

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 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：2012～2013

課題番号：24656208

研究課題名(和文) フォトニック結晶テラヘルツ波吸収体の研究

研究課題名(英文) Photonic crystal terahertz-wave absorbers

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) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：電波と光波の境界領域の周波数(0.1-10 THz)をもつ未開の電磁波テラヘルツ波においては、余計な電磁波を吸収し、システムを安定させるのに不可欠な電磁波吸収体が実用化されていない状況である。本研究では、波長のわずか五分の一の厚さをもつフォトニック結晶でテラヘルツ波を捕獲・吸収するという独自のコンセプトを実証するとともに、捕獲したテラヘルツ波とシリコンフォトニック結晶中の自由キャリアとの効果的な相互作用によって、最大吸収率99%以上、中心周波数の17%という広い90%動作帯域をもつ平面薄膜テラヘルツ波吸収体の実現できた。

研究成果の概要(英文)：Terahertz (THz) waves, which are located in the region between radio and light waves (0.1 THz - 10 THz), have attracted a great deal of interest in various fields. The highly-efficient THz perfect absorbers have attracted much attention recently due not only to scientific interest but also to various possible applications. However, thin, planar THz-wave absorbers with near perfect absorptivity and sufficiently broad bandwidth have not yet been demonstrated. Here we utilize the in-plane resonance of a thin, planar photonic-crystal slab with negligible absorption loss to successfully demonstrate and visualize THz-wave trapping. We artificially introduce free carriers, which interact with the trapped waves and capture them in the slab by absorption. Our system exhibits an experimental absorptivity (interaction efficiency) of > 99 % and a broad bandwidth (absorptivity \geq 90 %) that covers 17 % of the centre frequency.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：テラヘルツ波 フォトニック結晶 電磁波吸収体

1. 研究開始当初の背景

電磁波を吸収する電磁波吸収体は、無線LAN等の通信障害対策、レーダ対策、電波暗室用途、携帯電話等電子機器内のノイズ対策等において、幅広く利用されている電波利用には不可欠な電子材料である。電波と光波の境界領域の周波数帯(0.1-10 THz)の電磁波であるテラヘルツ波は、その発生・検出が困難であったため、極最近まで未開の電磁波であった。しかし、その高周波特性を活かした超高速無線通信や物質固有の吸収スペクトルの検知・適度な透過性を利用したセンサ・イメージングなど、システム応用につながるような研究も最近進行してきており、今後の情報通信分野における最重要基盤技術の一つである。しかし、他の電波領域では実用化されている余計な電磁波を吸収し、システムを安定させるのに不可欠な電磁波吸収体がまだ実用化されていない状況であった。

研究代表者はこの十年あまり、光の波長に近い大きさをもつ微細構造フォトニック結晶と発光材料の相互作用に関する先駆的な研究を行ってきた。フォトニック結晶(Photonic Crystal: PC)は固体結晶と同様に周期性をもち、光のエネルギーに対するフォトニックバンドが形成される。その結果、自由空間とは異なる電磁場環境を創り出すことができ、材料元来の限界を超える発光過程そのものの根源的な制御が可能になると期待できる。申請者は電磁界理論解析に基づく考察から、2次元フォトニック結晶を用いることで電磁モードの操作により余計な発光を抑え、有用な発光の効率を向上させるという、フォトニック結晶による発光制御の基本原則を世界に先駆けて実証してきた。

本研究の対象となるテラヘルツ波も光と同じく電磁波であり、光吸収現象は発光の逆過程で発光と同様に電磁モードに依存するため、上記で述べた申請者のこれまでの発光制御に関する研究から、フォトニック結晶でテラヘルツ波の吸収現象が制御可能になると考え、当該研究の構想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、電磁モードの操作という、研究代表者が2次元フォトニック結晶を用いて、世界に先駆けて実証してきた発光制御の基本原則に着想する観点から、フォトニック結晶を用いたテラヘルツ波吸収体を実現することを目指した。光に対する様々な効果が実証されているフォトニック結晶が、テラヘルツ波に対する吸収増大効果をもつかどうか、また、テラヘルツ波吸収体として有用かどうかに関して、明らかにし、テラヘルツ波という未開の電磁波に対して、電磁モードの操作という新しい観点から、吸収という基礎現象に取り組むことで、光と電波の境界領域の電磁波の利用の開拓、光領域では盛んに研究が進むフォトニック結晶の新規電子材料としての新たな応用展開に加え、テラヘルツ波と

物質の相互作用の物理の探究にもつなげることを目的とした。

3. 研究の方法

フォトニック結晶テラヘルツ波吸収体の実現へ向けて、1. フォトニック結晶によるテラヘルツ波の捕獲、2. 捕獲されたテラヘルツ波とフォトニック結晶との相互作用による吸収、というプロセスが必要であると考えた。

図1にフォトニック結晶によるテラヘルツ波捕獲の概念図を示す。自由空間から入射したテラヘルツ波がフォトニック結晶の面内共振効果によって、捕獲されると予想される。そこでまずは、テラヘルツ波を捕獲可能なフォトニック結晶の設計を行った。フォトニック結晶材料としては、加工の容易さ、将来の電子デバイスとの集積性および、キャリア密度(抵抗率)により吸収係数を変化させることができるという点からシリコンを選択した。シリコンへフォトニック結晶となる周期構造が形成されたモデルに対し、有限時間差分領域法を用いて、テラヘルツ波に対するフォトニック結晶の透過・反射特性と時間応答特性を解析した。そして、実際にシリコンを加工することで試料を作製し、時間領域テラヘルツ分光法で測定を行い、捕獲効果の実証を行った。その際、シリコン中の抵抗率を変化させることで、テラヘルツ波とシリコン中の自由キャリアとの相互作用による吸収に起因する透過率の減少の観測を原理実証のために目指した。

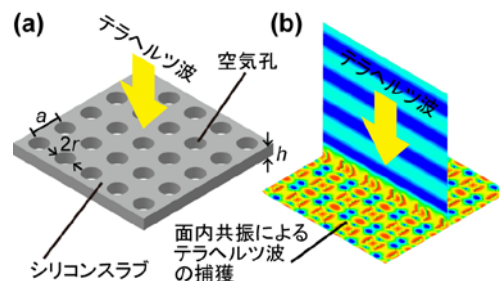


図1 (a)フォトニック結晶スラブと(b)テラヘルツ波捕獲の概念図。

さらに、フォトニック結晶の孔形状および厚さを調整することで、テラヘルツ波を捕獲可能にするモード f_e , f_o の動作帯域を広げることが図2のように試みた。このフォトニック結晶に対して、シリコンのキャリア密度を

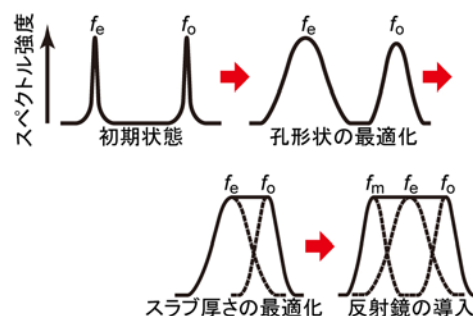


図2 広帯域動作の設計指針

様々に変化させた際の吸収スペクトルの系統的な解析を行い、最適なキャリア密度条件を算出した。さらにフォトニック結晶に反射鏡を付加することで、反射鏡に由来するモード f_m を導入し、動作帯域をさらに広げることを目指した。最終的には、得られた最適設計の試料を作製し、その吸収スペクトルを評価することで、広帯域動作可能な平面薄膜テラヘルツ波吸収体の実現を目指した。

4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を以下にまとめる。

(1) フォトニック結晶によるテラヘルツ波捕獲の原理実証

厚さ 200 ミクロンのシリコン基板（シリコンスラブ）をフォトリソグラフィ、プラズマエッチングといった電気微小機械（MEMS）の作製技術を用いて微細加工することで図 3 のような周期 $a = 450$ ミクロンの円孔正方格子 2 次元フォトニック結晶を作製した。電磁界シミュレーションの結果からこのフォトニック結晶では、周期と媒質内波長が一致する 0.3 THz 付近で、図 1 のようなテラヘルツ波の捕獲が期待できる。

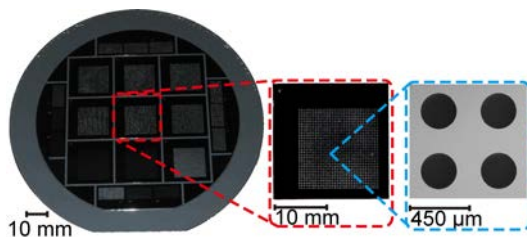


図 3 作製したテラヘルツ波フォトニック結晶。

作製した試料を時間領域テラヘルツ分光法で測定した結果を図 4 に示す。同図 (a) に示す時間波形から、フォトニック結晶では、

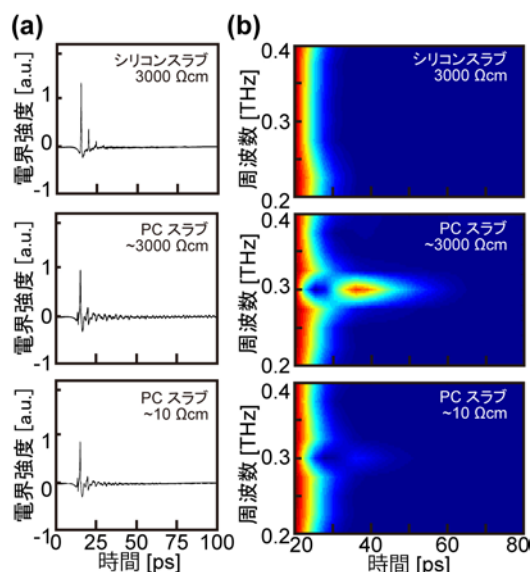


図 4 テラヘルツ波捕獲の原理実証結果。
(a)時間波形。(b)スペクトログラム。

時間的に長く続く成分が見られる。ここで、フォトニック結晶によるテラヘルツ波の捕獲は特定の共振周波数で起こるため、得られた時間波形を短時間フーリエ変換し、時間発展の周波数依存性を視覚化できるスペクトログラムを同図 (b) のように作成することにした。フォトニック結晶では、理論的に期待されるように 0.3 THz 付近に時間的に長く残る捕獲された成分が現れ、フォトニック結晶によるテラヘルツ波の捕獲効果が実証できた。さらに、シリコン中の吸収効果が無視できる $3000 \Omega \text{cm}$ と比べてキャリア密度が高く、吸収効果が期待される $10 \Omega \text{cm}$ の抵抗率の試料の結果とを比較すると、 $10 \Omega \text{cm}$ の場合には、先に述べた捕獲効果に由来する成分がスペクトログラム上から消滅した。以上により、捕獲されたテラヘルツ波とシリコンフォトニック結晶中の自由キャリアとの相互作用により、確かに吸収効果が起こるといことも実証できた。

(2) 広帯域平面薄膜フォトニック結晶テラヘルツ波吸収体の実現

フォトニック結晶は、その構造を変化させることで、電磁モード環境を操作することができる。テラヘルツ波材料・デバイスとしては、一般に広帯域なものが期待されるため、フォトニック結晶の孔形状および厚さを調整することで、テラヘルツ波を捕獲可能にするモードの動作帯域を図 5 のように広げることを検討した。孔を大きくすることで、自由空間との結合を強くし、フォトニック結晶に由来する共振モードの Q 値を小さくし、帯域幅を広げるようにした。さらには、スラブの厚さを変化させ、フォトニック結晶中に生じる二つの共振モード、偶モードと奇モードの周波数 f_e と f_o を近づけることで広帯域化を図った。

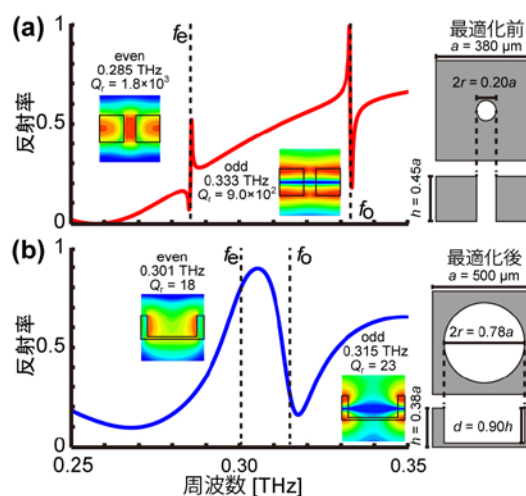


図 5 (a)構造最適化前と(b)最適化後の反射率スペクトルのシミュレーション結果。

ここで、吸収率が捕獲効果と吸収効果のバランスで決定されると考え、最適化されたフォトニック結晶構造に対して、シリコン中の

キャリア密度に対する吸収率と反射率の関係を解析した結果を図6に示す。キャリア密度が $1.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ において、最大の吸収率が得られるという設計が得られた。ここで、キャリア密度が最適値よりも高い場合には、シリコンが金属状態に近づくため、反射率が上昇し、吸収率が小さくなる。

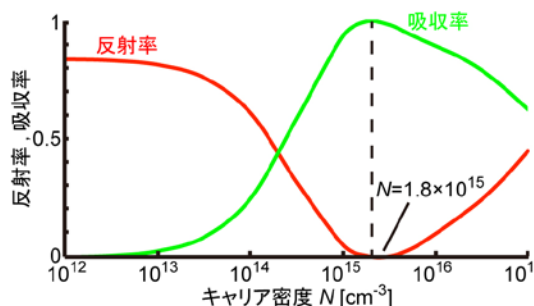


図6 キャリア密度と吸収率, 反射率の関係。

フォトニック結晶およびシリコンのキャリア密度に対して最適化された構造において、さらなる吸収作用の広帯域化を行うため、フォトニック結晶を透過したテラヘルツ波を反射鏡で反射させる構造を検討した。フォトニック結晶と反射鏡の間隔 S を変えた際の吸収スペクトルのシミュレーション結果を図7にまとめる。間隔 S に依存した吸収ピークが存在することがわかり、これが反射鏡とフォトニック結晶との間に生じるファブリペロー共振モードに由来することが電磁界分布から判明した。図7から、間隔 S を200ミクロン付近とすることで90%吸収帯域が50GHz という広い吸収帯域の設計が得られた。

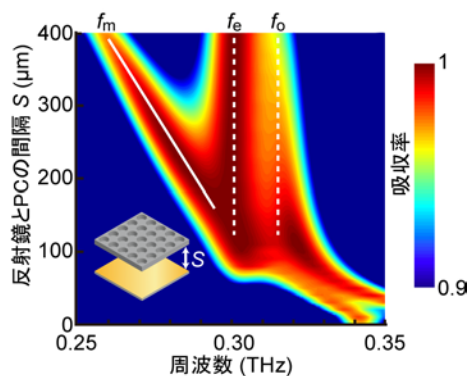


図7 吸収スペクトルのフォトニック結晶と反射鏡の間隔に対する依存性

以上、得られた最適設計をもとに前述のMEMSの作製技術を用い、最適なキャリア密度に相当する抵抗値 $6 \Omega \text{ cm}$ のシリコンウエハ(厚さ190ミクロン)を用いて試料を作製した。時間領域テラヘルツ分光法により作製した試料の反射率と透過率を測定し、吸収スペクトルを求めた結果を図8に示す。フォトニック結晶のない場合には最大40%の吸収率である一方、フォトニック結晶では、最大96%の吸収が0.3THz帯で得られた。反射鏡とフォトニック結晶の間隔 S を約200ミクロンとして導入すると、最大吸収率が99%以上に向

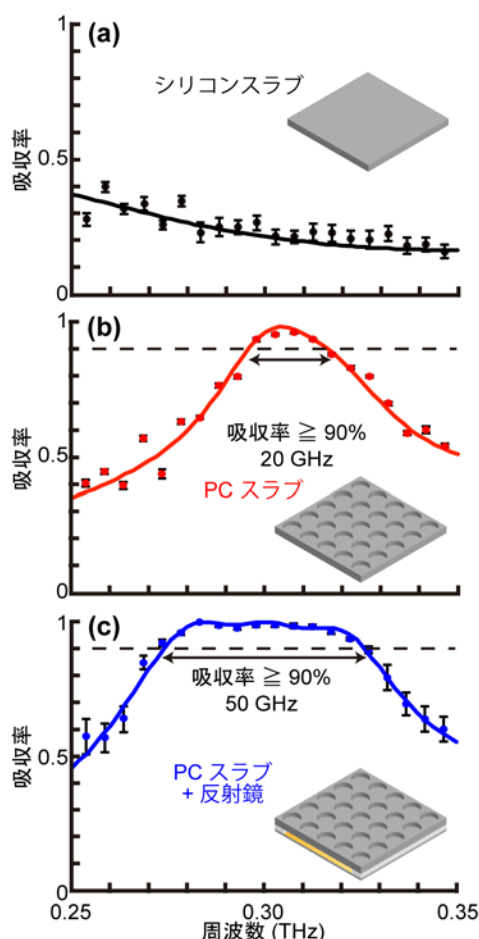


図8 吸収スペクトルの実験結果。(a)シリコンスラブ。(b)フォトニック結晶。(c)フォトニック結晶+反射鏡。

上し、90%吸収帯域が中心周波数の17%帯域に相当する50GHzにシミュレーションとよく一致して、拡大した。

以上のように本研究によって、波長のわずか五分の一の厚さをもつフォトニック結晶でテラヘルツ波を捕獲し、捕獲したテラヘルツ波とシリコンフォトニック結晶中の自由キャリアとの効果的な相互作用によって、広帯域動作可能な平面薄膜テラヘルツ波吸収体がはじめて実現できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

- ① R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, "A photonic-crystal terahertz-wave absorber and its application to terahertz communications", *The 4th Int. Sympo. THz NanoSci. (TeraNano4)*, Suita, Mar. 2014.

- ② R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Capturing a terahertz wave by photonic-crystal slab”, 第 32 回電子材料シンポジウム (EMS32), 守山, We2-9, Jul. 2013.
- ③ R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Terahertz-wave absorbers using a photonic crystal slab”, *The 10th Conf. Laser and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR2013)*, Kyoto, WC4-3, Jul. 2013.
- ④ R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Capturing and absorbing a terahertz wave by a photonic-crystal slab”, 6th Global Symposium on Millimeter Wave 2013 (*GSMM2013*), Sendai, no. M4-3, Apr. 2013.
- ⑤ 垣見亮磨, 富士田誠之, 永井正也, 芦田昌明, 永妻忠夫, “フォトニック結晶スラブを用いたテラヘルツ波吸収体”, 第 60 回春季応物学会, 厚木, no. 29p-D1-7, Mar. 2013.
- ⑥ 富士田誠之, 石垣司, 垣見亮磨, 永井正也, 芦田昌明, “フォトニック結晶のテラヘルツ波領域への展開”, 平成 24 年度大阪大学基礎工学研究科未来研究ラボシステム報告会, 豊中, Mar. 2013.
- ⑦ R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, “Trapping a terahertz wave in a photonic-crystal slab”, *IEEE Photonics Conference 2012 (IPC2012)*, Burlingame, no. WQ5, Sep. pp. 562-563, 2012.

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