

# 钼掺杂氧化锌薄膜的制备及其性能研究

顾锦华<sup>1</sup> 陆 轴<sup>2</sup> 康 淮<sup>2</sup>

(1 中南民族大学 实验教学与实验室管理中心, 武汉 430074; 2 中南民族大学 电子信息工程学院, 武汉 430074)  
**摘 要** 采用掺氧化钼( $\text{MoO}_3$ )的氧化锌( $\text{ZnO}$ )陶瓷靶作为溅射源材料,利用磁控溅射工艺制备了钼掺杂氧化锌(MZO)透明导电氧化物(TCO)薄膜,通过X-射线衍射仪(XRD)、分光光度计和四探针仪进行了测试表征,研究了溅射功率对MZO薄膜结构、光学和电学性能的影响.结果表明:所沉积的MZO薄膜样品均为六角纤锌矿结构,并具有(002)择优取向生长特性,溅射功率对薄膜结构和光电性能具有不同程度的影响.当溅射功率为120 W时,MZO薄膜的可见光区平均透过率最高、电阻率最低、性能指数最大,具有最好的光电综合性能.  
**关键词** 掺杂氧化锌;薄膜;结构;光电性能  
中图分类号 TM914 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2017)02-0066-07

## Preparation and Properties of Mo-Doped ZnO Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering

Gu Jinhua<sup>1</sup>, Lu Zhou<sup>2</sup>, Kang Huai<sup>2</sup>

(1 Center of Experiment Teaching, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China; 2 College of Electronic Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

**Abstract** The transparent conductive thin films of Mo-doped ZnO (MZO) were prepared by magnetron sputtering technique using a sintered ceramic target with a mixture of  $\text{MoO}_3$  and ZnO. The influence of sputtering power on the structural, electrical and optical properties of MZO thin films was analyzed by X-ray diffraction (XRD), four-point probe and optical transmission spectroscopy. The results indicate that all the deposited thin films have a hexagonal wurtzite structure and a (002) preferred orientation with the c-axis perpendicular to the substrate. The structural, optical and electrical properties of the thin films are closely related to the sputtering power. The MZO sample prepared at sputtering power of 120 W exhibits the best optoelectrical performance, with the highest average optical transmittance in the visible range, the lowest electrical resistivity and the maximum figure of merit.

**Keywords** doped zinc oxide; thin film; structure; optoelectrical properties

透明导电氧化物(TCO)薄膜具有独特的光学和电学性能,已经广泛应用于发光二极管<sup>[1-4]</sup>、太阳能电池<sup>[5-8]</sup>、液晶显示器<sup>[9-12]</sup>、薄膜晶体管<sup>[13,14]</sup>和气体传感器<sup>[15-17]</sup>等光电子领域中,引起了人们越来越多的关注.氧化锌( $\text{ZnO}$ )是II-VI族n型半导体材料,在室温条件下光学能隙较宽,对可见光的透明性较好.纯 $\text{ZnO}$ 薄膜的电阻率可达 $4.5 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,但是当温度高于150℃后薄膜性能不稳定,从而限制了其应用范围.据报道,在 $\text{ZnO}$ 中掺入B、Al、F等杂质后,薄膜的热稳定性能显著提升.目前, $\text{ZnO}$ 基透

明导电薄膜的掺杂元素主要包括B、Al、Ga、In、Y等第III族元素以及Si、Ge、Sn、Ti、Zr等第IV族元素,此外也可以掺 $\text{F}^-$ 替代 $\text{O}^{2-}$ ,其中,Al掺杂 $\text{ZnO}$ 透明导电薄膜得到了广泛而深入的研究,并被应用于太阳能电池和平板显示器等光电器件中.近年来,虽然人们对掺杂 $\text{ZnO}$ 透明导电薄膜进行了大量研究,但是关于高价态元素掺杂 $\text{ZnO}$ 基透明导电薄膜的研究很少.据文献[18,19]报道,在 $\text{In}_2\text{O}_3$ 中掺杂Mo、W等第VI族元素后,薄膜的光电性能明显提升.孟

收稿日期 2017-01-21

作者简介 顾锦华(1972-),女,讲师,研究方向:光电子材料及其器件,E-mail: jinhwagu@163.com

基金项目 湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB418);中南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CZP17002)

扬等人<sup>[18]</sup>采用反应蒸发法制备了高价态 Mo 掺杂  $\text{In}_2\text{O}_3$  透明导电薄膜,其载流子浓度为  $3.15 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,而载流子迁移率高达  $130 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 、电阻率低至  $2.11 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。这是因为价态差增大使得一个掺杂原子可以提供更多的自由载流子,能够实现低掺杂浓度情况下的高迁移率和低电阻率,因此 Mo 离子和 In 离子的高价态差是低掺杂获得薄膜高迁移率的主要原因。另外,李喜峰等人<sup>[19]</sup>也制备了性能良好的高价态 W 掺杂  $\text{In}_2\text{O}_3$  透明导电薄膜。当前,高价态掺杂方法受到人们的广泛关注,它被认为制备 TCO 薄膜一种极具潜力的新方法。

对于掺杂 ZnO 透明导电薄膜,其主要制备方法包括直流溅射法<sup>[20,21]</sup>、射频溅射法<sup>[22,23]</sup>、喷雾热分解法<sup>[24]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[25-27]</sup>、脉冲激光沉积法<sup>[28,29]</sup>、化学气相沉积法<sup>[30]</sup>等,其中磁控溅射技术具有设备简单、可控性好、沉积速率高等特点,所制备的薄膜不仅均匀致密、表面平整、附着牢固,而且 c 轴取向性好、可见光区透过率高,因此它是目前制备 ZnO 掺杂 TCO 薄膜的最常用方法之一。本文以氧化钼 ( $\text{MoO}_3$ ) 掺杂的 ZnO 陶瓷靶作为溅射源材料,采用磁控溅射工艺在普通玻璃基片上制备钼掺杂 ZnO (MZO) TCO 薄膜,通过 X-射线衍射仪 (XRD)、四探针仪和分光光度计测试表征,研究了溅射功率对 MZO 薄膜结构、电学和光学性能的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 主要材料与仪器

玻璃基片(珠海凯为电子元器件有限公司),切割成大小为  $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$  的方块。 $\text{MoO}_3$  掺杂的 ZnO 陶瓷靶材(其中  $\text{MoO}_3$  的质量分数为 2%,合肥科晶材料技术有限公司),实验用水为去离子水,实验所用试剂丙酮和乙醇均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

高真空磁控溅射与离子束溅射复合镀膜系统 (MS-560C 型,沈阳科友真空技术有限公司),X-射线衍射仪 (D8 ADVANCE 型,德国 Bruker 公司),双光束紫外-可见分光光度计 (TU-1901 型,北京普析通用仪器公司),数字式四探针仪 (SZ-82 型,苏州华仪电讯科技有限公司)。

### 1.2 玻璃基片的处理

为了制备性能良好的 MZO 薄膜样品,实验时按照下列步骤对玻璃基片进行处理:(1)采用丙酮擦拭基片表面,并用清水冲洗干净;(2)依次使用丙

酮、无水乙醇和去离子水对基片进行超声清洗  $10 \sim 15 \text{ min}$ ,以去除基片表面的微粒和有机污染物;(3)在无水乙醇中煮沸,吹干待用。

### 1.3 薄膜样品的制备

利用 MS-560C 型高真空磁控溅射与离子束溅射复合镀膜系统,采用射频磁控溅射工艺在经过处理的玻璃基片上制备 MZO 薄膜样品,溅射源材料为 ZnO:  $\text{MoO}_3$  (98%:2%) 陶瓷靶,其直径为  $50 \text{ mm}$ 、厚度为  $4 \text{ mm}$ 。在制备 MZO 薄膜样品之前,将溅射系统的真空度抽至  $3.0 \times 10^{-4} \text{ Pa}$  后通入 99.99% 的高纯氩气作为工作气体,并先采用氩等离子体对玻璃基片表面清洗  $5 \text{ min}$ ,然后再预溅射  $10 \text{ min}$  以清洁靶材表面和稳定系统,提高沉积 MZO 薄膜样品的质量。实验时,靶材与基片之间的距离为  $75 \text{ mm}$ ,生长温度为  $300 \text{ K}$ ,工作压强为  $2.5 \text{ Pa}$ ,溅射功率为  $100 \sim 140 \text{ W}$ ,沉积时间为  $15 \sim 20 \text{ min}$ 。不同溅射功率下制备 MZO 薄膜样品的工艺参数如表 1 所示。

表 1 MZO 薄膜样品的制备工艺参数  
Tab. 1 The deposition parameters of MZO samples

工艺参数	实验数值
本底真空/Pa	$3.0 \times 10^{-4}$
靶基距离/mm	75
生长温度/K	300
工作压强/Pa	2.5
沉积时间/min	15 ~ 20
溅射功率/W	100 ~ 140

### 1.4 测试与表征

MZO 薄膜样品的测试和表征均在室温和大气条件下完成。利用 X-射线衍射仪对薄膜样品进行晶体结构测试与分析,测试时使用铜靶  $K_\alpha$  射线源,其 X-射线波长 ( $\lambda$ ) 为  $1.54056 \text{ \AA}$ ,采用  $\theta$ - $2\theta$  连续扫描方式,扫描范围为  $10^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ ,扫描步长为  $0.0164^\circ$ ,扫描速度为  $10^\circ/\text{min}$ ,工作电压为  $40 \text{ kV}$ ,工作电流为  $40 \text{ mA}$ 。薄膜样品的透过率、反射率和吸光度通过双光束紫外-可见分光光度计测量,其测试波长范围为  $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$ ,扫描波长间隔为  $1 \text{ nm}$ ,采用空气作为参比。薄膜样品的电学性能利用数字式四探针仪表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构性质

图 1 为不同溅射功率时所制备 MZO 薄膜样品的 XRD 图谱,其中 (a)、(b)、(c) 分别对应于溅射功率  $100$ 、 $120$  和  $140 \text{ W}$  的 MZO 薄膜样品。从图中可以看出,在  $2\theta$  为  $10^\circ \sim 80^\circ$  的扫描范围之内,所有 MZO

薄膜样品都只存在一个强度较大的衍射峰,其 $2\theta$ 位于 $33^\circ \sim 34^\circ$ 之间,它对应于ZnO的(002)特征谱线,该结果与标准ZnO(JCPDS No. 36-1451)的峰位数据相吻合<sup>[31,32]</sup>,另外在图1中没有观察到金属Zn、Mo及其化合物的特征衍射峰,其结果表明:Mo替代

了Zn的位置,或者存在于六角晶格之中,或者分布在晶间界的区域,在XRD检测范围内没有生成其它新的物相,所有MZO薄膜样品均为单相的六角纤锌矿型ZnO结构,并且沿(002)方向具有择优取向生长特性。

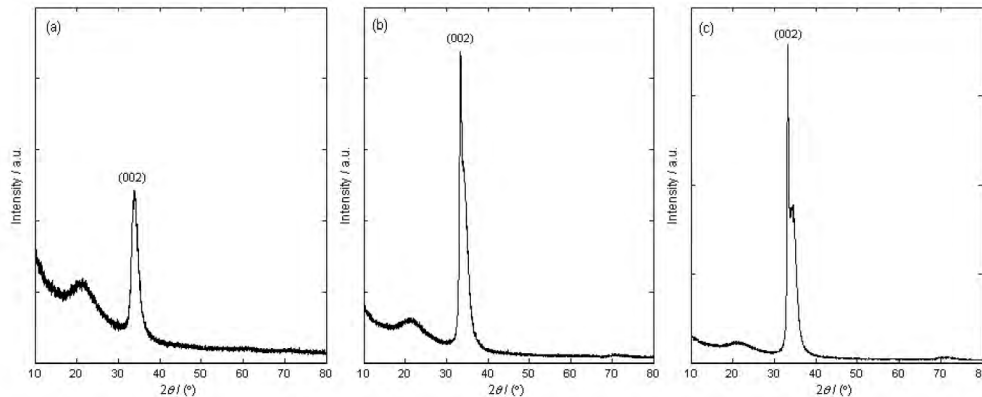


图1 MZO薄膜样品的XRD图谱

Fig. 1 The XRD patterns of MZO samples

表2总结了不同溅射功率时所制备MZO薄膜样品(002)衍射峰的半高宽( $\beta_{1/2}$ )数据,由表2可知,当溅射功率为100、120和140W时,MZO薄膜样品所对应的 $\beta_{1/2}$ 值分别为 $0.823^\circ$ 、 $0.801^\circ$ 和 $0.695^\circ$ ,半高宽 $\beta_{1/2}$ 随溅射功率增加而减小,呈现出单调下降的变化趋势;同时由于半高宽 $\beta_{1/2}$ 的变化幅度很小( $0.128^\circ$ ),其结果表明溅射功率对MZO薄膜的 $c$ 轴择优取向具有一定的影响,但其影响程度较小.不同溅射功率时MZO薄膜样品的平均晶粒尺寸( $D_{av}$ )可以根据谢乐公式<sup>[33]</sup>计算获得:

$$D_{av} = \frac{k\lambda}{\beta_{1/2} \cos\theta} \quad (1)$$

(1)式中 $\beta_{1/2}$ 为最大特征峰(002)晶面的半高宽, $\theta$ 为衍射角, $\lambda$ 为X-射线波长( $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ), $k$ 为常数,本文取 $k = 0.89$ 进行计算.(002)晶面的 $2\theta$ 变化反映了晶格应力对晶面间距( $d$ )的影响,根据Bragg公式<sup>[34]</sup>:

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \quad (2)$$

由(2)式可见,当X-射线波长 $\lambda$ 固定不变时,在晶体的特定方向上, $\theta$ 的改变能够反映出晶面间距 $d$ 值的变化.由于ZnO为六角纤锌矿结构,一般情况下( $hkl$ )晶面的晶格常数( $c$ )通过方程(3)确定<sup>[35]</sup>:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3)$$

根据公式(3),对于ZnO的(002)晶面, $h = k = 0$ , $l = 2$ ,其晶格常数 $c$ 与晶面间距 $d$ 之间的关系为 $c$

$= 2d$ .表2给出了不同溅射功率时MZO薄膜样品(002)衍射峰所对应的平均晶粒尺寸 $D_{av}$ 、晶面间距 $d$ 和晶格常数 $c$ ,从表中看出,当溅射功率从100W增加到140W时,MZO样品的平均晶粒尺寸 $D_{av}$ 稍有增大,其变化幅度为1.8nm,可见溅射功率对MZO薄膜平均晶粒尺寸 $D_{av}$ 的影响较小.另外,由表2可知,MZO薄膜样品的晶格常数 $c$ 与晶面间距 $d$ 分别为 $0.528 \sim 0.538 \text{ nm}$ 和 $0.264 \sim 0.269 \text{ nm}$ ,其结果都与标准ZnO(JCPDS No. 36-1451)的数值( $c_0 = 0.5206 \text{ nm}$ , $d_0 = 0.2603 \text{ nm}$ )相符<sup>[36]</sup>,这说明钼掺杂后并没有改变ZnO薄膜的晶体结构。

表2 MZO薄膜样品的XRD结果

Tab. 2 The XRD results of MZO samples

功率/W	$2\beta_{1/2}/(^\circ)$	$D_{av}/\text{nm}$	$d/\text{nm}$	$c/\text{nm}$
100	0.823	10.1	0.264	0.528
120	0.801	10.4	0.268	0.536
140	0.695	11.9	0.269	0.538

## 2.2 光学性质

图2为不同溅射功率时所制备MZO薄膜样品的透射率( $T$ )曲线,从图中看出,所有的透射率曲线都显示了既光滑又清晰的干涉条纹,这种透射率曲线的多级振荡是由于薄膜上表面和下表面(即薄膜与基片之间的界面)反射光之间的干涉所形成的.良好的振荡特性表明了所制备的MZO薄膜样品具有平整的表面、均匀的厚度和良好的光学质量.对于MZO薄膜的透射率光谱,可以划分为3个区域:强吸收区、中等吸收区和透明振荡区.由图2可以看出,MZO薄膜样品的强吸收区为 $300 \sim 370 \text{ nm}$ 、中等

吸收区为 370 ~ 400 nm、透明振荡区为 400 ~ 800 nm. 在透明振荡区域的波长 ( $\lambda$ ) 范围内, MZO 薄膜基本上是透明的; 随着波长  $\lambda$  的减小, MZO 薄膜进入中等吸收区, 这时薄膜具有较弱的吸收能力; 当波长  $\lambda$  继续减小时, MZO 薄膜则进入强吸收区域. 对于溅射功率为 100、120 和 140 W, 当波长  $\lambda$  分别为 375、380 和 385 nm 时 ZTO 薄膜的透过率出现急剧下降, 对应的吸收能力显著增强, 这表明 MZO 薄膜样品的光学能隙就在此附近. 由此可见, 当溅射功率从 100 W 增加至 140 W 时, 所制备 MZO 薄膜的透过率曲线朝长波长方向稍有移动(红移), 对应的光学能隙有所减小. 图 3 为不同溅射功率时所制备 MZO 薄膜样品的反射率( $R$ ) 曲线, 与透过率类似,

反射率曲线也具有多级振荡的特性, 说明了 MZO 薄膜样品的质量良好. 表 3 列出了不同溅射功率时 MZO 薄膜样品的光学参数, 其中  $T_{av}$  表示沉积在玻璃基片上 MZO 薄膜的可见光区平均透过率(未扣除玻璃基片). 可以看出, 溅射功率对 MZO 薄膜的透过率和反射率具有明显的影响. 当溅射功率从 100 W 增加到 120 W 时, MZO 薄膜的  $T_{av}$  值明显升高; 而当溅射功率进一步增加时, MZO 薄膜的  $T_{av}$  值反而减小. 可见, 随着溅射功率的增加, MZO 薄膜平均透过率  $T_{av}$  呈现出先增大后减小的变化趋势, 当溅射功率为 120 W 时, 沉积在玻璃基片上 MZO 薄膜具有最大的  $T_{av}$  值为 76.2%, 当扣除玻璃基片的影响后, MZO 薄膜的  $T_{av}$  值可达 85.1%.

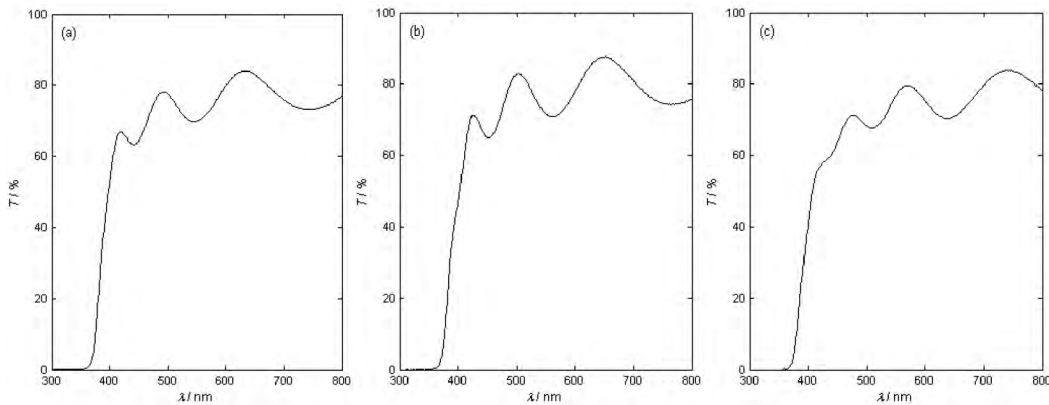


图 2 MZO 薄膜样品的透过率曲线

Fig. 2 The transmittance curves of MZO samples

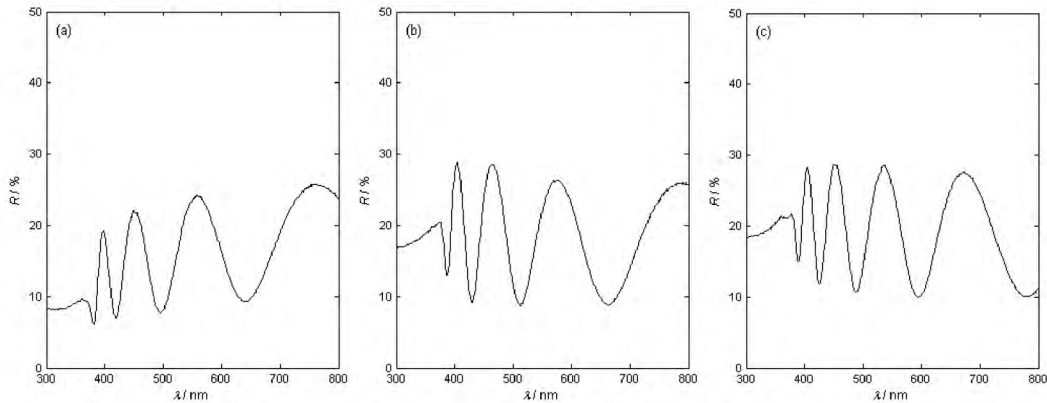


图 3 MZO 薄膜样品的反射率曲线

Fig. 3 The reflectance curves of MZO samples

表 3 MZO 薄膜样品的光学性质

Tab. 3 The optical properties of MZO samples

功率/W	$T_{av}$ /%	$T_{max}$ /%	$T_{min}$ /%	$R_{max}$ /%	$R_{min}$ /%	$\lambda_g$ /nm	$E_g$ /eV
100	74.3	84.3	52.2	25.8	7.2	386.5	3.208
120	76.2	87.8	47.3	28.5	8.5	387.1	3.203
140	73.1	83.9	42.1	28.7	9.6	388.3	3.194

图 4 为不同溅射功率时所制备 MZO 薄膜样品的吸光度( $A$ ) 曲线, 从图中看到, 对于所有的 MZO

薄膜样品,其吸光度  $A$  随入射光波长  $\lambda$  的变化趋势是类似的.在强吸收区  $A$  值较大,吸收能力较强;在中等吸收区  $A$  值明显减小,对应的吸收能力大大降低;而在透明振荡区  $A$  值很小,说明吸收可以忽略不计.另外,在强吸收区域,所有 MZO 薄膜样品吸光度  $A$  随波长  $\lambda$  的变化关系可以拟合成一条直线(见图4),该直线与横坐标的交点波长采用  $\lambda_g$  表示.当溅射功率为 100、120 和 140 W, MZO 薄膜对应的  $\lambda_g$  值分别为 386.5、387.1 和 388.3 nm. 根据文献[37]半导体薄膜的直接光学能隙( $E_g$ )可以通过

$\lambda_g$  值计算获得,它们之间的关系如下:

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g}, \quad (4)$$

(4) 式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光在真空中的传播速度.不同溅射功率时 MZO 薄膜样品的光学能隙  $E_g$  值如表3所示,当溅射功率从 100 W 增加到 140 W 时, MZO 薄膜  $E_g$  值的变化范围为 3.194 ~ 3.208 eV. 溅射功率增加时, MZO 薄膜样品的直接光学能隙略有减小,但其变化幅度很小.

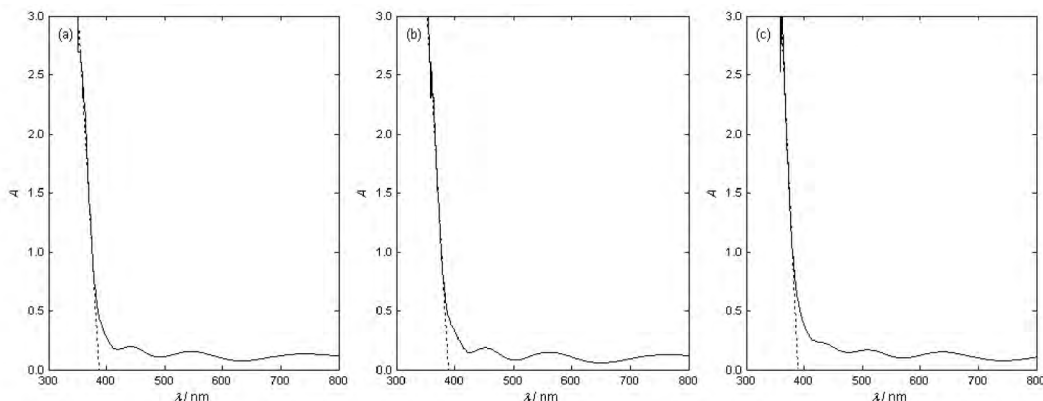


图4 MZO 薄膜样品的吸光度曲线

Fig.4 The absorbance curves of MZO samples

### 2.3 光电综合性能

不同溅射功率时所制备 MZO 薄膜样品的电阻率( $\rho$ )如图5所示,由图可知,随着溅射功率的增加, MZO 薄膜样品的电阻率  $\rho$  呈现出先减小后增大的变化趋势,而对应的可见光区平均透过率  $T_{av}$  则显示出先升高后降低的变化趋势.当溅射功率为 120 W 时, MZO 薄膜样品具有最低的电阻率  $\rho$  ( $5.08 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ ) 和最高的可见光区平均透过率  $T_{av}$ . 为了评价 MZO 半导体薄膜的光电综合性能,本文采用性能指数( $FOM$ )进行定量表征,  $FOM$  定义为<sup>[38,39]</sup>:

$$FOM = -\frac{1}{\rho \ln(T_{av})}, \quad (5)$$

(5) 式中  $\rho$  为 MZO 薄膜的电阻率,  $T_{av}$  为 MZO 薄膜在可见光区的平均透过率.不同溅射功率所制备 MZO 薄膜样品的性能指数  $FOM$  如图6所示,当溅射功率从 100 W 增加到 120 W 时,  $FOM$  的值迅速增大,但当溅射功率进一步增加时,  $FOM$  的值则明显减小,由此可见,当溅射功率为 120 W 时 MZO 薄膜的性能指数  $FOM$  最大 ( $103.23 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ),说明采用此溅射功率所制备的 MZO 半导体薄膜具有最好的光电综合性能.

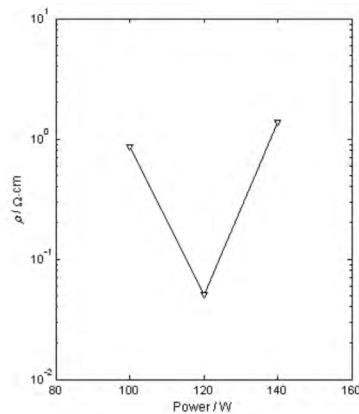


图5 MZO 薄膜样品的电阻率

Fig.5 The electrical resistivity of MZO samples

## 3 结语

以普通玻璃作为基片材料,采用  $\text{MoO}_3$  掺杂的 ZnO 陶瓷靶为溅射源,利用磁控溅射方法制备了 MZO 透明导电薄膜样品,通过 XRD、分光光度计和四探针仪测试进行了表征,研究了溅射功率对 MZO 薄膜样品结构、光学、电学和光电综合性能的影响.研究表明:所有的 MZO 薄膜样品均为六角纤锌矿结构,并呈现出  $c$  轴择优取向生长的特点,

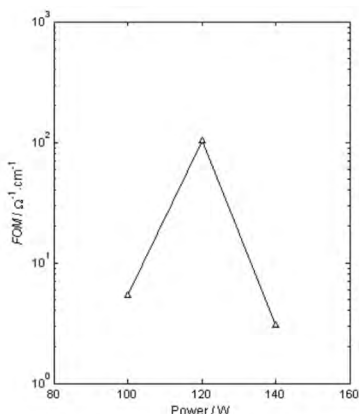


图 6 MZO 薄膜样品的性能指数

Fig. 6 The figure of merit of MZO samples

溅射功率对 MZO 薄膜结构和光电性能具有不同程度的影响。当溅射功率为 120 W 时, MZO 薄膜样品具有最好的光电综合性能, 其直接光学能隙为 3.203 eV、可见光区平均透过率为 85.1%、电阻率为  $5.08 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、性能指数为  $103.23 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Burroughes J H, Bradley D D C, Brown A R, et al. Light-emitting diodes based on conjugated polymers [J]. *Nature*, 1990, 347 (6293): 539-541.
- [2] Zhong Z Y, Jiang Y D. Surface treatments of indium-tin oxide substrates for polymer electroluminescent devices [J]. *Phys Status Solidi A*, 2006, 203 (15): 3882-3892.
- [3] 陈首部, 韦世良, 何翔, 等. 改性方法对氧化铟锡衬底表面形貌和化学组分的影响 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 28 (4): 43-46.
- [4] You Z Z, Hua G J, Lou S F. Optoelectrical characteristics of organic light-emitting devices fabricated with different cathodes [J]. *Int J Electron*, 2011, 98 (1): 129-135.
- [5] Kim J Y, Lee K, Coates N E, et al. Tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing [J]. *Science*, 2007, 317 (5835): 222-225.
- [6] Tang C W. Two-layer organic photovoltaic cell [J]. *Appl Phys Lett*, 1986, 48 (2): 183-185.
- [7] Sio A D, Chakanga K, Sergeev O, et al. ITO-free inverted polymer solar cells with ZnO: Al cathodes and stable top anodes [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2012, 98 (1): 52-56.
- [8] 肖健平, 何青, 陈亦鲜, 等. CIGS 薄膜材料研究进展 [J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2008, 34 (1): 189-193.
- [9] Kim H, Horwitz J S, Kim W H, et al. Doped ZnO thin films as anode materials for organic light-emitting diodes [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 420-421: 539-543.
- [10] Cao H T, Sun C, Pei Z L, et al. Properties of transparent conducting ZnO: Al oxide thin films and their application for molecular organic light-emitting diodes [J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2004, 14 (1): 169-174.
- [11] Kim H, Piqué A, Horwitz J S, et al. Effect of aluminum doping on zinc oxide thin films grown by pulsed laser deposition for organic light-emitting devices [J]. *Thin Solid Films*, 2000, 377-378 (1): 798-802.
- [12] 刘霄, 曾广根, 张静全, 等. 反应磁控溅射制备 CdTe 太阳能电池前电极 ITO 薄膜的性质研究 [J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2014, 40 (2): 265-270.
- [13] Kim J J, Lee J H, Ba J Y, et al. Characteristics of low-temperature-annealed ZnO-TFTs [J]. *J Korean Phys Soc*, 2010, 56 (1): 404-408.
- [14] Shim J H, Choi J H, Lee C M, et al. Fabrication and comparison of the properties of SnInZnO and InZnO TFTs processed by using the sol-gel method [J]. *J Korean Phys Soc*, 2010, 57 (6): 1847-1851.
- [15] Patel N G, Patel P D, Vaishnav V S. Indium tin oxide (ITO) thin film gas sensor for detection of methanol at room temperature [J]. *Sensor Actuat B-Chem*, 2003, 96 (1-2): 180-189.
- [16] Yi I-J, Kim J-H, Choi Y J, et al. A disposable biosensor with Prussian blue deposited electrode [J]. *Microelectron Eng*, 2006, 83 (4-9): 1594-1597.
- [17] Mitsubayashi K, Wakabayashi Y, Tanimoto S, et al. Optical-transparent and flexible glucose sensor with ITO electrode [J]. *Biosens Bioelectron*, 2003, 19 (1): 67-71.
- [18] Meng Y, Yang X-L, Chen H-X, et al. A new transparent conductive thin film  $\text{In}_2\text{O}_3: \text{Mo}$  [J]. *Thin Solid Films*, 2001, 394 (1-2): 218-222.
- [19] Li X, Zhang Q, W Miao, et al. Transparent conductive oxide thin films of tungsten-doped indium oxide [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 515 (4): 2471-2474.
- [20] Jeong S H, Park B N, Yoo D G, et al. Al-ZnO thin films as transparent conductive oxides: synthesis, characterization, and application tests [J]. *J Korean Phys Soc*, 2007, 50 (3): 622-625.
- [21] Pei Z L, Zhang X B, Zhang G P, et al. Transparent conductive ZnO: Al thin films deposited on flexible substrates prepared by direct current magnetron

- sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2006, 497 (1-2): 20-23.
- [22] Heo G S, Gim I G, Park J W, et al. Effects of substrate temperature on properties of ITO-ZnO composition spread films fabricated by combinatorial RF magnetron sputtering [J]. *J Solid State Chem*, 2009, 182 (10): 2937-2940.
- [23] Lin Y C, Chen M Z, Kuo C C, et al. Electrical and optical properties of ZnO: Al film prepared on polyethersulfone substrate by RF magnetron sputtering [J]. *Colloids Surf A*, 2009, 337 (1-3): 52-56.
- [24] Chen M, Pei Z L, Sun C, et al. ZAO: an attractive potential substitute for ITO in flat display panels [J]. *Mater Sci Eng B*, 2001, 85 (2-3): 212-217.
- [25] Xu Z Q, Deng H, Li Y R, et al. Characteristics of Al-doped c-axis orientation ZnO thin films prepared by the sol-gel method [J]. *Mater Res Bull*, 2006, 41 (2): 354-358.
- [26] Kim Y S, Tai W P. Electrical and optical properties of Al-doped ZnO thin films by sol-gel process [J]. *Appl Surf Sci*, 2007, 253 (11): 4911-4916.
- [27] Wang M, Lee K E, Hahn S H, et al. Optical and photoluminescent properties of sol-gel Al-doped ZnO thin films [J]. *Mater Lett*, 2007, 61 (4-5): 1118-1121.
- [28] Liu Y, Lian J. Optical and electrical properties of aluminum-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition [J]. *Appl Surf Sci*, 2007, 253 (7): 3727-3730.
- [29] Shukla R K, Srivastava A, Srivastava A, et al. Growth of transparent conducting nanocrystalline Al doped ZnO thin films by pulsed laser deposition [J]. *J Cryst Growth*, 2006, 294 (2): 427-431.
- [30] Martin A, Espinos J P, Justo A, et al. Preparation of transparent and conductive Al-doped ZnO thin films by ECR plasma enhanced CVD [J]. *Surf Coat Technol*, 2002, 151-152 (1): 289-293.
- [31] Raoufi D, Raoufi T. The effect of heat treatment on the physical properties of sol-gel derived ZnO thin films [J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 255 (7): 5812-5817.
- [32] Zhong Z Y, Zhang T. Microstructure and optoelectronic properties of titanium-doped ZnO thin films prepared by magnetron sputtering [J]. *Mater Lett*, 2013, 96 (2): 237-239.
- [33] 杨兵, 刘琰, 刘辉东, 等. AlTiSiN/AlCrSiN 纳米多层复合涂层的结构及性能研究 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 35 (3): 13-16.
- [34] Zhang T, Zhong Z. Effect of working pressure on the structural, optical and electrical properties of titanium-gallium co-doped zinc oxide thin films [J]. *Mater Sci-Poland*, 2013, 31(3): 454-461.
- [35] 钟志有, 顾锦华, 何翔, 等. 沉积温度影响有机太阳能电池阳极薄膜结晶性能 [J]. *中南民族大学学报(自然科学版)*, 2009, 28 (4): 33-37.
- [36] Raoufi D, Raoufi T. The effect of heat treatment on the physical properties of sol-gel derived ZnO thin films [J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 255 (7): 5812-5817.
- [37] Sathyamoorthy R, Mageshwari K, Mali S S et al. Effect of organic capping agent on the photocatalytic activity of MgO nanoflakes obtained by thermal decomposition route [J]. *Ceram Int*, 2013, 39 (1): 323-330.
- [38] Lu Z, Kang H, Zhong Z et al. Structural, electrical and optical properties of transparent conductive titanium-gallium-zinc oxide films by magnetron sputtering [J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2016, 27 (12): 13271-13279.
- [39] Cho S. Effects of rapid thermal annealing on the properties of In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films grown on glass substrate by rf reactive magnetron sputtering [J]. *Microelectron Eng*, 2012, 89 (1): 84-88.