

IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 3名 (数理物質科学研究科後期課程1名、前期課程2名)

特別研究学生 1名

卒研生 5名

- 【1】 ダイヤモンド窒素不純物-空孔欠陥中心を用いた量子センシング(小原, 甲斐田, Mariani, Golombiewski, 野村) 論文[3]

(1) ラビ振動 FFT 法によるマイクロ波分布イメージング

最近、ダイヤモンド中窒素不純物-空孔欠陥 (NV) センターを用いた量子センシングが注目を集めている。これは、ダイヤモンド中の NV センターからの発光強度の電子スピン共鳴から磁場を検出することにより、広い動作温度範囲において、高い空間分解能と高い磁場感度を得られるという特徴をもつ。常温での量子スピン操作が可能であり、量子アニーリングのプラットフォームとして有力な候補である。これまで、私たちは広視野光学顕微鏡とアンサンブル NV センターを用いた量子センシングに関する研究を進めてきた。この広視野光学顕微鏡を用いて、図 1 (a) に線幅が広い部分と狭い部分が交互に分布した示すテーパ型、図 1 (b) に示す直線型マイクロ波共振器の周囲でのマイクロ波強度増強に関する研究を実施した。広視野光学顕微鏡を用いたマイクロ波強度分布測定系の概略図を図 1 (c) に示す。対物レンズとダイヤモンドチップの間に置かれたリング型マイクロ波アンテナによって直径約 1 mm の領域にマイクロ波がほぼ一様に照射される。マイクロ波振動数が NV センターの準位間の共鳴振動数に近い場合、マイクロ波の振幅は Rabi 振動数に比例する。このことを利用してマイクロ波強度分布を定量的にイメージマッピングすることに成功した。図 2 (a), (c) にそれぞれ直線型および

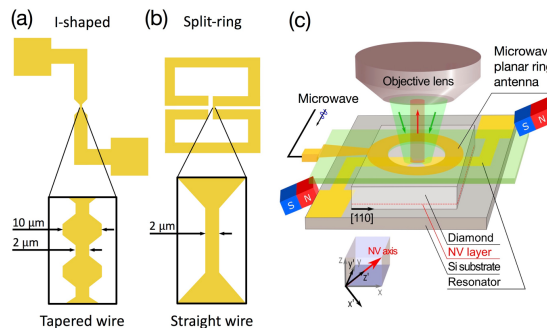


図 1 (a) テーパー型、(b)直線型マイクロ波共振器の概略図。(c) 広視野光学顕微鏡を用いたマイクロ波強度分布測定系の概略図。

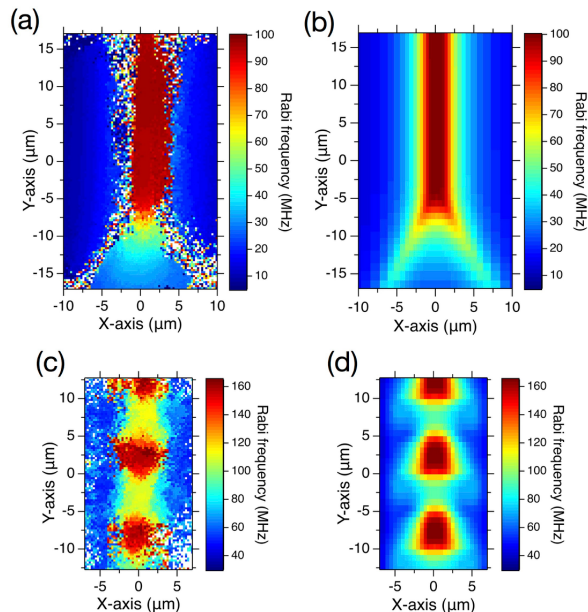


図 2 (a) 直線型マイクロ波共振器の周りのマイクロ波強度分布の(a)測定結果と(b)FDTD法による計算結果。テーパ型マイクロ波共振器の周りのマイクロ波強度分布の(c)測定結果と(d)FDTD法による計算結果。

テーパー型マイクロ波共振器の周りのラビ振動数分布の測定結果を示す。マイクロ波強度が局所的に増強されていることがわかる。この結果は図 2 (b), (d) に示す FDTD シミュレーション結果と良く一致した。以上により、テーパー型ワイヤーによりマイクロ波が局所的に振幅で 22 倍、強度で 480 倍に増強されることが示された。この手法は、量子スピンの局所的な制御、マイクロ波デバイスやメタマテリアル素子の評価、誘電率の差を利用したマイクロ波バイオイメージング等へ広く活用されることが期待される。

本研究は名古屋大学・産業技術総合研究所柏谷聡氏のグループとの共同研究である。

(2) ダイヤモンド NV センター-核スピン量子多体系の結合の検出に関する研究

ダイヤモンド NV センターは常温において長いスピンコヒーレンス時間を示し、最近、関連する研究が急速に進展している。この長いスピンコヒーレンス時間により、光と電子スピンを介した核スピン系の状態を制御および検出する可能性が開かれた。私たちは格子構造をなす核スピンを量子シミュレータとする可能性を探っている。本年度、相互作用する核スピン格子の作製法の研究、核スピン量子多体系の電子スピンと光を介した読み出しに関する研究を昨年度に引き続いて実施した。

ダイヤモンド NV スピンアンサンブルと広視野光学顕微鏡を用いた量子スピン状態の制御と状態の読み出しの手法をさらに発展させ、核スピン制御のための多重パルス法とスピンロック法のためのパルスシーケンス制御プログラムをそれぞれ開発し、設定条件のチューニングを行なった。波形整形されたマイクロ波パルスの照射により、高い忠実度で量子スピン状態の制御と状態の読み出しを行なった。広視野光学顕微鏡を用いた測定の場合、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あり、多重パルス法よりもスピンロック法 (図 3) の方がこのパルス長エラーに対してより堅牢であることが示された。そこで、スピンロック法による研究をさらに進めた。その結果、コヒーレンス時間 ($T_{1\rho}$) がおよそ 1 ms 以上に延長されることが示された。この手法によりノイズスペクトルを 1 - 60 MHz の範囲内で得ることに成功した。さらに、-46 dBm (25 nW) の 28 MHz の微小 RF 信号の検出に成功した。

本研究は名古屋大学・柏谷聡氏、産業技術総合研究所・渡辺氏のグループとの共同研究である。

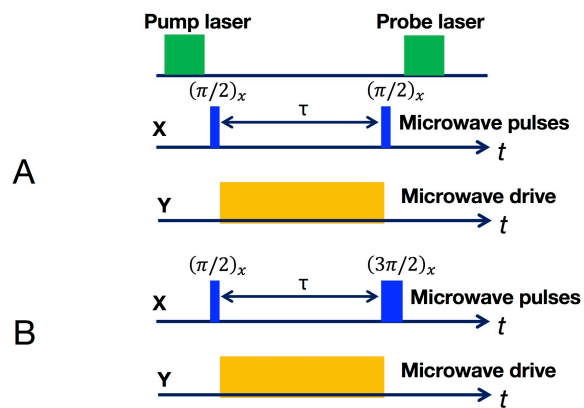


図 3 スピンロック法におけるレーザーパルス、マイクロ波パルス列の概略図。

【2】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の局所光応答 (有島, 野村)

遷移金属ダイカルコゲナイドは遷移金属元素 M (Mo, W, Nb 等) と 2 個のカルコゲナイド X (S, Se, Te) が結合した物質である。グラフェンと同様の手法により劈開され、原子層オーダーの薄膜が得られる。2 種類の元素から構成され、空間反転対称性が破

れているためバンドギャップが開く。この大きなバンドギャップにより on-off 比の大きな電界効果トランジスタ (FET) や高い感度の光センサーの候補物質として注目されている。

本年度は、ポリジメチルシロキサン (PDMS)-ポリプロピレンカーボネート (PPC) ドライトランスファー法を用いて WSe_2 FET 構造を作製し、その電気伝導特性に関する研究を開始した。 WSe_2 はバルクで 1.2 eV の間接バンドギャップを、単層で 1.65 eV の直接バンドギャップを持ち、比較的小さい正孔有効質量をもつ。フォトリソグラフィ法により作製された電極構造上に WSe_2 薄膜を転写し、イオン液体 DEME BF_4 を用いてゲート電圧を印加した。ドレイン=ソース電流がゲート電圧により変調され、320 mV/decade のサブスレッショルドスウィングが得られた。

【3】 過剰電流下のトポロジカル非圧縮性量子状態のイメージングに関する研究 (野村) [論文 2]

次世代の情報処理デバ/イス材料として期待されているトポロジカル物質に生じるトポロジカル端状態は、従来の物質よりも電子による情報伝達が不純物などに乱されにくい特性を持っている。本研究では、量子ホール状態に過剰電流を流し、走査ゲート顕微鏡を用いた観察を行うことにより、トポロジカル非圧縮性状態を可視化することに成功した。これによりトポロジカルに護られたミクロスコピックな状態が、過剰電流といった外乱下でも保持されていることが実証された。

本研究は東北大学富松透氏、橋本克之氏、平山祥郎氏等との共同研究である。

< 査読論文 >

1. Hironori Ito, Tetsuo Nakano, Shintaro Nomura, and Kazuhiko Misawa, "Polarization envelope helicity dependent photovoltage in $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ modulation-doped quantum well", *Opt. Exp.* **27**, 28091-28103 (2019).
2. Toru Tomimatsu, Katsushi Hashimoto, Shyunsuke Taninaka, Shintaro Nomura, and Yoshiro Hirayama, "Probing the breakdown of topological protection: Filling-factor-dependent evolution of robust quantum Hall incompressible phases", *Phys. Rev. Res.* **2**, 013128 (2020).
3. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, "System for the remote control and imaging of MW fields for spin manipulation in NV centers in diamond", *Sci. Rep.* **10**, 4813 (2020).

< 解説 >

1. 野村晋太郎、「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」 第64回光波センシング技術研究会講演論文集, p. 115-120 (2019).

< 学位論文 >

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2020年3月)

1. 小原 由知: 「ダイヤモンドNVセンターによる駆動場を用いたノイズスペクトル解析」

< 国際会議 >

1. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, "Wide-field imaging of microwave field by using NV centers in diamond", International Symposium on

- 20th Anniversary of Superconducting Qubits (SQ20th), (Tsukuba International Conference Center, Tsukuba, 13-15 May, 2019).
2. Toru Tomimatsu, K. Hashimoto, S. Taninaka, S. Nomura, K. Sato, and Y. Hirayama, "A Study of the Incompressible Strip in Quantum Hall System by Scanning Gate Microscopy", 2019 Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), (Goyang Goyang/Seoul, Korea, 3-7 June 2019).
 3. (Invited) Shintaro Nomura, "Wide-field imaging of microwave with nitrogen-vacancy center ensembles in diamond", Canada-Japan Workshop on Hybrid Quantum Systems, (University of Ottawa, Ottawa, Canada, 25-27 June, 2019).
 4. (Invited) Shintaro Nomura, "Wide-field quantum sensing using nitrogen-vacancy center ensembles in diamond", NCTU-Seminar (National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, 29 Nov, 2019).
 5. Y. Obara, G. Mariani, S. Kashiwaya, and S. Nomura, "Spin-locking Measurements Utilizing Local Enhancement of Microwave in the Vicinity of Micrometer Scale Metal Structures" International Symposium on Hybrid Quantum Systems (HQS2019) (Kunibiki Messe, Matsue, Japan, 2-4 Dec., 2019).
 6. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, "Characterization of the microwave magnetic field of RLC resonators by using electron spins ensembles in diamond", International Workshop for Young Researchers on the Future of Quantum Science and Technology 2020 (National Institute of Informatics, Tokyo, Japan, 3-6 Feb., 2020).

<講演>

1. (招待講演) 野村晋太郎 「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」 第17回ナノ学会 (鹿児島市, かごしま県民交流センター, 2019年5月10日)
2. 小原 由知, Giacomo Mariani, 柏谷 聡, 野村 晋太郎, 「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」 日本物理学会秋季講演会 (岐阜市, 岐阜大学, 2019年9月11日)
3. 野村晋太郎 「ダイヤモンド NV センター広視野量子センシング」 東北大学 電気通信研究所 共同プロジェクト研究会 「固体素子における非平衡ダイナミクスの精緻な理解と機能開拓」 (仙台市, 秋保温泉ホテル華乃湯, 2019年11月1日)
4. 野村晋太郎 「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」 量子デバイス材料研究ミニワークショップ (高崎市, 量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所, 2019年11月19日)
5. (招待講演) 野村晋太郎, 「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」 第64回 光波センシング技術研究会講演会 (東京都, 東京理科大学, 2019年12月10日)
6. Dwi Prananto, Susumu Sasaki, Kotaro Someya, Shintaro Nomura. "Coherence Enhancement of ^{19}F -NMR in CaF_2 " 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第10回領域会議 (和光市, 理化学研究所, 2020年2月25-26日)
7. 野村晋太郎, 小原由知, Giacomo Mariani, Dwi Prananto, 佐々木進, 柏谷聡, 「光-電子スピン-核スピン格子系の量子コヒーレント制御」 新学術領域「ハイブリッド量子科学」第10回領域会議 (和光市, 理化学研究所, 2020年2月25-26日)
8. (招待講演) 野村晋太郎, 「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」 日本物理学会第75回年次大会シンポジウム「多彩なスピン物性の発展を支える独創的な実験技術」 (名古屋市, 名古屋大学, 2020年3月16-19日)。

<外部資金>

1. 科学研究費 新学術領域研究 「光-電子スピン-核スピン格子ハイブリッド系の量子コヒーレント制御」 研究課題番号: 18H04283, 平成31年度: 直接経費 5,800,000円 (研究代表者: 野村 晋太郎)

2. 科学研究費 挑戦的研究(萌芽) 「核スピン量子多体系の状態制御と読み取り」研究課題番号: 18K18726, 平成31年度: 直接経費 1,300,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)