

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860033

研究課題名（和文）メタアトム装荷光伝導アンテナからのテラヘルツ波放射

研究課題名（英文）Terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas

## 研究代表者

高野 恵介 (TAKANO KEISUKE)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：70583102

## 研究成果の概要（和文）：

波長に比べて微小な共振器（メタアトム）を装荷した光伝導アンテナが、メタアトムの固有モードに強く影響されたテラヘルツ領域の電磁波を放射することを示した。メタアトム装荷光伝導アンテナのメタアトム部の基板半導体を光励起することで、放射テラヘルツ波の変調に利用できることを示した。本研究で提案した手法では、アンテナ構造そのものは変化させることなく、テラヘルツ波の放射スペクトルや偏光を変調できる。

## 研究成果の概要（英文）：

Meta-atoms, which are small resonators compared with wavelength of electromagnetic waves, are loaded to photoconductive antennas. The radiation spectra of the meta-atom-loaded photoconductive antennas are strongly affected by the eigen-modes of the meta-atoms. Optical switching of the spectrum and polarization of has been demonstrated, which is not required complicated electric circuits and structural changes.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,230,000	369,000	1,599,000
2011 年度	1,090,000	327,000	1,417,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,320,000	696,000	3,016,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：テラヘルツ波、メタマテリアル、光伝導アンテナ、超微細インクジェット工法

## 1. 研究開始当初の背景

未開拓電磁波領域などと呼ばれたこともあったテラヘルツ領域の光源・検出器の開発が近年進んできた。一方、光学素子の形成および光波操作技術においてもこの 10 年で重要な進展があった。電磁波の波長よりも十分に小さい構造体の集合の電磁波応答は、要素個々の微視的な応答よりもむしろ、集合全体

の巨視的な応答を表す有効誘電率や有効透磁率といった光学定数によって記述できる。要素の形状や要素同士の電磁的結合によって、要素の集合体の有効誘電率と有効透磁率を、自然には得がたい値にも設計できる。このような波長に比べて微細な構造の集合体で巨視的な電磁応答が設計された人工媒質はメタマテリアルと呼ばれる。またその基本

構成要素はメタアトムなどと呼ばれる。

それまでにほとんど考えられてこなかった、負の屈折率を持つ媒質でさえも実現できるため、2000年頃のメタマテリアルの概念の発見以来、メタマテリアルはマイクロ波から光領域まで盛んに研究が行われるようになった。テラヘルツ領域の電磁波に対しても、メタマテリアルの概念を利用した振幅変調子や完全吸収体、無反射平面などが提案された。これらのデバイスそのものだけでなく、構造体でテラヘルツ電磁波を操るといった概念の利用は、未だ不十分なテラヘルツ帯の光学素子の充実に寄与すると期待される。

## 2. 研究の目的

ある機能を持ったメタアトムを装荷することで機能拡張していくという光伝導アンテナの設計指針を提案したい。加えて、メタアトムの共振周波数を超短パルスレーザーで変調することで、ピコ秒オーダーでのテラヘルツ波の電場振幅制御を目指す。この手法によって光伝導アンテナの多機能化と汎用性の向上が期待できる。複雑な電子素子設計を必要とせず高速な変調動作が可能となり、本研究で得られる知見はテラヘルツ無線通信の伝送情報量増大などへの応用も期待できる。その過程で光伝導アンテナをインクジェット工法で簡便に作製する技術を確認する。

## 3. 研究の方法

超微細インクジェット工法で、ガリウムヒ素基板上に、メタアトムを装荷した光伝導アンテナを作製した。超微細インクジェット (Super-fine inkjet, SIJ) 工法は、産業技術総合研究所の村田博士らによって開発されている加工法で、数  $\mu\text{m}$  程度の配線をリフトオフなどの煩雑な工程なしで基板上に作製できる。近赤外フェムト秒パルスレーザーを用いて、作製した光伝導アンテナからテラヘルツ波を放射させ、テラヘルツ時間領域分光法を用いて、放射スペクトルとその偏光状態を測定した。また、時間領域有限差分法を用いてアンテナから放射される電磁場を計算し、実験結果と比較した。

## 4. 研究成果

(1) 超微細インクジェット工法による光伝導アンテナの作製

図1(a, b)は、フォトリソグラフィを用いて作製したダイポール型光伝導アンテナの模式図と顕微鏡写真である。基板はキャリア寿命が1 ps以下の低温成長 GaAs で、電極はオーミック接合が形成できる Au/Ge/Ni 合金である。図(c, d)は、SIJ工法で作製したダイポール型電極パターンの顕微鏡写真である。基板には厚さ 350  $\mu\text{m}$  の SI-GaAs を用いた。

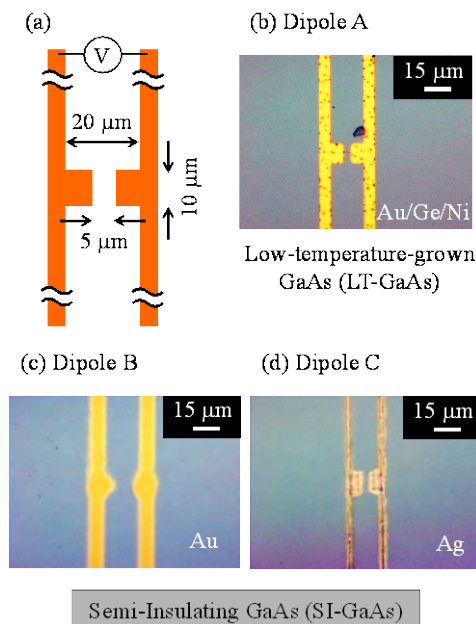


図1 (a)アンテナの模式図と(b-d)顕微鏡写真。

ウェットエッチングでSI-GaAs上の酸化膜を除去し、金および銀ナノペーストで電極構造を描画した後、窒素雰囲気中で1時間320°Cの焼結を行った。図1(b-d)の試料をそれぞれ、Dipole A、Dipole B、Dipole Cと呼ぶことにする。Dipole Bは、金ナノペーストの吐出量過多により、フォトリソグラフィで作製した電極に比べてパターンがなまっている。Dipole Cは5  $\mu\text{m}$ 以下の線幅で、フォトリソグラフィでの作製により近い精度で電極を作製できた。

図2はこれら試料のI-V曲線である。フォトリソグラフィで作製した試料はAu/Ni/Ge-GaAsのオーミック接合によって線形なI-V特性を示し、かつ良好な絶縁特性を示した。SIJ工法で作製した試料では金およ

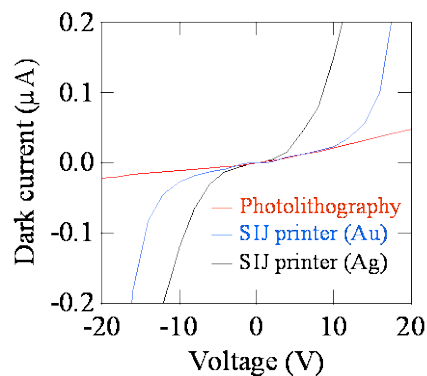


図2 I-V曲線

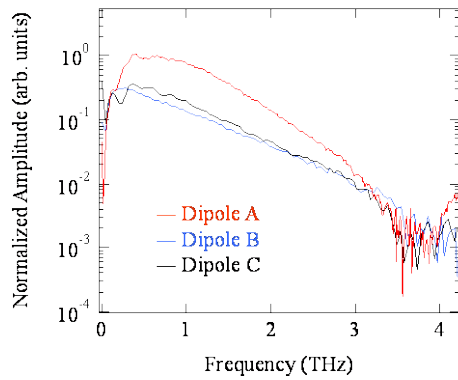


図3 Dipole A-C の放射スペクトル

び銀電極と GaAs 界面にショットキー障壁が形成されており、かつ低温成長 GaAs に比べて、基板の絶縁性が悪く暗電流が大きくなっている。

レーザー光源にはフェムト秒パルスレーザー (Spectra Physics社製 Tsunami, 繰り返し周波数 80 MHz, 中心波長 800 nm, パルス幅 100 fs以下) を用いた。テラヘルツ波の放射源にはDipole A-Cを用い, 検出にはDipole Aと同等の光伝導アンテナを用いた。放射アンテナには 20 V<sub>p-p</sub>, 3 kHzの交流電圧を印加し, 平均強度 5 mWのレーザーを対物レンズで電極のギャップ部分に集光した。検出用光伝導アンテナへの入射レーザーの平均強度は 8 mWであった。図3に試料からのテラヘルツ電磁波の放射スペクトルを示した。各スペクトルは, おおのこの 3.5 THz付近のノイズレベルが一致するように規格化されている。フォトリソグラフィで作製したDipole A3桁程度のダイナミックレンジが得られた。SIJ工法で作製したDipole BおよびDipole CではダイナミックレンジはDipole Aよりも低い2.5桁ほどとなっている。SI-GaAsの30 psを超えるキャリア寿命や, 暗電流の大きさがこの原因と考えられる。しかしながら, Dipole Aと同等の3.5 THz程度までの放射が得られており, SIJ工法が光伝導アンテナの作製に有用であることを示している。

## (2) メタアトム装荷光伝導アンテナの放射特性

メタ材料を構成するメタアトムのうちで最も基本的な要素である分割リング共振器を, ダイポール型電極に装荷した光伝導アンテナを作製した。図4に半絶縁ガリウムヒ素基板 (Semi-insulating GaAs, SI-GaAs) 上に作製した試料の顕微鏡写真を示す。電極を銀ナノペーストで描画した後, 220°Cで焼結を行った。

図4(a)のアンテナ構造右側の, ギャップ

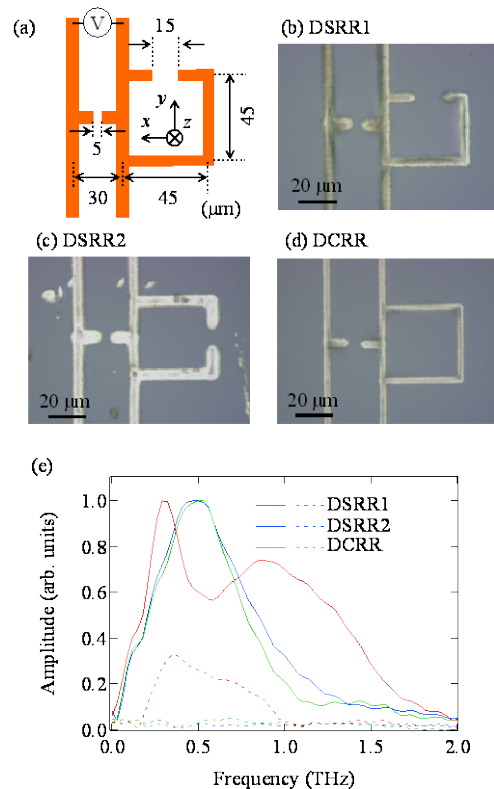


図4 (a)作製したメタアトム装荷光伝導アンテナの模式図と(b-d)顕微鏡写真。(e)各試料の放射スペクトル。実線は(a)のx方向偏光成分で破線はy方向偏光成分。

を持ったリング構造が分割リング共振器 (split-ring resonator, SRR) と呼ばれる構造である。SRRの最低次の共振モードでは, リングを周回する電流が流れ, リングに垂直な磁場が生じる。SRR配列はSRRに生じる磁場を利用して有効透磁率を設計するものである。図4(a)と(b)はダイポール型に, ギャップの向きが異なるSRRを装荷したもので, それぞれをDSRR1とDSRR2と呼ぶことにする。図4(c)はリングのギャップを閉じた閉リング共振器 (Closed-ring resonator, CRR) を装荷した構造で, DCRRと呼ぶことにする。各試料のダイポール型の電極ギャップ部に 40 kV<sub>p-p</sub>, 3 kHzの交流電圧を印加し, 中心波長 800 nm, 繰り返し周波数 80 MHzの超短パルスレーザーを集光した。

図4(e)は, 各光伝導アンテナからの放射スペクトルである。DSRR1は, 0.3 THzと1.0 THzに放射ピークを持つ。一方, DSRR2とDCRRは0.5 THzにピークを持つほぼ同じ放射スペクトルを示す。これらピーク周波数は, これまでに明らかになっている, SRRとCRR単体配列の固有モードの共振周波数におおよそ一致する。すなわち, 共振周波数の電磁波波長の1/10以下の共振器ではあるが, 光源近

傍に共振器（メタアトム）を置くことである程度放射スペクトルを設計することができる。

図5は、光伝導アンテナからの放射スペクトルを時間領域有限差分法でシミュレーションしたものである。強度変化  $I(t)$  のレーザーパルスによって励起されるキャリア密度  $N(t)$  が

$$\frac{dN(t)}{dt} = I(t) - \frac{N(t)}{\tau_c} \quad (1)$$

で表されると仮定した。さらに印加電圧によって  $N(t)$  に比例する電場が図5の光源部分に生じると仮定した。  $I(t)$  にはパルス幅 100 fs の正規分布を、SI-GaAs のキャリア寿命には  $\tau_c = 36$  ps を仮定した。検出器感度などの装置関数を無視した簡単なシミュレーションであるが、1 THz 以下の周波数領域では実験結果をよく再現でき、光伝導アンテナ設計に汎用性の高い時間領域有限差分法をある程度利用できる。

### (3) メタアトム装荷光伝導アンテナの放射特性の光スイッチング

SRR は、ギャップ部分のキャパシタンスと、リング部分のインダクタンスからなる LC 回路とみることができる。たとえば基板半導体のキャリアを光励起することでギャップのキャパシタンスを変えれば、SRR の共振を変化させることができる。このような手法で近年ではテラヘルツ用の位相・振幅変調子などが提案されている。本研究の SRR 装荷光伝導

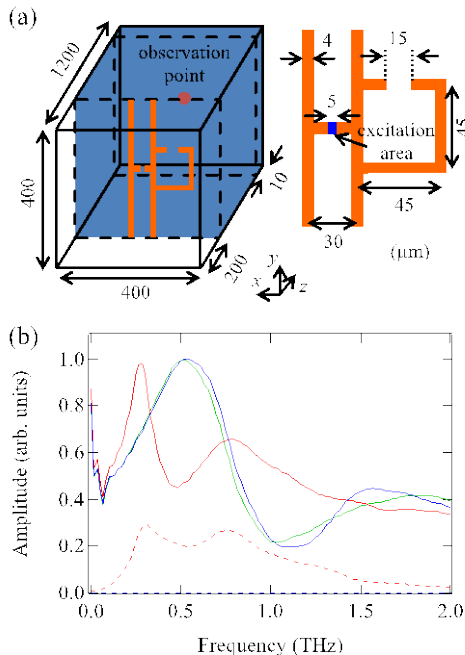


図5 (a)時間領域有限差分法によるシミュレーションモデルと(b)計算された放射スペクトル

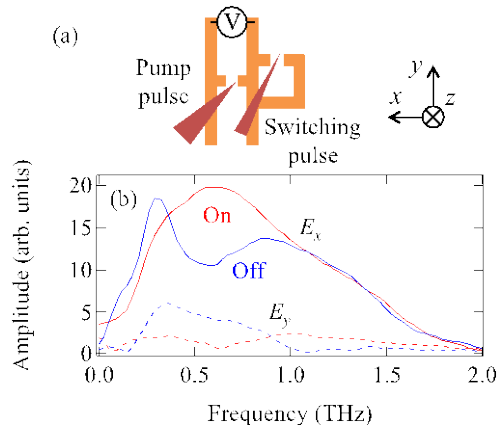


図6 (a)メタアトム装荷光伝導アンテナに入射するスイッチング光と励起光の模式図。(b)スイッチング光がある場合(赤線)とない場合(青線)の放射スペクトル。実線と破線はそれぞれ、放射波の  $x, y$  偏光成分を表す。

アンテナでも同様の手法で、放射スペクトルを操作できると考えられる。

ダイポールアンテナ部への励起パルスに加えて、SRR のギャップ部のキャリアを励起するためのスイッチングパルスを入射させる光学系を作製した。スイッチングパルスは、励起パルスと同じ対物レンズに、光軸をずらして入射し、SRR のギャップ部に集光させた。

図6にスイッチングパルスがある場合とない場合の DSRR1 の放射スペクトルを示す。スイッチングパルスによるキャリアの励起によって、0.3 と 1.0 THz にあった放射ピークが消失し、ブロードな放射スペクトル形状となる。SRR ギャップ部に励起されたキャリアは、ギャップをショートさせてキャパシタンスを消失させる。このため、放射スペクトルが切り替えられる。またスイッチングパルスによって SRR が CRR になると、アンテナ全体の構造が  $y$  方向に対象となるため、放射偏光も操作できる。

図7に、DSRR1 の放射スペクトル振幅のスイッチングパルス強度依存性を示す。放射振幅は、レーザー強度の平方根に比例して変化し、スイッチング光強度が 4 mW ほどで変化しなくなる(放射振幅は放射強度の平方根であるので、放射強度とスイッチングレーザー強度が比例して変化している)。もし、キャリア寿命が 1 ps 以下であるような基板(低温成長 GaAs など)を用いれば、テラヘルツ波の超高速変調も可能と考えられる。

### まとめ

超微細インクジェット工法を光伝導アンテナ作製に適用した。微小共振器(メタアト

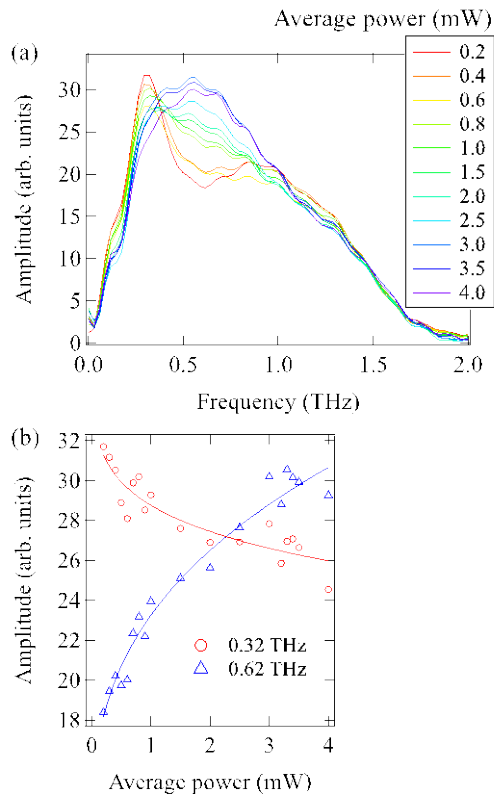


図7 (a)DSRR1 の放射波のスイッチング光の平均強度依存性。(b)0.32 および 0.62 THz の変化。実線は平方根曲線フィッティング。

ム) を装荷した光伝導アンテナが、メタアトム固有モードに強く影響された放射スペクトルを持つことを示した。メタアトム装荷光伝導アンテナを、テラヘルツ放射波の変調に利用できることを示した。本論文で提案した手法では、アンテナ構造そのものは変化させることなく、放射スペクトルや偏光を操作することができる。さらに高度にメタアトムを装荷していくことで、“メタ分子”やメタマテリアルを形成し、アンテナあるいは基板表面上のテラヘルツ波の伝搬分散制御や、放射ビームスイープなどへ応用できると考えられる。

## 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)

[雑誌論文] (計2件)

① Keisuke Takano, Yui Chiyoda, Tsubasa Nishida, Fumiaki Miyamaru, Taku Kawabata, Hirofumi Sasaki, Mitsuo W. Takeda, and Masanori Hangyo, “Optical switching of terahertz radiation from meta-atom-loaded photoconductive antennas”, *Applied Physics Letters*, 査読有, vol. 99 (2011),

p. 161114-1-3

② 高野恵介、宮丸文章、萩行正憲、メタマテリアルおよびメタアトムのテラヘルツデバイスへの応用、査読有、レーザー研究 (掲載確定)、40巻、(2012)

[学会発表] (計5件)

① Hirohumi Sasaki, Keisuke Takano et al (他4名). “Spectral and polarization characteristics of terahertz radiation from metaatom-loaded photoconductive antennas”, 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2011), 2011. 10. 6, Hyatt Regency Downtown, Houston TX USA.

② Hirohumi Sasaki, Keisuke Takano et al (他4名). “Spectral and polarization characteristics of terahertz radiation from metaatom-loaded photoconductive antennas”, 1st Korea-Japan Metamaterial Forum 2011, 2011. 7. 8, Ewha Womans University, Seoul, Korea.

③ Keisuke Takano et al. (他5名), Photoconductive antenna with split ring resonators for terahertz radiation, 4<sup>th</sup> International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (Metamaterials’ 2010), 2010. 9. 16, Karlsruhe Institute of Technology, Germany. : Best poster award 受賞。

④ Keisuke Takano et al. (他5名), Enhanced terahertz emission from metaatom-loaded photoconductive antennas, 35<sup>th</sup> International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), 2010. 9. 7, Angelicum, Pontificia Università, Rome, Italy.

⑤ 高野恵介、メタアトム装荷光伝導アンテナからのテラヘルツ波放射、電気学会光応用・視覚研究会、2010. 12. 27. 大阪産業大学梅田サテライトキャンパス

[図書] (計1件)

① 高野恵介、萩行正憲、日刊工業出版、NIKKO Green MOOK プリンテッドエレクトロニクスのすべて、第5章、「テラヘルツ領域における光学素子の形成」、2011, 120-124

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/ksktakra/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高野 恵介 (TAKANO KEISUKE)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・特任研究員

研究者番号：70583102