

铬基超材料太阳能吸收-发射器对 光谱调制过程的数值模拟

郝家成¹, 吴小虎², 张丹¹, 陈宇航¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 山东高等技术研究院, 250100, 济南)

摘要: 基于金属基底-介质层-金属阵列的多层结构,以三角柱-圆柱金属阵列为核心,提出了铬基超材料吸收-发射器对以同步实现太阳能全谱段吸收和光谱调制。围绕对光波的吸收、发射性能及其温度场的演化,建立了光热耦合计算模型并开展了系统研究。首先,在入射太阳能波段为 300~2 500 nm、吸收器三角柱边长为 50~300 nm、圆柱高度为 10~100 nm 条件下开展了吸收性能模拟;其次,在发射器基底边长为 1 000~2 000 nm、三角柱高度为 10~500 nm、圆柱高度为 30~500 nm 条件下开展了发射性能模拟;最后,在入射功率为 3~15 MW·m⁻² 条件下进行了温度场的演化计算。研究表明:吸收器光谱吸收率与太阳光 AM1.5 吻合,总体吸收率在 0.88~0.90 之间,且随阵列柱体几何结构、材质无明显变化,这有利于降低制造成本和工艺难度;发射器光谱发射率与 1 500~2 000 K 时的黑体辐射力曲线基本吻合,在 1 450~2 000 nm 的区间发射效率为 0.50~0.99,实现了光谱调制,其中三角柱高度与发射器自身温度是影响发射效率的关键因素;吸收-发射器对的总体光谱调制效率为 0.18~0.67,在合理设计发射器表面几何结构的基础上,通过强化吸收来提高发射器温度,这是提升光谱调制效能的根本途径。研究结果可为光谱调制元件的设计和运行提供一定的参考。

关键词: 太阳能;超材料;光谱调制;吸收器;发射器;光热耦合

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202502009 **文章编号:** 0253-987X(2025)02-0084-11

Numerical Simulation of the Spectral Modulation Process by Chromium-Based Metamaterial Solar Absorber-Emitter Pairs

HAO Jiacheng¹, WU Xiaohu², ZHANG Dan¹, CHEN Yuhang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shandong Institute of Advanced Technology, Jinan 250100, China)

Abstract: Based on the multilayer structure of metal substrate-dielectric layer-metal array with triangular column-cylindrical metal array as the core, a chromium-based metamaterial absorber-emitter pair was proposed to synchronously realize solar energy full-spectrum absorption and spectral modulation. An optical-thermal coupling computational model was established around its absorption and emission performance of light waves and the evolution of its temperature field, and a systematic study was carried out. Firstly, the absorption performance was simulated under the conditions with an incident solar energy wavelength of 300—2 500 nm, a side length of absorber

收稿日期: 2024-08-07。 作者简介: 郝家成(2000—),男,硕士生;张丹(通信作者),男,副教授,博士生导师。 基金

项目: 国家自然科学基金资助项目(51976162)。

网络出版时间: 2024-10-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241014.1327.002>

triangular column of 50—300 nm and a height of the column of 10—100 nm. Next, the emission performance was simulated under the conditions with a side length of the transmitter base of 1 000—2 000 nm, a height of the triangular column of 10—500 nm and a height of the column of 30—500 nm. Finally, the evolution of the temperature field was calculated at an incident power of 3—15 MW · m⁻². The results show that the spectral absorptivity of absorber matched with the solar AM1.5, and the overall absorptivity was between 0.88 and 0.90, and there was no obvious change with the array column geometry and material, which was conducive to the reduction of the manufacturing cost and process difficulty; the spectral emissivity of emitter matched basically with the blackbody radiative forcing curves at 1 500—2 000 K, and the emissivity efficiency in 1 450—2 000 nm was 0.50—0.99, and the spectral modulation was realized, in which the height of the triangular column and the temperature of the emitter itself were the key factors affecting its emission efficiency; the absorber-emitter pair had an overall spectral modulation efficiency of 0.18—0.67; the fundamental way to improve the spectral modulation efficiency was to increase the temperature of the emitter by strengthening the absorption on the basis of the rational design of the emitter surface geometrical structure. This study can provide a reference for the design and operation of spectral modulation elements.

Keywords: solar energy; metamaterial; spectral modulation; absorber; emitter; optical-thermal coupling

太阳能是新能源的核心,如何高效利用太阳能是新能源研究的热点^[1]。太阳能能量按光谱分布,太阳能光热、光电、光化学能等转化对太阳能波段都具有选择性。光热转化主要利用 1 400 nm 以上的近红外光区域^[2],光电转换主要利用 200~1 000 nm 波段^[3],光化学能转化主要利用 300~400 nm 的紫外光波段^[4]。因此,在提高全谱段吸收率的基础上,针对后续太阳能应用的偏好波段开展光谱调制,光谱调制是指获取外部辐射后在保持能量总额不变的同时将其波段调制到指定范围的过程。

提高太阳能全谱段吸收率的方法主要有增设吸收涂层^[5]和超材料^[6]两种方式。涂层材料自然结构导致反射光与入射光叠加相消,即通过减少反射实现了强化吸收^[7]。增设吸收涂层易于实施,但其可强化吸收波段取决于材料本身,调控性差。调整表面微结构是指通过改变超材料表面几何结构、电参数,以及添加损耗材料等方法使入射光与表面结构产生共振,从而强化吸收。超材料是指由人工主导下的具有亚波长尺寸的特定单元结构^[8],超材料与入射电磁波产生的多种共振效应,使其具有良好的电磁波调控性能。Landy 等^[9]提出了“金属基底-半导体层-金属微结构”太阳能吸收器结构,通过改变金属微结构不仅可提高吸收率,还可灵活调整吸收波段。张振亚等^[10]设计了金基底-氟化镁层-双金孔阵列的单峰吸收器,在 1 816~2 000 nm 波段内吸收

率高达 96%。高会轩^[11]设计了金基底-二氧化硅层-圆环方孔阵列的超材料吸收器,在 300~4 000 nm 波段内能量吸收率达到 88%。在众多超材料吸收器中周期型结构逐渐成为主流^[12],文献[13-14]设计了氮化钛基底-二氧化硅层-氮化钛圆柱阵列的超材料吸收器,不仅在 300~1 000 nm 波段内吸收率可达 97%,且对入射方向的适应性强,在入射角为 0~70° 时吸收率均高于 80%。

光谱调制的途径主要包括闪烁体和超材料吸收-发射器,闪烁体凭借入射光激发内部电子跃迁从而发出特定波段的光波,实现光谱调制,如量子点、稀土掺杂发光材料等^[15]。杜岩^[16]通过溶胶凝胶法合成了 ZnO 量子点,在 280~380 nm 入射波段照射下,可分别发出 365、405、428、550 nm 等特定波段光波,半幅全宽仅为 15 nm。赵瑾^[17]向钼酸盐、氯硼酸盐等基质材料制成稀土掺杂发光材料,可将 300~500 nm 波段的紫外和可见光转换为硅太阳能电池偏好 900~1 000 nm 波段的光波,能量转化效率约为 21%。闪烁体光谱调制的目标波段取决于材料本身,调制灵活性差,效率普遍较低。

超材料吸收-发射器对包括吸收器和发射器两部分。工作中,吸收器吸收入射光波将光能转化为热能并传导给发射器,通过合理设计发射器表面超材料结构,利用等离子激元效应 SPR^[18-19]使其发出特定波段的电磁波,从而实现光谱调制。SPR 即入

射光使金属表面存在电子振荡,这种振荡会在金属表面法线方向上以指数级衰减。当电子振荡和入射电磁波共振时入射光沿着表面传播而不被反射,该过程被称之为等离子激元效应,根据楞次定律,该入射光使金属表面产生感应磁场反抗入射磁场从而将电磁波转化成热能。根据基尔霍夫定律,热平衡下光谱发射率等于光谱吸收率,因此可以通过设计超材料表面结构来实现特定波段的选择性发射。

Swanson^[20]最早提出热光伏系统,系统由聚光板、发射器以及光伏板组成,聚光板实现对光能的聚集,之后进入具有众多反射壁的腔体。对底部的发射器进行加热,发射器被加热到 2 000~2 400 K 时,发射波长为 1 000 nm 的电磁波到光伏板进行利用,该系统的理想效率可达 80%。Abbas 等^[21]基于金属铬提出了一种改进的铬光伏系统,由超材料吸收器、热发射器和光伏板组成。超材料吸收器在 300~2 300 nm 范围内以 85% 的平均吸收率吸收光能后,将热量热传导到热发射器,热发射器以 95% 的发射率发射在 2.3 μm 对应于光伏电池 0.54 eV 带隙的电磁波,光电转换效率可达 21%。

超材料吸收-发射器对是同步实现高效全光谱吸收和光谱调制的有效手段,现有研究揭示了超材料吸收-发射器的工作原理和关键设计,即设计器件表面周期性微纳结构来实现特定波段的强共振,吸收器吸收性能需要满足宽带、高吸收以及入射角不敏感的性能。而发射器需要窄带的发射性能以实现选择性发射,现有针对超材料吸收-发射器对的研究存在不足,即吸收率的提高和光谱调制是分别进行的,缺乏电磁效应与热效应的联合设计。吸收器将吸收的光波转换成热能以导热的方式传导给发射器,这不可避免地引起吸收-发射器对温度的变化,该温度是影响超材料光谱调制效率与工作寿命的关键因素,但现有研究中电磁场与传热的耦合分析并未开展,研究中超材料吸收-发射器对更多应用于光电,缺乏对光热应用领域研究。

利用太阳能实现海水淡化、废水处理是太阳能光热利用的重要领域,其吸热介质以水为主。本课题组围绕纯水、NaCl 水溶液单液滴、液滴群的吸收、散热等辐射传输过程展开研究^[22]。为了提高对太阳能的利用率,本文以水的吸收偏好波段 1 450~2 000 nm^[23] 为光谱调制目标,提出了铬基超材料太阳能全光谱吸收及光谱调制单元,并采用时域有限差分法(FDTD),对其光谱吸收率、发射率及吸收器内部温度场演化进行数值模拟。

1 基本结构与计算模型

1.1 基本结构

光谱吸收-调制元件的设计原则如下:全光谱吸收;针对后续应用偏好波段选择性发射;吸收、发射器间传热性能良好;成本低,易加工。据此,本文设计了新的全光谱太阳能吸收与调制单元各项参数,如表 1 所示。

表 1 本文设计的主要参数

Table 1 The ranges of parameters in this study		
类别	参数	数值
入射光	波长 λ/nm	300~2 500
	强度 $q_{\text{in}}/(\text{MW} \cdot \text{m}^{-2})$	3~15
吸收器	基底边长 l_{a}/nm	800
	介质层厚度 h_{af}/nm	30
	三角柱高度 h_{ar}/nm	70
	三角柱边长 a_{at}/nm	200
	圆柱高度 h_{ac}/nm	30
	中心三角柱边长 a_{m}/nm	50~300
发射器	中心圆柱高度 h_{m}/nm	10~100
	基底边长 l_{e}/nm	1 000~2 000
	介质层厚度 h_{ef}/nm	60
	基底高度 h_{s}/nm	150
	三角柱边长 a_{er}/nm	500
	三角柱高度 h_{er}/nm	10~500
环境参数	圆柱高度 h_{ec}/nm	30~500
	环境温度 t_{∞}/K	300
	环境折射率 $n_0/1$	1.0
	空气对流换热系数 $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	20 ^[24]

表 1 中参数对应实物图如图 1 所示。该单元上方为吸收器,下方为发射器,二者直接接触。其中吸收器为多层结构,从上到下依次是铜圆柱阵列、三角柱阵列、二氧化硅介质层以及铬金属基底,强化吸收的周期性结构是铜圆柱以及三角柱阵列,铜圆柱圆截面为等边三角形内切圆,周期性结构指以规则的长度间隔重复出现的结构。发射器同样为多层结构,从上到下依次是铬金属基底、二氧化硅介质层、三角阵列以及铜圆柱阵列,实现选择性发射的周期性单元是铜圆柱以及铬三角阵列结构。

相比传统结构,该吸收器-发射器单元采用吸收、导热、发射贯通设计,结合本课题组废水处理、海水淡化的工程应用方向,在全光谱高效吸收的基础上以纯水偏好波段 1 450~2 000 nm 为调制目标。所用铜、铬等材料相比传统金^[11]、氮化钛^[13]、氟化镁等成本更低,相比文献[9]设计的“工”字型等超结构更加简单易加工。

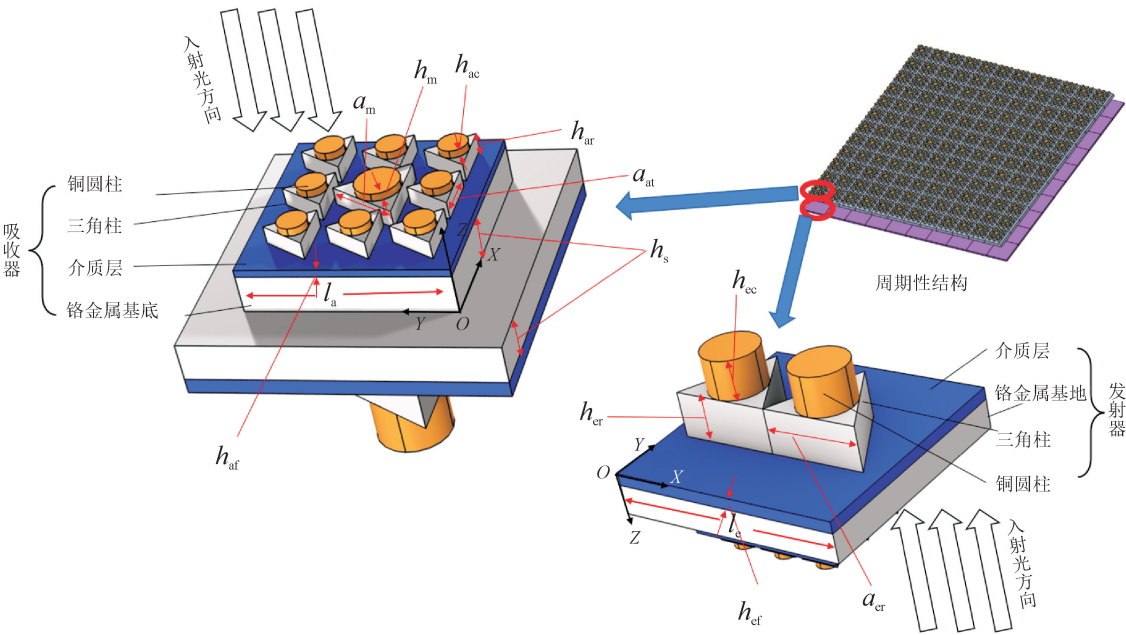


图 1 吸收-发射器对其周期性单元
Fig. 1 Absorber-emitter pair and periodic unit

1.2 计算模型

针对上述超材料吸收-发射器对对太阳能的吸收及光谱调制过程可建立计算模型。该模型视入射光为平面波,沿吸收器外法线方向入射,以该平面波的强度为输入,以吸收-发射器对的电磁场稳态分布、温度场演化,以及总体吸收率、发射率为计算目标。

为简化计算,该模型假设如下:除指定入射光外无其他光源;周围空气介质折射率恒为 1,环境温度恒为 300 K,环境压力保持常压 0.1 MPa;计算中考虑金属材料复折射率随波长的变化,消光系数指光在材料中传播被抑制的程度,相关材料热物性如表 2 所示,Cu、Cr 折射率随波长的变化如图 2 所示。

表 2 金属热物性参数

Table 2 Thermophysical properties of metals			
材料	密度 $\rho/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数 $k/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	比热容 $c/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Cr	7 190	93.3	448
SiO ₂	2 200	27	700
Cu	8 960	400	6.1

入射太阳光为平面波,入射方向垂直于吸收器吸收表面上,入射光谱为 AM1.5,波段为 300 ~ 2 500 nm。入射平面波在空气介质中的波动方程为

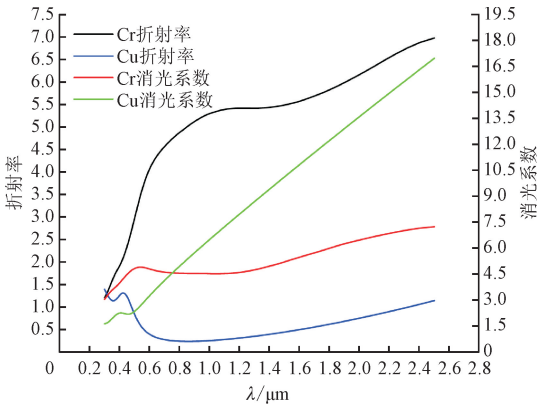


图 2 Cu、Cr 折射率随波长的变化
Fig. 2 Variations of refractive index of copper and chromium versus irradiating wavelength

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = 0$$

(1)

式中: E 为电场强度; c_0 为光速。

对于入射光入射吸收器,采用完美匹配层作为垂直方向边界条件,即模拟区域边界与周围材料阻抗匹配且模拟区域完全吸收入射光波,其内部的电场满足方程

$$E(x,z,t) = E_0 e^{-j\omega t} e^{-\left(\frac{\mu_e}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma_e}{2\mu_0}\right)} \quad (2)$$

(2)

式中: x,z 为坐标; E_0 为电场振幅; μ_e 、 σ_e 为磁导率和电导率的实部; ω 为电磁波角频率; ϵ_0 、 μ_0 分别为介质中的介电常数和磁导率。考虑到表面结构的周

期性,计算中水平方向采用周期性边界条件。

由于超材料吸收器对入射电磁波的响应,表面产生了等离子体振荡,将等离子体振荡的传播常数定义为波矢 k_s ,则有

$$k_s = \frac{\omega}{c_d} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (3)$$

式中: ω 为入射电磁波的角频率; c_d 为介质中光速; ϵ_m 为金属介电常数; ϵ_d 为介质层介电常数。

当入射光照射在结构表面时,光波产生了一系列的衍射波,衍射光波矢分量为

$$k_m = m \frac{2\pi}{\varphi} + \frac{2\pi}{\lambda} n_d \sin \theta \quad (4)$$

式中: m 为衍射级次; φ 为微纳结构阵列周期长度; λ 为波长; n_d 为金属折射率; θ 为衍射波与平面法线的夹角。当 $k_x = k_s$ 时发生 SPR,此时电磁波电场强度的控制方程为

$$\nabla^2 E - \mu \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

式中: μ 为磁导率; ϵ 为介电常数; σ 为电导率。

吸收器的总体吸收效率为

$$\eta_a = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \alpha(\lambda) I_s(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} I_s(\lambda) d\lambda} \quad (6)$$

式中: $I_s(\lambda)$ 为标准 AM1.5 太阳光谱辐照度; $\lambda_{\max} = 2\,500\text{ nm}$; $\lambda_{\min} = 300\text{ nm}$ 。

吸收器吸收入射光导致自身温度升高,其内部温度场演化满足导热方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \Delta T + Q_{rh} + Q_{ml} \quad (7)$$

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} R_e (JE^*) \quad (8)$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} R_e (i\omega BH^*) \quad (9)$$

式中: T 为温度; k_c 为材料导热系数; Q_{rh} 为感应加热过程中涡流产生的焦耳热功率密度; Q_{ml} 为磁损耗热功率密度; R_e 为材料电阻; J 为电流密度。

吸收器通过导热将能量传递到发射器,两者边界条件为等热流密度边界,即

$$q_{\text{abs}} = q_{\text{emit}} \quad (10)$$

发射器内部温度场演化服从如下导热方程

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_c \nabla T + Q_{\text{out}} \quad (11)$$

$$Q_{\text{out}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \omega \epsilon_2 |E|^2 \quad (12)$$

式中: λ_c 为导热系数; Q_{out} 为发射器以热辐射形式发

射的功率; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_2 为材料介电常数虚部。

对于发射器表面电场 E ,根据亥姆霍兹方程

$$\nabla \cdot (\mu_r^{-1} \nabla \cdot E) - k_b^2 \epsilon_r E = 0 \quad (13)$$

式中: k_b 为波数; ϵ_r 为相对介电常数; μ_r 为相对磁导率。

此外,除吸收器与发射器接触面外,其他表面也与外部空气发生对流,其边界条件可表示为

$$-k \frac{dT}{dx} = h(t_\infty - t_0) \quad (14)$$

根据基尔霍夫热辐射定律,热平衡下发射器光谱发射率等于其光谱吸收率^[26],即

$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - \left| \frac{\sqrt{\mu_r} - \sqrt{\epsilon_r}}{\sqrt{\mu_r} + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (15)$$

发射器在光谱调制目标波段 $1\,450 \sim 2\,000\text{ nm}$ 的区间发射效率为

$$\eta_e = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) E_b(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_b(\lambda, T) d\lambda} \quad (16)$$

式中: $\lambda_1 = 1\,450\text{ nm}$; $\lambda_2 = 2\,000\text{ nm}$; E_b 为标准黑体光谱辐射力^[27]。

对于吸收-发射器对的光谱调制效率为

$$\eta_{ae} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{S_e \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) E_b(\lambda, T) d\lambda \right)}{-\oint_s S ds} \quad (17)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (18)$$

式中: P_{in} 为投入能量; P_{out} 为发射器发射能量; S_e 为发射器发射面积; $\mathbf{S}$ 为坡印廷矢量。

2 结果与讨论

2.1 吸收器性能

吸收器中铜圆柱与三角柱在水平截面上的电场分布是衡量其吸收性能的重要依据。本文选取图3所示水平截面1、2,对比了入射波长分别为300、473、880、1 900 nm 时两种柱体截面上的电场强度分布,如图4、图5所示。

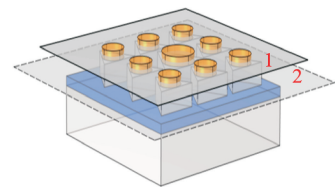


图3 电场截面位置

Fig. 3 Location of the electric field cross section

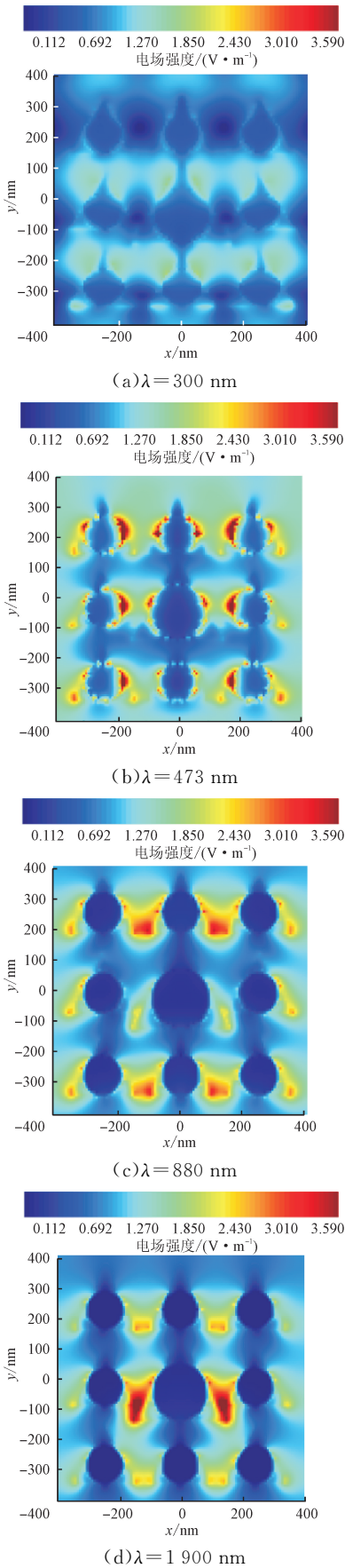
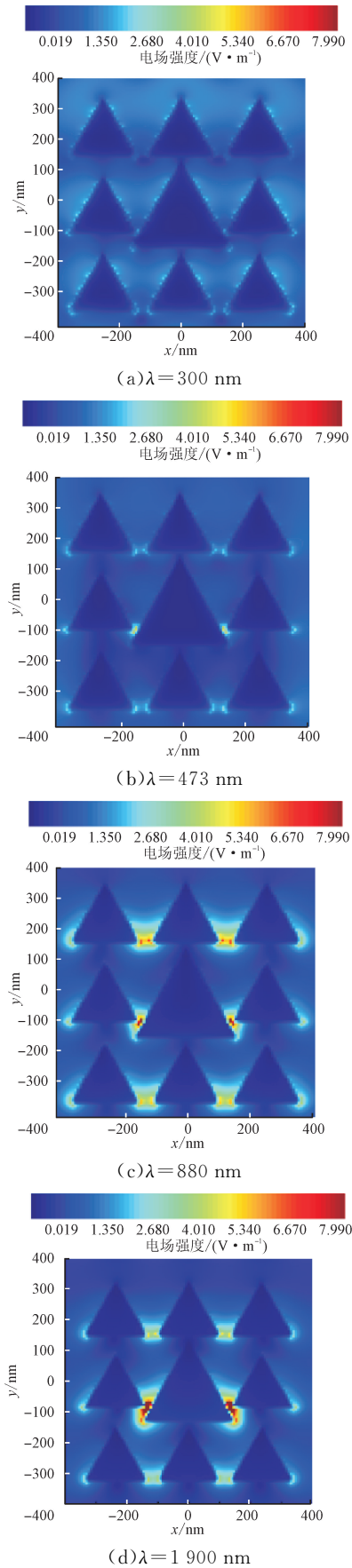


图 4 圆柱在截面 1 上的电场强度

图 5 三角柱在截面 2 上的电场强度

Fig. 4 Electric intensity of cylinder on section 1

Fig. 5 Electric intensity of triangular column on section 2

由图 4、5 可以看出:吸收器电场显著增强部位都集中在三角柱、圆柱之间,说明入射光主要在这些区域被吸收,并转化为热能,在铬金属基层以导热形式快速扩散;吸收器在 473、880 nm 处电场都有不同程度的增强,这是由吸收器两种柱体结构诱发 SPR 所致。以 473 nm 入射光为例,图 6 对比了吸收器表面离子体波矢 k_s 与入射光波矢 k_0 ,当没有金属阵列存在时, $m = 0$,即 k_s 、 k_0 无交点,无法产生 SPR;当存在金属阵列时,入射光波会产生诸多整数级次 m 的衍射波使得波矢曲线 k_0 下移进而与等离子体波矢 k_s 曲线相交,交点处即发生 SPR。由图 6 可知,衍射波级次为 -2 时,在波长为 473 nm 处产生共振,相应波长处的电场增强,同理,在波长为 323、880 nm 处会因共振使该波段在吸收器表面电场增强。

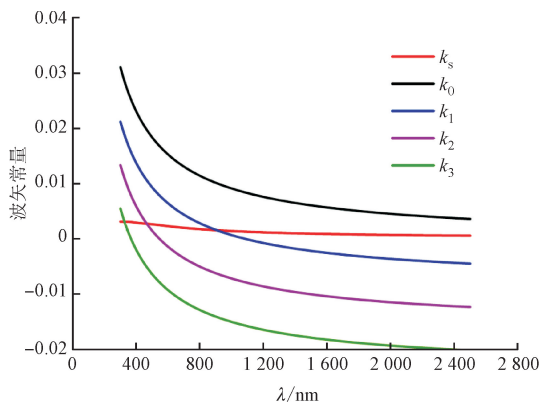


图 6 吸收器色散曲线

Fig. 6 Dispersion curves for absorbers

随着入射光波长增大,中心三角柱强化吸收的作用愈加显著。这是由于随入射波长的增大,主体材料铜和铬的消光系数都会增大,抑制了入射光波向金属内部的传播,进一步增强了其在金属表面因 SPR 被吸收的程度,这表明 SPR 效应是强化吸收的核心机理。

以吸收器中心三角柱边长 $a_m = 150$ nm、中心铜圆柱高度 $h_m = 30$ nm 为例,对比了吸收器光谱吸收率与 AM1.5^[28] 曲线,如图 7 所示,图中 I 为光谱辐照度。可以看出:吸收器的光谱吸收率介于 0.35~0.99 之间,总体上随波长的增大先升高后降低,这与太阳光谱 AM1.5 曲线基本一致;光谱吸收率在 323、473、880 nm 处存在峰值,吸收率分别为 0.89、0.95、0.99,峰值波长验证了上文对于强化机理的分析。图中阴影部分的面积为吸收器吸收的能量总量,根据式(6)可得吸收器总体吸收率 η_a 为 0.88。

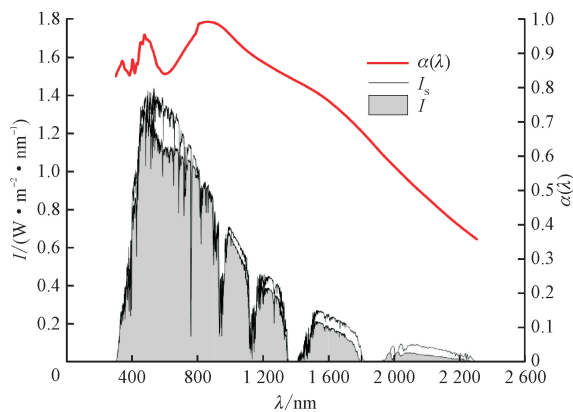


图 7 吸收器光谱吸收率与太阳能光谱分布(AM1.5)的比较

Fig. 7 Spectral comparison of absorber absorptivity and solar energy

图 8~10 分别对比了不同中心三角形边长、不同铜圆柱高度、不同三角柱材质下吸收器光谱吸收率与 AM1.5 曲线,总体吸收率随中心三角边长以及圆柱高度的变化如图 11 所示。改变上述参数后,吸收器光谱吸收率均与 AM1.5 基本匹配,在波长 1 400 nm 以下吸收率均大于 0.7,实现了对入射光的全光谱高效吸收。虽然改变中心三角边长 a_m 、中心圆柱高度 h_m 使得吸收器光谱吸收率在 1 000 nm 以下有一定局部变化,但对 η_a 影响不大,基本都介于 0.88~0.90 之间,这在一定程度上放宽了吸收器加工中对尺寸精度要求。由图 10 可知,改变三角柱材质对光谱吸收率的影响主要体现在 500 nm 以下,对 η_a 影响不大。由图 11 可知,铬材质下改变圆柱高度和中心三角柱边长, η_a 介于 0.83~0.88 之间,可通过选择常规材料来降低制造成本和工艺难度。

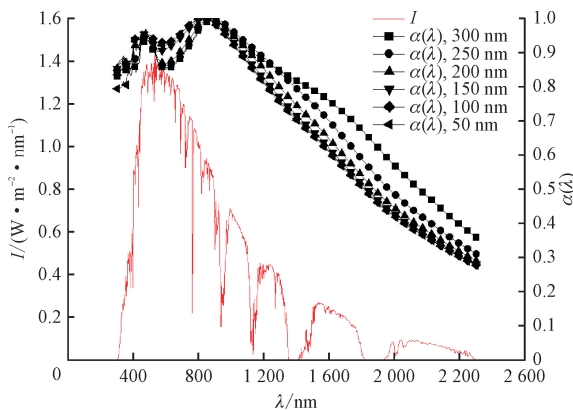


图 8 不同中心三角边长下吸收器光谱吸收率与太阳能光谱分布(AM1.5)的比较

Fig. 8 Spectral comparison of absorber absorptivity and solar energy under different edge lengths of central triangle

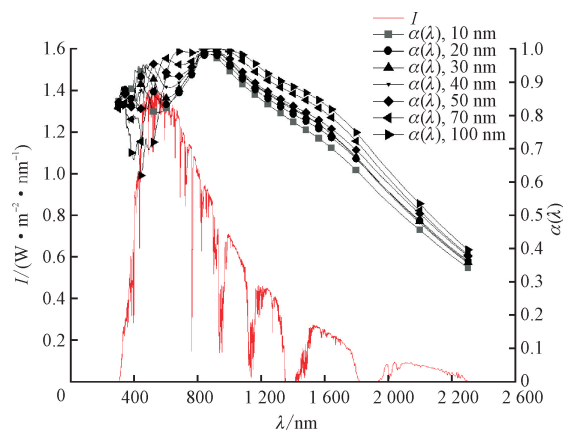


图 9 不同圆柱高度下吸收器光谱吸收率与太阳能光谱分布(AM1.5)的比较

Fig.9 Spectral comparison of absorber absorptivity and solar energy under different edge heights of cylinder

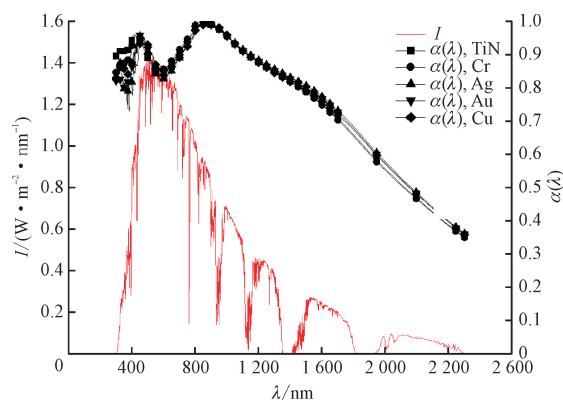


图 10 不同三角柱材料下吸收器光谱吸收率与太阳能光谱分布(AM1.5)的比较

Fig.10 Spectral comparison of absorber absorptivity and solar energy under different materials of triangular column

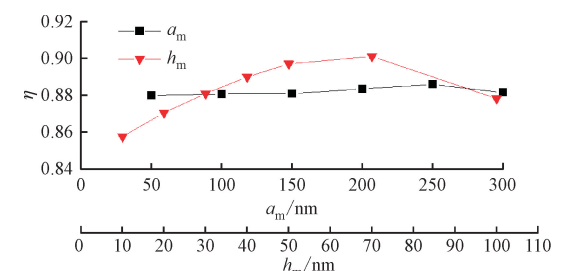


图 11 总体吸收率随中心三角边长以及圆柱高度的变化

Fig.11 Variation of overall absorption rate with the length of the center triangle edge and the height of the cylinder

2.2 发射器性能

吸收器的高吸收是通过吸收器表面特定尺寸微纳结构诱发 SPR 效应实现的。发射器中通过增大

微纳结构尺寸,使得式(4)中的周期长度发生改变,进而使得共振波长介于 1 450~2 000 nm 之间,实现了选择性发射。根据维恩位移定律,在调制目标波段 1 450~2 000 nm 范围内,黑体辐射温度约为 1 500~2 000 K。为考察发射器几何结构对光谱发射率影响,图 12~图 14 分别对比了发射器不同基底边长、不同三角柱高度、不同圆柱高度下发射器光谱发射率与 1 500~2 000 K 下黑体辐射力的光谱分布,图 15 汇总了发射器在 1 450~2 000 nm 波段区间发射效率 η_e 随参数的变化。

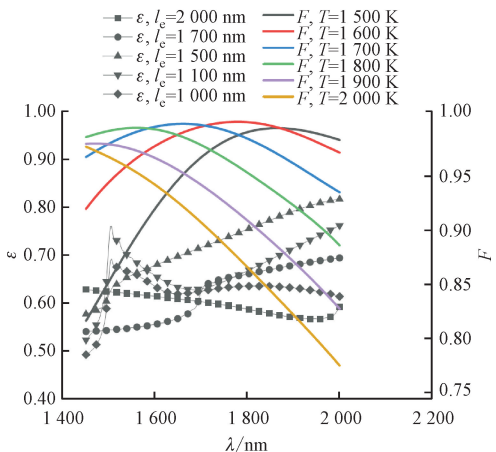


图 12 不同正方形边长及黑体温度下光谱发射率与黑体光谱辐射分数的对比

Fig.12 Spectral comparison of emitter emissivity and blackbody radiation fraction under different square lengths and blackbody temperatures

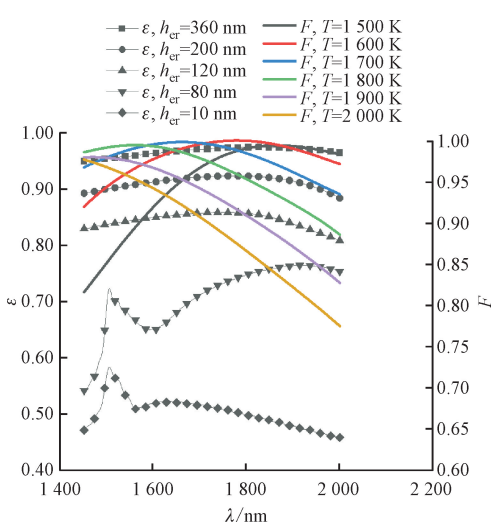


图 13 不同三角柱高度下光谱发射率与黑体光谱辐射分数的对比

Fig.13 Spectral comparison of emitter emissivity and blackbody radiation fraction under different triangular column heights and blackbody temperatures

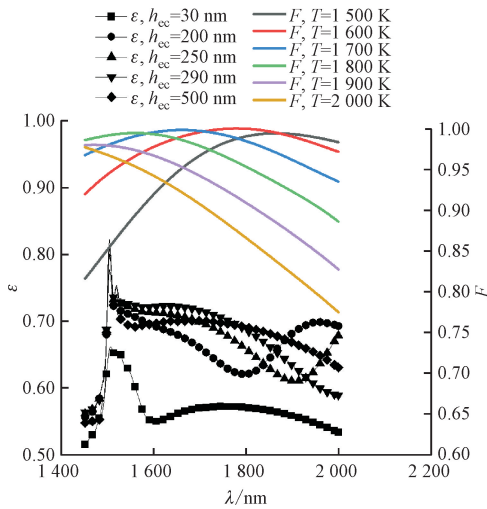


图 14 不同圆柱高度及黑体温度下光谱发射率与黑体光谱辐射分数的对比

Fig. 14 Spectral comparison of emitter emissivity and blackbody radiation fraction under different cylinder heights and blackbody temperatures

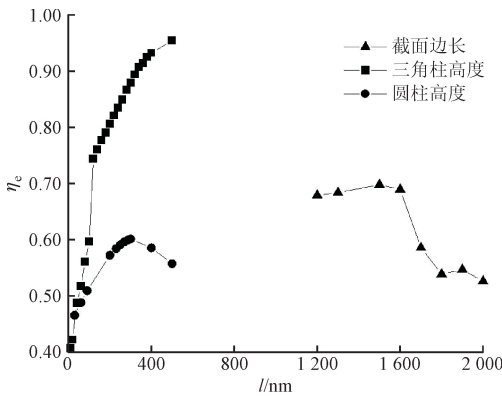


图 15 发射器在 1 450~2 000 nm 区间效率随截面边长、三角柱、圆柱高度的变化

Fig. 15 Variation of overall emissivity in 1 450—2 000 nm versus square edge length, triangular and cylinder heights

光谱发射率介于 0.25~0.99 之间,随波长的增大总体上先升高、后减小,与 1 500~2 000 K 温度下的黑体光谱辐射力分布基本一致;发射器在 1 450~2 000 nm 波段的光谱发射率为 0.70~0.99,而在其他波段发射率约为 0.5,实现了调制目标波段的选择性发射;在逐渐增大三角柱、圆柱高度时,发射器位于 1 450~2 000 nm 的发射率逐渐升高;仅改变圆柱高度或截面边长时, η_e 为 0.45~0.75,且呈现非单调变化;在增大三角柱高度时, η_e 可从 0.45 单调升高至 0.99,说明三角柱高度是影响 η_e 的主导因素。

2.3 温度场演化与光谱调制效率

吸收-发射器对的光谱调制效能不仅取决于两者的几何结构,还依赖于发射器对平均温度。图 16 以三角柱高度为 300 nm 的发射器为例,展示了入射功率密度为 $3 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时吸收器、发射器不同时间 t 表面温度的变化。由图 16 可以看出:吸收器温度会首先从产生共振的柱状结构间上升,而后通过基底向外扩散,使得整个吸收-发射器对温度上升,达到温度平衡仅需约 4 ms,升温过程中发射器温差维持在 0.01 K 以下;吸收器介质层之间的温差不会超过 30 K,但是金属阵列与基底之间的温差可达 200 K,这是由于 SPR 导致对入射光的强烈吸收,说明降低金属阵列与基底之间的温差是热设计的关键,可通过减小周期、增加周期内共振结构的方式来减小温差^[29]。

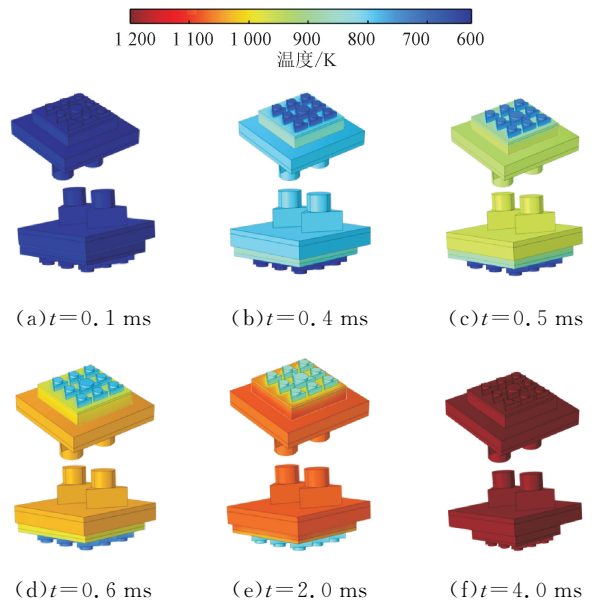


图 16 不同时间下吸收-发射器对温度场的变化

Fig. 16 Temperature evolution of the absorber-emitter unit

图 17 对比了不同发射器三角柱高度下,发射器平均温度 T_e 、光谱调制效率 η_{ac} 随入射功率密度 q_{in} 的变化,可知 T_e 、 η_{ac} 均随 q_{in} 的增大而增大。三角柱 230 nm 增大到 500 nm 的过程中,发射器总质量、表面积变化甚微,使得发射器平均温度几乎不变。当发射器平均温度大于 1 800 K 后,其黑体辐射力在调制目标波段 1 450~2 000 nm 内占优,此时提高三角柱高度对 η_{ac} 有明显提升。这说明,在合理设计发射器结构的基础上,通过强化吸收提高发射器温度是提升光谱调制效能的根本途径。

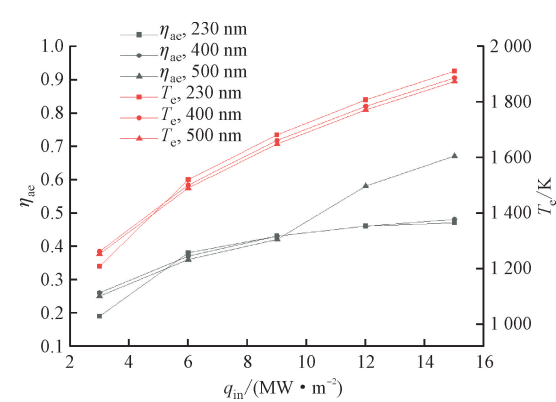


图 17 不同发射器三角柱高度下发射器平均温度与光谱调制效率随输入功率密度的变化

Fig. 17 Variations of emitter temperature and spectral modulation efficiency versus irradiating power flux

3 结 论

为了同步实现对太阳能的全谱段吸收及向纯水偏好波段 1 450~2 000 nm 的光谱调制,本文设计了铬基超材料吸收-发射器对,吸收与发射器均采用金属基底-介质层-金属阵列的多层结构。围绕对光波的吸收、发射过程及其温度场的演化过程建立了光热耦合计算模型,并开展了系统的数值模拟,得到可得如下主要结论。

(1)吸收器表面周期性柱状结构诱发的 SPR 效应实现了对入射光波吸收的强化,光谱吸收率随波长的增大先升高后降低,与太阳光谱 AM1.5 基本吻合。总体吸收效率为 0.88~0.90,且随阵列柱体几何结构、材质无明显变化,这有利于降低制造成本和工艺难度。

(2)发射器光谱发射率与温度 1 500~2 000 K 下的黑体光谱辐射力曲线基本吻合,且在调制目标波段 1 450~2 000 nm 内的区间发射效率为 0.50~0.99,实现了光谱调制的目标。设计范围内,发射效率主要依赖于表面金属阵列三角柱高度及发射器自身温度。

(3)吸收-发射器对总体光谱调制效率为 0.18~0.67,该效率及发射器平均温度均随入射功率密度的增大而增大,通过强化吸收提高发射器温度是提升光谱调制效能的关键。随着吸收的强化,吸收器金属阵列与基底之间的温差显著上升,说明强化两者之间的传热是热设计的关键。

参考文献:

[1] 徐生杰,席静,王静,等. 太阳能技术的研究综述 [J]. 山东化工, 2019, 48(1): 63-64.

XU Shengjie, XI Jing, WANG Jing, et al. Research status on solar energy utilization technology [J]. Shandong Chemical Industry, 2019, 48(1): 63-64.

[2] 马存霖. 太阳能光热利用材料的制备及其性能研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.

[3] 张小飞. 太阳光能量转化材料构建与应用演示系统 [D]. 济南: 山东大学, 2020.

[4] WANG Xiaoning, WANG Fulei, SANG Yuanhua, et al. Full-spectrum solar-light-activated photocatalysts for light-chemical energy conversion [J]. Advanced Energy Materials, 2017, 7(23): 1700473.

[5] 陈宇飞, 兰亚鹏, 古龙, 等. 太阳能选择性吸收涂层的研究进展与应用前景 [J]. 热加工工艺, 2022, 51(4): 8-14.

CHEN Yufei, LAN Yapeng, GU Long, et al. Research progress and application prospect of solar selective absorption coating [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(4): 8-14.

[6] 陈龙, 许明珠, 高善虎, 等. 可见光和近红外区域宽带超材料吸收器的设计 [J]. 光学仪器, 2023, 45(3): 87-94.

CHEN Long, XU Mingzhu, GAO Shanhu, et al. Design of broadband metamaterial absorber in the visible and near-infrared region [J]. Optical Instruments, 2023, 45(3): 87-94.

[7] 刘嘉成, 胡绪灿, 陈昆, 等. CoCuMnO_x 太阳能选择性吸收涂层的制备与性能研究 [J]. 化工新型材料, 2021, 49(1): 126-130.

LIU Jiacheng, HU Xucan, CHEN Kun, et al. Preparation and property of CoCuMnO_x solar selective absorption coating [J]. New Chemical Materials, 2021, 49(1): 126-130.

[8] 田宇泽, 金晶, 杨河林, 等. 微波电磁超材料设计与应用研究进展 [J]. 中国科学(物理学、力学、天文学), 2023, 53(9): 193-203.

TIAN Yuze, JIN Jing, YANG Helin, et al. Research progress on design and application of microwave electromagnetic metamaterial [J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2023, 53(9): 193-203.

[9] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect metamaterial absorber [J]. Physical Review Letters, 2008, 100(20): 207402.

[10] 张振亚, 刘晓丽, 温小栋. 基于局部表面等离子体激元的共振增强超材料吸收器的吸收性质 [J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(5): 533-539.

ZHANG Zhenya, LIU Xiaoli, WEN Xiaodong. Enhance absorption based on the resonance of localized surface plasmon modes in a metamaterial absorber [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37

- (5): 533-539.
- [11] 高会轩. 表面等离子激元完美吸收器的非凡光学特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [12] 阮心怡, 张恒宇, 王妮, 等. 周期结构电磁超材料吸波体的设计及最新进展 [J]. 材料导报, 2024, 38(3): 31-41. RUAN Xinyi, ZHANG Hengyu, WANG Ni, et al. Design and recent progress of periodically structured electromagnetic metamaterial absorbers [J]. Materials Reports, 2024, 38(3): 31-41.
- [13] SUN Chunlei, LIU Haotuo, YANG Bing, et al. An ultra-broadband and wide-angle absorber based on a tin metamaterial for solar harvesting [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2023, 25(1): 806-812.
- [14] ZHANG Heng, CAO Yuchun, FENG Yongtao, et al. Efficient solar energy absorber based on titanium nitride metamaterial [J]. Plasmonics, 2023, 18(6): 2187-2194.
- [15] 于怀娜. 二维光子晶体在软 X 射线扫描透射显微探测中的应用研究 [D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2022.
- [16] 杜岩. ZnO 量子点的制作与光学性质研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [17] 赵瑾. 稀土掺杂下转换发光材料的光谱调制和能量传递研究 [D]. 西安: 西北大学, 2016.
- [18] SUN Leihao, LIU Dingquan, SU Junli, et al. Near perfect absorber for long-wave infrared based on localized surface plasmon resonance [J]. Nanomaterials, 2022, 12(23): 4223.
- [19] JEONG Y, SAHU J K, PAYNE D N, et al. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. Optics Express, 2004, 12(25): 6088-6092.
- [20] SWANSON R M. A proposed thermophotovoltaic solar energy conversion system [J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(3): 446-447.
- [21] ABBAS M A, KIM J, RANA A S, et al. Nanostructured chromium-based broadband absorbers and emitters to realize thermally stable solar thermophotovoltaic systems [J]. Nanoscale, 2022, 14(17): 6425-6436.
- [22] ZHANG Dan, TU Maoping, YUAN Yang, et al. Thermal radiative transfer characteristics of a single water droplet [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 219: 124824.
- [23] 邓孺孺, 何颖清, 秦雁, 等. 近红外波段(900—2 500 nm)水吸收系数测量 [J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 192-206. DENG Ruru, HE Yingqing, QIN Yan, et al. Measuring pure water absorption coefficient in the near-infrared spectrum (900—2 500 nm) [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(1): 192-206.
- [24] RAHMANI A, CHOUAF F, BOUZID L, et al. Experimental evaluation of the wind convection heat transfer on the glass cover of the single-slope solar still [J]. Heat Transfer, 2024, 53(3): 1292-1311.
- [25] SYTCHKOVA A, BELOSLUDTSEV A, VOLOSEVICIENE L, et al. Optical, structural and electrical properties of sputtered ultrathin chromium films [J]. Optical Materials, 2021, 121: 111530.
- [26] 刘唤. 基于等效电路与阻抗匹配的层叠结构完美吸收器设计 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [27] BHATT R, GUPTA M. Design and validation of a high-efficiency planar solar thermophotovoltaic system using a spectrally selective emitter [J]. Optics Express, 2020, 28(15): 21869-21890.
- [28] GUEYMARD C A. The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models [J]. Solar Energy, 2004, 76(4): 423-453.
- [29] 谭文勇. 等离激元共振光吸收及其光热转化研究 [D]. 南昌: 江西师范大学, 2023.

(编辑 赵炜)