# Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层对玻璃衬底上 VO<sub>2</sub> 薄膜 光电性能的影响

王坤<sup>1</sup> 王麒雯<sup>1</sup> 刘初蕾<sup>2</sup> 康朝阳<sup>2\*</sup> (1. 河南地矿职业学院郑州 451464; 2. 河南大学未来技术学院郑州 450046)

# Influence of Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> Anti-Reflection Layers on Photoelectric Properties of the VO<sub>2</sub> Thin Films on Glass Substrate

WANG Kun<sup>1</sup>, WANG Qiwen<sup>1</sup>, LIU Chulei<sup>2</sup>, KANG Chaoyang<sup>2\*</sup>
(1. Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, China;
2. School of Future Technology, Henan University, Zhengzhou 450046, China)

Abstract A monoclinic phase of vanadium dioxide (M-VO<sub>2</sub>) film was grown on an amorphous glass substrate by pulsed laser deposition technique, and the effect of the Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> anti-reflection layers on the M-VO<sub>2</sub> film was investigated. The experimental results show that the M-VO<sub>2</sub> film prepared on the amorphous glass substrate has a single orientation and high purity. As an anti-reflection layer, Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> improves the visible light transmittance and solar energy adjustment rate of the film. By optimizing the thickness of the anti-reflection layer, it is found that when the thickness of the anti-reflection layer is 60 nm, the phase transition temperature is the lowest and the thermal hysteresis width is the narrowest at 6 °C. The development of this work is conducive to promoting the application of VO<sub>2</sub> thin films in smart windows.

Keywords Pulsed laser deposition, VO2 thin films, Mg85Ni15 anti-reflection layer, Photoelectric properties

摘要 采用脉冲激光沉积技术,在非晶玻璃衬底上生长单斜晶相的二氧化钒(M-VO<sub>2</sub>)薄膜,并研究了 Mg<sub>ss</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层对 M-VO<sub>2</sub> 薄膜性能的影响。实验结果表明:在非晶玻璃衬底上制备的 M-VO<sub>2</sub> 薄膜具有单一取向且纯度较高,并具有良好的光 电热致转变性能。Mg<sub>ss</sub>Ni<sub>15</sub> 作为减反层,在没有特别降低电学性能的基础上,提高了薄膜的可见光透过率和太阳能调节率。 通过对减反层厚度的优化发现:在减反层厚度为 60 nm 时,相变温度最低,且热滞宽度最窄为 6℃。此工作的开展有利于推 进 VO<sub>2</sub> 薄膜在智能窗方面的应用。

**关键词** 脉冲激光沉积 VO<sub>2</sub> 薄膜 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层 光电性能 中图分类号: O484.5 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202312001

1959年, Morin 首次发现二氧化钒(VO<sub>2</sub>)在温 度升高到 68℃ 附近时,发生了从绝缘体转变为导体 的金属-绝缘体相变(MIT)<sup>[1]</sup>,在 68℃ 以下时晶体结 构为单斜相(M-VO<sub>2</sub>),在 68℃ 以上时则是金红石相 (R-VO<sub>2</sub>)。伴随着相的转变, VO<sub>2</sub>薄膜的红外透过 率发生改变、电阻也发生了 3~5个数量级的变化。 正是 VO<sub>2</sub> 的相变温度接近室温,这一独特性质使其 在智能窗、光电器件、储存器件等领域具有广阔的 应用前景[2-6]。

目前,制备 VO<sub>2</sub> 薄膜的方法包括脉冲激光沉积 法(PLD)、磁控溅射法、分子束外延法、溶胶-凝胶 法、溶剂热/水热法、以及原子层沉积技术等<sup>[7-11]</sup>。 制备过程中的各种参数,如反应原料、反应时间与 温度、退火时间与温度等,都可能对薄膜的性能产 生重要影响。在实际应用中, VO<sub>2</sub> 热致变色智能窗 面临以下主要问题:高于室温的金属--绝缘体相变

基金项目:国家自然科学基金项目(11405045)

<sup>\*</sup>联系人: E-mail: kangcy@vip.henu.edu.cn

(MIT)温度、稳定性差、保温性能差、可见光透过率 和太阳能调节率低等。为了有效地调节材料的光 电性能,以满足人们的使用需求,特别是在降低 MIT 温度、提高可见光透过率(T<sub>lum</sub>,在 380~780 nm 范围内)和太阳光调控能力(ATsol,在 300~2500 nm 范围内)方面,研究人员采用多层复合方法来制备 VO2薄膜。一般来说,通过增加缓冲层或减反层,可 以有效地提升 VO, 薄膜的综合性能<sup>[12-13]</sup>。金属玻璃 薄膜(TFMGS)是一种由多种金属元素制备的非晶 态合金薄膜,其具备卓越的力学、光学和疲劳性能, 以及出色的耐蚀性和附着特性[14-15]。最近的研究发 现,金属玻璃薄膜具有优异的近红外透过率以及触 发表面等离子体激元等因素从而改善了 VO,薄膜 的光学性能,这很有利于在普通玻璃上设计智能窗。 如利用 Cu<sub>so</sub>Zr<sub>so</sub> 作为缓冲层在普通玻璃衬底上生长 的 VO₂ 薄膜其 ΔT<sub>sol</sub> 可达到 14.3%, 其 T<sub>lum</sub> 可达 52.3%, T<sub>sol</sub>和 T<sub>lum</sub>得到同步提升<sup>[16]</sup>。因此 TFMGS 成为作 为缓冲层或减反层改善二氧化钒薄膜的备选材料 之一。

基于上述考虑,本文采用脉冲激光沉积法(PLD) 在非晶玻璃上生长二氧化钒薄膜,并选择 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> (TFMGS 的一种)作为减反层。深入研究了不同厚 度的 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层对在玻璃上生长 VO<sub>2</sub> 薄膜的 晶体结构、电学性能和光学性能的影响。该研究有 助于推动 VO<sub>2</sub> 薄膜在智能窗领域的应用。

#### 1 实验方法

#### 1.1 材料和仪器

首先,采用脉冲激光沉积系统(PLD-450B)在玻 璃衬底上制备 VO<sub>2</sub> 薄膜,随后在 glass/VO<sub>2</sub> 样品上 生长不同厚度的 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层。使用高分辨率 的 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8 Advance, Cu Ka1,  $\lambda$ =1.5406 Å))来测量样品的晶体结构。使用原子力 显微镜 (AFM, Dektak 150, Bruker )研究样品的表面 形貌。利用霍尔效应测试仪(型号 HMS-5300, Ecopia,范德堡法)测试薄膜的电学性能;利用紫 外—可见光—红外光分光光度计(型号 UV-3600, Shimadzu)在 30°C 和 100°C 下分别测量薄膜的透过 率,测试的波长范围为 200~2650 nm。

#### 1.2 制备工艺

衬底选用无碱玻璃(BF33,首先对衬底进行清 洁处理,将其浸泡在丙酮与酒精溶液分别超声清洗 十分钟以去除油脂,而后用去离子水反复冲洗,最后用氮气吹干将清洗洁净的衬底放置在腔体中准备镀膜。制备厚度为 60 nm 的 VO<sub>2</sub> 薄膜若干,具体制备条件:本底真空条件为 3.2×10<sup>-4</sup> Pa,工作氧压为 0.9 Pa,衬底温度保持在 640℃,激光能量设定为 200 mJ,激光频率为 5 Hz,溅射时间为 30 min。

随后,作者在 glass/VO<sub>2</sub>样品上沉积 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减 反层,具体制备条件为:真空条件为  $3\times10^4$  Pa,衬底 为 glass/VO<sub>2</sub>,衬底温度为  $30^{\circ}$ ,激光能量设定为 200 mJ,激光频率为 5 Hz。除了溅射时间,其他生长 条件均相同, Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜的生长速率为 2 nm/min。 制备的 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层的不同厚度分别为 0、20、 60 和 120 nm。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 薄膜的晶体结构与表面形貌

使用高分辨率 X 射线衍射仪(XRD)测定了样 品的晶体结构。图1展示了在非晶玻璃衬底上生长 的 VO<sub>2</sub>薄膜以及不同厚度的 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>薄膜的 XRD图谱。从图中可以看出,在 2θ角度范围为 15°~30°之间的馒头峰对应于玻璃衬底的非晶衍射 峰。此外,在 2θ = 28°处,可以观察到 M-VO<sub>2</sub> (011) 面的衍射峰。当 VO,薄膜上层无 MgssNi15 减反层 时, XRD图中只有衬底的非晶衍射峰与 M-VO, (011) 面的衍射峰, 没有明显观察到其他的钒氧化物 的衍射峰,说明利用脉冲激光沉积技术在玻璃衬底 上得到了纯相的 VO2薄膜。当 Mg85Ni15 薄膜的厚 度为 20 nm 时, M-VO2 (011) 面的衍射峰几乎没有 变化,表明 20 nm 厚的 Mg85Ni15 薄膜对 VO2 薄膜的 晶体结构影响较小。然而,随着 MgssNi15 薄膜厚度 的增加, M-VO<sub>2</sub> (011) 面的衍射峰半高宽逐渐增大, 表明随着 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜厚度的增加,对 M-VO<sub>2</sub> (011)的晶体质量产生了不利影响。由图1知,当 MgssNi15 薄膜的厚度为 60 nm 与 120 nm 时,可以明 显观察到 MgO 或者 NiV<sub>2</sub>O<sub>6</sub>等其他氧化峰, 这可能 是由于 V 元素与 O 元素在界面的扩散并与 Mg 与 Ni 成键导致的。尤其是 Mg85Ni15 薄膜的厚度为 120 nm 时, M-VO<sub>2</sub> (011) 衍射峰的强度明显减弱, 对其 性能肯定产生不利的影响。这些是在做减反膜时 经常遇到的现象,减反膜太薄时,对 VO2薄膜的调 控不太明显,而减反膜太厚时,会使 VO,薄膜的相 变性能受到抑制。因此减反膜需要合适的厚度。



图1 非晶玻璃衬底上生长的 VO<sub>2</sub> 薄膜与 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜 (不同厚度)的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of VO<sub>2</sub> thin films grown on amorphous glass substrates and VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> thin films (with different thicknesses)

图 2 给出了在非晶玻璃衬底上生长的 VO<sub>2</sub> 薄 膜以及不同厚度的 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜的原子力显微 镜(AFM)图像。从图 2 可以看出, 当添加 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层后,随着 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 厚度的增加, 薄膜表面晶粒 先减小后增加。如图 2 (a), 无 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层的薄 膜的均方根粗糙度为 4.86nm。而分别添加 20、60 和 120 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层的薄膜的均方根粗糙度 分别为 3.52、4.56 和 7.88 nm (如图 2 (b)-(d))。这表 明引入 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层可以改变薄膜的表面形貌。 特别注意的是, Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层需要选择合适的厚



图2 非晶玻璃衬底上生长的 VO<sub>2</sub>薄膜与 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>薄膜 (不同厚度)的 AFM 图像。(a) VO<sub>2</sub>薄膜,(b) 20 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>,(c) 60 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>,(d) 120 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>

Fig. 2 AFM images of VO<sub>2</sub> thin films and VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> thin films with varying thicknesses on amorphous glass substrates. (a) VO<sub>2</sub> thin films, (b) 20 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>, (c) 60 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub>, (d) 120 nm Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 度,厚度过大会产生较粗糙的薄膜。

#### 2.2 光学性能

使用紫外—可见光—红外光分光光度计分别 测量了 VO<sub>2</sub> 薄膜和不同厚度的 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜 在 30 °C 和 100 °C 下的光透过率。通过测量数据计 算出样品的相关光学参数,包括 30 °C 和 100 °C 下的 可见光透过率( $T_{lum}$ )、太阳能调节率( $\Delta T_{sol}$ ),以及 2500 nm 处的红外光透过率差值( $\Delta T_{2500}$ )。其中,  $T_{lum}$  和 $\Delta T_{sol}$  可通过式(1)和(2)进行计算。 $\Phi_{sol}$  代表 空气质量为 1.5 时的太阳光谱辐射度(对应太阳倾 斜 角为 37°以上,符合 ASTM 标准 G173.03)<sup>[17]</sup>。  $T_{max}$  是可见光区域的最高透过率。

$$T_{\text{lum,sol}} = \frac{\int \Phi_{\text{lum,sol}}(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int \Phi_{\text{lum,sol}}(\lambda) d\lambda}$$
(1)

$$\Delta T_{\rm sol} = T_{\rm sol(30^\circ C)} - T_{\rm sol(100^\circ C)} \tag{2}$$

从图 3 中可以看出, 当减反层厚度为 20 nm 时, 光透过率曲线仅稍微上移, 表明 20 nm 厚的减反层 对 VO<sub>2</sub> 薄膜的光透过和调节能力的影响较小。然 而, 当减反层厚度为 60 nm 时, 可见光区域的峰值大 幅增加, 30℃ 和 100℃ 下的光透过率曲线明显变化, 显示出 VO<sub>2</sub> 薄膜的相变性明显, 因此, 60 nm 减反层 显著改善了薄膜的光学性能。当减反层厚度为 120 nm 时, 可见光透过率明显下降, 同时出现峰值 偏移。此外, 在室温和 100℃ 下测量的太阳能透过 率差值减小, 表明 VO<sub>2</sub> 薄膜的调节性能也下降。峰 值偏移和光学性能下降与 120 nm 减反层对 VO<sub>2</sub> 薄 膜结构的破坏有关。





Fig. 3 Light transmittance curve of the sample at 30  $^\circ\!\mathrm{C}$  and 100  $^\circ\!\mathrm{C}$ 

从图4可以看出,每个样品在30℃和100℃下 的可见光透过率基本一致,这是 VO<sub>2</sub>(M/R)型物相 的光学特性。Mg<sub>s</sub>Ni<sub>1</sub>、减反层的添加导致可见光透 过率明显变化。从 20 nm 到 60 nm 的样品,可见光 透过率都上升,而120 nm的样品明显下降。太阳能 调节率△T<sub>sol</sub>也有明显变化。20 nm 厚的减反层导 致 $\Delta T_{sol}$  显著下降, 60 nm 厚的减反层导致 $\Delta T_{sol}$  明 显上升,而120 nm 厚的减反层与未添加减反层的样 品相比差距不大。与 20 nm 和 120 nm 的样品相比, 60 nm 的样品和未添加减反层的样品的△T<sub>2500</sub> 超过 了 45%。综上所述, 当 Mg85Ni15 减反层厚度为 60 nm 时,提高了可见光透过率与太阳能调节率,从而提 高了其光学性能。光学性能提升的原因可能是由 于 Mg85Ni15 作为减反层, 在红外区具有金属性质的 透过率,在相应范围的金属薄膜界面上支撑 p 极化 表面等离激元[18],表面等离激元的出现可能有效地 调制了光学性质。

#### 2.3 电学性能

借助霍尔效应测试仪,作者测定了具有不同减 反层厚度的样品在升温和冷却过程中随温度变化 的方块电阻曲线。随着温度的升高,每个样品的方





块电阻都显著下降,这是二氧化钒薄膜的电学相变特征。但它们的热滞回线有所不同,这表明不同厚度的 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜对 VO<sub>2</sub>(M/R)型物相的电学性能产生了影响。插图中显示了标准高斯拟合的对数 微分曲线,通过这些曲线可以计算出升温和降温时的相变温度,计算公式为 dlg(*R*)/d*T*(其中 *R* 为方块电阻,*T* 为温度),*T*。则为 dlg(*R*)/d*T* 极值所对应的温度,即相变温度。

从图 5 中可以看出, glass/VO<sub>2</sub>升温和冷却过程



图5 非晶玻璃衬底上生长 VO<sub>2</sub> 薄膜 (a) 与 VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜不同厚度 (b) (c) (d) 方块电阻随温度的变化曲线。四个插图分别 对应其微分曲线 d(lgR)/dT~T

Fig. 5 The variation curve of the square resistance of VO<sub>2</sub> thin films (a) and VO<sub>2</sub>/Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> thin films (with different thicknesses (b) (c) (d)) grown on amorphous glass substrates with temperature. The insets correspond to the differential curve  $d(\lg R)/dT \sim T$ 

中的相变温度分别为76℃和63℃,热滞宽度为 13℃,相变前后方块电阻有接近4个数量级的变化, 这表明作者在玻璃衬底上制备了相变性能较好的 二氧化钒相变薄膜。在沉积 Mg85Ni15 减反层后,其 相变数量级均降低为2个数量级的变化,相变温度 与热滞宽度也发生了一些变化,具体的:glass/VO, 升温和冷却过程中的相变温度分别为 78℃ 和 63℃, 热滞宽度为 15℃; glass/VO<sub>2</sub>/ Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> (20 nm) 升温 和冷却过程中的相变温度分别为 63℃ 和 57℃, 热 滞宽度为 6℃; glass/VO<sub>2</sub>/ Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> (60 nm) 升温和冷 却过程中的相变温度分别为 66℃ 和 60℃, 热滞宽 度为 6℃; glass/VO<sub>2</sub>/ Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> (120 nm) 升温和冷却 过程中的相变温度分别为 64℃ 和 56℃, 热滞宽度 为8℃。热滞宽度通常与相邻晶界的错配度和结构 缺陷有关[19],值得注意的是,添加减反层后,虽然相 变的数量级降低,相变温度降低且热滞宽度减小。

相变温度降低可能是因为薄膜和减反层的热膨胀系数不同和晶格常数失配产生了内应力<sup>[20]</sup>。热滞宽度依赖于 VO<sub>2</sub>薄膜的结晶质量和薄膜中相邻晶粒间的不定向程度<sup>[21]</sup>。相对于 20 nm 和 120 nm 减反层的 VO<sub>2</sub>薄膜, 120 nm 减反层的 VO<sub>2</sub>薄膜, 120 nm 减反层的 VO<sub>2</sub>薄膜, 120 nm 减反层的 VO<sub>2</sub>薄膜, 120 nm 减反层的 VO<sub>2</sub>薄膜的热致变色性能和电学特性。综合考虑相变温度以及热滞宽度的大小,可以得出结论, 当减反层的厚度为 60 nm 时, M-VO<sub>2</sub>薄膜的电学性能较优。这表明通过添加减反层也可以对 M-VO<sub>2</sub>薄膜的相变温度产生影响。

## 3 结论

通过脉冲激光沉积(PLD)技术,在非晶玻璃衬 底上成功生长了 M-VO<sub>2</sub> 薄膜,并在其上镀上一层 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 薄膜作为减反层。XRD 结果表明,在实验 中制备的 M-VO<sub>2</sub> 薄膜中,出现了单一的晶向,而且 其纯度相对较高。然而,随着减反层厚度的增加, 薄膜的晶体质量逐渐降低。光学结果表明,添加 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层可以提高薄膜的可见光透过率与太 阳能调节率。电学测试结果表明,添加 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减 反层。虽然相变的数量级降低,相变温度降低且热 滞宽度减小。综合结果显示,在 Mg<sub>85</sub>Ni<sub>15</sub> 减反层为 60 nm 时,得到了光电性能较佳的复合薄膜。

本研究不仅揭示了不同 Mg85Ni15 减反层厚度 对 M-VO2 薄膜的晶体质量和电学性能产生的影响, 而且成功地提高了 M-VO<sub>2</sub> 薄膜的光学性能,特别是 在可见光透过率和太阳能调节率方面取得了显著 的改善。因此,这项研究有助于推动 VO<sub>2</sub> 薄膜在智 能窗领域的应用。

#### 参考文献

- Morin F J. Oxides which show a Metal-to-Insulator transition at the neel temperature[J]. Phys Rev Lett, 1959, 3(1): 34–36
- [2] Hu B, Ding Y, Chen W, et al. External-strain induced insulating phase rransition in VO<sub>2</sub> strain sensor[J]. Adv Mater, 2010, 22(45): 5134–5139
- [3] Aliev V S, Bortnikov S G, Badmaeva I A. Anomalous large electrical capacitance of planar microstructures with vanananobeam and its application as flexible dium dioxide films near the insulator-metal phase transition[J]. Appl Phys Lett, 2014, 104(13): 132906
- [4] Li W J, Ji S D, Qian K, et al. Preparation and characterization of VO<sub>2</sub>-BaSO<sub>4</sub> composite films with enhanced optical properties in thermochromic field[J]. Ceram Int, 2015, 41(3): 5049–5056
- [5] Kim H, Charipar N, Breckenfeld E, et al. Active terahertz metamaterials based on the phase transition of VO<sub>2</sub> thin films[J]. Thin Solid Films, 2015, 596: 45–50
- [6] Shukla N, Thathachary A V, Agrawal A, et al. A steepslope transistor based on abrupt electronic phase transition[J]. Nat Commun, 2015, 6: 7812
- [7] Bian J M, Wang M H, Sun H J, et al. Thickness-modulated metal-insulator transition of VO<sub>2</sub> film grown on sapphire substrate by MBE[J]. J Mater Sci, 2016, 51: 6149–6155
- [8] Jian J, Wang X J, Li L G, et al. Continuous tuning of phase transition temperature in VO<sub>2</sub> thin films on c-Cut sapphire substrates via strain variation[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2017, 9: 5319–5327
- [9] Yang Y J, Wang L X, Huang H L, et al. Controlling metalinsulator transition in (010)-VO<sub>2</sub>/(0001)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> epitaxial thin film through surface morphological engineering[J]. Ceramics International, 2018, 44: 3348–3355
- [10] Wang C, Zhao L, Liang Z H, et al. New intelligent multifunctional SiO<sub>2</sub>/VO<sub>2</sub> composite films with enhanced infrared light regulation performance, solar modulation capability, and super hydrophobicity[J]. Sci Technol Adv Mat, 2017, 18: 563–573
- [11] Zhou H J, Li J H, Xin Y C, et al. Electron transfer induced thermochromism in a VO<sub>2</sub>-graphene-Ge het-

erostructure[J]. J Mater Chem C, 2015, 3: 589-597

- [12] Liu P, Liang L P, Xu Y. Preparation and characteristics of SiO<sub>2</sub> /VO<sub>2</sub> double-layer thermochromic coatings for smart window[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0416001
- Li B, Liu J, Tian S, et al. VO<sub>2</sub>-ZnO composite films with enhanced thermochromic properties for smart windows[J]. Ceramics International, 2020, 46(3): 2758–2763
- [14] Chu C W, Jang J S C, Chen G J, et al. Characteristic studies on the Zr-based metallic glass thin film fabricated by magnetron sputtering process[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(22-23): 5564–5566
- [15] Chu J P, Liu C T, Mahalingam T, et al. Annealing-induced full amorphization in a multicomponent metallic film[J]. Phys Rev B, 2004, 69(11): 113410
- [16] Kang C Y, Zhang C, Yao Y X, et al. Enhanced thermochromic properties of vanadium dioxide (VO<sub>2</sub>)/glass heterostructure by inserting a Zr-based thin film metallic glasses (Cu<sub>50</sub>Zr<sub>50</sub>) Buffer Layer[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1751
- [17] ASTM G173-03: Standard tables for reference Solar spectral irradiances: Direct normal and hemispherical on 37°

tilted surface[M]. Annual Book of ASTM Standards (American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. USA), 2008, 14(04): 20

- [18] Zong H T, Geng C C, Kang C Y, et al. Excellent near-infrared transmission of Zr-based thin film metallic glasses[J]. Results in Physics, 2018, 10: 612–615
- [19] Zhang C, Kang C Y, Zong H T, et al. Stress induced modulation of the structure and photoelectric property of vanadium oxide films on sapphire substrate[J]. Journal of Inorganic Materials, 2018, 33(11): 1225–1231 (张聪, 康 朝阳, 宗海涛, 等. 应力对蓝宝石衬底上生长二氧化钒 薄膜结构和光电性能的调控 [J]. 无机材料学报, 2018, 33(11): 1225–1231 (in Chinese))
- [20] Koo H, Yoon S J, Kwon O J, et al. Effect of lattice misfit on the transition temperature of VO<sub>2</sub> thin film[J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(17): 6397–6401
- [21] Kucharczyk D, Niklewski T. Accurate X-ray determination of the lattice parameters and the thermal expansion coefficients of VO<sub>2</sub> near the transition temperature[J]. Journal of Applied Crystallography, 1979, 12(4): 370– 373