

スーパーインクジェットプリンタで試作した 3.0THz 帯高屈折率低反射メタサーフェスの実験評価

Measurements of 3.0-THz band metasurface with high refractive index and low reflection fabricated by super-fine ink-jet printer

○朝田 晴美¹ 鈴木 健仁^{1,2,*}
○Harumi Asada¹ Takehito Suzuki^{1,2,*}

東京農工大学 工学部 電気電子工学科¹ 国立研究開発法人 科学技術振興機構 さきがけ²
Department of Electrical and Electronics Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology¹
Japan Science and Technology Agency, PRESTO²

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を設計することで自然界には存在しない材料特性を実現できる。特に高屈折率無反射なメタサーフェス[1]は、近年報告の相次ぐ 1.0~5.0 THz 帯の室温連続発振テラヘルツ波光源[2]に実装可能な高指向性平面アンテナに応用できる[3]。高屈折率無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[4]。今回は SIJ により高屈折率無反射メタサーフェス[1]を試作し、実験評価したので報告する。

2. 設計と試作

図 1 に高屈折率かつ低反射なメタサーフェス[1]を示す。誘電体基板の表裏に金属の対称ペアカットワイヤを配置した構造である。表 1 は[1]をもとに 3.0 THz 帯で設計したパラメータである。3.0 THz で実効屈折率 $n_{\text{eff}} = 8.1 + j0.9$ 、透過電力 63.6%、反射電力 6.7%を設計した。実効屈折率導出時のメタサーフェスの実効的な厚さは $d + 2t = 5.2 \mu\text{m}$ とした。誘電体はポリイミド(屈折率 $1.8 + j0.04$ [5])、金属は銀ナノインク(NPS-J 導電率 $3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$)の値を用いた。

3. 試作

図 2 に試作したメタサーフェスを示す。表面と裏面のそれぞれに約 79000 個のカットワイヤを描画した。試作はスーパーインクジェットプリンタ(SIJ テクノロジ社製)を用いた。厚さ $5 \mu\text{m}$ のポリイミドフィルムの表裏両面の約 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ 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 2(b)のとおり、むらや短絡箇所などはあるが、おおむねポリイミド両面に対称にペアカットワイヤの形状を描画できている。インク焼成後の銀膜厚 t はおおよそ 140 nm である。3.0 THz の表皮厚は銀ナノインクの導電率より 50 nm である。

4. 実験

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。透過実験系の集光スポット径と焦点深度は 3.0 THz でそれぞれ約 0.1 mm と約 0.3 mm である。図 3 は(a)実効屈折率、(b)透過電力、(c)透過位相である。図 3 のプロット点(●)は実験結果、赤色($\sigma = 3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$)と橙色($\sigma = 6.1 \times 10^6 \text{ S/m}$)の実線は解析結果である。試作した素子が非常に薄いため反射測定が難しく、現状で反射の振幅と位相の正確な実験評価まで至っていない。そのため図 3(a)では実効屈折率は設計値のみ載せている。図 3(b)の透過電力の実験値は 3.0 THz で 28.5%である。導電率を $\sigma = 6.1 \times 10^6 \text{ S/m}$ とした解析結果と一致する傾向にある。3.0 THz での銀ナノインクによる金属表面の実効導電率を測定する必要がある。一方で図 3(c)の通り導電率の傾向によらず、実験と解析での透過位相に大きな誤差がある。これはメタアトムの試作誤差が影響していると考えられる。実験と解析ともに 3.0~3.5 THz で位相遅れが大きくなる傾向は得ている。青の波線はポリイミド単体での位相遅れである。

5. 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た。実験により 3.0 THz で透過電力 28.5%を確認した。現状では実験結果と解析結果に大きな誤差がある。引き続き、実験と設計との誤差要因の

検討を進める。また今回は初回の試作のため、繰り返しの試作が可能な特長を有する SIJ を用いて引き続き試作を進める。

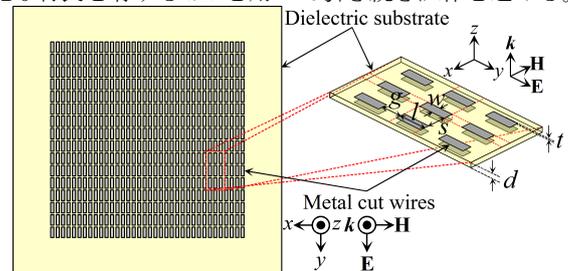


Fig. 1 Metasurface with high refractive index and low reflection.

Table 1 Parameters of the metasurface.

l	$27 \mu\text{m}$	w	$8 \mu\text{m}$	d	$5 \mu\text{m}$
g	$5 \mu\text{m}$	s	$6 \mu\text{m}$	t	100 nm

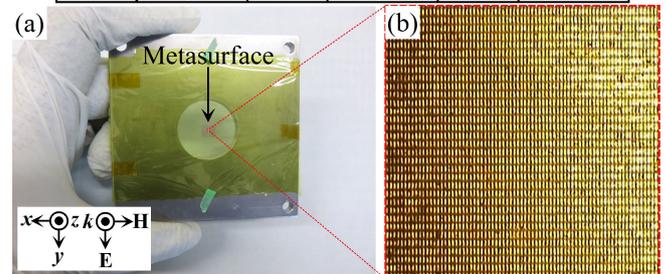
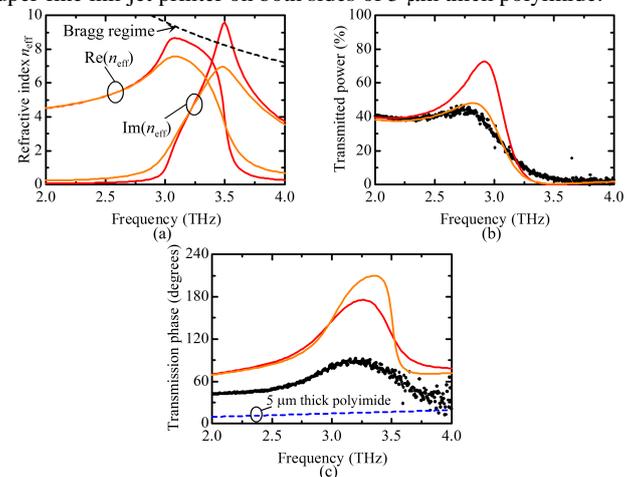


Fig. 2 Photographs of metasurface and meta-atoms fabricated by super-fine ink-jet printer on both sides of $5 \mu\text{m}$ thick polyimide.



●●Measurements — Simulations with $\sigma = 3.3 \times 10^7 \text{ S/m}$ — Simulations with $\sigma = 6.1 \times 10^6 \text{ S/m}$

Fig. 3 Simulations and measurements of (a) effective refractive index n_{eff} , (b) transmitted power and (c) transmission phase.

参考文献

- [1] K. Ishihara and T. Suzuki, *J. Infrared. Millim. Te.* **38**, 1130(2017).
 - [2] M. Razeghi et al., *Opt. Express*, **23**, 8462(2015).
 - [3] 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).
 - [4] K. Takano et al., *Appl. Phys. Express*, **3**, 016701(2010).
 - [5] H. Tao et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 232004(2008).
- 謝辞 本研究を進めるにあたり、実験素子の作製に多大なご協力をいただきました株式会社 SIJ テクノロジの田代直樹様に深く感謝を申し上げます。本研究の一部は、文部科学省科研費基盤(C)(18K04970)、JST さきがけ(JPMJPR1815)、公益財団法人東電記念財団、テレコム先端技術研究支援センター、公益社団法人新化学技術推進協会、公益財団法人精密測定技術振興財団、東京農工大学学長裁量経費(次世代研究支援)の助成を受けたものである。