

**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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13952

研究課題名(和文) フォトニック結晶共振器による超高感度テラヘルツセンシング

研究課題名(英文) Ultrahigh sensitivity terahertz sensing by photonic crystal cavity

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：電波と光波の境界領域の周波数(0.1 THz -10 THz)を有する電磁波，テラヘルツ波を用いた超高感度センシングの実現に向け，フォトニック結晶を用いた微小共振器に着目した．高抵抗シリコンウエハを微細加工することで，0.3 THz帯にて，約10,000という高いQ値の共振器を実現した．波長の1/100以下の薄膜を付加した際に現れる共振スペクトルの変化の検知に成功し，超高感度テラヘルツセンシングの可能性を示すことができた．

研究成果の概要(英文)：We studied photonic crystal microcavity for ultrahigh sensitivity sensing using terahertz wave with frequency located between the radio and light waves. We fabricated the cavity with a Q factor of approximately 10,000 in the 0.3 THz band from high resistivity silicon wafer using microfabrication technology. As a test bed for the sensing application, we successfully detected a change in the resonant spectrum of the cavity when a dielectric film with a thickness smaller than 1/100 of the wavelength was attached to the surface of the cavity.

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 共振器 センシング

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いる。特に物質固有の周波数応答を利用するような分光センシング応用では、生体分子の成り立ちや化学反応過程に重要な分子間相互作用にもとづく物質の解析が可能であるため、今後、高感度のテラヘルツセンシングが実現すれば、材料、食品、農業、セキュリティ、バイオテクノロジー、医用など、様々な分野への展開が期待でき、注目を集めている。現状、実用レベルで最も有効と考えられているテラヘルツセンシング法は、テラヘルツ波パルスとプリズムを用いた時間領域全反射分光法である。しかしながら、その感度が制限されるとともに、そのシステムはレーザー光源、検出器やミラーといった多くの個別部品で構成されている状況である。

ここで本研究開始の少し以前に研究代表者らは、誘電体微細構造からなる人工材料フォトニック結晶を基盤材料として、金属伝送路と比較して、2桁以上小さい伝搬損失(< 0.2 dB/cm)のテラヘルツ波伝送路と、自由空間から到来するテラヘルツ波のフォトニック結晶による捕獲効果を実証した。これらの研究を進展させることで、テラヘルツ波を微小領域へ極低損失で閉じ込める微小共振器を実現し、テラヘルツ波と対象物質とを効率的に相互作用させることができれば、超高感度なテラヘルツセンシングの実現も期待できると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

テラヘルツ波を含む電磁波を用いたセンシングにおいては、電磁波と物質の相互作用が重要である。物質の状態変化により、屈折率が変化すれば、電磁波の物質に対する応答が変化し、物質のセンシングが可能となる。電磁波と物質の相互作用を高めるには、波長程度の大きさの微小共振器を用いることで、局所的な電界強度を高めるとともに、共振器損失を低減することで共振器のQ値を高め、電磁波と物質を繰り返し相互作用させることが重要である。

マイクロ波領域においては金属の導体損失が小さいため、金属を利用した共振器への電磁波の閉じ込めが容易に可能である。一方、テラヘルツ波帯においては、金属を用いると損失が大きくなり、これまでに報告されている共振器Q値は数10から数100程度であった。

本研究で注目したフォトニック結晶共振器は、金属ではなく誘電体の微細構造から構成されるため、従来のテラヘルツ共振器よりも飛躍的に高いQ値の実現が期待される。そこで、本研究ではまず、テラヘルツ帯においてフォトニック結晶による極低損失な高いQ値を有する微小共振器を実現することを目指し、共振器と伝送路とを集積化したチップを作製し、分光評価した。そして、外因による共振器の状態、すなわち、共振スペクトルの変化を観察し、超高感度テラヘルツセンシングの可能性を探究することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、極低損失伝送路で実績のある材料、高抵抗シリコンにてフォトニック結晶を構成すると想定し、フォトニック結晶共振器を電磁界シミュレーションで解析した。一方で、研究代表者らが構築してきた高精度テラヘルツ波分光系での評価を可能とし、小型テラヘルツセンサへの展開も可能とするため、フォトニック結晶伝送路との結合構造を設計した。その設計結果を受けて試料をMEMSファクトリを利用して作製し、テラヘルツ波分光系で共振スペクトルを測定することで、共振器のQ値を評価した。そして、波長の1/100程度の厚さの誘電体薄膜を共振器に付加した際の共振スペクトルの変化を分析することで、フォトニック結晶共振器による超高感度テラヘルツセンシングの可能性を探究した。

4. 研究成果

フォトニックバンドギャップ効果を有するフォトニック結晶の周期構造中に、図1(a)のように周期を一部乱した部分を形成すると、テラヘルツ波を閉じ込め可能な微小共振器として働く。抵抗率20,000 Ωcmの高抵抗シリコンスラブを仮定し、円孔の位置を微調整したこの共振器Q値は電磁界シミュレーションでは、23,000と見積もられた。この共振器に直線上に孔を埋めて形成した伝送路を隣接させると、エバネッセント波を介して、伝送路から共振器へテラヘルツ波を入出力することができる。極低損失なフォトニック結晶伝送路を実現した技術を用いて、図1(b)に示すような共振器と伝送路を集積化した構造を作製した。ここでは、動作周波数が0.3 THz帯になるように、円孔の周期 $a = 240 \mu\text{m}$ 、半径 $r = 72 \mu\text{m}$ 、スラブの厚さを $200 \mu\text{m}$ とした。ここでは、共振器と伝送路との間の列数 $W$ を変化させたサンプルを作製した。

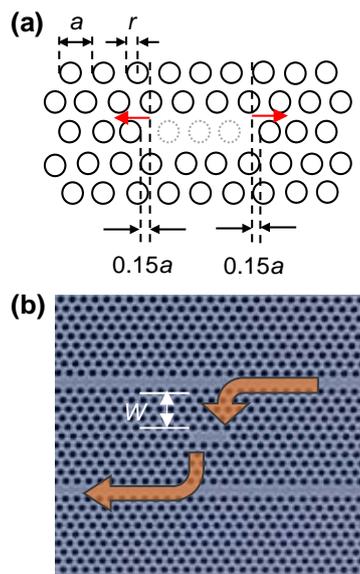


図1 フォトニック結晶共振器。(a)模式図。(b)伝送路との集積の様子。

ここで、図2に示すようなミリ波発生源、周波数通倍器、ミキサ、スペクトラムアナライザから構成される高精度なテラヘルツ分

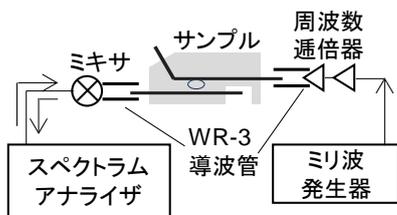


図2 テラヘルツ分光計の模式図.

光系で、伝送路に入力するテラヘルツ波の周波数を変化させながら、出力強度を測定することで共振器の共振スペクトルを図3のように測定した. 共振周波数は0.318 THzで半値全幅は30 MHzであり、共振器  $Q$  値は10,600と見積もられた. この共振器  $Q$  値は、本研究以前に報告されていたテラヘルツ帯のメタマテリアル共振器よりも2桁以上高い  $Q$  値であった.

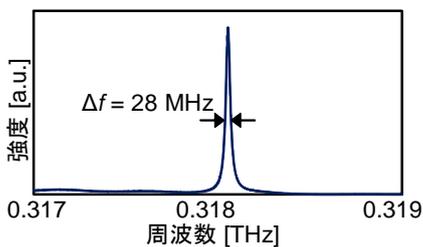


図3 共振スペクトル.

図4に共振器と伝送路間の列数  $W$  と  $Q$  値の関係を示す.  $W$ が増えると共振器と伝送路の間の結合が減るため、デバイス全体としての  $Q$  値が増加するという関係が得られた. 理論的には  $W$  を7以上に増加させると、 $Q$  値は共振器単体の値である23,000に近づく. 材料で決まる吸収損失からは、フォトニック結晶共振器構造の最適化で5万以上の  $Q$  値も期待できる.

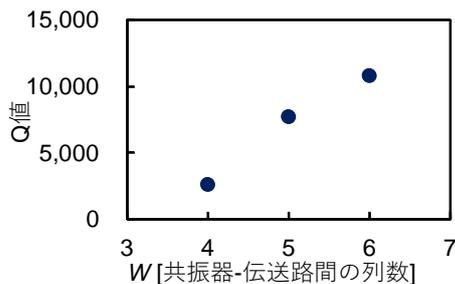


図4 共振器-伝送路間の列数と  $Q$  値の関係.

高感度なテラヘルツセンシングの方法として、共振器を用いた手法が挙げられる. 共振器に、ある屈折率を有する被測定物が付加する、もしくは、付加している被測定物の状態が変化すると、共振周波数が変化する. この周波数変化を観測することで被測定物のセンシングを行うという方法である. ここで、共振器  $Q$  値が高くなると周波数分解能が高くなり、より微小な共振周波数変化を検出できるため、センシングの感度が高くなるといえる. また、物体の付加や屈折率変化による周波数変化そのものが大きいとセンシングの感度が高いといえる. このような観点から共振器によるセンシングで一般的に用いら

れる指標(Figure of Merit: FOM)を見積もることと従来研究との感度の比較を行った.

ここでは上記のセンシングの原理検証と感度を見積もるため、被測定物として、厚さ  $5 \mu\text{m}$ - $30 \mu\text{m}$ 、屈折率約1.6の誘電体テープを図5のようにフォトニック結晶共振器に付加し、共振周波数の変化を測定した. 図6に示すように、波長の約1/100以下の薄いテープ厚さの違いを明瞭に判別でき、実験値は理論値と良い一致を見た.

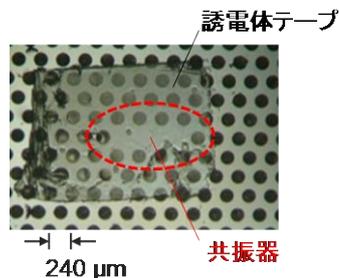


図5 フォトニック結晶共振器へ誘電体テープを付加した様子.

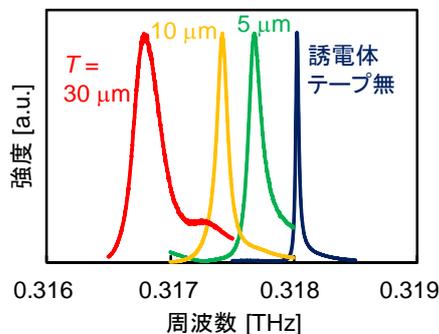


図6 薄膜センシングの結果. 誘電体テープの厚さ  $T$  を変化させたときの共振スペクトル.

図7にセンシングのFOMに関して、テラヘルツ帯で報告されているメタマテリアル共振器および金属共振回路と比較した結果を示す. フォトニック結晶共振器は、誘電体部分にテラヘルツ波が強く閉じこめられるため、屈折率変化自体は一桁から二桁小さいが、共振器  $Q$  値が二桁以上高いため、メタマテリアルよりも一桁程度高い屈折率センシングの感度が期待できることが見て取れる. これにより、テラヘルツ帯センシングの高感度化に対して、フォトニック結晶共振器が有望であることが示された.

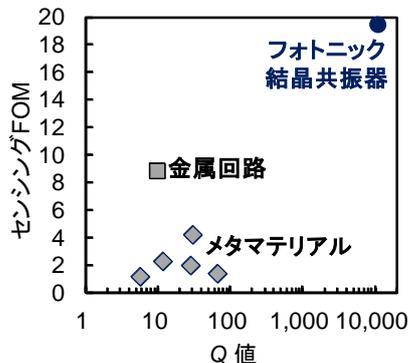


図7  $Q$  値をパラメータとした様々な共振器を用いたテラヘルツセンシングのFOM.

以上の研究をさらに発展させるべく小型で集積可能な電子デバイスである共鳴トンネルダイオード(Resonant Tunneling diode: RTD)を用いた小型高感度テラヘルツセンサの可能性も探求した. 図8に示すように, RTDを図2のミリ波発生器, 周波数通倍器に代わる小型の周波数可変のテラヘルツ光源として動作させ, フォトニック結晶共振器のスペクトルを測定した.

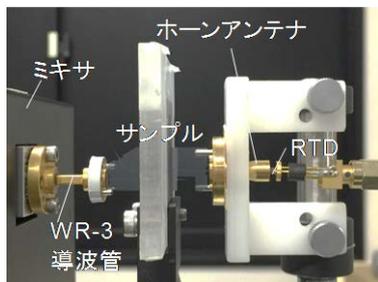


図8 RTDを用いたフォトニック結晶共振器の分光実験の様子.

図9のようにフォトニック結晶共振器の共振スペクトルが得られ, 厚さ5 $\mu\text{m}$ の誘電体テープを付加した場合のスペクトル変化も観察され, テラヘルツセンシングの原理検証に成功した. 加えて, フォトニック結晶共振器と集積化された伝送路上にRTD検出器をハイブリッド集積化したセンシングモジュールを作製し, 本モジュールによるフォトニック結晶共振器の共振スペクトルの検知にも成功した.

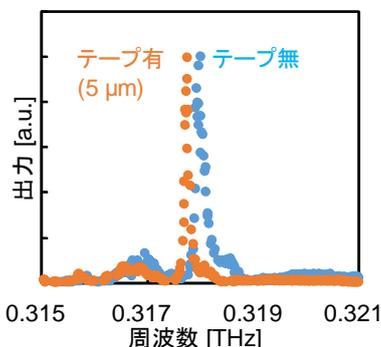


図9 RTD光源によるフォトニック結晶共振器のテラヘルツ分光センシングスペクトル.

以上のようにフォトニック結晶共振器を用いた超高感度かつ小型なテラヘルツセンサの可能性を示すことができた.

##### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

1. K. Okamoto, K. Tsudura, S. Diebold, S. Hisatake, M. Fujita and T. Nagatsuma, "Terahertz sensor using photonic crystal cavity and resonant tunneling diodes", *J. Infrared Millim. Terahz. Waves*, vol. 38, pp. 1-13, 2017. DOI:10.1007/s10762-017-0391-0 (査読有)
2. 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)
3. K. Tsuruda, K. Okamoto, S. Diebold, S. Hisatake, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "Terahertz sensing based on photonic crystal cavity and resonant tunneling

diode", *Proc. PIERS*, pp. 3922-3926, 2016.

DOI:10.1109/PIERS.2016.7735476 (査読有)

4. 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)

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)

[学会発表] (計 10 件)

1. 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, 大阪大学会館アセンブリホール (大阪府豊中市), 2016/12/20.
2. 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.
3. 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.
4. 鶴田一魁, 岡本和馬, Sebastian Diebold, 久武信太郎, 富士田誠之, 永妻忠夫, "共鳴トンネルダイオードとフォトニック結晶共振器を用いた小型テラヘルツ分光システム", 電子情報通信学会 マイクロ波・ミリ波フォトンクス研究会, 機械振興会館 (東京都港区), 2016/11/14.
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. K. Tsuruda, K. Okamoto, S. Diebold, S. Hisatake, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "Terahertz sensing based on photonic crystal cavity and resonant tunneling diode", *Progress in Electromagnetics Research Symposium, Shanghai (China)*, 2016/8/10.
7. M. Fujita, "Terahertz photonic crystals and their applications", *The 12th International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures, York (United Kingdom)*, 2016/7/19.
8. 岡本和馬, 久武信太郎, 富士田誠之, 永妻忠夫, "高 Q 値フォトニック結晶共振器によるテラヘルツセンシングの高感度化", 第 63 回春季応物学会, 東京工業大学 (東京都目黒区), 2016/3/20.
9. M. Fujita, "Photonic-crystal slab for terahertz-wave technology platform", *SPIE Photonic WEST, San Francisco (United State of America)*, 2016/2/18.
10. 岡本和馬, 久武信太郎, 富士田誠之, 永妻忠夫, "高 Q 値フォトニック結晶共振器によるテラヘルツ波センシングの高感度化に関する検討", 第 76 回秋季応物学会, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市), 2015/9/14.

##### 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