

文章编号: 0253-2239(2005)02-274-5

## 薄膜截止滤光片的消偏振设计\*

顾培夫 陈卫斌 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 薄膜截止滤光片在倾斜入射时不可避免地会产生 s 和 p 二个偏振分量的分离,因而在许多应用,特别是光通讯的应用中成为一个棘手的难题。提出了一种新的设计方法,对最常用的  $45^\circ$  入射角,实现了长波通和短波通两种截止滤光片的完全消偏振,在透射率为 50% 处,其偏振分离分别为 0.3 nm 和 0.1 nm。基本的设计方法是采用宽带法布里-珀罗薄膜干涉滤光片中心波长两侧的干涉带作为长波通或短波通截止滤光片的初始膜系,然后经过适当的优化以提高透射带的透射率。宽带干涉滤光片的间隔层常由半波长厚度的高、低折射率混合膜层组成,如 2H2L2H 或 2L2H2L。由于这种设计的截止区和透射带带宽常嫌不足,故提出了展宽截止区和透射带的方法。对一个典型的短波通截止滤光片,在波长 1550 nm,截止区和透射带宽均达到了 200 nm。这种设计方法不仅简单、性能优良,而且膜厚控制容差较大,故易于制造。

**关键词:** 薄膜光学; 截止滤光片; 消偏振设计; 干涉

中图分类号: O484 文献标识码: A

## Design of Depolarization Thin Film Cutoff Filters

Gu Peifu Chen Weibin Liu Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The separation between s- and p-polarization components is an invariable effect in thin film edge filters used for tilted incidence. So it is difficult for many applications, especially for optical communication. A novel design method is put forward and the cutoff filters with depolarization at incidence angle of  $45^\circ$  are achieved. The polarization separation at transmittance 50% for a long-wave-pass filter and a short-wave-pass filter is 0.3 nm and 0.1 nm respectively. The design method is based on a broad band Fabry-Pérot thin film interference filter in which higher or lower interference band in both sides of main transmittance peak can be used for an initial design of long-wave-pass filter or short-wave-pass filter and then can be refined to reduce the transmittance rippers. The spacer 2H2L2H or 2L2H2L of the interference filter is usually taken. Moreover, the method for expanding bandwidth of rejection and transmission is explained. The bandwidth of 200 nm for both rejection region and transmission band is obtained at wavelength 1550 nm. In this way, the long-wave-pass and short-wave-pass edge filters with zero separation between two polarization components can easily be gotten and fabricated.

**Key words:** thin film optics; cutoff filters; depolarization design; interference

### 1 引 言

光学上的长波通或短波通截止滤光片犹如电路网络中的低频通或高频通滤波器有着极其广泛的应用,特别是在液晶投影显示系统<sup>[1]</sup>和光通信波分复用系统<sup>[2]</sup>中。然而,基于薄膜干涉效应的这种截止滤光片,当光线倾斜入射时,不可避免地会产生 s 和

p 偏振分量之间的分离,这就是我们熟知的偏振效应。这种偏振效应在许多场合限制了截止滤光片的性能甚至导致它不能应用,对线偏振光系统除外。

要消除薄膜的这种偏振效应实在是一个棘手的难题。Costich<sup>[3]</sup>、Mahlein<sup>[4]</sup>和 Thelen<sup>[5]</sup>等曾对分光镜的消偏振问题作过深入的研究。在这些典型的

\* 浙江省科技计划(2004201)资助课题。

作者简介: 顾培夫(1944~),男,教授,博士生导师,主要从事光学与光电子薄膜、光电显示技术的研究工作。  
E-mail: gupeifu@zju.edu.cn.

收稿日期: 2004-03-03; 收到修改稿日期: 2004-10-19

方法中,除了 Thelen 的方法尚有一定实用性外,其它方法虽在理论上有一定意义,但由于材料、波段等因素的限制,并无实际应用价值。就是 Thelen 的方法,由于其膜层折射率容差非常小,且层数和材料多,故实际制造很难保证性能,而常用有一定吸收损耗的金属-介质组合的分光镜代替。对消偏振截止滤光片的研究更少,最有代表性的研究仍是 Thelen<sup>[6,7]</sup>。他提出了采用失谐滤光片的概念来设计消偏振的截止滤光片,获得了较好的消偏振效果。但是,实际上要寻找一个完全消偏振的截止滤光片的初始结构并非轻而易举,且其截止区和透射带的宽度都非常有限。

本文提出的新方法是基于法布里-珀罗(F-P)干涉滤光片来构建消偏振的长波通或短波通截止滤光片。由于采用较高级次的间隔层,在法布里-珀罗滤光片主极大透射峰两侧会产生次反射-透射带,而这种次反射-透射带的过渡区常常呈现消偏振的特性。我们要解决以下两个问题:1) 次反射-透射带的带宽较窄,故滤光片间隔层的级次和滤光片反射镜的反射率必须限制;2) 透射带次峰较大,故法布里-珀罗干涉滤光片的厚度必须进行优化。用这种方法非常易于构建一个消偏振的长波通或短波通截止滤光

片,而且消偏振性能优良,几乎实现了 s 和 p 偏振分量之间的零分离,因而在实际应用,特别是在光通信的应用中具有重要的实用价值<sup>[8]</sup>。

## 2 设计原理

最典型的长波通和短波通截止滤光片的膜系分别是  $G\left[\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right]^pA$  和  $G\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^pA$ ,其中 H 和 L 分别表示四分之一波长厚度的高折射率膜层和低折射率膜层, $p$  为周期数。这些截止滤光片虽然至今仍然应用非常广泛,但是在较大的入射角度时,其偏振分离是不可避免的,甚至是不可容忍的。图 1 表示这两种截止滤光片的偏振分离情况,其在空气中的入射角为  $45^\circ$ ,膜层材料为  $TiO_2$  和  $SiO_2$ ,在波长 1550 nm 的折射率分别为 2.28 和 1.425。不难看出,对长波通[图 1(a)]和短波通[图 1(b)]截止滤光片,对应于透射率为 50% 时的 s 和 p 分量的偏振分离分别为 96 nm 和 67 nm。由于这种偏振分离的缘故,使自然光产生一个明显的台阶而严重影响过渡区的陡度。这样的截止滤光片在许多场合是不能应用的,必须进行消偏振设计。

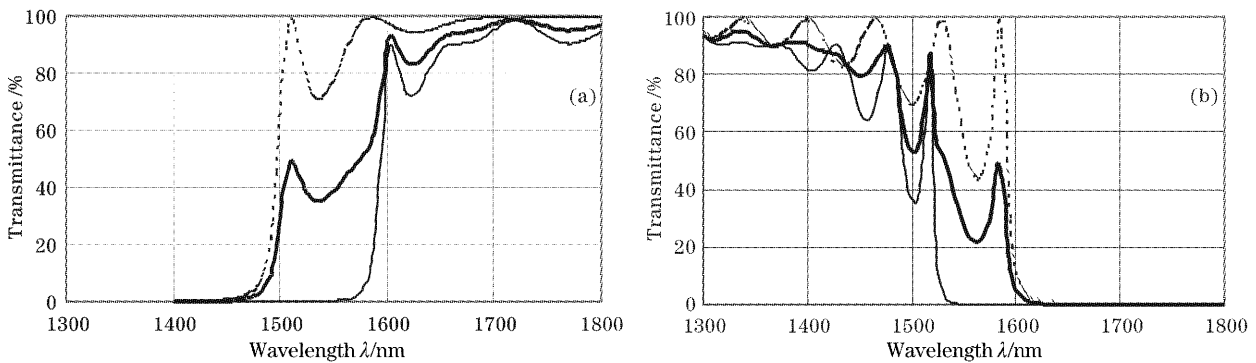


图 1 (a)长波通  $G\left[\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right]^{15}A$  和短波通(b) $G\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^{15}A$  截止滤光片的分光透射率曲线

Fig. 1 The transmittance curves of (a) long-wave-pass  $G\left[\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right]^{15}A$  and (b) short-wave-pass  $G\left[\frac{L}{2}H\frac{L}{2}\right]^{15}A$  filters

图 2 是一个法布里-珀罗滤光片以  $45^\circ$  角入射时 s 和 p 偏振分量的分光透射率曲线。作为例子,其膜系为:  $G(HLH2L2H2LHLHL)^9A$ ,参考波长为 1530 nm。可以看出,在滤光片中心波长主透射峰两侧各有一个过渡区消偏振的长波通和短波通区,以此作为初始膜系,经过适当的膜层厚度优化,即可获得消偏振的截止滤光片。

依据上述原理设计的长波通和短波通截止滤光片的例子如图 3 所示。其中前者的监控波长为 2060 nm,而后者的监控波长为 1340 nm。优化膜系结构列于表 1。由图 3 可见,对长波通和短波通膜系,在透射率为 50% 处 s 和 p 偏振分量的分离分别为 0.3 nm 和 0.1 nm,具有极其优良的消偏振特性。

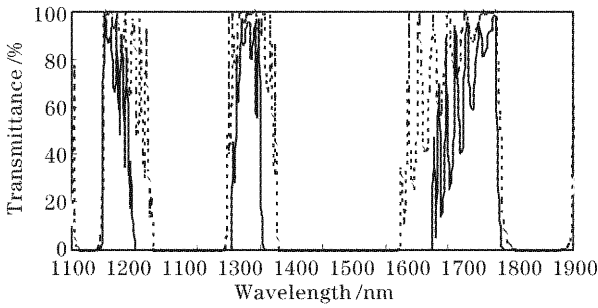


图 2 膜系 G(HLH2L2H2LHLHL)<sup>9</sup>A 在 45°角入射时 s 和 p 偏振分量的分光透射率曲线

Fig. 2 The transmittance curves of s- and p-polarization components for G(HLH2L2H2LHLHL)<sup>9</sup>A at 45° incidence

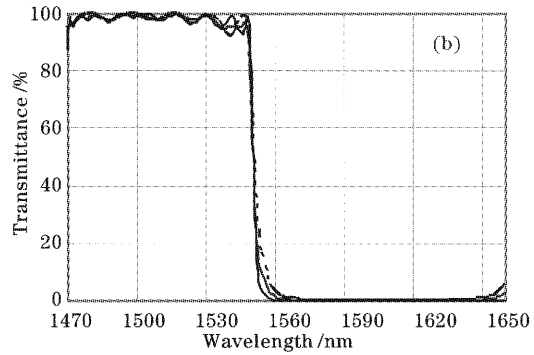
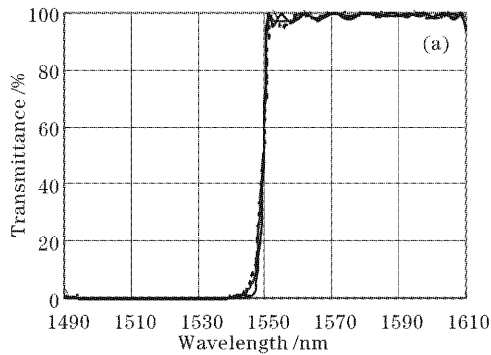


图 3 由初始膜系 G(HLH2L2H2LHLHL)<sup>9</sup>A 构成的(a)长波通和(b)短波通消偏振截止滤光片 45°角入射时的分光透射率曲线

Fig. 3 The transmittance curves of (a) long-wave-pass and (b) short-wave-pass edge filters from the initial design G(HLH2L2H2LHLHL)<sup>9</sup>A at 45° incidence

表 1 图 3 所示的(a)长波通和(b)短波通消偏振截止滤光片的 λ/4 光学厚度(从基板到空气依次排列)

Table 1 The quarter-wave thickness of non-polarizing filters: (a) long-wave-pass and (b) short-wave-pass (from substrate to air)

Design	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L	H	L
(a)	0.793	1.008	1.138	1.380	2.515	0.994	2.229	0.916	0.850	1.076	1.157	1.281	0.983	0.998
	2.192	2.433	0.852	0.950	0.941	1.193	1.150	1.165	0.929	0.978	2.233	2.336	0.872	0.967
	0.960	1.211	1.149	1.143	0.901	0.954	2.241	2.452	0.852	0.971	1.001	1.272	1.123	1.074
	0.871	0.947	2.133	2.514	0.881	1.033	1.043	1.254	1.087	1.063	0.883	0.989	3.524	0.986
	0.825	0.968	1.007	1.282	1.114	1.060	0.859	0.950	2.084	0.976	2.276	1.052	1.092	1.299
	1.045	1.005	0.836	0.908	2.180	0.969	0.967	2.934	1.214	1.105	0.861	0.889	0.791	0.905
	2.414	1.576	1.095	0.907	0.734	1.143								
(b)		1.870	0.931	2.565	3.363	1.161	1.077	0.850	0.538	0.820	1.071	1.336	1.299	1.324
	1.095	3.753	0.518	0.729	0.979	1.244	1.222	1.352	1.220	1.197	3.350	0.659	0.667	1.028
	1.050	1.553	1.203	1.255	1.222	0.925	3.094	0.737	0.807	1.277	1.279	1.225	1.362	1.132
	0.913	0.707	3.089	0.967	1.137	1.258	1.105	0.796	2.477	0.964	1.037	1.005	3.172	0.666
	0.827	1.124	1.146	1.316	1.218	1.264	0.987	0.677	2.984	1.092	1.14	1.297	1.198	1.234
	0.992	0.752	0.525	3.570	1.058	3.933	0.942	0.689	0.540	0.929	1.084	1.260	1.178	1.208
	2.887	0.479	1.035	1.442	1.500	0.854								

### 3 结果讨论

上述讨论均是以 2L2H2L 作为法布里-珀罗滤光片间隔层来构建长波通和短波通截止滤光片的，

消偏振截止滤光片的设计步骤可简单归纳为：

1) 选择一个适当的法布里-珀罗宽带滤光片，调节其间隔层级次和反射膜堆的反射率，寻找较宽截止区和透射带宽度的消偏振长波通或短波通截止滤光片的初始膜系结构；

2) 通过监控波长的选择，将初始膜系的消偏振过渡区调节到所需的波长；

3) 对初始膜系进行厚度优化，减小透射带波纹，并增加反射带宽度。

采用上述方法可以非常快捷地得到性能优良的消偏振截止滤光片。

同样也可采用 2H2L2H 作为法布里-珀罗滤光片的间隔层来构建截止滤光片，我们称这种结构为高、低折射率混合间隔层的消偏振截止滤光片。这种高、低折射率混合间隔层的法布里-珀罗滤光片在中心

波长主透射峰处也有一定的消偏振特性,采用  $2L2H2L\cdots$  或  $2H2L2H\cdots$  作为窄带滤光片的间隔层,可以适当调节  $s$  和  $p$  偏振分量的主透射峰位置,从而使两个偏振分量即使在倾斜入射时的中心波长仍然保持重叠<sup>[9]</sup>。这种效应在倾斜入射的波分复用窄带滤光片中颇有应用价值。但是,这种效应对诸如  $45^\circ$  大入射角的消偏振截止滤光片就无能为力了,它不足以使两个偏振分量的过渡边缘完全重合而构成长波通或短波通截止滤光片。

除了高、低折射率混合间隔层的消偏振截止滤光片外,采用单一材料的间隔层其实有时也可构建消偏振截止滤光片,例如  $G(HL6HLHL)^pA$  可构建长波通消偏振截止滤光片,而  $G(HL8HLHL)^pA$  和  $G(HLH10LHLHL)^pA$  可构建短波通截止滤光片。

这种消偏振截止滤光片的截止区和透射带虽比 Thelen 的设计有所改善,但实际使用时有时带宽尚嫌不够,如果用于光通信 C 波段和 L 波段,则绰绰有余了。如果要想进一步展宽截止区和透射带,通常有二种途径:第一是选用距法布里-珀罗滤光片中心波长主透射峰更远的消偏振区,这种方法对短波通截止滤光片是行之有效的,但对长波通截止滤光片会起到相反的作用。作为例子,初始膜系仍选为  $G(HLH2L2H2LHLHL)^pA$ ,但参考波长改为  $826\text{ nm}$ ,则短波通截止滤光片的截止区和透射带宽度均可增加到  $200\text{ nm}$ 。图 4 是优化膜系在  $45^\circ$  角入射时  $s$  和  $p$  偏振分量的分光透射率曲线,对应于透射率  $50\%$  处,它们的偏振分离约为  $1.2\text{ nm}$ 。可以看出,该截止滤光片在保持优良消偏振特性的同时,大大展宽了截止区和透射带。第二是调节滤光片间隔

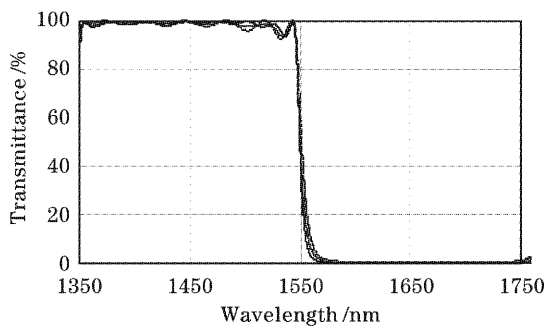


图 4 由初始膜系  $G(HLH2L2H2LHLHL)^pA$  ( $\lambda_m = 826\text{ nm}$ ) 优化的短波通消偏振截止滤光片在  $45^\circ$  角入射时的透射率曲线

Fig. 4 The transmittance curves for a short-wave-pass non-polarization edge filter from the initial design  $G(HLH2L2H2LHLHL)^pA$  with control wavelength  $826\text{ nm}$  at  $45^\circ$  incidence

层的级次和滤光片反射镜的反射率。为了便于比较,表 2 列出了单一材料间隔层的短波通截止滤光片的截止区和透射带宽度随间隔层级次和反射镜反射率的变化。

表 2  $1550\text{ nm}$  短波通截止滤光片的截止区和透射带宽度随膜系结构的变化

Table 2 Width of rejection and transmittance region with different filter structures for  $1550\text{ nm}$  short-wave-pass edge filter

Design and index ratio	Width of rejection / nm	Width of transmittance / nm
$G(HLH10LHLHL)^pA$ , $n_H/n_L = 2.28/1.425$	115	47
$G(HL10HLHL)^pA$ , $n_H/n_L = 2.28/1.425$	81	83
$G(HL8HLHL)^pA$ , $n_H/n_L = 2.28/1.425$	74	113
$G(HL8HLHL)^pA$ , $n_H/n_L = 2.28/1.56$	63	140

由表 2 可见,随着法布里-珀罗滤光片间隔层的级次降低,截止区宽度减小而透射带宽度增加;当法布里-珀罗滤光片因反射镜层数减少或高、低折射率比减小而使反射镜的反射率降低时,同样会使截止区宽度减小而透射带宽度增加。据此,可根据实际使用的带宽要求,适当调节间隔层级次和反射镜的反射率来满足所需的带宽。

通常,入射角对偏振特性的影响是极其敏感的,常规的消偏振截止滤光片只要改变入射角,消偏振特性就会遭到破坏<sup>[10]</sup>。然而,基于上述方法设计的消偏振截止滤光片对入射角变化很不灵敏,对上述  $45^\circ$  入射角设计的滤光片,当入射角变化从  $0^\circ \sim 60^\circ$  以上时,虽然截止过渡区和通带波纹略有变化,特别是入射角大于  $50^\circ$  时变化较大,但过渡区两个偏振分量的特性始终保持重合。这一特性为实际锥光束照明使用带来极大的方便。

由于滤光片经过厚度优化,故原则上它是一个非规则的任意厚度膜系,这给制备时的膜厚监控带来一定的困难。为此,需采用计算机辅助的膜厚监控技术或采用石英晶体膜厚监控系统进行厚度控制。

## 4 结 论

基于法布里-珀罗干涉滤光片来构建消偏振的长波通或短波通截止滤光片是一种既简单方便又性

能优良的新方法。虽然薄膜截止滤光片在倾斜入射时不可避免地会产生 s 和 p 偏振分量不可容忍的分离,但采用本文给出的设计方法,对 45° 入射角,实现了长波通或短波通截止滤光片的消偏振设计,偏振分离几乎为零。这种设计尤以 2L2H2L 或 2H2L2H 作为间隔层的膜系为好。主要缺点是截止区和透射带的宽度较窄,故需调节滤光片间隔层的级次和滤光片反射镜的反射率,或选用较宽截止区和透射带的消偏振区来弥补。此外,由于透射带次峰较大,故膜层厚度必须进行优化。用这种方法非常易于构建一个宽角度的消偏振长波通或短波通截止滤光片,在实际应用(特别是在光通信的应用中)中具有重要的实用价值。

### 参 考 文 献

- 1 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 (in Chinese)  
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
- 2 Kiyoshi Nosu, Hideki Ishio, Kunio Hashimoto. Multireflection optical multi/demultiplexer using interference filters[J]. *Electron. Lett.*, 1979, **15**(14): 414~415
- 3 Costich V R. Reduction of polarization effects in interference coatings[J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 866~870
- 4 Mahlein H F. Non-polarizing beam splitters[J]. *Optica Acta*, 1974, **21**(7): 577~583
- 5 Thelen A. Nonpolarizing interference films inside a glass cube[J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
- 6 Thelen A. Avoidance or enhancement of polarization in multilayers [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1980, **70**(1): 118~121
- 7 Thelen A. Nonpolarizing edge filters[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(3): 309~314
- 8 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin-film interference filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797 (in Chinese)  
顾培夫,白胜远,李海峰 等. 密集波分复用薄膜滤光片的设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 794~797
- 9 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Characteristics and improvement of dense wavelength division multiplexing thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380 (in Chinese)  
顾培夫,李海峰,章岳光 等. 用于倾斜入射的波分复用薄膜滤光片的特性及改进[J]. 光学学报, 2003, **23**(3): 377~380
- 10 Macleod H A. *Thin-Film Optical Filters* [M]. Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing, Third Edition, 2001. Chapter 8.4, 368~377