

# 基底温度对电子束沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜的影响

杜倩倩<sup>1,2</sup> 王文军<sup>1,2</sup> 李淑红<sup>1,2</sup> 刘云龙<sup>1,2</sup> 和晓晓<sup>1,2</sup> 高学喜<sup>1,2</sup>  
张丙元<sup>1,2</sup> 史 强<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059)  
(<sup>2</sup> 山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059)

**摘要** 利用热力学统计理论及薄膜生长理论, 给出了薄膜堆积密度、折射率与基底温度之间的关系。在实验中采用电子束热蒸发技术, 在不同的沉积速率和基底温度下制备了单层二氧化硅薄膜。研究了沉积速率与薄膜表面均匀度及折射率的关系, 并着重分析了基底温度对薄膜折射率、透射率、表面形貌及微观结构的影响。实验结果表明: 基底温度升高, 薄膜表面粗糙度减小, 晶粒间隙缩小, 折射率增加, 透射率提高, 吸收度降低。且当基底温度为 500 °C 时, 在可见光区域 SiO<sub>2</sub> 薄膜的透射率可达 99.4% 以上。对实验数据进行拟合, 理论计算与实验结果符合得很好。

**关键词** 薄膜; 电子束蒸发; 基底温度; 堆积密度

**中图分类号** O484.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.1007002

## Influence of Substrate Temperature on SiO<sub>2</sub> Thin Films by Electron Beam Deposition

Du Qianqian<sup>1,2</sup> Wang Wenjun<sup>1,2</sup> Li Shuhong<sup>1,2</sup> Liu Yunlong<sup>1,2</sup> He Xiaoxiao<sup>1,2</sup>  
Gao Xuexi<sup>1,2</sup> Zhang Bingyuan<sup>1,2</sup> Shi Qiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> School of Physical Science and Information Engineering, Liaocheng University,  
Liaocheng, Shandong 252059, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University,  
Shandong 252059, China

**Abstract** The relationship of stacking density, refractive index and substrate temperature is obtained by statistical thermodynamics theory and thin film growth mechanism. Monolayer SiO<sub>2</sub> thin films are fabricated at different substrate temperatures and deposition rates by electron beam evaporation technology. The relationships between deposition rate and surface uniformity, the refractive index are studied. The influence of substrate temperature on the refractive index, transmittance, morphology, microstructure of thin films is emphatically analyzed. It shows that the surface roughness decreases, the crystalline grain gap narrows, the refractive index and transmittance increase, absorption degree reduces with the increasing of substrate temperature. When the substrate temperature is 500 °C, the transmittance of SiO<sub>2</sub> thin films in the visible light is above 99.4%. Through fitting experimental data, theory calculation agrees well with the experimental results.

**Key words** thin films; electron beam evaporation; substrate temperature; stacking density

**OCIS codes** 310.6860; 310.1860; 310.6870; 310.6188

**收稿日期:** 2014-04-30; **收到修改稿日期:** 2014-05-16

**基金项目:** 国家自然科学基金(61275147)、山东省科技攻关计划(2010GGX10127)、山东省自然科学基金(ZR2012AL11, ZR2013EML006)、山东省“泰山学者”建设工程专项经费和聊城大学重点科研基金

**作者简介:** 杜倩倩(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事非线性光学及有机电致发光器件等方面的研究。

E-mail: dzdq0126@163.com

**导师简介:** 王文军(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学及有机光电子材料与器件等方面的研究。

E-mail: phywwang@163.com(通信联系人)

## 1 引 言

SiO<sub>2</sub> 是一种低折射率的氧化物材料,制成薄膜后可在可见光和近红外区域透明度高,具有光吸收小,附着力强,硬度大,抗磨耐腐蚀,抗激光损伤阈值高等优点,是一种理想光学薄膜,因此在微电子器件、光学元件等领域得到广泛应用<sup>[1-4]</sup>。目前制备 SiO<sub>2</sub> 薄膜的方法主要有电子束热蒸发、离子束反应溅射,磁控溅射法等<sup>[5-7]</sup>。随着科技的发展,光学以及电子元器件越来越精细,这对薄膜质量提出了更高的要求。制膜工艺是影响薄膜质量的关键,薄膜沉积过程中基底温度<sup>[8-11]</sup>,沉积速率<sup>[12]</sup>,气体压力<sup>[13]</sup>等因素,以及对薄膜退火处理<sup>[14]</sup>等都能影响薄膜的结构和性能。

电子束热蒸发技术易操作,效率高,所制备薄膜纯度高、质量好,被人们广泛采用。采用电子束热蒸发方法,以 K9 玻璃为基底制备 SiO<sub>2</sub> 薄膜。并利用热力学统计及薄膜生长理论,构建了薄膜堆积密度、折射率与基底温度之间的理论模型。研究了薄膜折射率、粗糙度随沉积速率的变化关系,着重分析了基底温度对薄膜形貌、微观结构及光学性能的影响;并将实验数据进行了拟合。

## 2 理论分析

基于气体动力学的薄膜堆积理论,在薄膜生长过程中,膜分子与空气分子的竞争在一定程度上对薄膜的生长起着主导作用<sup>[15]</sup>。假设  $V_s$ 、 $V_g$  分别为薄膜中膜分子和空隙的体积,则薄膜的堆积密度  $q$  为

$$q = \frac{V_s}{V_s + V_g}, \quad (1)$$

文献中记载,薄膜堆积密度  $q$  与薄膜折射率  $n$  呈线性关系<sup>[16]</sup>

$$n = n_g + q(n_s - n_g), \quad (2)$$

式中  $n_s$  为薄膜固体部分折射率, $n_g$  为薄膜空隙部分折射率

### 2.1 膜材蒸发粒子体积

若蒸发出的膜材分子数为  $Z_0$ ,在迁移途中发生碰撞的分子数为  $Z_1$ ,蒸发距离为  $l$ ,则发生碰撞的分子数与总蒸发分子数比率<sup>[17]</sup>为:

$$\frac{Z_1}{Z_0} = 1 - \exp\left(-\frac{l}{\lambda}\right), \quad (3)$$

式中  $\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi}Pd^2}$ , $k$  为玻尔兹曼常数, $P$  为气压值, $d$  为分子直径。

薄膜在沉积时,总有一部分原子或分子会产生

解析,而不能百分百地凝结,设蒸发粒子的凝结系数为  $\alpha_1$ ,它与基板温度,沉积速率以及基板性质有关<sup>[16]</sup>。单位时间内凝结在基板上分子总数  $Z_s$  为

$$Z_s = \alpha_1(Z_0 - Z_1) = \alpha_1 Z_0 \exp\left(-\frac{l}{\lambda}\right). \quad (4)$$

设单个膜材粒子的体积为  $v_s$ ,则薄膜分子的总体积为

$$V_s = v_s Z_s = v_s \alpha_1 Z_0 \exp\left(-\frac{l}{\lambda}\right) = v_s \alpha_1 Z_0 \exp\left(-\frac{\sqrt{2\pi}pd^2 l}{kT}\right). \quad (5)$$

### 2.2 薄膜空隙体积

将薄膜中的空隙部分近似看作气体分子填充,根据气体分子运动论,对处于热平衡状态,压强为  $P$  的气体,单位时间内碰撞单位面积器壁的分子数为

$$J = \frac{1}{4} \rho v_a = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (6)$$

式中  $\rho$  是分子密度, $v_a$  是算术平均速度, $m$  是分子质量, $k$  为玻尔兹曼常数。

设单个气体分子的体积为  $v_g$ ,吸附系数为  $\alpha_2$  故单位时间单位面积气体分子总数  $Z_g$  及气体分子所占总体积  $V_g$  为

$$Z_g = \frac{\alpha_2 P}{\sqrt{2\pi mkT}}$$

$$V_g = \frac{\alpha_2 v_g P}{\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (7)$$

将(5)式、(7)式代入(1)式得堆积密度为

$$q = \frac{V_s}{V_s + V_g} = \frac{v_s \alpha_1 Z_0 \exp\left(-\sqrt{2\pi}pd^2 l/kT\right)}{v_s \alpha_1 Z_0 \exp\left(-\sqrt{2\pi}pd^2 l/kT\right) + \alpha_2 v_g p/\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (8)$$

将(8)式代入(2)式即可得出薄膜折射率  $n$  与基底温度的关系。

## 3 实验过程

SiO<sub>2</sub> 薄膜制备采用中科院沈阳科仪公司生产的 DSZ-500 型电子束蒸发与电阻蒸发复合镀膜系统淀积到 K9 玻璃上,分别用乙醇和丙酮超声 15 min 清洗 K9 玻璃基板,然后用二次去离子水冲洗、氮气吹干。电子束热蒸发材料选用纯度为 99.99% 的 SiO<sub>2</sub> 颗粒。薄膜沉积过程中,基板匀速转动为 20 r/min 以确保薄膜的均匀性,并使用 SQM-200 石英晶控监测薄膜的厚度与蒸发速率。本底真空气压为  $1 \times 10^{-4}$  Pa,氧分压为  $2 \times 10^{-2}$  Pa,

分别在不同沉积速率和基片温度下,沉积相同厚度的 SiO<sub>2</sub> 薄膜,实验中维持稳定的蒸发速率。室温条件下,分别采用日本日立公司生产的 UV-3100 型紫外可见分光光度计、美国 J. A. Woollam 公司生产的 M-2000II 型椭偏仪、俄罗斯 NT-MDT Co 公司生产的原子力显微镜(AFM)对制备的 SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学性能及表面形貌进行测量和表征。

## 4 实验结果分析

沉积速率是影响薄膜性能的一个重要因素,图 1 为不同沉积速率 SiO<sub>2</sub> 薄膜 AFM 二维形貌,表 1 给出

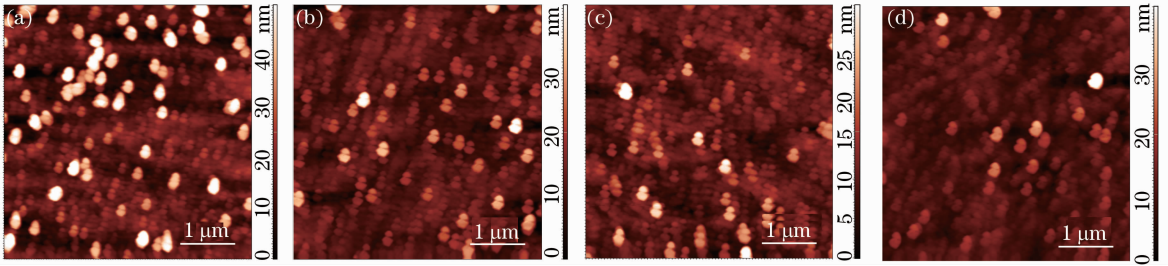


图 1 不同沉积速率 SiO<sub>2</sub> 薄膜二维 AFM 形貌。(a) 0.1 nm/s; (b) 0.2 nm/s; (c) 0.3 nm/s; (d) 0.4 nm/s

Fig. 1 AFM two dimension images of SiO<sub>2</sub> films deposited at different deposition rates. (a) 0.1 nm/s; (b) 0.2 nm/s; (c) 0.3 nm/s; (d) 0.4 nm/s

表 1 沉积速率对 SiO<sub>2</sub> 薄膜性能的影响

Table 1 Effects of the deposition rate on the performance of SiO<sub>2</sub> thin films

Deposition rate / (nm/s)	0.1	0.2	0.3	0.4
Roughness / nm	3.6137	3.4271	3.2069	3.5129
Refractive index at 450 nm	1.476	1.483	1.491	1.483

### 4.1 基底温度对薄膜折射率的影响

为研究基底温度对薄膜折射率的影响,分别在 50 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C 的基底温度下制备 SiO<sub>2</sub> 薄膜,并测量这些薄膜在 λ = 450 nm 的折射率,实验结果如图 2(实点)所示,可以看出,折射率在 1.49~1.55 之间变化,且随基底温度升高(50 °C~500 °C),折射率增大。

根据上面所得堆积密度(8)式,若只考虑基板温度的影响,可设拟合参数 C 为

$$C = \left[ \frac{v_g \alpha_2 p / \sqrt{2\pi mk}}{v_s \alpha_1 Z_0 \exp(-\sqrt{2\pi} p d^2 l / k)} \right], \quad (9)$$

代入(8)式得出薄膜堆积密度为

$$q = 1 / \left[ 1 + C \sqrt{1/T} \exp\left(\frac{1}{T}\right) \right], \quad (10)$$

将(10)式代入(2)式得出薄膜折射率与基板温度的关系为

了不同沉积速率下所制备的 SiO<sub>2</sub> 薄膜的折射率及粗糙度。沉积速率在 0.1~0.3 nm/s 范围内,随着沉积速率的增加,薄膜粗糙度减小,折射率增大;当沉积速率增加到 0.4 nm/s 时,薄膜粗糙度增大,折射率开始下降。原因是随着沉积速率的增加,入射粒子动能增加,在基片表面上的迁移率增大,可促进晶核的聚结,提高薄膜质量,但沉积速率过大,将导致薄膜生长缺陷密度增加,使薄膜质量降低。为了保证薄膜具有较高的致密度和较低的粗糙度,在后面的样品制备过程中保持 0.3 nm/s 沉积速率不变。

$$n = n_g + q(n_s - n_g) =$$

$$n_g + 1 / \left[ 1 + C \sqrt{1/T} \exp\left(\frac{1}{T}\right) \right] (n_s - n_g). \quad (11)$$

图 2 为制备的 SiO<sub>2</sub> 薄膜折射率与基板温度的关系,实点为实验测量值,虚线由(11)式拟合的曲线(取  $n_s = 1.5$ ,  $n_g = 1$ )。从图中可以看出,薄膜折射率随基底温度的升高而逐渐增大,在基板温度较低(200 °C 以下)时,折射率增加较快,温度达到 400 °C 以上其折射率基本趋于一个稳定值,理论计算与实验结果符合得很好。薄膜在生长过程中,随着基底温度增加,沉积粒子与基板进行热交换而获得较大的迁移动能,进而在基片表面进行充分扩散,减少了薄膜中的生长缺陷,空隙部分在膜层中的体积比例

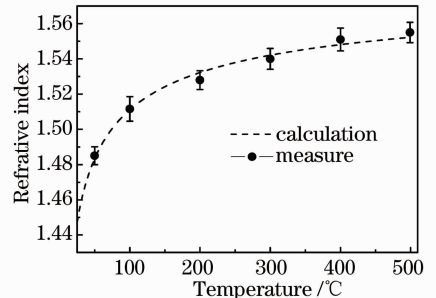


图 2 薄膜折射率随基底温度的变化曲线(λ = 450 nm)  
Fig. 2 Variation curve of refractive index with substrate temperature (λ = 450 nm)

减小,薄膜堆积密度增加,折射率增大。

### 4.2 基底温度对薄膜形貌的影响

采用 AFM 对不同基底温度下制备的 SiO<sub>2</sub> 薄膜表面形貌进行表征。设定 AFM 扫描范围为 4.0 μm×4.0 μm,扫描频率为 0.72 Hz,扫描方式选用轻敲模式。

图 3 为不同基底温度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜的 AFM 扫描图像。随着基片温度的增加,薄膜表面平整度逐渐提高,结构致密度增加。当基片温度为 50 °C [图

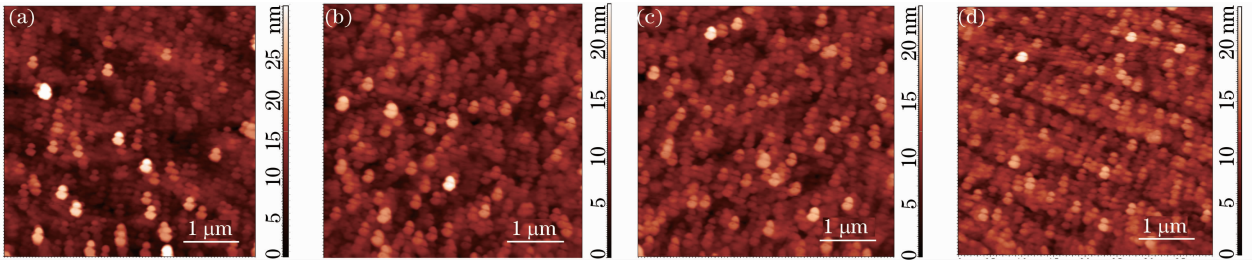


图 3 不同基底温度 SiO<sub>2</sub> 薄膜二维形貌。(a) 50 °C; (b) 100 °C; (c) 300 °C; (d) 500 °C

Fig. 3 AFM two dimension images of SiO<sub>2</sub> films deposited at different substrate temperatures. (a) 50 °C; (b) 100 °C; (c) 300 °C; (d) 500 °C

为了便于分析,将基底温度变化对薄膜表面粗糙度的影响绘成曲线,如图 4 所示,从图中明显看出:随温度升高,薄膜表面平均粗糙度(圆形符号线)及均方根粗糙度(方形符号线)均减小。主要原因为:薄膜在生长过程中,沉积在基板上的粒子与基底要进行能量交换,当基底温度较低时,沉积粒子将部分能量传给基片,粒子迁移动能减小,扩散能力降低,被吸附在基体表面上成核,核心较为分散,薄膜空隙体积 V<sub>g</sub> 所占比例大,生长的薄膜结构疏松多孔,薄膜的堆积密度小;基板温度增加,粒子将在基底获取能量,表面扩散能力增加,容易发生扩散迁移和重排,薄膜空隙体积 V<sub>g</sub> 减小,薄膜分子总体积 V<sub>s</sub> 增大,薄膜结构的致密度增加,进而提高薄膜的折射率。这与温度升高折射率增大的实验结果以及理论

3(a)]时,薄膜表面均匀性较差,高低起伏高达 35 nm,晶粒之间的空隙相当明显;基底温度为 100 °C [图 3(b)]时,表面的均匀性获得一定程度提高,起伏度下降(约 25 nm),晶粒之间空隙减小;基底温度为 300 °C [图 3(c)]时,晶粒之间的空隙进一步缩小,排布趋于密集,均匀度相对较好,表面结构已相当致密;基底温度达到 500 °C [图 3(d)]时, SiO<sub>2</sub> 薄膜表面平整,起伏度仅有 20 nm 左右,且晶粒排列整齐有序,致密度进一步提高。

关系保持较好的一致性。

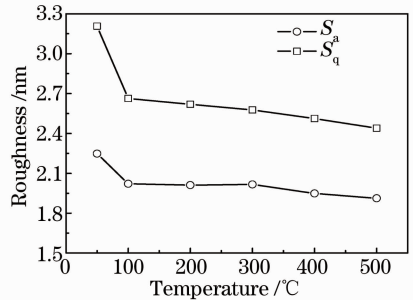


图 4 不同温度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜的表面粗糙度

Fig. 4 Roughness of SiO<sub>2</sub> thin films at different temperatures

### 4.3 基底温度对透射光谱影响

图 5(a)为不同基底温度环境下制备的 SiO<sub>2</sub> 薄

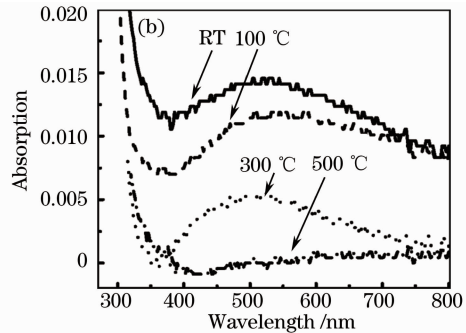
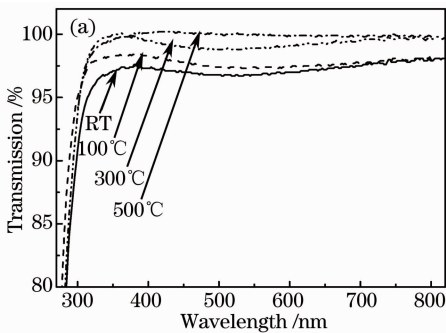


图 5 不同基底温度下 SiO<sub>2</sub> 薄膜的光谱。(a) 透射光谱;(b) 吸收光谱

Fig. 5 Spectra of SiO<sub>2</sub> films formed at different substrate temperatures. (a) Transmittance spectra; (b) absorption spectra

膜的透射光谱,图 5(b)是对应的吸收光谱,可以看出,随着基板温度的升高,薄膜透射率增加。在可见光波长范围内透明度都较高,透射率均在 95% 以上。随基底温度升高,光谱曲线向上漂移,透射率增加;当基底温度达 500 °C 时,透射率高达 99.4%。这是因为室温生长的薄膜疏松多孔,粗糙度较大,对光线的散射较强,光学损耗较大,薄膜透射率较低;基底温度升高,晶粒生长过程加快,凝结过程中缺陷减小,薄膜表面粗糙度下降,散射损耗降低,折射率增加。并且随着温度升高,薄膜材料对氧气的吸收增加,有利于基底表面吸附气体和杂质的脱附,使薄膜纯度增加,吸收损耗降低,薄膜透射率提高。

## 5 结 论

研究了沉积速率、基底温度对 SiO<sub>2</sub> 薄膜的折射率、透射率、形貌及微观结构的影响。利用热力学统计及薄膜生长理论,获得了薄膜堆积密度、折射率与薄膜基板温度之间的关系。利用电子束热蒸发方法,在不同基板温度下制备了相同厚度的 SiO<sub>2</sub> 薄膜,并对其光学性能及表面形貌进行了测量和表征。研究表明:随基底温度升高,薄膜表面粗糙度减小,结构致密度增加,折射率增大,折射率与基板温度关系的实验结果与理论计算十分吻合。不同基底温度环境下制备的 SiO<sub>2</sub> 薄膜,在可见光波长区域透射率均较高,并随基底温度的升高而增加。当基底温度为 500 °C 时,薄膜的表面平整、结构致密,透射率可达 99.4%。这对通过控制基板温度实现光学薄膜的优化和电子束蒸发沉积工艺提供了有价值的参考。

## 参 考 文 献

- 1 W H Lin, G P Wang, S H Zang. Design and fabrication of omnidirectional reflectors in the visible range[J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, 52(8): 1155-1160.
- 2 Gang Dai, Yanbei Chen, Jian Lu, *et al.*. Analysis of laser induced thermal mechanical relationship of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high reflective optical thin film at 1064 nm[J]. *Chin Opt Lett*, 2009, 7(7): 601-604.
- 3 Wang He, He Hongbo, Zhang Weili. Mechanical properties of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> thin films on different substrates [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(7): 0707003.  
王 河, 贺洪波, 张伟丽. 不同基底上 HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜的力学性能[J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0707003.
- 4 Zhang Xue, Li Yuping, Han Peide, *et al.*. Band gap properties and photocatalytic activities of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayers films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0716001.  
张 雪, 李玉平, 韩培德, 等. TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 多层膜的带隙结构及光催化性能[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0716001.
- 5 Mi Gaoyuan, Zhu Chang, Qi Yunjuan, *et al.*. Optical properties of silicon oxide thin films deposited by reactive-ion-beam

- sputtering method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(2): 236-240.
- 米高园, 朱 昌, 戚云娟, 等. 离子束反应溅射沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜的光学特性[J]. *应用光学*, 2011, 32(2): 236-240.
- 6 Liu Huasong, Wang Lishuan, Jiang Yugang, *et al.*. Adjustments of refractive index and stress of SiO<sub>2</sub> films prepared by IBS technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2238-2243.  
刘华松, 王利栓, 姜玉刚, 等. 离子束溅射制备 SiO<sub>2</sub> 薄膜的折射率与应力调整[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(9): 2238-2243.
- 7 Xiong Bin, Xu Gang, Shi Jifu. Effect of substrate temperature on SiO<sub>2</sub> deposition by magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2012, 49(2): 44-46.  
熊 斌, 徐 刚, 史继富. 基片温度对磁控溅射沉积二氧化硅的影响[J]. *真空*, 2012, 49(2): 44-46.
- 8 S V Chandra, S Uthanna, G M Rao. Effect of substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of dc magnetron sputtered tantalum oxide films[J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(7): 1953-1960.
- 9 R Fu, J Pattison. Advanced thin conformal Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films for high aspect ratio mercury cadmium telluride sensors [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(10): 104003.
- 10 Xinmiao Lu, Yiqun Wu, Yang Wang, *et al.*. Optical characterization of antimony-based bismuth-doped thin films with different annealing temperatures [J]. *Chin Opt Lett*, 2011, 9(10): 102101.
- 11 Zhao Haiting, Ma Ziwei, Li Jian, *et al.*. Influence of substrate temperature on structural and optical properties of HfO<sub>2</sub> thin films[J]. *High Power Lasers and Particle Beams*, 2010, 22(1): 71-74.  
赵海廷, 马紫薇, 李 健, 等. 衬底温度对 HfO<sub>2</sub> 薄膜结构和光学性能的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(1): 71-74.
- 12 Wang Ning, Wei Chaoyang, Shao Jianda, *et al.*. Experimentation of depositon rate control of SiO<sub>2</sub> by E-beam auto-weeping[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(10): 2615-2619.  
王 宁, 魏朝阳, 邵建达, 等. 电子束自动扫描 SiO<sub>2</sub> 材料沉积速率控制实验研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2615-2619.
- 13 Xing Xiao, Wang Wenjun, Li Shuhong, *et al.*. Properties of TiO<sub>2</sub> films deposited by pulsed laser depositon [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0207001.  
邢 晓, 王文军, 李淑红, 等. 脉冲激光沉积制备 TiO<sub>2</sub> 薄膜的性能[J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0207001.
- 14 Tian Hao, Liu Zhengtang, Feng Liping, *et al.*. Influence of annealing temperatures on optical properties of HfSi<sub>x</sub>O<sub>y</sub> thin films prepared by magnetron sputtering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0631005.  
田 浩, 刘正堂, 冯丽萍, 等. 退火对磁控溅射 HfSi<sub>x</sub>O<sub>y</sub> 薄膜光学性质的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0631005.
- 15 Zhang Dawei, Sun Haojie, Lü Weige. Effects of pressure and temperature on the refraction of film[J]. *University of Shanghai for Science and Technology*, 2007, 29(2): 175-178.  
张大伟, 孙浩杰, 吕玮阁. 压强和温度对薄膜折射率的影响模型 [J]. *上海理工大学学报*, 2007, 29(2): 175-178.
- 16 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Zhejiang: Zhejiang Univesity Press, 2006. 45-50.  
唐晋发, 顾培夫, 刘 旭, 等. *现代光学薄膜技术* [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2006. 45-50.
- 17 Li Yunqi. *Vacuum Coating* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. 92-95.  
李云奇. *真空镀膜* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011. 92-95.

栏目编辑: 张浩佳