

脉冲激光沉积制备 TiO₂ 薄膜的性能

邢 晓 王文军 李淑红 刘云龙 张 栋 史 强 高学喜 张丙元

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

摘要 采用脉冲激光沉积(PLD)的方法在玻璃衬底上制备了二氧化钛薄膜,研究了基片温度和氧压对薄膜表面形貌、晶体结构和光学性能的影响。结果表明:当基片温度低于 300 ℃或高于 400 ℃时,二氧化钛薄膜的折射率都随着基片温度的升高而增大;基片温度处于 300 ℃~400 ℃之间时,折射率随着基片温度的升高而降低;基片温度为 300 ℃时,折射率最大。薄膜的折射率随着氧压的增大而减小。X 射线衍射仪(XRD)显示薄膜在基片温度低于 300 ℃时为非晶态结构,在 300 ℃时出现了锐钛矿结构,当基片温度升高到 500 ℃时,薄膜仍为锐钛矿结构;300 ℃时,薄膜的 A(101)衍射峰最强,结晶度最好。通过原子力显微镜(AFM)图分析得出:低于 300 ℃时,随着基片温度的升高,二氧化钛薄膜的晶粒尺寸增大,聚集密度增大;高于 300 ℃时,晶粒的平均尺寸大小几乎不变,300 ℃时,晶粒排列最均匀有序。根据薄膜的透射谱计算了薄膜的光学带隙,可知随着基片温度的升高,二氧化钛薄膜的带隙变窄;随着氧压的增大,带隙变宽。

关键词 薄膜;TiO₂;折射率;基片温度;氧压;透射谱;带隙

中图分类号 O484.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0207001

Properties of TiO₂ Films Deposited by Pulsed Laser Deposition

Xing Xiao Wang Wenjun Li Shuhong Liu Yunlong Zhang Dong
Shi Qiang Gao Xuexi Zhang Bingyuan

(Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China)

Abstract The TiO₂ films are deposited on glasses by pulsed laser deposition (PLD), and the effects of substrate temperature and oxygen pressure on the surface morphology, structure and optical properties of TiO₂ films are studied. The results show that the refractive index of TiO₂ films increases until the substrate temperature reaches 300 ℃, decreases from 300 ℃ to 400 ℃, increases from 400 ℃ to 500 ℃, and gets the maximum at 300 ℃. The refractive index decreases when the oxygen pressure getting higher. The X-ray diffraction (XRD) diagrams demonstrate that the structure of TiO₂ films are all amorphous when the growth temperature is under 300 ℃, transforms into anatase structure at 300 ℃, and keeps anatase from 300 ℃ to 500 ℃. The crystallization degree is the best at 300 ℃. The atomic force micrographs (AFM) of the TiO₂ films manifest that the particle size increases with the substrate temperature increasing till 300 ℃. When the substrate temperature exceeds 300 ℃, the average particle size remain unchanged almost, and the grain arrangement is best-orderly when the substrate temperature is 300 ℃. According to the transmission spectra, the band gap width of TiO₂ thin films is calculated. It is recognized that the width of the band gap gets wider while the substrate temperature goes up, but narrower while the oxygen pressure increases.

Key words thin films; TiO₂; refractive index; substrate temperature; oxygen pressure; transmission spectrum; band gap

OCIS codes 310.1860; 310.5448; 310.6188; 310.6860; 310.6870

收稿日期: 2012-09-07; 收到修改稿日期: 2012-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61275147)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金(BS2009DX014)、山东省科技攻关计划(2010GGX10127)和聊城大学重点科研基金资助课题。

作者简介: 邢 晓(1987—),女,硕士研究生,主要从事真空镀膜和一维光子晶体方面的研究。

E-mail: xingxiao2010@163.com

导师简介: 王文军(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光技术、非线性光学和超快动力学特性等方面的研究。E-mail: phywwang@163.com

1 引言

二氧化钛(TiO_2)薄膜在可见光和近红外光波段范围内具有较高的折射率和较宽的光学带隙^[1~3],具有优异的电学和半导体性能^[4],独特的量子尺寸效应、表面和界面效应,以及宏观量子隧道效应等^[5]。 TiO_2 是一种用途十分广泛的薄膜材料,在光催化、光存储器、光滤波器^[6,7]、光子晶体^[8]等方面都有广泛应用^[9],因此受到研究人员的广泛关注^[3~11]。自然界中 TiO_2 主要有三种晶型结构:板钛矿、锐钛矿和金红石^[1~3,5,12]。在工业中, TiO_2 薄膜的制备技术主要有溶胶凝胶法、电化学法、化学汽相沉积法、磁控溅射法、激光沉积镀膜法等^[1,4],相对于其他制备技术,激光沉积镀膜法由于靶材的纯度高、镀膜的本底真空度高,因而生长的薄膜具有杂质少,缺陷均匀,薄膜致密性好等优点,并且制备过程能耗低、薄膜生长容易控制^[5,13]。应用该技术时,通过精确控制束流强度,调整源的方法,可以迅速改变膜层组分和掺杂浓度。本文采用激光沉积镀膜的方法在玻璃衬底上制备了不同条件下的 TiO_2 薄膜,通过控制激光的能量大小、镀膜时的氧压以及基板的温度等来控制薄膜的生长,以找寻化学比例最佳,平整度较好、光学性能优异的 TiO_2 薄膜,并分析了基片温度和氧压对薄膜表面形貌、结构和光学性能的影响。

2 实验

实验采用脉冲激光沉积制备了同条件下不同氧压和同条件下不同基片温度的两组 TiO_2 薄膜。所用光源为德国Lambda公司生产的KrF准分子激光器,输出激光波长为248 nm,脉宽为20 ns,脉冲重复频率为5 Hz,单脉冲能量为129 mJ。基片为普通玻璃片,玻璃基片分别在无水乙醇和丙酮溶液中超声15 min,取出后用去离子水冲洗,最后用高纯氮气吹干备用。靶材用直径50 mm、厚度3 mm、纯度为99.999%的钛靶,衬底与靶面间距为5 cm。激光束经聚焦后以 45° 照射到钛靶上。真空系统的背景真空都为 2×10^{-5} Pa,样品分为两组,第一组衬底温度为 400°C ,然后通入纯度为99.999%的高纯氧,氧压分别为0.5、1、2 Pa,沉积时间为30 min。第二组衬底温度分别为室温 100°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C ,然后通入纯度为99.999%的高纯氧,氧压为1 Pa,沉积时间为3 h。

透射谱在日本日立公司生产的UV-3100型紫

外可见分光光度计测量的。薄膜结构使用德国Bruker公司D8 Advance型X射线衍射仪(XRD)(Cu K α 辐射波长0.15406)测量,薄膜形貌使用俄罗斯NT-MDT Co公司生产的原子力显微镜(AFM)测量。

3 结果与讨论

3.1 氧压对薄膜折射率的影响

薄膜的厚度和折射率用美国J. A. Woollam公司生产的M-2000II型椭圆偏仪测量,并通过WVASE32软件对测得的数据进行拟合。第一组样品的厚度、折射率(在550 nm处)如表1所示。

表1 相同基片温度(400°C)不同氧压时 TiO_2 薄膜的厚度与折射率

Table 1 Thicknesses and refractive indices of TiO_2 films with different O_2 pressures and the same substrate temperature (400°C)

O_2 pressures /Pa	0.5	1	2
Thickness/nm	74.232	79.482	60.750
Refractive index (at 550 nm)	2.7400	2.6300	2.5029

从表1可以看出,薄膜的沉积速率在0.5 Pa和1.0 Pa时,变化不大。较小的变化可能与激光能量的误差有关。在氧压为2.0 Pa时,薄膜的沉积速率明显减小。这是因为在高氧压的情况下,粒子的运动受到束缚造成的。还发现随着氧压的增大,薄膜的折射率减小。图1为不同氧压条件下 TiO_2 薄膜的XRD图,从图中可以看出,基片温度为 400°C 时,只有氧压1 Pa TiO_2 薄膜测出了晶相,说明氧压1 Pa最适合 TiO_2 薄膜生长。由于薄膜的厚度只有80 nm左右,所以峰值强度较小。在外延室内部,激

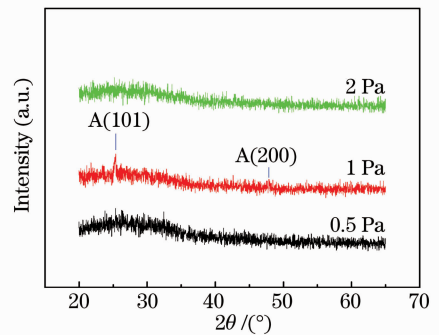
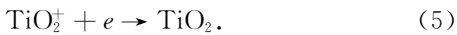
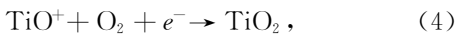
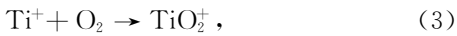


图1 基片温度为 400°C ,氧压分别取0.5、1.0、2.0 Pa时制备的 TiO_2 薄膜的XRD图
Fig. 1 X-ray diffraction of TiO_2 films deposited at different oxygen pressures of 0.5, 1.0, 2.0 Pa and substrate temperature of 400°C

光打到钛靶材上,钛原子吸收光子能量,发生如下反应:



(1)~(3)式的反应发生在基片的上方,(4),(5)式的反应发生在基片上^[2]。当氧压为 0.5 Pa 时,氧气不充足,薄膜中可能还存在着低价钛氧化物或者是钛离子;随着氧压增大到 1.0 Pa 时,钛离子和低价钛氧化物离子能够充分转化为 TiO₂。氧压增大到 2.0 Pa 时,外延室内的等离子体的密度增大,导致对分子的束缚力增大,当颗粒大到一定的程度后,受库仑斥力的影响,分子只能向相反的方向或者向库仑斥力不大的方向运动,而不能继续聚集形成更大的颗粒。分子之间的碰撞更加的频繁,阻止了晶粒增大^[14]。随着氧压的增大,由于表面张力和库仑力的影响导致颗粒尺寸减小,薄膜的聚集密度减小^[15],所以折射率就减小。

3.2 氧压对薄膜透射谱和带隙的影响

薄膜透射谱[图 2(a)]是在日本日立公司生产

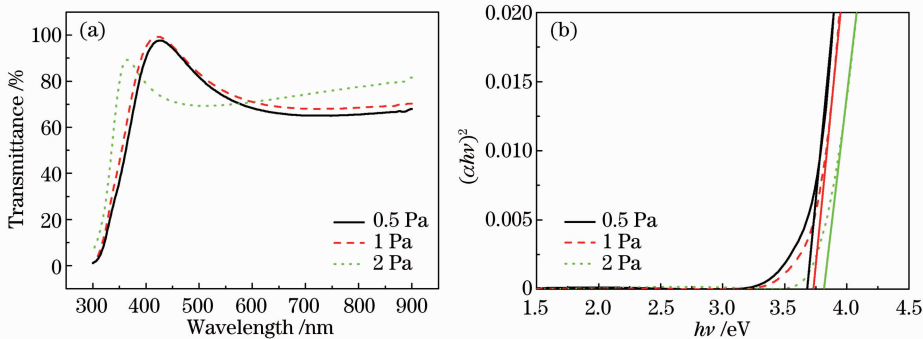


图 2 基片温度为 400 °C,氧压分别取 0.5,1.0,2.0 Pa 时制备的 TiO₂ 薄膜的(a)透射谱和(b)带隙

Fig. 2 (a) Transmission spectra and (b) $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ plot of TiO₂ films deposited at different oxygen pressures of 0.5, 1.0, 2.0 Pa and substrate temperature of 400 °C

图 2(a)给出了在相同基片温度(400 °C)、不同氧压情况下(0.5、1.0、2.0 Pa)制备的 TiO₂ 薄膜的透射谱,并根据透射谱计算了 TiO₂ 薄膜的带隙[如图 2(b)所示]。可以看出随着氧压的增大,截止波长有蓝移的趋势,在紫外波段的透射率增大,且带隙的宽度随着氧压的增大而增大,分别为 3.63 eV (0.5 Pa)、3.74 eV (1.0 Pa)、3.82 eV (2.0 Pa)。综上分析可知,随着氧压的增大,导致颗粒的尺寸减小,薄膜的聚集密度减小^[15],从而带隙宽度增大^[14]。

的 UV-3100 型紫外可见分光光度计上进行测量的。根据固体吸收理论,使用下面公式可以拟合出样品的带隙宽度:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n, \alpha = \frac{\ln(1/T)}{d}, \quad (6)$$

式中 A 为与材料有关的常数, α 为薄膜的吸收系数, T 为透射率, d 为薄膜的光学厚度, E_g 为薄膜的带隙宽度, $h\nu$ 为 λ 射光子的能量, n 为跃迁系数(直接跃迁为 1/2,间接跃迁为 2)^[14,16]。带隙宽度与光子能量的关系曲线见图 2(b)。将其线性部分外延到横轴,在 $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 处便可得到光学带隙 E_g 的值。虽然非晶态材料缺少长程周期性,但从本质上说电子状态取决于原子之间的成键方式,即取决于短程序^[17]。非晶态氧化钛薄膜和晶态氧化钛薄膜具有几乎完全相同的短程序,两者的能带结构应基本相似^[16],因此非晶态和晶态的氧化钛薄膜都可以用这种方法来计算光学带隙。

从薄膜的透射谱[图 2(a)]中可以看出,在可见光范围内(400~760 nm)有很高的透射率,而波长小于 360 nm 的紫外光透射率急剧下降,反映出 TiO₂ 薄膜属于直接带隙的半导体材料^[18,19],所以 n 取 1/2。

3.3 基片温度对薄膜折射率的影响

在 XRD 的测试中,基片温度为 400 °C 时,只有氧压为 1.0 Pa 时 TiO₂ 薄膜测出了晶相。因此说明氧压为 1.0 Pa 时,钛与氧的化学配比比较合适。因此选择氧压为 1.0 Pa,来研究基片温度对薄膜的影响。保持氧压为 1.0 Pa,改变基板温度(从室温到 500 °C),得到薄膜厚度、折射率(波长为 550 nm 处)如表 2 所示。

表 2 相同气氧压(1.0 Pa)不同基片温度时 TiO₂ 薄膜的厚度与折射率
Table 2 Thicknesses and refractive indices of TiO₂ films with different substrate temperatures at the same oxygen pressure (1.0 Pa)

Temperature / °C	26	100	200	300	400	500
Thickness/nm	350	336	286	313	255	297
Refractive index (at 550 nm)	1.9400	2.1300	2.2562	2.5635	2.4995	2.5168

从表 2 可以看出,在氧压为 1.0 Pa 时,随着温度的升高,TiO₂ 薄膜(在波长 550 nm 处)折射率先增大后减小,而后又再增大,在 300 °C 时达到最大。样品组的薄膜平均厚度为 306 nm,薄膜的沉积速率的最大误差保持在 0.0046 nm/s 之内。这一组的薄膜的沉积速率较第一组的薄膜沉积速率小,这是因为当 TiO₂ 溅射到衬底上时,首先形成团簇,然后团簇慢慢成核最后连成连续薄膜,这个过程中薄膜的生长速度是随着薄膜的形成逐渐变快的,此后薄膜生长速度保持稳定,当薄膜厚到一定值后,生长速度再次变慢。因此镀膜 0.5 h 的平均速率肯定要大于镀膜 3 h 的平均速率。图 3 为基片温度分别从室温到 500 °C,氧压为 1.0 Pa 时的 TiO₂ 薄膜 XRD 图。从图中可以看出,在温度低于 300 °C 时,为非晶态结构,这是因为在低温下,晶体不能形成大的晶粒^[20]。温度在 300 °C 时出现了晶相,且随着温度的升高,晶相表明都为锐钛矿结构,生长的薄膜有较好的择优取向 A(101)。另外,根据 A(101)晶相,计算出 300 °C 到 500 °C 的薄膜的半峰全宽(FWHM, $\omega_{1/2}$)都约为 0.213°。根据谢乐公式 $D = \frac{k\lambda}{\omega_{1/2} \cos \theta}$, $k = 0.89, \lambda = 0.15406, 2\theta = 25.281$, 可以得出晶粒的平均尺寸应为 37.29 nm。从图 3 中还发现,衬底温度从 300 °C 上升到 500 °C 时,随着衬底温度的改变, A(101) 衍射峰强度有所变化。300 °C 时最强,400 °C 时最弱,说明 300 °C 结晶最

好,因此折射率也最大。为了证明薄膜厚度的误差对薄膜折射率和结晶程度的影响可以忽略,选择其他条件不变,氧压 1.0 Pa,基片温度 400 °C,镀膜时间增加到 5 h。薄膜的厚度增大到 546 nm,此时的折射率为 2.4844,并没有因为厚度增大而折射率增大。而且薄膜的晶相 A(101)的衍射峰强度仍然小于 300 °C 和 500 °C 时的薄膜的晶相衍射峰强度。

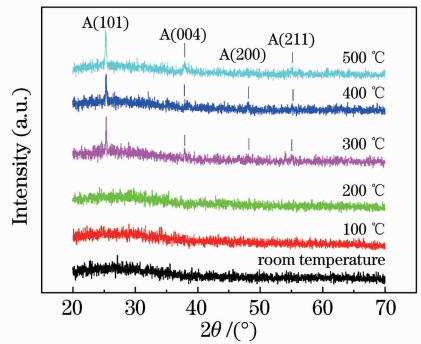


图 3 基片温度取不同值时 TiO₂ 薄膜的 XRD 图
Fig. 3 XRD pattern of TiO₂ films deposited at different substrate temperatures

图 4 为基片温度分别为室温、300 °C 和 500 °C 的 TiO₂ 薄膜的二维 AFM 图。图 5 为基片温度为 300 °C 和 500 °C 的 TiO₂ 薄膜的三维 AFM 图。从 AFM 观察薄膜的表面形貌,发现低于 300 °C 时,随着基片温度的升高,薄膜的颗粒尺寸增大,聚集密度增大,因此折射率增大;高于 300 °C 时,薄膜的颗粒尺寸几乎不变,因此聚集密度也几乎不变。从三维

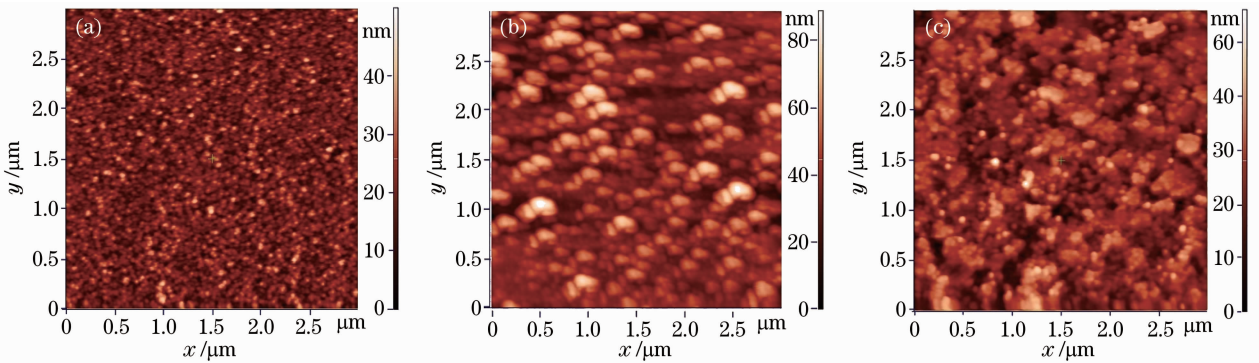


图 4 基片温度为(a)室温、(b) 300 °C 和(c) 500 °C 时制备的 TiO₂ 薄膜的二维 AFM 图
Fig. 4 Two-dimensional AFM of TiO₂ films deposited at different substrate temperatures of (a) room temperature; (b) 300 °C and (c) 500 °C

图可以看出,300 ℃时相对于 500 ℃时的晶粒排列更均匀有序,这也可以说明 300 ℃时的结晶最好,因

此折射率最大。

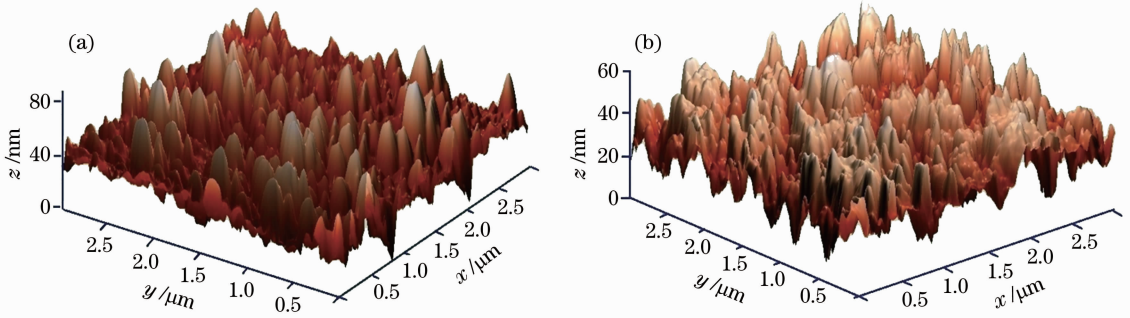


图 5 基片温度为(a) 300 ℃和(b) 500 ℃时制备的 TiO₂ 薄膜的三维 AFM 图

Fig. 5 Three-dimensional AFM of TiO₂ films deposited at different substrate temperatures of (a) 300 ℃ and (b) 500 ℃

3.4 温度对薄膜透射谱和禁带宽度的影响

图 6 给出了在相同氧压(1.0 Pa)、基片温度分别为室温 100 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃时 TiO₂ 薄膜的透射谱。从图 4(a)中可以看出,TiO₂ 薄膜的透射谱在可见光范围内,震荡随温度的升高而明显。而且在紫外范围内的截止波长有红移的趋势。这与晶粒尺寸的增大,以及晶相的出现有关系。根据透射谱计算的带隙宽度,TiO₂ 薄膜的禁带宽度分别为 3.61(300 ℃、400 ℃、500 ℃)、3.70(200 ℃)、3.77

(100 ℃)、3.84(26 ℃)。从图 6(b)中可以看出,300 ℃、400 ℃、500 ℃的有晶体结构的 TiO₂ 薄膜的带隙基本保持不变,这是由于高于 300 ℃时,薄膜的聚集密度变化很小的缘故。在低于 300 ℃时,随着温度的升高,晶粒尺寸增大,薄膜的聚集密度增大^[15],因此带隙宽度降低^[14]。第二组样品中的 400 ℃的薄膜的带隙宽度较第一组中的薄膜的较小,这是由于薄膜的厚度相差较大,聚集密度随着厚度的增大而增大^[15]引起的。

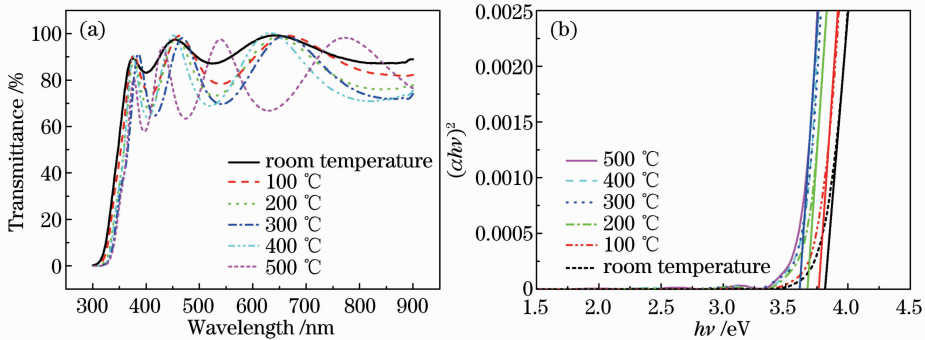


图 6 (a)氧压为 1.0 Pa,基片温度分别为室温、100 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃时制备的 TiO₂ 薄膜的 (a)透射谱和(b)带隙

Fig. 6 (a) Transmission spectra and (b) $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ plot of TiO₂ films deposited at different temperatures of room temperature, 100 ℃, 200 ℃, 300 ℃, 400 ℃ and 500 ℃ and oxygen pressure of 1.0 Pa

4 结 论

采用脉冲激光沉积的方法,在同条件下,通过调节氧压和改变基板的温度,制备了两组 TiO₂ 薄膜。结果表明,基片温度在 300 ℃出现锐钛矿,且随着温度升高直到 500 ℃,晶体的结构不变。基片温度和氧压是影响薄膜折射率的两个关键因素。在低于 300 ℃时,随着温度的升高,薄膜的颗粒尺寸增大,折射率也增大;高于 300 ℃时,折射率的大小与结晶程度有关,300 ℃的结晶最好,因此折射率最大。随

着氧压的增大,折射率减小。基片温度和氧压影响 TiO₂ 薄膜的截止波长,随着温度的升高,截止波长红移,禁带宽度减小;随着氧压的增大,截止波长出现蓝移,禁带宽度增大。因此可根据表面形貌、折射率、带隙等因素,来选择所需要的制备条件。

参 考 文 献

1 D. J. Kim, S. H. Hahn, S. H. Oh *et al.*. Influence of calcination temperature on structural and optical properties of TiO₂ thin films prepared by sol-gel dip coating[J]. *Materials*

- Letters, 2002, **57**(2): 355~360
- 2 Y. Y. Zhang, X. Y. Ma, P. L. Chen *et al.*. Effect of the substrate temperature on the crystallization of TiO₂ films prepared by DC reactive magnetron sputtering[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, **300**(12): 551~554
 - 3 Pan Yongqiang, Hang Lingxia. Optical properties and surface roughness of TiO₂ thin films prepared by using oblique angle deposition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0201001
潘永强, 杭凌侠. 斜角入射沉积 TiO₂ 薄膜的光学特性和表面粗糙度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0201001
 - 4 Li Zhaoyang, Jiang Wei, Wang Yi *et al.*. Properties of hydrophilicity and visible light absorption of N-doped TiO₂ thin films prepared by RF magnetron sputtering [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s2): 360~363
李朝阳, 江 伟, 王 怡等. 射频溅射掺氮 TiO₂ 薄膜的可见光吸收特性及亲水性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s2): 360~363
 - 5 P. Fisher, O. Maksimov, H. Du *et al.*. Growth, structure, and morphology of TiO₂ films deposited by molecular beam epitaxy in pure ozone ambients [J]. *Microelectronics Journal*, 2006, **37**(12): 1493~1497
 - 6 Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan *et al.*. Design and modification of double channel of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 661~664
田国勋, 吴永刚, 王占山等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 661~664
 - 7 Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong *et al.*. Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79~84
欧阳征标, 李景镇, 张道中等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 79~84
 - 8 G. H. Ma, J. Shen, K. Rajiv *et al.*. Optimization of two-photon absorption enhancement in one-dimensional photonic crystals with defect states[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(3): 359~363
 - 9 Yang Xiaoru, Guo Zhen'ning, Li Junren *et al.*. Preparation and photoluminescence study of nanometer titania thin film [J]. *Function Materials*, 2007, **38**(6): 1016~1017
杨小儒, 郭震宇, 李君仁等. 纳米二氧化钛薄膜的制备及光致发光研究[J]. *功能材料*, 2007, **38**(6): 1016~1017
 - 10 Xu Junhai, Zhao Yuan'an, Shao Jianda *et al.*. Absorption and laser induced damage threshold of TiO₂ single films under different process conditions[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0407001
徐俊海, 赵元安, 劭建达等. 不同工艺条件下 TiO₂ 单层膜的吸收和损伤阈值测试[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0407001
 - 11 Jia Hongbao, Sun Jinghua, Xu Yao *et al.*. Determination of thickness and optical constants of sol-gel derived TiO₂ films by combined analysis of transmittance and X-ray reflectivity spectra [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0831001
贾红宝, 孙菁华, 徐 耀等. 利用透射光谱与 X 射线反射谱精确测量溶胶-凝胶 TiO₂ 薄膜厚度和光学常数[J]. *光学学报*, 2012, **32**(8): 0831001
 - 12 H. C. Lee, W. S. Hwang. Substrate effects on the oxygen gas sensing properties of SnO₂/TiO₂ thin films[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **253**(4): 1889~1897
 - 13 R. Engel-Herbert, B. Jalan, J. Cagnon *et al.*. Microstructure of epitaxial rutile TiO₂ films grown by molecular beam epitaxy on γ -plane Al₂O₃ [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, **12**(3): 149~153
 - 14 P. Singh, D. Kaur. Room temperature growth of nanocrystalline anatase TiO₂ thin films by dc magnetron sputtering[J]. *Physica B*, 2010, **405**(5): 1258~1266
 - 15 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006. 296~300
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. 296~300
 - 16 Xu Linhua, Li Xiangyin. Microstructure and optical properties amorphous ZnO thin film[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2008, **29**(3): 227~230
徐林华, 李相银. 非晶体 ZnO 薄膜的微结构及光学性质[J]. *青岛科技大学学报(自然科学版)*, 2008, **29**(3): 227~230
 - 17 Chen Changle. Solid State Physics [M]. Beijing: Science Press, 2007
陈长乐. 固体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007
 - 18 Zhang Yiqing, Wang Changzheng, Zhang Peiming *et al.*. Structure and optical properties of ZnO thin films grown by laser molecular beam epitaxy[J]. *Function materials*, 2008, **39**(6): 896~898
张一清, 王长征, 张培明等. LMBE 法生长氧化锌薄膜的结构和光学性能[J]. *功能材料*, 2008, **39**(6): 896~898
 - 19 Zhao Qingnan, Li Chunling, Zhao Xiujian. The effect of oxygen partial pressure and annealing on morphology and optical properties of TiO₂ films coated on glass[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2004, **33**(3): 309~312
赵青南, 李春领, 赵修建. 氧气分压与热处理温度对制备玻璃基二氧化钛薄膜的表面形貌和光学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2004, **33**(3): 309~312
 - 20 Zhang Dong, Wang Changzheng, He Ying. Influence of substrate temperature on the structure and band edge luminescence of ZnO thin films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2938~2942
张 栋, 王长征, 何 英. 生长温度对 ZnO 薄膜晶体质量和发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2938~2942