

文章编号: 0253-2239(2010)01-0214-04

# 角度调谐滤光片带宽消偏振研究

俞 侃<sup>1,2</sup> 黄德修<sup>1,2</sup> 樊 玲<sup>3</sup> 包佳祺<sup>1</sup> 吴长发<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 华中科技大学文华学院, 湖北 武汉 430074; <sup>2</sup> 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)  
<sup>3</sup> 北京邮电大学民族教育学院, 北京 100876)

**摘要** 倾斜入射时薄膜窄带滤光片的 s 和 p 偏振光的带宽会随着入射角度的增大出现分离, 限制了滤光片的调谐范围。分析了偏振光带宽分离现象出现的原因和其与滤光片镜层膜系结构的关系, 并得到了消除偏振光带宽分离现象的方法。根据该方法对前期设计的 100 GHz 密集波分复用(DWDM)系统四腔角度调谐窄带滤光片进行了改进, 结果表明, 该方法能有效的解决偏振光带宽的分离问题, 扩大调谐范围。

**关键词** 薄膜光学; 窄带滤光片; 倾斜入射; 角度调谐; 消偏振

**中图分类号** O484 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0214

## Research on Bandwidth Depolarization of the Angle-Tuning Filter

Yu Kan<sup>1,2</sup> Huang Dexiu<sup>1,2</sup> Fan Ling<sup>3</sup> Bao Jiaqi<sup>1</sup> Wu Changfa<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Wenhua College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>2</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>3</sup> School of Ethnic Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** The bandwidth of s-polarization and p-polarization will separate when the narrow-band thin-film filter is in tilted incidence, which will limit the tunable range of the filter. The phenomenon of the polarization bandwidth separation and its relation to the mirror layers of the filter are analyzed. A method about eliminating the polarization bandwidth separation is also presented. According to this method, a former designed 100 GHz dense wavelength division multiplexing four-cavities angle-tuned narrow-band filter is improved. The simulation results prove it can eliminate the polarization bandwidth separation and enlarge the tunable range.

**Key words** thin film optics; narrow-band filter; tilted incidence; angle tuning; depolarization

## 1 引 言

薄膜干涉滤光片具有通带窄、插入损耗低和温度稳定性好等诸多优异的特性<sup>[1]</sup>, 所以被广泛应用于密集波分复用(DWDM)系统中。随着入射角度的增加, 滤光片的透射通带会向短波方向移动。依此原理设计的可调滤光片, 由于结构简单、成本低, 受到了人们的重视<sup>[2~4]</sup>。但倾斜入射同时会带来偏振光中心波长分离和偏振光带宽分离等问题, 产生较大的偏振相关损耗, 限制了可调谐范围。近年来, 对角度调谐滤光片的消偏振设计主要集中在改善偏振光的中心波长分离问题上<sup>[5,6]</sup>, 其方法都是通过调节滤光片间隔层的等效折射率, 使偏振光的中心波长在一定角度范围内实现对准。而对于倾斜入射时窄带滤光片的偏振带宽分离特性却少有研究。本文从薄膜矩阵理论

出发, 探讨了倾斜入射时偏振光带宽分离的原因, 并提出了解决方法。通过计算采用 3 种不同折射率材料构成滤光片的反射镜层, 能有效解决偏振光带宽的分离问题。在与调节滤光片间隔层等效折射率的方法结合后, 能够实现角度调谐窄带滤光片的完全消偏振设计, 使之具备更大的可调谐范围。

## 2 偏振光带宽分离现象

多腔窄带滤光片的基本结构为高/低折射率膜层相间, 每层膜的厚度都是正入射中心透射波长的四分之一整数倍<sup>[7]</sup>。在前期工作中, 我们设计并制备了一种能够实现偏振光中心波长对准的 100 GHz 信道间隔的四腔角度调谐滤光片<sup>[8]</sup>, 膜系结构如(1)式所示:

收稿日期: 2009-02-23; 收到修改稿日期: 2009-03-11

作者简介: 俞 侃(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光通信技术和器件等方面的研究。E-mail: onlyfish@126.com

$$G/\left[\frac{(\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7 \text{L}(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^8 \text{L}}{(\text{HL})^8 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^8 \text{L}(\text{HL})^7 2\text{L}3\text{H}4\text{L}3\text{H}2\text{L}(\text{LH})^7}\right]/A, \quad (1)$$

其中 H 和 L 分别表示高/低折射率膜层( $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ )<sup>[9]</sup>。

该滤光片在入射角  $\theta$  从 0 调至  $15^\circ$  时,中心波长能从 1563 nm 移至 1545 nm 左右。而且在整个调

谐范围内通带和截止带的带宽指标都能满足 100 GHz DWDM 系统的要求。在对透射光模场进行了整形后得到的测试结果如图 1 所示<sup>[10]</sup>。

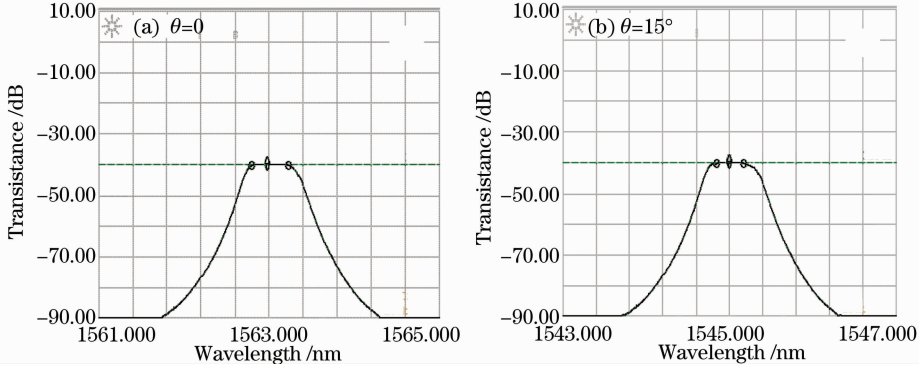


图 1 膜系(1)的测量光谱。

Fig. 1 Measured spectrum of the stack (1)

随着入射角度的进一步增大,由于偏振光带宽的分离,使得平均光的带宽已不能满足系统的要求,出现了明显的展宽。如图 2 所示是计算得到的该膜系在  $25^\circ$  倾斜入射下的透射光谱。由图可知,尽管偏振光的中心波长仍实现对准,但是由于 s 和 p 偏振光的带宽分离,使得平均光通带减小、截止带展宽,同时导致产生很大的偏振相关损耗。

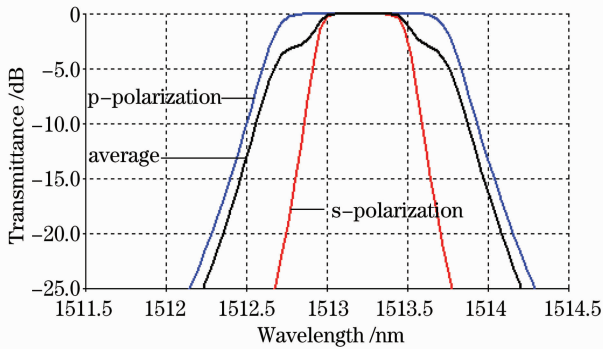


图 2 膜系(1)时的透射曲线

Fig. 2 Transmittance curves of the stack (1)

### 3 理论分析

在倾斜入射时,由于 s 偏振光的反射率是逐步高于 p 偏振光反射率的,因此 s 偏振光的带宽会逐步小于 p 光。要解决这一问题,就必须想办法使得两个偏振光的反射率大小相等,这样在倾斜入射时两者的带宽就不会产生分离。

基片和薄膜组合的特征矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^l \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{l+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

令  $P = Y/\eta_0$ , 又  $Y = C/B$ , 所以可得

$$P = C/B\eta_0, \quad (3)$$

$$r = \frac{1-P}{1+P} = \frac{1-C/B\eta_0}{1+C/B\eta_0}, \quad (4)$$

$$R = rr^* = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C}\right)^*. \quad (5)$$

对于 F-P 腔结构的带通薄膜滤波器而言,其反射镜层的膜层数为偶数。因此,其镜层结构的特征矩阵为实数。 $P$  可以表示为

$$P = \begin{pmatrix} \eta_{l-1} & \eta_{l-3} & \dots & \eta_3 & \eta_1 \\ \eta_l & \eta_{l-2} & & \eta_4 & \eta_2 \end{pmatrix} \frac{\eta_s}{\eta_0}. \quad (6)$$

从(6)式可以分解出:

$$U = \begin{pmatrix} n_{l-1} & n_{l-3} & \dots & n_3 & n_1 \\ n_l & n_{l-2} & & n_4 & n_2 \end{pmatrix} \frac{n_s}{n_0}, \quad (7)$$

$$W = \begin{pmatrix} \cos \theta_{l-1} & \cos \theta_{l-3} & \dots & \cos \theta_3 & \cos \theta_1 \\ \cos \theta_l & \cos \theta_{l-2} & & \cos \theta_4 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_0}. \quad (8)$$

仿照修正导纳在倾斜入射时的定义式  $\eta_p = N/\cos \theta$  和  $\eta_s = N \cos \theta$ , 可以写出

$$P_p = U/W, \quad (9)$$

$$P_s = UW. \quad (10)$$

所以可以得到

$$R_p = \left(\frac{1-U/W}{1+U/W}\right)^2, \quad (11)$$

$$R_s = \left(\frac{1-UW}{1+UW}\right)^2. \quad (12)$$

从推导得出的(11)式和(12)式可以看出,当  $U$  为实数且  $W = 1$  时,有  $R_p = R_s$  成立。此时两个偏振光的反射率是相等的,能实现带宽的偏振不敏感性。因此要实现的角度调谐滤光片偏振带宽分离的抑制,就必须从滤光片的反射镜层结构着手,通过添加不同折射率材料来调节对不同偏振模式的反射率,从而实现消偏振。为了使设计能尽量简化,选用 3 种折射率材料构成滤光片的反射镜层。

## 4 镜层结构设计

设膜系的镜层结构为:  $A/(HMLM)^m/G$ , 其中  $H, M$  和  $L$  都是四分之一光学厚度膜层,分别代表高/中/低三种折射率材料膜层,在结构上仍保持高低相间。 $m = 8$  为镜层参数,设入射角为  $\theta_0 = 25^\circ$ , 中心波长设在  $1563 \text{ nm}$ 。根据(7)式有

$$U = \left( \frac{n_{l-1}}{n_l} \frac{n_{l-3}}{n_{l-2}} \dots \frac{n_3}{n_4} \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{n_s}{n_0} = \left( \frac{n_H}{n_M} \frac{n_L}{n_M} \right)^{2m} \frac{n_s}{n_0} = \frac{n_H^{2m} n_L^{2m} n_s}{n_0 n_M^{4m}}. \quad (13)$$

可令  $U = k$ ,  $k$  为一实数。同时根据(8)式有

$$W = \left( \frac{\cos \theta_{l-1}}{\cos \theta_l} \frac{\cos \theta_{l-3}}{\cos \theta_{l-2}} \dots \frac{\cos \theta_3}{\cos \theta_4} \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} \right)^2 \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_0} = \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_0} \left( \frac{\cos \theta_H}{\cos \theta_M} \frac{\cos \theta_L}{\cos \theta_M} \right)^{2m}. \quad (14)$$

令  $\sin \theta_0 = h$ , 又根据 Snell 定律可以推导出

$$W = \frac{\cos \theta_s (1 - h^2 n_0^2 n_H^{-2})^m (1 - h^2 n_0^2 n_L^{-2})^m}{(1 - h^2 n_0^2 n_M^{-2})^{2m} \cos \theta_0}. \quad (15)$$

令  $W = 1$ 。由推导的(13)式和(15)式,可以看出,当这 3 种折射率材料确定了某一种后,可以求解出其余两者。首先确定的是价格最低性能最稳定的

低折射率材料  $L$  为  $\text{SiO}_2$ , 即  $n_L = 1.46$ 。联立(13)式和(15)式就可以解出  $n_M$  和  $n_H$ 。计算时  $k$  可取为 30。如图 3 所示,曲线 1 为  $U$  的关系式曲线,曲线 2 为  $W$  的关系式曲线。两者的交点为能实现消偏振的镜层两种折射率值。

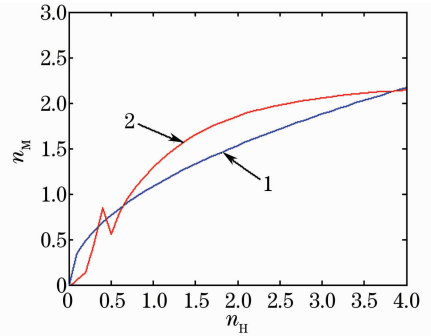


图 3 根据方程式  $U, W$  推导的  $n_M$  和  $n_H$  的关系曲线

Fig. 3 Relation curve of the  $n_M$  and  $n_H$  according to the equation  $U$  and  $W$

如图所示两条曲线的交点有 4 条,前 3 个交点由于其高折射率膜料的折射率数值小于 1,所以是无效的解。从第 4 个交点可以求出构成反射镜层的另外两种材料的折射率的值分别为  $n_M = 2.03$  和  $n_H = 3.88$ 。经查询折射率材料库,与之非常接近的折射率材料分别为  $\text{ZnO}$  和  $\text{Si}$ 。

## 5 膜系验证

在通过计算得到了能使得倾斜入射时偏振光反射率一致的 3 种折射率材料后,将其作为反射镜层应用于类似膜系(1)的一个四腔结构窄带滤光片中,膜系结构如(16)式所示:

$$G / \left[ \frac{(HMLM)^7 H4LH(MLMH)^7 L(HMLM)^8 H4LH(MLMH)^8 L}{(HMLM)^8 H4LH(MLMH)^8 L(HMLM)^7 H4LH(MLMH)^7} \right] / A. \quad (16)$$

该膜系的正入射中心波长与膜系(1)一样设在  $1563 \text{ nm}$ 。经过计算得到了如图 4 所示的处于  $25^\circ$  倾斜入射时的透射率曲线。

如图 4 所示,该膜系在  $25^\circ$  倾斜入射时,由于  $s$  和  $p$  偏正光的反射率基本一致,所以透射的偏振光带宽没有产生很大分离,两者的带宽基本相等。仅仅是由于没有调节间隔层的等效折射率导致偏振光的中心波长出现了较大的分离。计算结果表明,通过添加不同折射率材料构成间隔层,使  $s$  和  $p$  偏振光的反射率在一定倾斜入射角度内趋于一致,能有效地解决偏振光带宽的分离问题。

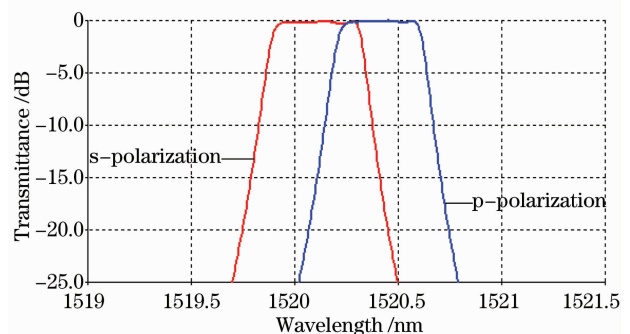


图 4 膜系(16)的透射曲线

Fig. 4 Transmittance curves of the stack(16)

进一步根据文献[7]中所述,前期设计中运用的算法对滤光片的间隔层结构做改进后,可以同时实现 25° 倾斜入射下偏振光中心波长的对准,从而获

得完全消偏振的角度调谐窄带滤光片。具体的膜系结构如膜系(17)式所示:

$$G/\left[\frac{(HMLM)^7 M_3 H_6 L_3 HM(MLMH)^7 L(HMLM)^8 M_3 H_6 L_3 HM(MLMH)^8 L}{(HMLM)^8 M_3 H_6 L_3 HM(MLMH)^8 L(HMLM)^7 M_3 H_6 L_3 HM(MLMH)^7}\right]/A. \quad (17)$$

经过对该膜系进行计算,可以得到如图 5 所示的透射滤波曲线。

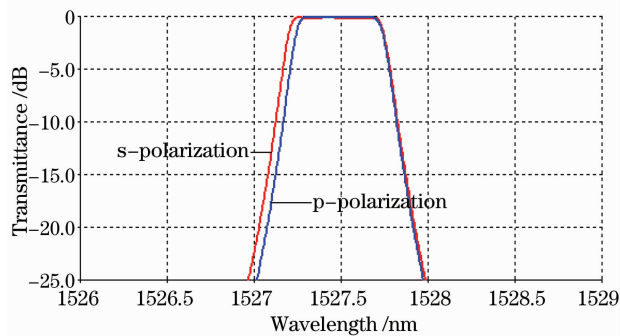


图 5 膜系(17)的透射曲线

Fig. 5 Transmittance curves of the stack(17)

如图所示,在采用了计算得到的镜层结构和调整了间隔层结构后,s 和 p 偏振光的中心波长在倾斜入射时也同时实现了对准。从正入射到 25° 倾斜入射的整个调谐范围内,中心波长能从 1563 nm 移至 1527.5 nm,在整个调谐过程中滤光片的偏振光的带宽和中心波长都没有出现较大的分离,基本实现了完全的消偏振。由于设计反射镜层时,是按镜层参数  $m = 8$  来设计的,而该四腔膜系中由于考虑到抑制纹波的需要,有两个对称的腔采了  $m = 7$  的镜层参数,因此最终的 s 和 p 偏振光的反射率没有做到完全一致,表现在 25° 倾斜入射下 s 光的带宽略微大于 p 光一些,但是仍能证明前面消偏振方法的正确性。

## 6 结 论

窄带滤光片都是用于正入射场合,在倾斜入射时其偏振光的中心波长和带宽都会产生明显的分离。传统的角度调谐滤光片消偏振方法是通过调节间隔层来实现中心波长的对准,但是这只是解决了滤光片偏振敏感性的一个方面。偏振光带宽的分离会影响平均光带宽的稳定性,限制调谐角度的进一步增大。从薄膜矩阵理论中推导了 s 和 p 偏振光的反射率与膜层折射率的关系,通过添加 3 种不同折射率材料构成滤光片的反射镜层,有效的实现了偏

振光反射率的一致,降低了偏振光带宽的分离。对于角度调谐滤光片以及多层薄膜的消偏振设计,具有较高的理论指导意义。

## 参 考 文 献

- 1 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 794~797  
顾培夫, 白胜元, 李海峰等. 密集型波分复用薄膜干涉滤光片的设计[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7): 794~797
- 2 Yoshihiko Suemura, Aho Tajima, Naoya Henmi *et al.*. An adaptive wavelength tunable optical filter employing an angle-tuned interference filter and an intelligent digital controller[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 1048~1055
- 3 Anatoly Frenkel, Chinlon. Angle-tuned etalon filters for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed systems[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **4**(7): 615~624
- 4 Lawrence Domash, Ming Wu, Nikolay Nemchuk *et al.*. Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(1): 126~135
- 5 Gu Peifu, Li Haifeng, Zhang Yueguang *et al.*. Characteristics and improvement of DWDM thin film filters used in tilted incidence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 377~380  
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
- 6 Wang Chong, Luo Bin, Pan Wei. 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  
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[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 707~711
- 7 Yang Minghong, Liu Jinsong, Zhang Bo *et al.*. Optimal design of narrowband filter with genetic arithmetic[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 57~59  
杨明红, 刘劲松, 张 波等. 基于遗传算法的窄带滤光片的优化设计[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 57~59
- 8 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu. Optimal design and arithmetic on the stack of the angle-tuned filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1287~1291  
俞 侃, 刘 文, 黄德修. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1287~1291
- 9 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. A novel reconfigurable optical add-drop multiplexer based on thin-film filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1247~1251  
俞 侃, 刘 文, 黄德修等. 基于薄膜滤光片的新型可重构光分插复用器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1247~1251
- 10 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Design and research of facular-shaping on the angle-tuned filter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1375~1379  
俞 侃, 刘 文, 黄德修等. 角度调谐滤光片光斑整形设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1375~1379