

doi:10.3788/gzxb20164512.1231001

基于户外照明灯罩的自清洁复合膜研制

付秀华, 范家晨, 张静, 熊仕富, 张于帅

(长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

摘 要:根据户外照明系统自清洁功能的需求,基于光学薄膜理论,对复合膜折射率和质量配比进行了理论分析与模拟,采用电子束共蒸发技术镀制 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜,并对其做真空退火处理.在单晶控系统中,通过控制左右两电子枪的束流,镀制了不同质量配比复合膜.亲水性测试和甲基橙实验表明,复合膜中 TiO_2 的质量配比越高,自清洁效果越好,但亲水性和可见光透过率会降低.对不同质量配比的复合膜进行了检测和分析,并通过调整质量配比来优化试验方案,结果表明, $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量配比为 9:1 时,该薄膜既具有自清洁亲水作用,又具较高的可见光透过率.

关键词:薄膜;户外照明灯罩;电子束共蒸发;退火;自清洁;折射率;质量比

中图分类号:O484

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)12-1231001-6

Development of Outdoor Lighting Lampshade Self-cleaning Composite Film

FU Xiu-hua, FAN Jia-chen, ZHANG Jing, XIONG Shi-fu, ZHANG Yu-shuai

(Department of Optics and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: According to the environmental requirements of self-cleaning quality for outdoor lighting system, the refractive index of composite film and the quality ratios were analyzed and simulated based on the theory of optical thin film. The method of electron beam evaporation was used to plate the $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite film, and then the composite film was given for the vacuum annealing treatment. By controlling the beams of the left and right of the electron gun, the different mass ratios plating composite film was prepared in the single-crystal control system. The hydrophilic test and the Methyl orange experiment shows that, the higher the quality ratio of TiO_2 is, the better the self-cleaning effect is, but the ability of hydrophilic and visible light transmittance are both reduced. The composite film with different quality ratios were tested and analyzed. And the paper adjusts the mass ratio to optimize the test plan, the results show that, when the mass ratio of the $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ is 9:1, the film not only has a self-cleaning hydrophilic interaction, but also with a high visible light transmittance.

Key words: Thin film; Outdoor lighting lampshade; Electron beam evaporation; Annealing; Self-cleaning quality; Index of refraction; Mass ratio

OCIS Codes: 310.1860; 310.3834; 310.6845; 310.6870

0 引言

自清洁薄膜是指在玻璃表面形成的半导体氧化物光催化薄膜,在阳光的照射下,光催化剂产生电子-空穴对,依靠强氧化能力将玻璃表面的大部分有机污染物完全氧化并降解为相应的无害无机物,并利用其特有的光诱导亲水性使玻璃表面长期保持亲水,从而使

玻璃表面具有易洁、自洁、防雾和不易再被污染的功能^[1].该薄膜在防水汽与防污的玻璃、户外灯具、陶瓷、自清洁的汽车观后视镜等有重要的应用.

目前,国内外大多数采用溶胶-凝胶、化学气相沉积、磁控溅射、双晶控电子束共蒸发等方法镀制具有自清洁亲水作用的复合膜^[2-4].20世纪70年代,日本东京大学的藤岛昭教授发现了 TiO_2 的光催化特性^[5].2000

基金项目:吉林省重大科技攻关专项(No. 20140203002GX)资助

第一作者:付秀华(1963-),女,博士,教授,主要研究方向为光学薄膜. Email:goptics@126.com

通讯作者:范家晨(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为薄膜技术. Email:fjc_optics@126.com

收稿日期:2016-06-17;录用日期:2016-08-17

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

年, M. Machida 等发现 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合溶胶制备的薄膜具有较好的光诱导亲水性^[6]. 2007 年, 西安电子科技大学刘男等用交流电沉积的方法研究了 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜的光催化特性性能^[7]. 2014 年, 中国矿业大学杨帅等通过溶胶-凝胶法制得 TiO_2 和 Ta_2O_5 薄膜并对其光学性能进行了研究^[8].

现在一般采用溶胶-凝胶方法制备自清洁复合膜, 但该方法所用原料多数为有机物, 其中有很多成份对人体有危害, 并且还有处理时间长、薄膜易开裂、材料中有很多的残留羟基和残余碳等缺点. 然而, 单晶控、双源电子束共蒸发方法具有处理时间短、工艺简单、薄膜牢固等优点, 因此本文采用该方法镀制自清洁薄膜.

本文选用 TiO_2 和 Al_2O_3 两种膜料, 借助膜系设计软件进行模拟设计, 将两种膜料按照不同质量配比进行混合蒸镀, 通过测试和分析, 筛选出具备自清洁亲水功能的最佳质量配比的薄膜.

1 材料特性

未镀膜的户外灯罩表面暴露在大气中很容易变脏, 如果在其表面镀一层具有自清洁亲水性功能的薄膜, 将会大大提高照明质量. TiO_2 从紫外到红外 ($0.2\sim 8\ \mu\text{m}$) 都具有较好的透光性、化学稳定性、较低的吸收系数和高的机械强度^[9]. 最为重要的是, 由于 TiO_2 具有较宽的禁带宽度, 在紫外光照射下, 能产生活泼自由基, 自由基能分解有机化合物, 具有杀菌和自清洁等作用^[10]. Al_2O_3 从可见到红外 ($0.44\sim 10\ \mu\text{m}$) 都具有较好的透光性、良好的耐腐蚀性和耐磨性, 而本身容易失氧特性和疏松的结构使其具有亲水的特性^[11]. 故选 TiO_2 和 Al_2O_3 作为镀制该复合膜的材料.

2 混合膜理论

混合膜的制备方法包括固相混合和气相混合两种. 所谓固相混合就是将两种或两种以上的材料按比例预先混合, 用一个蒸发源进行蒸发, 通过改变混合材料的配比得到所需的质量比. 气相混合就是用几个蒸发源同时蒸发多种材料, 控制各自的蒸发速率而得到所期望的质量比. 固相混合的材料蒸汽压差异对膜的成分影响很大, 蒸发条件较为苛刻, 不易控制^[12]. 所以, 在此选用气相混合蒸镀法, 图 1 为单晶控、双源蒸发的原理图.

假设混合的两种高低折射率膜料的折射率分别为 n_H 、 n_L ; v_1 、 v_2 分别为两种膜料的沉积速率; v 为两种膜料混合蒸发时的沉积速率; $n(\lambda)$ 为两种膜料混合后的折射率. 两种膜料共蒸后沉积速率与膜料折射率的关系为^[13]

$$n^2(\lambda) = n_H^2(\lambda) \frac{v_1}{v_1 + v_2} + n_L^2(\lambda) \frac{v_2}{v_1 + v_2} \quad (1)$$

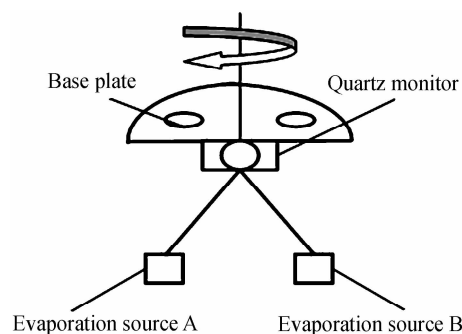


图 1 单晶控、双源共蒸发原理

Fig. 1 Principle diagram of dual-source co-evaporation control with single crystal

此时认为两种膜料的单分子体积相等; v 可以近似为 $v = v_1 + v_2$, 则代入式(1)变换之后可以得到

$$v_1 = \frac{n^2(\lambda)n_L^2(\lambda)}{n_H^2(\lambda)n_L^2(\lambda)}v \quad (2)$$

$$v_2 = v - v_1 = \frac{n_H^2(\lambda) - n^2(\lambda)}{n_H^2(\lambda) - n_L^2(\lambda)}v \quad (3)$$

假设蒸发源到基板的高度为 h , 到转轴中心的距离为 L , 蒸发材料的质量和密度分别为 m 、 ρ , 则基板上沉积的膜厚为

$$d_s = \frac{mh^2}{\pi\rho(h^2 + L^2)^2} \quad (4)$$

对于任意两种不同膜料的质量比有

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{d_{s1}\pi\rho_1(h^2 + L^2)^2/h^2}{d_{s2}\pi\rho_2(h^2 + L^2)^2/h^2} = \frac{d_{s1}\rho_1}{d_{s2}\rho_2} \quad (5)$$

其中, 左右两蒸发源到基板的高度可以看作是相等的, 到转轴中心的距离也是相等的. 镀膜过程中, 沉积的膜厚与时间和沉积速率有关, 即

$$d_s = vt \quad (6)$$

联立式(5)和式(6), 得到在相同的时间里质量之比为

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_1\rho_1}{v_2\rho_2} \quad (7)$$

联立式(2)和式(3)可以得到两种膜料的沉积速率之比为

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n^2(\lambda) - n_L^2(\lambda)}{n_H^2(\lambda) - n^2(\lambda)} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8)可以得到

$$n(\lambda) = \sqrt{\left(n_H^2 + \frac{m_2\rho_1}{m_1\rho_2}n_L^2\right) / \left(1 + \frac{m_2\rho_1}{m_1\rho_2}\right)} \quad (9)$$

由式(7)、(8)可知, 混合薄膜的折射率和质量配比是由两种膜料的蒸镀速率之比决定的, 但依据 Drude 理论推导的混合薄膜折射率公式(9)可知, 混合薄膜折射率与混合的两种材料的折射率、质量比和密度比有关.

3 实验原理

对单波长而言,在 550 nm 处,选取折射率分别为 $n_H=2.43, n_L=1.66$ 的两种材料,其密度比为 1.077, 带入式(5)、式(7)和式(9)中分别得到

$$\frac{m_1}{m_2}=1.077 \frac{d_{s1}}{d_{s2}} \quad (10)$$

$$\frac{m_1}{m_2}=1.077 \frac{v_1}{v_2} \quad (11)$$

$$n=\sqrt{\left(5.905+2.968 \times \frac{m_2}{m_1}\right) / \left(1+1.077 \times \frac{m_2}{m_1}\right)} \quad (12)$$

从式(11)、(12)可知,混合膜折射率数值与沉积速率比和两种材料质量比有关,见表 1. 沉积不同质量比的薄膜得到的折射率实测数据见表 2. 比较实测数据与理论模拟的数据,如图 2,两者差异很小.

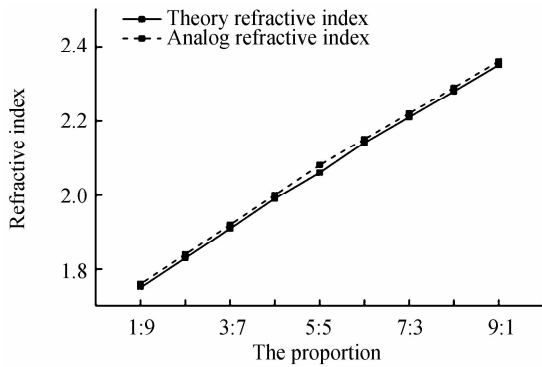


图 2 理论折射率与模拟折射率的对比曲线
Fig. 2 Contrast curve between the theory and the simulation of the refractive index

表 1 不同质量比对应的速率之比和折射率的理论数据

m_1/m_2	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
v_1/v_2	0.103	0.232	0.398	0.619	0.928	1.392	2.167	3.714	8.357
n	1.75	1.83	1.91	1.99	2.06	2.14	2.21	2.28	2.35

表 2 不同质量比对应的折射率的实测数据

m_1/m_2	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
n	1.76	1.84	1.92	2.00	2.08	2.15	2.22	2.29	2.36

4 混合薄膜的制备技术

该实验在 TXX-900 真空镀膜机上进行,采用电子束蒸发工艺混合蒸镀 TiO_2 和 Al_2O_3 . 镀膜前,使用考夫曼离子源清洗基片 10 min.

在利用单探头时,当监控膜厚的两个蒸发源同时蒸发,通过控制两种膜料的沉积速率比,就能得到一定

表 3 不同质量比下 TiO_2 和 Al_2O_3 的沉积速率

m_1/m_2	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
V_1 ($nm \cdot s^{-1}$)	0.038	0.076	0.114	0.153	0.193	0.233	0.274	0.316	0.357
V_2 ($nm \cdot s^{-1}$)	0.362	0.324	0.286	0.247	0.207	0.167	0.126	0.084	0.043

在不考虑吸收的条件下,根据单层膜反射率公式^[14]

$$R=\left(\frac{n_0-n^2(\lambda)/n_2}{n_0+n^2(\lambda)/n_2}\right)^2 \quad (13)$$

式中 n_0, n_2 分别表示入射介质和基底的折射率.

计算单层复合膜透过率公式为

$$T=1-\left[\frac{n_0 n_2 + \frac{m_2 \rho_1}{m_1 \rho_2} n_0 n_2 - n_{H1}^2 - \frac{m_2 \rho_1}{m_1 \rho_2} n_{L1}^2}{n_0 n_2 + \frac{m_2 \rho_1}{m_1 \rho_2} n_0 n_2 + n_{H1}^2 + \frac{m_2 \rho_1}{m_1 \rho_2} n_{L1}^2}\right]^2 \quad (14)$$

查阅相关资料可知^[15],混合膜厚度在 900 ~ 1 100 nm 的时候,混合膜具有较好的自清洁作用. 当膜厚固定为 1 000 nm 时,不同质量比的混合膜透过率曲线用 TFCalc 软件计算结果如图 3.

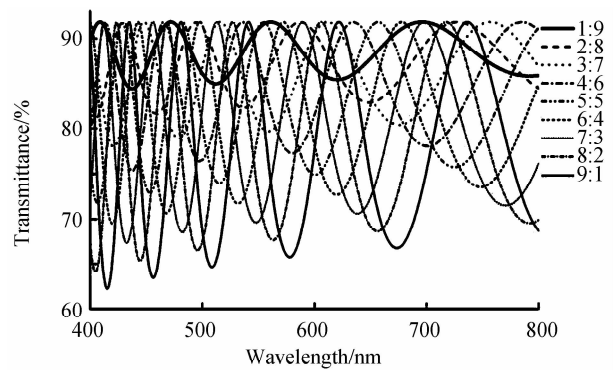


图 3 不同质量比随波长的光谱曲线
Fig. 3 Spectrum curve of different quality ratios with the changing of the wavelength

质量配比和特定折射率的混合薄膜,所以在同时沉积这两种膜料之前需要确定其中一种膜料的沉积速率^[16].

设定总的沉积速率为 0.4 nm/s,通过实验得到不同质量比下 TiO_2 和 Al_2O_3 的沉积速率见表 3.

经过多次实验得出两种膜料在不同的沉积速率下所对应的束流见表 4.

表 4 两种膜料不同稳定速率下所对应的束流

Table 4 Corresponding beams of two kinds of membrane material under different stable rates

m_1/m_2	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
I_1 (mA)	118	133	148	160	182	195	205	214	225
I_2 (mA)	275	266	257	249	237	223	208	187	152

5 测试结果及分析

5.1 光谱测试及分析

用日本岛津 UV-3 150 分光光度计对 400 ~ 1 500 nm 的混合薄膜进行光谱特性检测,并与用 TFCalc 设计的混合薄膜的透过率曲线进行了对比如图 4.

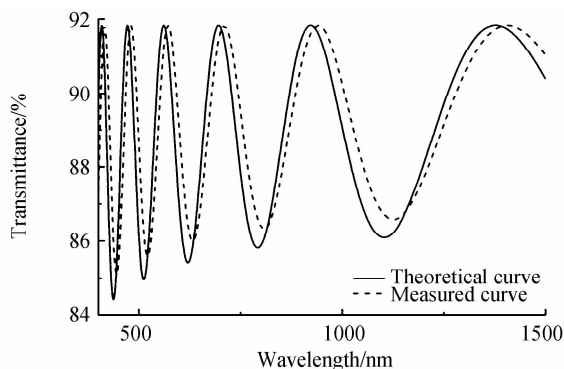


图 4 质量比 1:9 的透过率曲线

Fig. 4 Transmittance curve with a mass ratio of 1:9

从图 4 中可以看出实测曲线向长波飘移,这是因为薄膜本身呈柱状结构,其气孔部分在空气中吸潮,导致膜层的光学厚度增加,则光谱曲线往长波方向漂移;其他质量比的薄膜也与质量配比为 1:9 的薄膜有相似的问题,经过多次实验过后,测试曲线基本和理论曲线重合,满足质量比的要求^[17].

从图 5 中可以看出,质量配比为 9:1 时,可见光透过率较小,此时的透过率在 81% 左右,但是自清洁效果好于其他配比.

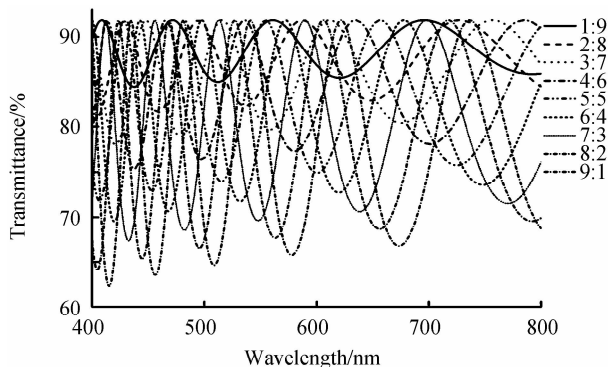


图 5 TiO_2 和 Al_2O_3 不同质量比的可见光透过率曲线
Fig. 5 Visible light transmittance curves of TiO_2 and Al_2O_3 under different mass ratios

5.2 自清洁测试及分析

自清洁性能可以用光催化降解的能力表征,在这里选用甲基橙降解实验来检测^[18].

1) 光催化降解实验在无其它光源干扰的环境中进行.用紫外杀菌灯作为光源(253.7 nm)并在去离子水配制的甲基橙溶液中进行实验.分别往石英管中倒入 20 mL 的 5 mg/L 的甲基橙溶液,将试样完全浸入液面以下,液面距灯管外表面为 100 mm.在降解过程中需保持磁力搅拌,使溶液降解均匀彻底.

2) 甲基橙最大吸收波峰在 465 nm 处,用紫外-可见分光光度计测量不同质量配比复合膜在相同光催化降解时间(10 min)溶液的吸光度 A_t ,溶液初始浓度记为 A_0 (5 mg/L),复合薄膜光催化特性用降解率 η 来表示,用 20W 光强光源照射下甲基橙溶液的降解率计算式为

$$\eta = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (15)$$

表 5 不同配比 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合膜的光催化效率Table 5 Photocatalytic rate of $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ film under different mass ratios

m_1/m_2	1:9	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2	9:1
A_t (mg · L ⁻¹)	2.75	3	2.7	2.55	2.25	2.15	2.1	2.05	2
Photocatalytic rate/%	35	40	46	49	55	57	58	59	60

计算结果见表 5,甲基橙的降解率随着 TiO_2 质量的不断增大,降解率不断增大,质量比为 9:1 时,降解率为 60%.

5.3 亲水性测试及分析

一般 TiO_2 薄膜需在至少 20 mW/cm² 紫外光下照射 5 h 以上.与水接触角才能从 70° 左右降至 10° 左右^[19].

对镀制后的不同质量比的薄膜放进退火炉中在 350℃ 温度下退火 2h,并将退火处理后的镜片放置在

太阳光下照射 6 h,并用 JC2000 型接触角测量仪测量接触角,结果见表 6,实验组中所有质量配比的复合膜接触角均小于 10°,且随着 TiO_2 质量分数的不断增大,复合膜的接触角也不断增大,质量配比为 9:1 时,接触角为 9°.

固体材料的表面与水接触角在 15° 以下水在表面具有良好流动性,10° 以下有亲水功能,7° 以下具有防雾功效.

实验组中 TiO₂ 和 Al₂O₃ 质量比为 9 : 1 的混合薄膜具有自清洁能力和较好的亲水性,而且该质量配比

的复合膜在可见光范围内也具有较好的透过率,满足灯罩透光的基本要求。

表 6 不同配比 TiO₂/Al₂O₃ 复合膜的接触角
Table 6 Contact angle of TiO₂/Al₂O₃ film under different mass ratios

m_1/m_2	1 : 9	2 : 8	3 : 7	4 : 6	5 : 5	6 : 4	7 : 3	8 : 2	9 : 1
Contact angle	0°	0°	0°	0°	0°	0°	1°	3°	9°

6 结论

本文从户外灯罩的自清洁要求出发,依据光学薄膜基础理论和自清洁材料的特性,选择 TiO₂ 和 Al₂O₃ 作为混合蒸镀的材料,并结合膜系设计软件完成了该薄膜在可见光波段的透过率(80%)设计;实验中发现 TiO₂ 和 Al₂O₃ 质量配比为 9 : 1 时,复合膜整体的自清洁效果最好。本实验通过控制两电子枪的束流的方法,解决了在单晶控系统中,同时精准控制两种膜料的蒸镀速率的问题。以往所用的溶胶-凝胶法是原料在溶剂中发生水解和缩聚反应形成薄膜;而本实验与溶胶-凝胶法截然不同,是以电子束蒸发的方式蒸镀混合膜,并从理论上分析复合膜折射率和质量配比的关系,该实验方法以及理论在半导体照明领域具有一定的借鉴价值。目前,该自清洁薄膜需要在一定强度的太阳下照射 6 h 才能达到比较好的自清洁效果,有一定的局限性。因此,如何进一步改善该自清洁薄膜,使其在各种天气情况下,都能达到自清洁的效果,将是今后的研究方向。

参考文献

- [1] ZHAO Qi, QIN Yong. Preparation and properties of flexible transparent self-cleaning film [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012: 7-11.
赵骑,秦勇. 柔性透光自清洁薄膜的制备及性能研究[D]. 兰州:兰州大学, 2012: 7-11.
- [2] HE Rui-ying, WEI Chang-ping, WANG Guo-dong, et al. Preparation and photoelectric properties of Ni/SnO₂ composite thin films[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(8): 888-892.
何瑞英,魏长平,王国栋,等. Ni/SnO₂ 复合薄膜的制备与光电性能[J]. 发光学报, 2015, **36**(8): 888-892.
- [3] DENG Shuang, YANG Pei-zhi, ZI Xing-fa, et al. Characterization of Ni-Cr system based solar selective absorbing films prepared at different oxygen content [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(3): 377-381.
邓双,杨培志,自兴发,等. 不同氧气含量下镍铬系平板集热器选择性吸收薄膜的制备和性能表征[J]. 发光学报, 2014, **35**(3): 377-381.
- [4] ZHOU Yuan, LI Chang-hong. Preparation and application of TiO₂ self-cleaning glass[J]. *Plating and Finishing*, 2007, **29**(2): 23-24.
周圆,李长虹. TiO₂ 自洁玻璃制备及其应用[J]. 电镀与精饰, 2007, **29**(2): 23-24.
- [5] LIU Tai-qi, CAO Bin-bin, WANG Chen. Research development in nano TiO₂ self-cleaning materials [J]. *New Technologies*, 2010(10): 73-74.
刘太奇,操彬彬,王晨. 纳米 TiO₂ 自清洁材料的研究进展[J]. 新技术新工艺, 2010(10): 73-74.

- [6] WANG Yu-ling, XU Qi-ming. The research of self-cleaning glasses with TiO₂ thin film [D]. Xian: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005: 13-14.
王玉玲,许启明. TiO₂ 薄膜自洁玻璃的制备及其性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005: 13-14.
- [7] LIU Nan, LIANG Yan-ping. The research on the photocatalysis properties of TiO₂/Al₂O₃ composite films [D]. Xian: Xidian University, 2007: 1-61.
刘男,梁燕萍. TiO₂/Al₂O₃ 复合薄膜光催化特性的研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007: 1-61.
- [8] YANG Shuai, XU Cheng. Formation and optical properties characterization of sol-gel deposited TiO₂ and Ta₂O₅ laser thin film [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014: 1-30.
杨帅,许程. 溶胶-凝胶法 TiO₂ 和 Ta₂O₅ 激光薄膜的制备及其光学性能研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2014: 1-30.
- [9] NIE Ming-qi, HU Zhi-qiang, ZHANG Lin-an, et al. The preparation of TiO₂/Eu³⁺, Y³⁺ down-conversion film and its application in dye-sensitized solar cell [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1216003.
聂铭歧,胡志强,张临安,等. TiO₂/Eu³⁺, Y³⁺ 下转换薄膜的制备及其在染料敏化太阳能电池中的应用[J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 1216003.
- [10] HOU Qing-yu, ZHANG Yue, ZHANG Tao. Study on first principle of optical property of oxygen vacancy-doped anatase TiO₂ [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **28**(7): 1347-1349.
侯清玉,张跃,张涛. 含氧空位锐钛矿 TiO₂ 光学性质的第一性原理研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(7): 1347-1349.
- [11] HE Jun-peng, ZHANG Yue-guang, SHEN Wei-dong, et al. Optical properties of Al₂O₃ thin film fabricated by atomic layer deposition [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **30**(1): 277-278.
何俊鹏,章岳光,沈伟东,等. 原子层沉积制备 Al₂O₃ 薄膜的光学性能研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(1): 277-278.
- [12] TANG Jin-fa, GU Pei-fu, LIU Xu, et al. Modern optical thin film technology [M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2006: 243-244.
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: 243-244.
- [13] SHEN Zi-cai, WANG Ying-jian, FAN Zheng-xiu, et al. Analysis of deposition rate of inhomogeneous coatings prepared by co-evaporation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **25**(4): 561-565.
沈自才,王英剑,范修正,等. 共蒸法制备非均匀膜的速率控制分析[J]. 光学学报, 2005, **25**(4): 561-565.
- [14] FU Xiu-hua, XIONG Shi-fu, LIU Dong-mei, et al. Study and fabricate of TV goniometry optics composite film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 131003.
付秀华,熊仕富,刘冬梅,等. 电视测角仪光学系统复合薄膜的研制[J]. 光子学报, 2015, **44**(11): 131003.
- [15] LIU Qing-Ju, WANG Qing-hui, JIN Ying-xia, et al. Study on super-hydrophilicity of TiO₂/Al₂O₃ composite film [J]. *Functional Materials*, 2003, **4**(34): 460-463.
柳清菊,王庆辉,靳映霞,等. TiO₂/Al₂O₃ 复合薄膜的亲水性研究[J]. 功能材料, 2003, **4**(34): 460-463.

- [16] ZHANG Xue-dian, QIAN Yan-hua, CHANG Min, *et al.* Monitoring for filter film thickness based on the combination of photoelectric extreme value and quartz crystal oscillation methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(6): 0631001. 张学典, 钱研华, 旻常敏, 等. 光控-晶控相结合的膜厚监控法对滤光片膜厚的监控[J]. 光子学报, 2016, **45**(6): 0631001.
- [17] LIU Dong-mei, LIU Shuang, FU Xiu-hua, *et al.* Study and fabrication of broad band-pass Filters in infrared therapy apparatus [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0331001. 刘冬梅, 刘爽, 付秀华. 红外线治疗仪中宽波段带通滤光片的研究[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 0331001.
- [18] QU Juan, HUANG Rong-rong, LAI Li-fang, *et al.* Study of properties of TiO₂ photocatalytic degradation of methyl orange[J]. *Journal of Jiang Su Polytechnic University*, 2009, **21**(1): 18-22. 瞿娟, 黄荣荣, 赖梨芳, 等. TiO₂ 光催化降解甲基橙性能的研究[J]. 江苏工业学院学报, 2009, **21**(1): 18-22.
- [19] DING Xiao-feng, GUAN Rong, CHEN Pei-zhi. Recent development of contact angle measurement technique [J]. *Ptca(Part: Aphys. Test.)*, 2008, **44**(2): 84-85. 丁晓峰, 管荣, 陈沛智. 接触角测量技术的最新进展[J]. 理化检验-物理分册, 2008, **44**(2): 84-85.