

衬底温度对柔性硫化锌薄膜结构与光学性能的影响

李远洁^{1,2*} 朱瑄³ 赵玉清¹

(1. 西安交通大学电子科学与工程学院 西安 710049; 2. 西安交通大学深圳研究院 深圳 518057;
3. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710054)

Effect of Substrate Temperature on Structural and Optical Properties of Flexible ZnS Thin Films

LI Yuanjie^{1,2*}, ZHU Xuan³, ZHAO Yuqing¹

(1. Department of Electronic Science and Engineering, University of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shenzhen Academy of Xi'an Jiaotong University, Shenzhen 518057, China; 3. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, University of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

Abstract Transparent zinc sulfide (ZnS) thin films were deposited on flexible polyimide(PI), In-doped SnO₂ (ITO) coated glass, and quartz glass substrates by radio frequency (RF) magnetron sputtering at different substrate temperatures. The effects of substrate temperatures on the crystal structure, optical transmittance, refractive index, and surface morphology properties of ZnS films have been systematically studied. The films showed preferential growth of ZnS (111) crystal plane with increasing substrate temperature. The average optical transmittance of the flexible and rigid ZnS films is above 80% and 85% in the visible and infrared spectral range, respectively. The refractive index of the flexible ZnS films is 2.21–2.56 in the 400 nm–890 nm wavelength range. In addition, the refractive index of the rigid ZnS films deposited at 300 °C is 2.26 at 890 nm wavelength. The surface roughness and film thickness of the flexible ZnS films decreased with increasing substrate temperature, reaching a minimum of 2.99 nm at 300 °C. The optimum substrate temperature for the flexible ZnS films is 200 °C–300 °C to obtain the optimized performance of ZnS-based flexible optoelectronic devices.

Keywords Flexible ZnS thin films, Optical transmittance, RF magnetron sputtering, Refractive index

摘要 本文利用射频磁控溅射薄膜沉积技术在柔性聚酰亚胺(PI)、氧化铟锡(ITO)玻璃及石英玻璃衬底上制备了透明硫化锌(ZnS)薄膜。通过改变生长过程中的衬底温度,全面系统地研究了衬底温度对柔性和刚性 ZnS 薄膜的晶体结构、光透过率、光学常数以及表面性能影响的规律。研究表明升高衬底温度有利于形成 ZnS 薄膜(111)晶面的择优取向生长。不同衬底温度条件下制备的柔性和刚性 ZnS 薄膜在可见光波长范围内的平均光透过率均大于 80%;在红外波长范围的平均光透过率达到 85%。柔性 ZnS 薄膜在 400 nm–890 nm 波长范围内的光学折射率为 2.21–2.56。刚性 ZnS 薄膜的光学折射率随着衬底温度的升高有所增加,当衬底温度为 300 °C 时,刚性 ZnS 薄膜在 890 nm 波长处的折射率达到 2.26。柔性 ZnS 薄膜厚度及表面粗糙度均随着衬底温度的升高而降低,当衬底温度为 300 °C 时,柔性 ZnS 薄膜表面均方根粗糙度达到最小值 2.99 nm。为实现高性能柔性 ZnS 光电器件,应控制生长柔性 ZnS 薄膜的衬底温度在 200 °C–300 °C,以获得最优化的器件性能。

关键词 柔性 ZnS 薄膜 光透过率 射频磁控溅射 光学折射率

中图分类号: O472, TN304.9

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202207019

硫化锌(ZnS)是一种具有直接跃迁型宽能带的 II-VI 族化合物半导体,闪锌矿和纤锌矿晶体结构

ZnS 的室温禁带宽度分别为 3.72 eV 和 3.77 eV^[1-7]。由于 ZnS 具有在可见光和红外波长范围内较高的

收稿日期: 2022-07-27

基金项目: 深圳市科技计划基础研究项目(JCYJ20180306170801080)

* 联系人: Tel: 15891749032; E-mail: liyuanjie@mail.xjtu.edu.cn

透过率,稳定的化学性质和热稳定性等优点,在荧光发光器件、太阳能电池、光电探测器件以及航空航天等领域有着广泛的应用前景^[8-14]。近年来随着柔性电子技术的发展,人们对高性能光电器件的需求也在不断增加,期望此类器件实现可弯曲/可便携,能够附合各种曲面结构,甚至可以舒适地贴在皮肤表面以获得监控信息和诊断结果。因此,多功能智能化的柔性电子技术要求在柔性衬底上实现常温或低温制备大面积均匀的薄膜及纳米结构材料,同时该材料需具备多功能集成化、可调控、稳定性高及生物无毒性等各项性能。此外,目前最具应用价值之一的铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳能电池主要利用硫化镉(CdS)作为缓冲层,然而金属镉对人体和环境均有较大的毒性。用宽禁带半导体 ZnS 替代 CdS 用于 CIGS 太阳能电池中的缓冲层,不仅能够提高短波长范围内太阳能量的吸收,而且大大降低了对环境的影响和危害。

研究表明,ZnS 薄膜可通过电子束蒸发、金属有机化学气相沉积、溶胶凝胶和磁控溅射等薄膜生长技术制备^[15-19]。与其它技术相比,磁控溅射法具有薄膜均匀性好、生长速度快和薄膜性能可重复性高等优势,适合制备大面积性能均匀的 ZnS 薄膜。兰州空间技术物理研究所李坤等^[20]研究了电子束蒸发技术中离子源偏压和沉积温度对玻璃基片上制备的 ZnS 薄膜性能的影响规律,发现镀膜过程中沉积温度对 ZnS 薄膜光学性能与结晶特性影响较大。Vall 等^[21]报道了利用射频磁控溅射在玻璃和硅片上制备 ZnS 薄膜,研究表明射频溅射功率对 ZnS 薄膜的表面形貌、晶粒尺寸和光学性能有直接的影响。因此,全面系统地研究薄膜制备工艺参数对 ZnS 薄膜性能的影响规律有着重要的科学意义和应用价值。

目前国内外对柔性衬底上制备 ZnS 薄膜及相关器件的应用仍处于前沿科学研究阶段,尚未有成熟的产品应用于市场。本论文研究工作主要利用射频磁控溅射技术,在透明柔性聚酰亚胺(PI)、氧化铟锡(ITO)玻璃及石英玻璃衬底上分别生长 ZnS 薄膜,通过调控薄膜生长过程中的衬底加热温度,系统地研究了衬底温度对柔性 ZnS 薄膜的晶体结构、光透过率、光学常数以及表面形貌等特性的影响规律,同时对柔性和刚性衬底上制备的 ZnS 薄膜性能进行比较,为实现基于柔性衬底的 ZnS 光电器件的应用提供充分的实验与理论分析依据。

1 实验

1.1 薄膜材料制备

利用射频(13.56 MHz)磁控溅射沉积技术在柔性 PI、ITO 玻璃及石英玻璃衬底上制备 ZnS 薄膜,所采用的溅射设备为 Denton Vacuum Explorer 多靶磁控溅射系统。靶材为高纯度(99.99%)ZnS 烧结靶材。薄膜生长之前,先将柔性 PI、ITO 玻璃及石英玻璃衬底分别在丙酮、乙醇及去离子水中各超声清洗 15 min,并用压缩氮气吹干备用。样品尺寸为 5 cm×5 cm。当磁控溅射真空腔室背底真空抽至 3×10^{-5} torr 以下时,通入流量为 20 mL/min(标准状态)的氩气预溅射 ZnS 靶材 5 min。薄膜沉积过程中溅射功率设定为 200 W,沉积时间为 40 min。本文工作中所使用的柔性 PI 衬底最高工作温度为 350℃ 左右,为防止在薄膜沉积过程中出现柔性衬底软化等问题,衬底温度分别设置为室温、100℃、200℃ 和 300℃。

1.2 薄膜性能表征及分析

利用 Bruker D8 Advance X 射线粉末衍射仪(X-ray Diffraction, XRD)对不同衬底上制备的 ZnS 薄膜进行物相及晶体结构分析,扫描角度范围为 10° – 80° ;利用 Perkin Elmer Lambda 950 紫外-可见-近红外分光光度计测试 ZnS 薄膜的光透过率,测试波长范围为 360 nm–1500 nm;利用 Shimadzu SPM-9700HT 原子力显微镜对不同衬底上制备的 ZnS 薄膜样品表面形貌进行表征,测试模式为轻敲模式,扫描面积为 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$;此外,还利用 J.A.WOOLAM ALPHA-SE 光谱型椭偏仪对不同衬底上制备的 ZnS 薄膜的折射率和膜厚进行了测试,测试的波长范围为 370 nm–900 nm。

2 结果与讨论

2.1 ZnS 薄膜晶体结构

为了研究 ZnS 薄膜制备过程中衬底温度对薄膜结晶特性的影响,本文对不同衬底上制备的 ZnS 薄膜随衬底温度变化的晶体结构进行了 X 射线衍射测试与分析。图 1 所示为在不同 ITO 玻璃衬底温度条件下制备的 ZnS 薄膜的 XRD θ - 2θ 图谱。从 XRD 衍射图谱可以看出,所有样品均出现了 ITO 多晶结构的特征衍射峰,来自 ITO 玻璃衬底。当衬底温度为 100℃,在 2θ 为 28.9° 附近出现了一个强度较低的衍射峰,根据 ZnS 立方相闪锌矿结构的标准

图谱(JCPDS 79-0043), 该衍射峰对应于面心立方结构 ZnS 的(111)晶面。随着衬底温度升高至 300℃ 时, ZnS(111)衍射峰强度增加显著, 同时衍射峰半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 1.11° 左右。研究表明衬底温度对 ZnS 薄膜中(111)晶面取向生长影响较大, 这是由于随着衬底温度的升高, 溅射沉积的 Zn 和 S 原子在衬底表面能够获得更高的表面扩散能量, 从而有助于形成 ZnS(111)晶面的择优取向生长。

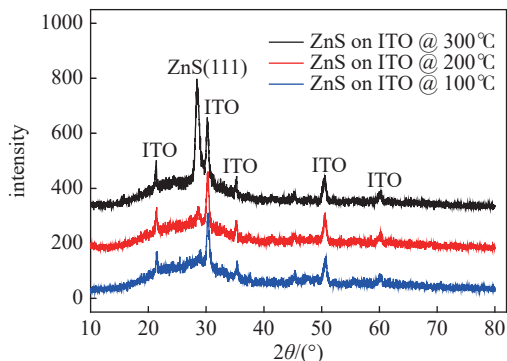


图1 不同 ITO 玻璃衬底温度下 ZnS 薄膜的 X 射线衍射谱
Fig. 1 XRD spectrum of the ZnS films grown on ITO glass substrates at different temperatures

图 2 所示为在不同衬底温度条件下, 柔性 PI 衬底上制备的 ZnS 薄膜的 XRD θ -2 θ 图谱。从 XRD 衍射图谱可以看出, 所有样品均在 2 θ 为 15.6° 左右出现了宽的衍射峰包, 来自 PI 柔性衬底。当柔性 PI 衬底温度为 100℃ 时, 样品的 XRD θ -2 θ 扫描图谱没有出现来自 ZnS 薄膜的衍射峰。然而, 当衬底温度从 100℃ 升高至 200℃ 时, 在 2 θ 为 28.9° 附近出现了尖锐的 ZnS(111)衍射峰, 但强度较低。随着衬底温度升高至 300℃ 时, ZnS(111)衍射峰强度有

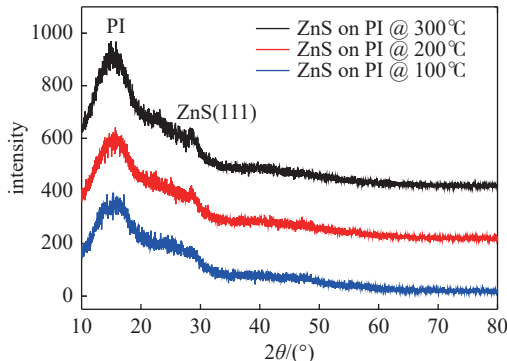


图2 不同柔性 PI 衬底温度下 ZnS 薄膜的 X 射线衍射谱
Fig. 2 XRD spectrum of the ZnS films grown on PI substrates at different temperatures

所增加。研究表明, 当柔性 PI 衬底温度较低时, ZnS 薄膜中没有形成取向优化的晶体结构, 随着衬底温度的升高, 柔性 ZnS 薄膜的结晶质量有所提升, 逐渐呈现(111)晶面的择优取向。

近年来国内外对 II-VI 族化合物半导体薄膜生长过程中衬底温度对材料性能的影响已有广泛的报道^[22-24], 研究发现, 衬底温度对刚性衬底上生长的薄膜晶面取向、光透过率以及载流子浓度等特性都有重要的影响作用。然而, 衬底温度的变化对于在柔性衬底上生长的 II-VI 族半导体薄膜的性能影响还鲜有报道。因此, 本文研究工作旨在揭示衬底温度对柔性 ZnS 薄膜特性的影响规律, 从而获得晶体结构、光学及表面性能最优化的柔性 ZnS 薄膜。

2.2 ZnS 薄膜光学性能

2.2.1 光透过率

在测试 ZnS 薄膜的光透过率之前, 首先对无 ZnS 薄膜的柔性 PI 和石英玻璃衬底进行了扣除背景透过率的测试。柔性 PI 衬底上制备的 ZnS 薄膜随衬底温度变化的光透过率如图 3 所示。如图所示, 不同衬底温度条件下制备的柔性 ZnS 薄膜在可见光波长范围内的平均光透过率均大于 80%; 在红外波长范围的平均光透过率达到 85%。随着衬底温度的升高, ZnS 薄膜的紫外吸收峰没有发生偏移, 表明柔性 ZnS 薄膜的光学能带宽度并没有受到薄膜生长过程中衬底温度的影响。

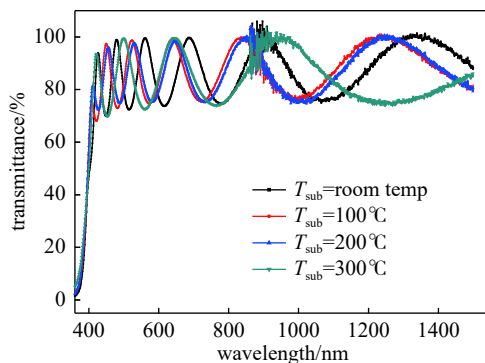


图3 不同柔性 PI 衬底温度下 ZnS 薄膜的光透过率
Fig. 3 Effect of substrate temperature on the optical transmittance of the ZnS films grown on flexible PI substrates

与柔性 ZnS 薄膜相比, 作者同样对石英玻璃衬底上制备的 ZnS 薄膜也进行了光透过率的测试。图 4 所示为石英玻璃衬底上制备的 ZnS 薄膜随衬底温度变化的光透过率。随着衬底温度升高至 300℃, ZnS 薄膜的平均光透过率并没有降低, 在可

见与红外波长范围内均呈现良好的光透过率特性。图3和图4结果表明,随着衬底温度的升高,ZnS薄膜的透过率光谱曲线均向长波长方向发生偏移。根据光学薄膜的原理可以分析出,ZnS薄膜的光学厚度减小。在射频磁控溅射技术制备ZnS薄膜过程中,当衬底温度升高,沉积原子与离子在新生膜层表面的扩散动能提高;同时衬底温度的升高也造成表面沉积生成物的再释放加剧,从而降低了薄膜的沉积速率,因此相同沉积时间内膜厚减小^[25]。

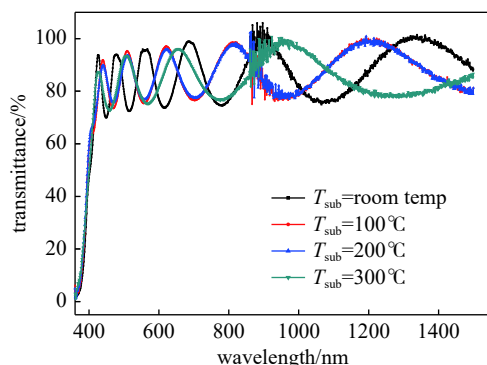


图4 不同石英玻璃衬底温度下 ZnS 薄膜的光透过率

Fig. 4 Effect of substrate temperature on the optical transmittance of the ZnS films grown on quartz glass substrates

2.2.2 光学常数

本研究中所采用的光谱型椭偏仪是测试偏振光经过 ZnS 薄膜样品反射或透射后光的偏振态改变,通过基于 Cauchy 模型的反演法,拟合出薄膜样品的光学折射率及厚度。图5为不同衬底温度下 ZnS 薄膜的折射率随波长变化的曲线,衬底为柔性 PI。在测试柔性 ZnS 薄膜样品之前,首先对无 ZnS 薄膜的柔性 PI 衬底进行了扣除背底信号的测试。从图中可以看出,随着衬底温度的升高,柔性 ZnS

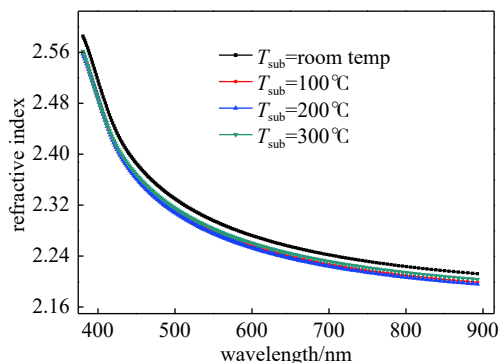


图5 不同柔性 PI 衬底温度下 ZnS 薄膜折射率随波长的变化
Fig. 5 Refractive index variation of ZnS films with wavelength at different PI substrate temperatures

薄膜的折射率略微有所下降,在 400 nm–890 nm 波长范围内的折射率为 2.21-2.56。

不同衬底温度下 ZnS 薄膜的折射率随波长变化的曲线如图6所示,衬底为 ITO 玻璃。同样在测试 ZnS 薄膜样品之前,首先对无 ZnS 薄膜的 ITO 玻璃衬底进行了扣除背底信号的测试。从图中看出,ITO 玻璃衬底上生长的 ZnS 薄膜的折射率随衬底温度的升高有明显的增加趋势。在 890 nm 波长处,当衬底温度为 100°C 时,薄膜的折射率为 2.14;而当衬底温度为 300°C 时,薄膜的折射率达到 2.26。根据前面对 ZnS 薄膜样品晶体结构的分析得知,由于 ITO 玻璃衬底上 ZnS 薄膜的晶面择优取向受到薄膜制备过程中衬底温度的影响较大,因此,ITO 玻璃上 ZnS 薄膜的折射率随衬底温度的升高可能是由于晶面取向的优化而发生了增加。

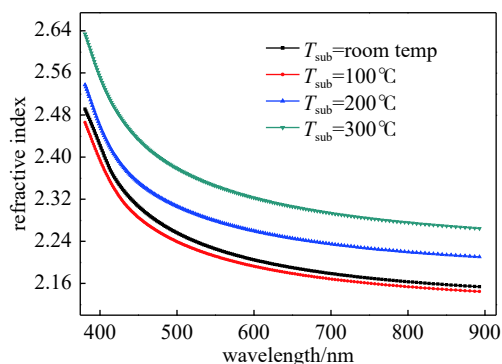


图6 不同 ITO 玻璃衬底温度下 ZnS 薄膜折射率随波长的变化

Fig. 6 Refractive index variation of ZnS films with wavelength at different ITO glass substrate temperatures

通过椭偏仪对不同衬底上制备的 ZnS 薄膜的反射偏振光谱的模型拟合分析,我们获得了不同衬底温度下生长的 ZnS 薄膜的厚度,如表1所示。随着衬底温度的逐渐升高,相同沉积时间条件下制备的 ZnS 薄膜厚度有明显的下降趋势。当衬底温度达到 300°C 时,与不加热衬底相比,ZnS 薄膜的厚度降低了 35%。这主要是由于随着衬底温度的升高,溅射沉积的 Zn 和 S 原子在衬底表面能够获得更高的能量,使这些沉积原子从衬底表面脱附的过程加重,从而造成了薄膜厚度的下降。这与前面讨论的光透过率测试结果一致。

2.3 表面形貌与粗糙度

为研究衬底温度对柔性和刚性 ZnS 薄膜的表面形貌和粗糙度的影响规律,作者利用原子力显微

表 1 不同衬底及温度下生长的 ZnS 薄膜厚度

Tab. 1 Film thickness of the ZnS films deposited at different temperatures

衬底	衬底温度/℃	薄膜厚度 /nm
柔性 PI	室温	606.2
	100	573.2
	200	589.4
	300	388.4
ITO 玻璃	室温	557.8
	100	598.1
	200	563.5
	300	387.7
石英玻璃	室温	603.8
	100	583.2
	200	579.6
	300	386.4

镜分别对生长在柔性 PI 衬底和 ITO 玻璃上的 ZnS 薄膜样品进行了表征。

图 7 (a)-(d) 所示为不同衬底温度下制备的柔性 ZnS 薄膜的表面形貌。从图中可以看出,随着衬底温度的升高,柔性 ZnS 薄膜的晶粒尺寸减小。由于柔性 PI 衬底表面存在微观缺陷,从而造成 ZnS 薄膜表面形貌也观察到明显的条状褶皱。图 8 (a)-(d) 所示为不同 ITO 玻璃衬底温度下 ZnS 薄膜的表面形貌。随着衬底温度的升高,在 ITO 玻璃衬底上制

表 2 不同衬底温度的 ZnS 薄膜表面粗糙度

Tab. 2 RMS roughness of the ZnS films deposited at different temperatures

衬底	衬底温度/℃	RMS 粗糙度/nm
柔性 PI	室温	6.86
	100	7.35
	200	4.28
	300	2.99
ITO 玻璃	室温	22.6
	100	21.9
	200	19.5
	300	17.8

备的 ZnS 薄膜表面形貌趋于平整。这是由于衬底温度的升高,使沉积 Zn 和 S 原子在衬底上获得更高的扩散能量,更趋向以二维层状模式进行薄膜生长,从而形成了较为平整均匀的薄膜表面微观结构。

表 2 列出了不同衬底温度下柔性及刚性 ZnS 薄膜的表面粗糙度。此处给出的表面均方根粗糙度 (root mean square, RMS) 是据表面形貌图像经过数值分析算出。从表 2 中可以看出,随着衬底温度的升高,柔性和刚性衬底上制备的 ZnS 薄膜的 RMS 均有明显的降低。这是由于随着衬底温度的升高,溅射沉积的原子、分子及离子在衬底表面获

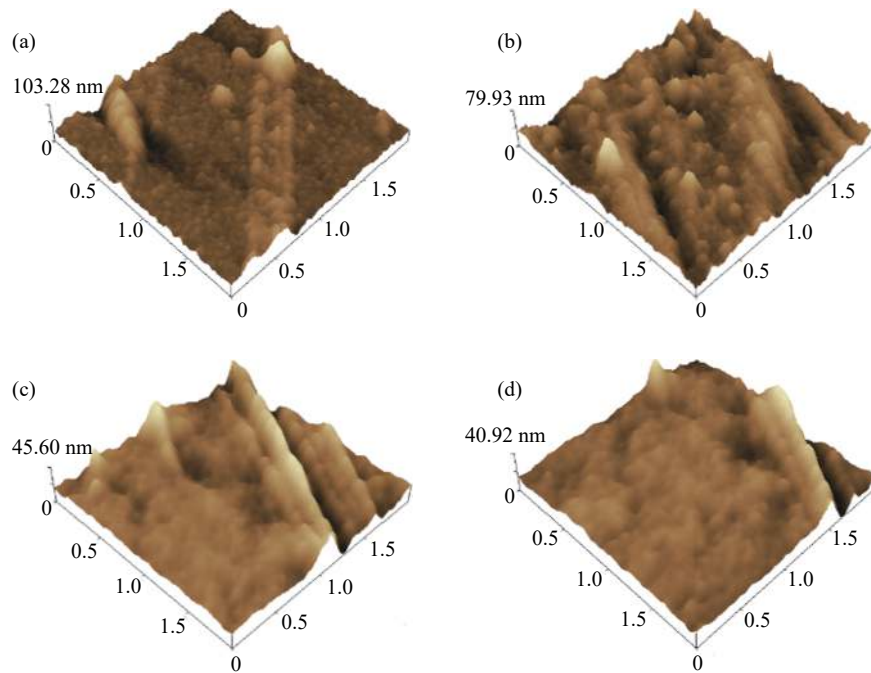


图7 不同柔性 PI 衬底温度下 ZnS 薄膜的表面形貌 (a) 室温, (b) 100℃, (c) 200℃, (d) 300℃

Fig. 7 Surface morphology of the ZnS films grown on PI substrates at temperatures of (a) room temperature, (b) 100℃, (c) 200℃, (d) 300℃

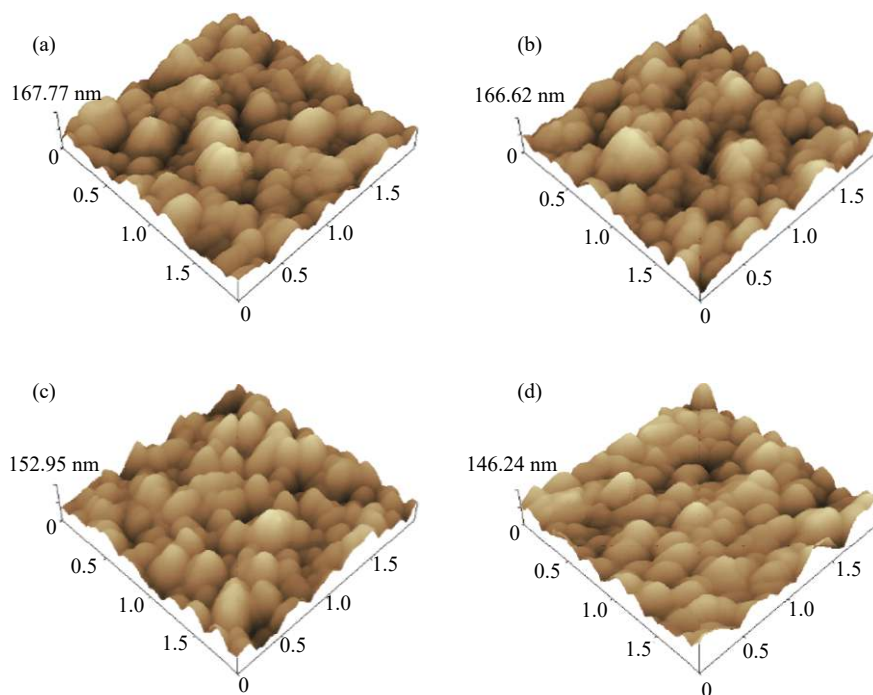


图8 不同 ITO 玻璃衬底温度下 ZnS 薄膜的表面形貌 (a) 室温, (b) 100℃, (c) 200℃, (d) 300℃

Fig. 8 Surface morphology of the ZnS films grown on ITO glass substrates at temperatures of (a) room temperature, (b) 100℃, (c) 200℃, (d) 300℃

得了足够高的表面扩散能量与速率,从而更有利于形成较为均匀、平整的表面形貌特征。

ZnS 薄膜的表面粗糙度对折射率也有一定的影响。在柔性 PI 衬底上制备的 ZnS 薄膜平均 RMS 要低于 ITO 玻璃衬底上的 ZnS,因此在同一波长下,柔性 ZnS 薄膜折射率要略高于在 ITO 玻璃上制备的 ZnS 薄膜折射率。然而当衬底升高至 300℃ 时,ITO 玻璃衬底上制备的 ZnS 薄膜的晶体结构取向优化明显,此时 ITO 玻璃上的 ZnS 薄膜折射率呈现较为显著的增加。

3 结论

本文利用射频磁控溅射技术,在柔性 PI、ITO 玻璃及石英玻璃衬底上分别生长了均匀性良好的透明 ZnS 薄膜,研究表明升高薄膜生长过程中的衬底温度,柔性和刚性 ZnS 薄膜均呈现 (111) 晶面的择优取向生长。不同衬底温度条件下制备的柔性和刚性 ZnS 薄膜在可见光波长范围内的平均光透过率均大于 80%;在红外波长范围内的平均光透过率达到 85%。柔性 ZnS 薄膜在 400 nm–890 nm 波长范围内的光学折射率为 2.21–2.56。此外,随着衬底温度的升高,由于衬底表面的脱附过程加剧,造成柔性和刚性 ZnS 薄膜厚度减少;同时柔性 ZnS 薄膜

表面粗糙度明显降低,更趋向以二维层状模式生长。当柔性衬底温度为 300℃ 时,ZnS 薄膜 RMS 达到最小值 2.99 nm。因此,本研究表明为实现基于柔性衬底的高性能 ZnS 光电器件,应控制生长柔性 ZnS 薄膜的衬底温度在 200℃–300℃,以获得最优化的器件性能。

致谢 感谢西安交通大学测试与分析中心和机械制造系统工程国家重点实验室提供 ZnS 薄膜样品制备及性能测试的实验条件。

参 考 文 献

- [1] Xu X, Li S, Chen J, et al. Design principles and materials engineering of ZnS for optoelectronic devices and catalysis[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28: 1802029
- [2] Butanovs E, Kuzmin A, Zolotarjovs A, et al. The role of Al_2O_3 interlayer in the synthesis of ZnS/ Al_2O_3 /MoS₂ core-shell nanowires[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 918: 165648
- [3] Ci H, Ma L, Liu X, et al. Photo-excited antibacterial poly(ϵ -caprolactone)/MoS₂/ZnS hybrid nanofibers[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 434: 134764
- [4] Liu B, Yang B, Dierre B, et al. Local defect-induced red-shift of cathodoluminescence in individual ZnS nanobelts[J]. *Nanoscale*, 2014, 6: 12414–12420

- [5] Fang X, Wu L, Hu L, et al. ZnS nanostructure arrays: a developing material star[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23: 585–598
- [6] Clark RM, Carey BJ, Daeneke T, et al. Two-step synthesis of luminescent MoS_2 -ZnS hybrid quantum dots [J]. *Nanoscale*, 2015, 7: 16763–16772
- [7] Liu X, Zhang X, Liu Y, et al. Influence of ZnS crystal morphology on adsorption-photocatalytic efficiency of pseudocrystal ZnS nanomaterials for methylene blue degradation[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1256: 132514
- [8] Toma O, Ion L, Iftimie S, et al. Physical properties of rf-sputtered ZnS and ZnSe thin films used for double-heterojunction ZnS/ZnSe/CdTe photovoltaic structures[J]. *Applied Surface Science*, 2019, 478: 831–839
- [9] Jiang H, Zeng YB, Zhang J, et al. High performance Ti-doped ZnS thin film anode for lithium-ion batteries[J]. *Nanotechnology*, 2022, 33: 455402
- [10] Li X, Li X, Zhu B, et al. Synthesis of porous ZnS, ZnO and ZnS/ ZnO nanosheets and their photocatalytic properties[J]. *RCS Advances*, 2017, 7: 30956–30962
- [11] Najim A, Hartiti B, Labrim H, et al. The effect of deposition time on the growth and properties of copper doped zinc sulfide thin films via spray pyrolysis[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 290: 126481
- [12] Kanchana T, Sivakumar T, Venkateswari P, Enhanced photocatalytic properties of ZnS/CdS/ZnCdS catalysts under visible light irradiation[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2022, 1265: 133375
- [13] Jesu Jebathew A, Karunakaran M, Shkir M, et al. High sensitive samarium-doped ZnS thin films for photo-detector applications[J]. *Optical Materials*, 2021, 122: 111649
- [14] Zhang L, Fang L, Liu PK et al. Epitaxial growth of wurtzite ZnS thin films on c-plane sapphire substrates by PLD[J]. *Journal of Functional Materials*, 2016, 47(5): 224–226 (张蕾, 方龙, 刘攀克, 等. PLD法在C面蓝宝石衬底上制备纤锌矿ZnS外延薄膜[J]. *功能材料*, 2016, 47(5): 224–226(in chinese))
- [15] Sun CH, Zhang P, Zhang TN, et al. Growth and characterization of ZnS thin films by atomic layer deposition[J]. *Infrared*, 2017, 38(2): 1–6 (孙常鸿, 张鹏, 张天宁, 等. 硫化锌薄膜的原子层沉积生长及表征[J]. *红外*, 2017, 38(2): 1–6(in chinese))
- [16] Ledonne A, Cavalcoli D, Mereu A, et al. Study of physical properties of ZnS thin films by RF sputtering[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 71: 7–11
- [17] Xie J, Li B, Li YJ, et al. Study of ZnS thin films prepared by RF magnetron sputtering technique[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(8): 5749–5754 (谢婧, 黎兵, 李愿杰, 等. 射频磁控溅射法制备ZnS多晶薄膜及其性质[J]. *物理学报*, 2010, 59(8): 5749–5754(in chinese))
- [18] Tian W, Zhang C, Zhai T, et al. Flexible ultraviolet photodetectors with broad photoresponse based on branched ZnS-ZnO heterostructure nanofilms[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26: 3088–3093
- [19] Liu J, Yue S, Fabrication of ZnS layer on silicon nanopillars surface for photoresistor applications[J]. *Chemical Physics Letters*, 2022, 801: 139716
- [20] Li K, Xiong YQ, Wang H, et al. Effects of process parameters on optical properties and crystallization characteristics of zinc sulfide films[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(6): 184–192 (李坤, 熊玉卿, 王虎, 等. 工艺参数对硫化锌薄膜光学性能和结晶特性的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(6): 184–192(in chinese))
- [21] Vall C, Chaik M, Dads H, et al. Effect of RF power on the structural and optical properties of ZnS thin films prepared by RF-sputtering[J]. *Journal of Semiconductors*, 2018, 39: 123001
- [22] Yu TY, Qin Y, Liu DQ. Investigation of the crystal and optical properties of ZnS thin films deposited at different temperature[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214211 (于天燕, 秦杨, 刘定权. 沉积温度对硫化锌薄膜的结晶和光学特性影响研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214211(in chinese))
- [23] Chelvanathan P, Yusoff Y, Haque F, et al. Growth and characterization of RF-sputtered ZnS thin film deposited at various substrate temperatures for photovoltaic applications[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 334: 138–144
- [24] Faiazul H, Kazi R, Mohammad I, et al. Effects of growth temperatures on the structural and optoelectronic properties of sputtered zinc sulfide thin films for solar cell applications[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51(8): 1–13
- [25] Li SB, Wu ZM, Zhu KP, et al. Effect of substrate temperature on the optical properties of a-Si:H films by RF-PECVD[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2007, 23(8): 1252–1256 (李世彬, 吴志明, 朱魁鹏, 等. 衬底温度对用RF-PECVD法制备的非晶硅薄膜光学性能影响[J]. *物理化学学报*, 2007, 23(8): 1252–1256(in chinese))