

研究種目:展開研究

研究期間:平成 24 年 9 月～平成 25 年 3 月

課題名(和文)フォトニック結晶のテラヘルツ波領域への展開

(英文)Development of an unexplored terahertz-wave photonic crystal

研究代表者 富士田 誠之(FUJITA, Masayuki)

システム創成専攻・電子光科学領域・准教授

研究成果

フォトニック結晶とは、光の波長に近い大きさの周期をもち、光の自在な制御を可能にする微細構造として、注目を集めている。光波領域におけるフォトニック結晶技術の最近の進展は著しく、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、微小光導波路などが、可能になってきている。

一方、光波と電波の境界領域の周波数(0.1-10 THz)をもつテラヘルツ波は、その発生・検出が困難であったため、未開拓の電磁波であった。しかし、最近、超高速光技術等を駆使することで発生・検出が可能となってきている。テラヘルツ波帯のエネルギーは半導体中のキャリアの応答、超伝導ギャップ、高分子特有の吸収準位に相当するため、テラヘルツ波分光は物性科学の大きなトピックとなっている。

ここで、光と同じく電磁波であるテラヘルツ波をフォトニック結晶の技術を用いて、自在に操作することができれば、物性科学の発展はもちろん、テラヘルツ波のもつ光波の直進性と電波の透過性双方の利点を活かしたイメージング技術や超高周波特性を活かした超高速無線通信といった、新たな工学の開拓にもつながるはずである。

本研究は、専門分野の異なるフォトニック結晶工学およびテラヘルツ波分光科学のエキスパートが共同研究を推進することで、フォトニック結晶をテラヘルツ領域へ展開し、両者の融合した新しい基礎工学分野の開拓につなげることを目的としている。昨年度の未来研究ラボでは、まず、テラヘルツ波フォトニック結晶の材料には、シリコンが適しており、キャリア密度で特性を制御できることを見いだした。そして、テラヘルツ波フォトニック結晶の基礎設計を進め、サンプル試作およびテラヘルツ波分光法による評価を進めることで、研究の立ち上げを行うことができた。その結果、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度、科学研究費補助金挑戦的萌芽研究、テレコム先端技術研究支援センターSCAT 研究助成などの外部資金獲得につながった。今年度は、昨年度の研究を発展させることで、テラヘルツ波フォトニック結晶伝送路および、フォトニック結晶テラヘルツ波吸収体といった、応用デバイスの実現に成功した。以下には、その成果の一部を要約して記す。

1.極低損失テラヘルツ波フォトニック結晶伝送路の実現

フォトニック結晶の周期構造に線欠陥を導入することで伝送路を形成することができる。面内方向の電磁モードが存在できないフォトニックバンドギャップ(PBG)効果と上下方向の全反射効果でテラヘルツ波をシリコン基板内に強く閉じ込めることが可能であり、低い伝搬損失が期待できる。電磁界シミュレーションにより、厚さ 200 μm のシリコン基板に直径 144 μm の 2 次元円孔三角格子を格子定数 240 μm で配列することで 0.31-0.39 THz に伝搬帯域が現れ、特に全反射効果が完全に働く周波数帯では、シリコンの抵抗率を 3 $\text{k}\Omega\text{cm}$ 以上とすることで、伝搬損失が 0.2 dB/cm 以下となる設計が得られた。

この設計を元に抵抗率約 3 $\text{k}\Omega\text{cm}$ のシリコン基板を用い、導波管との入出力構造としてテーパー構造を設けた長さ 19 mm のテラヘルツ波フォトニック結晶伝送路を作製した。マイクロ波発振器、通倍器、スペクトラムアナライザ、WR-3 導波管で構成される分光システムを用い、作製したサンプルを導波管と接続し、通倍器からのサンプルへの入力信号周波数を 0.28-0.39 THz の範囲で変化させ、スペクトラムアナライザで透過特性を測定した。図 1 に示すように伝送路のない場合には

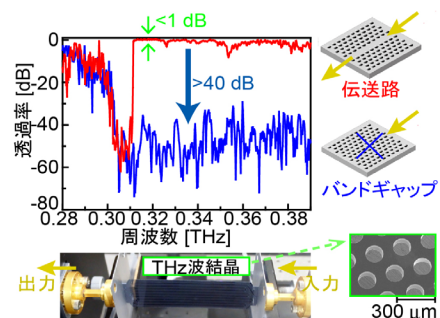


図 1 作製したサンプルと透過特性

PBG 帯域での伝搬が禁止される一方で、伝送路ではその伝搬帯域となる 0.31 THz 以上で導波モードが現れ、0.311-0.325 THz の範囲では 1 dB 以下の低損失性が示された。この値は、0.3 THz 帯における金属の吸収損失が影響する金属伝送路と比較しても小さく、信号源から検出器までの結合損失も含むため、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、世界最高水準の低損失性が得られたといえる。以上により、フォトニック結晶伝送路がテラヘルツ波集積回路の伝送線路として有望であるという結果が得られた。

2. 平面薄型フォトニック結晶テラヘルツ波吸収体の実現

テラヘルツ波帯においては、通信システム等の安定に不可欠な電磁波吸収体が実用化されていない。昨年度までに 2 次元フォトニック結晶のフォトニックバンド端での面内共振効果を利用することで、外部から入射するテラヘルツ波を捕獲して制御することを提案し、実証してきた。今年度はさらに、フォトニック結晶を構成するシリコン基板に適度なキャリア密度のドーピングを行うことで吸収効果を導入し、テラヘルツ波吸収体を実現した。シミュレーションの結果、キャリア密度を $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ とすることでフォトニック結晶によって捕獲されたテラヘルツ波がシリコン中の自由キャリア吸収と効果的に相互作用し、吸収率が最大化できることを明らかにした。得られた設計をもとに、試料を作製し、テラヘルツ時間領域分光法で透過率と反射率を測定し、吸収率を評価した結果を図 2 に示す。中心周波数 0.3 THz、半値全幅 0.1 THz、最大吸収率 96 % の吸収特性が得られた。以上のように、加工性に優れた半導体のみを用いて、波長のわずかに約 1/5 の厚さの構造で高い吸収率と広い吸収周波数帯域をもつ平面薄型のテラヘルツ波吸収体を実現できたため、フォトニック結晶はテラヘルツ波の制御に有望である、という結論が得られた。

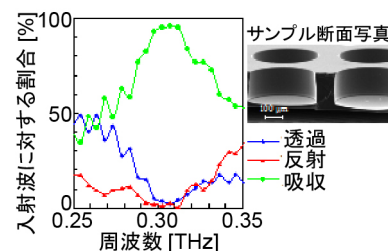


図 2 スペクトル特性と実験サンプル

キーワード: フォトニック結晶, テラヘルツ, 伝送路, 吸収体, 集積回路

研究経費(H24 年度)の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
88,000 円	74,534 円	282,966 円	0 円	1,354,500 円	2,000,000 円

共同研究者等

(1) 共同研究者

芦田 昌明・物質創成専攻未来物質領域 教授
永井 正也・物質創成専攻未来物質領域 准教授

(2) 研究協力者

石垣 司・システム創成専攻電子光科学領域・修士課程大学院 2 年生
垣見 亮磨・システム創成専攻電子光科学領域・修士課程大学院 1 年生

発表論文等(平成 25 年 3 月 31 日現在)

1. R. Kakimi, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, "Trapping a terahertz wave in a photonic-crystal slab", *IEEE Photonics Conference 2012*, pp. 562-563, 2012.
2. T. Ishigaki, M. Fujita, M. Nagai, M. Ashida and T. Nagatsuma, "Photonic-crystal slab for terahertz-wave integrated circuits", *IEEE Photonics Conference 2012*, pp. 774-775, 2012.
3. 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 (submitted)
4. 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*, 2013. (submitted)
5. A. Suminokura, T. Ishigaki, M. Fujita, and T. Nagatsuma, "Grating coupler for terahertz-wave integrated circuits", *Asia-Pacific Radio Science Conference*, 2013. (submitted)
6. 石垣司, 富士田誠之, 永妻忠夫, "テラヘルツ波集積回路に向けたフォトニック結晶スラブの検討(2)ーフォトニック結晶伝送路の評価ー", 2013 年電子情報通信学会総合大会, no. C-14-19, 2013.
7. 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 回春季応用物理学会, no. 29p-D1-7, 2013.

参考となるHP等

<http://www.laser.ee.es.osaka-u.ac.jp>, <http://www.itohlab.mp.es.osaka-u.ac.jp/>