

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760035

研究課題名(和文) プログラマブルメタマテリアル回路の開発

研究課題名(英文) Development of programmable metamaterial circuits

研究代表者

大野 誠吾 (Ohno, Seigo)

東北大学・高等教育開発推進センター・助教

研究者番号：70435634

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではメタマテリアルを用いてテラヘルツ帯の光学応答が動的に自在に変えられるデバイス、プログラマブルメタマテリアル回路の実現をめざし開発を行った。半導体基板上に作製したスプリットチューブ配列構造と、CW光源で励起した光励起キャリアを組み合わせることで、その共鳴周波数付近で、透過するテラヘルツ波の振幅、および位相が変調できることが、シミュレーションから予想でき、実験においてもわずかではあるがそれらのパラメータが制御できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In this research program, we have developed "programmable metamaterial circuits" which can enable us to control the optical response arbitrary and actively in terahertz region. Simulation results were shown that a split-tube array structure on a Si substrate irradiated with a CW light source can modulate amplification and phase of THz wave near the resonance frequency. The behavior of modulation was observed in our experiments although the signal was smaller than the simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツメタマテリアル 変調技術

### 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ帯は近年、その周波数帯に分子固有の振動状態に対応する指紋スペクトルを有し、精力的に研究が進められているが、指紋スペクトルが多く物質に存在するがゆえに便利な光学材料、光学機器がこの帯域に乏しいのもまた事実である。テラヘルツ帯の光学機器についてみると、通信帯、可視域では当たり前のように使われている変調技術(強度変調、位相変調、周波数変調など)もまた発展途上である。もし、これらが実現できれば、テラヘルツ帯の利用目的、応用分野がさらに広がりテラヘルツ光科学に資するものと考えられる。特に今後開発が進むであろう、テラヘルツ量子カスケードレーザーといった単色のテラヘルツレーザーに対する変調技術が必要となる。

一方で近年注目を集める光学技術の一つにメタ材料がある。メタ材料は、光の波長よりも微細な構造を人工的に設計することで光学応答をデザインできる技術であり、微細加工技術の進歩とともに発達している研究領域である。研究アプローチの一つとして、メタ材料をテラヘルツ領域のデバイスへと応用することで発展途上のテラヘルツ帯の光学技術を補おうという動きは実際になされている。たとえば、メタ材料と半導体にドープしたキャリアの空間分布の電圧制御とを組み合わせることで、テラヘルツ帯の強度、位相変調器を実現しているグループも存在する[1]。また、再生増幅された高強度の光パルス空間分布させ、それによる半導体光励起キャリアを用いてテラヘルツ光の変調に成功している例もある[2]。

[1] H. Chen, et al, Nat. Photonics 3, 148 (2009)

[2] T. Okada, et al, Sci. Rep. 1, 121 (2011)

### 2. 研究の目的

本研究では、金属構造と光励起キャリアの組み合わせにより、プログラマブルなメタ材料回路を動的に生成し、テラヘルツ帯の光を変調する技術を開発することにある。特に、光励起キャリアのみでメタ材料を形作るのではなく、半導体基板の金属構造と組み合わせることで、光励起キャリアの生成に、CW光源などより入手の容易な光源を用いてテラヘルツ光のアクティブな変調を行うことが大きな目標である。

本研究では、金属構造と光励起キャリアを組み合わせたとき、テラヘルツ光に対して、どのような変調が得られるか、少なくとも強度、位相の特性に関して明らかにする。また、十分な変調を得られるための条件なども明らかにする。

ターゲットの周波数帯域は 2 THz 以下を考えている。この周波数帯は、現在もっとも普及しているテラヘルツ光源である光電導アンテナにより放出できる領域であると同

時に、ニオブ酸リチウムを使ったナノ秒テラヘルツ光源においても出力のピーク周波数となっており、この周波数帯での変調器が実現できれば応用の可能性がある。また、我々の研究グループで構築してきた構造作製技術で得意とするサイズが 10  $\mu\text{m}$  オーダーであり今回のターゲット周波数に対するメタ材料として、考えることができる領域である。

### 3. 研究の方法

本研究で調べたプログラマブルメタ材料回路に関して、アプローチは大きく分けて2つある。一つは金属ドット構造と光励起キャリアの組み合わせ、もう一つは金属-フォトレジスト構造と光励起キャリアの組み合わせである。それぞれの方法を以下に述べる。

#### (1) 金属ドット+光励起キャリア分布

このアプローチの狙いは金属ドットと光励起キャリアの分布によりメタ材料構造を作製することであり、空間的な光励起パターンを変えることでキャリア分布を変調し異なる応答を示すことが期待できる。

光励起キャリアと金属ドットを組み合わせるために、半導体基板上に金属ドットの作成をおこなった。半導体基板としてキャリア寿命の比較的長いシリコンを利用した。本研究では CW 光源によるキャリア生成を念頭に置いているので、より大きなキャリア密度(プラズマ周波数が高くなり変調度合いが大きくなる)が見込まれる)を得るには寿命が長い必要がある。作製には、市販の金属メッシュをマスクとして基板上に張り付け、その上から金を蒸着した。作製した金属ドット構造の光学顕微鏡像を図1に示す。

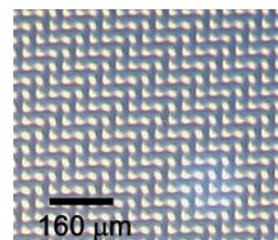


図1 シリコン基板上に作製した金ドット構造。ピッチ 31  $\mu\text{m}$  の正方格子状に配列。

このような構造に、450nm の CW 半導体レーザーを照射し光励起キャリアの生成によるテラヘルツスペクトルをテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) にて実験的に評価したところ、スペクトルに明確なドット構造による差異は見られなかった。この時、励起光には分布を持たせなかったが、構造が最も大きく変わっているこの状況で変化が見られないとすると、分布を持たせた場合、キャリア密度はさらに低くなることが予想されるため、大きな変化は得られないと考えた。そこで、次節に述べる金属フォトレジスト構造+光励起キャリアについて調べるよう方針を転

換した。

(2)金属フォトレジスト構造 + 光励起キャリア

このアプローチではフォトレジストと金属構造を組み合わせることで、メタ材料の大棒を作成して置き、光励起キャリアにより、その構造パラメータを調整することで少ないキャリア密度でも変調効果が大きく得られることを期待した。また、フォトレジストパターンを変えることで作成できるメタ材料も設計の自由度が得られる。

金属フォトレジスト構造の作製方法は以下のとおりである。洗浄したシリコン基板上にフォトレジストをスピコートし、デジタルミラーデバイス (DMD) を用いたマスクレス露光装置 (図 2) により、パソコンから送ったパターンを露光した。現像後、金を斜め蒸着した。

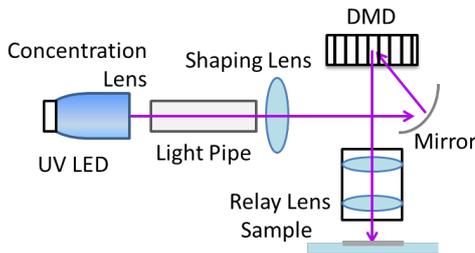


図2 マスクレス露光装置の模式図。サンプル上のフォトレジストにDMDのパターンを感光させる。これまで構築してきたものを本研究ではより高性能に改造した

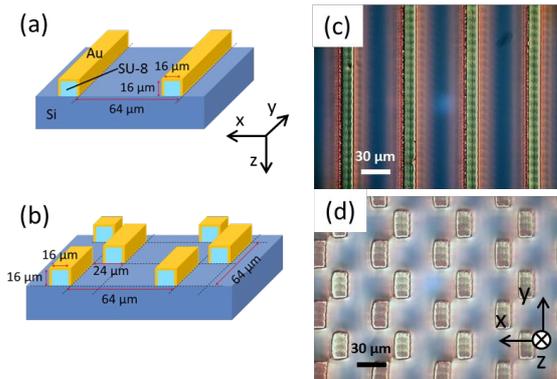


図3 設計した構造。(a)スプリットチューブ配列構造、(b)左右にシフトしたスプリットチューブ配列構造とそれぞれの光学顕微鏡像(c)、(d)

このようにして作成した金属フォトレジスト構造を図3に示す。フォトレジストとしてSU-8 という厚膜作製が可能なフォトレジストを用いることで、10 $\mu\text{m}$  オーダーの立体構造が作成できる。本研究で提案する基板上に立体的に自立した構造が、スプリットリングをリングの同軸方向に伸ばした金属の管のような構造が周期的に並んでいるように見えることから“スプリットチューブ”配列構造と呼称する。

スプリットチューブ配列構造に関して、まず光励起しない場合の FDTD 法による電磁場シミュレーション、実際の THz-TDS による測定を行った。その上で、作製した構造の中から光励起の実験に適しているものを選び、図4のような光学配置で、スプリットチューブ構造と光励起キャリアが組み合わさった場合のテラヘルツ帯光学応答を調べた。励起用の CW レーザーには、安価高出力な 450nm の半導体レーザーを用いた。

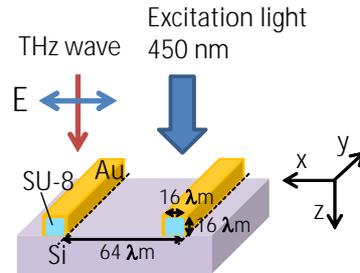


図4 光励起スプリットチューブの光学配置

4. 研究成果

本研究で明らかになったことを以下にあげる。

(1)スプリットチューブ配列構造とその光学応答

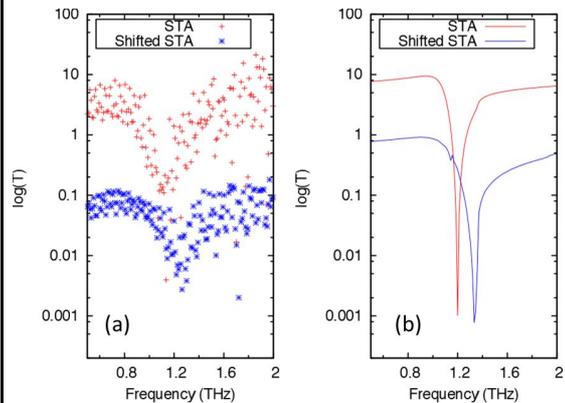


図5 スプリットチューブ配列(赤:STA)とシフトしたスプリットチューブ配列(青: Shifted STA)におけるテラヘルツ透過スペクトル。(左)実験結果、(右)シミュレーション結果

スプリットチューブ配列構造、シフトした構造におけるテラヘルツ透過スペクトルを図5に示す。図5(左)は THz-TDS による実験結果、(右)は FDTD によるシミュレーション結果である。スプリットチューブ構造は 1.2 THz 付近に共鳴によるディップがある。シフトした構造ではそれが高周波側にシフトしている。この振る舞いは、実験とシミュレーションとが一致しており、シミュレーションにより現象が再現できているものと思われる。シミュレーション結果の精密な解析、および角度分解透過測定の実験結果から、この共鳴現象には少なくとも磁場がかかわって

いることが分かった。(100%磁場だけで誘起されているわけではない)また、今のところ、構造をシフトさせたことによる共鳴周波数のシフトは、構造間の相互インダクタンスの低下によるものと考えているが、正確な理解のためには今後、詳細な解析が必要である。

シミュレーション結果から分かった共鳴の特徴として、共鳴周波数では透過がほぼゼロになり、反射率が1に近い値となる。この応用面では、本構造はノッチパスフィルタ、バンド反射フィルタとして利用できる可能性がある。さらに構造により、共鳴周波数の調整が可能である。

レジストグレーティングに対して金を斜め蒸着するだけのプロセスで、比較的容易にテラヘルツ帯に LC 共鳴周波数をもつ構造が実現できた。レジストグレーティング自体も簡易的なマスクレス露光により実現できており、テラヘルツ帯のメタ材料作製としては非常に安価な手法が確立できたといえる。このことは、方針転換による大きな副産物の一つである。

## (2) 光励起スプリットチューブ構造の変調特性

### シミュレーション

光励起状態の FDTD シミュレーションを行うに当たり、図4の配置ではスプリットチューブの下基板は陰になり励起光は当たらないが、キャリア拡散によりチューブの真下にもキャリアが移動できることを仮定した。結果として、スプリットチューブの直下にキャリア密度が高い層が厚さ  $10\mu\text{m}$  で、光励起によりできるものと考えた。キャリア密度分布層の光学応答は、Drude モデルで与えた。その場合の透過スペクトルのプラズマ周波数(キャリア濃度に対応)依存性をそれぞれ図6に示す。

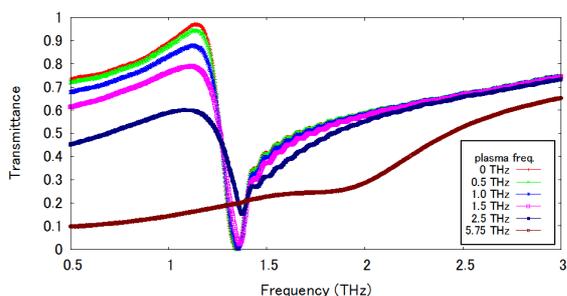


図6 光励起スプリットチューブ配列構造における透過スペクトルのプラズマ周波数依存性

透過スペクトルについて、キャリア密度が高くなる(プラズマ周波数が高くなる)にしたがって、共鳴周波数以外のところでは透過が減少するのに対し、共鳴周波数付近ではディップが浅くなり、むしろ透過率が上昇していることがわかる。また、わずかではあるが共鳴周波数が高周波側にシフトしている。プラズマ周波数よりも十分高い周波数領域では、

ほとんど変化は見られなかった。共鳴周波数以外での振る舞いは通常の Drude モデルの振る舞いと同一であるが、共鳴周波数付近では逆の振る舞いを示す。

また、各周波数における基板のみの場合の時の位相のずれを図7に示す。これを見ると共鳴による位相の飛びがキャリア密度の上昇にしたがってなだらかになっている様子が見て取れる。キャリア密度による位相のずれの変化は、共鳴周波数において最も大きかった。

反射スペクトル、吸収スペクトルとの比較から、この現象は、高キャリア密度層の自由キャリア吸収により、スプリットチューブが単純な LC 回路から、散逸も含む LCR 回路になったものと考えられる。その結果、共鳴の Q 値が下がり、スペクトルが変化した。

これらのことから、スプリットチューブ配列構造において、光励起強度を変えることで、共鳴周波数付近で、強度および位相の変調がおこることが予想される。

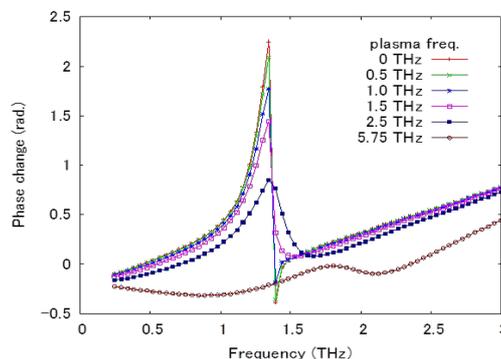


図7 光励起スプリットチューブ配列構造における位相のずれのプラズマ周波数依存性

### 実験

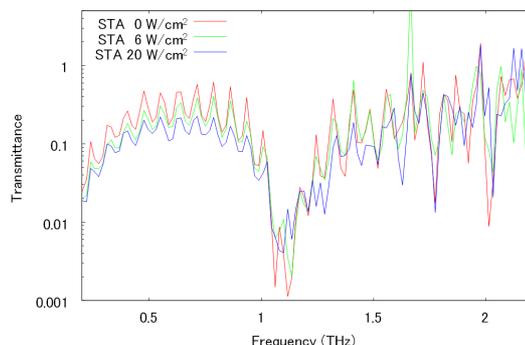


図8 光励起スプリットチューブ配列構造における透過スペクトルの励起光強度依存性(赤:励起光なし,緑:6 W/cm<sup>2</sup>,青:20 W/cm<sup>2</sup>)

図4に示した実験配置におけるテラヘルツ透過スペクトルの励起強度依存性を図8に示す。これを見ると1.2THz 付近の透過のディップがあり、励起光強度が強くなるにしたがって、共鳴周波数付近では透過が大きくなり、それ以下の周波数では透過強度の低下がみられ

るこの挙動はシミュレーション結果と一致する。ただ、サンプルの裏面による多重反射の影響によりその効果が見えにくい。次に、位相変化のずれを図9に示す。これを見ると共鳴周波数付近で位相の飛びは見られ、励起光強度が強くなるにしたがって、わずかではあるがこの傾きがなだらかになっていることがわかる。

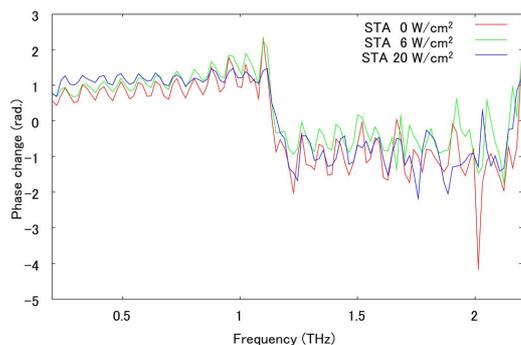


図9 光励起スプリットチューブ配列構造における位相変化のずれの励起光強度依存性 (赤:励起光なし,緑:6 W/cm<sup>2</sup>、青:20 W/cm<sup>2</sup>)

これらのことから、スプリットチューブ配列構造とCW光源による光励起により実験的に、強度および位相の変調が実現できることがわかった。しかし、現状では変調度という点では、既に報告されているTHz変調器よりも大きくなったとは言えない。課題として、サンプル裏面の多重反射により、測定結果が見やすくなかったため、サンプルを厚くするなど工夫が必要である。また、励起光強度の強化、構造最適化など研究の余地が残されている。今後の展望として励起光をパターン化し、強度分布を制御することで、フェーズアレイアンテナ、焦点距離可変レンズといったビームのハンドリングが行える可能性がある。

## 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 3 件)

大野 誠吾, 新宮 正彦, 黒澤 裕之, 森竹 勇斗, 日下 寛太, 中山 和之, 石原 照也, “光励起スプリットチューブ構造におけるテラヘルツ帯光学応答”, 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月17日, 相模原、青山学院大学

大野 誠吾, 新宮 正彦, 黒澤 裕之, 森竹 勇斗, 中山 和之, 石原 照也, “スプリットチューブ構造のテラヘルツ帯における光学応答”, 第74回応用物理学会秋季学術講演会, 2013年9月16日, 京田辺、同志社大学

Seigo Ohno, Masahiko Shingu, Hiroyuki Kurosawa, Yuto Moritake, Kazuyuki

Nakayama, and Teruya Ishihara, “Fabrication and Terahertz Response of “split-tube” Arrays”, CLEO-PR 2013, 2013年7月3日, 京都

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

大野 誠吾 (Ohno, Seigo)

東北大学・高等教育開発推進センター・助教

研究者番号: 70435634