

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.8 テラヘルツ全般

2024年9月20日(金) 13:30 ~ 17:00 皿 A34 (朱鷺メッセ3F)

[20p-A34-1~12] 3.8 テラヘルツ全般

トリパティ サロジ(静大)、鶴町 徳昭(香川大)

13:30 ~ 14:00

[20p-A34-1]

[第45回優秀論文賞受賞記念講演] 高屈折率低反射メタサーフェスの開拓と応用

○鈴木 健仁¹ (1.農工大)

14:00 ~ 14:15

[20p-A34-2]

バビネ相補型メタルメッシュ構造を持つテラヘルツバンドパスフィルタにおけるプラズモニックモード

○(M1)松木 拓人¹、植田 雅大¹、和田 想人¹、大家 拓巳¹、渡辺 勇太¹、正光 義則³、鈴木 仁研²、和田 武彦⁴、中岡 俊裕¹ (1.上智大理工、2.宇宙航空研究開発機構、3.量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構、4.国立天文台)

◆ 奨励賞エントリー

14:15 ~ 14:30

[20p-A34-3]

バビネ相補型メタルメッシュ構造における例外点

○(M1)植田 雅大¹、松木 拓人¹、和田 想人¹、大家 拓巳¹、渡辺 勇太¹、正光 義則³、鈴木 仁研²、和田 武彦⁴、中岡 俊裕¹ (1.上智大理工、2.宇宙航空研究開発機構、3.量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構、4.国立天文台)

◆ 奨励賞エントリー

14:30 ~ 14:45

[20p-A34-4]

非等方歪モアレ型メタ表面によるテラヘルツ円偏光セレクター素子

○千葉 初奈¹、代市 拓海¹、折谷 岳¹、三成 剛生²、大野 誠吾³、宮本 克彦^{1,4} (1.千葉大学、2.物材機構、3.東北大院理、4.千葉大学分子キラリティー研)

◆ 奨励賞エントリー

14:45 ~ 15:00

[20p-A34-5]

テラヘルツ渦干渉計のための中空らせん位相板の作成

○山口 航平¹、時実 悠²、長谷 栄治²、安井 武史² (1.徳島大院創成、2.徳島大pLED)

15:00 ~ 15:15

[20p-A34-6]

シリコン-空気有効媒質を用いたテラヘルツ広帯域旋光子

○山根 秀勝¹、山田 義春¹、近藤 裕佑¹、富士田 誠之²、村上 修一¹ (1.大阪技術研、2.阪大基礎工)

15:30 ~ 15:45

[20p-A34-7]

THz域における二重Wire Grid偏光保持鏡の光学特性解析

○前田 季里¹、東原 奈央¹、水谷 颯真¹、鶴町 徳昭¹ (1.香川大創造工)

15:45 ~ 16:00

[20p-A34-8]

レーザー加工によるTHz波位相制御及び反射防止デバイスの開発

○(M2)三浦 悠杜¹、Agulto Verdad²、馮 時雨²、加藤 康作²、中嶋 誠²、小野 晋吾¹ (1.名工大工、2.阪大レーザー研)

◆ 奨励賞エントリー

16:00 ~ 16:15

[20p-A34-9]

テラヘルツ波反射防止用TiO₂コーティングSiモスアイ構造

○(M2)三浦 悠杜¹、Agulto Verdad²、加藤 康作²、Raduban Marilou^{2,4}、山ノ井 航平²、中嶋 誠²、前川 覚¹、糸魚川 文広¹、Olejnicek Jiri³、小野 晋吾¹ (1.名工大工、2.阪大レーザー研、3.Czech Academy of Sciences.、4.Massey Univ.)

◆ 英語発表

16:15 ~ 16:30

[20p-A34-10]

Multi-frequency terahertz quasi-MIM absorber for integrating with thin-film MEMS bolometer

○(M1)ZIHAO ZHAO¹、Kazuho Harada¹、Chao Li¹、Isao Morohashi²、Ya Zhang¹ (1.TUAT, 2.NICT)

16:30 ~ 16:45

[20p-A34-11]

Fabrication of terahertz quasi-MIM absorbers for integration with thin-film MEMS bolometers

○原田 和歩¹、趙 子豪¹、李 超¹、諸橋 功²、張 亜¹ (1.農工大工、2.情報通信研究機構)

16:45 ~ 17:00

[20p-A34-12]

サブ波長構造を用いた10THz帯Si GRINレンズアレイの作製

○(M1)和田 想人¹、松木 拓人¹、植田 雅大¹、渡辺 勇太¹、大家 拓巳¹、中岡 俊裕¹、鈴木 仁研²、正光 義則³、和田 武彦⁴ (1.上智大理工、2.宇宙航空研究開発機構、3.量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構、4.国立天文台)

高屈折率低反射メタサーフェスの開拓と応用

Explorations and Applications of Metasurfaces with High Refractive Index and Low Reflection

鈴木 健仁^{1,*} Takehito Suzuki^{1,*} E-mail: takehito@go.tuat.ac.jp

東京農工大学 工学研究院 先端電気電子部門¹

Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology¹

1. まえがき

本稿の前半では、第45回応用物理学会優秀論文賞に選んでいただいた[1]の内容について、発明[2]に至った開拓の流れとともに述べる。本稿で、発明に至った開拓の流れも記載させていただくことで、例えば、本稿を読んだ学部、修士の学生、社会人の方々が、研究の日々はまさに冒険のようであると感じ、研究者や博士号の取得を目指すきっかけともなれば幸いである。本稿の後半では、[1]の発表後の2021年頃から2024年までの研究の進捗を中心にまとめる。2021年頃までの研究内容の概要は、[3]と[4]の応用物理学会の招待講演の学会原稿で整理してまとめているので、そちらも参考になる。なお、本講演では、発明に至る流れは省き、[1]の内容と本稿の3.について講演する。

2. 発明に至る流れ

筆者がテラヘルツ波帯の研究を開始して、今年で15年目となる。筆者は、学生時代は東京工業大学で研究の楽しさと奥深さをご指導いただき、卒業論文、修士論文、博士論文ではミリ波帯の研究を行っていた。また、博士課程時代に、早稲田大学の大学院ネクストリーダープログラムに1年間通ったことがきっかけで、イノベーションのジレンマで破壊的イノベーション[5]について勉強する機会があった。これが現在進めているJST創発的研究支援事業(JST創発)での[1,2]の産業化を目指した研究に少しずつ繋がっていくきっかけとなる。

博士号取得後は、茨城大学に着任させていただき、文部科学省新学術領域電磁メタマテリアルが開始されたタイミングで公募班として参加させていただいた。15年前はテラヘルツ波帯のコミュニティーにアンテナの専門家がほとんど参入しておらず、「せっかく研究するならば、“開拓者の心意気”で」と日立市の持つカルチャーに感化されたことはとても運が良かった。日立市の日製の関係者の方々からは、ことあるごとに日製の創業者の小平浪平氏の“開拓者の心意気”をご指導いただいた。それに感化され、「何か独自の発見はできないものか？」とメタサーフェスにより高屈折率と低反射な特性を併せ持つ極限屈折率材料の発見[6]に至った。当時、報告されていた高屈折率なメタサーフェスは反射が非常に大きく、応用が難しいという課題を解決でき、応用への道を切り拓けた。

その後、「独自に発見した極限屈折率材料を何かに役立てられないか？」にもがき、テラヘルツ波帯の新たなメタレンズアンテナの発明[7]に至った。幅広いテラヘルツ波連続発振光源への搭載が可能な構造である。発明したメタレンズアンテナを0.3 THz帯共鳴トンネルダイオード(RTD)と融合して動作を実証するために、共同受賞したローム株式会社様との共同研究を開始した。

ちょうどその頃、東京農工大学に着任させていただき、実証化の研究を加速していき、2021年にメタレンズアンテナとRTDの距離が10 mm(10λ)での実証に至った[8]。[1]では、図1の通り、メタレンズアンテナとRTDの距離が1 mm(1λ)の世界トップ級の極短焦点なメタレンズを実現した。時期を同じくして、JST さきがけにより、0.3 THz帯から3 THz帯[9]、さらに50 THz帯まで極限屈折率材料の高周波化を進めることができた。現在、発明した極限屈折率材料によるメタレンズアンテナの産業化を破壊的イノベーションがスローガンのJST創発で進めている。

3. 最近の研究の進捗

現在、[1]のメタレンズアンテナの指向性利得をさらに向上させるため、積層構造のメタレンズアンテナへ応用し、指向性利得30 dB(1,000倍)の設計[10]、作製の一検討とRTDによる

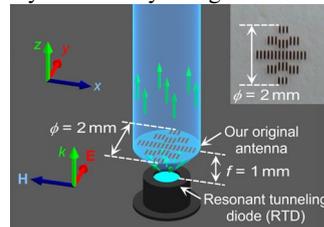


Fig. 1 Terahertz planar antenna made with metasurfaces [1,3,4].

Copyright (2022) The Japan Society of Applied Physics

実験[10,11]を進めている。ここで指向性利得は、放射状の電磁波を指向性の鋭い平面波に変換する際の遠方界でのパワー密度を意味している。作製法をさらに模索するため、両面同時電子ビーム露光による厚さ100 nmの誘電体膜(窒化シリコンSiNx)への金属微細構造の作製[12]などにも挑戦している。また、10を超える超高屈折率、ゼロ屈折率、負の屈折率を同種類のメタアトムで実現した低反射メタサーフェス[13]や無偏光なメタアトムによる高屈折率低反射メタサーフェスにも応用を進めている[14]。

4. まとめ

高屈折率低反射メタサーフェスの開拓と応用について、[1,2]の発明に至った開拓の流れとともに紹介した。また、最近の研究の進捗について紹介した。現在、産業化に向けて、学術指導、講演、セミナーを実施している[15]。2024年も10月から毎週金曜日の午後18時から8回、メタサーフェスに関するセミナーを開催する。専門外の方が修士号程度の背景知識を持って企業内で研究開発を進められるようになることを意図している。2020年度から企業からの参加も可能な体制が整い、産業化に向けた動きを加速させている。

参考文献

- [1] K. Endo, M. Sekiya, J. Kim, K. Sato, and T. Suzuki, Appl. Phys. Express 14(8), 082001 (2021).
- [2] 日本特許第6596748号, 米国特許第10686255号
- [3] 鈴木 健仁, 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会, 24p-E201-5, Mar. 2022.
- [4] 鈴木 健仁, 2022年第83回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-C200-8, Sep. 2022.
- [5] J. L. Bower and M. Christensen, p.43-53, Jan.-Feb. 1995.
- [6] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves 38(9), 1130-1139 (2017).
- [7] 大内 隆嗣, 石原 功基, 佐藤 竜也, 富樫 隆久, 鈴木 健仁, 電子情報通信学会論文誌B, vol.J1100-B, no.3, pp.235-244, Mar. 2017.
- [8] T. Suzuki, K. Endo, J. Kim, K. Tsuruda, and M. Sekiya, Opt. Express 29(12), 18988-19000 (2021).
- [9] H. Asada, K. Endo, and T. Suzuki, Opt. Express 29(10), 14513-14524 (2021).
- [10] 浦島 康平, 鈴木 健仁, 信学技報, vol.122, no.352, MWPTH2022-66, pp.47-52, Jan. 2023.
- [11] 宇野 晃生, 浦島 康平, 中田 成央, 朝田 晴美, 鈴木 健仁, テラヘルツ科学の最先端 X, Con-05, 東北大学, Dec. 2023.
- [12] H. Asada and T. Suzuki, Optics Letters, vol.49, no.6, pp.1409-1412, Mar. 2024.
- [13] K. Sato, K. Watai, K. Ishihara, R. Ohuchi, S. Kondoh, T. Sato, and T. Suzuki, Applied Physics A, 2024.
- [14] K. Sato and T. Suzuki, Nanophotonics, Vol.12, no.13, pp.2537-2544, May 2023.
- [15] <https://web.tuat.ac.jp/~suzuki-lab/sangaku.html>

謝辞 応用物理学会優秀論文賞の共同受賞者の遠藤君、関谷君、金様、佐藤君に深く感謝いたします。本研究の一部は、JST創発的研究(JPMJFR2221)、JSPS科研費基盤研究(B)(24K01376)の助成を受けたものである。本研究の一部は、ローム株式会社との共同研究として実施されました。本研究の材料の一部は、住友金属鉱山株式会社から提供されました。研究を推進してくれている研究室の学生、卒業生、スタッフの皆様にも深く感謝いたします。

バビネ相補型メタルメッシュ構造を持つテラヘルツバンドパスフィルタにおけるプラズモニックモード

Plasmonic modes in a terahertz bandpass filter with a Babinet complementary metal mesh structure

上智大理工¹, 宇宙航空研究開発機構²,

量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構³, 国立天文台⁴

(M1)松木 拓人¹, 植田 雅大¹, 和田 想人¹, 渡辺 勇太¹, 大家 拓巳¹

正光 義則³, 鈴木仁研², 和田 武彦⁴, 中岡 俊裕¹

Sophia Univ.¹, ISAS/JAXA², QUP/KEK³, NAOJ⁴

Takuto Matsuki¹, Masahiro Ueda¹, Soto Wada¹, Yuta Watanabe¹, Takumi Oie¹,

Yoshinori Shohmitsu³, Toyooki Suzuki², Takehiko Wada⁴, Toshihiro Nakaoka¹

E-mail: t-matsuki-114@eagle.sophia.ac.jp

はじめに 遠赤外線-サブミリ波長帯 (1 THz-10THz)による天体観測は、宇宙史の解明に欠かせない。本研究グループはテラヘルツ帯に適用するロバストな宇宙望遠鏡用バンドパス光学フィルタとして、Si ベースのバビネ相補型メタルメッシュ構造のフィルタ[Fig.1(a)]を提案した。上部は Au による誘導グリッド, 下部は容量グリッドのメタルメッシュハーフミラーからなり, 主要透過メカニズムはハーフミラー間のファブリペロー(FP)共振である [1]。近年, ファブリペロー共振モードと反交差する Plasmonic hybrid モードの存在を報告した [2]。同モードの存在はフィルタの設計およびファブリペロー共振モードと Plasmonic モードの相互作用の理解に重要である。今回、上部ハーフミラー, 下部ハーフミラーのそれぞれに局在する Plasmonic モードを観測, 同定した。

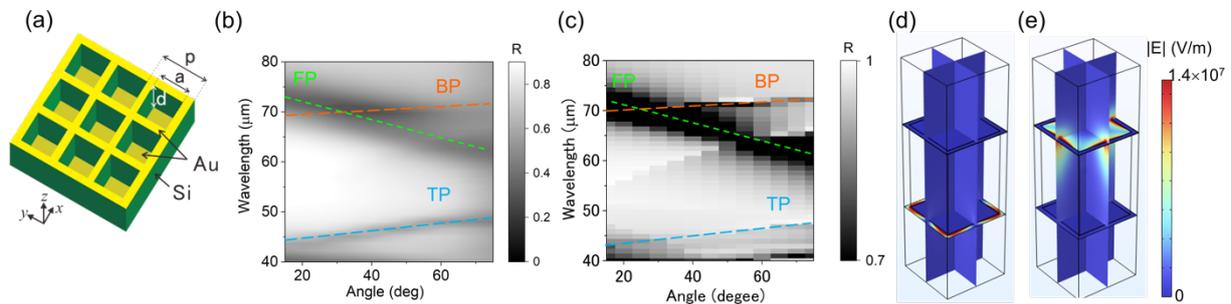


Fig. 1 (a) Schematic of the Babinet structure. Contour plots of (b) measured and (c) simulated reflectivity as a function of incident angle. Fabry-Perot (FP) mode and plasmonic modes localized in the bottom (BP) and top (TP) are indicated by dashed lines. Color plots of electric field intensity $|E|$ for the (d) BP and (e) TP modes. The model structure has a period $p = 15 \mu\text{m}$, side length $a = 13 \mu\text{m}$ and depth $d = 19.5 \mu\text{m}$.

結果 Fig. 1(b)はFT-IR を用いた反射スペクトル角度依存性の等高線プロットであり、カラーバーの値は反射率を表す。ファブリペロー共振モードは入射角 15 度から 75 度の傾斜で波長 $75 \mu\text{m}$ から波長 $60 \mu\text{m}$ へブルーシフトした。TE 偏光で励起される Bottom Plasmonic (BP) モードは波長 $69 \mu\text{m}$ から波長 $72 \mu\text{m}$ へ, TM 偏光で励起される Top Plasmonic (TP)モードは波長 $42 \mu\text{m}$ から波長 $47 \mu\text{m}$ へレッドシフトした。これらのモード分散を 3次元電磁界シミュレーションにて再現した[Fig.1(c)]。電場分布から BP は下部容量グリッドに局在する plasmonic モードであり[Fig.1(d)], TP は上部誘導グリッドに局在する plasmonic モードであることがわかった[Fig.1(e)].

[1] Kasumi Miyata et al., Opt. Express 31, 23507-23517 (2023).

[2] 植田雅大 他, 第 84 回応用物理学会秋期学術講演会 [19a-B203-5].

バビネ相補型メタルメッシュ構造における例外点

Exceptional point in a Babinet complementary metal mesh structure

上智大理工¹, 宇宙航空研究開発機構²,

量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構³, 国立天文台⁴

○(M1) 植田 雅大¹, 松木 拓人¹, 和田 想人¹, 大家拓巳¹, 渡辺勇太¹,

正光 義則³, 鈴木仁研², 和田 武彦⁴, 中岡 俊裕¹

Sophia Univ.¹, ISAS/JAXA², QUP/KEK³, NAOJ⁴

Masahiro Ueda¹, Takuto Matsuki¹, Soto Wada¹, Takumi Oie¹, Yuta Watanabe¹,

Yoshinori Shohmitsu³, Toyooki Suzuki², Takehiko Wada⁴, Toshihiro Nakaoka¹

E-mail: m-ueda-1i7@eagle.sophia.ac.jp

はじめに 遠赤外線-サブミリ波長帯 (1 THz-10 THz)による天体観測は、宇宙史の解明に欠かせない。本研究グループはテラヘルツ帯に適用するロバストな宇宙望遠鏡用バンドパス光学フィルタとして、バビネ相補型メタルメッシュ構造[Fig.1(a)]のフィルタ[1]を研究してきた。主要な透過特性をもたらすファブリペロー共振(FP)モード^[1]に加え、メタルメッシュ部に局在する Plasmonic モードが存在する。今回、電磁界シミュレーションによって、FPモードと、Plasmonicモード間の特異な分散特性を得た。深さ d を 5%変化させるだけで、両モード間の相互作用が交差から例外点を経由して反交差へ変化した。例外点近傍におけるモード変換など興味深い現象が報告されており、本構造が非エルミート光学のプラットフォームになり得ることを報告する。

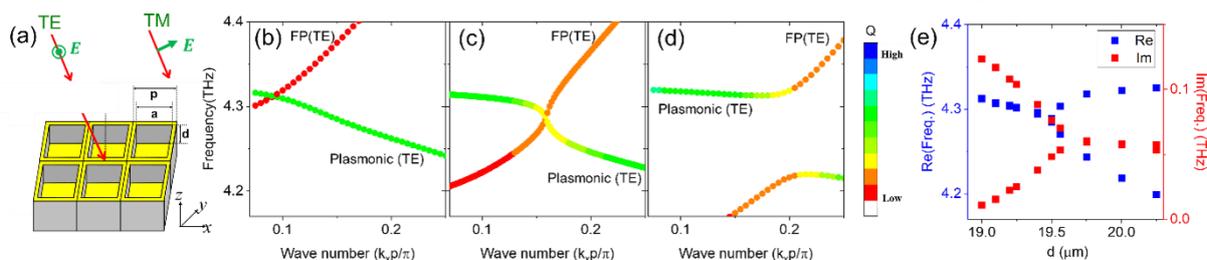


Fig. 1 (a) Schematic of a terahertz filter with Babinet complementary metal mesh structure and incident TM and TE polarized lights. Photonic band structures of Fabry-Perot (FP) and plasmonic modes for the terahertz bandpass filter with period $p=15\mu\text{m}$, side length $a=13\mu\text{m}$, (b) depth $d=19.0 \mu\text{m}$, (c) $d=19.5 \mu\text{m}$ (d) $d=20 \mu\text{m}$. The color of the data points indicates the Q-factor of the modes. (e) Real and imaginary parts of the eigenfrequencies as a function of d .

結果と考察 Fig.1(b)-(d)に周期、穴径を $p=15\mu\text{m}$, $a=13\mu\text{m}$ で固定し、深さ d のみを変化させた際の FPモードと Plasmonicモードに関するフォトニックバンドを示す。 $d=19.0 \mu\text{m}$ で両 TEモードは Q値の変化なく交差するのに対し、 $d=19.5 \mu\text{m}$ では Q値の変化を伴う特異な分散となり、 $d=20 \mu\text{m}$ では Q値の移り変わりを含む反交差となる。Fig.1(e)に示すように、両モードの実部・虚部成分の縮退と対応しており、例外点近傍の振る舞いとして理解できる。講演ではシミュレーションに対応する素子の作製、反射率測定の結果と併せて報告する。

[1] K. Miyata et al., Opt. Express 31, 23507-23517 (2023).

非等方歪モアレ型メタ表面によるテラヘルツ円偏光セクター素子

Terahertz circular polarization selector based on moiré metasurface

with anisotropic distortion

千葉大学¹, 物材機構², 東北大院理³, 千葉大学分子キラリティー研⁴

○(M1)千葉 初奈¹, (M2)代市 拓海¹, (B)折谷 岳¹, 三成 剛生², 大野 誠吾³, 宮本 克彦^{1,4}

Chiba Univ.¹, NIMS², Tohoku Univ.³, Chiba Univ. MCRC⁴

○Uina Chiba¹, Takumi Yoichi¹, Gaku Oritani¹, Takeo Minari², Seigo Ohno³, Katsuhiko Miyamoto^{1,4}

E-mail: k-miyamoto@faculty.chiba-u.jp

われわれは、テラヘルツ周波数領域において新たな光学素子として非等方歪モアレ型メタ表面による円偏光セクターの開発を行っている。モアレ型メタ表面は、バルク構造を必要とせず軽量かつ小型素子が実現できる。周期的な構造同士の干渉パターンであるモアレの特性とメタ表面によって電磁波に独自の変調を付与させることが可能である。本研究では周期構造の一方方向にのみ歪みを加えることで、テラヘルツ円偏光を分離するセクター素子の開発を行った。

異なる格子定数 a をもつ2種類の金属2次元周期構造（格子定数 $a_1 = 51 \mu\text{m}$ 、 $a_2 = 52 \mu\text{m}$ ）を用いて、非等方歪モアレ型メタ表面[1]を作製した。厚み $50 \mu\text{m}$ のゼオノアフィルムシート上に、半径 $11.25 \mu\text{m}$ の銀ディスクを三角格子状にプリントドエレクトロニクス[2]により配列した。図(a)のように三角格子パターンの底辺が平行になるよう2層を重ね、図中 x 方向に対して非等方歪を付加した。 y 方向のずれ Δy の大きさに起因してモアレが形成する局所的な異方性の分布が変化し、 $\Delta y/a = 0.2$ の場合に円偏光異常屈折を示す[3]。これは、円偏光が感じる幾何学的位相が x 方向に徐々に変化することに由来する。

周波数 4.35 THz の円偏光テラヘルツ光を、作製した非等方歪モアレ型メタ表面に入射し回折光の強度を観察した。図(b)中の赤丸および青丸はそれぞれ ± 1 次回折光を示し、横軸はテラヘルツ光の偏光を調整する QWP ($\lambda/4$ 板)の角度である。角度の変化に対応して、 ± 1 次回折光の強度の強弱が交差するような振る舞いを確認した。特に QWP が 320° 付近では右円偏光を入射したことに対応し、その選択性が透過光強度として確認できた。回折光強度が入射光の偏光状態に起因していることから、非等方歪モアレ型メタ表面による円偏光異常屈折の機能を実証することができた。

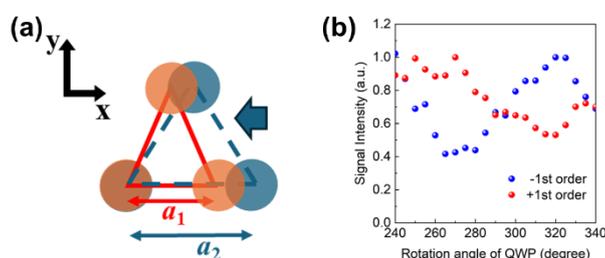


Fig.(a) Anisotropic distortion in x-direction, (b) Signal intensity of ± 1 st-order diffracted beam from moiré metasurface at 4.35 THz depending on the incident polarization.

謝辞 JSPS 科研費(JP22H01980, JP23K17885), JST 創発的研究支援事業 (JPMJFR2036)の支援を受けた。

[1] S. Ohno, Appl. Phys. Lett., 108 251104 (2016).

[2] L. Li, et al., Small, 17 2101754 (2021).

[3]第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 19a P3 8, 2018.3.

テラヘルツ渦干渉計のための中空らせん位相板の作成

Fabrication of hollow spiral plate for terahertz spiral interferometer

○(M1)山口航平¹, 時実悠², 長谷栄治², 安井武史^{1,2}

¹徳島大院創成, ²徳島大 pLED

Kohei Yamaguchi¹, Yu Tokizane², Eiji Hase² and Takeshi Yasui^{1,2}

¹Grad. Sch. Sci. Tech. Innov., Tokushima Univ., ²pLED, Tokushima Univ.,

Email: c612436025@tokushima-u.ac.jp

<http://femto.me.tokushima-u.ac.jp>

光渦位相計測[1-3]は、光渦と呼ばれる螺旋状の波面を有する光を用いた位相計測手法である。平面波を用いた位相計測では物体の凹凸が判別できないが、光渦位相計測ではらせん状干渉縞の回転方向から凹凸を判別できる。また、らせん状干渉縞から物体の高さを定量的に測定可能である。光渦位相計測は従来の位相計測で得られないパラメータを取得可能である一方、可視光領域の測定光を用いるため、光に対して不透明なサンプルへの適用が困難である。光渦位相計測にテラヘルツ(THz)波を用いてTHz渦干渉計を実現すれば、光に対して不透明な試料の渦位相計測が可能となる。本研究はTHz渦干渉計に用いる中空螺旋位相板の作成を目的とする。光渦干渉計ではフーリエ面上で空間フィルタリングとらせん波面変換を行うことで、共軸干渉計による干渉縞を得る。空間位相変調器[1, 2]や中空らせん位相板を用いる手法[3]がある。これらの機能をTHz周波数領域において実現するため、より技術的ハードルの低い中空THzらせん位相板の作成を行なった。3Dプリンタ(キーエンス社製 AGILISTA-3200)を用いて中心に直径1 mmの穴を持つ中空らせん位相板(位相板直径20 mm, 設計周波数0.3 THz, トポロジカルチャージ 1, 段差数 16)を作成した。Fig. 1に設計図を示す。材料にシリコーンゴムと透明樹脂を用いた。テラヘルツ時間分解分光装置を用いて、作成した位相板の位相遅れを0.3 THzにおいて測定した結果をFig. 2に示す。方位角方向に沿った位相が2.77[rad.]から9.01[rad.]まで変化しており、差がおよそ 2π になっていることから0.3 THzの中空らせん位相板が作成できたことがわかる。



Fig. 1 作成した螺旋位相板のCAD設計図(設計周波数 0.3THz, 位相板直径 20 mm)

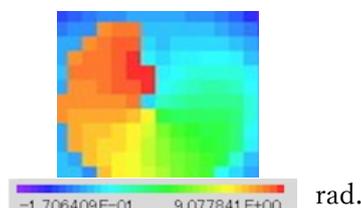


Fig. 2 螺旋位相板の位相シフト分布。

[1] Severin Fürhapter, et al., Opt. Lett. **30**,1953(2005).

[2] Yu Tokizane, et. al., Opt. Lett. **49**, 3516(2024).

[3] X.-C. Yuan, et al., Appl. Phys. Lett. **91**,171116(2007).

シリコン-空気有効媒質を用いたテラヘルツ広帯域旋光子

Broadband Terahertz Polarization Rotator Using Silicon-Air Effective Medium

大阪技術研¹, 阪大基礎工²○山根 秀勝¹, 山田 義春¹, 近藤 裕佑¹, 富士田 誠之², 村上 修一¹ORIST¹, Osaka Univ.²°Hidemasa Yamane¹, Yoshiharu Yamada¹, Yusuke Kondo¹, Masayuki Fujita², Shuichi Murakami¹

E-mail: yamane.hidemasa@orist.jp

テラヘルツ帯域のデバイスは、通信、医療、セキュリティなど多岐にわたる分野での応用が期待され、テラヘルツ波の伝搬制御技術が求められている。我々は、テラヘルツ帯域で吸収損失の小さい高抵抗シリコンのみで作られた有効媒質を用いて、1-2 THz という広い帯域で旋光度がほぼ90度となる旋光子を設計、実証し、その光学特性を解析した。

シリコン基板上に微細な貫通孔を空けたシリコン-空気有効媒質を考える。入射光偏光に対する非対称構造として Fig. 1 に示すような45度傾いた楕円孔の周期配列を採用した。電磁場応答の数値解析により、透過光の旋光度に対する楕円孔の形状や配列周期依存性を解析した。その結果、厚さ200 μm、楕円孔(長軸/短軸 = 90/30 μm)、周期(長軸方向/短軸方向 = 100/95.44 μm)のとき、Fig. 2 に示すように、1-2 THz において旋光度がほぼ90度となる特性を見出した。このときの透過光の無旋光成分と90度旋光成分をそれぞれ Fig. 3 の赤実線、青実線に示す。10kΩcm以上の高抵抗シリコン基板上に、フォトリソグラフィとシリコン深掘りエッチング装置を用いて、数値解析の結果をもとに、楕円孔周期配列を空けて有効媒質を作製した。テラヘルツ時間領域分光により透過光の無旋光成分のスペクトルを取得した結果を Fig. 3 の黒波線で示す。実験結果は数値解析結果によく一致している。

本講演では、シリコン内部の電磁場応答解析による楕円形状および配列周期の依存性や、透過光の楕円偏光制御についても論じる予定である。

本研究は科研費 JP24K00933 の助成を受けて実施された。

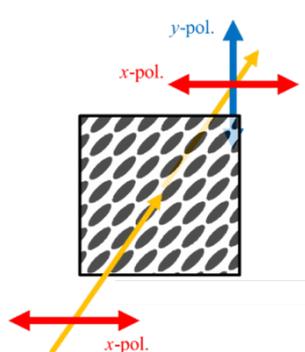


Fig. 1 Polarization rotation for silicon-air effective medium.

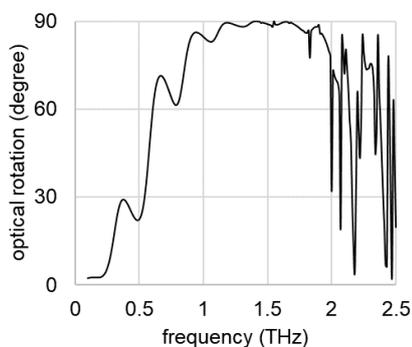


Fig. 2 Calculated polarization rotation spectrum.

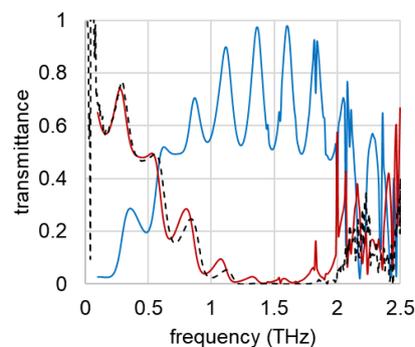


Fig. 3 Transmittance spectra: calculated x-pol. (red solid) and y-pol. (blue solid), experimental result (black dashed).

THz 域における二重 Wire Grid 偏光保持鏡の光学特性解析

Optical property analysis of double Wire Grid polarization preserving mirror in THz region

香川大創造工, °前田 季里, 東原 奈央, 水谷 颯真, 鶴町 徳昭

Kagawa Univ., °Kiri Maeda, Nao Higashihara, Souma Mizutani, and Noriaki Tsurumachi

E-mail: tsurumachi.noriaki@kagawa-u.ac.jp

1. はじめに

近年、円偏光制御デバイスの一つとして円偏光の閉じ込めが可能な光共振器(通称:キラル共振器)が注目を集めている。キラル共振器を構成する鏡には円偏光の掌性を保持する性質が求められ、既に可視域から近赤外域において多様な偏光保持鏡が報告されている^{1,2)}。一方で、我々はこれまでに THz 域を対象に Wire Grid(WG)を鏡とする Fabry-Pérot 共振器にメタ材料を導入した系において、電場または磁場とメタ原子の強結合に起因する基準振動モード分裂を観測している^{3,4)}。同様に、キラル共振器中の円偏光と物質においても強結合状態が可能であると期待されているものの、その研究の多くは理論段階で留まっており、更には THz 域でのキラル共振器および偏光保持鏡の報告はほとんどないのが現状である。以上を踏まえ、本発表では THz 域におけるキラル共振器の実現を最終目的とし、THz 域で動作する偏光保持鏡として二重 WG 構造を提案する。以下では、二重 WG 構造の偏光保持原理と FDTD 法による解析結果について述べる。

2. 設計モデルと動作原理

二重 WG 構造の模式図を Fig.1 に示す。WG は金属細線を周期配列した構造を持つ偏光子であり、細線の長軸方向と平行な偏光(TE 波)を反射し、短軸方向と平行な偏光(TM 波)を透過する性質を持つ。すなわち、WG は TE 波に対する高反射鏡となる。この WG 鏡を直交させ一定間隔を空けた二重構造とすると、Fig.1 の WG1 は y 偏光、WG2 は x 偏光に対する鏡となり、異なる偏光を独立に制御できる。通常の鏡では、両偏光を同時に反射し円偏光の掌性を反転させる。対して、二重 WG 構造では WG 間の距離を $\lambda/4$ (λ は入射波長)だけ離して左円偏光(LCP)を入射すると、一方の偏光だけ光路が往復で $\lambda/2$ 、位相に換算して π 分ずれることになり、入射 LCP の x、y 偏光の位相差を反射後も保持できる。したがって、二重 WG 構造は円偏光の掌性を保持できる偏光保持鏡として動作すると考える。

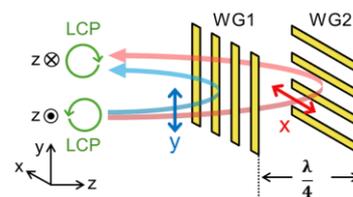


Fig.1: Principle diagram of polarization preserving effect of double WG structure.

3. 結果と考察

二重 WG 構造の反射スペクトルを Fig.2 に示す。Fig.2 の実線 (R_{LL}) は LCP 入射で LCP 反射、破線 (R_{LR}) は LCP 入射で右円偏光(RCP)反射での反射率である。Fig.2 より、1.62THz で R_{LL} が 0.871、 R_{LR} は 0 となり、1.62THz 付近では二重 WG 構造に LCP を入射すると掌性が反転することなく LCP として反射されることが分かる。したがって、特定の周波数において二重 WG 構造が偏光保持鏡として機能することを確認できた。また、1.62THz よりも低周波および高周波側では、 R_{LL} に対し R_{LR} が高くなり掌性の反転が生じた。これは、これらの周波数帯に対応する光が 2 重 WG 構造の偏光保持条件である $\lambda/4$ を満たさないためである。

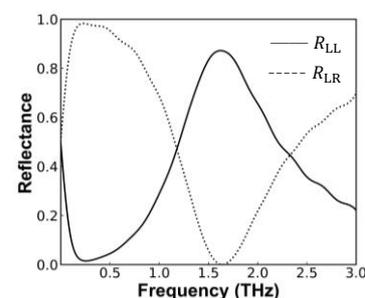


Fig.2: Reflectance spectrum of double WG structure.

参考文献

- 1) K. Voronin *et al.*, *ACS Photonics*, **9**, 2652 (2022).
- 2) W. Ye *et al.*, *Phys. Rev. Appl.* **7**, 054003 (2017).
- 3) D. Nguyenthin *et al.*, *J. Appl. Phys.* **128**, 073102 (2020).
- 4) H. Anzai *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 051702 (2023).

レーザー加工による THz 波位相制御及び反射防止デバイスの開発

Development of THz wave phase control and anti-reflection devices by laser processing

名古屋工業大学¹, 大阪大学レーザー科学研究所²

○(M2)三浦 悠杜¹, Verdad C. Agulto², 馮 時雨², 加藤 康作², 中嶋 誠², 小野 晋吾¹

Nagoya Institute of Technology,¹ Institute of Laser Engineering, Osaka University.²

○Haruto Miura¹, Verdad C. Agulto², Shiyu Feng², Kosaku Kato², Makoto Nakajima², Shingo Ono¹

E-mail: h.miura.473@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

テラヘルツ (THz) 波工学は、近年の光、ナノ技術の発展によって技術革新がもたらされ、注目を集めている。しかし、THz 技術の実用化のためには未だ課題が残されている。THz 波発生・検出素子、レンズなどの光学材料には酸化亜鉛 (ZnO) やシリコン (Si) などの高屈折率半導体が用いられる。そのため、これらの高屈折率材料界面での THz 波の大きな反射損失が問題となっている。そこで、反射率損失低減のため、反射防止構造が望まれる。そこで我々は超短パルスレーザー加工により ZnO 基板表面に反射防止構造であるモスアイ構造の作製を行った。さらに、この微細構造を用いて光学異方性材料を設計し、偏光制御を行ったので、これらについて報告する。

2. 実験内容と結果

フェムト秒レーザー加工により ZnO 基板上に2方向溝の Sample1 と1方向溝の Sample2 の2種類モスアイ構造を作製した。作製したサンプルはテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) を用いて、透過強度の評価を行った。しかし、レーザー加工によって形成された表面欠陥によるテラヘルツ波の吸収が起き、透過強度が減少した[1]。そのため、大気中アニールにより、励起子、亜鉛格子間原子の欠陥を減少させることで透過強度の向上に成功した。作製したサンプルと透過強度の結果を Fig.1 に示す。

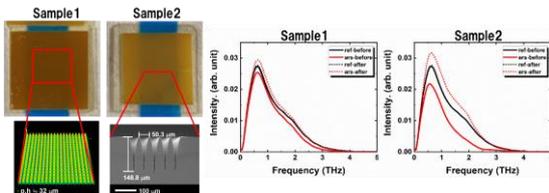


Fig.1 Measured images of Sample 1 and Sample 2 and their transmission intensities before and after annealing.

またモスアイ構造の利点として、他の反射防止構造と比較して広い入射許容角が挙げられる。そこで未加工の ZnO 基板と Sample2 の

入射許容角の比較を行った。それぞれのサンプルの垂直入射の透過率に対して減少量が20%以下となる角度を入射許容角とする。その結果、未加工の ZnO 基板では 30° であったのに対し、Sample2 では 40° となり、モスアイ構造が広い入射許容角を示すことが確認できた。

続いて Sample2 を光学異方性材料として用いた THz 波の偏光制御を行った。1方向溝の Sample2 では入射する偏光方向によって、THz 波に対する実効的な屈折率が異なる。そのためサンプル透過後の THz 波の位相制御が可能である。Fig.2 は、Sample2 透過後の THz 波の水平及び垂直方向の電場の時間波形を示す。溝に対して垂直な直線偏光の $\phi=0^\circ$ では偏光特性に変化はないが、溝に対して 45° の直線偏光の $\phi=45^\circ$ では位相差が生じ、円偏光へと偏光回転が生じている。このように、周期溝構造を用いた屈折率制御により、反射防止性能に加え、THz 波の位相制御を行うことに成功した。

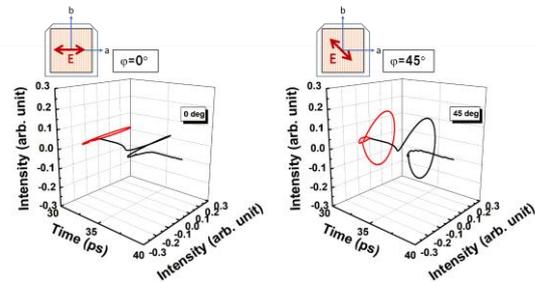


Fig.2 Three-dimensional transmission intensity at $\phi=0^\circ$ and $\phi=45^\circ$.

3. まとめ

本研究は、レーザー加工による波長以下の高精度微細溝構造による実効屈折率制御を行い、表面における屈折率分布によって THz 帯域における高い反射防止特性と入射許容角を実現した。さらに、偏光方向に対して屈折率の異方性を持たせることで THz 波の位相制御が可能であることを示した。

[1] Micromachines 2021,12,596.

テラヘルツ波反射防止用 TiO₂ コーティング Si モスアイ構造

TiO₂ coated Si moth-eye structures for anti-reflection of THz waves

名工大¹, 阪大レーザー研², Czech Academy of Sciences³, Massey Univ.⁴

○(M2)三浦 悠杜¹, Verdad C. Agulto², 加藤 康作², Marilou C. Raduban^{2,4}, 山ノ井 航平²,

中嶋 誠², 前川 覚¹, 糸魚川 文広¹, Jiří Olejníček³, 小野 晋吾¹

Nagoya Institute of Technology¹, Institute of Laser Engineering, Osaka University²,

Czech Academy of Sciences³, Massey University⁴

◦H. Miura¹, V. Agulto², K. Kato², M. Raduban^{2,4}, K. Yamanoi², M. Nakajima², S. Maegawa¹,

F. Itoigawa¹, J. Olejníček³, S. Ono¹

E-mail: h.miura.473@stn.nitech.ac.jp

1. はじめに

近年、テラヘルツ波は幅広い分野での応用が期待されているが、光学材料の界面での大きな反射損失が問題となっている。この反射損失を低減する手法の一つとして、モスアイ構造がある。しかし、モスアイ構造の突起の幅と高さの比(アスペクト比)を大きくすると低反射率を実現できるが、機械的強度が低くなるという欠点がある。そこで我々はモスアイ構造へコーティングを施し、機械的強度を維持しつつ、低周波数側において反射率低減につながる新たな設計を考案した。

2. 実験内容と結果

今回行った実験では、フェムト秒レーザー加工によりシリコン(Si)基板上に2種類の周期的な溝を作製した。この構造にホットホローカソード放電を用いて膜厚の異なる酸化チタン(TiO₂)コーティングを施した。作製したサンプルはテラヘルツ時間領域分光法(THz-TDS)を用いて反射率、透過率の評価を行った。また、各構造についてモデル化し、高周波電磁界解析ソフト(HFSS)を用いて反射率、透過率シミュレーションを行った。シミュレーションモデルとTHz-TDS、HFSSによる反射率と透過率の結果をFig.1に示す。

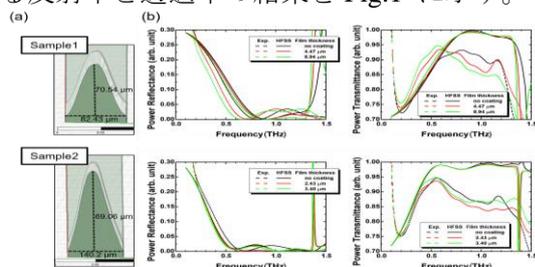


Fig.1 (a) HFSS model with Si moth-eye structure with two types of TiO₂ coatings. (b) Reflectance and transmittance results for Sample1 and Sample2.

今回の計算値、実験値ともに0.5~1THz周辺においてパワー反射率を0付近まで低減することに成功した。また、膜厚を大きくすることで低周波数側でより反射率の低減が確認できた。

次に0.1~1.25THz帯域において同程度のパワー反射率改善を示すTiO₂コーティング有りのSample3とコーティング無しのSample4の機械的強度を比較する。数値解析ソフトウェア(COMSOLの構造力学モジュール)を用いて応力解析を行った。両サンプル共に斜面に対して垂直方向に1MPaの圧力を加えた場合、最も応力集中した箇所のミーゼス応力の評価を行った。その両モデルと計算結果をFig.2に示す。最も応力集中する溝部分のミーゼス応力は、コーティングを施したSample3の方がSample4よりもおよそ0.29倍となることが確認でき、同じ圧力の負荷をかけても応力集中が少ないため、より機械的強度の高いモデルだと言える。

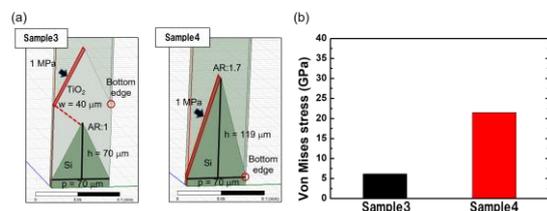


Fig.2 (a) Sample 3 of the moth-eye structure model with TiO₂ coating and sample 4 of the model without coating. (b) Von Mises stress for sample3 and sample4.

3. まとめ

本研究は、モスアイ構造へコーティングを施すことで、機械的強度を維持したまま、低周波数側において高い反射防止特性を示した。

Multi-frequency terahertz quasi-MIM absorber for integrating with thin-film MEMS bolometer

Inst. of Eng., Tokyo Univ. of Agri. & Techno.¹, National Institute of Information and Communications Technology², °Zihao Zhao¹, Kazuho Harada¹, Chao Li¹, Isao Morohashi², and Ya Zhang¹

zhangya@go.tuat.ac.jp

Terahertz (THz) thermal detectors utilizing microelectromechanical systems (MEMS) resonators[1-2] have attracted significant interests owing to their advantages of room-temperature operation, high sensitivity, rapid response, and miniaturization. In such MEMS detectors, a metallic film is typically employed as a THz absorber, but its low absorption coefficient (typically 10-20%) prevents further improvements in the optical sensitivity of MEMS detectors. An alternative, the metal-insulator-metal (MIM) metamaterial based plasmonic absorber, is promising for achieving high THz absorption. However, the MIM absorber generally features a multi-layer structure with a thickness of several micrometers, which is considerably thicker than the thin-film beam structure of MEMS detectors. It is therefore very challenging to integrate MIM absorbers with MEMS detectors.

We present a novel THz absorber with a quasi-MIM structure for improving the THz absorption coefficient of a THz bolometer based on a doubly clamped MEMS beam resonator. The quasi-MIM absorber is formed by etching the silicon substrate to create a groove structure, followed by metallic film deposition on both the etched and non-etched parts of the substrate. The silicon substrate is used as the dielectric structure instead of introducing extra dielectric materials. Consequently, this quasi-MIM structure offers a notable advantage over conventional MIM structures due to its reduced thickness, making it suitable for integration with MEMS bolometers. An example for the geometry design of the quasi-MIM absorber is shown in Fig. 1(a), which is designed for the resonance frequency of 5.1 THz. Fig. 1(b) shows the simulated absorption spectrum when THz wave is incident from the Si substrate of the structure. As seen, the absorber features absorption levels of up to 98%, indicating that our quasi-MIM absorber can work as an almost perfect THz absorber. Furthermore, by composing multiple groove structures in the absorber, we have realized THz absorber of multiple absorption peaks, as shown in Fig. 1(c). These results indicate that the quasi-MIM absorber is promising for realizing both narrow and broad band THz absorbers.

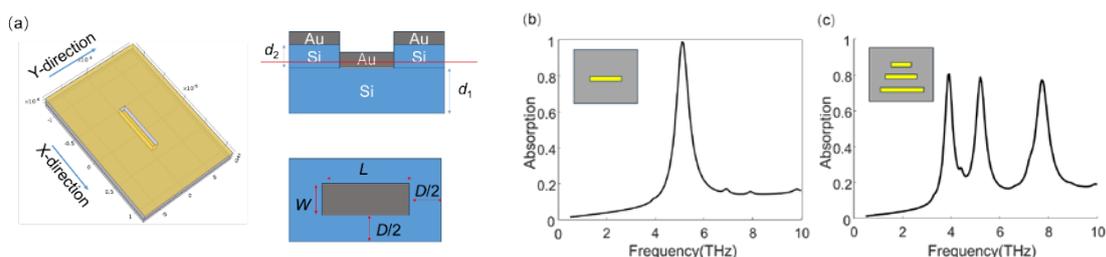


Fig. 1(a) An example of the unit structure of the MIM absorber. The vertical cross-section of the unit structure with $d_1 = 1 \mu\text{m}$ and $d_2 = 1.6 \mu\text{m}$. The top view with $L = 8 \mu\text{m}$, $W = 1 \mu\text{m}$, $D = 16 \mu\text{m}$. (b) The calculated absorption spectrum of the absorber shown in Fig. 1(a). (c) The absorption spectrum of the sample composed of three rectangles grooves with $L = 5 \mu\text{m}$, $8 \mu\text{m}$, $11 \mu\text{m}$.

Reference

- [1] Y. Zhang, Y. Watanabe, S. Hosono, N. Nagai, and K. Hirakawa, Appl. Phys. Lett. 108, 163503 (2016).
- [2] Y. Zhang, S. Hosono, N. Nagai, S.-H. Song, and K. Hirakawa, J. Appl. Phys. 125, 151602 (2019).

Fabrication of terahertz quasi-MIM absorbers for integration with thin-film MEMS bolometers.

農工大工¹, 情報通信研究機構²

Inst. of Eng., Tokyo Univ. of Agri. & Techno.¹, NICT², Kazuho Harada¹, Zihao Zhao¹, Chao Li¹, Isao Morohashi², and Ya Zhang¹

zhangya@go.tuat.ac.jp

Metal-insulator-metal (MIM) metamaterial absorbers [1] are promising for achieving high terahertz (THz) absorption, which is crucial for the development of high sensitivity THz detectors. Here, we have fabricated a quasi-MIM absorber on high-resistivity silicon substrate, for improving the optical sensitivity of a THz detector using a SOI MEMS resonator [2]. The fabrication process is schematically shown in Figure 1(a). The quasi-MIM absorber is formed by etching a high-resistivity silicon substrate by using reaction ion etching (RIE) to form a groove structure. Then we deposit a 200nm-thick Al film on the top surface of the substrate by thermal evaporation, and the etched and unetched parts naturally become two metal layers, forming the MIM structure together with the silicon substrate as the dielectric layer. A short wet etching process is performed for the Al film to completely separate the two Al layers. This structure features a notable advantage that no extra dielectric layers are introduced, thus is very compact, and very easily fabricated on SOI MEMS beam resonator.

Figure 1(b) shows the microscope images of two fabricated quasi-MIM structures (sample A/B). Figure 1(c) shows the reflection (black) and transmission (blue) spectra of a sample A, measured by using a THz time-domain spectroscopy, when THz electromagnetic wave incident from the Si substrate. The reflection of the bottom surface of the silicon substrate has been removed in the data analysis. As seen, the reflection spectrum shows a valley at ~ 1.8 THz, indicating that there is a plasmonic resonance at this frequency. The absorption spectrum (A) is calculated by $A=1-T-R$, which is shown as the red curve in Figure 1(c). As seen, the peak absorption is over 95%, demonstrating the effectiveness of the proposed quasi-MIM structure for achieving a high THz absorption coefficient. The transmission, reflection and absorption spectra of sample B is shown in Figure 1(d). Sample B has the sample design for the resonant pattern, but with a smaller separation between two patterns. As seen, it seems sample B shows two absorption peaks at ~ 1.6 THz and ~ 4 THz, suggesting that the interactions between resonant patterns may play an important role in such structures. These results indicate that the quasi-MIM absorber is promising for realizing both single frequency and multi-frequency THz absorbers.

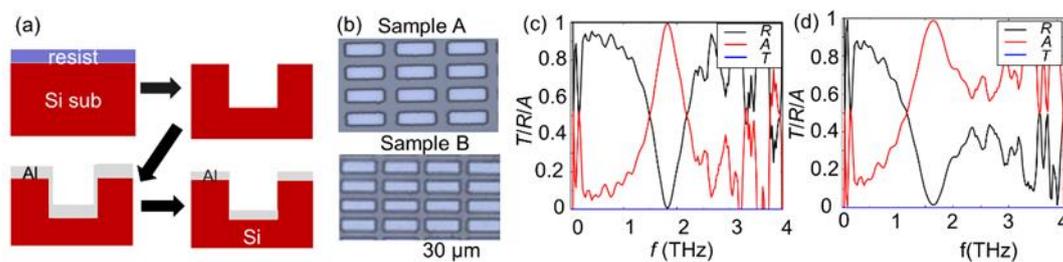


Fig. 1 (a) Schematic fabrication process of quasi-MIM absorber. (b) microscope images of two fabricated quasi-MIM absorbers (sample A/B). (c) Measured reflection (black) and transmission (blue) spectra of the fabricated sample A. The absorption spectrum (red) is calculated from the reflection and transmission spectra. (d) Reflection (black), transmission (blue), and absorption (red) spectra of sample B.

Reference

- [1] J. Zhu, Z. Ma, W. Sun, et al. Appl. Phys. Lett. 105, 021102 (2014).
- [2] K. Ebata, et al., the 71st JSAP Spring Meeting 25a-11E-7 (2024)

サブ波長構造を用いた 10THz 帯 Si GRIN レンズアレイの作製

Fabrication of 10 THz-band Si GRIN lens array with sub-wavelength structure

上智大理工¹, 宇宙航空研究開発機構²

量子場計測システム国際拠点/高エネルギー加速器研究機構³, 国立天文台⁴

○(M1) 和田 想人¹, 松木 拓人¹, 植田 雅大¹, (B) 渡辺 勇太¹, 大家 拓巳¹

中岡 俊裕¹, 鈴木 仁研², 正光 義則³, 和田 武彦⁴

Sophia Univ.¹, ISAS/JAXA², QUP/KEK³, NAOJ⁴

○Soto Wada¹, Takuto Matsuki¹, Masahiro Ueda¹, Yuta Watanabe¹, Takumi Oie¹

Toshihiro Nakaoka¹, Toyoaki Suzuki², Yoshinori Shohmitsu³, Takehiko Wada⁴

E-mail: s-wada-0d5@eagle.sophia.ac.jp

はじめに 中間-遠赤外線波長帯 (~10-200 μm) は、有機物、氷や鉱物などの固体微粒子からの放射が含まれる波長帯であり、赤外線天文学において重要である。波長 30~60 μm 帯は、Si 系検出器と Ge 系検出器の感度の谷間に位置しており、この波長帯における高感度な赤外線検出器の開拓が望まれている。本研究グループは同波長域の冷却サイクルに強くかつ集積化に適した平坦なレンズとしてサブ波長構造による Si 屈折率分布型 (GRIN) レンズを研究してきた[1]。本研究では、暗電流を低減するためサイズ縮小したアレイ型検出素子へ集光するための Si GRIN レンズアレイの作製について報告する。

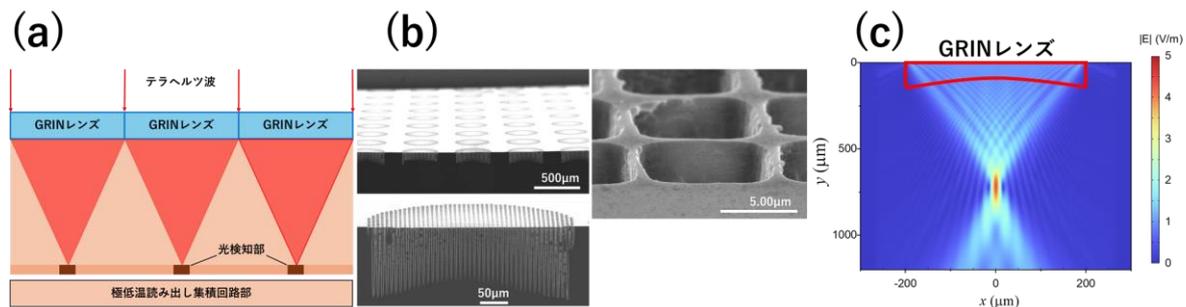


Fig. 1. (a) Schematic view of an IR sensor with GRIN lenses and (b) SEM images of a fabricated GRIN lens array. (c) Simulated spatial distribution of E-field passing through a GRIN lens with geometrical parameters measured from SEM images of (b).

結果と考察 Fig. 1(a)にアレイ型検出器向けの GRIN レンズの模式図を示す。検出器の画素と同じ周期、基板厚み程度の焦点距離を持つ GRIN レンズアレイが求められ、観測中心波長（波長 30~60 μm ）における焦点と入射における電場強度比は重要な性能指標となる。フォトリソグラフィによるパタニングと SF_6 , C_4F_8 を用いたボッシュプロセスにより、高抵抗 Si 基板に四角開口のサブ波長構造を形成した。レンズ中心からの距離の 2 次関数で減少する有効屈折率分布となるようサブ波長構造を配列した。レンズの直径は 400 μm , 周期は 9.0 μm である。作製した GRIN レンズの SEM 写真を Fig. 1(b)に示す。本 SEM 測定に基づく GRIN レンズの構造パラメータを用いた電磁界シミュレーションによる電場分布を Fig. 1(c)に示す。波長 30 μm の光が基板厚み程度である焦点距離 710 μm でフォーカスされ、その電場強度比は約 4 倍となることが期待される。

[1] 鹿島 千晴, 枝 泰希, 豊島 理彩, 塚本 慶人, 宮田 香清, 後藤 優花, 山本 啓太, 正光 義則, 中岡 俊裕, 和田 武彦, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会, 12p-N303-8 (2021).