

基底温度和离子源能量对薄膜应力的影响

郝帅*, 崔碧峰**, 房天啸, 王阳

北京工业大学信息学部光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124

摘要 在不同的基底温度和离子源能量下,采用电子束蒸发方法在 GaAs 基底上分别制备了 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 光学薄膜。测量了所制备薄膜的表面应力,并对不同离子源能量下薄膜的折射率进行了测试。结果表明,三种光学薄膜的表面应力呈不均匀分布,通过调节基底温度和离子源能量能有效减小薄膜应力, SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的平均应力最小值分别为 2.9, 8.4, 25.1 MPa。

关键词 薄膜; 基底温度; 离子源能量; 折射率; 平均应力

中图分类号 TB43

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.093101

Effects of Substrate Temperature and Ion Source Energy on Stress of Thin Film

Hao Shuai*, Cui Bifeng**, Fang Tianxiao, Wang Yang

Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Co-Construction of Provincial Department, Ministry of Education, Department of Information, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The optical thin films of SiO_2 , TiO_2 and Al_2O_3 are prepared on GaAs substrates by using the electron beam evaporation method under different substrate temperatures and ion source energies, respectively. The stress distributions of these thin films are measured, and the refractive indexes of these thin films prepared under different ion source energies are also tested. The results show that, the surface stress distributions of these three kinds of thin films are non-uniform, and the substrate temperature and ion source energy can be adjusted to reduce the stresses of these thin films effectively. The average minimum stresses of SiO_2 , TiO_2 and Al_2O_3 thin films are 2.9, 8.4 and 25.1 MPa, respectively.

Key words thin films; substrate temperature; ion source energy; refractive index; average stress

OCIS codes 310.1860; 310.4925

1 引言

SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的光学特性优良,化学特性稳定。随着传统光学、信息光学以及光电子技术的迅速发展,薄膜光学器件在光学系统中得到了广泛的应用^[1]。薄膜应力会影响薄膜元件的可靠性和寿命^[2],若膜层中的应力超过其损伤阈值,则薄膜元件会发生断裂损伤,薄膜的性能降低,甚至失去功能^[3]。因此,对光学薄膜应力的测试和分析一直是薄膜研究的热点。

Nishikawa 等^[4]对离子辅助沉积制备的 SiO_2

薄膜的应力进行了研究,发现其均表现为一定的压应力, Lee 等^[5]研究了基底温度对 TiO_2 薄膜应力的影响, Robic^[6]等对离子辅助制备的 SiO_2 薄膜的应力进行了研究,但是这些研究中薄膜的应力都比较大,没能得到有效的控制。熊胜明等^[7]研究发现,热处理能够改善薄膜应力,顾培夫等^[8]对不同基底温度下制备的 SiO_2 和 TiO_2 的应力情况进行了探索,张金胜^[9]等研究了 SiO_2 薄膜厚度和生长速率对其应力的影响,但是这些研究中对基片的测试范围较小,不能全面表征整个基片的应力。陈焘等^[10]研究了在圆形硅基底上离子辅助沉积制备的 TiO_2 薄膜

收稿日期: 2018-03-05; 修回日期: 2018-04-06; 录用日期: 2018-04-18

基金项目: 2017 年科技创新服务能力建设-科研基地建设-重点实验室-光电子技术教育部重点实验室(市级)项目 (PXM2017_014204_500034)

* E-mail: 18810360722@163.com; ** E-mail: cbf@bjut.edu.cn

的应力分布情况,使用的薄膜应力测试仪器对基片表面的平整度要求较高,使用比硅平整度更好的基底能够使测试结果更准确。

本文在圆形 GaAs 基底上采用电子束蒸发方法制备了 SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜,使用电子薄膜应力测试仪在室温下测量了薄膜表面的应力,分析了基底温度和离子源能量对薄膜应力的影响。

2 实验方法

2.1 材料和样品制备

所有样品均采用美国丹顿真空公司生产的型号为 Denton Vacuum Infinity 26 的真空镀膜机进行制备,该设备配备有 CC-105 冷阴极离子源系统和 Leybold-Inficon XTC/2 石英晶体速率控制器,图 1 所示为离子束辅助蒸发示意图。

实验中采用厚度为 1 mm,直径为 2 英寸(约 5.08 cm)的圆形 GaAs 片作为基底,在制备样品前,

表 1 不同基底温度下制备 SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜的实验参数

Table 1 Experimental parameters for preparation of SiO₂, TiO₂ and Al₂O₃ thin films under different substrate temperatures

Thin film	Substrate temperature /K	Working gas flow /(mL·min ⁻¹)		Ion source energy /eV	Evaporation rate /(nm·s ⁻¹)
		Ar	O ₂		
SiO ₂	323/373/423	10	10	67	1
TiO ₂	323/373/423	0	25	106	0.3
Al ₂ O ₃	323/373/423	0	20	149	0.3

表 2 不同离子能量下制备 SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜的实验参数

Table 2 Experimental parameters for preparation of SiO₂, TiO₂ and Al₂O₃ thin films under different ion energies

Thin film	Ion source energy /eV	Working gas flow /(mL·min ⁻¹)		Substrate temperature /K	Evaporation rate /(nm·s ⁻¹)
		Ar	O ₂		
SiO ₂	67/108/153	10	10	373	1
TiO ₂	78/106/154	0	25	373	0.3
Al ₂ O ₃	103/149/189	0	20	373	0.3

2.2 薄膜应力测量

样品均采用电子薄膜应力分布测试仪在室温下进行测试^[11]。该测试仪运用光偏振相移干涉原理,通过测量制备样品前后基片的形变量来计算薄膜应力^[12]。实验中 GaAs 基片上一点(x,y)离面位移量 ω(x,y)与该点曲率及应力分布 S(x,y)之间的关系为

$$S(x,y) = \frac{S_x + S_y}{2} = \frac{E_s t_s^2}{6(1 - \mu_s) t_f} \left[\frac{\partial^2 \omega(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega(x,y)}{\partial y^2} \right] = \frac{E_s t_s^2}{6(1 - \mu_s) t_f} \cdot \frac{1}{R_{1,2}(x,y)}, \quad (1)$$

式中 S_x、S_y 分别为薄膜应力在 x 和 y 方向的一阶

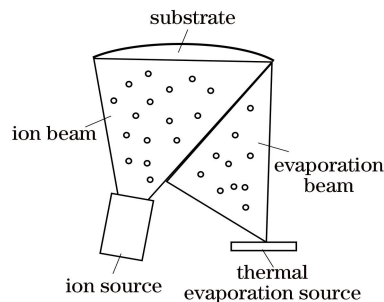


图 1 离子束辅助蒸发示意图

Fig. 1 Schematic of ion beam assisted evaporation

用离子源系统对 GaAs 基底进行清洗。首先使用 Ar 离子源清洗(清洗 4 min,流量 20 mL/min),然后用 N₂ 离子源进行清洗(清洗 30 min,流量 20 mL/min)。表 1 和表 2 所示分别为在不同基底温度和离子源能量下制备 SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜的实验参数。SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜的厚度分别为 170,115,110 nm。

导,t_s与t_f分别为 GaAs 基底和制备样品的厚度,E_s和μ_s分别为 GaAs 基底的弹性模量和泊松比,R_{1,2}(x,y)为薄膜的曲率半径^[13]。测量 GaAs 基底生长薄膜前后的形变,再输入 E_s、μ_s、t_s和 t_f 参数的值,就可准确计算出薄膜的平均应力 \bar{S} ,最大应力 S_{max}和最小应力 S_{min},并绘出整个薄膜表面应力分布三维图^[14]。所有样品制备完后随即进行了应力测试。

3 实验结果与分析

3.1 基底温度对薄膜应力的影响

采用电子束蒸发制备 SiO₂、TiO₂ 和 Al₂O₃ 薄膜时,基底温度主要通过热应力的形式对薄膜产生张应力

$$\sigma_f(T) = \left(\frac{E_f}{1 - \mu_f} \right) (\alpha_f - \alpha_s)(t_1 - t_0), \quad (2)$$

式中 α_f 和 α_s 分别为生长的薄膜和基底材料的热膨胀系数^[15], t_0 和 t_1 分别表示薄膜应力测试环境温度和薄膜制备时的基底温度。由(2)式可知,当生长薄膜的基底温度升高时,由热应力导致的张应力会变大;但是,随着基底温度的升高,在薄膜的生长过程中,薄膜材料分子的迁移率会变大,进而导致薄膜的聚集密度增大,最终使薄膜的压应力增大^[16]。因此,在不同基底温度下,薄膜应力是热应力导致的张应力与薄膜致密化产生的压应力共同作用的

结果^[17]。

图2所示为在153 eV离子源能量下,基底温度分别为323,373,423 K时的SiO₂薄膜应力三维分布图;图3所示为在106 eV离子源能量下,基底温度分别为323,373,423 K时的TiO₂薄膜应力三维分布图;图4所示为在189 eV离子源能量下,基底温度分别为323,373,423 K时的Al₂O₃薄膜应力三维分布图。在测试结果中,应力为正值代表张应力,应力为负值代表压应力^[18-19]。由图2~4可知,通过电子束蒸发在圆形GaAs基底上制备的SiO₂、TiO₂和Al₂O₃薄膜的应力分布不均匀。

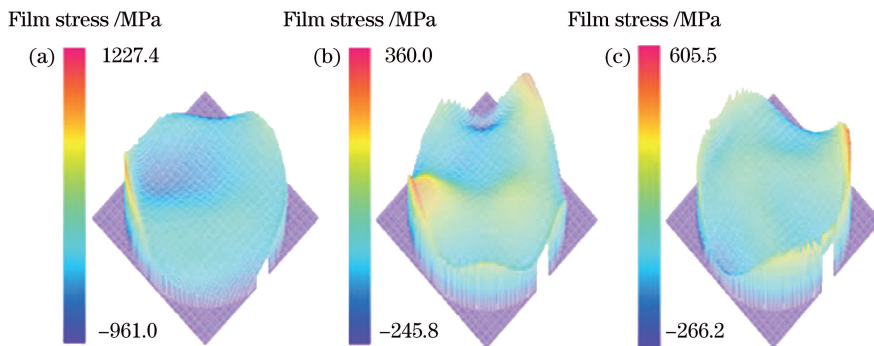


图2 不同基底温度下SiO₂薄膜应力分布三维图。(a) 323 K;(b) 373 K;(c) 423 K

Fig. 2 3D stress distributions of SiO₂ thin film under different substrate temperatures. (a) 323 K; (b) 373 K; (c) 423 K

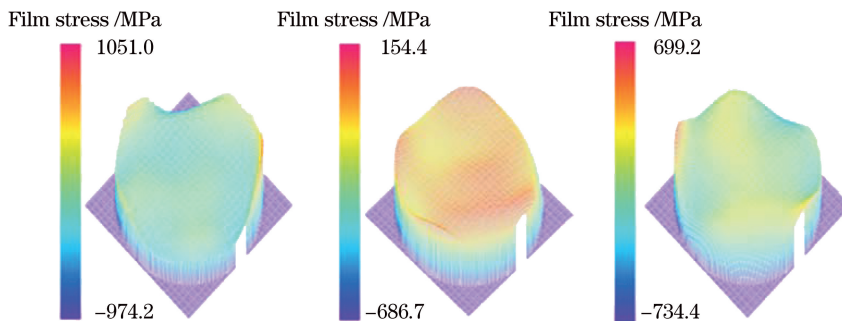


图3 不同基底温度下TiO₂薄膜应力分布三维图。(a) 323 K;(b) 373 K;(c) 423 K

Fig. 3 3D stress distributions of TiO₂ thin film under different substrate temperatures. (a) 323 K; (b) 373 K; (c) 423 K

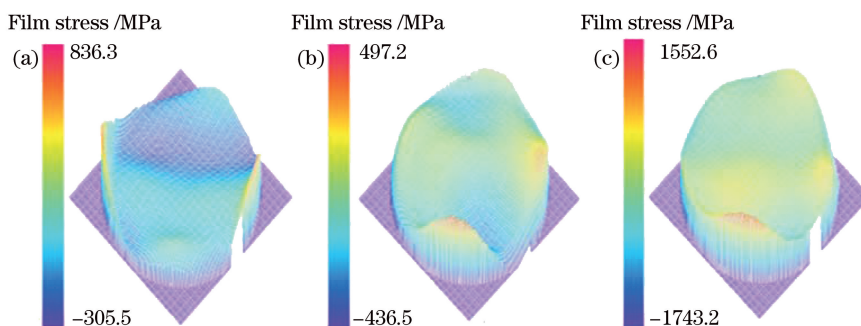


图4 不同基底温度下Al₂O₃薄膜应力分布三维图。(a) 323 K;(b) 373 K;(c) 423 K

Fig. 4 3D stress distributions of Al₂O₃ thin film under different substrate temperatures. (a) 323 K; (b) 373 K; (c) 423 K

由图 2 可知,当基底温度为 323 K 时, SiO_2 薄膜整体上表现为压应力,测得 SiO_2 薄膜压应力的最大值为 961.0 MPa,张应力的最大值为 1227.4 MPa,且主要分布在薄膜的边缘部分;当基底温度为 373 K 时,薄膜表面既有压应力集中的现象,又有张应力集中的现象;当基底温度为 423 K 时,薄膜表面主要表现为张应力。由图 3 可知,当基底温度为 323 K 时, TiO_2 薄膜表面绝大部分表现为压应力;当基底温度为 373 K 时,薄膜主要变现为张应力;当基底温度为 423 K 时,薄膜主要变现为张应力,在边缘部分出现了张应力极大值。由图 4 可知,当基底温度为 323 K, Al_2O_3 薄膜表面主要表现为压应力;当基底温度为 373 K 和 423 K 时,薄膜绝大部分区域表现为张应力。

图 5 所示为 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜平均应力与基底温度间的关系。当基底温度为 323 K 时, SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的平均应力分别为 -132.5, -74.0, -86.8 MPa;当基底温度为 373 K 时,其平均应力分别为 2.9, 8.4, 25.1 MPa;当基底温度为 423 K 时,这三种薄膜的平均应力分别为 58.4, 59.5, 65.4 MPa。

当基底温度为 323 K 时,所制备的 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜均表现为压应力;当基底温度提高到

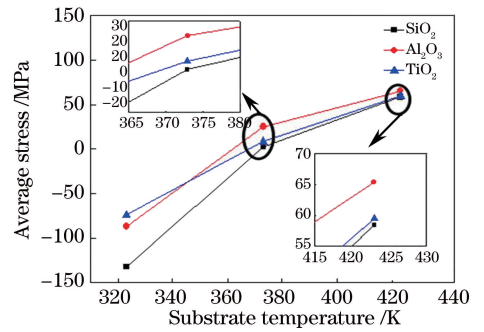


图 5 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜平均应力与基底温度间的关系

Fig. 5 Relationship between average stress and substrate temperature for SiO_2 , TiO_2 and Al_2O_3 thin films
373 K 时, SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 的张应力不断增加,这是沉积温度升高产生的张应力占主导优势所导致的;当基底温度继续提高到 423 K 时,薄膜张应力增加的速度变小,产生这种现象的原因是薄膜压应力的增长速率大于张应力的增长速率。

3.2 离子源能量对薄膜应力的影响

按照表 1 所示的工艺参数制备 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜。图 6~8 分别为当基底温度为 323 K 时, SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜在不同离子源能量下的应力分布三维图。

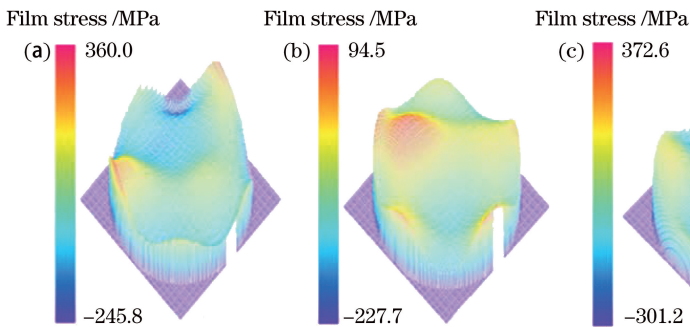


图 6 不同离子源能量下的 SiO_2 薄膜应力分布三维图。(a) 67 eV;(b) 108 eV;(c) 153 eV

Fig. 6 3D stress distributions of SiO_2 thin film under different ion source energies. (a) 67 eV; (b) 108 eV; (c) 153 eV

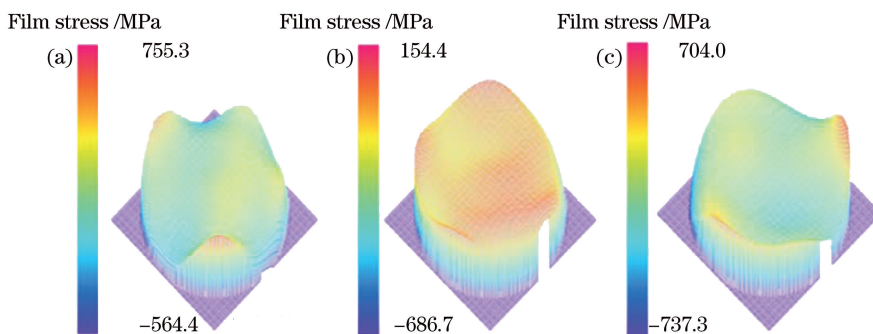


图 7 不同离子源能量下的 TiO_2 薄膜应力分布三维图。(a) 78 eV;(b) 106 eV;(c) 154 eV

Fig. 7 3D stress distribution of TiO_2 thin film with different ion source energies. (a) 78 eV; (b) 106 eV; (c) 154 eV

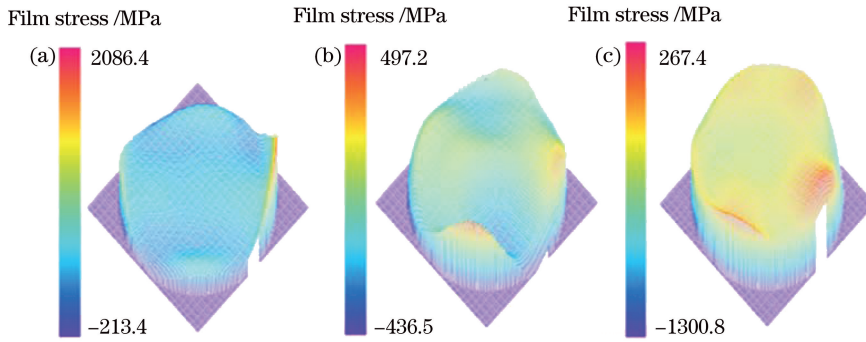


图 8 不同离子源能量下的 Al_2O_3 薄膜应力分布三维图。(a) 103 eV; (b) 149 eV; (c) 189 eV

Fig. 8 3D stress distributions of Al_2O_3 thin film under different ion source energies. (a) 103 eV; (b) 149 eV; (c) 189 eV

由图 6 可知,不同离子源能量下制备的 SiO_2 薄膜表面应力分布比较不均匀。由图 7 可知,当离子源能量为 78 eV 时, TiO_2 薄膜表面应力的极大值主要分布在边缘区域;当离子源能量继续增大到 106 eV 时,薄膜主要表现为张应力;当离子源能量为 154 eV 时,薄膜主要表现为压应力。由图 8 可知,当离子源能量为 103 eV 时, Al_2O_3 薄膜表面主要表现为张应力;当离子源能量增大到 149 eV 时,薄膜表面的应力极大值相对较小;当离子源能量为 189 eV 时,薄膜主要表现为压应力集中,在薄膜边缘区域有极小部分张应力集中。

图 9 所示为 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的平均应力及折射率与离子源能量间的关系,其中折射率均为 980 nm 波长处的值。当离子源能量为 67, 108, 153 eV 时, SiO_2 薄膜的平均应力分别为 2.9, -35.2, -45 MPa;当离子源能量为 78, 106, 154 eV 时, TiO_2 薄膜的平均应力分别为 128.2, 8.4, -35.7 MPa;当离

子源能量为 103, 149, 189 eV 时, Al_2O_3 薄膜的平均应力分别为 304.6, 25.1, -183.9 MPa。

由图 9(a) 可知,当离子源能量为 67 eV 时,测得 SiO_2 薄膜的平均应力为张应力;随着离子源能量的增加,薄膜的压应力不断增加,在离子源能量为 108 eV 时, SiO_2 的应力类型发生了变化。由图 9(b) 可知,当离子源能量为 78 eV 和 106 eV 时, TiO_2 薄膜均表现为张应力,在 154 eV 的能量下,测得 TiO_2 为压应力。由图 9(c) 可知, Al_2O_3 薄膜的应力随离子源能量的变化比较大。由图 9 可知,随着离子源能量的增加, SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜在波长 980 nm 处的折射率逐渐增加,相应的薄膜聚集密度增加,从而使薄膜的压应力增大。上述分析表明,在制备 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 光学薄膜时,离子源能量对这三种薄膜的应力具有比较大的影响,通过选取合适的离子源能量,能够有效减小 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 光学薄膜的表面应力。

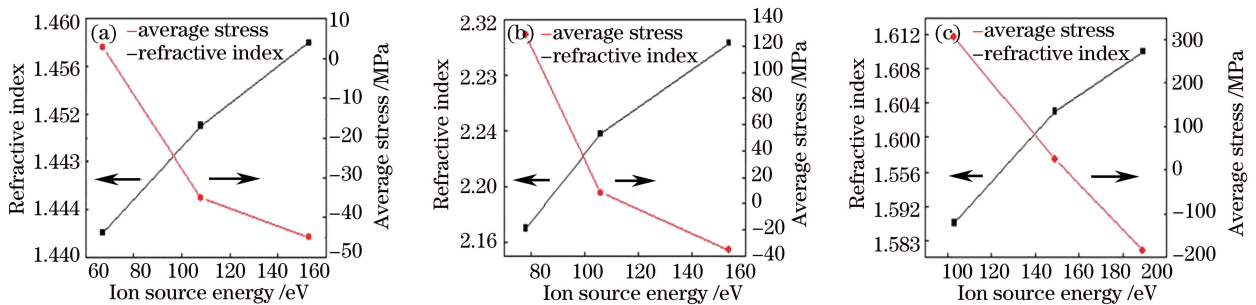


图 9 平均应力及折射率(波长 980 nm 处)与离子源能量间的关系。(a) SiO_2 薄膜; (b) TiO_2 薄膜; (c) Al_2O_3 薄膜

Fig. 9 Average stress and refractive index at wavelength of 980 nm versus ion source energy.

(a) SiO_2 thin films; (b) TiO_2 thin films; (c) Al_2O_3 thin films

不同基底温度和离子源能量下制备的 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的表面应力分布呈非均匀性,在薄膜样品的边缘易出现应力的集中现象,而且薄膜的脱落也往往是从薄膜的边缘开始的^[20]。产生这种现象的原因是:电子束蒸发制备的薄膜在生长

过程中存在着边界效应^[21],导致薄膜应力在边缘区域变化较大,分布很不均匀,而且薄膜应力的极大值也集中分布在薄膜边缘部分;由于 GaAs 基底尺寸(直径 2 英寸)较大,在薄膜的生长过程中基底表面各个部分温度分布不均匀,也是造成薄膜不均匀性

应力分布的一个重要原因。

3.3 放置时间对薄膜应力的影响

范瑞瑛等^[22]研究了 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 多层膜在大气环境中的放置时间(相对湿度约为 50%)对其应力的影响,结果表明,随着放置时间的增加,薄膜的张应力缓慢增加,而且最少需要放置 3 个月薄膜的应力才会趋于稳定。邵淑英等^[23]对电子束蒸发制备的 SiO_2 薄膜的应力随其在大气中放置时间的变化进行了测量,结果表明,不同基底温度下制备的所有 SiO_2 薄膜样品随着放置时间的增加,其张应力缓慢增加。由此可见,随着薄膜在大气环境中放置时间的增加,其张应力会出现缓慢增加的现象,最终趋于稳定。

4 结 论

用电子束蒸发方法在 GaAs 基底上制备了 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜,研究了不同基底温度及离子源能量下三种薄膜的应力分布,结果表明,薄膜的应力分布呈不均匀性,且基底温度和离子源能量对薄膜应力有显著的影响。通过合理地调节基底温度及离子源能量,得到 SiO_2 、 TiO_2 和 Al_2O_3 薄膜的最小应力值分别为 2.9, 8.4, 25.1 MPa,有效减小了薄膜应力。相关研究表明,放置时间也是影响薄膜应力的一个比较重要的因素。

参 考 文 献

- [1] Xu P, Zhang M. Current status of research on measurement of the stress in thin film[J]. Science Mosaic, 2006(12): 125-126.
徐鹏, 张萌. 薄膜应力测量研究现状[J]. 科技广场, 2006(12): 125-126.
- [2] Zhao Y J, Huang T C, Shen W D, *et al.* Effect of ion assisted deposition on the stress of TiO_2 thin films[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(11): 1816-1818.
赵永江, 黄腾超, 沈伟东, 等. 离子辅助沉积对 TiO_2 薄膜应力的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(11): 1816-1818.
- [3] Xu J, Chen L X, You X H, *et al.* Thermal stress damage of thin-film components induced by surface impurities[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0614003.
徐娇, 陈丽霞, 游兴海, 等. 表面杂质诱导薄膜元件的热应力损伤[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0614003.
- [4] Nishikawa T, Ono H, Murotani H, *et al.* Analysis of long-term internal stress and film structure of SiO_2

optical thin films[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): C210.

- [5] Lee C C, Chen H C, Jaing C C. Investigation of thermal annealing of optical properties and residual stress of ion-beam-assisted TiO_2 thin films with different substrate temperatures[J]. Applied Optics, 2006, 45(13): 3091-3096.
- [6] Robic J Y, Leplan H, Pauleau Y, *et al.* Residual stress in silicon dioxide thin films produced by ion-assisted deposition[J]. Thin Solid Films, 1996, 290/291: 34-39.
- [7] Xiong S M, Zhang Y D, Tang J F. The stress properties of oxide thin films prepared by reactive electron beam evaporation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2001, 28(1): 13-15.
熊胜明, 张云洞, 唐晋发. 电子束反应蒸发氧化物薄膜的应力特性[J]. 光电工程, 2001, 28(1): 13-15.
- [8] Gu P F, Zheng Z R, Zhao Y J, *et al.* Study on the mechanism and measurement of stress of TiO_2 and SiO_2 thin-films [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(12): 6459-6463.
顾培夫, 郑臻荣, 赵永江, 等. TiO_2 和 SiO_2 薄膜应力的产生机理及实验探索[J]. 物理学报, 2006, 55(12): 6459-6463.
- [9] Zhang J S, Zhang J L, Ning Y Q. Study of SiO_2 dielectric film stress grown by the method of ion assisted deposition[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(12): 1304-1308.
张金胜, 张金龙, 宁永强. 离子辅助沉积法制备 SiO_2 介质薄膜的应力研究[J]. 发光学报, 2012, 33(12): 1304-1308.
- [10] Chen T, Luo C T, Wang D S, *et al.* Stress distributions of titanium oxide film grown by electron-beam evaporation[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007, 27(2): 168-171.
陈焘, 罗崇泰, 王多书, 等. 电子束蒸发制备二氧化钛薄膜应力测量[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(2): 168-171.
- [11] Li C A, Yang M D, Quan B Q, *et al.* Stress simulation analysis of multilayer films deposition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 043101.
李长安, 杨明冬, 全本庆, 等. 多层薄膜沉积的应力仿真分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 043101.
- [12] Gries T, Vandenbulc L, Simon P, *et al.* Polarized micro-Raman spectroscopy for studying stresses in As-grown and tensile tested diamond films[J].

- Surface and Coatings Technology, 2008, 202(11): 2263-2267.
- [13] Tsyganov I, Maitz M F, Wiesser E, *et al.* Structure and properties of titanium oxide layers prepared by metal plasma immersion ion implantation and deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174/175: 591-596.
- [14] Lee C C, Chen H C, Jaing C C. Effect of thermal annealing on the optical properties and residual stress of TiO₂ films produced by ion-assisted deposition[J]. Applied Optics, 2005, 44(15): 2996-3000.
- [15] Murotani H, Arai K, Wakaki M. Time dependence of internal stress and optical characteristics of SiO₂ optical thin film[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6469: 646905.
- [16] Ligot J, Welzel U, Lamparter P, *et al.* Stress analysis of polycrystalline thin films and surface regions by X-ray diffraction[J]. Journal of Applied Crystallography, 2005, 38(1): 1-29.
- [17] Zhao Z W, Tay B K, Yu G Q. Room-temperature deposition of amorphous titanium dioxide thin film with high refractive index by a filtered cathodic vacuum arc technique[J]. Applied Optics, 2004, 43(6): 1281-1285.
- [18] Yuan W J, Shen W D, Zheng X W, *et al.* Optical and mechanical properties and microstructures of Nb₂O₅, Ta₂O₅ and SiO₂ thin film prepare by ion beam sputtering [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 1231001.
袁文佳, 沈伟东, 郑晓雯, 等. 离子束溅射制备 Nb₂O₅、Ta₂O₅ 和 SiO₂ 薄膜的光学、力学特性和微结构[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 1231001.
- [19] Guo J L, Liu X F, Zhao Y A, *et al.* Effect of substrates crystalline structure on crystalline and mechanical properties of HfO₂ thin films[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0603001.
郭佳露, 刘晓凤, 赵元安, 等. 基底晶态对 HfO₂ 薄膜晶向结构和力学特性的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0603001.
- [20] Dong M J, Zhang L, Wang D S, *et al.* Study on stress in edge optical filters[J]. Aerospace Materials and Technology, 2015(1): 14-17.
董茂进, 张玲, 王多书, 等. 光学滤光片薄膜边缘应力研究[J]. 宇航材料工艺, 2015(1): 14-17.
- [21] Chen T, Luo C T. The research progress of thin film stress[J]. Vacuum and Cryogenics, 2006, 12(2): 68-74.
陈焘, 罗崇泰. 薄膜应力的研究进展[J]. 真空与低温, 2006, 12(2): 68-74.
- [22] Fan R Y, Fan Z X. Stress analysis of films and some testing results[J]. Optical Instruments, 2001, 23(5/6): 84-91.
范瑞瑛, 范正修. 薄膜应力分析及一些测量结果[J]. 光学仪器, 2001, 23(5/6): 84-91.
- [23] Shao S Y, Tian G L, Fan Z X, *et al.* Influences of the deposition parameters and aging time on the residual stress of SiO₂ films[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 126-130.
邵淑英, 田光磊, 范正修, 等. 沉积参量及时效时间对 SiO₂ 薄膜残余应力的影响[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 126-130.