

令和 4 年 5 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05306

研究課題名（和文）光の軌道角運動量を用いた固体物性研究

研究課題名（英文）Research on solid state physics using orbital angular momentum of light

研究代表者

有川 敬（Arikawa, Takashi）

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：70598490

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：軌道角運動量を持つ光渦（トポロジカル光波）を用い、新しいタイプの光と物質の相互作用を探求することを目的として研究を行なった。物質系としては多くの素励起が存在する固体物質に着目した。必要となるテラヘルツ周波数帯の測定技術開発を行い、パルステラヘルツ波の高精度な電場イメージ計測やホモダイン検波による連続テラヘルツ波の高感度電場検出などを実現した。これらの計測手法を用い、テラヘルツ波の軌道角運動量を用いたメタマテリアルのプラズモンモードの制御を行なった。また、量子ホール系など他の系における光渦と物質の相互作用を研究する計測技術を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軌道角運動量を持つ光渦と物質の相互作用は未解明な部分が多い。現在最も理解が進んでいるのは、原子の束縛電子との相互作用であり、双極子禁制なS軌道からD軌道への遷移が実験的に確認されている。このような物質の内部自由度への光の軌道角運動量転写は、これまで未開拓な形の光と物質の相互作用である。光に軌道角運動量を持たせることで生まれる新しい相互作用チャンネルであると言え、その学術的・技術的価値は非常に大きい。このような相互作用は原子系のみならず、一般的に多くの固体物質系で起こるはずであり、その一端を明らかにした本研究の意義は大きいと言える。

研究成果の概要（英文）：Using vortex beams with orbital angular momentum (topological lightwave), we aimed to explore a new type of interaction between light and matter. As a matter system, we focused on solid state materials in which many elementary excitations exist. We have developed necessary measurement techniques for the terahertz frequency region, and have realized high-precision electric field imaging of pulsed terahertz waves and high-sensitivity electric field detection of continuous terahertz waves using homodyne detection. Using these measurement techniques, we have controlled the plasmon mode of metamaterials using the orbital angular momentum of terahertz waves. We were also able to establish measurement techniques to study the interaction between terahertz vortex beams and other material systems such as quantum Hall systems.

研究分野：光物性

キーワード：テラヘルツ 光渦 メタマテリアル 擬似プラズモン ホモダイン検波

1. 研究開始当初の背景

1992年にラゲールガウス光が軌道角運動量を持つ事が認識されて以来、この新たな光の自由度を用いた物質研究は大きな注目を集めている。光の軌道角運動量はらせん状の等位相面に由来しており、そのような光は一般的に光渦、またはトポロジカル光波と呼ばれている。これまで、光渦を用いた微小誘電体の回転や、ナノニードル生成等が報告されており、光の軌道角運動量が物質の重心運動に転写される現象はよく理解されている。

一方、光の軌道角運動量の物質の内部自由度への転写は未解明な部分が多い。現在最も理解が進んでいるのは、原子の束縛電子状態への軌道角運動量転写である。理論的には、光の渦状の位相構造のために相互作用ハミルトニアンが双極子型にはならず、遷移選択則が変化する。その結果、双極子禁制なS軌道からD軌道への遷移が可能になり、このことは実験的にもカルシウムイオンを用いて確認されている。S軌道からD軌道への遷移において、電子の角運動量は $2\hbar$ 変化しており、光のスピン角運動量 \hbar と軌道角運動量 \hbar の両方が電子の内部自由度へ転写されたと理解できる。

このような物質の内部自由度への光の軌道角運動量転写は、これまで未開拓な形の光と物質の相互作用である。光に軌道角運動量を持たせることで生まれる新しい相互作用チャンネルであると言え、その学術的・技術的価値は非常に大きい。このような相互作用は、上述の原子系のみならず、一般的に多くの物質系で起こるはずである。とりわけ、固体物質系には数多くの素励起が存在するため、光渦と固体の相互作用は従来の常識とはかけ離れたものになるのではないかと期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、光の軌道角運動量の存在がどのように固体との相互作用を変化させるか、その一端を明らかにすることである。このような動機の理論的研究はすでに行くつか行われており、様々な新規現象の発現が予測されているが、実験的に明確に観測された例は非常に限られている。この原因を突き止め、理解し、解決することが本研究の重要な課題である。

3. 研究の方法

実験的に固体への光の軌道角運動量転写が実現していない理由は、光渦と物質系のサイズミスマッチにあると考えられる。光の軌道角運動量は、渦状の空間位相構造によって定義されるため、物質系が光の軌道角運動量の存在を認識するためには、光渦のスポットサイズ程度の大きさで物質系の波動関数がコヒーレンスを保つ必要がある。そのため、軌道角運動量転写の効率(物質系のコヒーレント長/光渦のビーム径)の因子に大きく依存する。固体物質中の多くの素励起が存在するテラヘルツ周波数帯の光渦を用いると、分母の光渦のビーム径は波長で制限され、数百 μm 程度となる。従って数百 μm のコヒーレント長を持つ固体の素励起を用意することが必要となる。これは通常物質を用いている限り簡単ではないが、本研究ではメタマテリアルを用いることでこの困難を回避した。我々が用いたメタマテリアルのプラズモン励起(擬似プラズモン)はテラヘルツ帯に存在する。我々は $5\mu\text{m}$ の空間分解能(0.3 THzで波長の1/200)を持つテラヘルツ帯の近接場イメージング技術を開発してきた。この技術を用いることで、電場の空間位相構造を可視化することができ、軌道角運動量の転写を観測することが可能になる。

4. 研究成果

図1は軌道角運動量を持たないテラヘルツ波を用いた場合(上段)と、持つテラヘルツ波を用いた場合(下段)に励起される擬似プラズモンの違いを観測したものである。上段の結果を見ると、外側の円で示した試料外周沿いの電場が青(-)→赤(+)->青(-)→赤(+)-と符号が変化していることがわかる。この変化を角度 ϕ の関数として示したのが中央のグラフの赤線である。この角度依存性は、右側に示した双極子型プラズモンが励起されている時に見られる $\cos(2\phi)$ の形(黒色破線)をしており、双極子型プラズモンが励起されていることが確認できる。ここで観測された双極子型プラズモンは、 $\pm\hbar$ の角運動量を持っており、昔から知られているスピン角運動量の転写で説明される。一方、下段の軌道角運動量($+\hbar$)を持つ光の場合では青(-)と赤(+)-が共に3回現れており、電場の符号変化の回数が増えている様子が観測された。中央のグラフに示した電場の角度依存性は $\cos(3\phi)$ の形になり、このことは右側に示した四重極子型プラズモンが励起されてい

ることを示している。観測された四重極子型プラズモンは $+2\hbar$ の角運動量を持つため、スピン角運動量の転写だけでは励起できない。従ってこの結果は、スピン角運動量($+\hbar$)に加えて軌道角運動量($+\hbar$)も擬似プラズモンに転写されていることを意味している。

我々は同様の実験を軌道角運動量($+2\hbar$)の場合など様々な条件で行い、また電磁場解析シミュレーションとの比較も行なった。それらの結果から、光渦と擬似プラズモンの相互作用は全角運動量(スピン角運動量+軌道角運動量)が保存されるという遷移選択則に従うことを明らかにした。選択則は光と物質の相互作用の仕方を規定するものであるため、非常に重要な知見である。

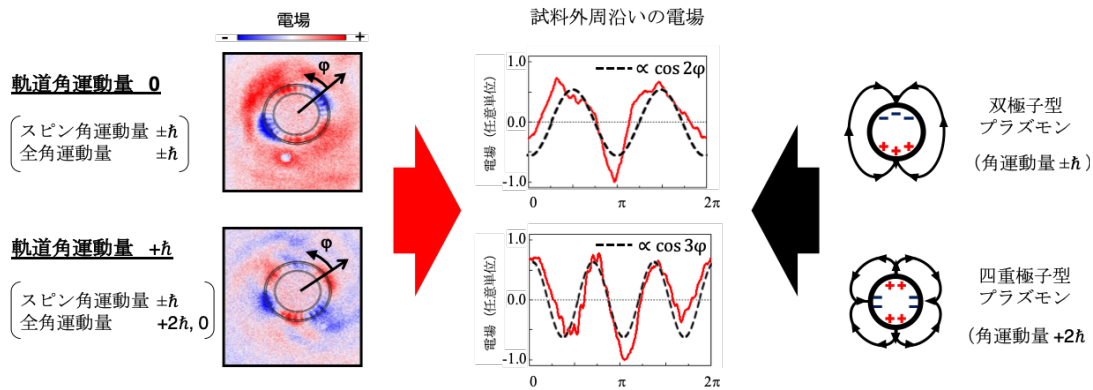


図1 軌道角運動量の有無によって異なる擬似プラズモンが励起されている様子。

また、その他の個体物質系における光渦と物質の相互作用を研究するために必要となるテラヘルツ周波数帯の測定技術開発を行なった。まず、特定の軌道角運動量を持つ純粋な光渦ビームを生成するために、単色性の良い連続テラヘルツ波を発生・検出するシステムを構築した。このシステムでは、2つの通信波長帯半導体レーザーの周波数差に等しいテラヘルツ波を発生するフォトミキシング技術を利用している。これにより、テラヘルツ波の波長は半導体レーザーの波長精度で精密に決まる。このシステムを用い、通常軌道角運動量を持たないガウスビームを用いたテスト実験を行った。初めにテスト試料として ESR 測定の標準試料として知られている DPPH (2, 2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl) を用いた。0.1 THz, 0.115 THz, 0.13 THz の連続テラヘルツ波を用い、ESR 信号を測定することができた。次に、グラフェン量子ホール系を用いた実験を行った。グラフェン試料は伝導測定による量子ホール効果測定のために、ホールバー構造への加工および電界効果トランジスタデバイスの作製を行った。試料を 5K 程度まで冷却し、電気伝導測定を行った結果、磁場 5T で明瞭な量子振動が観測された。テラヘルツ波によるランダウ準位間遷移を観測することはできなかったが、ランダウ準位間隔より低い光子エネルギーのテラヘルツ波(周波数 0.5 THz)を照射すると、電気抵抗率に変化が観測された。この変化はテラヘルツ電場によって電子の軌道が変化し、局在状態が変化したこと起因していると考えられる。

これらの実験を通して、テラヘルツ波の検出感度に課題があることが明らかになったため、その解決に取り組んだ。従来の連続テラヘルツ波を用いた実験システムではフェルミレベル制御バリアダイオード(FMBD)の二乗検波特性を利用したテラヘルツ波の強度測定を行っていた。しかし、多くの光渦実験で想定される微小な強度変化を観測するにはダイナミックレンジが不足していた。そこで、FMBD のホモダイン検波特性を利用した連続テラヘルツ波の電場測定技術の開拓を行なった。そのために、マイケルソン干渉系型の光学系を組み、局所信号の偏光を制御することで電場測定を実現した。その結果、ダイナミックレンジが一桁改善した。また、偏光回転測定に適用した場合の角度分解能が 7 ミリラジアンから 12 マイクロラジアンに大幅に改善し、多くの研究に有用な手法となることがわかった。

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 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Arikawa T., Hiraoka T., Morimoto S., Blanchard F., Tani S., Tanaka T., Sakai K., Kitajima H., Sasaki K., Tanaka K.	4. 巻 6
2. 論文標題 Transfer of orbital angular momentum of light to plasmonic excitations in metamaterials	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaay1977
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.aay1977	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 5件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 有川敬
2. 発表標題 時間分解近接場イメージング技術を用いたテラヘルツ光渦の発生・検出・応用
3. 学会等名 日本光学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2020（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有川敬
2. 発表標題 テラヘルツ光渦を用いた擬似局在表面プラズモンの多重極モード選択励起
3. 学会等名 分子研研究会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有川敬
2. 発表標題 テラヘルツ領域における光渦の発生・計測と物質への軌道角運動量転写
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 江口航平、有川敬、田中耕一郎
2. 発表標題 超狭線幅周波数可変テラヘルツ光源を用いた偏光分解磁気光学測定系の構築
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有川敬
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードを用いたモード同期テラヘルツ発振器の開拓
3. 学会等名 テラヘルツ科学の最先端VIII (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 有川敬
2. 発表標題 共鳴トンネルダイオードを用いたモード同期テラヘルツ発振器の開拓
3. 学会等名 電子情報通信学会ED研・THz研の共催研究会(招待講演) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Zhuldybina, L.-P. Beliveau, C. Trudeau, T. Arikawa, F. Blanchard, K. Tanaka
2. 発表標題 THz near-field characterization of printed electronics V-shape antennas
3. 学会等名 Photonics North 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

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			
カナダ	Ecole de Technologie Superieure			