

文章编号: 0253-2239(2010)07-2159-05

# 基于等效膜层理论的 1/4 规整膜系薄膜偏光分束镜

王 庆 吴福全 郝殿中 齐瑞云 吴闻迪 尹延学

(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, 山东 曲阜 273165)

**摘要** 为了设计制作 1/4 规整膜系的高性能薄膜偏光分束镜, 根据三层对称膜系结构的等效膜层理论和截止带理论, 设计了两种对称膜系结构的偏光分束镜。利用 TFCalc 薄膜软件对两种膜系结构偏光分束镜的分光光谱特性进行了模拟。利用电子枪蒸镀法分别制备了两种膜系结构的偏光分束镜(580~780 nm), 并利用分光光度计和搭建的消光比测试系统, 对两种膜系结构偏光分束镜的透射率和消光比进行了测试。结果表明, 两种膜系结构的偏光分束镜在设计分光光谱范围内透射率可以达到 90% 以上, 消光比优于  $3 \times 10^{-3}$ , 与理论设计吻合得很好。

**关键词** 薄膜光学; 等效膜层; 截止带; 偏光分束镜; 透射率; 消光比

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2159

## Quarter Periodic Multilayer Polarizing Beam Splitter Based on Equivalent Layers Theoretics

Wang Qing Wu Fuquan Hao Dianzhong Qi Ruiyun Wu Wendi Yin Yanxue

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

**Abstract** In order to design and fabricate quarter wavelength high performance polarizing beam splitter (PBS), based on equivalent layers concept and stopband theoretics, two types quarter wavelength periodic multilayer PBS are proposed. The TFCalc software is used for the calculations and analysis. The polarizing beam splitters are fabricated by electron gun vapour deposition in spectrum range of 580~780 nm. The transmissivity characteristic of PBS is investigated by spectrometer, and the extinction ratio characteristic is measured by the constructed setup in the experiment. The experimental results indicated that the transmissivity reaches 90% or more, and the extinction ratio is better than  $3 \times 10^{-3}$ . The experimental results consistent with theoretical performance of the layer design.

**Key words** thin film optics; equivalent layers; stopband; polarizing beam splitter (PBS); transmissivity; extinction ratio

## 1 引 言

偏光分束镜是重要的光学元件, 广泛应用于光学仪器、激光、光电显示设备和光存储等领域<sup>[1,2]</sup>。传统的偏光分束镜由天然光学双折射晶体冰洲石制成, 如萨那芒特棱镜、洛匈棱镜、沃拉斯顿棱镜、分束格兰-汤姆孙棱镜和萨伐尔偏光镜<sup>[3]</sup>等。这些偏光分束镜具有很好的消光比特性和较大的视场角, 但由于冰洲石晶体稀少, 因此造价较高; 且受晶体尺寸

的限制, 难于制造大口径的偏光分束镜。其他实现偏光分束的方法还有利用光学薄膜的干涉、制造具有双折射性质的光学薄膜<sup>[4]</sup>、金属线栅衍射<sup>[5]</sup>、光子晶体的负折射<sup>[6]</sup>和布拉格光栅波导<sup>[7]</sup>等方法。Li 等<sup>[8]</sup>报道了一种基于受抑全反射原理的薄膜偏光分束镜, 具有很宽的带宽和较大的视场角, 但所用的膜层是非 1/4 规整膜系, 并且膜层厚度很薄, 很难精确控制, 制造非常困难<sup>[9]</sup>。

收稿日期: 2009-08-10; 收到修改稿日期: 2009-09-21

作者简介: 王 庆(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事薄膜光学和偏振光学器件等方面的研究。

E-mail: jiguangsu08@163.com

导师简介: 吴福全(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事偏光器件物理学方面的研究。

E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn(通信联系人)

最常用的薄膜偏光分束镜是 Macneille 型<sup>[10,11]</sup>, 国内外都对此进行过广泛的研究<sup>[12~19]</sup>。三层对称膜系的等效膜层理论最早由 Epstein 提出<sup>[20]</sup>, Thelen 和 Ohmer 对其进行过深入的研究<sup>[21,22]</sup>, 并广泛应用于滤光片的设计。本文应用对称膜系的等效膜层理论和截止带理论, 设计 1/4 规整膜系的非 Macneille 结构的薄膜偏光分束镜, 为制作易于镀制的高性能薄膜偏光分束镜提供一种新方法。

## 2 原理与设计

薄膜偏光分束镜的结构和分光光路, 如图 1 所示。它是将多个周期的三层对称结构介质膜镀制在光学玻璃棱镜的斜面上, 然后再将两棱镜用光学胶合剂胶合起来。三层对称膜系的结构为

$$n_0 | (n_1, n_2, n_1)^N | n_0,$$

式中  $n_0$  为封装用光学玻璃棱镜的折射率,  $n_1, n_2$  为两种不同薄膜材料的折射率,  $N$  为三层对称膜系的周期数。

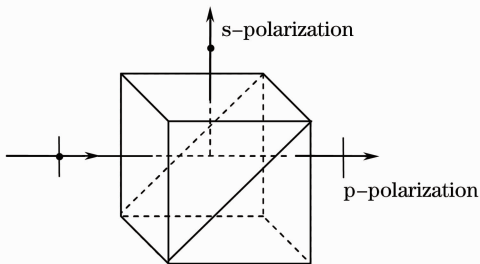


图 1 薄膜偏光分束镜的结构

Fig. 1 Schematic diagram of thin film PBS

对于三层对称结构的膜系, 在数学上存在一个等效膜层的概念, 可以用一层特殊的等效单层膜来描述, 这层等效膜的等效折射率<sup>[23]</sup>为

$$E = \eta_1 \sqrt{\frac{\sin 2\delta_1 \cos \delta_2 + A \cos 2\delta_1 \sin \delta_2 - B \sin \delta_2}{\sin 2\delta_1 \cos \delta_2 + A \cos 2\delta_1 \sin \delta_2 + B \sin \delta_2}}, \quad (1)$$

式中

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

对于 s 偏振分量有

$$\begin{cases} \eta_1 = n_1 \cos \theta_1, \\ \eta_2 = n_2 \cos \theta_2. \end{cases} \quad (3)$$

对于 p 偏振分量有

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

式中  $d_1, d_2$  分别为折射率  $n_1, n_2$  膜层的几何厚度;  $\theta_1, \theta_2$  分别为光在折射率  $n_1, n_2$  膜层内的折射角。

光线倾斜入射时, 由于偏振效应的存在, 三层对称结构膜系中 s, p 偏振分量具有不同的等效折射率; 如果通过适当选取薄膜材料、封装用光学玻璃和入射角度, 使三层对称结构膜系中 p 偏振分量的等效折射率与封装用光学玻璃中 p 偏振分量的光学导纳相等, 则 p 偏振分量就相当于在同一种介质中传播, 从而 p 偏振分量可以完全透过; 同时使三层对称结构膜系中 s 偏振分量的等效折射率为纯虚数, 即进入对称膜系中 s 偏振分量等效折射率的截止带, 当 s 偏振分量的相位厚度足够厚时, s 偏振分量就可以被完全反射而不能透过。要达到 s 偏振分量完全反射, p 偏振分量完全透射的目的, 需要同时满足以下条件:

$$\begin{cases} E_s^2 < 0 \\ E_p = \frac{n_0}{\sin \theta_0}. \end{cases} \quad (5)$$

在设计时, 可以先选定薄膜材料和封装用的光学玻璃, 然后确定合适的入射角度; 也可以先选定入射角度, 然后确定合适的薄膜材料和封装用的光学玻璃。本文设计中采用的是第一种方法。

周期性三层对称膜系可以有两种膜系结构:  $(LHL)^N$  和  $(HLH)^N$ , 其中 H, L, N 分别代表高、低折射率薄膜材料和膜系的周期数。基于上述原理设计了两种膜系结构的偏光分束镜, 标记为样品 1 和样品 2。样品 1 和样品 2 分别采用的是  $(LHL)^N$  和  $(HLH)^N$  膜系, 其设计光学参数如表 1 所示。

为了简化镀制工艺, 采用 1/4 规整膜系, 由斯涅耳定理可得倾斜入射时每一膜层在中心波长处的相位厚度为

$$\begin{cases} \delta_1 = \pi/2 n_1 \sqrt{n_1^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}, \\ \delta_2 = \pi/2 n_2 \sqrt{n_2^2 - (n_0 \sin \theta_0)^2}, \end{cases} \quad (6)$$

式中  $\theta_0$  为光在棱镜中的入射角。把相应薄膜材料和封装用光学玻璃的折射率和(3), (4), (6)式代入(1)式, 可以得到三层对称膜系中 s, p 偏振分量的等效折射率和封装用光学玻璃中 s, p 偏振分量的光学导纳随入射角的变化曲线如图 2 和图 3 所示。

表 1 薄膜材料和光学玻璃的折射率参数  
Table 1 Refractive indices of the film materials and optical glass

PBS	Cement optical glass		Low refractive index film		High refractive index film material material	
	Type of glass	Index of glass	Material	Index of material	Material	Index of material
1#	ZF <sub>6</sub>	1.75	MgF <sub>2</sub>	1.38	ZnS	2.35
2#	LaK <sub>2</sub>	1.69	SiO <sub>2</sub>	1.45	TiO <sub>2</sub>	2.10

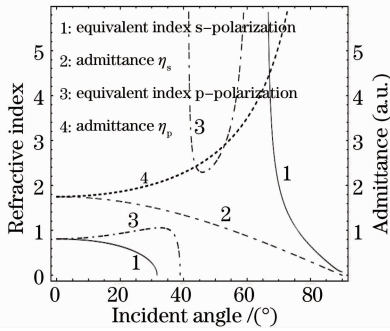


图 2 LHL 膜系的等效折射率和入射介质的光学导纳随入射角变化曲线

Fig. 2 Equivalent index  $E$  and entrance media admittance of combinations LHL versus incident angle

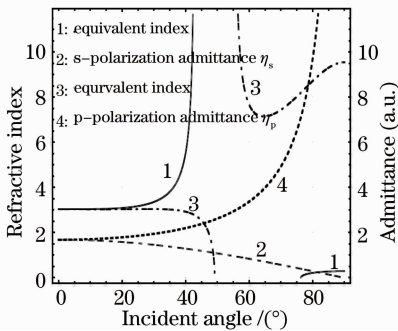


图 3 HLH 膜系的等效折射率和入射介质的光学导纳随入射角变化曲线

Fig. 3 Equivalent index  $E$  and entrance media admittance of combinations HLH versus incident angle

要使(5)式成立,经计算样品 1 的入射角应为 43.84°或者 52.94°,而样品 2 的入射角应为 45.69°或者 78.57°。从图 2 和图 3 中也可以看出,在上述角度时对称膜系中 p 偏振分量的等效折射率与封装用光学玻璃中 p 偏振分量的光学导纳完全匹配,并且进入了 s 偏振分量等效折射率的截止带。样品 1 和样品 2 的入射角度都选择为 45°,为了让 s 偏振分量获得足够的反射,并且考虑薄膜镀制工艺的限制,选择对称膜系的周期数  $N$  为 10,设计参考波长 610 nm,薄膜偏光分束镜的设计分光光谱范围为

580~780 nm。用 TFCalc 薄膜分析软件对样品 1 和样品 2 的设计进行了理论模拟,其理论分光光谱特性如图 4 和图 5 所示。

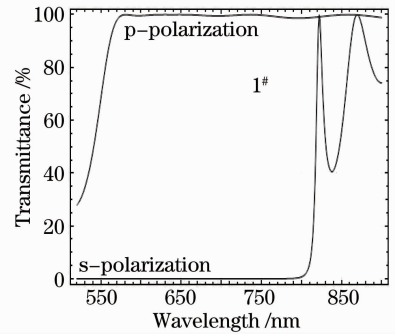


图 4 LHL 膜系偏光分束镜透射光的理论分光光谱  
Fig. 4 Calculated s-polarization and p-polarization transmittance for LHL multilayer systems

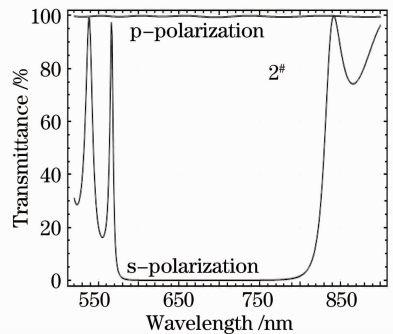


图 5 HLH 膜系偏光分束镜透射光的理论分光光谱  
Fig. 5 Calculated s-polarization and p-polarization transmittance for HLH multilayer systems

### 3 器件的镀制

偏光分束膜的镀制是在韩国产 EB900 真空镀膜机上完成的。实验的膜系结构是 1/4 规整膜系,所以采用光学极值法监控薄膜厚度。具体实验条件如表 2 所示。为了增加薄膜偏光分束镜的透射率,在三个通光面上镀制了 550~800 nm 宽带增透膜。

表 2 薄膜偏光分束镜的沉积制备参数  
Table 2 Deposition parameters of the PBS

PBS	Vacuum /Pa	Temperature /°C	Monitor wavelength /nm	Deposition speed /(nm/s)	
1#	$1.6 \times 10^{-3}$	100	520	MgF <sub>2</sub>	ZnS
				1.5	1.5
2#	$1.2 \times 10^{-2}$	200	550	TiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>
				0.5	1.5

## 4 器件的性能测试

### 4.1 透射率的测试

将两块直角棱镜用冷杉树胶胶合在一起,用岛津 UV3101PC 分光光度计测量其透射光谱,测试系统框图如图 6 所示。

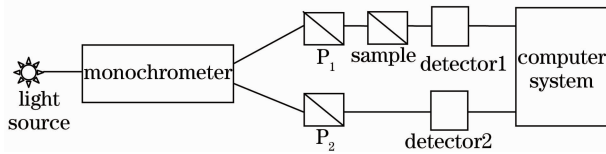


图 6 分光光度计测试光路原理图

Fig. 6 Sketch map of spectrometer experimental optical route

光源产生的连续光谱经聚焦进入单色仪,单色光经分束器分成两束,一束为测试光,另一束为参考光,两束光分别经透振方向相同的  $P_1, P_2$  两个起偏镜起偏。首先使测试样品的透振方向与  $P_1, P_2$  的平行,测出 p 偏振分量的透射光谱,然后使测试样品的透振方向与  $P_1, P_2$  的垂直,测出 s 偏振分量的透射光谱。透射光分光光谱曲线如图 7 和图 8 所示。

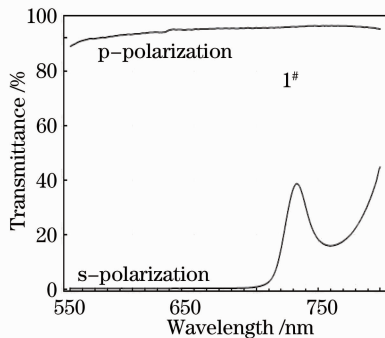


图 7 LHL 膜系偏光分束镜透射光的实验分光曲线

Fig. 7 Measured performance of the LHL multilayer systems

由图可见,样品 1 的分光光谱区间在 550 ~ 710 nm,比设计的分光光谱区间 580 ~ 780 nm 向短波方向有所漂移且光谱区有所变窄,分光光谱区间向短波段漂移是由于镀制过程中监控波长选择的偏短的缘故;分光光谱区间变窄一是由于镀制的薄膜折射率与理论计算时存在偏差,二是由于增透膜的

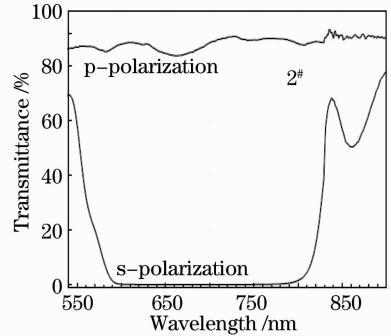


图 8 HLH 膜系偏光分束镜透射光的实验分光曲线

Fig. 8 Measured performance of the HLH multilayer systems

增透光谱区间没有和分光膜的分光光谱区间重合。样品 2 的分光光谱区间为 590 ~ 790 nm,与理论设计符合得很好。样品 1 和样品 2 在整个分光光谱区间内透过率都可以达到 90%。

### 4.2 消光比的测试

为了测试薄膜偏光分束镜的消光比特性,搭建了如图 9 所示的消光比测试系统。由于格兰-汤姆孙棱镜的视场角大,消光比可以达到  $10^{-6}$ ,透射率对入射角不敏感,所以实验中采用格兰-汤姆孙棱镜作为检偏镜。

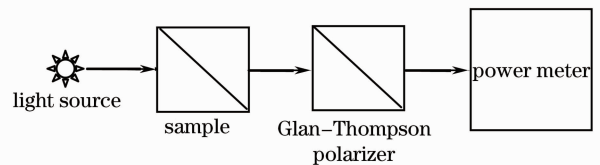


图 9 消光比测试系统光路图

Fig. 9 Sketch map of extinction ratio measurement experimental system

实验中使用波长为 633 nm 的 He-Ne 激光器作为光源。光线进入待测样品后经格兰-汤姆孙棱镜检偏,然后由 Newport 公司产的 Model 1931-C 光功率计测试透射光强。旋转格兰-汤姆孙棱镜,将最大光强记为  $T_p$ ,最小光强记为  $T_s$ , $T_s/T_p$  即是测试样品的消光比。测得的数据和计算的消光比如表 3 所示。由表 3 中数据可见,样品 1 的消光比优于样

品 2 的消光比, 并且样品 1 的消光比优于以往的 Macneille 型<sup>[24]</sup>。

表 3 消光比测试数据

Table 3 Measure data of extinction ratio

PBS	$T_s/nW$	$T_p/\mu W$	$T_s/T_p$	Mean $T_s/T_p$
	228.9	428.5	$5.3 \times 10^{-4}$	
1 <sup>#</sup>	226.3	399.4	$5.7 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-4}$
	224.9	477.0	$4.7 \times 10^{-4}$	
	1602.0	699.5	$2.3 \times 10^{-3}$	
2 <sup>#</sup>	1638.0	459.7	$3.6 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-3}$
	1538.0	492.1	$3.1 \times 10^{-3}$	

## 5 结 论

从三层对称膜系的等效膜层理论和截止带理论出发, 利用倾斜入射时对称膜系 s, p 偏振分量等效折射率的差异, 使对称膜系 p 偏振分量的等效折射率与入射介质 p 偏振分量的光学导纳匹配, 同时使对称膜系 s 偏振分量的等效折射率进入截止带, 设计了 1/4 规整膜系的偏光分束镜。利用电子枪蒸镀膜法制备了两种膜系结构的偏光分束镜; 利用分光光度计和搭建的消光比测试系统, 分别测量了样品棱镜的透射率和消光比。样品 1 的透射率达到了 95%, 消光比达到了  $5.2 \times 10^{-4}$ ; 样品 2 的透射率达到了 90%, 消光比达到了  $3 \times 10^{-3}$ 。由此可见, 利用倾斜入射时三层对称膜系 s, p 偏振分量等效折射率的差异设计薄膜偏光分束镜是完全可行, 且制作的薄膜偏光分束镜消光比优于 Macneille 型; 与受抑全反射型薄膜偏光分束镜相比, 该类型的薄膜偏光分束镜使用的膜系是 1/4 规整膜系, 可以用光学极值法精确监控, 镀制工艺简化。为设计制作高性能薄膜偏光分束镜提供了新的途径。

## 参 考 文 献

- Junbo Feng, Zhiping Zhou. Polarization beam splitter using a binary blazed polarization beam splitter using a binary blazed grating coupler[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(12): 1662~1664
- Li Li, S. B. Thomas, J. A. Dobrowolski. High efficiency projection displays having thin film polarizing beam splitter[P]. U. S. patent 5,982,541, 1999
- Jian Xiaohua, Zhang Chunmin, Sun Yao *et al.*. Novel polarization interference imaging spectrometer with adjustable lateral displacement savart polariscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 643~646  
简小华, 张淳民, 孙 尧等. 一种可调横向剪切面的新型偏振干涉成像光谱仪[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 643~646
- Tyan Rongchung. Design, fabrication, and characterization of form-birefringent multilayer polarizing beam splitter[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1997, **14**(7): 1627~1636
- M. Xu, H. P. Urbach, D. K. G. de Boer *et al.*. Wire-grid diffraction gratings used as polarizing beam splitter for visible light and applied in liquid crystal on silicon[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(7): 2303~2320

- Zhang Jinlong, Liu Xu, Li Yiyu *et al.*. Polarization beam splitters one-dimensional metal-dielectric structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1788~1792  
张锦龙, 刘 旭, 厉以宇等. 基于一维金属-介质周期结构的偏振分束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1788~1792
- E. Simova, I. Golub. Polarization splitter/combiner in high index polarization splitter/combiner in high index contrast Bragg reflector waveguides [J]. *Opt. Express*, 2003, **11** (25): 3425~3430
- Li Li, J. A. Dobrowolski. High-performance thin-film polarizing beam splitter operating at angles greater than the critical angle [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(16): 2754~2771
- Penghui Ma, Li Li, Fengchen Lin *et al.*. Manufacture of high performance polarizing beam splitter for projection display applications[C]. Tucson: TuC1, 2007
- Kong Weijin, Wu Fuquan, Wang Jiming. Investigation on the thin film polarizing beam splitter [J]. *J. Appl. Opt.*, 2004, **24**(4): 17~19  
孔伟金, 吴福全, 王吉明. 薄膜偏振分光镜的研究[J]. *应用光学*, 2004, **24**(4): 17~19
- S. M. Macneille. Beam splitter[P]. U. S. patent 2,403,731, 1946
- B. v. Blanckenhagen. Practical layer designs for polarizing beam-splitter cubes[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(7): 1539~1543
- Yao Liying, Yi Ku, Yang Jian *et al.*. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1116~1118  
姚李英, 易 葵, 杨 健等. 应用于投影显示系统的偏振分光镜的设计和制备[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1116~1118
- Zhang Yueguang, Sheng Yongjiang, Ai Manling *et al.*. Wide band and wide angle polarizing beam splitter [J]. *Optical Instruments*, 2001, **23**(5,6): 198~201  
章岳光, 盛永江, 艾曼灵等. 宽波段宽角度偏振分束薄膜[J]. *光学仪器*, 2001, **23**(5,6): 198~201
- Gu Peifu, Liu Xu, Tang Jinfa. Design of broadband and wide-angle polarizing beam splitter [J]. *Optical Instruments*, 1999, **21**(4,5): 17~21  
顾培夫, 刘 旭, 唐晋发. 宽波长宽角度偏振分光镜设计[J]. *光学仪器*, 1999, **21**(4,5): 17~21
- Philip Baumeister. Rudiments of the design of an immersed polarizing beam divider with a narrow spectral bandwidth and enhanced angular acceptance [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(16): 3610~3613
- Li Li, J. A. Dobrowolski. Visible broadband, wide-angle, thin-film multilayer polarizing beam splitter [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(13): 2221~2225
- J. Mouchart, J. Begel, E. Duda. Modified MacNeille cube polarizer for a wide angular field [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14): 2847~2853
- J. A. Dobrowolski, A. Waldorf. High-performance thin film polarizer for the UV and visible [J]. *Appl. Opt.*, 1981, **20**(1): 111~116
- L. I. Epstein. The design of optical filters [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1952, **42**(11): 806~810
- M. C. Ohmer. Design of three-layer equivalent films [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(1): 137~139
- A. Thelen. Equivalent layers in multilayer filters [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(11): 1533~1538
- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2007. 43~48  
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, 2007. 43~48
- Kong Weijin, Wu Fuquan, Hao Dianzhong *et al.*. The design and test of narrow wavelength thin film polarizing beam-splitting prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1173~1176  
孔伟金, 吴福全, 郝殿中等. 窄带薄膜偏光分束镜的研制及其性能测试 [J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1173~1176