

# 基片温度对镓钛共掺杂氧化锌 透明导电薄膜性能的影响

钟志有 张 腾 汪 浩

(中南民族大学 电子信息工程学院 武汉 430074)

**摘 要** 以镓钛共掺杂氧化锌(GTZO)陶瓷靶作为溅射源材料,采用射频磁控溅射技术在玻璃基片上制备了GTZO透明导电薄膜,通过X射线衍射仪(XRD)、可见-紫外分光光度计和四探针仪等测试表征,研究了基片温度对GTZO薄膜晶体结构、电学性质和光学性能的影响。结果表明:所制备的GTZO薄膜均为六角纤锌矿结构,并具有(002)择优取向,其结晶质量、晶粒尺寸、方块电阻、透过率、光学能隙以及品质因数都与基片温度密切相关,当基片温度为350℃时,GTZO薄膜的品质因数最大,具有最佳的光电综合性能。

**关键词** 氧化锌薄膜; 掺杂; 光电性能

中图分类号 TM914 文献标识码 A 文章编号 1672-4321(2013)01-0058-07

## Influence of Substrate Temperature on Properties of Transparent Conducting Gallium and Titanium Doped Zinc Oxide Thin Films

Zhong Zhiyou, Zhang Teng, Wang Hao

(College of Electronic Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Gallium and titanium doped zinc oxide (GTZO) thin films were deposited by radio-frequency magnetron sputtering method using a sintered ceramic target. The influence of substrate temperature on crystalline, optical and electrical properties of GTZO films was investigated by X-ray diffraction (XRD), four-point probe and optical transmission spectroscopy. The results show that all the deposited films are polycrystalline with a hexagonal wurtzite structure and grow preferentially in the (002) direction. The structural, optical and electrical properties of the films are closely related to the substrate temperature. The GTZO film grown at substrate temperature of 350℃ possesses the best optoelectronic performance, with the largest grain size and the highest figure of merit.

**Keywords** zinc oxide thin films; doping; optical and electrical properties

有机光伏电池具有轻薄、成本低、能卷曲、环境友好、容易实现大面积制造等独特优势<sup>[1-3]</sup>,在便携式计算机、半透光式充电器以及柔性可卷曲系统等体系中具有潜在的应用前景,是未来最为廉价和最有吸引力的能源模式之一。自从1986年Tang<sup>[4]</sup>发明电子给体-受体双层结构的有机光伏电池以来,人们从电池结构、器件机理、光伏材料和制备工艺等各个方面卓有成效地开展了研究,电池的性能获得了

明显提高<sup>[5-7]</sup>。众所周知,有机光伏电池的典型结构为三明治夹心结构,即依次由透明导电电极、有机活性层和金属阴极组成,其中,电池阳极一般采用掺锡氧化铟(ITO)透明导电玻璃,但由于铟(In)、锡(Sn)自然储量较少、制备工艺复杂、成本高、有毒性、稳定性不理想等原因,从而将极大影响未来光伏电池的推广应用,因此,研制可以替代ITO产品的透明导电薄膜已经成为该领域的重要课题之一。

收稿日期 2012-11-28

作者简介 钟志有(1965-),男,博士,教授,研究方向:光电子材料及其器件,E-mail: zhongzhiyou@163.com

基金项目 湖北省自然科学基金资助项目(2011CDB418);中南民族大学研究生创新基金资助项目(chxyyz120023);中南民族大学学术团队基金资助项目(XTZ09003)

氧化锌(ZnO)是II-VI族n型半导体材料,在室温条件下直接光学能隙约为 $3.37\text{ eV}$ <sup>[8]</sup>,它具有良好的导电性和透光性,在发光器件、光伏电池、液晶显示器、透明电磁屏蔽以及触敏覆盖层等众多领域得到了非常广泛的应用<sup>[9,10]</sup>。与目前普遍使用的ITO相比,ZnO薄膜具有自然储量丰富、价格低廉、在活性氢和氢等离子体环境下稳定性高等优点而备受青睐。研究表明,Al、B、Ti、Zr、Ga等单元素掺杂能够较大幅度地提高ZnO薄膜的导电能力,但其光学性能和化学稳定性却仍然不尽如人意。为此,近几年人们开始尝试采用Al-Mn<sup>[11]</sup>、Ga-B<sup>[12]</sup>、Li-Mg<sup>[13]</sup>、Al-Sc<sup>[14]</sup>、Al-Zr<sup>[15]</sup>、Mn-Co<sup>[16]</sup>等共掺杂方法来获得具有优良光电性能的ZnO透明导电薄膜。对于共掺杂ZnO透明导电薄膜,其主要制备方法有脉冲激光沉积法<sup>[17,18]</sup>、喷雾热分解法<sup>[19]</sup>、化学气相沉积法<sup>[20]</sup>、射频溅射法<sup>[21,22]</sup>、直流溅射法<sup>[23,24]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[25-27]</sup>等,其中磁控溅射技术具有设备简单、价格便宜、易于掺杂等特点,所制备的薄膜不仅均匀致密、表面平整、附着性好,而且c轴取向性好、可见光区透过率高,因此它是目前掺杂ZnO薄膜最常用的制备方法之一。本文以镓钛共掺杂氧化锌(GTZO)陶瓷靶作为靶材,采用射频磁控溅射技术制备了GTZO无铟透明导电薄膜,通过X射线衍射仪(XRD)、分光光度计和四探针仪等测试表征,研究了基片温度对薄膜结晶质量、电学性质和光学性能的影响。

## 1 实验

### 1.1 基片处理

实验选用普通玻璃作为基片材料,首先采用丙酮擦拭玻璃基片表面,然后用清水冲洗干净,再依次使用丙酮、无水乙醇和去离子水各超声清洗约15 min,最后在水乙醇中煮沸,吹干待用。

### 1.2 薄膜制备

利用射频磁控溅射技术在玻璃基片上制备透明导电的GTZO薄膜,所用实验设备为国产KDJ567型高真空复合镀膜系统,所用溅射靶材的直径为50 mm、厚度为4 mm,它由ZnO、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>混合烧结而成,ZnO、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>的纯度均为99.99%,其中ZnO、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和TiO<sub>2</sub>的质量分数分别为97%、1.5%和1.5%。溅射所用气体为纯度99.99%的高纯氩气,GTZO薄膜沉积之前,先将玻璃基片放置于镀膜系统的真空室中,待气压抽至低于 $5 \times 10^{-4}\text{ Pa}$

后通入氩气,并先采用氩离子体对基片表面清洗约3 min,然后再对靶材表面预溅射5 min以去除其表面的杂质和污染物。实验时,制备GTZO薄膜的具体工艺参数如下:溅射功率为200 W,靶-基距离为70 mm,工作压强为0.5 Pa,氩气流量为15 sccm,溅射时间为40 min,基片温度分别为300℃、350℃和400℃。

### 1.3 性能表征

GTZO薄膜的晶体结构采用德国Bruker公司的D8-ADVANCE型X射线衍射仪(Cu K $\alpha$ ,射线源的波长 $\lambda = 0.15406\text{ nm}$ )分析,薄膜的方块电阻利用SZ-82型数字式四探针仪测试,薄膜的光学性能使用TU-1901型双光束紫外-可见光分光光度计进行表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 薄膜的微观结构

不同基片温度时所制备GTZO薄膜样品的XRD图谱如图1所示,由图可见,所有GTZO样品的特征谱线与均ZnO薄膜六角纤锌矿结构的特征谱线相吻合,这说明GTZO薄膜样品均具有六角纤锌矿结构,并且存在(002)方向上的择优取向。另外从XRD图谱看出,对于所有GTZO薄膜,在衍射峰位 $34.4^\circ$ 附近存在一个很强的(002)衍射峰,并且没有检测到Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相和TiO<sub>2</sub>相的存在,这说明掺杂到薄膜当中的Ga原子和Ti原子均以替位形式取代了六角晶格中的部分Zn原子的位置,或者它们弥散在薄膜的晶粒间界区域<sup>[28,29]</sup>,对于不同元素掺杂的ZnO薄膜,也有类似结果的报道<sup>[30-32]</sup>。

图2为GTZO薄膜(002)衍射峰位 $2\theta$ 及其衍射强度随基片温度的变化关系,可以看出,基片温度对GTZO样品(002)衍射峰位的影响并不明显,但对(002)峰的衍射强度具有较为显著的影响,当基片温度为300℃、350℃和400℃时,GTZO薄膜(002)峰衍射强度分别为 $3.5 \times 10^5\text{ cps}$ 、 $6.6 \times 10^5\text{ cps}$ 、 $6.3 \times 10^5\text{ cps}$ ,呈现出先升高、后降低的变化趋势,其中基片温度为350℃时所对应的衍射峰强度最大。

GTZO样品(002)衍射峰半高宽( $B$ )随基片温度的变化如图3(a)所示,由图可知,基片温度升高时,半高宽 $B$ 先逐渐减小、后逐渐增加,当基片温度为350℃时GTZO薄膜的 $B$ 值最小,大约为 $0.162^\circ$ 。基于(002)衍射峰的峰位 $2\theta$ 值和对应的半高宽 $B$ ,不同基片温度时GTZO薄膜的晶粒尺寸( $D$ )可以根

据 Debye-Scherrer 公式<sup>[33, 34]</sup> 计算:

$$D = \frac{k\lambda}{B\cos\theta} \quad (1)$$

公式(1)中  $\theta$  为衍射角  $\lambda$  为 X 射线的波长(对于铜靶  $\lambda = 0.15406 \text{ nm}$ )  $k$  为形状因子(这里取  $k = 0.89$ )<sup>[35]</sup>. 不同基片温度时所制备 GTZO 样品的晶粒尺寸  $D$  如图 3(b) 所示,从图中可以看出,当基片温度为  $300^\circ\text{C}$ 、 $350^\circ\text{C}$  和  $400^\circ\text{C}$  时,GTZO 样品的晶粒尺寸  $D$  分别为  $36.6 \text{ nm}$ 、 $50.8 \text{ nm}$  和  $45.9 \text{ nm}$ ,结果说明 GTZO 薄膜的晶粒尺寸  $D$  明显受到基片温度的影响, $D$  随基片温度的变化趋势与半高宽  $B$  相反,当基片温度为  $350^\circ\text{C}$  时样品的晶粒尺寸最大( $50.8 \text{ nm}$ ).

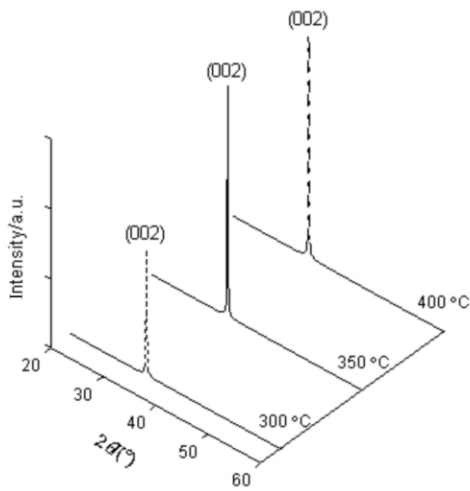


图 1 不同基片温度时样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the samples deposited with different substrate temperatures

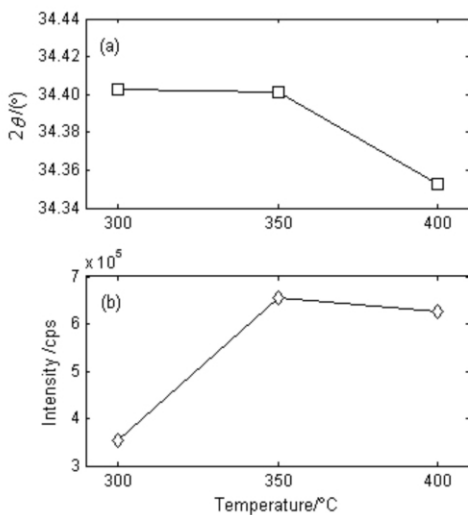


图 2 不同基片温度时样品的(002) 峰位置和衍射强度

Fig. 2 The peak position ( $2\theta$ ) (a) and intensity (b) of (002) plane for the samples deposited with different substrate temperatures

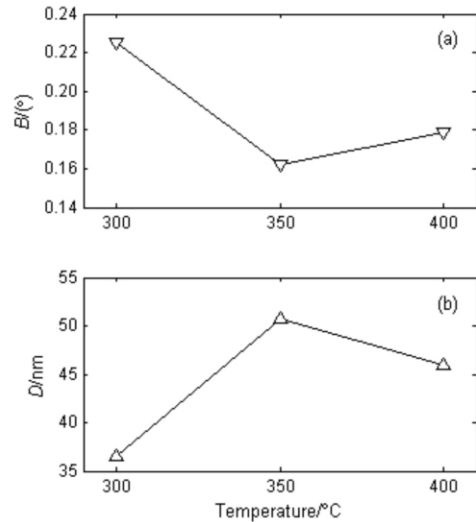


图 3 不同基片温度时样品的(002) 峰半高宽和晶粒尺寸  
Fig. 3 The full-width at half-maximum ( $B$ ) (a) and grain size ( $D$ ) (b) of (002) plane for the samples deposited with different substrate temperatures

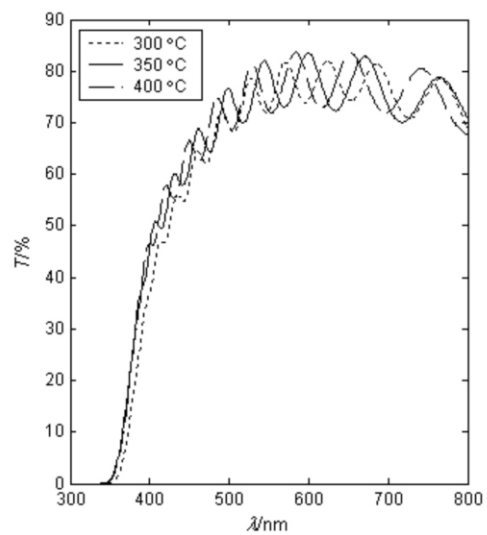


图 4 不同基片温度时样品的透射谱

Fig. 4 Transmittance spectra of the samples deposited with different substrate temperatures

## 2.2 薄膜的光电性能

图 4 为不同基片温度时所制备 GTZO 薄膜的透过率曲线,可以看出,所有薄膜样品的透过率曲线显示了清晰、光滑的干涉条纹,这种透过率曲线的多级振荡来自于薄膜上表面和下表面(即与基片之间的界面)反射光之间的干涉,良好的振荡特性表明所制备的 GTZO 薄膜具有平整的表面、均匀的厚度和良好的光学质量<sup>[36, 37]</sup>. 对于图 4 的透过率谱线,可以粗略地分成 3 个区域:透明振荡区( $400 \sim 800 \text{ nm}$ )、中等吸收区( $360 \sim 400 \text{ nm}$ )和强吸收区( $200 \sim 360 \text{ nm}$ ).透明振荡区表明 GTZO 薄膜在此光谱范

围内基本上是透明的. 随着波长 ( $\lambda$ ) 减小, GTZO 薄膜进入中等吸收区, 这时薄膜具有一定的弱吸收能力. 当波长  $\lambda$  继续减小时, GTZO 薄膜进入强吸收区, 可以看到大约在  $\lambda = 355 \text{ nm}$  处, 薄膜的透过率急剧下降, 其吸收能力显著增强, 表明了 GTZO 薄膜的光学能隙在此附近. 图 5 (a) 给出了不同温度时沉积在玻璃基片上 GTZO 薄膜的平均透过率 ( $T_{av}$ , 未扣除玻璃基片), 当基片温度为  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  时, GTZO 薄膜/玻璃基片的可见光区平均透过率  $T_{av}$  分别为  $71.5 \%$ ,  $72.6 \%$  和  $73.2 \%$ , 可见, 薄膜的平均透过率随着基片温度的升高略有增加, 但并没有显著性的变化. 图 5 (b) 为 GTZO 薄膜的方块电阻 ( $R_s$ ) 与基片温度之间的变化关系, 随着基片温度的升高, 方块电阻  $R_s$  单调增加, 呈现出先平缓而后陡峭的变化趋势. 可见, 虽然 GTZO 薄膜的  $T_{av}$  和  $R_s$  都随基片温度的升高而增加, 但是二者的变化速率却明显不同, 因此为了评价透明导电薄膜的光电综合性能, Haacke<sup>[38]</sup> 定义了优良指数, 即薄膜的品质因数 ( $F_H$ ) 为:

$$F_H = \frac{T_{av}^{10}}{R_s} \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $T_{av}$  为 GTZO 薄膜可见光波段的平均透过率,  $R_s$  为薄膜的方块电阻<sup>[39]</sup>. 不同基片温度下所制备 GTZO 薄膜样品的品质因数  $F_H$  如图 6 所示, 基片温度从  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  升高到  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $F_H$  增大, 而当基片温度继续升高到  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $F_H$  反而减小, 可见, 基片温度为  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  时 GTZO 薄膜的  $F_H$  值最大 ( $4.2 \times 10^{-3} \Omega^{-1}$ ), 这表明基片温度为  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  时所制备的 GTZO 薄膜具有最好的光电综合性能.

### 2.3 薄膜的光学能隙

由图 4 可知, GTZO 薄膜在波长  $\lambda$  为  $400 \sim 800 \text{ nm}$  范围内表现出良好的透光性能, 并在  $355 \text{ nm}$  左右有一陡峭的吸收边, 在吸收边附近, 薄膜的透过率 ( $T$ ) 与吸收系数 ( $\alpha$ ) 之间满足如下关系式<sup>[40]</sup>:

$$R = T_0 e^{\alpha t} \quad (3)$$

公式 (3) 中,  $T_0$  和  $t$  分别为常数和薄膜厚度. 对于吸收边附近有  $T_0 \approx 1$ <sup>[41]</sup>, 因此, 利用式 (3) 式由薄膜厚度  $t$  以及对应的吸收边附近的光学透过率  $T$  就可以获得薄膜的光学吸收系数  $\alpha$ . 根据 Tauc 法则<sup>[42]</sup>, 对于薄膜的吸收边附近, 光学吸收系数  $\alpha$  与入射光子能量 ( $h\nu$ ) 之间满足如下方程:

$$(\alpha h\nu)^m = C(h\nu - E_g) \quad (4)$$

公式 (4) 中,  $C$  为常数,  $E_g$  为薄膜的光学能隙, 指数  $m$  取决于跃迁的类型. 当  $m = 2$  时, 对应于直接

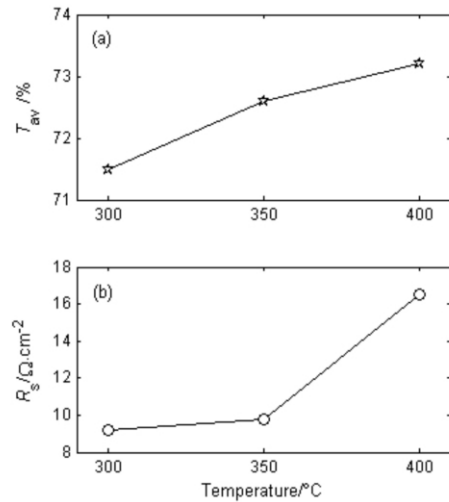


图 5 不同基片温度时样品的可见光区平均透过率和方块电阻值

Fig. 5 Average visible transmittance ( $T_{av}$ ) (a) and sheet resistivity ( $R_s$ ) (b) of the samples deposited with different substrate temperatures

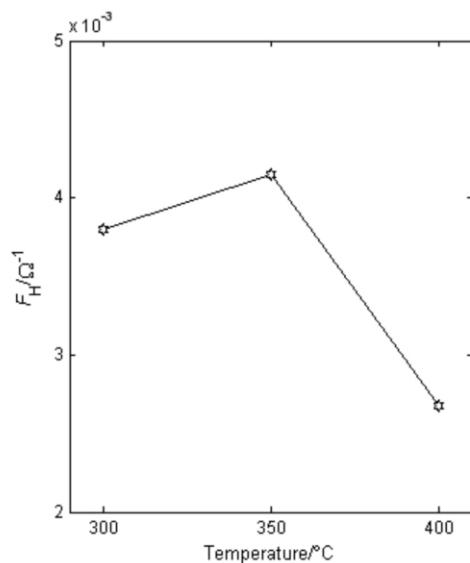


图 6 不同基片温度时样品的品质因数

Fig. 6 Figure of merit for the samples deposited with different substrate temperatures

跃迁, 而当  $m = 0.5$  时则对应于间接跃迁<sup>[43]</sup>. 由于 GTZO 薄膜属于直接跃迁, 故取  $m = 2$  作出  $(\alpha h\nu)^2$  与  $h\nu$  之间的关系曲线图, 根据外推法得到横轴 ( $h\nu$ ) 上的交点 ( $\alpha h\nu = 0$ ) 后, 容易计算获得薄膜的光学能隙  $E_g$ . 图 7 为不同基片温度时所制备 GTZO 薄膜的  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  关系曲线, 利用外推法可得样品的光学能隙  $E_g$  值如图 8 所示, 不同基片温度时所制备 GTZO 薄膜的  $E_g$  值为  $3.48 \sim 3.54 \text{ eV}$ , 均大于纯 ZnO 薄膜的光学能隙 ( $E_{g0} = 3.37 \text{ eV}$ )<sup>[8]</sup>, 这主要是 Burstein-Moss (B-M) 效应<sup>[43, 44]</sup> 所引起的, 即由于导带底部附近量子态基本上已被电子占据, 故价带中的电子欲

想直接跃迁到导带中时,则必须吸收更多的能量才能跃迁到导带中较高的空位上,就如同禁带宽度增加了. GTZO 薄膜在紫外光区的吸收是由薄膜中的载流子浓度  $n_e$  所决定的,由 B-M 效应而引起的能隙宽化( $\Delta E_g^{B-M}$ ) 可以表示为<sup>[27,45]</sup>:

$$\Delta E_g^{B-M} = E_g - E_{g0} = \frac{h^2}{8m_e^*} \left( \frac{3n_e}{\pi} \right)^{2/3}. \quad (5)$$

公式(5)中,  $h$  为普朗克常量,  $m_e^*$  为电子的有效质量,  $n_e$  为载流子的浓度. 由公式(5)可知,薄膜中载流子浓度  $n_e$  的增大将导致薄膜光学能隙  $E_g$  的增加.

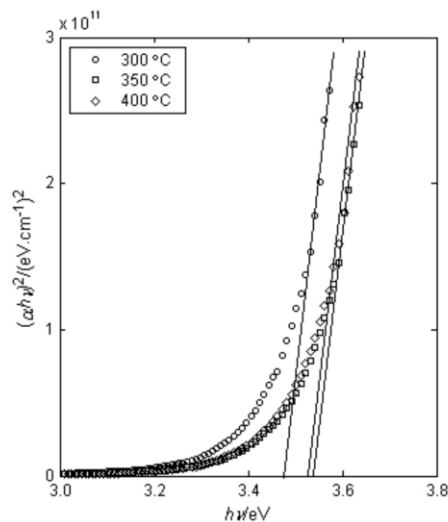


图7 不同基片温度时样品的  $(\alpha hv)^2-hv$  关系曲线

Fig. 7  $(\alpha hv)^2$  as a function of  $hv$  for the samples deposited with different substrate temperatures

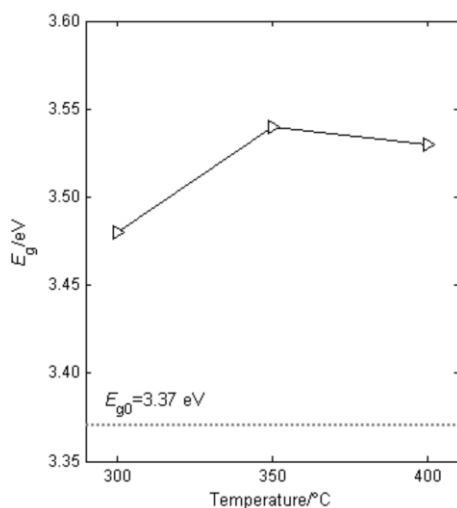


图8 不同基片温度时样品的光学能隙

Fig. 8 Optical energy gap ( $E_g$ ) of the samples deposited with different substrate temperatures

### 3 结语

采用高密度镓钛共掺杂氧化锌铝陶瓷靶作为溅射源,利用射频磁控溅射技术制备了 GTZO 透明导电薄膜,研究了基片温度对薄膜结构、电学性质和光学性能的影响. 实验结果表明:基片温度明显影响 GTZO 薄膜的晶体结构和光电性能,当基片温度为 350 °C 时,GTZO 薄膜具有最好的  $c$  轴取向性、最大的晶粒尺寸、较低的方块电阻和较高的可见光区平均透射率,其品质因数最大、光电综合性能最佳. 由于受 Burstein-Moss 效应的影响,所制备 GTZO 薄膜的光学能隙均大于纯 ZnO 薄膜的能隙值,同时基片温度对光学能隙也有一定程度的影响,当基片温度为 350 °C 时,GTZO 薄膜的光学能隙最大.

### 参 考 文 献

- [1] Brabec C J. Organic photovoltaics: technology and market [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2004, 83 (2-3): 273-292.
- [2] Sariciftci N S, Smilowitz L, Heeger A J, et al. Photoinduced electron transfer from conducting polymers onto buckminsterfullerene [J]. *Science*, 1992, 258 (5087): 1474-1476.
- [3] Yu G, Gao J, Hummelen J C, et al. Polymer photovoltaic cells: enhanced efficiencies via a network of internal donor-acceptor heterojunctions [J]. *Science*, 1995, 270 (5243): 1789-1791.
- [4] Tang C W. Two-layer organic photovoltaic cell [J]. *Appl Phys Lett*, 1986, 48 (2): 183-185.
- [5] Li G, Shrotriya V, Huang J, et al. High-efficiency solution processable polymer photovoltaic cells by self-organization of polymer blends [J]. *Nat Mater*, 2005, 4 (11): 864-868.
- [6] 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.
- [7] Chen H Y, Hou J, Zhang S, et al. Polymer solar cells with enhanced open-circuit voltage and efficiency [J]. *Nat Photonics*, 2009, 3 (11): 649-653.
- [8] Chen H X, Ding J J, Zhao X G, et al. Microstructure and optical properties of ZnO: Al films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering [J]. *Phys B*, 2010, 405 (7): 1339-1344.
- [9] Jayaraj M K, Antony A, Ramachandran M. Transparent conducting zinc oxide thin film prepared by off-axis rf magnetron sputtering [J]. *Bull Mater Sci*, 2002, 25 (3): 227-230.

- [10] Sakurai K, Kanehiro M, Nakahara K, et al. Effects of oxygen plasma condition on MBE growth of ZnO [J]. *J Cryst Growth*, 2000, 209 (2-3): 522-525.
- [11] Cao H T, Pei Z L, Gong J, et al. Transparent conductive Al and Mn doped ZnO thin films prepared by dc reactive magnetron sputtering [J]. *Surf Coat Technol*, 2004, 184 (1): 84-92.
- [12] Abduev A K, Akhmedov A K, Asvarov A S. The structural and electrical properties of Gd-doped ZnO and Ga, B-codoped ZnO thin films: the effects of additional boron impurity [J]. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2007, 91 (4): 258-260.
- [13] Aksoy S, Caglar Y, Ilcan S, et al. Sol-gel derived Li-Mg co-doped ZnO films: preparation and characterization via XRD, XPS, FESEM [J]. *J Alloy Compd*, 2012, 512 (1): 171-178.
- [14] Chen J, Chen D, He J, et al. The microstructure, optical, and electrical properties of sol-gel-derived Sc-doped and Al-Sc co-doped ZnO thin films [J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 255 (23): 9413-9419.
- [15] 袁玉珍, 王辉, 张化福, 等. 膜厚对 Zr, Al 共掺杂 ZnO 透明导电薄膜结构和光电性能的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2010, 39 (1): 169-173.
- [16] Nirmala M, Smitha P, Anukaliani A. Optical and electrical properties of undoped and (Mn, Co) co-doped ZnO nanoparticles synthesized by DC thermal plasma method [J]. *Superlattice Microst*, 2011, 50 (5): 563-571.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [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] Chen H, Guo W, Ding J, et al. Ti-incorporated ZnO films synthesized via magnetron sputtering and its optical properties [J]. *Superlattice Microst*, 2012, 51 (4): 544-551.
- [29] Jiang M, Liu X, Chen G, et al. Preparation and photoelectric properties of Ti doped ZnO thin films annealed in vacuum [J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2009, 20 (12): 1225-1228.
- [30] Ma Q-B, Ye Z-Z, He H-P, et al. Effects of deposition pressure on the properties of transparent conductive ZnO: Ga films prepared by DC reactive magnetron sputtering [J]. *Mat Sci Semicon Proc*, 2007, 10 (4-5): 167-172.
- [31] Yang W, Liu Z, Peng D-L, et al. Room-temperature deposition of transparent conducting Al-doped ZnO films by RF magnetron sputtering method [J]. *Appl Surf Sci*, 2009, 255 (11): 5669-5673.
- [32] Zhang H-F, Liu R-J, Liu H-F, et al. Mn-doped ZnO transparent conducting films deposited by DC magnetron sputtering [J]. *Mater Lett*, 2010, 64 (5): 605-607.
- [33] Fang G J, Li D, Yao B L. Influence of post-deposition annealing on the properties of transparent conductive nanocrystalline ZAO thin films prepared by RF magnetron sputtering with highly conductive ceramic

- target [J]. *Thin Solid Films*, 2002, 418 (1): 156-162.
- [34] Hong R, Shao J, He H, et al. ZnO: Zn phosphor thin films prepared by face-to-face annealing [J]. *J Cryst Growth*, 2005, 284 (3-4): 347-352.
- [35] Kale R B, Lokhande C D. Influence of air annealing on the structural, optical and electrical properties of chemically deposited CdSe nano-crystallites [J]. *Appl Surf Sci*, 2004, 223 (4): 343-351.
- [36] Yadav H K, Sreenivas K, Gupta V. Influence of postdeposition annealing on the structural and optical properties of cosputtered Mn doped ZnO thin films [J]. *J Appl Phys*, 2006, 99 (8): 083507-1-083507-8.
- [37] Zhong Z-Y, Gu J-H, Sun F-L, et al. Preparation and properties of gallium-doped zinc oxide transparent conductive thin films [J]. *J Synth Cryst*, 2012, 41 (5): 1337-1344.
- [38] Haacke G. New figure of merit for transparent conductors [J]. *J Appl Phys*, 1976, 47 (9): 4086-4089.
- [39] Zhou J, Zhong Z Y. Structural and optoelectrical properties of Ga-doped ZnO semiconductor thin films grown by magnetron sputtering [J]. *Cryst Res Technol*, 2012, 47 (9): 944-952.
- [40] 顾锦华, 钟志有, 何翔, 等. 真空退火处理对光敏薄膜及聚合物太阳能电池性能的影响 [J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2009, 28 (3): 30-33.
- [41] 李桂锋, 张群, 王颖华, 等. 高迁移率 IWO 透明导电氧化物薄膜制备及其退火处理研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2008, 28 (2): 95-98.
- [42] Ratana T, Amornpitoksuk P, Suwanboon S, et al. The wide band gap of highly oriented nanocrystalline Al doped ZnO thin films from sol-gel dip coating [J]. *J Alloy Compd*, 2009, 470 (3): 408-412.
- [43] 孙奉葵, 惠述伟. 衬底温度对射频溅射沉积 ZAO 透明导电薄膜性能的影响 [J]. *中南民族大学学报: 自然科学版*, 2009, 28 (2): 10-13.
- [44] Prepelita P, Medianu R, Sbarcea B, et al. The influence of using different substrates on the structural and optical characteristics of ZnO thin films [J]. *Appl Surf Sci*, 2010, 256 (9): 1807-1811.
- [45] Fallah H R, Ghasemi M, Hassanzadeh A, et al. The effect of deposition rate on electrical, optical and structural properties of tin-doped indium oxide (ITO) films on glass at low substrate temperature [J]. *Phys B*, 2006, 373 (1): 274-279.

(上接第 57 页)

### 参 考 文 献

- [1] Stren M P. Diabetes and cardiovascular disease: the "common" hypothesis [J]. *Diabetes*, 1995, 44: 369-374.
- [2] Sowers J R, Frohlich E D. Insulin and insulin resistance: impact on blood pressure and cardiovascular disease [J]. *Med Clin North Am*, 2004, 88 (1): 63-82.
- [3] 李蕾, 李之俊, 魏安奎, 等. 胰岛素抵抗动物模型和运动干预模型的建立和评价 [J]. *武汉体育学院学报*, 2009, 43 (8): 51-54.
- [4] 刘微, 李冀, 谢田, 等. 胰岛素抵抗动物模型的研究进展 [J]. *中医药信息*, 2008, 25 (6): 9-11.
- [5] 喻嵘, 成细华, 胡伟, 等. 骨骼肌特异性胰岛素样生长因子 1 及胰岛素双受体功能缺失鼠糖尿病发病及其相关炎症因子的变化 [J]. *中国临床康复*, 2007, 11 (45): 9075-9078.
- [6] 张闽, 杨晔, 刘敏, 等. 果糖诱导的高血压伴胰岛素抵抗大鼠血清脂联素肿瘤坏死因子  $\alpha$  浓度的变化 [J]. *心肺血管病杂志*, 2007, 26 (1): 48-50.
- [7] 赵永松, 李玉光, 赵晓云. 高脂饮食对大鼠胰岛素抵抗及氧化损伤指标的影响及意义 [J]. *山西医药杂志*, 2007, 36 (8): 675-677.
- [8] Elsner M, Guldbakke B, Tiedge M, et al. Relative importance of transport and alkylation for pancreatic beta-cell toxicity of streptozotocin [J]. *Diabetologia*, 2000, 43 (12): 1528-1533.
- [9] Saini K S, Thompson C, Winterford C M, et al. Streptozotocin at low doses induces apoptosis and at high doses causes necrosis in a murine pancreatic beta cell line [J]. *J Biochem Mol Biol Int*, 1996, 39 (6): 1229-1236.
- [10] 王俊贤, 李小军, 刘跃辉, 等. 高糖、高脂诱导大鼠肝脏胰岛素抵抗评价 [J]. *中国药师*, 2012, 15 (6): 747-751.
- [11] 文晓红. 链脲佐菌素致胰岛破坏及其与高血糖关系的实验研究 [D]. 重庆: 重庆医科大学, 2008: 25.
- [12] Gannon M C, Niewoehner C B, Nuttall F Q. Effect of insulin administration on cardiac glycogen synthase and synthase phosphatase activity in rats fed diets high in protein, fat or carbohydrate [J]. *J Nutr*, 1985, 115 (2): 243-251.