

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04259

研究課題名(和文) 液晶と金属メタ構造を用いた電圧駆動テラヘルツ素子の創製

研究課題名(英文) Voltage-controllable terahertz element using liquid crystal and metallic metastructure

研究代表者

佐々木 友之 (Sasaki, Tomoyuki)

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90553090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：情報通信、生体イメージング、非破壊検査、セキュリティ、環境計測、材料物性の探索等、多様な分野でテラヘルツ(THz)波の魅力的な応用が提案されている。それらを実現すべく、THz帯における動的伝搬制御素子用材料に関する需要が高まっている。本研究では、電場応答性と透過性を併せ持つ液晶と、近年周波数帯を問わず研究が盛んにおこなわれているメタマテリアルとに注目し、両者の複合体によって電圧駆動可能なTHz素子を創製することを目的に実施した。結果として、複合化により発現する大きな複屈折による偏波変調器や、液晶サブ波長格子による偏波無依存位相変調器等、有益な素子を開発するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した偏波変調器や位相変調器は、THzイメージングにより得られる情報を飛躍的に増大させるなど、各種THz波応用を高度化する上で極めて有益な素子である。電圧駆動可能であることからエレクトロニクスとの親和性も高く、今後、THz産業の発展に寄与することが期待される。

本研究で提案した液晶と金属サブ波長構造の複合体は、即ち、構成要素に液晶を含んだメタマテリアルである。今回は電圧駆動素子への応用を指向したが、多様な外場応答性を示す新規的人工材料として、今後、周波数帯を問わず展開される可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)： A variety of useful applications of the terahertz (THz) waves have been proposed for a wide range of fields, including information communications, biological imaging, nondestructive inspection, security, environmental monitoring, and physical chemistry. To realize these applications, active THz elements are in high demand. In the present study, we propose voltage controllable THz elements using liquid crystals and metallic metamaterials. We fabricated THz polarization converters using liquid crystal-embedded metal mesh with huge birefringence. Polarization-independent THz phase shifters using subwavelength liquid crystal gratings and metallic films were also realized.

研究分野：応用光学

キーワード：テラヘルツ波 メタマテリアル 液晶

1. 研究開始当初の背景

材料物性の探索、情報通信、生体観察、非破壊検査、セキュリティ、環境計測等、多様な分野でテラヘルツ (THz) 波 (周波数が 0.1 THz から 10 THz 程度の電磁波) の魅力的な応用が提案されている¹。それらを実現すべく、近年、THz 帯における発振器と検出器に関する研究が精力的に行われている。一方で、それらに関する技術基盤がまだ整わないことも一つの要因となり、THz 波の伝搬を制御するための素子 (THz 素子) の研究は大きく遅れている²。各種 THz 波応用実現のため、高機能 THz 素子の開発は必須のテーマである。

特に、機械駆動システムを必要としない電圧制御型の動的 THz 素子については、研究がほとんど行われていない。光領域においては、電気光学結晶や液晶材料を用いた、強度、位相、偏光、伝搬方向等の電圧による制御技術が確立されており、光通信やディスプレイ等、多くの有用なシステムやデバイスに広く用いられている。このことから、THz 帯においても、電圧駆動可能な動的素子を実現された場合、エレクトロニクスと THz 技術との融合により各種 THz 波応用が急速に進展するものと期待される。

2. 研究の目的

液晶は屈折率異方性、多様な外場応答性、広い周波数帯域における透過性を併せ持つ稀有な材料であり、THz 素子用材料としての可能性を秘めている。本申請者らはこれまでに、液晶の多次元光配向技術を独自に確立しており、それにより、偏光分離回折格子や高速偏光検出器等、新規的かつ有用な光学素子を多数提案してきた³。本研究は、この技術に立脚し、各種 THz 波応用の普及および高度化に資する高機能液晶 THz 素子の創製に挑む。

液晶 THz 素子の開発が進まない原因の一つに、光領域で用いられている酸化物半導体薄膜電極が、THz 帯において透明電極として機能しないことが挙げられる。本申請者らはこれまでに、グラフェンや導電性高分子膜を液晶 THz 素子用電極に用いることを試みてきたが、これらにおいては導電率と透過率がトレードオフの関係にあり、なおかつパターンニングが困難であるため、実用化へと繋げるためにはかなりの時間を要することが予測される^{4,5}。本研究では、この問題に従来とは異なる観点から挑む。具体的には、THz 帯で透過性を有するメタ材料を金属材料により作製し、それを液晶駆動用の電極として用いることを試みる。金属微細構造による電磁メタ材料は、THz 帯においても、平面波変換レンズや超高感度偏光子等、有益な素子へと展開されている。しかしながら、メタ材料の特性は構成要素であるメタ原子やメタ分子の空間配置により決まるため、メタ材料を動的素子用材料として用いるためには、MEMS 技術を併用するなどの工夫が必要となり、作製が困難になるだけでなく、設計の自由度も低下する。こういった課題を解決すべく、本研究では、液晶と金属メタ構造とを相補的に利用することで、動的 THz 素子の実現を目指す。

3. 研究の方法

ここでは、本研究にて見出した、液晶と金属メタ構造の複合体により得られる高複屈折媒体に関して紹介する。メタ原子の構造を図 1 に示すが、これは、サブ波長オーダーの開口を有する金属膜 (以下、メタルメッシュ) とネマチック液晶 (一軸異方性媒質) との複合体であり、液晶は開口面内で一様に配向しているものとする。メタルメッシュは特定の周波数の電磁波を透過或いは反射することが知られており、THz 帯では周波数フィルターや共振器用のミラー等に用いられている⁶。今回は、図 1 のように開口を十字状 (原点に対して 90 度回転対称な構造) としており、メタルメッシュ単体では屈折率に異方性を生じない。

上記メタ原子の 2 次元配列からなるメタ表面の THz 帯での電磁特性を、時間領域差分法 (FDTD 法) によりシミュレーションした。金属部分は完全電気導体とし、液晶としては、室温でネマチック相を示すことから研究用途には広く用いられている 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl (通称 5CB) を想定した。5CB の THz 帯における屈折率は文献⁷を参照した。但し、簡単のため、液晶部分における損失は無視した (消衰係数は 0 とした)。波源は直線偏波 (固有偏波) で、偏面波の THz パルスとし、垂直入射に対する散乱パラメータを計算することで、メタ表面の実効的な屈折率を、

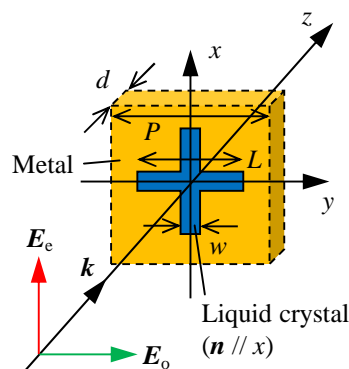


図1 金属と液晶からなるメタ原子の構造と入射偏波の関係。nは液晶の配向方向、kは入射波の波数ベクトル、E₀とE_cは固有偏波の電場。

$$N = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}}, \quad (1)$$

として求めた⁸。ここで、 k は真空中での波数、 d は構造の厚さ、 S_{11} と S_{21} は散乱パラメーターである。ここでは割愛するが、実効的な誘電率、透磁率、波動インピーダンスも散乱パラメーターから見積もることができる⁸。

4. 研究成果

二つの固有偏波に対して計算した透過スペクトルの一例を図2(a)に示す。なお、構造の寸法等、詳細な計算条件は割愛する。この結果から、図1に示したような構造はバンドパスフィルターとして機能し、その透過ピーク周波数が固有偏波により異なっていることが分かる。つまり、開口部分の液晶の配向を外場により制御することで、本構造体が、周波数可変フィルターとして利用可能であることが示唆された。

また、同条件に対して計算した二つの実効的固有屈折率の実部の差(実効複屈折)の大きさを図2(b)に示す。開口部分に配置した液晶の複屈折は0.15としたが、それを1桁程度上回る実効複屈折が得られる場合のあることを確認した。複屈折の増加は外部印加電圧に対する応答の高速化に直結することから⁹、液晶と金属メタ構造とを相補的に利用することの有用性を明らかにすることができたと考えている。

本研究では、フォトリソグラフィの手法により実際に液晶含有メタルメッシュの作製を試み、THz帯における偏波変調器用材料として有用であることも実証している¹⁰。

上記のような構造の他にも、液晶の光配向技術を用いて作製したサブ波長液晶格子構造と金属薄膜との複合体による偏波無依存 THz 位相変調器についても開発を行った¹¹。

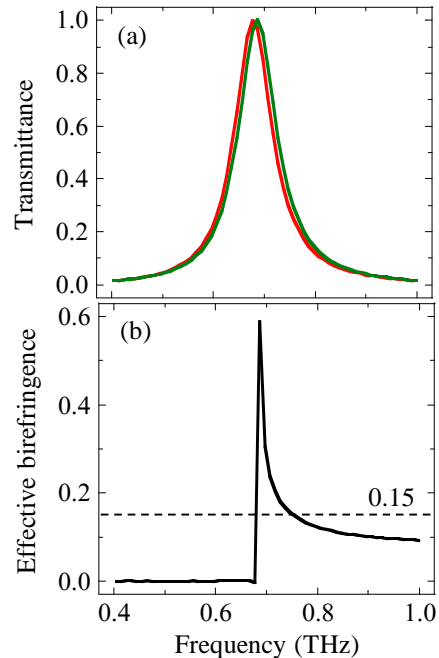


図2 電磁特性の計算結果の一例。(a)は透過率(色は図1の偏波に対応)、(b)は実効複屈折。

< 引用文献 >

- 1) M. Tonouchi, *Nature Photonics* **1**, 97 (2007).
- 2) T. Suzuki, *Oyo Butsuri* **86**, 897 (2017).
- 3) T. Sasaki, T. Wada, K. Noda, N. Kawatsuki, and H. Ono, *J. Appl. Phys.* **115**, 023110 (2014).
- 4) T. Sasaki, K. Noda, N. Kawatsuki, and H. Ono, *Opt. Lett.* **40**, 1544 (2015).
- 5) T. Sasaki, H. Okuyama, M. Sakamoto, K. Noda, H. Okamoto, N. Kawatsuki, and H. Ono, *J. Appl. Phys.* **121**, 143106 (2017).
- 6) A. Ferraro, D. C. Zografopoulos, R. Caputo, and R. Beccherelli, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **23**, 8501308 (2017).
- 7) N. Vieweg, M. K. Shakfa, B. Scherger, M. Mikulics, and M. Koch, *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves* **31**, 1312 (2010).
- 8) D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, *Phys. Rev. E* **71**, 036617 (2005).
- 9) T. Sasaki, H. Kushida, M. Sakamoto, K. Noda, H. Okamoto, N. Kawatsuki, and H. Ono, *Opt. Commun.* **431**, 63 (2019).
- 10) T. Sasaki, Y. Nishie, M. Kambayashi, M. Sakamoto, K. Noda, H. Okamoto, N. Kawatsuki, and H. Ono, *IEEE Photon. J.* **11**, 5901007 (2019).
- 11) T. Sasaki, T. Asano, M. Sakamoto, K. Noda, T. Unuma, K. Goto, K. Tsutsui, N. Kawatsuki, and H. Ono, *Opt. Mater. Express* **10**, 240 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Sasaki, Y. Nishie, M. Kambayashi, M. Sakamoto, K. Noda, H. Okamoto, N. Kawatsuki, and H. Ono	4. 巻 11
2. 論文標題 Active terahertz polarization converter using a liquid crystal-embedded metal mesh	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Photonics Journal	6. 最初と最後の頁 5901007-1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JPHOT.2019.2950021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 T. Sasaki, T. Asano, M. Sakamoto, K. Noda, T. Unuma, K. Goto, K. Tsutsui, N. Kawatsuki, and H. Ono	4. 巻 10
2. 論文標題 Subwavelength liquid crystal gratings for polarization-independent phase shifts in the terahertz spectral range	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical Materials Express	6. 最初と最後の頁 240~248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OME.10.000240	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Tomoyuki, Saito Kazutaka, Sakamoto Moritsugu, Noda Kohei, Tamayama Yasuhiro, Okamoto Hiroyuki, Kawatsuki Nobuhiro, Ono Hiroshi	4. 巻 124
2. 論文標題 Effects of slant angle of metallic fish-scale structure on polarization conversion in the terahertz spectral range	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 789-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00339-018-2205-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sasaki Tomoyuki, Okuyama Hiroki, Sakamoto Moritsugu, Noda Kohei, Kawatsuki Nobuhiro, Ono Hiroshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Optical control of polarized terahertz waves using dye-doped nematic liquid crystals	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 115326-1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5041294	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sasaki Tomoyuki, Kushida Hiroki, Sakamoto Moritsugu, Noda Kohei, Okamoto Hiroyuki, Kawatsuki Nobuhiro, Ono Hiroshi	4. 巻 431
2. 論文標題 Liquid crystal cells with subwavelength metallic gratings for transmissive terahertz elements with electrical tunability	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 63~67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2018.09.013	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 神林正篤、Vo Hoan Phuc、坂本盛嗣、野田浩平、伊藤桂一、岡本浩行、小野浩司、佐々木友之
2. 発表標題 液晶を内包するサブ波長メタルメッシュによるテラヘルツ帯での高複屈折媒体
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤裕汰、伊藤桂一、佐々木友之
2. 発表標題 THz液晶デバイスのトポロジー最適化に関する基礎的検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西江裕基、神林正篤、坂本盛嗣、野田浩平、岡本浩行、小野浩司、佐々木友之
2. 発表標題 液晶を内包するサブ波長メタルメッシュ構造によるテラヘルツ帯での偏波変換素子に関する研究
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Sato, M. Tanaka, K. Itoh, and T. Sasaki
2. 発表標題 Study on topology optimization of THz liquid crystal device
3. 学会等名 5th STI-Gigaku 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Vo Hoan Phuc、坂本盛嗣、野田浩平、小野浩司、佐々木友之
2. 発表標題 負の屈折率を有する液晶テラヘルツメタマテリアル
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木友之、坂本盛嗣、野田浩平、小野浩司
2. 発表標題 液晶を内包するメタマテリアルによるテラヘルツ素子に関する研究
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤裕汰、田中将樹、佐々木友之、伊藤桂一
2. 発表標題 THz液晶デバイスの形状設計とメタマテリアルへの応用
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤裕汰、田中将樹、佐々木友之、伊藤桂一
2. 発表標題 THz液晶デバイスの形状設計法に関する研究
3. 学会等名 令和3年東北地区若手研究者研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 テラヘルツ波制御素子	発明者 佐々木友之、小野浩司、川月喜弘、後藤耕平、筒井皇晶	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-237772	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Electromagnetic Wave Control Device Laboratory https://whs.nagaokaut.ac.jp/hertz

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小野 浩司 (Ono Hiroshi) (10283029)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	
研究分担者	伊藤 桂一 (Itoh Keiichi) (20290702)	秋田工業高等専門学校・その他部局等・教授 (51401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	坂本 盛嗣 (Sakamoto Moritsugu) (60757300)	長岡技術科学大学・工学研究科・助教 (13102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関