

文章编号: 1001-3806(2010)05-0611-03

## 对称膜系偏光分束镜特征参量的入射角效应

齐瑞云, 吴福全\*, 王庆, 郝殿中, 吴闻迪

(曲阜师范大学 激光研究所 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了研究入射角对对称膜系薄膜偏光分束镜性能的影响, 从等效膜层理论和截止带理论出发, 采用图像法分析了分光光谱带宽和透过率随入射角的变化趋势和原因。利用 UV3101-PC 分光光度计测量了  $(LHL)^N$  膜系偏光分束镜在不同入射角下的透射分光光谱, 实验结果与理论分析一致。结果表明, 分光光谱带宽和入射角存在直接联系, 分光光谱带宽随入射角的增大先变宽后变窄, 存在一个带宽最大值, 以带宽最大值对应的入射角为基点, 减小入射角时, 分光光谱带宽向长波段漂移并且出现凹陷; 增大入射角时, 分光光谱向短波段漂移。这些结果对优化对称膜系薄膜偏光分束镜有一定的参考价值。

**关键词:** 薄膜; 偏光分束镜; 等效膜层; 透过率; 带宽

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.010

## The incident angle effect of symmetric periodic multilayer polarizing beam splitter

QI Rui-yun, WU Fu-quan, WANG Qing, HAO Dian-zhong, WU Wen-di

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to study the effect of incident angles on the characteristics of symmetric periodic multilayer polarizing beam splitter (PBS), based on equivalent layers concept and stop-band theory, the bandwidth of spectrum and transmittance change with incident angles were analyzed with the graphical method. The transmittance spectrum of  $(LHL)^N$  PBS was measured with a UV3101-PC spectrometer. The experimental results show that the bandwidth spectrum becomes wider and then narrower with incident angles increase, so there is a maximum bandwidth. Taking the point corresponding to the maximum bandwidth as a reference point, the transmittance spectrum moves to longer-wave band and appears hollow aperture with the incident angle decreases; on the other hand, the transmittance spectrum moves to shorter-wave band with the incident angle increases. The experimental results are consistent with theoretical ones. The results provide an important reference for design and optimization of the symmetric periodic multilayer PBS.

**Key words:** thin film; polarizing beam splitter; equivalent layers; transmittance; bandwidth

## 引言

偏光分束镜是重要的光学元件, 广泛应用于磁光存储、光开关、光隔离器<sup>[1]</sup>、光电显示设备和光信息处理<sup>[2]</sup>等领域。传统的偏光分束镜由光学双折射晶体冰洲石制成, 如萨那芒特棱镜、沃拉斯顿棱镜、洛匈棱镜、分束格兰-汤普逊棱镜<sup>[3]</sup>等。由于薄膜偏光分束镜所用的光学玻璃不受尺寸限制, 可以制作大口径的偏光分束镜, 因此, 在实际中获得了广泛的应用, 国内外学者均对此进行过深入研究<sup>[2,4-9]</sup>。薄膜偏光分束镜的特征参量有使用分光光谱带宽、透过率、消光比和视场角。现有对薄膜偏光分束镜的研究主要侧重于展宽

作者简介: 齐瑞云(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事薄膜光学和偏振光学器件的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2009-09-14; 收到修改稿日期: 2009-12-24

使用带宽, 提高透过率, 改善消光比, 或者增大视场角<sup>[10-11]</sup>。作者利用对称膜系的等效折射率公式, 通过图像法研究基于等效膜层理论和截止带理论的薄膜偏光分束镜特性的人射角效应, 为提高薄膜偏光分束镜性能的设计提供理论参考。

## 1 分光原理及性能分析

对于3层对称结构膜系, 存在1个等效膜层概念, 因此可以将其用1个等效单层膜来描述<sup>[12-13]</sup>。由于光线倾斜入射时偏振效应的存在, 3层对称结构膜系  $(ABA)^N$  对  $s, p$  偏振分量具有不同的等效折射率。通过适当选取薄膜材料、封装光学玻璃和入射角度, 使对称膜系中  $p$  偏振分量光的等效折射率与封装光学玻璃棱镜中  $p$  偏振分量光的光学导纳相等, 则对于  $p$  偏振分量的光相当于在同一种介质中传播而可以完全透过; 同时使对称膜系中  $s$  偏振分量光对应的等效折射

率为纯虚数,即光进入  $s$  偏振分量等效折射率的截止带,当其位相厚度足够时, $s$  偏振分量的光就可以完全反射而不透过。

玻璃棱镜的光学导纳由下式给出:

$$\begin{cases} \eta_{g,s} = n_g \cos \theta_0 \\ \eta_{g,p} = n_g / \cos \theta_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n_g$  是玻璃棱镜的折射率,光从棱镜到膜层的入射角为  $\theta_0$ 。

3 层对称膜系的等效折射率由下式给出<sup>[14]</sup>:

$$E = \eta_1 \sqrt{\frac{\sin 2\delta_1 \cos 2\delta_2 + A \sin 2\delta_2 \cos 2\delta_1 - B \sin 2\delta_2}{\sin 2\delta_1 \cos 2\delta_2 + A \sin 2\delta_2 \cos 2\delta_1 + B \sin 2\delta_2}} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n_1 d_1 \cos \theta_1 \\ \delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d_2 \cos \theta_2 \\ A = \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} + \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \\ B = \frac{1}{2} \left( \frac{\eta_1}{\eta_2} - \frac{\eta_2}{\eta_1} \right) \end{cases} \quad (3)$$

对于  $s$  偏振分量有:

$$\begin{cases} \eta_1 = n_1 \cos \theta_1 \\ \eta_2 = n_2 \cos \theta_2 \end{cases} \quad (4)$$

对于  $p$  偏振分量有:

$$\begin{cases} \eta_1 = n_1 / \cos \theta_1 \\ \eta_2 = n_2 / \cos \theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中,折射率分别为  $n_1, n_2$  的膜层的几何厚度为  $d_1, d_2$ ;光在折射率分别为  $n_1, n_2$  的膜层中的折射角为  $\theta_1, \theta_2$ 。

当采用 1/4 规整膜系,参考波长为 600nm 时,由斯涅尔定理可得倾斜入射时每一膜层的位相厚度:

$$\begin{cases} \delta_1 = \frac{300\pi}{\lambda n_1} \sqrt{n_1^2 - (n_g \sin \theta_0)^2} \\ \delta_2 = \frac{300\pi}{\lambda n_2} \sqrt{n_2^2 - (n_g \sin \theta_0)^2} \end{cases} \quad (6)$$

取  $\lambda = 600\text{nm}$ ,高低折射率薄膜材料和封装光学玻璃分别为 ZnS, MgF<sub>2</sub> 和 ZF<sub>6</sub>。采用对称膜系结构为 (ABA)<sup>N</sup>(B,A 分别为高低折射率膜层)。不考虑材料的色散,将(3)式~(6)式和材料的折射率参量代入(1)式、(2)式得到的对称膜系对  $s, p$  偏振分量的等效折射率和封装玻璃棱镜的光学导纳随入射角的变化关系如图 1 所示。

从图 1 可以看出: $s$  偏振分量在  $p$  偏振分量匹配的范围内一直保持截止,这表明薄膜偏光分束镜的分

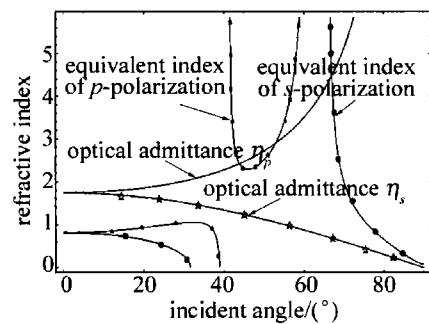


Fig. 1 The equivalent index  $E$  and entrance media admittance of symmetric multilayer change with incident angles

光光谱带宽由  $p$  偏振分量决定。将(3)式、(5)式、(6)式代入(1)式、(2)式,得到  $(E_p - \eta_{g,p})$  与波长  $\lambda$  和入射角  $\theta_0$  的关系,其中  $E_p$  是对称膜系  $p$  偏振分量的等效折射率,  $\eta_{g,p}$  是光学玻璃棱镜中  $p$  偏振分量的光学导纳。 $E_p, \eta_{g,p}$  是  $\theta_0$  和  $\lambda$  的函数,作出的  $|E_p - \eta_{g,p}|$  关于波长  $\lambda$  和入射角  $\theta_0$  的等势图如图 2 所示。当  $|E_p - \eta_{g,p}| = 0.35$

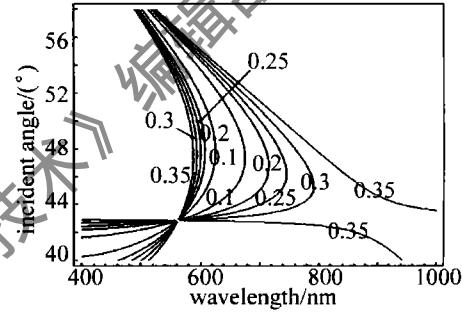


Fig. 2  $|E_p - \eta_{g,p}|$  contour as a function of wavelengths and incident angles

时,  $p$  偏振分量的剩余反射量为 0.5%,若以  $|E_p - \eta_{g,p}| = 0.35$  为临界点确定分光光谱带宽,从图中曲线可以看出,入射角确定后,分光光谱带宽也随之确定,且在 45°附近分光光谱带宽达到最大值。以带宽最大值对应的入射角为基点,入射角增大时分光光谱带宽向短波段漂移;入射角减小时分光光谱带宽向长波段漂移。在 43°入射角附近等势线交于一点,这说明  $p$  偏振分量的等效折射率在这一点截止,此时,等效膜层中  $p$  偏振分量的等效折射率与光学玻璃棱镜中  $p$  偏振分量的光学导纳失配,导致  $p$  偏振分量的反射增大,相应的在偏光分束镜的透射分光光谱上出现凹陷;当入射角度在截止点以下时,即短波段(400nm ~ 500nm)出现一段分光光谱带宽。

## 2 实验验证及分析

薄膜偏光分束镜结构角选择为 45°,设计参考波长 600nm,分光光谱范围为 580nm ~ 780nm,膜系是 1/4 规整膜系;为了让  $s$  偏振分量获得足够的反射,并且考虑镀制工艺的限制,选择对称膜系的周期数  $N = 10$ ,采用光学极值法监控薄膜厚度,在韩国产 EB900 真空镀膜机上镀制了偏光分束膜。为了增加薄膜偏光分束镜

的透过率,在3个通光面上均镀制了550nm~800nm宽带增透膜。

用岛津UV3101-PC分光光度计对偏光分束镜的透射分光光谱进行了测量,测试系统原理光路见图3。

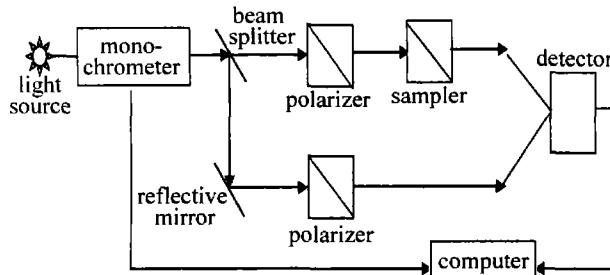


Fig. 3 Optical sketch of the spectrometer

由光源系统产生的连续光谱的光束经聚焦进入单色仪系统,产生波长可连续变化的单色光,经分束器分

成两束,一束为测试样品光,另一束为参考光。通过刻度转盘改变光在偏光分束镜的入射角度,测得的透射分光光谱随入射角变化曲线如图4所示。

图4中虚线表示正入射时的分光光谱,图4a~图4c中的实线分别表示光在入射端面的入射角增大1°,2°,3°时的分光光谱;图4d~图4f的实线分别表示光在入射端面的入射角减小1°,2°,3°时的分光光谱。若以 $p$ 偏振分量透过率85%标定分光光谱带宽,由图中曲线可以看出:入射角增大时分光光谱向短波漂移,并且分光光谱带宽变窄, $p$ 偏振分量较正入射时透过率变化不大;入射角减小时分光光谱带宽向长波段漂移,并且在短波段出现凹陷,入射角减小的越多,凹陷程度越大,这与 $\theta_0 = 43^\circ$ 时, $p$ 偏振分量出现截止点造成反射增大的理论分析一致。

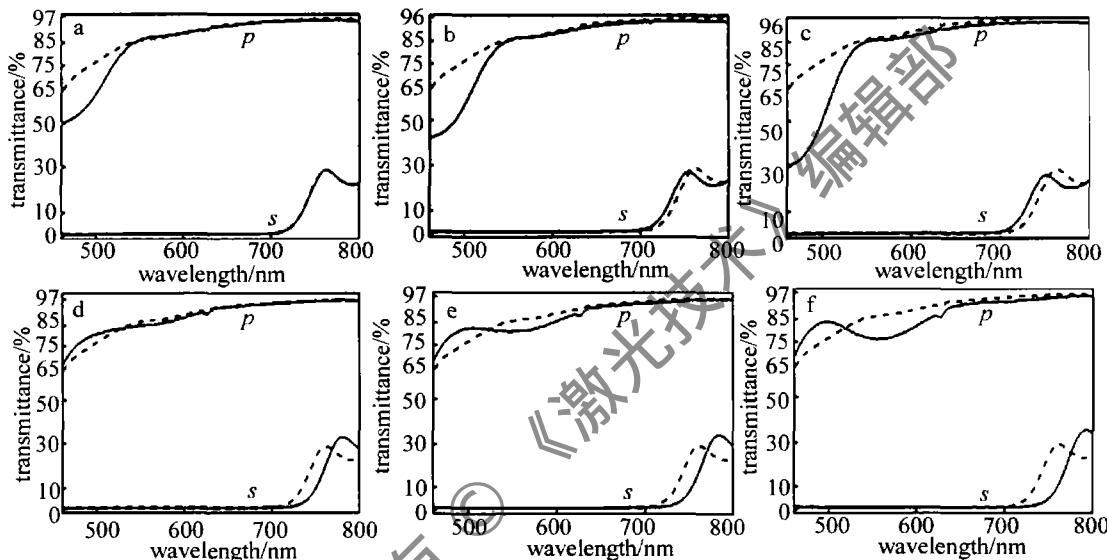


Fig. 4 Polarizing beam splitter's transmittance spectrum with incident angles

### 3 结 论

从对称膜系等效折射率公式出发,得到( $E_p - \eta_{g,p}$ )与波长 $\lambda$ 和入射角 $\theta_0$ 的关系,作出了 $|E_p - \eta_{g,p}|$ 关于波长 $\lambda$ 和入射角 $\theta_0$ 的等势图,等势图表明:分光光谱带宽和入射角存在直接联系,分光光谱带宽随入射角的增大先变大后变小,其带宽存在一个最大值;减小入射角时, $p$ 偏振分量的等效折射率有截止奇点,导致 $p$ 偏振分量的反射率增大,分光光谱上相应出现凹陷。利用UV3101-PC分光光度计,测量了(LHL) $^N$ 膜系的薄膜偏光分束镜在不同入射角下的透射分光光谱,测试结果与通过等势图的理论分析一致。对称膜系等效折射率是波长和入射角的函数,考虑到倾斜入射时的偏振效应,不能得到带宽的解析公式,用图像法确定对称膜系结构薄膜偏光分束镜的分光光谱带宽是可行的,这为优化

设计对称膜系结构的薄膜偏光分束镜提供了新的方法。

### 参 考 文 献

- [1] FENG J B, ZHOU Zh P. Polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler[J]. Opt Lett, 2007, 32(12): 1662-1664.
- [2] GU P F, LIU X, TANG J F. Design of broadband and wide-angle polarizing beam splitter[J]. Optical Instruments, 1999, 21(4/5): 17-21(in Chinese).
- [3] LI G H. Optics[M]. Jinan: Shandong University Press, 1998: 122-189(in Chinese).
- [4] SHEN Z C, KONG W J, SONG Y X, et al. The optimum design and preparation of  $ZrO_2/SiO_2$  polarizing film[J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 101-103(in Chinese).
- [5] KONG W J, WU F Q, WANG J M. Investigation on the thin film polarizing beam splitter[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(4): 17-19(in Chinese).
- [6] YAO L Y, YI K, YANG J, et al. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(9): 1116-1118(in Chinese).

(下转第627页)

2.4.3 激光线自身特性的影响 第1.1节中光功率检测数据显示,峰值功率在出射位置稍偏左。由图5a可知,−0.7m处亮度较大,而0.7m处激光亮度较弱且出现断线,大于0.7m时,亮度进一步减小。经测量,0.7m处功率为6mW,因此,激光线出瞳2m远的功率应至少大于6mW。

此外,由图7可知,原图所反映的线宽对阈值分割后的图的线宽会有影响,但光功率密度较集中时,用灰度重心法就可以较好地提取光刀中心。

### 3 结 论

实验结果表明,局部最大类间方差法(算法(3))在处理大功率半导体线激光图像上优于普通意义上的全局最大类间方差法。它考虑了图像的局部特征,因而处理背景噪声较大的图像效果更佳,且处理用时更短。为了得到最佳的处理效果,在本文中的测量系统下,此方法有一定的适用条件,即应保证信号与背景阳光的信噪之比大于3.02,线激光出瞳2m处功率大于6mW,且对不同的待测目标要做适当调整。在进一步改进算法的同时,也应该提高激光线自身的光束质量,并针对不同的待测物给出具体的功率密度范围。

### 参 考 文 献

- [1] CHEN H D, ZHOU G, WANG C J, et al. An algorithm for laser stripe matching based on the epipolar constraint[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 584-587 (in Chinese).
- [2] HUANG Zh H, SUN D Zh, CAI H Y, et al. Research on a 3-D measuring method for buildings based on fixed scanning points[J].

(上接第613页)

- [7] ZHANG Y G, SHENG Y J, AI M L, et al. Wide band and wide angle polarizing beam splitter[J]. *Optical Instruments*, 2001, 23(5/6): 198-201 (in Chinese).
- [8] MOUCHART J, BEGEL J, DUDA E. Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field[J]. *Appl Opt*, 1989, 28(14): 2847-2853.
- [9] DOBROWOLSKI J A, WALDORF A. High-performance thin film polarizer for the UV and visible[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(1): 111-116.
- [10] BLANCKENHAGEN B. Practical layer designs for polarizing beam-splitter cubes[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(7): 1539-1543.

- [3] SUBBARAO M, CHOI T. Accurate recovery of three-dimensional shape from image focus[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(3): 266-274.
- [4] HU B, LI D H, JIN G, et al. New method for obtaining the center of structured light stripe by direction template[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(11): 59-60 (in Chinese).
- [5] CUI X J, YANG Ch, LIU B H, et al. Self-adaptive iterative method of extracting center of linear-structured light e[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2007, 41(1): 73-76 (in Chinese).
- [6] WU G J, WU L L, CANG Y P, et al. A method for calculating the center position of collimated light[J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, 4(2): 155-158.
- [7] HUANG K, HE P A, FAN R, et al. Uniformization shaping method of line laser beam[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(3): 523-526 (in Chinese).
- [8] ZHOU Y, HE P A, JIANG Q N, et al. Research of laser beam shaping system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2006, 4(2): 26-28 (in Chinese).
- [9] LIU Y H. Three thresholding algorithms implemented in MATLAB6.5 [J]. *Journal of Xiangnan University*, 2007, 28(5): 81-84 (in Chinese).
- [10] HUANG Y R, WANG Sh. Multilevel thresholding methods for image segmentation with Otsu based on QPSO [C]//Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing. Washington D C: IEEE Computer Society, 2008: 701-705.
- [11] YANG H. Research on thresholding methods for image segmentation [J]. *Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 33(2): 135-137 (in Chinese).
- [12] WU Q Y, SU X Y, LI J Zh, et al. A new method for extracting the centre-line of line structure light-stripe[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(4): 151-155 (in Chinese).

- [11] LI L, DOBROWOLSKI J A. Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter[J]. *Appl Opt*, 1996, 35(13): 2221-2225.
- [12] OHMER M C. Design of three-layer equivalent films[J]. *J O S A*, 1978, 68(1): 137-139.
- [13] THELEN A. Equivalent layers in multilayer filters[J]. *J O S A*, 1966, 56(11): 1533-1538.
- [14] TANG J F, GU P F, LIU X, et al. Modern optical thin film technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007: 111-121 (in Chinese).