

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.03.018

Al掺杂对 ZnO 薄膜结构和光学性能的影响

杨帆, 周昕, 何明灿, 周响亮, 彭峰, 李雪勇

(湖南工业大学 理学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 研究了 Al 掺杂对采用直流磁控溅射方法制备的 ZnO 薄膜结构及光学性能的影响。X 射线衍射结果揭示薄膜具有良好的 C 轴择优取向生长特性, 同时, 衬底温度对它们的透射谱和荧光谱有着明显影响, 所有薄膜都有大于 86% 的可见光透过率和陡峭的本征吸收边, 但 ZAO 薄膜的光学透过率略低。Al 掺杂导致了更宽的光学带隙, 光致发光光谱显示 ZnO 具有较强的近带本征吸收峰和深能级发射峰, 但 Al 掺杂使得深能级发射峰降低。随着衬底温度的升高, 近带边吸收峰蓝移, 与光学带隙 E_g 变化趋势一致。

关键词: Al 掺杂 ZnO; 磁控溅射; 晶体结构; 光学性质

中图分类号: O484.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)03-0088-06

The Effect of Al-Doped on the Structure and Optical Properties of ZnO Thin Films

Yang Fan, Zhou Xin, He Mingcan, Zhou Xiangliang, Peng Feng, Li Xueyong

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

Abstract: Investigates the influence of Al-doped on the structure and optical properties of ZnO(ZAO) thin films which prepared by direct current (dc) magnetron sputtering. The X-ray diffraction results reveal that the film has good C-axis preferred orientation growth characteristics, the substrate temperature influences obviously on the optical transmittance and photoluminescence (PL) spectra of both ZnO and ZAO films, and all films exhibit a transmittance higher than 86% in the visible region, while the optical transmittance of ZAO films is slightly smaller than that of ZnO films. Al-doping leads to a larger optical band gap (E_g) of the films, the near-band-edge (NBE) emission and deep-level (DL) emission are observed in pure ZnO thin films by PL measurement, however the DL emission of the thin films is depressed with Al-doping. As the substrate temperature increases, the peak of NBE emission has a blueshift to region of higher photon energy, which shows a trend similar to the E_g in optical transmittance measurement

Keywords: Al-doped ZnO; magnetron sputtering; crystal structure; optical properties

0 引言

氧化锌 ZnO 是一种六角纤锌矿结构的直接带隙宽禁带 (3.37 eV) 半导体, 具有优异的光学和电学性

能, 因而引起了半导体领域中科研工作者的兴趣与广泛研究^[1-2]。ZnO 具有较高的激子束缚能 (60 meV), 大于激子室温热离化能 (26 meV)^[3], 其高化学稳定性和高热稳定性使得它在不同领域具有各种

收稿日期: 2013-12-20

基金项目: 湖南工业大学大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湖工大教学[2013]19-23), 湖南省教育厅科研基金资助项目(13C020)

作者简介: 杨帆 (1992-), 男, 湖南张家界人, 湖南工业大学学生, 主要研究方向为薄膜材料,

E-mail: 1476129997@qq.com

通信作者: 李雪勇 (1973-), 男, 湖南嘉禾人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事应用物理学方面的教学与研究,

E-mail: lixueyong@163.com

各样的应用,如被应用于紫外发射器件、声表面波器件、气体传感器和透明导电电极^[1]等。此外,氧化锌可以与各种各样的离子掺杂,以满足不同领域的需求。掺Al的ZnO(ZAO)薄膜具有较低的电阻率和良好的光学特性,表现出紫外截止特性,在红外光区范围内有较高的反射率,在可见光区具有较高的透射率,且其光学带隙可由Al的掺杂浓度来改变^[4]。与当前应用最多的透明导电氧化铟锡(indium tin oxides, ITO)薄膜相比,ZAO薄膜具有如下优势:自然资源丰富,生产工艺简单,成本低,无毒性,性能稳定。因此,ZAO薄膜是至今为止最佳的ITO薄膜替代品。

制作氧化锌薄膜已有多种沉积方法,如真空蒸发法、脉冲激光沉积法、化学气相沉积法、溶胶-凝胶处理法、磁控溅射法、分子束外延法等^[5-10],其中,磁控溅射法因其沉积参数易于控制而被广泛应用^[11]。ZnO薄膜的物理性能往往依赖于沉积参数,如氧分压、溅射功率、基底温度等。氧分压对薄膜结构和光学性能的影响已得到了广泛的研究,但衬底温度对薄膜的影响至今鲜少有研究者深入系统研究。因此,本研究中拟利用直流磁控溅射法制备ZnO和ZAO薄膜,并对衬底温度对2种薄膜的结构和光学性能的影响进行研究,以期制备性能优异的透明导电ZAO薄膜提供工艺和理论参考。

1 实验

1.1 材料与仪器

Zn靶、ZAO靶,中国科学院金属研究所;

丙酮、无水乙醇,长沙晶康新材料科技有限公司;

JCP-350型多功能磁控溅射仪、质量流量计、压强控制仪,北京泰科诺科技有限公司;

接触式台阶测量仪,Alpha-step 200型,美国辛耘科技工程有限公司;

X射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD),SIEMENS D-500型,德国西门子公司;

原子力显微镜(atomic force microscope, AFM),Solver P47型,俄罗斯莫斯科NT-MDT公司;

紫外-可见分光光谱仪,TU-1800PC型,北京普析通用仪器公司;

荧光分光光度计F-2500,日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 ZnO和ZAO薄膜的制备

ZnO和ZAO薄膜样品是在JZCK-450SF型多功能磁控溅射仪上,采用直流磁控溅射方法制备的。

制备过程中,分别选用高纯度的Zn(纯度为99.99%)金属靶和质量分数为3%的Al₂O₃(纯度为

99.99%)掺杂的ZnO(纯度为99.99%)陶瓷靶;且设定真空室背底真空度为 5×10^{-4} Pa,靶材与衬底之间的距离为70 mm;并以纯度为99.9%的氩气和氧气分别作为溅射气体和反应气体,各自的流量和总压强分别由质量流量计和压强控制仪控制,总流量通过质量流量计控制,为15 cm³/s。玻璃衬底首先用丙酮清洗,再用无水乙醇清洗,然后用去离子水冲洗,分别超声清洗20 min,最后用氮气吹干。

为了得到高透过率和低电阻率的薄膜,在沉积薄膜前先用氩气预溅射靶材10 min,以去除靶面的污染物及杂质,提高薄膜的纯度,直至靶材稳定辉光放电才移开挡板开始镀膜。工作时溅射气压保持在1 Pa,溅射功率保持为150 W。

研究基片温度对薄膜性能的影响过程中:ZnO薄膜溅射时的氧分压为25%,ZAO薄膜溅射时的氧分压为1%;溅射时的基片温度分别设为室温RT,100,200,300℃。实验中,ZnO薄膜的溅射时间为60 min,ZAO薄膜的溅射时间为15 min。

1.2.2 薄膜的测试与表征

利用接触式台阶测量仪测量薄膜样品的厚度,经对多个样品的测试,发现所制得薄膜的厚度均为500 nm左右;

利用X射线衍射仪分析薄膜样品的物相结构,具体操作时,衍射角从0°到70°变化;

选用原子力显微镜观察薄膜样品的表面形貌;

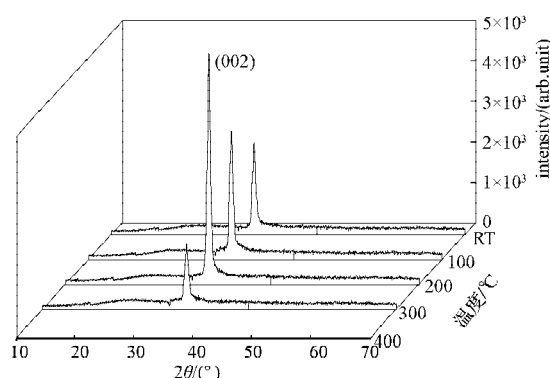
利用紫外-可见分光光谱仪测定薄膜样品的光透射谱;

利用荧光分光光度计测定薄膜样品的室温荧光光谱,测量范围为330~600 nm。

2 结果与讨论

2.1 薄膜结构

试验所得不同温度下ZnO和ZAO薄膜的XRD图如图1所示。



a) ZnO薄膜

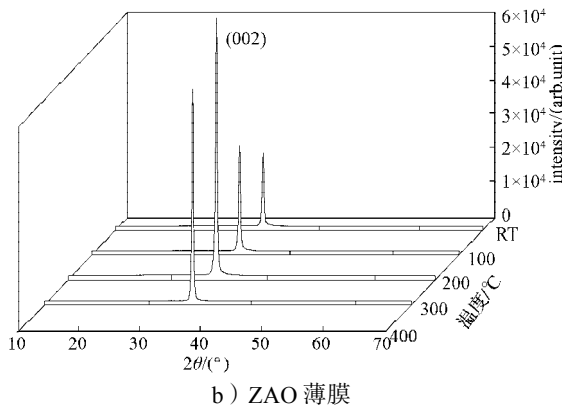


图1 不同温度下 ZnO 和 ZAO 薄膜的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of ZnO and ZAO thin films under different temperatures

由图1可知,在200 °C以下时,ZnO的(002)晶面的衍射峰强度随着温度的升高而变大;当温度超过200 °C且继续升高时,其强度有所下降。衍射峰强度之所以随着温度的升高而增大,是因为较高温度下生长的薄膜将有更好的C轴取向性和更好的结晶质量,这一结果与已有实验研究结论^[2,12]一致。但在更高的温度(>200 °C)下,薄膜的衍射强度会有所下降,这跟衬底表面混乱的(002)晶面取向有关^[13]。这些由XRD测得的参数能够用来表征薄膜的性质,所有的计算结果列于表1中。

表1 XRD各种测得结果和计算参数

Table 1 XRD measured results and computing parameters

样品	温度/ °C	2θ/ (°)	FWHM/ (°)	D/nm	c/nm	strain/ ×10 ⁻³	crystallite size/nm
ZnO	室温	34.29	0.56	0.261 37	0.522 74	3.94	14.85
	100	34.30	0.58	0.261 30	0.522 60	3.67	14.34
	200	34.33	0.57	0.261 08	0.522 15	2.80	14.59
	300	34.40	0.59	0.260 56	0.521 12	0.83	14.10
ZAO	室温	34.10	0.36	0.262 78	0.525 57	9.37	23.09
	100	34.14	0.32	0.262 49	0.524 97	8.22	25.98
	200	34.26	0.28	0.261 59	0.523 19	4.80	29.70
	300	34.22	0.28	0.261 89	0.523 78	5.93	29.69

表1反映了不同衬底温度下2种样品薄膜(002)晶面的衍射峰位置的移动情况。当温度从室温升高到300 °C时,ZnO薄膜的(002)衍射角逐渐从34.29°增加到34.40°,最后非常接近ZnO体晶的衍射角(34.43°)。当温度从室温升高到200 °C时,ZAO薄膜的(002)衍射角仅从34.10°增加到34.26°,温度再升高到300 °C时,反而降低为34.22°。

以上数据表明,所有样品的衍射角都向小角度方向移动,这可能是由残留的内应力^[14]引起的。根据布拉格公式

$$\lambda=2d\sin\theta,$$

式中: λ 为X射线的波长,取0.154 1 nm;

d 为晶面(hkl)间距;

θ 为(002)晶面的衍射角。

可得衍射角的增加正是由晶面间距的减小造成的。对于(002)衍射峰而言,晶格常数 c 为(002)晶面间距 d 的2倍^[15],可通过如下公式来估算C轴方向应力 ε 的大小^[14]:

$$\varepsilon=(c_{\text{film}}-c_{\text{bulk}})/c_{\text{bulk}}$$

式中: c_{film} 为薄膜的晶格常数; c_{bulk} 为无应力时理想ZnO体晶的晶格常数^[1](且 $c_{\text{bulk}}=0.520 69$ nm)。具体的计算结果参见表1。

薄膜内应力的产生可能是由本征结构缺陷而不是热效应引起的。热应力可以分别通过薄膜和玻璃衬底的线性热膨胀系数 α ($\alpha_{\text{ZnO}}=4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha_{\text{glass}}=9 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)推导出来,但是推导得到的结果明显小于测量值,这说明薄膜的应力主要是由生长过程引起的。ZnO和ZAO薄膜的晶格常数 c 都大于ZnO体晶,表现为压应力。测得的压应力主要是由于生长过程中较低温度沉积时产生的缺陷引起的,在合适的范围内,随着衬底温度的升高,原子的移动速率增加,减少了晶格的缺陷,应力降低,这在ZnO和ZAO薄膜中都有所表现:随着温度的升高,ZnO薄膜的压应力单调下降,趋近于0;而ZAO薄膜在温度从室温上升到200 °C时,应力随着温度的升高而减小,到300 °C时,应力又有所增加。ZAO薄膜的压应力明显高于ZnO薄膜,这不是因不同离子半径的 Al^{3+} (0.053 nm)取代 Zn^{2+} (0.074 nm)造成的;而是在ZnO生长过程中,形成的 O^{2-} 离子不断轰击薄膜,导致其表面原子注入并且取代内层薄膜而引起压应力^[16]。更高应力的ZAO薄膜是由于陶瓷靶比金属靶上有更多的氧离子中心,而在300 °C时的应力增加,可能是因热效应和晶格不匹配而引起的。

衍射峰的半高宽(full width half maximum, FWHM)可以用来估算沿C轴方向的晶粒尺寸。基于XRD的结果,晶粒的平均直径 D 可以由Debye-Scherrer公式给出:

$$D=0.9\lambda/B\cos\theta.$$

式中 B 为衍射峰(002)的半高宽。

分析表1中的数据,可以发现衬底温度对晶粒尺寸的影响较小,这可能与等离子体形成的高能中性氧原子有关^[17]。随着等离子气中氧的比例的增加,高能中性氧原子的再溅射效应也会相应增加。因此,它可能加速晶粒的生长,同时改变薄膜初始生长阶段的表面性质。在应力不断减小的室温到200 °C温度段,ZAO薄膜的晶粒明显逐渐增大,但200~300 °C

温度范围内,晶粒尺寸基本不变。这表明衬底温度的增加,在增加表面原子的移动速度的同时,也增加了晶粒的生长速率。

表1中的数据表明,两种薄膜在200℃温度下生长的薄膜有最小的半高宽。综合前面的分析,可知200℃衬底温度下,沉积薄膜具备高质量的C轴择优取向。ZnO薄膜的最大晶粒都比ZAO的要小,同时ZAO薄膜的半高宽也明显小于ZnO,这表明Al掺杂在提高薄膜的结晶性能上具有积极作用;另一方面也说明,在Ar的等离子体环境下,用陶瓷靶溅射生长的薄膜生长速率明显高于金属靶。

2.2 光学性质

2.2.1 透射率

表2给出了不同处理温度下,ZnO和ZAO薄膜样品的光学透过率及光学带隙。

表2 ZnO和ZAO薄膜的光学透过率及光学带隙
Table 2 Optical transmission and optical band gap of ZnO and ZAO films

样品	温度/℃	光学透过率/%	光学带隙/eV
ZnO	室温	90.88	3.25
	100	91.74	3.31
	200	91.21	3.33
	300	90.51	3.34
ZAO	室温	86.11	3.42
	100	87.96	3.44
	200	89.62	3.46
	300	89.41	3.46

从表2中的数据可得出,所有薄膜的可见光透过率都在86%~92%范围内,这说明所制备的薄膜具有较好的透明性,极具应用价值。ZAO薄膜因Al的掺杂而增加了光的散射,其透过率略低于ZnO薄膜。在室温~300℃温度范围内,由于具有相似的晶粒大小和表面粗糙度,温度对ZnO薄膜的可见光透过率的影响很小。ZAO薄膜的光学透过率则在室温~200℃温度范围内随着温度的升高而增加,但到300℃时略有下降。透过率的增加,是由于晶粒的增大和表面粗糙度的减小使得光散射和吸收减弱,同时微粒边界的缺陷也变小了。

由于ZnO的本征吸收,所有薄膜在波长为400nm以下时有陡峭的吸收边。与ZnO薄膜相比,ZAO薄膜的光学吸收边有所蓝移。吸收系数 α 由以下关系式计算得到:

$$T=(1-R)^2\exp(-\alpha x) \quad (1)$$

式中: T 和 R 分别为薄膜的透过率和反射率;

x 为薄膜厚度。

薄膜的光学带隙由如下公式^[18]计算得出:

$$\alpha hv = D_0(hv - E_g)^n \quad (2)$$

式中: hv 为光子能量;

E_g 为光学带隙;

D_0 为常数。

n 为与半导体性质有关的常数,由于ZnO薄膜属于直接带隙半导体,故 n 取1/2。

经计算,得到不同温度下生长的各个样品的光学带隙(见表2),可知ZnO和ZAO薄膜的光学带隙分别在3.25~3.35eV与3.42~3.46eV范围内,显然,ZAO薄膜的光学带隙要大于ZnO薄膜。造成这一结果的原因,可能是ZnO薄膜的导电特征主要由氧空位和锌填隙原子决定,这使得其光学带隙比其体晶带隙(3.37eV)小,而在任一温度下,沉积的ZAO薄膜的光学带隙都比ZnO体晶的大。对于ZAO薄膜,Al³⁺离子代替Zn²⁺离子而使得载流子电子的浓度增加,产生Burstein-Moss效应,使得带隙变宽^[18]。ZnO为 n 型半导体,Al掺杂使得费米能级进入导带。根据Burstein-Moss效应,展宽的带隙为

$$\Delta E_g = \left(\frac{\hbar^2}{2m_{vc}^*} \right) (3\pi^2 N_c)^{2/3} \quad (3)$$

式中: ΔE_g 为光学带隙的变大量;

m_{vc}^* 为电子折合有效质量;

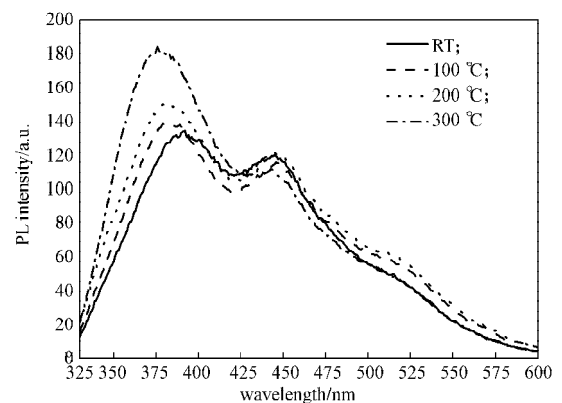
\hbar 为约化普朗克常量;

N_c 为载流子浓度。

根据式(3)所示方程,可知光学带隙随载流子浓度的增加而增大。表2中的数据表明,2种样品薄膜的光学带隙均先随衬底温度的增加而增大,随后在高温处逐渐饱和,这是由载流子随温度增加而引起的。同时,高温有利于氧气的解吸附作用,减少了体晶缺陷。载流子浓度随着衬底温度的增加达到饱和,是由于缺陷减少导致了载流子浓度较少^[19]。

2.2.2 光致发光

图2所示为试验所得不同衬底温度下沉积的样品薄膜的室温光致发光光谱图。



a) ZnO

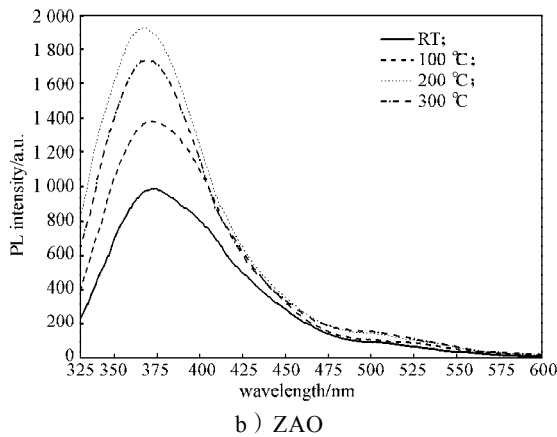


图2 不同温度下 ZnO 和 ZAO 薄膜的室温光致发光光谱
Fig. 2 Room-temperature photoluminescence spectra of ZnO and ZAO films deposited at various substrate temperatures

图2的图a中,很清晰地显示出 ZnO 薄膜有两个发射峰,一个为紫外近带边发射峰,另一个通常被认为是深能级发射的可见光发射峰。

强的近带边峰的出现是由于自由激子^[20]的复合,使其光致发光谱随着温度的变化而变化。有研究表明,不管衬底类型和生长温度如何,微弱而宽的深能级发射峰总是存在于纯 ZnO 薄膜中^[21]。低能级宽的近带发射峰在所有的样品中都能看到,但深能级的发射峰却在 Al 掺杂 ZnO 薄膜中消失了。一般说来,光致发光光谱与结晶好坏有着密切的关系,因为缺陷降低了薄膜的结晶质量。薄膜的带边光谱强度随着温度的增加而有所增加,同时伴有峰变窄现象。高温下,沉积的薄膜具有强的近带边发射峰标示着好的结晶质量。Al 掺杂减少了薄膜缺陷,因此 ZAO 薄膜中深能级发射峰消失,同时近带发射峰增强。300 °C 下沉积的 ZnO 薄膜的光致发光光谱具有较强的带边发射峰和较小的半高宽,并且深能级发射峰减弱。荧光光谱结果与光学吸收谱一致,这表明在 300 °C 下沉积的薄膜缺陷减少。

注意到图2中最强的峰不是出现在晶粒取向性最好的 200 °C 下沉积的 ZnO 薄膜,这与 300 °C 下沉积薄膜的应力较小有关。对于 ZAO 薄膜,当温度增加到 200 °C 时,近带边发射峰增加,但当温度进一步升高到 300 °C 时反而略有下降。同一温度下,ZAO 薄膜有着更强的近带发射光谱,这是由其缺陷和应力的减少、晶粒尺寸的改变和结晶质量的提高造成的。ZnO 薄膜的近带边吸收峰随衬底温度的增加发生蓝移,但 ZAO 薄膜的近带边吸收峰随着温度增加到 200 °C 时发生蓝移,再升高到 300 °C 时发生红移,这也与高温下载流子的增加导致 Burstein-Moss 效应有关。对比 ZnO 薄膜,ZAO 薄膜的近带发射峰有些蓝移,这

与透射率研究的结果一致。考虑到 ZnO 自由激子能与带隙有关,ZnO 的近带发射峰在 380 nm 左右,ZAO 的近带吸收峰移动到 370 nm,这也表明了 Al 的掺入的确引发了 Burstein-Moss 效应。

3 结论

本文利用直流磁控溅射技术,在玻璃衬底上制备了 ZnO 和 ZAO 薄膜,研究了 2 种薄膜的结构和光学性能,得到了如下结论:

1) X 射线衍射结果表明,薄膜具有良好的 C 轴择优取向生长特性,所有样品都有较强的 (002) 衍射峰,且 ZAO 薄膜的衍射峰较 ZnO 薄膜向小角度方向移动。

2) 衬底温度对薄膜的透射谱和荧光谱有着明显的影响,所有薄膜都有大于 86% 的可见光透过率和陡峭的本征吸收边,但是相对而言,ZAO 薄膜的光学透过率略低。

3) ZnO 薄膜的光学带隙小于 ZnO 体晶,但 ZAO 薄膜的光学带隙都大于 ZnO 体晶,这可能是由于 Burstein-Moss 效应导致带隙变宽引起的。

4) 光致发光谱结果显示,所有薄膜存在近带发射峰,而深能级发射峰在 ZAO 薄膜中却没有被发现,说明 Al 掺杂提高了薄膜的结晶质量。随着衬底温度的增加,近带边发射峰发生蓝移,与光学透射率中带隙 E_g 的变化趋势相似。

以上结果显示,ZnO 和 ZAO 薄膜的结构和光学性质与衬底温度有着密切的关系。为了提高薄膜的结晶度和光电性能,选择合适的衬底温度至关重要。Al 掺杂对 ZnO 薄膜的结构和光学性能有着较大的影响,光致发光光谱研究表明,ZAO 薄膜是极具潜力的紫外光电器件材料。

参考文献:

- [1] Pearton S J, Norton D P, Ip K, et al. Recent Progress in Processing and Properties of ZnO[J]. Progress in Materials Science, 2005, 50(3): 293-340.
- [2] Özgür Ü, Alivov Y I, Liu C, et al. A Comprehensive Review of ZnO Materials and Devices[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(4), 041301: 1-103
- [3] Martínez O, Plaza J L, Mass J, et al. Luminescence of Pure and Doped ZnO Films Synthesized by Thermal Annealing on GaSb Single Crystals[J]. Superlattices and Microstructures, 2007, 42(1): 145-151.
- [4] Kluth O, Schöpe G, Hüpkes J, et al. Modified Thornton Model for Magnetron Sputtered Zinc Oxide: Film

- Structure and Etching Behaviour[J]. *Thin Solid Films*, 2003, 442(1): 80–85.
- [5] Ma J, Ji F, Zhang D, et al. Optical and Electronic Properties of Transparent Conducting ZnO and ZnO: Al Films Prepared by Evaporating Method[J]. *Thin Solid Films*, 1999, 357(2): 98–101.
- [6] Khandelwal R, Singh A P, Kapoor A, et al. Effects of Deposition Temperature on the Structural and Morphological Properties of Thin ZnO Films Fabricated by Pulsed Laser Deposition[J]. *Optics and Laser Technology*, 2008, 40(2): 247–251.
- [7] Lamb D A, Irvine S J C. Growth Properties of Thin Film ZnO Deposited by MOCVD with *n*-Butyl Alcohol as the Oxygen Precursor[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 273(1): 111–117.
- [8] Natsume Y, Sakata H. Zinc Oxide Films Prepared by Sol-Gel Spin-Coating[J]. *Thin Solid Films*, 2000, 372(1): 30–36.
- [9] Lin S S, Huang J L, Šajgalik P. Effects of Substrate Temperature on the Properties of Heavily Al-Doped ZnO Films by Simultaneous rf and dc Magnetron Sputtering[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 190(1): 39–47.
- [10] Oh D C, Setiawan A, Kim J J, et al. Characterization of N-Doped ZnO Layers Grown on (0 0 0 1) GaN/Al₂O₃ Substrates by Molecular Beam Epitaxy[J]. *Current Applied Physics*, 2004(4): 625–629.
- [11] Meng L J, Dos Santos M P. Direct Current Reactive Magnetron Sputtered Zinc Oxide Thin Films: The Effect of the Sputtering Pressure[J]. *Thin Solid Films*, 1994, 250(1): 26–32.
- [12] Singh S, Srinivasa R S, Major S S. Effect of Substrate Temperature on the Structure and Optical Properties of ZnO Thin Films Deposited by Reactive rf Magnetron Sputtering [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(24): 8718–8722.
- [13] Cebulla R, Wendt R, Ellmer K. Al-Doped Zinc Oxide Films Deposited by Simultaneous rf and dc Excitation of a Magnetron Plasma: Relationships Between Plasma Parameters and Structural and Electrical Film Properties[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(2): 1087–1095.
- [14] Chen M, Pei Z L, Sun C, et al. Surface Characterization of Transparent Conductive Oxide Al-Doped ZnO Films[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2000, 220(3): 254–262.
- [15] Li Li, Fang Liang, Chen Ximing, et al. Effect of Annealing Treatment on the Structural, Optical, and Electrical Properties of Al-Doped ZnO Thin Films[J]. *Rare Metals*, 2007, 26(3): 247–253.
- [16] Kappertz O, Drese R, Wuttig M. Correlation Between Structure, Stress and Deposition Parameters in Direct Current Sputtered Zinc Oxide Films[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2002, 20(6): 2084–2095.
- [17] Suche M, Christoulakis S, Katsarakis N, et al. Comparative Study of Zinc Oxide and Aluminum Doped Zinc Oxide Transparent Thin Films Grown by Direct Current Magnetron Sputtering[J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(16): 6562–6566.
- [18] Mandal S, Singha R K, Dhar A, et al. Optical and Structural Characteristics of ZnO Thin Films Grown by rf Magnetron Sputtering[J]. *Materials Research Bulletin*, 2008, 43(2): 244–250.
- [19] Fu Engang, Zhuang Daming, Zhang Gong, et al. Substrate Temperature Dependence of the Properties of ZAO Thin Films Deposited by Magnetron Sputtering[J]. *Applied Surface Science*, 2003, 217(1): 88–94.
- [20] Bagnall D M, Chen Y F, Zhu Z, et al. High Temperature Excitonic Stimulated Emission from ZnO Epitaxial Layers [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(8): 1038–1040.
- [21] Lim J, Shin K, Woo Kim H, et al. Photoluminescence Studies of ZnO Thin Films Grown by Atomic Layer Epitaxy [J]. *Journal of Luminescence*, 2004, 109(3): 181–185.

(责任编辑: 廖友媛)

