

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

基于超材料的光学太阳反射镜的研究

赵颂, 刘昱轩, 张恒, 赵亚丽, 李旭峰

引用本文:

赵颂, 刘昱轩, 张恒, 等. 基于超材料的光学太阳反射镜的研究[J]. 光电工程, 2024, 51(11): 240186.

Zhao S, Liu Y X, Zhang H, et al. Study of optical solar mirrors based on metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240186.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240186>

收稿日期: 2024-08-10; 修改日期: 2024-10-07; 录用日期: 2024-10-08

相关论文

基于相变材料 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ 的可切换边缘检测与聚焦成像超表面

胡杰, 唐紫依, 蓝翔, 邓钦荣, 张汶婷, 黄奕嘉, 李玲

光电工程 2023, 50(8): 220284 doi: [10.12086/oe.2023.220284](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220284)

超表面实现复杂矢量涡旋光束的研究进展

柯岚, 章思梦, 李晨霞, 洪治, 井绪峰

光电工程 2023, 50(8): 230117 doi: [10.12086/oe.2023.230117](https://doi.org/10.12086/oe.2023.230117)

Genetic algorithm assisted meta-atom design for high-performance metasurface optics

Zhenjie Yu, Moxin Li, Zhenyu Xing, Hao Gao, Zeyang Liu, Shiliang Pu, Hui Mao, Hong Cai, Qiang Ma, Wenqi Ren, Jiang Zhu, Cheng Zhang
Opto-Electronic Science 2024, 3(9): 240016 doi: [10.29026/oes.2024.240016](https://doi.org/10.29026/oes.2024.240016)

Miniature tunable Airy beam optical meta-device

Jing Cheng Zhang, Mu Ku Chen, Yubin Fan, Qinmiao Chen, Shufan Chen, Jin Yao, Xiaoyuan Liu, Shumin Xiao, Din Ping Tsai
Opto-Electronic Advances 2024, 7(2): 230171 doi: [10.29026/oea.2024.230171](https://doi.org/10.29026/oea.2024.230171)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



OE_Journal



Website

基于超材料的光学太阳反射镜的研究

赵 颂¹, 刘昱轩¹, 张 恒¹,
赵亚丽^{2*}, 李旭峰^{1*}

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024;

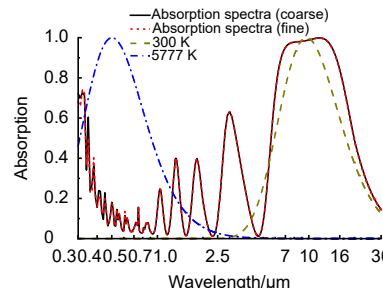
²晋中学院材料科学与工程系, 山西 晋中 030600

摘要: 研究了一种基于超材料的光学太阳反射镜 (optical solar reflector, OSR), 其由掺铝氧化锌 (AZO) 超表面、MgF₂ 介质层和 Ag 金属反射层三层结构组成。在热红外 AZO 超表面激发表面等离子体共振增强电磁吸收, MgF₂ 介质层介电常数的稳定性减少了吸收振荡带来的反射, 在可见光照射下 AZO 超表面和 MgF₂ 介质层的透明特性可降低太阳辐射损耗, Ag 金属反射层可有效抑制透射。仿真结果表明, 优化后的 OSR 在 0.3~2.5 μm 内有 17.6% 的低太阳吸收率, 在 2.5~30.0 μm 内有 86.5% 的高红外发射率。此外, 偏振和入射角度对其性能影响较小。该结构在红外波段实现了较好的吸收, 在红外热成像、辐射制冷等领域也具有潜在应用价值。

关键词: 超材料; 光学太阳反射镜; 表面等离子体共振; 电磁吸收

中图分类号: O436

文献标志码: A



赵颂, 刘昱轩, 张恒, 等. 基于超材料的光学太阳反射镜的研究 [J]. 光电工程, 2024, 51(11): 240186

Zhao S, Liu Y X, Zhang H, et al. Study of optical solar mirrors based on metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240186

Study of optical solar mirrors based on metamaterials

Zhao Song¹, Liu Yuxuan¹, Zhang Heng¹, Zhao Yali^{2*}, Li Xufeng^{1*}

¹College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Department of Materials Science and Engineering, Jinzhong College, Jinzhong, Shanxi 030600, China

Abstract: A metamaterial-based optical solar reflector (OSR) consisting of a three-layer structure of aluminum-doped zinc oxide (AZO) metasurface, a MgF₂ dielectric layer and an Ag metal reflector layer is investigated. In the thermal infrared, the AZO metasurface excites the surface equipartition excitation resonance to enhance the electromagnetic absorption, the stability of the MgF₂ dielectric constant reduces the reflection caused by the absorption oscillations. In the visible light, the transparent properties of AZO and MgF₂ provide the low loss for the solar radiation, and the Ag reflector layer effectively suppresses the transmission. Simulation results show that the optimized OSR has a low solar absorptivity of 17.6% in 0.3~2.5 μm and a high IR emissivity of 86.5% in 2.5~30 μm . In addition, polarization and angle of incidence have a small effect on its performance. The structure achieves good

收稿日期: 2024-08-10; 修回日期: 2024-10-07; 录用日期: 2024-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62105131); 太原科技大学研究生联合培养示范基地项目 (JD2022007); 晋中市科技重点研发项目 (Y201027)

*通信作者: 赵亚丽, yaliz12@163.com; 李旭峰, xfli@tyust.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

absorption in the infrared band and also has potential applications in infrared thermography, radiative cooling, and other fields.

Keywords: metamaterial; optical solar reflector; surface plasmon polariton; electromagnetic absorption

1 引言

光学太阳反射镜 (Optical solar reflector, OSR) 亦称二次表面镜^[1]。OSR 为光谱选择性吸收器, 其对 0.3~2.5 μm 波段的太阳光谱具有低吸收、高反射特性; 对 2.5~30 μm 波段的红外光谱具有较强的吸收 (发射)。OSR 应用于航天器散热器面板的外表面, 用于反射太阳光谱辐射并将散热器面板上的热量以红外形式辐射出去, 保证内部设备在合适的环境温度下正常运行。OSR 在航天器的热控中起着至关重要的作用, 它促进了热管理系统与空间环境之间的能量交换。

传统 OSR 由石英和金属反射层组成^[2], 石英吸收并发射热红外, 底层金属反射太阳光。石英具有优异的光热特性, 且在长期暴露于太空环境后, 仍保持良好的光热特性, 然而石英在处理时容易断裂、且不能应用于弯曲或可弯曲的散热器面板。此外, 石英比重大, 增加了卫星发射成本。石英的替代品是氟树脂-46 薄膜 (F46)^[3-4], 然而氟树脂缺乏石英的光热性能和耐久性, 长时间暴露于紫外线辐射和原子氧环境中会使其变得易碎和不透明。目前我国卫星热控涂层主要是各种涂料型白漆^[5], 可满足航天需求。但白漆孔隙率较大, 容易受到污染导致性能退化, 加上原子氧侵蚀^[6], 会进一步缩短工作寿命, 而随着深空探测的深度和广度不断扩大, 热控材料需要适应新的空间环境, 应对更长的高低温持续时间, 对材料的工作质量和寿命有更高要求。自然界中很难寻找一种兼具太阳光谱低吸收和红外高发射的材料, 因此需要使用由人工设计结构的超表面材料, 该材料可以实现对电磁波偏振、频率、相位和波导模式等的调控^[7-8]。

超表面第一次应用于 OSR 是 2017 年由 Sun 等演示的^[9], 从那时起, 基于超表面的 OSR 理论迅速发展, 并出现了多种材料和图案的超表面结构。2019 年, Yildirim 等设计出一种由 ITO、 SiO_2 和 Al 构成的 OSR, 在 2.5~25 μm 实现了完美的宽带吸收, 红外发射率高达 96.8%, 太阳发射率 17%, 实验未考虑 25~30 μm 波段^[10]。2022 年, Sun 等提出了基于 VO_2 表面的 OSR 结构, 用掺铝氧化锌 (AZO) 代替传统

的金属层反射器, 实现了高透明度, 并且在 5~20 μm 内实现 55%~81% 红外发射率可调^[11], 但 30% 的太阳吸收率限制了其使用。2023 年, Wu 等基于光子晶体 ($\text{VO}_2/\text{BaF}_2/\text{Ag}$) 设计了一种航天器用的智能辐射装置, 实现了 8% 的太阳吸收率和 69% 的红外发射率^[12]。Xiao 等使用算法优化设计的 SiN 、 SiO_2 和 Ta_2O_5 交替结构实现了 11% 的太阳吸收率和 75% 的红外发射率, 但是结构为 3 种材料的 18 层交替组成^[13], 加工难度较大。Gaspari 等开发了一种智能 OSR, 该 OSR 具有随温度变化的红外发射率, 但太阳吸收率仅为 0.24, 仍需改进^[14]。

目前, 大多数研究主要集中在单独增强红外发射率或者降低太阳吸收率, 因为材料的红外发射率和太阳吸收率往往受到其物理性质和光谱特性的共同影响, 在提高红外发射率的时候也会提高太阳吸收率, 这对 OSR 性能是不利的。因此研究人员往往选择集中力量攻克其中一个难题, 以期望在某一性能方面取得突破。而本文同时考虑两种性能, 设计了一种由 AZO 超表面, MgF_2 介质层和 Ag 金属反射层构建的 OSR, AZO 超表面和 MgF_2 介质层的透明特性减少了可见光吸收, 降低了太阳吸收率。大多数材料在中红外波段由于复杂的介电常数, 如 SiO_2 在 10 μm 和 20 μm 处的介电常数有很大变化, 这种变化带来的强色散, 在光谱吸收中显示出强烈的曲线扰动, 在波谷位置带来额外的反射, 导致红外发射率降低; 而 MgF_2 介质层在红外波段介电常数的稳定性不会影响它作为 $\lambda/4$ 间隔物的干涉条件, 吸收带宽且稳定, 保证了较高的红外发射率。优化后的 OSR 实现了在紫外到近红外为 17.6% 的低太阳吸收率, 在热红外波段有 86.5% 的红外发射率。此外, 该结构在红外波段有着优异的吸收带宽, 在大气红外窗口 (8~14 μm) 有 96% 的平均吸收率, 在红外热成像、辐射制冷、能量收集^[15]等领域也具有潜在应用价值。

2 结构设计与计算方法

本文研究的 OSR 由 AZO 超表面, MgF_2 介质层和 Ag 金属反射层三层结构组成, 见图 1 所示。AZO

具备显著的红外局域特性^[16], 在紫外和可见光范围内表现为良好的介质特性, 在红外范围内显示出金属特性, 可以用来激发表面等离子体共振。AZO 超表面为正方形对称结构, 可让任意偏振方向的入射电磁波产生谐振, 减少极化敏感性。MgF₂ 在紫外到近红外内表现出高透明性, 化学性质稳定, 耐高温, 可以选为介质层材料。介质层对上表面透射波和底层反射波进行相位差调控, 产生相干相消增强吸收^[17], 该层类似于 $\lambda/4$ 间隔物。底层反射层为 Ag, 以保证反射太阳光。该结构在实际制备中可使用微纳加工手段获得, 流程简述: 使用光刻技术自下而上溅射沉积特定厚度的 Ag、MgF₂ 薄膜, 然后将光刻胶掩膜压印到 MgF₂ 表面, 在合适温度下进行 AZO 超表面生长, 高温真空处理, 退火。样品可用椭圆偏振仪和红外光谱仪进行参数测试。等离子体共振波长与结构尺寸、形状和周期等高度相关, 因此需要研究这些参数对 OSR 性能的影响。

图 1 中 l 为 AZO 超表面边长, p 为单元结构周期, h_1 为 AZO 超表面厚度, h_2 为介质层厚度, h_3 为金属反射层厚度, 为了更好地反射太阳辐射, 该层厚度应该远大于趋肤深度, 此处设为 100 nm。其中 MgF₂ 折射率设为 1.42, Ag 折射率采用文献 [18] 实验值, AZO 折射率采用文献 [19] 实验值。

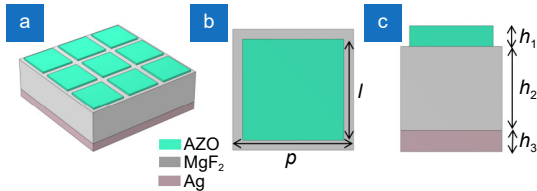


图 1 太阳反射镜结构图。(a) 阵列图; (b) 单个单元俯视图; (c) 单个单元侧视图

Fig. 1 Structure of the optical solar reflector. (a) Array graph; (b) Top view of individual unit; (c) Side view of individual unit

本文使用有限元分析软件 Comsol 进行研究, 用 0.3~30 μm 的平面波光源沿 z 轴传播, x 、 y 方向设为周期性边界条件, z 方向增加完美匹配层。基于实验室计算机算力有限, 网格在材料交界面附近细化, 介质层中间粗化, 最大单元网格大小为 $\lambda/5$ 。

计算得到了该 OSR 对 0.3~30 μm 波长光谱吸收率 $A(\lambda)$ 的相关数值, 根据基尔霍夫定律, 结合光谱辐射分布式 (1), 使用式 (2) 加权计算后得到 0.3~2.5 μm 范围的太阳吸收率 α 以及 2.5~30 μm 的红外发射率 ε 。

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (1)$$

$$\alpha, \varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda) B(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, T) d\lambda}, \quad (2)$$

其中: B 为黑体辐射能量密度, λ 为波长, T 为黑体温度, 普朗克常数 $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s, 光速 $c = 2.998 \times 10^8$ m/s, 玻尔兹曼常数 $k = 1.380649 \times 10^{-23}$ J/K, 太阳吸收率 α 使用太阳表面温度 $T = 5777$ K 时的黑体辐射, 并将积分限制为 $\lambda_1 = 300$ nm 和 $\lambda_2 = 2500$ nm。热红外发射率 ε 使用室温 $T = 300$ K 时的黑体辐射, $\lambda_1 = 2.5$ μm , $\lambda_2 = 30$ μm 。式 (1) 表示黑体辐射谱分布^[20], 式 (2) 表示 OSR 的电磁波吸收对黑体辐射加权^[9]。

3 结果和讨论

3.1 超表面周期对吸收的影响

为了探究超材料 OSR 的吸收机理, 研究了在入射光为横电 (TE) 模式下, AZO 超表面 $l=1.1$ μm , MgF₂ 介质层 $h_2=1.6$ μm , 金属反射层 $h_3=0.1$ μm 时, 周期 p 分别为 1.1 μm 、1.3 μm 和 1.5 μm 时的光谱吸收曲线, 并得到不同波长处的电场能量分布图。

图 2 中为了方便与吸收光谱进行比较, 300 K 和 5777 K 时的黑体辐射密度分布图做了归一化处理。从中可看出在 300 K 时黑体辐射能量密度分布中心波长为 10 μm , 5777 K 时黑体辐射能量密度分布中心波长为 0.5 μm 。此外, 使用粗化和细化两种网格对吸收光谱进行仿真, 为保证精度, 两种网格均满足最大网格单元大小为 $\lambda/5$ 的条件。介质层体积较大, 粗化网格中将介质层中间部分网格粗化, 以减少仿真时间和内存压力。仿真结果显示粗化和细化的曲线重合, 说明粗化网格已达到收敛条件, 满足精度要求, 全文使用粗化网格进行研究。

图 3 为 AZO 超表面在不同周期时 OSR 的电磁波吸收曲线, 图 4 分别展示了对应结构 OSR 在 8 μm 和 15 μm 电磁波时的电场模分布图。图 3 中 OSR 吸收光谱在紫外光到近红外范围 (0.3~2.5 μm) 大多表现为低吸收率和多条法布里-珀罗条纹^[21-22], 在 0.35 μm 处有 0.67 的吸收率, 这是因为 Ag 在 0.35 μm 波长附近具有带隙, 从而增加了紫外吸收, 但 Ag 在可见光范围内仍具有很高的平均反射率, 且紫外波段的能量

占比较小, 该处吸收不会对 OSR 性能造成太大的影响。

图 3 中 $p=1.1 \mu\text{m}$ 时曲线在 $8 \mu\text{m}$ 处有 1 个吸收峰, 之后吸收快速下降; $p=1.3 \mu\text{m}$ 时吸收在 $15 \mu\text{m}$ 开始降低, 因此选择这两个波长处的电场分布进行分析。图 4(a, b, d, e) 可以明显观察到电场增强区域主要集中在顶层周期性图案的边缘, 原因是在入射电磁波的作用下, 超表面微细结构激发了表面等离激元, 共振耦合进一步激发局域表面等离激元共振, 强电场将能量限制在边缘处^[23-24], 从而增强了吸收, 在光谱吸收上表现为图 3 中 $8 \sim 15 \mu\text{m}$ 的吸收带宽。图 4(b, e) 边缘电场强度没有图 4(a, d) 中的电场强度大, 激发的表面等离激元强度相对较弱。在 $p=1.1 \mu\text{m}$ 时 AZO 超表面

的边长 l 与单元结构周期 p 相等, 此时 OSR 顶层由超表面微细结构变为平面薄膜, 对应于图 4(c, f), 这种结构电场能量分布在整个平面, 没有激发表面等离激元效应, 吸收更多依赖于材料对电磁波的损耗。相比于 $p=l=1.1 \mu\text{m}$ 的结构, 在 $p=1.3 \mu\text{m}$ 时吸收带宽增加了 $8 \mu\text{m}$, 周期继续增加到 $1.5 \mu\text{m}$ 时带宽变窄了 $3 \mu\text{m}$, 峰值降低了 0.05, 因此本文周期使用 $1.3 \mu\text{m}$ 。

3.2 超表面结构尺寸对吸收的影响

在周期 $p=1.3 \mu\text{m}$, 其它参数不变的条件下, 采用有限元分析软件对 AZO 超表面结构尺寸进行仿真, 分析尺寸对光谱吸收率的影响, 仿真结果如图 5 所示。

从图 5 可看出超表面的谐振波长处于红外波段, 在 $7 \sim 20 \mu\text{m}$ 时有很高的吸收, 紫外到近红外的光谱吸

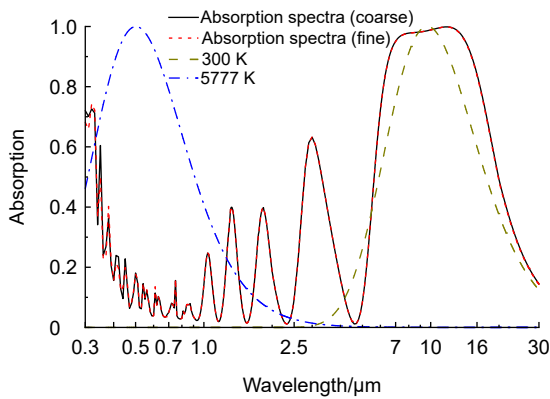


图 2 AZO 超表面 OSR 的光谱吸收和 300 K、5777 K 时黑体辐射密度分布

Fig. 2 Spectral absorption of OSR on the AZO metasurface and blackbody radiation density distributions at 300 K and 5777 K

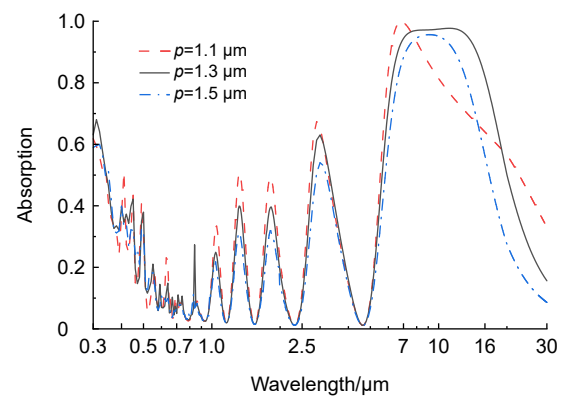


图 3 AZO 超表面周期 p 分别为 $1.1 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 和 $1.5 \mu\text{m}$ 时 OSR 的光谱吸收曲线

Fig. 3 Spectral absorption curves of OSR for the AZO metasurface period p of $1.1 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$, and $1.5 \mu\text{m}$, respectively

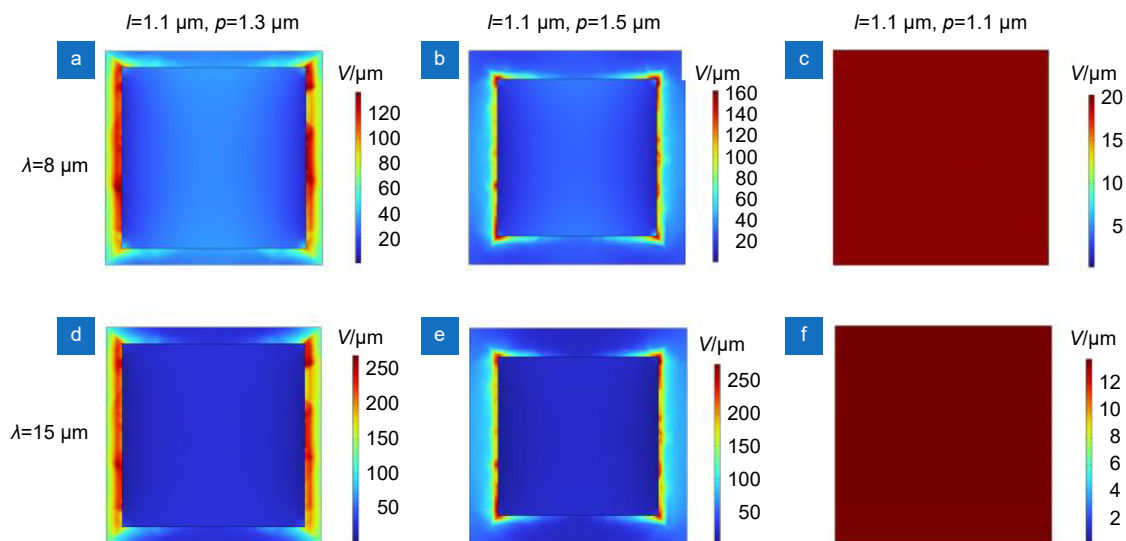


图 4 AZO 超表面在不同特征尺寸时 OSR 的电场分布

Fig. 4 Electric field distributions of OSR at different feature scales for AZO metasurfaces

收变化和图 3 类似。红外范围内, 在超表面的边长 l 增大过程中, 间隙 $u=p-l$ 变小, 吸收峰带宽逐渐变宽, 中心波长红移。 $u=0 \mu\text{m}$ 时不激发表面等离子元共振, 吸收峰中心波长 $6.5 \mu\text{m}$, 带宽只有 $2 \mu\text{m}$; $u=0.05 \mu\text{m}$ 时, 吸收峰在 $6\sim 20 \mu\text{m}$, 带宽为 $14 \mu\text{m}$, 在 $6.5 \mu\text{m}$ 时吸收率几乎达到 100% , 但 $10\sim 20 \mu\text{m}$ 波段的吸收峰降为 0.9 ; $u=0.1 \mu\text{m}$ 时, 带宽为 $10 \mu\text{m}$, 带宽虽然变窄, 但是峰值增加为 0.95 ; $u=0.2 \mu\text{m}$ 时, 中心波长为 $11 \mu\text{m}$, 带宽 $8 \mu\text{m}$, 整个吸收峰都保持 0.98 的吸收率。综合可得超表面边长对 OSR 吸收特性影响较大, 这是由于局域表面等离子元共振会将电磁场能量聚集在耦合结构的间隙中, 边长变小导致过大的间隙宽度, 共振减弱, 吸收率降低。OSR 底层结构会将电磁波完全反射回结构, 不会产生透射光, 因此反射特性与吸收特性成反比。

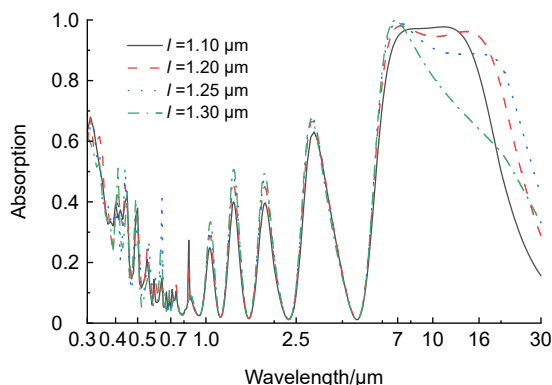


图 5 尺寸 l 分别为 $1.1 \mu\text{m}$ 、 $1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.25 \mu\text{m}$ 、 $1.3 \mu\text{m}$ 时结构的吸收光谱

Fig. 5 Absorption spectra of the structure at dimensions of $l = 1.1 \mu\text{m}$, $1.2 \mu\text{m}$, $1.25 \mu\text{m}$, and $1.3 \mu\text{m}$, respectively

表 1 为超表面在不同尺寸情况下的太阳吸收率 (α) 和红外发射率 (ε) 以及吸收发射比 (α/ε), 表中数据为图 5 吸收光谱利用式 (2) 加权计算所得。

表 1 超表面在不同尺寸下的吸收率 α 、发射率 ε 和吸收发射比 α/ε

Table 1 Absorption rate α , emission rate ε , and absorption-to-emission α/ε of the metasurface for different size cases

$l/\mu\text{m}$	α	ε	α/ε
1.10	0.177	0.772	0.229
1.20	0.187	0.847	0.221
1.25	0.191	0.844	0.227
1.30	0.182	0.695	0.262

在 $l \neq p$ (即间隙宽度不为 0) 时, l 增大, α 和 ε 都增大, ε 增大有利于 OSR 热量发射, 但 α 增大会导致 OSR 对热量的吸收增加, 此时需要考虑 α/ε , α/ε

越小越有利于航天器的降温, 所以优化后的 OSR 使用 $l=1.2 \mu\text{m}$, $p=1.3 \mu\text{m}$ 。

3.3 中介质层对吸收的影响

中介质层主要作用被设计为对 AZO 表面的透射光和底层反射光进行相消干涉和材料自身的本征吸收。然而, 由于红外光中材料常见的复介电常数变化, 最佳介质层厚度通常会变化。所以为了达到更好的吸收效果, 探究一个合适的介质层厚度是有必要的。

图 6 展示了超材料 OSR 在不同介质层厚度时的吸收光谱, 随着介质层厚度增加, 有效光程增加, 使得电磁波干涉条件改变, 吸收光谱出现红移, 且吸收峰中下凹趋势消失。 $h_2=1.2 \mu\text{m}$ 时, 中心波长在 $8 \mu\text{m}$; $h_2=1.4 \mu\text{m}$ 时, 吸收峰红移, 中心波长 $9 \mu\text{m}$; $h_2=1.6 \mu\text{m}$ 、 $1.8 \mu\text{m}$ 时, 中心波长分别为 $10 \mu\text{m}$ 和 $11 \mu\text{m}$, 吸收峰值分别下降了 0.1 和 0.2 。AZO 超表面在红外范围内表现为金属特性, 介质层变厚使上下层金属的谐振强度减弱, 吸收峰降低, 但是介质层厚度的增加会引入更多的反射和干涉路径, 谐振频率增大, 谐振波段变长, 吸收带宽增加了 $2 \mu\text{m}$ 。由式 (1) 的黑体辐射分布可知, 在 $T=300 \text{ K}$ 时黑体辐射能量中心波长为 $10 \mu\text{m}$, OSR 电磁吸收峰范围与黑体辐射光谱重叠率越高, 红外发射率就越大。

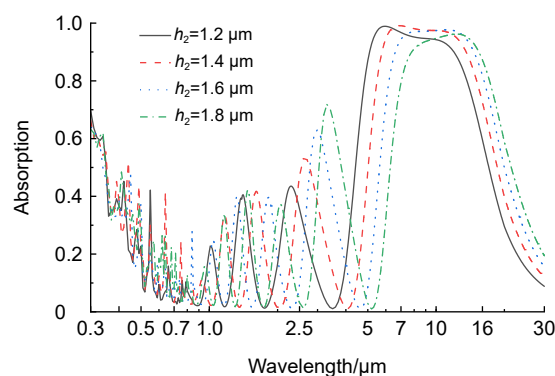


图 6 介质层厚度分别为 $1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.4 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 、 $1.8 \mu\text{m}$ 的吸收光谱

Fig. 6 Absorption spectra of dielectric-layer thicknesses of $1.2 \mu\text{m}$, $1.4 \mu\text{m}$, $1.6 \mu\text{m}$, and $1.8 \mu\text{m}$, respectively

表 2 给出了不同厚度对应的吸收比和发射比, $h_2=1.6 \mu\text{m}$ 时红外吸收峰的中心波长与 300 K 黑体辐射密度分布的中心波长一致, 可以获得最大发射比, 计算后吸收发射比 α/ε 也最小, 因此优化后的结构选择 $h_2=1.6 \mu\text{m}$ 。目前航天器用来散热的热控涂层厚度在 $200 \mu\text{m}$ 以上, 而超材料 OSR 整体厚度不超过 $2 \mu\text{m}$ 即可满足相同的功能, 具有很大的潜力。

3.4 偏振和入射角度对吸收的影响

探究不同入射角和不同偏振模式对 OSR 吸收影响具有必要性, 因此本文在其他参数一致的条件下仿真了以 TE 波和 TM 波入射时的吸收光谱以及从 0°到 60°入射的吸收光谱。

图 7 为 TE 波和 TM 波正入射时的电磁波吸收曲线, OSR 在 TE 偏振和 TM 偏振入射电磁波下的吸收光谱基本一致, 这是因为顶层的超表面图案具有高度对称性, 能有效改善结构对偏振的敏感性。

图 8 和图 9 分别为 TE 偏振和 TM 偏振入射时, 入射角从 0°至 75°的吸收光谱, 其对应的 α 和 ε 如表 3、表 4 所示, 入射角在 45°之前 OSR 基本保持良

好性能, 当入射角继续增加到 60°时, 吸收峰值降低了 0.15, 这种变化可以归因于随着角度增加, 超表面有效工作尺寸发生了变化, 同时也引起了阻抗变化, 发生一定的阻抗失配, 造成吸收降低, 红外发射率降低了 0.24。由朗伯余弦定律可知^[9], 辐射照度 E 在斜入射时变为 $E \cos\theta$, 随角度增加而降低, 在 60°时太阳辐射能量会缩减为原来的一半, 此时 OSR 吸收到的热量减少, 温度降低, 对散热性能 ε 的要求会相对降低。在入射角为 75°时, 太阳吸收率大幅降低, 有利于 OSR 性能, 但红外发射率也降低了一半, 这对散热性能是个挑战, 还需继续优化。

表 2 不同介质层厚度对应的吸收发射比 α/ε

Table 2 Absorption-to-emission ratios for different dielectric-layer thicknesses

$h_2/\mu\text{m}$	1.2	1.4	1.6	1.8
α	0.171	0.186	0.176	0.196
ε	0.803	0.854	0.865	0.841
α/ε	0.213	0.218	0.204	0.233

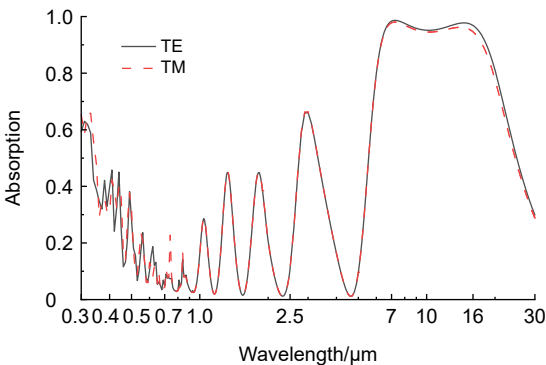


图 7 正入射时 TE 偏振和 TM 偏振对应的吸收光谱
Fig. 7 Absorption spectra corresponding to TE polarization and TM polarization at normal incidence

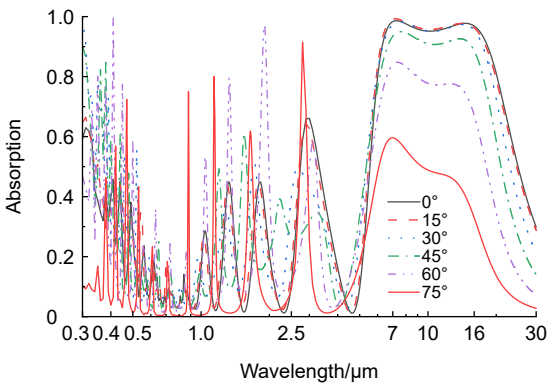


图 8 TE 偏振时不同入射角的吸收光谱
Fig. 8 Absorption spectra at different angles of incidence for TE polarization

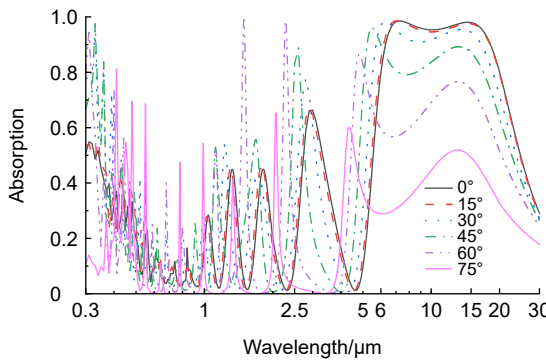


图 9 TM 偏振时不同入射角的吸收光谱
Fig. 9 Absorption spectra at different angles of incidence for TM polarization

表 3 TE 偏振时不同入射角的吸收率 α 和发射率 ε

Table 3 Absorption rate α and emission rate ε for different angles of incidence at TE polarization

Angle/°	α	ε
0	0.176	0.865
15	0.191	0.861
30	0.203	0.839
45	0.204	0.775
60	0.210	0.624
75	0.096	0.367

表 4 TM 偏振时不同入射角的吸收率 α 和发射率 ε

Table 4 Absorption rate α and emission rate ε for different angles of incidence at TM polarization

Angle/ $^{\circ}$	α	ε
0	0.174	0.865
15	0.183	0.858
30	0.191	0.830
45	0.198	0.761
60	0.213	0.625
75	0.107	0.398

4 结 论

本文展示了一种基于超表面设计的 OSR, 其反射太阳辐射并在室温下强烈发射热量。利用表面等离子激元原理和有限元分析法, 实现了在 0.3~2.5 μm 内 17.6% 的太阳吸收率, 2.5~30 μm 内 86.5% 的红外发射率。通过对超表面尺寸/介质层厚度等模拟分析, 得到 OSR 在中红外波段有较长的平稳吸收带宽, 与通常使用的 SiO_2 等介质层相比, MgF_2 稳定的介电常数, 使红外波段的光谱吸收保持平滑的吸收带宽, 显著提升了红外部分的发射率, 可以拓展应用于红外成像、通信等方面。本文提出的 OSR 还具有极化不敏感性和一定的广角发射性能, 同时具备低太阳吸收率和高红外发射率, 有望为超材料 OSR 的研发提供一些帮助。不过该实验由于光刻技术限制, 还处于模拟阶段, 太阳吸收率也需进一步优化。在将来的研究中, 通过对材料和结构的选择, 在保证高红外发射率的前提下进一步降低太阳吸收率, 提升 OSR 总体性能。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

[1] 陈帅朋. 基于超表面的热辐射特性研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2023.

[2] Xing Y J, Sun B, Gao K, et al. Research status of thermal protection system and thermal protection materials for aerospace vehicles[J]. *Aerosp Mater Technol*, 2018, **48**(4): 9–15.
邢亚娟, 孙波, 高坤, 等. 航天飞行器热防护系统及防热材料研究现状[J]. *宇航材料工艺*, 2018, **48**(4): 9–15.

[3] Li C L, Ni J, Guo T, et al. Research on optical properties of CPI film second surface mirror[J]. *Vacuum*, 2024, **61**(3): 70–73.
李灿伦, 倪俊, 郭腾, 等. 无色聚酰亚胺薄膜二次表面镜的光学特性研究[J]. *真空*, 2024, **61**(3): 70–73.

[4] Zhou C, Zhou H, He Y C, et al. Optical and irradiation-resistant properties of ITO films on F46 and PI substrates[J]. *Trans Tianjin Univ*, 2019, **25**(2): 195–200

[5] Xiang Y C, Gao H, Wen M, et al. Review of spacecraft thermal control materials and applications[J]. *Mater Rep*, 2022, **36**(22): 22050193.
向艳超, 高鸿, 文明, 等. 航天器热控材料及应用研究进展[J]. *材料导报*, 2022, **36**(22): 22050193.

[6] Li Z Y, Han H Y, Liu B Q, et al. Tests of environmental degradation performance of thermal control white coating used for long-life manned spacecraft[J]. *Spacecr Environ Eng*, 2020, **37**(1): 102–106.
李振宇, 韩海鹰, 刘炳清, 等. 长寿命载人航天器热控白漆退化性能试验研究[J]. *航天器环境工程*, 2020, **37**(1): 102–106.

[7] Liu B, Xie X, Gan X T, et al. Applications and progress of all-metal metasurfaces in phase manipulation of electromagnetic waves[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230119
刘博, 谢鑫, 甘雪涛, 等. 全金属超表面在电磁波相位调控中的应用及进展[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230119

[8] Zhu Q, Tian H W, Jiang W X. Manipulations and applications of radiating waves using electromagnetic metasurfaces[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(9): 230115.
朱潜, 田翰闰, 蒋卫祥. 电磁超表面对辐射波的调控与应用[J]. *光电工程*, 2023, **50**(9): 230115.

[9] Sun K, Riedel C A, Wang Y D, et al. Metasurface optical solar reflectors using AZO transparent conducting oxides for radiative cooling of spacecraft[J]. *ACS Photonics*, 2018, **5**(2): 495–501

[10] Yildirim D U, Ghobadi A, Soydan M C, et al. Disordered and densely packed ITO nanorods as an excellent lithography-free optical solar reflector metasurface[J]. *ACS Photonics*, 2019, **6**(7): 1812–1822

[11] Sun K, Xiao W, Wheeler C, et al. VO_2 metasurface smart thermal emitter with high visual transparency for passive radiative cooling regulation in space and terrestrial applications[J]. *Nanophotonics*, 2022, **11**(17): 4101–4114.

[12] Wu B Y, Mao Q J, Li H J, et al. Spacecraft smart radiation device with near-zero solar absorption based on cascaded photonic crystals[J]. *Case Stud Therm Eng*, 2023, **50**: 103473

[13] Xiao W, Dai P, Singh H J, et al. Flexible thin film optical solar reflectors with Ta_2O_5 -based multimaterial coatings for space radiative cooling[J]. *APL Photonics*, 2023, **8**(9): 090802

[14] Gaspari M, Mengali S, Simeoni M, et al. Metamaterial-based smart and flexible optical solar reflectors[J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2023, **1287**: 012003.

[15] Qin Z, Meng D J, Yang F M, et al. Broadband long-wave infrared metamaterial absorber based on single-sized cut-wire resonators[J]. *Opt Express*, 2021, **29**(13): 20275–20285

[16] Cueva A, Carretero E. Comparison of the optical properties of different dielectric materials (SnO_2 , ZnO , AZO, or SiAlN_x) used in silver-based low-emissivity coatings[J]. *Coatings*, 2023, **13**(10): 1709.

[17] Yang F M, Liang Z Z, Shi X Y, et al. Broadband long-wave infrared metamaterial absorbers based on germanium resonators[J]. *Results Phys*, 2023, **51**: 106660

[18] Yang H U, D'Archangel J, Sundheimer M L, et al. Optical dielectric function of silver[J]. *Phys Rev B*, 2015, **91**(23): 235137

[19] Shkondin E, Takayama O, Panah M E A, et al. Large-scale high aspect ratio Al-doped ZnO nanopillars arrays as anisotropic metamaterials[J]. *Opt Mater Express*, 2017, **7**(5): 1606–1627

[20] Gao H X, Zhou D P, Cui W L, et al. Ultraviolet broadband plasmonic absorber with dual visible and near-infrared narrow bands[J]. *J Opt Soc Am A*, 2019, **36**(2): 264–269

- [21] Liu K, Liu Y Y, Deng F, et al. Long-wave infrared ultra-broadband perfect absorber with embedded structure[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, 41(24): 2423002.
刘坤, 刘媛媛, 邓芳, 等. 嵌入式长波红外超宽带完美吸收器[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2423002.
- [22] Zhang T, Guo T M, Yan J Y, et al. Design of tunable four-broadband terahertz absorber[J]. *Acta Opt Sin*, 2024, 44(5): 0523002.
张婷, 郭泰铭, 闫俊伢, 等. 可调谐四宽带太赫兹吸收器设计[J]. *光学学报*, 2024, 44(5): 0523002.
- [23] Shao L, Ruan Q F, Wang J F, et al. Localized surface plasmons[J]. *Physics*, 2014, 43(5): 290-298.
邵磊, 阮琦锋, 王建方, 等. 局域表面等离子激元[J]. *物理*, 2014, 43(5): 290-298.
- [24] Zheng S M, Jiang X W, Jiang D F, et al. Dual-band metamaterial absorber based on black phosphorus and its sensing characteristics[J]. *Laser Technol*, 2023, 47(6): 846-853.
郑盛梅, 江孝伟, 江达飞, 等. 基于黑磷的双频带超材料吸收体及其传感特性[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 846-853.

作者简介



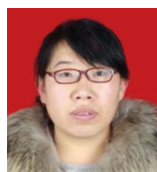
赵颂 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为基于微纳结构的热控涂层特性研究。

E-mail: 1349796209@qq.com



【通信作者】李旭峰 (1980-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为半导体装备与技术应用、近场光学理论与技术应用、太阳能电池。

E-mail: xfli@tyust.edu.cn



【通信作者】赵亚丽 (1981-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电超材料应用。

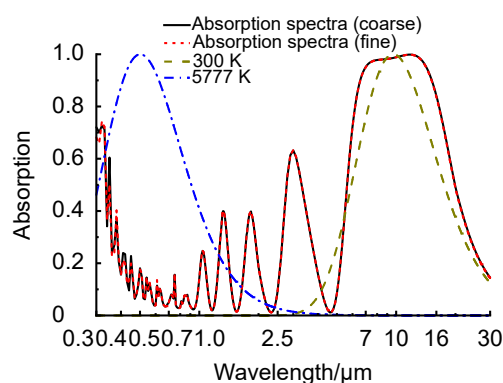
E-mail: yaliz12@163.com



扫描二维码, 获取PDF全文

Study of optical solar mirrors based on metamaterials

Zhao Song¹, Liu Yuxuan¹, Zhang Heng¹, Zhao Yali^{2*}, Li Xufeng^{1*}



Spectral absorption of OSR on AZO metasurface and blackbody radiation density distribution at 300 K and 5777 K

Overview: Optical solar reflector (OSR), also known as a secondary surface mirror, has low absorption and high reflection of the solar spectrum in the 0.3~2.5 μm band, and strong absorption (emission) of the infrared spectrum in the 2.5~30 μm band. OSR is used on the outer surface of spacecraft radiator panels to reflect the solar spectrum radiation and radiate the heat from the radiator panels in the form of infrared, which plays a vital role in the thermal control of spacecraft.

The traditional OSR consists of quartz and metal reflective layers. Quartz has excellent optical and thermal properties; however, quartz is easy to break during processing, and the specific gravity increases the satellite launch cost. At present, our satellite thermal control coatings are mainly various paint-type white lacquers, which can meet the spaceflight requirements. However, the white paint has a large gap rate and is easily contaminated, leading to performance degradation. With the expanding depth and breadth of deep space exploration, the thermal control materials need to be adapted to the new space environment. It is difficult to find a natural material that combines both low absorption in the solar spectrum and high emission in the infrared, thus requiring the use of metasurfaces with artificially designed structures.

Currently, most of the research focuses on enhancing the IR emissivity or reducing the solar absorptivity alone, since both properties of a material are often jointly affected by its physical and spectral properties. When one parameter is increased, the other is also increased, which is detrimental to the OSR. In this paper, an OSR constructed from an AZO (aluminum-doped zinc oxide) metasurface, MgF_2 dielectric layer, and Ag metal reflective layer is designed by considering both properties simultaneously. The transparent properties of AZO and MgF_2 reduce the visible absorption and enable lower solar absorptivity. Most of the materials show strong perturbations in spectral absorption in the mid-infrared (MI) band, due to the complex dielectric constants. The trough position brings additional reflections, leading to a decrease in IR emissivity. At the same time, the stability of the dielectric constant of MgF_2 in the IR band does not affect its interference conditions as a $\lambda/4$ spacer, and the absorption bandwidth and stability ensure a high IR emissivity. The optimized OSR achieves a low solar absorptivity of 17.6% in the UV to NIR and an IR emissivity of 86.5% in the thermal IR band.

Zhao S, Liu Y X, Zhang H, et al. Study of optical solar mirrors based on metamaterials[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(11): 240186; DOI: 10.12086/oee.2024.240186

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (62105131), Taiyuan University of Science and Technology Postgraduate Joint Cultivation Demonstration Base Project (JD2022007), and Jinzhong Municipal Science and Technology Key Research and Development Project (Y201027)

¹College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; ²Department of Materials Science and Engineering, Jinzhong College, Jinzhong, Shanxi 030600, China

* E-mail: yaliz12@163.com; xfli@tyust.edu.cn