

掺铪氧化锌红外透明导电薄膜

赵雯媛^{1,2}, 张梦瑶^{1,2}, 毕然^{1,2}, 郑传涛^{1,2*}, 王一丁^{1,2}¹ 吉林大学集成光电子学国家重点联合实验室, 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012;² 吉林省红外气体传感技术工程研究中心, 吉林 长春 130012

摘要 采用射频磁控溅射法在蓝宝石衬底上制备了 Hf:ZnO (HZO) 薄膜, 研究了氧气流速和退火温度对薄膜微观结构和光电性能的影响。为了提高薄膜的结晶性, 将制备的薄膜在 800 °C 下退火 30 min, 并自然冷却到室温。测试、分析了退火后薄膜的微观结构和光电性能。研究发现, 随着氧气流速从 0 增加到 0.6 mL/min, 薄膜的致密度逐渐增大, 电阻率逐渐降低, 而当氧气流速继续增大到 0.8 mL/min 时, 薄膜的结晶性恶化, 电阻率突然升高。氧气流速为 0.6 mL/min 时制备的薄膜光电性能最佳, 利用傅里叶红外光谱仪和霍尔测试仪进行测试, 得到薄膜在 3~5 μm 波段的平均透过率为 83.87%, 电阻率为 $1.66 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, 载流子迁移率为 $13.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 载流子浓度为 $2.82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。利用 X 射线衍射仪进行测试, 发现薄膜样品具有 ZnO 的六方纤锌矿结构, 并沿 (002) 方向择优生长, 通过扫描电子显微镜可以看到薄膜表面生成致密均匀的球状结构颗粒。这种薄膜可以用作 3~5 μm 波段的透明窗口。

关键词 薄膜; 磁控溅射; 中红外波段; 透明导电薄膜; 氧化锌; Hf:ZnO

中图分类号 O484

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2031002

Infrared Hf-doped ZnO Transparent Conductive Film

Zhao Wenyuan^{1,2}, Zhang Mengyao^{1,2}, Bi Ran^{1,2}, Zheng Chuantao^{1,2*}, Wang Yiding^{1,2}¹ State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China;² Jilin Provincial Engineering Research Center of Infrared Gas Sensing Technique, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Hf:ZnO (HZO) films were prepared on sapphire substrate by radio frequency magnetron sputtering. The effects of oxygen flow rate and annealing temperature on the microstructure and photoelectric properties of the films were studied. For better crystallinity, the prepared films were annealed at 800 °C for 30 min and then naturally cooled to room temperature. The microstructure and photoelectric properties of annealed films were tested and analyzed. The results showed that as the oxygen flow rate increased from 0 to 0.6 mL/min, the microstructure became denser and the resistivity gradually decreased. However, when the oxygen flow rate increased to 0.8 mL/min, the crystallinity deteriorated and the resistivity suddenly increased. The HZO film prepared at an oxygen flow rate of 0.6 mL/min obtained the best photoelectric properties. The results of the Fourier transform infrared (FTIR) spectrometer manifested that the average transmittance of this film in the 3–5 μm waveband was 83.87% and the Hall effect test results demonstrated that its resistivity, carrier mobility, and carrier concentration were $1.66 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, $13.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, and $2.82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, respectively. Meanwhile, the XRD results showed that the annealed films presented ZnO hexagonal wurtzite structure and grew in the (002) direction. The SEM results revealed the dense and uniform spherical particle structure on the surface of the films. In a nutshell,

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-04-24; 录用日期: 2021-05-06

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700101)、国家自然科学基金(61960206004, 61775079, 61627823)、吉林省科技发展计划项目(20180201046GX, 20190101016JH)

通信作者: *zhengchuantao@jlu.edu.cn

HZO films prepared at an oxygen flow rate of 0.6 mL/min and an annealing temperature of 800 °C can be used as the transparent window material for the 3–5 μm waveband.

Key words thin films; magnetron sputtering; mid-infrared band; transparent conductive film; ZnO; Hf:ZnO

OCIS codes 310.1860; 310.6860; 310.6870; 310.7005

1 引言

透明导电氧化物 (transparent conductive oxide, TCO) 是一种既透光又导电的特殊材料, 可应用于太阳能电池^[1]、显示器件^[2-3] 中, 如 In_2O_3 基薄膜, 它的电阻率达到 $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 在可见光和近红外波段的透过率达到 90%^[4-5], 但是它在红外波段的反射率高, 无法应用。为此, 本课题组利用磁控溅射法制备了 Hf: In_2O_3 薄膜^[6] 和 W: $\text{In}_2\text{O}_3/\text{Cu}/\text{W}: \text{In}_2\text{O}_3$ 多层薄膜^[7], 二者在 3~5 μm 波段均具有良好的透过率。但 In 是稀有金属, 因此, 研究可以替代 In_2O_3 的 TCO 材料具有重要的意义。ZnO 薄膜凭借着其优异的光电性能^[8-10] 和丰富的资源储备成为替代 In_2O_3 薄膜的候选材料。

研究透明导电薄膜的关键是提高材料的载流子迁移率, 因为这既能降低红外波段载流子的吸收率, 又能提高电导率^[11]。掺杂与材料不同族的元素可以提高电导率。对于 ZnO 薄膜, 掺杂元素可以是 III A 族元素和卤族元素, 其中 III A 族元素取代 Zn^{2+} 并产生电子, 进而提高载流子浓度, 同时产生位于导带底部的杂质能级; 而卤族元素取代 O^{2-} 并产生电子, 同时在价带顶部引入杂质能级。Wang 等^[12-13] 制备了掺杂 F 和 Ga 的 ZnO (FGZO) 薄膜、掺杂 F 和 Al 的 ZnO (FAZO) 薄膜, 所制备薄膜的电导率虽然提高了, 但是上述掺杂元素的半径与 Zn^{2+} 、 O^{2-} 相差较大, 作为替位式原子, 当其取代 Zn^{2+} 或 O^{2-} 时, 会产生一定程度的晶格畸变。本文将在 ZnO 中掺杂 Hf 元素 (即 HZO 薄膜), Zn^{2+} 的半径为 74 pm, Hf^{4+} 的半径为 71 pm, 二者半径接近, 这会减小由掺杂引起的晶格畸变, 从而降低由晶格散射引起的迁移率。此外, 当 Al^{3+} 和 Ga^{3+} 取代 Zn^{2+} 时, 产生一个自由电子, 而 Hf^{4+} 取代 Zn^{2+} 时, 产生两个自由电子。若仅通过外来掺杂提升载流子浓度, 掺杂 Hf^{4+} 比掺杂 III A 族元素需要的掺杂量更少^[14], 从而减小由杂质离子散射引起的迁移率。因此, 对 HZO 薄膜的研究很有必要。

2 薄膜的制备和测试

采用台湾亮杰公司生产的 SP-203 型磁控溅射仪, HZO 靶材纯度为 99.99%, 掺杂浓度 (质量分

数) 为 2%, 靶材到衬底的距离为 20 cm。首先, 将蓝宝石衬底依次用丙酮、乙醇和去离子水分别超声清洗 10 min, 去除表面的灰尘, 释放表面聚集电荷; 然后, 将清洗后的衬底放到真空室内, 关闭舱门并抽真空, 待真空室的压强达到 5×10^{-5} Pa 时, 开始向镀膜室通入纯度为 99.99% 的 Ar 气体, 流速控制在 20 mL/min, 衬底温度设置为 50 °C。当气压达到 2×10^{-2} Pa 时, 关闭挡板进行预溅射以去除靶材表面的杂质, 20 min 后打开挡板开始溅射, 氧气流速分别设置为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 mL/min, 溅射总时长为 150 min。

为了形成良好的欧姆接触, 降低由薄膜表面粗糙不平引起的台阶势垒, 在 800 °C 下将薄膜退火 30 min 并使其自然冷却到室温。用 TTR III 型组合式多功能 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 分析仪测试薄膜样品的生长方向和结构参数, 用 JSM-7500F 型扫描电子显微镜 (scanning electronic microscopy, SEM) 测试薄膜样品的表面形貌, 用 XP-2 型台阶仪测试 HZO 薄膜样品的厚度, 用傅里叶红外 (Fourier transform infrared, FTIR) 光谱仪测试薄膜样品在 2.5~7.5 μm 波段的透过率, 选择功函数值较小的金属 Ag, 利用热蒸镀机在薄膜样品上蒸镀电极, Ag 电极的厚度为 200 nm, 形成导电沟道, 采用霍尔效应测试仪测量薄膜样品的导电类型、载流子浓度、载流子迁移率和电阻率。

3 结果和讨论

3.1 XRD 测试结果和分析

薄膜的微观结构如图 1 所示。其中, 图 1(a) 是在不同的退火温度下 (未退火、400 °C、600 °C、800 °C) HZO 薄膜的 XRD 衍射图, 对应的结构参数如表 1 所示。从图 1(a) 可以看出, 在不同退火温度下薄膜的 XRD 衍射谱都具有尖锐且峰值很强的 (002) 衍射峰、平缓且峰值很弱的 (101) 衍射峰, 它们对应于纤锌矿结构的 ZnO 衍射峰。此外, 退火后的薄膜衍射谱显示出微弱的 (004) 衍射峰, 它是 (002) 衍射峰的二级衍射峰, 故峰值较弱。随着退火温度的增加, (002) 和 (004) 衍射峰逐渐变强, (101) 衍射峰逐渐减弱直至消失, 这表明高温退火更有利于多晶薄膜沿垂直于衬底的方向生长。在未退火、

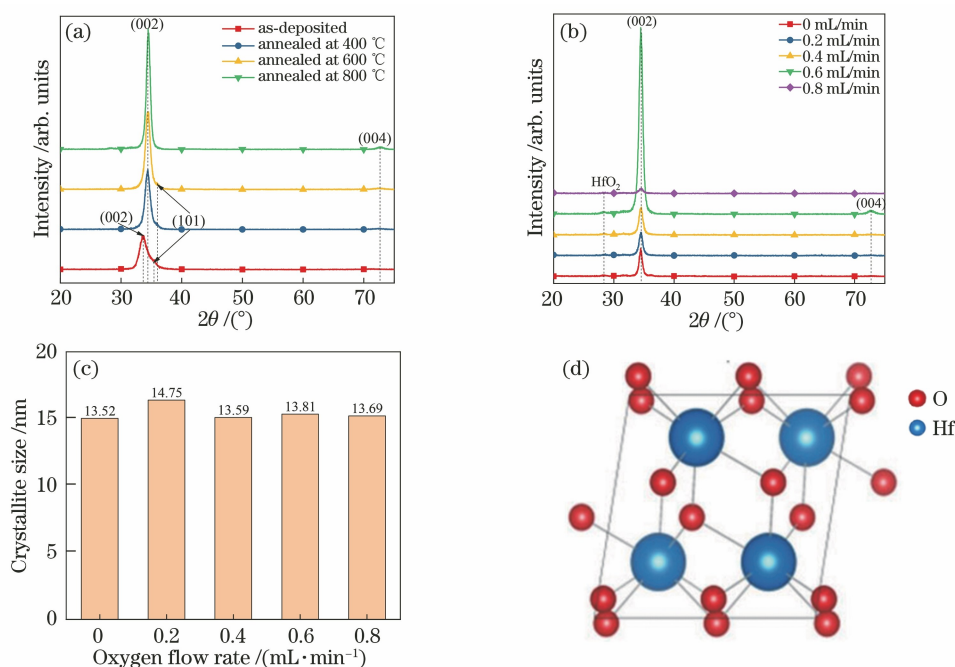


图 1 HZO 薄膜的微观结构。(a)不同退火温度下薄膜的 XRD 衍射图谱;(b)不同氧气流速下薄膜的 XRD 衍射图谱;
(c)不同氧气流速下薄膜的晶粒尺寸;(d) HfO_2 (m 相)的结构

Fig. 1 Microstructure of the HZO films. (a) XRD spectra of films under different annealing temperatures; (b) XRD spectra of films under different oxygen flow rates; (c) crystallite size of films under different oxygen flow rates; (d) structure of the HfO_2 (m phase), reproduced with permission

表 1 不同退火条件下 HZO 薄膜的结构参数

Table 1 Structural parameters of HZO films under different annealing conditions

Annealing condition	$2\theta / (^{\circ})$	$d / \text{\AA}$	FWHM $/ (^{\circ})$	D / nm
As-deposited	33.776	2.6515	1.181	8.00
Annealed at 400 $^{\circ}\text{C}$	34.410	2.6041	0.882	10.79
Annealed at 600 $^{\circ}\text{C}$	34.423	2.6032	0.802	11.87
Annealed at 800 $^{\circ}\text{C}$	34.485	2.5986	0.652	14.61

400 $^{\circ}\text{C}$ 退火和 600 $^{\circ}\text{C}$ 退火的薄膜衍射谱中,没有观察到 Zn 单质、Hf 单质和其他氧化物的衍射峰,这表明薄膜中没有其他的相,掺杂物 HfO_2 没有改变 ZnO 的晶体结构, Hf^{4+} 替换了 ZnO 晶体中晶格点位置的 Zn^{2+} 。但是,当退火温度增加到 800 $^{\circ}\text{C}$ 时,在其薄膜衍射谱中观察到微弱的 HfO_2 衍射峰,且与标准 PDF 卡片 06-0318 匹配良好,对应的是 $\text{P}2_1/c$ 单斜相结构,即 HfO_2 结构中能量最低的 m 相,其结构如图 1(d) 所示^[15],这说明高温会析出 HfO_2 。表 1 给出了不同退火温度下 HZO 薄膜的结构参数,可以看出,随着退火温度不断增加,衍射峰的位置逐渐右移,这是由掺杂的 Hf 元素引起的。根据 Scherrer 公式,晶粒大小 D 可表示为

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

式中: D 的单位为 nm; k 为校正因子,一般取 0.89;

λ 为 X 射线的波长,Cu-K α 射线波长取 0.154 nm; β 为半峰全宽(full width at half maxima, FWHM),单位为 $(^{\circ})$,在计算中转换为弧度; θ 为衍射角,单位为 $(^{\circ})$ 。因为 Hf^{4+} 的半径大于 Zn^{2+} 的半径,Hf 取代 Zn 的反应发生后, D 增大,从而 θ 增大,衍射峰右移,且退火温度越高,右移越明显。同时,晶面间距也逐渐减小,这种变化趋势满足 Bragg 公式: $2d \sin \theta = n\lambda$,其中 d 为晶面间距, n 为衍射级数。从图 1(a)和表 1 可以看出,在 800 $^{\circ}\text{C}$ 退火条件下生长的薄膜的结晶性最好,而且退火处理使薄膜重新生长成更大晶粒的多晶薄膜。图 1(b)为在不同氧气流速下制备的、经 800 $^{\circ}\text{C}$ 退火后的 HZO 薄膜的 XRD 衍射图,可以看出:随着氧气流速从 0 mL/min 增大至 0.6 mL/min,(002) 衍射峰逐渐增强,氧气流速为 0.6 mL/min 时制备的薄膜结晶性最好;随着氧气流速继续增加到 0.8 mL/min,(002) 衍射峰明显减

弱。图 1(c)所示为不同氧气流速下薄膜的平均晶粒尺寸,发现氧气流速对晶粒尺寸的影响小,这与 Guo 等^[16]的研究结果一致。因此,通过表 1、图 1(a)和图 1(b)可以确定,在氧气流速为 0.6 mL/min 条件下制备的、经 800 °C 退火 30 min 后的 HZO 薄膜具有最佳的微观结构。

3.2 SEM 测试结果和分析

为了更加直观地观察氧气流速对薄膜晶粒尺寸和结晶效果的影响,测试了在不同氧气流速下制备

的 HZO 薄膜的表面形貌,结果如图 2 所示,薄膜都在 800 °C 下退火 30 min。从图 2 可以看到 HZO 薄膜具有圆形颗粒状结构,没有出现明显的梭形或楔形结构,这是薄膜垂直于衬底方向生长的结果,与 XRD 测试结果吻合。而且在不同氧气流速下制备的薄膜都具有均匀且平整的颗粒,未见明显的缺陷和裂纹。此外,薄膜的平均晶粒尺寸相差小,且满足 XRD 测试计算得出的晶粒尺寸规律,这说明氧气流速对晶粒大小的影响并不明显。

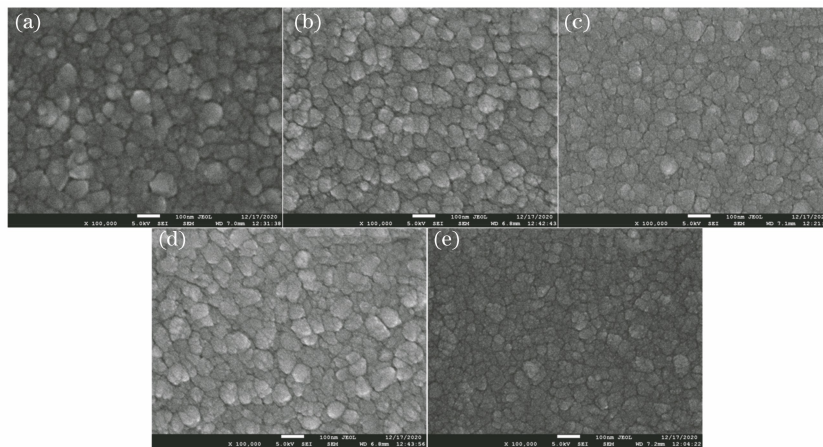


图 2 不同氧气流速下的 HZO 薄膜表面形貌。(a) 0 mL/min; (b) 0.2 mL/min;

(c) 0.4 mL/min; (d) 0.6 mL/min; (e) 0.8 mL/min

Fig. 2 Surface morphology of the HZO films under different oxygen flow rates. (a) 0 mL/min; (b) 0.2 mL/min;

(c) 0.4 mL/min; (d) 0.6 mL/min; (e) 0.8 mL/min

3.3 台阶仪测试结果和分析

表 2 所示为 0~0.8 mL/min 氧气流速下制备的薄膜的厚度。可以看出,氧气流速从 0 mL/min 增加到 0.2 mL/min 时,薄膜变厚,而后随着氧气流速进一步增加,薄膜逐渐变薄。另外,退火处理使薄膜重新结晶,因此薄膜变薄。影响厚度的因素主要有以下两种:1) 无氧环境中制备的薄膜有较多的氧空位,通入氧气后,氧空位与通入的氧气进行一系列反应,最终生成晶格位置处的中性氧原子,故氧气分

子填补了部分晶格缺陷,该反应的结果是薄膜变厚;2) 根据磁控溅射的原理,薄膜中的 ZnO 粒子来自 Ar 电离出的 Ar⁺轰击靶材表面产生的 ZnO 颗粒,Ar⁺的能量和数量决定了薄膜的沉积速率。在溅射腔体中通入氧气后,氧含量增加,使得氩气所占的压强比减小,而气体电离的总能量未变,因此 Ar⁺的能量和数量相对减少,薄膜的沉积速率减小。该反应的结果是薄膜变薄。表 2 所示的厚度变化趋势是两种反应共同作用的结果。

表 2 不同氧气流速下制备的 HZO 薄膜厚度

Table 2 Thickness of HZO films under different oxygen flow rates

Annealing condition	Film thickness / nm				
	0 mL/min	0.2 mL/min	0.4 mL/min	0.6 mL/min	0.8 mL/min
As-deposited	370	440	343	341	300
Annealed at 800 °C	287	326	235	226	153

3.4 FTIR 测试结果和分析

图 3 给出了不同条件下制备的薄膜在 2.5~7.5 μm 波段的透过率曲线,插图是放大后的 3~5 μm 波段内的透过率曲线。可以看出:随着氧气流速从 0 mL/min 增加到 0.2 mL/min,透过率降低,

而当氧气流速从 0.2 mL/min 增加到 0.6 mL/min 时,透过率逐渐升高,其原因与 3.3 节中引起厚度变化的原因一致。此外, HZO 薄膜在 3~5 μm 波段有较高的透过率,受蓝宝石衬底的限制,在 6 μm 以后透过率急剧下降,薄膜的透过率随着波长的增加

呈下降趋势,这是由吸收作用引起的。红外波段的吸收作用可分为以下三种:自由电子吸收、电子跃迁吸收和晶格振动吸收^[17-18]。当载流子浓度大于 10^{20} cm^{-3} 时,自由电子吸收占据主导地位^[19];当光子能量大于禁带宽度时,即 $\lambda \leq 1.24/E_g$ (其中 λ 的单位为 μm , E_g 的单位为 eV) 时,电子跃迁吸收占据主导地位;晶格振动主要与温度有关,由声子描述,在一定温度下,声子与光子相互作用引起吸收。因此,对于图 3 给出的 HZO 薄膜光学特性而言,吸收作用主要是由晶格振动吸收和杂质吸收引起的。

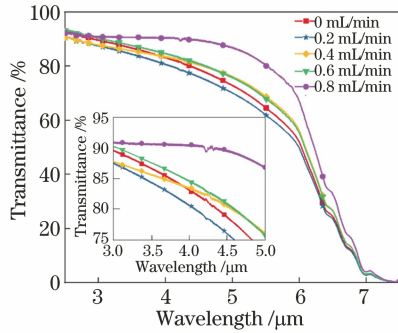


图 3 HZO 薄膜的光学特性
Fig. 3 Optical properties of HZO films

3.5 霍尔测试结果和分析

经 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 退火处理 30 min 后的薄膜,它的电阻率、载流子迁移率和载流子浓度随氧气流速的变化关系如图 4 所示,测试得到的霍尔系数都为负数,故所有薄膜都是 n 型薄膜。从图 4 可以看出,随着氧气流速从 0 mL/min 增加到 0.6 mL/min,薄膜的迁移率逐渐升高。这是因为随着氧气流速增加,薄膜内部的氧空位变成了晶格位置的中性氧,捕获载流子的氧空位缺陷数量逐渐减少,散射减弱,从而使得载流子迁移率增大。而随着氧气流速进一步增加,氧气所占的压强比值增大,导致薄膜沉积速率变慢,结晶性恶化,晶粒尺寸减小,载流子迁移率明显下降,这与 XRD 和 SEM 测试结果一致。在 0.6 mL/min 的氧气流速下,获得了最低电阻率 ($1.66 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$) 和最高迁移率的薄膜 ($13.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。薄膜中的自由电子主要来自氧空位和掺杂元素 Hf,随着氧气流速的增加,氧空位逐渐减少,并且 Hf^{4+} 取代 Zn^{2+} 的概率降低,故载流子浓度下降。此外,Roschke 等^[20]提出了迁移率随掺杂浓度变化的模型,即

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + (N/N_{\text{ref}})^{\alpha}}, \quad (2)$$

式中: μ 为迁移率; μ_{\min} 为高掺杂时的迁移率,此时

杂质离子散射是主要的散射机制; μ_{\max} 为未掺杂时的迁移率,此时晶格散射是主要的散射机制; N 为掺杂浓度; N_{ref} 表示迁移率为 $(\mu_{\max} + \mu_{\min})/2$ 时对应的掺杂浓度; α 表示从 μ_{\min} 变化到 μ_{\max} 的速度,而载流子浓度与掺杂浓度成正比。因此,随着载流子浓度减小,迁移率增大。薄膜的电阻率满足公式

$$\rho = \frac{1}{N_e e \mu}, \quad (3)$$

式中: ρ 为电阻率; N_e 为载流子浓度; e 为电子电量。综合考虑 XRD、SEM、FTIR 测试结果,发现在氧气流速为 0.6 mL/min 条件下得到的薄膜,经过 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 退火处理后具有最佳的微观结构和光电性能。

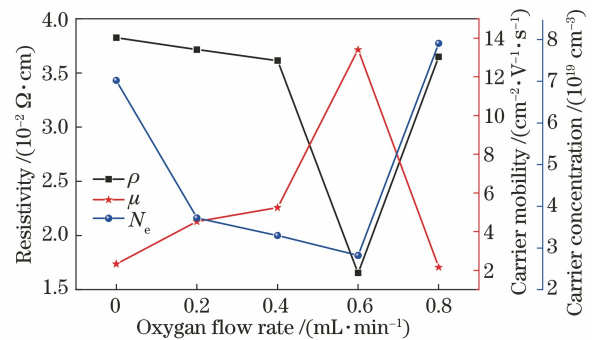


图 4 HZO 薄膜的电学特性
Fig. 4 Electrical properties of the HZO films

4 结 论

采用射频磁控溅射法制备了 HZO 薄膜,研究了氧气流速和退火条件对薄膜的微观结构、厚度和光电性能的影响。XRD 测试结果表明 HZO 薄膜具有纤锌矿结构,退火处理可使晶粒尺寸增加,晶面间距减小,衍射峰右移;氧气含量对晶粒尺寸的影响小,但对衍射峰强度的影响较大。SEM 测试结果显示所制备的薄膜具有致密均匀的圆形颗粒状结构。从 FTIR 测试结果可以看出,薄膜在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的平均透过率超过 80%。霍尔测试结果表明在氧气流速为 0.6 mL/min 时,薄膜的电阻率低至 $1.66 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$,此时对应的迁移率和载流子浓度分别为 $13.4 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $2.82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。因此,在氧气流速为 0.6 mL/min,退火温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下制备的 HZO 薄膜具有最佳的微观结构和光电性能,可用作 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的红外窗口材料。

参 考 文 献

[1] Zhao X Y, Shen H P, Zhang Y, et al. Aluminum-

- doped zinc oxide as highly stable electron collection layer for perovskite solar cells [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(12): 7826-7833.
- [2] Zeumault A, Subramanian V. Mobility enhancement in solution-processed transparent conductive oxide TFTs due to electron donation from traps in high- k gate dielectrics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(6): 955-963.
- [3] Ye Y T, Ma H, Sun C L, et al. Research progress on flexible photonic materials and devices [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(3): 030001.
叶羽婷, 马辉, 孙春雷, 等. 柔性光子材料与器件的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(3): 030001.
- [4] Taha H, Jiang Z T, Henry D J, et al. Improving the optoelectronic properties of titanium-doped indium tin oxide thin films [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(6): 065011.
- [5] Lu Z D, Meng F Y, Cui Y F, et al. High quality of IWO films prepared at room temperature by reactive plasma deposition for photovoltaic devices [J]. *Journal of Physics D*, 2013, 46(7): 075103.
- [6] Tian F, Bi R, Zhao W Y, et al. Infrared indium oxide Hf-doped transparent conductive films [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9): 0931001.
田丰, 毕然, 赵雯媛, 等. 氧化铟掺铪红外透明导电薄膜[J]. *光子学报*, 2020, 49(9): 0931001.
- [7] Han F B, Zhao W Y, Bi R, et al. Influence mechanism of Cu layer thickness on photoelectric properties of IWO/Cu/IWO films [J]. *Materials*, 2019, 13(1): 113.
- [8] Guo K, Yu T, Song B B, et al. Fabrication and optoelectronic properties of ZnO/Ag/ZnO composite films at room temperature [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 103102.
郭凯, 于涛, 宋斌斌, 等. 常温下 ZnO/Ag/ZnO 复合薄膜的制备及其光电特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 103102.
- [9] Guo D S, Chen Z N, Wang D K, et al. Effects of annealing temperature on crystal quality and photoelectric properties of Al-doped ZnO thin film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0403002.
郭德双, 陈子男, 王登魁, 等. 退火温度对铝掺杂氧化锌薄膜晶体质量及光电性能的影响[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0403002.
- [10] Mo G K, Liu J H, Zou Z L, et al. Preparation of low-resistivity GZO thin films using pulsed laser deposition and investigation of optoelectronic properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1003001.
莫观孔, 刘家辉, 邹卓良, 等. 脉冲激光沉积法制备低阻掺镓氧化锌薄膜及其光电性能[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1003001.
- [11] Guo S, Yang L, Dai B, et al. The research progress about the effect of carrier concentration and mobility on the infrared transparent properties and conductive properties of oxide thin films [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2018, 48(6): 583-595.
郭帅, 杨磊, 代兵. 载流子浓度与迁移率对氧化物薄膜红外透明导电性能影响的研究进展[J]. *中国科学(技术科学)*, 2018, 48(6): 583-595.
- [12] Wang Y F, Song J M, Zhang J, et al. Effect of substrate temperature on F and Al co-doped ZnO films deposited by radio frequency magnetron sputtering[J]. *Solar Energy*, 2019, 194: 471-477.
- [13] Wang Y F, Song J M, Guo Y J, et al. Optimization of physical properties of transparent conductive F and Ga Co-doped ZnO films for optoelectronic applications [J]. *Materials Letters*, 2020, 269: 127591.
- [14] Wang Y F, Zhang X D, Meng X D, et al. Simulation, fabrication, and application of transparent conductive Mo-doped ZnO film in a solar cell [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 145: 171-179.
- [15] Qi Y B, Singh S, Lau C, et al. Stabilization of competing ferroelectric phases of HfO₂ under epitaxial strain[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(25): 257603.
- [16] Guo S, Yang L, Zhang X P, et al. Modulation of optical and electrical properties of In₂O₃ films deposited by high power impulse magnetron sputtering by controlling the flow rate of oxygen[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(17): 21590-21595.
- [17] Liu E K, Zhu B S, Luo J S. The physics of semiconductors [M]. 7th ed. Beijing: Electronics industry Press, 2008: 281-285.
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学[M]. 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 281-285.
- [18] Yu H Z. Infrared optical material [M]. 2nd ed. Beijing: Defense Industry Press, 2015: 65-68.
余怀之. 红外光学材料[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2015: 65-68.
- [19] Cheng L, Zhu S, Zheng W, et al. Ultra-wide spectral range (0.4–8 μm) transparent conductive ZnO bulk single crystals: a leading runner for mid-infrared optoelectronics [J]. *Materials Today Physics*, 2020, 14: 100244.
- [20] Roschke M, Schwierz F. Electron mobility models for 4H, 6H, and 3C SiC[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(7): 1442-1447.