

スーパーインクジェットプリンタによる作製に向けた 0.3THz 帯コリメートメタレンズの設計

Design of collimating metalens in the 0.3-THz band for fabrication by super-fine ink-jet printer

○浦島 康平¹ 遠藤 孝太² 中尾 春映² 鶴田 一魁⁴ 鈴木 健仁^{3,5*}

Kohei Urashima¹ Kota Endo² Haruaki Nakao² Kazuio Tsuruda⁴ Takehito Suzuki^{3,5*}

東京農工大学 工学部 電気電子工学科¹ 工学府 電気電子工学専攻² 工学研究院 先端電気電子部門³

ローム株式会社⁴ 国立研究開発法人 科学技術振興機構 さきがけ⁵

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering¹, Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering², Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering³, Tokyo University of Agriculture and Technology ROHM Co., Ltd⁴ Japan Science and Technology Agency, PRESTO⁵

1. まえがき

テラヘルツ波帯を活用した第5世代を超える次世代の高速無線通信 (Beyond 5G, 6G)[1]やイメージング技術[2]の実現に向けて、共鳴トンネルダイオード(RTD)[3]などのテラヘルツ波連続発振(CW)光源が充実してきている。これらのCW光源から放射されたテラヘルツ波を制御するための光学コンポーネントとして、これまでに高屈折率かつ低反射なメタサーフェス[4]を用いた、光源からの放射波を平面波に変換する分布屈折率コリメートメタレンズ[5]が報告されている。スーパーインクジェットプリンタ[6]は、数 μm オーダーの描画が可能かつ、繰り返しの試作が容易である。そのため、スーパーインクジェットプリンタを用いてテラヘルツ光学コンポーネントを作製することができれば、光学コンポーネントの設計・作製・実験の流れを速められ、テラヘルツ波帯の産業化を後押しできる。

本稿では、スーパーインクジェットプリンタによる 0.3 THz 帯コリメートメタレンズの作製に向け、これまで銅成膜フィルムをエッチング加工して作製していたコリメートメタレンズ[8]について、銅を銀ナノインク[7]に置き換えて設計した。設計したコリメートメタレンズとエッチング加工で作製したコリメートメタレンズを全構造解析し、性能を評価したので報告する。

2. 0.3 THz 帯コリメートメタレンズの構造

図1に設計した 0.3 THz 帯コリメートメタレンズと RTD を示す。コリメートメタレンズは誘電体基板の両面にカット金属ワイヤーを配置したメタアトムで構成されている。RTD から放射されたテラヘルツ波を平面波に変換するために、メタレンズを通過するテラヘルツ波の光路長が全て等しくなるようメタアトムを配置している。メタレンズと RTD 間の距離は 3 mm とした。比較のため、メタレンズ B[8]の金属部分を、メタレンズ A では銀ナノインク(ハリマ化成グループ株式会社製 NPS-J)にそのまま置き換えた。それ以外のメタレンズ A のパラメータや材料は、メタレンズ B と同じである。表1にメタレンズ A およびメタレンズ B の設計に使用した誘電体と金属、および誘電体と金属間の接着層の有無を示す。誘電体基板にはメタレンズ A と B とともに厚さ 12.5 μm のポリイミド(屈折率 $n = 1.8 + j0.04$ [9])を用いた。メタレンズ B にのみ、カット金属ワイヤーと誘電体基板の間の接着層としてニッケル系合金($\sigma_{\text{Ni}} = 5.0 \times 10^4 \text{ S/m}$)を用いている[8]。図2にドルーデモデルを用いて計算した銅と NPS-J の複素導電率を示す。銅の 0.312 THz における複素導電率は $\sigma_{\text{Cu}} = 5.8 \times 10^7 + j2.8 \times 10^6 \text{ S/m}$ 、銀ナノインク NPS-J の複素導電率は $\sigma_{\text{NPS-J}} = 6.0 \times 10^6 + j2.2 \times 10^6 \text{ S/m}$ [7]である。

3. 0.3 THz 帯コリメートメタレンズの解析結果

2種類の分布屈折率コリメートメタレンズを 0.312 THz で連続発振する RTD に装荷し、解析した。解析には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS を用いた。図3に RTD にメタレンズ A を装荷した場合、メタレンズ B を装荷した場合、RTD 単体の指向性利得を示す。図3(a)に xz 面、(b)に yz 面における指向性利得をそれぞれ示している。RTD 単体の最大の指向性利得を 1 と規格化している。RTD 単体の指向性利得と比較して、メタレンズ A を装荷した場合には 1.59 倍、メタレンズ B を装荷した場合には 1.69 倍の指向性の向上を確認した。銅よりも導電率が低い NPS-J を用いたメタレンズ B でも、RTD から放射された放射波を平面波におおそ変換できている。メタレンズ A では、銅よりも導電率の実部が 1/10 程度低い銀ナノインクを用いているが、メタレンズ B では接着層としてニッケル系合金を有するため、同程度の指向性利得となっていると考えている。図4に周波数を 0.25 THz から 0.35 THz まで変化させたときの指向性利得の変化を示す。周波数が 0.312 THz のときの RTD 単体の指向性利得を 1 と規格化している。メタレンズ A と B は周波数が 0.3 THz のとき、それぞれ 2.47 倍、2.4 倍の指向性の向上を確認した。

4. まとめ

スーパーインクジェットプリンタによる 0.3THz 帯コリメートメタレンズの作製に向けて、金属部分を銀ナノインクに置き換え、全構造解析によりメタレンズの性能を評価した。メタレンズ A を RTD に装荷することで RTD の指向性を 0.312 THz で 1.59 倍に向上できることを解析により確認した。また、周波数解析より銀ナノインクを用いた

メタレンズ A が 0.25 から 0.35 THz で周波数のロバスト性を有していることも確認した。今後、メタレンズ A の最適化設計を行い、スーパーインクジェットプリンタによりメタレンズを作製し、RTD に装荷した指向性の測定を行う。

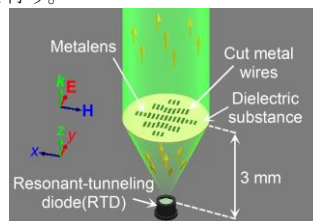


Fig. 1 Collimating metalens mounted on resonant-tunneling diode in the 0.3-THz band.

Table1 Dielectric substance, cut metal wires, and adhesion layer of metalens.

Metalens	Metalens A	Metalens B
Dielectric substance	Polyimide	Polyimide
Cut metal wires	Silver paste ink (NPS-J)	Copper
Adhesive layer	Without	With

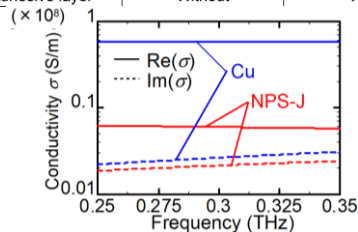


Fig. 2 Real and imaginary parts of complex conductivity for silver paste ink (NPS-J) and copper with the Drude model.

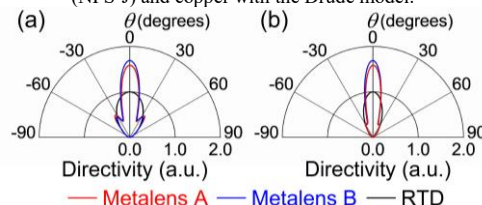


Fig. 3 Simulated directivity of the metalenses A and B mounted on an RTD and a single RTD in the (a) xz - and (b) yz -planes.

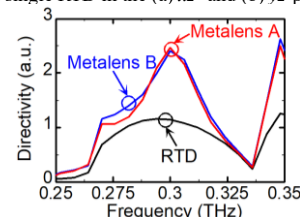


Fig. 4 Simulated frequency characteristics of the directivity for the collimating metalenses A and B mounted on an RTD and a single RTD.

謝辞

本研究の一部は、国立研究開発法人科学技術振興機構さきがけ (JST)(JPMJPR1815)、文部科学省科研費基盤(C)(18K04970)、公益財団法人稲盛財団、公益財団法人加藤科学振興会、公益財団法人池谷科学技術振興財団、公益財団法人東電記念財団、公益財団法人 GMO インターネット財団、公益財団法人野口研究所の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] T. Nagatsuma et al., Nat. Photonics **10**(6), 371-379 (2016).
- [2] D. M. Mittleman, Opt. Express **26**(8), 9417-9431 (2018).
- [3] T. Miyamoto et al., Jpn. J. Appl. Phys. **55**(3), 032201 (2016).
- [4] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared Millim. Te. **38**(9), 1130-1139 (2017).
- [5] T. Suzuki et al., Opt. Express **28**(15), 22165-22178 (2020).
- [6] K. Murata et al., Microsyst. Technol. **12**(1), 2-7 (2005).
- [7] 遠藤 他, 第 80 回応用物理学会秋季学術講演会, 20p-E206-9, 北海道大学 札幌キャンパス (2019).
- [8] K. Takano et al., Appl. Phys. Express **3**(1), 016701 (2010).
- [9] H. Tao et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**(23), 232004 (2008).