$- \frac{v}{2}$

フタロシアニンイオンビーム注入によるダイヤモンド中への Multiple-NV セン ターの形成と観測

木村 晃介*, 加田 渉, 花泉 修	群馬大学大学院
小野田 忍, 山田 圭介, 大島 武	量子科学技術研究開発機構
寺地 徳之	物質・材料研究機構
磯谷 順一	筑波大学

A Nitrogen Vacancy (NV) center in diamond is known as a solid-state spin qubit at room temperature, and, especially, multiple-NV centers coupled by dipole-dipole interaction has a potential to realize quantum registers. Organic compound ion implantation is attracting attention as technique for creating multiple-NV centers because of its ability to implant nitrogen atoms as close as possible. This paper reported the results of implantation of phthalocyanine ion, which contains eight nitrogen atoms, into diamond, and observation of NV centers by Confocal Fluorescence Microscopy (CFM) and Optical Detected Magnetic Resonance (ODMR) method. Photon counting by CFM and ODMR spectra revealed that four NV centers were successfully created in one fluorescent spot.

Keywords: diamond, NV centers, ion implantation

1 まえがき

ダイヤモンド内の格子欠陥である窒素・空孔(Nitrogen Vacancy: NV)センターの負電荷状態は、基底 三重項状態(S=1)で電子スピンを持ち、スピン状態 の初期化と読み出しが光でできる点、スピン状態を マイクロ波で操作できる点、優れたコヒーレンス時間 を持つ点から,量子センシング^{1,2)}や量子コンピュー ティング³⁻⁵⁾としての応用が期待されている.量子コ ンピューティング分野においては,NVセンター間の 双極子相互作用^{5,6)}や,NVセンターの電子スピンと ¹⁴N/¹⁵N核スピンもしくは近接¹³C核スピンとの相互 作用^{3,7-9)}を用いて量子ビット間の操作を行う.量子 操作可能な量子ビット群は,量子状態を保持し記憶す る量子レジスタを形成する.一般的に量子コンピュー ターは,量子レジスタ内の量子ビットを操作すること によって計算を実行する.また,このような量子レジ スタの形成は,量子センシング分野においても,感度, 周波数分解能を向上させることが可能なため¹⁰⁾,注目 を浴びている.

NV センターで構成される量子レジスタ開発におけ る大きな課題は,多量子ビット化である.多量子ビッ ト化の実現には、複数の NV センターを近接した位 置に形成し、双極子結合させる必要がある.ダイヤ モンド内に NV センターを形成する手法として電子 線照射^{11,12)},イオン注入¹³⁻¹⁵⁾,フェムト秒レーザー照 射¹⁶⁾, プラズマ CVD 合成中に窒素ガスをドープする 手法^{17,18)}などがある。中でも、ナノホールマスク越 しの窒素 (N⁺) イオン注入は, Multiple-NV センター (双極子結合した複数のNV センター)の形成に有望な 手法であると考えられてきた¹⁹⁻²¹⁾. しかし 2016 年に Jakobi らは, 注入する N⁺ イオンのエネルギーと注入 量を最適化し、双極子結合した Triple-NV センター以 上の形成は困難であると結論付けた. Multiple-NV セ ンターを形成するもう1つの有力な手法は、分子イオ ン注入である^{14,22)}. 2013年に Yamamoto らは, 窒素分 子イオン (N⁺)を 20 keV で注入し, 55 kHz の強い双極 子結合を持つ Double-NV センターの形成を報告した. 20 keV で加速された N⁺₂ は,ダイヤモンド表面で 2 つ の窒素原子に分離して内部に注入される。注入された

Creation and Observation of Multiple–NV Centers in Diamond by Phthalocyanine Ion Beam Implantation

Kosuke KIMURA*, Wataru KADA and Osamu HANAIZUMI (Gunma University), Shinobu ONODA, Keisuke YAMADA and Takeshi OHSHIMA (National Institutes for Quantum Science and Technology), Tokuyuki TERAJI (National Institute for Materials Science), Junichi Isoya (University of Tsukuba), 〒370–1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

TEL: 027-346-9186, E-mail: onoda.shinobu@qst.go.jp

原子は空孔を作りながらダイヤモンド内部を進行し, ストラグリングによって決定される位置に停止する. そのため、2つのNVセンターを容易に近接した位置 に形成できる。当初,N3やN4といった窒素クラスタ を形成させ、単一分子内の窒素原子の数を増やすこと で、さらなる集積化を目指した。しかし、純粋な窒素 クラスタは化学構造が不安定であり、イオン化が難し いことから、NV センターの形成が困難である。そこ で,我々は窒素クラスタに代わって,窒素を含有する有 機化合物イオンを用いることを提案した²²⁾. 2019年 には、アデニン(C5N5H5)を原料とする有機化合物イ オン (C₅N₄H_n) をダイヤモンドに注入し, 双極子結合 した Triple-NV センターの形成に成功した²²⁾. さらに 2022 年には、C5N4Hn イオンよりも窒素原子数の多い 有機化合物イオンを用いることにより、さらに集積化 された Multiple-NV センターが形成できると考え、フ タロシアニン ($C_{32}N_8H_{18}$) イオンの注入を報告した²³⁾. 本稿では、C32N8H18 イオン注入によって形成された Multiple-NV センターの観測手法について紹介する. 主に共焦点レーザー走査型蛍光顕微鏡 (confocal laser scanning fluorescence microscopy: CFM) および光検出 磁気共鳴(optical detected magnetic resonance: ODMR) 測定システムの構築について説明する. さらに, これ らの測定システムを用いた Multiple-NV センターの解 析についても, Ref. 23 を引用しながら紹介する.

2 C₃₂N₈H₁₈ イオン注入および NV センターの形成

本節では、 $C_{32}N_8H_{18}$ イオン注入および NV センター の形成について述べる.本実験では $C_{32}N_8H_{18}$ イオン を 284 keV で加速し、ダイヤモンドに注入した.ダ イヤモンド試料は高温高圧 (High Pressure High Temperature: HPHT) 合成したダイヤモンド基板上にプラ ズマ CVD 法を用いて合成した厚み約 30 μ m の高純 度な IIa 型ダイヤモンド薄膜 (12 C 同位体濃縮,窒素 濃度 1 ppb 以下)を使用した.Figure 1(a) に $C_{32}N_8H_{18}$ イオン注入の模式図を示す.284 keV で加速された $C_{32}N_8H_{18}$ イオンはダイヤモンド表面に衝突すると窒 素,炭素,水素原子がそれぞれ7.7 keV, 6.6 keV, 0.6 keV のエネルギーを持つ原子に分解され、空孔を形成しな がらダイヤモンド内を進み、ある程度の拡がりをもっ て停止する.Figure 1(b) に SRIM²⁴⁾の 2 体衝突過程



Figure 1. Overview of implantation experiments. (a) Schematic image of 284 keV $C_{32}N_8H_{18}$ ion implantation. (b) Trajectories of nitrogen ions with energy of 7.7 keV simulated by SRIM. (c) The histogram of implanted nitrogen ions depth.

のシミュレーションによるダイヤモンド内の窒素原 子の飛跡を示す. 7.7 keV のエネルギーで加速した窒 素イオンの注入を 5000 回繰り返し,窒素イオンが停 止した位置の差を算出した.ただし今回はダイヤモ ンドの結晶構造は考慮していない.注入された窒素 イオン間の距離の平均値と標準偏差は (9±4) nm と 求められた.Figure 1(c) には,注入された窒素原子 とダイヤモンド表面との距離のヒストグラムを示す. 縦軸の Occurrence は単位面積あたりの個数に規格化 している.図内の曲線はヒストグラムをガウス関数 $f(x) = A \exp\{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\}$ でフィッティングした結果であ る ($A = 8.75 \times 10^5$, b = 11.8, c = 4.62).フィッティ ング結果から注入された窒素とダイヤモンド表面との 距離は (11.8±4.62) nm と計算された.

注入された窒素原子は,熱処理によって原子空孔と 結びつくことでNVセンターを形成する.また,熱処 理は,スピンノイズ源となる空孔欠陥を拡散させて取 り除き,ダイヤモンドの結晶構造を回復させる役割も 果たす.本実験では1000℃,2時間真空中でアニール した.次にNVセンターの負電荷の安定化のため,ダ イヤモンド表面の酸素終端処理として酸素環境下にお いて460℃,2時間のアニールを行った後,硝酸と硫 酸を1:3の割合で混合した熱混酸を用いて30分間の 酸処理を行った.

3 Multiple-NV センターの観測に使用する CFM およ び ODMR システムの構築

まず, CFM による NV センターの観察法について述 べる (Fig. 2(a) 参照).励起光として連続発振レーザー (532 nm, 100 mW)を対物レンズ(倍率×50,開口数 (NA) 0.95)を介してダイヤモンドの一点に照射し,ND フィルタを用いて対物レンズ手前において 200 μW に 統一した.対物レンズは操作幅 100 μm の 3 次元ピエ ゾステージに固定されており,上下左右前後に走査が 可能である.励起光によって生じる NV センターから の蛍光は,約 25 μm のピンホールと 647 nm ロングパス フィルタを通過した後,アバランシェフォトダイオー ド (avalanche photo diode: APD)検出器にて検出され た.ピエゾステージを走査させながら蛍光をプロット することで,CFM マップが得られる.Figure 2(b)は, C₃₂N₈H₁₈ イオンを注入したダイヤモンド表面付近の CFM マップである.蛍光スポットが観察され,NV セ ンターの形成が確認できる.

NV センターの蛍光強度については、レーザーの偏 光を調整し、全ての単一NV センターが同程度の蛍光 強度を示すよう調整した.レーザー偏光の調整には、 Fig. 3(a) のように 1/2 波長板を用いて行った.入射光 の偏光方向が、波長板に対して θ の角度で入射し場 合、その偏光方向を 2θ 回転させて出射することがで きる.NV センターの蛍光は配向軸と偏光方向が垂直 のとき最大となり、また NV センターはダイヤモンド 結晶構造に応じて4方位に配向する (Fig. 3(b))こと から、4 つすべての配向軸とレーザーの偏光方向が等 しい角度となるように波長板を調整した.その結果を Fig. 3(c) に示す.波長板を 10° 回転させた時、4 軸すべ ての NV センターの蛍光強度が 28 kcps 程度となった.

続いて, ODMR 測定システムについて述べる. ODMR 測定は, マイクロ波と外部磁場を用いて対象 電子スピンを共鳴させ, 蛍光強度変化を検出する測定 技術である. Figure 4(a) に, ODMR 測定システムのマ イクロ波印加部の模式図を示す. マイクロ波は, 直 径 30 μm の金ワイヤーをサンプル表面に固定するこ



Figure 2. (a) Schematic illustration of CFM. Some devices have been omitted for the sake of simplicity. (b) Example of a surface CFM map of phthalocyanine-implanted area.



Figure 3. (a) Schematic diagram of adjusting the laser polarization using a half-waveplate. (b) Orientation axes of NV centers. NV centers are oriented in four different directions in diamond. (c) Adjustment of photon counts with half-waveplate.



Figure 4. (a) Schematic diagram of ODMR measurement by applying microwaves to NV center. (b) Example of ODMR Spectra.

とによって印加した.NV センターはスピン状態で異 なる蛍光を示す.スピン磁気量子数 $m_s = \pm 1$ の電子 は、一重項状態 (S = 0) を経て蛍光を発さずに基底状 態へ戻る遷移確率が $m_s = 0$ と比較して高い.そのた め、マイクロ波 (約 2.87 GHz)を印加して、 $m_s = 0$ から $m_s = \pm 1$ に遷移させると、蛍光強度が減少し、 Fig. 4(b)の上側のスペクトルのように、2.87 GHz 付近 に窪み (ディップ)のあるスペクトルが得られる.さ らに、外部磁場を印加すると、縮退していたスピン 状態がゼーマン分裂し、ディップは2つに分裂する (Fig. 4(b)の下側のスペクトル)、ディップの分裂幅は $2\gamma B_{NV}$ (γ :電子の磁気回転比) であり, NV 軸と平行 な磁場成分 (Fig. 4(a) 中の B_{NV})の強さに比例する. Figure 3 に示した通り, NV センターはダイヤモンド 格子中で4つの方向に配向する. 異なる配向軸を持つ NV センターにおいては, 異なる分裂幅を持つディッ プが観測される.

4 CFM および ODMR 測定による Multiple-NV セン ターの観測

C₃₂N₈H₁₈ イオンを注入した領域に形成されたスポットの蛍光強度にはばらつきがみられる. これはス



Figure 5. CFM maps of fluorescent spots with different photon counts and photon count distributions.



Figure 6. Normalized histogram of photon counts observed by CFM. The solid lines indicate Gaussian fits. The inset shows a magnified figure in the range of 50 kcps–90 kcps. This figure is reprinted from Ref. 23.

ポット内に含まれる NV センターの数が異なること に由来する. 異なる蛍光強度を示す 4 つのスポットを Fig.5 に示す. 図中の CFM マップの大きさは $1 \times 1 \mu m^2$ である. CFM マップ内の × で示した直線方向の蛍光 強度分布から, 蛍光強度の平均とスポット径を評価 した. 曲線はガウス分布でフィッティングした結果で ある. 蛍光強度の高さは, それぞれ (a) 28.7 kcps, (b) 41.6 kcps, (c) 60.4 kcps, (d) 72.0 kcps と求められた. 半 値全幅 (FWHM) から算出されるスポット径は, それ ぞれ (a) 0.24 μ m, (b) 0.24 μ m, (c) 0.22 μ m, (d) 0.16 μ m

離で複数の NV センターが形成されたことが期待でき る. 蛍光強度の高さから,それぞれのスポットには(a) 1 個,(b) 2 個,(c) 3 個,(d) 4 個の NV センターを含 むと考えられる.そこで複数のスポットの蛍光強度を 測定し,ヒストグラムを作成した(Fig. 6, Ref. 23 か ら引用). 軸の Occurrence はヒストグラムを測定範囲 で割って,単位面積当たりの個数に規格化している. 緑,青,赤,黒の曲線は,ヒストグラムに対するガウ

と計算された。単一NV センターはこれらのスポット

径よりも十分に小さいため、スポット径よりも近い距



Figure 7. ODMR spectra of fluorescent spots with different photon counts. The photon counts of the spots are about (a) 27 kcps, (b) 45 kcps, (c) 60 kcps, and (d) 70 kcps, respectively. This figure is reprinted from Ref. 23.

スフィットである.まず, 7.60×10^{-5} cm²の測定領域 から,スポットに単一NV センターを含むスポットの 蛍光強度が得られた.さらに Multiple–NV センターを 含むスポットに対する統計を取るために,測定領域を 5.19×10^{-4} cm² に拡大し, 36 kcps 以上のスポットのみ を選出した.ガウス曲線からスポット内に含まれてい る NV センターの個数が 1つ, 2 つ, 3つ, 4 つと推定 されるスポット蛍光強度は,それぞれ (27 ± 3.8) kcps, (44±3.9) kcps, (60±2.8) kcps, (71±3.7) kcps であった.

ヒストグラムから得られた Multiple-NV センター の蛍光強度が NV センターの数に対応していること を確認するため、いくつかの蛍光スポットで ODMR 測定を行った, Ref. 23 から引用した ODMR スペク トル結果の一例を Fig. 7 に示す.上述したように異 なる配向軸の NV センターは、異なる分裂幅を持つ ディップとして観測されるため、スポット内のNV セ ンターの配向軸の種類をディップの本数から識別で きる. Figure 7(a) は 27 kcps 程度の蛍光強度を持つス ポットの ODMR スペクトルである. 磁場が印加され ているため、ゼーマン分裂が生じ、ディップが2か所 観測され、1つの配向軸を持つ NV センターのスペク トルであることが確認された. Figure 7(b), (c), (d) は それぞれ 45 kcps, 60 kcps, 70 kcps 程度の蛍光強度を 持つスポットの ODMR スペクトルであり, それぞれ 2つ,3つ,4つのNV センターを含む Multiple-NV セ

ンターであると予想される.また,ディップの本数より異なる配向軸の NV センターがそれぞれ2つ,3つ,4つ含まれていることがわかる.

5 まとめおよび今後の展望

本研究では、まず Multiple–NV センターの CFM 観 測および ODMR 測定システムの構築を行った.次に、 構築したシステムを用いて $C_{32}N_8H_{18}$ イオンによる Multiple–NV センターの形成を評価した. $C_{32}N_8H_{18}$ イ オンを注入した領域において NV センターを蛍光ス ポットとして確認できた.測定時、1/2 波長板を用い てすべての単一 NV センターの蛍光強度が均一となる ようレーザーの偏光を調整した.スポットの蛍光強度 と ODMR スペクトル測定を行い、4 つの NV センター を含む蛍光スポットの形成を明らかにした.これは、 2019 年の $C_5N_4H_n$ イオン注入²²⁾ では確認できなかっ た成果である.

今後の展望として第一に,Multiple-NV センター 観測システムのさらなる高度化である.今回用いた ODMR 測定システムでは,スポット内に存在する同軸 配向を持つ NV センターは,同じ周波数をもつため区 別することができない.このような課題を解決するた めには,ナノスケールで変化する傾斜磁場を導入し, 同軸の NV センターに異なる磁場を印加させ ODMR 測定を行う必要がある.アンサンブル NV センターに 傾斜磁場を印加させた報告はいくつかある^{25,26)}.第二 に,Multiple–NV センターのコヒーレンス時間の評価 である.コヒーレンス時間はスピン操作可能な時間を 制限するため,長いことが望まれる.長いコヒーレン ス時間を確保できれば,双極子–双極子相互作用を用 いた NV センター間の操作が可能となる.今回観測さ れた4つの NV センターが長いコヒーレンス時間を持 ち,さらに双極子–双極子相互作用によってコヒーレ ントに結合しているのならば,量子コンピューティン グをはじめ,量子センシングや量子通信といったさま ざまな分野で応用が期待される量子レジスタとなるだ ろう.

〈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, および 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)・JP-MXS0118067395, JPMXS011806837, 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 (JP MI00316) の支援を受け実施された. ここに感謝申し 上げる.

〈参考文献〉

- 1) C. L. Degan, Appl. Phys. Lett., 92 (2008) 243111.
- J. R. Maze, P. L. Stanwix, J. S. Hodges, S. Hong, J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Jiang, M. V. Gurudev Dutt, E. Togan, A. S. Zibrov, A. Yacoby, R. L. Walsworth, M. D. Lukin, Nature, 455 (2008) 644.
- J. Wrachtrup, S. Ya Kilin, A. P. Nizovtsev, Opt. Spectros., 91 (2001) 429.
- F. Jelezko, T. Gaebel, I. Popa, M. Domhan, A. Gruber, J. Wrachtrup, Phys. Rev. Lett., 93 (2004) 130501.
- P. Neumann, R. Kolesov, B. Naydenov, J. Beck, F. Rempp, M. Steiner, V. Jacques, G. Balasubramanian, M. L. Markham, D. J. Twitchen, S. Pezzagna, J. Meijer, J. Twamley, F. Jelezko, J. Wrachtrup, Nat. Phys., 6 (2010) 249.
- F. Dolde, I. Jakobi, B. Naydenov, N. Zhao, S. Pezzagna, C. Trautmann, J. Meijer, P. Neumann, F. Jelezko, J. Wrachtrup, Nat. Phys., 9 (2013) 139.
- 7) M. V. Gurudev Dutt, L. Childress, L. Jiang, E. Togan,

J. Maze, F. Jelezko, A. S. Zibrov, P. R. Hemmer, M. D. Lukin, Science, 316 (2007) 1312.

- T. H. Taminiau, J. J. T. Wagenaar, T. van der Sar F. Jelezko, V. V. Dobrovitski, R. Hanson, Phys. Rev. Lett., 109 (2012) 137602.
- 9) C. E. Bradley, J. Randall, M. H. Abobeih, R. C. Berrevoets, M. J. Degen, M. A. Bakker, M. Markham, D. J. Twitchen, T. H. Taminiau, Phys. Rev. X, 9 (2019) 031045.
- I. Lovchinsky, A. O. Sushkov, E. Urbach, N. P. De Leon, S. Choi, K. De Greve, R. Evans, R. Gertner, E. Bersin, C. Müller, L. Mcguinness, F. Jelezko, R. L. Walsworth, H. Park, M. D. Lukin, Science, 351 (2016) 836.
- A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup, C. von Borczyskowski, Science, 276 (1997) 2012.
- 12) A. Beveratos, S. Kühn, R. Brouri, T. Gacoin, J.-P. Poizat, P. Grangier, Eur. Phys. J. D, 18 (2002) 191.
- 13) J. Meijer, B. Burchard, M. Domhan, C. Wittmann, T. Gaebel, I. Popa, F. Jelezko, J. Wrachtrup, Appl. Phys. Lett., 87 (2005) 261909.
- T. Yamamoto, C. Müller, L. P. McGuinness, T. Teraji,
 B. Naydenov, S. Onoda, T. Ohshima, J. Wrachtrup, F. Jelezko, J. Isoya, Phys. Rev. B, 88 (2013) 201201(R).
- S. Pezzagna, B. Naydenov, F. Jelezko, J. Wrachtrup, J. Meijer, New J. Phys., 12 (2010) 065017.
- 16) Y.-C. Chen, P. S. Salter, S. Knauer, L. Weng, A. C. Frangeskou, C. J. Stephen, S. N. Ishmael, P. R. Dolan, S. Johnson, B. L. Green, G. W. Morley, M. E. Newton, J. G. Rarity, M. J. Booth, J. M. Smith, Nat. Photonics, 11 (2017) 77.
- 17) K. Ohno, F. J. Heremans, L. C. Bassett, B. A. Myers, D. M. Toyli, A. C. Bleszynski Jayich, C. J. Palmstrøm, D. D. Awschalom, Appl. Phys. Lett., 101 (2012) 082413.
- 18) T. Fukui, Y. Doi, T. Miyazaki, Y. Miyamoto, H. Kato, T. Matsumoto, T. Makino, S. Yamasaki, R. Morimoto, N. Tokuda, M. Hatano, Y. Sakagawa, H. Morishita, T. Tashima, S. Miwa, Y. Suzuki, N. Mizuochi, Appl. Phys. Express, 7 (2014) 055201.
- 19) D. M. Toyli, C. D. Weis, G. D. Fuchs, T. Schenkel, D. D. Awschalom, Nano Lett., 10 (2010) 3168.
- 20) S. Sangtawesin, T. O. Brundage, Z. J. Atkins, J. R. Petta, Appl. Phys. Lett., 105 (2014) 063107
- 21) I. Jakobi, S. A. Momenzadeh, F. Fávaro de Oliveira,

J. Michl, F. Ziem, M. Schreck, P. Neumann, A. Denisenko, J. Wrachtrup, J. Phys. Conf. Ser., 752 (2016) 012001.

- 22) M. Haruyama, S. Onoda, T. Higuchi, W. Kada, A. Chiba, Y. Hirano, T. Teraji, R. Igarashi, S. Kawai, H. Kawarada, Y. Ishii, R. Fukuda, T. Tanii, J. Isoya, T. Ohshima, O. Hanaizumi, Nat. Commun., 10 (2019) 2664.
- 23) K. Kimura, S. Onoda, K. Yamada, W. Kada, T. Teraji, J. Isoya, O. Hanaizumi, T. Ohshima, Appl. Phys. Express, 15 (2022) 066501.
- 24) J. F. Ziegler, M. D. Ziegler, J. P. Biersack, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. Atoms, 268 (2010) 1818.
- 25) S. Bodenstedt, I. Jakobi, J. Michi, I. Gerhardt, P. Neumann, J. Wrachtrup, Nano Lett., 18 (2018) 5389.
- 26) H. Zhang, K. Arai, C. Belthangady, J. -C. Jaskula, R. L. Walsworth, npj Quantum Inf., 3 (2017) 31.

〈著者略歴〉

木村 晃介: 群馬大学大学院 理工学府理工学専攻 電子 情報・数理領域 博士後期課程.

加田 渉: 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門 准教

授(現職).博士(工学).

花泉 修: 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門 教授 (現職). 工学博士.

小野田 忍: 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム 科学部門 高崎量子応用研究所 量子機能創製研究セン ター 上席研究員(現職). 博士(工学).

山田 圭介: 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科 学部門 高崎量子応用研究所 放射線高度利用施設部 イ オン加速器管理課 主任技術員(現職).

大島 武: 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学 部門 高崎量子応用研究所 量子機能創製研究センター センター長(現職). 博士(工学).

寺地 徳之:物質・材料研究機構 機能性材料研究拠点 ワイドバンドギャップ材料グループ 主席研究員(現 職).博士(工学).

磯谷 順一: 筑波大学 図書館情報メディア研究科 名誉教授.博士(理学).