

引用格式: ZHAO Guangyu, XU Li, FAN Jie, et al. Influence of Substrate Temperature on Properties of ZnSe Thin Films Deposited by Electron-beam Evaporation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0631001

赵广宇,徐莉,范杰,等. 衬底温度对电子束沉积 ZnSe 薄膜性能影响研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6):0631001

## 衬底温度对电子束沉积 ZnSe 薄膜性能 影响研究

赵广宇,徐莉,范杰,张家斌,兰云萍,邹永刚,马晓辉

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要:** 为了研究衬底温度对硒化锌薄膜微观结构和光学特性的影响,采用电子束蒸发技术在 K9 玻璃基底上制备了单层的硒化锌薄膜。通过研究薄膜的 X 射线衍射谱、透射光谱特性、表面形貌及粗糙度,分析了不同衬底温度下薄膜微观晶体结构和光学特性的变化规律。实验结果表明:在 20~200℃ 的衬底温度范围内制备的 ZnSe 薄膜均为具有(111)晶面择优取向的纳米晶薄膜,随着衬底温度升高,基片上原子获得的动能增加,导致薄膜的晶粒尺寸变大、内应力和位错密度降低;同样在不同衬底温度下,薄膜的光学特性也不尽相同,随着衬底温度的升高,折射率和消光系数减小、光学带隙增加、薄膜的表面粗糙度降低。分析表明折射率下降是薄膜中空隙部分所占比例增加所致,而消光系数的下降是薄膜结晶度提高,内部缺陷减少造成的。

**关键词:** ZnSe 薄膜;衬底温度;电子束蒸发;微观结构;光学特性

中图分类号: O484.4

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215006.0631001

## Influence of Substrate Temperature on Properties of ZnSe Thin Films Deposited by Electron-beam Evaporation

ZHAO Guangyu, XU Li, FAN Jie, ZHANG Jiabin, LAN Yunping,

ZOU Yonggang, MA Xiaohui

(National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to study the influence of substrate temperature on the microstructure and optical properties of ZnSe thin films, a single layer of ZnSe thin films was prepared on K9 glass substrate by electron beam evaporation. By studying the X-ray diffraction spectrum, transmission spectrum characteristics, surface morphology and roughness of the thin film, the variation rules of the microstructure and optical properties of the thin film under different substrate temperatures were analyzed. The experimental results show that the ZnSe films prepared in the range of substrate temperature from 20°C to 200°C are all single crystal films with (111) crystallographic texture. With the increase of substrate temperature, the kinetic energy obtained by atoms on the substrate increases, resulting in the increase of grain size, internal strain and dislocation density of the films. The optical properties of thin films are also different at different substrate temperatures. With the increase of substrate temperature, the refractive index and extinction coefficient decrease, the optical band gap increases, and the surface roughness of thin films decreases. It is concluded that the decrease of refractive index is caused by the increase of the proportion of

基金项目: 吉林省科技发展计划(Nos.20190302052GX, 20180519018JH), 吉林省教育厅“十三五”科技项目(No.JJKH20190543KJ)

第一作者: 赵广宇(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体激光器腔面膜及光学薄膜。Email: 774275893@qq.com

导师(通讯作者): 徐莉(1962—), 女, 研究员, 博士, 主要研究方向为高功率半导体激光技术及应用。Email: xuli@cust.edu.cn

收稿日期: 2020-11-16; 录用日期: 2021-01-09

<http://www.photon.ac.cn>

the pores in the film, and the decrease of extinction coefficient is caused by the increase of crystallinity and the reduction of internal defects.

**Key words:** ZnSe thin films; Substrate temperature; Electron beam evaporation; Microstructure; Optical properties

**OCIS Codes:** 310.6860; 310.6870; 310.1860; 310.6188

## 0 引言

ZnSe是一种具有重要应用前景的II-VI族半导体材料,作为宽带隙直接带隙材料(禁带宽度约为2.7 eV),在半导体激光器等光电子器件领域有着广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。ZnSe也是一种重要的中远红外光学介质薄膜材料,它的折射率高、吸收小,在可见到远红外波段有着较高的透过率(透明区为0.55~18 μm),可与低折射率的氟化物材料组合,广泛地应用于多层减反膜、反射镜、介质滤光片等光学多层膜元件<sup>[4]</sup>。同时ZnSe薄膜在半导体激光器腔面薄膜领域也有着广泛应用,作为腔面钝化膜,在保护激光器腔面、提高激光器输出功率和抗光学灾变损伤方面有着巨大的应用潜力。

ZnSe薄膜作为半导体激光器腔面薄膜的重要组成部分,其性能的优劣直接影响着器件的可靠性和使用寿命,这就对薄膜的质量提出了更高的要求。目前已经报道了多种ZnSe薄膜的制备方法,主要有分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)<sup>[5]</sup>、金属有机化合物气相沉积(Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)<sup>[6]</sup>、化学气相沉积(Chemical Vapor Deposition, CVD)<sup>[7]</sup>、电阻加热蒸发<sup>[8]</sup>、电子束加热蒸发<sup>[9]</sup>等等。在这些制备技术中,不同方法制备的ZnSe薄膜有着不同的应用领域,其中电子束蒸发技术是制备ZnSe光学薄膜的主流技术,它仪器设备简单、实验要求条件相对较低,只需较小的电子束束流即可获得质量优良的ZnSe薄膜。当使用电子束蒸发技术沉积ZnSe薄膜时,薄膜的性能与制备工艺密切相关,真空度<sup>[10]</sup>、衬底温度<sup>[11]</sup>、沉积速率<sup>[12]</sup>等工艺参数都会对薄膜的结构和性质产生重要的影响,而当ZnSe作为半导体激光器腔面薄膜材料应用时,其光学性质(折射率、消光系数等)也是薄膜最重要最关键的性质,通常为了获得光学性能优良的薄膜,需要进行大量的实验来优化工艺参数。目前关于电子束蒸发技术制备ZnSe薄膜的研究报道相对较少,研究内容多集中在薄膜的微观晶体结构特性,研究的内容较为零散,缺乏对薄膜光学性质的系统分析。

由于衬底温度对ZnSe薄膜的结晶有很大影响,故有必要研究衬底温度与成膜性质之间的关系。因此本文采用电子束蒸发技术(Electron Beam Evaporation, EBE)技术,以K9玻璃为基底制备了单层的ZnSe薄膜,研究了衬底温度对薄膜微观结构和光学特性的影响。并结合薄膜微观结构的变化规律对薄膜光学性质进行了分析,从而得出了薄膜性能与衬底温度的变化关系,以便为ZnSe薄膜性能的提升及其在光学薄膜中的应用提供依据。

## 1 实验

实验使用Leybold ARES710电子束真空镀膜机来完成ZnSe薄膜的制备,膜料采用纯度为99.9%的ZnSe颗粒,基片采用K9玻璃。在薄膜沉积之前,先用丙酮清洗擦拭基片,并且使用霍尔离子源对基片进行轰击清洗,以排除基底污染对实验的影响。在薄膜沉积过程中,真空室的本底真空度为 $1 \times 10^{-3}$  Pa,电子束束流约为10 mA,沉积速率始终保持在0.5 nm/s,由晶控来控制薄膜厚度和沉积速率。对基片升温后,真空室保温30 min。在制备参数一致的情况下,分别在衬底温度为20 °C(室温)、50 °C、100 °C、150 °C和200 °C的条件下制备五种ZnSe单层膜样品,各样品工艺参数如表1所示。

表1 ZnSe单层膜的制备工艺参数  
Table 1 Deposition parameters of ZnSe thin film

Sample No.	A0	A1	A2	A3	A4
Substrate temperature/°C	20	50	100	150	200
Deposition rate/(nm·s <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Base pressure/( $\times 10^{-3}$ Pa)	1	1	1	1	1

## 2 实验结果与分析

### 2.1 薄膜的微观结构特性

利用Bruker公司的X射线衍射仪来进行薄膜的物相结构分析,X射线源为Cu靶的 $K\alpha$ 射线( $\lambda=0.154\ 05\ \text{nm}$ ),扫描范围为 $20^\circ\sim 80^\circ$ ,扫描速度为 $2^\circ/\text{min}$ 。图1为不同衬底温度下制备的ZnSe薄膜样品的X射线衍射图,由图可知在五种衬底温度下制备的ZnSe薄膜均只在 $2\theta=27.2^\circ$ 左右存在一个极强的衍射峰,这是面心立方晶体(111)晶面具有的特征,说明由电子束蒸发技术在K9玻璃上制备的ZnSe薄膜均为纳米晶薄膜,具有优良的(111)取向的闪锌矿结构。通过分析(111)晶面衍射峰可以发现,随着衬底温度的升高,衍射峰半高宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)值在逐渐减小,说明薄膜的结晶质量正在逐渐提高,同时也证明衬底温度对ZnSe薄膜的微观结构的变化有着重要的影响,微观结构的改变进而会影响宏观光学性质的变化。并且观察发现(111)晶面衍射峰的强度呈现减弱趋势,这主要是因为随着温度的升高,ZnSe沉积到衬底上的薄膜实际厚度逐渐减少造成的。观察样品的XRD衍射峰可以发现随着衬底温度的增加,衍射峰的峰位有向小角度方向移动的趋势,这是因为衬底温度升高,薄膜的晶格常数和内应力变化造成的。为了更加深入地了解衬底温度对ZnSe薄膜微观结构造成的影响,分别对薄膜的晶粒尺寸、晶面间距、晶格常数、内应力、位错密度进行了计算分析。

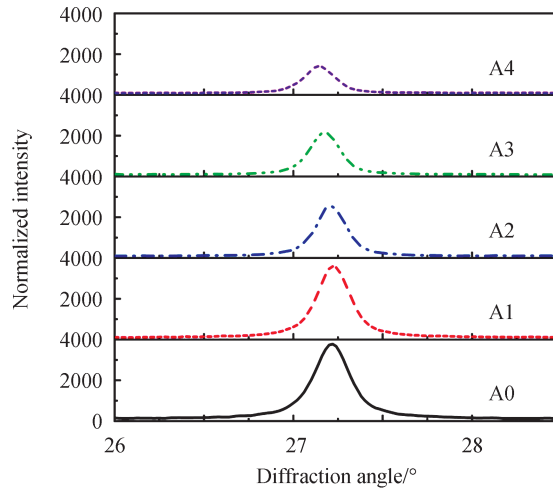


图1 不同衬底温度下ZnSe薄膜的XRD衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns for ZnSe thin films at different substrate temperatures

晶粒尺寸的计算可以根据Scherrer公式(1)得到

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

式中, $K$ 为常数等于0.9, $\lambda$ 为X射线波长,等于0.154 05 nm, $\beta$ 为衍射峰的半峰宽, $\theta$ 为衍射角。

晶面间距可由Bragg衍射公式(2)得到

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

晶格常数可由式(3)计算得到

$$a = d(h^2 + l^2 + k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中, $h, l, k$ 为晶面指数,皆为1。

内应力可由式(4)计算得到<sup>[13]</sup>

$$\sigma = \frac{\beta \cos\theta}{4} \quad (4)$$

位错密度可由式(5)计算得到<sup>[14]</sup>

$$\delta = \frac{15\beta \cos\theta}{4aD} \quad (5)$$

根据式(1)~(5),计算得到不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的微观结构参数,如表 2 所示。晶粒尺寸、内应力、位错密度随衬底温度的变化趋势如图 2 所示,可以发现随着衬底温度的升高,薄膜的平均晶粒尺寸从 30.49 nm 逐渐增大到 39.47 nm,这是因为衬底温度的升高提高了基片上原子的动能,从而使其获得了更高的迁移能,使得原子能够迁移到合适的成核的位置,有利于较大尺寸晶粒的形成。ZnSe 薄膜的内应力和位错密度呈现出随衬底温度升高而下降的趋势,同样是因为衬底温度的升高给淀积原子提供了一定的动能,使得原子沿膜面做迁移运动,尽可能的进入其平衡位置,而且衬底温度的升高也会排除吸附在基片上和混入到膜层内的气体分子,从而减少薄膜中的缺陷数目。内应力和位错密度的降低同时也意味着薄膜的质量正在逐渐提高。

表 2 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的微观结构参数

Table 2 The microstructure parameters of ZnSe thin films at different substrate temperatures

$T_{\text{sub}}/^{\circ}\text{C}$	$2\theta$	$\beta$	$D/\text{nm}$	$d/\text{nm}$	$a/\text{nm}$	Strain $\times 10^{-3}\sigma/$ ( $\text{lin}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}$ )	Dislocation density $\times$ $10^{15}\delta/(\text{lin}\cdot\text{m}^{-2})$
A0	27.21	0.268	30.49	0.327 3	0.567	1.137	0.986
A1	27.22	0.233	35.07	0.327 3	0.566 9	0.988	0.745
A2	27.20	0.217	37.66	0.327 5	0.567 2	0.92	0.646
A3	27.17	0.211	38.73	0.327 8	0.567 8	0.895	0.61
A4	27.13	0.207	39.47	0.328 3	0.568 6	0.878	0.587

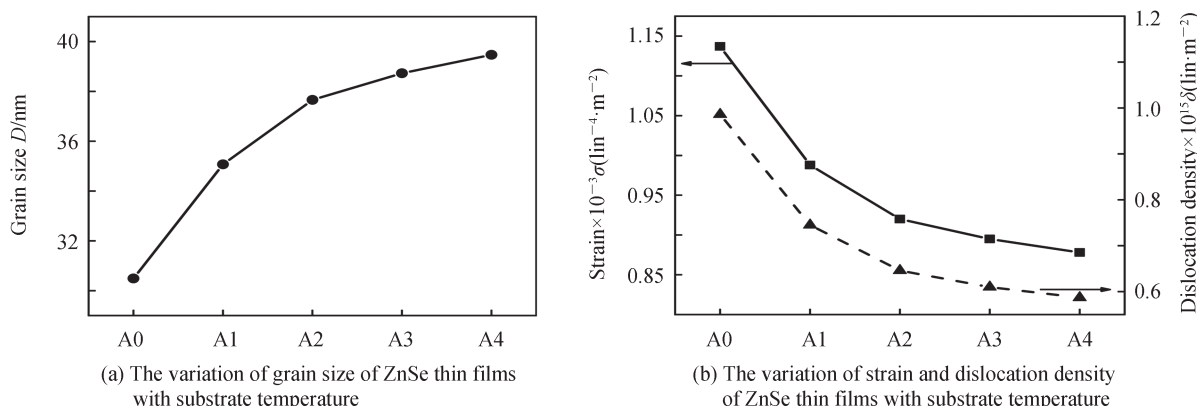


图 2 ZnSe 薄膜的晶粒尺寸、内应力和位错密度随衬底温度的变化趋势

Fig. 2 The variation of grain size strain and dislocation density of ZnSe thin films with substrate temperature

## 2.2 薄膜的光谱特性

ZnSe 薄膜样品的透射特性由 Shimadzu 公司生产的 UV-3101PC 分光光度计测得,测试光谱范围为 300~2 200 nm,测试步长为 1 nm。图 3 为不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的透射光谱曲线,由图可知随着衬底温度的逐渐增加,薄膜样品的透射光谱曲线向短波方向漂移,说明沉积到基底上的薄膜的实际厚度在逐渐减小,同时薄膜的短波吸收带也在向短波方向移动,将不同沉积温度下获得 ZnSe 薄膜的透射光谱数据导入 Essential Macleod 软件,用包络线法计算得到相应的折射率、消光系数以及物理厚度<sup>[15]</sup>。

ZnSe 的成膜方式非常独特,它的成膜过程与 ZnS 类似,在蒸发的过程中首先分解成 Zn 和 Se 原子,然后再以原子的形态在基板上重新化合凝结,由于该材料沉积到基板上时是以原子的形态重新化合形成薄膜,所以该类材料对沉积温度特别敏感,其凝结系数有着随沉积温度上升而下降的性质<sup>[16]</sup>。

图 4 为不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的折射率色散曲线,由图可知,随着基底温度的升高,折射率呈现出下降的趋势,在波长 1 060 nm 处,薄膜的折射率从 2.517 下降为 2.455。这主要是由于 ZnSe 在成膜过程中凝结系数随沉积温度升高而下降的性质造成的。随着衬底温度的升高,在基板上凝结的原子数目减少,膜层内

的空隙增加。而在通常情况下折射率又是聚集密度的函数<sup>[17]</sup>,空隙部分在薄膜总体积中所占的总比例随衬底温度的升高逐渐增加,因此造成了薄膜折射率的降低。目前已有研究报道了采用电子束蒸发技术制备 ZnS 薄膜时,出现了类似的折射率随基底温度升高而下降的趋势,而造成这种现象的正是由于其薄膜内部空隙部分增加所致的<sup>[18]</sup>。

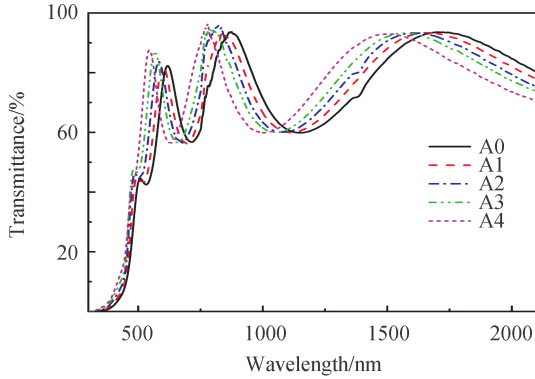


图3 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的透射光谱曲线  
Fig. 3 Transmission spectrum of ZnSe thin films at different substrate temperatures

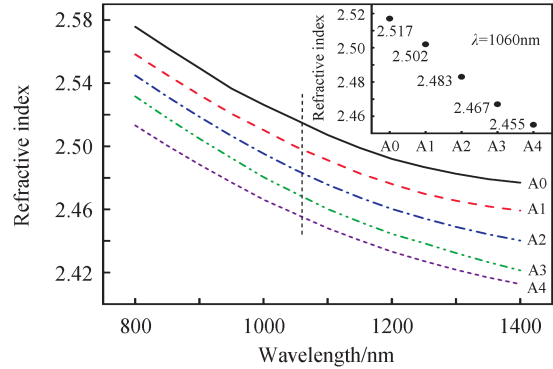


图4 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的折射率色散曲线  
Fig. 4 Refractive index dispersion curve of ZnSe thin films at different substrate temperatures

同样在图5中,消光系数也表现出随衬底温度的升高而下降的趋势。在波长为1060 nm处薄膜的消光系数由0.0024下降为0.00065。吸收系数 $\alpha$ 与消光系数的关系为 $\alpha=4\pi k/\lambda$ <sup>[19]</sup>,低的消光系数意味着低的吸收。造成这种下降趋势的原因是因为随着衬底温度的升高,ZnSe薄膜的结晶度提高,同时由上面XRD分析结果可知,薄膜的位错密度在逐渐降低,薄膜样品中的缺陷也随之减少,从而减小了对光的吸收和散射损耗,因此在宏观上就表现为更低的消光系数。图6为计算得到的不同衬底温度下的 ZnSe 薄膜的实际厚度,由图可以发现,随着衬底温度的升高,薄膜的实际厚度是在逐渐减小的,这也进一步证实了 ZnSe 凝结系数随沉积温度升高而下降的现象。

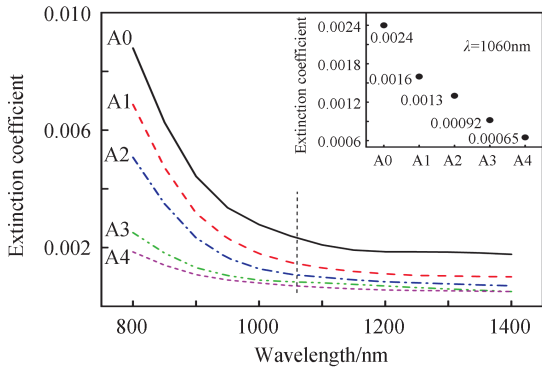


图5 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的消光系数色散曲线  
Fig. 5 Dispersion curve of extinction coefficient of ZnSe thin films at different substrate temperatures

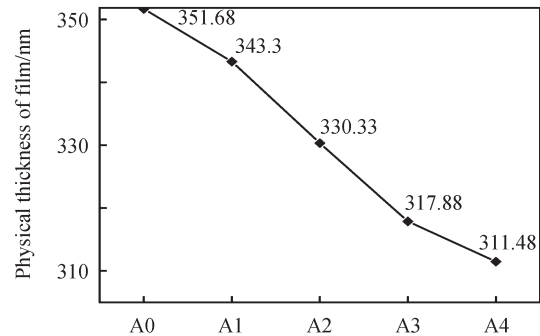


图6 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜的实际厚度  
Fig. 6 The actual thickness of ZnSe thin films at different substrate temperatures

### 2.3 光学带隙的理论计算

光学带隙 $E_g$ 也是薄膜材料的一个重要的物理特征参量, $E_g$ 不仅与薄膜的能带结构有关,而且还可以表征薄膜的本征吸收。在制备 ZnSe 薄膜时,光学带隙会受制于薄膜制备时的工艺参数,会随着薄膜的生长条件发生变化。图7(a)为使用分光光度计测得的 ZnSe 薄膜实验样品的吸收光谱曲线,测试范围为300~700 nm。可以看出在300~500 nm范围内,薄膜表现出了较强的光吸收,主要是由材料的本征吸收造成的。为了计算 ZnSe 薄膜的禁带宽度,可以使用 Tauc 公式<sup>[20]</sup>,对于半导体材料,其光学带隙 $E_g$ 和吸收系数之间的关系为

$$ahv=A(hv-E_g)^n \quad (6)$$

式中, $\alpha$ 为吸收系数,可以由薄膜的吸收光谱直接得到, $hv$ 为光子能量, $A$ 为常数,由于 ZnSe 是一种直接带隙

材料,故 $n=1/2$ 。然后通过吸收光谱做关于 $(ahv)^2$ 与 $h\nu$ 的关系曲线,线性拟合曲线上 $\alpha=0$ 的点就可以得到薄膜的光学带隙 $E_g$ 。

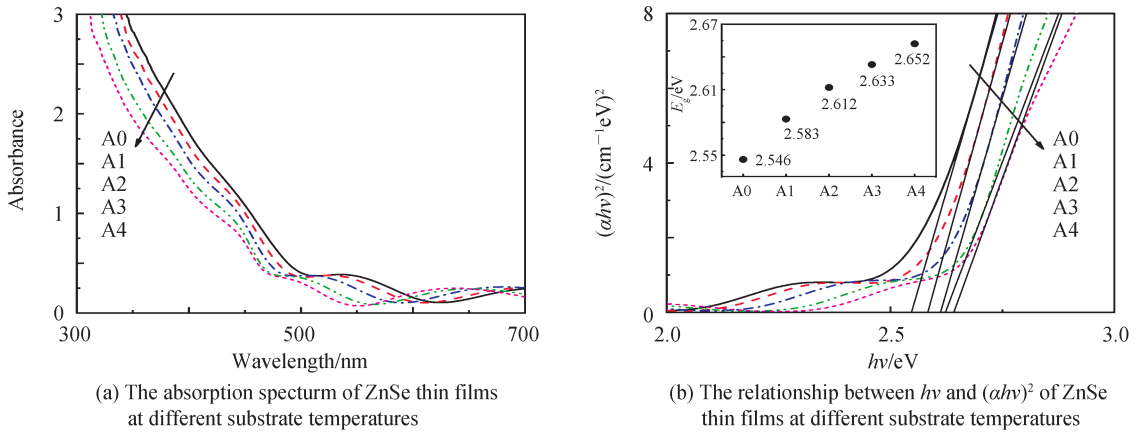


图 7 不同衬底温度下的吸收光谱和光子能量  $h\nu$  与  $(ah\nu)^2$  关系  
Fig. 7 The absorption spectrum and the relationship between  $h\nu$  and  $(ah\nu)^2$  of ZnSe thin films at different substrate temperatures

由图 7(b) 可以发现,随着基底温度的升高,光学带隙  $E_g$  在逐渐增大,当基底温度由 20 °C 逐渐增加为 50 °C、100 °C、150 °C、200 °C 时,光学带隙  $E_g$  由 2.546 eV 逐渐增加为 2.583 eV、2.612 eV、2.633 eV、2.652 eV。这种光学带隙增大的趋势意味着本征吸收的发生需要更大的光子能量,同时也解释了图 3 中 ZnSe 薄膜透射光谱中短波吸收带发生蓝移的现象。

### 2.4 薄膜的表面粗糙度

图 8 为不同基底温度下制备的 ZnSe 薄膜的表面形貌及表面均方根粗糙度值 ( $\delta_{RMS}$ ),测试设备为 Aglient 公司生产的原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM)。当基板温度为 20 °C、50 °C、100 °C、150 °C、200 °C 时,对应的粗糙度  $\delta_{RMS}$  分别为 1.61 nm、1.33 nm、1.29 nm、1.18 nm、0.997 nm。可以发现随着基底温度的升高,薄膜的表面粗糙度呈现出下降的趋势。造成这种下降趋势的原因可以解释为:当衬底温度较低时,基片上的原子的动能较低,迁移率也较低,活动范围有限。随着温度的升高,原子获得了更高的动能,迁移

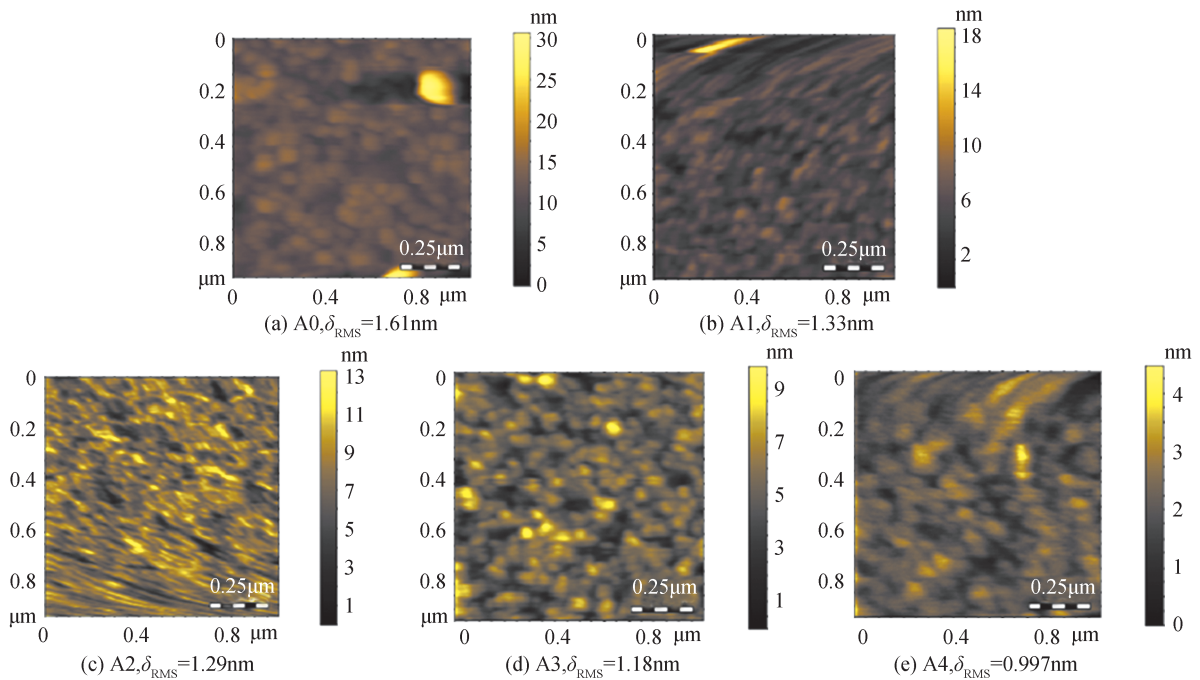


图 8 不同衬底温度下 ZnSe 薄膜样品的 AFM 图  
Fig. 8 AFM images of ZnSe thin films at different substrate temperatures

率也随之增加,有利于原子在基片表面的迁移和重排,使得薄膜表面更加均匀平整,因而薄膜就具有更低的表面粗糙度。

### 3 结论

本文研究了衬底温度对电子束沉积 ZnSe 薄膜微观结构和光学特性的影响。实验结果表明:在 20~200℃的衬底温度范围内制备的 ZnSe 薄膜为具有(111)晶面择优取向的纳米晶薄膜。同时随着衬底温度的升高,基片上沉积原子的动能增加,晶粒尺寸增大,内应力与位错密度逐渐降低,薄膜的质量随衬底温度的升高得到提升。光谱特性分析表明,随着衬底温度的升高,薄膜的透射率曲线全光谱向短波方向发生漂移,薄膜的折射率  $n$  和消光系数  $k$  均呈现出下降的趋势,分析认为折射率下降是因为膜层内部的空隙部分所占比例增加所致,而消光系数的下降是因为薄膜的结晶度提高,内部缺陷减少造成的。薄膜的实际厚度在逐渐减少,进一步证明了 ZnSe 凝结系数随沉积温度升高而下降的趋势。光学带隙随衬底温度的升高而变大,与薄膜透射光谱短波吸收带的蓝移相对应。AFM 测试表明,薄膜的表面粗糙度随衬底温度的升高而降低。由此可知,衬底温度的升高会造成的薄膜微观结构的变化,而微结构的变化进而又影响薄膜宏观光学性质的改变。因此该研究对于通过控制衬底温度来实现 ZnSe 薄膜性质的提升和电子束沉积工艺的优化具有重要的意义。

#### 参考文献

- [1] PRABUKANTHAN P, HARICHANDRAN G. Electrochemical deposition of n-Type ZnSe thin film buffer layer for solar Cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(14):D736-D741.
- [2] RIVEROS G, GÓMEZ H, HENRQUEZ R, et al. Electrodeposition and characterization of ZnSe semiconductor thin films [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2001, 70(3):255-268.
- [3] WANG S Y, HAUKSSON I, SIMPSON J, et al. Blue stimulated emission from a ZnSe p-n diode at low temperature[J]. Applied Physics Letters, 1992, 61(5):506-508.
- [4] PAN Yongqiang, ZHU Chang. High performance infrared antireflection films on ZnSe substrate for 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4):394-396.  
潘永强,朱昌. 硒化锌基底 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  高性能增透膜的研究[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4):394-396.
- [5] CHEN W R, CHANG S J, SU Y K, et al. ZnSe epitaxial layers and ZnSSe/ZnSe strain layer superlattices grown by molecular beam epitaxy[J]. Superlattices & Microstructures, 2002, 32(1):59-63.
- [6] SEO K W, LEE S S, PARK J P, et al. Single-source precursor based ZnSe thin film preparation through MOCVD method [J]. Bulletin Korean Chemical Society, 2006, 27(12):2074-2076.
- [7] CHANG C C, LEE C H. Characterization and fabrication of ZnSe epilayer on porous silicon substrate [J]. Thin Solid Films, 2000, 379(1-2):287-291.
- [8] YUVARAJ D, RAKESH KUMAR R, TAMIL SELVAN V, et al. Growth of ZnSe nano and microstructures at high vacuum by thermal evaporation[J]. Applied Nanoscience, 2014, 4:469-475.
- [9] POULOPOULOS P, BASKOUTAS S, KAROUTSOS V, et al. Growth and optical absorption of thin ZnSe films[J]. Journal of Physics Conference Series, 2005, 10(1):259.
- [10] DONG Maojin, CHEN Tao, WANG Jizhou, et al. Influence of vacuum degree on the optical and structure properties of TiO<sub>2</sub> films[J]. Vacuum & Cryogenics, 2010, 16(4):233-237.  
董茂进,陈焘,王济洲,等. 真空度对 TiO<sub>2</sub> 薄膜光学和结构特性的影响[J]. 真空与低温, 2010, 16(4):233-237.
- [11] YANG C, FAN H, XI Y, et al. Effects of depositing temperatures on structure and optical properties of TiO<sub>2</sub> film deposited by ion beam assisted electron beam evaporation[J]. Applied Surface Science, 2008, 254(9):2685-2689.
- [12] ZHANG Dongping, ZHAN Meiqiong, FANG Ming, et al. Influence of deposition rate on the properties of ZrO<sub>2</sub> thin films prepared in electron beam evaporation method[J]. Chinese Optics Letters, 2004(6):364-366.
- [13] ASHRAF M, AKHTAR S M J, KHAN A F, et al. Effect of annealing on structural and optoelectronic properties of nanostructured ZnSe thin films[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509(5):2414-2419.
- [14] GHARGE M N, BHATTAR S L, KOLEKAR G B, et al. Structural and photophysical aspects of perylene-doped anthracene crystalline powders prepared by microwave heating[J]. Indian Journal of Chemistry, 2008, 47(11):1642-1648.
- [15] SWANEPOEL R. Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films[J]. Journal of Physics E Scientific Instruments, 1984, 17(10):896-903.
- [16] WANG Ying. Research on the fabrication of mid-infrared dielectric coatings for laser system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.  
王颖. 中红外激光薄膜的研究与制备[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

- [17] RITTER E. Optical film materials and their applications[J]. Applied Optics, 1976, 15(10):2318-2327.
- [18] WU Xiaochun, LAI Fachun, LIN Yongzhong, et al. Effects of substrate temperature and annealing on the structure and optical properties of ZnS film[C]. International Symposium on Advanced Optical Manufacturing & Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies. International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [19] DESAI H N, DHIMMAR J M, MODI B P. Optical and dispersion analysis of Zinc selenide thin film[J]. Materials today: proceedings, 2016, 3(6):1650-1657.
- [20] TAUC J. Amorphous and Liquid Semiconductor[M].Berlin:Springer Verlag, 1974, 25-27.