

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：15K13975
研究課題名(和文) フォトニック結晶によるテラヘルツ・タグの創製

研究課題名(英文) A Terahertz Tag Using Photonic Crystal Slabs

研究代表者

永妻 忠夫 (Nagatsuma, Tadao)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：00452417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：近年、バーコードのように情報が書き込まれたタグを準備し、それを電波で読み出すだけの機能を持ったものとして、テラヘルツ波をタグ・リーダのための電磁波として用いる「THzタグ」が報告されている。THzタグは、保護・梱包材の外から読み取る、内蔵型タグとしての利用が可能である。しかし、これらの情報量は27 bit(単位平方cm)程度であり、実用のためには記憶できる情報量を増やす必要があった。本研究では、2次元フォトニック結晶スラブを利用して、周波数と空間の2次元情報を書き込む情報タグを提案し、600GHz帯において、48 bit(単位平方cm)のタグの試作と動作実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：We propose a novel terahertz (THz) tag as future tags for Internet of Everything (IoE), which can be secure, compact and packaged inside objects. In contrast to previous THz tags, which have a maximum capacity of 27 bits per square centimeters, we introduce two dimensional (2D) photonic-crystal slabs in order to increase the capacity by encoding an information in both space and frequency domains. We have designed, fabricated and successfully demonstrated THz tags with a capacity of 48 bits per square centimeters in the 600-GHz band.

研究分野：工学

キーワード：テラヘルツ タグ イメージング

1. 研究開始当初の背景

図 1 に本研究で取り扱う、テラヘルツ波 (100GHz~10THz)を利用したタグ(THz タグ)の位置づけを示す。THz タグとは、可視光領域で用いられているバーコードや QR コードと同様に、物体の管理情報を書き込むもので、THz 波を使って読み出しを行うものである。光学タグと違い、タグを物体内に内蔵しても、THz 波の透過性を利用して読み取ることができる。

研究開始当初において、テラヘルツ波を利用したタグ(THz タグ)の情報量(容量)は、最大で 27bit/cm² 程度であり、あらゆる物がインターネットに繋がる、IoT や IoE 時代に向けて、従来の THz タグの情報量を大幅に上回るタグに対するニーズが高まっていた。一般的には最低 128bit が必要とされていた。

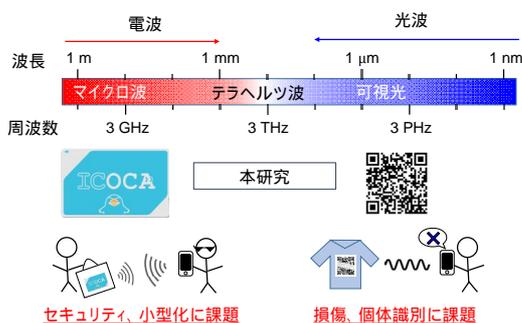


図 1. THz タグの位置づけ.

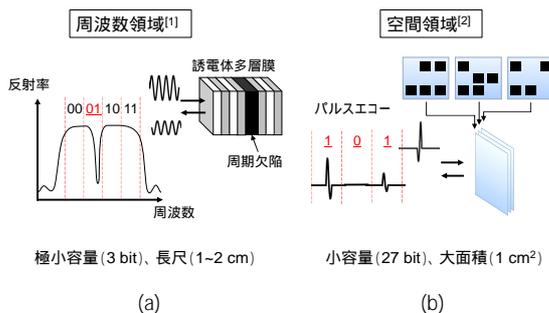


図 2. 従来の THz タグの構造. [1] E. Perret et al., Radio engineering, 20(2), 380-386 (2011). [2] K. Willis et al., ACM Trans Graph, 32(4), 138 (2013).

2. 研究の目的

本研究では、フォトニック結晶を利用した新奇的なタグを提案し、情報量という観点から、従来の THz タグを大幅に凌駕する可能性を実験的に示すことを目的とする。

3. 研究の方法

図 3 に本研究で提案する THz タグの構造を示す。図 4 に示すように、フォトニック結晶が構造に特有の反射・吸収・透過特性を有することを利用して、周波数軸上に情報を書き込むと共に、それをユニットとして、空間

上に 2 次元配置することで、さらなる情報量を確保する。またこれを多層にすることで情報量を増加させることが可能である。

本研究においては、特に、どのようなフォトニック結晶(格子)構造が最も急峻な吸収特性を示すか(周波数軸上の情報量を増加)と、単位セルとなるフォトニック結晶をどこまで小さくできるか(格子の周期数を減らし、2次元空間上の情報量を増加)に関して詳細な検討を行った。

尚、本研究においては、所有の THz 信号源の中で、最も広い周波数帯域(>200GHz)を有し、かつ試作したタグを実験的に評価する上で十分な出力(>10μW)を確保できる 600GHz 帯を選んだ。また、高抵抗(>10k cm)Si を基板とする MEMS 技術によりフォトニック結晶を試作した。

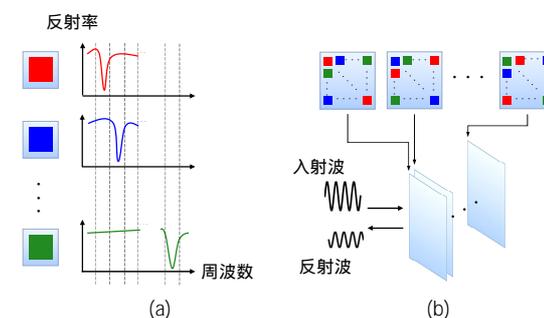


図 3. 提案する THz タグ. (a) 単位ユニットセル. (b) 2次元化と多層化による大容量化.

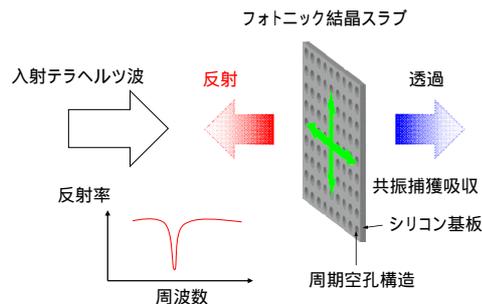


図 4. フォトニック結晶に THz 波を照射した時の反射波の振舞.

4. 研究成果

まず、電磁界シミュレータを用いて、THz タグの設計を行った。設計の高精度化を目的として、予め単純な構造のフォトニック結晶を試作し、実験的に得られた周波数特性と設計値とを比較することにより、シミュレーションにおけるいくつかの条件(境界条件等)の最適化を行った。

フォトニック結晶の格子構造としては、偏波依存を無視できる 4 回対称構造を採用した。正方格子を含む 6 種類の構造を検討し、その中で、最も鋭い吸収特性が得られる構造を探

索した。また、タグ後方(裏側)の環境がタグの周波数特性に影響を及ぼさないように、タグの後方にミラーを配置する構造を用いることとした。

図 5(a)は、タグの単位セルのサイズが最小(<2.5mm)で、かつ最も鋭い吸収特性が得られる構造の一例である。単位格子の周期数は、縦横 10 周期とした。同図(b)に示すように、600GHz ~ 720GHz において、空孔の間隔を変えることにより、8つの異なる周波数($f_1 \sim f_8$)で吸収が起こるようにした。これにより、 $\log_2 8 = 3\text{bit}$ のタグが実現できる。

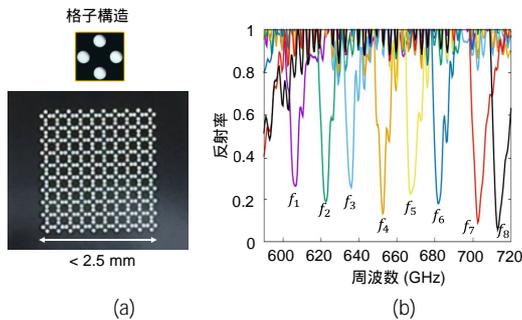


図 5. 単位ユニットセルの構造と吸収特性(設計値). サイズが、<2.5mm となっているのは、空孔の間隔によって周波数特性が変化するため、10 周期分のサイズが異なることによる。

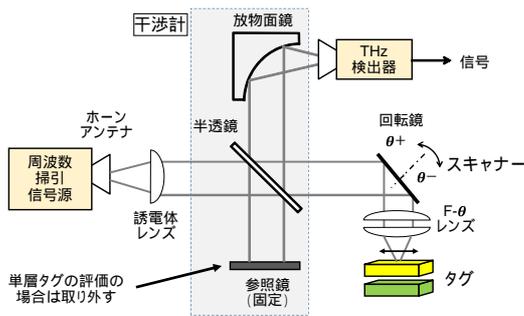


図 6. タグを読み取るためのシステム構成. 奥行き情報(多層のタグ)は、干渉信号の周波数特性を、フーリエ変換することで得られる。

最後に、図 6 に示す測定系を用いて、試作したタグ読み取りの検証実験を行った。図 7(a)に示すように 8 種類($f_1 \sim f_8$)のユニットを 3×3 に配置し、それぞれのユニットについて、吸収特性を測定した結果が図 7(b)である。同図に示すように、設計通りの吸収特性が得られた。すなわち、7.5mm 角のタグによって、27bit の情報量を記録できることが示された。単位 cm^2 に換算すると、 $48\text{bit}/\text{cm}^2$ の記録密度となる。

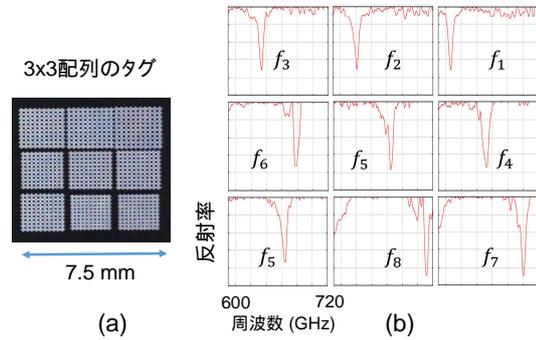


図 7. 3×3 配列のタグの周波数特性 (測定値). $f_1 \sim f_8$ (f_5 は 2 か所) が明瞭に読み取れていることが分かる。

今後、図 5 から明らかなように、各吸収スペクトル間には十分なスペースがあることから、吸収周波数の数を 2 倍の 16 個(4bit)に増やすことは容易である。また使用帯域を 600GHz ~ 720GHz から 500GHz ~ 740GHz に拡張することにより、32 個(5bit)まで増やすことが可能である。これは、記録密度に換算すると、 $64 \sim 80\text{bit}/\text{cm}^2$ に相当する。さらに、図 3 に示すように、2 層あるはそれ以上の多層化により、IoE において必要とされている 128bit の容量を実現できる見通しが得られた。

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)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

K. Tsuruda, K. Okamoto, S. Diebold, S. Hisatake, M. Fujita, and T. Nagatsuma, Terahertz Sensing Based on Photonic Crystal Cavity and Resonant Tunneling Diode, PIRS Proceedings, pp. 3922-3926, 2016, 査読有

10.1109/PIERS.2016.7735476

M. Yata, M. Fujita, and T. Nagatsuma, Photonic-crystal Diplexers for Terahertz-wave Applications, Opt. Express, vol. 24, pp. 7835-7849, 2016, 査読有

10.1364/OE.24.007835

T. Nagatsuma, S. Hisatake, and H. H. N. Pham, Photonics for Millimeter-Wave and Terahertz Sensing and Measurement, IEICE Trans. Electron., vol. E99-C, pp. 173-180, 2016, 査読有

10.1587/transele.E99.C.173

T. Nagatsuma, S. Hisatake, M. Fujita, H. H. N. Pham, K. Tsuruda, S. Kuwano, and J. Terada, IEEE J. Quantum Electronics, vol. 52, 600912, 2016, 査読有

10.1109/JQE.2015.250699

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, 査読有
10.1364/OE.23.031977

T. Nagatsuma, M. Fujita, and S. Hisatake, Empowering Terahertz System Applications by Photonics, IEEE Photonics Newsletters, vol. 29, pp. 12-18, 2015, 査読有
<http://www.photonicsociety.org/images/files/publications/Newsletter/April-2015Web.pdf>

〔学会発表〕(計 14 件)

久次米 祐助, 植田 峻司, 富士田 誠之, 永妻 忠夫, フォトニック結晶スラブを用いたテラヘルツタグの大容量化, 電子情報通信学会総合大会 C-14-3, 2017 年 3 月 25 日, 名古屋

T. Nagatsuma, Millimeter-wave and Terahertz Applications Enabled by Photonics, IEEE Radio & Wireless Week (RWW2017), RWW Distinguished Lecturers Session (招待講演), 2017 年 1 月 15 日, Phoenix, USA

永妻忠夫, テラヘルツ技術の動向とその集積化に向けた展望, 電気学会・高周波集積回路の新分野展開と対応技術調査専門委員会(招待講演), 2016 年 11 月 18 日, 東京
鶴田 一魁, 岡本 和馬, S. 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・ミリ波フォトニクス研究会, MWP2016-43, pp.1-5, 2016 年 11 月 14 日, 東京

犬伏 祐樹, 豆塚 祥大, 黒川 翼, 富士田 誠之, 永妻忠夫, フォトニック結晶によるテラヘルツ帯電力分配器の設計と特性評価, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-14-15, 2016 年 9 月 21 日, 札幌

T. Nagatsuma, Millimeter-wave and Terahertz Technologies Enabled by Photonics, Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC 2016) (基調講演), 2016 年 8 月 22 日, Seoul, South Korea

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 (PIERS 2016) (招待講演), 2016 年 8 月 11 日, Shanghai, China

永妻忠夫, フォトニクス技術がもたらすミリ波・テラヘルツ波の応用と展開, 電子情報通信学会マイクロ波研究会(特別招待講演), 2016 年 6 月 23 日, 岐阜

T. Nagatsuma, Telecom-based Photonics

Technologies for Terahertz Applications: From Discrete Devices to Integration, IEEE International Microwave Symposium, Workshop WFH (招待講演), 2016 年 5 月 27 日, San Francisco, USA

M. Fujita and T. Nagatsuma, Photonic Crystal Technology for Terahertz System Integration, SPIE Commercial+ Scientific Sensing and Imaging (招待講演), 2016 年 4 月 17 日, Baltimore, USA

植田峻司, 富士田誠之, 永妻忠夫, フォトニック結晶スラブを用いたテラヘルツタグ, 電子情報通信学会 2016 年総合大会, 2016 年 3 月 18 日, 九州大学・福岡

T. Nagatsuma, Millimeter-wave and Terahertz Applications Enabled by Photonics, Seminar of IEEE MTT-S Distinguished Microwave Lecturer (招待講演), 2016 年 3 月 14 日, Stockholm, Sweden

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 回応用物理学会秋季学術講演会, 2015 年 9 月 15 日, 名古屋

T. Nagatsuma, Exploring Millimeter and Terahertz Waves by Photonics for Communications and Measurement, International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2015)(招待講演), 2015 年 7 月 5 日, Budapest, Hungary

〔図書〕(計 1 件)

Ho-Jin Song, and Tadao Nagatsuma(編著), Handbook of Terahertz Technologies - Devices and Applications, Pan Stanford Publishing, May 31, 2015 (612 ページ).

〔その他〕

ホームページ: <http://ipg-osaka.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 連携研究者

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