

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K22138

研究課題名（和文）光渦の空間モードカイラリティを活用した時間分解分光の開発

研究課題名（英文）Time-resolved spectroscopy by utilizing chiral spatial modes of optical vortices

研究代表者

戸田 泰則（TODA, YASUNORI）

北海道大学・工学研究院・教授

研究者番号：00313106

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：光渦と呼ばれる空間モードに特徴をもつ光波の分離選択性を活用し、半導体面発光レーザーに対する空間位相変調分光と銅酸化物高温超伝導体に対する同軸時間分解分光を開発した。前者に対しては共振器の幾何学位相にもとづく空間モード変換を使って、らせん位相の方向（カイラリティ）を選択可能な光渦発振を実現した。後者に対しては光渦ビーム内部の強度暗点の空間走査により、暗点部に局在した過渡的超伝導の時空間制御を実現し、高温超伝導体の光学応答の空間的特徴を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

らせん状の波面を持つ光渦は、その特異的な空間モードカイラリティにもとづいて複数光波を分離したり重ね合わせたりできる。本研究ではそのような光渦の空間特性を時間分解分光に活用し、従来は不可能であった空間位相変調や時間変調、特異点走査を半導体レーザーおよび高温超伝導体に対して実現した。得られた成果はデバイス機能開拓や物性探索に対する光波の空間モードカイラリティ利用の有効性を示しており、光源開発やイメージング、ナノデバイス応用につながる。

研究成果の概要（英文）：By utilizing the selectivity of optical vortices with unique chiral spatial modes, we have newly developed 1) spatial phase modulation spectroscopy for semiconductor surface emitting lasers and 2) coaxial three-pulse time-resolved spectroscopy for cuprate high-Tc superconductors. In case 1), chirality-selective optical vortex generations were realized by spatial mode conversion based on the geometrical phase of the resonator. In case 2), by spatial scanning the dark spots in the optical vortices, we have achieved spatio-temporal control of transient superconductivity localized at the vortices and revealed the spatial characteristics of the optical response of high-Tc superconductors.

研究分野：光物性

キーワード：光渦 時間分解分光 光の軌道角運動量 カイラリティ

1. 研究開始当初の背景

一般的なレーザー光波の断面位相は一様と見なせる。これに対して断面方位方向に位相勾配をもつ光波は光渦と呼ばれ、らせん状波面の巻き数と向き(カイラリティ)に応じた指標(トポロジカルチャージ ℓ) で特徴づけられる高次の空間モード(ラゲールガウス(LG)モード)光波である。回転中心は位相の定まらない特異点を形成し、強度暗点として特異的なビーム形状を形成する。またらせん状波面の勾配に起因する方位方向の運動量として ℓ に比例する光の軌道角運動量(OAM)を定義できる。OAM は偏光で特徴づけられるスピン角運動量に加わる新しい角運動量パラメータとして活用され、光計測やイメージング、情報伝送など幅広い分野の研究にイノベーションをもたらした[1]。本研究ではこのような光渦の特異的な空間モードカイラリティにもとづく光波の分離選択性に着目し、分光手段として利用することによる観測(制御)可能な光学応答自由度の拡張を着想した。

2. 研究の目的

本研究では光渦の空間モードカイラリティをレーザー分光に対する光波選択分離手法として活用し、物質の時空間機能を開拓可能な全く新しいタイプの分光手法を開発することを目的とした。一般的にレーザー分光では励起光と信号光の光波分離が利用される。例えば超短光パルスを用いた時間分解分光では、ポンプ光とプローブ光の 2 パルスからなるパルス対を励起に用いたポンププローブ(Pp)分光が利用される。通常の Pp 分光では、ポンプ光とプローブ光を空間的に分離することにより、プローブ光の光学応答変化(過渡応答)を選択検出する。しかしながらパルス対を空間分離するため非同軸の光学配置が必須となり、空間自由度が失われる。本研究では光渦の特異的な空間モードカイラリティにもとづく光波分離(選択)をレーザー分光に適用することにより、これまで未開拓であった光学応答自由度を活用し、新規物性およびデバイス新機能を開拓する。

3. 研究の方法

光渦は高次の空間モード光波に対応し、その特徴である波面のらせん位相(OAM)は回転数(ℓ の大きさ)と方向(ℓ の符号)で特徴づけられる。したがって分光計測の際に ℓ を選択すれば光波の分離選択が可能となる。また符号の異なる同次数の光渦を用いると、パルス対の強度分布は同一となり、同軸上にビームを一致させることができる。すなわち完全同軸共鳴条件下の光波分離が可能となり、位置や周波数、偏光の相対精度を向上させることができる。本研究では以上の点を踏まえ、申請者の従来研究成果に対して励起光波の空間モードカイラリティを活用した

(項目 A) 半導体面発光レーザー(VCSEL)に対するカイラル空間モードの選択制御

(項目 B) 高温超伝導体試料(Bi2212)に対する光渦誘起超伝導の時空間制御

を実現した。項目 A では周波数掃引による空間位相変調分光を実施した。通常の位相変調分光とは異なり、ここでは高次空間モードの空間位相に着目する。共振器の非対称性に起因する幾何学位相(グイ位相)を反映した空間モード特性を明らかにし、グイ位相補償にもとづくカイラリティ選択可能な光渦発振を実現した。また項目 B では異なる空間モードカイラリティを持つ 3 パルス型の時間分解 Pp 分光を開発した。超伝導相を破壊するような強励起の光渦パルスを照射すると、強度暗点に局在した超伝導を創出できる。本研究ではこの超伝導の時空間発展を同軸上に配置した光渦パルス対を用いて観測することに成功した。同軸上に配置された光渦対は、強度暗点の相対位置を変化させることにより、光学系や試料の安定性を損なうことなく光学応答の空間走査を可能にする。以下、各項目で達成した主要成果をまとめる。

4. 研究成果

(1) 項目 A では、応用上重要な汎用光源として開発の進む半導体面発光レーザー(VCSEL)に対して光渦の特異的な空間モードカイラリティを利用した光波分離(選択)制御を実現した[2]。対象としたのは $\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ 多重量子井戸を活性層とするブロードエリア型(開口径 $d=10\mu\text{m}$)の VCSEL ($\lambda=780\text{nm}$, $I_{\text{th}}=1.7\text{mA}$) である。周波数掃引は被制御 VCSEL の温度調節で行う。制御 VCSEL は単一モードファイバーに通して横モードを最低次ガウスモード(TEM_{00})に設定後、軸対称波長板、半波長板、偏光子を用いてエルミートガウス(HG)モードへと変換した。位相変化の方向は半波長板を回転することにより実現され、空間位相の回転(回転角 θ)に応じて HG モードの暗線が回転する(図 1(a))。VCSEL の被制御光波に対する空間モードの同定は既に確立している空間光位相変調器(SLM)を用いたモード分解検出を利用した。図 1(b)、(c)は代表的な 2 つの異なる回転角を持つ HG モード(内挿図)を制御光として用いた OAM 分解スペクトルと共鳴で観測される被制御光のビームプロファイルである。 TEM_{00} からの離調周波数($\Delta\nu$)に対する 3 つの OAM 成分($\ell=-1, 0, +1$)のスペクトル特性を示す。約 60GHz と 80GHz の共鳴($\ell=\pm 1$ の同時共鳴)は $C_{4\nu}$ から $C_{2\nu}$ への共振器の回転対称性低下に伴う HG モードの非縮退共鳴に対応する。ビームプロファイルを見ると、 $\Delta\nu\sim 60\text{GHz}$ の HG モードは、注入光の回転角に関わらず同

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Toda Y., Tsuchiya S., Oda M., Kurosawa T., Katsumata S., Naseska M., Mertelj T., Mihailovic D.	4. 巻 104
2. 論文標題 Ultrafast transient reflectivity measurements of optimally doped Bi ₂ xSr ₂ -xCuCu ₂ O ₈ +d with disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 94507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.094507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 K. Nakagawa, K. Yamane, R. Morita, Y. Toda	4. 巻 13
2. 論文標題 Laguerre-Gaussian vortex mode generation from astigmatic semiconductor microcavity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 042001 ~ 042001
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1882-0786/ab7bf7	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 -
1. 著者名 Suzuki Masato, Yamane Keisaku, Oka Kazuhiko, Toda Yasunori, Morita Ryuji	4. 巻 9
2. 論文標題 Comprehensive quantitative analysis of vector beam states based on vector field reconstruction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-46390-7	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 -
1. 著者名 Honda Asami, Yamane Keisaku, Iwasa Kohei, Oka Kazuhiko, Toda Yasunori, Morita Ryuji	4. 巻 12
2. 論文標題 Ultrafast beam pattern modulation by superposition of chirped optical vortex pulses	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-18145-4	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 -

1. 著者名 Toda Yasunori, Tsuchiya Satoshi, Yamane Keisaku, Morita Ryuji, Oda Migaku, Kurosawa Tohru, Mertelj Tomaz, Mihailovic Dragan	4. 巻 31
2. 論文標題 Optical vortex induced spatio-temporally modulated superconductivity in a high-Tc cuprate	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17537 ~ 17537
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.487041	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yasunori Toda
2. 発表標題 Optical vortex generation and control in rotationally symmetry-breaking microcavities
3. 学会等名 International Conference on Quantum Liquid Crystals 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 戸田泰則
2. 発表標題 光波の空間構造を利用した物性探索
3. 学会等名 第38回プラズマ・核融合学会 年会シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永田憲正、土屋聡、谷口弘三、戸田 泰則
2. 発表標題 有機伝導体b-(BEDT-TTF)2I3における光誘起金属-絶縁体相分離の探査
3. 学会等名 第57回応用物理学会北海道支部 / 第18回日本光学会北海道地区合同学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋葉 俊宏、土屋 聡、戸田 泰則、黒澤 徹、小田 研
2. 発表標題 銅酸化物高温超伝導体Bi2201のコヒーレントクエンチ分光
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 戸田 泰則、山岡 利盛、土屋 聡、山根 啓作、森田 隆二、小田 研
2. 発表標題 光渦バルスを用いた超伝導コヒーレントクエンチの実現
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲川 幸輝、山根 啓作、森田 隆二、戸田 泰則
2. 発表標題 高次横モード光励起を用いた面発光レーザーの光渦発振特性
3. 学会等名 第55回応用物理学会北海道支部 / 第16回日本光学会北海道地区合同学術講演会 A-21
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲川 幸輝、山根 啓作、森田 隆二、戸田 泰則
2. 発表標題 空間変調光帰還型面発光レーザーの OAM モード発振制御
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部 / 第17回日本光学会北海道地区合同学術講演会 B-11 オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 下田 隆一, 土屋 聡, 山根 啓作, 森田 隆二, 戸田 泰則
2. 発表標題 カイラル変調分光を目的とする分割型デフォーダブルミラーを用いた光渦生成
3. 学会等名 第56回応用物理学会北海道支部 / 第17回日本光学会北海道地区合同学術講演会 A-18 オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Toda, K. Nakagawa, K. Yamane, R. Morita, Y. Awaji
2. 発表標題 OAM mode property of broad-area VCSEL studied by optical injection
3. 学会等名 The 38th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仲川 幸輝, 山根 啓作, 森田 隆二, 戸田 泰則
2. 発表標題 高次横モード光励起を用いた面発光レーザーの光渦発振特性
3. 学会等名 第55回応用物理学会北海道支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲川 幸輝, 山根 啓作, 森田 隆二, 戸田 泰則
2. 発表標題 空間変調光帰還型面発光レーザーのOAMモード偏光特性
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019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			
スロベニア	ヨゼフステファン研究所			