

自适应光学激光导星系统中偏振分光膜的研制

付秀华¹ 莫朝燕¹ 黄金龙² 莫舒蕙³ 吴博琦¹

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022
² 深圳昂纳信息技术(深圳)有限公司, 广东 深圳 518118
³ 海南珠江源高级职业技术学校, 海南 海口 570216

摘要 为了满足自适应光学中激光导星系统的要求, 根据薄膜理论, 选择合适的薄膜材料, 采用针式优化算法并建立与膜内电场强度相关的膜系评价函数, 优化出满足要求且电场强度分布较低的膜系。通过电子束加热蒸发和离子源辅助沉积制备薄膜。制备的偏振分光膜满足偏振耦合分光系统的使用要求, 通过了环境测试并具有较高的激光损伤阈值。

关键词 薄膜; 偏振分光膜; 针式优化; 激光损伤阈值; 自适应光学

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0131002

Design and Fabrication of Polarizing Beam Splitter in Adaptive Optics Laser Guide Star System

Fu Xiuhua¹ Mo Zhaoyan¹ Huang Jinlong² Mo Shuhui³ Wu Boqi¹

¹ College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² O-Net Communications (Shenzhen) Limited, Shenzhen, Guangdong 518118, China
³ Hainan Zhujiangyuan Institute of Vocational Technology, Haikou, Hainan 570216, China

Abstract In order to meet the requirements of adaptive optics laser guide star system, the appropriate film material is selected base on film theory. The film system's evaluation function which is associated with the electric field is established by using needle optimization algorithm. The film is optimized to meet the requirements and has a lower electric field intensity distribution. Electron beam heating evaporation and ion-assisted deposition system are adopted for film preparation. The polarizing beam splitter meets the requirements of polarization coupling splitting system, and passes the environmental testing, which has a high laser damage threshold.

Key words thin films; polarizing beam splitter; needle optimization; laser induced damage threshold; adaptive optics

OCIS codes 310.0310; 310.6805; 230.1360; 110.1085

1 引 言

自适应光学能够对因大气湍流而导致的波前畸变进行实时补偿校正, 得到接近真空中传输的理想特性, 在天文探测、激光武器和激光核聚变中有着广泛的应用^[1]。激光钠导星作为自适应光学中一项重要的应用, 能辅助天文望远镜获得更清晰的太空图像。导星系统中的偏振耦合分光系统主要用于激光的发射和接收, 因此为了提高激光的分光效率, 高质

量的偏振分光膜起到了非常关键的作用^[2]。根据所查资料可知, 目前国内外对偏振分光膜有了多方面的研究^[3-4], 但是要求在 589 nm 处具有高抗激光损伤阈值高消光比的偏振分光棱镜还未见报道。

本文根据偏振耦合分光系统对分光效率的要求, 研制出高激光损伤阈值的偏振分光膜。通过分析电场强度与激光损伤阈值的关系, 在膜系设计的过程中考虑电场强度的分布, 并引入评价函数进行

收稿日期: 2013-07-15; 收到修改稿日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(60977052)

作者简介: 付秀华(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事光学薄膜和工艺等方面的研究。E-mail: goptics@126.com

分光膜设计。

2 膜系设计

2.1 膜层材料的选取

根据钠导星系统中对偏振分光棱镜的要求,具体的膜系技术指标如表 1 所示。 T_p 、 T_s 分别为 p 光和 s 光的平均透射率。

表 1 偏振分光膜的参数要求

Table 1 Specifications of polarizing beam splitter

Technical specification	Parameter
(589±15) nm	$T_p > 99.8\%$, $T_s < 0.2\%$
Angle of incidence	45°
Extinction ratio	$E > 40$ dB

由于该偏振片用于激光系统中,为了避免薄膜遭到激光破坏,导致整个系统性能下降,根据参数要求,应选取在要求波段内有较好的透光性及较高的抗激光损伤性能的薄膜材料。同时还要考虑其折射率、吸收系数、膜层间应力及化学稳定性。根据实验测试结果,选取 HfO_2 和 SiO_2 作为高低折射率材料。

HfO_2 从紫外到红外(0.22~12 μm)具有较好的透光性,并有较低的消光系数以及良好的热稳定性,而且与 Ti_3O_5 等其他高折射率材料相比具有较高的抗激光损伤阈值。 SiO_2 在 0.18~8 μm 有良好的透光性、优良的机械性能和抗腐蚀性能,并且成膜质量好,是可见光范围较理想的低折射率材料。

2.2 膜系设计

棱镜偏振分光膜是指在直角棱镜的斜面镀制多层膜,使光束与薄膜之间的入射角满足布儒斯特角条件,从而实现 p 偏振光高透射 s 偏振光高反射,从而达到偏振分光的作用。根据薄膜设计理论^[5],选择偏振分光膜的基本结构为 Sub |(HL)¹⁰ H | Glass,入射角度为 45°,参考波长为 589 nm,Sub 为 K9 基底,Glass 表示入射介质为 K9。H 和 L 分别代表 HfO_2 和 SiO_2 的 1/4 中心波长的光学厚度,理论光谱曲线如图 1 所示。

如图 1 所示,其基本结构与高反膜系相同,s 偏振光的反射率随着膜层的增多而增大,但 p 偏振光的透射率则随着膜层的增加而减小。为了满足设计要求,选择在初始膜系的基础上采用针式优化法通过添加膜层并对膜厚进行优化从而达到设计的要求。设入射介质无吸收,导纳为 n_0 , θ 为入射角,对于 p 光和 s 光,膜层第 j 层的位相厚度均为 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda}n_j d_j \cos \theta_j$,p 光和 s 光的导纳 η_j 可表示为 p 光:

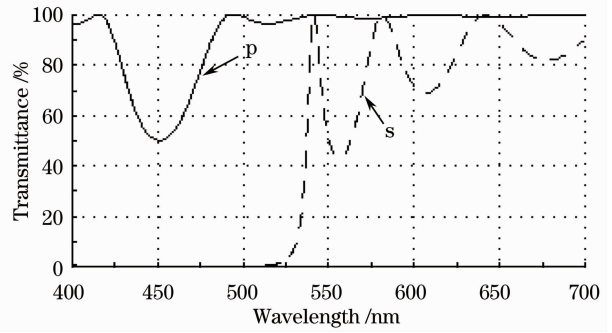


图 1 偏振分光膜的光谱曲线

Fig. 1 Spectral curves of the polarization beam splitter

$\eta_j = n_j / \cos \theta_j$; s 光: $\eta_j = n_j \cos \theta_j$ 。

当插入折射率为 n ,物理厚度为 z 的膜层时,p 光的导纳的微分方程为

$$\frac{dY}{dz} = ik \left\{ \epsilon(z) - \left[1 - \frac{a^2}{\epsilon(z)} Y^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

s 光的导纳微分方程为

$$\frac{dY}{dz} = ik [\epsilon(z) a^2 - Y^2], \quad (2)$$

其中 $\epsilon(z)$ 为光学薄膜的介电常数, k 为薄膜的第 k 层, a 为入射介质的折射率。微分后得到 p 光导纳的变化量为

$$\Delta Y_p = i \frac{2\pi}{\lambda} \left[n^2 - \left(1 - \frac{a^2}{n^2} \right) Y_p^2 \right] \Delta z, \quad (3)$$

s 光为

$$\Delta Y_s = i \frac{2\pi}{\lambda} (n^2 - a^2 - Y_s^2) \Delta z. \quad (4)$$

若在第 k 层插入了新增的膜层, k 层之后的导纳也随之改变,当第 j 层时($j > k$),根据资料^[6]可知

$$\Delta Y_{j+1} \phi_{j+1} = \Delta Y_j \phi_j. \quad (5)$$

能量反射率为

$$r(k) = \frac{\eta_a - Y(z_a, \lambda)}{\eta_a + Y(z_a, \lambda)}. \quad (6)$$

两边同时对 $Y(z_a, k)$ 求导可得

$$\delta r(\lambda) = - \frac{[1 + r(\lambda)]}{2\eta_a} \delta Y(z_a, \lambda). \quad (7)$$

由于 $\delta R(\lambda) = 2\text{Re}[r^*(\lambda)\delta r(\lambda)]$, 则 $\delta R(\lambda) = -\text{Re} \left\{ \frac{r^*(\lambda)}{\eta_a} [1 + r(\lambda)]^2 \delta Y(z_a, \lambda) \right\}$, 其中 η_a 表示为入射介质的导纳, z_a 为垂直于界面的坐标。

将 p 光和 s 光的导纳微分方程代入 $\delta R(\lambda)$ 中, 可得插入新膜层时能量反射率 R_s 和 R_p 的变化。

对于应用在激光系统中的偏振膜,抗激光损伤能力是评价抗激光膜的重要参数。根据资料可知,提高激光损伤阈值的主要途径有进行激光预处理,增进抛光工艺,改善镀膜工艺和优化膜系设计等。

激光预处理对于部分光学元件能够有效的提高激光损伤阈值,但是不同光学元件所需要的预处理参数不尽相同,如果选取不当反而会对元件造成负面影响。而改善抛光和镀膜工艺,则需要耗费大量的精力进行研究。通过优化膜系设计,能够改善薄膜内的驻波场分布^[7],从而有效地提高抗激光损伤阈值。

根据驻波场理论,偏振膜的抗激光损伤能力的大小主要与 p 光和 s 光在偏振膜内部的电场强度分布有关。为了保证设计的膜系具有高的消光比的同时尽可能减少薄膜内部的光学损耗,膜系设计时,在

针式优化算法的基础上^[8],将膜层内部电场加以考虑,根据资料^[5]可知, $E_{j-1} = B_j E_{\text{SUB}}$,假定基底内部的电场强度 E_{SUB} 为 1, B_j 表示任意界面的相对电场强度,由于

$$\begin{bmatrix} B_k \\ C_k \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / \eta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (8)$$

设 $\begin{bmatrix} B_k \\ C_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{22} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$, 可得

$$|E_p^+| = \frac{1}{2} [m_{11} + i m_{12} \eta_s + (i m_{21} + m_{22} \eta_s) / \eta_0] |E_{\text{SUB}}|, \quad (9)$$

$$|E_s^-| = \frac{1}{2} [m_{11} + i m_{12} \eta_s - (i m_{21} + m_{22} \eta_s) / \eta_0] |E_{\text{SUB}}|. \quad (10)$$

当在第 k 层插入物理厚度为 z , 折射率为 n 的材料时, 设位相厚度为 δ_n 那么特征矩阵变为 $\mathbf{M}'_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_n & i \sin \delta_n \\ i \eta_n \sin \delta_n & \cos \delta_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & i m_{22} \\ i m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m'_{11} & i m'_{22} \\ i m'_{21} & m'_{22} \end{bmatrix}$, 可得电场强度变化为

$$|E_p^+| = \frac{1}{2} [m'_{11} + i m'_{12} \eta_s + (i m'_{21} + m'_{22} \eta_s) / \eta_0] |E_{\text{SUB}}|, \quad (11)$$

$$|E_s^-| = \frac{1}{2} [m'_{11} + i m'_{12} \eta_s - (i m'_{21} + m'_{22} \eta_s) / \eta_0] |E_{\text{SUB}}|. \quad (12)$$

当 $z \rightarrow 0$ 时, 可求得在第 k 层插入膜层时入射光和反射光电场强度的变化率。设评价函数为

$$F = \frac{1}{K(\omega_{R_p} + \omega_{R_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{R_p} \left[\frac{R_p(\lambda_i) - \widehat{R}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_p(\lambda_i)} \right]^2 + \omega_{R_s} \left[\frac{R_s(\lambda_i) - \widehat{R}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_s(\lambda_i)} \right]^2 \right\} + \frac{1}{K(\omega_{E_p} + \omega_{E_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{E_p} \left[\frac{E_p(\lambda_i) - \widehat{E}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_p(\lambda_i)} \right]^2 + \omega_{E_s} \left[\frac{E_s(\lambda_i) - \widehat{E}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_s(\lambda_i)} \right]^2 \right\}, \quad (13)$$

式中 K 为优化目标的数量, ω_{R_s} 和 ω_{R_p} , ω_{E_s} 和 ω_{E_p} 分别为反射率和电场强度相关的权重系数, $\widehat{R}_s(\lambda_i)$ 和 $\widehat{R}_p(\lambda_i)$ 为目标反射率, $R_s(\lambda_i)$ 和 $R_p(\lambda_i)$ 为目标的当前光谱曲线反射率, $\widehat{E}_s(\lambda_i)$ 和 $\widehat{E}_p(\lambda_i)$ 目标电场强度值, $E_s(\lambda_i)$ 和 $E_p(\lambda_i)$ 为膜层中实际的场强值, $\Delta \widehat{R}_s(\lambda_i)$, $\Delta \widehat{R}_p(\lambda_i)$, $\Delta \widehat{E}_s(\lambda_i)$ 和 $\Delta \widehat{E}_p(\lambda_i)$ 分别为要求的膜系能量反射率与电场强度容差。根据上述公式, 评价函数的导数可表示为

$$\begin{aligned} \delta F(n, z) = & \left\{ \frac{1}{K(\omega_{R_p} + \omega_{R_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{R_p} \left[\frac{R_p(\lambda_i) - \widehat{R}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_p(\lambda_i)} \right]^2 + \omega_{R_s} \left[\frac{R_s(\lambda_i) - \widehat{R}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_s(\lambda_i)} \right]^2 \right\} \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \\ & \frac{1}{K(\omega_{R_p} + \omega_{R_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{R_p} \left[\frac{R_p(\lambda_i) - \widehat{R}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_p(\lambda_i)} \right] \frac{\delta R_p(n, z)}{\Delta \widehat{R}_p(\lambda_i)} + \omega_{R_s} \left[\frac{R_s(\lambda_i) - \widehat{R}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{R}_s(\lambda_i)} \right] \frac{\delta R_s(n, z)}{\Delta \widehat{R}_s(\lambda_i)} \right\} + \\ & \left\{ \frac{1}{K(\omega_{E_p} + \omega_{E_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{E_p} \left[\frac{E_p(\lambda_i) - \widehat{E}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_p(\lambda_i)} \right]^2 + \omega_{E_s} \left[\frac{E_s(\lambda_i) - \widehat{E}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_s(\lambda_i)} \right]^2 \right\} \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \\ & \frac{1}{K(\omega_{E_p} + \omega_{E_s})} \sum_{i=1}^K \left\{ \omega_{E_p} \left[\frac{E_p(\lambda_i) - \widehat{E}_p(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_p(\lambda_i)} \right] \frac{\delta E_p(n, z)}{\Delta \widehat{E}_p(\lambda_i)} + \omega_{E_s} \left[\frac{E_s(\lambda_i) - \widehat{E}_s(\lambda_i)}{\Delta \widehat{E}_s(\lambda_i)} \right] \frac{\delta E_s(n, z)}{\Delta \widehat{E}_s(\lambda_i)} \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

根据(14)式可得出当插入折射率为 n , 物理厚度为 z 的新膜层时对评价函数 F 的影响, 当 $\delta F(n, z)$ 为负数时表示所插入的膜层能够降低膜系的评价函数, 通过不断地迭代计算降低膜系理论值与目标值之间

的差值, 从而得到满足设计要求的膜系。将(14)式导入 Matlab 软件中, 根据设计要求, 设定相关变量, 对膜系进行计算后, 得到的评价函数极小值为 0.2372, 优化后的膜系为: Sub | 1.044H 1.2346L 0.8946H

1.1087L 0.9605H 1.2974L 1.0933H 1.4079L
 1.1396H 1.4254L 1.1239H 1.3689L 1.0523H
 1.2524L 0.9709H 1.2224L 1.0256H 1.3532L
 1.1273H 1.4453L 1.1668H 1.4629L 1.1577H
 1.4308L 1.1117H 0.7127L 1.0639H 1.0791L
 1.4284H 1.0672L 1.2348H | Glass, 偏振分光膜的理论设计光谱曲线和膜层内电场分布如图2和图3所示。

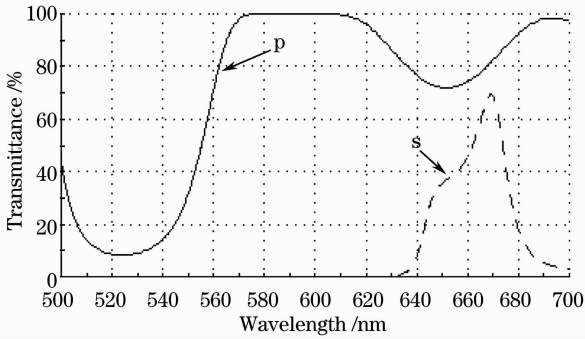


图2 偏振分光膜的理论设计光谱曲线

Fig. 2 Theoretical spectral curves of the polarization beam splitter

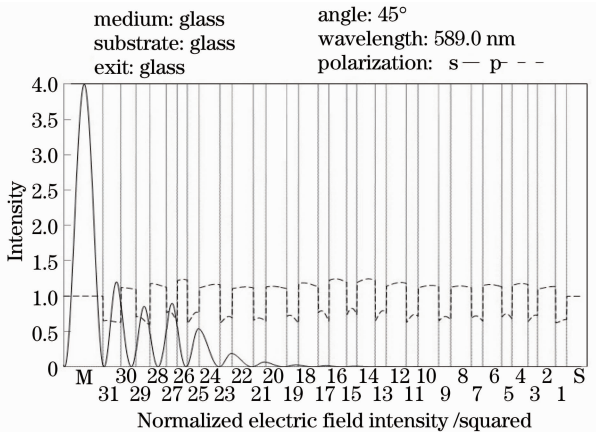


图3 膜层内电场分布

Fig. 3 Electric field distributions within the film

如图2和图3所示,该膜系在工作波段内p光平均透射率为99.968%,s光平均透射率为0.0529%,且膜层内点电场强度分布较低。

3 薄膜制备

实验在OTFC-1300真空镀膜机上进行,该设备配有双电子枪与射频离子源辅助系统以及HOM2-R-VIS350A光学膜厚控制系统。射频离子源系统能够给予淀积粒子较大的动能,有效地破坏膜层的微柱状结构,提高薄膜的机械性能。HOM2-R-VIS350A光学膜厚控制系统采用反射式监控,利

用Lightratiopeak的方式,根据光量值的大小对膜系进行监控,这种监控方式可改善光控极值法引起的极值判断不精确的问题。

采用无水乙醇和无水乙醚体积比为3:1的混合溶液对基片进行清洗,然后进行上夹抽真空,选择衬底温度为250℃,本底真空为 2.0×10^{-3} Pa。根据膜料的特性,工艺的重复性及膜层的监控精度,选定 HfO_2 的淀积速率为0.3 nm/s, SiO_2 的淀积速率为0.8 nm/s。使用射频离子源对基片清洗后,开始镀膜。

4 测试结果与分析

采用Lambda950分光光度计对试验片进行测试,测试光谱曲线如图4所示。

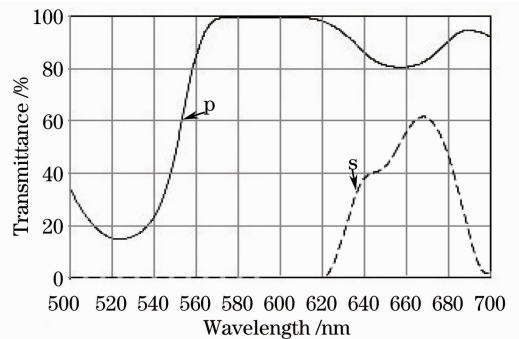


图4 偏振分光膜测试光谱曲线

Fig. 4 Measured transmittance curves of the polarization beam splitter

由图4可以看出,在 (589 ± 15) nm范围内p偏振光平均透射率99.88%,s偏振光平均透射率为0.19%,虽然满足设计要求,但与理论设计仍有差距。进行分析后发现,主要是由于实际镀膜过程中光量值与理论计算值有一定的误差,导致实际镀制膜层厚度无法与理论值完全相同,从而造成透射率降低。

5 环境测试

1) 抗激光测试:选用波长为1064 nm,脉冲宽度为10 ns的Nd:YAG激光器,采用1-on-1的方式进行激光损伤测试,测得激光损伤阈值约为 11.2 J/cm^2 ,满足激光导星系统的使用要求。

2) 膜层牢固度测试:采用高温胶带紧紧粘贴在膜层表面,并用垂直于薄膜表面的拉力迅速拉起,重复10次,薄膜表面未有脱膜现象。

3) 湿度测试:将基片在相对湿度为95%的环境下,放置24 h,膜层无明显的变化。

4) 高温测试:将偏振片放置在 200 °C 的高温中进行烘烤 2 h 后,膜层表面未出现明显的变化。

5) 水煮测试:将偏振分光片放置在去离子水中加热至沸腾 2 h 后,观察膜层表面未有脱膜现象。

6 结 论

采用电子束加热蒸发并结合离子辅助沉积技术制备偏振分光膜。为了保证制备的偏振分光膜具有高的消光比的同时有高抗激光损伤阈值,通过分析提高抗激光损伤阈值的有效途径,在膜系设计时建立新的膜系评价函数,通过理论计算优化出合适的膜系。研制的偏振分光膜在工作波段内 p 光平均透射率为 99.88%,s 光平均透射率为 0.19%,抗激光损伤阈值约为 11.2 J/cm²。

从测试曲线可以看出,研制的偏振分光膜虽符合要求,但在分光性能上还能有进一步的提高,如何提高偏振分光膜的分光效率是今后研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Guan Baozhu, Chen Haiqing, Cheng Penghui. The space-borne adaptive optical system based on laser guide star [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, 41(8): 20-23.
管保柱, 陈海清, 程鹏辉. 基于激光纳导星的星载自适应光学系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, 41(8): 20-23.

- 2 Ye Yidong, Yi Hengyu, Luo Zhongxiang, *et al.*. Efficiency of polarizing beam splitting scheme for Rayleigh laser guide star transmitted and received in common aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1301-1304.
叶一东, 易亨瑜, 雒仲祥, 等. 激光导星共孔径发射接收的偏振分光效率研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(10): 1301-1304.
- 3 Wang Qing, Wu Fuquan, Hao Dianzhong, *et al.*. Quarter periodic multilayer polarizing beam splitter based on equivalent layers theoretics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2159-2163.
王庆, 吴福全, 郝殿中, 等. 基于等效膜层理论的 1/4 规整膜系薄膜偏光分束镜[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2159-2163.
- 4 Nie Mingju, Liu Deming, Hu Bichun. Experiment and optimization design of thin film polarizing beam splitter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 899-901.
聂明局, 刘德明, 胡必春. 薄膜偏振分光镜的优化设计与实验[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(6): 899-901.
- 5 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 33-37, 167-170.
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 33-35, 167-170.
- 6 Sh A Furman, A V Tikhonravov. *Basics of Optics of Multilayer Systems* [M]. Paris: Editions Frontieres, 1992. 123-140.
- 7 Xu Junqi, Su Junhong, Hui Yingxue, *et al.*. Laser damage properties of 1064 nm anti-reflective films with different electric field distributions [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2012, 23(7): 1268-1273.
徐均琪, 苏俊宏, 惠迎雪, 等. 不同场强分布的 1064 nm 激光减反射膜损伤特性[J]. *光电子 • 激光*, 2012, 23(7): 1268-1273.
- 8 A V Tikhonravov, M K Trubetskov, G W DeBel. Optical coating design approaches based on the needle optimization technique [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(5): 704-710.

栏目编辑: 韩峰