

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26246001

研究課題名(和文)ダイヤモンド中のNVセンターのナノ配列作製による数量子ビット量子レジスタの実現

研究課題名(英文) Realization of several-qubit quantum register by fabrication of nanoscale-array of NV centers in diamond

研究代表者

磯谷 順一 (ISOYA, Junichi)

筑波大学・図書館情報メディア系(名誉教授)・名誉教授

研究者番号：60011756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,000,000円

研究成果の概要(和文)：室温量子スピンとして優れたNVセンタ同士の相互作用に着目した。量子レジスタの多量子ビット化をめざして、短い距離(～13 nm)のNVセンタ配列を規則的なナノホール配列をもつマスク注入により作製する技術を開発した。平均距離～5 nmの高濃度NVセンタを作製し、離散的時間結晶の生成を室温で実証した。単一NVセンタにもナノホール注入を応用し、量子センサー・アレイを作製した。量子アルゴリズムを高磁場測定と組み合わせたナノNMRにおいて超微量の試料のケミカルシフトを観測する高分解能を達成した。高品質結晶合成により、結晶中の離れた位置のSiV-センタから識別できない単一光子を発生することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, we have developed fabrication methods of introducing strong mutual interactions into NV centers which have excellent properties as quantum spins at room temperature. By implanting molecular nitrogen ions through masks with regularly arranged nano-holes, multi-NV centers having the distances of ~13nm have been fabricated as regular arrays. By fabricating a three-dimensional ensemble of NV centers of an average distance of ~5 nm, the creation of the discrete time crystal has been experimentally demonstrated. Secondly, nano-hole implantation has been applied for fabricating regular array of quantum sensors of shallow single NV centers. In nano-NMR, by combining high field measurements, quantum algorithms, and high-quality HPHT crystal, high resolution detecting chemical shift has been achieved for samples of ultra-micro quantity. By the growth of high quality CVD crystals, the generation of indistinguishable single photons from separate SiV- centers has been demonstrated.

研究分野：ダイヤモンドのカラーセンタを用いる量子デバイスの開発

 キーワード：ダイヤモンド 量子レジスタ 量子センシング 離散的時間結晶 ナノNMR HOM量子干渉 動的核分極
イオン注入

1. 研究開始当初の背景

(1) ダイヤモンドのNV(nitrogen-vacancy)センタは、1997年に単一分子に相当する単一欠陥の検出、単一欠陥のESRスペクトルの観測が報告[1]されて以来、室温・常圧動作のスピ量子ビットとして、量子コンピューティングへの応用の研究が行われてきた。単一NVセンタに伴う電子スピンは、室温で、光による初期化・スピンの読み出し、マイクロ波パルスによるコヒーレント操作ができ、コヒーレンス時間が長いなど「室温量子スピン」と呼ばれるにふさわしい特性をもつ。NV-NVペアを用いた電子スピン2量子ビットの量子レジスタ[2]、3個の核スピン(^{14}N と2個の ^{13}C)と電子スピンのハイブリッド量子レジスタによる量子エラー訂正プロトコルの実証[3]などが示された。量子レジスタの多量子ビット化にはコヒーレンス時間/ゲート操作時間の比を高くすることが重要となる。NVセンタの配列を構成するNVセンタの数を増やす方式の多量子ビット化は、NVセンタ間の強い双極子双極子相互作用をもたらす短い距離が求められる。

(2) 超伝導量子回路、量子ドット、シリコン中の燐ドナーなど低温を必要とする他の固体量子ビットを含めて、量子を操作する技術が飛躍的に進展し、量子コンピューティング・量子通信に加えて、量子シミュレーション、量子センシングへと展開が進んでいる。そのなかで、最近SiC中の欠陥が加わったとは言え、NVセンタは室温量子スピンとして独自の位置を保ってきていた。

(3) 量子情報の長距離伝送に加えて量子ネットワークによる拡張には光子が必要である。NVセンタはスピン特性には優れているが、発光のうちZPLの割合が4%にすぎないなど、光特性においては弱点をもっている。

2. 研究の目的

(1) 隣接するNVセンタ同士がコヒーレント結合したナノスケールの短い距離をもつNVセンタ配列を作製して、室温動作の量子レジスタの数量子ビットへの拡張をめざす。

(2) NVセンタ以外にも量子情報デバイス応用に優れたカラーセンタを探索する。高品質の結晶合成に加えて、位置および濃度を制御して特性に優れたカラーセンタを作製するというダイヤモンド材料科学の最先端技術を活かして、量子操作技術の進歩、固体量子デバイスの開発に貢献する。

3. 研究の方法

(1) $^{12}\text{C}99.998\%$ 濃縮・高純度・高結晶性、平坦な成長面をもつ化学気相成長(CVD)単結晶の合成を初めとして、本研究グループがもつ最先端のダイヤモンド結晶合成技術によって作製した基板を用いる。これに注入後の熱処理条件、高温電子線照射など、欠陥制御に優れた方法を開発し、特性に優れたカラーセンタを作製する。

(2) ナノホール注入(EBリソグラフィを用いて、レジスト・マスクに規則的配列として作製したナノホールを通して複数の低エネルギー窒素分子イオン/窒素イオンを注入)を用いて、位置およびスポット当たりの数を制御してカラーセンタを作製する。

4. 研究成果

(1) 量子レジスタの作製

本研究では、室温動作の量子レジスタを数量子ビットに拡張することをめざした。NVセンタの配列を用いる量子レジスタでは、単一スピンの回転操作は速いので、隣接するスピンの間の双極子双極子相互作用による2量子ビットCNOTゲートを高速にする短い距離が求められる。イオン注入による位置制御はストラグリングで制限される。FIBとなる窒素イオン源がないので、ナノスケールのNV配列を散在的に作製するのは困難である。このためEBリソグラフィで作製した規則的に並んだナノホール(径16nm)を持つレジスト・マスクを用い、平坦な成長面を持つ ^{12}C 濃縮・高純度CVDダイヤモンド結晶に、窒素分子イオン($^{15}\text{N}_2^+$, 20 keV)注入、熱処理(1000°C)によって、距離 ~ 13 nmのNVセンタ配列を蛍光スポット配列として作製する技術を開発した。図1に示したように、NVセンタ配列は共焦点顕微鏡で読み取れるアドレスマーカをもつ、規則的なスポット配列を形成する個々のスポットとして作製される。注入フルエンスを変えることにより、NVセンタ数/スポットのポアソン分布の平均値(0.97 \sim 20)を制御できた(図2)。ODMRスペクトルから、個々の電子スピンを識別できる2個 \sim 4個の配列作製の再現性が確かめられた。短いゲート操作時間をもたらす短い距離をもつ配列の作製は達成されたと考えられ、電荷の安定化(k個のNVセンターからなる配列はkの電荷をもつ)とコヒーレンス時間の改善の段階(追成長、燐ドーピング、表面処理)に進むことができた。

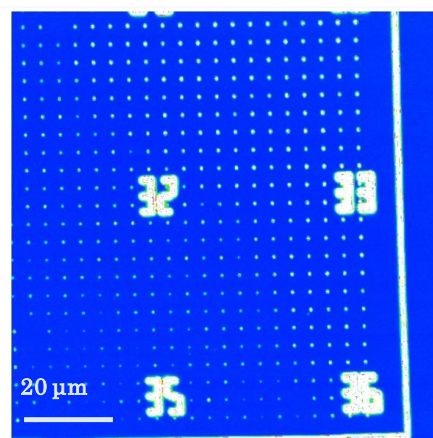


図1 ナノホール注入(20keV, $^{15}\text{N}_2^+$, $2.5 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$)によって作製した1スポット当たり数個のNVセンタからなる蛍光スポット配列の共焦点顕微鏡イメージ(xyスキャン)

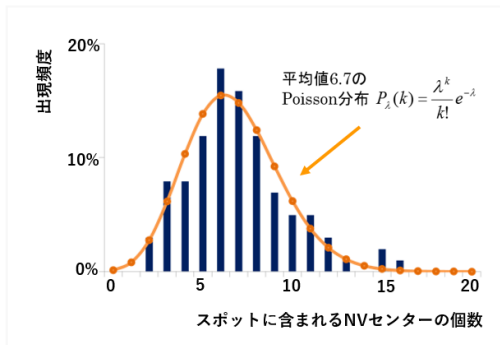


図2 NV センタ数/スポットの分布

(2) 浅い NV センタの量子センサー・アレイの作製

量子レジスタ作製では、ひとつのナノホールを通して多数の窒素分子イオンを注入したスポット毎に2個以上の NV センタからなる配列を作製した。アドレスマーカをもつ規則的なスポット配列は、多くの注入サイトから量子レジスタに適したものを効率よく探し出すのに役立つ。注入エネルギー、注入フルエンスを低くすることにより、外部の核スピンの NMR シグナルの量子センシング検出に適した、浅い単一 NV センタを規則的な配列として作製することができる。EB リソグラフィを用いて PMMA レジスト・マスク (厚さ ~200 nm) に作製した規則的な配列のナノホール (径~20 nm) を使い、単一 NV センタ (スポット当たりの NV センタ数のポアソン分布の平均値 1.40 が得られた) の配列を作製した (図3, 4)。各 NV センタの深さは、XY8-N 法を用いて、ダイヤモンド表面のイメージジョンオイルの $^1\text{H-NMR}$ から高精度に求められ (2~10nm の分布をもつことがわかった)、ナノ NMR 用のプローブとして使えることが示された。アドレスマーカをもつ規則的配列として作製されており、望みの深さ (検出体積を決める) の NV に再現性良く容易にアクセスできる量子センサー・アレイが作製できた。

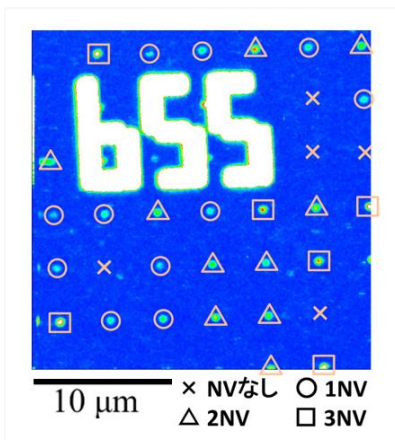


図3 ナノホール注入 (2.5keV, $^{15}\text{N}^+$, $1 \times 10^{12}\text{cm}^{-2}$) によって作製した量子センサー・アレイの共焦点顕微鏡イメージ (xy スキャン)

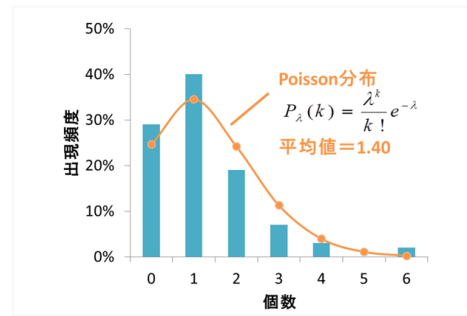


図4 NV センタ数/スポットの分布
ナノホール (径 20 nm) 窒素イオン注入 (2.5 keV, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$)

(3) 離散的時間結晶

高温電子線照射 (2 MeV, ~800°C) を用いて NV センタを高濃度 (45 ppm、平均距離 5 nm) に作製し、室温量子スピンが相互作用する量子多体系として、「非平衡状態を長く保つことができ、強い相互作用と不規則性をもつ量子スピンの集団」を実現した。これにより、非平衡の状態での存在が理論的に予測されていた「離散的時間結晶」の室温での生成を実証することに成功した。この成果は、10 個の Yb イオンの配列という極低温の捕獲イオンの実験 (メリーランド大学) と並んで Nature に掲載された。我々の実験では、($\sim 0.5 \mu\text{m}$)³ の体積に存在する ~100 万の NV センタという 3 次元系を用いた。レーザーによる光ポンピング ($M_s=0$ にそろえる、量子化軸は z 方向) に続いて、 $(-\pi/2)_y$ マイクロ波パルスにより回転系の +x 方向にスピンの向きがそろった初期状態を生成する。その後 +x 方向のマイクロ波パルスによるスピンロッキング (時間 τ_1) と +y 方向のマイクロ波パルスによる角度 $\theta (= \pi)$ の回転操作 (時間 τ_2) の組み合わせを 2n 回繰り返したのち、初期状態との相関を蛍光強度として読み出した。駆動のもつ周期 T ($\tau_1+\tau_2$) の繰り返しという時間並進対称性を破り、周期 2T の時間並進対称性 (周期 2T で初期状態に戻る繰り返しの振動が $n \sim 100$ と長く続く) を観測した。駆動する外場に不完全性 (回転角 θ を π からずらす) を導入しても、周期 2T を保って初期状態へ戻るという頑丈さをもつことを示すことができた。また相互作用時間 (τ_1) 及び駆動場の不完全性 (π からのずれ) を系統的に変えて時間結晶の相と、時間結晶が融解した相との境界を求めることができた。離散的時間結晶が駆動する外場の不完全性に対して頑丈であることは、量子コンピュータにとって重要な量子メモリや高精度の量子測定にも寄与すると考えられる。

(4) 量子センシング NMR

単一の NV センタを用いる量子センシングにおいて、従来の NMR よりも 11 桁も低い超極微量の試料に対して、1 ppm の周波数分解能を達成した。これにより ^1H 核および ^{19}F 核

のナノ NMR において、結合状態が異なる原子をケミカルシフトとして識別することに成功した。この高分解能は、①3T の高磁場を用いること、② ^{15}N 核スピン (スピン格子緩和時間 260 秒) をメモリとして用いること、③コヒーレンス時間の長い NV センタによりセンサの感度を上げて検出体積を大きくしたこと、④量子コンピューティングへの応用で培われてきた量子もつれや量子非破壊測定を含む量子アルゴリズムを用いたことによりもたらされた。ナノ NMR の高分解能化によって、極微量の試料の化学構造の情報が得られることは、量が少ないために NMR を使えなかったという試料が多い医学・医療、生物学の道具として、これらの分野に革命的变化を起こすことが期待できる。

(5) SiV-センタ

本研究では、NV センタ以外にも、量子情報デバイス応用に優れた特性をもつカラーセンタの探索を行っている。SiV-センタは発光の 70% が、線幅が狭く長波長 (738nm) の ZPL に集中しているので、量子通信用の単一光子源、バイオマーカーとして適している。空間的に離れた単一光子源から識別できない光子を発生することは量子テレポーテーションにおいて 2 つの光子の量子もつれを生成するのに不可欠の条件である。本研究では、高純度に加えて結晶性が高く歪みが極めて少ない高品質の CVD 単結晶を合成した。これに単一欠陥として観測できる低濃度 ($\sim 0.1 \mu\text{m}^{-3}$) の SiV-センタを成長時導入欠陥として作りこんだ。これを用いて、結晶格子中の異なる位置の SiV-センタから放出される 2 つの単一光子が識別できないことを示す Hong-Ou-Mandel 量子干渉の実験に成功した。さらに、ラムダ型遷移を用い、低温で光によって電子スピンを初期化し、そのスピン格子緩和時間、コヒーレンス時間を測定するとともに、重ね合わせ状態の生成の証拠となる CPT (coherent population trapping) を観測した。今まで ESR も観測されていなかった SiV-センタ ($S=1/2$) がスピン量子ビットとして機能することを示すことができた。

(6) その他

超伝導量子ビットとハイブリッド系をなす NV センタ・アンサンブル・メモリにおいて蓄積・読み出しの効率の一桁以上の改善を示した。

NV センタの電子スピンのスピンロッキングのラビ周波数を ^{13}C -NMR 周波数に同調する Hartmann-Hahn 法を用いる動的核分極を用いて、室温で光ポンピングによる NV センタの偏極を ^{13}C 核スピンの核スピン集団の効率的な高偏極が得られた。これは ^{13}C をプローブとしてナノダイヤモンド・バイオマーカーをドラッグ・デリバリーに用い、MRI を用いて追跡する方法につながる。

引用文献

- [1] A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, L. Fleury, J. Wrachtrup and C. von Borczyslawski, “*Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers*”, *Science*, **276** (1997), 2012-2014.
- [2] F. Dolde, I. Jakobi, B. Naydenov, N. Zhao, S. Pezzagna, C. Trautmann, J. Meijer, P. Neumann, F. Jelezko and J. Wrachtrup, “*Room-temperature entanglement between single defect spins in diamond*”, *Nature Phys.* **9** (2013), 139-143.
- [3] G. Waldherr, Y. Wang, S. Zaiser, M. Jamali, T. Schulte-Herbrüggen, H. Abe, T. Ohshima, J. Isoya, P. Neumann, J. Wrachtrup, “*Quantum error correction in a solid-state hybrid spin register*”, *Nature* **506** (2014), 204-207.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 19 件)

- ① N. Aslam, M. Pfender, P. Neumann, R. Reuter, A. Zappe, F. F. de Oliveira, A. Denisenko, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, J. Wrachtrup, “*Nanoscale nuclear magnetic resonance with chemical resolution*”, *Science*, 査読有、*Science* 10.1126/science.aam8697 (2017).
- ② 磯谷順一、寺地徳之、小野田忍、NV-センタの構造・物理・SiV-センタとの比較、*New Diamond*, 査読無、**33** (2017), 14-22
- ③ J. Choi, S. Choi, G. Kucsko, P. C. Maurer, B. J. Shields, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, E. Demler, F. Jelezko, N. Y. Yao, and M. D. Lukin, “*Depolarization dynamics in a strongly interacting solid-state spin ensemble*”, *Phys. Rev. Lett.* 査読有、**118**, (2017), 093601(1-6)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.093601
- ④ S. Choi, J. Choi, R. Landig, G. Kucsko, H. Zhou, J. Isoya, F. Jelezko, S. Onoda, H. Sumiya, V. Khemani, C. von Keyserlingk, N. Y. Yao, E. Demler and M. D. Lukin, “*Observation of discrete time-crystalline order in a disordered dipolar many-body system*”, *Nature*, 査読有、**543** (2017) 221-225
DOI: 10.1038/nature21426
- ⑤ T. Teraji, J. Isoya, K. Watanabe, S. Koizumi, Y. Koide, “*Homoepitaxial diamond chemical vapor deposition for ultra-light doping*”, *Materials Science Semiconductor Processing*, 査読有、(2016)
DOI: 10.1016/j.mssp.2016.11.012
- ⑥ C. Grezes, Y. Kubo, B. Julsgaard, T. Umeda, J. Isoya, H. Sumiya, H. Abe, S. Onoda, T. Ohshima, K. Nakamura., “*Towards a spin-ensemble quantum memory for quantum qubits*”, *Comptes Rendus*

- Physique, 査読有、**17** (2016), 693-704
DOI: 10.1016/j.cry.2016.07.006
- ⑦ A. Angerer, T. Astner, D. Wirtitsch, H. Sumiya, S. Onoda, J. Isoya, S. Putz, and J. Majer, “Collective strong coupling with homogeneous Rabi frequencies using a 3D lumped element microwave resonator”, Appl. Phys. Lett. 査読有、**109** (2016), 033508(1-5)
DOI: 10.1063/1.4959095
- ⑧ G. A. Álvarez, C. O. Bretschneider, R. Fischer, P. London, H. Kanda, S. Onoda, J. Isoya, D. Gershoni and L. Frydman “Local and bulk ^{13}C hyperpolarization in nitrogen-vacancy-centred diamonds at variable fields and orientations”, Nature Commun. 査読有、**6** (2015), 8456(1-8)
DOI: 10.1038/ncomms9456
- ⑨ N. Aslam, M. Pfender, R. Stöhr, P. Neumann, M. Scheffler, H. Sumiya, H. Abe, S. Onoda, T. Ohshima, J. Isoya, and J. Wrachtrup “Single spin optically detected magnetic resonance with 60-90 GHz (E-band) microwave resonators”, Rev. Sci. Instrum. 査読有、**86** (2015), 064704(1-8)
DOI: 10.1063/1.4922664
- ⑩ C. Grezes, B. Julsgaard, Y. Kubo, W. L. Ma, M. Stern, A. Bienfait, K. Nakamura, J. Isoya, S. Onoda, T. Ohshima, V. Jacques, D. Vion, D. Esteve, R. B. Liu, K. Mølmer, and P. Bertet, “Storage and retrieval of microwave fields at the single-photon level in a spin ensemble”, Phys. Rev. A、査読有、**92** (2015), 020301(R) (1-5)
DOI: 10.1103/PhysRevA.92.020301
- ⑪ S. J. Scheuer, I. Schwartz, Q. Chen, D. Schulze-Sünninghausen, P. Carl, P. Höfer, A. Retzker, H. Sumiya, J. Isoya, B. Luy, M. B. Plenio, B. Naydenov and F. Jelezko, “Optically induced dynamic nuclear spin polarization in diamond”, New J. Phys. 査読有、**18** (2016) 01304(1-6)
DOI: 10.1088/1367-2630/18/1/013040
- ⑫ T. Teraji, T. Yamamoto, K. Watanabe, Y. Koide, J. Isoya, S. Onoda, T. Ohshima, L. J. Rogers, F. Jelezko, P. Neumann, J. Wrachtrup, and S. Koizumi, “Homoepitaxial diamond film growth: High purity, high crystalline quality, isotopic enrichment, and single color center formation”, Phys. Status Solidi A 査読有、**212** (2015), 2365-2384
DOI: 10.1002/pssa.201532449
- ⑬ 磯谷順一、ダイヤモンドのNVセンターを用いる量子デバイスの開発、放射線と産業、査読無、**138** (2015), 38-43
- ⑭ A. Sipahigil, K.D. Jahnke, L.J. Rogers, T. Teraji, J. Isoya, A.S. Zibrov, F. Jelezko, and M. D. Lukin, “Indistinguishable Photons from Separated Silicon-Vacancy Centers in Diamond”, Phys. Rev. Lett. 査読有、**113** (2014), 113602
DOI: 10.113/PhysRevLett.113.113602(1-5)
- ⑮ L. J. Rogers, K. D. Jahnke, M. H. Metsch, A. Sipahigil, J. M. Binder, T. Teraji, H. Sumiya, J. Isoya, M. D. Lukin, P. Hemmer, and F. Jelezko, “All optical initialization, readout, and coherence preparation of single silicon-vacancy spins in diamond”, Phys. Rev. Lett. 査読有、**113** (2014), 263602(1-5)
DOI: 10.113/PhysRevLett.113.263602
- ⑯ A. Dietrich, K. D. Jahnke, J. M. Binder, T. Teraji, J. Isoya, L. J. Rogers and F. Jelezko, “Isotopically varying spectral features of silicon vacancy in diamond”, New J. Phys. 査読有、**16** (2014) 113019(1-10)
DOI: 10.1088/1367-2630/16/11/113019
- ⑰ L. J. Rogers, K. L. D. Jahnke, L. Marseglia, C. Müller, B. Naydenov, H. Schauffert, C. Kranz, T. Teraji, J. Isoya, L. P. McGuinness, and F. Jelezko, “Multiple intrinsically identical single-photon emitters in the solid state”, Nature Commun. 査読有、**5** (2014), 4739(1-6)
DOI: 10.1038/ncomms5739
- ⑱ S. Tamura, G. Koike, A. Komatsubara, T. Teraji, S. Onoda, L. P. McGuinness, L. Rogers, B. Naydenov, E. Wu, L. Yan, F. Jelezko, T. Ohshima, J. Isoya, T. Shinada, and T. Tani, “Array of bright silicon-vacancy centers in diamond fabricated by low-energy focused ion beam implantation”, Appl. Phys. Exp. 査読有、**7** (2014), 115201(1-4)
DOI: 10.7567/APEX.7.115201
- ⑲ T. Yamamoto, S. Onoda, T. Ohshima, T. Teraji, K. Watanabe, S. Koizumi, T. Umeda, L. P. McGuinness, C. Müller, B. Naydenov, F. Dolde, H. Fedder, J. Honert, M. L. Markham, D. J. Twitchen, J. Wrachtrup, F. Jelezko, and J. Isoya, “Isotopic identification of engineered nitrogen-vacancy spin qubits in ultrapure diamond”, Phys. Rev. B 査読有、**90** (2014), 081117(R)(1-6)
DOI: 10.1103/PhysRevB.90.081117

〔学会発表〕 (計 52 件)

- ① 福田諒介, 東又格, 岡田拓真, 加賀美理沙, 寺地徳之, 小野田忍, 春山盛善, 山田圭介, 稲葉優文, 山野楓, P. Balasubramanian, F. Stuenkel, S. Schmitt, L. McGuinness, F. Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 加田渉, 花泉修, 磯谷順一, 谷井孝至, 浅い単一 NV センターの規則的配列を用いた表面の水素核スピンの検出、第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017.3.14, パシフィコ横浜、神奈川県横浜市)
- ② 東又格, 岡田拓真, 加賀美理沙, 寺地徳之, 小野田忍, 春山盛善, 山田圭介, 稲葉優文, 山野楓, P. Balasubramanian, F. Stuenkel, S. Schmitt, L. McGuinness, F. Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 加田渉, 花泉修, 磯谷順一, 谷井孝至, 量子センシングのための浅い単一 NV センターの規則配列形成: イメージングオイル中の水素核スピン計測、第30回 ダイヤモンド

シンポジウム, (2016.11.16, 東京大学駒場リサーチキャンパス、東京都目黒区)

③ 東又格, 岡田拓真, 加賀美理沙, 寺地徳之, 小野田忍, 春山盛善, 山田圭介, 稲葉優文, 山野颯, P. Balasubramanian, L. P. McGuinness, B. Naydenov, F. Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 加田渉, 花泉修, 磯谷順一, 谷井孝至, ナノホールレジストマスクを用いた低エネルギーイオン注入による量子センシングのための NV センター配列の作製, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016.9.13, 朱鷺メッセ、新潟県新潟市)

④ 岡田拓真, 東又格, 加賀美理沙, 寺地徳之, 小野田忍, 山田圭介, 春山盛善, 稲葉優文, 山野颯, P. Balasubramanian, B. Naydenov, L. McGuinness, F. Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 加田渉, 花泉修, 磯谷順一, 谷井孝至, ナノホールレジストマスクを用いた NV センター配列の作製II, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016.9.13, 朱鷺メッセ、新潟県新潟市)

⑤ 加賀美理沙, 東又格, 岡田拓真, 寺地徳之, 小野田忍, 春山盛善, 大島武, 品田高宏, 加田渉, 花泉修, 磯谷順一, 谷井孝至, イオン注入を用いた SiV センターの作製と生成収率のエネルギー依存性評価、第 77 回応用物理学会秋季学術講演会 (2016.9.13, 朱鷺メッセ、新潟県新潟市)

⑥ I. Higashimata, G. Koike, T. Teraji, S. Onoda, M. Inaba, P. Balasubramanian, L. P. McGuinness, B. Naydenov, F. Jelezko, T. Ohshima, T. Shinada, H. Kawarada, J. Isoya, T. Tani, Fabrication of nitrogen-vacancy centers by implantation through nano-holes in resist mask, The 67th Diamond Conference (July 11-14, 2016, University of Warwick, Coventry, United Kingdom)

⑦ 小池悟大, 東又格, 寺地徳之, 小野田忍, 稲葉優文, P. Balasubramanian, B. Naydenov, F. Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 磯谷順一, 谷井孝至, ナノホールレジストマスクを用いた NV センター配列の作製, 第 29 回ダイヤモンドシンポジウム, 2015.11.17-19, 東京理科大学葛飾キャンパス (東京都葛飾区)

⑧ 東又格, 小池悟大, 寺地徳之, 小野田忍, 稲葉優文, Priyadharshini Balasubramanian, Boris Naydenov, Fedor Jelezko, 大島武, 品田高宏, 川原田洋, 磯谷順一, 谷井孝至, ナノホールレジストマスクを用いた NV センター配列の作製, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015.9.13-16, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市)

⑨ G. Koike, I. Higashimata, T. Okada, T. Teraji, S. Onoda, M. Inaba, P. Balasubramanian, B. Naydenov, F. Jelezko, T. Ohshima, T. Shinada, H. Kawarada, J. Isoya, T. Tani, "Fabrication of nitrogen-vacancy center array by electron-beam lithography and ion implantation", Diamond Quantum Sensing Workshop, 2015.8.5-7., Kagawa International Conference Hall (香川県

高松市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯谷順一 (ISOYA Junichi)
筑波大学・図書館情報メディア系 (名誉教授)・名誉教授
研究者番号: 60011756

(2) 研究分担者

谷井孝至 (TANII Takashi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 20339708

小野田 忍 (ONODA Shinobu)
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所・先端機能材料研究部・主幹研究員 (定常)
研究者番号: 30414569

寺地徳之 (TERAJI Tokuyuki)
国立研究開発法人物質・材料研究機構・機能性研究拠点・主幹研究員
研究者番号: 50332747

川原田洋 (KAWARADA Hiroshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 90161380

(3) 研究協力者

角谷 均 (SUMIYA Hitoshi)
住友電気工業株式会社・アドバンストマテリアル研究所・技師長/フェロー

Fedor Jelezko
ウルム大学・量子光学研究室・教授