

熱輻射の指向性制御に向けた 200THz 帯高屈折率メタサーフェスの設計

Design of a metasurface with high refractive index in the 200-THz band for control of thermal radiation

齊藤 祐希[†] 望月 景太^{**} 朝田 晴美^{***} 鈴木 健仁^{****,*****}

Yuki SAITO[†] Keita MOCHIZUKI^{**} Harumi ASADA^{***} Takehito SUZUKI^{****,*****}

東京農工大学 [†]工学部 知能情報システム工学科 ^{**}工学府 電気電子工学専攻

^{***}工学府 電子情報工学専攻 ^{****}工学研究院 先端電気電子部門 ^{*****}JST 創発研究者

[†]Department of Electrical Engineering and Computer science, ^{**}Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, ^{***}Department of Electronic and Information Engineering, Graduate School of Engineering,

^{****}Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering,

Tokyo University of Agriculture and Technology, ^{*****}FOREST Researcher, Japan Science and Technology Agency

1. まえがき

熱輻射は熱源から常に放射される電磁波である。熱輻射の多くは空气中に排出されたままで利用されていない。熱源を直接加工し、フォトニック結晶を作製することで、熱輻射を制御できることが報告されている[1,2]。熱輻射の指向性制御はサーマルマネジメントやエネルギーハーベスティングなどへ応用できる可能性がある。

テラヘルツ帯で、誘電性と磁性の共振を制御した高屈折率・低反射なメタサーフェスが報告されている[3]。高屈折率・低反射なメタサーフェスを応用したメタレンズアンテナによる、テラヘルツ光源の指向性利得の向上も報告されている[4]。赤外域で高屈折率・低反射なメタサーフェスを実現し、メタレンズアンテナに応用できれば熱輻射の指向性を制御できる可能性がある。

赤外域メタサーフェスは厚さが数 10 nm となり、作製や実験での扱いが困難である。例えば 100 THz 帯では、Si 地板上に金属と誘電体からなる微細な人工構造を周期的に配置して作製を進めている[5]。本稿では、熱輻射の指向性制御に向け、地板による影響を考慮して、地板を有する 200 THz 帯高屈折率・低反射なメタサーフェスを設計したので報告する。

2. 200 THz 帯メタサーフェスの全体構造

図 1(a)、(b)にそれぞれ赤外域で動作する地板ありと地板なしのメタサーフェスの構造を示す。メタサーフェスは金属、誘電体、金属の 3 層正方形パッチを周期的に配置した構造である。金属には Au(200 THz の複素導電率 $\sigma=3.84 \times 10^4 + j1.32 \times 10^6$ S/m)、誘電体には SiO₂(200 THz の屈折率 $n=1.45 + j0.0001$)を用いた。金属と誘電体の間には、接着層として Cr(200 THz の複素導電率 $\sigma=4.23 \times 10^5 + j1.77 \times 10^6$ S/m)を用いた。金属 Au と接着層 Cr の複素導電率はドルーデモデルで算出している。地板には Si(200 THz の屈折率 $n=3.48$)を用いた。

3. 200 THz 帯メタサーフェスの設計

厚さ 100 nm の Si 地板ありのメタサーフェスと地板なしのメタサーフェスの反射率と透過率をそれぞれ比較し、共振周波数の変化について検討した。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。解析から得られた散乱行列より透過率、反射率、実効屈折率を導出している[6]。金属 Au の厚さ t 、誘電体 SiO₂ の厚さ d 、接着層 Cr の厚さ p は、それぞれ $t=20$ nm、 $d=20$ nm、 $p=5$ nm である。正方形パッチ一辺の長さ l と正方形パッチの間隔 s は、それぞれ $l=120$ nm、 $s=20$ nm である。

図 2(a)に地板ありのメタサーフェスと地板なしのメタサーフェスの反射率と透過率の解析結果を示す。図 2(b)に地板なしのメタサーフェスの実効屈折率の解析結果を示す。地板なしのメタサーフェスは 333 THz で実効屈折率 $5.08 + j0.93$ 、反射率 14.3% である。高屈折率で低反射な特性を有することを確認した。誘電体の表と裏に配置された正方形金属パッチにより、誘電性と磁性の共振を制御し、高屈折率・低反射な特性を設計している[3]。地板ありのメタサーフェスは、220 THz 付近で共振が見られる。220 THz で反射率 30% の低反射な特性を確認した。Si 地板がある構造では、地板なしの構造に比べ、約 110 THz 低周波側で共振が見られる。Si の屈折率が真空に比べて高いことで、Si 内での波長は小さくなり、見かけ上の構造の大きさが大きくなるため、共振周波数が低周波側にシフトしたと考えられる。

4. 地板によるメタサーフェスの動作への影響

Si 地板の厚さがメタサーフェスの動作に与える影響を検討した。図 3(a)、(b)にそれぞれ Si 地板の厚さを変えた

場合の反射率と透過率の解析結果を示す。Si 地板の厚さ w は、 $w=100$ nm、200 nm、500 nm、1000 nm とした。図 3(a)、(b)より、地板ありの構造では、地板での多重反射による波の干渉に由来すると考えられる共振が見られる。地板由来の共振によって、メタサーフェスの構造由来の共振が見づらくなっている可能性も考えられる。

5. まとめ

Si 地板を用いた 200 THz 帯高屈折率・低反射メタサーフェスを設計した。厚さ 100 nm の Si 地板ありのメタサーフェスは、地板なしのメタサーフェスに比べ、共振する周波数が低周波側へシフトした。

今後、Si 地板ありのメタサーフェスの実効屈折率を導出する方法の検討を進める。また、200 THz 帯高屈折率・低反射メタサーフェスの作製方法の検討を進める。

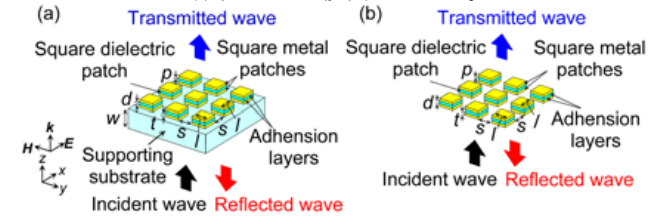


Fig. 1 (a) Metasurface with a supporting substrate and (b) metasurface without a supporting substrate in the infrared region.

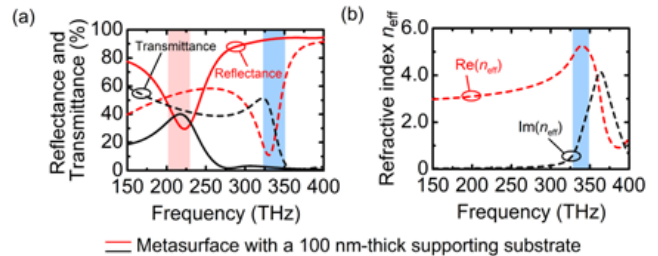


Fig. 2 (a) Simulated frequency characteristics of the reflectance and transmittance of the metasurfaces with a 100 nm-thick supporting substrate and without a supporting substrate. (b) Simulated frequency characteristics of refractive indices of the metasurface without a supporting substrate.

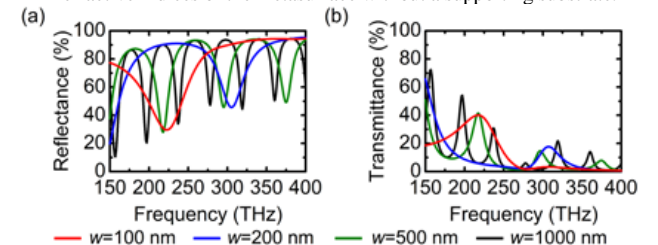


Fig. 3 Simulated frequency characteristics of (a) reflectance and (b) transmittance of metasurface with a supporting substrate with varying thickness w .

謝辞

本研究の一部は、JST 創発的研究支援事業(JPMJFR222I)、JSPS 科研費基盤研究(B)(21H01839)、公益財団法人中部電気利用基礎研究振興財団の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] D. G. Baranov et al., Nat. Mater., vol.18, no.9, pp.920-930, May 2019.
- [2] W. Li et al., Opt. Express, vol.26, no.12, pp.15995-16021, Jun. 2018.
- [3] K. Sato et al., Nanophotonics, vol.12, no.13, pp. 2537-2544, May 2023.
- [4] K. Endo et al., Phys. Express, vol.14, no.8, pp.082001, Jul. 2021.
- [5] 劉 他, テラヘルツ科学の最先端 IX, P-16, フェニックスプラザ, Nov. 2022.
- [6] X. Chen et al., Phys. Rev. vol.70, no.1, pp.016608, Jul. 2004.