

文章编号 1004-924X(2016)增-0082-05

长波通截止滤光片的消偏振设计

包佳祺¹, 刘祥彪^{1,2}, 俞侃^{1*}

- (1. 文华学院 信息科学与技术学部, 湖北 武汉 430074;
2. 武汉墨光科技有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:常规结构的薄膜干涉截止滤光片在倾斜入射时由于其 P 和 S 偏振光会产生明显的波长分离现象, 导致其截止边带会出现严重的偏振相关损耗。本文基于 TiO₂ 和 SiO₂ 两种常规膜料设计了一种长波通干涉截止滤光片的消偏振膜系结构。通过在高折率间隔层的两侧添加不同厚度的低折射率材料作为匹配层, 构建膜系评价函数并利用计算机自动寻优, 得到了最优的膜系结构 $(\frac{H}{2}4L2H4L\frac{H}{2})^{15}$ 。该截止滤光片在 45° 倾斜入射时 3 dB 位置的截止边带偏振波长分离小于 2 nm 通带透射率超过 92%, 偏振敏感性得到了有效的抑制。利用该算法和膜系结构可以较为容易地设计和制备消偏振的长波通干涉截止滤光片。

关键词:薄膜; 截止滤光片; 长波通; 消偏振

中图分类号: O484 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0082

Design of non-polarization long-wave-pass edge filter

BAO Jia-qi¹, LIU Xiang-biao^{1,2}, YU Kan^{1*}

- (1. Department of Information Science and Technology, Wenhua College, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Asdoptics Science and Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

* Corresponding author, E-mail: dunyiyu@hust.edu.cn

Abstract: An oblique incidence on the conventional film interference cut-off filter will result in an obvious phenomenon of wavelength separation due to its P and S polarized lights, thus leading to serious polarization dependent loss in the cut-off band. Based on two ordinary film materials TiO₂ and SiO₂, this paper designs a depolarized stack structure for the long wave-pass interference cut-off filter through adding low refractive material with different thicknesses as matching layers above and under the high refractive layer. The algorithm for stack calculation was proposed and operated on a computer, thereby obtaining an optimal stack structure of $(\frac{H}{2}4L2H4L\frac{H}{2})^{15}$. The stack enables the cut-off filter to achieve a polarization wavelength separation less than 2 nm in the cut-off sideband and a band-pass transmittance over 92% when the filter is in the position of 3 dB with an oblique incidence angel of 45°. Using the algorithm and the stack, the depolarized long-wave-pass interference edge filter can be easily designed and fabricated.

Key words: thin film; edge filter; long-wave-pass; non-polarization

收稿日期: 2016-05-11; 修订日期: 2016-06-12.

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划资助项目 (No. B2015191); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划资助项目 (No. T201431, No. T201633)

1 引言

薄膜干涉截止滤光片由于具有插入损耗低、温度不敏感和隔离度高等诸多优点,在光通信领域得到了广泛的应用^[1]。当薄膜干涉截止滤光片处于倾斜入射时,由于其 P 偏振光和 S 偏振的等效光学厚度和相位厚度的变化,不同偏振光会呈现不一样的光谱特性^[2-3]。该现象使得不同偏振光在截止边带处出现明显的波长分离,从而使平均光的截止边带产生严重的偏振相关损耗并降低了隔离度^[4-5]。在薄膜滤光片消偏振技术的早期研究中,Gu 等人利用两种折射率材料组成间隔层来抑制薄膜滤光片的偏振敏感性^[6],YU 等人和王羽中等人在理论上探讨了设计低偏振带通滤光片膜系间隔层等效折射率的算法^[7-8],Chen 等人利用非规整膜系设计了波长调谐范围在 10 nm 的可调谐滤光片^[9],Thelen 利用三种不同折射率材料设计了带宽偏振不敏感的带通薄膜滤光片^[10]。但是,研究对象的入射角度一般小于 20°,且理论设计的膜系折射率数值往往在实际镀膜材料库中找不到对应的材料。因此,利用现有实际可使用的镀膜材料设计出一能满足大角度(45°)倾斜入射状态下的消偏振干涉截止滤光片膜系有较大的研究价值。

常规的干涉截止滤光片的膜系结构研究发现,大角度倾斜入射时其光谱会由于偏振光截止边带分离现象出现次峰,导致了严重的偏振相关损耗。本文基于两种常规的镀膜材料设计了一种长波通干涉截止薄膜滤光片的消偏振膜系结构。该膜系结构在高折射率间隔层材料的两侧同时添加低折射率材料作为匹配层,有效地降低了大角度倾斜入射时产生的偏振光截止边带分离现象,从而设计出了能用于 45°倾斜入射的长波通干涉截止滤光片的消偏振膜系。

2 截止滤光片的偏振特性

基于薄膜光学理论,常规的长波通干涉截止滤光片的典型膜系结构为:

$$\left(\frac{H}{2} L \frac{H}{2} \right)^m. \quad (1)$$

膜系(1)中的 H 和 L 分别表示该结构中的高、低折射率膜层,其光学厚度均为四分之一中心波长^[11], m 是膜堆的重复级次。当该膜系的中心波长在 840 nm、重复级次 $m = 15$ 和使用 TiO_2 (折射率 $n_H = 2.3$) 和 SiO_2 (折射率 $n_L = 1.46$)^[12] 作为高、低折射率材料时,图 1 显示的是该膜系在正入射时的透射率曲线。如图 1 所示,其透射率曲线是一个典型的长波通滤光片,其截止边带范围为 30 nm(970~1 000 nm),在 1 000~1 040 nm 的通带起始波长范围处纹波稍大,但是由于 P 偏振光和 S 偏振光的折射率是一致的,因此截止边带没有发生分离现象,该膜系经过进一步优化是可以使用的。

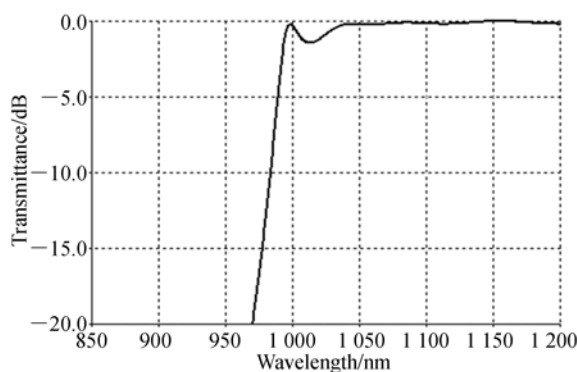


图 1 膜系(1)在正入射时的透射率曲线

Fig.1 Transmittance curve of stack (1) at normal incident

当膜系(1)处于 45°倾斜入射时,其透射率曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看到,P 偏振光和 S 偏振光的截止边带在倾斜入射时由于等效光学厚度的降低均向短波方向漂移。同时,由于不同偏振光的光学导纳在倾斜入射状态下不再相等,因此 P 偏振光和 S 偏振光向短波方向的漂移量不等,由此产生了透射和反射波段的偏振分离,从而导致平均光的截止边带出现了明显的次峰并产生了展宽,导致隔离度的降低和严重的偏振相关损耗。如图 2 所示,其平均光的截止边带范围达到 90 nm(860~950 nm),为正入射时的 3 倍。同时在 3 dB 处 P 偏振光和 S 偏振光的波长分离度超过了 50 nm,产生了极大的偏振敏感性。在 870 nm 附近截止边带出现了明显的次峰,产生的偏振相关损耗大于 4 dB。因此,大角度入射时常规膜系的长波通干涉截止滤光片产生的偏振敏感性

严重地劣化了其光谱特性,制约了它在倾斜入射状态下的使用。

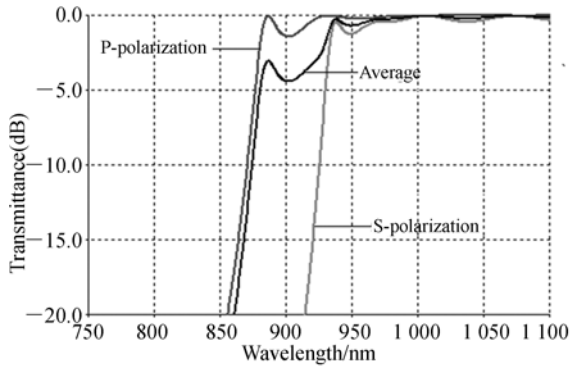


图 2 膜系(1)在 45°时的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance curves of stack (1) at incident angle of 45°

3 消偏振设计

在薄膜干涉截止滤光片处于倾斜入射时,当单纯使用高折射率材料作为膜系间隔层时,其 P 偏振光向短波方向的漂移量是小于 S 偏振光的;而当单纯使用低折射率材料作为膜系间隔层时,其 P 偏振光向短波方向的漂移量是大于 S 偏振光的^[13]。因此,通过在高折射率间隔层材料外添加低折射率材料作为匹配层,就可以有效的调整间隔层的等效折射率位于高、低折射率之间,从而可以有效地降低 P 偏振光和 S 偏振光在倾斜入射状态下的波长分离度。对于任意一种折射率为 n 的镀膜材料,当倾斜入射时,其 P 偏振光的折射率为 $n_p = n/\cos \theta$,而 S 偏振光的折射率为 $n_s = n\cos \theta$ 。根据薄膜矩阵理论,可算出倾斜入射时两个偏振光在 3 dB 处的对应截止波长,因此不同偏振光的截止边带分离度可以定义为:

$$CWL = |\lambda_p - \lambda_s|. \quad (2)$$

为了简化计算和减少膜层数,这里通过在高折射率材料外添加两层低折射率材料作为匹配层的方式构建了如式(3)所示的长波通干涉截止滤光片的膜系结构:

$$\left(\frac{H}{2} s_1 L s_2 H s_3 L \frac{H}{2} \right)^m. \quad (3)$$

在膜系(3)中,高、低折射率材料仍为 TiO_2 和 SiO_2 ,参考中心波长为 720 nm。因此,其透射

特性将由膜层重复级次 m ,间隔层和匹配层对应的干涉级次 s_i 来决定。因此,该膜系的特征参数可以被描述为集合 $\{m, s_1, s_2, s_3\}$ 。对于一个四分之一中心波长的规整膜系结构,将同为正整数的 m 和 s_i 作为自变量,故在总膜层数有限的条件下其参数范围是有限的: $m \in (10 - 16)$, $s_i \in (1 - 10)$ 。这样可以通过在规定范围类改变这些自变量的数值,利用计算机寻优得到最合适解。该长波通干涉截止滤光片的限制条件为:入射角度为 45°,截止边带带宽容限 $\sigma = 10 \text{ nm}$,3 dB 处的偏振光波长分离度容限为 $\mu = 5 \text{ nm}$ 。因此,该长波通干涉截止滤光片需要满足如下的约束条件:

$$BW_{\text{cutoff}} \leq \sigma, CWL \leq \mu. \quad (4)$$

在约束条件下,集合 $\{m, s_1, s_2, s_3\}$ 的取值范围是有限的,因此本文构建了一个评价函数 $\varphi\{m, s_1, s_2, s_3\}$ 来衡量满足限制条件的膜系结构参数集合,如式(5)所示。这样寻优可以描述为在限制条件下集合特征参数评价函数的最小化。

$$\varphi\{m, s_1, s_2, s_3\} = \bar{\omega}\sigma(10\sigma)^2 + \bar{\omega}\mu(10\mu)^2. \quad (5)$$

式中: $\bar{\omega}\sigma$ 和 $\bar{\omega}\mu$ 分别为截止边带带宽和 3 dB 偏振光波长分离度的权重因子,取值均为 1。寻优的参数集合 $\{m, s_1, s_2, s_3\}$ 的初始值为 $\{10, 1, 1, 1\}$,随后计算机在特征参数取值范围内通过改变不同特征参数的数值来获得满足约束条件的膜系结构参数集合。通过评价函数分析将满足约束指标且评价函数数值最小的膜系特征参数保存在可能解的集合 L 中作为设计结果输出。由此得到 45°倾斜入射时最优的长波通干涉截止滤光片的膜系结构为:

$$\left[\frac{H}{2} 4L2 H4L \frac{H}{2} \right]^{15}. \quad (6)$$

4 结果分析

图 3 为设计的膜系(6)在 45°倾斜入射时的透射率曲线。如图 3 所示,P 偏振光和 S 偏振光的截止边带带宽小于 8 nm,截 3 dB 处的偏振光波长分离小于 2 nm,无论是截止度还是偏振分离度均远远小于膜系(1)。因此,截止边带没有产生明显的次峰,偏振敏感性得到了明显的抑制。

该结果体现了较好的大角度消偏振特性,但是该长波通干涉截止滤光片在通带的 1 100 nm 处纹波稍大(略大于 1.5 dB),因此还可以进一步

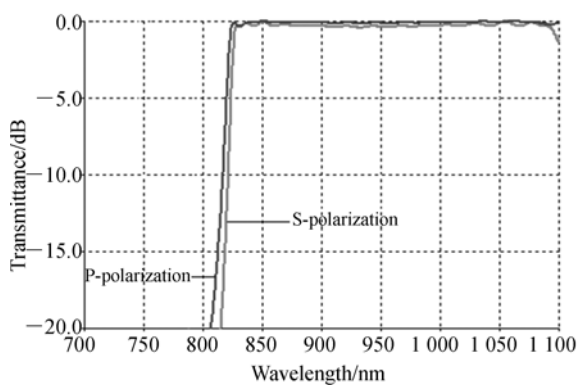


图 3 膜系(6)在 45°时的透射率曲线

Fig. 3 Transmittance curves of stack (6) at incident angle of 45°

优化以消除纹波,实现通带平整。传统的 needle 法是通过改变每一层膜层的厚度来得到更为理想的光谱特性,因此本文利用 TFCal 光学薄膜软件中的 needle 法对消偏振膜系(6)进行优化,结果如图 4 所示。该长波通干涉截止滤光片的消偏振膜系具有较宽的平坦通带(850~1 100 nm)和陡直的截止边带(810~830 nm),通带范围内的纹波和插损均小于 0.5 dB,偏振相关损耗低于 1 dB,实现了 45°较大倾斜入射状态下的消偏振设计。

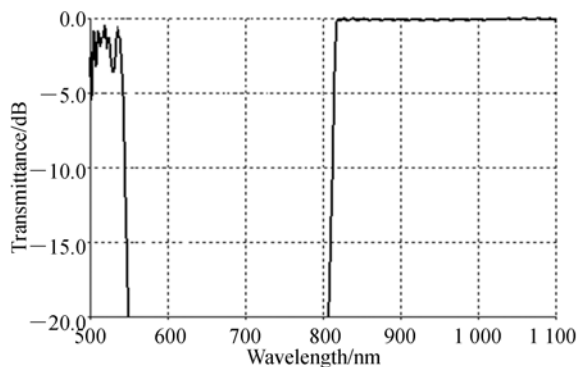


图 4 针法优化后膜系(6)在 45°时的透射率曲线

Fig. 4 Transmittance curves of stack (6) optimized by needle method at 45° oblique incidence

参考文献:

- [1] 顾培夫,白胜元,李海峰,等. 密集波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. 光学学报,2002,22(7): 794-797.
GU P F, BAI SH Y, LI H F, *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters[J]. *Acta Opti-*

滤光片制备时采用德国莱宝 APS 真空镀膜机对设计的膜系进行了镀制,由于设计膜系为规整膜系,因此薄膜沉积的精度要求只用设备的反射式监控方式即可。制备后采用 Lambda90 近红外分光光度计对制备的滤光片进行了 45°倾斜入射测试,测试的光谱曲线如图 5 所示。实验结果表明:该型干涉截止长波通滤光片达到了设计要求,截止边带没有产生明显的偏振次峰,通带的透射率能达到 92%以上。

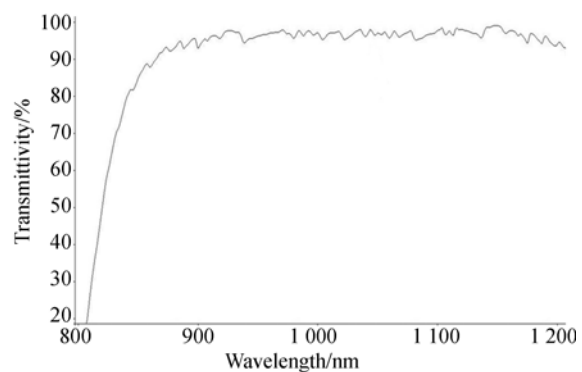


图 5 滤光片的测试光谱

Fig. 5 Measured spectrum of edge filter

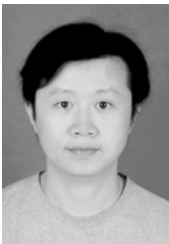
5 结 论

本文提出了一种新的消偏振长波通干涉截止滤光片的膜系结构,通过在高折射率间隔层的两侧添加不同厚度的低折射率材料作为匹配层,构建了评价函数,利用计算机自动寻优得到了满足 45°倾斜入射条件下消偏振设计的合理解。通过 needle 法优化进一步改善了长波通消偏振截止滤光片的通带光谱特性。实验结果显示,它在 45°倾斜入射状态下的通带透射率超过 92%,通带范围为 850~1 200 nm,截止边带的偏振相关损耗低于 1 dB,偏振敏感性得到了有效的抑制。

- ca Sinica*, 2002, 22(7): 794-797. (in Chinese)
[2] 俞侃,包佳祺,黄德修,等. 斜入射滤光片的偏振相关损耗抑制技术[J]. 光电工程,2010,37(1): 101-105.
YU K, BAO J Q, HUANG D X, *et al.*. Restraining technology on the polarization dependent loss of the thin-film filter in oblique incidence[J]. *Opto-*

- Electronic Engineering*, 2010, 37(1): 101-105. (in Chinese)
- [3] ANTONIO J E, CASTILLO A, MAY D A. Tunable multimode-interference bandpass fiber filter[J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(3): 324-326.
- [4] XIE J, CHEN Y P, LU W J, *et al.*. Tunable optical bandpass filter with multiple flat-top bands in nanostructured resonators[J]. *Opt. Eng.*, 2011, 50(3): 103-108.
- [5] YU K, LIU Y Y, BAO J Q, *et al.*. Design of angle-tuned wedge narrowband thin film filter [J]. *Opt. Laser. Technol.*, 2014, 56(3): 71-75.
- [6] GU P F, CHEN H X, ZHANG Y G, *et al.*. Wavelength-division multiplexed thin-film filters used in tilted incident angles of light [J]. *Appl Opt.*, 2004, 43(10): 2066-2070.
- [7] YU K, LIU Y Y, BAO J Q, *et al.*. Design of angle-tuned wedge narrowband thin film filter [J]. *Opt. Laser. Technol.*, 2014, 56(3): 71-75.
- [8] 王翀, 罗斌, 潘炜. 角度调谐滤光片偏振控制的间隔层折射率寻优算法研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(5): 707-711.
WANG C, LUO B, PAN W. Algorithm of seeking precise refractive index value of spacer for controlling angle tuned filter' polarization characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 707-711. (in Chinese)
- [9] CHEN X M, MA J X, YANG Y T. Design of 50G nonpolarizing dense wavelength division multiplexer angle-tuning bandpass filter [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(28): 5271-5275.
- [10] THELEN A. Non-polarizing edge filters[J]. *Appl. Opt.*, 1984, 23(20): 3541-3543.
- [11] YU K, YIN J J, BAO J Q, *et al.*. Design of non-polarization angle-tuned narrowband thin film filter [J]. *Optik*, 2014, 125(1): 397-400.
- [12] 刘华松, 姜承慧, 王利栓, 等. 热处理对离子束溅射 Ta₂O₅ 薄膜特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10): 2645-2651.
LIU H S, JIANG CH H, WANG L SH, *et al.*. Effects of annealing on properties of Ta₂O₅ thin films deposited by ion beam sputtering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10): 2645-2651. (in Chinese)
- [13] 俞侃, 包佳祺. 基于等效层理论的薄膜滤光片中心波长消偏振膜系设计[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 45-49.
YU K, BAO J Q. Design of thin film filter central wavelength depolarization stack based on equivalent layers theory [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 45-49. (in Chinese)

作者简介:



包佳祺(1980—),男,浙江宁波人,硕士,讲师,2006年于长春理工大学获得硕士学位,主要从事光学系统设计和薄膜光学等方面的研究。E-mail: baojiaqi@163.com

通讯作者:



俞侃(1978—),男,浙江宁波人,博士,副教授,2009年于华中科技大学获得博士学位,现为文华学院信息学部副主任,主要从事薄膜光学和LED照明技术等方面的研究。E-mail: dunyi@hust.edu.cn