

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

【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（中野、野村）

電子系への光照射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とを契機に、光照射による物質の量子相状態の動的制御の試みが最近注目を集めている。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ベクトル波形整形パルス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可能性をもたらした。フェムト秒レーザー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。

本年度、ベクトル波形整形の手法により発生させたねじれ偏光パルスを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。図1に二次元電子系に対する波形整形ねじれ偏光パルス照射の概略図を示す。フェムト秒モード同期チタンサファイアレーザーからのパルス光を波形整形して発生させた右・左まわり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_xGa_{1-x}As 変調ドープ量子井戸試料に斜め入射した。ねじれ偏光パルス光照射によってホールバー端子間に誘起される偏光回転方向に同期した電圧を検出した。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。今回、ねじれ偏光パルスをホールバー試料に照射した結果、偏光方位角回転振動数とその回転の向きに依存した“エッジ”電流“の観測に成功したことは、無磁場下での量子ホール状態の観測、ひいては光照射による物質の量子相状態の動的制御のための重要なステップである。

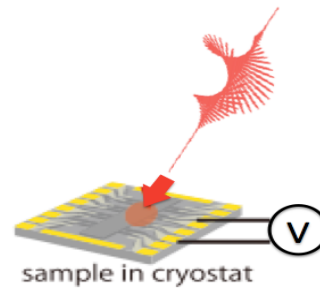


図1：二次元電子系に対する波形整形ねじれ偏光パルス照射法の概略図。

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-欠陥中心を用いた高感度磁場測定(木村、野元、野村)

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)中心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中心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。

本年度、図2に示すような広い温度範囲でトポロジカル候補物質を評価するためのダイヤモンドNVセンターESRイメージングシステムを構築し、トポロジカル候補物質のまわりの磁場の空間分布に関する研究を実施した。また、パルスレーザー光とマイクロ波パルスをダイヤモンドに照射するシステムを開発し、量子スピン操作に関する研究を開始した。

低温での測定ではマイクロ波照射による温度上昇を避ける必要がある。本研究では、マイクロ波照射によるヘリウムクライオスタット試料ステージの温度上昇を最小限とするため、2.9 GHz近傍においてインピーダンスマッチングしたマイクロ波アンテナを設計・製作し、クライオスタットの外部から試料にマイクロ波を照射するシステムを開発した。高速sCMOSカメラを用いた独自の方式の広視野光学顕微鏡を用いて超高感度磁場測定に十分な性能を得た。トポロジカル絶縁体薄膜に外部磁場を印加して磁化させた後に、その磁化によって生じる磁場ベクトルを、4方向の結晶軸のNVセンターの電子スピン共鳴位置から再構成された。複数の試料温度において薄膜試料に水平、垂直方向の磁場を印加して磁化させたそれぞれの場合について、磁化により生じた磁場ベクトルを得た。その結果、バルクではc軸方向であった磁化ベクトルが薄膜ではc軸と垂直の面内方向であることが示された。

ダイヤモンドNVセンターのユニークな特徴の一つはレーザー照射により量子スピン状態を $|0\rangle$ 状態に初期化可能である点である。NV電子スピンの $m=0$ と $m=1$ の準位間のエネルギーに共鳴した振動数のマイクロ波パルスを照射すると、図3(a)の赤の太い矢印で示した量子スピンはブロッホ球内を回転運動する。パルス照射時間の増大と共に回転角 θ は増大し、量子スピン状態 $|\Psi\rangle$ は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の二状態間を振動する。このラビ振動をダイヤモンドNVセンターから放出される光を高速sCMOSカメラを用いた独自の方式の広視野光学顕微鏡用いて検出することに成功した(図3(b))。

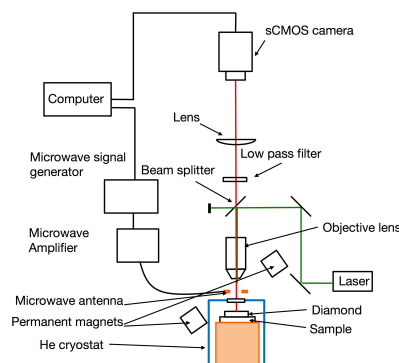


図2. ヘリウム温度から室温までの広い範囲で動作可能なダイヤモンドNVセンター広視野磁気顕微鏡の概略図。

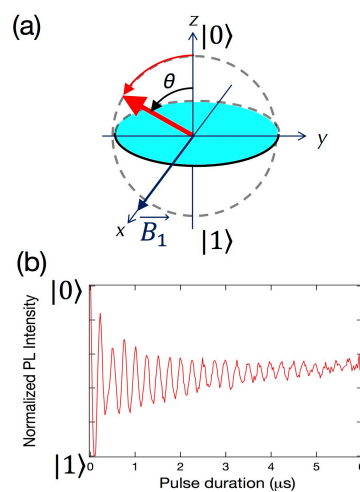


図3. (a) ブロッホ球の概略図。(b) NVセンター発光により検出した電子スピン系のラビ振動。

本研究は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。

【3】 遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光応答（綾野、野村）〔論文2〕

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 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。この有限の大きさのバンドギャップにより高い on/off 比の電界効果トランジスタ(FET)が作製され、発光素子・光検出器としても有望とされている。さらにスピン-バレーロックングによりスピントロニクス素子としても興味深い性質をもつ。

これまで、私たちは遷移金属ダイカルコゲナイド MoS_2 薄膜を利用した FET 構造を作製し研究を進めてきた。前年度に引き続き、 MoS_2 薄膜チャネルと絶縁膜の間の界面ラフネス散乱、 SiO_2 絶縁膜中の固定電荷等による散乱等の影響を低減するために、六方晶窒化ボロン(h-BN)で MoS_2 薄膜チャネルの上下を挟んだ構造の試料を作製し、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。

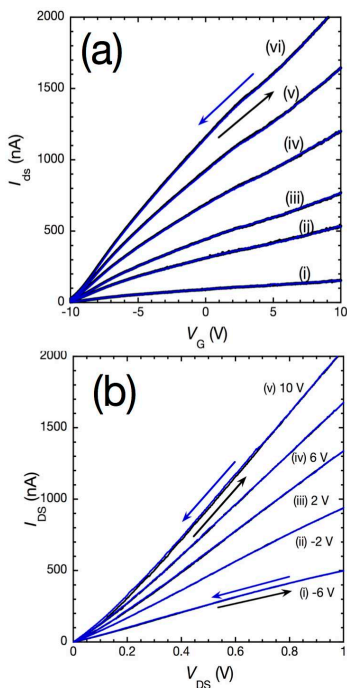


図4. ドライトランスファー法により作製した $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造電界効果トランジスタの線形領域、レーザー光非照射下室温における (a) $I_{DS}-V_G$ 特性 (i) $V_{DS}=0.1$, (ii) 0.3, (iii) 0.4, (iv) 0.6, (v) 0.8, (vi) 1.0 V、(b) $I_{DS}-V_{DS}$ 特性 (i) $V_G=-6$, (ii) -2, (iii) 2, (iv) 6, (v) 10 V。

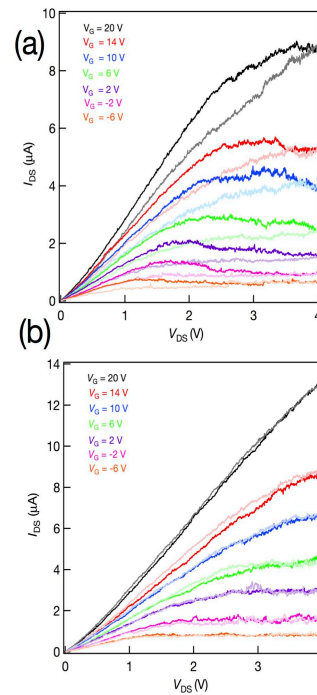


図5. ドライトランスファー法により作製した $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 積層構造電界効果トランジスタの $I_{DS}-V_{DS}$ 特性。(a) レーザ光非照射, (b) レーザ光照射下 ($P = 1.6 \mu\text{W}$)。

図 4 (a) にドライトランスファー法により作製した MoS₂/h-BN 積層構造 FET の線形領域、レーザ光非照射下室温におけるドレイン電流 (I_{DS})-ゲート電圧 (V_G) 特性を示す。従来型の SiO₂ 上 MoS₂FET で見られていたヒステリシスが MoS₂/h-BN 積層構造 FET ではほぼ消失していることがわかる。これは従来型の SiO₂ 上 MoS₂FET においては MoS₂-SiO₂ 界面に吸着された水分子によるトラップ状態の影響が大きかったが、MoS₂/h-BN 積層構造 FET ではその伝導特性への影響を避けられたためであると考えられる。同様にドレイン電圧が 1 V 以下の線形領域における I_{DS} -ドレイン-ソース電圧 (V_{DS}) 特性 (図 4(b)) においても、ヒステリシスをほぼ消失させることに成功した。

図 5 に MoS₂/h-BN 積層構造 FET の非線形-飽和領域におけるドレイン-ソース電流 I_{DS} - V_{DS} 特性を示す。レーザ光非照射の場合、飽和電圧はゲート電圧 V_G の減少に伴い、減少することがわかる。また、 I_{DS} - V_{DS} 特性には MoS₂/hBN 界面近傍の電荷トラップ状態へのホットキャリアの注入と放出によると考えられるヒステリシスが見られた。このヒステリシスは図 5 (b) に示すように、レーザ光照射下では顕著に低減した。これはレーザ光照射によってホットキャリアの注入、放出時間が短くなったためであると考えられる。

<査読論文>

1. Daisuke Sakuma, Yusuke Nago, Ryosuke Ishiguro, Satoshi Kashiwaya, Shintaro Nomura, Kimitoshi Kono, Yoshiteru Maeno, Hideaki Takayanagi, “Investigation of the Vortex States of Sr₂RuO₄-Ru Eutectic Microplates Using DC-SQUIDS”, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 114708 (2017).
2. Akihisa Saito, Tomoki Ayano, and Shintaro Nomura, “Photoresponse in h-BN/MoS₂/h-BN thin-film transistor”, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 045201 (2018).
3. Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Magnetization measurements of Sr₂RuO₄-Ru eutectic microplates using dc-SQUIDS”, J. Phys.: Conf. Ser. (in press).

<学位論文>

数理物質科学研究科物理学専攻修士論文 (2018 年 3 月)

1. 木村 龍典: 「ヘリウム温度下電流・磁気イメージングのための広視野磁気顕微鏡システムの開発と評価」
2. 中野 徹生: 「二次元電子系試料のねじれ偏光パルス照射効果」

<国際会議>

1. (invited) Shintaro Nomura, “Local spin injection and detection for investigations of nanostructures and topological materials”, International Workshop Top-Spin 3 (IFW Dresden, Dresden, Germany, April 25-28, 2017).
2. S. Nomura, Y. Miura, S. Nomoto, and S. Kashiwaya, “Magnetic field imaging for topological materials”, International Conference on Topological Materials Science, (Tokyo Institute of Technology, May 10, 2017).
3. Y. Miura, S. Nomoto, S. Kashiwaya, and S. Nomura, “Wide-field Magnetometry by Frequency Modulation of Microwaves Based on Nitrogen-vacancy Centers in Diamond”, SPINTECH IX, (Fukuoka International Congress Center, June 4-6, 2017).
4. Y. Nago, D. Sakuma, R. Ishiguro, S. Kashiwaya, S. Nomura, K. Kono, Y. Maeno, and H. Takayanagi, “Magnetization measurements of Sr₂RuO₄-Ru eutectic microplates using dc-SQUIDS”, 28th International Conference on Low Temperature Physics (Swedish Exhibition Centre, Aug. 9-16, 2017).

5. A. Saito, T. Ayano, and S. Nomura, “Photocurrent in h-BN/MoS₂/h-BN Heterostructures”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (Pennsylvania State University, July 31-August 4, 2017).
6. H. Tanikawa, T. Nakano, H. Ito, S. Nomura, and K. Misawa, “Selective Excitations of Two-dimensional Electron Systems by Arbitrary Vector Shaped Optical Pulse”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (Pennsylvania State University, July 31-August 4, 2017).
7. T. Ayano, A. Saito, and S. Nomura, “Characterizations of a Hexagonal BN-encapsulated Multilayer MoS₂ Photodetector”, JSAP-OSA Joint Symposia 2017 (Fukuoka International Congress Center, Sep. 7, 2017).
8. Shuhei Nomoto, Ryusuke Kimura, Satoshi Kashiwaya, and Shintaro Nomura, “Optical magnetic field imaging on magnetic film with Nitrogen-Vacancy center in diamond”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).
9. T. Nakano, H. Tanikawa, H. Ito, S. Nomura, and K. Misawa, “Optical Excitation of Two-dimensional Electron Gas by Chirp Controlled Ultrafast Pulses”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).
10. T. Ayano, A. Saito, and S. Nomura, “High photoresponsivity Hexagonal BN Encapsulated Multilayer MoS₂ Photodetector”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (International Congress Center Tsukuba, Sep. 26, 2017).

<講演>

1. 野元嵩平, 木村龍典, 柏谷聡, 野村晋太郎「ダイヤモンドNVセンターを用いた磁性体の広範囲磁気イメージング」日本物理学会2017年秋季大会, 21pPSA-31 (岩手市, 岩手大学, 2017年9月21日)
2. 齋藤明央, 綾野智貴, 野村晋太郎「MoS₂/h-BN薄膜積層構造の光応答」日本物理学会2017年秋季大会, 23pB31-8 (岩手市, 岩手大学, 2017年9月23日)
3. (招待講演) 野村晋太郎「ベクトル波形整形波による二次元電子系の光励起効果」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, 2017年11月2日)
4. 中野徹生, 伊藤宙陸, 野村晋太郎, 三沢和彦「ベクトル電場波形整形パルス照射による二次元電子系試料光起電力の円二色性」日本物理学会年次大会, 23pB402-10, (野田市, 東京理科大学, 2018年3月23日)

<社会貢献>

1. 野村晋太郎「光の科学」(茨城県立並木中等教育学校, SSH特別講義, 2017年12月14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29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 「先端ナノプローブ分光測定によるトポロジカル物質の解明」研究課題番号: 16H00978, 平成29年度: 直接経費 2,000,000 円 (研究代表者: 野村 晋太郎)
3. 科学研究費 基盤研究 A 「ベクトル電場波形整形パルスによる時間反転対称性の破れた量子系の生成と制御」研究課題番号: 15H02117, 平成29年度: 直接経費 6,300,000 円 (分担金 1,500,000 円) (研究代表者: 三沢 和彦)