

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18726

研究課題名（和文）核スピン量子多体系の状態制御と読み取り

研究課題名（英文）Control and readout of nuclear spin quantum many-body states

研究代表者

野村 晋太郎（Nomura, Shintaro）

筑波大学・数理解物質系・准教授

研究者番号：90271527

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ダイヤモンドのフッ素化表面処理による核スピン格子の作製に関する研究、核スピン量子多体系状態の電子スピンと光を介した読み出し制御システムの構築、アダマール基底を用いたAC磁場高感度検出法の研究、核スピン量子多体系の状態の読み出しと制御に関する研究を行った。スピンロッキング法によりAC磁場を高感度に検出することに成功し、RF電磁波の空間分布を従来にないマイクロメートルの空間分解能で得ることに成功した。スペクトル線幅の広くパルス幅の短い非選択的なマイクロ波パルスを用いて核スピン状態の初期化に成功し、核スピンのラビ振動の観測を通じて核スピンのコヒーレント状態の制御を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

常温で非常に長いコヒーレンス時間をもつ多数の核スピン状態を短時間で初期化し読み出すことに成功したことは、核スピン量子多体系状態の電子スピンと光を介した読み出しと制御の研究を大きく進展させるものであり、電子スピンと核スピンの結合を活用した量子シミュレータの構築、スケーラブルな量子コンピュータの実現への発展に寄与するものである。RF電磁波の空間分布を従来にない高い空間分解能で得ることに成功したことは、量子物性の研究に寄与するのみではなく、高周波デバイス、高周波基板等からの電磁波輻射の評価、半導体、極性分子、ポリマー等の材料評価、医療イメージング等に広く寄与すると見込まれる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we have performed research on the preparation of nuclear spin-lattice by fluorination of the diamond surface, on the development of a system for the control and readout of nuclear spin-electron states, on high sensitivity AC field detection using the Hadamard basis, and on control and readout of the nuclear spin states. We have successfully detected AC magnetic field by a spin-locking method at high sensitivity, and have successfully visualized the image of RF field distribution. Furthermore, we have successfully initialized the nuclear spin states by using nonselective microwave pulses and observed Rabi oscillations of the nuclear spin state.

研究分野：物性物理学

キーワード：量子スピン 核スピン イメージング 量子センシング ダイヤモンド 量子物性

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初において、ダイヤモンド窒素-空孔(NV)センターの長いスピンコヒーレンス時間を活用した室温での超高感度磁場測定法の研究が急速に進展している状況下にあった。研究代表者の野村と研究分担者の柏谷とは二次元相関電子系のスピン状態の直接検出のためにダイヤモンド NV センターを用いた超高感度磁場イメージングに関する共同研究を行ってきた [Jpn. J. Appl. Phys. 56, 04CK03 (2017)]。この共同研究によって、NV センターの光を用いた電子スピン共鳴(ESR)には電子スピンと核スピン間の超微細相互作用による結合が観測され、光と電子スピンを介した核スピン状態の観測と制御の可能性が開かれていた。また、研究分担者の佐々木は量子ビットに位相デコヒーレンスを与えるノイズの多重パルス法による測定法の研究を進めていた [Phys. Rev. Lett. 107, 170504 (2011)]。柏谷、佐々木、野村は議論を重ね、より積極的に相関電子系の基底状態を外部的に制御する手法を探った。コヒーレンス時間の長い核スピに着目し、核スピン間の双極子相互作用を電磁波照射により制御して NV センターを介してプローブする本研究構想に至り、研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究課題は、格子構造をなす核スピン間の双極子相互作用を電磁波照射により変調し、核スピンのなす量子多体系の量子状態を制御することを目的とした。量子アニーリングの手法により実現させた量子多体系の基底状態を、NV センターの電子スピンと光を介して読み出すことを本研究課題の目標とした。その実現のための課題はいくつか予想されるが、その課題の所在を明確化し、解決法を本研究課題において探ることを目的とした。

3. 研究の方法

1) 相互作用する核スピン格子の作製

高純度化学気相成長ダイヤモンドに同位体分離した $^{15}\text{N}^+$ イオンを注入、熱処理により、ダイヤモンド表面から浅いところに高い面密度の NV センターを形成した。RF プラズマ反応炉中にて(001) および(111)ダイヤモンド表面に ^{19}F のフッ素化表面処理した。反射高速電子線回折法(RHEED)による表面構造の観測、X 線光電子分光法(XPS)を実施した。さらに、フッ素化表面処理の有無による発光スペクトルの変化を観測した。

2) 核スピン量子多体系状態の電子スピンと光を介した読み出しと制御のためのシステムの構築
既に稼働中の広視野光学顕微鏡を用いた局所磁場検出のためのシステムを活用として本研究計画を開始した。研究開始当初に稼働中であった装置ではマイクロ波スイッチによる On/Off によるマイクロ波パルスを発生させていた。このためマイクロ波パルス幅の分解能は 2 ns に留まっていた。また、マイクロ波パルス形状は装置固有の周波数特性から決定され、その結果、マイクロ波パルスによるスピン状態の制御が十分な精度で行われていなかった。本予算で購入した任意波形発生器を当時稼働中の組み込むことにより、パルス形状が波形整形されたマイクロ波パルスの照射を可能とした。(図1) マイクロ波パルス形状は制御コンピュータで数値的に生成した波形を任意波形発生器に送ることで行われた。その結果、パルス幅の分解能が装置のスイッチング周期で制限されなくなり事実上無段階となったこと、マイクロ波パルス形状がプログラミングによって制御されるようになったことから、量子スピン制御の忠実度が格段に向上した。さらに任意波形発生器から 2 チャンネルの信号を発生させてマイクロ波ダブルバランス IQ ミキサーに入力して局所マイクロ波信号と混合してマイクロ波パルスを生成する手法を導入することにより、マイクロ波パルスの瞬時位相をコンピュータで制御することを可能とした。その結果、量子スピン制御の自由度が拡大し、スピンロッキング、XY8 等の高度なパルスシーケンスの導入が可能となった。

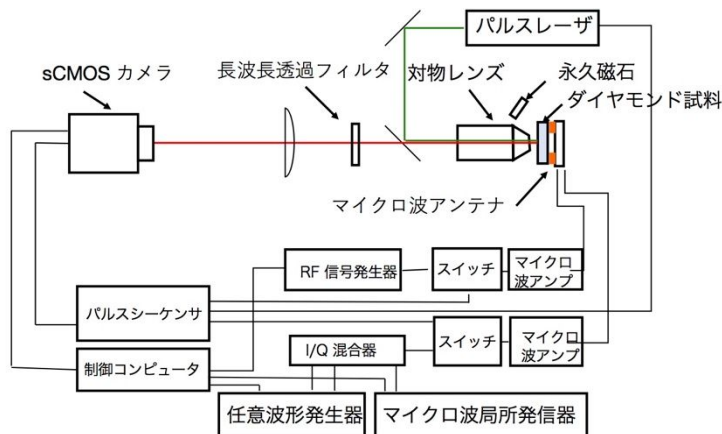


図1、本研究において構築した広視野光学顕微鏡を用いた電子スピンと光を介した読み出しと制御のためのシステムの概略図。

核スピン制御のための RF 電磁波はマイクロ波と独立に図 1 のように試料に印可するセットアップを構築した。

3) Hadamard 基底を用いた微小 AC 磁場高感度検出法

まず、ポンプレーザーパルスをダイヤモンド NV センターに照射し、スピン状態を図 2 の回転座標系上のブロッホ球で示される $|0\rangle$ 状態に初期化する。その後、スピンの x 軸まわり 90 度の回転を与えるマイクロ波 $(\pi/2)_x$ パルスを印可し、ブロッホ球の赤道面上 y 軸方向負の向きにスピンを倒した。このようにして量子スピンの基底状態を $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態との二つの重みが等しい重ね合わせ状態である Hadamard 基底、すなわち

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + i|1\rangle)$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - i|1\rangle)$$

に初期化した。この後、スピンと平行に駆動マイクロ波を印可する。これによりスピンと電磁波の混成状態であるドレス状態間にエネルギーギャップ Δ が生じる。エネルギーギャップ Δ は y 方向駆動場の強度に比例するラビ周波数で与えられる。スピンはこの Δ と非共鳴な振動数のノイズの影響から守られ、スピンのコヒーレンス時間が飛躍的に長くなる。一方、 Δ と共鳴する電磁波は高感度に検出される。この手法はスピンロッキング法と呼ばれる。y 方向駆動場を継続時間 τ 印可した後、マイクロ波 $(\pi/2)_x$ パルス(図 1 (c) Pattern

B) または $(-\pi/2)_x$ パルス(図 1 (d) Pattern B) を印可し、スピン状態をブロッホ球の $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態を結ぶ軸上へ射影し、プローブレーザーパルスによりスピン状態を発光強度として検出する。Pattern A, Pattern B を用いたフェーズサイクリングを行った(図 1 (e))。

スピン操作のフィデリティの向上のためにはマイクロ波パルス強度エラーの与える影響を緩和することが重要である。その手法の一つとして本研究では SCROFULOUS 法を用い、 $\pi/2$ パルスを 3 つのパルスに分割して印可する方法を導入した。この SCROFULOUS 複合パルス法を上述の測定法に適用し、その効果を調べた。

核スピン量子多体系の状態の読み出しと制御の手法として、私たちは、スペクトル線幅の広くパルス幅の短い非選択的なパルスを用いた核スピン制御方法を用いた。 ^{15}N イオンのイオン注入により作製されたダイヤモンド NV センター試料の光検出磁気共鳴スペクトルには電子スピン (S) と核スピン (I) との相互作用

$$H_A = A_{||} S_z I_z + \frac{A_{\perp}}{2} (S_+ I_- + S_- I_+)$$

によってスペクトル分裂が生じる。この相互作用第一項を用いて核スピン状態を制御することを試みた。第一項から二つに分裂した状態には歳差運動に 3 MHz の周波数差が生じる。この差を利用して $I_z = \pm 1/2$ と結合した電子スピン状態を分離して制御した。

4. 研究成果

1) 相互作用する核スピン格子の作製

相互作用する核スピン格子作製のために、RF プラズマ反応炉中にて CF_4 ガスを用いて (001) および (111) ダイヤモンド表面に ^{19}F のフッ素化表面処理した。反射高速電子線回折法 (RHEED) による表面構造の観測を行った。フッ素化表面処理前の試料で明瞭な RHEED 図形に明瞭な回折構造を観測した。フッ素化表面処理後の試料では適切な処理条件を探って複数回試みたが回折スポット、菊池線はほとんど観察されなかった。ダイヤモンド表面数原子層はアモルファス状態であると推定される。一方、XPS からフッ素に起因するボンドの形成が観察された。発光スペクトルの測定からフッ素化表面処理後の試料においても負に帯電した窒素-空孔センター (NV⁻) 状態が

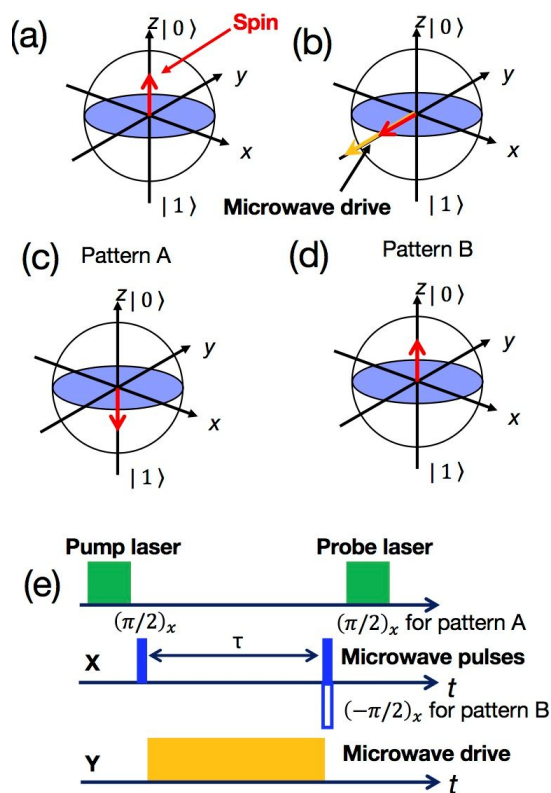


図 2、(a)-(d) ブロッホ球上で示したスピン操作の概略図。(e) スピンロッキング法のためのパルスシーケンスの概略図。

確認された。NVの発光強度はフッ素化表面処理前後で増大する場合と減少する場合の双方がみられた。以上の研究で得られたフッ素化表面処理に関する知見は現時点で一括りにまとめるに至っておらず、フッ素化表面処理現象の複雑さを示している。さらなる研究を継続して進めることが重要であることを示している。平行して行われたフッ化カルシウム結晶中のスピン 1/2, ^{19}F の NMR に関する研究において、Alternating Phase Carr-Purcell's (APCP) 多重パルス法により、コヒーレンス時間の延長が示された。

2) Hadamard 基底を用いた微小 AC 磁場高感度検出

Hadamard 基底と駆動マイクロ波によって形成されたエネルギーギャップ δ ドレス状態を用いて δ に共鳴した微小 AC 磁場を高感度に検出した。図 3 に $\delta/2 = -26.8$ MHz におけるスピンロッキング信号の減衰曲線を示す。マイクロ波の不均一性や P1 センター等に起因する早い減衰成分と内因的要因によると考えられる長い減衰成分が見られた。長い減衰成分は $T_{1\rho} = 640 \mu\text{s}$ であった。これは、測定に用いられたダイヤモンド NV センター試料のスピンコヒーレンス時間 T_2, T_2^* の双方より顕著に長いものであり、スピンロッキングによる δ と非共鳴な振動数のノイズの影響からのスピン状態の保護の効果を示すものである。

図 4 (a) に RF 印可をしない場合の横軸 δ におけるスピンノイズスペクトルを示す。シリコン基板上的 Ti/Au ワイヤ構造を形成した試料に強度 -40 dBm の RF を印可した際にまわりに生じる RF を検出した例を図 4 (b) に示す。

$\delta/2 = 15$ MHz にピークが見られる。このようにこの手法で微小 RF 信号を高感度に検出可能であることが示された。

広視野光学顕微鏡を用いた測定の場合に視野内でのマイクロ波強度分布によるパルス長のエラーが必然的に生じることが課題となっていたが、SCROFULOUS 法の導入により、パルス長のエラーの一次の項を抑制することが可能となった。パルス長のエラーが 20% 以下の場合において、単パルスの場合と比較してパルス長のエラーによる検出信号強度の低下を約 1/5 に低下させることに成功した。

図 5 にスピンロッキング法により得られた RF 強度イメージの例を示す。幅 $10 \mu\text{m}$ の細線の両端近傍で強度が大きいことがわかる。この結果は時間領域差分法 (FDTD 法) の計算結果と良い一致が得られた。

3) 核スピン量子多体系状態の電子スピンと光を介した読み出し

時間軸上でスピン状態を制御することにより、スペクトル線幅の広くパルス幅の短い非選択的なパルスによる制御が可能となった。これはスピンコヒーレンス時間 T_2 が比較的短いアンサンブル NV センター試料に適した方法である。この手法により核スピン状態の初期化が可能であることが示された。さらに、 A_{\parallel} に共鳴した RF 照射により核スピンのラビ振動の観測に成功した。この方法はダイヤモンド NV センター-核スピン量子多体系の状態の制御と読み取り手法として有望な方法であると期待される。私たちの手法は従来の既知手法と比べて高速に核スピン制御と読み出しが行える利点があり、量子シミュレータ構築のための核スピン量子多体系の電子スピンと光を介した状態制御と読み出し方法として有望な手法であることが示された。

4) 本研究の特徴と学術的意義、社会的意義

本研究の特徴は図 1 に示すように sCMOS カメラを用いた広視野光学顕微鏡を用いてダイヤモンド NV センターからの発光像を取得していることにある。従って 2), 3) の結果は多数のダイヤモンド NV センター電子スピン、核スピンの制御と読み出しを同時に行っていることに本研究の特筆すべき点がある。このことにより、高い感度で RF 磁場のイメージングを行うこと、広い範囲

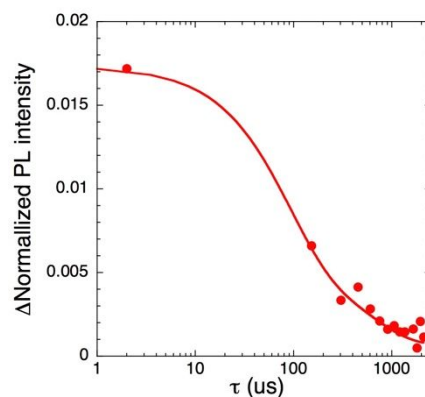


図 3 スピンロッキング信号の減衰曲線。

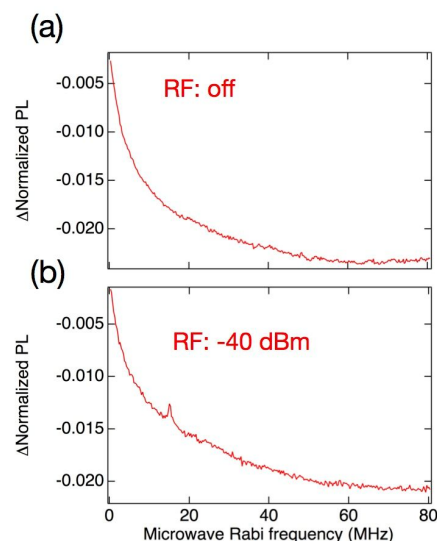


図 4 (a) RF 印可なし (b) 周波数 15 MHz 強度 -40dBm の RF 印可時のスピンロッキング法により検出されたスペクトル。

の多数の核スピン状態の初期化とその状態分布の読み出しに成功した。従来、RF 磁場は超伝導量子干渉計、トンネリング磁気抵抗 (TMR) 素子等を用いて測定が行われてきた。これらの手法では、センサの空間走査のために画像の取得に長時間の測定時間が必要であり、センサ間、センサと対象物間の相互干渉のため煩雑な較正と画像解析が必要であった。従来の手法ではマイクロメートルの高い空間分解能でイメージを得ることは困難であった。本研究のダイヤモンド NV センターからの発光像を取得からスピンロッキングにより高感度に RF 磁場イメージを得る手法は従来技術の欠点を解消した新規の優れた方法である。

本研究で得られた成果は、核スピン量子多体系の状態制御と読み出しに関わる研究の進展に大きく寄与すると見込まれ、電子スピンと核スピンの結合を活用した量子シミュレータの構築、スケーラブルな量子コンピュータの実現への発展に寄与するものである。本研究で得られた成果は極微小 RF 信号の検出およびその空間分布の評価に革新をもたらすものである。これらの成果は科研費基盤研究(b) (21H01009)において活用され、より発展・推進される予定である。さらに、本研究を通じて編み出した手法は量子スピンの局所的な制御、半導体、極性分子、ポリマー等の物質の特性評価、高周波素子、高周波基板、高周波シールド等の評価、医療イメージング等へ広く活用されることが見込まれ、特許出願中 (特願 2021- 94625) である。

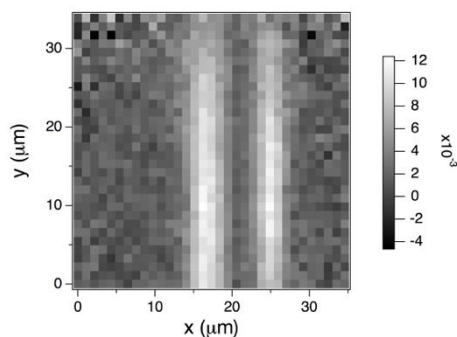


図5 スピンロッキング法により得られた RF 強度イメージ。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura	4. 巻 10
2. 論文標題 System for the remote control and imaging of mw fields for spin manipulation in NV centers in diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4813-1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-61669-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hironori Ito, Tetsuo Nakano, Shintaro Nomura. and Kazuhiko Misawa	4. 巻 27
2. 論文標題 Polarization envelope helicity dependent photovoltage in GaAs/Al0.3Ga0.7As modulation-doped quantum well	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 28091-28103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.27.028091	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shintaro Nomura, Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Koki Kaida, Hideyuki Watanabe and Satoshi Kashiwaya	4. 巻 2020
2. 論文標題 Imaging of Microwave and Radio-Frequency Fields Using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Extended Abstracts of the 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials	6. 最初と最後の頁 611-612
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Susumu, Miura Takanori, Ikeda Kosuke, Sakai Masahiro, Sekikawa Takuya, Saito Masaki, Yuge Tatsuro, Hirayama Yoshiro	4. 巻 10
2. 論文標題 1/f2 spectra of decoherence noise on 75As nuclear spins in bulk GaAs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10674-1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-67636-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 ナノデバイス・ナノ物性評価のためのダイヤモンドNVセンター量子センシング
3. 学会等名 電子情報通信学会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村晋太郎, 甲斐田 幸希, 渡邊 幸志, 柏谷 聡
2. 発表標題 広視野光学顕微鏡を用いたダイヤモンド NV センタースピンロッキング
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shintaro Nomura, Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Koki Kaida, Hideyuki Watanabe and Satoshi Kashiwaya
2. 発表標題 Imaging of Microwave and Radio-Frequency Fields Using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond
3. 学会等名 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 甲斐田 幸希, 渡邊 幸志, 柏谷 聡, 野村晋太郎
2. 発表標題 複合パルスを用いたダイヤモンド NV センタースピンロッキング
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 東 勇佑, 野村 晋太郎, 渡邊 幸志, 柏谷 聡
2. 発表標題 非選択的パルスを用いたダイヤモンドNV センター15N 核スピンの初期化方法
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 Nb弱結合型ナノSQUID・ダイヤモンドNVセンターを用いた磁気プローブマッピング
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会シンポジウム講演(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村晋太郎, 小原由知, Giacomo Mariani, Dwi Prananto, 佐々木進, 柏谷聡
2. 発表標題 光-電子スピン-核スピン格子系の量子コヒーレント制御
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第10回領域会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Dwi Prananto, Susumu Sasaki, Kotaro Someya, Shintaro Nomura
2. 発表標題 Coherence Enhancement of ^{19}F -NMR in CaF_2
3. 学会等名 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第10回領域会議
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura
2. 発表標題 Characterization of the microwave magnetic field of RLC resonators by using electron spins ensembles in diamond
3. 学会等名 International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 ダイヤモンドNVセンターを用いた広視野量子センシング
3. 学会等名 第64回 光波センシング技術研究会講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Obara, G. Mariani, S. Kashiwaya, and S. Nomura
2. 発表標題 Spin-locking Measurements Utilizing Local Enhancement of Microwave in the Vicinity of Micrometer Scale Metal Structures
3. 学会等名 International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Nomura
2. 発表標題 Wide-field quantum sensing using nitrogen-vacancy center ensembles in diamond
3. 学会等名 NCTU Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 広視野光学顕微鏡を用いたダイヤモンドNVセンタ量子センシング
3. 学会等名 量子デバイス材料研究ミニワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 ダイヤモンド NV センター広視野量子センシング
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小原 由知, Giacomo Mariani, 柏谷 聡, 野村 晋太郎
2. 発表標題 非給電微小アンテナによる局所マイクロ波増強を利用したスピンロッキング
3. 学会等名 日本物理学会秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shintaro Nomura
2. 発表標題 Wide-field imaging of microwave with nitrogen-vacancy center ensembles in diamond
3. 学会等名 Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura
2. 発表標題 Wide-field imaging of microwave field by using NV centers in diamond
3. 学会等名 International Symposium on 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野村晋太郎
2. 発表標題 先端光学的手法を用いたナノ構造中電子状態の制御と検出
3. 学会等名 第17回ナノ学会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura
2. 発表標題 Microwave intensity distribution imaging by Rabi oscillation FFT mapping of diamond NV Center
3. 学会等名 Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村龍典, 野元嵩平, 柏谷聡, 笹川 崇男, 野村晋太郎
2. 発表標題 強磁性トポロジカル絶縁体の低温広視野磁気イメージング
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野元嵩平, Giacomo Mariani, 柏谷聡, 野村晋太郎
2. 発表標題 非給電微小アンテナによるマイクロ波局所増強のラビ振動FFTイメージング
3. 学会等名 日本物理学会第74回年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 野村晋太郎	4. 発行年 2019年
2. 出版社 応用物理学会	5. 総ページ数 6
3. 書名 第64回 光波センシング技術研究会講演論文集	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 検出装置及び電磁波検出方法	発明者 渡邊 幸志、野村晋太郎、柏谷 聡	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021- 94625	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

<p>Lab. for Optical Properties of Nanostructures http://www.px.tsukuba.ac.jp/~snomura/ 野村研究室 http://www.px.tsukuba.ac.jp/~snomura/</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	柏谷 聡 (Kashiwaya Satoshi) (40356770)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	
研究分担者	佐々木 進 (Sasaki Susumu) (80323955)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関