

高屈折率低反射なテラヘルツ波帯メタサーフェスの高周波化と実験評価

学籍番号 15257002 氏名 朝田 晴美 指導教員 鈴木 健仁 准教授

1. まえがき

波長以下の構造のメタアトムから構成されるメタサーフェスは、メタアトムの形状と寸法の設計により自然界には存在しない材料特性を実現できる。特に高屈折率低反射なメタサーフェス[1]は、0.3~5.0 THz 帯の室温連続発振テラヘルツ波光源[2,3]に実装可能な高指向性平面アンテナへの応用が進んでいる[4]。高屈折率低反射メタサーフェスの作製では、金属のメタアトムを誘電体基板の表裏の両面に多量に描画する必要がある。スーパーインクジェットプリンタ(SIJ)は微細なメタアトムを、印刷技術により多量に描画できる魅力がある[5]。本稿では、特に SIJ で試作した 3.0 THz 帯高屈折率低反射メタサーフェスの実験評価を報告する[7]。

2. 設計と試作

図 1(a)と(b)は試作した高屈折率低反射なメタサーフェスの写真、(c)と(d)はメタアトムのカットワイヤの写真と構造である。表 1 にパラメータを示す。誘電体基板の表裏に同じ寸法と間隔で配置した金属ペアカットワイヤを有する。表裏で y 軸方向に a ずらしている。解析により 2.92 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 8.0 + j0.4$ 、反射電力 1.2%、透過電力 71.2%を設計した。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。金属の厚さ t は $0.26 \mu\text{m}$ とし、実効屈折率導出時のメタサーフェスの実効的な厚さは $d + 2t = 5.52 \mu\text{m}$ とした。誘電体はポリイミド(屈折率 $1.8 + j0.04$ [6])、金属は銀ナノインク(NPS-J 直流での導電率 $3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$)の値を用いた。試作にはスーパーインクジェットプリンタ(SIJ テクノロジー社製)を用いた。厚さ $5 \mu\text{m}$ のポリイミドフィルムの約 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ の範囲に、表 1 のパラメータのカットワイヤを片面で約 73000 個ずつ、表裏両面に描画した。描画後、銀ナノインク(NPS-J)の導電率向上のため、220 度で 1 時間焼成した。図 1(c)の通り、むらや歪みなどはあるが、ポリイミドフィルムの表裏の両面に金属構造のペアカットワイヤの形状を描画できている。

3. 実験結果と考察

テラヘルツ時間領域分光法(Toptica Photonics 社 Teraflash)により集光系で透過と反射を測定した。周波数分解能は 0.005 THz である。3.0 THz での集光スポット径と焦点深度はそれぞれ、透過実験系では約 0.4 mm と約 2.0 mm 、反射実験系では約 0.7 mm と約 7.9 mm である。3.0 THz でのダイナミックレンジは、透過実験系では 23.3 dB、反射実験系では 4.6 dB である。図 2 は実効屈折率の (a)実部と(b)虚部、(c)反射電力、(d)透過電力である。図 2 のプロット点(●)は実験結果、黒色($-\sigma = 3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$)と青色($-\sigma = 3.3 \times 10^6 \text{ S/m}$)の実線は解析結果である。反射測定でメタサーフェスが入射側の手前から奥に向かって $150 \mu\text{m}$ 盛り上がっていると仮定して反射位相を補正した。実験結果は、3.105 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 7.0 + j1.7$ 、反射電力 0.1%、透過電力 28.6%である。実効屈折率の実験結果(a)と(b)では、エネルギー保存則[1]を満たさない周波数のプロットを除いている。エネルギー保存則[1]を満たさない原因や実験値と解析値の誤差の原因は、実験誤差や試作誤差などが考えられる。透過電力は導電率を $\sigma = 3.3 \times 10^6 \text{ S/m}$ とした解析結果と一致する傾向にあ

る。3.0 THz 帯での銀ナノインクによる金属表面の実効導電率と直流での導電率の差によるものと考えられる。

4. まとめ

3.0 THz 帯で高屈折率低反射なメタサーフェスを設計し、スーパーインクジェットプリンタで試作し、[7]で報告した。実験により、3.105 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 7.0 + j1.7$ 、反射電力 0.1%、透過電力 28.6%を確認した。今回は初期検討としての試作のため、引き続き SIJ を用いた試作、実験評価、拡張構造への展開を進める。

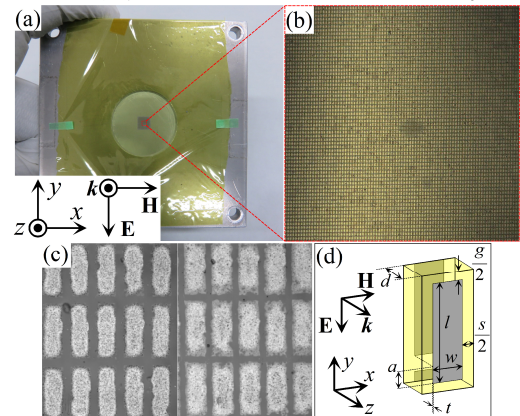
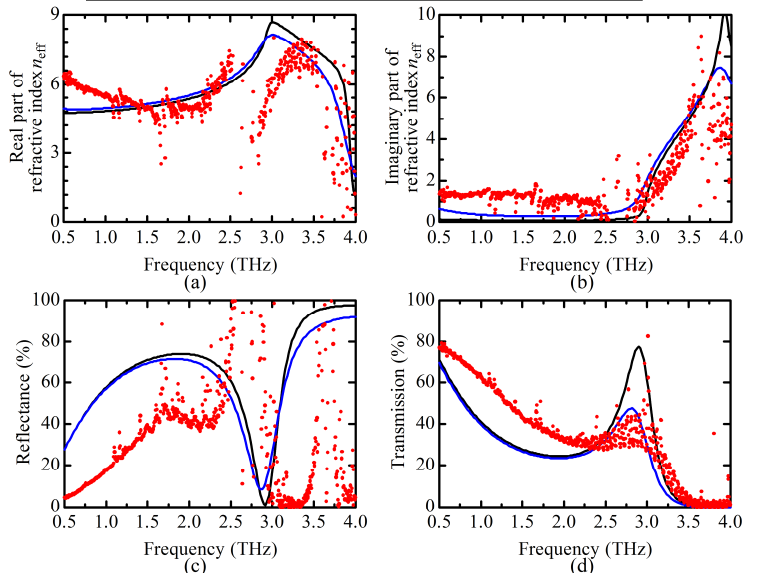


Fig. 1 Photographs of (a), (b) metasurface, and (c) meta-atoms fabricated by super-fine ink-jet printer on both sides of $5 \mu\text{m}$ thick polyimide. (d) A single meta-atom.

Table 1 Parameters of the metasurface.

l	g	w	s	a	d	t
$28.8 \mu\text{m}$	$4.37 \mu\text{m}$	$10.7 \mu\text{m}$	$4.12 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$	$5 \mu\text{m}$	$0.26 \mu\text{m}$



●●●Measurements—Simulations with $\sigma = 3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$ —Simulations with $\sigma = 3.3 \times 10^6 \text{ S/m}$

Fig. 2 Simulations and measurements of (a) real parts and (b) imaginary parts of effective refractive index n_{eff} , (c) reflectance, and (d) transmission for the metasurface.

参考文献

- [1] K. Ishihara and T. Suzuki, J. Infrared. Millim. Te. **38**, 130 (2017).
- [2] T. Maekawa et al., Appl. Phys. Express **9**, 024101 (2016).
- [3] M. Razeghi et al., Opt. Express **23**, 8462 (2015).
- [4] 近藤, 鈴木, 第 65 回春季応用物理学学会学術講演会, 20a-A402-8 (2018).
- [5] K. Takano et al., Appl. Phys. Express **3**, 016701 (2010).
- [6] H. Tao et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **41**, 232004 (2008).
- [7] 朝田, 鈴木, 第 66 回春季応用物理学学会学術講演会, 11p-S421-17 (2019).