

引用格式: LIU Dong-mei, WEI Bo-yang, FU Xiu-hua, *et al.* Development of Polycarbonate High Strength Ultra-low Reflectivity Film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(12):1231001

刘冬梅,魏博洋,付秀华,等.聚碳酸酯高强度超低反射率薄膜的研制[J].光子学报,2020,49(12):1231001

聚碳酸酯高强度超低反射率薄膜的研制

刘冬梅¹,魏博洋¹,付秀华¹,张静¹,董所涛¹,李爽²

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 光驰科技(上海)有限公司, 上海 200444)

摘 要:为了降低杂散光导致光学系统成像质量下降的问题,以聚碳酸酯为基板,采用电子束离子辅助的方法制备了可见光波段超低减反射膜.采用真空退火法降低了由于镀膜过程中基板温度升高导致的热拉应力,并使用 MATLAB 软件拟合分析了材料的应力,通过研究离子源沉积工艺,解决了膜裂的问题.通过 MATLAB 模拟调节比例-积分-微分控制器控制参数,稳定了成膜速率,解决了厚度误差导致光谱漂移的问题.测试结果表明:该膜层在 430~700 nm,绝对反射率小于 0.15%.

关键词:光学薄膜;减反射膜;离子源沉积;应力;塑料

中图分类号:O484

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204912.1231001

Development of Polycarbonate High Strength Ultra-low Reflectivity Film

LIU Dong-mei¹, WEI Bo-yang¹, FU Xiu-hua¹, ZHANG Jing¹, DONG Suo-tao¹, LI Shuang²

(1 College of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Optorun (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to reduce the problem of image quality degradation caused by stray light in the optical system, polycarbonate is used as the substrate and the electron beam ion assisted method is used to prepare the ultra-low attenuation reflective film in visible band. Vacuum annealing method was used to reduce the thermal tensile stress caused by the increase of substrate temperature in the coating process, and MATLAB software was used to fit and analyze the stress of the material. By studying the ion source deposition process, the problem of film cracking was solved. MATLAB simulation was used to adjust the control parameters of Proportion Integration Differentiation (PID) controller, so as to stabilize the film-forming rate and solve the problem of spectral drift caused by thickness error. The results show that the absolute reflectance of the film is less than 0.15% at 430 ~ 700 nm.

Key words: Optical thin film; Anti-reflection film; Ion source deposition; Stress; Plastic

OCIS Codes: 310.1860; 310.6860; 310.4165; 310.6805

0 引言

随着 5G 时代的到来,用户对 VR/AR(虚拟现实和增强现实)观看体验的要求也不断提升.AR 系统中的鬼像会让使用者产生视觉疲劳,鬼像实质上是一种杂散光,其来源主要有四种:外部非成像光束进入光学系统的杂散光、成像光束经非光学系统传播路径的杂散光、自然热辐射杂散光、光学元件表面粗糙引起的杂散

基金项目:十三五装备预研基金(No.414xxxx0202)

第一作者:刘冬梅(1970-),女,教授,硕士,主要研究方向为光学制造.Email:sjx8811@sohu.com

通讯作者:魏博洋(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学薄膜.Email:2824155502@qq.com

收稿日期:2020-06-24;录用日期:2020-09-08

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

光^[1-3]. 通过使用塑料替代传统光学玻璃可以增加佩戴的舒适度,而在塑料表面镀制减反射率薄膜可降低杂散光对成像质量的影响.

近年,已有不少学者进行了减反射薄膜的研究.2004年,JUNG L等应用TiO₂和SiO₂在聚碳酸酯基片上镀制了多层减反射膜,在可见光波段范围内反射率小于1%^[4].2010年,SHIMOMOURA H等以聚合物为基底,在可见光范围内(400~800 nm)制备了反射率小于0.5%的减反射率薄膜^[5].2013年,WINKOWSKI P等研制了230~400 nm的减反射膜,平均反射率小于0.5%^[6];2009年,郝殿中等应用ZrO₂A和Al₂O₃作为高低折射率材料,在400~700 nm波段和1 064 nm处平均反射率小于0.5%^[7].2018年,张静等应用Al₂O₃和AlF₃研制了200~900 nm宽波段范围增透膜,平均透射率为95.7%^[8].根据相关文献可知,在可见光范围内减反射率薄膜仍存在较高的反射率,不能有效降低杂散光对成像质量的影响.因此,在可见光波段范围内制备超低减反射率薄膜,可以降低杂散光对成像质量的影响.塑料基板受热膨胀带来的应力影响,与薄膜材料结合牢固度低,易出现脱膜,本文通过分析模拟材料应力函数,采用真空退火和凹字形离子源工艺解决了脱膜及膜裂的问题.

1 膜系设计

本文以聚碳酸酯为基板镀制减反射率薄膜,相关技术指标如表1所示.聚碳酸酯(PC)的综合性能^[9]如表2所示.

表1 减反射膜技术指标

Table 1 Technical indexes of subtracting the reverse membrane

Parameters	Indicators
Substrate	Polycarbonate
Incident angle/(°)	0
Spectral range/nm	430~700
Absolute reflectivity/%	<0.15

表2 聚碳酸酯综合性能

Table 2 Polycarbonate synthesis and performance

Performance	Numerical
Bibulous rate/%	0.15
Modulus of elasticity in tension/MPa	2 200~2 500
Bending strength/MPa	106
Coefficient of linear expansion/(10 ⁻⁵ K ⁻¹)	6~7
Brinell hardness/MPa	97~104
Transmittance magnitude/%	87~90

1.1 材料的选择

选取在可见波段范围内表现良好的薄膜材料.高折射率材料有TiO₂、H₄、Ta₂O₅;低折射率材料有MgF₂、Al₂O₃、SiO₂.根据技术指标要求,基板为聚碳酸酯,其热变形温度为135~143℃,温度要限制在135℃以下,而H₄和MgF₂为高温材料,Ta₂O₅和Al₂O₃会制造出多孔膜层^[10],不能满足环测要求.TiO₂线膨胀系数为25/℃.SiO₂线膨胀系数为0.55×10⁻⁵/℃,吸收小、抗磨耐腐蚀,可作为最外层材料,保护PC基板.基于以上分析,选择TiO₂和SiO₂分别作为高低折射率材料.两种材料的折射率曲线如图1.

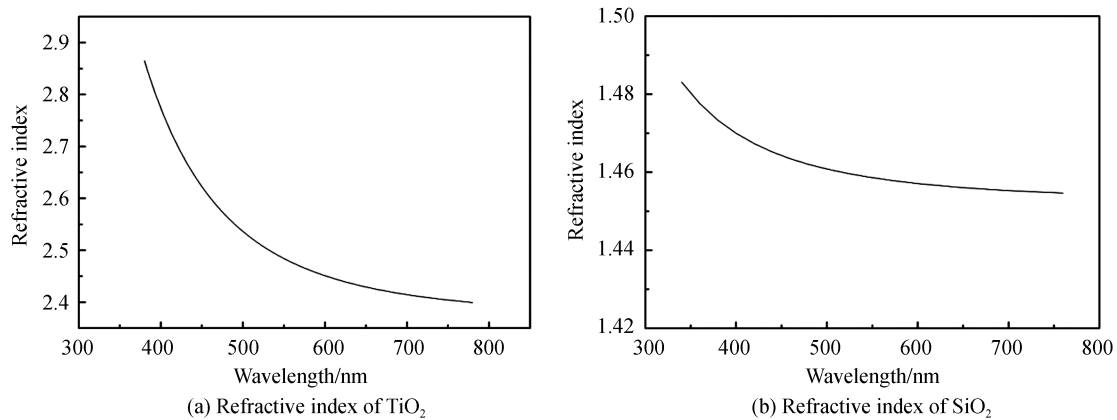


图1 两种材料的折射率
Fig.1 Refractive index of two materials

1.2 理论设计

由于规整膜系不能满足设计要求,因此,利用膜系设计软件 Macleod 进行膜系结构优化设计,初始结构为(HL)⁻⁵,采用单纯形优化算法进行全局优化,优化后得到的膜系结构为:Sub|0.03H0.17L0.04H0.4L0.04H0.13L0.24H0.02L0.23H0.26L|Air,其中 Sub 代表 PC,H 代表 TiO₂,L 代表 SiO₂,Air 代表空气,其理论设计的反射率光谱如图 2,在 430~700 nm 波段绝对反射小 0.15%。

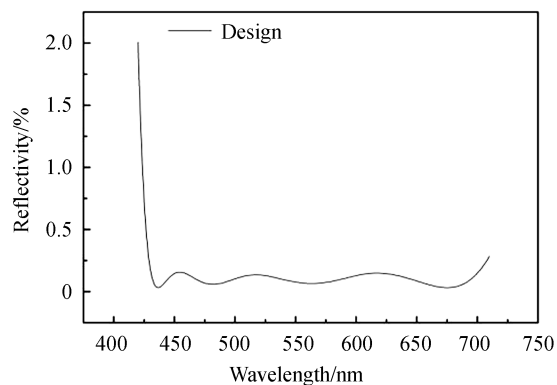


图2 减反射膜理论设计曲线
Fig.2 Theoretical design curve of antireflection film

2 薄膜制备及测试分析

实验使用光驰科技(上海)有限公司 OTFC-1800-DBI-PX 真空镀膜机.该设备有双 e 型电子枪、RF(射频)源,石英晶体膜厚控制仪、6 个晶控探头、并配有 Polycold system.由于基板为塑料,首先考虑薄膜的附着力,薄膜的附着力主要包括两个方面^[11]:1)薄膜材料对基板的附着力;2)每一层薄膜材料之间的结合力.通常,等离子体工艺处理会提高表面附着力,为此使用等离子体轰击激活基板.通过 zygo 测量不同轰击时间基板表面的粗糙度,结果如图 3.

通过等离子体轰击基板表面,基板表面粗糙度增大,散射也会增大,导致薄膜的反射率增大,尝试不同等离子体处理时间轰击基板表面.由图 4 可知,当等离子体处理时间为 500 s 时,均方根粗糙度最小,为 6.102 nm.因此,最终确定等离子体处理时间为 500 s.

实验前首先将基板放入烤箱,以 80 °C 烘烤 2 h,排除基板表面水汽,当真空度抽到 1.0×10^{-4} Pa 用离子源轰击时间为 500 s,电压为 800 V,电流为 800 mA,氧气为 90 sccm.实验中沉积了多层膜,塑料基板上的氧化物薄膜因其热膨胀系数与基板不同而产生脱膜现象^[12].基板的温度主要来自该工艺使用的蒸发源、电子枪产生的二次电子和等离子体轰击基板产生的热量.且温度随着镀膜时间呈梯度式上升,通过 Stoney 公式可

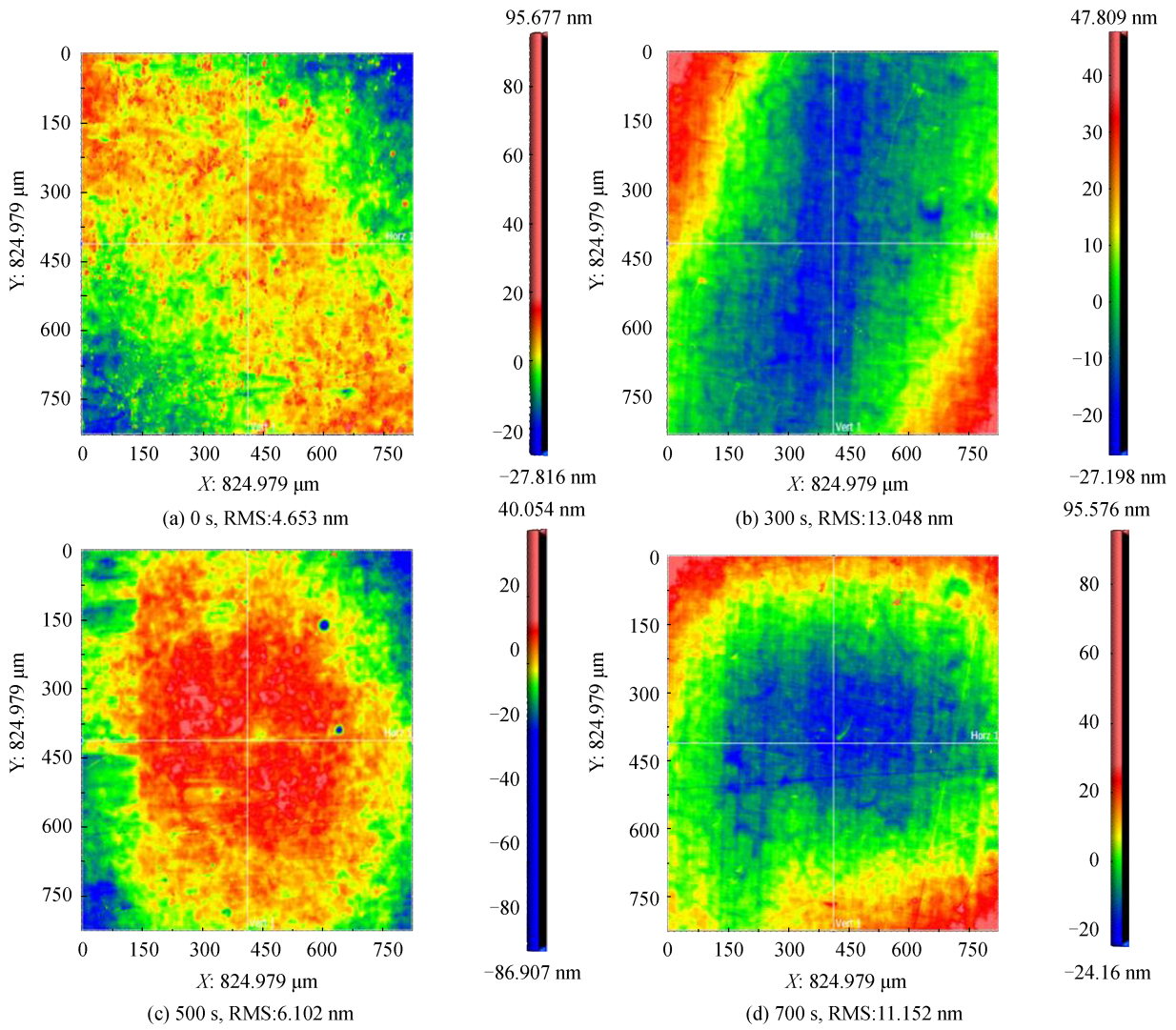


图3 不同等离子体轰击时间基板表面粗糙度
Fig.3 Surface roughness of substrate at different plasma treatment times

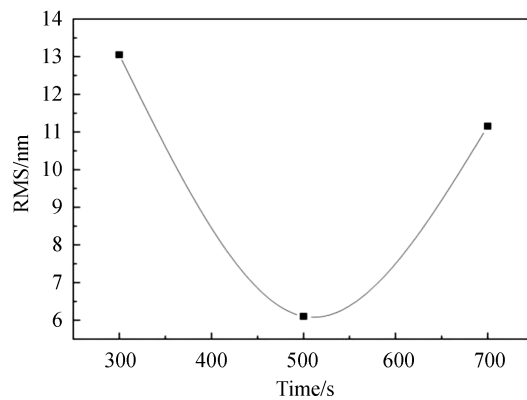


图4 不同等离子体轰击时间基板表面粗糙度
Fig.4 The surface roughness of the substrate during different plasma treatment times

以粗略计算镀膜层各分层的应力 σ_i ^[12]

$$\sigma_i = \frac{Ed_s^2}{(1-\nu)\delta d_i} \left(\frac{1}{R_d} - \frac{1}{R_o} \right) \quad (1)$$

式中, R_0, R_d 分别为镀膜前后的曲率半径, d_s, d_f 分别为基板和薄膜的厚度, E 为杨氏模量, ν 为泊松比. PC 的热膨胀系数约为 $6 \times 10^{-5} \text{K}^{-1}$, 经过粗略估算, 镀膜期间温度变化产生大约 $5 \sim 20 \text{MPa} \cdot \text{K}^{-1}$ 热拉应力. 薄膜制备完成后采用真空退火法^[13-16]. 真空退火实际上是薄膜的能量发生转移, 温度可以改变原子的运动状态, 原子重新排列组合, 薄膜自身的应变能降低. 由于 PC 热变形温度为 $130 \text{ }^\circ\text{C}$, 不能通过高温加热的方式使原子获得能量, 因此使用离子源电离 Ar^+ , Ar^+ 获得动能, 通过能量传递使膜层原子和 PC 基板获得能量, 膜层和 PC 基板自身的应变能降低, 从而膜层应力和 PC 基板热拉应力降低. 最终确定的薄膜应力和真空退火参数如表 3.

表 3 真空退火参数
Table 3 Vacuum cooling parameters

	Annealing temperature/ $^\circ\text{C}$	Annealing time/h	Ion source energy		Film stress/MPa	
			Voltage/V	Current/mA	Annealing before	After annealing
Sample1	120	1	300	300	-265	-205
Sample2	120	2	300	300	-253	-213
Sample3	120	3	300	300	-256	-209
Sample4	120	4	300	300	-258	-224

通过查阅相关论文, 氧化膜层的应力主要取决于真空镀膜的工艺参数^[17], 分别在此工艺下用台阶仪测量两种材料单层膜的应力, 结果如表 4. 设 TiO_2 和 SiO_2 应力函数分别为

$$s(x) = a_0 + a_1 \cdot \cos(x \cdot w) + b_1 \cdot \sin(x \cdot w) \quad (2)$$

$$s(x) = a_1 \cdot \sin(b_1 \cdot x) + c_1 \quad (3)$$

式中, $S(x)$ 为应力函数, x 为膜层厚度, a_0, a_1, b_1, c_1, w 为应力系数, 借助 MATLAB 软件分别使用傅立叶逼近型拟合、正弦曲线逼近拟合确定 a_0, a_1, b_1, w 应力系数, TiO_2 和 SiO_2 两种材料的拟合公式分别为

$$s(x) = -287.9 + 254.6 \cos(0.018214x) + 119.5 \sin(0.01824x) \quad (4)$$

$$s(x) = 179.2 \sin(0.01074x + 3.135) \quad (5)$$

应力拟合曲线如图 5 所示, 其中确定系数分别为 0.995 0、0.982 6, 表明拟合度较好.

表 4 两种材料单层膜应力
Table 4 Monolayer stress of the two materials

Deposition time/s	Single layer stress/MPa	
	TiO_2	SiO_2
30	-426	-476
60	-455	-477
90	-484	-398

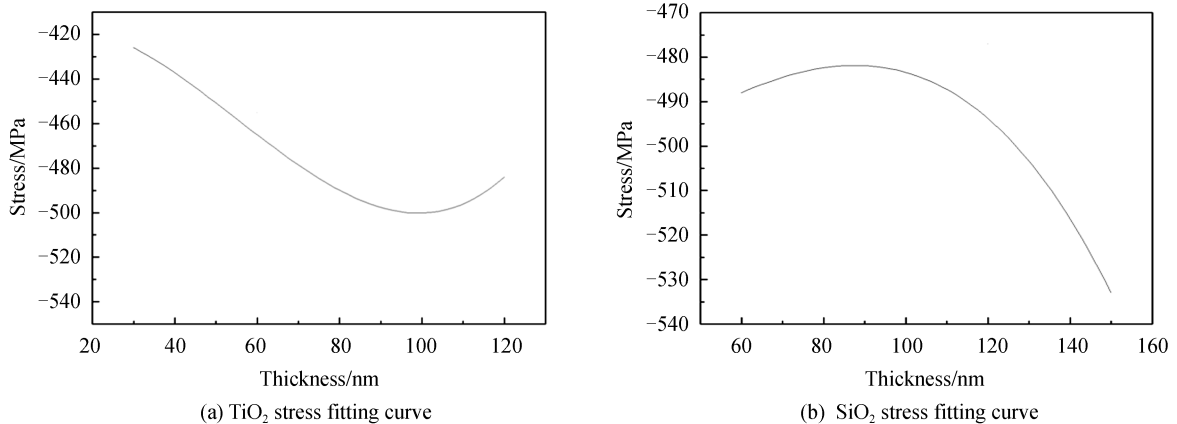


图 5 应力拟合曲线
Fig. 5 Stress fitting curve

膜裂是由于薄膜应力的存在,一般压应力和张应力交替出现可以削弱薄膜中累积应力,但从图5两种材料的拟合应力数据可知,两种材料均为压应力,表明膜层聚集密度较高,导致膜层之间的应力不能释放.为此提出凹字形离子源能量工艺,3~7层使用低能量离子源辅助沉积,使膜层疏松多孔,从而释放应力,通过不断试验,最终确定的离子源工艺参数如表5所示.经过测试,膜层牢固度较好,未出现膜裂.使用台阶仪测量镀膜前后表面的曲率半径,根据曲率变化计算出薄膜应力 σ_t ,如表6所示.

表5 凹字形离子源工艺参数记录表
Table 5 Notched ion source process parameters record table

Membrane layer	Material	Voltage/V	Current/mA	Acc/V	O ₂ /sccm	Ar/sccm
1~2	TiO ₂	800	800	150	90	10
	SiO ₂	800	800	150	60	8
3~8	TiO ₂	500	500	150	90	10
	SiO ₂	500	500	150	60	8
	TiO ₂	500	500	150	90	10
	SiO ₂	500	500	150	60	8
	TiO ₂	500	500	150	90	10
	SiO ₂	500	500	150	60	8
9~10	TiO ₂	800	800	150	90	10
	SiO ₂	800	800	150	60	8

表6 增透膜分层梯度应力
Table 6 Layered gradient stress of anti-reflection film

Membrane layer	Stress/MPa
1~2	-132
1~8	-84
1~10	-96

2.1 光谱测试与分析

使用LRM8-600P1显微分光光度计对光谱进行测试,测量结果如图6所示.测量结果在430~700 nm绝对反射率大于0.15%,与设计曲线存在一定差异,通过使用Macleod软件反演分析,主要是由于TiO₂和SiO₂的速率不稳造成的厚度误差^[18],两种材料的沉积速率变化曲线如图7.

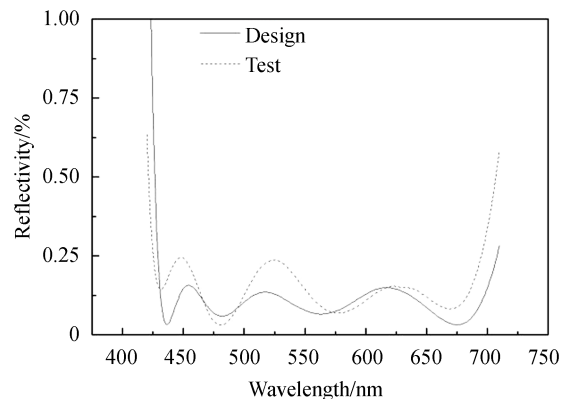


图6 光谱测试曲线
Fig. 6 Spectral test curve

两种材料的沉积速率主要通过PID控制器控制电子枪的电流大小来调节,如图8所示,设沉积单层膜速率变化为 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_{k-2}, X_{k-1}, X_k$,当前偏差为

$$E_k = S_v - X_k \quad (6)$$

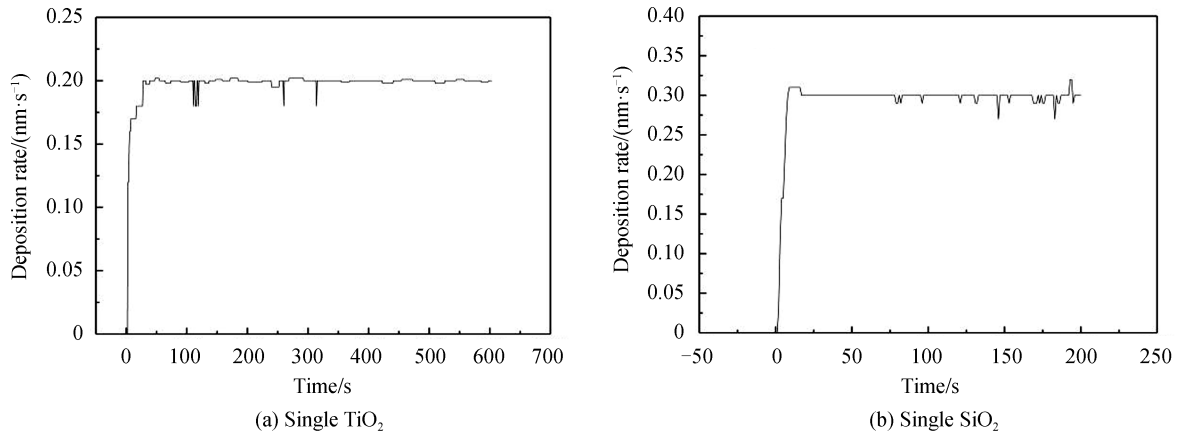


图7 速率变化曲线
Fig.7 Rate change curve

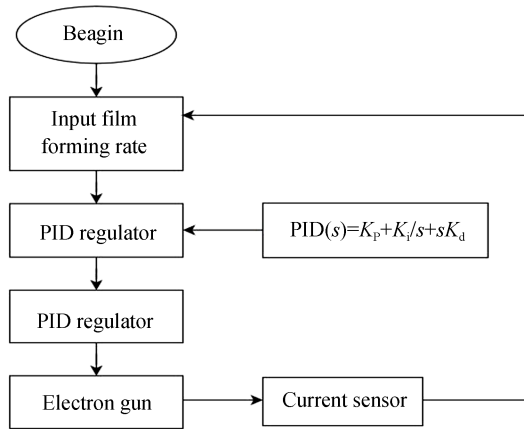


图8 PID控制电子枪电流原理
Fig. 8 Schematic diagram of PID control electron gun current

输出为

$$P_{out} = K_p \cdot E_k + O \quad (7)$$

式中, P 为比例项, S_v 为单层膜设定速率, X_k 为当前沉积速率, K_p 为增益, O 为系统设定脉宽.

历史偏差为 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_{k-2}, E_{k-1}, E_k$. 将历史偏差相加得到 S_k , 即

$$S_k = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_{k-2} + E_{k-1} + E_k \quad (8)$$

输出为

$$I_{out} = K_i \cdot S_k + O \quad (9)$$

将最后两次偏差相减得

$$D_k = E_k - E_{k-1} \quad (10)$$

输出为

$$D_{out} = K_d \cdot D_k + O \quad (11)$$

式(9)积分时间为 I_{out} , 式(11)微分时间为 D_{out} ^[19-20], 通过MATLAB模拟仿真PID控制发现, 比例项 P 减小, 沉积速率曲线逐渐上升, 实现长稳定时间, 不发生过冲. 积分时间 I 减小时, 沉积速率曲线发生上下振荡, 并且沉积速率曲线快速上升. 微分时间 D 增大时, 过冲/下冲和稳定时间减少, 但薄膜速率曲线本身发生细微振荡. 最终通过模拟, 并根据实际情况确定传递函数 K_p, K_i, K_d 三个增益. 得到 TiO_2 和 SiO_2 两种材料的沉积速率传递函数分别为

$$M_c = \frac{8s^2 + 24s + 1}{s^2 + 11s^2 + 25s + 1} \quad (12)$$

$$M_d = \frac{6s^2 + 22s + 1}{s^2 + 9s^2 + 23s + 1} \quad (13)$$

式(12)中, $K_p=24$ 、 $K_i=3$ 、 $K_d=8$; 式(13)中 $K_p=22$ 、 $K_i=1$ 、 $K_d=6$. 最终得到相对稳定的薄膜沉积速率, 如图9所示. 光谱测试曲线如图10所示.

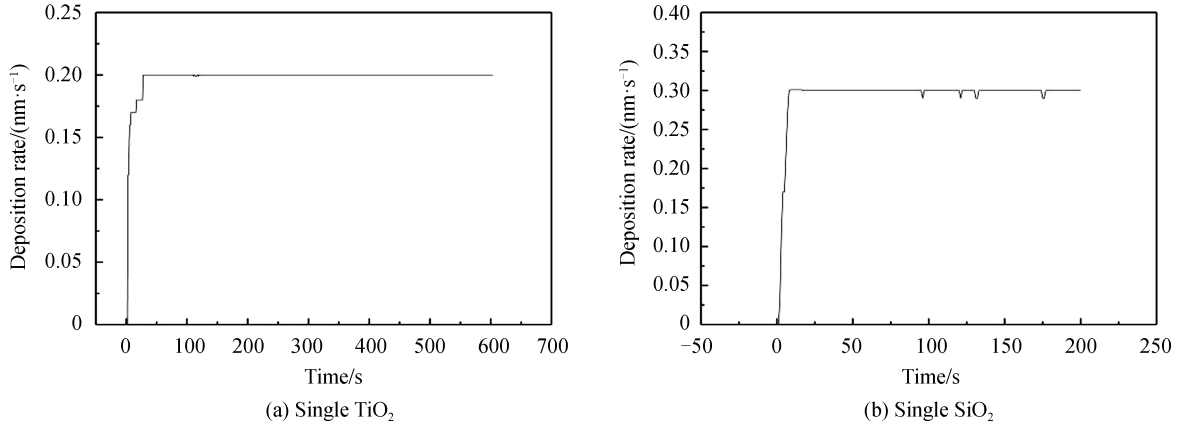


图9 PID调整之后的沉积速率

Fig. 9 Deposition rate after PID adjustment

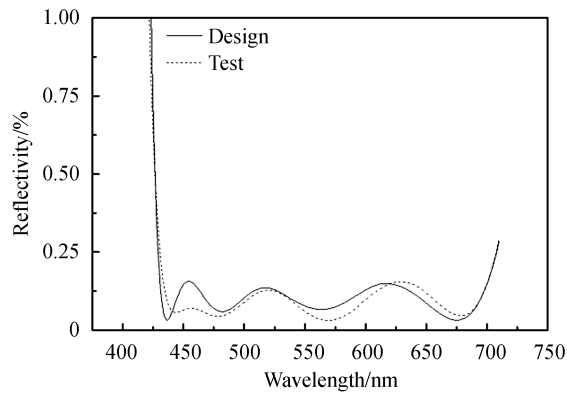


图10 PID稳定沉积速率光谱测试曲线

Fig. 10 PID stable film forming rate spectral test curve

2.2 膜层环境适应性测试

按照相关规范, 对本课题在PC上制备的减反射率薄膜做了环境测试, 结果如下:

1) 附着力测试: 使用强度不小于 2.94 N/cm^2 , 宽度为 2 cm 的3M胶带贴紧膜层表面, 将3M胶带从垂直于基板的方向迅速拉起后, 膜层并无脱膜.

2) 百格拉膜测试: 在膜层表面使用百格刀均匀画出 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的方格, 以同样的方式用3M胶带进行拉膜测试, 无脱膜.

3) 高温高湿测试: 在温度 $85 \text{ }^\circ\text{C}$ 和湿度 85% 的高温高湿箱中 72 h , 通过显微镜观察, 无膜裂.

3 结论

以聚碳酸酯为基板, 利用Macleod膜系设计软件完成了可见波段范围内减反膜的设计, 使用真空退火降低了由于蒸发源和等离子体使基板温度升高而导致膜层的热拉应力. 分析两种材料的应力, 并通过调整离子源沉积工艺, 得到一种凹字形离子源沉积工艺, 使膜层应力得到释放, 从而解决以塑料PC为基板膜裂的问题. 根据PID控制沉积速率原理, 修正由速率变化引起膜层厚度误差导致光谱漂移. 研究薄膜材料特性, 优化薄膜沉积工艺, 进一步降低膜层应力是今后工作的重点研究方向.

参考文献

- [1] ZHANG Miao-miao, MENG Bing-huan, HAN Lin, *et al.* Correction of ghost artifacts for directional polarimetric camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(1): 0111002.
张苗苗, 孟炳寰, 韩琳, 等. 多角度偏振成像仪鬼像校正方法[J]. 光子学报, 2019, **48**(1):0111002.
- [2] LU Juan, MA Xiao-long, HE Ying-hong, *et al.* Simulation test and inhibit method of forward scattered stay light of polarized beam split optical antenna[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0406002.
吕娟, 马小龙, 贺应红, 等. 偏振分光光学天线前向散射杂光仿真测试与抑制[J]. 光子学报, 2016, **45**(4):0406002.
- [3] LI Ting, YANG Jiang-feng, SUN Ping, *et al.* Research on optical system of the lunar-based optical telescope (LOT)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(6):136-141.
李婷, 杨建峰, 阮萍, 等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(6):136-141.
- [4] JUNG L, JUNSIK C, SEOKKEUN K, *et al.* Improvement of adhesion between plastic substrates and antireflection layers by ion-assisted reaction[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **449**(1-2): 147-151.
- [5] SHIMOMOURA H, GEMICI Z, COHEN R, *et al.* Layer-by-layer-assembled high-performance broadband antireflection coatings[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2010, **2**(3): 813-820.
- [6] WINKOWSKI P, KONSTANTY W. Wide band antireflective coatings $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2/\text{MgF}_2$ for UV region [C]. SPIE, 2013, **8902**: 890228.
- [7] HAO Dian-zhong, WU Fu-fang, SONG Lian-ke. The developmen of glan-taylor prism AR film [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 307-310.
郝殿中, 苏富芳, 宋连科, 等. 可见光波段及1064nm波长处用于Glan-Taylor棱镜减反射膜[J]. 光子学报, 2009, **38**(2):307-310.
- [8] ZHANG Jing, LIN Zhao-wen, FU Xiu-hua, *et al.* Development of ultra ultraviolet to near infrared wide band anti-reflection film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1031003.
张静, 林兆文, 付秀华, 等. 超短紫外到近红外宽波段增透膜的研制[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1031003.
- [9] ZHANG Liu-cheng, ZHAI Xiong-wei, DING Hui-li. Foundation of polymer materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012, 155-158.
张留成, 瞿雄伟, 丁会利. 高分子材料基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012, 155-158.
- [10] JOO W, KIM J, KIM K. Broadband antireflection coating covering from visible to near infrared wavelengths by using multilayered nanoporous block copolymer films[J]. *Langmuir*, 2010, **26**(7): 5110-5114.
- [11] TANG Jin-fa, GU Pei-fu, LIU Xu, *et al.* Modern optical film technology[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2018: 236-238.
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, 2018:236-238.
- [12] Stephen. Plastic optics manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 177-179.
史蒂芬. 塑料光学手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013:177-179.
- [13] FU Xiu-hua, PAN Yong-gang, DONG Jun, *et al.* The characteristic of connecting layer material on teo₂ crystal surface by thermal stress method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0131001.
付秀华, 潘永刚, 董军, 等. 用热应力法研究二氧化磷晶体表面连接层材料的特性[J]. 光子学报, 2016, **45**(1):0131001.
- [14] LIU Dong-mei, LIU Wen-cheng, FU Xiu-hua, *et al.* Synthesis of refractive coating on polycarbonate membrane: An advanced material of vehicle head-up display[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2019, (12): 1083-1089.
刘冬梅, 刘文成, 付秀华, 等. 车载抬头显示光学系统塑料元件反射膜的研制[J]. 真空科学与技术学报, 2019, (12): 1083-1089.
- [15] CHEN Tao, LUO Chong-tai, WANG Duo-shu, *et al.* Influence of ion beam assistance deposition and annealing on stress in ZnS films[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, **29**(z1): 55-58.
陈焱, 罗崇泰, 王多书, 等. 离子束辅助沉积和真空退火对硫化锌薄膜应力的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2009, **29**(z1):55-58.
- [16] LIU Bao-jian, DUAN Wei-bo, LI Da-qi, *et al.* Effect of annealing temperature on structure and stress properties of Ta₂O₅/SiO₂ multilayer reflective coatings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(11): 114208.
刘宝剑, 段微波, 李大琪, 等. 退火温度对Ta₂O₅/SiO₂多层反射膜结构和应力特性的影响[J]. 物理学报, 2019, **68**(11):114208.
- [17] LI Yu-qiong, YU Zhi-nong, WANG Hua-qing, *et al.* Effects of substrate material and deposition parameters on film stress[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 296-302.
李玉琼, 喻志农, 王华清, 等. 基片材料与沉积参数对薄膜应力的影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(2):296-302.
- [18] ZHAN Mei-qiong, ZHANG Dong-ping, YANG Jian-he. Thickness monitoring by quartz crystal scillation for optical coating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 585-588.

- 占美琼,张东平,杨健贺. 石英晶体振荡法监控膜厚研究[J]. 光子学报, 2004, **33**(5):585-588.
- [19] HUANG Hai-bo, AI Yong, CHEN Jing, High frame rate image recognition and tracking system based on kalman and fuzzy PID[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(12): 3295-3300.
黄海波, 艾勇, 陈晶, 等. 基于卡尔曼与模糊PID的高帧频图像识别跟踪系统[J]. 光子学报, 2009, **38**(12):3295-3300.
- [20] HAN Ya-meng, MA Jian-kang, ZHANG Ying. Study on fuzzy control Application in the opto-electronic tracking servo system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1918-1920.
韩亚蒙, 马健康, 张颖. 模糊PID控制在电视跟踪伺服系统中的应用[J]. 光子学报, 2005, **34**(12):1918-1920.