

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H00249

研究課題名（和文）トポロジカルフォトリック結晶のテラヘルツへの展開

研究課題名（英文）Development of terahertz topological photonic crystals

研究代表者

富士田 誠之（Fujita, Masayuki）

大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授

研究者番号：40432364

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,200,000円

研究成果の概要（和文）：一般に高周波回路では金属が用いられるが、その損失はテラヘルツ帯では顕著になる。本研究では、金属を用いない誘電体微細周期構造であるフォトリック結晶に着目し、物質科学に変革をもたらしているトポロジカルな性質を与えたテラヘルツ回路の基盤技術の開拓を行った。1回あたり0.1 dB以下という極めて小さな曲げ損失特性が得られ、合分波器を開発することができた。非圧縮4K映像伝送および100 Gbit/sを上回る多値通信実験にも成功し、トポロジカルフォトリック結晶の有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、電磁波に対するトポロジカル不変量の存在によって、従来のフォトリック技術では困難だった曲げや欠陥による散乱が抑制される低損失な導波路を実現するための基盤技術を確立し、それが情報通信システムに対して有用であることを示したことは学術的に意義深い。特にデバイス・回路の開発が困難な電磁波領域であるテラヘルツ帯での応用可能性を示したことは、新たな周波数帯の電磁波の利活用につながるため、社会的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：One of the most critical issues in terahertz systems is the significant loss in conventional metallic electronic-based circuits. In this study, we investigate the topological transport of terahertz waves using metal-free silicon photonic crystal waveguides, which are dielectric microstructures with a periodic refractive index distribution. Owing to the robustness of their topological properties, we successfully developed low-loss (0.015 dB/cm) terahertz waveguides with sharp bends (0.1 dB/bend) and terahertz multiplexers. Real-time transmission of uncompressed 4K high-definition videos and multilevel communications at a data rate exceeding 100 Gbit/s are demonstrated, thus indicating the potential of topological photonic crystals for use in advanced information communication technologies and terahertz science and technology.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：トポロジカルフォトリック フォトリック結晶 テラヘルツ 通信 シリコンフォトリック デバイス
回路 導波路

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は、その発生・検出が困難であり、ごく最近までは未開の電磁波であった。しかし、通信・センシングといったシステム応用につながる研究が最近進展しており、電子工学とその周辺分野における最重要課題の一つといえる。しかしながら、現状のテラヘルツ応用システムの多くは、光電変換のためのレーザ光源や伝送路を形成するための導波管など、様々な個別部品で構成されており、テラヘルツ波の利活用に向けて、小型集積化が必要な状況である。しかしながら、マイクロ波領域での集積回路で広く利用されている金属線路に関する技術をテラヘルツ帯の集積技術として適用すると、金属による損失が大きくなってしまおうという問題点がある。そのため、金属を用いない新たな回路技術の開発が必要である。

フォトリソグラフィは、光の波長に近い大きさの周期を有する誘電体微細構造であり、光の自在な操作を可能にする人工材料として、注目を集めている。光波領域におけるフォトリソグラフィ研究の進展は著しく、微小光共振器や光導波路などの光デバイスとその集積化が可能になってきている。ここで、研究代表者は、テラヘルツ波も光波と同じ電磁波のため、フォトリソグラフィで操作可能になると考え、2011年からテラヘルツフォトリソグラフィの研究に着手し、伝搬損失が最小で0.04 dB/cmと既存の金属伝送線路と比べ、2桁以上小さい極低損失の導波路を実現してきた。一方、集積回路技術という観点から、導波路に曲げを形成する場合の曲げ角度が60度と限られ、その損失も比較的大きく回路の配線自由度が低い、動作帯域が約10 GHzと狭く通信速度が限られているといったような課題が浮き彫りになってきた。

ここで、物質科学の分野において、形状における孔の有無に例えられるような物質のトポロジカルな性質に関する研究が量子ホール効果の理論的な説明やトポロジカル電子物質の発見につながり、2016年のノーベル物理学賞の対象となった。そのようなトポロジカル物質は、スピントロニクスや量子計算への応用も期待される新しい電子デバイス素材として注目されている。このようなトポロジカル状態のアイデアを光の振る舞いに対して適用したトポロジカルフォトリソグラフィといえる分野が最近切り拓かれ、電磁波に対するトポロジカル不変量の存在によって、曲げや欠陥による散乱が抑制される低損失な光導波路の実現が期待されていた。

2. 研究の目的

エレクトロニクスとフォトリソグラフィの極限領域に位置するデバイス科学のフロンティアといえるテラヘルツ帯において、トポロジカルフォトリソグラフィを基盤とする回路技術を構築し、従来の金属配線やフォトリソグラフィ導波路では困難な、低損失かつ小型で自由度の高いテラヘルツ回路デバイスの学術基盤を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、従来のフォトリソグラフィ結晶の円孔三角格子フォトリソグラフィ結晶の格子構造を反転対称性をくずした格子構造に置き換えることでテラヘルツ波に対する疑似的なスピン状態を生成することで、テラヘルツ波にトポロジカルな性質を付与し、従来のフォトリソグラフィ結晶では難しい120度曲げを有する導波路を作製し、伝搬損失の評価を行った。通信実験によってその有用性を示したのち、トポロジカル導波路の性質を活かした新規デバイスの開発を行うとともに、さらなる高速通信などへの応用の可能性を示すことにした。

4. 研究成果

トポロジカルフォトリソグラフィ結晶の基本構造として、図1に示すようなトポロジカルな性質の起源といえるテラヘルツ波に対する擬スピン状態を生成可能な大小の三角空孔をシリコンスラブに六員環状に周期的に配置した微細構造を採用した。

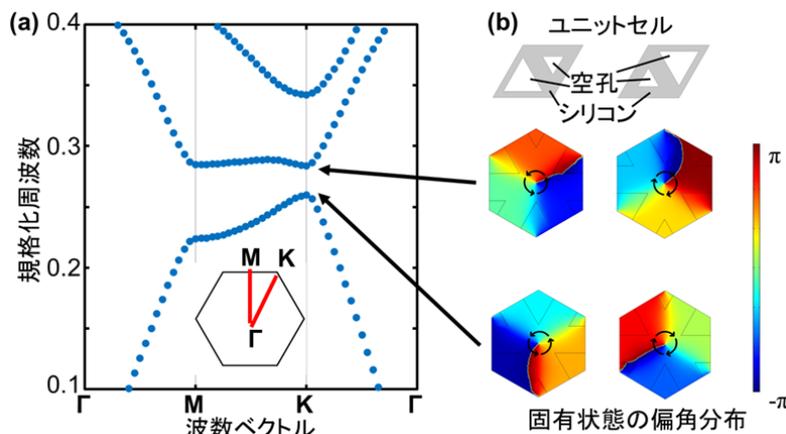


図1 トポロジカルフォトリソグラフィ結晶の(a)フォトリソグラフィバンド図と(b)K点での固有状態の偏角分布。テラヘルツ波の擬スピン状態の向きがユニットセルの向きで変わる。

テラヘルツ波の擬スピン状態の向きがユニットセルの向きで変わるため、周期構造中に界面を形成すると、それが伝送路として働く伝搬状態が生成される。図2に示すような120度と60度の急峻な曲げ構造を有する導波路および、曲げ構造がない直線導波路をフォトリソグラフィ、プラズマエッチングといった微細加工技術を利用することで図3のように作製した。その際、高い抵抗率を有するシリコンを利用することでテラヘルツ帯で課題となる吸収損失を抑制した。エレクトロニクスに基づく高精度テラヘルツ分光システムで評価を行った結果、図4に示すようにトポロジカルフォトニック結晶導波路の1回あたりの曲げ損失は0.1 dB以下であり、従来の円孔三角格子を形成したフォトニック結晶の0.2 dBよりも小さいトポロジカルなテラヘルツ波の伝搬に期待される結果が得られた。また、単位長さあたりの最小の伝搬損失は0.015 dB/cmと見積もられ、これも従来のフォトニック結晶導波路の0.04 dB/cmを更新した。

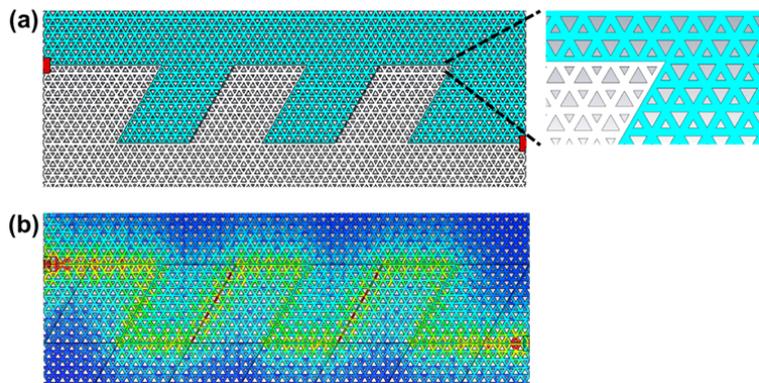


図2 トポロジカルフォトニック結晶導波路の(a)モデル図と(b)電磁界シミュレーション結果。

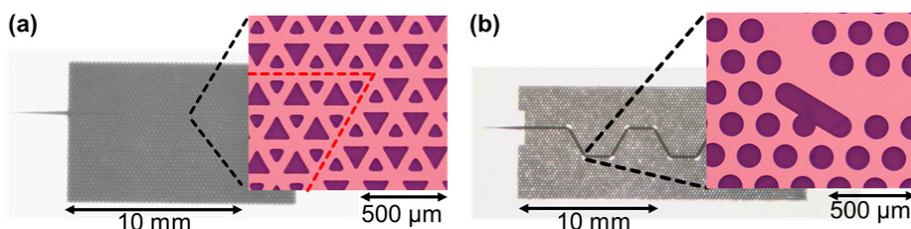


図3 作製した(a)トポロジカルフォトニック結晶導波路と(b)従来のフォトニック結晶導波路。

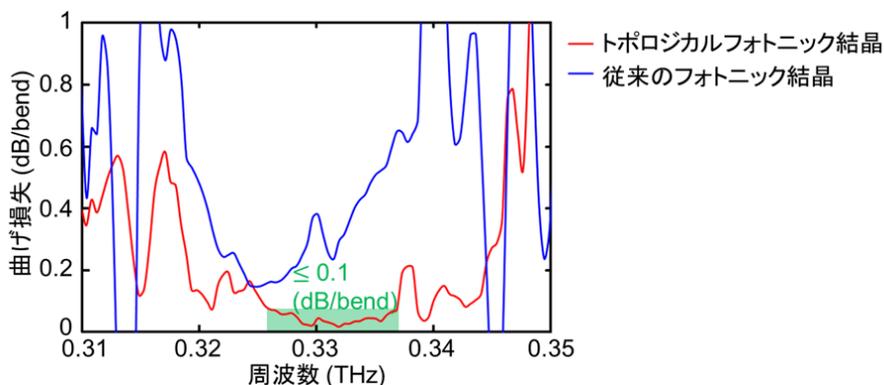


図4 曲げ損失の周波数依存性。

このような極低損失導波路の通信応用の可能性を光電変換素子を用いたテラヘルツ通信システムで検証した。オンオフ変調方式を用いた場合、ビット誤り率10のマイナス11乗以下となるリアルタイムに映像伝送可能な実用上エラーフリーな通信データレートとして11 Gbit/sが得られ、曲げ導波路を含む従来のフォトニック結晶導波路の1.5 Gbit/sを大きく更新した。また、図5に示すように非圧縮4K映像の伝送を行うことにも成功した。

ここで図6(a)に示す六員環格子を考えた時、Zigzagになる端面が向いあわせで形成された界面を有するZigzag導波路および、図6(b)に示すZigzag端面から格子点が髭のように飛び出す形で形成された端面が界面を形成するBearded界面導波路が考えられる。フォトニックバンド図計算から得られた分散関係の違いに起因して、Bearded界面導波路では低周波側の漏れを抑制することが可能であり、広帯域な動作が可能であることがわかった。さらに大小の孔の大きさの差を拡大することでフォトニックバンドギャップ効果を大きくし、0.3THz帯で従来を上回る40 GHz以上の帯域を有する導波路が実現できた。このBearded導波路に共鳴トンネルダイオード受信器を集積化したデバイスでテラヘルツ通信実験を行ったところ、オンオフ変調方式にて26 Gbit/sのエラーフリー通信に成功した。

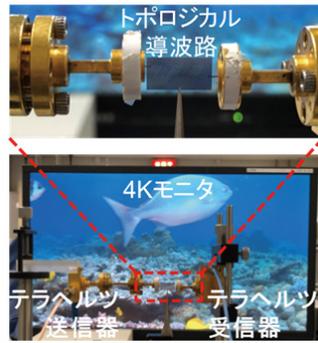


図5 トポジカルフォトニック結晶導波路を用いた非圧縮4K映像伝送の様子。

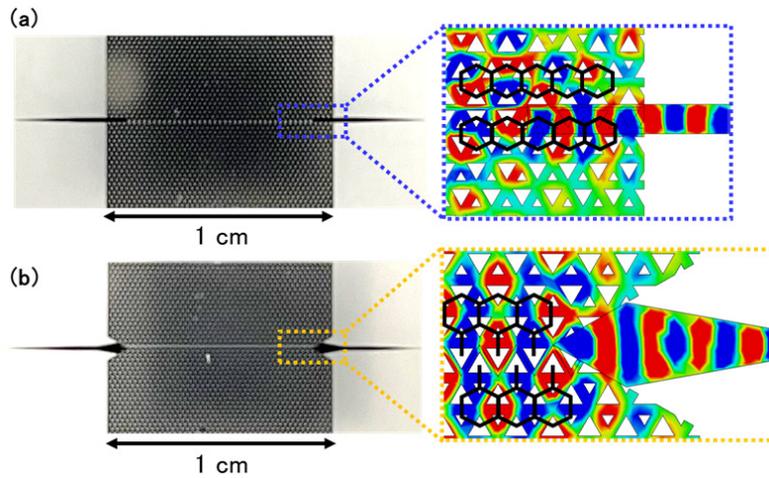


図6 異なる界面を有するトポジカルフォトニック結晶導波路の作製結果と電磁界シミュレーション結果。(a)Zigzag 導波路。(b)Bearded 導波路。

また、Zigzag 導波路と Bearded 導波路はその分散関係から逆向きの波数を有する伝搬モードであるため、図7(a)のように Zigzag 導波路と Bearded 導波路を並列に配置すると、通常の導波路とは異なり、逆方向に伝搬するテラヘルツ波が結合し、図7(b)に示すようなモードギャップが生じることでフィルタとして動作することを見出した。さらにこのフィルタのカットオフ周波数の調整方法を見出し、カットオフ周波数の異なるフィルタを直列に配置し、曲げ導波路と組み合わせた図8に示すような合分波デバイスを作製した。トポジカルな性質を有するフィルタは曲げ構造を伴うにも関わらずスムーズにテラヘルツ波が伝搬可能であり、図9に示すように周波数によって経路が3方向に切り替わる合分波デバイスが実現できた。そして、図10に示すように3チャンネルの合計でオンオフ変調方式による30 Gbit/sの高速無線通信実験に成功した。

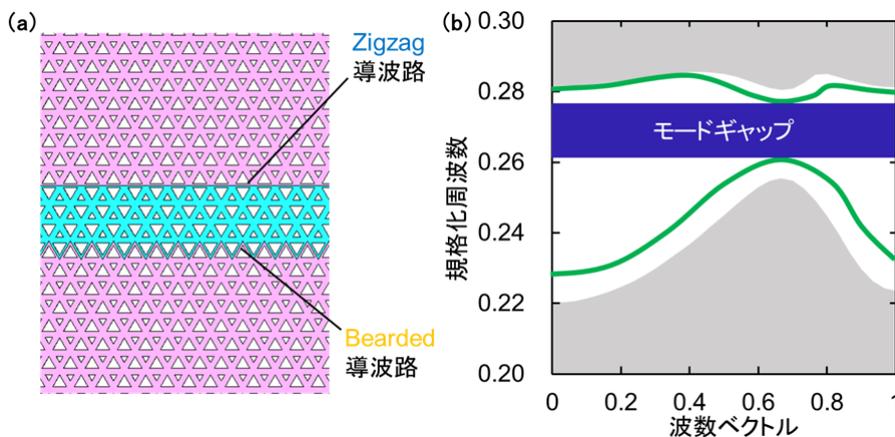


図7 異なる界面を有するトポジカルフォトニック結晶導波路を(a)結合させた場合の(b)フォトニックバンド図。

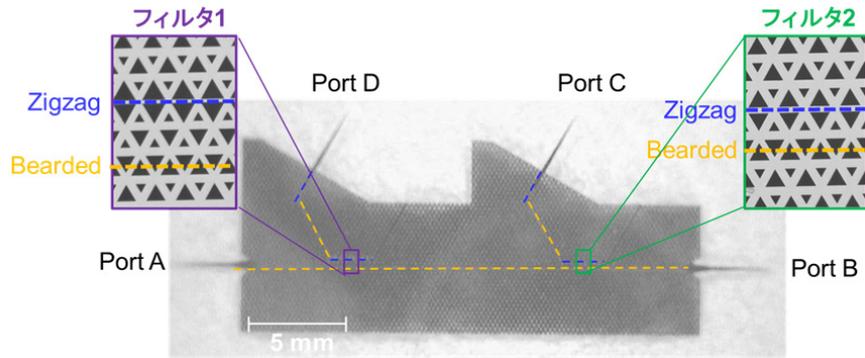


図8 作製したトポロジカルフォトニック結晶合分波デバイス.

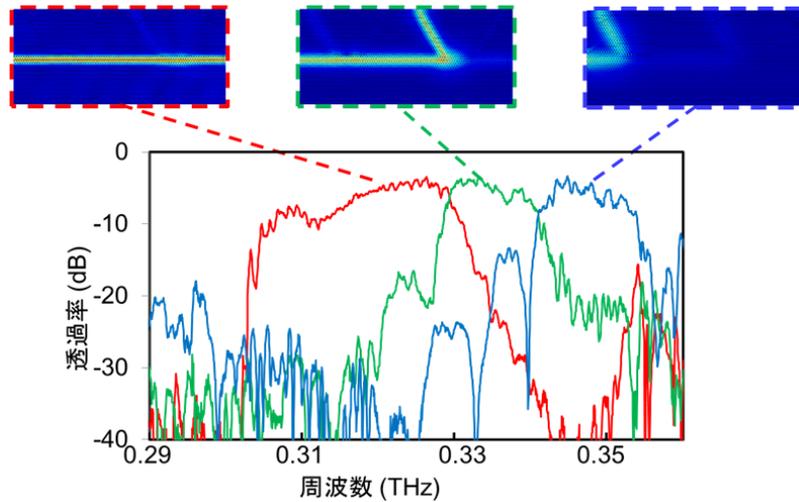


図9 トポロジカルフォトニック結晶合分波デバイスの透過特性と異なる周波数(0.320 THz, 0.335 THz, 0.345 THz)での伝搬の様子の電磁界シミュレーション結果.

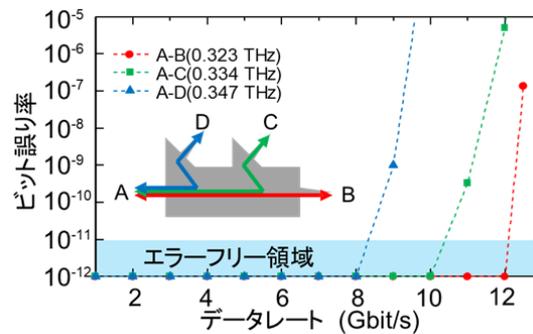


図10 トポロジカルフォトニック結晶合分波デバイスの通信実験結果.

トポロジカル導波路のさらなる高速通信の可能性を追求するため、多値通信方式のテラヘルツ通信システムに適用した. 図11に示すように64-QAMで75 Gbit/s, 16-QAMでは108 Gbit/sとテラヘルツ通信の目標といえる100 Gbit/sを超える通信実験を行うことに成功した.

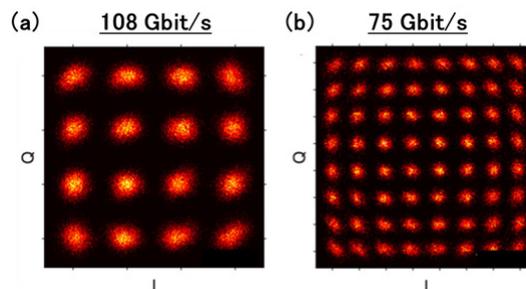


図11 トポロジカルフォトニック結晶導波路の多値通信実験結果. (a)16-QAM. (b)64-QAM.

ここでは紙面の関係などから詳しく述べないが、シリコンスラブに微細構造を形成することで歪フォトニック結晶によるテラヘルツ波に対する一般相対性理論に基づく疑似重力効果の実現, テラヘルツレーダーセンシング, 近接場イメージセンサなど, テラヘルツ波に関する様々な新たな応用を切り開く研究も実施した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 11件）

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Daniel Headland, Masayuki Fujita, Guillermo Carpintero, Tadao Nagatsuma, Withawat Withayachumnankul | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Terahertz integration platforms using substrateless all-silicon microstructures | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 APL Photonics | 6. 最初と最後の頁 091101-1 ~ 43 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0158350 | 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 |
| 1. 著者名 Kanji Nanjyo, Yuki Kawamoto, Hitoshi Kitagawa, Daniel Headland, Masayuki Fujita, Kyoko Kitamura | 4. 巻 108 |
| 2. 論文標題 Deflection of electromagnetic waves by pseudogravity in distorted photonic crystals | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review A | 6. 最初と最後の頁 033522-1 ~ 7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.108.033522 | 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 Harrison Lees, Daniel Headland, Shuichi Murakami, Masayuki Fujita, Withawat Withayachumnankul | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Terahertz radar with all-dielectric leaky-wave antenna | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 APL Photonics | 6. 最初と最後の頁 036107-1 ~ 14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0180941 | 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 |
| 1. 著者名 Ratmalgre Koala, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Nanophotonics-inspired all-silicon waveguide platforms for terahertz integrated systems | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Nanophotonics | 6. 最初と最後の頁 1741 ~ 1759 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/nanoph-2021-0673 | 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 Norihiko Shibata, Yuta Uemura, Yuma Kawamoto, Li Yi, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 12 |
| 2. 論文標題 Silicon dielectric diplexer module for 600-GHz-band frequency-division multiplexing wireless communication | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology | 6. 最初と最後の頁 334 ~ 344 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TTHZ.2022.3167946 | 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 Ratmalgre Koala, Ryoma Maru, Kei Iyoda, Li Yi, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Ultra-low-loss and broadband all-silicon dielectric waveguides for WR-1 band (0.75-1.1 THz) modules | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Photonics | 6. 最初と最後の頁 515-1 ~ 515-19 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/photonics9080515 | 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 Abhishek Kumar, Manoj Gupta, Prakash Pitchappa, Nan Wang, Masayuki Fujita, Ranjan Singh | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 Terahertz topological photonic integrated circuits for 6G and beyond: A perspective | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 140901-1 ~ -14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0099423 | 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 |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Daniel Headland, Yosuke Nishida, Xiongbin Yu, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Terahertz oscillator chips backside-coupled to unclad microphotronics | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics | 6. 最初と最後の頁 8500111-1 ~ -10 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JSTQE.2022.3215524 | 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 Ratmalgre Koala, Kei Iyoda, Weijie Gao, Yuji Matsuura, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 Terahertz fiber link using dielectric silicon waveguide interface | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Optics Express | 6. 最初と最後の頁 7351 ~ 7362 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.482785 | 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 Daniel Headland, Withawat Withayachumnankul, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 8 |
| 2. 論文標題 Gratingless integrated tunneling multiplexer for terahertz waves | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Optica | 6. 最初と最後の頁 621 ~ 629 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.420715 | 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 |

| | |
|---|------------------------------|
| 1. 著者名 Daniel Headland, Andreas Klein, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Dielectric slot-coupled half-Maxwell fisheye lens as octave-bandwidth beam expander for terahertz-range applications | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 APL Photonics | 6. 最初と最後の頁 096104-1 ~ -12 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0054251 | 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 |

| | |
|---|------------------------|
| 1. 著者名 富士田 誠之 | 4. 巻 40 |
| 2. 論文標題 共鳴トンネルダイオードとシリコンフォトニック構造が拓くテラヘルツ帯集積基盤技術の進展 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 オプトロニクス | 6. 最初と最後の頁 97 ~ 102 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 無 |
| 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 Julian Webber, Yuichiro Yamagami, Guillaume Ducournau, Pascal Szriftgiser, Kei Iyoda, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma, Ranjan Singh | 4. 巻 39 |
| 2. 論文標題 Terahertz band communications with topological valley photonic crystal waveguide | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology | 6. 最初と最後の頁 7609 ~ 7620 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2021.3107682 | 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 |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Yihao Yang, Yuichiro Yamagami, Xiongbin Yu, Prakash Pitchappa, Julian Webber, Baile Zhang, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma and Ranjan Singh | 4. 巻 14 |
| 2. 論文標題 Terahertz topological photonics for on-chip communication | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Nature Photonics | 6. 最初と最後の頁 446 ~ 451 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41566-020-0618-9 | 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 Daniel Headland, Withawat Withayachumnankul, Xiongbin Yu, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma | 4. 巻 38 |
| 2. 論文標題 Unclad microphotonics for terahertz waveguides and systems | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology | 6. 最初と最後の頁 6853 ~ 6862 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2020.3021681 | 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41件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 16件)

| |
|---|
| 1. 発表者名 山本 祥太, Nguyen Ngo, 伊豫田 圭, 山田 義春, 近藤 祐佑, 村上 修一, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 界面構造の異なるトポロジカルバレーフォトニック結晶テラヘルツ導波路の比較 |
| 3. 学会等名 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Terahertz silicon photonics towards 6G and beyond |
| 3. 学会等名 Workshop on Terahertz Device, Circuit and System Fundamentals and Applications in The European Microwave Integrated Circuits Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Terahertz integrated photonics based on photonic crystals and silicon microstructures |
| 3. 学会等名 第84回秋季応物学会, 4.8 Optica Special Lecture, JSAP-Optica Joint Symposia 2023 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 テラヘルツ集積システムの新潮流～鍵を握るのはインターコネクション～ |
| 3. 学会等名 第14回 光・電波フォーラム (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Nguyen Ngo, Yuta Inose, Yuma Kawamoto, Yosuke Nishida, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 WR-2.2-band (330-500 GHz) packaged resonant tunneling diode receiver module for terahertz communications |
| 3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Nguyen Ngo, Yuma Kawamoto, Yuta Inose, Yosuke Nishida, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 WR-2.2-band packaged resonant tunneling diode module for terahertz communications |
| 3. 学会等名 シンポジウムテラヘルツ科学の最先端X |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuma Kawamoto, Koki Kawaguchi, Michihiko Tanaka, Yosuke Nishida, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 Integration of terahertz resonant tunneling diode with broadband dielectric waveguide using corrugated mode converter |
| 3. 学会等名 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Shuya Iwamatsu, Daniel Headland, Israa Mohammad, Masayuki Fujita, Andreas Stohr |
| 2. 発表標題 THz near-field imaging sensor using integrated substrateless silicon interferometer |
| 3. 学会等名 15th German Microwave Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 フォトニック結晶と応用展開～基礎と発光制御～ |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 Webinarチュートリアルシリーズ(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 フォトリソグラフィと応用展開～テラヘルツへの展開～ |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会 Webinarチュートリアルシリーズ(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 伊豫田 圭, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 トポロジカルバレーフォトリソグラフィを用いたテラヘルツ帯分波器 |
| 3. 学会等名 電子情報通信学会マイクロ波テラヘルツ電子光技術研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 6Gの未来を切り拓くテラヘルツシリコンフォトリソグラフィ |
| 3. 学会等名 テラヘルツテクノロジーフォーラム 第14回テラヘルツビジネスセミナー(招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Nanophotonics-inspired terahertz silicon photonics |
| 3. 学会等名 The 6th A3 Metamaterials Forum(招待講演)(国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 フォトリック結晶のテラヘルツ帯域への展開 |
| 3. 学会等名 LQE/LSJ合同研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ratmalgre Koala, Shibata Norihiko, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 WR-1-band packaged low-loss unclad silicon waveguide module |
| 3. 学会等名 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kei Iyoda, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 Terahertz multiplexers based on valley photonic crystals |
| 3. 学会等名 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小藪 庸介, 柴田 紀彦, 要 遼平, 水野 遼子, 易 利, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 シリコンY分岐導波路を用いた300 GHz帯三次元イメージング |
| 3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 テラヘルツシステムの集積化に向けたデバイス回路技術 |
| 3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 シリコンフォトニック構造のテラヘルツへの展開 テラヘルツシリコンフォトニクス - |
| 3. 学会等名 日本学術振興会 R025 先進薄膜界面機能創成委員会 第11回研究会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ratmalgre Koala, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 Dual polarization operation in silicon terahertz diplexer |
| 3. 学会等名 シンポジウムテラヘルツ科学の最先端IX |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 6G and Beyondに向けたテラヘルツシリコンフォトニクスの進展 |
| 3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 Beyond 5Gの未来を切り拓くテラヘルツシリコンフォトリニクス進展と将来展望 |
| 3. 学会等名 未来ICTシンポジウム2023 (招待講演) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--------------------------|
| 1. 発表者名 北川 均, 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 フォトニック結晶歪と時空歪 |
| 3. 学会等名 かたちシュレー2022 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊豫田 圭, 山神 雄一郎, 西田 陽亮, 村上 修一, 富士田 誠之, 永妻 忠雄 |
| 2. 発表標題 バレーフォトニック結晶導波路と共鳴トンネルダイオードの集積化 |
| 3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Ngo Hoai Nguyen, Shota Yamamoto, Kei Iyoda, Yoshiharu Yamada, Yusuke Kondo, Shuichi Murakami, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 Comparison of topological valley photonic crystal and unclad silicon terahertz waveguides |
| 3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Terahertz integrated photonics based on photonic crystals and silicon microstructures |
| 3. 学会等名 The 13th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Norihiko Shibata, Yuta Uemura, Yuma Kawamoto, Li Yi, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 600-GHz-band silicon dielectric waveguide module |
| 3. 学会等名 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yuma Kawamoto, Norihiko Shibata, Yuta Uemura, Shuya Iwamatsu, Yosuke Nishida, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 Integrated resonant tunneling diode with rectangular waveguide I/O using photonic crystal interface |
| 3. 学会等名 46th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊豫田 圭, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 バレーフォトニック結晶スラブを用いた3チャンネル合分波器 |
| 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 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 柴田 紀彦, 上村 悠太, 川本 勇真, 易 利, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 600 GHz帯ダイプレクサの広帯域化と無線通信応用 |
| 3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Norihiko Shibata, Yuta Uemura, Yuma Kawamoto, Li Yi, Masayuki Fujita and Tadao Nagatsuma |
| 2. 発表標題 600-GHz-band frequency-division multiplexing communication with silicon unclad diplexer |
| 3. 学会等名 2021 Asia-Pacific Microwave Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Advanced terahertz devices based on photonic crystal and resonant tunneling diode |
| 3. 学会等名 2021 Asia-Pacific Microwave Conference (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Advanced terahertz devices and systems toward 6G and beyond |
| 3. 学会等名 8th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 テラヘルツ共鳴トンネルダイオードのシリコンプラットフォームへの実装 |
| 3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会（招待講演） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 伊豫田 圭, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 バレーフォトリック結晶スラブを用いた3チャネル合分波器の実証 |
| 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 Masayuki Fujita |
| 2. 発表標題 Terahertz integration technology based on photonic crystal and resonant tunneling diode |
| 3. 学会等名 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Julian Webber, Yuichiro Yamagami, Guillaume Ducournau, Pascal Szriftgiser, Masayuki Fujita, Tadao Nagatsuma and Ranjan Singh |
| 2. 発表標題 50-Gbit/s terahertz communication using a valley photonic crystal waveguide |
| 3. 学会等名 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 トポロジカルフォトニック結晶導波路のテラヘルツ帯への展開 |
| 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 南條 勤治, 北川 均, 北村 恭子, Headland Daniel, 富士田 誠之 |
| 2. 発表標題 歪フォトニック結晶の実験的検証 |
| 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 伊豫田 圭, 山神 雄一郎, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 バレーフォトニック結晶を用いた広帯域合分波器の設計 |
| 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 山神 雄一郎, 西田 陽亮, 富士田 誠之, 永妻 忠夫 |
| 2. 発表標題 バレーフォトニック結晶導波路と金属線路の高効率結合に関する検討 |
| 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 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 富士田 誠之 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 シーエムシー出版 | 5. 総ページ数 6 |
| 3. 書名 テラヘルツ波産業創成の課題と展望 第3章2節 「テラヘルツ誘電体回路」 | |

〔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 | | | |
|---------|----------------------------------|--|--|--|
| シンガポール | Nanyang Technological University | | | |
| フランス | Universit ´e Lille | | | |
| オーストラリア | The University of Adelaide | | | |
| ドイツ | University of Duisburg-Essen | | | |
| スペイン | Universidad Carlos III de Madrid | | | |