

IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 7名 (数理工学物質科学研究科後期課程1名、前期課程6名、
人間総合科学研究群教育学学位プログラム前期課程1名)

特別研究学生 1名

卒研究生 3名

- 【1】 ダイヤモンド窒素-空孔センターを用いた量子センシング(甲斐田, Mariani, Golombiewski, 東, 野村) 論文[1]

(1) スピンロッキング法による RF 波分布イメージング

量子現象を活用して高い精度の測定を可能とする量子センシングが最近大きな注目を集めている。常温で長いコヒーレンス時間をもち高い安定性を示すダイヤモンド中の窒素-空孔(NV)センターは量子センシングのプラットフォームとして有力な候補である。量子センシングでは高分解 NMR や量子ビット操作のために開発されてきた手法を活用して測定感度の向上がはかられてきた。従来、高感度測定には SQUID がしばしば用いられてきたが、ダイヤモンド NV センターの導入により、より広い温度と磁場範囲、より高い空間分解能での測定が可能となり、新たな研究領域が開かれつつある。

前年度までにダイヤモンド NV センターを用いてラビ振動からマイクロは分布を測定する手法の研究を進めてきた。この方法では検出される電磁波の振動数はマイクロ波局所発信器の振動数と一致していた。今年度、スピンロッキング法を用いて検出対象の電磁波の振動数を局所発信器の振動数と独立に回転座標系 y 軸方向の駆動マイクロ波の強度によって決められる方法について研究を進めた。図 1 にその方法の概略を示す。まず、ポンプレーザーパルスでダイヤモンド NV センターに照射し、スピン状態を図 1 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 $(\pi/2)_x$ パルスを押加し、ブロッホ球の赤道面上 y 軸方向負の向きにスピンを倒す。この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 Ω_d が生じる。エネルギーギャップ Ω_d 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 Ω_d と非共鳴な

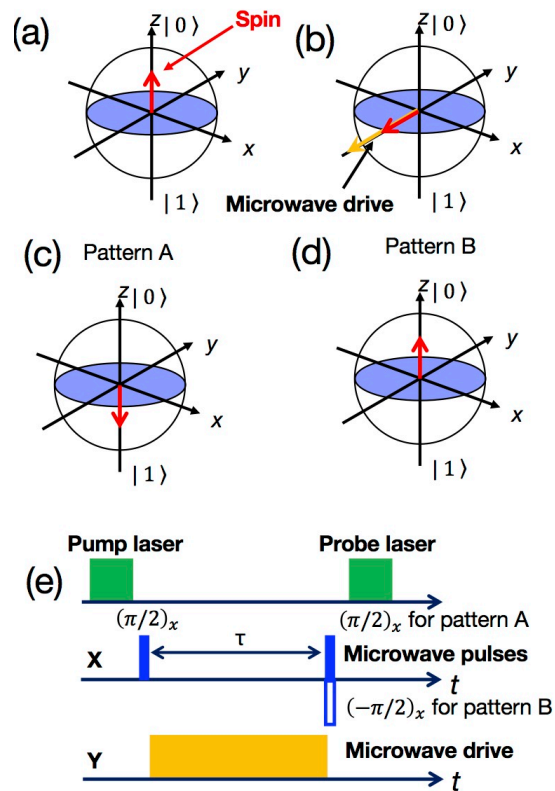


図 1、(a) - (d) スピンロッキング法の概略図。(e) スピンロッキング法のためのパルスシーケンスの概略図。

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、 Ω_d と共鳴する電磁波は高感度に検出される。 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北極と南極を結ぶ軸上へ射影し、プローブレザ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によりコモンモードノイズが抑制され信号強度が大きくなり、高い SN 比を得ることが可能となった。このようにして検出されたノイズスペクトルを図 2 (a)、 -40 dBm を印可したシリコン基板上の Ti/Au ワイヤ構造のまわりに生じる RF を検出した例を図 2 (b) に示す。本研究により微小 RF 信号を高感度に検出可能であることが示された。この手法は、微小 RF 信号の空間分布の評価にも適用可能である。この手法は量子スピンの局所的な制御、物質の特性評価、RF/マイクロ波素子の評価、医療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。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。核スピンの制御には準位間の反交差を用いる方法やスペクトル線幅の狭くパルス幅の長い選択的 マイクロ波パルス用いる方法等が知られている。これらに手法には印可磁場の大きさの安定性に左右されること、電子スピンのデコヒーレンス時間が長い試料が求められること等の課題があった。今回、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の研究を進めた。核スピン制御の対象としてスピン $1/2$ の ^{15}N を選び、イオン注入によりダイヤモンド表面近傍に作製されたダイヤモンド NV センター試料を用いた。

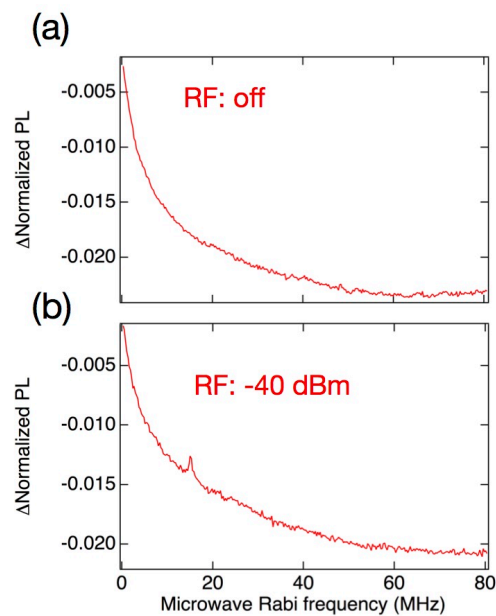


図 2 (a) RF 印可なし (b) 15 MHz, RF -40 dBm 印可時のスピントッキング法により検出されたスペクトル。

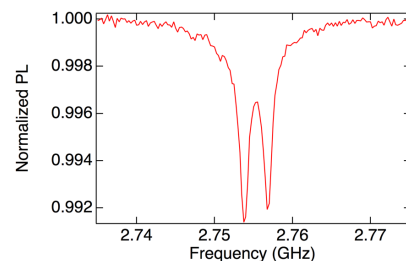


図 3 ^{15}N イオンのイオン注入により作製されたダイヤモンド NV センター試料の光検出磁気共鳴スペクトル。

図3に¹⁵N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の一例を示す。図3に見られる3 MHzのスペクトル分裂は電子スピン(S)と核スピン(I)との相互作用

$$H_A = A_{\parallel} S_z I_z + \frac{A_{\perp}}{2} (S_+ I_- + S_- I_+) \quad (1)$$

によるものである。この第一項を用いて核スピン状態を制御することを試みた。(1)式第一項から二つに分裂した状態(図3)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することが可能である。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。これはスピニコヒーレンス時間 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。

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。

【2】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の局所光応答 (有島, 袴塚, 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、昨年度に引き続き、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WSe₂FET構造を作製し、その電気伝導特性に関する研究を行った。SiO₂上にWSe₂薄膜FETを形成した場合とSiO₂とWSe₂の間に六方晶窒化ホウ素(h-BN)層を形成した場合のFET構造をそれぞれ作製し、その電気伝導特性を評価した。h-BN層上に薄膜FETを形成した場合に、キャリアの移動度、サブスレッショルドスイング、オンオフ比の向上、ソースドレイン電圧(V_{sd})-ソースドレイン電流(I_{sd})のヒステリシスの低減が見られた。h-BN層上に薄膜FETを形成することにより界面準位の影響を低減されたと考えられ、 V_{sd} - I_{sd} のヒステリシスが若干残り、さらなるプロセスの改良を進めていく必要があると考えられる。

<査読論文>

1. Shintaro Nomura, Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Koki Kaida, Hideyuki Watanabe and Satoshi Kashiwaya, "Imaging of Microwave and Radio-Frequency Fields Using Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond", Extended Abstracts of the 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials, pp. 611-612 (2020).

<国際会議>

1. Shintaro Nomura, Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Koki Kaida, Hideyuki Watanabe and Satoshi Kashiwaya, "Imaging of Microwave and Radio-Frequency Fields Using Nitrogen-

Vacancy Centers in Diamond”, 2020 International Conference on Solid State Devices and Materials I-2-05 (Sep 28, 2020, Online).

<講演>

1. (招待講演) 野村晋太郎、「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」第3回超高速光エレクトロニクス研究会, 2020年9月3日, オンライン
2. 野村晋太郎, 甲斐田 幸希, 渡邊 幸志, 柏谷 聡「広視野光学顕微鏡を用いたダイヤモンド NV センタースピロッキング」日本物理学会2020年秋季大会 8aA1-7, 2020年9月8日, オンライン
3. 甲斐田 幸希, 渡邊 幸志, 柏谷 聡, 野村晋太郎「複合パルスを用いたダイヤモンド NV センタースピロッキング」2021年日本物理学会第76回年次大会 13pA1-1, 2021年3月13日, オンライン
4. 東 勇佑, 野村 晋太郎, 渡邊 幸志, 柏谷 聡「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」2021年応用物理学会春季学術講演会 18p-Z13-7, 2021年3月18日, オンライン

<その他>

1. 「次世代高機能材用の動向(3)～量子機能材料」紹介記事 Yano E plus, 通巻146, pp. 17-21, 2020年5月号 矢野経済研究所
2. 野村晋太郎、「原子と光 -ダイヤモンドを使って測る」並木中等教育学校特別講義 2021年2月1日、つくば市並木中等教育学校

<外部資金>

1. 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, 令和元年度: 直接経費 1,200,000 円 (研究代表者: 野村晋太郎)