

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04697

研究課題名(和文)メタマテリアルを含む1次元フォトニック結晶波長可変型超高速THzスイッチの開発

研究課題名(英文)Development of wavelength tuning type ultrafast THz switching by one-dimensional photonic crystal containing metamaterials

研究代表者

鶴町 徳昭 (Tsurumachi, Noriaki)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：50372719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：メタマテリアルと1DPCの融合による波長可変型超高速THzスイッチに関する研究遂行のために、以下のような要素技術に関する研究を行った。まず、半導体基板上にカットワイヤや電氣的分割リング共振器のようなTHz帯メタマテリアルを作製し、光学特性を評価した。次に二色レーザー誘起プラズマ法により空気からの広帯域高強度THz波発生を行った。そしてワイヤグリッドを利用したファブリーペロー微小共振器の共振特性を解析し、その中にメタマテリアルを導入した場合にモード分裂が起こることを見出した。これによりより簡便な波長可変型THzスイッチが可能となる。

研究成果の概要(英文)：In order to carry out research on tunable ultrafast THz switch by hybridization of metamaterial and one-dimensional photonic crystal, we studied the following element technologies. First, a THz metamaterials such as a cut wire or an electric split ring resonator was fabricated on a semiconductor substrate, and their optical properties were evaluated. Next, broadband high intensity THz wave generation from air was carried out by dichroic laser induced plasma method. Finally, we analyzed the resonance characteristics of Fabry - Perot microcavity using wire grid and found that mode splitting occurs when metamaterial is introduced into the cavity. As a result, a useful wavelength variable type THz switch becomes possible.

研究分野：光物性物理学・量子非線形光学

キーワード：メタマテリアル テラヘルツ波 フォトニック結晶 超高速現象

## 1. 研究開始当初の背景

近年、光源や検出法などの様々な THz 技術が盛んに研究されてきたが、更に今後の進展が期待されている。特に安価でコンパクトな高強度の THz 波光源や、センシング素子、変調素子などの実現は重要な課題であるが、特に今回、波長可変型超高速全光 THz スイッチに着目した。フォトニック結晶を用いた光スイッチ動作は、その構成物質の屈折率変化に起因したバンド構造や局在モードの周波数変化を利用することで行うのが一般的である。この場合、外界から光学的・電気的あるいは熱的な摂動を与えるが、いずれにせよ、大きな屈折率変化と超高速応答性の間にはトレードオフがあることが問題となっている。

今回、この問題を解決するためにメタマテリアルと THz 帯 1 次元フォトニック結晶 (1DPC) の融合を行うことを着想した。メタマテリアルとは自然界には存在しない様々な物性を示す人工物質であり、それによる負の誘電率や透磁率、さらにはそれらを組み合わせた負の屈折率の実現は、大きな反響を呼んでいる。近年、I 型の金属微細構造により巨大屈折率を所望の周波数帯で自由に発現できることも報告されている。

これまで半導体を用いた THz 帯メタマテリアルにおいて光励起により大きな誘電率の変調に起因した透過スペクトルの変調が報告されている。これはいわば半導体の光励起によりキャリア密度が増大して、メタマテリアルの形状そのものが実効的に変化することを利用しており、構成材料の物性変化を大きく増幅したことに対応する。これは新しいメカニズムによる光変調であり、学術的にも興味深い。このメタマテリアルの大きな動的物性変化をさらにフォトニック結晶に組み込むことで、大きな誘電率変化と超高速応答性を兼ね備えた、フォトニック結晶あるいはメタマテリアル単体では得られない新規の THz デバイスが実現可能となる。

## 2. 研究の目的

上記のメタマテリアルと 1DPC の融合による波長可変型超高速全光型 THz スイッチの実現のために、本研究では以下のような目標を掲げる。

高屈折率を有する THz 帯メタマテリアルの作製 (有機半導体の利用を含む)

超短パルス光励起によるメタマテリアルの超高速光学特性制御

1DPC とメタマテリアルの複合化による波長可変型超高速全光型スイッチング動作の確認

## 3. 研究の方法

メタマテリアルと 1DPC の融合による波長可変型超高速 THz スイッチに関する研究遂行のために、下記に示す要素技術についてそれぞれ研究を行った。

### (1) 半導体基板上的 THz 帯メタマテリアル作製と評価

光励起により THz 帯の誘電関数が大きく変化し得るメタマテリアルを半導体基板上に作製した。分割リング共振器や I 型構造のメタマテリアルにおいて所望の周波数域に電気共鳴や磁気共鳴を人工的に生成することができることはよく知られている。この共鳴周波数はその形状や背景誘電率の影響を大きく受ける。そのため光励起などで基板中のキャリア密度を変化させることで、実効的にメタマテリアルの形状を変化させることが可能となり、その透過率すなわち誘電関数を自在に制御可能である。この事実に着目し、THz 域の所望の周波数において光励起により誘電率を大きく変化させられる構造を FDTD 法などにより設計した。

そして実際にこのような構造を RF スパッタリングとウエットエッチングなどの技術を用いて作製した。これは本学微細構造デバイスセンタと共同で行った。

作製した試料は、本研究室所有の THz 時間領域分光システムにて光学特性評価を行った。

### (2) 高強度 THz 波を用いた時間領域分光

半導体基板上的メタマテリアルおよび 1DPC-メタマテリアル複合体の光励起キャリアダイナミクスを調べるためには、光ポンプ THz プローブ分光が有効な手段であり、我々はこれまでに Ti サファイア再生増幅器および光パラメトリック増幅器を光源とした自作の系で様々な半導体および半導体を含む 1DPC における光ポンプ THz プローブ分光を行ってきた。

これまで THz 波の発生法としては ZnTe などの非線形光学結晶を用いた光整流を採用してきたが、今回、THz 波の広帯域化を目指して二色レーザー誘起プラズマ法を採用した。この方法は再生増幅器からの高強

度超短レーザーパルスとその第二高調波を同時に空気中で集光し、プラズマを発生させそこから THz 波を得るというものである。この手法で発生できる THz 波は 100kV/cm 以上となり、それ自身が非常に興味深いものである。今回、二色レーザー誘起プラズマ法を用いた THz 時間領域分光系を整備した。

### (3)メタマテリアルを含む THz 帯微小共振器構造

本研究の申請段階においては、1DPC とメタマテリアルの複合化を目指していた。ここで 1DPC とは屈折率が 1 次元的に周期的変調された媒質のことであり、内部に構造欠陥を導入することで微小共振器としてふるまう。我々は空気層と誘電体（あるいは半導体）などの多層構造により THz 帯の 1DPC を実現し、THz 波の発生や検出の増強、高効率 THz 波変調などに応用してきた。この 1DPC のスペクトルは、THz 波を透過するフォトニックバンドと伝搬が禁じられているフォトニックバンドギャップ(PBG)が交互に繰り返す構造であり、共振器としての透過ピークはその PBG 内に出現する。すなわち、透過ピークのシフトを目指す場合、PBG はできる限り広いほうが良い。そしてその PBG は一般に用いる媒質の屈折率比で決まるため、限界がある。

今回、より大きな透過ピークのシフトに耐えうる構造として 1DPC ではなく、THz 帯の偏光子としてよく用いられるワイヤグリッド(WG)の利用を着想した。この構造は特定の偏光の THz 波を反射するので、2枚の WG を向かい合わせるだけでファブリーペロー微小共振器として作用する。

この着想に基づき、FDTD 法を用いて微小共振器としての光学特性を調べるとともに、共振器内にメタマテリアルを挿入した場合の光学特性も調べた。またメタマテリアル作製時と同様の手法で実際にサンプルの作製も行った。

## 4. 研究成果

これまでの成果をいかにまとめる。

### (1) 半導体基板上の THz 帯メタマテリアル作製と評価

本研究ではカットワイヤ(CW)構造、I 型構造、電気的分割リング共振器(eSRR)構造、および矩形スリット構造を FDTD 法により

設計、作製した。ここでは CW および eSRR について述べる。

まず CW 構造であるが、図 1 に作製した構造の顕微鏡写真を示す。このように長さや幅、間隔などをいろいろと変化させた場合、透過スペクトルが様々に変化することを観測できた。例えばワイヤ長を 50 $\mu\text{m}$ 、幅を 2 $\mu\text{m}$  に固定し、ワイヤの短軸方向の間隔  $G_2$  を 2 $\mu\text{m}$ 、20 $\mu\text{m}$ 、80 $\mu\text{m}$  と変化させると透過スペクトルは図 2 に示すように大きな変化を見せることがわかった。

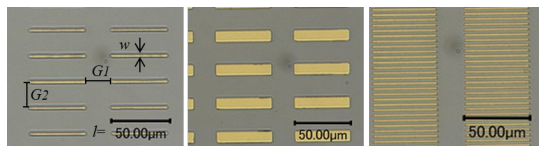


図 1 CW 構造の顕微鏡写真

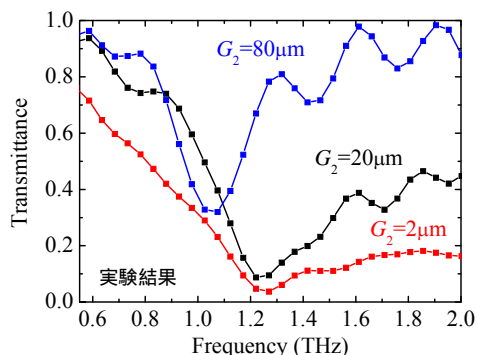


図 2 CW 構造の透過スペクトル

次に eSRR 構造について述べる。図 3 に作製した eSRR の顕微鏡写真を示す。

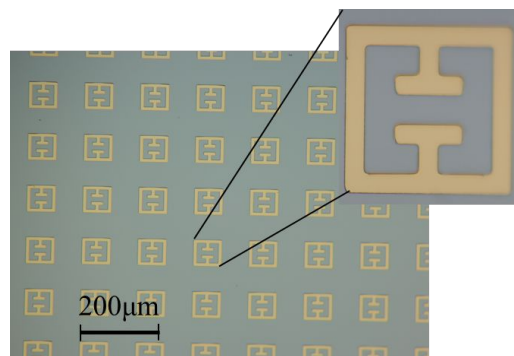


図 3 eSRR 構造の顕微鏡写真

また図 4 に透過スペクトルを示す。黒実線が実験値、赤破線が FDTD によるシミュレーションの結果である。eSRR の LCR 共振に由来する低エネルギー側のディップと縦の辺における半波長ダイポールアンテナに由来する高エネルギー側のディップがそれぞれ観測できた。

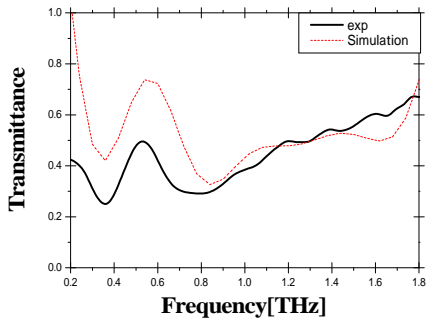


図4 eSRR 構造の透過スペクトル

このように THz 帯の様々なメタマテリアルを設計・作製でき、光学特性も評価できる体制を整えることができた。

### (2) 高強度 THz 波を用いた時間領域分光

本研究では、二色レーザー誘起プラズマ法にて高強度広帯域 THz 波を発生させた。図5に発生させた THz 波の時間波形を示すピークにおいて 65 kV/cm 程度の電場強度を測定できた。また、図6に示す通り光整流で発生させる場合(可測定範囲 2.5THz 程度)と比較して広帯域の THz 波が確認できた。

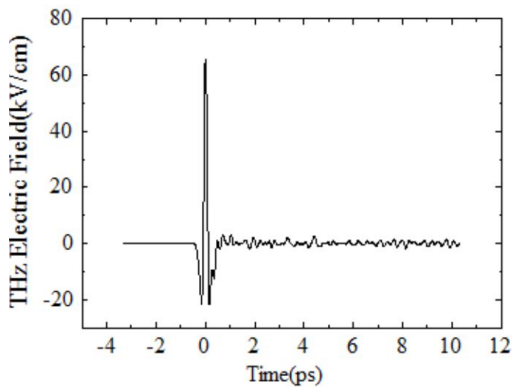


図5 THz 波電場波形

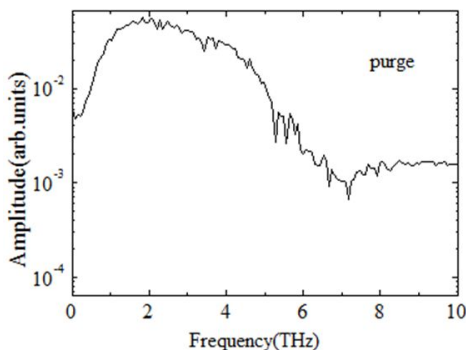


図6 THz 波スペクトル

### (3)メタマテリアルを含む THz 帯微小共振器構造

本研究では、WG を向かい合わせることで THz 帯のファブリーペロー微小共振器が作製できることを見出した。

まず図7に FDTD 法によって得た WG 単体の反射スペクトルを示す。ここでワイヤの周期は  $60\mu\text{m}$  で固定し、ワイヤの幅  $D$  を変化させた。この結果からわかるように、構造のパラメータを変えることで反射スペクトルが変化している様子が見える。図8に FDTD 法によって得た WG 微小共振器の透過スペクトルを示す。ここで WG の間隔すなわち共振器長は  $155\mu\text{m}$  とした。これより複数の共振モードが観測できていることがわかる。周波数が高くなるにつれて WG そのものの反射率が低くなるため、 $Q$  値が下がり共振によって生じる透過ピークの線幅が太くなっていることがわかる。このように適切な WG を用いることで  $Q$  値を自由自在に制御できることが分かった。これは 1DPC では容易には実現できないことであり、WG 微小共振器のメリットといえる。また、この後述べるメタマテリアルと同様の方法で作製できるため、monolithic な構造を作りやすい。

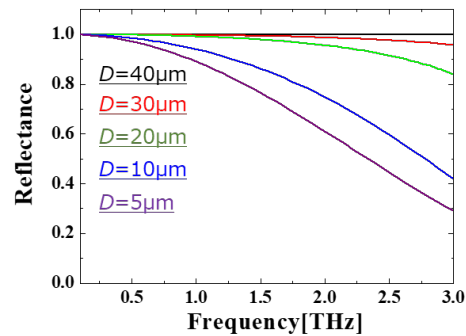


図7 WG 構造の反射スペクトル

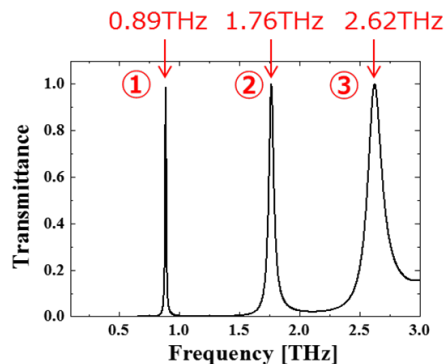


図8 WG 微小共振器の透過スペクトル

このような THz 帯の微小共振器の共振層にメタ材料を挿入した構造に対して、FDTD 法により計算した透過スペクトルを図 9 に示す。今回はメタ材料として CW を想定しているが、I 型構造や eSRR 構造においても同様のことが可能であることは確認できている。これを見てわかるようにメタ材料がない場合には通常のファブリーペロー共振を呈していたが、CW が入ることでモードの分裂が観測できた。メタ材料を一種の LC 共振器とみなすとこれは WG ファブリーペロー共振器との結合共振器となっていることを意味する。その一方で、メタ材料を疑似的な原子(メタアトム)としてみなすと、共振器量子電磁力学における光子-原子間の強結合状態(あるいは超強結合)とも考えられ、非常に魅力的な系となりうる。さらにこの現象はより簡便な波長可変型 THz スイッチになりうる可能性を秘めている。

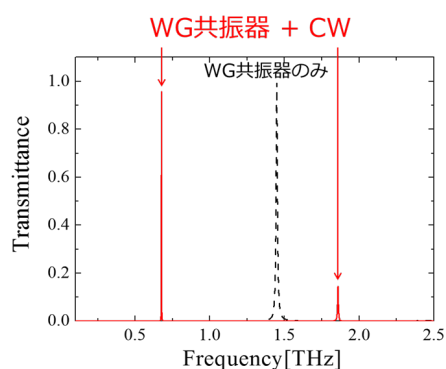


図 9 CW メタ材料を含む WG 微小共振器の透過スペクトル

今回、当初の目的であるメタ材料と 1DPC の融合による波長可変型超高速全光型 THz スイッチの実現には至らなかったが、3 年間の成果として上記のようなことがわかり、様々な知見や今後の新しい展開に対するアイデアを得ることができた。今後も本テーマの実現のために努力をしていきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

"Dye concentration dependence of spectral triplet in one-dimensional photonic crystal with cyanine dye J-aggregate in strong coupling regime", Makoto Suzuki, Tomohiro Sakata, Ryouya Takenobu, Shinobu Uemura, Hayato Miyagawa, Shunsuke Nakanishi, and Noriaki

Tsurumachi, Appl. Phys. Lett., **111**, 163302 (2017).

"Observations of cavity polaritons in one-dimensional photonic crystals containing liquid-crystalline semiconductor based on perylene bisimide units", Tomohiro Sakata, Makoto Suzuki, Tatsuya Yamamoto, Shunsuke Nakanishi, Masahiro Funahashi, and Noriaki Tsurumachi, Phys. Rev. E., **96**, 042704 (2017).

"Dependence on fluorescence wavelength of Purcell effect in dye molecules on metal-dielectric multilayer hyperbolic metamaterials", Noriaki Tsurumachi, Hayato Izawa, Ryo Tomioka, Tomohiro Sakata, Makoto Suzuki, Yasuhiro Tanaka, Fusao Shimokawa, Shunsuke Nakanishi, Jpn. J. Appl. Phys., **55**, 02BB05 (2016).

など

〔学会発表〕(計 34 件: 国際 10(うち招待 4, 国内 24))

Invited : "THz Microcavity Photonics", Noriaki Tsurumachi, the 4th International Symposium on Microwave/Terahertz Science and Applications (MTSA 2017) (2017/11/19-23, Okayama, Japan)

など

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ

<http://www.eng.kagawa-u.ac.jp/~tsuru/labo/indexj.htm>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

鶴町 徳昭 (Noriaki Tsurumachi)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号 : 50372719

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

下川 房男 (Fusao Shimokawa)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号 : 90580598

舟橋 正浩 (Masahiro Funahashi)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号 : 90262287

### (4)研究協力者

なし