensors in Biological Measurement: Material Design, Control, and Applications

○Ryuji Igarashi<sup>1,2,3,4</sup> (1.QST, 2.Tokyo Tech, 3.Chiba Univ., 4.Tohoku Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM JST | 12:30 AM - 12:45 AM UTC

[20a-A41-2]

Electron Irradiation NV Center Formation on Nano-Diamonds for Quantum Biosensors Part 2

○Hiroshi Abe<sup>1,2</sup>, Kiichi Kaminaga<sup>2</sup>, Ryuji Igarashi<sup>2</sup>, Takeshi Ohshima<sup>1</sup> (1.QST QMARC, 2.QST IQLS)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[20a-A41-3]

Study on magnetic sensing with high sensitivity using NV centers in nanodiamonds

○Naoya Kamiyama<sup>1</sup>, Masanori Fujiwara<sup>1</sup>, Naoya Morioka<sup>1,2</sup>, Tetsuri Nishikawa<sup>1</sup>, Chihiro Suzuki<sup>3</sup>, Kiichi Kaminaga<sup>3</sup>, Ryuji Igarashi<sup>3</sup>, Norikazu Mizuochi<sup>1,2</sup> (1.ICR, Kyoto Univ., 2.CSRN, Kyoto Univ., 3.QST)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[20a-A41-4]

Using a 3D Microwave Resonator Nanodiamond Temperature Measurement and its Application

○Hiromu Nakashima<sup>1</sup>, Keisuke Oshimi<sup>1</sup>, Masazumi Fujiwara<sup>1</sup> (1.Okayama Univ)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[20a-A41-5]

Analysis of band bending in hydrogen-terminated diamond using nitrogen-vacancy centers near the surface

○Taisuke Kageura<sup>1,2</sup>, Yosuke Sasama<sup>1</sup>, Keisuke Yamada<sup>3</sup>, Kosuke Kimura<sup>3,4</sup>, Shinobu Onoda<sup>3</sup>, Takahide Yamaguchi<sup>1,5</sup> (1.NIMS, 2.AIST, 3.QST, 4.Gumma Univ., 5.Tsukuba Univ.)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[20a-A41-6]

Low-frequency AC magnetic field measurement using ensemble NV

○Hiroya Saito<sup>1</sup>, Tsukasa Hayashi<sup>1</sup>, Takumi Kondo<sup>1</sup>, Hiroshige Deguchi<sup>1</sup>, Yoshiki Nishibayashi<sup>1</sup>, Yutaka Kobayashi<sup>1</sup>, Masanori Fujiwara<sup>2</sup>, Hiroki Morishita<sup>3</sup>, Norikazu Mizuochi<sup>2</sup>, Natsuo Tatsumi<sup>1</sup> (1.Sumitomo Electric industries, Ltd., 2.ICR Kyoto Univ., 3.Tohoku Univ.)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[20a-A41-7]

Imaging of Submicron-Scale Continuous Variation in Phase of AC Magnetic Field around Micro-Circuit with Diamond Quantum Sensor

○Fuki Otsubo<sup>1,2</sup>, Takumi Mikawa<sup>1,2</sup>, Yuichiro Matsuzaki<sup>3</sup>, Norio Tokuda<sup>4</sup>, Junko Ishi-Hayase<sup>1,2</sup>  
(1.Keio Univ., 2.Keio CSRN, 3.Chuo Univ., 4.NanoMaRi, Kanazawa Univ.)

---

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[20a-A41-8]

Enhancement in the Sensitivity of Diamond Quantum Sensor using Flux Concentrator toward Magnetoencephalography

○Kazuki Shirota<sup>1</sup>, Naota Sekiguchi<sup>1</sup>, Takayuki Iwasaki<sup>1</sup>, Mutsuko Hatano<sup>1</sup> (1.Tokyo Tech.)

---

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[20a-A41-9]

Development of Micro NV Center Array Element of Diamond (MAED) for Measuring Brain Function Magnetic Fields

○Noriko Kurose<sup>1</sup>, Kotaro Obata<sup>1</sup>, Shintaro Nomura<sup>2</sup>, Koji Sugioka<sup>1</sup>, Satoshi Wada<sup>1</sup>, Yoshinobu Aoyagi<sup>1</sup> (1.RIKEN Center for Advanced Photonics, 2.Tsukuba Univ.)

---

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[20a-A41-10]

Simultaneous multipoint measurement of magnetic field at a millimeter scale interval using diamond quantum sensors

○Atsumi Yoshimura<sup>1</sup>, Ayumi Kanamoto<sup>1</sup>, Naota Sekiguchi<sup>1</sup>, Chikara Shinei<sup>2</sup>, Masashi Miyakawa<sup>3</sup>, Takashi Taniguchi<sup>3</sup>, Tokuyuki Teraji<sup>3</sup>, Shinobu Onoda<sup>4</sup>, Takeshi Ohsima<sup>4</sup>, Takayuki Iwasaki<sup>1</sup>, Mutsuko Hatano<sup>1</sup> (1.Tokyo Tech., 2.Univ. of Tsukuba, 3.NIMS, 4.QST)

---

# ナノダイヤモンド量子センサの材料設計・制御と生命計測への応用

## Nanodiamond Quantum Sensors in Biological Measurement:

### Material Design, Control, and Applications

QST量子生命<sup>1</sup>, 東工大生命理工<sup>2</sup>, 千葉大院融合理工<sup>3</sup>, 東北大院医<sup>4</sup> °五十嵐龍治<sup>1,2,3,4</sup>

QST<sup>1</sup>, Tokyo Tech<sup>2</sup>, Chiba Univ.<sup>3</sup>, Tohoku Univ.<sup>4</sup>, °Ryuji Igarashi<sup>1,2,3,4</sup>

E-mail: igarashi.ryuji@qst.go.jp

量子センサー技術は、量子的な特性をセンシングに活用することで、物理的・化学的パラメータを極めて高い感度と精度で決定する計測技術である。その中でも、ダイヤモンド結晶中の格子欠陥の一種である窒素-空孔中心 (NV センター) は、常温常圧下で、しかもナノサイズの結晶中でも安定に機能することから、生体内微小環境の計測や微量生体分子の検出に革新をもたらす計測技術として生命科学分野で注目を集めている。

これまでの研究で、我々はナノ量子センサーを使った生体計測技術の開発においていくつかの画期的な成果を上げている。たとえば、我々は粒径わずか 5nm のナノダイヤモンドを用いた量子センサーの作成に世界で初めて成功した[1]。これは、爆轟法で生成されたナノダイヤモンドに電子線を照射し、熱酸処理で微細化する技術により達成された。

また、ナノ量子センサーの応用範囲の拡大にも貢献している。従来、NV センターを用いて検出できたのは温度や磁場などの物理パラメータに限られていたが、ナノダイヤモンド表面の官能基に対して特定の化学修飾を行うことで、pH 等の化学的なパラメータをリアルタイム計測することが可能になった[2]。さらに、NV センターと外部磁場とのゼーマン相互作用を 3次元ナノモーショントラッキングに活用することで、ナノダイヤモンドをプローブとしてわずか 10 nm ほどのタンパク質 1 分子が構造変化する様子を可視化することにも成功した[3]。

我々は、NV センターの検出効率を大幅に向上させる技術も開発してきた。この技術は、スピン操作に基づく蛍光変調をヘテロダイン検出に適用したものであり、これにより夾雑物がもたらす背景光に邪魔されることなく、NV センターの蛍光のみを選択的に検出できるようになった[4,5]。この手法は、医療分野で一般に用いられる免疫アッセイを大幅に高感度化する検出法として、感染症やがん、アルツハイマー病などの早期診断への応用が期待されている[6]。

本講演では、生命現象を理解するためのナノダイヤモンド量子センサ (ナノ量子センサ) の設計と応用について紹介する。まず、ナノ量子センサの基本構造について説明し、特定の生命現象を測定するためのセンサ設計と表面官能基制御を示す。また、ナノ量子センサがどのような生命計測に応用されるか、具体例を交えながら紹介する。特に、細胞内微小環境のリアルタイム計測や、バイオマーカー分子の高感度検出などを取り上げる予定である。

[1] Terada *et al.* *ACS nano* 13, 6461 (2019). [2] Fujisaku *et al.* *ACS nano* 13 11726 (2019). [3] Igarashi *et al.* *Journal of the American Chemical Society* 142 7542 (2020). [4] Igarashi *et al.* *Nano letters* 12 5726 (2012). [5] Yanagi *et al.* *ACS nano* 15 12869 (2021). [6] Miller *et al.* *Nature* 587 588 (2020).

## 生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射 NV センター形成 2 Electron Irradiation NV Center Formation on Nano-Diamonds for Quantum Biosensors

### Part 2

QST 量子機能創製研究センター<sup>1</sup>, QST 量子生命科学研究所<sup>2</sup> ◯阿部 浩之<sup>1,2</sup>, 神長 輝一<sup>2</sup>,  
五十嵐 龍治<sup>2</sup>, 大島 武<sup>1</sup>

QST QuBS<sup>1</sup>, QST QLMS<sup>2</sup>, ◯Hiroshi Abe<sup>1,2</sup>, Kiichi Kaminaga<sup>2</sup>, Ryuji Igarashi<sup>2</sup>, Takeshi Ohshima<sup>1</sup>

E-mail: abe.hiroshi2@qst.go.jp

生体ナノ量子センサとして、NV(窒素-空孔)を含む蛍光ナノダイヤモンド (FNDs) の高品質化の研究を進めている。生命現象により誘起される微小温度変化や細胞活性に伴う磁気・電気的変化の検出を活用した生体内のイメージング材料として既に多種細胞への導入試験とともに種々のセンシングを試みている[1]。これら量子計測・センサ技術のためにはより効率的にダイヤモンド NV センター(NVC)を導入することに加え、スピン特性の優れた FNDs 形成が求められており、高蛍光・高感度化 FNDs 形成に向けて電子線照射及びその後の熱処理条件の最適化研究を進めている[2]。

本研究ではナノダイヤモンド(ND, 平均粒径 50 nm)に対し 2 MeV 電子線の照射モード高温照射と室温照射により作製した FNDs について、蛍光強度、NV 濃度と ODMR(光検出磁気共鳴)による dip の深さ測定を実施し、生体ナノ量子センサとして最適な FNDs 形成条件を見出す。高温照射はヒーター加熱しながら電子線照射を実施し、常に照射により形成された欠陥を 900°C 程度に加熱し拡散させながら NV 形成をさせていく。室温照射は照射後 NV 形成のための熱処理プロセスを実施する方法であり、高温/室温照射共にサンプルに対して高温加熱に関わる条件の数値を合わせ、最後に大気雰囲気中 575°C にて 3 時間の熱処理を施すことで表面の炭化層を除去した。これら形成させた NVC についてフォトルミネッセンス(PL: レーザー励起 532 nm)計測、光検出磁気共鳴(ODMR)測定にて dip 深さを測定し、種々の照射条件等について蛍光強度ならびに dip 深さによるセンシング精度についての相関を調べた。

図は 2 つの電子線照射モードの模式図を示す。照射後の NV センター形成熱処理を省いた状態で空気酸化処理をして FNDs としたのが高温(HT)照射である。これら電子線照射手法の違いによる NV 形成について議論する。

#### 【参考文献】

[1] K. Kaminaga et al., Non-contact measurement of internal body temperature using subcutaneously implanted diamond microparticles, *Biomater. Sci.*, 2021, 9, 7049-7053, DOI; 10.1039/d1bm01187a.

[2] 阿部浩之 他、生体量子センサ用ナノダイヤモンドへの電子線照射 NV センター形成、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会、2023 年 9 月 19~23 日、熊本城ホール (熊本市・熊本県)

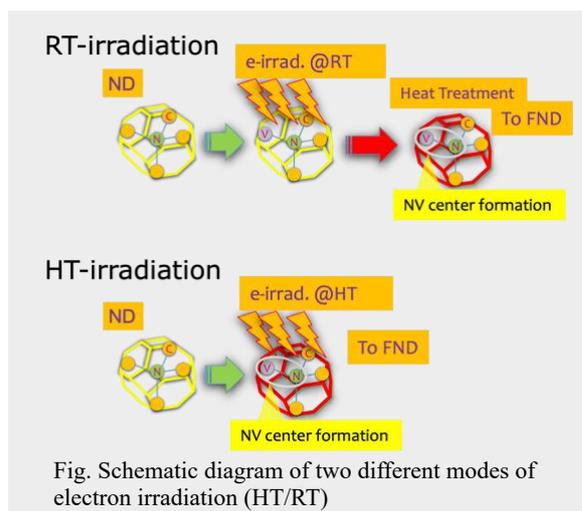


Fig. Schematic diagram of two different modes of electron irradiation (HT/RT)

## ナノダイヤモンド中の NV 中心を用いた高感度磁気センシング

### Study on magnetic sensing with high sensitivity using NV centers in nanodiamonds

京大化研<sup>1</sup>, 京大スピセンター<sup>2</sup>, 量研<sup>3</sup> ○(M2) 神山 直也<sup>1</sup>, 藤原 正規<sup>1</sup>,  
森岡 直也<sup>1,2</sup>, 西川 哲理<sup>1</sup>, 鈴木 智達<sup>3</sup>, 神長 輝一<sup>3</sup>, 五十嵐 龍治<sup>3</sup>, 水落 憲和<sup>1,2</sup>

ICR, Kyoto Univ.<sup>1</sup>, CSRN, Kyoto Univ.<sup>2</sup>, QST<sup>3</sup> ○N. Kamiyama<sup>1</sup>, M. Fujiwara<sup>1</sup>,  
N. Morioka<sup>1,2</sup>, T. Nishikawa<sup>1</sup>, C. Suzuki<sup>3</sup>, K. Kaminaga<sup>3</sup>, R. Igarashi<sup>3</sup>, and N. Mizuochi<sup>1,2</sup>

E-mail: kamiyama.naoya.62s@st.kyoto-u.ac.jp

**【研究背景】**ダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)中心は室温でも十分な電子スピンコヒーレンス時間 ( $T_2$ ) を有し<sup>[1]</sup>、光とマイクロ波を用いた光検出磁気共鳴 (ODMR) を利用することで高感度な量子センサとして期待されている。特に、NV 中心を含むナノダイヤモンド(ND)は、生体毒性が小さい、表面修飾が可能、安定な発光、等の優れた性質から、細胞内微小領域における磁場センサとして注目されている。2008年には粒径 30 nm の ND 中の単一 NV 中心を用いた交流(AC)磁場センシングにより、磁場感度が  $0.5 \mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$  と報告されている<sup>[2]</sup>。一方、生体の膜電位が誘起する磁場は典型的に数 nT 程度であるため<sup>[3]</sup>、更なる高感度化が要求される。高感度化には個々の ND 中に含まれる NV の個数を増やすことが重要だが、一方で多量な NV は  $T_2$  の低下を招き、感度の低下を生じさせる。そのため、ND の高感度化には高濃度の NV かつ長い  $T_2$  の両立が必要となる。今回、我々は独自に作成した ND 中の NV 中心を用いて、高い磁場感度の実現を試みた。

**【実験および結果】**実験で用いた粒径数百 nm の ND は量研で開発されたもので、電子線照射後、表面修飾を施している。この ND の希釈懸濁液をカバーガラスに滴下、自然乾燥させ、共焦点顕微鏡で観察した。外部静磁場とほぼ平行な NV 軸を持つ輝点に対してレーザー及びマイクロ波を照射し、図 1 のような ODMR スペクトルを得た。さらに、Rabi 振動測定、Hahn-echo 測定から  $T_2$  を求めた (図 2)。最後に、AC 磁場測定から磁場感度を求めた。発表では、測定結果の詳細について報告する。

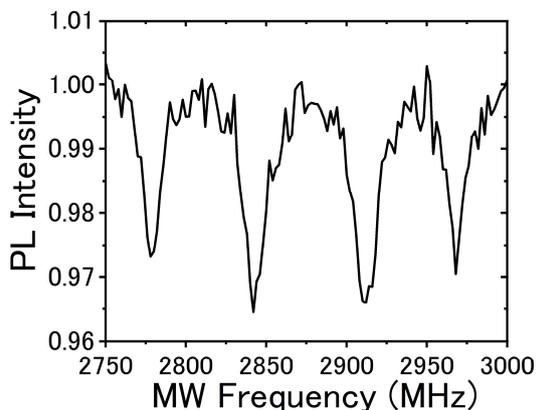


図 1. ND の cw-ODMR 測定

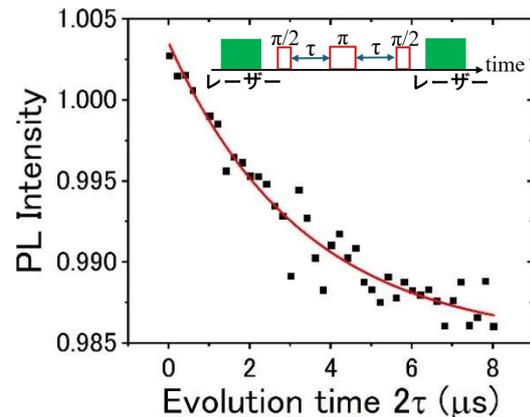


図 2. ND の Hahn-echo シーケンスと測定結果

**【謝辞】**本研究は、MEXT Q-LEAP (No. JPMXS0120330644)の支援を受けて行われた。

**【参考文献】** [1] E. D. Herbschleb et al., *Nat. Commun.* **10**, 3766 (2019). [2] J. R. Maze et al., *Nature* **455**, 644-647 (2008). [3] L. T. Hall et al., *Sci. Rep.* **2**, 401 (2012).

### 3次元マイクロ波共振器を用いた ナノダイヤモンド温度計測とその応用

### Using a 3D Microwave Resonator Nanodiamond Temperature Measurement and its Application

岡山大 理/院環自然

○中島大夢, 押味佳裕, 藤原正澄

Okayama Univ.

Hiromu Nakashima, Keisuke Oshimi, Masazumi Fujiwara

窒素欠陥中心により発光する蛍光性ナノダイヤモンド(FND)では、緑励起光とマイクロ波を用いた光検出磁気共鳴(ODMR)が観測され、これを用いた量子計測が行われている。ODMR測定は蛍光観察と同時に、広範囲、高強度かつ均一なマイクロ波照射が求められる。これまで、マイクロ波照射機構として様々なものが開発され、我々も生体試料に向けたガラスチップ集積化型アンテナを開発した[1]。しかしながら、これらの構造ではマイクロ波電場も生体試料に照射されるという課題があった。そのため、広範囲に磁場照射領域を持ち、電場と磁場がきり分けられる3次元共振器に我々は着目してきた(Fig. 1(a))。これまでに、この3次元共振器の特性評価を行い、FND単体の量子計測を可能にした[3]。しかし、生体応用においては、共振周波数の調整を迅速に行う機構の開発やODMRコントラストの向上という2つの課題が存在している。

本研究では、3次元共振器に共振周波数を即時調整可能な機構を導入し、サンプルの測定位置変化により生じる共振周波数の再調整や再現性の低下を減らした。これにより、短時間で高いコントラストのODMR計測が行えるようになった。さらに、この装置を用いて線虫を測定し(Fig1(b))、0.93のODMRコントラストを達成した(Fig1(c))。講演では温度測定などについても説明する。

本研究の一部は、JSPS (20H00335, 20KK0317, 23KJ1607.), JST (JPMJMI21G1, JPMJAP2339, JPMJFS2128), NEDO (JPNP20004), AMED (JP23zf0127004), 旭硝子財団の支援を受けたものです。

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

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

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

[4] Nakashima et al., manuscript in preparation.

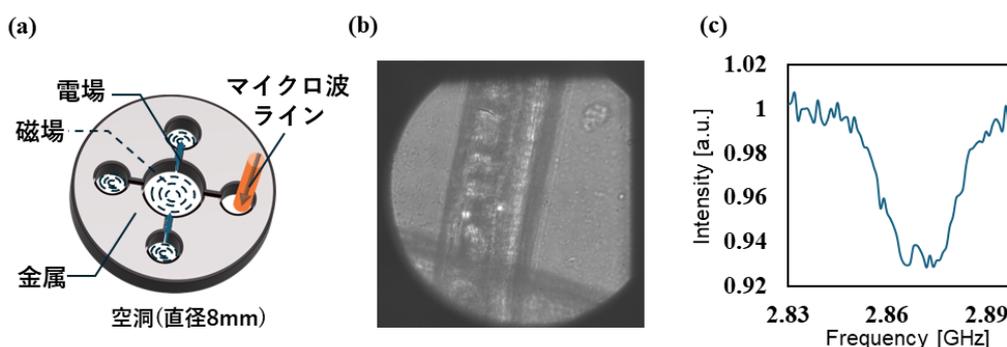


Fig. 1 (a) Schematic of the 3D resonator. (b) Fluorescent image of *C. elegans* (c) ODMR spectra within *C. elegans*

# 水素終端ダイヤモンド表面下で生じる バンドベンディングの NV センターを利用した律速要因解析

## Analysis of band bending in hydrogen-terminated diamond

### using nitrogen-vacancy centers near the surface

物材機構<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>, 量研<sup>3</sup>, 群馬大学<sup>4</sup>, 筑波大学<sup>5</sup>

○蔭浦 泰資<sup>1,2</sup>, 笹間 陽介<sup>1</sup>, 山田 圭介<sup>3</sup>, 木村 晃介<sup>3,4</sup>, 小野田 忍<sup>3</sup>, 山口 尚秀<sup>1,5</sup>

NIMS<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, QST<sup>3</sup>, Gunma Univ.<sup>4</sup>, Tsukuba Univ.<sup>5</sup>

○T. Kageura<sup>1</sup>, Y. Sasama<sup>2</sup>, K. Yamada<sup>3</sup>, K. Kimura<sup>3,4</sup>, S. Onoda<sup>3</sup>, T. Yamaguchi<sup>1,5</sup>

E-mail: kageura.taisuke@aist.go.jp

水素終端ダイヤモンドの表面直下に誘起される p 型の表面伝導は、不純物添加を伴わない高い伝導率など優れた特性からパワーエレクトロニクスや量子デバイスへの応用が期待されている。この表面伝導の起源は、大気中の分子のダイヤモンド表面への吸着によるトランスファードーピングモデル<sup>[1]</sup>で一般的に説明されてきた。このモデルでは、表面近傍におけるバンドベンディングはダイヤモンドと表面吸着分子（アクセプタ）の仕事関数差に律速されると考えられてきた。しかし本研究では、窒素-空孔中心（NV センター）を利用した新計測手法により、表面アクセプタ密度がバンドベンディングの律速要因となる場合があることを明らかにした。

IIa 型{001}ダイヤモンドに、異なる面密度 ( $10^{11}$  -  $10^{13}$  cm<sup>-2</sup>)、10 keV で窒素イオン注入し（平均深さ $\approx$ 15 nm）、熱処理（1000°C, 2h）によって NV を形成した後、プラズマ処理により水素終端を形成したサンプルを作製した。共焦点顕微鏡を用いた PL 強度・スペクトル計測と光検出磁気共鳴（ODMR）法によって NV センターの電荷状態の注入窒素密度依存性を評価するとともに、2 端子計測で表面伝導度を評価した。図 1 のように、大気暴露した我々のサンプルでは表面伝導度の消失と NV<sup>-</sup>状態の発現が同程度 ( $\approx 1 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup>) の注入窒素密度で生じた。この結果とシュレーディンガー・ポアソン方程式に基づいたシミュレーションとの比較により、仕事関数差ではなく、 $1 \times 10^{12}$  cm<sup>-2</sup> 程度の表面アクセプタ密度によってバンドベンディングが律速されていることが示された<sup>[2]</sup>。本研究から得られた知見は、低不純物密度および低表面アクセプタ密度が望まれる高周波ダイヤモンドデバイスの開発や動作解析に大きく貢献することが期待される。

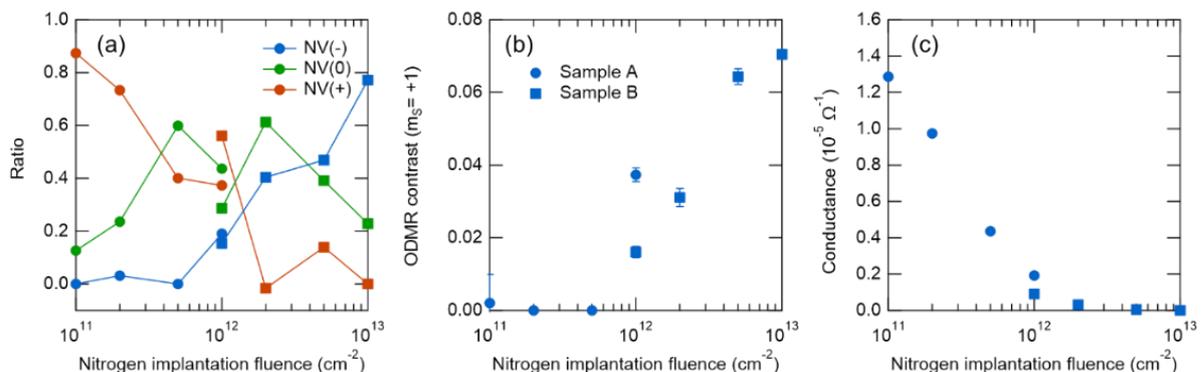


図 1. (a) NV センターの電荷状態、(b) ODMR コントラスト、(c) 表面伝導度の注入窒素密度依存性 [参考文献] [1] F. Maier et.al, PRL, 85, 3472 (2000). [2] T. Kageura et.al, arXiv 2310.17289 (2023)

## アンサンブル NV による低周波交流磁界計測

## Low-frequency AC magnetic field measurement using ensemble NV

住友電気工業(株)<sup>1</sup>, 京大化研<sup>2</sup>, 東北大<sup>3</sup> ○ 済藤 紘矢<sup>1</sup>, 林 司<sup>1</sup>, 近藤 巧<sup>1</sup>, 出口 洋成<sup>1,2</sup>西林 良樹<sup>1</sup>, 小林 豊<sup>1</sup>, 藤原 正規<sup>2</sup>, 森下 弘樹<sup>3</sup>, 水落 憲和<sup>2</sup>, 辰巳 夏生<sup>1</sup>Sumitomo Electric industries, Ltd.<sup>1</sup>, ICR Kyoto Univ.<sup>2</sup>, Tohoku Univ.<sup>3</sup>,○ Hiroya Saito<sup>1</sup>, Tsukasa Hayashi<sup>1</sup>, Kondo Takumi<sup>1</sup>, Hiroshige Deguchi<sup>1,2</sup>, YoshikiNishibayashi<sup>1</sup>, Yutaka Kobayashi<sup>1</sup>, Masanori Fujiwara<sup>2</sup>, Hiroki Morishita<sup>3</sup>, NorikazuMizuochi<sup>2</sup>, Natsuo Tatsumi<sup>1</sup>

E-mail: saito\_hiroya@nissin.co.jp; tatsumi-natsuo@sei.co.jp

ダイヤモンド NV では電子スピン共鳴法でスピンを操作することで磁界や電界の計測が可能のため、特に近年センサ用途へのダイヤモンドの開発が進められている。高温高压法で合成したアンサンブル NV (12C 濃縮サンプル) で連続 Ramsey 法を行うことで低周波 (50~200Hz)、交流磁界計測を行った。連続 Ramsey 法とは一般的な Ramsey シーケンスにおいて  $\pi/2$  パルス間の時間を任意の値に固定した計測手法であり、マイクロ波照射後のブロッホ球上におけるスピンの XY 面内の回転量は交流強度に依存するため、交流計測が可能になる。

交流磁界強度  $1\mu\text{T}$ ~ $1\text{mT}$  までを計測したところ図 1 に示すように  $10\mu\text{T}$  までは磁界強度が大きくなるにつれ交流振幅も大きくなるが、強度が  $10\mu\text{T}$  以上になるとスピンの XY 面内で蛍光のピークを過ぎるところまで回転し、図 2 のように交流波形が折りたたまれた波形になった。またアンサンブル NV ではシングル NV と異なり、3 つの超微細構造で計測されるため観測される波形は 3 つのスピンの波形が合成された波形になった。これら合成波形を解析した結果は図 3 になり、当日はフィッティング手法についても報告する。

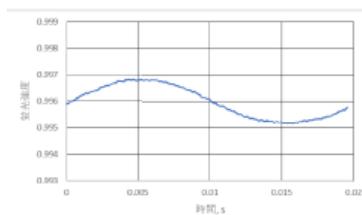


Fig. 1. 交流磁界 10uT

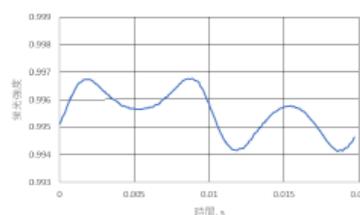


Fig. 2. 交流磁界 40uT

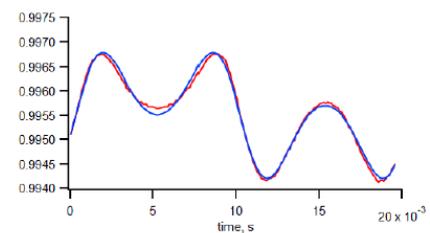


Fig. 3. 交流波形の解析結果 (青線)

【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。また、森下は東北大学 CSIS の CSRN の支援を受けた。

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

## ダイヤモンド量子センサによる交流磁場位相の連続的変化イメージング

## Imaging of Submicron-Scale Continuous Variation in Phase of AC Magnetic Field around Micro-Circuit with Diamond Quantum Sensor

慶大理工<sup>1</sup>, 慶大 CSRN<sup>2</sup>, 中大理工<sup>3</sup>, 金大ナノマリ<sup>4</sup>○(M2)大坪楓季<sup>1,2</sup>, 見川巧弥<sup>1,2</sup>, 松崎雄一郎<sup>3</sup>, 徳田規夫<sup>4</sup>, 早瀬潤子<sup>1,2</sup>Keio Univ.<sup>1</sup>, Keio CSRN<sup>2</sup>, Chuo Univ.<sup>3</sup>, Kanazawa Univ.<sup>4</sup>○(B4)Fuki Otsubo<sup>1,2</sup>, Takumi Mikawa<sup>1,2</sup>, Yuichiro Matsuzaki<sup>3</sup>,Norio Tokuda<sup>4</sup>, and Junko Ishi-Hayase<sup>1,2</sup>

E-mail: fukiotsubo0918@keio.jp

**【背景・目的】**近年、電子デバイスの小型化・集積化によって構成回路の微細化・信号の微弱化が進み、測定・解析が困難となっている。ダイヤモンド NV 中心の電子スピン状態を用いた量子磁場センサは、室温下で高感度・高空間分解能を有すること、CCD/CMOS カメラの利用により 2 次元磁場イメージを取得できることから、微細回路イメージの測定が可能なセンサとして期待されている。NV 中心を用いた通常交流磁場計測では、レーザーやマイクロ波の複雑なパルス操作を必要とするが、本研究では電子スピン二重共鳴下で観測される RF-Dressed 状態<sup>[1,2]</sup>を用いて、簡便な CW-ODMR による微細回路の周りに発生する交流磁場の振幅<sup>[3]</sup>とともに、連続的に変化する位相のイメージングに成功したので報告する。

**【方法】**Figure 1 に NV 軸に垂直な直流磁場下における電子スピン ( $S=1$ ) のエネルギー準位を示す。エネルギー固有状態は、スピン磁気量子数が  $0, \pm 1$  の三重項状態  $|0\rangle, |\pm 1\rangle$  の重ね合わせで表され  $|B\rangle, |D\rangle = (|+1\rangle \pm |-1\rangle)/\sqrt{2}$ 、マイクロ波によって  $|0\rangle \leftrightarrow |B\rangle, |D\rangle$  と遷移できる。ここで、 $|B\rangle-|D\rangle$  間に共鳴する交流磁場  $RF_{tar}$  を印加すると、磁場振幅に比例して  $|B\rangle$  と  $|D\rangle$  のエネルギー準位が各々 2 つに分裂する。蛍光強度の違いによりこれらの準位を測定することで (CW-ODMR)、振幅  $RF_{tar}$  の測定が行える。さらに測定対象と同じ周波数の参照用交流磁場  $RF_{ref}$  を同時に印加すると、 $RF_{tar}$  との位相差に応じて合成波の振幅および分裂幅が変化するため、位相測定が可能となる。

**【結果】**Figure 2 に微細回路 ( $L/S: 10/20 \mu\text{m}$ ) から生じる交流磁場 (14 MHz) の振幅・位相イメージを示す。サブミクロンの高空間分解能で  $\mu\text{T}$  オーダーの交流磁場振幅と位相の 2 次元像を、簡便な CW-ODMR で取得することに成功した。発表では、微細回路上に保護膜を塗布した、より実際の回路状況を模した条件での結果についても議論する。

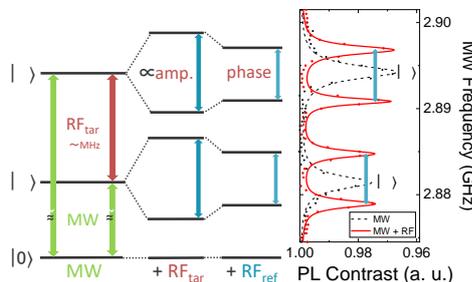


Fig. 1 Energy level and ODMR spectra under electron spin double resonance.

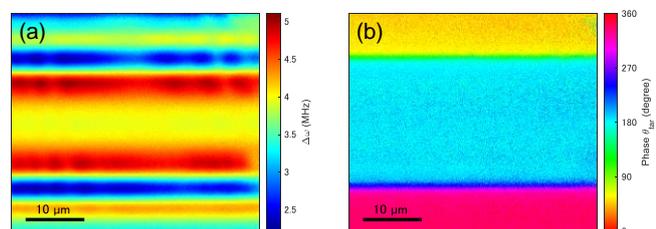


Fig. 2 Images of (a) magnitude and (b) phase of AC magnetic field generated by micro-circuit.

**【謝辞】**本研究の一部は、科研費 (No. 20H05661, 22H01558), Q-LEAP (No. JP-MXS0118067395), 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。また実験を支援いただいた京セラ株式会社に感謝申し上げる。

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

[3] Karl J. Hallböck, *et al.*, Proc. SPIE. 117004A (2021).

# 脳磁計測に向けたフラックスコンцентрレーターによる ダイヤモンド量子センサの高感度化

## Enhancement in the Sensitivity of Diamond Quantum Sensor using Flux Concentrator toward Magnetoencephalography

東工大<sup>1</sup> ○(M2)城田 一樹<sup>1</sup>, 関口 直太<sup>1</sup>, 岩崎 孝之<sup>1</sup>, 波多野 睦子<sup>1</sup>

Kazuki Shirota<sup>1</sup>, Naota Sekiguchi<sup>1</sup>, Takayuki Iwasaki<sup>1</sup>, Mutsuko Hatano<sup>1</sup>

E-mail: shirota.k.ac@m.titech.ac.jp

近年、ダイヤモンド中の窒素-空孔中心 (NV センタ) を用いたダイヤモンド量子センサの生体磁気計測への応用が注目されており、弱い生体磁場を測定するために高感度化の研究が行われている[1]。高感度化手法の一つとして、flux concentrator (FC) によって信号磁場を増強する (集磁する) 方法がある[2]。そこで本研究では、小動物であるラットの脳磁の測定を目的に、FC によるダイヤモンド量子センサの高感度化を行なっている。

Fig. 1(a)にフェライト (MN60) で作製した FC の模式図を示す。効率的に集磁するため、予想されるラット脳磁分布を考慮して FC を設計した。1 対の FC の間に NV センタを含むダイヤモンドを設置してダイヤモンド量子センサとして動作させ、FC で集磁した磁場を測定する。この系に対してコイルを用いて一様磁場  $B_0$  を印加し、磁気副準位  $|m_s = -1\rangle$  と  $|m_s = 1\rangle$  の間のゼーマン分裂幅を測定した (Fig. 1(b))。青線は印加した一様磁場から計算した FC なしの場合のゼーマン分裂幅 ( $2\gamma_e B_0$ ,  $\gamma_e = 28 \text{ GHz/T}$  は磁気回転比) を表している。測定したゼーマン分裂幅を FC なしの場合の分裂幅と比べると集磁率が計算でき、集磁率は約 7 倍であった。これにより、感度を 7 倍向上できると期待できる。

本研究で使用した NV センタを含むダイヤモンドの作製は、物質・材料研究機構および量子科学技術研究開発機構に行っていただいた。本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395 の助成を受けたものである。

[1] N. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Applied **21**, 064010 (2024).

[2] I. Fescenko *et al.*, Phys. Rev. Research **2**, 023394 (2020).

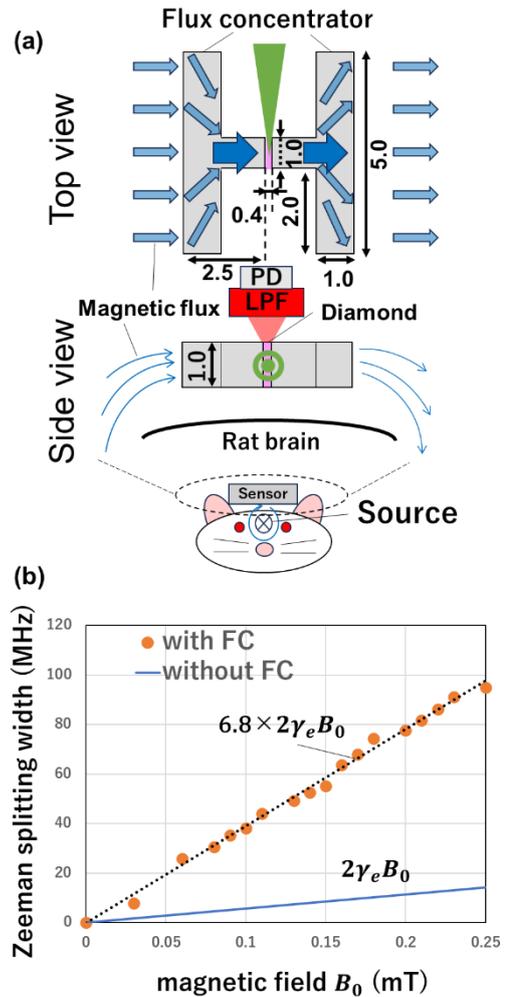


Fig. 1 (a) Schematic diagram of FCs.

PD:photo detector LPF:long pass filter

(b) Zeeman splitting width as a function of an applied magnetic field.

# 脳機能磁場測定用ダイヤモンドマイクロ NV センターアレー素子の開発 Development of Micro NV Center Array Element of Diamond (MAED) for Measuring Brain Function Magnetic Fields

理研 光量子<sup>1</sup>, 筑波大学<sup>2,4</sup>

○黒瀬 範子<sup>1</sup>, 小幡 孝太郎<sup>1</sup>, 野村 晋太郎<sup>2</sup>, 杉岡 幸次<sup>1</sup>, 和田 智之<sup>1</sup>, 青柳 克信<sup>1</sup>

RIKEN Center for Advanced Photonics<sup>1</sup>, Tsukuba Univ.<sup>2</sup>,

○Noriko Kurose<sup>1</sup>, Kotaro Obata<sup>1</sup>, Shintaro Nomura<sup>2</sup>, koji Sugioka<sup>1</sup>, Satoshi Wada<sup>1</sup>,

Yoshinobu Aoyagi<sup>1</sup>

E-mail: Noriko.kurose@riken.jp

生体機能の解明のために非侵襲で行う脳機能測定方法には脳波計(EEG)、脳磁計 (MEG)、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)、陽電子放出断層撮影(PET)などがある。その中で脳神経活動時におこる電気信号をとらえる MEG は高い分解能を持ち、fMRI 画像と重ね合わせて脳活動の測定に用いられている。MEG を用いた脳神経活動の局所情報は SQUID の素子の大きさできまっていたため、神経伝達のやりとりのより詳しい情報は SQUID の分解能でその得られる情報が限られていた。

そこで我々は、SQUID と同等の磁場感度をもつダイヤモンド NV センターを用いて、高分解能局所磁場測定素子の開発を試みた。素子の開発条件は、SQUID と同程度の磁場感度を持っていること、細胞単位での測定のため素子の大きさは  $20\ \mu\text{m}$  前後であること、素子をアレー状に並べて磁場の時系列測定ができること、非侵襲での測定であることの 4 点である。

この条件達成のため、フェムト秒レーザーを用いてダイヤモンド NV センターの品質を上げ、Fig.1 に示すようにダイヤモンドの厚み方向を長さとした導波路を作製することで NV センターからの赤色発光を閉じ込め集光し、高感度・高空間分解能の「縦型光導波路微小磁場計測素子」を開発した。Fig.2 は矩形型縦型光導波路内での発光の閉じ込め効果を示す (左図は導波路なし、右図は導波路あり)。導波路の大きさは  $15\ \mu\text{m}\sim 25\ \mu\text{m}$  四方、長さ  $250\ \mu\text{m}$  でアレー状に配置できる。高分解能局所磁場測定のダイナミックな計測が出来れば、脳神経活動あるいは脳神経伝達など脳の中の動きの詳細が可視化できるようになる。

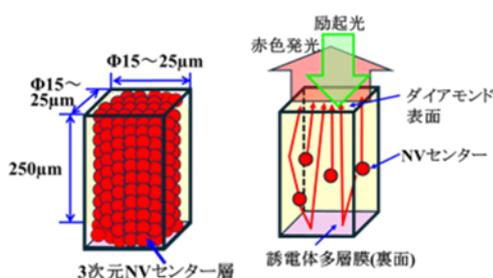


Fig.1 縦型光導波路構造図と光閉じ込め効果

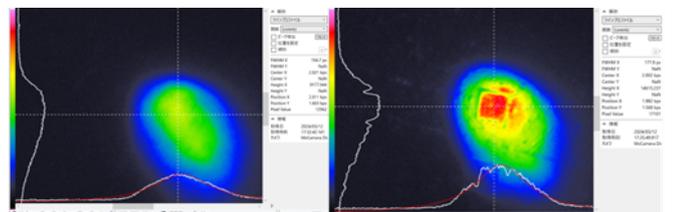


Fig.2 縦型導波路の有無によるダイヤモンドNVセンターからの赤色発光の強度の違い  
波長532nmのレーザーでNVセンターを励起し、NVセンターからの赤色発光をCCDで測定。導波路効果によって赤色が集光され発光強度が上がっていることが分かる

謝辞：本研究は天田財団、上原記念生命科学財団、池谷化学技術振興財団、中谷医工計測技術振興財団の支援を受け、立命館大学・荒木努教授、豊田工業大学・神谷格教授、豊田工業大学・岩田直高教授にご指導を頂きました。

## ダイヤモンド量子センサによる ミリメートル間隔での同時多点磁場測定法の開発

### Simultaneous multipoint measurement of magnetic field at a millimeter scale interval using diamond quantum sensors

東工大<sup>1</sup>, 筑波大<sup>2</sup>, NIMS<sup>3</sup>, QST<sup>4</sup>, °吉村 厚美<sup>1</sup>, 金本あゆみ<sup>1</sup>, 関口 直太<sup>1</sup>, 眞榮 力<sup>2</sup>,  
宮川 仁<sup>3</sup>, 谷口 尚<sup>3</sup>, 寺地 徳之<sup>3</sup>, 小野田 忍<sup>4</sup>, 大島 武<sup>4</sup>, 岩崎 孝之<sup>1</sup>, 波多野 睦子<sup>1</sup>

Tokyo Tech.<sup>1</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>2</sup>, NIMS<sup>3</sup>, QST<sup>4</sup>, °A. Yoshimura<sup>1</sup>, A. Kanamoto<sup>1</sup>, N. Sekiguchi<sup>1</sup>,  
C. Shinei<sup>2</sup>, M. Miyakawa<sup>3</sup>, T. Taniguchi<sup>3</sup>, T. Teraji<sup>3</sup>, S. Onoda<sup>4</sup>, T. Ohshima<sup>4</sup>, T. Iwasaki<sup>1</sup>, M. Hatano<sup>1</sup>

E-mail: [yoshimura.a.ac@m.titech.ac.jp](mailto:yoshimura.a.ac@m.titech.ac.jp)

ダイヤモンド中の窒素-空孔 (NV) 中心を利用したダイヤモンド量子センサは、室温でかつ広いダイナミックレンジで微小磁場を測定できる。これらの特徴から、ダイヤモンド量子センサによる生体磁場計測の研究が行われており[1-3]、我々のグループでも小動物の脳磁測定を試みてきた[4]。脳磁から脳活動を推定するには頭皮上の多数点において同時に脳磁を測定する必要がある。しかし現状では、センサヘッドの大きさやマイクロ波干渉などの要因により、ミリメートル間隔の多数点で磁場を高感度に同時測定することは難しい。本研究では、ラットの脳磁同時多点検出を目標に 3 mm 間隔の 2 点で同時に磁場を測定するダイヤモンド量子センサの開発に取り組んだ。

Fig. 1 に測定系を示す。同一のセンサヘッド内に、高温高压法で合成した (111) ダイヤモンドを 3 mm 間隔で 2 個並べて設置した。それぞれのダイヤモンドに側面から 532 nm のレーザー光を入射し、NV 中心からの赤色蛍光を 1 つのフォトダイオード (PD) で検出した。同時計測のポイントは各々のダイヤモンドに同一のバイアス磁場を加えた上で、空間的に不均一な磁場を印加して磁気共鳴ピークを分離させることである。これらの分離した共鳴ピークに対応する 2 つのマイクロ波磁場を異なる変調周波数で周波数変調し、ミリメートル間隔での 2 点同時測定を可能にした。一例として 2 つのダイヤモンドに逆位相のテスト磁場を印加し、3 mm の近距離でそれぞれの位置における磁場を同時に測定した結果を示す (Fig. 2)。それぞれの位置で測定した磁場は、印加したテスト磁場と一致していた。現在、高感度化や、より多点で測定するための開発を行っている。本研究は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) JPMXS0118067395 および JPMXS0118068379 の助成を受けたものである。

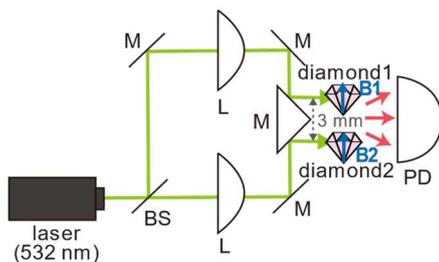


Fig. 1 Experimental setup

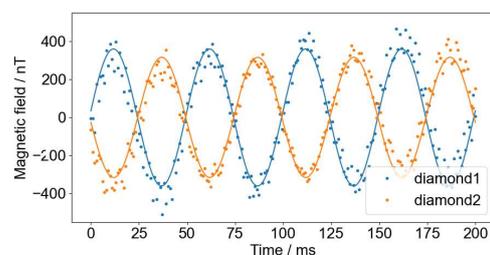


Fig. 2 Measurement of test magnetic field

[1] J. F. Barry *et al.*, Proc. Natl. Acad. Sci. **113**, 14133 (2016).

[2] K. Arai *et al.*, Comm. Phys. **5**, 200 (2022).

[3] N. Sekiguchi *et al.*, Phys. Rev. Applied **21**, 064010 (2024).

[4] A. Yoshimura *et al.*, The 84<sup>th</sup> JSAP Autumn Meeting, Kumamoto, 22p-A601-11 (2024).