

光学薄膜特性的锥角效应数值分析

刘华松 王利栓 刘丹丹 姜承慧 姜玉刚 孙 鹏 季一勤

(天津航技术物理研究所,天津市薄膜光学重点实验室,天津 300192)

摘要 建立非平行光入射多层膜的模型,给出了在圆形光束锥角入射时的薄膜特性表达式,对三类典型光学薄膜即多腔滤光片、非偏振分光薄膜和非偏振截止滤光薄膜的特性进行了数值实验。研究表明:随着光束入射锥角的增加,多腔滤光片的影响是中心波长向短波方向移动,透射率下降和通带形状退化;非偏振分光薄膜的 s 和 p 偏振透射率增加,宽带波纹度增加;非偏振截止滤光薄膜的通带透射率出现周期振荡,s 偏振的通带波纹度大于 p 偏振,通带波纹度总体具有增加的趋势,过渡区的陡度具有变大的趋势。

关键词 薄膜;入射光锥角;透射率;锥角效应

中图分类号 O484.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0131003

Numerical Analysis of Cone Angle Effect of Optical Thin Films Characteristics

Liu Huasong Wang Lishuan Liu Dandan Jiang Chenghui Jiang Yugang
Sun Peng Ji Yiqin

(Tianjin Key Laboratory of Optical Thin Film, Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics,
Tianjin 300192, China)

Abstract Model of non-parallel light incident multilayer is established. Expressions of film characteristics are given for the case that the incident light beam has a circular cone angle. Numerical experiments are done on the properties of three kinds of typical optical thin films such as multi-cavity filter, non-polarization beam splitter and non-polarization cutoff filter. The results show that as the cone angle of incident light increases, the center wavelength moves to short-wave for the multi-cavity filter, and the transmittance and pass band get worse. The transmittance and waviness increase for both of s and p polarization in non-polarization beam splitter. For non-polarization cutoff filter, the transmittance in pass band shows periodic oscillation, the waviness of s polarization is larger than that of p polarization. There is an increasing trend overall for waviness, in addition the gradient of the transition region is growing.

Key words thin films; cone angle of incident light; transmittance; cone angle effect

OCIS codes 310.4925; 310.6188; 310.6860

1 引 言

在现代光学系统的发展中,光学薄膜是解决系统光能量损失和杂散光抑制的关键元件。由于光学系统的功能和系统结构不同,光束一般为非理想平行光束,而光学薄膜的设计则是基于平行光的理想光束进行设计。因此,在光学系统中当光束以一定

的锥角入射到光学薄膜元件表面时,薄膜在非理想设计条件下工作,其性能就会发生变化甚至失效^[1-2]。另外,对光学薄膜特性的检测一般采用分光光度计和光谱仪,而这些检测仪器的光学系统结构各不相同,测试光束也是非理想平行光束,典型的光度计和光谱仪的测试光束 $f^\#$ 一般为 4~10,对应

收稿日期: 2013-07-15; **收到修改稿日期**: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235011)、国家重大科学仪器专项子项目(2012YQ04016405)、天津市自然科学基金(12JJCQN1001200)、天津市自然科学基金(13JCYBJC17300)

作者简介: 刘华松(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事光学薄膜的设计、制备与测试技术等方面的研究。

E-mail: liuhuasong@hotmail.com

的入射光束半锥角为 $7.12^\circ \sim 2.86^\circ$ ^[3], 在精确测量薄膜样品的光学特性时存在一定的误差^[4-5]。本文建立了圆形光束锥角入射薄膜样品的物理模型, 通过数值实验研究了典型的三类光学薄膜锥角效应, 获得了锥角对光学薄膜特性的影响, 对于这类薄膜的测试及其在光学系统中的应用具有指导意义。

2 基本理论

假设入射光束为圆形光束, 入射光以半锥角 θ 旋转对称, 下面将以 θ 讨论光束入射的锥角效应。当光束以一定的锥角入射到薄膜样品表面时, 光束呈现聚焦和发散两种状态, 图 1 和图 2 分别给出了垂直入射和倾斜入射时的锥形光束的示意图。

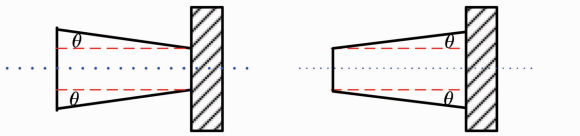


图 1 正入射光束锥角

Fig. 1 Cone angle of normal incident beam

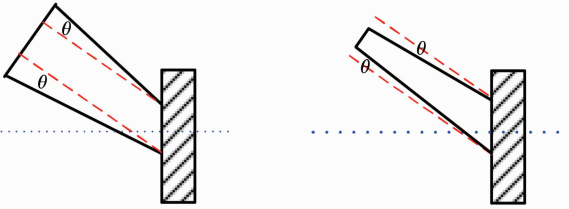


图 2 斜入射光束锥角

Fig. 2 Cone angle of abnormal incident beam

描述光束入射也可以采用 $f^\#$, 光束起点到样品表面距离为 d , 光束在起点的光束口径为 φ_1 , 入射到样品表面的光束口径为 φ_2 , 光束入射到样品表面为 θ_0 时, $f^\#$ 定义为

$$f^\# = \left| \frac{d}{(\varphi_1 - \varphi_2 \cos \theta_0)} \right|. \quad (1)$$

则入射光锥最大的锥角 θ_{\max} 表达为

$$\theta_{\max} = \arctan \left| \frac{(\varphi_1 - \varphi_2 \cos \theta_0)}{2d} \right| = \arctan \left(\frac{1}{2f^\#} \right). \quad (2)$$

将锥形光束的能量按照光线入射角度分配, 假设光束能量在锥角 $2\theta_{\max}$ 内的能量分布为 $C(\theta)$, 则锥形光束以 θ_0 角度入射到薄膜样品上的在全光束锥角内的分光特性可表达为

$$F(\lambda) = \frac{1}{2\theta_{\max}} \int_{\theta_0 - \theta_{\max}}^{\theta_0 + \theta_{\max}} C(\theta) f(\lambda, \theta) d\theta, \quad (3)$$

式中 θ_0 为入射角, θ_{\max} 为半锥角, $f(\lambda, \theta)$ 为薄膜样品

的透射率或反射率。

假设在基底表面上的多层膜共有 K 层, 入射介质导纳为 η_0 , 基底导纳为 η_{K+1} , 第 j 层薄膜的导纳为 η_j , 则薄膜-基底系统的特征矩阵如下^[6]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \frac{\sin \delta_j}{\eta_j} \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

入射角为 θ_0 时, 在 s 和 p 偏振下, η_j 分别为

$$\eta_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j, & \text{p-polarization} \\ n_j \cos \theta_j, & \text{s-polarization} \end{cases}, \quad (5)$$

其中 n_j 为第 j 层薄膜的折射率; θ_j 为第 j 层薄膜的折射角, 可由菲涅耳定律确定。

第 j 层薄膜的相位厚度 δ_j 为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j, \quad (6)$$

式中 d_j 为第 j 层薄膜的物理厚度。

由(4)式可以得到多层膜和基板的组合导纳 $Y=C/B$, 因此可以获得薄膜样品的反射率 R 和透射率 T 分别为

$$R(\theta, \lambda) = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*, \quad (7)$$

$$T(\theta, \lambda) = \frac{4\text{Re}(\eta_0 \eta_{K+1})}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}. \quad (8)$$

在研究中讨论透射率光谱, 选择 $f(\lambda, \theta) = T(\lambda, \theta)$, 并且假设光束在锥角内的能量均布, 即 $C(\theta) = 1$ 。

3 数值分析

3.1 多腔滤光片

利用光学薄膜技术制备滤光片是目前常用的光学频段滤波方法之一, 法布里-珀罗干涉结构是干涉带通滤光片的基本结构^[7]。对于应用在密集型波分复用(DWDM)光纤通信系统中的窄带滤光片, 为了实现矩形窄带通、高截止的滤光性能, 一般采用全介质结构的多腔法布里-珀罗干涉结构, 并且制备过程必须选择膜层厚度控制精度较高的镀膜设备^[8]。选择一个 200 GHz 的滤光片结构进行数值模拟实验, 膜系采用多层膜结构^[9]: Glass | (HL)⁻⁷ 2H (LH)⁻¹⁵ 4H (HL)⁻¹⁵ 10H (LH)⁻¹⁵ 4H (HL)⁻¹⁵ 2H (LH)⁻⁷ 1.635H 0.760L | Air, H 和 L 分别为 Ta₂O₅ 和 SiO₂。法布里-珀罗滤光片共为三个, 膜系设计角度为正入射, 在设计波长 1550 nm 的透射率为 99.81%。不同锥角下薄膜的透射率与中心波长变化分别如图 3 和图 4 所示。随着入射光锥角的增加, 薄膜中心波长向短波方向移动, 透射带的透射率

从大变小,透射带形状由矩形逐渐退化为三角形,在1550 nm处透射率从99.81%下降到49.05%。由此可见,窄带滤光片的锥角效应包含了中心波长向短波方向移位、透射率下降和通带变形。

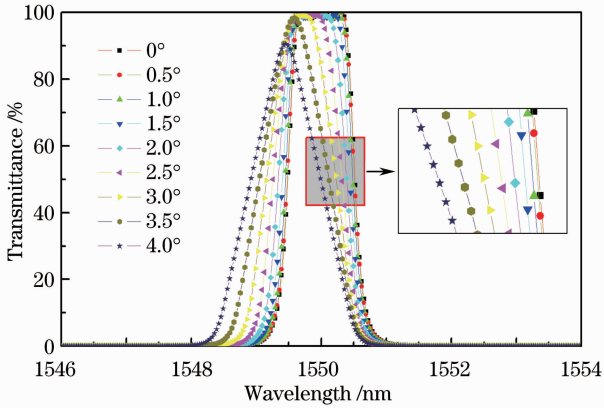


图3 透射率光谱的锥角效应

Fig. 3 Cone angle effect of transmission spectrum

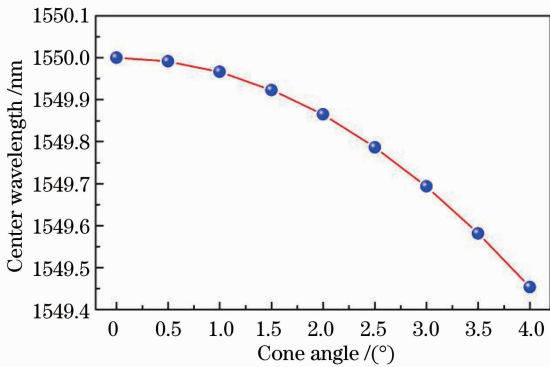


图4 中心波长变化的锥角效应

Fig. 4 Cone angle effect of center wavelength

3.2 非偏振分光薄膜

当入射光具有一定角度时,光学薄膜表现出强烈的偏振效应,s和p分量的反射率(透射率)曲线偏振分离明显加大,这种现象在大部分应用场合会使系统的光学性能发生劣变^[10]。非偏振分光薄膜设计在玻璃基底上,入射角度为45°,工作波长为525~580 nm,薄膜材料为MgF₂(L)、Al₂O₃(M)和TiO₂(H),膜系选自Macleod software^[11]: Glass | 0.3869L 2.205H 0.3382M 0.8101L 0.1396M 0.1713L 0.9773M 3.9601H 0.1814L 0.2495H 0.9203L 0.3894M 0.6861H 0.3715L 0.6025H 1.2951M 1.1036H 1.2375M 1.5819L 1.4112M 1.1264H 1.2497M 1.5917L 1.336M 1.1359H 1.2747M 1.5894L 1.2921M 0.8422H 0.1722L 0.1819H 1.3344M 1.2424H 0.7835M 2.7617H 0.2724L 2.0701H | Air.

图5和图6给出了在不同入射光锥角下的透射率变化情况。随着入射光锥角的增加,s和p偏振光透射率均呈上升趋势;对于s偏振光,锥角对长波长的影响较大,对于p偏振光锥角的影响相反;在580 nm处s偏振光的透射率增加8.95%,p偏振光透射率则增加6.18%。

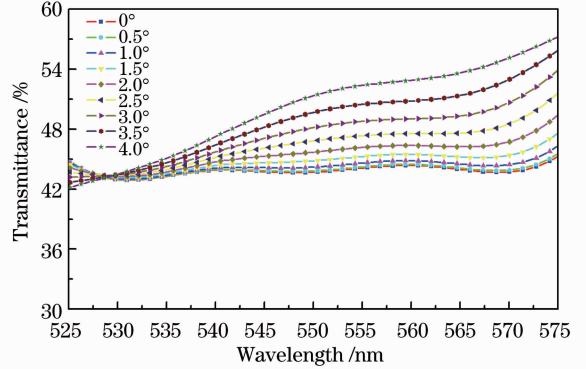


图5 非偏振分光薄膜光谱的锥角效应(s偏振)

Fig. 5 Cone angle effect of non-polarization beam splitter spectrum (s polarization)

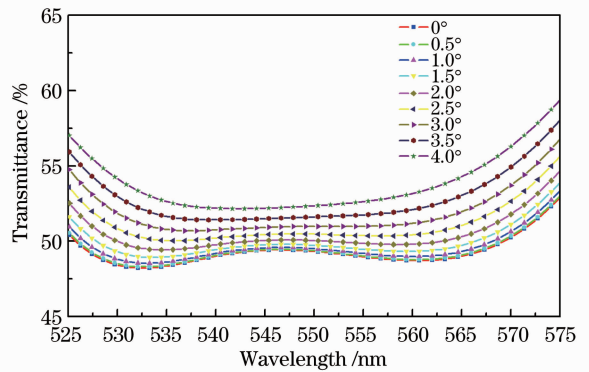


图6 非偏振分光薄膜光谱的锥角效应(p偏振)

Fig. 6 Cone angle effect of non-polarization beam splitter spectrum (p polarization)

非偏振分光薄膜的偏振度和宽带光谱的波纹度计算结果如图7和图8所示。随着入射锥角的增加,偏振度呈下降趋势,说明s和p偏振的透射率逐渐接近,并且偏振度的变化速率逐渐增加,偏振度下降幅度最大为50%。对于525~580 nm的宽光谱来讲,两个偏振的波纹度随着锥角的增加都有增加的趋势,s偏振的波纹度变化要大于p偏振的波纹度;与平行光入射时相比,随着锥角的变化s和p偏振的光谱波纹度可增加8.62%和1.05%。通过上述分析可知,锥角对非偏振分光薄膜的影响主要是透射率、偏振度和宽光谱的波纹度,入射光束锥角会导致透射率和波纹度变差,反而使偏振度得到改善。

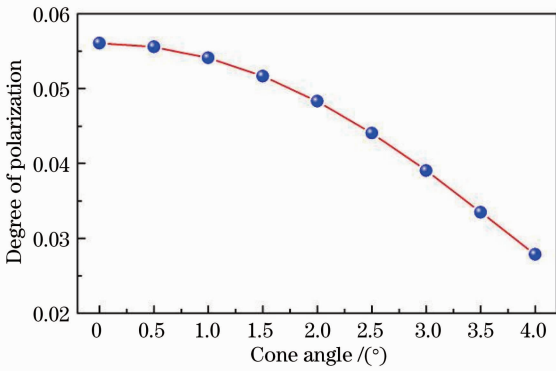


图 7 非偏振分光薄膜光谱的偏振度锥角效应
Fig. 7 Cone angle effect of polarization degree of non-polarization beam splitter spectrum

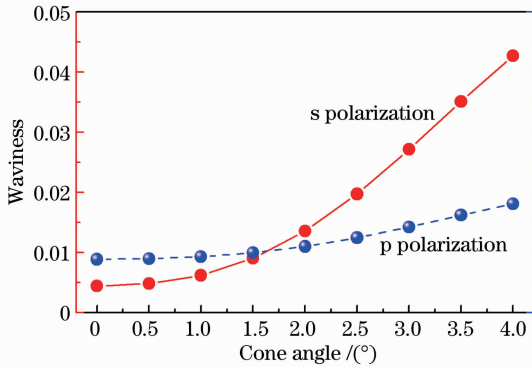


图 8 宽带非偏振分光薄膜的波纹度锥角效应
Fig. 8 Cone angle effect of waviness of broadband non-polarization beam splitter spectrum

3.3 非偏振截止滤光薄膜

在液晶投影显示系统中,为了提高光源的利用率和色彩还原的真实性,平板分色系统中非偏振截止滤光薄膜必须尽可能高的通带透射率和较低的波纹度^[12]。非偏振截止滤光薄膜设计在玻璃基底上,设计通带为 500~690 nm,截止波长为 700~750 nm,入射角度为 45°,薄膜材料为 TiO₂(H)和 SiO₂(L),膜系选自 Macleod software^[11]: Glass | 0. 1128H1. 9371L 0. 3228H 0. 1703L 0. 8215H 0. 7582L 0. 1601H 0. 6000L 1. 1128H 0. 5117L (0. 3136H 0. 6262L 0. 7H 0. 6262L) ~ 25 0. 3136H 0. 4793L 1. 0688H 0. 3859L 0. 0916H 1. 1166L 1. 7911H 0. 3656L 0. 5109H 0. 9262L 0. 0820H | Air。图 9 和图 10 给出了在不同入射光锥角下非偏振截止滤光薄膜的通带和截止带透射率变化情况。在通带光谱中,随着入射光锥角的增加,s 偏振光的透射率光谱的变化比 p 偏振光显著,两个偏振光的透射率光谱出现波纹,在理想设计透射率光谱附近振荡,并且在波长方向上具有一定的周期性,即仍有一些波长点的透射率不受光锥角的影响;在截止

带内,锥角的影响不明显,但是在通带与截止带的过渡区内存在明显的变化,存在一个透射率不变的波长点(有效截止区和有效通带区的界限波长),在此波长的左侧(短波方向),透射率随着入射光锥角的增加而减小,在此波长的右侧(长波方向),透射率随着入射光锥角的增加而增加。

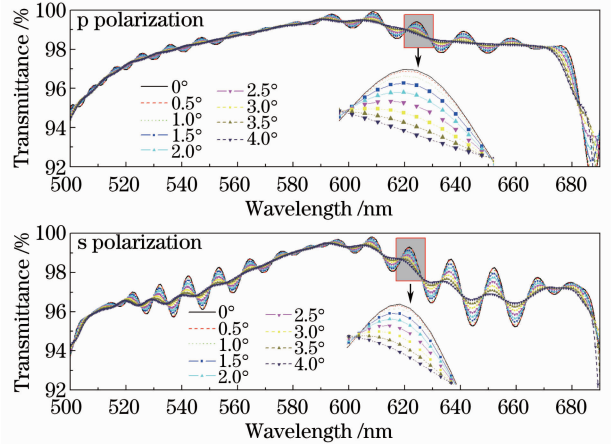


图 9 非偏振截止滤光薄膜通带光谱的锥角效应
Fig. 9 Cone angle effect of pass band spectrum of non-polarization cutoff filter

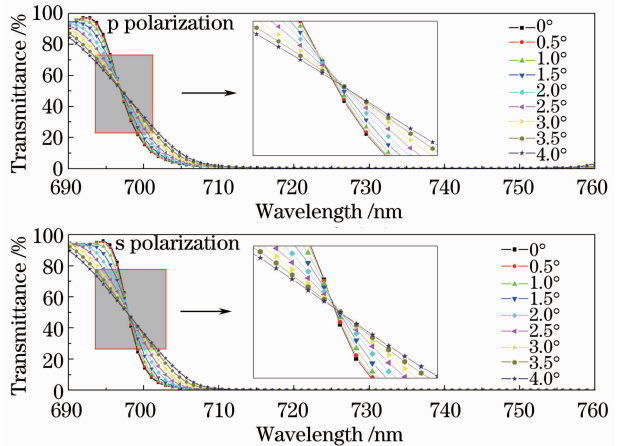


图 10 非偏振截止滤光薄膜截止带光谱的锥角效应
Fig. 10 Cone angle effect of stop band spectrum of non-polarization cutoff filter

非偏振截止滤光薄膜的波纹度和陡度与入射光锥角的关系如图 11 和图 12 所示。随着入射光锥角的增加,s 偏振光和 p 偏振光的平均波纹度先逐渐减小而后增大,s 偏振光在入射锥角为 3.0°时波纹度最小,p 偏振光在入射锥角为 2.5°时波纹度最小。在过渡区内的陡度随着入射光锥角的增加而增加,并且 s 偏振光的透射率陡度大于 p 偏振光。因此,入射光锥角对非偏振滤光薄膜的波纹度、陡度和通带的透射率影响显著,总体来说有效控制入射光束

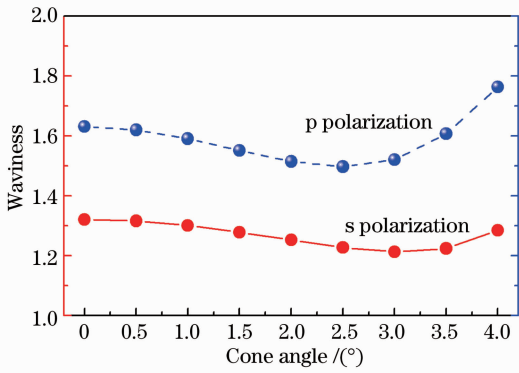


图 11 非偏振截止滤光薄膜的波纹度锥角效应

Fig. 11 Cone angle effect of waviness of non-polarization cutoff filter

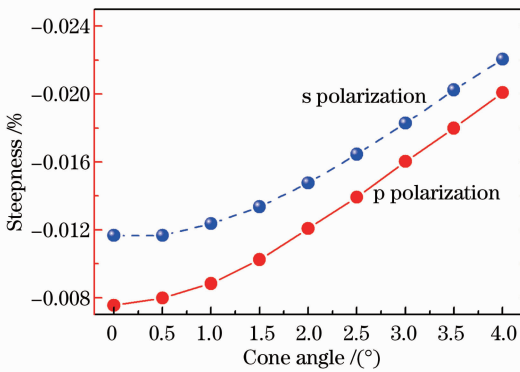


图 12 非偏振截止滤光薄膜的陡度锥角效应

Fig. 12 Cone angle effect of gradient of non-polarization cutoff filter

的锥角,可以避免对上述关键性能的影响。

4 结 论

通过应用光锥角入射多层膜的物理模型,利用数值实验研究了入射光锥角对多腔滤光薄膜、非偏振分光薄膜和非偏振截止滤光薄膜性能的影响。随着入射光锥角的增加,多腔滤光薄膜的中心波长向短波移位,设计波长光谱透射率下降,并且矩形通带退化成三角形;非偏振分光薄膜的 s 偏振和 p 偏振透射率增加,宽带波纹度增加但偏振度下降;非偏振滤光薄膜的通带透射率出现周期性波动,通带波纹度总体下降,并且过渡区的陡度具有增加的趋势。通过对三类薄膜的入射光锥角效应的研究,给出了这些薄膜的应用和性能测试评价的关键点。

参 考 文 献

- 1 Yang Ligong, Gu Peifu. Effect of broad conic angle incidence on color reproducibility of dichroic filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(6): 724–728.
杨立功, 顾培夫. 宽锥角光束对分色合色膜色再现性能的影响 [J]. *光学学报*, 2003, 23(6): 724–728.
- 2 Qian Qiuming, Li Qingxiong, Wang Nenghe, *et al.*. Analysis of the reflection wave of cone beam from a multilayer thin film [J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, 6(7): 644–649.
钱秋明, 李庆熊, 王能鹤, 等. 锥形光入射到多层介质膜上的反射波分析 [J]. *光学学报*, 1986, 6(7): 644–649.
- 3 J D Rancourt. *Optical Thin Films; User Handbook* [M]. New York: SPIE Press, 1996. 149–151.
- 4 M Born, E Wolf. *Principle of Optics* [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫. *光学原理* [M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- 5 Yu Kan, Ji Zijuan, Huang Dexiu, *et al.*. Transmitted-intensity distribution of a narrowband thin-film filter with oblique incidence of Gaussian beam under non-parallel case [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1013001.
俞 侃, 吉紫娟, 黄德修, 等. 非平行条件下高斯光束斜入射窄带滤光片的透射光强分布 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1013001.
- 6 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology* [M]. Hangzhou: Zhengjiang University Press, 2006.
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.
- 7 Yu Kan, Huang Dexiu, Yin Juanjuan, *et al.*. Reflected intensity distribution of a thin-film filter with oblique incidence of a Gaussian beam under-parallel case [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0807003.
俞 侃, 黄德修, 尹娟娟, 等. 高斯光束写入射非平行薄膜滤光片的反射光强分布 [J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0807003.
- 8 M Lequime, R Parmentier, F Lemarchand, *et al.*. Toward tunable thin-film filters for wavelength division multiplexing applications [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(16): 3277–3284.
- 9 H A Macleod. Challenges in the design and production of narrowband filters for optical fiber telecommunications [C]. SPIE, 2000, 4094: 46–57.
- 10 Wang Wenliang, Hao Honggang. Designs of near infrared two-waveband non-polarizing beam splitter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1131002.
王文梁, 郝宏刚. 近红外双波段消偏振分光膜的设计 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1131002.
- 11 Thin Film Center. *Essential Macleod: Optical Coating Design Program, Version 9.5* [M]. Tucson: Thin Film Center Inc., 2002.
- 12 Zhang Yueguang, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. Color-separation multilayer systems used for thin film transistor-liquid crystal display [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(6): 791–794.
章岳光, 顾培夫, 刘 旭, 等. 薄膜晶体管液晶投影仪中的偏振分色薄膜 [J]. *光学学报*, 1999, 19(6): 791–794.

栏目编辑: 韩 峰