

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401  
研究種目：基盤研究(B) (一般)  
研究期間：2014～2016  
課題番号：26289104  
研究課題名(和文) フォトニック結晶を基盤とするテラヘルツ波平面回路の研究

研究課題名(英文) Terahertz planar circuits based on photonic crystal

## 研究代表者

富士田 誠之 (Fujita, Masayuki)

大阪大学・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) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：電波と光波の境界領域の周波数を有するテラヘルツデバイスを小型集積化するための基盤技術として、フォトニック結晶スラブに着目した。フォトニック結晶伝送路の低損失性を追求し、0.04 dB/cmという極低損失を0.3 THz帯で実現した。また、周波数の違いで伝搬経路を分ける小型合分波器をフォトニック結晶伝送路間の方向性結合の現象を利用して実現した。そして、この合分波器と自由空間との入出力を実現するグレーティングカップラおよび、共鳴トンネルダイオードを平面回路集積化したテラヘルツデバイスを作製し、所期の基本動作を確認した。加えて、テラヘルツフォトニック結晶デバイスの動作帯域に関する検討を行った。

研究成果の概要(英文)：We focused on a photonic crystal slab as technology platform for the integration of terahertz devices, such as planar circuits, with operating frequency located between the radio and light waves. We investigated the low loss of terahertz waveguides using a photonic crystal slab, and achieved a loss of 0.04 dB/cm in the 0.3 THz band. We also demonstrated a compact diplexer using a directional coupler based on photonic crystal waveguides. Then, we fabricated a prototype of a terahertz integrated circuit using the photonic crystal platform for frequency division wireless communication, which consists of the diplexer, a grating coupler as input-output wireless interface, and resonant tunneling diodes. Finally, we discussed the operating bandwidth of terahertz photonic crystal devices.

研究分野：光電子量子工学

キーワード：テラヘルツ フォトニック結晶 回路 集積

## 1. 研究開始当初の背景

電波と光波の境界領域の周波数(0.1-10 THz)を有する電磁波、テラヘルツ波に関して、その発生・検出技術の進展に伴い、分光・通信といった応用研究が最近進展してきており、今後の情報・通信分野における重要課題の一つであるといえる。しかしながら、テラヘルツ波応用システムは主に中空導波管や誘電体レンズなどの個別部品を定盤上に並べることで基礎実験がなされている段階であり、システムとして大幅な小型化を図るには、例えば、テラヘルツ波の導波、分波、合波、入出力といったような機能が集積化されたテラヘルツ波平面回路の実現が不可欠である。

本研究の基盤技術となるフォトニック結晶は、光の波長に近い大きさの周期をもつ誘電体の微細構造であり、光の自在な制御を可能にする技術として、注目を集めている。光波領域におけるフォトニック結晶研究の進展は著しく、極微小領域への光の蓄積と増強、光モードのデザインによる効率的かつ自在な光の放射、微小光導波路などの光の制御が、研究代表者らのこれまでの研究成果も含め、可能になってきている状況にあった。

ここで、研究代表者らは、テラヘルツ波も光波と同じ電磁波のため、フォトニック結晶で制御可能になると考え、本研究の開始の少し以前にテラヘルツフォトニック結晶の研究に着手した。まずは、材料として、高抵抗シリコンを用いることで、既存の金属伝送線路と比べ、2桁以上小さいサブデシベル/cmの伝搬損失がテラヘルツ波帯で得られることを見いだした。そして、量産性に優れるMEMSの作製技術を利用し、良好な形状のテラヘルツフォトニック結晶の作製に成功した。さらには、独自に構築した高精度テラヘルツ分光系によって、作製したテラヘルツフォトニック結晶伝送路を計測したところ、光波領域を含むあらゆるフォトニック結晶導波路において過去最高の低損失性(0.2 dB/cm)の実証をするに至っている状況であった。

以上の背景から、フォトニック結晶技術を基盤として、テラヘルツ集積平面回路の実現を目指す本研究の着想に至った。

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者らが微細構造フォトニック結晶を用いることで世界最小の伝搬損失の実現に成功したテラヘルツ波平面伝送路の研究を進展させるとともに、分合波および外部との無線入出力といった機能を集積化したテラヘルツ波平面回路を実現することを目的とした。

具体的には、基盤技術となる伝送路のさらなる低損失性を追求するとともに、動作帯域と損失の関係を明らかにし、テラヘルツ波の分合波処理と自由空間からフォトニック結晶伝送路への入出力、といった新しい機能を実現し、低損失なフォトニック結晶テラ

ヘルツ伝送路を基盤技術として、テラヘルツ波の分合波、入出力機能の平面集積化を目指した。

## 3. 研究の方法

まず、テラヘルツ波伝送路に関して、伝搬損失の主要因と予想される材料損失の影響を詳しく調査するため、フォトニック結晶を構成する高抵抗シリコンの抵抗率を系統的に変化させ、理論解析と実験を行った。また、動作帯域と伝搬損失の関係に関して、その周波数依存性を解析した。一方、テラヘルツ波送受信無線デバイスの実現に必要な分合波器と入出力カプラに関して、フォトニック結晶伝送路との接続を想定したモデルを電磁界シミュレーションすることで設計した。得られた設計を受けて、動作検証のための試料を作製し、テラヘルツ分光系で周波数応答を測定した。最終的には、分合波器と入出力カプラとを集積化させたテラヘルツ平面回路デバイスを作製し、その基本動作の確認を行った。

## 4. 研究成果

情報信号を伝播させる伝送路は集積回路における最も基本的な要素であるといえる。2次元周期孔をシリコンに形成したフォトニック結晶スラブの周期構造の周期をテラヘルツ波の実効波長の約半分に設計すると、スラブ面内のモードを禁止するフォトニックバンドギャップ効果が発現する。そのようなフォトニック結晶の周期構造中に意図的に周期を乱した部分を形成すると、フォトニックバンドギャップ効果が反射鏡として働く。これを線状につなげば、伝送路として働くことになる。このようなフォトニック結晶伝送路の伝搬損失は、伝送路からの放射損失と材料による吸収損失がその要因として考えられるが、スラブ上下方向の全反射条件が満たされる周波数帯では、理論的には放射損失がない極低損失伝搬が期待され、吸収損失が伝搬損失の要因となる。吸収損失はシリコン中の自由キャリア密度、すなわち、抵抗率に依存するため、シリコンの抵抗率をパラメータとして、伝搬損失低減の追求を行った。図1に示すシミュレーションの結果は材料吸収から理論的に予想される伝搬損失に従い、抵抗率が高くなるほど伝搬損失が低減している。0.1 dB/cm以下の領域ではシミュレーションと理論値の差があるが、これは、シミュレーションモデルではフォトニックバンドギャップ効果に寄与するフォトニック結晶の周期数が有限であり、わずかな面内放射の影響が現れているためである。このような伝搬損失の抵抗率依存性を検証するため、様々な伝搬長を有する周期 $a = 240 \mu\text{m}$ の円孔が厚さ $200 \mu\text{m}$ のシリコン基板に三角格子状に形成されたフォトニック結晶伝送路をMEMSファンドリによって作製した。ミリ波発振器、周波数連倍器、ミキサ、スペクトラムアナ

イザといったエレクトロニクス技術で実現したテラヘルツ分光システムによって、極低損失領域である 0.33 THz 帯の伝搬損失を測定した。理論解析同様にフォトニック結晶伝送路の伝搬損失は、シリコン基板の抵抗率が高くなるほど減少し、最小 0.04 dB/cm に達した。すなわち、テラヘルツフォトニック結晶伝送路の伝搬損失は、放射損失や加工精度に起因する散乱損失ではなく、吸収損失が支配的な損失要因であることが明らかになった。

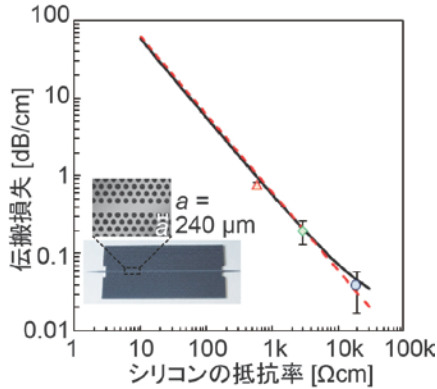


図 1 0.33 THz でのフォトニック結晶伝送路の伝搬損失のシリコンの抵抗率依存性。実線は電磁界シミュレーションの値、破線は材料吸収から決まる理論値、プロットは実験値。

ここで伝送路を情報通信へ応用する場合には、伝搬損失だけではなく、分散特性で決定される伝送帯域にも着目する必要がある。図 1 に示した伝送路の分散曲線から、1 cm あたりの群遅延特性を算出し、各キャリア周波数における最大の群遅延差から伝送帯域の周波数依存性を図 2(a)のように求めた。図 2(b)において伝搬損失が 0.1 dB/cm 以下となる極低損失帯域では、伝送帯域が 10 GHz 以下に制限されている。一方、伝搬損失を 2 dB/cm 以下に許容すれば、群遅延が小さいキャリア周波数 0.377 THz においては、最大 36 GHz の伝送帯域が期待できるという結果が得られ、数 10 Gbit/s 級のデータ通信が実現できる可能性が示された。一方で 0.3 THz 帯の極低損失領域で 10 Gbit/s を超える通信を実現するには、導波路構造の調整等による分散関係のエンジニアリングが必要であることが明らかになった。

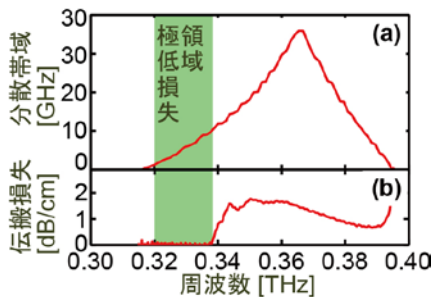


図 2 フォトニック結晶テラヘルツ伝送路の (a)分散帯域と(b)伝搬損失。

次に周波数によって、伝搬経路を切り替えるデバイスである分合波器をフォトニック結晶スラブで実現するため、図 3 に示すような 2 本の隣接する伝送路間の方向性結合現象を利用することを考えた。この結合長は周波数に依存するため、適切な長さの設計を行えば、分合波器が実現できる。ここで、動作帯域を保ちつつ、分合波器の長さをできるだけコンパクトにするために 2 本の導波路の間隔、導波路間の孔の大きさおよび導波路の幅を調整し、図 4 に示す分合波器を設計した。0.32 THz と 0.33 THz で経路が切り替わる様子が電磁界シミュレーションで確認できた。

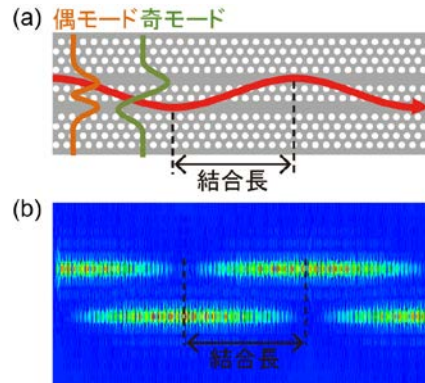


図 3 フォトニック結晶伝送路間の方向性結合。(a)概念図 (b)電界強度分布

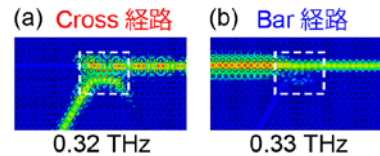


図 4 設計した分合波器の電界強度分布。点線部分が方向性結合器であり、0.32 THz(a)と 0.33 THz (b)で経路が切り替わる。

設計した構造を作製し、透過率の周波数依存性を図 4 の Cross 経路と Bar 経路で測定した結果を図 5 に示す。0.32 THz と 0.33 THz という周波数の違いによって、伝搬する経路が切り替わるといふ所期の特性が得られた。

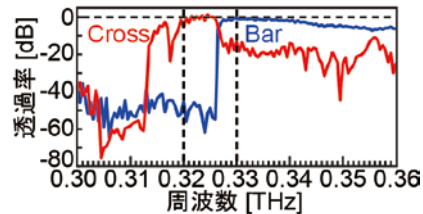


図 5 分合波器の周波数依存性。

加えて、フォトニック結晶伝送路への無線入出力カプラとして、伝送路と一括形成した図 6 に示すようなグレーティングカプラを設計した。0.3 THz 帯で動作させるため、300 μm のグレーティングを周期 600 μm で形成し、長さ 13 mm のテーパ状の接続部でフォトニック結晶伝送路へ接続する構造とし、特性評価のための伝送路と導波管を接続するためのコネクタ構造を一括形成した。

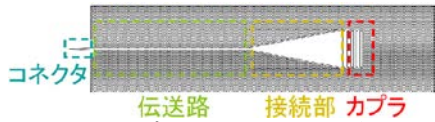


図6 入出力カプラと伝送路の集積デバイス.

WR-2.8 導波管の周波数通倍器から出力されたテラヘルツ波をコネクタを介して、フォトニック結晶伝送路へ入力し、入出力カプラから自由空間に放出されたテラヘルツ波をホーンアンテナで受信し、スペクトラムアナライザで検出される強度から結合効率を見積もった。図7に示すように伝送路を伝搬する0.3 THz帯のテラヘルツ波が自由空間へ出力されるという基本動作を確認できた。なお、カプラからの入力に関しても同様の特性が得られ、入出力無線カプラとしての所期の動作が確認できた。

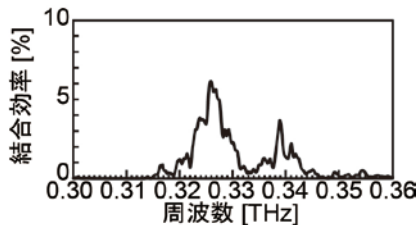


図7 入出力カプラの結合効率の測定結果.

以上実現した分合波器と入出力カプラをフォトニック結晶伝送路を介して集積化するデバイスを検討した。ここでは、小型のテラヘルツ波送受信デバイスの実現に向けて、フォトニック結晶伝送路上にテラヘルツ波の検出と発生を行うことが可能な小型電子デバイス共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunneling Diode: RTD)をハイブリッド集積化し、図8に示すようなデバイスを作製した。

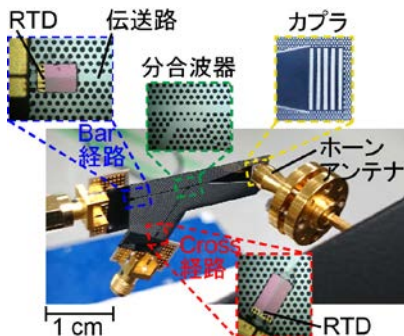


図8 分合波器とカプラを平面回路で集積化したテラヘルツ波デバイス.

作製したデバイスの周波数依存性を測定した結果を図9に示す。ここでは、ホーンアンテナから出力されたテラヘルツ波を入出力カプラで受信し、分合波器の先の伝送路上のRTDで検出した強度を示している。0.328 THzを境にCrossとBarの経路で検出される信号が切り替わっており、集積デバイスでの分合波動作が確認できた。ここで、Cross経路の検出強度がBar経路と比較して、低くなっているが、これは個々のRTDと伝送路との

結合効率の周波数依存性の影響である。RTDと伝送路との結合効率の改善が今後の重要課題であるといえる。

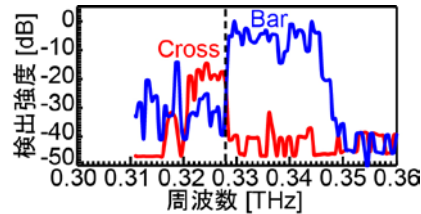


図9 分合波器-カプラ集積デバイスの特性。RTDでの検出強度を評価した。

また、今後の大容量周波数多重通信応用に向けて、分合波器の周波数チャネルの多重化および、分合波動作の帯域を拡大可能にする構造の設計を行い、シミュレーションでその動作を確認した。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 9 件)

1. 富士田誠之, “フォトニック結晶構造を用いたテラヘルツ素子”, 光技術コンタクト, vol. 54, pp. 37-42, 2016.  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40021004622> (査読無)
2. 富士田誠之, “フォトニック結晶スラブによるテラヘルツ波の操作と応用”, 応用物理, vol. 85, pp. 490-495, 2016.  
<https://www.jsap.or.jp/ap/2016/06/ob850490.xml> (査読有)
3. M. Fujita and T. Nagatsuma, “Photonic crystal technology for terahertz system integration”, Proc. SPIE, vol. 9856, pp. 98560O-1-98560O-10, 2016.  
DOI:10.1117/12.2225151 (査読有)
4. M. Yata, M. Fujita, and T. Nagatsuma, “Photonic-crystal diplexers for terahertz-wave applications”, Opt. Express, vol. 24, pp. 7835-7849, 2016. DOI:10.1364/OE.24.007835 (査読有)
5. M. Fujita, “Photonic-crystal slab for terahertz-wave technology platform”, Proc. SPIE, vol. 9757, pp. 97570W-1-97570W-8, 2016. DOI:10.1117/12.2218065 (査読有)
6. T. Nagatsuma, S. Hisatake, M. Fujita, H. H. N. Pham, K. Tsuruda, S. Kuwano, and J. Terada, “Millimeter-wave and terahertz-wave applications enabled by photonics”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 52, pp. 0600912-1-0600912-12, 2016.  
DOI:10.1109/JQE.2015.2506992 (査読有)
7. K. Tsuruda, M. Fujita and T. Nagatsuma, “Extremely low-loss terahertz waveguide based on silicon photonic-crystal slab”, Opt. Express, vol. 23, pp. 31977-31990, 2015.  
DOI:doi.org/10.1364/OE.23.031977 (査読有)
8. T. Nagatsuma, M. Fujita and S. Hisatake, “Empowering terahertz system applications by photonics”, IEEE Photonics Society Newsletter, vol. 29, pp. 12-17, 2015.  
<http://www.photonicssociety.org/images/files/publications/Newsletter/April-2015Web.pdf> (査読無)



9. M. Yata, M. Fujita and T. Nagatsuma, “Diplexer for terahertz-wave integrated circuits using a photonic-crystal slab”, Proc. Int. Top. Meet. MWP, vol.9, pp. 40-43, 2014. DOI:10.1109/MWP.2014.6994484 (査読有)
- [学会発表] (計 24 件)
1. M. Fujita, “Terahertz systems based on resonant tunneling diodes and photonic crystals”, IEEE Photonics Conference, Florida (United States of America), 2017/10/1-2017/10/5.
  2. 富士田誠之, “フォトニック結晶のテラヘルツ領域への展開と応用”, 第1回豊中地区研究交流会, 大阪大学 (大阪府豊中市), 2016/12/20.
  3. 富士田誠之, “フォトニック結晶構造によるテラヘルツ波の制御と応用”, 応用物理学学会量子エレクトロニクス研究会, 上智大学軽井沢セミナーハウス (長野県軽井沢町), 2016/12/8.
  4. 富士田誠之, “フォトニック結晶のテラヘルツ科学への展開と応用”, シンポジウムテラヘルツ科学の最先端 III, 三国観光ホテル (福井県坂井市), 2016/11/24.
  5. 富士田誠之, “フォトニック結晶のテラヘルツ波への展開と応用”, 日本学術振興会テラヘルツ波科学技術と産業開拓 182 委員会 第 28 回研究会, (株) 島津製作所, 関西支社マルチホール (大阪府大阪市), 2016/10/21.
  6. M. Fujita, “Terahertz photonic crystals and their applications”, The 12th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal structures, York (United Kingdom), 2016/7/19.
  7. M. Fujita and T. Nagatsuma, “Photonic crystal technology for terahertz system integration”, SPIE DCS, Baltimore (United States of America), 2016/4/29.
  8. 富士田誠之, “テラヘルツフォトニック結晶とテラヘルツダイオードとの融合”, 電子情報通信学会総合大会, 九州大学 (福岡県博多市), 2016/3/16.
  9. 富士田誠之, “極低損失テラヘルツフォトニック結晶とその応用”, 第 16 回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ, 電気通信大学 (東京都調布市), 2016/3/7.
  10. M. Fujita, “Photonic-crystal slab for terahertz-wave technology platform”, SPIE Photonic WEST, San Francisco (United State of America), 2016/2/18
  11. 富士田誠之, “フォトニック結晶によるテラヘルツ波の制御と応用”, レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会, 名城大学 (愛知県名古屋市), 2016/1/11.
  12. 富士田誠之, “フォトニック結晶のテラヘルツ波領域への展開とその応用”, 2015 年第 4 回エイトラムダフォーラム, ルヴェンヴェール本郷 (東京都文京区), 2015/12/10.
  13. 矢田将大, 隅倉麻子, 鶴田一魁, 向井俊和, 富士田誠之, 永妻忠夫, “フォトニック結晶と共鳴トンネルダイオードを集積化したテラヘルツ波送受信デバイス”, 第 76 回秋季応物学会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2015/9/16.
  14. 矢田将大, 富士田誠之, 永妻忠夫, “テラヘルツフォトニック結晶導波路の伝送帯域の解析”, 第 76 回秋季応物学会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2015/9/15.
  15. 富士田誠之, “フォトニック結晶によるテラヘルツ波の閉じ込め効果とその応用”, 応用物理学学会テラヘルツ電磁波技術研究会, かんぼの宿奈良 (奈良県奈良市), 2015/8/21.
  16. K. Tsuruda, M. Fujita, A. Suminokura, M. Yata and T. Nagatsuma, “Terahertz-wave integrated circuits based on photonic crystals”, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Prague (Czech Republic), 2015/7/8.
  17. 鶴田一魁, 隅倉麻子, 矢田将大, 富士田誠之, 永妻忠夫, “テラヘルツ帯フォトニック結晶導波路とダイオードの集積化に関する検討”, 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 機械振興会館 (東京都港区), 2015/5/25.
  18. 富士田誠之, “フォトニック結晶のテラヘルツ波領域への展開”, 国際光年記念シンポジウム, 東京大学安田講堂 (東京都文京区), 2015/4/21.
  19. 鶴田一魁, 隅倉麻子, 富士田誠之, 永妻忠夫, “極低損失テラヘルツ波フォトニック結晶導波路”, 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトニクス研究会, 大阪大学 (大阪府豊中市), 2015/1/29.
  20. 富士田誠之, “テラヘルツ波シリコンフォトニック結晶”, 第 22 回シリコンフォトニクス研究会, ホテル賀茂川荘 (広島県竹原市), 2015/1/22.
  21. M. Fujita, K. Tsuruda, A. Suminokura, M. Yata and T. Nagatsuma, “Silicon photonic crystal as a terahertz-wave technology platform”, The 4th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence, Tokyo (Japan), 2014/11/19.
  22. 矢田将大, 富士田誠之, 永妻忠夫, “フォトニック結晶を用いた小型・広帯域合分波器の設計とテラヘルツ帯における実現”, 応用物理学学会関西支部平成 26 年度第 2 回講演会, 神戸大学 (兵庫県神戸市), 2014/11/12.
  23. M. Yata, M. Fujita and T. Nagatsuma, “Diplexer for terahertz-wave integrated circuits using a photonic-crystal slab”, 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics / The 9th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, Sapporo (Japan), 2014/10/21.
  24. M. Yata, M. Fujita and T. Nagatsuma, “Broadband, compact diplexer using a photonic-crystal directional coupler”, 第 33 回電子材料シンポジウム, ラフォーレ修善寺 (静岡県伊豆市), 2014/7/11.
6. 研究組織  
 (1)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  
 (3)連携研究者  
永妻 忠夫 (NAGATSUMA TADAO)  
 大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
 研究者番号: 00452417