

## IX - 4. 光ナノ物性グループ

准教授 野村 晋太郎

大学院生 4 名（数理物質科学研究科後期課程 1 名、前期課程 3 名）

### 【1】 ベクトル電場波形整形波の二次元電子系への照射効果（野村）

最近、電子系へ光を照射することによって光ドレスト状態を形成し、物質のトポロジカル的性質を制御する提案が理論的に示された。この提案を契機に、光照射によって物質の量子相状態を動的制御しようとする試みが最近大きな注目を集めている。私たちは単一光パルス内で偏光状態を時間領域で自在にコントロールすることを可能とするベクトル電場波形整形パルス法を用いて二次元電子系の光照射効果の研究を進めている。この手法はベクトルの的に光パルスの時間発展を制御するものであり、従来にはない自由度と制御の可能性をもたらした。フェムト秒レーザを用いて発生させる THz パルス波は電場強度の極大化とパルスあたりのエネルギーの極小化とを兼ね備え、無磁場下円偏光照射による光誘起ホール効果の発現のための有力な方法である。

ベクトル電場波形整形パルス法により発生させたねじれ偏光パルス二次元電子系へ照射し、その結果生じる円二色性について調べた。ねじれ偏光パルスをヘリウムクライオスタット中の (001) GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As 変調ドープ量子井戸ホールバー構造試料に斜め入射した。ねじれ偏光パルス光を照射することによってホールバー端子間に誘起される電圧を偏光回転方向に同期して検出した。その結果、光パルスの二次分散量、偏光方位角回転振動数、回転の向きに依存した光起電力を観測した。特に電場包絡線の THz 回転の向きの反転による検出信号の符号の反転が観測された。さらにホールバー構造試料上の光照射位置に依存して検出信号の符号の反転が観測された。以上の結果は試料の端を流れる“エッジ”電流と試料の中央部でも観測される“バルク”電流からなるモデルで理解された。試料の中央部で観測される“バルク”電流は、ドレッシングハウス、ラッシュバ=スピン軌道相互作用により、電子の波数  $k$  に対して線形な項がある。その結果、図 9 に示すように GaAs の伝導電子帯のサブバンドがスピン分裂する。このためねじれ偏光パルス光を照射することによって光ガルバニック効果の一種である“バルク”電流が生じる。一方、試料の端を流れる“エッジ”電流はボルツマン方程式で記述される。光の電場ベクトルによって変調ドープ量子井戸中の自由キャリアが加速されることにより、試料端において生じる光電流によるものと考えられる。

以上、ベクトル電場波形整形ねじれ偏光パルスの回転振動数は広い範囲で調整可能であり、かつ偏向状態を高い自由度で設定可能であることが、THz 領域における物質と偏向光の関わる現象の研究にとっても強力な手段であることが示された。今後、さまざまな物質系にこの手法が適用されると考えられる。また、本研究の成果は無または低磁場下において動作するスピントロニクスデバイス、円偏光を検出する THz 帯光センサの開発に寄与すると期待される

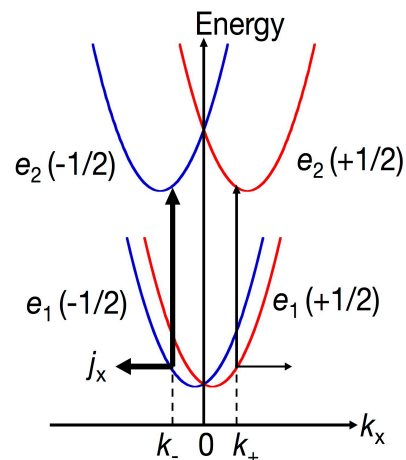


図 1 : 波数  $k$  線形項によってスピン分裂した GaAs 量子井戸中伝導電子帯サブバンドの概略図。サブバンド間励起によって生じる光電流密度を  $j_x$  で表す。

本研究は東京農工大学三沢和彦氏のグループとの共同研究である。

【2】 ダイヤモンド窒素不純物-欠陥中心を用いた量子センシング(野元, 小原, Mariani, 野村)

(1) ラビ振動 FFT 法によるマイクロ波分布イメージング

直接的磁場イメージングは、ナノ構造半導体、トポロジカル物質、超伝導体等の物性研究において有力な手法である。最近、ダイヤモンド中窒素不純物-欠陥(NV) センターを用いた高感度磁場測定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(ESR)から磁場を検出するものである。高い空間分解能、高い磁場感度、広い動作温度範囲という特徴をもつ。さらに、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。

ダイヤモンド NV センター電子スピンによる量子センシングには、スピン駆動のためにマイクロ波を用いられる。高感度量子センシングにおいてその強度分布の評価が求められる。しかし、マイクロメートルの分解能をもったマイクロ波強度測定法はこれまで知られていなかった。そこで私たちはマイクロ波照射下のラビ振動数  $\Omega$  とマイクロ波振幅  $B_1$  が既知の定数  $\gamma$  を用いて  $\Omega/2\pi = \gamma B_1$  で表されることを利用して、NV センター電子スピンのラビ振動からマイクロ波強度分布の定量的な評価を行なった。マイクロメートルサイズのアンテナを作製し、外部から空間的にほぼ一様なマイクロ波パルス照射し、マイクロメートルサイズアンテナまわりのマイクロ波強度分布を調べた。

(100) CVD type IIa 高純度ダイヤモンドに  $^{15}\text{N}_2^+$  を  $2 \times 10^{12}$ – $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  の密度でイオン注入したものを用いた。フォトリソグラフィーにより図 2 (a) に示すようなマイクロメートルサイズの

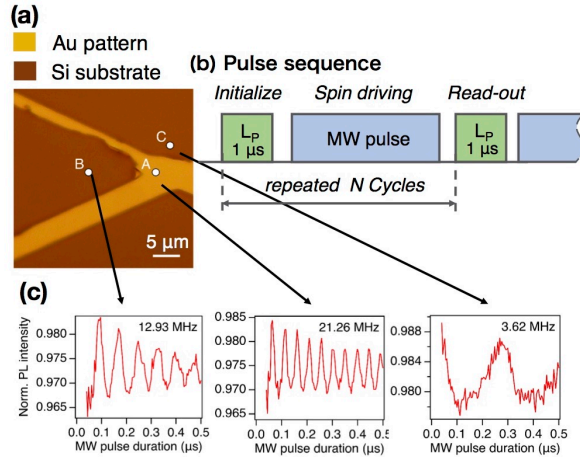


図 2 (a) マイクロメートルサイズ金電極の光学顕微鏡写真。(b) ラビ振動測定のためのパルスシーケンス。(c) 点 A, B, C における NV センター電子スピンのラビ振動。

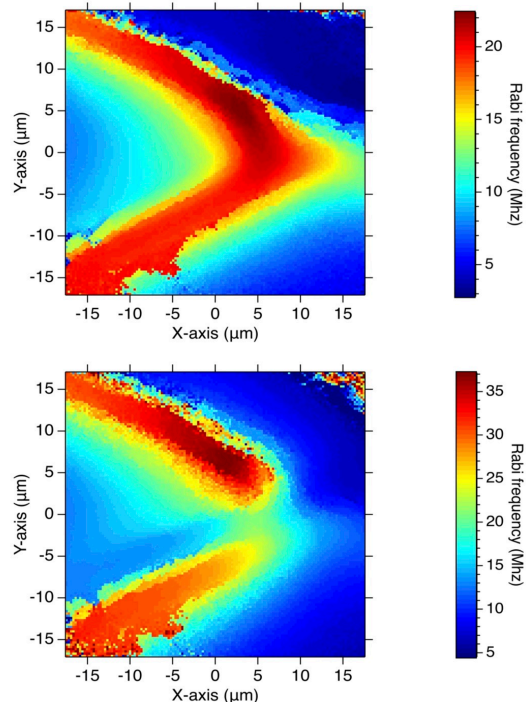


図 3 マイクロメートルサイズ金電極のまわりのラビ振動 FFT 法によって得たマイクロ波強度分布。(上) 電子スピン  $m_s=0 \rightarrow 1$ , (下)  $m_s=0 \rightarrow -1$  の場合のプロット。

金電極を Si 基板上に作製した。この上にダイヤモンドチップを置き、ダイヤモンドチップからの発光を顕微鏡対物レンズ、光学フィルターを介して sCMOS カメラにより撮像した。図 2 (b) に示すようなパルスレーザとマイクロ波パルスのパルスシーケンスにより、ピクセル毎のラビ振動を得た。ラビ振動は図 2 (c) に示すように場所に大きく依存することがわかった。

このピクセル毎のラビ振動をフーリエ変換することにより、図 3 に示すようなラビ振動数マッピングを得た。これによりミクロンサイズアンテナのまわりで近接場により約 19 倍マイクロ波が増強されることがわかった[1]。この手法は微小なマイクロ波デバイスの評価に有用である。近接場を用いることにより波長で制限されないミクロン～ナノサイズのアンテナパターンで定まる局所領域のマイクロ波強度を局所的に増強可能なことを示された。局所照射により格子温度の上昇を必要最低限に抑えつつ高い振動数で電子スピン操作を行うことが可能であることが示された。これは高感度量子センシングの実現のために有用な方法である。

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

ダイヤモンド窒素-空孔 (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、最近急速に関連する研究が進展している。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、高分解能固体 NMR 装置を用いたバルクフッ化物を対象とした双極子相互作用の制御手法、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開始した

高純度化学気相成長ダイヤモンドに同位体分離した  $^{15}\text{N}_2^+$  イオンを注入し、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フッ素化表面処理し、 $^{19}\text{F}$  でダイヤモンドの表面を終端した。RHEED により表面構造を観測を実施した。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に新たに任意波形発生器を組み込み、パルス形状が波形整形されたマイクロ波パルス照射を可能とするシステムを開発した。これにより量子スピン制御の忠実度が格段に向上した。また、核スピン制御のための高周波照射系の構築を行った。NV 電子スピンの偏極度を NV センターのアンサンブルからの発光によって検出し、多数の NV 電子スピンの量子スピン状態を発光イメージとして繰り返し取得した。NV 電子スピンをグリーンレーザパルス励起とマイクロ波パルス励起により量子スピン  $|0\rangle$  と  $|1\rangle$  の 2 つの重みが等しい重ね合わせ状態である Hadamard 基底に初期化した。図 4 に示すようなラムゼーフリンジ測定等の手法により、量子スピン状態の制御とその結果の読み出しを行った。得られた信号とシミュレーションの結果とは良く一致し、高い忠実度で量子スピン状態の制御と状態の読み出しが行われていることが確認された。

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

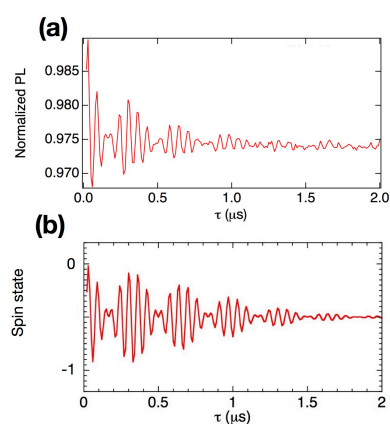


図 4 (a)ダイヤモンド NV センターアンサンブルのラムゼーフリンジ測定結果 (b) シミュレーション結果。

### 【3】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の局所光応答（綾野, 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。例えば二硫化モリブデン  $\text{MoS}_2$  では蜂の巣構造が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。一方、 $\text{MoS}_2$  表面に付着した水分子や酸化トラップ電荷等が FET の伝導特性に大きな影響を与えることが知られている。私たちは、六方晶窒化ホウ素(h-BN)を用いて  $\text{MoS}_2$  薄膜チャンネル層を挟んだ FET を作製し、それが伝導特性に非常に小さいヒステリシスと、大きな光応答性をもつことを示してきた。

前年度に引き続き、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 h-BN/ $\text{MoS}_2$ /h-BN ヘテロ構造 FET を作製し、電気伝導特性と光応答特性に関する研究を本年度実施した。

図5に  $V_G=0.5\text{ V}$ 、 $V_{DS}=1.0\text{ V}$  における h-BN/ $\text{MoS}_2$ /h-BN ヘテロ構造 FET の局所光励起マッピングを示す。チャンネル中央部にレーザー光を照射した際に大きい光応答が見られた。この結果は図5に示すドレイン電極とソース電極の間にあるチャンネルにおいて大きな光電流を示す。また、光電流のピークはドレイン電極側に見られることがわかった。ドレイン電極側の方がソース側よりも横方向のポテンシャル勾配が大きく電子密度の低いため、この結果は電界効果トランジスタの動作モデルと整合する。hBN/ $\text{MoS}_2$ /hBN ヘテロ構造 FET は、従来の  $\text{MoS}_2$ FET と比較して優れた電気伝導特性と光応答特性を示すことがわかった。また、 $\text{MoS}_2$  チャンネルが両面を h-BN 薄膜に挟まれているため、大気中での電気特性の安定度は従来のものと比べて高いことがわかった。

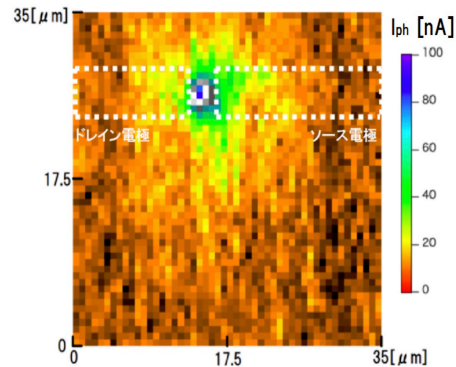


図5 h-BN/ $\text{MoS}_2$ /h-BN ヘテロ構造 FET の  $V_G=0.5\text{ V}$ 、 $V_{DS}=1.0\text{ V}$  における局所光励起マッピング。白破線はドレイン電極とソース電極の位置の概略を示す。

#### < 論文 >

1. Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, "Magnetization measurements of  $\text{Sr}_2\text{RuO}_4$ -Ru eutectic microplates using dc-SQUIDs", J. Phys.: Conf. Ser. **969**, 12040 (2018).
2. Hironori Ito, Tetsuo Nakano, Shintaro Nomura, and K. Misawa, "Polarization envelope helicity dependent photovoltage in  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  modulation-doped quantum well", Opt. Express **27**, 28091 (2019).
3. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, "Imaging of microwave field distribution over a non-fed gold pattern by using NV centers in diamond", arXiv:1812.02864.
4. T. Tomimatsu, K. Hashimoto, S. Taninaka, S. Nomura, and Y. Hirayama, "Imaging the evolution of quantum-Hall incompressible states from the edge state to bulk-localized state", arXiv: 1812.10035.



#### < 学位論文 >

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文（2019 年 3 月）

1. 綾野 智貴：「h-BN/MoS<sub>2</sub> 積層薄膜電界効果トランジスタ構造の局所光励起マッピング」
2. 野元 嵩平：「ダイヤモンド NV センター量子スピンコヒーレンスを用いた磁場イメージング」

#### < 国際会議 >

1. H. Ito, T. Nakano, S. Nomura, and K. Misawa, “Polarization envelope helicity dependent photocurrents in GaAs/AlGaAs modulation-doped quantum well”, International Conference on Physics of Semiconductors 2018 (The Corum Conference Centre, Montpellier, France, 29 July–3 Aug., 2018).
2. K. Hashimoto, T. Tomimatsu, S. Taninaka, S. Nomura, and Y. Hirayama, International workshop on disordered systems 2018 (PCS IBS, Daejeon, South Korea, 3-7 Sep., 2018).
3. Shuhei Nomoto, Giacomo Mariani, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, “Microwave intensity distribution imaging by Rabi oscillation FFT mapping of diamond NV Center”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2018 (Tsukuba International Conference Center, Tsukuba, 21 Sep. 2018).
4. Tomoki Ayano, Akihisa Saito, and Shintaro Nomura, “Electrical and Optical Properties of Hexagonal BN Encapsulated Multilayer MoS<sub>2</sub> Field Effect Transistor”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2018 (Tsukuba International Conference Center, Tsukuba, 21 Sep. 2018).
5. (invited) Shintaro Nomura, “Generation of vector-shaped light pulses and its application to spin control of semiconductor two-dimensional electron system”, Global Research Efforts on Energy and Nanomaterials 2018 (GIS Taipei, Taiwan, Dec. 21-24, 2018).
6. H. Ito, T. Nakano, S. Nomura, and K. Misawa, “Polarization shaping of near-infrared femto second pulse for transport measurement of semiconductor”, Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan (National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, January 23-25, 2019).

#### < 講演 >

1. 野村晋太郎「ダイヤモンドアンサンブルNVセンターを用いた光-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7回領域会議（名古屋市，名古屋大学，2018年8月6日）
2. 野元嵩平，柏谷聡，野村晋太郎「ダイヤモンドアンサンブルNVセンターを用いた広視野磁気イメージング」新学術領域「ハイブリッド量子科学」第7回領域会議（名古屋市，名古屋大学，2018年8月6日）
3. 木村龍典，野元嵩平，柏谷聡，笹川崇男，野村晋太郎「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」日本物理学会2018年秋季大会（京田辺市，同志社大学京田辺キャンパス，2018年9月11日）
4. 野元嵩平，木村龍典，柏谷聡，笹川崇男，野村晋太郎「ダイヤモンドNVセンターを用いた強磁性トポロジカル絶縁体中磁場ベクトルの再構成」新学術領域「ハイブリッド量子科学」若手研究会（東京，東京理科大学神楽坂キャンパス，2018年10月26日）
5. Giacomo Mariani, Shuhei Nomoto, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, “Rabi oscillation FFT mapping of microwave intensity using NV centers in diamond”, 新学術領域「ハイブリッド量子科学」若手研究会（東京，東京理科大学神楽坂キャンパス，2018年10月26日）

6. (招待講演) 野村晋太郎「ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスによる二次元電子系局所励起効果」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会, (仙台市, 茂庭荘, 2018年11月1日)
7. 野村晋太郎「非給電マイクロサイズアンテナにより増強されたマイクロ波強度のイメージング」新学術領域「ハイブリッド量子科学」第8回領域会議(恩納村, 沖縄科学技術大学, 2019年1月9-10日)
8. 野元嵩平, Giacomo Mariani, 柏谷聡, 野村晋太郎「ダイヤモンドNVセンターを用いたラビ振動数マイクロ波強度イメージング」新学術領域「ハイブリッド量子科学」第8回領域会議(恩納村, 沖縄科学技術大学, 2019年1月9-10日)
9. 橋本克之, 富松透, 谷中俊宥, 野村晋太郎, 平山祥郎「量子ホール非圧縮性状態の走査ゲートイメージング」日本物理学会第74回年会(福岡市, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日)
10. 野元嵩平, Giacomo Mariani, 柏谷聡, 野村晋太郎「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」日本物理学会第74回年会(福岡市, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日)
11. 綾野智貴, 野村晋太郎「h-BN/MoS<sub>2</sub>/h-BN積層構造電界効果トランジスタの局所光励起」日本物理学会第74回年会(福岡市, 九州大学伊都キャンパス, 2019年3月14-17日)
12. Giacomo Mariani, 野元嵩平, 柏谷聡, 野村晋太郎「ミクロンスケールマイクロ波増強のダイヤモンドNV センターを用いたイメージング」第66回応用物理学会春季学術講演会(東京, 東京工業大学大岡山キャンパス, 2019年3月9-12日)

#### <外部資金>

1. 科学研究費 基盤研究 B 「ヘリカル THz 波による二次元電子系局所励起効果の解明」研究課題番号: 15H03673, 平成30年度: 直接経費 2,300,000 円(研究代表者: 野村 晋太郎)
2. 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30年度: 直接経費 5,100,000 円(研究代表者: 野村 晋太郎)
3. 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30年度: 直接経費 5,100,000 円(研究代表者: 野村 晋太郎)