

## 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 6 月 1 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656017

研究課題名（和文） スーパーインクジェットプリンタによるテラヘルツデバイスの作製

研究課題名（英文） Fabrication of terahertz devices by super-fine ink-jet printer

研究代表者

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：10144429

研究成果の概要（和文）：テラヘルツ領域のデバイスの多くは、マイクロオーダーの精度で作製される。本研究では、スーパーインクジェットプリンタを用いて、金属ナノペーストインクにより、基板上に、ワイヤーグリッドやメタマテリアルなどの平面受動デバイスや、テラヘルツ波放射用の光伝導アンテナを簡便に作製する技術を確立した。光伝導アンテナについては、様々な形状のものを作製し、スペクトルや偏光がアンテナ形状により制御できることを示した。

研究成果の概要（英文）：Many of terahertz devices are fabricated with the spatial resolution of micrometers. In this study, we have established the technology to fabricate planar passive devices such as wire grids and metamaterials, and photoconductive antennas for terahertz emission by using a super-fine ink-jet printer with metallic nano-paste ink. For photoconductive antennas, it is demonstrated that the spectrum and polarization can be controlled by the antenna structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,700,000	0	1,700,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	420,000	3,520,000

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：テラヘルツ波、超微細インクジェットプリンタ、光伝導アンテナ、伝送線路、センシング

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ技術が近年格段の進歩を遂げ、企業を含めて研究人口が急激に増大しているが、申請者はテラヘルツ技術の曙時代から、この研究に携わり、極めて安価な汎用 CW マルチモードレーザーを用いたテラヘルツ時間領域分光装置の提案 (Appl. Phys. Lett. **76**, 1519 (2000))、市販の汎用プリンタを用いた簡便なワイヤーグリッド偏光子の作製 (Jpn.

J. Appl. Phys. **42**, L373 (2003)) などを行ってきた。これらの研究はテラヘルツ技術普及のための安価な素子やシステム作製を目的とするものである。この市販のプリンタとメタリックカラーインクを用いてテラヘルツ素子を作る方法ではある程度の素子は作れるものの、精度や基板が制限されるなどの問題があった。一方、産総研の村田らがマイクロオーダーの金属線が描画できる超微細

インクジェット (SIJ) プリンタを開発したが、申請者はこれを平成 20 年に導入し (販売 3 号機)、テラヘルツ素子への応用を開始した。作製技術のノウハウの積み上げで、マイクロオーダーの金属線の作製が可能になり、半絶縁性 GaAs (SI-GaAs) 基板上的テラヘルツ波放射用の光伝導アンテナの作製が熱処理も含めて 1 時間程度で可能となっている。

## 2. 研究の目的

テラヘルツ波技術が格段の進歩を遂げ、様々な分野に応用されようとしているが、光源、検出器、光学素子などがまだ十分発達しておらず、また、極めて高価である。本研究では、マイクロオーダーの金属線などが簡便に作製できる SIJ プリンタを用いて様々なテラヘルツデバイスを簡便・高速に作製する技術を開発するとともに、これらを 1 枚の基板上に作製したマイクロセンシングシステムを作製することを目的としている。

## 3. 研究の方法

SIJ プリンタは、マイクロオーダーの線を金属ナノペーストインクで自在に書くことができ、また、比較的低温の 220°C 程度での熱処理で金属化が可能であるが、基板の性質、温度、ノズルの状態や印加電圧によって、作製された試料の精度などが大きく変化するという弱点がある。これらを克服してできるだけ安定な試料作製を可能とするためには、まず、条件のノウハウの積み上げが必要である。

作製するデバイスは、まず、受動デバイスとしての平面金属構造体の作製とそのテラヘルツ透過特性を評価する。評価にはテラヘルツ時間領域分光装置を用いる。

次に、テラヘルツ波放射用の光伝導アンテナを作製する。光伝導アンテナの放射特性はアンテナ形状に大きく依存することが知られているので、メタ原子付加を含む様々な形状のアンテナを作製し、その放射特性を評価する。

平面金属構造体の透過特性や光伝導アンテナの放射特性の物理的な機構を明らかにするために、FDTD シミュレーションも同時に行う。

また、放射素子や伝送線路などを基板上にモノリシックに作製したセンシング素子のプロトタイプを開発を行う。

## 4. 研究成果

(1) SIJ プリンタを用いて金あるいは銀ナノペーストインクにより、安定に 3 ミクロン幅の金属線を描く技術を確立した。5×5 mm<sup>2</sup>程度の面積に、数十ミクロンの大きさの金属単位構造を 2500 個作製するのに要する時間は数時間である。厚い構造を作るための重ね書

きも簡単にできる。

(2) ワイヤグリッドや分割リング共振器 (SRR) 配列をシリコン基板上に作製し、そのテラヘルツ偏光スペクトルを測定した。FDTD シミュレーションと実験結果を比較した結果、試料が精度良く作製されていることを確認した。

(3) SRR が基板から立ち上がった立体メタマテリアルの作製に成功した (図 1)。このような構造は通常のリソグラフィでは作製困難であるので、SIJ プリンタの有用性が示された。図 2 はその透過スペクトルであるが、磁気的な応答が観測されている。

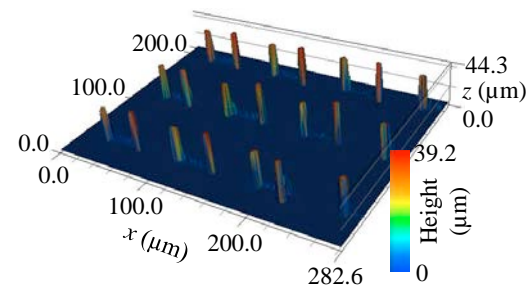


図 1 立体 SRR 配列メタマテリアルのトポグラフィ像

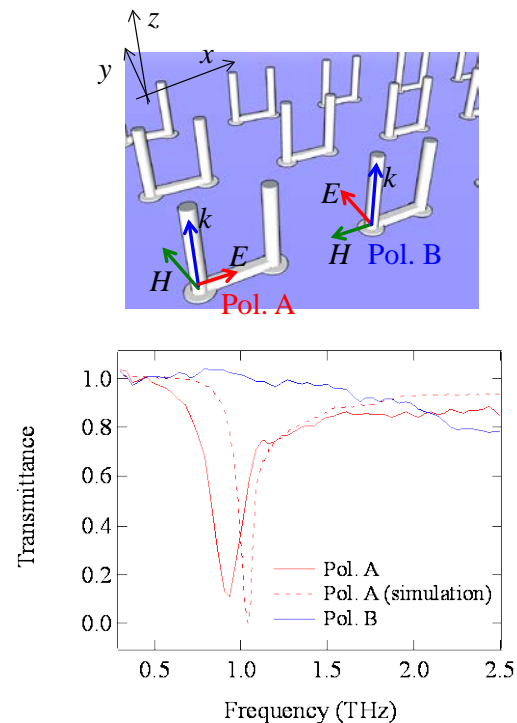


図 2 立体 SRR 配列メタマテリアルの模式図と測定された透過スペクトル

(4) SI-GaAs 基板上に通常のダイポール型光伝導アンテナを作製し、フェムト秒レーザー励起により予想通りのテラヘルツ波が放射

されることを確認した。ついで、SRR や閉リング共振器(CRR)を付加した光伝導アンテナを作製し、リングの形状やそのギャップの方向により、放射スペクトルの形状や偏光特性が大きく変化することを見出した(図 3)。FDTD により放射特性をシミュレーションした結果、実験結果とほぼ一致することを確認した。このことにより、要求されるスペクトル並びに偏光特性を満たすテラヘルツ波放射用光伝導アンテナの設計指針がある程度確立された。

(5) 最終目的のモノリシック基板上のセン

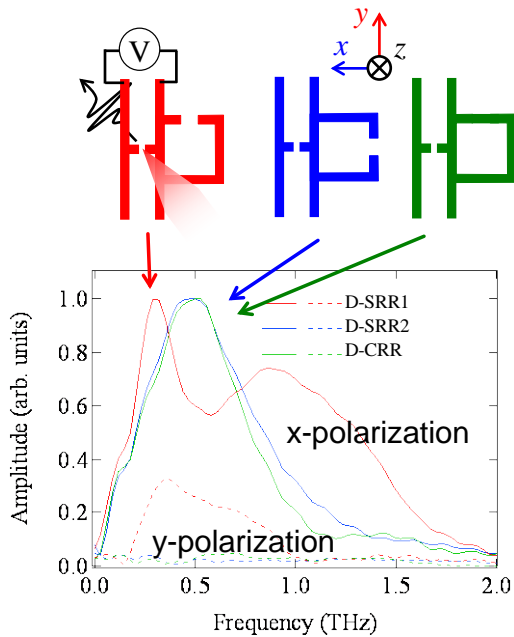


図 3 メタ原子装荷光伝導アンテナの放射特性

シングについての研究の現状は以下のとおりである。当初、SI-GaAs 基板上にテラヘルツ波検出用の光伝導アンテナも作製する予定であったが、光キャリア寿命が長い場合、十分な検出感度が得られなかった。そこで、光キャリア寿命の短い低温成長 GaAs (LT-GaAs) 基板を用いることにしたが、予定していたメーカーが生産を打ち切ったため、現在別のメーカーに依頼しており、実験が遅れている。このことへの対応として、放射用の光伝導アンテナからのテラヘルツ波パルスを送信線路に導き、送信線路の曲りからの放射を、別途用意した検出用光伝導アンテナで検出する手法を暫定的に試みている。送信線路上に被検出試料を置いて、センシングを行うものである。

## 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)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 萩行正憲、テラヘルツ波技術の歩みと展望、応用物理、査読有、81 巻、(2012)、271-283.
- ② 萩行正憲、高野恵介、テラヘルツ波メタマテリアル、OPTRONICS、査読無、(2011)、12 号、63-67.
- ③ K. Takano, Y. Chiyoda, T. Nishida, F. Miyamaru, T. Kawabata, H. Sasaki, M. W. Takeda, and M. Hangyo, Appl. Phys. Lett., 査読有, 99 巻, (2012), 161114-1-3.
- ④ 萩行正憲、高野恵介、テラヘルツ波メタマテリアル、マテリアルインテグレーション、査読無、24 巻、(2011)、13-20.
- ⑤ K. Takano, H. Yokoyama, A. Ichii, I. Morimoto, and M. Hangyo, Wire-grid polarizer sheet in the terahertz region fabricated by nanoimprint technology, Opt. Lett., 査読有, 36 巻, (2011), 2665-2667.
- ⑥ K. Akiyama, K. Takano, Y. Abe, Y. Tokuda, and M. Hangyo, Optical transmission anomalies in a double-layered metallic slit array, Opt. Express, 査読有, 18 巻, (2010), 17876-17882.
- ⑦ F. Miyamaru, M. Kamijyo, K. Takano, M. Hangyo, H. Miyazaki, and M. W. Wada, Characteristics and generation process of surface waves excited on a perfect conductor surface, Opt. Express, 査読有, 18 巻, (2010), 17576-17583.

[学会発表] (計 23 件)

- ① 萩行正憲、イントロダクトリートーク : 電磁メタマテリアルの最近の進展と将来展望、応用物理学会、2012. 3. 15、早稲田大学
- ② 萩行正憲、高野恵介、宮丸文章、テラヘルツ領域の平面、立体、3 次元メタマテリアルの作製と評価、2012. 3. 15、早稲田大学
- ③ 西田 翼、宮丸文章、武田三男、高野恵介、萩行正憲、メタアトム装荷光伝導アンテナによるテラヘルツ波制御、応用物理学会、2011. 8. 31、山形大学
- ④ 高野恵介、周防裕政、大野誠吾、石原照也、萩行正憲、円型光伝導アンテナのテラヘルツ波偏光特性、応用物理学会、2011. 8. 31、山形大学
- ⑤ 萩行正憲、テラヘルツ波とメタマテリアル、分子研研究会「大強度テラヘルツ光の発生と利用研究」、2011. 1. 14、分子科学研究所
- ⑥ 高野恵介他、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
- ⑦ M. Hangyo他、Terahertz metamaterials fabricated by a super-fine ink-jet printer, 3rd Korea-Japan THz Workshop, 2010. 12. 17, Busan, Korea
- ⑧ 萩行正憲他、電磁メタマテリアルの基礎

と最近の展開、第 21 回光物性研究会、  
2010. 12. 10、大阪市立大学

⑨ 萩行正憲、テラヘルツテクノロジーの最近の進展とメタマテリアル、防衛技術協会「光波・ミリ波センシング部会」、2010. 11. 24、グランドヒル市ヶ谷

⑩ 萩行正憲、テラヘルツ波の発生と多様な応用、センシング技術応用研究会、2010. 11. 11、京都工業繊維大学

⑪ 萩行正憲、テラヘルツテクノロジーの進展とメタマテリアル、上智大学半導体研究所創設記念シンポジウム、2010. 10. 18、上智大学

⑫ K. Takano et al., Enhanced terahertz emission from metaatom-loaded photoconductive antennas, IRMMW-THz 2010, 2010. 9. 7, Rome, Italy

⑬ K. Takano et al., Wire-grid polarizer in the terahertz region fabricated by nanoprint technology, IRMMW-THz 2010, 2010. 9. 8, Rome, Italy

⑭ K. Takano et al., Photoconductive antennas with split-ring resonators for terahertz radiation, Metamaterials 2010, 2010. 9. 16, Karlsruhe, Germany

⑮ 萩行正憲、テラヘルツ電磁波の応用とメタマテリアル、岡山県立大学講演会、2010. 9. 7、岡山県立大学

⑯ 萩行正憲、電磁メタマテリアル研究の現状、2010. 9. 3、佐賀大学

⑰ 萩行正憲、新しい光・電磁波材料メタマテリアルの現状、レーザー技術総合研究所平成 21 年度研究成果報告会、2010. 7. 6、千里ライフサイエンスセンター

⑱ M. Hangyo, Laser-excited THz waves and applications - From high-Tc superconductors to metamaterials -, The 4th Yamada Symposium on Advanced Photons and Sciences Evolution 2010, 2010. 6. 15, JICA 大阪

⑲ K. Takano et al., Planar and three-dimensional metamaterials in the terahertz region, The 4th Yamada Symposium on Advanced Photons and Sciences Evolution 2010, 2010. 6. 15, JICA 大阪

⑳ K. Takano et al., Terahertz responses of near self-complimentary checkerboard patterns, The International Conference on Nanophotonics, 2010. 6. 3, EPOCHAL, Tsukuba

〔図書〕(計 1 件)

高野恵介、萩行正憲、日本工業出版、プリンテッドエレクトロニクスのおべて(第 5 章の「テラヘルツ領域における光学素子の形成」を分担執筆)、(2010)、120-124

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)

大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・教授

研究者番号：10144429