

基于透射光谱确定溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜的光学常数*

梁丽萍† 郝建英 秦 梅 郑建军

(太原科技大学材料科学与工程学院,太原 030024)

(2007 年 12 月 17 日收到 2008 年 7 月 29 日收到修改稿)

基于溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜的紫外/可见/近红外透射实验光谱,采用 Swanepoel 方法结合 Wemple-DiDomenico 色散模型,方便地导出了 ZrO_2 薄膜在 200—1200 nm 波长范围内的光学常数,包括折射率、色散常数、膜层厚度、吸收系数及能量带隙.研究发现,溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜具有高折射率(1.63—1.93,测试波长为 632.8 nm),低吸收和直接能量带隙(4.97—5.63 eV)等光学特性,而且其光学常数对薄膜制备过程中的重要工艺参数——膜层后处理温度表现出强烈的依赖性.此外,在膜层的弱吸收和中等吸收光谱区域内,计算得到的折射率色散曲线与分光光度法的测试结果基本符合,说明本实验中所建立的计算方法在确定溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜光学常数方面的可靠性.

关键词:光学常数,Swanepoel 方法, ZrO_2 薄膜,热处理

PACC: 7865, 7820D

1. 引 言

溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜综合了组成材料优异的光学性能和溶胶凝胶化学镀膜的优势,因而作为高折射率膜层在基频使用的大口径、高功率激光光学薄膜领域有着广阔的应用前景^[1-3].作为高功率激光光学膜层,薄膜的光学常数(如折射率、色散常数、厚度、吸收系数及能量带隙等)不仅是其光学性能的直接体现,而且与薄膜的微观结构和激光损伤性能密切相关^[4,5].因此,如何方便而准确地获得薄膜的光学常数对于其制备及应用具有十分重要的意义.

椭圆偏振光谱法和分光光度法是目前测定薄膜光学常数的常用方法,其不足之处在于都需要建立复杂的测试设备和计算模型.1983 年,Swanepoel^[6]报道了基于薄膜透射光谱直接计算弱吸收薄膜光学常数的极值包络线法,称之为 Swanepoel 方法.由于透射光谱的测量比反射光谱要容易得多,而测量精度又比较高,因而该方法在确定弱吸收薄膜光学常数方面得到了广泛的应用^[7-10].

溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜属于典型的弱吸收体系,基于透射光谱采用 Swanepoel 方法计算 ZrO_2 膜层光学常数的研究已有报道^[11,12].遗憾的是,现有文献大多局限于研究薄膜透射光谱的弱吸收和中等吸收区域,致使由此导出的折射率色散曲线缺乏完整性且能量带隙数据也不够准确.此外,已有的研究在 ZrO_2 薄膜的色散特性方面也有待进一步完善.鉴于此,本文试图根据溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜的紫外/可见/近红外透射光谱,采用 Swanepoel 极值包络线法结合 Wemple-DiDomenico (WDD) 色散公式(简化的 Sellmeier 公式)^[8,10,13,14],建立一套适合于确定 ZrO_2 薄膜光学常数的方法.

2. 实 验

2.1. 薄膜样品的制备

ZrO_2 薄膜样品的制备包括乙醇(EtOH)体系中二乙醇胺(DEA)和水(H_2O)共同作用下丙醇锆($Zr(OPr)_4$)的配合-水解-缩聚反应过程、溶胶陈化、

* 太原科技大学博士科研启动基金(批准号 200786)资助的课题.

† E-mail: lianglipingcn@yahoo.com.cn

旋转镀膜及膜层热处理过程.关于溶胶制备和薄膜沉积在我们先前的研究^[3,4]中已有详尽叙述.本研究采用的反应体系的初始组成如下: $Zr(OPr)_4$ 的摩尔浓度为 0.28 mol/L,配合剂 DEA 与 $Zr(OPr)_4$ 的摩尔比为 0.6:1,反应水与 $Zr(OPr)_4$ 的摩尔比为 2:1.膜层热处理在空气气氛中进行,温度为 150—750 °C.考虑到 ZrO_2 薄膜的吸收边位于紫外光谱区域且包络线方法的应用要求薄膜足够厚以形成干涉振荡,本实验选用石英玻璃基底并多次重复旋转镀膜和膜层热处理环节,以获得光学常数计算所要求的宽光谱区域和膜层厚度.此外,为方便讨论,我们将未经热处理的薄膜样品命名为 F020,将 150,350,450,550,650 和 750 °C 热处理后的薄膜样品分别命名为 F150, F350, F450, F550, F650 和 F750.

2.2. 薄膜样品的表征

采用日本 Shimadzu 公司生产的 UV-3150 型紫外/可见/近红外光谱仪测试薄膜样品在 190—1200 nm 波长范围内的透射光谱.采用美国科学计算国际 (SCI)公司生产的 Tek 3000 型薄膜分析仪测试样品在 340—1200 nm 波段的折射率、物理厚度和能量带隙.采用德国 Bruker AXS 公司生产的 D8 Advance 型 X 射线衍射 (XRD) 仪研究薄膜样品在热处理过程中的物相变化;针对衍射角 $2\theta = 26^\circ$ — 33° 区域的衍射谱线进行线宽分析.根据四方 $ZrO_2(111)$ 晶面的衍射峰,采用 Scherrer 公式^[15]计算四方相晶粒的平均尺寸.

3. 结果及讨论

3.1. 薄膜样品的透射光谱及光学常数计算方法

图 1 是 ZrO_2 薄膜样品 F020 的透射光谱.透射率 T 随波长 λ 的振荡变化源于光在两个界面即空气-薄膜及薄膜-基底界面的干涉现象^[6,9].在吸收边附近,干涉带逐渐消失,且膜层的本征吸收引起透射率急剧下降.

根据 Swanepoel^[6]和 Márquez^[7]的观点,对于沉积于透明基底上厚度均匀的薄膜,如果用 d_s 和 n_s 表示基底的厚度和折射率,用 d 和 n 表示膜层的厚度和折射率,用 α 和 k 表示膜层的吸收系数和消光系数.在 $d \ll d_s$ 且 $k^2 \ll n^2$ (弱吸收)的情况下,薄膜的透射率 T 可以表示为

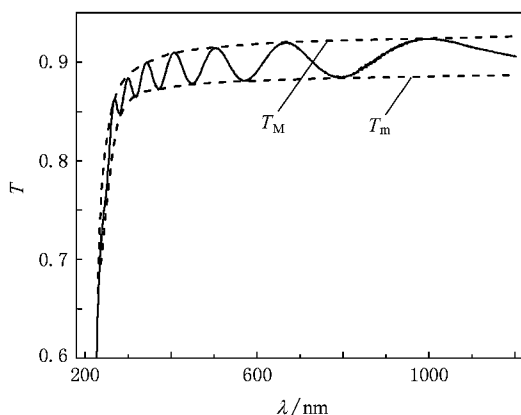


图 1 薄膜样品 F020 的透射光谱及其包络线 T_M 和 T_m

$$T = \frac{Ax}{B - Cx \cos \varphi + Dx^2}, \quad (1)$$

式中

$$A = 16n^2 n_s, \quad (2a)$$

$$B = (n + 1)(n + n_s^2), \quad (2b)$$

$$C = 2(n^2 - 1)(n^2 - n_s^2), \quad (2c)$$

$$D = (n - 1)(n - n_s^2), \quad (2d)$$

$$\varphi = 4\pi nd/\lambda, \quad (2e)$$

$$x = \exp(-\alpha d). \quad (2f)$$

干涉带的极值可以表示为

$$T_M = \frac{Ax}{B - Cx + Dx^2}, \quad (3a)$$

$$T_m = \frac{Ax}{B + Cx + Dx^2}. \quad (3b)$$

在 (3a) 和 (3b) 式中,上、下包络线 T_M, T_m 可视为波长 λ 的连续函数,并且可以通过对实验透射光谱的极值进行拟合得到.在 T_M 和 T_m 确定之后,联立上述方程,就可以很方便地获得薄膜的光学常数.需要说明的是,方程 (1) 是在 $k^2 \ll n^2$ 的条件下得到的.因此,只有在远离吸收边的光谱区域内,上述方程才能成立.所以,在采用包络线方法计算薄膜光学常数时,通常将透射光谱分为弱吸收、中等吸收和强吸收三个区域.在本研究中,我们划定波长 $\lambda \geq 600$ nm 为膜层的弱吸收区域, 400 nm $\leq \lambda \leq 600$ nm 为中等吸收区域,而 $\lambda \leq 400$ nm 为强吸收区域.

采用 Swanepoel 方法结合 WDD 色散模型确定薄膜光学常数的方法主要包括以下六步: (1) 根据实验透射光谱确定上、下包络线 T_M 和 T_m . (2) 基于弱吸收和中等吸收区域的包络线计算该光谱区域内膜层折射率、吸收系数及厚度. (3) 采用 WDD 色散模型对

计算得到的折射率数据进行分析,获得色散常数。
(4) 将计算得到的折射率数据外推至强吸收区域,获得强吸收波段的折射率。(5) 应用强吸收区域的透射光谱和折射率数据计算该区域内膜层的吸收系数。
(6) 由强吸收和中等吸收区域内吸收系数对波长的依赖关系确定薄膜的能量带隙。

3.2. 薄膜样品的折射率、厚度和色散常数

在弱吸收和中等吸收区域 ($\lambda \geq 400$ nm), 折射率 n 可以通过下式确定^[6-9]:

$$n = [N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}]^{1/2}, \quad (4)$$

式中

$$N = 2n_s \frac{T_M - T_m}{T_M T_m} + \frac{n_s^2 + 1}{2}. \quad (5)$$

基底的折射率 n_s 可以通过测量基底的透射率 T_s 由下列方程获得^[6,7]:

$$n_s = \frac{1}{T_s} + \left(\frac{1}{T_s} - 1\right)^{1/2}. \quad (6)$$

对于石英基底而言,在 400—1200 nm 的光谱区域 T_s 基本保持 93.1% 不变,由此可获得此光谱区域内基底的折射率 $n_s = 1.47$. 由方程 (4) 计算得到未经热处理的 ZrO_2 薄膜样品 F020 的折射率数据如图 2 中散点所示. 作为比较,图 2 还给出 Tek 3000 型薄膜分析仪的测试结果,如图 2 中的实线所示. 图 2 清晰地显示,在 400—1200 nm 的波长范围内,采用 Swanepoel 方法计算得到的 ZrO_2 薄膜折射率和薄膜分析仪的测定结果符合很好. 在 632.8 nm 处,薄膜样品 F020 的折射率为 1.63,略高于文献 [12,16,17] 中报道的数值 (1.57—1.59),但明显低于块体折射率^[12] (约为 2.17). 这不仅与薄膜中残留一定数量的配合中间体和羟基有关^[3,4],而且还与溶胶凝胶薄膜低的堆积密度有关。

薄膜的折射率色散分析采用 WDD 单振子色散模型^[8,13,14],其色散方程如下:

$$n^2 = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - (h\nu)^2}, \quad (7)$$

式中 E_0 为单振子能量,它与膜层的能量带隙 E_g 直接关联; E_d 为色散能,它与材料的结构有序性密切相关; h 为 Planck 常数. 将 $(n^2 - 1)^{-1}$ 对 $(h\nu)^2$ 作图并进行线性拟合,可以获得直线的斜率 $(E_0 E_d)^{-1}$ 和截距 (E_0/E_d) ,进而获得色散常数 E_0 和 E_d .

图 2 的内插图为薄膜样品 F020 的 WDD 色散曲线. 在可见光谱区域内 $(n^2 - 1)^{-1} - (h\nu)^2$ 良好的线

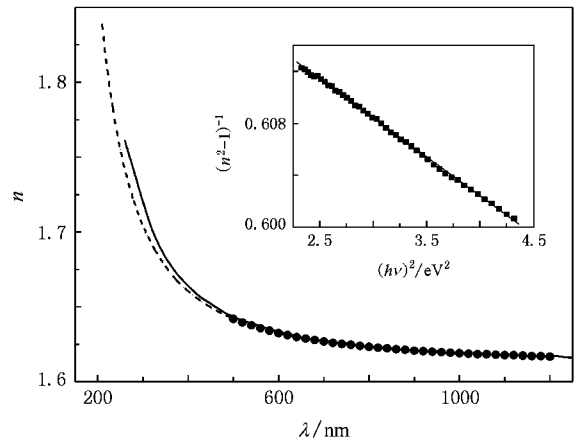


图 2 薄膜样品 F020 的折射率色散曲线 内插图为 $(n^2 - 1)^{-1} - (h\nu)^2$ 曲线

性关系表明,采用 WDD 色散模型研究我们所讨论的薄膜体系是合理的. 通过线性拟合获得的样品 F020 的 E_0 和 E_d 数值分别为 10.30 和 16.46 eV.

将方程 (7) 外推至短波区域,即可估算出强吸收区域膜层的折射率,如图 2 中虚线所示. 与薄膜分析仪的测试结果相比,两者差别显著,说明 WDD 色散模型在近紫外区域已不再适用。

基于计算所得的折射率数据,还可以很方便地计算出膜层厚度 d . 薄膜厚度 d 是一系列 d' 的平均值,而 d 可由下式得到:

$$d' = \frac{m\lambda_m}{2n_m}, \quad (8)$$

式中

$$m = \frac{xn_m\lambda_{m+x}}{n_{m+x}\lambda_m - n_m\lambda_{m+x}}. \quad (9)$$

这里 m 为干涉级数, n_m 和 n_{m+x} 分别为透射光谱中第 m 级和 $m+x$ 级极大 (或极小) 值 λ_m 和 λ_{m+x} 处膜层的折射率. 计算得到 ZrO_2 薄膜样品 F020 的厚度为 622 nm.

3.3. 薄膜样品的吸收系数和光学带隙

在弱吸收和中等吸收区域,薄膜的吸收系数 α 可以通过下式计算^[6-9]:

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{1}{d} \ln x \\ &= -\frac{1}{d} \\ &\quad \times \ln \left\{ \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)(n^2 - n_s^4)]^2}{(n - 1)(n - n_s^2)} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

式中

$$E_M = \frac{8n^2 n_s}{T_M} + (n^2 - 1)(n^2 - n_s^2). \quad (11)$$

在强吸收区域,吸收系数 α 可以由下列关系式确定^[6,8,9]:

$$\begin{aligned} \alpha &= -\frac{1}{d} \ln x \\ &= -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{(n+1)(n+n_s^2)}{16n^2 n_s} T \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

图 3 给出了 ZrO_2 薄膜样品 F020 的吸收系数计算结果.在 $\lambda \geq 400$ nm 的光谱区域,薄膜吸收系数几乎为零,表明在该波长范围内膜层的线性吸收可以忽略.在 200—250 nm 的光谱区域,膜层的吸收系数急剧增加,与图 1 中透射率曲线的迅速下降一致.透射率和吸收系数的这一突变是材料直接光学带隙特性的具体表现^[8,9].

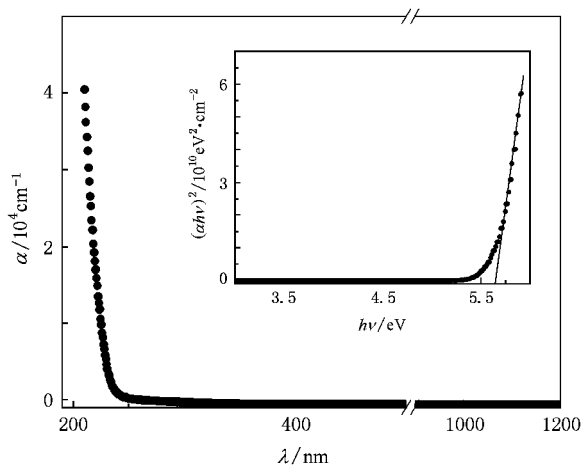


图 3 薄膜样品 F020 的吸收系数随波长的变化 内插图表示由 $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线推导膜层能量带隙

为了确定光学跃迁的本质并获得相应的带隙宽度,可以根据下式对图 3 的强吸收区域进行了详细分析^[8-10,18,19],

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^p, \quad (13)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, A 是与跃迁概率有关的常数,指数 p 取决于价带与导带之间光学跃迁的类型,即直接跃迁或间接跃迁.用于确定光学跃迁本质和能量带隙的常用方法是作 $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线,该曲线在高光子能量区域应趋于一条直线.指数 p 通常取 1/2 或 2,分别对应直接或间接跃迁^[9].本研究中,我们以 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 对 $h\nu$ 作图,发现当 p 取 1/2 时 $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线的高光子能量区域呈现明显的线性趋势(如图

3 内插图所示).这一现象表明,直接跃迁是溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜最可能的光学吸收机理.在吸收边附近,透射率曲线的急剧下降和吸收系数的陡然上升也是直接跃迁的有力佐证.此外,将 $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ 曲线的直线部分外推至 $(\alpha h\nu)^{1/2} = 0$,即可获得薄膜的能量带隙 E_g (如图 3 的内插图所示).计算得到的薄膜样品 F020 的能量带隙为 5.63 eV,略高于文献^[20]报道的溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜的 E_g 值(5.1—5.4 eV),这可能与膜层材料之间不同的结晶状态有关^[9,10].

3.4. 薄膜光学常数对膜层热处理温度的依赖性

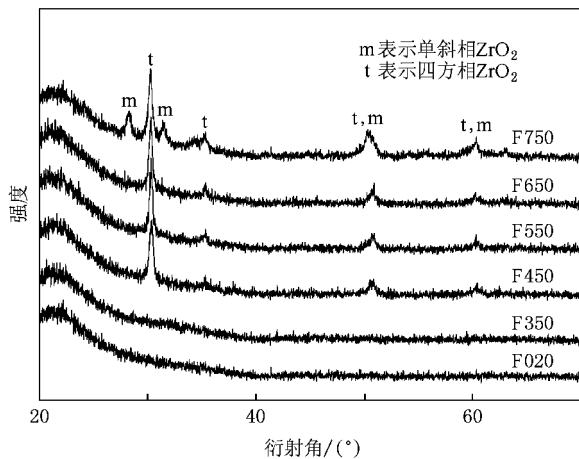
文献 20—22 指出,在采用溶胶凝胶方法制备 ZrO_2 薄膜材料时,薄膜的后处理温度会对其结构和光学性能产生显著影响.然而,已有文献大多侧重于研究折射率对热处理温度的依赖关系,就薄膜的光学性能而言,尚缺乏完整性.基于上述计算方法,本文详细考察了中等温度热处理对薄膜光学常数的影响.

经不同温度热处理得到的 ZrO_2 薄膜样品的主要光学常数和部分结构参数列于表 1,其 XRD 分析结果示于图 4.表 1 中,光学常数的值及其误差限是采用最小二乘法对 5 个薄膜样品(同一制备条件)的计算结果进行拟合所得.表 1 清楚地显示,在实验研究的温度范围内,膜层折射率以 550 °C 为分界呈现先增大后减小的趋势,且经 550 °C 热处理得到的薄膜样品的折射率为 1.93(在 632.8 nm 处),这与 Liu 等^[22]的研究结果一致.结合薄膜制备过程及 XRD 分析结果,我们认为当热处理温度低于 550 °C 时,膜层折射率的增加应归因于物理吸附水和有机溶剂的去除、有机残留物的氧化分解以及膜层材料的逐步晶化.在 550—750 °C 的温度区间内,由烧结引起的晶粒长大及 ZrO_2 相变引起的体积膨胀使得膜层的堆积密度逐步下降,从而导致折射率的持续下降.膜层折射率随热处理温度的变化还可以从其结构有序性的角度得到解释.在计算色散常数时我们已经提到,色散能 E_d 与材料的结构有序性密切相关,色散能 E_d 的值越大表明其结构越规整.由表 1 可知,折射率 n 和色散能 E_d 随热处理温度的变化呈现相同的变化趋势,表明热处理会引起膜层结构的有序性发生变化,从而导致膜层折射率的变化.此外,随热处理温度的提高,单振子能量 E_0 和能量带隙 E_g 总

表 1 ZrO_2 薄膜样品的结构和光学性能常数

样品	$n(\lambda = 632.8 \text{ nm})$	E_0/eV	E_d/eV	E_g/eV	物相组成	D_T/nm
F020	1.63 ± 0.01	10.30 ± 0.09	16.46 ± 0.51	5.63 ± 0.05	a	—
F150	1.68 ± 0.01	10.15 ± 0.11	17.81 ± 0.55	5.61 ± 0.05	a	—
F350	1.85 ± 0.01	9.84 ± 0.08	22.92 ± 0.47	5.57 ± 0.05	a	—
F450	1.91 ± 0.01	9.62 ± 0.09	24.48 ± 0.52	5.36 ± 0.05	t	18.2 ± 0.5
F550	1.93 ± 0.01	9.71 ± 0.11	25.48 ± 0.54	5.28 ± 0.05	t	19.5 ± 0.5
F650	1.88 ± 0.01	9.51 ± 0.12	23.04 ± 0.59	5.13 ± 0.05	t	25.3 ± 0.5
F750	1.86 ± 0.01	9.47 ± 0.11	22.25 ± 0.53	4.97 ± 0.05	t + m	25.6 ± 0.5

注:物相组成中 a 表示无定型 ZrO_2 , t 表示四方相 ZrO_2 , m 表示单斜相 ZrO_2 , D_T 表示膜层中四方晶粒的平均尺寸。

图 4 不同温度热处理得到的 ZrO_2 薄膜样品的 XRD 谱

体呈下降趋势。根据文献 [9, 10, 23] 的研究结果,我们将 E_g 数值的降低归因于膜层结晶度的逐步升高、晶粒尺寸的逐步增大以及热处理薄膜中微量非化学计量化合物缺陷的存在。

4. 结 论

采用溶胶凝胶方法在石英玻璃基底上制备了 ZrO_2 光学薄膜。基于薄膜的透射实验光谱,采用极值包络线法结合 WDD 色散模型,在 200—1200 nm 的波长范围内较准确地计算出了 ZrO_2 薄膜样品的折射率、色散常数、厚度、吸收系数及能量带隙。在此基础上,结合膜层的 XRD 分析结果和已有的研究积累,从膜层材料组成、致密度、结晶状态、结构有序性等角度,简单解释了 ZrO_2 薄膜光学常数与重要工艺参数——膜层后处理温度之间的强烈关系。该工作对于完善 ZrO_2 薄膜的光学表征以及指导溶胶凝胶 ZrO_2 薄膜的制备和应用都将是非常有益的。

本工作得到了中国科学院山西煤炭化学研究所徐耀研究员、吴东研究员、孙予罕研究员以及美国科学计算国际公司薄膜分析中心的大力帮助,在此表示衷心感谢。

- [1] Thomas I M 1994 *SPIE* **2288** 50
- [2] Belleville P ,Prené P ,Bonnin C ,Beaurain L ,Montouillout Y ,Lavastre É 2004 *SPIE* **5250** 196
- [3] Liang L P ,Zhang L ,Xu Y ,Zhang B ,Wu D ,Sun Y H ,Jiang X D ,Wei X F ,Li Z H ,Wu Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6175 (in Chinese) [梁丽萍、张磊、徐耀、章斌、吴东、孙予罕、蒋晓东、魏晓峰、李志宏、吴忠华 2006 物理学报 **55** 6175]
- [4] Liang L P ,Zhang L ,Sheng Y G ,Xu Y ,Wu D ,Sun Y H ,Jiang X D ,Wei X F 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3596 (in Chinese) [梁丽萍、张磊、盛永刚、徐耀、吴东、孙予罕、蒋晓东、魏晓峰 2007 物理学报 **56** 3596]
- [5] Li D ,Zhu Z Q ,Fu X Y ,Qiu H 1999 *Opto-Electron. Eng.* **26** 58 (in Chinese) [李丹、朱自兵、付雄鹰、邱服民 1999 光电工程 **26** 58]
- [6] Swanepoel R 1983 *J. Phys. E :Sci. Instrum.* **16** 1214
- [7] Márquez E , Ramírez-Malo J B , Villares P , Jiménez-Garay R , Swanepoel R 1995 *Thin Solid Films* **254** 83
- [8] González-Leal J M ,Prieto-Alcón R ,Angel J A ,Márquez E 2003 *J. Non-Cryst. Solids* **315** 134
- [9] Tigau N ,Ciupina V ,Prodan G 2005 *J. Cryst. Growth* **277** 529
- [10] Bhaskar S ,Majumder S B ,Jain M ,Dobal P S ,Katiyar R S 2001 *Mat. Sci. Eng. B* **87** 178
- [11] Sánchez-González J ,Díaz-Parralejo A ,Ortiz A L ,Guiberteau F 2006 *Appl. Surf. Sci.* **252** 6013
- [12] Díaz-Parralejo A ,Caruso R ,Ortiz A L ,Guiberteau F 2004 *Thin Solid Films* **458** 92

- [13] Wemple S H ,DiDomenico M Jr 1971 *Phys. Rev. B* **3** 1338
- [14] Sahoo N K ,Thakur S ,Tokas R B 2006 *Appl. Surf. Sci.* **253** 618
- [15] Shukla S ,Seal S 2004 *J. Phys. Chem. B* **108** 3395
- [16] Grosso D ,Seromon P A 2000 *Thin Solid Films* **368** 116
- [17] Cueto L F ,Sánchez E ,Torres-Martínez L M ,Hirata G A 2005 *Mater. Charact.* **55** 263
- [18] Yoon M ,Seo M ,Jeong C ,Jang J H ,Jeon K S 2005 *Chem. Mater.* **17** 6069
- [19] Wang Z ,Helmersson U ,Käll P O 2002 *Thin Solid Films* **405** 50
- [20] Ehrhart G ,Capoen B ,Robbe O ,Boy P ,Turrell S ,Bouazaoui M 2006 *Thin Solid Films* **496** 227
- [21] Mignotte C 2001 *J. Non-Cryst. Solids* **291** 56
- [22] Liu W C ,Wu D ,Li A D ,Ling H Q ,Tang Y F ,Ming N B 2002 *Appl. Surf. Sci.* **191** 181
- [23] Jana S ,Biswas P K 1997 *Mater. Lett.* **30** 53

Determination of the optical constants of sol-gel derived ZrO₂ films simply from the transmission spectra^{*}

Liang Li-Ping[†] Hao Jian-Ying Qin Mei Zheng Jian-Jun

(College of Material Science and Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan 030024 ,China)

(Received 17 December 2007 ; revised manuscript received 29 July 2008)

Abstract

By combining Swanepoel's theory and the Wemple-DiDomenico dispersion model , a simple method was established to determine the optical constants of the sol-gel derived ZrO₂ films directly from the corresponding transmission spectra. The results showed that the sol-gel ZrO₂ films exhibit the optical characteristics of high refractive index of 1.63—1.93 (at 632.8 nm) , negligible absorption in spectral region of 400—1200 nm , as well as the direct band gap of about 4.97—5.63 eV. And the specific values of the optical constants strongly depend on the annealing temperature , which is one of the important technological parameters for the sol-gel preparation of ZrO₂ films. Moreover , in the weak and medium absorption spectral regions , the calculated values of refractive indices are in satisfactory agreement with the results derived from the high-resolution Tek 3000 film-characterization system , indicating the reliability and feasibility of the method in determining the optical constants of ZrO₂ films.

Keywords : optical constants , Swanepoel's method , ZrO₂ films , annealing

PACC : 7865 , 7820D

^{*} Project supported by the Scientific Research Foundation for the Doctors of Taiyuan University of Science and Technology , China (Grant No. 200786).

[†] E-mail : lianglipingen@yahoo.com.cn