

The Influence of Oxygen Pressure on the Structure, Optoelectronic Properties, and MIT Characters of VO₂ Thin Films

Xin Tao, Hao Lu, Pai Li, Yinmei Lu*, Yunbin He

Ministry-of-Education Key Laboratory of the Green Preparation and Application for Functional Materials, School of Materials Science and Engineering, Hubei University, Wuhan Hubei
Email: yinmei_lu@hubu.edu.cn

Received: May 4th, 2018; accepted: May 20th, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

Vanadium dioxide (VO₂) epitaxial films were grown on TiO₂ (110) substrates with various O₂ pressures by pulsed laser deposition using a metal vanadium as target and high-purity O₂ as reaction gas. The growth experiments were carried out at a fixed substrate temperature of 600°C and different O₂ pressures. X-ray diffraction (XRD), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), UV-visible-near-infrared spectrophotometer (UV-VIS-NIR) and four-probe method were used to characterize the films. The XRD rocking curve half widths at (011)-plane of the VO₂ films deposited at various oxygen pressures are all very small, in the range of 0.12° - 0.27°, indicating a very good out-of-plane atomic ordering of the films. It was revealed that 6.5 Pa was the optimum oxygen pressure for the growth of high-quality VO₂ films, which exhibit a XRD rocking curve half width as small as 0.116°, the most effective modulation to solar energy in the visible-near-infrared region, and almost four orders of magnitude change in resistance, *i.e.*, an obvious metal-insulator transition character at a temperature around 63°C.

Keywords

VO₂ Film, Metal-Insulator Transition (MIT), Pulsed Laser Deposition (PLD)

沉积氧压对二氧化钒薄膜结构、光电性能及其 MIT 相变特性的影响研究

陶欣, 陆浩, 李派, 卢寅梅*, 何云斌

湖北大学材料科学与工程学院, 功能材料绿色制备与应用教育部重点实验室(湖北大学), 湖北 武汉

*通讯作者。

文章引用: 陶欣, 陆浩, 李派, 卢寅梅, 何云斌. 沉积氧压对二氧化钒薄膜结构、光电性能及其 MIT 相变特性的影响研究[J]. 材料科学, 2018, 8(5): 573-581. DOI: [10.12677/ms.2018.85067](https://doi.org/10.12677/ms.2018.85067)

Email: yinmei_lu@hubu.edu.cn

收稿日期: 2018年5月4日; 录用日期: 2018年5月20日; 发布日期: 2018年5月28日

摘要

本工作中我们采用脉冲激光沉积法,以金属钒靶作为烧蚀靶材、高纯氧气作为反应气体,通过改变薄膜生长时的氧压,在TiO₂ (110)衬底上制备VO₂薄膜。利用X射线衍射仪、X射线光电子能谱分析仪、紫外-可见-近红外光谱测试仪、四探针测试仪系统测试并研究了薄膜生长氧压对VO₂薄膜的结构、成分、光学性能及金属-绝缘体相变特性的影响。实验结果表明:不同氧压下制备的VO₂薄膜(011)晶面X射线衍射摇摆曲线半高宽都很小(在0.12°~0.27°范围),表明薄膜的面外取向度很高;当氧压为6.5 Pa时,制备的VO₂薄膜摇摆曲线半高宽最小(0.116°),相变前后薄膜对太阳能调制最大、其电阻开关比达到4个数量级,薄膜相变温度接近63℃,金属-绝缘体转变特性显著。

关键词

VO₂薄膜, 金属-绝缘体相变, 脉冲激光沉积法

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

1959年Morin [1]发现二氧化钒(VO₂)具有由低温绝缘相到高温金属相的可逆相变特性,且其相变温度为68℃ [2],稍高于室温。人们通过掺杂不同元素和改变生长条件来调节二氧化钒的相变温度,使其进一步降低到室温附近。在二氧化钒发生相变后,其由单斜结构的绝缘体相转变为金红石结构的金属相,电阻率有4到5个数量级的变化[3] [4]。二氧化钒相变前后对红外光的透过有着很大的改变,且其相变前后的光电特性变化都是可逆的。由于这些可逆的特性,二氧化钒在光电开关、红外探测器、智能玻璃等方面具有良好的应用前景[5] [6] [7] [8]。

氧空位和应力对VO₂的相变特性具有显著的影响[9]。由于钒具有多种价态,易形成V₂O₃、VO₂、V₂O₅等氧化物,所以生长氧压对纯相二氧化钒的制备至关重要。过去已有多种方法用于VO₂薄膜的制备,基于反应介质主要可分为气相沉积法和液相沉积法两大类。气相沉积法又可分为化学气相沉积(CVD: Chemical Vapor Deposition) [10] [11]和物理气相沉积[12] [13] [14] [15] (PVD: Physical Vapor Deposition)两种。化学气相沉积法的成膜装置简单,适用于形状复杂的零件和内孔镀膜,但其沉积速率不高,对环境有污染,对设备耐腐蚀性能有一定要求;而物理气相沉积法的技术工艺过程简单,对环境无污染、耗材少,成膜均匀致密、与基体的结合强。脉冲激光沉积(PLD: Pulsed Laser Deposition)法因沉积速率高,制备的薄膜均匀,易获得符合化学计量比的多组分膜而被公认为实验室制备薄膜的最好方法之一。在1993年Singh [16]等人最先用PLD法在R面蓝宝石上制备了VO₂薄膜。

在本工作中,我们采用脉冲激光沉积法,以金属钒靶作为烧蚀靶材、TiO₂ (110)作为衬底、高纯氧气作为反应气体,固定衬底温度600℃和沉积时间30 min,通过改变氧压大小制备出系列VO₂薄膜,以探究沉积氧压对薄膜结构及其金属-绝缘体相变(MIT: Metal-Insulator Transition)特性的影响。

2. 实验

2.1. 薄膜样品制备

本实验中,我们采用 PLD 方法,以金属钒(V)靶作为烧蚀靶材,采用单晶 TiO_2 (110)作为衬底、高纯氧气 O_2 (99.999%)作为反应气体,通过调节生长氧压大小来制备 VO_2 薄膜。实验中使用的是德国 Lambda Physik 公司生产的 KrF 准分子激光器(COMPLEX PRO 205F),输出波长为 248 nm,固定激光频率为 5 Hz,激光脉冲能量为 420 mJ/Pulse。沉积薄膜之前,首先将 TiO_2 (110)衬底放入真空管式炉中在空气中、900°C 下退火 1 小时,以消除衬底中的应力及表面吸附杂质,使其更有利于高质量 VO_2 薄膜的外延生长。然后,将衬底依次在丙酮、乙醇、去离子水中超声清洗各 15 min,以进一步去除表面污染物杂质。清洗干净的衬底用氮气吹干后固定于样品托上,并被立即送入 PLD 真空室内。固定靶材和衬底之间的距离为 55 mm,待真空室压强抽至 4.0×10^{-4} Pa 以下,开始加热衬底至薄膜生长所需温度(600°C),随后通入高纯氧气,设置靶材和衬底分别以 5 r/min 和 10 r/min 的速度转动,开启激光器沉积薄膜 30 min。薄膜生长完毕后,待样品在真空室自然冷却至室温后取出。设定沉积时的氧压分别为 4.5 Pa、5.5 Pa、6.0 Pa、6.5 Pa、7.0 Pa、7.5 Pa,得到 6 个不同氧压下生长的薄膜样品。

2.2. 薄膜样品测试

通过场发射扫描电镜(FE-SEM, 蔡司(ZEISS), SIGMA 500)观测薄膜断面,可知薄膜厚度大约为 60 nm;采用四圆单晶 X 射线衍射仪(HRHRD, D8 discover, Bruker, $\text{CuK}\alpha 1$, $\lambda = 1.540598 \text{ \AA}$)对薄膜的晶体结构进行分析,使用 X 射线光电子能谱分析仪(XPS, Escalab 250Xi, Thermo Scientific)对薄膜的成分进行检测,采用 UV3600Plus 型紫外-可见-近红外光谱仪测试其对可见-近红外光的透过率,通过四探针法来测量薄膜在升温 and 降温过程中电阻的变化。

3. 结果与讨论

3.1. 沉积氧压对薄膜晶体结构的影响

图 1(a)、图 1(b)分别为不同氧压下生长的 VO_2 薄膜 XRD 全谱图和窄谱图。从全谱图中可以看出,27.44° 和 56.64° 分别对应于 TiO_2 (110)衬底的(110)和(220)面衍射峰,28.2° 和 57.16° 分别对应单斜相 M-VO_2 的(011)

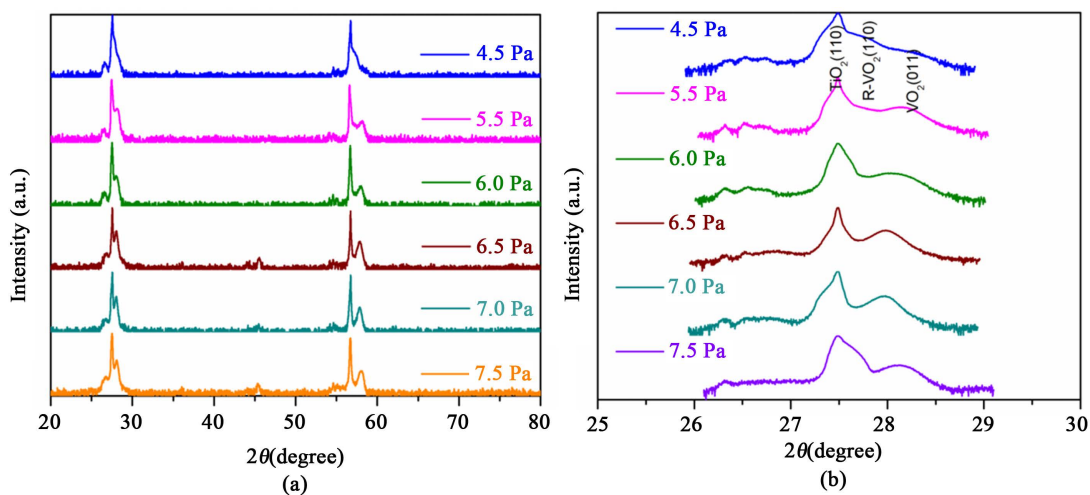


Figure 1. The θ -2 θ scan XRD patterns of VO_2 films grown at different oxygen pressures: (a) broad-scan; (b) narrow-scan
图 1. 不同氧压下生长 VO_2 薄膜的 θ -2 θ 扫描 XRD 图谱: (a) 全谱图; (b) 窄谱图

和(022)面衍射峰。当沉积氧压为 4.5 Pa 时,除了衬底的衍射峰外,图谱中出现了金红石相 R-VO₂ (110) 的衍射峰和单斜相 M-VO₂ (011)的衍射峰;沉积氧压在 5.5 Pa 与 6.0 Pa 之间时,除了衬底的衍射峰外,只出现了单斜相 VO₂的衍射峰,表明成功得到单相的 M-VO₂ 薄膜;当沉积氧压 \geq 6.5 Pa 时,除了衬底和 M-VO₂的衍射峰外,谱图在 45.34°处出现微弱的 V₂O₅ (411)的杂峰,表明此条件下制备的 VO₂ 薄膜中含有微量的 V₂O₅ 相。从窄谱图中可以看出,随着氧压从 5.5 Pa 升高到 7.0 Pa, VO₂ (011)面衍射峰从 28.124° 逐渐向低角度移动到 27.98°,此峰位移动是由于随着沉积氧压升高 VO₂ 薄膜中氧空位减少造成的[17]。由布拉格方程 $2d\sin\theta = n\lambda$ (d 为衍射晶面间距, θ 为入射 X 射线与晶面的夹角, λ 为 X 射线波长, n 为衍射级数通常取 1)可以计算出,对应于 VO₂ (011)面衍射峰从 28.124°移动到 27.98°,薄膜面间距从 3.1703 Å 增加到 3.1863 Å,如表 1 所示。为了研究薄膜的面外取向度,对不同氧压下生长的 VO₂ 薄膜的摇摆曲线进行测试,结果如图 2 所示。从图中可以看出,实验得到的薄膜的摇摆曲线半高宽都很小(在 0.12°~0.27° 范围),表明薄膜的面外取向高、结晶质量好。

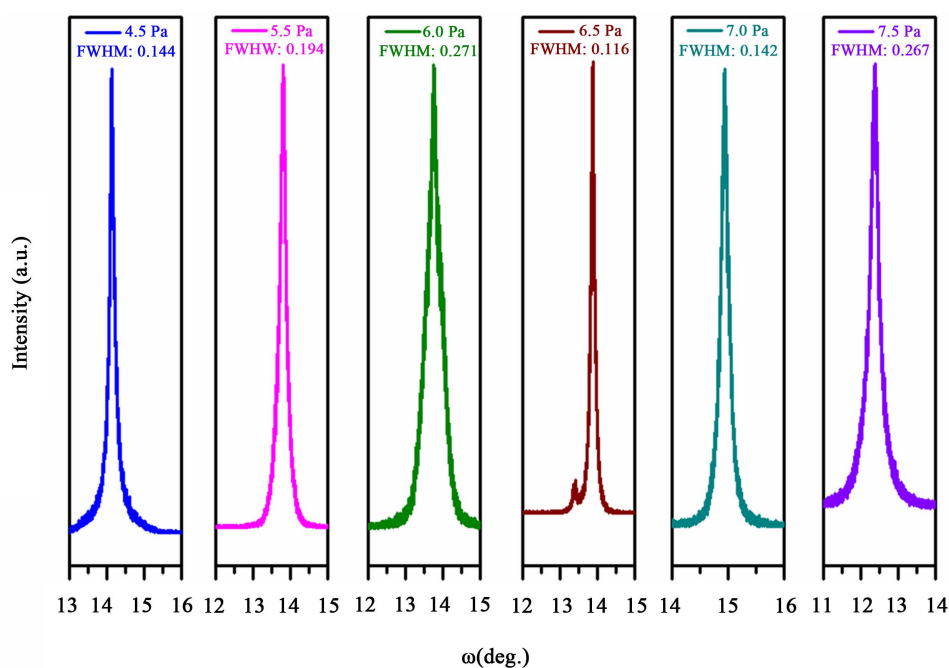


Figure 2. The XRD rocking curves of the (011)-plane of VO₂ films

图 2. VO₂ 薄膜(011)面的摇摆曲线图

Table 1. Metal-insulator phase transition temperature and (011)-plane interlayer spacing of VO₂ films deposited at different oxygen pressures.

表 1. 不同氧压下生长 VO₂ 薄膜的金属-绝缘体相变温度及(011)晶面的面间距

沉积氧压(Pa)	$T_{c,heating}$ (°C)	$T_{c,cooling}$ (°C)	T_c (°C)	(011)面间距(Å)
4.5	66.92	64.93	65.93	3.1467
5.5	62.19	57.75	59.97	3.1703
6.0	68.17	64.75	66.46	3.1803
6.5	63.17	62.10	62.35	3.1859
7.0	68.50	65.75	67.13	3.1863
7.5	69.67	66.33	68.00	3.1752

3.2. 沉积氧压对薄膜成分的影响

图 3 展示了 6.5 Pa、7.5 Pa 下生长的 VO₂ 薄膜的 XPS 全谱图，从图中可以看出，除了 V、O 特征峰外，还有 C 的特征峰被测到，这是由于薄膜长时间暴露在空气中，碳氢化合物杂质吸附在薄膜的表面所造成的，所生长的薄膜中没有引入其它杂质元素。

3.3. 沉积氧压对薄膜光学性能的影响

图 4 展示的是不同氧压下生长的 VO₂ 薄膜的可见-红外光的透射光谱图及透射光谱相关数据分析结果图。图 4(a) 中的实线代表的是不同氧压下生长的 VO₂ 薄膜在环境温度为 25℃ 时的透过率，虚线代表的是在 90℃ 的透过率 (λ 为透射光波的波长，其范围为 $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 2500 \text{ nm}$)。由图可见，对于可见光 (400~800 nm)，VO₂ 薄膜在高温和低温下的透过率几乎相等，而对于近红外光 (800~2500 nm)，VO₂ 薄膜在高温和低温下的透过率相差很大，即：VO₂ 薄膜在相变前后对近红外光透过率具有明显调制作用。图 4(b) 中的数据表明，当温度为 25℃，VO₂ 薄膜对波长为 2500 nm 的红外光的透过率随氧压变化不大，基本都达到了 65%；当温度为 90℃ 时，VO₂ 薄膜对波长为 2500 nm 的红外光的透过率随氧压的增加先减小后增大，在 7.0 Pa 时，达到最小值 8%，与此对应，VO₂ 薄膜在相变前后对 2500 nm 波长红外光透过率的调制幅度 ($\Delta T = T_{25^\circ\text{C}} - T_{90^\circ\text{C}}$) 随氧压增加先增大后减小，在 7.0 Pa 时，到达最大值 60%。对于 VO₂ 薄膜在智能窗玻璃涂层上的应用，其相变前后对于太阳光谱中可见光 (410~800 nm) 透过率的影响及可见-近红外波段 (410~2500 nm) 能量透过率的调制幅度至关重要。图 4(c)、图 4(d) 分别给出本工作制备的 VO₂ 薄膜在 25℃ 和 90℃ 下对太阳光谱中可见光波段与可见-近红外波段辐照能量透过率 T_{vis} 、 T_{sol} 及相变前后透过率的差值 ΔT_{vis} 、 ΔT_{sol} 。太阳光谱辐照能量透过率 T 根据积分公式 [18]：

$$T = \frac{\int_0^{\infty} T(\lambda) E_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda}$$

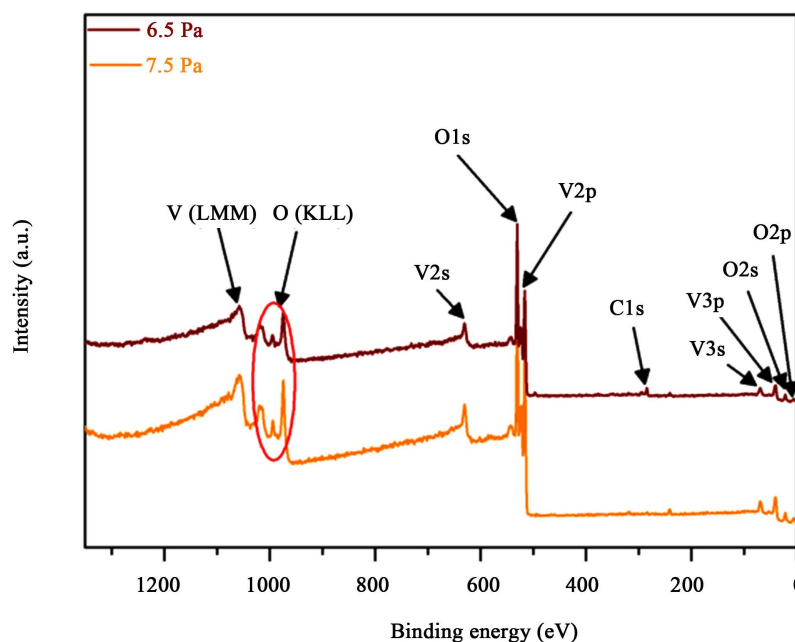


Figure 3. The XPS survey spectra of VO₂ films prepared at 6.5 Pa and 7.5 Pa oxygen pressure
图 3. 6.5 Pa、7.5 Pa 氧压下制备的 VO₂ 薄膜的 XPS 全谱

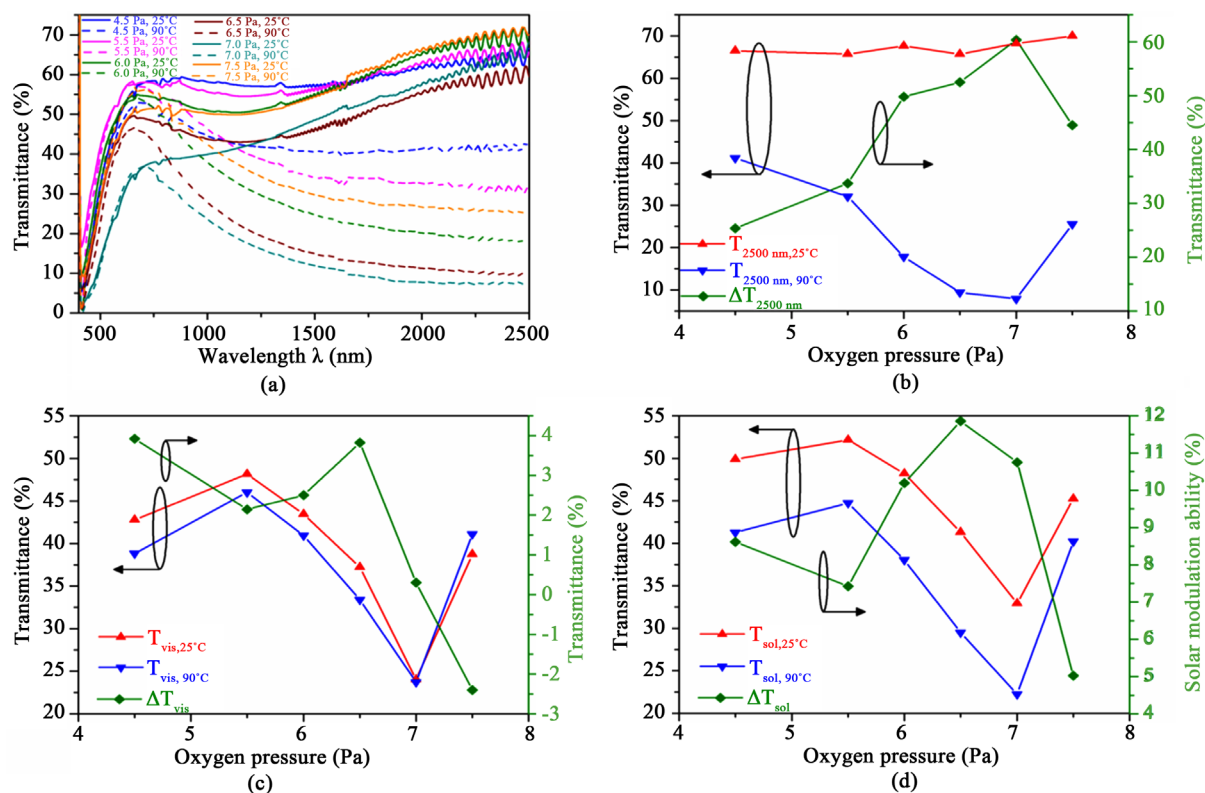


Figure 4. The visible-near infrared transmittance curves of VO₂ thin films prepared under different oxygen pressures: (a) transmittance spectra in the visible near infrared region measured at 25°C and 90°C (*i.e.*, before and after the phase transition of VO₂); (b) transmittance at fixed infrared light wavelength of 2500 nm; (c) transmittance in the visible light region (410 nm ≤ λ ≤ 780 nm); and (d) transmittance in the visible-near infrared region (410 nm ≤ λ ≤ 2500 nm) before and after the phase transition of VO₂ thin films

图 4. 不同氧压下制备的 VO₂ 薄膜对可见-近红外光的透过率曲线图谱: (a) 薄膜在低温 25°C 和高温 90°C 下(即相变前后)对可见-近红外光透射全谱图; (b) 薄膜在相变前后对固定波长 2500 nm 红外光的透过率 $T_{2500 \text{ nm}, 25^\circ\text{C}}$ 、 $T_{2500 \text{ nm}, 90^\circ\text{C}}$ 及其差值 $\Delta T_{2500 \text{ nm}}$; (c) 薄膜在相变前后对可见波段(410~800 nm)光的透过率 $T_{\text{vis}, 25^\circ\text{C}}$ 、 $T_{\text{vis}, 90^\circ\text{C}}$ 及其差值 ΔT_{vis} ; (d) 薄膜在相变前后对可见-近红外波段(410~2500 nm)光的透过率 $T_{\text{sol}, 25^\circ\text{C}}$ 、 $T_{\text{sol}, 90^\circ\text{C}}$ 及其差值 ΔT_{sol}

计算所得, 其中 $T(\lambda)$ 为不同波长光的透过率, $E(\lambda)$ 在可见光情形(图 4(c))运用人眼的光谱灵敏度[19], 在可见-近红外波段(图 4(d))运用太阳光谱辐照度[20]。从图中可以看出: 相变前后的 VO₂ 薄膜对于可见光的透过率(图 4(c))均随着生长氧压的增加先增加再减小最后又增加, 不过相变前后对可见光调控幅度小于 4%, 且随氧压增加呈现变小的趋势。相比较而言, VO₂ 薄膜在相变前后对可见-近红外波段太阳能的调控(图 4(d))作用明显, 其调控幅度随着氧压的增大先增大后减小, 在氧压为 6.5 Pa 时达到最大值~12%。

3.4. 沉积氧压对薄膜 MIT 相变的影响

利用四探针法测量不同氧压下生长的 VO₂ 薄膜电阻随温度的变化关系。对升温 and 降温过程中电阻变化进行分别测量, 结果如图 5 所示。当氧压从 4.5 Pa 增加到 6.5 Pa 时, 薄膜相变前后电阻的开关比由 1 个数量级逐步增大到接近 4 个数量级; 随着氧压继续增大到 7.5 Pa 时, 开关比又逐渐减小, 直至基本消失, 由此可以说明生长氧压能显著改变薄膜 MIT 相变前后电阻开关比。这是因为当氧压过低时, 制备的 VO₂ 薄膜中有很多氧空位; 而当氧压过高时, 制备的 VO₂ 薄膜中含有 V₂O₅ 杂相, 这在 XRD θ - 2θ 全谱图中可以看出。相变前后 VO₂ 薄膜电阻开关比与薄膜对太阳能调控随氧压的变化趋势相同, 都随氧压的增大先增大后减小, 在氧压为 6.0 Pa~6.5 Pa 时达到最大。

为了获得 VO₂ 薄膜 MIT 相变温度, 我们对变温电阻曲线进行了微分处理, 结果如图 6 所示。随着氧压的增大, 薄膜变温电阻微分曲线先由平缓逐渐变得陡峭, 随着氧压继续增大, 薄膜变温电阻微分曲线又变得平缓。升温、降温过程电阻微分曲线的拐点分别记为 $T_{c,heating}$ 、 $T_{c,cooling}$, 则薄膜相变温度 T_c 可由公式 $T_c = (T_{c,heating} + T_{c,cooling})/2$ 计算确定, 结果如表 1 所示。随着氧压在 4.5 Pa~7.5 Pa 之间变化, VO₂ 薄膜 MIT 相变温度在 60°C~68°C 之间变化, 与 VO₂ 体材的相变温度(68°C)接近。不同沉积氧压使得薄膜中存在不同浓度的氧空位, 氧空位可以有效调节薄膜的相变温度。

4. 结论

本工作通过脉冲激光沉积法在 TiO₂ (110) 衬底上生长 VO₂ 薄膜, 研究了沉积氧压对 VO₂ 薄膜结晶性、光电特性的影响。氧压过高容易生成钒的其他氧化物杂相, 氧压过低导致薄膜中存在大量氧空位而使薄膜 MIT 特性表现不明显。VO₂ 薄膜生长的最佳氧压为 6.5 Pa, 此条件下制备薄膜的(011)面 XRD 摇摆曲线半高宽降至 0.116°, UV 测试结果表明薄膜对可见光和太阳能的调控均达到最佳, 薄膜相变前后电阻的开关比达到近 4 个数量级。当沉积氧压在 5.5 Pa 至 7.0 Pa 之间时, 薄膜都显示出明显的 MIT 特性, 相变温度在 60°C~68°C 之间变化, 这表明薄膜中氧空位浓度可以有效调节 VO₂ MIT 相变温度。

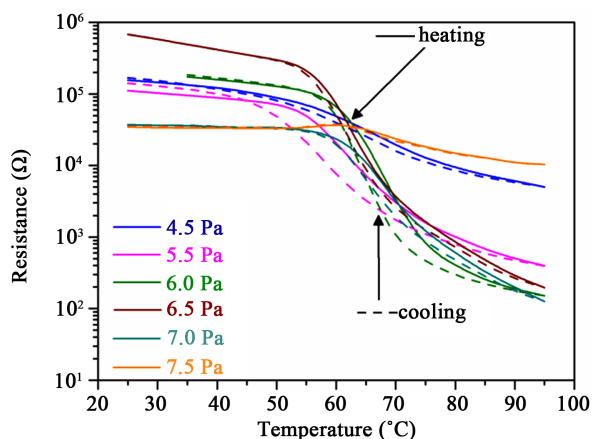


Figure 5. The temperature-dependent resistance of VO₂ films prepared under different oxygen pressures. Solid and dashed lines represent the heating and cooling processes, respectively

图 5. 不同氧压下制备的 VO₂ 薄膜的变温电阻曲线(实线和虚线分别代表升温和降温过程)

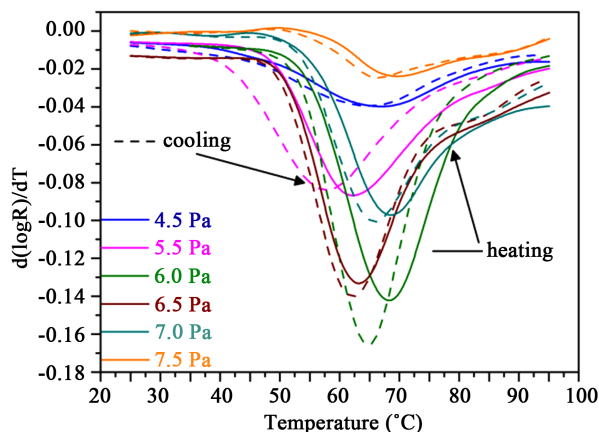


Figure 6. The temperature-dependent differential resistance of VO₂ films prepared under different oxygen pressures

图 6. 不同氧压下制备的 VO₂ 薄膜的变温电阻微分曲线

致 谢

感谢国家自然科学基金(61274010, 11574074, 11774082); 湖北省自然科学基金(2016AAA031); 武汉国际科技合作项目(2016030409020222)以及材料复合新技术国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金(2018-KF-16)对本工作的支持。

参考文献

- [1] Morin, F.J. (1959) Oxides Which Show a Metal to Insulator Transition at Neel Temperature. *Physical Review Letters*, **3**, 34-36. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.3.34>
- [2] Leroux, C., Nihoul, G. and Van Tendeloo, G. (1998) From VO₂(B) to VO₂(R): Theoretical Structures of VO₂ Polymorphs and *in Situ* Electron Microscopy. *Physical Review B*, **57**, 5111-5121. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.5111>
- [3] Yang, T.H., Mal, S., Jin, C., *et al.* (2011) Epitaxial VO₂/Cr₂O₃/Sapphire Heterostructure for Multifunctional Applications. *Applied Physics Letters*, **98**, 022105. <https://doi.org/10.1063/1.3541649>
- [4] Zhang, H., Wu, Z., Yang, W., *et al.* (2013) Large Phase-Transition Hysteresis for Nanostructured VO_x Film Prepared on ITO Conductive Glass by DC Reactive Magnetron Sputtering. *Vacuum*, **98**, 84-86. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2013.01.027>
- [5] Narayan, J. and Bhosle, V.M. (2006) Phase Transition and Critical Issues in Structure-Property Correlations of Vanadium Oxide. *Journal of Applied Physics*, **100**, 1-3. <https://doi.org/10.1063/1.2384798>
- [6] Jin, P., Yoshimura, K. and Tanemura, S. (1997) Dependence of Microstructure and Thermo-chromism on Substrate Temperature for Sputter-Deposited VO₂ Epitaxial Films. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, **15**, 1113-1117. <https://doi.org/10.1116/1.580439>
- [7] Kang, L.T., Gao, Y.F., Zhang, Z.T., Du, J., Cao, C.X., Chen, Z. and Luo, H.J. (2010) Effects of Annealing Parameters on Optical Properties of Thermo-chromic VO₂ Films Prepared in Aqueous Solution. *Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 1901-1911. <https://doi.org/10.1021/jp909009w>
- [8] Li, S.Y., Niklasson, G.A. and Granqvist, C.G. (2012) Thermo-chromic Fenestration with VO₂-Based Materials: Three Challenges and How They Can Be Met. *Thin Solid Films*, **520**, 3823-3828. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.10.053>
- [9] Kim, H., Charipar, N., Osofaky, M., *et al.* (2014) Optimization of the Semiconductor-Metal Transition in VO₂ Epitaxial Thin Films as a Function of Oxygen Growth Pressure. *Applied Physics Letters*, **104**, Article ID: 081913. <https://doi.org/10.1063/1.4866806>
- [10] Wilkinson, M., Kafizas, A., Bawaked, S.M., Obaid, A.Y., Al-Thabaiti, S.A., Basahel, S.N., *et al.* (2013) Combinatorial Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition of Graded TiO₂-VO₂ Mixed-Phase Composites and Their Dual Functional Property as Self-Cleaning and Photo-chromic Window Coatings. *Acs Combinatorial Science*, **15**, 309-319. <https://doi.org/10.1021/co400027p>
- [11] Crane, J., Warwick, M., Smith, R., Furlan, N. and Binions, R. (2011) The Application of Electric Fields to Aerosol Assisted Chemical Vapor Deposition Reactions. *Journal of the Electrochemical Society*, **158**, D62-D67. <https://doi.org/10.1149/1.3519870>
- [12] Fuls, E.N., Hensler, D.H. and Ross, A.R. (1967) Reactively Sputtered Vanadium Dioxide Thin Films. *Applied Physics Letters*, **10**, 199-201. <https://doi.org/10.1063/1.1754909>
- [13] Kana, J.B.K., Ndjaka, J.M., Ngom, B.D., Manyala, N., Nemraoui, O., Fasasi, A.Y., *et al.* (2010) Thermo-chromic Nanocrystalline Au-VO₂ Composite Thin Films Prepared by Radiofrequency Inverted Cylindrical Magnetron Sputtering. *Thin Solid Films*, **518**, 1641-1647. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.11.074>
- [14] Batista, C., Carneiro, J., Ribeiro, R.M. and Teixeira, V. (2011) Reactive Pulsed-DC Sputtered Nb-Doped VO₂ Coatings for Smart Thermo-chromic Windows with Active Solar Control. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, **11**, 9042-9045. <https://doi.org/10.1166/jnn.2011.3486>
- [15] Fortier, J.P., Baloukas, B., Zabeida, O., Klemberg-Sapieha, J.E. and Martinu, L. (2014) Thermo-chromic VO₂ Thin Films Deposited by HiPIMS. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **125**, 291-296. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.03.007>
- [16] Borek, M., Qian, F., Nagabushnman, V., *et al.* (1993) Pulsed-Laser Deposition of Oriented VO₂ Thin Films on R-Cut Sapphire Substrates. *Applied Physics Letters*, **63**, 3288-3290.
- [17] Soltani, M., Chaker, M., Haddad, E., *et al.* (2007) Micro-Optical Switch Device Based on Semiconductor-to-Metallic Phase Transition Characteristics of W-Doped VO₂ Smart Coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, **25**, 971-975. <https://doi.org/10.1116/1.2734150>

-
- [18] Babulanam, S.M., Eriksson, T.S., Niklasson, G.A. and Granqvist, C.G. (1987) Thermochromic VO₂ Films for Energy-Efficient Windows. *Solar Energy Materials*, **6**, 347-363. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(87\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0165-1633(87)90029-3)
- [19] DIN 5031-1:1982-03 Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik (DIN 5031-1:1982).
- [20] ISO 9845-1:1992-10 Solar Energy; Reference Solar Spectral Irradiance at the Ground at Different Receiving Conditions; part 1: Direct Normal and Hemispherical Solar Irradiance for Air Mass 1.5 (ISO 9845-1:1992).

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org