

光学学报

一种多层 Zr/SiO₂ 结构的超宽带完美吸波体

伍铁生^{1,2,3*}, 王学玉^{1**}, 张慧仙¹, 王宜颖¹, 曹卫平¹, 王义平^{2,3***}

¹桂林电子科技大学信息与通信学院广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004;

²深圳大学光电工程学院光电子器件与系统教育部重点实验室, 广东 深圳 518060;

³深圳大学光电工程学院广东省光纤传感技术粤港联合研究中心, 广东 深圳 518060

摘要 平面金属/介质薄膜结构吸波体的吸收性能优越, 制备过程简单, 应用前景广阔, 因此备受关注。为了提高吸收性能, 提出了一种基于 Fabry-Perot (FP) 共振吸收的具有多层 Zr/SiO₂ 结构的超宽带完美吸波体。通过传输矩阵法并结合遗传算法, 对结构参数进行了优化。计算结果表明, 具有 10 层 Zr/SiO₂ 结构 (构成了 4 个串联 FP 腔) 的吸波体在 0.4~3.0 μm 波长范围内的最低吸收效率均超过 96.6%, 平均吸收效率高达 98.6%。即使只设置 4 层结构, 其在该波段的平均吸收效率依然可达 91.5%。同时分析了该结构在其他波段的吸收特性, 并计算了其平均吸收效率与层数之间的关系。与其他复杂结构的吸波体相比, 所设计的吸波体具有工作带宽大、吸收效率高和结构简单等特点, 在太阳能收集、热辐射器、红外隐身等领域有广阔的应用前景。

关键词 材料; 薄膜结构; 吸波体; 宽带吸收; Fabry-Perot 腔

中图分类号 O441.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0516001

Ultra-Broadband Perfect Absorber Based on Multilayered Zr/SiO₂ Film

Wu Tiesheng^{1,2,3*}, Wang Xueyu^{1**}, Zhang Huixian¹, Wang Yiying¹,
Cao Weiping¹, Wang Yiping^{2,3***}

¹Guangxi Key Laboratory of Wireless Broadband Communication and Signal Processing, College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

²Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China;

³Guangdong and Hong Kong Joint Research Centre for Optical Fiber Sensors, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China

Abstract The absorber based on planar metal/dielectric thin films has attracted much attention due to its superior absorption performance, simple preparation process and broad application prospects. In order to improve the absorption performance, an ultra-broadband perfect absorber with a multilayered Zr/SiO₂ structure is proposed, which is based on multiple Fabry-Perot (FP) resonant absorption. The structural parameters are optimized by employing the transfer matrix method combined with the genetic algorithm and the calculation results show that as for an absorber with a 10-layered Zr/SiO₂ structure (which constitutes 4 series FP cavities), the minimum absorption efficiency exceeds 96.6% and the average absorption efficiency is up to 98.6% in the wavelength range of 0.4~3.0 μm. Even as for one with only a 4-layered structure, its average absorption efficiency still reaches 91.5%. Furthermore, the absorption characteristics of the proposed structure are analyzed in other wavelength ranges and

收稿日期: 2020-08-18; 修回日期: 2020-09-15; 录用日期: 2020-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(61805051)、广西自然科学基金(2018JJB170035, 2018AD19071, 2018AD19064, 2018JJA170021)、广西无线宽带通信与信号处理重点实验室主任基金(GXKL06190118, GXKL06160102, GXKL06180203, GXKL06180104)

* E-mail: tieshengw@163.com; ** E-mail: xueyuwang@hotmail.com; *** E-mail: ypwang@szu.edu.cn

the relation of its average absorption efficiency with lay number is also calculated. Compared with other absorbers with complex structures, the proposed absorber has the characteristics of large working bandwidth, high absorption efficiency and simple structure. It has wide application prospects in the fields of solar energy collection, heat radiator, and infrared cloaking.

Key words materials; thin film structure; absorber; broadband absorption; Fabry-Perot cavity

OCIS codes 160.3918; 160.4236; 230.4170

1 引言

自从 Landy 等^[1]在 2008 年报道了第一个超材料完美吸波体,有关超材料吸波体的设计与应用引起了众多学者的关注。当前,对吸波体波长吸收范围的研究涵盖了可见光到微波频段^[2-5]。吸收波长范围在可见光和中红外光的吸波体更是得到了广泛的应用,如太阳能电池^[6]、热成像^[7]、热检测^[8]和电磁隐身技术^[9]等。但是,已报道的大多数吸波体存在一些常见缺点,如吸收效率低、吸收宽带窄、吸收效率与偏振相关,这严重制约了它们的实际应用。为了获得宽带完美吸收,研究人员提出了多种设计方法,包括图案化的金属纳米阵列^[5-10]、多层金属-介质光栅结构^[11-12]和没有结构图案化的平面薄膜^[13-14]。这些吸波体设计方案通常受制于复杂的制备过程或有限的吸收带宽。此外,贵金属(如金和银)和某些复杂的图案化结构具有优异的表面等离子体极化特性,得到了广泛的应用,但成本昂贵。因此,制备简单、成本低的超宽带吸波体设计仍然是一个挑战。

考虑到设计和制造的可行性,本文提出了一种具有多层 Zr/SiO₂ 结构的超宽带完美吸波体。无需纳米光刻,利用多层平面金属/电介质堆叠就可制备多个 Fabry-Perot (FP) 腔,从而实现超宽带完美吸收。采用传输矩阵法对吸波体的吸收特性进行数值计算,并结合遗传算法对模型结构参数进行优化。研究表明,利用平面 Zr/SiO₂ 薄膜构成 4 个 FP 腔,所设计的吸波体在 0.4~3.0 μm 的波长范围内可实现高达 98.6% 的平均吸收效率。通过增加层数以构成 9 个 FP 腔,该结构在 0.4~7.0 μm 的大波长范围内仍可实现 97.8% 的平均吸收效率。该结果超越了先前报道的大部分宽带吸波体的吸收性能。本文提出的吸波体结构为吸波体的设计提供了灵活的设计思路,并极大减少了制造成本和加工难度。可以预见,本文所提出的吸波体在太阳能收集、光电探测器应用和红外隐身等方面具有巨大的应用潜力。

2 模型结构和计算方法

本文提出的超宽带吸波体结构如图 1 所示。最上层是 SiO₂ 抗反射层,其作用是减小入射光的反射同时避免金属层被氧化。之后,从上往下,多层 Zr/SiO₂ 薄膜构成多个 FP 光学腔,从而形成多种共振模式,可捕获入射光并增强光吸收。将厚度为 400 nm 的 Zr 沉积在硅片基底上以构成最后一个光学腔,足够大的厚度(大于穿透深度)也可以阻止光传输到基底。由图 1 可知, N 腔结构具有 2(N+1) 层。

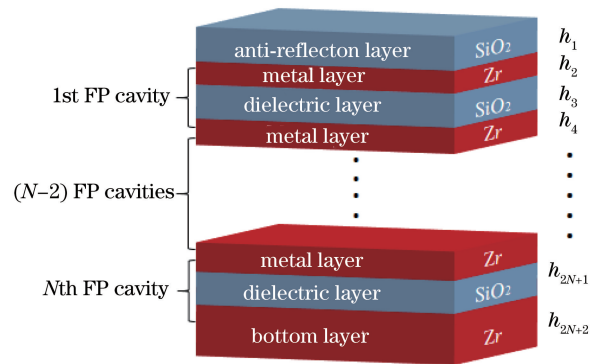


图 1 多层平面金属/介质超宽带吸波体的结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of multilayered planar metal/dielectric ultra-broadband absorber

为了计算该结构的光吸收效率(A),首先使用传输矩阵法(Transfer Matrix method, TMM)计算反射率(R)和透射率(T)。每一层薄膜与光波的相互作用可由其特征矩阵来确定,则第 j 层薄膜的特征矩阵^[15-16]为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \theta_j / \lambda$,横电(TE)极化时 $\eta_j = n_j \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} \cos \theta_j$,横磁(TM)极化时 $\eta_j = n_j \sqrt{\epsilon_0 / \mu_0} / \cos \theta_j$,其中 λ 为入射波长, d_j 为第 j 层介质的厚度, n_j 为第 j 层介质的折射率, θ_j 为光在第 j 层介质中的传播角, ϵ_0 和 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率。在数值仿真中,金属(Fe, Cr, Ti, Au)和 SiO₂ 的折射率由文献^[17]给出,Zr 的折

射率由文献[18]给出。

$2(N+1)$ 层结构的特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由(2)式得到结构的反射系数 r 和透射系数 t 分别为

$$r = \frac{\eta_0 m_{11} + \eta_0 \eta_i m_{12} - m_{21} - \eta_i m_{22}}{\eta_0 m_{11} + \eta_0 \eta_i m_{12} + m_{21} + \eta_i m_{22}}, \quad (3)$$

$$t = \frac{2\eta_0}{\eta_0 m_{11} + \eta_0 \eta_i m_{12} + m_{21} + \eta_i m_{22}}, \quad (4)$$

式中: η_0 和 η_i 分别为电磁波入射端和出射端的修正导纳。结构的反射率 $R = |r|^2$, 透射率 $T = |t|^2$, 吸收效率 $A = 1 - R - T$ 。当金属基底(第 N 层)的厚度 (>400 nm) 远大于金属的趋肤深度时, 没有电磁波的透射, 即 $T=0$ 。

此外, 为了提高吸波体的性能, 本文采用遗传算法来优化薄膜厚度。遗传算法是一种基于生物进化和适者生存的全局优化算法, 具有高鲁棒性、高效率的特点, 适合处理多元优化问题^[19-20]。在优化过程中, 最底层 Zr 厚度不是优化变量, 其值统一设置为 400 nm。因此, 在 $2(N+1)$ 层结构的研究波长范围内, 遗传算法只优化 $(2N+1)$ 层的厚度以获得良好的吸收性能^[21]。遗传算法优化的平均吸收效率为

$$A_v = \frac{\sum A(\lambda)}{p_0}, \quad (5)$$

式中: A_v 为特定波长下由传输矩阵法计算的平均吸收效率; $A(\lambda)$ 为采样波长点处的吸收效率; p_0 为采样波长点的个数。

3 结果与分析

本文首先研究了 10 层 Zr/SiO₂ 结构吸波体的光吸收特性, 该 10 层 Zr/SiO₂ 构成了 4 个串联的 FP 腔, 数值仿真波长为 0.4~3.0 μm , 优化的膜层厚度 $h_1 \sim h_9$ 分别为 130.8, 1.7, 111.4, 3.7, 115.8, 6.3, 114.3, 11.0, 107 nm, 这里 h_{10} 为底部层厚度, 取值 400 nm。考虑 TE 入射光由上表面垂直入射, 数值计算结果如图 2 所示。由图 2 可知, 在 0.4~3.0 μm 的波长范围内, 其最低吸收效率均超过 96.6%。根据(5)式, 计算可得该吸波体在该波长范围内的平均吸收效率高达 98.6%。

为了确保计算结果的可靠性和正确性, 使用时域有限差分 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 法及有限元方法 (Finite Element Method, FEM) 分别建立三维模型, 进行全矢量仿真以验证

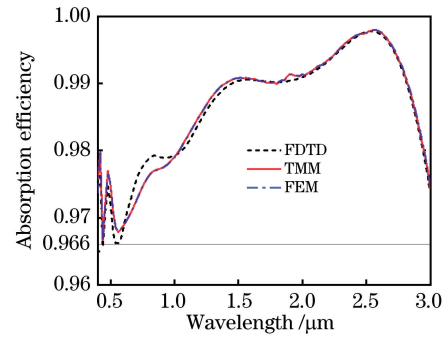


图 2 10 层 Zr/SiO₂ 结构吸波体的吸收谱
Fig. 2 Absorption spectra of 10-layered Zr/SiO₂ absorber

传输矩阵法的数值计算结果。仿真结果如图 2 所示, 结果表明, TMM 和 FEM 仿真得到的吸收谱是一致的, 与 FDTD 法仿真获得的结果略有差别, 但变化趋势是一致的。在 0.4~3.0 μm 波长范围内, 用 FEM 和 TMM 获得的平均吸收效率都为 98.67%, 用 FDTD 法获得的平均吸收效率为 98.66%, 相差约为 0.01%。这是因为 FDTD 法在大波长范围内仿真, 材料色散往往会引起误差。先前报道的大部分超宽带吸波体, 通常是以贵金属(金或银)作为吸波材料。为了便于比较, 本文用其他金属(Au, Cr, Fe, Ti)取代模型结构中的 Zr 并进行仿真。不同金属膜对应的吸收谱如图 3(a)所示。可以看出, 多层 Au/SiO₂ 结构的吸收谱与其他四种结构的吸收谱存在较大差异, 其吸收性能最差。在 0.4~1.8 μm 的波长范围内, 当金属薄膜为 Zr, Cr, Fe 和 Ti 时, 吸波体的吸收谱几乎重合, 即在 0.4~1.8 μm 波段内吸收性能差异不大。差异主要体现在 1.8~3.0 μm 波长范围内, 在该波长范围内, 当金属薄膜为铬、铁时, 吸波体的吸收性能随着波长的增加而显著下降, 而在同样层数下, 当金属薄膜为 Zr/SiO₂ 时, 吸波体在该波长范围内依然维持了高吸收特性。计算结果表明, 当金属薄膜为 Cr, Fe, Ti, Au 时, 10 层平面金属/介质结构吸波体在 0.4~3.0 μm 内的平均吸收效率分别为 94.5%、93.8%、97.5% 和 14.6%, 均低于本文所提结构的 98.6%。

为了解释超宽带和高吸收性能, 本文基于阻抗变换方法, 详细计算和分析了所提结构的归一化阻抗。根据文献 [22], 归一化阻抗为 $Z = \frac{|1 + \sqrt{R(\lambda)}|}{|1 - \sqrt{R(\lambda)}|}$ 。阻抗匹配是完美吸收的前提, 因为更好的阻抗匹配可以减少光的反射。众所周知, 自由空间的归一化阻抗为 $Z_0 = 1$, 为了实现超宽带完

美吸收,吸波体应在整个工作波长范围内实现阻抗匹配,即满足条件 $Z=Z_0$ 。由图 3(b)可知,10 层 Zr/SiO₂ 结构吸波体的归一化阻抗在 0.4~3.0 μm 波长范围内都接近于 1,阻抗匹配情况最好,阻抗匹配情

况与图 3(a)中的完美吸收带宽情况吻合。10 层 Au/SiO₂ 结构的归一化阻抗匹配情况最差,这说明其吸收性能也最差[图 3(b)]。这几种情况下的阻抗匹配曲线不一致,是由不同金属材料的特性引起的。

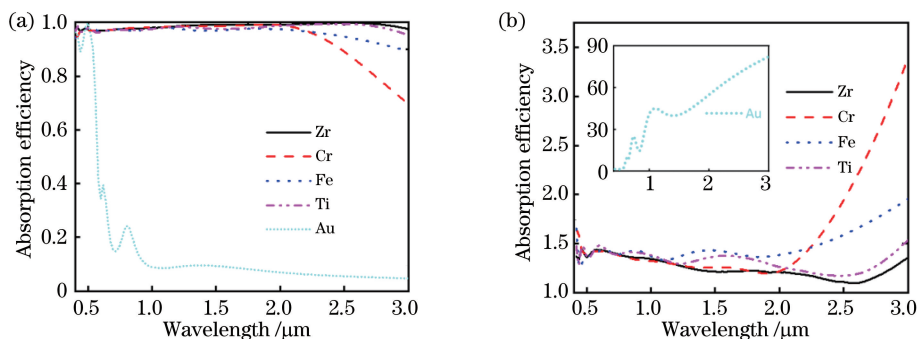


图 3 不同金属薄膜下吸波体的光学特性。(a)吸收光谱;(b)归一化阻抗

Fig. 3 Optical properties of absorbers for different metal films. (a) Absorption spectra; (b) normalized impedance

图 4(a)、(b)给出了上述 Zr/SiO₂ 结构吸波体沿 z 轴方向的电场分布和吸收强度分布与波长的关系。这里定义垂直方向为 z 轴,吸波体上表面为 z 轴的零点位置,结构中的 Zr/SiO₂ 平面薄膜构成了三个 FP 腔,且电磁波在 SiO₂ 层中激发了腔谐振模式,来自顶部和底部的多层金属的来回反射振荡在内部形成了驻波,导致了图 4(a)所示的电场分布。电场主要分布在上面的三个光学腔中,且上层的电场强度明显强于下层。这说明光经过这个 10 层金属-介质薄膜系统后,确实被半透明的金属吸收

层吸收。为了观察每层金属对吸收的贡献,图 4(b)给出了不同金属层的吸收强度与波长的关系。可以看出,靠近顶部的金属层的吸收强度高,厚度较薄,另一方面,靠近底部的金属层的吸收强度低,厚度较大。为了评估每层金属对吸收的总贡献,图 4(c)演示了每层金属的总吸收效率与波长的关系。值得注意的是,在研究的波长范围内,SiO₂ 是无损耗介质,因此这里只研究各金属层对电磁波的吸收。观察图 4(c)可知,在所研究的波长范围(0.4~3.0 μm)内,各金属层的吸收效率在波长较短处变化剧烈,随着

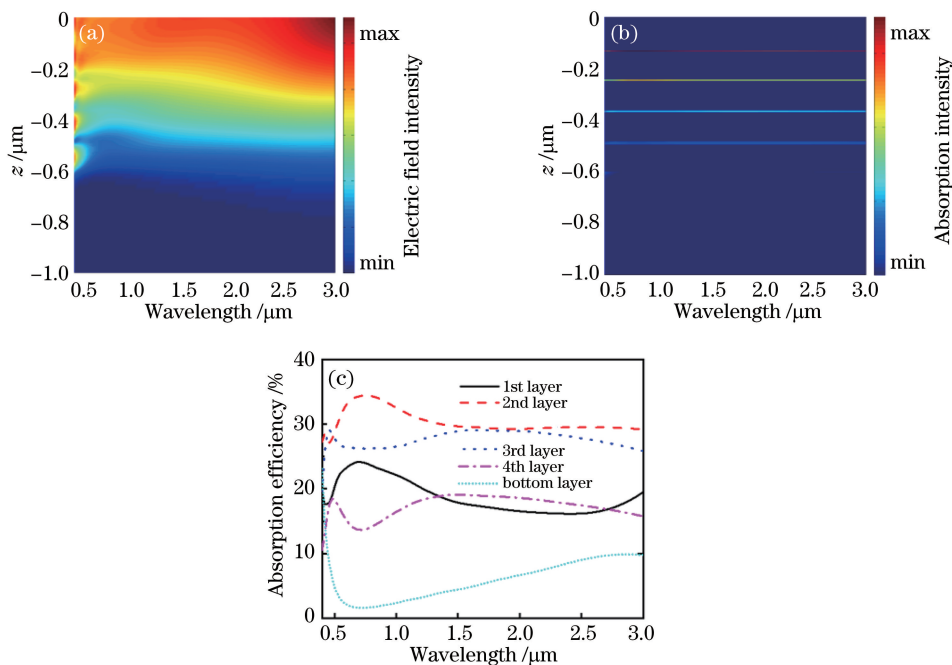


图 4 各个物理量与波长的关系。(a)电场强度;(b)吸收强度;(c)各层金属吸收率

Fig. 4 Relationship between each physical variable and wavelength. (a) Electric field intensity; (b) absorption intensity; (c) absorption efficiency of each metal layer

波长的变大,各金属层对吸收的贡献趋于稳定。此外,在整个波长范围内,上面的四层金属薄膜对吸收起主要贡献作用,这与图 4(b)的分析结果一致。

为了分析膜层厚度对吸收性能的影响,图 5(a)~(h)分别演示了各薄膜层($h_1 \sim h_8$)在不同厚度条件下的吸收谱。介质层(SiO_2)的厚度变化范围为 0~200 nm,仿真步长为 40 nm,金属层(Zr)的厚度变化范围为 0~20 nm,仿真步长设置为 4 nm。需要指出的是:在研究某一特定膜层厚度对吸收性

能的影响时,保持其他薄膜厚度参数不变,且该特定膜层厚度最优的参数值仍在仿真范围之内。由图 5(a)~(d)可知,介质层厚度的变化引起 FP 腔谐振波长的变化,进而 FP 腔的共振吸收特性发生变化,这会影结构对电磁波的吸收。由图 5(e)~(h)可以看到:金属层厚度太大或太小均会导致结构吸收效率降低。这是因为金属层的厚度太小,该层金属对电磁波的吸收会减小;金属层的厚度太大,电磁波的向下传输受到阻碍,从而吸波体的吸收性能受到影响。

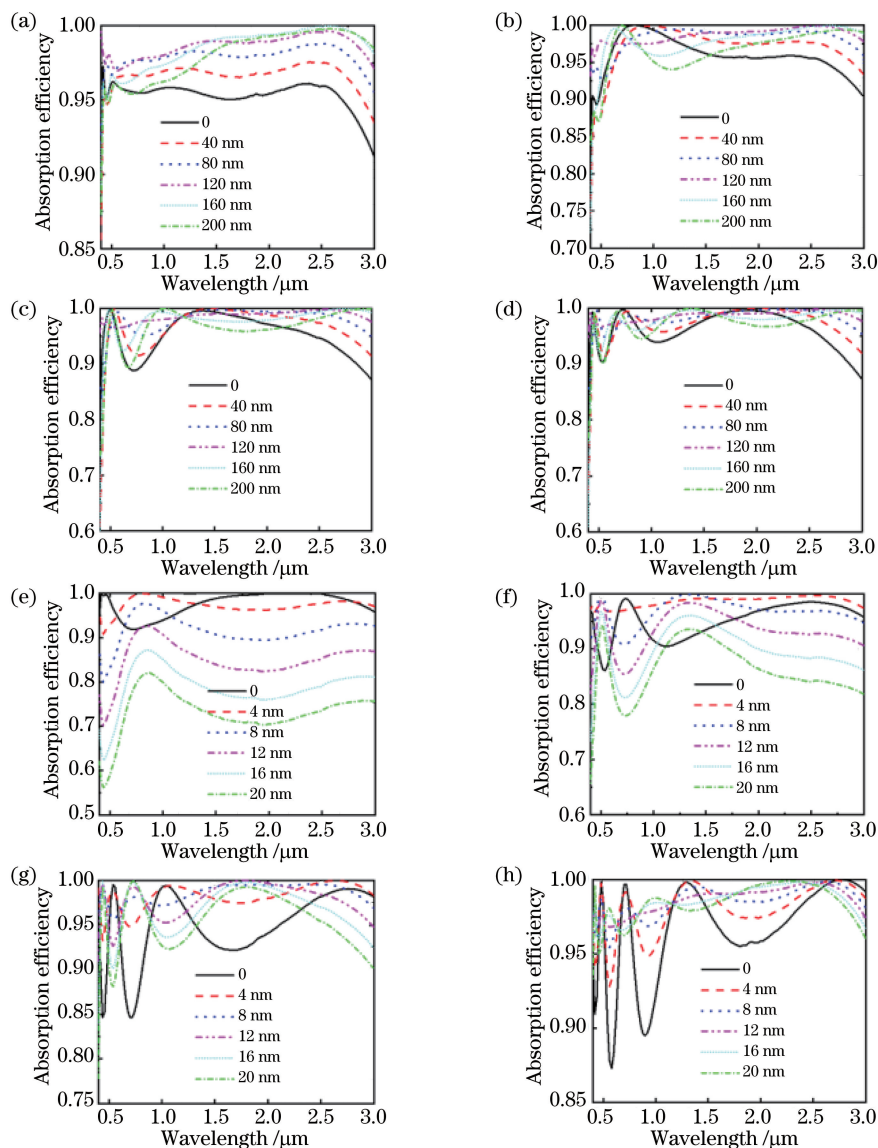


图 5 吸波体在不同膜层厚度下的吸收谱。(a) h_1 ; (b) h_2 ; (c) h_3 ; (d) h_4 ; (e) h_5 ; (f) h_6 ; (g) h_7 ; (h) h_8

Fig. 5 Absorption spectra of absorbers with different film layer thicknesses. (a) h_1 ; (b) h_2 ; (c) h_3 ; (d) h_4 ; (e) h_5 ; (f) h_6 ; (g) h_7 ; (h) h_8

本文还计算了不同层数下 Au/ SiO_2 结构的吸收性能,结果如图 6 所示。当层数分别为 4, 6, 8, 10 和 12 时,器件在 0.4~3.0 μm 内的平均吸收效率

分别为 91.5%, 95.5%, 97.9%, 98.6% 和 98.6%。仿真波长范围为 0.4~3.0 μm ,当层数确定后,所给出的吸收谱为相应结构膜层厚度优化后的结果,相

关的结构参数如表 1 所示。由图 6 可知,吸波体对 1.1~2.3 μm 波长范围内的光吸收几乎不受结构层数的影响,而随着层数的增加,吸波体对短波长光的吸收效率显著增大,与此同时,对 2.3~3.0 μm 范围内的光的吸收效率也有小幅度的提升,从而使得器件在整个工作波段内的平均吸收效率增大。多层结构由 4 层(构成单个 FP 腔)增加到 10 层(构成 4 个 FP 腔)时,在 0.4~3.0 μm 范围内,光平均吸收效率由 91.5% 上升到 98.6%。但器件吸收性能并未一直随着薄膜层数的增加而增加,当层数 ≥ 10 时,平均吸收效率趋于稳定。

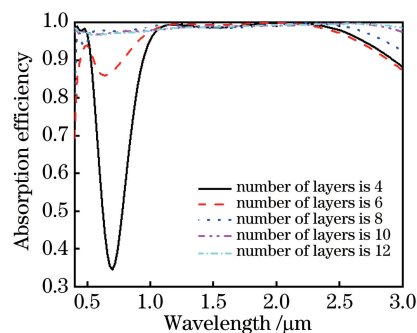


图 6 不同薄膜层数下吸波体的吸收谱
Fig. 6 Absorption spectra of absorbers with different film layer numbers

表 1 不同层数下吸波体在 0.4~3.0 μm 范围内实现最高平均吸收效率时的结构参数
Table 1 Structural parameters for realizing highest average absorption efficiency of absorbers with different layer numbers in range of 0.4~3.0 μm

Layer number	4	6	8	10	12
h_1/nm	229.9	215.0	136.7	130.8	130.3
h_2/nm	8.9	5.4	2.6	1.7	1.3
h_3/nm	222.6	128.4	115.9	111.4	108.4
h_4/nm	400.0	8.2	5.1	3.7	3.1
h_5/nm		112.8	113.6	115.8	116.1
h_6/nm		400.0	8.7	6.3	5.1
h_7/nm			111.2	114.3	117.1
h_8/nm			400.0	11.0	8.2
h_9/nm				107.0	113.7
h_{10}/nm				400.0	15.5
h_{11}/nm					102.3
h_{12}/nm					400.0

为了在实际应用中能够接收到更多的入射光,本文也分析了吸波体在斜入射时的吸收性能。入射角定义为波矢量与垂直方向的夹角,当光在 TE 偏振下以角度 θ 入射时,磁场 H 倾斜,电场 E 的方向始终垂直于纸面;在 TM 偏振情况下,磁场 H 的方向始终垂直于纸面,电场 E 倾斜。图 7(a)、(b)分别

演示了 10 层 Zr/SiO_2 结构在 TE 和 TM 偏振入射光下的吸收特性与入射角度的关系。由图 7 可知,即使 TE 和 TM 偏振入射光的入射角较大,吸波体在 0.4~3.0 μm 波长范围内依然维持高吸收性能。入射角度为 60° 时,该结构在 TE 波和 TM 波入射下的平均吸收效率分别为 87.0% 和 95.9%。仿真结

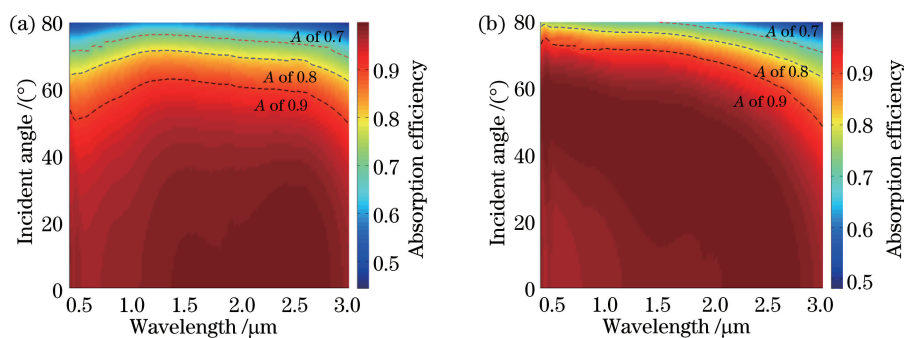


图 7 不同偏振条件下光吸收效率与入射角关系。(a) TE 偏振; (b) TM 偏振
Fig. 7 Relationship between light absorption efficiency and incident angle under different polarization conditions.
(a) TE polarization; (b) TM polarization

果表明,本文所设计的多层 Zr/SiO₂ 结构的吸波体具有广角吸收的特点,因此可用于太阳能和热能收集等。

带宽和吸收效率是衡量宽带吸波体性能优劣的重要指标,为了提高吸波体的吸波性能,本文分析了多层 Zr/SiO₂ 结构在其他波段范围内的吸收特性,并将其与其他报道的吸波体进行了对比。表 2 给出了该结构在 0.4~0.8 μm, 0.4~1.5 μm, 0.4~2.0 μm, 0.4~2.5 μm, 0.4~3.0 μm, 0.4~4.0 μm, 0.4~5.0 μm, 0.4~6.0 μm, 0.4~7.0 μm, 0.4~8.0 μm 波段内的平均吸收效率与层

数(膜厚已优化)的关系。从表 2 中可以看到,在 0.4~0.8 μm 范围内,8 层 Zr/SiO₂ 结构构成了三个 FP 腔,可实现高达 99.8% 的平均吸收效率。随着研究波段的进一步变宽,为了实现最优的平均吸收效率,则需要更多的层数。最优平均吸收效率随着带宽的变大而逐渐降低。该结构在 0.4~8.0 μm 范围内的平均吸收效率为 96.4%。相比于其他结构的吸波体,在相同层数下,所提吸波体结构能实现更高的吸收效率和更大的工作带宽,而在近似相等的吸收效率和工作带宽条件下,所提吸波体结构对结构层数的需求更少。

表 2 不同波段下最优平均吸收效率与结构层数的关系

Table 2 Relationship between optimal average absorption efficiency and layer number for each wavelength range

Layer number	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-	0.4-
	0.8 μm	1.5 μm	2.0 μm	2.5 μm	3.0 μm	4.0 μm	5.0 μm	6.0 μm	7.0 μm	8.0 μm
4	99.5 ^[21]	95.9 ^[23]	93.8	92.0	91.5	88.0	84.9	81.9	79.1	74.9
6	99.6 ^[24]	99.0 ^[25]	98.7 ^[26]	97.3	95.5	94.6 ^[27]	92.9	91.3	88.7	86.8
8	99.8	99.1	98.8 ^[28]	98.7 ^[15]	97.9	96.7	95.7	94.5	93.1	90.6
10	99.8	99.1	98.9	98.7	98.6	97.7	96.8	96.1	94.4	92.5
12					98.6	98.2	97.2	96.9	95.7	93.8
14						98.4	97.9	97.3	96.4	94.6
16							98.1	97.7	97.1	95.2
18							98.3	97.9	97.4	95.6
20								97.9	97.6	96.0
22									97.7	96.2
24									97.8	96.4

unit: %

此外,本文还通过热模拟研究了该超宽带完美吸波体中的光热效应^[29-30]。在热学模拟中,上表面边界设置为对流边界条件,对流传热系数为 $h = 10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,底部的边界条件设置为固定温度热边界条件(300 K),把光学仿真结果作为热源导入到热仿真模型中。Zr 和 SiO₂ 的热导率分别取 $k_{\text{Zr}} = 22.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $k_{\text{SiO}_2} = 0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,

比热容分别取 $C_{\text{Zr}} = 270 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $C_{\text{SiO}_2} = 200 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。图 8(a)演示了在不同的谐振波长(531,1345,2580 nm)条件下,吸波体的温度变化与入射光强的关系。可以看出,吸波体的温度变化与输入光功率呈线性关系。插图是在入射光强为 $100 \text{ W}/\text{cm}^2$,入射波长为 1345 nm 时的温度分布场。当温度达到稳态时,结构上部温度高出下部温

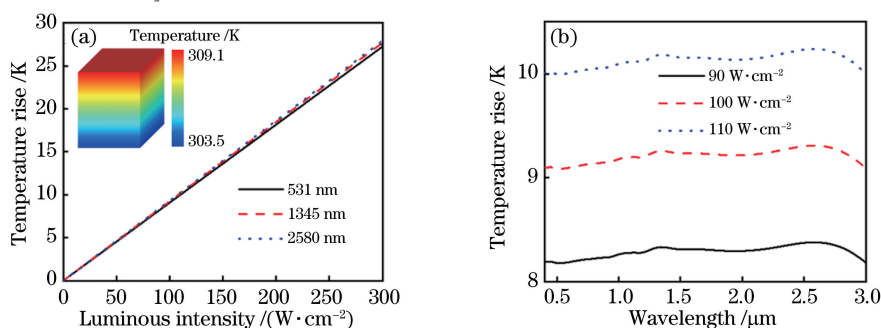


图 8 温升与各参数的关系。(a)不同入射波长下温升随光强的变化;(b)不同光强下温升随入射波长的变化

Fig. 8 Relationship between temperature rise and each parameter. (a) Temperature rise versus luminous intensity for different incident wavelengths; (b) temperature rise versus incident wavelength for different luminous intensities

度 5.6 K。图 8(b)展示了在 400~3000 nm 波长范围内,吸波体温度变化与入射光强的关系。很显然,入射光强越大,吸波体的温度变化越大,该结构可以在大波长范围内有效地吸收入射光并将光能转换成热能。因此,本文所提的吸波体可用于热能收集。

光热转化效率是衡量太阳能吸波体性能优劣的一个重要指标。太阳能吸波体的光热转化效率 η_T ^[31-33] 为

$$\eta_T = \bar{\alpha}_{\text{total}} - \bar{\epsilon}_{\text{total}} \cdot \frac{\sigma T^4}{H_s}, \quad (6)$$

$$\bar{\alpha}_{\text{total}} = \frac{\int_0^{\infty} A I_{\text{AMI},5}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\text{AMI},5}(\lambda) d\lambda}, \quad (7)$$

$$\bar{\epsilon}_{\text{total}} = \frac{\int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda} I_{\text{BB}}(\lambda, T) d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\text{BB}}(\lambda, T) d\lambda}, \quad (8)$$

式中: $\bar{\alpha}_{\text{total}}$ 和 $\bar{\epsilon}_{\text{total}}$ 分别为光垂直入射时太阳能吸波体的加权吸收率和加权热辐射率; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; T 为工作温度; H_s 由文献[34]获得; ϵ_{λ} 为吸波体的光谱发射效率,且 $A = \epsilon_{\lambda}$; h 为普朗克常数; c 为光速; k 为玻尔兹曼常数; $I_{\text{BB}}(\lambda, T)$ 为在温度 T 下吸收体的黑体辐射光谱强度; $I_{\text{AMI},5}$

为大气质量为 1.5 时的太阳辐射光谱^[34]。由于太阳能光谱的能量集中在 0.4~1.5 μm 波长范围内,因此本文以表 2 中 0.4~1.5 μm 波长范围内六层薄膜结构的吸波体(膜层厚度 $h_1 \sim h_6$ 分别为 108.6, 3.6, 106.3, 9.4, 94.6, 400 nm)为例,计算和分析其热辐射特性。为了便于比较,图 9 演示了太阳能辐射谱、光在垂直入射情况下吸波体的吸收谱和不同温度下的归一化热辐射谱。由图 9 可知,在低温时,该结构的热辐射可以忽略不计,随着温度的上升,热辐射增强,且热辐射峰值波长向短波长方向漂移。当吸波体的温度分别为 1000, 1300, 1500 K 时,吸波体的热辐射峰值波长分别为 2.78, 2.22, 1.93 μm ,即使该吸波体的温度高达 1000 K,其在 2.78 μm 处的归一化峰值辐射强度也只有 0.131。此外,由(6)~(8)式计算可得吸波体的 $\bar{\alpha}_{\text{total}}$ 及不同温度下的 $\bar{\epsilon}_{\text{total}}$ 和 η_T ,结果如表 3 所示。由表 3 可知,吸波体在 1000 K 下具有高达 94.4% 的光热转化效率,与太阳能吸波体的吸收效率(97.2%)接近。即使工作温度升高到 1500 K,该吸波体仍然具有 77.3% 的光热转化效率。这表明即使在很高的工作温度下,该吸波体也具有很高的光热转化效率。经上述计算和分析可得,本文所提出的平面金属/介质薄膜结构宽带吸波体在太阳能光-热转化等领域具有良好的应用前景。

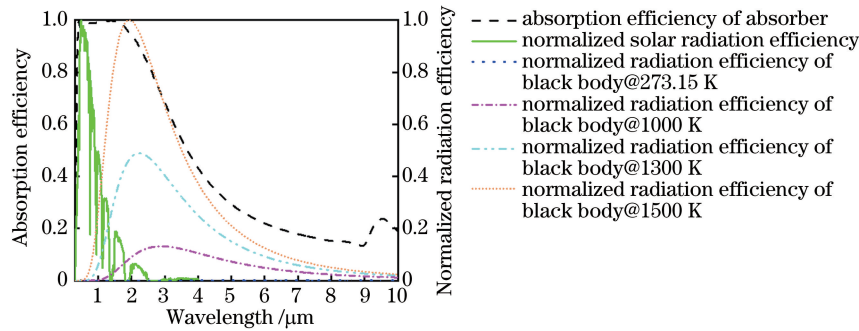


图 9 吸波体的吸收谱、归一化太阳辐射谱及不同温度下的归一化黑体辐射谱

Fig. 9 Absorption spectrum of absorber, normalized solar radiation spectrum and normalized radiation spectra of black body at different temperatures

表 3 不同温度下,吸波体的 $\bar{\alpha}_{\text{total}}$, $\bar{\epsilon}_{\text{total}}$ 和 η_T

Table 3 $\bar{\alpha}_{\text{total}}$, $\bar{\epsilon}_{\text{total}}$ and η_T of absorber for different temperatures

Temperature /K	$\bar{\alpha}_{\text{total}}$	$\bar{\epsilon}_{\text{total}}$	η_T
273.15	0.972	0.001	0.972
1000	0.972	0.506	0.944
1300	0.972	0.629	0.870
1500	0.972	0.694	0.773

4 结 论

提出了一种具有多层 Zr/SiO₂ 结构的超宽带完美吸波体。利用传输矩阵法计算了该吸波体的吸收效率,并结合遗传算法,优化了膜层厚度。计算结果表明,所提结构在 0.4~3 μm 范围内的吸收效率均超过了 96.6%,平均吸收效率可达 98.6%。还研究

了不同波段内的吸收效率与结构层数的关系,即使在 $0.4\sim 8\ \mu\text{m}$ 的大波长范围内,所提吸波体的平均吸收效率依然达到了 96.4%,其吸收性能超越了目前已报道的大多数多层金属/介质结构吸波体的吸收效率。所提吸波体具有结构简单、工作宽带大、吸收效率高等特点,且易于制备,对入射波的入射角度和偏振态不敏感,因此在太阳能收集、热辐射器、红外隐身等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Landy N I, Sajuyigbe S, Mock J J, et al. Perfect metamaterial absorber[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(20): 207402.
- [2] Wang Y, Leng Y B, Dong L H, et al. Design of tunable metamaterial absorber based on graphene-metal hybrid structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0716001.
王越, 冷雁冰, 董连和, 等. 基于石墨烯-金属混合结构的可调超材料吸波体设计[J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0716001.
- [3] Mao Q J, Feng C Z. Absorptance properties of nested-ring metamaterial absorbers based on magnetic polaritons[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0816001.
毛前军, 冯春早. 基于磁激元的嵌套环超材料吸波器的吸收特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0816001.
- [4] Durmaz H, Cetin A E, Li Y Y, et al. A polarization insensitive wide-band perfect absorber[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(8): 1900188.
- [5] Deng H X, Mathai C J, Gangopadhyay S, et al. Ultra-broadband infrared absorption by tapered hyperbolic multilayer waveguides [J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 6360-6370.
- [6] Bagheri S, Zgrabik C M, Gissibl T, et al. Large-area fabrication of TiN nanoantenna arrays for refractory plasmonics in the mid-infrared by femtosecond direct laser writing and interference lithography [Invited J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(11): 2625-2633.
- [7] Yuzhakova A, Zhukova L, Akif'eva N, et al. Application of infrared polycrystalline fibers in thermal imaging temperature control systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 314: 112237.
- [8] Maier T, Brückl H. Wavelength-tunable microbolometers with metamaterial absorbers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(19): 3012-3014.
- [9] Liu R H, Zhao D P, Zhang J K, et al. Preparation and characteristics of middle and far infrared stealth of photonic crystal film [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0816001.
刘瑞煌, 赵大鹏, 张继魁, 等. 中远红外隐身光子晶体薄膜的制备及隐身特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0816001.
- [10] Aydin K, Ferry V E, Briggs R M, et al. Broadband polarization-independent resonant light absorption using ultrathin plasmonic super absorbers[J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 517.
- [11] Cong J W, Zhou Z Q, Yun B F, et al. Broadband visible-light absorber via hybridization of propagating surface plasmon [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 1965-1968.
- [12] Jin X X, Lou Z K, Zhang H W, et al. Random distributed feedback fiber laser at $2.1\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 4923-4926.
- [13] Wang H, Alshehri H, Su H, et al. Design, fabrication and optical characterizations of large-area lithography-free ultrathin multilayer selective solar coatings with excellent thermal stability in air [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 445-452.
- [14] Wu J B, Lin M L, Cong X, et al. Raman spectroscopy of graphene-based materials and its applications in related devices [J]. *Chemical Society Reviews*, 2018, 47(5): 1822-1873.
- [15] Hu E T, Liu X X, Yao Y, et al. Multilayered metal-dielectric film structure for highly efficient solar selective absorption [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(6): 066428.
- [16] Gao J X, Lan Y L, Wu J J. Magnetically tunable multi-band absorption of graphene based on photonic crystal heterostructure [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(5): 624-630.
高金霞, 兰云蕾, 武继江. 基于光子晶体异质结构的磁可调石墨烯多带吸收 [J]. *发光学报*, 2020, 41(5): 624-630.
- [17] Palik E D. Handbook of optical constants of solids [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1998.
- [18] Sani E, Mercatelli L, Meucci M, et al. Compositional dependence of optical properties of zirconium, hafnium and tantalum carbides for solar absorber applications [J]. *Solar Energy*, 2016, 131: 199-207.
- [19] Jalsan K E, Soman R N, Flouri K, et al. Layout optimization of wireless sensor networks for structural health monitoring [J]. *Smart Structures and Systems*, 2014, 14(1): 39-54.
- [20] Livak K J, Schmittgen T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta C_T}$ method [J]. *Methods*, 2001, 25(4): 402-408.

- [21] Li S R, Liu K, Long X Y, et al. Numerical study of infrared broadband multilayer film absorber with tunable structural colors [J]. Optics Communications, 2020, 459: 124950.
- [22] Wu D, Liu C, Liu Y M, et al. Numerical study of an ultra-broadband near-perfect solar absorber in the visible and near-infrared region [J]. Optics Letters, 2017, 42(3): 450-453.
- [23] Zhu L, Wang Y, Liu Y Y, et al. Design and analysis of ultra broadband nano-absorber for solar energy harvesting [J]. Plasmonics, 2018, 13(2): 475-481.
- [24] Gao H X, Peng W, Liang Y Z, et al. Plasmonic broadband perfect absorber for visible light solar cells application [J]. Plasmonics, 2020, 15(2): 573-580.
- [25] Hu E T, Yao Y, Zang K Y, et al. High photon-to-heat conversion efficiency in the wavelength region of 250–1200 nm based on a thermoelectric Bi_2Te_3 film structure [J]. Scientific Reports, 7(1): 44614.
- [26] Qin F, Chen X F, Yi Z, et al. Ultra-broadband and wide-angle perfect solar absorber based on TiN nanodisk and Ti thin film structure [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2020, 211: 110535.
- [27] Liu G H, Chen T, Xu J L, et al. Solar evaporation for simultaneous steam and power generation [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(2): 513-531.
- [28] Li J K, Chen X F, Yi Z, et al. Broadband solar energy absorber based on monolayer molybdenum disulfide using tungsten elliptical arrays [J]. Materials Today Energy, 2020, 16: 100390.
- [29] Monier R, Griffin E, Gebran M, et al. The chemical compositions of the two new HgMn stars HD 30085 and HD 30963: comparison to χ Lupi A, ν cap, and HD 174567 [J]. The Astronomical Journal, 2019, 158(4): 157.
- [30] Khoza N, Nuru Z Y, Sackey J, et al. Structural and optical properties of $\text{ZrO}_x/\text{Zr}/\text{ZrO}_x/\text{Al}_x\text{O}_y$ multilayered coatings as selective solar absorbers [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 773: 975-979.
- [31] Trotter D M, Sievers A J. Spectral selectivity of high-temperature solar absorbers [J]. Applied Optics, 1980, 19(5): 711-728.
- [32] Gupta M C, Ungaro C, Foley IV J J, et al. Optical nanostructures design, fabrication, and applications for solar/thermal energy conversion [J]. Solar Energy, 2018, 165: 100-114.
- [33] Rinnerbauer V, Lausecker E, Schäffler F, et al. Nanoimprinted superlattice metallic photonic crystal as ultraselective solar absorber [J]. Optica, 2015, 2(8): 743-746.
- [34] Wang H, Chang J Y, Yang Y, et al. Performance analysis of solar thermophotovoltaic conversion enhanced by selective metamaterial absorbers and emitters [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 98: 788-798.