

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：14303

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18857

研究課題名（和文）光ワイル点に起因するトポロジカルエッジ状態を利用した半導体円偏光発光素子の実現

研究課題名（英文）Semiconductor-based circularly polarized emission by using topological edge states derived from optical Weyl points

研究代表者

高橋 駿（Takahashi, Shun）

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：60731768

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：トポロジカルに特異な性質をもつ光ワイル点形成される三次元カイラルフォトリック結晶について、数値計算によって、この構造における光ワイル点の存在を確認するとともに、ワイル点に起因するトポロジカルエッジ状態が円偏光に偏極することも明らかにした。この数値計算結果に基づいた基礎実証実験として、マイクロ波領域での透過測定を行い、光ワイル点に由来した特異な透過現象や円偏光トポロジカルエッジ状態の観測に成功した。さらに、光領域を対象とした半導体試料も作製し、角度分解透過スペクトル測定を行い、光ワイル点に由来するトポロジカルエッジ状態を示唆する実験結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、半導体の高い屈折率を活かして作製したカイラルナノ構造であるため、外乱の影響を受けにくい、10ミクロン程度の小型な円偏光発光素子が可能となるほか、既存の半導体素子との整合性も高く集積化に向く。また、光ワイル点に起因する容易なエッジ状態形成により、導波光の動的制御も期待できる。さらに、左回り円偏光と右回り円偏光が、上向き電子スピンと下向き電子スピンにそれぞれ一対一で対応することを利用すれば、実用に不向きな外部磁場の代わりに、ワイル点を有するカイラル構造に起因したトポロジカルエッジ状態によってスピンを制御できるため、スピントロニクスへの応用も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Three-dimensional chiral photonic crystals can form optical Weyl points which show topologically unique properties. We numerically confirmed the existence of such optical Weyl points in a chiral photonic crystal, and revealed that the topological edge states derived from the Weyl point were circularly polarized. Based on this numerical result, we performed transmission measurements in a microwave region, and successfully measured unique transmission phenomena at a Weyl point and topological edge states. The obtained edge states were actually polarized in circular polarization. Furthermore, we fabricated semiconductor-based chiral photonic crystals, and performed angle-resolved transmission measurements in an optical region. The obtained results indicate topological edge states derived from a Weyl point.

研究分野：電子デバイス・電子機器

キーワード：トポロジカルフォトリクス

1. 研究開始当初の背景

2016年のノーベル物理学賞の受賞に代表されるように、数学の分野で長年培われてきたトポロジーの概念が、物性物理と融合して新たな領域を展開している。スピン軌道相互作用の強い物質では、電子の波動関数の位相が運動量空間で特異点を有し、真空などの特異点のない物質とは異なる物性を示す。特に、それら異なる物質の接合界面では、異なる物性を補償するように自発的に電子が運動し、無散逸かつ外乱に強い一定の伝導度が生じること(トポロジカルエッジ状態)から、トポロジカル物質として理論・実験ともに盛んに研究されている。この理論的背景には、電子がフェルミ粒子であることが鍵であり、ボーズ粒子である光子ではトポロジーに起因する現象は起こらないとされてきた。

しかし近年、光の波長程度の周期性をもつフォトニック結晶を利用することで、光子の運動量や偏光に注目して擬似的にフェルミ粒子と見なし、電磁場分布を波動関数に見立てると、トポロジカルな性質を引き出せることが理論的に提案された[1]。最近では電子系と同様に、エッジ状態による光の導波が実現されている[2]。しかし、理論提案されている構造の複雑性や材料の誘電率・透磁率の特殊性のため、構造全体が大きく集積に向かないことや、実用的な通信波長領域での実現例が世界的にも少ないこと、磁気干渉により集積に向かない磁場や磁性体を要するなど課題が多い。特に、応用先として無散逸な光導波路などの受動素子が注目される一方、実用に不可欠な能動素子や動的制御が実現されていないことも大きな問題である。

2. 研究の目的

本研究では、半導体カイラルフォトニック結晶を用いて、トポロジカルな性質を有する光ワイル点を形成し、それに付随するトポロジカルエッジ状態を利用して、円偏光発光する光トポロジカル能動素子を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 数値計算による光ワイル点の実証

対象とするカイラルフォトニック結晶に対して、実空間局所基底を用いた手法や平面波展開法、有限差分時間領域法といった計算手法を用いて、フォトニックバンド構造、トポロジカルチャージ(チャーン数)、トポロジカルエッジ状態の計算を行った。特に、フォトニックバンド構造に現れる三次元的な点縮退について、積層方向の波数を変えながら点縮退近傍でのセクションチャーン数の計算を行うことで、この点縮退がワイル点であることを示せる。また、積層方向の波数を変化させて縮退を解くと、開いたエネルギーギャップの中に、バルク-エッジ対応に起因するトポロジカルエッジ状態が形成されることが予想される。そこで、実空間での光強度のマッピングを行い、カイラルフォトニック結晶と真空との界面で電磁場が局在することを調べた。さらに、このエッジ状態が構造のカイラリティに依存して強く円偏光偏極することも調べた。

(2) カイラルフォトニック結晶の作製

(1)での数値計算結果から、光ワイル点を有するカイラルフォトニック結晶の詳細な構造が得られるため、この結果に基づいて、試料の作製を行った。最終的な目標である光領域での実験の前に、基礎実証実験としてマイクロ波領域での実験も検討し、マイクロ波領域に対する試料の作製も行った。試料作製にあたっては、フォトニック結晶のスケーリング則より、それぞれ異なる構造周期で作製を行った。マイクロ波用試料としては、高周波基板の切削加工によって、所望の構造を作製した。光領域用試料としては、GaAsの微細加工技術を駆使し、電子線リソグラフィ技術およびドライ・ウェットエッチング技術によって、150 nm幅のロッドが500 nmの周期で並んだ $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ サイズの薄い(厚さ200 nm)層を作製し、マイクロマニピュレーション法によって1層ずつ適切な順序で積層することで、カイラルフォトニック結晶を作製した。光領域用試料では、能動素子への応用に向けて、量子ドットを発光体として高密度に導入した。

ただし、本研究期間の途中で新型コロナウイルス(COVID-19)感染症の世界的な拡大が生じ、光領域用試料の作製で必須となる大型共用装置(他都道府県への移動が必要)を利用することができず、半導体カイラルフォトニック結晶の作製が大幅に遅れた。そこで、本研究目的を達成するために研究期間を延長して試料作製を行った。

(3) マイクロ波測定

作製した試料に対して、ベクトルネットワークアナライザを用いてマイクロ波の透過振幅および位相を測定した。具体的には、カイラルフォトニック結晶の側面中央から、マイクロ波を入射して、構造上面で透過強度を測定した。この測定によって、光ワイル点の点縮退を解くことで生じるトポロジカルエッジ状態の観測が期待できる。さらに、同じ入射に対して構造側面で透過振幅および位相を測定し、その偏光状態を調べた。この他にも、構造の側面中央の高さからマイクロ波を点光源的に面直偏波で入射し、構造背面の同じ高さにおいて、同偏波の透過波の振幅と位相の2次元分布を測定した。光ワイル点では、伝播に寄与するモードはワイル点のみであるこ

とから、通常の伝播とは異なる透過波が期待できる。

(4) 光学測定

作製した試料に対して、量子ドットにおける非発光過程を抑制するために、液体ヘリウム温度での低温顕微フオルミネッセンス測定を行った。(3)のマイクロ波測定での知見から、トポロジカルエッジ状態が側面を伝播する角度に注意する必要がある。近赤外光の高感度検出が可能で、且つ試料からの発光の広い空間領域を同時観測可能な、冷却2次元 InGaAs 検出器を他予算との合算で導入し、角度分解透過スペクトル測定を行った。

4. 研究成果

(1) 数値計算による光ワイル点の実証

本研究で対象としたカイラルフォトニック結晶は、図1(a)に示した回転積層型 woodpile 構造である。いずれの層も面内に同じ周期のロッドパターンを有し、隣り合う層でパターンが60度ずつ回転している。したがって、積層方向に3層で1周期のらせん構造である。ロッドの周期を a として、ロッド幅は $a/3.846$ 、各層の厚さは $a/3$ とした。これらの値は最終的な最適値である。ここでは、最終的な光領域での実現に向けて $a = 500 \text{ nm}$ とするが、フォトニック結晶のスケーリング則より、 a を変更することで対象とする波長を比例的に調節可能である。構造の屈折率は、GaAs を想定して 3.4 とした。

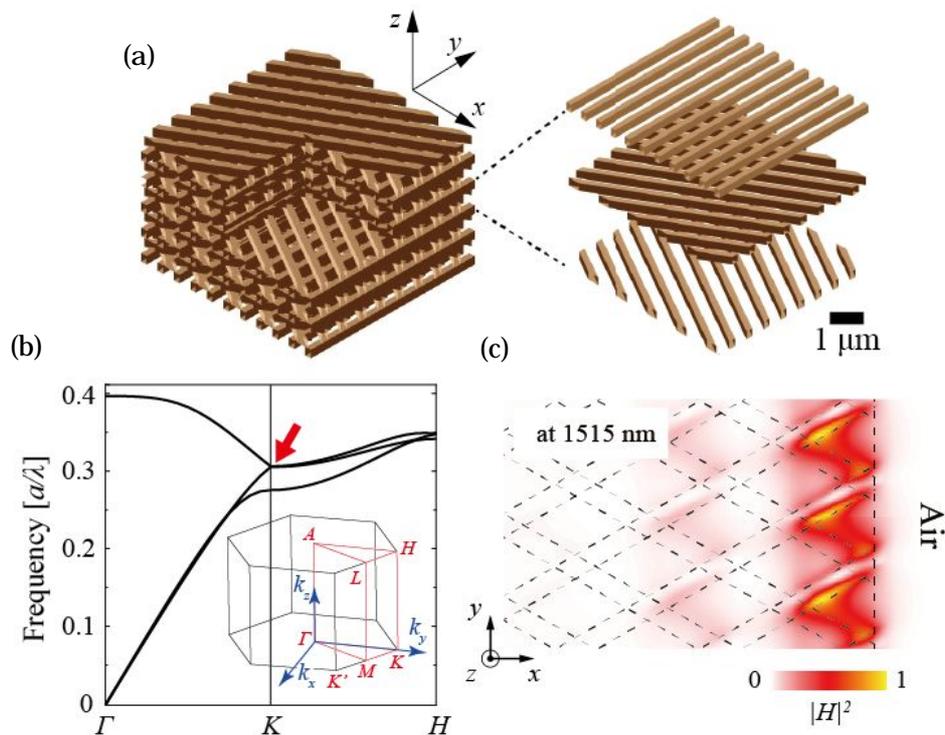


図1(a)対象としたカイラルウッドパイル構造の模式図。(b)数値計算で得られたフォトニックバンド構造の一部。矢印が光ワイル点を指す。(c)ワイル点の縮退を解くことで得られたトポロジカルエッジ状態。

この構造に対して、実空間でのガウス関数局在基底を用いて、フォトニックバンド構造、トポロジカルチャージ(チャーン数)、トポロジカルエッジ状態の数値計算を行った。まず、図1(b)はフォトニックバンド図の一部を、挿入図は第一ブリルアンゾーンを示す。K点において三次元的な点縮退が現れ、光ワイル点の存在が示唆された。そこで、この縮退点近傍でのトポロジカルチャージの計算を行った。三次元ブリルアンゾーンにおけるチャーン数の計算にあたっては、 k_z の値を固定した二次元セクションにおいて計算した(セクションチャーン数: $C(k_z)$)。その結果、 $k_z = 0$ を除いて、セクションチャーン数がゼロでない値を取ることが示され、前述の縮退点 が実際に光ワイル点であることが証明された。

次に、この光ワイル点の縮退を解消することで、トポロジカルエッジ状態が形成されることを検証した。光ワイル点では、波数を変化させるだけで縮退を解くことができる。ここでは、 k_z を変化させることで、エネルギーギャップを開けた。図1(c)は、 $k_z = 2/3$ で光ワイル点の縮退を解いて得られるギャップレスモードについて、電磁場における磁場の大きさを実空間でマッピングした結果である。構造と真空との界面で磁場強度が局在していることがわかり、トポロジカルエッジ状態であることが示された。

さらに、このエッジ状態の偏光について、FDTD法(有限差分時間領域法)によって調べた。

FDTD 法は、マクスウェル方程式を差分化して逐次的に数値計算を進める方法であり、現実の実験系に近い計算手法である。a = 500 nm の構造周期に対して、1515 nm の波長に注目し、トポロジカルエッジ状態の端面での磁場分布を調べた。Hx および Hy の成分が支配的で、これらは位相 /2 のシフトの関係にあったため、円偏光状態であることを示唆する。伝播方向に対して垂直な磁場成分のみを抽出したところ、伝播方向に対して、ベクトルが右回りの円偏光になっていることが示され、その楕円率は最大で 41 度に達した。これは 85% の円偏光度に相当し、強く円偏光偏極していることが示された。この円偏光の左巻き・右巻きについては、カイラル構造の巻き方（カイラリティ）に依存していることも判明した。

以上のように、数値計算によって、対象としたカイラルフォトニック結晶において光ワイル点、およびそれに付随するトポロジカルエッジ状態が形成されることを証明した。また、そのエッジ状態が強く円偏光偏極していることも示した。以上の結果は、学术论文にまとめて出版した。

(2) カイラルフォトニック結晶の作製

前節で最適化されたカイラル構造について、まず、マイクロ波領域における基礎実証のために高周波基板で作製を行った。10 GHz のマイクロ波に対して屈折率 3 を有する高周波基板を切削加工して、図 2 のようにカイラルフォトニック結晶を得た。ロッドの周期 a = 17.2 mm であり、光ワイル点の形成が予想される周波数は 5 GHz である。

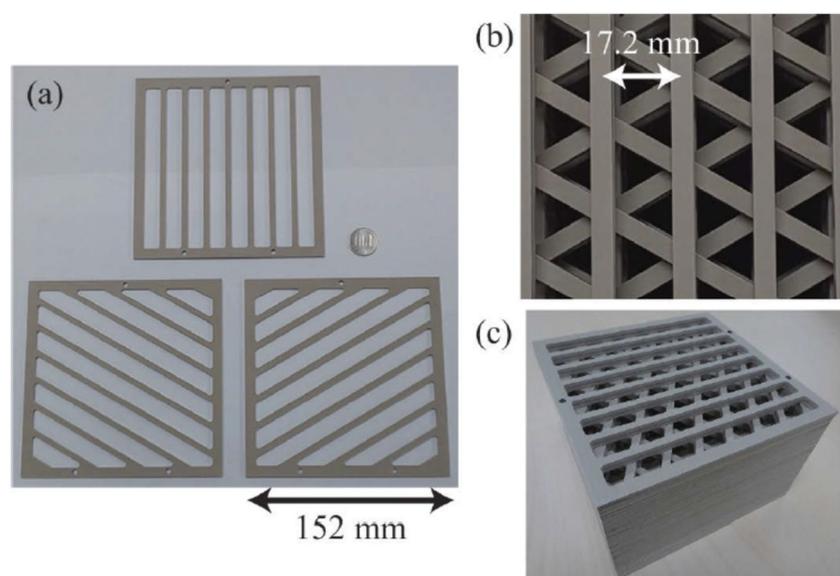


図 2 (a)作製したカイラルフォトニック結晶の各層、(b)(c)積層後の拡大および鳥瞰写真

一方で、光領域での実証のために、GaAs を材料とした、サブミクロン周期を有するカイラル構造の作製も行った。まず、有機金属気相成長法によって、GaAs 基板の上に 1.5 μm の厚さの AlGaAs 犠牲層、200 nm の厚さの GaAs スラブ層の結晶成長を行った。GaAs スラブ層の結晶成長では、途中で高密度な InAs 自己形成量子ドットを形成させた。この量子ドットは近赤外光の内部発光体として利用する。この基板の上に電子線リソグラフィによって 500 nm の周期をもつロッド配列パターンを形成した。ロッドの幅は 150 nm に設定し、60 度ずつ面内に回転させたパターンを 3 種類用意した。その後、誘導結合型反応性イオンエッチング（ドライエッチング）によって、この面内パターンを GaAs スラブ層に転写し、フッ化水素酸を用いたウェットエッチングによって、AlGaAs 犠牲層を除去した。最終的に、中空に浮いた GaAs スラブ層（プレート）を得た。このようなプレートをマイクロマンピュレーション法によって、16 枚積層した。積層の順番は、図 1 のとおり、3 層でひとつのらせん周期を形成するようにした。

(3) トポロジカルエッジ状態の測定

まず、高周波基板から作製したカイラルフォトニック結晶について、基礎実証としてマイクロ波領域での測定を行った。カイラルフォトニック結晶の側面中央から、5.16 GHz のマイクロ波（x 偏光）を入射して、構造上面で透過強度（x 偏光）を測定した結果が図 3(a)である。構造右側面と空気との界面に強い強度が得られ、トポロジカルエッジ状態の観測に成功した。なお、構造左側面での界面では、強い強度は得られなかった。これは、左側面でのエッジ状態は構造下に伝播するためであり、数値計算と同じ傾向の結果を得ることができた。

次に、構造の右側面において、下から 25 mm の位置から x 偏光の点光源を入射し、x 偏光の透

過強度をスキャンしたところ、図 3(b)のように斜めに伝播する強度分布を得た。この結果も、数値計算結果と一致しており、トポロジカルエッジ状態の観測を裏付ける結果となった。さらに、y 偏光についても測定し、x 偏光との位相差をプロットした結果が図 3(c)である。(b)における伝播領域で位相差が -90 度程度になっていることが示され、トポロジカルエッジ状態が円偏光状態で伝播していることが実験的に確認された。マイクロ波測定では、この他にも、光ワイル点で透過強度が伝播長に対して逆二乗則で減少することや、クローキング現象なども観測され、学術論文にまとめて出版した。

以上の数値計算および基礎実証実験を踏まえて、半導体で作製したカイラルフォトニック結晶について、光領域にて測定に取り組んだ。量子ドットを発光体として含んでいるため、フォトルミネッセンス測定によって、量子ドットから放出された光が、トポロジカルエッジ状態を導波する様子を観察することを試みた。その結果、特定の波長領域において、試料の端面でのみ発光特性が観測され、光ワイル点に由来するトポロジカルエッジ状態を示唆する実験結果を得た。現在、その偏光状態も含めて得られたデータを詳細に解析中である。

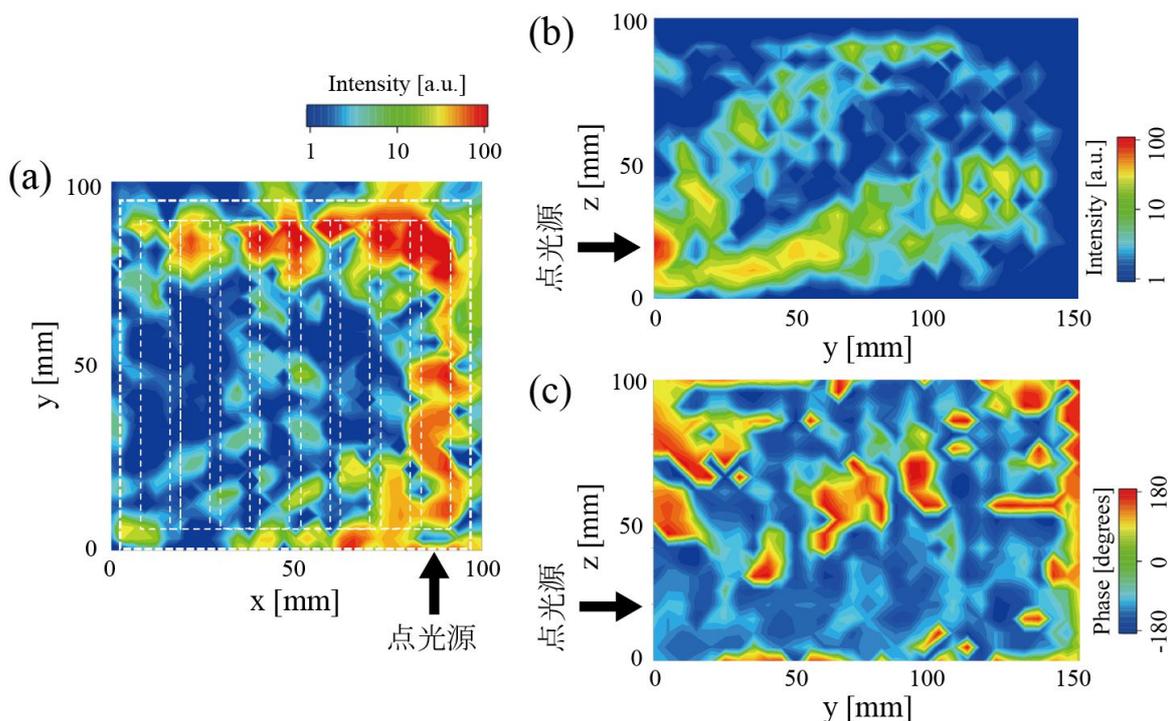


図 3 カイラルフォトニック結晶におけるトポロジカルエッジ状態の測定結果
(a)上面強度分布図、(b)側面強度分布図、(c)側面位相分布図

このように、光ワイル点の数値計算による実証から、マイクロ波領域での光ワイル点およびそれに由来する円偏光トポロジカルエッジ状態の観測を実現し、光領域に関する実験結果でも解析中ながら同様の結果を得ており、当初の目的であった、円偏光発光する光トポロジカル能動素子を示唆する結果を得られた。今後は、さらなる解析を進めるとともに、トポロジカルエッジ状態をより高感度に検出可能にするために、他の伝播モードからエッジ状態を選別できるような構造設計や測定手法の工夫が課題である。

<引用文献>

- [1] F. D. M. Haldane and S. Raghu, Phys. Rev. Lett. **100**, 013904 (2008).
- [2] M. Hafezi, et al., Nat. Photon. **7**, 1001 (2013).

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 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Tajiri Takeyoshi, Takahashi Shun, Harteveld Cornelis A. M., Arakawa Yasuhiko, Iwamoto Satoshi, Vos Willem L.	4. 巻 101
2. 論文標題 Reflectivity of three-dimensional GaAs photonic band-gap crystals of finite thickness	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 235303
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.101.235303	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 Tajiri T., Takahashi S., Ota Y., Watanabe K., Iwamoto S., Arakawa Y.	4. 巻 6
2. 論文標題 Three-dimensional photonic crystal simultaneously integrating a nanocavity laser and waveguides	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 296 ~ 296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.6.000296	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 Takahashi Shun, Oono Shuhei, Iwamoto Satoshi, Hatsugai Yasuhiro, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 87
2. 論文標題 Circularly Polarized Topological Edge States Derived from Optical Weyl Points in Semiconductor-Based Chiral Woodpile Photonic Crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 123401 ~ 123401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.123401	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 -
1. 著者名 Takahashi Shun, Kimura Erika, Ishida Takeshi, Tajiri Takeyoshi, Watanabe Katsuyuki, Yamashita Kenichi, Iwamoto Satoshi, Arakawa Yasuhiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Fabrication of three-dimensional photonic crystals for near-infrared light by micro-manipulation technique under optical microscope observation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 015001 ~ 015001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac414a	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 -

1. 著者名 Takahashi Shun, Tamaki Souma, Yamashita Kenichi, Yamaguchi Takuya, Ueda Tetsuya, Iwamoto Satoshi	4. 巻 29
2. 論文標題 Transmission properties of microwaves at an optical Weyl point in a three-dimensional chiral photonic crystal	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 27127 ~ 27127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.431233	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16件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 高橋 駿, 若林 克法, 岩本 敏
2. 発表標題 3次元Woodpile型フォトニック結晶におけるHinge状態の検討
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 Seiya Ito, Shun Takahashi, Kenichi Yamashita, Jun Tatebayashi, Satoshi Iwamoto, and Yasuhiko Arakawa
2. 発表標題 光学顕微鏡マイクロマニピュレーターで作製したカイラルフォトニック結晶における量子ドット円偏光放射の観測
3. 学会等名 第5回フォトニクスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋駿, 玉置爽真, 山下兼一, 山口拓也, 上田哲也, 岩本敏
2. 発表標題 3次元カイラルフォトニック結晶における光ワイル点近傍のマイクロ波特性の観測
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Takahashi, Shuhei Oono, Yasuhiro Hatsugai, Yasuhiko Arakawa, and Satoshi Iwamoto
2. 発表標題 Numerical Investigation of Topological Edge States in a GaAs-Based Three-Dimensional Chiral Photonic Crystal
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 有光 佑紀哉、高橋 駿、山下 兼一、渡邊 克之、岩本 敏、荒川 泰彦
2. 発表標題 光学顕微鏡マイクロマニピュレーション法による大面積三次元フォトニック結晶の作製及び光学評価
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

1. 発表者名 高橋 駿、太田 泰友、Liu Feng、若林 克法、荒川 泰彦、岩本 敏
2. 発表標題 単純立方格子からなる三次元フォトニック結晶における一次元状のトポロジカルエッジ状態
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

1. 発表者名 玉置 爽真、高橋 駿、山下 兼一、山口 拓也、上田 哲也、岩本 敏
2. 発表標題 三次元カイラルフォトニック結晶の光Weyl点近傍での位相再構成現象の観測
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

1 . 発表者名 T. Tajiri, S. Takahashi, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa
2 . 発表標題 A nanocavity laser and waveguides simultaneously integrated in a three-dimensional photonic crystal
3 . 学会等名 Industry-UCB-UEC-keio Workshop 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Tajiri, S. Takahashi, S. Iwamoto, Y. Arakawa, and W. L. Vos
2 . 発表標題 Reflectivity of finite 3D photonic band gap crystals made from GaAs
3 . 学会等名 Physics@Veldhoven (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Ishida, S. Takahashi, T. Tajiri, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa
2 . 発表標題 Three-dimensional photonic crystal nanocavity fabricated by a micro-manipulation technique under optical microscope observation
3 . 学会等名 International Conference on Nanophotonics and Nano-optoelectronics (ICNN) 2018 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Shun Takahashi
2 . 発表標題 Circularly polarized topological edge states in a 3D chiral photonic crystal
3 . 学会等名 The 4th nano-optics and photonics young researchers meeting (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 駿、大野 修平、初貝 安弘、荒川 泰彦、岩本 敏
2. 発表標題 異なるカイラリティを有する半導体三次元フォトニック結晶の界面におけるトポロジカルエッジ状態の検討
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 玉置 爽真、高橋 駿、山下 兼一、山口 拓也、上田 哲也、初貝 安弘、荒川 泰彦、岩本 敏
2. 発表標題 全誘電体三次元カイラルフォトニック結晶におけるマイクロ波領域トポロジカルエッジ状態の観測
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋 駿
2. 発表標題 Numerical simulations of Weyl points in a three-dimensional chiral photonic crystal
3. 学会等名 第9回電磁メタマテリアル講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Onishi, S. Takahashi, K. Yamashita, T. Ishida, K. Watanabe, S. Iwamoto, and Y. Arakawa
2. 発表標題 光学顕微鏡マイクロマニピュレータで作製したウッドパイル型3次元フォトニック結晶の角度分解透過測定
3. 学会等名 第6回JSAPフォトニクスワークショップ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 芦田 侑也、山下 兼一、上田 哲也、若林 克法、岩本 敏、高橋 駿
2. 発表標題 単純立方格子からなる3次元フォトニック結晶におけるHinge状態のマイクロ波領域での観測
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
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		
オランダ	University of Twente		