

熱輻射制御に向けた高屈折率無反射メタサーフェスの設計

Design of reflectionless meta-surface with high refractive index for control of thermal radiation

○朝田 晴美¹ 鈴木 健仁^{1,2,*}

○Harumi Asada¹ Takehito Suzuki^{1,2,*}

東京農工大学 工学府 電気電子工学専攻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, Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology¹
Japan Science and Technology Agency, PRESTO²

1. まえがき

ナノ構造を用いた熱輻射制御は熱マネジメントの新たな手法の1つとして期待されている[1]。熱輻射はプランクの法則により物体の温度で決定されるスペクトルで放射される。例えば2000 Kや500 Kの物体から放射される熱輻射スペクトルは、それぞれ200 THz帯(1.5 μm帯)と50 THz帯(6.0 μm帯)に最大値を有する。もしこれらの周波数帯で動作する高屈折率でありながら、無反射となる材料が実現できれば、熱輻射制御に効果的な材料となりうる。

本稿では、熱輻射制御に向けて高屈折率無反射なメタサーフェスを200 THz帯(1.5 μm帯)で設計し、解析により光学特性を評価した。熱輻射の放射源とは独立して構成できる本メタサーフェスは、既存のシステムを大幅に変更することなく、後から導入する形式で熱輻射を制御できる可能性がある。

2. 設計方法

図1に高屈折率かつ無反射なメタサーフェス[2,3]を示す。誘電体基板の表裏両面に、サブ波長の寸法を有する金属対称ペアカットワイヤを周期的に配置している。この人工構造材料の動作は以下のように等価回路的に説明できる[2,4]。材料の誘電性は片面のカットワイヤのみからなるLC直列共振回路で制御できる。材料の磁性は表裏両面のカットワイヤからなるLC並列回路で制御できる。特に磁性の共振を設計周波数で起こすことで、比誘電率と比透磁率を同値にして、フレネル反射を抑えながら高屈折率な光学特性を設計している。[3]では200 THz帯で両面対称ペアカットワイヤ構造により磁性の共振を起こし、高屈折率無反射な現象が起きることを解析で確認している。しかしながら、誘電体層に真空を代用した作製不可能な構造であったため、本稿では実際の作製を見据えて誘電体基板を考慮した設計結果を示す。

設計には有限要素法電磁界シミュレータ ANSYS 社 HFSS ver. 19 を使用した。金属の複素導電率はドルーデモデルにより式(1)から導出した値を用いた。

$$\sigma = \sigma_0 \left\{ \frac{1}{(2\pi f\tau)^2 + 1} + j \frac{2\pi f\tau}{(2\pi f\tau)^2 + 1} \right\} \quad (1)$$

ここで f は周波数である。今回は金属には銀を用い、直流導電率 σ_0 と緩和時間 τ はそれぞれ $\sigma_0 = 6.1 \times 10^7$ S/m, $\tau = 37$ fsを用いた。また誘電体にはポリイミド[5,6]を用いた。

3. 設計結果

表1にカットワイヤの短辺 w と短辺間の間隔 s 、誘電体基板の厚さ d 、カットワイヤの厚さ t のパラメータを示す。図2にカットワイヤの長辺 l と長辺間の間隔 g をそれぞれ変化させた際の、(a)実効屈折率の実部と(b)反射の等高線図を示す。設計周波数は200 THz(波長1.5 μm)である。×印で示したカットワイヤの長辺 $l = 240$ nm、長辺間の間隔 $g = 100$ nmで、実効屈折率 $4.21 + j0.23$ 、反射6.4%、透過80.3%を設計している。実効屈折率の導出の際、メタサーフェスの実効的な厚さは $d + 2t = 160$ nmとした。

図3に100 THz(波長3.0 μm)から300 THz(波長1.0 μm)までの周波数解析の結果を示す。パラメータは図2の×印のパラメータ(表1および $l = 240$ nm, $g = 100$ nm)である。実線と点線はそれぞれ入射波の偏光の角度 ϕ が0度と90度の場合である。 $\phi = 0$ 度では、図3から200 THz帯で共振による高屈折率かつ無反射な光学特性の設計を確認できる。 $\phi = 90$ 度では共振が起きず、設計したメタサーフェスは偏光特性を有している。本稿では光学特性の実験を見据えて、偏光特性を有するメ

タサーフェスの設計を示したが、無偏光特性な高屈折率無反射メタサーフェスも[7]で示している。

4. まとめ

誘電体基板を考慮した両面対称ペアカットワイヤ構造のメタサーフェスにより、200 THz帯(1.5 μm帯)で高屈折率無反射な人工構造材料を設計した。今後は、材料の選定、作製手法の検討を進め、設計したメタサーフェスを実際に作製し、200 THz帯(1.5 μm帯)での光学特性の実験評価を進める。

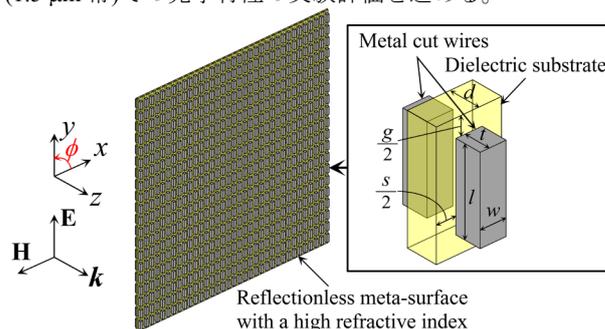


Fig. 1 Reflectionless meta-surface with high refractive index in the 200-THz band.

Table 1 Parameters of the meta-surface.

w [nm]	50	s [nm]	75
d [nm]	60	t [nm]	50

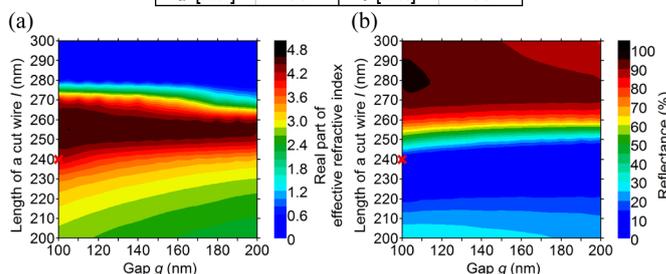


Fig. 2 Simulated counter maps of (a) real part of effective refractive index and (b) reflectance of the designed meta-surface at 200 THz.

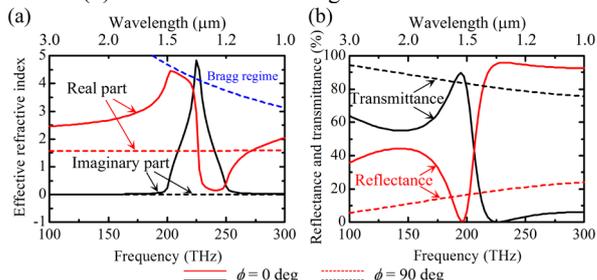


Fig. 3 Simulations of (a) effective refractive index and (b) reflectance and transmittance of the designed meta-surface.

参考文献

- [1] W. Li and S. Fan, *Opt. Express* **26**(12), 15995–16021 (2018).
- [2] K. Ishihara and T. Suzuki, *J. Infrared. Millim. Te.* **38**(9), 1130–1139 (2017).
- [3] T. Suzuki et al., *The 9th International Symposium on Radiative Transfer*, Athens (2019).
- [4] T. Suzuki et al., *Opt. Express* **26**(7), 8314–8324 (2018).
- [5] 福澤, 大西, 長坂, *日本航空宇宙学会論文集* **50**(579), 129–134 (2002).
- [6] Z. M. Zhang et al., *Int. J. Thermophys.* **19**(3), 905–916 (1998).
- [7] 佐藤, 中尾, 鈴木, 第80回秋季応用物理学会学術講演会, 北海道大学 (2019).

謝辞 本研究の一部は、JST さきがけ(JPMJPR1815)、文部科学省科研費基盤(C)(18K04970)、公益財団法人稲盛財団の助成を受けたものである。