

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610079

研究課題名(和文)ベクトル整形パルス励起による端電流制御

研究課題名(英文)Controlling edge current by irradiation of terahertz polarization-shaped pulses

研究代表者

野村 晋太郎(Nomura, Shintaro)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：90271527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：最近、開発されたベクトル整形パルス発生法では、光の電場の二つの偏光方向の位相をコントロールし、時間軸上で任意電場パルス波形を発生させることが可能となった。本研究ではこの手法を用いて、直線偏光の向きが時間経過にともない回転するねじれ偏光パルスを、ねじれのTHz帯の周期で生成し、無磁場下の二次元電子系試料に照射して、その効果を調べた。その結果、軌道の角運動量空間での非平衡分布を生じ、試料端近傍を光励起した際に生じる光電流がねじれ偏光パルスのねじれの向きの正負に対して非対称であることを見いだした。本研究は、系の時間反転対称性が破れに起因する新規な光物質相の開拓のためのさきがけとなった。

研究成果の概要(英文)：Recently developed polarization shaping method of terahertz pulses enables us to control the electric field vectors arbitrary. In this research project, we have investigated the optical excitation effects in a two-dimensional electron gas by irradiation of an optical field with polarization vector rotating in THz regime at zero external magnetic field at low temperatures. We have found that the induced photo-current is not symmetric with respect to the direction of the rotation of the polarization vector. The results of our research project should promote further investigations of symmetry breaking phenomena due to optical excitations.

研究分野：半導体物性

キーワード：光照射効果 二次元電子系

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 二次元電子系中の量子ホール状態の実現に磁場は必須ではなく、時間反転対称性を破ることにより生じ得ることが Haldane によって示されていた [Haldane, PRL **61**, 2015 (1988)]。最近、トポロジに起因した量子状態への理解が深まり、円偏光照射による半導体のトポロジカル絶縁体への転移 [Inoue 他, PRL **105**, 017401 (2010)]、半導体量子井戸のトポロジカル絶縁体への転移 [Lindner 他, Nat. Phys. **7**, 490 (2011)]、光照射による無磁場下での量子ホール状態 [Kitagawa 他, PRB **84**, 235108 (2011)] 等に関する理論的提案が相次いでなされ、円偏光照射による新たな量子状態の生成が注目を集めている。

(2) 最近、研究代表者等は近接場走査型光学顕微鏡を用いたホール光起電圧測定法により量子ホール端状態の可視化に成功した [Ito 他, PRL **107**, 256803 (2011)]。近接場光プローブの改良と偏向状態外部制御技術の開発等によって局所円偏光照射技術を確立した。その結果、局所的にスピン注入し、スピン分裂した量子ホール端状態の観測に世界に先駆けて成功した [EP2DS 2013]。以上のように量子ホール端状態の解明にあたって、光学的手法の有効性を実証した。一方、近年の超高速パルスレーザー技術の進歩に伴い、THz 光発生は実験室レベルでの物性研究に適用されるようになってきた。最近、研究分担者である三沢のグループにおいて電場ベクトルの振幅と位相をコントロールして THz パルスを発生させるベクトル整形 THz パルス発生法が開発された [Sato 他, Nature photonics **7**, 724 (2013)]。これは近赤外波長領域で用いられてきたパルスシェーピングの技術を THz 帯へ拡張したものであり、THz パルスの偏向状態を完全に制御するものである。これにより 0.3~3 THz の範囲で波長可変な円偏向パルス光源を実験室レベルにおいて得られるようになった。

研究代表者と研究分担者である三沢との間の議論の積み重ねにより、円偏向 THz 光照射による無磁場下での量子ホール状態の実現への端緒が得られるのではないかとこの着想に至った。両者がこれまでの研究で得た知見を最大限生かして、この開拓研究を行うこととした。

## 2. 研究の目的

(1) 最近、開発されたベクトル整形パルス発生法では、光の電場の二つの偏光方向の位相をコントロールし、時間軸上で任意電場パルス波形を発生させることが可能となった。この手法を用いて、本研究では直線偏光の向きが時間経過にともない回転するねじれ偏光パルスを、ねじれの THz 帯の周期で生成することが可能となった。本研究の

目的は、このベクトル整形パルスを無磁場下の二次元電子系試料に照射することにより、軌道の角運動量空間での非平衡分布を生じさせ、その効果を電気伝導特性により調べて新規な光-物質相を開拓することである。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、ベクトル整形パルス照射効果を調べるために最適な構造をもつ GaAs/AlGaAs 変調ドープ単一ヘテロ接合ホールバー構造試料、層状半導体である MoS<sub>2</sub> 等に電極を形成した試料を新規に設計した。GaAs/AlGaAs 変調ドープ単一ヘテロ接合ホールバー構造試料は、電子移動度の高い試料を再現性良く作製することが可能であるため、無磁場下の試料端の古典的軌道の観測のための第一の候補として用いた。一方、Kitagawa 他 PRB 2011 の論文では蜂の巣構造をもつ層状物質がトポロジカル端状態観測の候補として挙げられているため、蜂の巣構造層状物質でバンドギャップが開く MoS<sub>2</sub> 等も候補物質として取り上げた。これらの候補物質に対してフォトリソグラフィ法、電子線露光法により光照射効果を調べるための電極を作製した。さらに、これらの電極を形成した試料の光照射効果、電気伝導特性等の基礎的物性評価を実施した。(2) フェムト秒モード同期チタンサファイアレーザーを光源として用い、反射型空間光変調器を用いた光電場パルス波形整形器を用いて偏光方向が回転するねじれ偏光パルスを発生させた。偏光方向の回転の振動数は -9~+9 THz とした。このねじれ偏光パルス光を 77 K もしくはヘリウム温度のクライオスタット中に設置した試料に照射した。その際に、クライオスタットの窓材等による付加される分散の補償を行った。ねじれ偏光パルス照射の結果生じた照射効果を、試料端の電極間に生じる光電流をロックインアンプで同期して高感度に検出する手法を用いて調べた。軌道の角運動量空間での非平衡分布を生じさせて無磁場下における反転対称性の破れに起因する現象の開拓研究を実施した。

## 4. 研究成果

(1) ベクトル波形パルス照射効果を調べるための対象となる二次元電子系試料として図 1 (a) に示すような GaAs/AlGaAs 変調ドープ単一ヘテロ接合ホールバー構造試料および図 1 (b) に示すような層状半導体である MoS<sub>2</sub> に電極を形成した試料を作製した。変調ドープ単一ヘテロ接合ホールバー構造試料の幅  $W = 400 \mu\text{m}$ 、長さ  $L = 1600 \mu\text{m}$ 、電圧プローブ間の間隔は  $100 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$  とし、光照射に適した形状とした。作製した試料の電気伝導特性を 0.3 K、磁場下で評価し、電子密度  $4.9 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 、移動度  $1.3 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$  と本研究の実施に十分な特性を

持つと評価され、無磁場中の試料端の古典的軌道の観測のための条件を満たしていることが示された。また、円偏光照射に対する光応答を磁場下端状態において調べ、光選択則に従う信号を得た。

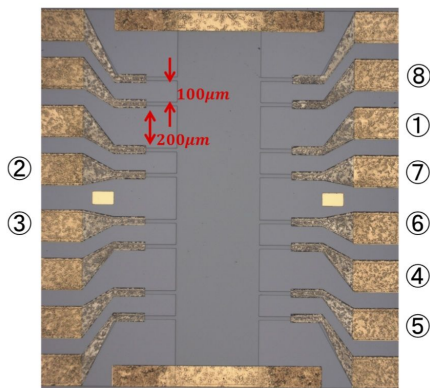


図1 ベクトル整形パルス照射効果を調べるために作製されたGaAs/AlGaAs変調ドーピング単一ヘテロ接合ホールバー構造試料の光学顕微鏡写真の例。①から⑧は電圧プローブ番号でありその間隔は100 μm、200 μmである。

(2) 層状半導体であるMoS<sub>2</sub>薄膜を270 nmの酸化膜を形成したp-Si基板上に劈開して形成した。MoS<sub>2</sub>薄膜の厚さは原子間力顕微鏡と発光スペクトル、ラマンスペクトル測定によって評価した。図2(a)には、1から3層の領域をもつMoS<sub>2</sub>薄膜の光学顕微鏡写真の例を示す。従来、MoS<sub>2</sub>薄膜はオーミック電極の抵抗が大きく、薄膜の電子移動度が低いため、電極間2端子抵抗が大きいたことが光応答素子としての性能の阻害要因となっていた。そこで本研究では、1,2ジクロロエタンを用いた塩素のMoS<sub>2</sub>への化学ドーピングを行った上で、電極を形成した。図2(b)に測定に用いた試料の光学顕微鏡写真の一例を示す。化学ドーピングの結果、オーミック電極の電気特性の改善と薄膜の電気抵抗の低減を測ることに成功した。p-Si基板の裏面に形成した電極と電子線リソグラフィにより表面に形成したオーミック電極間に電圧を印加することにより、MoS<sub>2</sub>薄膜の電気抵抗を制御可能であることが示された。光照射下でMoS<sub>2</sub>薄膜に流れる電流を裏面電極電圧、ソース=ドレイン電圧に対して詳細に調べた。その結果、光電流 $I_{ph}$ と入射レーザー強度密度 $P$ の比で表される受光感度 $R=I_{ph}/P$ が裏面電極電圧20 V、 $P=90 \text{ mW/cm}^2$ において97 A/Wという高い値を持つことがわかった。以上のように化学ドーピングは光照射下における受光感度の向上に有用であることが示された。

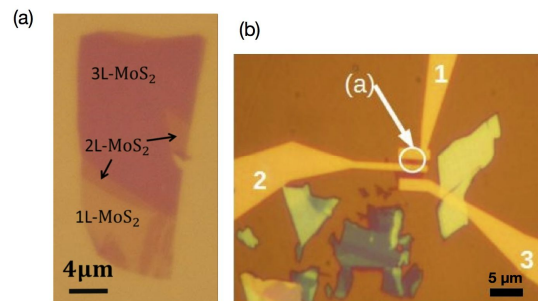


図2 (a) 層状半導体であるMoS<sub>2</sub>薄膜の光学顕微鏡写真の例。1層(1L)、2層(2L)、3層(3L)の領域を示す。(b)電子線露光法により電極を形成したMoS<sub>2</sub>薄膜試料の光学顕微鏡写真の例。

(3) 図3に光電場パルス波形整形器を用いて発生させたベクトル波形整形パルスの二次元電子系試料への照射のために本研究で開発したセットアップの概略図を示す。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は透過型回折格子で分散された後、凹面鏡により空間光変調器に入射された。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た後、再度透過型回折格子を通過してパルスに戻された。THz領域のねじれ偏光パルスのねじれ周波数は二つの偏光成分の周波数チャープと一次分散項とを空間光変調器を用いて設定することにより-9~+9 THzの範囲内で制御された。

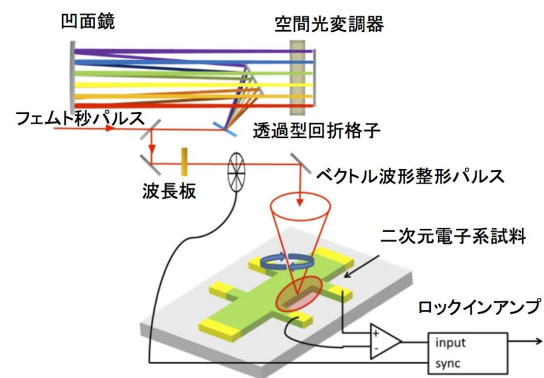


図3 光電場パルス波形整形器を用いて発生させたベクトル波形整形パルスの二次元電子系試料への照射のためのセットアップの概略図。

液体窒素デューワー中の温度77 K、もしくはヘリウムクライオスタット中の温度約6 K中に設置したGaAs/AlGaAs変調ドーピング単一ヘテロ接合ホールバー構造試料の試料端近傍にベクトル波形整形パルスを照射した。

ねじれ偏光パルスのねじれの向きが正負の両方の場合についてTHz回転周波数を0から9 THzの間で試料を光励起した際に生じる光電流の回転周波数依存性を、励起

強度を変化させて図 1 に示す複数の電圧プローブ間に対して詳細に調べた。その結果、光電流はねじれ偏光パルスのねじれの向きの正負に対して非対称であることを見いだした。これはインパルス誘導ラマン散乱過程によって電子系の運動量が励起された結果であると考えられる。比較のため、通常の直線偏光のフェムト秒レーザパルス光を試料に照射して空間マッピングを行い、生じた光電流の光励起強度依存性を調べた。その結果、同じ光励起密度下においてベクトル波形整形波照射時の光電流の大きさは、直線偏光フェムト秒レーザパルス光照射時の光電流の値より大きいことがわかった。

以上の結果は、ねじれ偏光パルス照射によって系の時間反転対称性が破れていることを示唆した。これは、ベクトル波形整形パルスを用いて半導体試料中の軌道角運動量を励起するという独自の新しい方法論の提案をおこなうものであり、その端緒が得られたことは今後のこの分野の発展に寄与するものと考えられる。以上のように本研究は、系の時間反転対称性が破れに起因する新規な光-物質相の開拓のためのさきがけとなった。さらに、応用面においても、本研究の成果は円偏光分解イメージング素子の開発等に寄与すると期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

Syuhei Mamyouda, Hironori Ito, Yusuke Shibata, Satoshi Kashiwaya, Masumi Yamaguchi, Tatsushi Akazaki, Hiroyuki Tamura, Youiti Ootuka, and Shintaro Nomura, “Circularly polarized near-field optical mapping of spin-resolved quantum Hall chiral edge states”, *Nano Lett.* 査読有 **15**, 2417-2421 (2015).

DOI: 10.1021/nl504767w

Shintaro Nomura, Syuhei Mamyouda, Hironori Ito, Yusuke Shibata, Tomoya Ohira, Luno Yoshikawa, Youiti Ootuka, Satoshi Kashiwaya, Masumi Yamaguchi, Hiroyuki Tamura, Tatsushi Akazaki, “Circularly Polarized Near-field Scanning Optical Microscope for Investigations of Edge States of a Two-dimensional Electron System”, *Appl. Phys. A* 査読有 **121**, 1341-1345 (2015).

DOI 10.1007/s00339-015-9420-9

Yusuke Shibata, Shintaro Nomura, Hiromi Kashiwaya, Satoshi Kashiwaya,

Ryosuke Ishiguro, and Hideaki Takayanagi, “Imaging of current density distributions with a Nb weak-link scanning nano-SQUID microscope”, *Sci. Rep.* 査読有 **5**, 15097/1-15097/10 (2015).  
DOI: 10.1038/srep15097

[学会発表](計 6 件)

S. Nomura, S. Mamyouda, H. Ito, Y. Shibata, Y. Ootuka, S. Kashiwaya, M. Yamaguchi, H. Tamura, and T. Akazaki, “Spin-split and spin-unpolarized incompressible strips revealed by optical local spin injection”, *International Symposium on Advanced Nanodevices and Nanotechnology*, November 29-December 4, 2015, Waikoloa, (USA).

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、2015年10月8日～2015年10月9日、ベルサンピアみやぎ泉(宮城県黒川郡大和町)。

三沢和彦「ベクトル電場波形整形パルスの生成と物質制御への応用」東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会、2015年10月8日～2015年10月9日、ベルサンピアみやぎ泉(宮城県黒川郡大和町)。

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*, Sep. 4, 2015, 筑波大学(茨城県つくば市)。

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*, July 26 - 31, 2015, 仙台国際会議場(宮城県仙台市)。

大嶋勇輝、伊東駿、野村晋太郎、三沢和彦、「GaAs単一ヘテロ接合ホールバーへのベクトル波形整形波照射効果」日本物理学会第70回年次大会、2015年3月21日～2015年3月25日、早稲田大学(東京都新宿区)。

[その他]

ホームページ等

<http://www.px.tsukuba.ac.jp/~snomura/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

野村 晋太郎 (NOMURA, Shintaro)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：9 0 2 7 1 5 2 7

(2)研究分担者

三沢 和彦 (MISAWA, Kazuhiko)  
東京農工大学・工学研究院・教授  
研究者番号： 80251396