

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.06.012

# 溅射功率对氧化锌薄膜微结构及光学性能的影响

陈星辉, 王 军, 范雪婷

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 室温下, 以质量分数 99.99% 的氧化锌陶瓷靶为溅射源, 利用射频磁控溅射技术在石英衬底上沉积氧化锌薄膜, 通过 X 射线衍射仪、薄膜测厚仪、紫外-可见分光光度计、X 射线荧光光谱仪进行测试和表征, 研究了溅射功率 (120~180 W, 功率步长为 20 W) 对 ZnO 薄膜微结构及光学性能的影响。结果表明: 所制得薄膜均在  $34.3^\circ$  附近出现 (002) 面衍射峰, 呈现 *c* 轴择优生长, 为纤锌矿结构; 随着功率的增加, 薄膜折射率有不同程度的变化, 波长范围为 190~368 nm 的紫外光区域平均透过率小于 10%, 可见光区域平均透过率大于 90%, 在 368 nm 附近出现陡峭的吸收峰; 溅射功率为 160 W、氩气气压为 0.5 Pa, 氩气流速为 8.7 mL/min, 沉积时间为 60 min, 制备所得的氧化锌薄膜晶粒尺寸最大, 晶粒取向性较好, 薄膜结构致密, 具有较佳的结晶质量和光学性能。

**关键词:** 溅射功率; ZnO 薄膜; 衍射峰; 透过率

**中图分类号:** O484; TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2020)06-0086-06

**引文格式:** 陈星辉, 王 军, 范雪婷. 溅射功率对氧化锌薄膜微结构及光学性能的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(6): 86-91.

## Effects of Sputtering Power on Microstructure and Optical Properties of ZnO Films

CHEN Xinghui, WANG Jun, FAN Xueting

(College of Science, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** At room temperature, ZnO thin films are deposited on quartz substrate by RF magnetron sputtering with 99.99% purity ZnO ceramic target as the sputtering source. An investigation has been made on the effects of sputtering power (120~180 W, power step size 20 W) on the microstructure and optical properties of ZnO thin films by X-ray diffractometer (XRD), thin-film thickness gauge, UV-visible spectrophotometer, and X-ray fluorescence spectrometer. The results show that the (002) plane diffraction peak appears near  $34.3^\circ$ , showing the *c*-axis preferred growth and wurtzite structure. With the increase of power, the refractive index of the films change in varying degrees. The average transmittance in the ultraviolet region of the wavelength range of 190~368 nm is less than 10%, while the average transmittance in the visible region is higher than 90%, with a steep absorption peak near 368 nm. The results show that the ZnO thin films are characterized with the largest grain size, good grain orientation, compact structure and the best crystal quality and optical properties with a the sputtering power of 160 W, an argon pressure of 0.5 Pa, the flow rate of argon being 8.7 mL/min, and deposition time being 60 min.

**Keywords:** sputtering power; ZnO thin films; diffraction peak; transmittance

收稿日期: 2020-01-11

基金项目: 湖南省教育厅普通高校教学改革研究基金资助项目 (湘教通 [2019]291 号-579)

作者简介: 陈星辉 (1966-), 女, 湖南湘潭人, 湖南工业大学高级实验师, 主要从事近代物理实验方面的教学与研究,

E-mail: 442090113@qq.com

## 0 引言

已有研究表明, 过多的紫外线辐射对人类健康不利, 对家具、图书、文物等的收藏有较大影响<sup>[1-4]</sup>。近年来, 紫外屏蔽材料的研究非常活跃, 目前紫外屏蔽的手段大致分为两类: 一类是反射; 另一类是吸收。很多学者对其进行了大量研究, 并得到了许多能吸收和反射紫外线的材料, 比如  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{CeO}_2$ 、 $\text{ZnO}$ 、纳米  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、纳米  $\text{FeO}$  等<sup>[5-12]</sup>。相对其他材料而言,  $\text{ZnO}$  在自然界中的储量丰富, 价格低廉, 无毒无害, 激子束缚能高达 60 meV, 具有很好的化学和热稳定性能, 室温下禁带宽约为 3.37 eV<sup>[13-15]</sup>,  $\text{ZnO}$  薄膜沉积温度低, 在紫外光区具有很高的吸收率, 在可见光区有较高的透过率, 是理想的紫外屏蔽材料, 发展潜力巨大。

目前, 制备  $\text{ZnO}$  薄膜常用的方法主要有溶胶-凝胶法、喷涂热解法、脉冲激光沉积法、分子束外延法、化学气相沉积法、磁控溅射法等<sup>[13-25]</sup>, 其中磁控溅射法制备薄膜具有膜厚均匀可控、薄膜质量好、光电性能佳的特点, 且制备工艺简单, 可以实现大面积生产, 因而被广泛采用。氧化锌薄膜的结晶质量和光电性能与溅射工艺参数, 如功率、温度、气压、氧氮比等的设置紧密相关, 溅射温度、气压、氧氮比等参数对薄膜光电性能的影响已经得到了学者们的广泛研究<sup>[16-25]</sup>。本文采用射频磁控溅射法, 在石英衬底上沉积  $\text{ZnO}$  薄膜, 在其他工艺条件不变的情况下, 探究溅射功率对薄膜微结构及光学性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验仪器与材料

高真空多靶磁控溅射镀膜机, JCP-350M2 型, 北京泰科诺科技有限公司; HONEST 循环冷却水, 北京九州同诚科技有限公司; 超声波清洗器, DS-3510DT, 上海生析超声仪器有限公司; 薄膜测厚仪, SGC-10, 天津港东科技发展有限公司; 紫外-可见分光光度计, WFZ-26A, 天津拓普科技有限公司; Ultima IV 型 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 日本理学; 能量色散型 X 射线荧光光谱仪 (energy-dispersive X-ray Fluorescence Spectrometer, ED-XRF), EDX-720, 日本岛津公司; 吹风机、耐高温石英衬底, 厚度为 1 mm; 玻璃衬底, 厚度为 1 mm; 丙酮, 分析纯, 株洲市星空化玻有限公司; 无水酒精, 分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司; 去离子水; 氧化锌陶瓷靶材, 质量分数为 99.99%, 直径为 50 mm, 厚度为 4 mm, 北京众诚新材料科技有限公司。

### 1.2 衬底处理

薄膜制备前, 将石英和玻璃衬底分别用丙酮、无水酒精、去离子水超声清洗 10 min 后吹干备用。

### 1.3 氧化锌薄膜的制备与表征

实验以质量分数 99.99% 的氧化锌陶瓷靶为溅射源, 利用高真空多靶磁控溅射镀膜机, 采用射频 (13.56 MHz) 磁控溅射技术, 在石英和玻璃衬底上沉积  $\text{ZnO}$  薄膜。溅射前, 将腔室真空度抽至  $2.7 \times 10^{-3}$  Pa, 再通入体积分数为 99.99% 的氩气启辉, 启辉后预溅射 5 min, 以去除氧化锌靶材表面杂质。所有批次薄膜制备实验条件保持溅射气压为 0.5 Pa, 氩气流速为 8.7 mL/min, 沉积温度为室温, 沉积时间为 60 min。改变溅射功率 (由 120 W 增加到 180 W, 功率步长 20 W) 制备  $\text{ZnO}$  薄膜样品, 以研究溅射功率对  $\text{ZnO}$  薄膜微结构及光学性能的影响。

对于沉积的  $\text{ZnO}$  薄膜, 采用 Ultima IV 型 X 射线衍射仪 ( $\text{CuK}\alpha$ ,  $\lambda=0.15046$  nm) 表征其晶体结构, 通过薄膜测厚仪测量薄膜厚度、折射率和消光系数, 通过紫外-可见分光光度计测量薄膜的光学透过率光谱, 利用能量色散型 X 射线荧光光谱仪测试薄膜的荧光光谱。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄膜晶体结构 XRD 分析

X 射线衍射是研究晶体结构及其变化规律的主要手段, X 射线衍射谱被作为薄膜的晶格取向、晶粒大小和择优取向性强弱的判据。图 1 显示了不同溅射功率下在石英衬底上沉积  $\text{ZnO}$  薄膜的 XRD 衍射图谱。

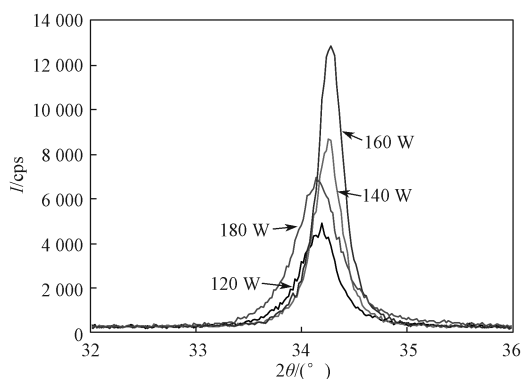


图1  $\text{ZnO}$  薄膜的 XRD 衍射图谱

Fig. 1 XRD diffraction pattern of  $\text{ZnO}$  films

由图 1 可知, 不同功率下溅射的  $\text{ZnO}$  薄膜在  $34.3^\circ$  附近有 (002) 面衍射峰, 呈现  $c$  轴择优生长, 为纤锌矿结构, 随着溅射功率的增加, (002) 面衍射峰强度逐渐增大, 当溅射功率达到 160 W 时, 衍射

峰强度达最大值,但当功率继续增加到 180 W 时,衍射峰强度反而降低。具体的 ZnO 薄膜 XRD 分析结果如表 1 所示。

表 1 ZnO 薄膜 XRD 分析结果  
Table 1 XRD analysis results of ZnO films

$P/W$	$2\theta/(^{\circ})$	$d/(10^{-10}\text{ m})$	$I_{(002)}/\text{cps}$	$\beta/(^{\circ})$	$D/(10^{-10}\text{ m})$	$c/(10^{-9}\text{ m})$
120	34.173	2.621 6	3 005	0.405	214	0.524 32
140	34.277	2.613 9	5 951	0.265	327	0.522 78
160	34.294	2.612 7	9 232	0.247	362	0.522 54
180	34.143	2.623 9	4 560	0.484	180	0.524 78

分析表 1 中的数据可知:随着溅射功率的增加,ZnO 薄膜的衍射角  $2\theta$ 、晶面间距  $d$ 、衍射峰峰高  $I_{(002)}$ 、衍射峰半高宽  $\beta$ 、晶粒尺寸  $D$  等都有明显变化。晶格常数  $c$  按照公式<sup>[17]</sup>计算

$$c = [1/d^2 - 4(h^2 + k^2 + hk)/(3a^2)]^{-1/2}。$$

式中: $h$ 、 $k$ 、 $l$ 为衍射晶面指数; $a$ 、 $c$ 为晶格常数,对于(002)晶面衍射峰,有 $c=2d$ ,不同功率下(002)晶面晶格常数 $c$ 的计算结果见表1。

由表1可知,首先,衍射角 $2\theta$ 、衍射峰峰高 $I_{(002)}$ 、晶粒尺寸 $D$ 均随着溅射功率的增加而逐渐增大,功率为160 W时出现最大值,而当溅射功率增加到180 W时,均呈现减小的趋势;晶面间距 $d$ 、衍射峰半高宽 $\beta$ 、晶格常数 $c$ 均随着溅射功率的增加而逐渐减小,当功率为160 W时,出现最小值,而当功率增加到180 W时,呈现增大的趋势。

从理论上讲,(002)面衍射峰的峰值高度和半高宽决定 ZnO 薄膜的结构特性,表1的实验数据表明,当功率从120 W增加到160 W时,随着溅射功率的增加,薄膜结晶质量变好,160 W时效果最佳。而当溅射功率继续增加到180 W时,薄膜的结晶质量反而下降,说明溅射功率太大时将会使薄膜结晶质量降低。这是因为提高溅射功率时,靶材溅射电压升高,使撞击靶材的氩离子数量和入射粒子的能量增加,溅射出更多具有较大动能的原子,沉积原子束流增大,原子表面扩散能力加强,沉积速率加快,薄膜厚度增加,沉积过程对衬底的轰击增强,热效应增大,衬底温度升高,较高的衬底温度更有利于薄膜晶粒的生长,择优取向性更好,衍射峰强度增强,薄膜结构更加致密,从而改善了薄膜晶体质量。但是,当溅射功率太高时,溅射出来的粒子由于能量过高将会破坏已经生长的 ZnO 薄膜,致使薄膜晶体结构畸变,取向性变差,结晶质量降低。XRD 分析结果表明,溅射功率对 ZnO 薄膜晶体微结构有明显影响,故选择合适的溅射功率对于制备高质量薄膜至关重要。

## 2.2 薄膜光学性能分析

### 2.2.1 薄膜厚度、折射率和消光系数

折射率和消光系数是表征氧化锌薄膜光学性能的重要参数,其大小与薄膜的反射率和透过率相关,薄膜厚度与薄膜的折射率和消光系数也有着重要联系。采用薄膜测厚仪测量薄膜厚度、折射率和消光系数,实验结果表明:随着溅射功率的增加,薄膜厚度增大,溅射功率为120,140,160,180 W所对应的薄膜厚度分别为163.7,191.7,223.3,233.8 nm,薄膜均匀性良好;图2显示了不同溅射功率下制备的氧化锌薄膜在不同波长处的折射率。

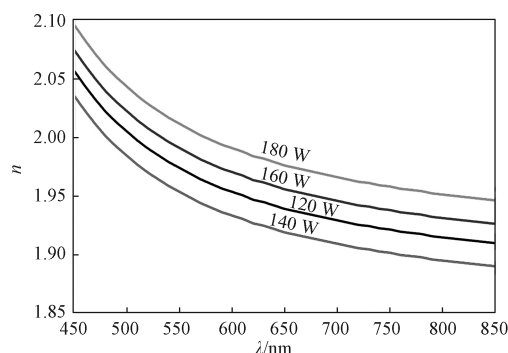


图2 氧化锌薄膜折射率图谱

Fig. 2 Refractive index  $n$  pattern of ZnO films

由图2可以得知,溅射功率对薄膜折射率有较大影响:在测试波长范围内,折射率随着波长的增加单调减小;随着溅射功率的增大,同一波长处折射率先减小后增大,表明薄膜折射率与溅射功率、薄膜结构及致密程度相关。

实验测得不同溅射功率下制备的氧化锌薄膜对不同波长光的消光系数均为0,说明氧化锌薄膜对可见光的透光性很好。

### 2.2.2 薄膜透过率分析

透过率是表示光线透过介质的能力,也是表征氧化锌薄膜光学性能的重要指标。图3显示了不同溅射功率下制备的氧化锌薄膜的透过率。

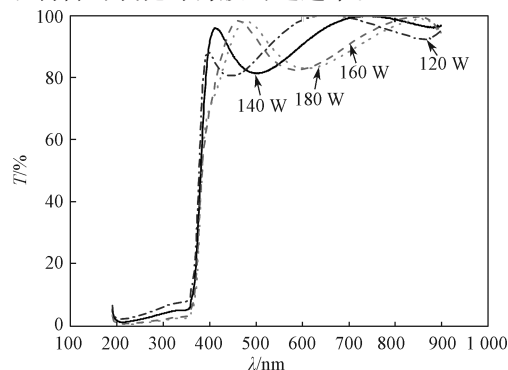


图3 石英衬底氧化锌薄膜透过率图谱

Fig. 3  $T$ -spectrum of transmittance of ZnO films on quartz substrate



由图3可以看出,随着溅射功率的增加,透过率变化明显,在紫外光区(190~368 nm)薄膜样品透过率很低,具有很好的紫外光吸收特性,随着溅射功率的增加(120~180 W),透过率逐渐减小,当波长为300 nm时,透过率分别为5.816%,4.053%,2.214%,1.850%;在可见光区(380~780 nm),薄膜样品透过率很高,平均透过率均大于90%。这是因为薄膜样品的透过率与薄膜材料的禁带宽有关,室温下氧化锌禁带宽约为3.37 eV,对波长小于368 nm的紫外光有强吸收作用,而对可见光则有很高的透过率,随着溅射功率的增加,薄膜厚度增大,导致透过率降低;另一方面,过大的功率,薄膜粒度尺寸增大,表面粗糙度增加,薄膜对可见光的反射和散射能力增强,也将导致透过率发生改变。总体来看,薄膜样品在紫外光区透过率很低,可见光区平均透过率均大于90%,在波长368 nm附近出现陡峭的吸收边,吸收系数和光学带隙随着溅射功率的增加,都有不同程度的改变。

课题组还比较了载玻片衬底与石英衬底氧化锌薄膜透过率的差异(见图3和图4),发现相同条件下制备的薄膜,载玻片衬底的薄膜紫外光区(190~290 nm)透过率远大于石英衬底薄膜的透过率,如图4所示,说明衬底材料与薄膜透过率严重相关,选择合适的衬底材料非常关键。

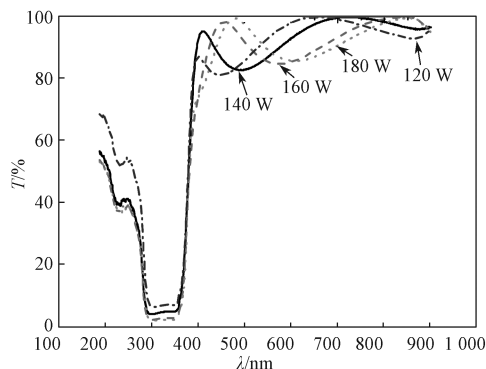


图4 载玻片衬底氧化锌薄膜透过率图谱

Fig. 4  $T$ -spectrum of the transmittance of ZnO films on the slide substrate

### 2.2.3 X射线荧光光谱分析

X射线荧光光谱分析是在X射线激发下,被测元素原子的内层电子发生能级跃迁而发出次级X射线(X荧光),把混合的X射线按能量或波长分开,分别测量不同能量或波长的X射线的强度,以进行定性和定量分析的一种方法。图5为溅射功率160 W时制备的氧化锌薄膜的能量色散型X射线荧光(ED-XRF)光谱,测试条件如下:仪器,能量色散型X射线荧光光谱仪;氛围,大气;准直器,  $\phi 10$  mm。其他功率

下薄膜的荧光光谱图类似,均在能量为8.64 keV和9.58 keV处出现次级X荧光峰  $ZnK_{\alpha}$  和  $ZnK_{\beta}$ ,且随着溅射功率增加,峰值增大。

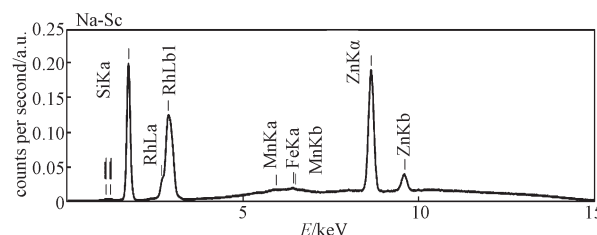


图5 氧化锌薄膜 ED-XRF 图谱

Fig. 5 ED-XRF spectra of ZnO films

表2为不同溅射功率下制备的氧化锌薄膜 ED-XRF 定量分析 Zn 元素的质量分数和能量为8.64 keV处  $ZnK_{\alpha}$  线峰值强度的实验数据。

表2 氧化锌薄膜 ED-XRF 定量分析实验数据

Table 2 Quantitative analysis of experimental data of ZnO films by ED-XRF

功率/W	$\omega(\text{Zn})/\%$	$\omega$ 增幅/ %	$ZnK_{\alpha}$ 强度 / (cps· $\mu\text{A}^{-1}$ )	强度增幅 / (cps· $\mu\text{A}^{-1}$ )
120	1.666		30.033 9	
140	2.093	0.427	33.787 8	3.753 9
160	2.700	0.607	39.958 9	6.171 1
180	2.990	0.290	42.557 0	2.598 1

由图5和表2可知,随着溅射功率的增加,  $\omega(\text{Zn})$  由1.666%增加到2.990%,8.64 keV处  $ZnK_{\alpha}$  线强度由30.033 9 cps/ $\mu\text{A}$ 增加到42.5570 cps/ $\mu\text{A}$ ,相邻溅射功率之间(范围120~160 W),Zn元素含量增幅和  $ZnK_{\alpha}$  线强度增幅逐渐增大;但是,当溅射功率增加到180 W时,相邻功率间的含量增幅和强度增幅反而减小,这可能与锌元素的含量、薄膜颗粒大小和薄膜表面粗糙度有关。

## 3 结论

室温下,以ZnO陶瓷靶材为溅射源,利用射频磁控溅射技术在石英衬底上沉积氧化锌薄膜,在其他工艺条件相同的情况下,研究了溅射功率(120~180 W,功率步长为20 W)对氧化锌薄膜微结构、结晶质量及光学性能的影响。结果表明:氧化锌薄膜在34.3°附近出现(002)面衍射峰,呈现c轴择优生长,为纤锌矿结构,随着溅射功率的增加,薄膜结晶质量和光学性能变好,当功率增至160 W时,达到最优;继续增大功率,晶粒尺寸增大,晶格缺陷增多,粗糙度增大,薄膜结晶质量反而变差。实验结果显示,在450~850 nm范围内,随着波长增加,氧化锌薄膜的折射率呈现单调减小趋势,消光系数均为0;随着

溅射功率的增加,同一波长处,薄膜折射率先减小后增大,紫外光区透过率减小,可见光区平均透过率大于 90%,次级 X 荧光峰  $\text{ZnK}_\alpha$  和  $\text{ZnK}_\beta$  峰值增大。因此,选择合适的衬底和溅射功率对制备光学性能优良的高质量薄膜材料至关重要。

#### 参考文献:

- [1] 叶希韵. 紫外线致皮肤光老化研究进展[J]. 生物学教学, 2015, 40(11): 2-5.  
YE Xiyun. Research Progress of Skin Photoaging Induced by Ultraviolet[J]. Biology Teaching, 2015, 40(11): 2-5.
- [2] 路婷婷, 陈亚泽, 卢涛, 等. 紫外线的皮肤损伤机制及具有紫外线防护作用的天然产物的研究进展[J]. 中国药理学通报, 2012, 28(12): 1655-1659.  
LU Tingting, CHEN Yaze, LU Tao, et al. Mechanism of UV Damage and the Protective Effect of Natral Products Against UV Damage[J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2012, 28(12): 1655-1659.
- [3] 曾庆广, 左志高, 解帮杰, 等. 高原地区对紫外线晶状体损伤的防护研究[J]. 武警医学, 2005, 16(9): 678-679.  
ZENG Qingguang, ZUO Zhigao, XIE Bangjie, et al. Protective Study on UV Lens Damage in Plateau Area[J]. Medical Journal of the Chinese People's Armed Police Forces, 2005, 16(9): 678-679.
- [4] 张欢. 从文物保护角度探讨博物馆照明问题[J]. 照明工程学报, 2012, 23(6): 64-67.  
ZHANG Huan. Discussion on Museum Illumination Based on Conservation of Culture Heritage[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2012, 23(6): 64-67.
- [5] 何满堂, 周心怡.  $\text{TiO}_2$  涂层棉织物的制备及其防紫外线性能研究[J]. 棉纺织技术, 2019, 47(12): 74-77.  
HE Mantang, ZHOU Xinyi. Preparation of  $\text{TiO}_2$  Coating Cotton Fabric and Its UV Protection Property[J]. Cotton Textile Technology, 2019, 47(12): 74-77.
- [6] 杨豆豆, 孟家光, 白亚琴, 等. 纳米  $\text{TiO}_2$  溶胶的制备及其性能[J]. 印染, 2019, 45(20): 20-24.  
YANG Doudou, MENG Jiaguang, BAI Yaqin, et al. Preparation and Properties of Nano- $\text{TiO}_2$  Sol[J]. Dyeing & Finishing, 2019, 45(20): 20-24.
- [7] 张宇.  $\text{ZnO}/\text{TiO}_2$  复合紫外滤光薄膜提高杂化钙钛矿材料紫外光稳定性的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2018.  
ZHANG Yu. Enhanced Ultraviolet Light Stability of Hybrid Perovskite Materials with  $\text{ZnO}/\text{TiO}_2$  Composite Film[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2018.
- [8] 吕英帅. 纳米二氧化铈复合粉体的制备及屏蔽紫外线性能研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2011.  
LÜ Yingshuai. Preparation of  $\text{CeO}_2$  Composite Oxides and Their UV-Shielding Properties[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2011.
- [9] 郑天亮, 何宗虎. 防紫外线透明涂料的试验研究[J]. 表面技术, 2002, 31(6): 15-16.  
ZHENG Tianliang, HE Zonghu. Experimental Research of UV-Absorbing Clear Coating[J]. Surface Technology, 2002, 31(6): 15-16.
- [10] 张爱华, 李梅, 柳召刚, 等. 溶胶-凝胶法制备  $\text{CeO}_2$  防紫外膜[J]. 功能材料, 2012, 43(8): 988-991, 996.  
ZHANG Aihua, LI Mei, LIU Zhaogang, et al. The Preparation of  $\text{CeO}_2$  UV-Shielding Film by Sol-Gel Process[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(8): 988-991, 996.
- [11] 侯大寅, 李良飞, 魏取福. PET 基纳米  $\text{ZnO}$  溅射成膜及其紫外线通透性能[J]. 纺织学报, 2007, 28(2): 48-51.  
HOU Dayin, LI Liangfei, WEI Qufu. Sputter Coated Nano- $\text{ZnO}$  Film on PET Substrate and Its Ultraviolet Radiation Transmittance[J]. Journal of Textile Research, 2007, 28(2): 48-51.
- [12] 尉乔南, 李若平, 朱治广, 等. 高含量高透明度  $\text{PS}/\text{TiO}_2$  纳米复合材料膜的紫外防护性能研究[J]. 中国塑料, 2015, 29(3): 63-69.  
YU Qiaonan, LI Ruoping, ZHU Zhiguang, et al. UV-Protective Properties of Transparent Polystyrene/ $\text{TiO}_2$  Nanocomposite Films with High Particle Loadings[J]. China Plastics, 2015, 29(3): 63-69.
- [13] 张军. 多功能  $\text{ZnO}$  薄膜的制备与性能研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.  
ZHANG Jun. Fabrication and Properties of Functional  $\text{ZnO}$  Thin Films[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.
- [14] 彭福川.  $\text{ZnO}$  薄膜的制备及其光电学性质的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2011.  
PENG Fuchuan. Preparation and Optoelectronic Properties of  $\text{ZnO}$  Films[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2011.
- [15] 任光远. 射频磁控溅射  $\text{ZnO}$  薄膜及其性能的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.  
REN Guangyuan. Growth of  $\text{ZnO}$  Thin Films by RF Magnetron Sputtering on and Study Its Properties[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [16] 姚婷婷, 杨勇, 李刚, 等. 直流磁控溅射功率对溅射生长 GZO 薄膜光电性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2017, 35(5): 747-751, 814.  
YAO Tingting, YANG Yong, LI Gang, et al. Influence of Sputtering Power on Optical and Electrical Properties of GZO Films Deposited by DC Magnetron Sputtering[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2017,

- 35(5): 747-751, 814.
- [17] 张 腾, 钟志有, 汪 浩. 溅射功率对钛镓共掺杂氧化锌透明导电薄膜光电性能的影响[J]. 人工晶体学报, 2013, 42(7): 1353-1359.
- ZHANG Teng, ZHONG Zhiyou, WANG Hao. Influence of Sputtering Power on the Optical and Electrical Properties of Ti and Ga Codoped ZnO Thin Films[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2013, 42(7): 1353-1359.
- [18] 钟志有, 兰 椿, 汪 浩. 掺钛氧化锌半导体薄膜制备及其光学性质的研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 51-57.
- ZHONG Zhiyou, LAN Chun, WANG Hao. Preparation and Optical Properties of  $\text{TiO}_2$ -Doped Zinc Oxide Semiconductor Thin Films[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2014, 33(1): 51-57.
- [19] 张化福, 刘汉法, 袁长坤, 等. 铝锆共掺杂氧化锌透明导电薄膜的低温制备及特性研究[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(3): 306-310.
- ZHANG Huaifu, LIU Hanfa, YUAN Changkun, et al. Low Temperature Growth and Properties of Al-Zr Co-Doped ZnO Films[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30(3): 306-310.
- [20] 徐 玮, 于 军, 王晓晶, 等. 磁控溅射中工艺参数对 ZnO: Al 薄膜性能的影响[J]. 半导体光电, 2010, 31(2): 256-259, 262.
- XU Wei, YU Jun, WANG Xiaojing, et al. Effects of Process Parameters on Properties of ZnO: Al Thin Films Fabricated with Magnetron Sputtering[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2010, 31(2): 256-259, 262.
- [21] 刘亚强, 陈青清, 李 朋. 磁控溅射法制备铝掺杂氧化锌薄膜研究进展[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2017, 30(4): 667-671.
- LIU Yaqiang, CHEN Qingqing, LI Peng. Research Progress of Al-Doped Zinc Oxide Thin Films by Magnetron Sputtering Method[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2017, 30(4): 667-671.
- [22] 雷 蕾, 王 超, 杨 帆. 溅射功率对玉米蛋白膜基底上制备氧化锌 (ZnO) 薄膜性质的影响[J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(1): 77-81.
- LEI Lei, WANG Chao, YANG Fan. Effects of Sputtering Power on Properties of Zinc Oxide (ZnO) Thin Films Prepared on Zein Film Substrate[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2019, 36(1): 77-81.
- [23] 陈首部, 陆 轴, 兰 椿. 氧化锌薄膜的微观结构及其结晶性能研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 67-72.
- CHEN Shoubu, LU Zhou, LAN Chun. Microstructure and Crystalline Characteristics of Zinc Oxide Thin Films[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2017, 36(4): 67-72.
- [24] 范丽琴, 裴 瑜, 林丽梅, 等. 溅射功率对掺铝氧化锌薄膜光电学性质的影响[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2008, 24(5): 44-48.
- FAN Liqin, PEI Yu, LIN Limei, et al. Influence of Sputtering Power on the Optical and Electrical Properties of ZnO: Al Films[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2008, 24(5): 44-48.
- [25] 范丽琴. 衬底温度对磁控溅射制备掺铝氧化锌薄膜的结构和光电性能的影响[J]. 物理实验, 2014, 34(6): 1-6.
- FAN Liqin. Effects of Substrate Temperature on Structure and Photoelectric Properties of Al Doped ZnO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. Physics Experimentation, 2014, 34(6): 1-6.

(责任编辑: 申 剑)