

令和元年6月14日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03673

研究課題名(和文)ヘリカルTHz波による二次元電子系局所励起効果の解明

研究課題名(英文) Investigations of local excitation of two-dimensional electron systems by helical THz waves

研究代表者

野村 晋太郎 (Nomura, Shintaro)

筑波大学・数理工学系・准教授

研究者番号：90271527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではベクトル波形整形パルス発生法を用いて偏光状態とTHz帯回転振動数を制御したパルスを発生し、二次元電子系試料の局所励起効果に関する研究を実施した。そのためにGaAs/AlGaAs変調ドープ量子井戸試料、遷移金属ダイカルコゲナイドMoS<sub>2</sub>試料を作製し評価した。変調ドープ量子井戸試料に対して、ねじれ偏光パルス光照射し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することにより、偏光方位角回転振動数とその回転の向きに依存した光電流の観測に初めて成功した。こ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。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では無磁場下非磁性体において時間反転対称性の破れた状態の実現・観測に成功した。これは無磁場下での量子ホール状態の観測、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と位置付けられる。ベクトル整形ねじれ偏光パルスの回転振動数を広い範囲で調整可能であり、高い自由度で偏向状態を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。本研究の成果は無もしく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。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we have generated polarization-twisting pulses with the polarization rotation frequency in the THz regime, and investigated a local excitation effect of two-dimensional electron gas samples by illuminating the polarization shaped pulses. For this purpose, we have fabricated and characterized GaAs/AlGaAs modulation-doped quantum well Hall-bar samples and encapsulated h-BN/MoS<sub>2</sub>/h-BN heterostructure field-effect transistors. We have, for the first time, successfully observed the switching of the direction of the photovoltage depends on the envelope helicity of the polarization-twisting pulses. These observations are explained by the circular photogalvanic effect and the classical edge photocurrent generated by acceleration of free carriers in the vicinity of the sample edge by the optical electric field of the polarization-twisting pulses.

研究分野：半導体物性

キーワード：半導体 二次元電子系 偏光状態任意操作

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初時点において研究代表者等のグループでは希釈冷凍機中で動作する円偏光近接場光学顕微鏡の開発に成功し、初めてスピン分裂した量子ホールカイラル端状態の空間マップ図を得ることに成功していた。これにより異なるチャーン数をもつ領域をマッピングすることが可能となりトポロジカル端状態の研究に寄与した。これらの研究は光学的イメージングを観測に活用するパッシブな手法であったが、この手法をさらに一歩進めて光照射によって積極的に物性を制御することで二次元電子系の物性研究に新たな可能性が開けるのではないかという着想を得たのが本研究を開始する発端となった。二次元電子系分野において Oka-Aoki, Kitakawa 等の円偏光レーザー照射によって物質系のトポロジカルな性質を制御する可能性が理論的に提案された。これは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な性質を制御しようとするものであり、光照射による物性制御の研究への機運が高まっていた。その中、三沢氏等と研究代表者が議論を深めて開始したのが本研究である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、完全に外部コントロールされた光の強度、偏光、位相情報を二次元電子系の軌道角運動量とスピンへ転写し、新たな量子状態の制御手法を確立しようとするものである。具体的には、最近開発された波面の制御された近赤外フェムト秒パルスからベクトル波形整形ねじれ偏光パルスを発生させる手法を用い、電場ベクトルの振幅と位相が制御されたヘリカル THz 波を極低温中の二次元電子系試料に局所照射して電子系の軌道角運動量の磁気量子数とスピンを選択的に励起する手法を開発すること、この軌道角運動量とスピンの選択的励起に関わる現象を調べ、新規な光-物質相の学理を確立することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスの局所励起

研究分担者の三沢等により、光パルスの直交する二つの方向の電場ベクトルの位相と振幅を各スペクトル成分毎に独立にコントロールして光パルスの時間発展をベクトル的に制御するベクトル波形整形波の発生法が開発された。この手法により、例えば、偏光方位角が時間に伴い回転するねじれ偏光パルスの発生が実証され、さらに波長変換により任意の偏光状態をもつ THz 帯のパルスを、数 THz の振動数の範囲で生成可能であることが示された。本研究では、このベクトル波形整形波発生法を用いた。本研究で構築したこのシステムの概略図を図 1 に示す。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は透過型回折格子で分散された後、凹面鏡 (CM) により空間光変調器 (SLM) に入射される。空間光変調器により各波長の二つの直交偏光成分のスペクトル位相がコンピュータにより制御される。各スペクトル成分に対して二次分散、周波数チャープを与えてフェムト秒パルスを時間軸で引き延ばす。さらに、二つの直交偏光成分に異なる一次分散を与えることにより電場波形を時間軸で平行移動させる。このことにより各偏光成分の瞬時周波数に一定の周波数差を与えられる。空間光変調器透過後の光を再度、透過型回折格子を通過してパルスに戻すことにより、ねじれ周波数、パルスの継続時間が制御された右・左まわりねじれ偏光パルスが生成される。このベクトル波形整形ねじれ偏光パルスをヘリウムクライオスタット中の二次元電子系試料に局所照射して空間マップを行うために、光路上のレンズ、光学ウィンドウ、光学ミラー等によって周波数チャープと偏向の乱れを補正するためのセットアップを構築した。光パルスのスペクトル位相の特性評価と分散補償にはメタホウ酸バリウム (BBO) 結晶を用いた自己相関による Multiphoton Intrapulse Interference Phase (MIIPS) 法を用いた。

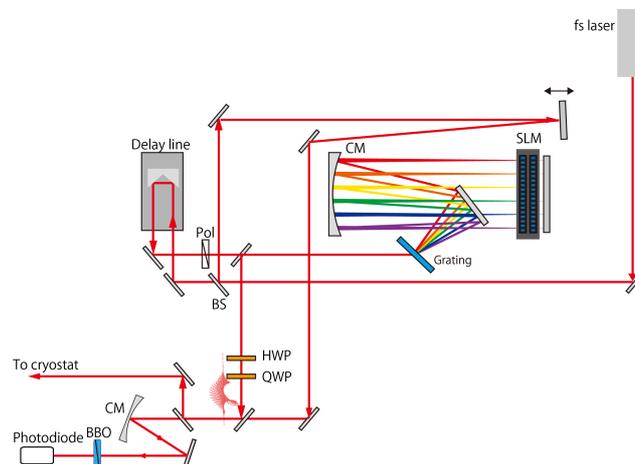


図 1 ベクトル波形整形波発生のためのシステムの概略図。偏光子 (Pol) を透過後に透過型回折格子 (Grating) で分散された光の凹面鏡 (CM)、空間光変調器 (SLM) により直交する二つの方向のスペクトル位相を制御し、波長板 (HWP)、 $\lambda/2$  波長板 (QWP) を用いてねじれ偏光パルスを生成した。メタホウ酸バリウム (BBO) 結晶を用いた自己相関によりねじれ偏光パルス特性評価を行なった。

## (2) 光照射下反転対称性の破れに起因する新規な光-物質相の研究

ベクトル波形整形波を照射し、光照射下反転対称性の破れに起因する新規な光-物質相の研究を実施するための二次元電子系試料として、a) スピン-軌道相互作用の小さい GaAs ヘテロ接合中二次元電子系、b) スピン-軌道相互作用の大きい遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{MoS}_2$  二次元系試料を候補に選択し、これらの試料を作製し研究を実施した。

### a) GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 変調ドープ量子井戸試料

二次元電子系として井戸幅 10 nm の GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  変調ドープ量子井戸試料を作製した。フォトリソグラフィにより幅  $W=400\ \mu\text{m}$ 、長さ  $L=1600\ \mu\text{m}$  の変調ドープ量子井戸ホールバー試料を作製した。試料裏面にバックゲートを作製し、バックゲート電圧 ( $V_g$ ) によって電子密度を調整することを可能とした。

### b) 遷移金属ダイカルコゲナイド $\text{MoS}_2$ 二次元系試料

遷移金属ダイカルコゲナイド  $\text{MoS}_2$  薄膜を利用した二次元系試料には試料の安定性と電子移動度の低さに課題があった。そこで、私たちは  $\text{MoS}_2$  薄膜を六方晶窒化ボロン h-BN で挟み込んだ 3 層構造の試料を作製した。ドライトランスファー法によりチャネルを溶媒に触れさせることなく hBN/ $\text{MoS}_2$ /hBN ヘテロ構造試料を作製する方法を開発した。バックゲート電極にバックゲート電圧 ( $V_G$ ) を印加することによって電子密度を調整することを可能とした。

## (3) ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスの誘導ラマン過程を用いた局所励起

近赤外波長領域のベクトル波形整形ねじれ偏光パルスを試料に局所照射し、インパルス誘導ラマン過程により二次元系試料に THz 帯の励起を行う手法の開発を行なった。誘導ラマン過程では光子エネルギー  $h\nu_1$  と  $h\nu_2$  の光が試料に入射された際に、その差のエネルギー  $h\nu_0 = h\nu_1 - h\nu_2$  が試料中の素励起に与えられる。回折格子で分散された瞬時周波数成分がチャープにより各時刻において一定のエネルギー差  $h\nu_0$  を保つようなねじれ偏光パルスを試料に入射し、THz 帯の励起を行なった。空間位相変調器を用いて位相、偏向を制御し、右回りまたは左回りの一定のヘリシティをもつ THz 励起を行なった。励起パルス光の波長を変調ドープ量子井戸のバンドギャップエネルギー以上を含む場合、バンドギャップエネルギー以下のみを含む場合について測定を行なった。図 1 の 1/2 波長板のかわり光弾性変調器を設置した測定も行い、ヘリシティを右回り、左回りに変調してこれに同期した信号を検出することにより高感度に信号を得た。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、励起強度、入射角度等に依存した変調ドープ量子井戸ホールバー試料の電極間に生じる光起電力を調べた。試料表面を局所的に光励起し、空間マッピングを行なった。

## (4) 円偏向 THz 電磁波局所励起

ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスを GaP 結晶(111)面に入射し、円偏向ヘリカル THz 電磁波に変換した。これを最大磁場 6 T、最低温度 3 K の光学窓付きヘリウムクライオスタット中に設置された変調ドープ量子井戸試料に斜め入射することにより、THz 帯の励起に関する研究を実施した。円偏向 THz 光パルスを照射した状態下の磁場依存性、磁場を固定した際の THz の振動数依存性に関する研究を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) 新規な光-物質相のための試料に関する研究

#### a) GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 変調ドープ量子井戸

二次元電子系として井戸幅 10 nm の GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  変調ドープ量子井戸試料を作製し、その特性を評価した。試料裏面にバックゲートを作製し、バックゲート電圧 ( $V_g$ ) によって電子密度を調整することを可能とした。測定温度 0.3 K における  $V_g = 0 \sim -2\ \text{V}$  において、電子密度は  $n_s = 2.6 \times 10^{15} \sim 1.6 \times 10^{15}\ \text{m}^{-2}$ 、電子移動度は  $\mu = 310,000 \sim 120,000\ \text{cm}^2/\text{Vs}$  であった。これは、光照射下反転対称性の破れに起因する新規な光-物質相の研究に適用可能な十分高い特性を示す試料であることを示す。

#### b) 遷移金属ダイカルコゲナイド $\text{MoS}_2$ 二次元系

六方晶窒化ボロンでチャネルをはさんだ hBN/ $\text{MoS}_2$ /hBN ヘテロ構造試料を新たに開発したドライトランスファー法により作製し、その特性を評価した。その結果  $10^5$  以上の on/off 比、サブスレッショルドスイング値 200 mV/dec 以上、電子移動度 25  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  を得た。図 2 に線形領域におけるドレイン-ソース電圧のバックゲート電圧 ( $V_G$ ) 依存性、ドレイン-ソース電流 ( $I_{DS}$ ) のドレイン-ソース電圧 ( $V_{DS}$ ) 依存性、 $P = 660\ \text{nW}$  の光照射下におけるドレイン-ソース電流のバックゲート電圧依存性を  $V_G$ ,  $V_{DS}$  の上昇方向、下降方向のスweepについてそれぞれ示す。いずれもドレイン-ソース電流の特性にヒステリシスが小さいことがわかる。これは  $\text{MoS}_2$ /h-BN 積層構造によるキャリア散乱の低減効果によるものと推定される。従来報告されていた  $\text{MoS}_2$  電解効果トランジスタではゲート絶縁体における電荷のトラッピング、デトラッピングによるヒステリシスが観測されていたのと比較して大きく改善された。

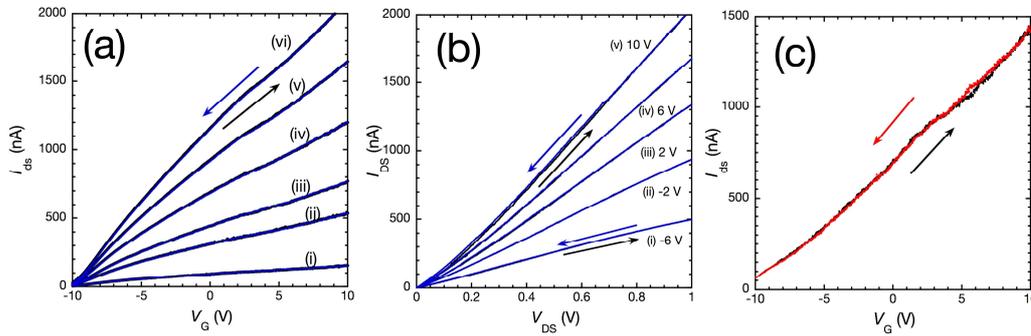


図2 (a) ドレイン-ソース電圧  $V_{DS} = (i) 0.1, (ii) 0.3, (iii) 0.4, (iv) 0.6, (v) 0.8, (vi) 1.0$  V におけるドレイン-ソース電流のバックゲート電圧依存性。  $V_G$  について上昇方向のスイープ (黒) 下降方向のスイープ (青)。 (b) バックゲート電圧  $V_G = (i) -6, (ii) -2, (iii) 2, (iv) 6, (v) 10$  V におけるドレイン-ソース電流のドレイン-ソース電圧依存性。 (c) 光照射下 ( $P = 660$  nW) ドレイン-ソース電圧  $V_{DS} = 1.0$  V におけるドレイン-ソース電流のバックゲート電圧依存性。  $V_G$  について上昇方向のスイープ (黒) 下降方向のスイープ (赤)。

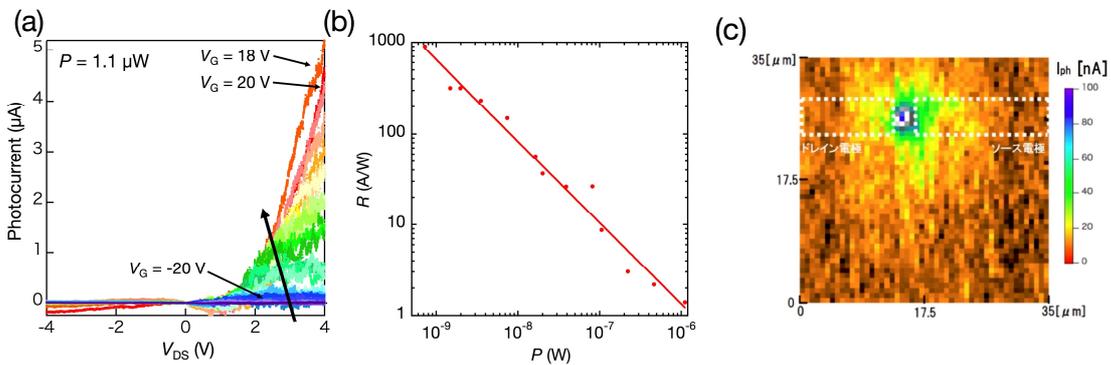


図3 (a) 光照射下 ( $P = 1.1 \mu\text{W}$ )、バックゲート電圧  $V_G = (i) 20, (ii) 14, (iii) 8, (iv) 2, (v) -4, \text{ and } (vi) -10$  V における光電流のドレイン-ソース電圧 ( $V_{DS}$ ) 依存性。 (b) 光応答 ( $R = I_{ph}/P$ ) の光励起強度 ( $P$ ) 依存性。 (c)  $V_G = 0.5$  V、 $V_{DS} = 1.0$  V における局所光励起マッピング。白破線はドレイン電極とソース電極の位置の概略を示す。

図3 (a) にバックゲート電圧  $-10 \sim 20$  V における光電流 ( $I_{ph}$ ) のドレイン-ソース電圧 ( $V_{DS}$ ) 依存性を示す。  $V_{DS}$  の大きい非線形領域において大きな光電流が観測された。図3 (b) に  $V_G = 20$  V、 $V_{DS} = 4$  V における光応答 ( $R = I_{ph}/P$ ) の光励起強度 ( $P$ ) 依存性を示す。  $P = 0.73$  nW において高い光応答  $R = 900$  A/W が得られた。これは従来の単層  $\text{MoS}_2$  素子で観測された  $P = 0.9$  nW における  $R = 6$  A/W、 $P = 0.15$  nW における  $R = 880$  A/W と比較して高い光応答を得ることに成功した。以上のように窒化ボロンを用いたことによる応答特性の向上が示された。

図3 (c) に  $V_G = 0.5$  V、 $V_{DS} = 1.0$  V における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を照射した際に大きい光応答が見られた。この結果は図8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起電流を示し、信号のピークはドレイン電極側に見られる。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。

以上のように、hBN/ $\text{MoS}_2$ /hBN ヘテロ構造試料は、従来の  $\text{MoS}_2$  電界効果トランジスタ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。さらに、h-BN に  $\text{MoS}_2$  薄膜が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。しかしながら、数週間測定を継続するとその間に電気特性が変化し、突然電気抵抗が非常に大きくなる試料がしばしば見られた。従って、 $\text{MoS}_2$  薄膜は興味深い性質をもつものであり、将来にわたって解明すべきことではあるが、以下、ベクトル波形整形ねじれ偏光パルス照射する測定は、GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  変調ドープ量子井戸試料を中心に行なった。

## (2) ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスの誘導ラマン過程を用いた局所励起

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関する研究を実施した。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/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  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 回転の向きの変換による検出信号の符号の変換が観測された。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変換が観測された。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。試料の中央部でも観測される“バルク”電流は、ドレセルハウス、ラッシュバー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り GaAs の伝導電子帯のサブバンドがスピン分裂していることによるものであり、光ガルバニック効果の一種である。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ものであり、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。本研究の成果は論文にまとめられ、報告書提出時点において査読中である。

### (3) 円偏光 THz 電磁波局所励起

ベクトル波形整形ねじれ偏光パルスを GaP 結晶(111)面に入射して得た円偏光ヘリカル THz 波を光学窓付きヘリウムクライオスタット中に設置された変調ドープ量子井戸試料に斜め入射し、ヘリカル THz 波局所励起効果に関する研究を実施した。円偏光 THz パルスを照射下、試料電極間に生じる光起電圧の磁場依存性、および磁場を一定の条件下で光起電圧の THz 振動数依存性を調べた。振動数一定における磁場スイープにおいて、THz パルス照射時、非照射時の電極間電圧に明確な差が観測され、量子ホール状態の電子占有数と相関を持つ信号を得た。

### (4) まとめ

以上のように、本研究では無磁場下非磁性体において時間反転対称性の破れた状態を実現・観測した。本研究において、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電流の観測に初めて成功した。THz 回転ねじれ偏光パルスにより変調ドープ量子井戸中伝導電子帯サブバンドの電子が選択的にスピン励起され、スピン-軌道相互作用により軌道運動量に変換されたものである。今回観測された試料の端を流れる“エッジ”電流は半古典的なものであり量子化状態には至らなかった。しかしながらこれ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と位置付けられる。ベクトル整形ねじれ偏光パルスの回転振動数を広い範囲で調整可能であり、かつ偏光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。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

1. Akihisa Saito, Tomoki Ayano, and Shintaro Nomura, “Photoresponse in h-BN/MoS<sub>2</sub>/h-BN thin-film transistor”, *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**, 045201-1-4 (2018), <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.045201> (査読有)。
2. Kazuhiko Misawa “Applications of polarization-shaped femtosecond laser pulses”, *Advances in Physics: X*, 544-569 (2016), <http://dx.doi.org/10.1080/23746149.2016.1221327> (査読有)。

[学会発表](計 23 件)

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、2019年5月10日、かごしま県民交流センター。
2. 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、2019年3月17日、九州大学伊都キャンパス。
3. H. Ito, T. Nakano, S. Nomura, and K. Misawa, “Polarization shaping of near-infrared femtosecond pulse for transport measurement of semiconductor” Annual Meeting of the Physical Society of Taiwan, (National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, January 23-25, 2019).
4. (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, Dec. 23, 2018).
5. 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、2018年11月1日茂庭荘。
6. Tomoki Ayano, Akihisa Saito, 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).
7. 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*, (Montpellier, France, 2 Aug. 2018).
8. 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)。
9. 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)。
10. T. Ayano, A. Saito, S. Nomura, “High photoresponsivity Hexagonal BN Encapsulated Multilayer MoS<sub>2</sub> Photodetector”, Interdisciplinary Work Shop on Science and Patents 2017 (26 Sep. 2017, International Congress Center Tsukuba).
  11. T. Nakano, H. Tanikawa, H. Ito, S. Nomura, and K. Misawa, “Optical Excitation of Two-dimensional Electron Gas by Chirp Controlled Ultrafast Pulses”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2017 (26 Sep. 2017, International Congress Center Tsukuba).
  12. 齋藤明央, 綾野智貴, 野村晋太郎「MoS<sub>2</sub>/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, 2017 年 9 月 2 3 日)。
  13. T. Ayano, A. Saito, S. Nomura, “Characterizations of a Hexagonal BN-encapsulated Multilayer MoS<sub>2</sub> Photodetector”, JSAP-OSA Joint Symposia 2017 (7 Sep. 2017, Fukuoka International Congress Center).
  14. 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 (July 31 – August 4, 2017, Pennsylvania State University, University Park, U.S.A).
  15. A. Saito, T. Ayano, and S. Nomura, “Photocurrent in h-BN/MoS<sub>2</sub>/h-BN Heterostructures”, 22nd International Conference on Electronic Properties of Two Dimensional Systems (July 31 – August 4, 2017, Pennsylvania State University, University Park, U.S.A).
  16. (invited) S. Nomura, “Local spin injection and detection for investigations of nanostructures and topological materials”, International Workshop Top-Spin 3 (IFW Dresden, Dresden, Germany, 25-28, April 2017).
  17. 谷川大貴, 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の光起電力効果」日本物理学会年次大会 18aA21-8、(豊中市、2017 年 3 月 18 日)。
  18. 三沢和彦「ベクトル波形整形パルスの生成と応用」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、2016 年 11 月 22 日 - 23 日)。
  19. 野村晋太郎「半導体二次元電子系へのベクトル波形整形ねじれ偏光パルス励起効果」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、2016 年 11 月 22 日 - 23 日)。
  20. 野村晋太郎「光誘起端状態の検出に向けて」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会(宮城県黒川郡大和町、ベルサンピアみやぎ泉、2015 年 10 月 8 日)。
  21. 齋藤明央, 渡邊寛之, 野村晋太郎, 「ゲート付き遷移金属ダイカルコゲナイド薄膜の光伝導特性」日本物理学会秋季大会 19p-PSB-14 (吹田市、関西大学、2015 年 9 月 18 日)。
  22. A. Saito, R. Kimura, H. Watanabe, and S. Nomura, “Photoconductivity measurements of back-gated MoS<sub>2</sub> photodetectors”, Interdisciplinary Workshop on Science and Patents 2015 (Univ. Tsukuba, Sep. 4, 2015).
  23. H. Watanabe, C. Tsukamoto, and S. Nomura, “High photoresponsivity MoS<sub>2</sub> photodetectors by chemical doping technique” 21st International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-21) (Sendai International Center, July 26 - 31, 2015).

〔その他〕

ホームページ等 <http://www.px.tsukuba.ac.jp/~snomura/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：三沢 和彦

ローマ字氏名：Kazuhiko Misawa

所属研究機関名：東京農工大学

部局名：工学(系)研究科(研究院)

職名：教授

研究者番号(8桁)：80251396

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。