

一种抑制二倍频半波孔现象的短波通设计方法

鲍刚华^{1,2} 焦宏飞^{1,2*} 程鑫彬^{1,2} 刘华松³ 王占山^{1,2}

¹ 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092
² 同济大学精密光学工程技术研究所, 上海 200092
³ 天津市薄膜光学重点实验室天津航技术物理研究所, 天津 300192

摘要 短波通滤色片是光学系统,尤其是激光系统中普遍使用的一种薄膜,它的基本结构为 $(0.5LH0.5L)^N$ 。但薄膜的非均质性会产生半波孔现象,从而影响滤色片的光学特性。利用导纳技术分析了折射率非均质性产生半波孔现象的原因:非均质性使常规膜系基本周期内导纳轨迹的终点偏离起点;这种偏离越大,半波孔现象就越严重。优化了常规膜系的基本周期结构,通过在高低折射率膜层之间引入导纳匹配层,使得改良后的基本周期导纳轨迹的终点与起点偏差大大减小,提高了半波处的透射率,从而提出了一种可以抑制由非均质性引起的半波孔现象的短波通设计方法,并依据实际制备工艺进行了误差分析。最终成功制备出了具有超宽透射带的短波通滤色片,实验和理论曲线具有很好的一致性。

关键词 薄膜;短波通滤色片;半波孔;导纳匹配;非均质性

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0831001

A New Approach to Eliminate Half-Wave Holes in Short-Wave Pass Filters with Layer Inhomogeneity

Bao Ganghua^{1,2} Jiao Hongfei^{1,2} Cheng Xinbin^{1,2} Liu Huasong³ Wang Zhanshan^{1,2}

¹ MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Shanghai 20092 China
² Institute of Precision Optical Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China
³ Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300192, China

Abstract Short-wave pass filter is an important optical component in high power laser systems which has the repetitive structure of $(0.5LH0.5L)^N$. But its optical property is significantly influenced by the half-wave hole due to layer inhomogeneity. Analysis by admittance theory shows the key reason for the presence of half-wave hole: the end point of the admittance locus of the periodic structure based on the quarter-wave stack doesn't return to the initial point again. The greater the deviation, the worse the half-wave hole. By inserting matching layers between high and low index materials, a new method is presented to eliminate half-wave hole. The new short-pass film is designed and successfully fabricated, which has a super wide and smooth region with low reflectance at around second harmonic. The experimental results consistent well with the theoretical performance.

Key words thin films; short-wave pass filter; half-wave hole; admittance matching; layer inhomogeneity

OCIS codes 310.1860; 310.6805; 240.0310

收稿日期: 2014-02-25; 收到修改稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61108036,61235011)、中央高校基本科研业务费专项资金(1370219171)、国家 863 计划

作者简介: 鲍刚华(1981—),男,博士研究生,主要从事抗激光损伤薄膜方面的研究。E-mail: 12bgh@tongji.edu.cn

导师简介: 王占山(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事极紫外软 X 射线和 X 射线光学与光学薄膜等方面的研究。

E-mail: wangzs@mail.tongji.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jiaohf@tongji.edu.cn

1 引言

短波通滤色片是强激光系统中普遍使用的一种光学元件^[1]。通常情况下,薄膜的初始结构是 $(0.5LH0.5L)^N$,它在基频具有良好的高反射率,在二倍频处具有良好的透射率^[2]。为了保持良好的抗激光损伤特性,通常采用电子束蒸镀 HfO_2 和 SiO_2 的方法来制备薄膜^[3-6]。但在此工艺条件下制备的 HfO_2 薄膜的折射率具有明显的非均质性^[7]。折射率的非均质性会导致短波通滤色片在二倍频的透射率显著降低,这就是所谓的半波孔现象^[8]。半波孔现象会严重降低薄膜的光学特性,从而影响使用效果。

半波孔现象引起了中外学者的关注。引起半波孔的因素可以分为两大类。1) 诸如厚度失配,周期性厚度误差积累和色散等^[8-9]。通过优化厚度监控方法或调整厚度比例,可以尽可能减小甚至消除其对二倍频处透射率的影响^[10-11]; 2) 专指折射率非均质性。众所周知折射率非均质性会影响薄膜的光谱,但却鲜有文章讨论如何消除其对半波孔的影响^[12-13]。

最近, Alex 等^[14]通过特殊的膜系设计解决了这一问题。这一设计的特殊之处在于将薄膜折射率的非均质性也作为优化计算的参数之一。常规薄膜设计软件往往针对的是折射率沿厚度方向均匀分布的薄膜,因而在设计和分析非均质性对倍频分束镜等短波通滤光片的影响时,便显得不够有效。在当前缺乏有效抑制手段的情况下,普遍采用了回避半波孔现象的办法来设计膜系^[15]。但这样做的后果不仅使半波附近的高透射带很窄,而且当薄膜元件的两种组成材料折射率差异较小时,根据薄膜理论,截止带的宽度会变窄,因而类似偏移厚度的方法可能不再适用。

本文利用导纳理论分析了非均质性导致常规膜系产生半波孔现象的原因,由此引入导纳匹配层法,提出了一种可以抑制由非均质性导致半波孔的薄膜设计方法。设计并制备出可消除半波孔的短波通滤色片。

2 非均质性产生半波孔现象的原因

2.1 基础理论

利用导纳理论分析非均质性对二倍频处导纳和透射率的影响。依照 Epstein^[16]的理论,设多层膜有 N 个周期,每个周期的特征矩阵为 M ,则

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 m_{11}, m_{22} 为实数, m_{12}, m_{21} 为虚数。

设 M 浸没在假想的透明介质 η 内,则透射系数

$$\tau = \frac{2\eta}{\eta(m_{11} + m_{22}) + \eta^2 m_{12} + m_{21}}, \quad (2)$$

令 $\tau = |\tau| \exp(i\phi)$, 则对 $1/\tau$ 有

$$\frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) + \frac{1}{2}\left(\eta m_{12} + \frac{1}{\eta} m_{21}\right) = \frac{\cos \phi - i \sin \phi}{|\tau|}, \quad (3)$$

比较两边的实数部分,有

$$\frac{1}{2}(m_{11} + m_{22}) = \frac{\cos \phi}{|\tau|}. \quad (4)$$

若忽略薄膜界面间的多次反射,同时膜堆为半波长之整数倍,则 ϕ 相当于总的相位厚度 $\phi = l\pi$, $\cos \phi = \pm 1$ 。

于是,

当 $|\tau| < 1$ 时, $\frac{1}{2}|m_{11} + m_{22}| > 1$, 为高反射区。

当 $|\tau| = 1$ 时, $\frac{1}{2}|m_{11} + m_{22}| < 1$, 为高透射区。

由上可知,要想得到高反射,必须满足

$$|\tau| < 1 \text{ and } \phi = l\pi, \quad (5)$$

要想得到高透射,必须满足

$$|\tau| = 1 \text{ and } \phi = l\pi. \quad (6)$$

2.2 非均质性对常规膜堆导纳的影响

对于常规基本周期结构 $0.5LH0.5L$, 理想情况下,即薄膜折射率不随厚度变化时,在二倍频的导纳曲线是一封闭的整圆,相当于虚设层。假定此周期浸没在透明玻璃中,显然,此周期满足高透射的条件

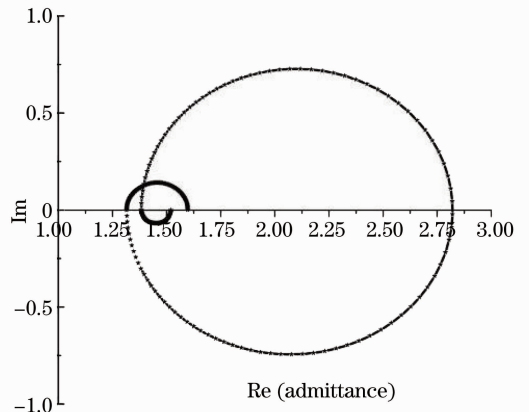


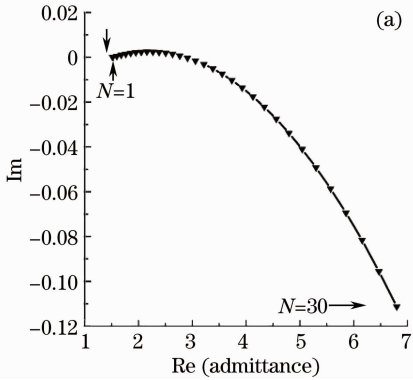
图1 常规结构 $0.5LH0.5L$ 在半波处的导纳轨迹,其中 H 非均质性 5% , 基板为 BK7 玻璃

Fig. 1 Admittance locus at half-wave of classic structure $0.5LH0.5L$, where the inhomogeneity of H is 5% and the substrate is BK7

(6)式。当薄膜有非均质性时,情况就会比较复杂。为了讨论的方便,仍然假定薄膜浸没在透明的玻璃中, L 为均匀膜,折射率 1.46。 H 具有折射率非均质性。假定 H 薄膜靠近基板的折射率为 n_i ,随着薄膜生长,折射率随着厚度呈线性变化为 n_o ,此时,表征非均质性的公式为^[7]

$$\frac{n_o - n_i}{(n_o + n_i)/2}, \quad (7)$$

本文假定 H 的平均折射率为 1.95,随厚度增加呈线性减少,非均质性为 -5% 。此时 H 在二倍频处的导纳不再是一个封闭的圆,如图 1 所示。相对起点,此层不再是虚设层,从而破坏了原有的导纳匹配,使得 $|\tau| < 1$;随着周期 N 的增加,导纳终点距离起点位置越来越远,如图 2(a)所示;导纳的起点为



(1.52, 0),当周期 $N=1$ 时,导纳的终点为(1.598, 0.000531),当周期 $N=30$ 时,导纳的终点为(6.802, -0.111),距离起点明显变远了。图 2(b)给出了透射率随周期 N 变化的情况,当 $N=1$ 时,透射率为 99.94% ,当 $N=30$ 时,透射率为 59.7% ,透射率明显降低,产生了所谓的半波孔。这意味着,随着周期数增加,常规膜堆的导纳偏离初始导纳越来越大,对膜堆和周围介质的导纳匹配的破坏也越来越严重,最终导致半波位置的透射率不断降低,产生半波孔。

由上可知,非均质性越严重,或周期数越多,半波孔现象就越严重。对于常规的薄膜设计软件,其前提是薄膜折射率是均匀的,因而无法通过软件优化计算来得到抑制半波孔产生的膜系设计。

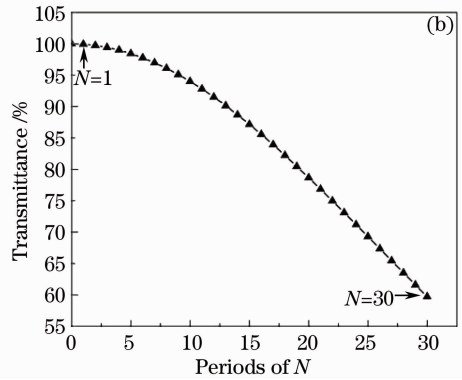


图 2 H 非均质性为 -5% 。(a)常规结构 $(0.5LH0.5)^N$ 的导纳终点周期 N 的变化;(b)半波处透射率随周期 N 的变化
Fig.2 Inhomogeneity of H is -5% . (a) Admittance of classic structure $(0.5LH0.5)^N$; (b) transmittance at half-wave

3 抑制半波孔的设计方法

3.1 改进后的周期结构

根据上文讨论的由非均质性引起的半波孔现象的原因,对于一个具有确定非均质性的薄膜,如果能够给出这么一个结构:使得在一个基本周期结构中,导纳的起点与终点能够闭合,同时又满足(1)式中提到的高反条件,就可以抑制由非均质性引起的半波孔。

假定 H 浸没在透明的 L 介质中,则如果在 H 与 L 接触的两个界面分别增加一个导纳匹配层,那么整个基本周期的导纳等效于具有一定光学厚度的 L 。显然,此结构的导纳轨迹是封闭的。

此结构可以简单表述为: $aL(AR1)H(AR2)cL$,其中 $AR1$ 为其中 L/H 薄膜界面(即 L 层在 H 层开始生长的界面)的增透膜, $AR2$ 为 H/L 薄膜界面(即 H 层在 L 层开始生长的界面)的增透膜; H 、 L 分别代表高低折射率材料在基频波长的四分之一光

学厚度, a 、 c 为四分之一光学厚度的倍数;基本周期的总厚度为基频的半波光学厚度。考虑到 H 具有非均质性,即膜层的两个表面具有不同的折射率,因此不同界面之间应该有不同的匹配层。

假定 L 的折射率为 1.45, H 的平均折射率为 1.95,非均质性为 -5% 。导纳匹配层可以有多种方式可以给出。比如选择单层膜,则折射率 $n = \sqrt{n_L * n_H}$ 。显然,能满足此折射率条件的单层膜材料并不容易找到。因此,导纳匹配层可以考虑选择两层膜,为制备方便,膜料仍然使用 H 和 L ,则 $AR1$ 为 $0.179795H0.156962L$, $AR2$ 为 $0.172378L0.149613H$ 。为了保证 H 折射率的准确性, H 的厚度依然为 1;为了满足基频高反的条件,基本周期的光学厚度须为 2,所以基本周期结构变为: $0.163244L0.179795H0.156962LH0.172378L0.149613H0.178009L$ 。

假定薄膜浸没在透明的玻璃中。此时单一周期的导纳起点为(1.52, 0),终点为(1.52, -0.0043),相比传统结构,导纳终点与起点的距离大大减小了,

考虑到计算结果的有效位数,可以近似认为轨迹是封闭的,如图 3 所示。从图 4(a)可以看出,随着周期的增加,当 N 从 1 增加到 30 时,导纳的终点由 $(1.52, -0.00429)$ 变到了 $(1.47, -0.125)$,导纳的终点距离起点的偏差也在逐步加大。透射率也由 $N=1$ 时的 99.999% 降到了 $N=30$ 时的 99.795%,如图 4(b) 所示。可以看出,随着周期增加,导纳终点距离起点的偏差,或者透射率的降低依然存在,但是相比前面讨论的传统膜系,都要小的多。

再依据等效层理论,在膜堆两侧添加与基板和空气的匹配层,就可以得到理想的倍频分束薄膜^[2]。

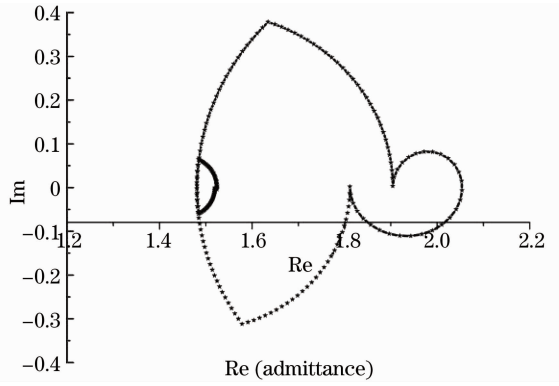


图 3 改善后的薄膜结构在半波处的导纳。其中 H 的非均质性为 -5%

Fig. 3 Admittance locus of modified structure, where the inhomogeneity of H is -5%

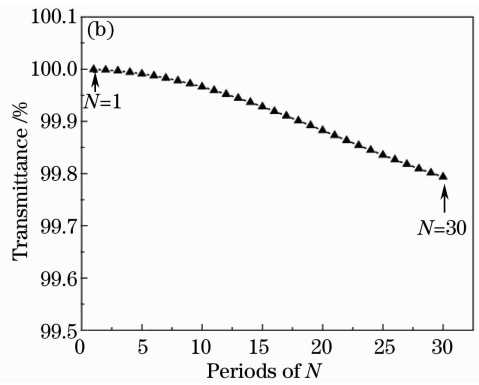
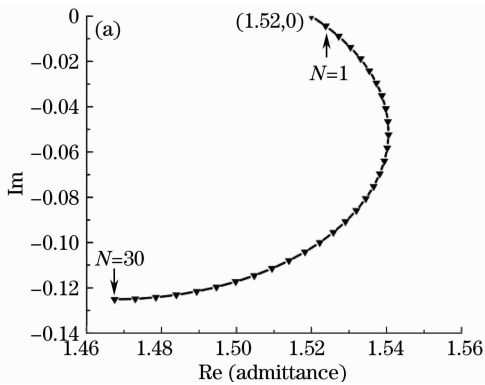


图 4 随着 N 增加,改进后的膜堆导纳(a)和透射率(b)在半波处的变化。H 的非均质性为 -5%

Fig. 4 Admittance of modified structure (a) and transmittance (b) at half-wave, where the inhomogeneity of H is -5%

3.2 薄膜误差分析

在前面分析的基础上,取 17 个周期: $(0.163244L$ $0.179795H$ $0.156962L$ H $0.172378L$ $0.149613H$ $0.178009L)$ ¹⁷ 作为初始结构。此时在中心波长处的反射率可以达到 99.5% 以上。考虑到在前面的计算

中,薄膜浸没在玻璃中,因此,只需要添加薄膜与空气的导纳匹配层,即可在半波处得到理想的透射率,最终的光谱如图 5 所示。点圆线为考虑非均质性后得到的最终光谱。可以看到,改进后的设计具有理想的超宽透射带,带宽不小于: $\lambda_0/1.3 \sim \lambda_0/2.4$;在整

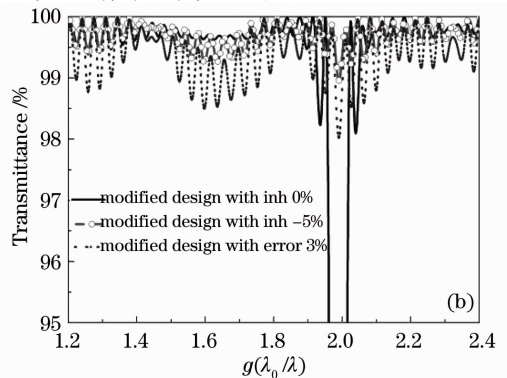
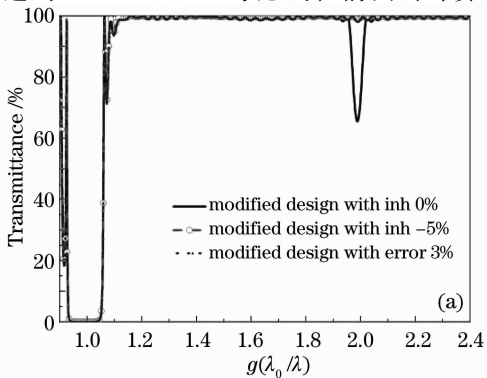
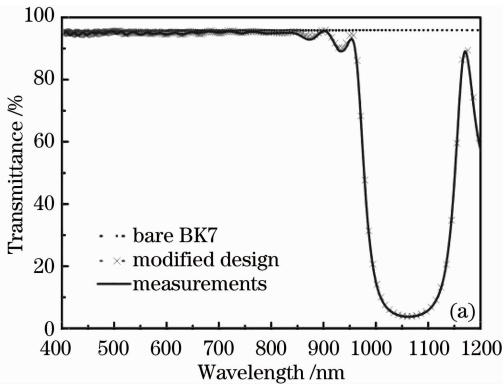


图 5 改进后的设计分别在全波段(a)和透射带的光谱(b)。实线为不考虑非均质性的情况,点圆线非均质性为 -5% 的情况,点线为考虑非均质性和误差 3% 后的情况

Fig. 5 Spectra of modified design in the whole band (a) and the anti-reflectance band (b), the solid line representing homogeneous film, the circle line representing film with inhomogeneity of -5% and the dot line representing film with inhomogeneity of -5% and thickness error of 3%

个透射带的透射率不小于 99%，由非均质性引起的半波孔几乎可以忽略。实线为改进后的设计在不考虑非均质性情况下的光谱，可以看到半波孔现象非常严重，这主要是因为此种优化设计主要是用导纳匹配层的添加来弥补薄膜非均质性所引起的导纳失配效应，因此在不考虑非均质性的情况下，导纳匹配的作用将失效。此现象也同时意味着：对于这种设计方法来讲，必须准确给出薄膜折射率的非均质性，否则由非均质性引起的半波孔会再次出现。

对于这样的设计，不可回避的一个问题是：膜层结构中会包含很多薄层，且总的膜层数也会比较多。但是由于此设计思路是从促使每个膜堆周期单元的导纳轨迹圆回到起始点作为出发点，因此此种设计方法可以有效减小个体膜层厚度的误差对膜系整体光谱性能的影响。图 5 中光谱所对应的膜层设计为 115 层，在实际的薄膜制备中，膜层厚度的误差通常情况下小于 2%，为了验证此设计的可行性，文中取膜层厚度的误差为 3%，图 5 中点线为膜层厚度随机误差为 3% 时的计算曲线。从图中可以发现厚度随机误差主要影响透射带光谱的高低，不改变波纹



峰谷的数目。当随机误差不超过 3% 时，透射带的透射率都在 98% 以上，符合大部分情况下的使用要求。对于这样的容差，使用监控精度不高的晶振控制即可实现。

4 实验结果与讨论

在上述的讨论中都假定薄膜的光学常数与波长不相关，为了进一步验证这个方法的可行性，按照上述方法设计了膜系，初始膜系结构为：(0.517L 0.173H 0.160L H 0.170L 0.154H 0.176L)¹¹ 中心波长为 1064 nm。前文的误差分析表明厚度误差量级小于 10^{-2} 时，并不影响最终的光谱特性。考虑到厚度控制的精度限制，实际光学厚度的数值都只取到小数点后三位有效数字。H 和 L 分别为 HfO_2 和 SiO_2 在 532 nm 处的折射率，分别是 1.959 和 1.462； HfO_2 的折射率非均质性为 -3%。图 6 中的叉线是最终设计的光谱。为了制备方便，这里只采用了 11 个周期。

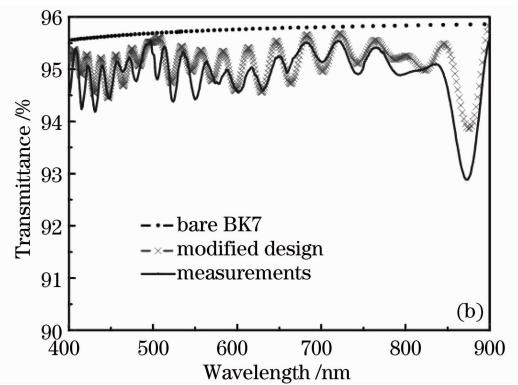


图 6 (a) 实验中的膜系设计(叉线)、实验曲线(实线)以及裸基板 BK7(点线)的透射率光谱, (b) 为透射带光谱

Fig. 6 (a) Transmittance of design in the experiment (cross line), measurements (solid line) and bare BK7 (dot line); the anti-reflectance band is zoomed in (b)

在 Optorun 机器上采用电子束法在 BK7 基板上对得到的膜系进行了制备。为保证每层 HfO_2 薄膜折射率非均质性的稳定性，实验中通过控制氧气流量而非真空度的方式来控制氧分压。为验证此膜系制备的易操作性，实验中使用晶振控制薄膜的厚度。图 6 中的实线为实验曲线。高反带位于 1064 nm 附近，1064 nm 处的透射率小于 3.9%。显然，理论和实验曲线吻合的很好。透射带从 400 nm 一直延伸到 800 nm；虚线为 BK7 裸基板的透射率曲线，由此可以推算出透射率都在 98.7% 以上。对比透射带的理论和实验曲线，发现波纹数目一致，没有明显的半

波孔，对应的峰谷值差异在 1% 以内，考虑到仪器测量的误差等因素，理论模拟显示随机误差不超过 1.5%。

5 结 论

利用导纳理论分析了薄膜的非均质性对半波孔现象的影响，发现随着周期数增加，或非均质性变大，都会加大半波孔现象。通过分析，提出了一种改进的薄膜设计方案：在基本周期的相邻膜层之间增加导纳匹配层，使基本周期的导纳轨迹尽可能成为一个封闭的曲线。增加匹配层时需要考虑材料的非

均质性。

采用电子束热蒸镀的方法,成功制备出消除了半波孔现象的短波通滤色片,而且具有超宽的平滑透射带。理论和实验曲线吻合的很好,表明了这种方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Xinbin Cheng, Zhengxiang Shen, Hongfei Jiao, *et al.*. Laser damage resistance of dichroic mirrors at 532 nm and 1064 nm [C]. SPIE, 2010, 7842: 78420C.
- 2 Andreea Dinca, Mihai Eugen Trifan, Voicu Lupei, *et al.*. Dichroic mirror design by complete admittance matching [J]. Opt Eng, 1996, 35(5): 1284–1287.
- 3 Xinbin Cheng, Jinlong Zhang, Tao Ding, *et al.*. The effect of an electric field on the thermomechanical damage of nodular defects in dielectric multilayer coatings irradiated by nanosecond laser pulses [J]. Light: Science & Applications, 2013, 2(6): e80.
- 4 Robert Chow, Steve Falabella, Gary E Loomis, *et al.*. Reactive evaporation of low-defect density hafnia [J]. Appl Opt, 1993, 32(8): 5567–5574.
- 5 Yang Lihong, Wang Tao, Su Junhong, *et al.*. Influence of laser conditioning on the damage properties of HfO₂ thin film [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1231001.
杨利红, 王涛, 苏俊宏, 等. 激光预处理对 HfO₂ 薄膜损伤特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1231001.
- 6 Shao Shuying, Tian Guanglei, Fan Zhengxiu, *et al.*. Influences of the deposition parameters and aging time on the residual stress of SiO₂ films [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(1): 126–130.
邵淑英, 田光磊, 范正修, 等. 沉积参量及时效时间对 SiO₂ 薄膜残余应力的影响[J]. 光学学报, 2005, 25(1): 126–130.
- 7 J P Borgogno, B Lazarides, E Pelletier. Automatic determination of the optical constants of inhomogeneous thin films [J]. Appl Opt, 1982, 21(22): 4020–4029.
- 8 H A Macleod. Half wave holes, leaks and other problems in proceedings of the 39th annual technical conference of the society of vacuum coaters [C]. Society of Vacuum Coaters, 1996. 193–198.
- 9 Han Jin, ZhangJinlong, Cheng Xinbin, *et al.*. Analysis of the half-wave hole for symmetricalharmonic beam splitter based on equivalent layer theoretics [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 32(1): 0131001.
韩金, 张锦龙, 程鑫彬, 等. 基于等效层法分析对称性倍频分束镜的半波孔[J]. 光学学报, 2011, 32(1): 0131001.
- 10 Xiao Fengma, Yingjian Wang, Jianda Shao, *et al.*. Elimination of the half-wave hole for short-wave pass filter [C]. SPIE, 2004, 5774: 377–380.
- 11 Xue Jianjun, Zhu Jianhua, Jiang Maoqing, *et al.*. Study on the half-wave hole phenomenon of short-wave pass filtercaused by film infiltration [J]. J Light Scattering, 2008, 20(4): 319–323.
薛建军, 朱建华, 蒋茂清, 等. 膜层渗透产生短波通截止滤光片半波孔现象的分析[J]. 光散射学报, 2008, 20(4): 319–323.
- 12 Roland Jacobsson. Review of the optical properties of inhomogeneous thin films [C]. SPIE, 1993, 2046: 2–8.
- 13 A V Tikhonravov, M K Trubetskov, B T Sullivan, *et al.*. Influence of small inhomogeneities on the spectral characteristics of single thin films [J]. Appl Opt, 1997, 36(28): 7188–7198.
- 14 A V Tikhonravov, M K Trubetskov. Design of optical coatings taking into account thin film inhomogeneity [C]. Optical Interference Coatings Optical Society of America, 2013. TD. 6.
- 15 H Niederwald, P Greve, R Eichinger. Dielectric coatings for diode pumped solid state laser devices [C]. SPIE, 1990, 1125: 76–84.
- 16 L I Epstein. Improvements in heat-reflecting filters [J]. J Opt Soc Am, 1955, 45(5): 360–362.

栏目编辑: 张浩佳