

基于 VO₂ 相变的热致型智能辐射器设计

蒋 蔚¹, 李 毅^{1,2}, 陈培祖¹, 伍征义¹, 徐婷婷¹, 刘志敏¹,
张 娇¹, 方宝英¹, 王晓华^{1,3}, 肖 寒^{1,4}

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

³上海电力学院电子与信息工程学院, 上海 200090;

⁴上海健康医学院医学影像学院, 上海 201318

摘要 基于 VO₂/Si₃N₄/Al 结构设计了一种发射率可调控的智能辐射器 (SRD)。通过薄膜特征矩阵理论 SRD 的光学特性进行分析, 结果表明 VO₂ 的厚度决定了 SRD 的辐射能力, 其调控光谱范围与介质层 Si₃N₄ 的厚度密切相关, 优化后的 SRD 发射率调控范围为 0.38。采用 MgF₂/Si₃N₄ 双层减反膜进一步优化 SRD, 使其低温 (20 °C) 和高温 (100 °C) 发射率分别达到 0.30 和 0.91, 调控范围扩大至 0.61。利用有限时域差分法分析了有无减反膜时 SRD 的辐射场分布, 结果表明减反膜可以提高 SRD 的温度调控效率, 增强空间复杂环境适应能力。设计思路对高性能 SRD 的制备和航天器热控系统的轻量化具有重要意义。

关键词 薄膜; 智能辐射器; 发射率; 二氧化钒; 减反膜

中图分类号 TB43; TN214 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0131001

Design of Thermochromic Smart Radiation Device Based on VO₂ Phase Change

Jiang Wei¹, Li Yi^{1,2}, Chen Peizu¹, Wu Zhengyi¹, Xu Tingting¹, Liu Zhimin¹,
Zhang Jiao¹, Fang Baoying¹, Wang Xiaohua^{1,3}, Xiao Han^{1,4}

¹ School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

² Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, Shanghai 200093, China;

³ School of Electric and Information, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

⁴ College of Medical Imaging, Shanghai University of Medicine and Health Sciences, Shanghai 201318, China

Abstract A smart radiation device (SRD) of VO₂/Si₃N₄/Al structure with tunable emittance is designed. The optical properties of SRD are studied through the optical thin film characteristic matrix analytical method. The results show that emission properties of SRD are determined by the thickness of VO₂ and the modulation wavelength range is related to the thickness of Si₃N₄ dielectric layer. The emittance tunability of the optimized SRD is 0.38. The SRD with MgF₂/Si₃N₄ bi-layer anti-reflection coating presents an emittance of 0.30 at 20 °C and 0.91 at 100 °C, and the tunability is increased to 0.61. The finite difference time domain method is used to analyze the modulated radiation distribution of SRDs with or without anti-reflection coating. It is proved that the added anti-reflection coating can improve the emittance-switching efficiency of SRD and enhance its adaptability in complex environment. The method can give reference to the design of high performance SRD and meets the need for a lighter thermal control device of spacecraft.

收稿日期: 2016-07-01; **收到修改稿日期:** 2016-08-12

基金项目: 国家 863 计划(2006AA03Z348)、教育部科学技术研究重点项目(207033)、上海市科学技术委员会科技攻关计划(06DZ11415)、上海市教育委员会科技创新重点项目(10ZZ94)

作者简介: 蒋 蔚(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电材料方面的研究。E-mail: jiangwei8113@163.com

导师简介: 李 毅(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电材料、光电器件和微光机电系统等方面的研究。

E-mail: liyi@usst.edu.cn(通信联系人)

Key words thin films; smart radiation device; emittance; vanadium dioxide; anti-reflection coating
OCIS codes 310.6860; 160.6840; 230.4170

1 引 言

在航天任务中,温度是决定航天器内部仪器设备正常运转的关键因素之一。在轨空间环境中,航天器内部与外空间的主要热交换方式为热辐射,由于外部环境温度波动范围大,为保证各设备正常运转,目前航天器的温控手段主要是采用百叶窗、辐射换热器、热管等有源式复杂装置,这些装置又大又重,严重影响了火箭的有限载荷能力。近年来人们关注最多的是智能辐射器(SRD),该设备可作为辐射窗口直接贴装于飞行器表面工作,且质量轻、体积小、安装灵活,被认为是微小卫星发展的关键技术之一^[1-4]。

SRD进行温度调控的核心是具有热致变色或电致变色特性的薄膜,其辐射特性可随自身温度或电场变化而明显改变。相对于电致型SRD,热致型SRD无需施加额外电场激励即可完成对热辐射的调控,在能源和空间有限的条件下更具优势。在具有热致相变特性的材料中,二氧化钒(VO_2)在相变前后红外光学特性的变化明显,且相变温度接近于室温,从而使其在热致型SRD的研究和应用中极具潜力,人们也因此对基于 VO_2 的热致型SRD进行了大量研究。Benkahoul等^[5]选取Al作为衬底,采用磁控溅射法制备了 VO_2/Al SRD,其红外辐射调控范围仅为0.22。Hendaoui等^[6-7]通过脉冲激光沉积法制备 VO_2/Al SRD,其动态范围约为0.38,并进一步采用钨掺杂二氧化钒制备了 $\text{V}_{1-x}\text{W}_x\text{O}_2/\text{SiO}_2/\text{Al}/\text{SiO}_2$ “三明治”结构,将调控范围提高至0.49。Wang等^[8]设计了 $\text{VO}_2/\text{HfO}_2/\text{Ag}/\text{Si}$ 复合结构SRD,其动态范围达到了0.55。上述研究虽然实现了SRD的基本功能,但其调控范围仍相对较小,温度调控效率低。针对实际空间环境,Feng等^[9]通过光学仿真设计了基于 TiO_2 和Ge的多层结构SRD,能有效防止空间表面充放电效应的产生,但其动态范围仍相对较小,且复杂的结构使制备过程较为困难。

本文从 $\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 结构出发,分析了各层厚度对调控特性的影响,通过光学仿真对各层参数进行优化,使设备具有相对较好的温度调控性能。进一步探索了高低温下红外光学减反膜对SRD发射率的影响,并提出了一种扩大SRD辐射调控范围的方法,并利用有限时域差分法分析了SRD的辐射场分布。

2 设计原理

热致型SRD的核心是红外发射率可变的相变材料,设计中采用具有热致相变特性的 VO_2 。 VO_2 是一种钒氧化物,其相变温度($T_c=68^\circ\text{C}$)接近室温,温度从室温升高至相变温度时, VO_2 材料会在纳秒级时间内发生半导体相到金属相的转变^[10-12],与之伴随的是光学特性的相应改变^[13]。为了研究基于 VO_2 的热致型SRD的光学特性,采用温度修正的Sellmeier色散模型来表征 VO_2 薄膜材料的光学特性^[14]。为此对获得的 VO_2 薄膜光学常数进行拟合从而得到色散关系, VO_2 薄膜材料的折射率和消光系数来自文献^[5]。

由于相变前后 VO_2 薄膜的光学特性差异较大,且SRD的工作光谱范围较宽,同时拟合 VO_2 在高、低温下的光学常数将使拟合的色散关系式残差较大,所以对低于、高于 VO_2 相变温度两种情况下的光学常数分别进行拟合,以确定高、低温各自适用的色散系数。最终获得 VO_2 薄膜的温度修正Sellmeier色散关系式为

$$n(T, \lambda) = a_1 + a_2\lambda + a_3/\lambda + a_4/\lambda^2 + a_5(T - 20) + a_6(T - 20)^2 + a_7(T - 20)^3 + [a_8(T - 20) + a_9(T - 20)^2]/\lambda^2, \quad (1)$$

$$k(T, \lambda) = b_1 + b_2\lambda + b_3/\lambda^2 + b_4(T - 20)^2 + b_5(T - 20)^3 + [b_6(T - 20) + b_7(T - 20)^2 + b_8(T - 20)^3]/(\lambda - b_9)^2, \quad (2)$$

式中 n 为折射率, k 为消光系数, T 为温度, λ 为波长, a_i 和 b_i 为色散系数。分别对低于、高于 T_c 时不同温度的多组折射率和消光系数数值进行关联拟合,得到色散系数 a_i 和 b_i 的值如表1所示。拟合效果如图1所示,拟合的色散关系式能较好地表征 VO_2 薄膜材料在高低温下的光学特性。

表 1 拟合参数

Table 1 Fitting parameters

Parameter	$T < T_c$	$T > T_c$	Parameter	$T < T_c$	$T > T_c$
a_1	5.6133×10^{-1}	9.9931×10^{-1}	b_1	3.5988×10^0	3.3184×10^0
a_2	1.2824×10^{-1}	-9.0161×10^{-2}	b_2	-2.5673×10^2	-3.9464×10^1
a_3	1.0374×10^1	-8.2113×10^1	b_3	1.6188×10^2	4.4420×10^1
a_4	-1.0788×10^1	1.1336×10^0	b_4	3.5991×10^{-2}	6.7721×10^{-4}
a_5	9.2113×10^{-1}	9.7044×10^{-1}	b_5	3.6143×10^{-3}	1.3218×10^{-5}
a_6	-6.8503×10^{-2}	-2.1164×10^{-2}	b_6	9.2714×10^1	9.8916×10^{-4}
a_7	1.1536×10^{-3}	1.3943×10^{-4}	b_7	9.2714×10^0	1.8318×10^{-5}
a_8	7.1281×10^{-2}	5.1783×10^0	b_8	9.2711×10^{-1}	1.0032×10^{-7}
a_9	-8.7159×10^{-3}	-4.4139×10^{-2}	b_9	-3.9707×10^0	2.1848×10^0

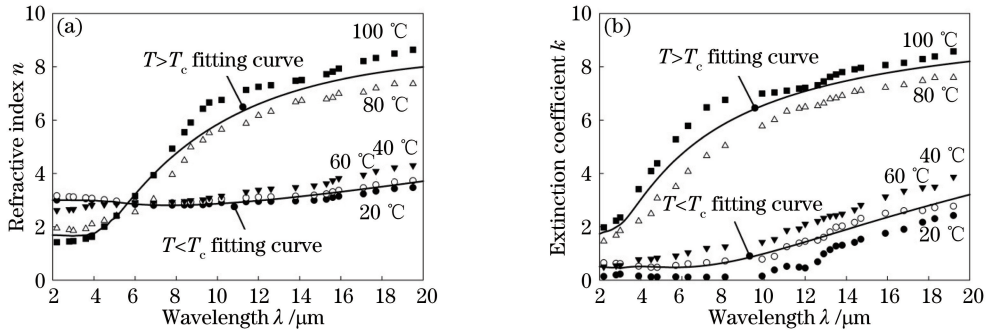


图 1 高低温下光学常数的拟合曲线。(a) 折射率 n ; (b) 消光系数 k

Fig. 1 Fitting curves of optical constants at high and low temperatures. (a) Refractive index n ; (b) extinction coefficient k

以低红外反射率材料(玻璃、蓝宝石等)作为衬底制备的 VO_2 薄膜,在高温时具有低红外透射率,而低温时则具有高红外透射率,这种结构属于热致变色智能窗^[15-16]。与智能窗的设计方案相反,热致型 SRD 一般采用高反射率材料(金、银、铝等)作为衬底。目前广泛采用相变材料层/介质层/红外高反射层的多层结构,其中介质层可采用 SiO_2 、 Si_3N_4 、 HfO_2 等材料。设计采用图 2 所示 $\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 作为基础结构,当环境温度低于 VO_2 的相变温度时,半导体相的 VO_2 与 Si_3N_4 具有相近的光学性质,SRD 表现为 Al 的红外反射特性;当环境温度高于 VO_2 的相变温度时,SRD 表现为反射型滤光特性,并且高吸收特性的金属相 VO_2 使其实现了宽波段截止^[17]。

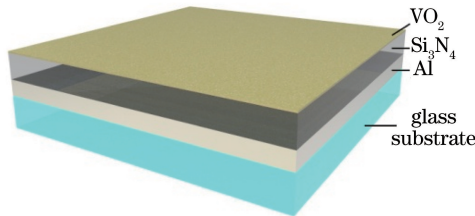


图 2 $\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 结构 SRD 示意图

Fig. 2 Schematic of SRD with $\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ structure

采用薄膜特征矩阵理论研究图 2 所示结构的反射特性从而得到其辐射特性^[18]。设入射介质的光学常数为 N_0 , Al 层的光学常数为 $N_s = n_s - ik_s$,厚度 d_s 大于其对工作波长的趋肤深度,确保光经过 Al 层时其透射率为零,因此也可以将 Al 作为衬底层; Si_3N_4 层的光学常数为 $N_1 = n_1 - ik_1$,厚度为 d_1 ,相位厚度为 $\delta_1 = 2\pi d_1(n_1 - ik_1)/\lambda$; VO_2 层的光学常数为 $N_2 = n_2 - ik_2$,厚度为 d_2 ,相位厚度为 $\delta_2 = 2\pi d_2(n_2 - ik_2)/\lambda$ 。对 SRD 多层薄膜矩阵计算得到整个结构的反射率为

$$R = \left\{ \left(N_0 - N_s \right) \cos \delta_1 \cos \delta_2 + \left(\frac{N_s N_2}{N_1} - \frac{N_0 N_1}{N_2} \right) \sin \delta_1 \sin \delta_2 + i \left[\left(\frac{N_s N_0}{N_1} - N_1 \right) \sin \delta_1 \cos \delta_2 + \right. \right.$$

$$\left(\frac{N_s N_0}{N_2} - N_2 \right) \sin \delta_2 \cos \delta_1 \Bigg] \Bigg/ \left\{ (N_0 - N_s) \cos \delta_1 \cos \delta_2 + \left(\frac{N_0 N_1}{N_2} + \frac{N_s N_2}{N_1} \right) \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \right. \\ \left. i \left[\left(\frac{N_s N_0}{N_1} + N_1 \right) \sin \delta_1 \cos \delta_2 + \left(\frac{N_s N_0}{N_2} + N_2 \right) \sin \delta_2 \cos \delta_1 \right] \right\}^2. \quad (3)$$

将 Al、Si₃N₄ 和拟合的 VO₂ 薄膜光学常数代入(3)式即得到 SRD 在高低温下不同波长的反射率。根据基尔霍夫定律,热平衡状态物体的光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$ 与光谱吸收率 $\alpha(\lambda)$ 相等,两者间的关系为

$$\epsilon(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - R(\lambda), \quad (4)$$

式中 $R(\lambda)$ 为光谱反射率^[19]。 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内总发射率 ϵ 的计算公式为

$$\epsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda, T) P(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda, T) d\lambda}, \quad (5)$$

式中 $P(\lambda, T)$ 为描述黑体辐射光谱分布的普朗克公式。根据欧洲航天局(ESA)对热控材料光学特性的测试标准(ECSS-Q-ST-70-09C), (5)式中可取 $\lambda_1 = 2 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 20 \mu\text{m}$ 的光谱范围来计算 SRD 的发射率^[20]。

3 SRD 的辐射特性

在图 2 所示结构中,首先确定金属 Al 层厚度为 300 nm,以获取高红外反射率并保证 SRD 透射率为零。Si₃N₄ 作为介质层,一方面能提高晶格匹配度,改善 VO₂ 薄膜晶体特性;另一方面合适的厚度决定了整个器件的调控特性。VO₂ 相变层在高低温条件下能对辐射特性进行调控,其厚度在器件的设计中尤为关键。

介质层 Si₃N₄ 的厚度在一定程度上决定 SRD 对辐射光谱的调控范围,因此先对该参数进行优化。40 nm 厚 VO₂、300 nm 厚 Al、不同厚度 Si₃N₄ 的 SRD 高低温辐射特性如图 3 所示。当 Si₃N₄ 厚度取 400 nm, SRD 在 2~2.6 μm 波长范围内高低温光谱发射率差值较小,而在波长大于 2.6 μm 之后高低温光谱发射率差值较大。将高低温光谱发射率开始出现高差值的起始点记为 λ_c ,可以发现随着 Si₃N₄ 厚度的增大, λ_c 会产生红移,其中 Si₃N₄ 厚度为 700 nm 时 $\lambda_c = 4 \mu\text{m}$, Si₃N₄ 厚度为 1000 nm 时 $\lambda_c = 6.2 \mu\text{m}$ 。小于 λ_c 的波长范围内 SRD 具有较低的高温光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$, λ_c 过大在一定程度上会导致 SRD 的高温发射率 ϵ_H 下降,所以从这一角度上考虑 λ_c 应尽量减小;而从另一角度考虑,对于大于 λ_c 的任一波长 λ ,随着 Si₃N₄ 厚度的增大,高温光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$ 也随之增大,低温光谱发射率仅小幅提高,所以 λ_c 较大在一定程度上又有利于提高发射率差值。为了确定最合适的 Si₃N₄ 厚度,通过(5)式计算上述各 Si₃N₄ 厚度的 SRD 高低温发射率差值 $\Delta\epsilon$,其中 Si₃N₄ 厚度取 400 nm 时 $\Delta\epsilon = 0.30$,取 500 nm 时 $\Delta\epsilon = 0.33$,取 700 nm 时 $\Delta\epsilon$ 为极大值 0.36, Si₃N₄ 厚度大于 700 nm 时 $\Delta\epsilon$ 呈下降趋势,当 Si₃N₄ 厚度取 1000 nm 时 $\Delta\epsilon$ 降至 0.31,因此选择 Si₃N₄ 厚度为 700 nm,并进行后续优化设计。

VO₂ 相变层的厚度不能太厚,一般为数十纳米,否则高温状态时光无法穿过 VO₂, SRD 将无法实现波长选择功能。先设定 Si₃N₄ 厚度为 700 nm、Al 厚度为 300 nm,比较 VO₂ 相变层厚度为 20~70 nm 时的 SRD 光谱发射率,其高低温下辐射特性如图 4 所示。可以看出,SRD 在低温时的发射特性基本一致,在高温下发射率则随 VO₂ 厚度的增大呈下降趋势,即高低温发射率差随 VO₂ 厚度的增大而减小。考虑到厚度过小会使实际制备变得困难,因此选择 VO₂ 厚度为 30 nm。

经过上述优化后,最终确定 SRD 中 Al、Si₃N₄、VO₂ 的厚度分别为 300, 700, 30 nm, 高低温辐射特性曲线如图 5 所示。在低温(20 $^{\circ}\text{C}$)时,SRD 降低物体在辐射波段的光谱发射率 $\epsilon(\lambda)$,随着温度的升高(100 $^{\circ}\text{C}$), SRD 光谱发射率增大,从而实现物体辐射特性的调控。SRD 的总发射率 ϵ 通过(5)式求得,20 $^{\circ}\text{C}$ 时其发射率 $\epsilon_L = 0.17$, 100 $^{\circ}\text{C}$ 时其发射率 $\epsilon_H = 0.55$, 调控范围为 0.38。SRD 发射率与温度的关系如图 6 所示,与 Hendaoui 等^[6]的结果进行对比发现,两者变化趋势较为吻合,表明所设计的 SRD 具有随温度变化的辐射特性。

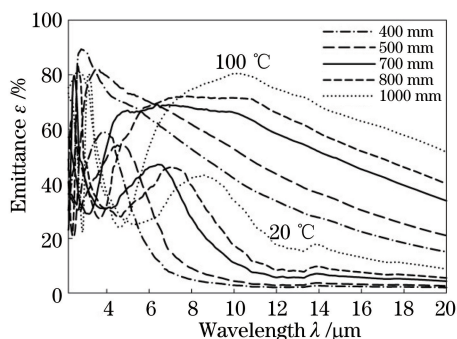


图 3 不同厚度 Si_3N_4 的 SRD 高低温辐射特性 (400~1000 mm)

Fig. 3 Radiation properties of SRD with different Si_3N_4 thicknesses at high and low temperatures (400~1000 mm)

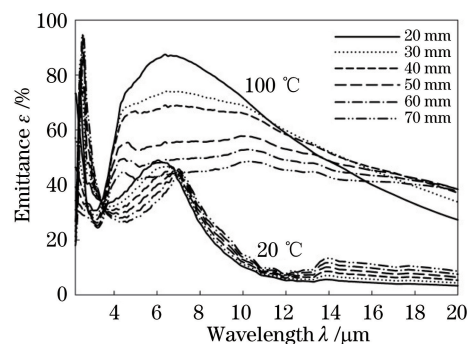


图 4 不同厚度 VO_2 的 SRD 高低温辐射特性 (20~70 mm)

Fig. 4 Radiation properties of SRD with different VO_2 thicknesses at high and low temperatures (20~70 mm)

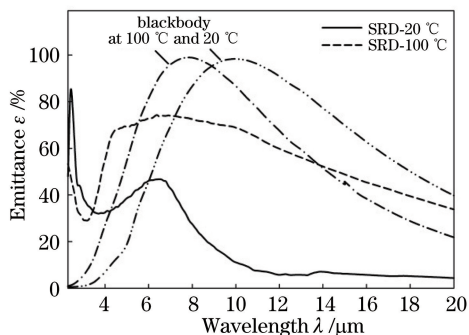


图 5 SRD 高低温辐射特性

Fig. 5 SRD radiation properties at high and low temperatures

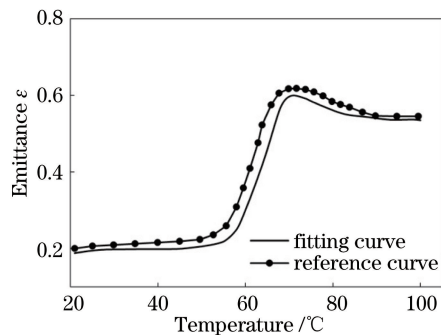


图 6 SRD 的发射率-温度特性

Fig. 6 Emittance-temperature curves of SRD

4 SRD 的性能优化

从(4)式非透明物体发射率和反射率的关系可知,热平衡状态下物体反射率越高,表面发射率越小,而反射率低的物体则具有较大的表面发射率。因此,为了增大 SRD 发射率的动态范围 $\Delta\epsilon$,可以通过合理设计多层结构减小高温时 SRD 反射率来提高 ϵ_H ,同时提高或保持低温时 SRD 的反射率,以保证获得较低的 ϵ_L 。为此,可引入减反(AR)膜来提高 SRD 的性能。减反膜应具有较高的透光特性且不产生本征吸收,因此选择消光系数较小、稳定性高的 $\text{MgF}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合薄膜作为减反膜。

优化设计的 SRD 为 $\text{MgF}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 结构,其中 $\text{VO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ 三层结构构成基本的 SRD 功能层,实现不同温度下对辐射特性的调控,而 $\text{MgF}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合薄膜作为折射率缓冲层,进一步改善器件的光学特性。优化获得 MgF_2 和 Si_3N_4 厚度分别为 700 nm 和 600 nm 的 SRD 辐射特性曲线如图 7 所示。

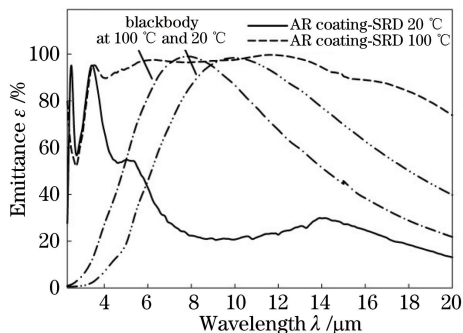


图 7 引入减反膜后 SRD 的辐射特性

Fig. 7 Radiation properties of SRD with AR coating

与无减反膜 SRD 对比可发现,引入减反膜后 SRD 低温辐射曲线稍有上移,高温辐射曲线则大幅度上移。根据(5)式求得有减反膜的 SRD 在 100 °C 时的发射率为 $\epsilon_H = 0.91$, 20 °C 时的发射率为 $\epsilon_L = 0.30$, 动态范围 $\Delta\epsilon = 0.61$, 这表明合理设计减反膜改善了 SRD 的辐射特性,提高了温度调控能力。

基本结构 SRD 和有减反膜 SRD 的反射特性对比如图 8 所示。从图 8(a)可知,在低温条件下,有减反膜 SRD 的反射能力与基本结构 SRD 相比稍有下降;图 8(b)表明, MgF_2/Si_3N_4 复合减反膜的加入使 SRD 在高温时的反射能力较基本结构 SRD 大幅下降。与此对应的结果是低温时发射率 ϵ_L 仅提高了 0.13, 而高温时发射率 ϵ_H 提高了 0.36, 发射率动态范围 $\Delta\epsilon$ 也因此增大, 这表明该复合减反膜的加入在基本不影响 SRD 低温工作特性的前提下,有效提升了高温时的工作性能。

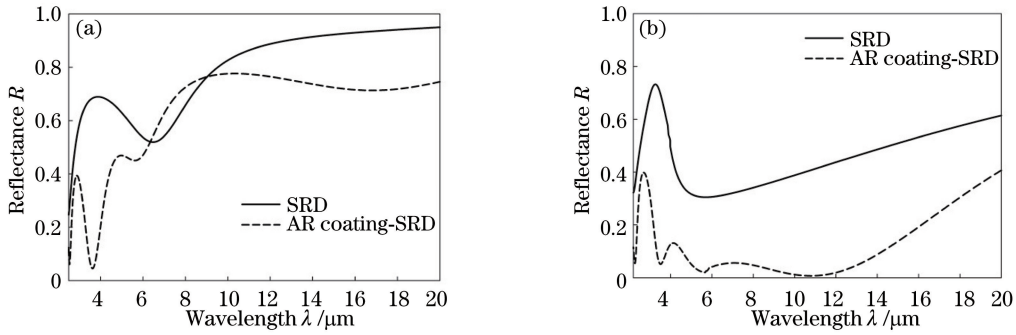


图 8 基本结构 SRD 和有减反膜 SRD 的反射特性对比。(a) 20 °C ; (b) 100 °C

Fig. 8 Reflection characteristics of SRDs with and without AR coating. (a) 20 °C ; (b) 100 °C

为了研究 SRD 对辐射光谱的调控特性,采用有限时域差分法(FDTD)计算高低温条件下 SRD 的辐射光场分布,空间中各厚度平面层的平均能流密度 \bar{S} 如图 9 所示。图 9(a)和(b)为基本结构 SRD 分别在低温(20 °C)和高温(100 °C)下的光场分布。图 9(a)表明,低温条件下正入射平面波激励光作用于 SRD 后,光场主要分布在 Al 层以上的区域,这是因为低于相变温度的 VO_2 在工作波段内消光系数 k 极低,表现出高透光特性,光可直接穿透 VO_2 层和 Si_3N_4 层抵达底层的 Al。结合低温条件下 SRD 具有高反射特性[图 8(a)]可知,图 9(a)中 0.3 μm 高度以上的光场基本是由 Al 反射形成并将入射光反射出 SRD 上表面,所以低温条件下 SRD 对红外光谱的红外发射率较低。观察图 9(b),由于高于相变温度的 VO_2 具有较高的消光系数 k ,可吸收较多的入射光,因此只有少部分能量穿透 VO_2 层、经过 Si_3N_4 层并到达 Al 层表面。图 9(b)中 SRD 外部的光场主要由 VO_2 吸收能量后的辐射和 VO_2 表面的少量反射产生,由 Al 层反射的能量只有一小部分,所以 SRD 在高温条件下具有良好的辐射特性。

图 9(c)和 9(d)分别为有减反膜的 SRD 在低温和高温下的辐射分布。图 9(c)表明在低温条件下,与基

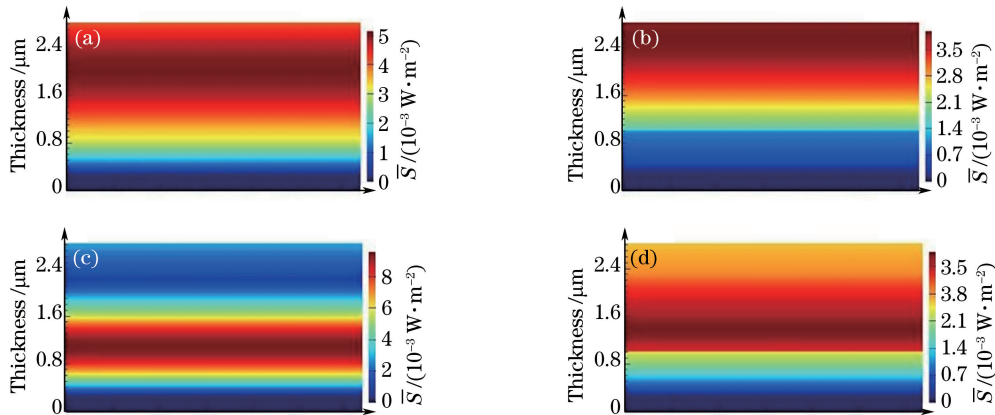


图 9 SRD 的辐射光场分布。(a) 基本结构 SRD 低温调控特性; (b) 基本结构 SRD 高温调控特性;

(c) 有减反膜 SRD 低温调控特性; (d) 有减反膜 SRD 高温调控特性

Fig. 9 Radiation field distribution of SRD. (a) SRD at low temperature; (b) SRD at high temperature;

(c) SRD with AR coating at low temperature; (d) SRD with AR coating at high temperature

本结构 SRD 一样,工作光波先穿透复合减反膜,仍能穿透 VO_2 层和 Si_3N_4 层抵达 Al 层,然后被反射出 SRD。对比有、无减反膜时 SRD 外部空间的光场分布可发现,复合减反膜的加入使 SRD 反射出去的光强稍有减弱,并且 Si_3N_4 层的光场分布强度也有小幅提高,这表明 SRD 对工作波长的吸收能力稍有增强,而与之对应的结果则是低温时发射率 ϵ_l 略有提高。图 9(d)表明在高温条件下,复合减反膜减弱了光入射到 SRD 表面时产生的反射,使更多光进入高消光系数的 VO_2 层,最终使 SRD 的发射率更高。

5 结 论

采用温度修正的 Sellmeier 色散关系式拟合表征了 VO_2 薄膜的红外光学特性,并采用薄膜特征矩阵理论计算了 SRD 的反射率。通过调节相变层 VO_2 和介质层 Si_3N_4 的厚度来优化 SRD 光学特性,最终确定了基本结构 SRD 的各层参数。所得结构由低温升高至相变温度时,发射率会由低变高。 VO_2 相变层厚度直接影响 SRD 发射率的动态范围,而 SRD 可调控的辐射光谱范围则与介质层厚度相关,同时,介质层厚度对 SRD 高温发射率也有一定的影响。在相变层表面采用 $\text{MgF}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 复合减反膜,可大幅度提高 SRD 在高于相变温度时的发射率,且保持低温时发射率基本不受影响,使其调控范围进一步扩大。

参 考 文 献

- [1] Baturkin V. Micro-satellites thermal control-concepts and components[J]. *Acta Astronautica*, 2005, 56(1): 161-170.
- [2] Thyagarajan K, Murthy D V A R. Micro-and mini-satellites of ISRO-technology and applications [J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(9): 1375-1382.
- [3] Zhang Yuming, Li Yi, Sun Ruoxi, *et al.* Design and research of ultraviolet image device microlens array[J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(2): 67-71.
张宇明, 李 毅, 孙若曦, 等. 紫外成像器件中衍射微透镜阵列设计与研制[J]. *光学仪器*, 2012, 34(2): 67-71.
- [4] Zhang Wei, Li Yi, Zhang Hu, *et al.* Ultraviolet diffractive microlens array design and fabrication [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2011, 33(2): 174-178.
张 伟, 李 毅, 张 虎, 等. 紫外衍射微透镜阵列的设计与制备[J]. *上海理工大学学报*, 2011, 33(2): 174-178.
- [5] Benkahoul M, Chaker M, Margot J, *et al.* Thermochromic VO_2 film deposited on Al with tunable thermal emissivity for space applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(12): 3504-3508.
- [6] Hendaoui A, Émond N, Dorval S, *et al.* Enhancement of the positive emittance-switching performance of thermochromic VO_2 films deposited on Al substrate for an efficient passive thermal control of spacecrafts[J]. *Current Applied Physics*, 2013, 13(5): 875-879.
- [7] Hendaoui A, Émond N, Dorval S, *et al.* VO_2 -based smart coatings with improved emittance-switching properties for an energy-efficient near room-temperature thermal control of spacecrafts[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 117(4): 494-498.
- [8] Wang X, Cao Y Z, Zhang Y Z, *et al.* Fabrication of VO_2 -based multilayer structure with variable emittance [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 344: 230-235.
- [9] Feng Y D, Wang Z M, Ma Y L, *et al.* Thin film design for advanced thermochromic smart radiator devices[J]. *Chinese Physics*, 2007, 16(6): 1704.
- [10] Xiao H, Li Y, Yuan W R, *et al.* Microstructures and thermochromic characteristics of VO_2/AZO composite films[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 580-586.
- [11] Kim M, Kim D, Hwang S, *et al.* Characteristics of Mo-doped vanadium oxide sputtered nano-thin films [J]. *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, 2015, 7(12): 1004-1008.
- [12] Sun Yao, Li Yi, Tang Jiayin, *et al.* Optical properties of Au/VO_2 double-film nano array[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(11): 1131001.
孙 瑶, 李 毅, 唐佳茵, 等. Au/VO_2 双层薄膜纳米点阵的光学特性[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1131001.
- [13] Guinneton F, Sauques L, Valmalette J C, *et al.* Optimized infrared switching properties in thermochromic vanadium dioxide thin films: role of deposition process and microstructure[J]. *Thin Solid Films*, 2004, 446(2): 287-295.
- [14] Wang Haifang, Li Yi, Yu Xiaojing, *et al.* Study on temperature dependence of infrared optical properties of vanadium dioxide thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1522-1526.
王海方, 李 毅, 俞晓静, 等. 二氧化钒薄膜的变温红外光学特性研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1522-1526.

- [15] Zhu Huiqun, Li Yi, Wang Haifang, *et al.* Infrared optical properties of thermochromic energy-saving thin films with nanostructure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2794-2799.
朱慧群, 李毅, 王海方, 等. 热致变色纳米节能薄膜红外光学特性[J]. *光学学报*, 2010, 30(10): 2794-2799.
- [16] Zhou J, Gao Y, Zhang Z, *et al.* VO₂ thermochromic smart window for energy savings and generation[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(10): 3029.
- [17] Yu Peng, Shen Weidong, Zhang Yueguang, *et al.* Reflective color filters based on metal-dielectric thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1231003.
余鹏, 沈伟东, 章岳光, 等. 基于金属介质薄膜的反射型彩色滤光片[J]. *光学学报*, 2011, 31(12): 1231003.
- [18] Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.* Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006: 20-36.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 20-36.
- [19] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer[M]. Bristol: Hemisphere Publishing, 1992: 55-81.
- [20] European Space Agency. ESA space product assurance-measurements of thermo-optical properties of thermal control materials: ECSS-Q-ST-70-09C[S]. The Netherlands: ESA Requirements and Standards Division, 2008.