二氧化钒薄膜的研究进展*

张 华[1,2],肖秀娣[1],徐 刚[1],柴冠麒[1],杨 涛[3]

(1 中国科学院广州能源研究所,中国科学院可再生能源重点实验室,广州 510640;2 中国科学院大学,北京 100049;3 华南理工大学发光材料与器件国家重点实验室,广州 510640)

摘要 系统总结了 VO_2 薄膜常用的制备方法,并针对目前热色智能窗用 VO_2 薄膜存在的问题,如透过率低、调节率不理想等,详细综述了提高 VO_2 薄膜性能的工艺改进途径,包括沉积减反层、加入折射率小的材料、掺杂等,以揭示改善 VO_2 薄膜的最佳途径,为推进 VO_2 智能窗的实用化提供依据。

关键词 热色智能窗 VO_2 薄膜 可见光透过率 太阳能调节率

中图分类号:TB321 **文献标识码**:A

Research Progress of Vanadium Dioxide Films

ZHANG Hua[1,2], XIAO Xiudi[1], XU Gang[1], CHAI Guanqi[1], YANG Tao[3]

(1 CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3 State Key Laboratory of Luminescent Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract The preparations methods of VO_2 films are reviewed. However, properties of current VO_2-based TSW still have several problems, such as the luminous transmittance is too low and the solar modulation is limited. The ways for improving the properties are introduced, including depositing antireflection coating, adding low-reflective-index materials, doping ions and so on. It reveals the best way to improve the properties of films and provides a foundation for practical usage of VO_2-based thermochromic fenestration.

Key words thermochromic fenestration, VO_2 films, luminous transmittance, solar modulation

随着现代工业的不断发展,全球总能耗和温室气体排放不断增加,全球变暖和能源短缺已经成为人类亟待解决的关键问题。而在国内,为了实现可持续发展,节能环保的理念越来越受到人们的重视,十二五规划建议也指出要抓好工业、建筑、交通运输等重点领域节能。据统计,我国建筑能耗占总体能耗的近 30%,与生活息息相关的建筑领域是我们密切关注的节能领域。对于一般建筑,窗户面积约占建筑外围面积的 30%,而通过窗户耗散的能量占总建筑能耗的 2/3,可见窗户是建筑能耗的关键部位。有数据表明,通过玻璃耗散的能量占门窗能量损失的 80%[1]。另一方面,太阳光 98% 的能量分布在 200～2500 nm 范围内,其中 380～780 nm 的可见光区占 45%,0.78～2.5 μm 的近红外区占 49%,太阳光通过玻璃辐照进入室内在很大程度上影响着室内的环境温度。可见,为实现建筑节能,必须要减少因门窗玻璃产生的能耗。

目前针对门窗玻璃的节能技术主要有低辐射玻璃(Low-E 玻璃)和智能窗。Low-E 玻璃是在普通玻璃表面镀一层以银为基础的低辐射薄膜来阻挡能量较高的红外线进入室内,但 Low-E 玻璃的氧化银膜层十分脆弱,必须要做成中空结构,而中空的设计会明显提高产品成本,且其无法智能调节室内温度。与之相比,智能窗可以依据环境温度智能调控玻璃的光学性质,目前研究的智能窗可分为热致变色智能窗、光致变色智能窗、气致变色智能窗和电致变色智能窗。其中电致变色智能窗、气致变色智能窗需要额外提供电能或气体来激发其工作;光致变色智能窗对环境温度变化响应差,且冬季光线强度较弱工作效果不佳。此外上述 3 种材料由于成本较高、加工工艺复杂等原因无法实现大面积的应用。相比之下,热致变色(热色)智能窗制备工艺简单,使用中无需电力或气体支持,表面沉积热色涂层的智能窗玻璃可以通过调控太阳能辐射来大幅度降低建筑能耗,也正是由于优点突出、节能效果显著,热色智能窗一直受到广泛关注。

热色材料是指在受热或冷却过程中随温度变化其温度、光学性质呈现可逆变化的一类化合物或混合物。热色现象在复合材料、有机材料以及无机材料中都普遍存在。在众多热色材料中,无机金属氧化物 VO_2 因其较为优异的相变特性是目前热色智能窗研究的一大热点。

本文简单总结了 VO_2 薄膜常见的几种制备方法,并详细介绍了近些年来为提高薄膜透过率、改善薄膜调节率所采取

* 国家自然科学基金(51102235);2014 年广州市珠江科技新星计划

张华:女,1990 年生,硕士,主要从事太阳能利用关键材料的研究 E-mail:zhanghua@ms.giec.ac.cn 肖秀娣:通讯作者,女,1982 年生,博士,副研究员,主要从事太阳能利用关键材料的研究 E-mail:xiudixiao@163.com

的一些工艺改进方法，为其进一步深入研究提供参考。

1　VO_2 薄膜的制备方法

实际应用对 VO_2 薄膜的性能要求较高，因此制备出高质量的 VO_2 薄膜十分重要，目前常用的 VO_2 薄膜制备方法可分为化学法和物理法两大类。物理法的主要特点在于制备原理相对简单，容易操作，但是物理法的设备昂贵、制膜成本高；而化学法的反应环境更为温和，所得薄膜纯度高，但化学法的合成步骤多、重复性较差。

1.1　物理法

物理法主要包括溅射法、真空蒸发法以及脉冲激光法。

1.1.1　溅射法

溅射法通常以纯度较高的金属钒为靶材，以氧化铟锡导电玻璃（ITO 玻璃）、蓝宝石单晶、SiO_2 等为衬底，在真空度小于 10^{-3} Pa 的 Ar、O_2 混合气氛下制备 VO_2 薄膜。溅射法可通过精确控制溅射时间、溅射温度、衬底种类等参数来获得性能良好的 VO_2 薄膜，是目前制备 VO_2 薄膜法中文献报道最多的一类方法。

Beydaghyan 等[2] 采用溅射法以 ITO 玻璃为衬底在 430～455 ℃的低压下得到厚度约 200 nm 的 VO_2 薄膜，薄膜在 2500 nm 处高低温透过率的变化超过 60%，红外调节效果较好，但该薄膜的可见光透过率低于 10%。Mlyuka 等[3] 在 450 ℃下通过改变溅射时间得到不同厚度（25～120 nm）的 VO_2 薄膜，其中 25 nm 厚的薄膜可在保持高的红外调节率的同时将可见光透过率提升至 70%左右，见图 1。目前关于溅射法的报道中，溅射温度一般都在 300 ℃以上，而黄章立等[4] 改用特殊处理的硼硅酸盐玻璃为衬底，溅射温度可降低至280 ℃，所得薄膜在 2600 nm 处高低温透过率的变化仍可超过 50%。

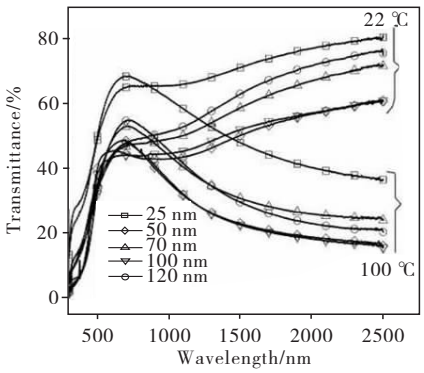

图 1　Mlyuka[3] 制备的 VO_2 薄膜的透射率-入射光波长图

Fig. 1　The transmittance spectra of VO_2 films prepared by Mlyuka[3]

1.1.2　真空蒸镀法

与溅射法相似，真空蒸镀法也是在真空室中以金属钒或其氧化物为反应源来制备 VO_2 薄膜。尚东等[5] 以 V_2O_5 为蒸发源，在真空度小于 10^{-3} Pa、衬底温度 320～380 ℃条件下蒸镀即得到高纯度的 VO_2 薄膜，但该 VO_2 为 B 相，无相变特性。王玉泉等[6] 以金属 V 为蒸发源，在 280 ℃下蒸镀即快速得到均匀的 VO_2 薄膜，但该薄膜同样因为 VO_2 相态问题也无金属-半导体相变（MST）特性。可见，采用真空蒸镀法制备 VO_2 薄膜的条件十分苛刻，制备难度较大。

1.1.3　脉冲激光法（PLD）

PLD 是利用脉冲激光轰击靶材得到气化分子并在基底沉积成膜的方法。Wang 等[7] 用 PLD 法研究了氧分压对薄膜成分的影响，发现以金属 V 为靶材 800 ℃下氧分压只在 0.008～0.3 Pa 范围内才能得到纯 VO_2 薄膜，制备条件苛刻。Lappalainen 等[8] 以 V_2O_5 为靶材、α-Al_2O_3 为衬底，在温度 400 ℃、氧分压 0.6 Pa 条件下得到厚度 108 nm 的 VO_2 薄膜，薄膜的红外调节效果较好，2500 nm 处的高低温透过率变化超过 40%，但薄膜的可见光透过率一般，仅在 30%左右，见图 2。由于 PLD 法是以等离子化的靶材成膜，而等离子体分布存在局域性，因此该方法仅适用于小面积 VO_2 薄膜的制备。

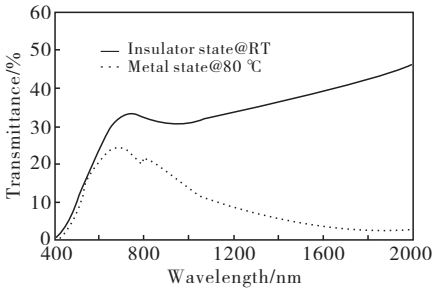

图 2　Lappalainen[8] 制备的 VO_2 薄膜的透射率-入射光波长图

Fig. 2　The transmittance spectra of VO_2 films prepared by Lappalainen[8]

1.2　化学法

化学法制备 VO_2 薄膜可分为溶液法和涂料法。

1.2.1　溶液法

溶液法一般是将含钒的前驱体溶液旋涂在衬底上获得前驱体膜层，再在一定气氛下高温退火得到 VO_2 膜。该方法的优点在于成本低，但退火环境的真空度、退火温度等对薄膜性能都有明显的影响，制膜的反应条件范围很窄。Wang 等[9] 将 V_2O_5 溶胶作为前驱体旋涂在硅衬底表面，仅在 750 ℃且真空度小于 1.2×10^{-4} Pa 的退火条件下可以得到 VO_2 薄膜，薄膜的可见光透过率在 40%左右，而红外区域的高低温透射率变化超过 45%，红外调节性能较好。张宗涛等[10] 在石英玻璃上旋涂 $VO(acac)_2$ 的甲醇溶液得到前驱体膜层，随后在纯的 N_2 气氛、400～600 ℃下退火得到约 50 nm 厚的 VO_2 薄膜，薄膜的热色效果受退火温度影响显著，当退火温度为 530 ℃时薄膜的可见光透过率超过 60%，2500 nm 处的高低温透射率差值为 50%，薄膜热色性能较好，见图 3。

1.2.2　涂料法

涂料法制膜原理简单，通常将 M 相 VO_2 粉体分散在透明聚合物中，然后喷涂或刮涂后待成膜剂凝固即得到 VO_2 薄膜。Uppsala 大学的 Li 等[11] 通过大量的数值计算证实涂料法可在不降低可见光透过率的前提下达到较好的太阳能调

节效果。肖秀娣等[12]将 VO_2 粉体分散在丙烯酸树脂中并旋涂得到约 20 μm 厚的薄膜,薄膜的可见光透过率为 48%,2000 nm 波段处的高低温透过率变化为 37.3%,薄膜的热色性能好。

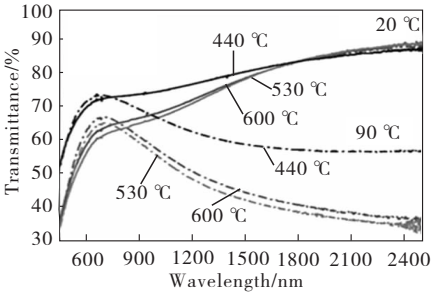

图 3　张宗涛[10]在不同退火温度下制备的薄膜的透射率-入射波长图

Fig. 3　The transmittance spectra of VO_2 films with different annealing temperatures prepared by Zhang[10]

采用该方法制膜,VO_2 粉体的尺寸及其在聚合物中的分散效果都会影响薄膜最终的光学性质和热色性能。Valmalette 等[13]通过对不同粒径的 VO_2 粉体制得的不同厚度的膜层进行观察后指出,涂料法制膜,尤其是制备较薄膜层时,粉体在透明聚合物中的分散并非是各向同性的,这种情况下,粉体的颗粒大小对薄膜的透过率影响很大。该课题组通过数值计算发现,在涂料配比不变的情况下,随着 VO_2 粉体粒径的逐步增大,薄膜的透过率增加;但另一方面,薄膜的高低温透过率的增加速率并不相同,高温下薄膜的透过率变化更快,薄膜对红外光的调节能力随 VO_2 粉体粒径的增加而显著减弱,粗略估计采用涂料法制备 20 μm 厚的 VO_2 薄膜所用粉体的最佳粒径在 500 nm 左右。同样,在固定粉体粒径不变的情况下,薄膜的透过率、热色调节能力和涂料配比之间也存在相似的制约规律。

2　工艺改进方法的介绍

虽然制备 VO_2 薄膜的方法多种多样,但目前制得的薄膜仍存在诸多问题,而薄膜可见光透过率低、太阳能调节率不理想是亟待解决的两个问题。近些年来有不少关于这几方面的改进方法,主要是通过沉积减反层、造孔或提高粗糙度、掺杂这三大类。

2.1　沉积减反层

在 VO_2 薄膜表面沉积一层或多层折射率小于 VO_2 薄膜的材料,可有效减小薄膜整体的反射率,从而达到提高透射率、改善调节率的目的。关于沉积减反层的报道很多,SiO_2 和 TiO_2 是常用的两种减反层材料。

早在 1987 年,Babulanam 等[14]就通过数值计算证明沉积 SiO_2 减反层可以将薄膜的可见光透过率提升至 50%,但文章也指出薄膜的热色性能也会因 SiO_2 的加入受到影响。而随后 Lee 等[15]采用溅射法在 VO_2 薄膜上沉积 100 nm 厚的 SiO_2 减反层,实验发现与未沉积 SiO_2 层的相比,薄膜的可见光透过率从 42%上升至 55%,同时薄膜的热色性能未受影响。但 SiO_2 并非是减反层材料的最佳选择,相比之下高折射率的 TiO_2 减反效果更佳。金平实等[16]采用溅射法获得不同厚度的 TiO_2/VO_2 薄膜,当 TiO_2 厚度为 40 nm 时,薄膜的可视透过率 T_{lum} 提高至 49%,与无减反层时相比提高 32%,此外还通过数值模拟和实验指出,沉积多层 TiO_2 减反层薄膜可进一步提高透过率,制备的 $TiO_2/VO_2/TiO_2$ 薄膜的可视透过率 T_{lum} 高达 57.6%。而随后 Mlyuka 等采用磁控溅射方法制备得到 $TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$ 五层膜,其透射率为 45%,太阳光调节率 ΔT_{sol} 为 12%。除物理法沉积减反层外,李亚梅等[17]在 VO_2 纳米棒表面包覆 TiO_2 层,并用化学法制膜,虽其减反效果不及物理法,可视透过率 T_{lum} 仅为 27.4%,但薄膜的太阳能调节率 ΔT_{sol} 高达 17.6%。

关于减反层的报道数量较多,沉积不同减反层的 VO_2 复合薄膜的热色性能比对归纳于表 1 中。

表 1　沉积不同减反层的 VO_2 复合薄膜的热色性能

Table 1　A comparison of smart-window transmittance metrics for a variety of VO_2 based films with different anti-reflection coating

结构	厚度/nm	T_{lum}/%		ΔT_{sol}/%
		低温	高温	
TiO_2/VO_2[16]	40/50	49.9	45.5	7.9
$TiO_2/VO_2/TiO_2$[16]	25/50/25	57.9	54.9	4.1
$TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$[3]	130/40/130/40/130	45.3	43.1	11.8
ZrO_2/VO_2[18]	56/50	51.3	48.5	5.7
$Si/VO_2/Si$[19]	25/100/25	10.3	6.9	8.9
$SiO_x/VO_2/SiO_x$[19]	25/100/25	35.6	34.9	3.6
$SiO_2/Pt/VO_2$[20]	55/9/40	37.9	—	—

2.2　加入折射率小的材料

根据多层膜的反射率计算公式可知,在 VO_2 薄膜中加入折射率小的材料可以减小薄膜层的反射率,从而达到提高薄膜透过率的效果。

在薄膜中造孔,利用折射率小的空气来提高透射率是常用的方法之一。而聚乙烯吡咯烷酮(PVP)在热处理过程中降解为薄膜产生大量的孔隙,是最常用的造孔聚合物。康利涛等[21]采用此方法在硅衬底上沉积得到复合 VO_2 薄膜,可见光透过率超过 40%。另外无机盐与 PVP 之间相容性的差异所产生的微观结构上的相分离会使得薄膜粗糙度增加,折射率降低,从而进一步提高薄膜的光学性质。与 PVP 存在相分离现象的有 $ZnCl_2$、$Zn(OH)Cl$、$Mg(NO_3)_2$、$La(NO_3)_2$ 等。杜靖等[22]将 VO_2 粉体、PVP 与 $ZnCl_2$ 混合旋涂得到复合 VO_2 薄膜,$ZnCl_2$ 的加入增加了薄膜的粗糙度,当 $n(Zn)/n(V)$ 为 0.1 时,薄膜的可见光透过率 T_{lum} 可达 60%,且太阳能调节率 ΔT_{sol} 保持在 10%以上。

除造孔及提高粗糙度外,也有加入其他低折射率材料的报道,例如掺 F 的 SnO(FTO)涂层。FTO 涂层的折射率小于 VO_2 且透射率高(>80%),可降低薄膜的反射从而提高其可见光透过率。张宗涛等[23]采用溶液法以 FTO 导电玻璃为

衬底，于 390 ℃的 N_2-O_2 气氛下退火得到不同厚度的 VO_2 薄膜，当 VO_2 层厚度为 42 nm 时薄膜可见光透过率在 50%左右，太阳能调节率 ΔT_{sol}仅为 4%，而随着 VO_2 层厚度的增加其透过率明显下降，见图 4。为进一步提高薄膜透过率，并改善薄膜太阳能调节率，该课题组还将该改进方法与沉积减反层相结合，在约 55 nm 厚的 VO_2 表面旋涂约 60 nm 厚的 TiO_2 减反层，复合薄膜的可见光透过率提升至 44%，同时太阳能调节率 ΔT_{sol}增加至 8.81%。此外，Zhao 等[24]也通过数值计算证明在加入低折射率的 ZnO 层的同时加入 SiO_2 减反层，薄膜的可视透过率 T_{lum}高达 63%，太阳能调节率 ΔT_{sol}的理论值超过 13%。

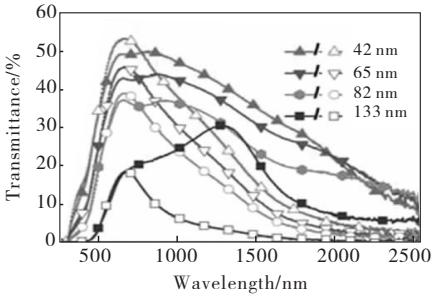

图 4　张宗涛[23]制备的不同厚度的 VO_2/FTO 薄膜的透射率-入射光波长图

Fig. 4　The transmittance spectra of VO_2/FTO films with different thickness prepared by Zhang [23]

2.3　掺杂

可用于提高 VO_2 薄膜可见光透过率、改善薄膜调节率的掺杂元素主要是 Mg、F 及贵金属。F 的加入可以使 VO_2 光谱的吸收边位置发生蓝移，从而提高薄膜的可见光透过率，尤其是高温透过率，但高温透过率的过度增加会导致薄膜的太阳能调节率 ΔT_{sol}降低，无法达到调节太阳光节省能耗的最终目的，因此单独掺杂 F 的研究并不具有实用价值[25]。而 Mg 的加入可以将 VO_2 的禁带宽度从 1.6 eV 扩大至 2.3 eV，VO_2 薄膜的透过率（尤其是 600 nm 以下波段）随之增加[26]。Mlyuka 等[27]采用溅射法在玻璃衬底上沉积掺 Mg 的 VO_2 薄膜，随着 Mg 掺杂量的增加，薄膜的透过率逐渐提高，当 Mg 掺杂量增加至 7%左右时，薄膜在低温下的可见光透过率相比掺杂前提高 10%，并且与同一波段下高温透过率相持平，见图 5，这明显提高了薄膜的太阳能调节率 ΔT_{sol}，可见 Mg 掺杂的效果较好，更具应用前景。

与 Mg、F 不同，Ag、Au 等贵金属具有很强的局域表面等离子体共振效应（LSPR），会对入射光产生强的吸收或散射，从而改变材料的光学性能，将其与 VO_2 薄膜结合，可定域改变薄膜某一波段内的光学性能，不但可以提高薄膜的透过率、改善薄膜的太阳能调节率，还可以改变薄膜颜色。徐刚等采用溅射法在 VO_2 表面沉积 Ag[28]或 Au[29]层，随着金属层厚度的改变，薄膜透射谱的谱峰位置发生移动，薄膜颜色发生变化，而薄膜的可见光透过率也保持在 40%左右。此外，徐刚等[30]还将减反层和 LSPR 相结合，采用溅射法在石英衬底上依次沉积 VO_2 层、Ag 层和 TiO_2 层获得多层膜结构，通过调节 TiO_2 层和 Ag 层的厚度可明显改变薄膜的光谱形状，并使薄膜呈现红、蓝、紫等多种颜色，见图 6。

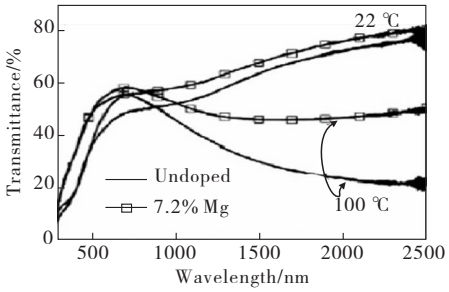

图 5　Mlyuka 等[27]制备的 Mg 掺杂 VO_2 薄膜的透射率-入射光波长图

Fig. 5　The transmittance spectra of Mg-doped VO_2 films prepared by Mlyuka et al[27]

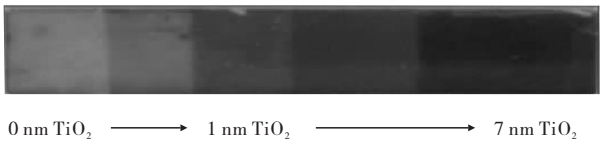

图 6　徐刚等[30]制备的不同厚度 TiO_2 层的 TAQ 薄膜对比图

Fig. 6　The photograph of TAQ films with different thickness of TiO_2 layer prepared by Xu et al[30]

3　结语

近些年来无论是在国内还是国外，VO_2 薄膜因其较为优异的相变特性一直是智能窗用热色涂层研究的热门话题。目前，VO_2 薄膜的制备工艺已日趋完善，但可见光透过率低、太阳能调解率不理想是制约其发展的两大难点问题。毫无疑问，实现薄膜产业化、实用化有相当长的路要走，如何提升热色智能窗用 VO_2 薄膜的综合性能，还有待进一步的实验验证和更为深入的理论分析佐证。

参考文献

1　杜靖. 二氧化钒基纳米复合热色节能薄膜的制备与性能的增强 [D]. 北京：中国科学院大学，2012

2　Beydaghyan G, Basque V, Ashrit P V. High contrast thermochromic switching in vanadium dioxide (VO_2) thin films deposited on indium tin oxide substrates [J]. Thin Solid Films, 2012, 522: 204

3　Mlyuka N R, Niklasson G A, Granqvist C G. Thermochromic multilayer films of VO_2 and TiO_2 with enhanced transmittance [J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2009, 93(9): 1685

4　Huang Z L, Chen S H, Wang B Q, et al. Vanadium dioxide thin film with low phase transition temperature deposited on borosilicate glass substrate [J]. Thin Solid Films, 2011, 519: 4246

5　尚东，等. 特型二氧化钒薄膜的制备及电阻温度系数的研究 [J]. 四川大学学报：自然科学版，2005，42(3)：523

6　王玉泉. 钒氧化物纳米材料的制备和性能 [D]. 北京：清华

大学, 2008
7 Wang Y L, Chenet X K, Li M C, et al. Phase composition and valence of pulsed laser deposited vanadium oxide thin films at different oxygen pressures [J]. Surf Coat Techn, 2007,201:5344
8 Lappalainen J, Heinilehto S, Saukko S, et al. Microstructure dependent switching properties of VO_2 thin films [J]. Sensors Actuators A: Physical,2008,142(1):250
9 Wang N, Magdassi S, Mandler D, et al. Simple sol-gel process and one-step annealing of vanadium dioxide thin films: Synthesis and thermochromic properties [J]. Thin Solid Films,2013,534:594
10 Zhang Z T, Gao Y F, Chen Z, et al. Thermochromic VO_2 thin films: Solution-based processing, improved optical properties, and lowered phase transformation temperature [J]. Langmuir,2010,26(13):10738
11 Li S Y, et al. Nanothermochromics: Calculations for VO_2 nanoparticles in dielectric hosts show much improved luminous transmittance and solar energy transmittance modulation [J]. J Appl Phys,2010,108:063525
12 Xiao X D, Zhang H, Chai G Q, et al. A cost-effective process to prepare VO_2(M) powder and films with superior thermochromic properties [J]. Mater Res Bull,2014,51:6
13 Valmalette J C, Gavarri J R. Vanadium dioxide/polymer composites: Thermochromic behaviour and modeling of optical transmittance [J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 1994,33:135
14 Babulanam S M, Eriksson T S, Niklasson G A, et al. Thermochromic VO_2 films for energy-efficient windows [J]. Solar Energy Mater Solar Cells,1987,16(5):347
15 Lee M H, Cho J S. Better thermochromic glazing of windows with anti-reflection coating [J]. Thin Solid Films, 2000,365(1):5
16 Jin P, Xu G, Tazawa M, et al. A VO_2-based multifunctional window with highly improved luminous transmittance [J]. Jpn J Appl Phys,2002,41(3A):L278
17 Li Y M, Ji S D, Gao Y F, et al. Core-shell VO_2@TiO_2 nanorods that combine thermochromic and photocatalytic properties for application as energy-saving smart coatings [J]. Sci Reports, 2013,3:1370
18 Xu G, Jin P, Tazawa M, et al. Optimization of antireflection coating for VO_2-based energy efficient window [J]. Solar Energy Mater Solar Cells,2004,83(1):29
19 Kakiuchida H, Jin P, Tazawa M. Control of thermochromic spectrum in vanadium dioxide by amorphous silicon suboxide layer [J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2008, 92(10): 1279
20 Kang L T, Gao Y F, Zhang C, et al. Pt/VO_2 double-layered films combining thermochromic properties with low emissivity [J]. Solar Energy Mater Solar Cells, 2010, 94 (12):2078
21 Kang L T, Gao Y F, Luo H J. A novel solution process for the synthesis of VO_2 thin films with excellent thermochromic properties [J]. ACS Appl Mater Interf,2009,1(10):2211
22 Du J, et al. Enhancing thermochromic performance of VO_2 films via increased microroughness by phase separation [J]. Solar Energy Mater Solar Cells,2013,110:1
23 Zhang Z T, et al. Solution-based fabrication of vanadium dioxide on F: SnO_2 substrates with largely enhanced thermochromism and low-emissivity for energy-saving applications [J]. Energy Environm Sci,2011,4(10):4290
24 Zhao Y, et al. Simulation of smart windows in the ZnO/VO_2/ZnS sandwiched structure with improved thermochromic properties [J]. Energy Build,2013,66:545
25 Taylor A, Parkin I, Noor N, et al. A bioinspired solution for spectrally selective thermochromic VO_2 coated intelligent glazing [J]. Opt Express,2013,21(105):A750
26 Li S Y, et al. Thermochromic fenestration with VO_2-based materials: Three challenges and how they can be met [J]. Thin Solid Films,2012,520(10):3823
27 Mlyuka N R, Niklasson G A, Granqvist C G. Mg doping of thermochromic VO_2 films enhances the optical transmittance and decreases the metal-insulator transition temperature [J]. Appl Phys Lett,2009,95:171909
28 Xu G, Tazawa M, Jin P, et al. Wavelength tuning of surface plasmon resonance using dielectric layers on silver island films [J]. Appl Phys Lett,2003,82(22):3811
29 Xu G, Huang C M, Tazawa M, et al. Tunable optical properties of nano-Au on vanadium dioxide [J]. Opt Commun, 2009,282(5):896
30 Xu G, Huang C M, Liang Q, et al. Wavelength multiplexing and tuning in nano-Ag/dielectric multilayers [J]. Appl Phys A,2009,94(3):525

(责任编辑 沈耀红)

(上接第 55 页)

18 谢乔,朱冬梅,王晓艳,等. C/C-SiC 陶瓷基复合材料刹车副摩擦性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2007,36(S1):655
19 范尚武,徐永东,张立同,等. C/SiC 摩擦材料的制备及摩擦磨损性能[J]. 无机材料学报,2006,21(4):927
20 Paris J Y, Vincent L, Denape J. High-speed tribological behaviour of a carbon/silicon-carbide composite [J]. Compos Sci Techn,2001,61:417
21 Li Zhuan, Xiao Peng, Xiong Xiang, et al. Preparation and tribological properties of C fibre reinforced C/SiC dual matrix composites fabrication by liquid silicon infiltration [J]. Solid State Sci,2013,16:6

(责任编辑 沈耀红)