

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03481

研究課題名(和文) 光渦による量子ホール・カイラルエッジ状態の電子励起と制御

研究課題名(英文) Electron excitation in the quantum Hall chiral edge state by optical vortex irradiation

研究代表者

音 賢一 (Oto, Kenichi)

千葉大学・大学院理学研究院・教授

研究者番号：30263198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：光渦の軌道角運動量と円偏光による角運動量が量子ホール電子系や、関連する電子励起に対して及ぼす影響を調べるため、低温・強磁場下の試料に光渦を顕微照射する実験系を構築した。GaAsヘテロ構造2次元電子系試料の形状を様々に工夫して、光渦の光強度プロファイルと2次元電子系のエッジ状態の位置関係が実験的に最適となるように試行錯誤を繰り返し、単なる光起電力効果等による現象と分離して光渦状態と円偏光状態を同時に制御した励起光の照射による電気伝導度の変化と光起電力の変化について調べた。ランダウ準位へ光渦照射により直接励起される条件下で、光渦照射による2次元電子系の磁気抵抗に差異が現れることを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光渦は、らせん状の等位相面を持ち、放射状の電場や中心軸を周回する方向の回転電場が発生するキラリティを持った光であり、いわゆる光の軌道角運動量を有した電磁波である。光渦が半導体に吸収されたときに生じる励起電子の状態は、通常の光励起によるものとは異なる可能性があり、新しい性質を与える可能性がある。量子ホール電子系は強い磁場により、電子のエネルギーはもちろん、その軌道角運動量やスピン角運動量が明確に定まっており、光励起によって生じた電子による電流やそのスピン状態を計測することで、未解明である光渦と電子系との相互作用を詳しく調べることができ、本研究では、その一端を捉えることができた。

研究成果の概要(英文)：The optical vortex (OV) which has a spiral wave front with the axial and radial components of electric fields carries an optical orbital angular momentum with a chirality. We studied the electron transport in a two-dimensional electron system made of GaAs/AlGaAs single-heterostructure under the OV irradiation to investigate the interaction between the OV and quantum Hall electron system which has chiral edge states along the sample boundary. To avoid the influence of the simple photoconductive effect, we measured the resistance deviation (dR) due to the OV irradiation by using lock-in technique. The dR peaks or dips can be observed in the QH regime, where the chiral edge states act as electron transport channels along the sample boundary. The origin of the observed dR may be attributed by the change of the scattering rate and/or by the modification of the number of excited electrons due to the sign of the topological number m of irradiated OV.

研究分野：半導体物理学

キーワード：量子ホール効果 光渦 エッジ状態 2次元電子系 強磁場 光起電力 キラリティ

1. 研究開始当初の背景

(1) らせん状の等位相面をもつ光渦は、中心軸に電場ゼロの特異点を有し、その周りの放射状電場や中心軸を周回する方向の回転電場が発生する「キラリティ」を持った光であり、光の軌道角運動量を有する特異な電磁波である。このため、光渦が半導体に吸収されたときに生じる励起電子の状態は、通常の光励起によるものとは異なることが期待され、光渦により生成した半導体中の励起子への軌道角運動量転写や、微粒子の回転マニピュレーションなど、興味深い現象が報告されている。この光渦による半導体中の電子励起の際に、光渦の角運動量および円偏光成分による角運動量が、電子系にどのように転写されるのかは自明ではなく、実験的にも未解明である。さらに、電子系自身がキラリティを持つ量子ホール電子系に対する光渦励起の研究は今まで報告が無い。

(2) 量子ホール電子系は、強磁場によるスピン分離したランダウ量子化により電子系の軌道角運動量やスピン角運動量が明確で、光励起によって生じたキャリアによる伝導やスピン状態を計測することで光渦との相互作用がより顕著に表れることが期待される。準備実験として量子ホール状態の試料の光照射による伝導度変化を試験的に調べたところ、試料端のカイラル・エッジ状態への電子励起が光渦により変化している可能性を示唆する結果を得て、本研究を本格的に実施して光渦の軌道角運動量と電子系との相互作用について研究を行うこととした。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、光渦の軌道角運動量と電子系の相互作用を明らかにすることである。その中でも特に、光照射での入射光エネルギー・光強度依存性を調べることで、光渦による光キャリアの生成過程の解明と、電子系の伝導を変化させる要因を定量的に把握し、軌道角運動量による違いを抽出して取り出すことを目指した。特に、光渦の軌道角運動量成分が量子ホール電子系に及ぼす効果について詳細に調べるとともに、試料端でのエッジ状態や様々な素励起に対しての相互作用を明らかにすることを目的とする。

(2) 量子ホール電子系は、そのエネルギーとスピン状態を実験的に制御可能な「素性の明らかな電子系」である。さらに、量子ホール状態にある2次元電子系の端に沿った1次元のカイラルな電子状態である「エッジ状態」は、加えられた磁場の向きにより試料端に沿って伝播する周回方向が決まっており（キラリティを持った電子）、後方散乱の無い量子伝導を示す。この量子ホール・カイラルエッジ状態の電子に対して、光渦の軌道角運動量成分とどのように相互作用するかを調べ、電子系の物性制御などの可能性を探る。

3. 研究の方法

(1) 光学窓付き7 T超伝導電磁石内にセットされた2次元電子系試料 (GaAs/AlGaAs 量子井戸や HEMT 構造試料など) に対して、チタンサファイア波長可変レーザーまたは半導体波長可変レーザーの CW 光を光源として、空間位相変調器 (SLM) を用いたホログラム法により光渦を生成し、対物レンズで集光し試料に照射する。この照射位置をガルバノミラーにより精密走査し、光渦の顕微照射系を構築する (図1)。これにより光照射下での量子ホール状態の2次元電子系試料の電気抵抗の変化および光起電力効果を計測する。また、光学系に1/4波長板または液晶リターダを必要に応じて挿入することにより、光渦の円偏光状態も制御した。

光渦の軌道角運動量の違いによる抵抗や光起電力の極わずかな変化を鋭敏に検出するために、光渦のホログラムパターンの周期的な置換や、液晶リターダによる円偏光の変化に同期させたロックイン検出を行った。これにより単なる光強度の揺らぎなどに起因するノイズと分離した計測を実現している。試料上の光渦の照射位置は CCD カメラを用いてモニターし、試料上での照射位置精度を向上させている。なお、実験はすべて温度 1.5 K で行い、量子ホール効果が明瞭に観測される条件である。また、超流動ヘリウムに試料が浸された状態での計測で、He 気泡の影響は無いことを確認している。

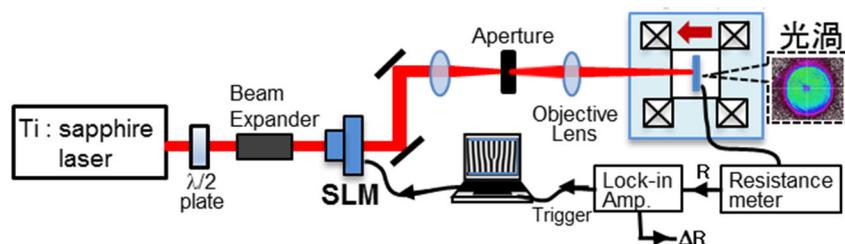


図1：光渦顕微照射系の概要図。SLMに投影されたホログラムパターンによる回折で光渦が発生し、低温・強磁場下の2次元電子系試料に集光照射される。

(2) 光渦と2次元電子系のエッジ状態の相互作用をより顕在化させることを目的に、光渦の円周と試料端ができるだけ重なるように、照射する光渦のスポットサイズ(約 $100\mu\text{m}$)に合わせた円板状の部分(図2の矢印の先)を持つ試料を製作・使用した。円板の直径は $60\mu\text{m}$ 、試料加工は紫外線リソグラフとウェットエッチングにより行った。この円板の両側に続く部分にオーミック電極を配して、4端子法による抵抗計測を行った。

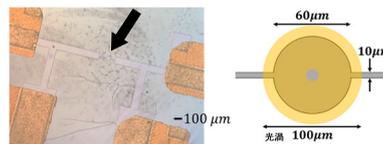


図2：試料の光学顕微鏡像(左)、および円板部の拡大模式図(右)

(3) 磁気抵抗に現れる照射光渦のエネルギー依存性を調べるため、波長可変レーザーを精密に制御して波長を変え、そのときの磁気抵抗変化を詳細に調べる。ランダウ準位の占有数と光渦による変化の度合いの相関を調べることで、生じている光遷移に関する変化を探る。

4. 研究成果

(1) 光渦の軌道角運動量 l の違いによる磁気抵抗変化

光渦の持つ軌道角運動量を固定し、円偏光の右回り左回りで変調をかけて抵抗変化 ΔR をロックイン検出した。図3に、波長 807 nm の光渦の持つ軌道角運動量を $l=0\sim 4$ として照射し、抵抗変化を測定した典型的な結果を示す。ただし、 $l=0$ は光渦では無く、比較として行ったガウスビームでの結果である。グラフの横軸は掃引した磁場、縦軸は ΔR を示してあり、縦抵抗 R_{xx} は参考のため併記している。円偏光照射のため、特にランダウ準位の奇数占有数からその強磁場側付近で抵抗変化が強く表れている($B=4.7\text{ T}$, $\nu=5$)。このとき、軌道角運動量 l の違いにより ΔR に比較的大きな差が出ていることが見受けられる。

(2) 光渦照射光のエネルギー依存性

GaAs バンドギャップエネルギー付近での照射光エネルギーによる依存性を見るため、励起光波長を 1 nm ずつ変えて ΔR の測定を行った。その一部を図4(波長 $815\sim 820\text{ nm}$: $1.521\sim 1.514\text{ eV}$)に示す。照射光のエネルギーが 1 meV ずれるだけで ΔR はその傾向を大きく変えることがわかる。特に、図4の網掛けで示した $5\sim 6\text{ T}$ 付近での ΔR に対する光渦の軌道角運動量の違いによる変化が顕著に表れている。ただ、照射光のエネルギーが大きくなるにつれてLandau準位のエネルギーに対応する磁場位置が(強磁場側へ)移動すると考えられるが、一見して系統的变化のようには見えない。これは、遷移に関わる準位を判別するにはより細かい範囲でエネルギー依存性を見る必要があると考えられ、狭いエネルギー範囲での精査が必要であることが分かった。

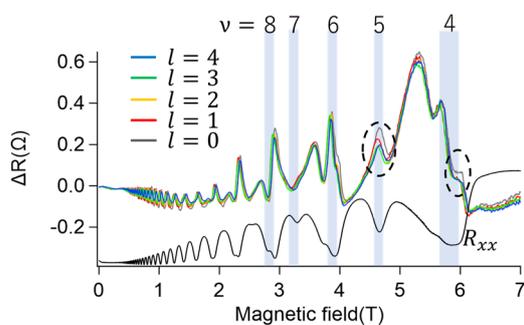


図3：GaAs/AlGaAsヘテロ接合2次元電子系試料での、様々な光渦(l)での左右円偏光変化に対する磁気抵抗変化 ΔR 。

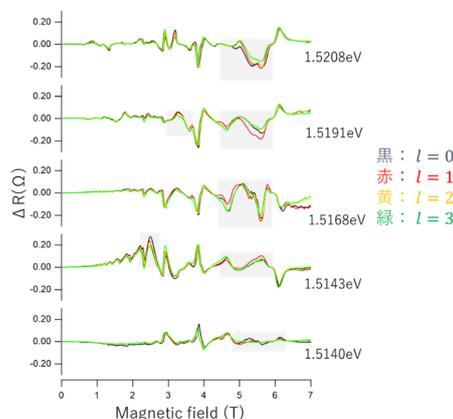


図4：波長を 1 nm ずつ変えて測定した ΔR 。

(3) 狭い範囲での光渦照射光のエネルギー依存性

Landau準位と ΔR 信号の関係性を精査するために、光渦の波長を約 0.1 nm ステップで変化させて ΔR 信号を測定した。そのうち、図5に(a) $807\sim 808\text{ nm}$ 、(b) $809\sim 810\text{ nm}$ の範囲での結果を示す。光渦の軌道角運動量 l は(黒, 赤, 緑, 青)=($0, 1, 2, 3$)に対応している。図5の(a), (b)を比べると、磁場 $4.8\sim 6.2\text{ T}$ の部分で、(a)のみ軌道角運動量ごとに大きな差が観測され、かつ変化量は軌道角運動量 l の順で変化していることがわかる。これらより、この試料では 807 nm 近傍の光渦を照射するとき、その軌道角運動量の大きさの違いが遷移に反映されている可能性があるものと考えられる。なお、この現象は、光渦の l を変えること起因した光強度の変化や、照射位置のズレなどに寄るものではないことを別の測定で確認している。この変化の大きい図5(a)のデータのうち、 $l=1$ でのグラフを重ねたものが図6である。磁場値を記したディップは、その磁場位置と入射光のエネルギーとに相関がある。図7は、その磁場位置とエネルギーの関係を示し

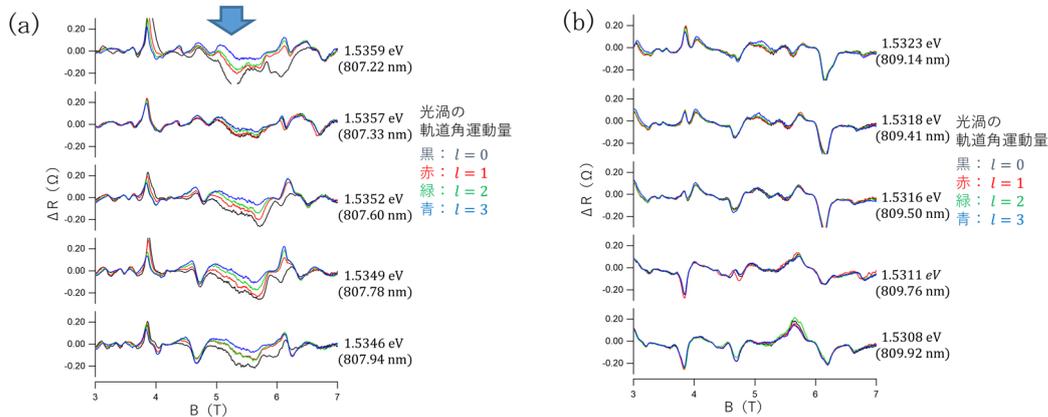


図 5 : (a) 波長 807 nm 付近の励起光での ΔR 。 (b) 波長 809 nm 付近の励起光での ΔR 。

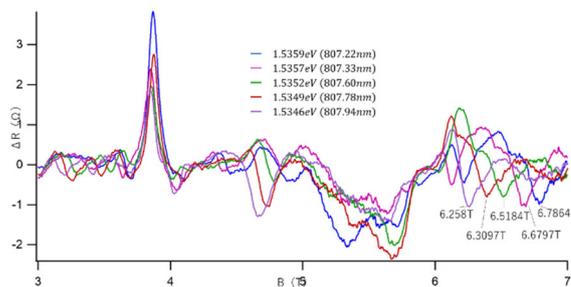


図 6 : 波長 807 nm 付近の $l=1$ 光渦で励起したときの ΔR 。光のエネルギーの違いに相関して磁場位置が変化するディップ（ピーク）がある。

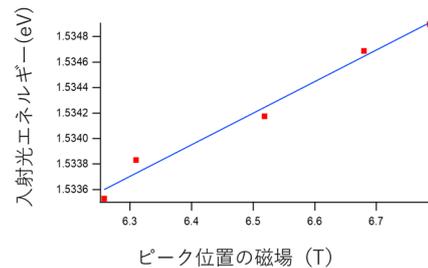


図 7 : 波長 807 nm 付近の $l=1$ 光渦で励起したときの ΔR 信号の磁場位置。N=1 ランダウ準位のエネルギーに相当する。

たもので、GaAs の有効質量 $m^*=0.067m_0$ より、N=1 のランダウ準位に対応することが分かった。なお、本試料 (GaAs HEMT) のバンドギャップはヘリウム温度で 816 nm 付近であり、それより長い波長ではバンド間遷移が起こらない。実際、波長 825 nm の光では ΔR 信号が消失することを確認しており、 ΔR 信号はバンド間の遷移で、それが光渦により影響を受けていることを実験的に示すことができたものと考えられる。

(4) まとめと今後の展望

光渦照射における 2 次元電子系への光励起および量子ホール状態でのエッジ状態による伝導への影響を調べるため、主に磁気抵抗の変化を手段として実験を行った。

試料への光渦照射位置の依存性は非常にクリティカルであり、実験ごとに照射位置を正確に合わせないと結果が大きく変わってしまうなど、実験当初では再現性が乏しかったが、照射位置の拡大モニター等の改善により安定して計測が行えるようになった。これは、光渦の強度/位相の空間分布とエッジ状態の分布との重なりが、励起や磁気抵抗の変化に大きく影響することが現れているのではないかと考えている。

また、照射光エネルギー依存性の実験から、価電子帯からランダウ準位への励起エネルギーと一致して光吸収が強くなる時に、はじめて光渦の軌道角運動量の違いによる励起が顕在化し、磁気抵抗などのマクロな測定量に変化として現れる可能性があるものと考えている。

本研究に引き続き、光起電力の計測により、光励起キャリアを直接計測する実験を継続して行っており本研究での知見と合わせて、光渦による半導体電子の励起について今後も実験を進める予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Kimura, K. Matsumori, K. Oto, Y. Kanemitsu and Y. Yamada	4. 巻 14
2. 論文標題 Observation of high carrier mobility in CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ single crystals by AC photo-Hall measurements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Express	6. 最初と最後の頁 41009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/abf02b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 木村 匠、音 賢一、金光 義彦、山田 泰裕
2. 発表標題 CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ 単結晶におけるキャリア密度に依存したHall易動度
3. 学会等名 第68回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 匠、音 賢一、金光 義彦、山田 泰裕
2. 発表標題 CH ₃ NH ₃ PbBr ₃ 単結晶のキャリア分解光Hall測定
3. 学会等名 第81回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Fushimi, J. Tsutsumi, K. Oto, Y. Yamada, H. Mino, and T. Omatsu
2. 発表標題 Transport Properties of Quantum Hall Electron System under Optical Vortex Irradiation
3. 学会等名 21st Int. Conf. on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON21)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伏見淳毅、音 賢一、山田 泰裕、三野 弘文、尾松 孝茂
2. 発表標題 光渦照光渦照射下における量子ホール電子系の電気伝導
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会（北海道大学）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 J. Tsutsumi, K. Oto, Y. Yamada, H. Mino, and T. Omatsu
2. 発表標題 Electron spin polarization in the quantum Hall system under optical vortex irradiation
3. 学会等名 2018 Ajou-Chiba Joint Symposium（国際学会）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山田 泰裕 (Yamada Yasuhiro)		
研究協力者	三野 弘文 (Mino Hirofumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------