

文章编号: 0258-7025(2007)09-1287-05

角度调谐滤光片的膜系优化设计算法

俞侃^{1,2}, 刘文^{1,3}, 黄德修^{1,2}, 黄华茂^{1,2}

(¹ 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)
³ 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 根据薄膜窄带滤光片在倾斜入射时的特性,通过改进间隔层膜系结构调整其等效折射率,可以设计出具有稳定透射峰值和带宽的角度调谐窄带滤光片。倾斜入射时窄带滤光片透射光的S和P偏振分量的中心波长会随着入射角度的增大出现分离现象,产生较大的偏振相关损耗。分析了偏振分离现象出现的原因和其与滤光片等效折射率的关系,提出了消除偏振分离现象的方法。根据薄膜矩阵理论建立了分析模型并提出了一种该可调滤光片的设计方法,根据开发的程序优化设计并制备了一组用于100 GHz密集波分复用(DWDM)系统的低偏振相关损耗的四腔角度调谐窄带滤光片,实验结果证明其满足设计要求并有接近20 nm的可调范围。

关键词 薄膜;窄带滤光片;优化设计;倾斜入射

中图分类号 O 484 文献标识码 A

Optimal Design and Arithmetic on Stack of Angle-Tuned Filter

YU Kan^{1,2}, LIU Wen^{1,3}, HUANG De-xiu^{1,2}, HUANG Hua-mao^{1,2}

¹Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China
²School of Optoelectronic Science and Engineering,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China
³Wuhan Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract According to the characteristics of the thin film narrowband filter, the angle-tuned filter with stable transmission peak and bandwidth can be designed by amelioration of the structure of the stack and adjust of effective refractive index of the spacer. At the same time, the central wavelength of S-polarization and P-polarization will separate when the filter is tilted, which causes the polarization dependent loss. The phenomena of polarization separation and its relationship to the effective refractive index of the filter are analyzed. A method about eliminating the polarization separation is presented. Theoretical analysis model is built up and an angle-tuned filter design method is provided based on the theory of thin film matrix. A 100 GHz dense wavelength division multiplexing (DWDM) four-cavity angle-tuned narrowband filter with low polarization dependent loss is optimized and fabricated based on the programme. The experimental results prove it meets the demand of design and its tunable range is about 20 nm.

Key words thin films; narrowband filter; optimal design; tilted incidence

1 引言

在密集波分复用(DWDM)系统中,薄膜干涉滤光片具有通带窄、插入损耗低、温度稳定性好等诸多优异的特性^[1],应用十分广泛。在倾斜入射时,滤光片的透射通带和峰值会向短波方向移动,据此原理

设计的可调滤光片结构简单、成本低^[2~4]。但倾斜入射同时会带来偏振分离和偏振相关损耗增大等问题。顾培夫等^[5]在间隔层中同时使用高低折射率材料,设计了倾斜入射时具有较低偏振相关损耗的三腔滤光片。本文结合该方法优化了窄带滤光片膜系结构的设计算法,设计并制备了可应用于100 GHz

收稿日期:2007-04-17;收到修改稿日期:2007-05-31

作者简介:俞侃(1978—),男,浙江人,博士研究生,主要从事光通信技术和器件研究。E-mail:onlyfish@126.com

导师简介:黄德修(1937—),男,湖南人,教授,博士生导师,主要从事光纤通信与传感方面的研究与教学工作。

E-mail:wnlo2@mail.hust.edu.cn

密集波分复用系统的四腔窄带角度调谐可调滤光片。计算和实验结果都表明,在倾斜入射时的透射性能稳定,偏振相关损耗和插入损耗较低,同时具有较大的调谐范围。

2 理论分析

多腔窄带滤光片的基本结构为高、低折射率膜层相间,每层膜的光学厚度都是中心波长的四分之一整数倍^[6]。 r 层的多层薄膜的结构可表示为

$$\text{sub}/(d_1 n_1)(d_2 n_2)\cdots(d_j n_j)\cdots(d_r n_r)/\text{air}, \quad (1)$$

式中 sub 表示玻璃基板,其折射率 $n_G = 1.5$; air 表示入射介质空气,其折射率 $n_A = 1$; n_j 为第 j 层薄膜的折射率, d_j 为该层薄膜的光学厚度,单位是整个膜系的中心波长 λ_0 的四分之一。根据薄膜特征矩阵理论,整个多层薄膜在波长 λ 处的等效特征矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^r \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} n_A \\ n_G \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$ 为第 j 层薄膜的相位厚度, $n_A \sin \theta_0 = n_j \sin \theta_j$, θ_0 为光信号的入射角度。利用薄膜特征矩阵的计算可以得到多层薄膜的诸多特性,整个膜系透射率为 $T(\lambda) = [T_s(\lambda) + T_p(\lambda)]/2$,其中 $T_{s,p}(\lambda) = \frac{4n_G n_A}{(n_A B + C)(n_A B + C)^*}$ 。

当滤光片的入射角度为 θ_0 时,其中心波长 λ 与正入射时中心波长 λ_0 的关系为 $\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n^2}}$, n 为等效折射率,故倾斜入射时波长向短波的偏移量 $\Delta \lambda$ 为

$$\Delta \lambda = \lambda_0 - \lambda = \lambda_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n^2}} \right). \quad (3)$$

由于在倾斜入射时,不同偏振光的光学导纳值会产生变化,对于 S 偏振态为 $n_s = n \cos \theta_0$,对于 P 偏振态为 $n_p = n / \cos \theta_0$ 。所以两个偏振分量的中心波长会随着入射角度的增大出现分离现象,其中心波长偏振分离量 $\Delta \lambda_{p,s}$ 为

$$\Delta \lambda_{p,s} = \lambda_0 \left(\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0}{n^2}} - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n^2 \cos^2 \theta_0}} \right). \quad (4)$$

对于窄带滤光片,间隔层的影响最大^[7]。在倾斜入射时由于其间隔层的等效折射率及等效厚度产生变化,导致其峰值和带宽会向短波方向移动。同时在倾斜入射时,滤光片的带宽、透过率指标都会发

生改变,并产生 S 偏振和 P 偏振中心波长的分离。这些问题从根本上可以通过优化滤光片的膜系结构来加以改善^[8]。在间隔层中同时使用不同厚度的高低折射率材料,调整其等效折射率,可以达到偏振分量中心波长对准的目的。对于多腔窄带滤光片,各腔间的间隔层结构必须保持一致。否则由于各腔间的间隔层具有不同的等效折射率,在倾斜入射时会因其各间隔层的等效折射率变化不均等而出现失谐现象。在相同的入射角度下,各腔的透射曲线向短波移动的距离不等,导致其透射峰值迅速衰减,透射曲线变形,出现多个透射峰值。所以在设计角度调谐窄带滤光片时,除了要调整多腔窄带滤光片间隔层的结构和等效折射率外,其各腔间的间隔层结构还应保持一致。

3 算法设计

在角度调谐时,整个滤光片的透射特性改变可以视为一个等效折射率为 N 的间隔层变化引起的。出于对 100 GHz 频率间隔密集波分复用系统的纹波和矩形度等方面要求的考虑,滤光片的膜系至少要按照四腔来设计。目的是设计一个 100 GHz 的可调谐滤光片,正入射时的中心波长在 1563 nm 处。选用的高折射率镀膜材料是 Ta_2O_5 , 折射率 $n_H = 2.05$, 低折射率材料为 SiO_2 , 其折射率为 $n_L = 1.46$ 。

3.1 计算方法

常规用于正入射的滤光片其间隔层仅由 $2mL$ 或 $2mH$ 组成^[9], m 为干涉级次。改进结构在不使用新膜料的情况下,其间隔层中需要同时使用高低折射率材料。对称结构间隔层中膜料的层数是奇数,可为三层或者五层。层数过大将因膜层过厚导致制备的困难。间隔层结构的中间层为低折射率材料,两边对称间隔为高低折射率材料,单腔膜系结构为: $(HL)^p (H)^{s_1} (L)^{s_2} \cdots (H)^{s_i} (LH)^p$ 。膜系结构中 H 和 L 分别为高、低折射率的四分之一波长膜层。这样角度调谐滤光片的基本光谱特性就主要由串接的单腔膜系的个数 q ($q = 4$), 各单腔反射层 HL 的对数 p , 间隔层中高低折射率膜料的层数 i 和对应的高低折射率材料的干涉级次 s_i 决定。这样,把同为正整数的 q, p, s_i 作为自变量,通过最优化原理,就可以利用计算机自动寻优来找到合适的解。每个单腔的特征参数可以表示为 $\{p, s_i, i\}$ 。

设通信系统的信道间隔为 β , 信道内光载波带宽为 α , 载波通过滤光片后容许的最大损耗为 l , 倾

斜入射时两个偏振分量的中心波长偏离度为 σ , 通带内的矩形度定义为 $\epsilon = BW_{0.5 \text{ dB}}/BW_{25 \text{ dB}}$, BW 为带宽, 纹波系数定义为 $\xi = (T_{\max} - T_{\min})/T_0$ 。在 100 GHz 的密集波分复用系统中, $\alpha = 0.4 \text{ nm}$, $\beta = 1.2 \text{ nm}$, l 可取为 0.1 dB, σ 可取为 0.01 nm。则角度调谐滤光片设计需要满足的设计约束条件为

$$\begin{aligned} \tau(\lambda - \alpha/2, \lambda + \alpha/2) &\leq l, \\ BW_{0.5 \text{ dB}} &\geq \alpha, BW_{25 \text{ dB}} \leq \beta, CWL \leq \sigma, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\tau(\lambda) = -10 \log[T(\lambda)]$, CWL 为中心波长偏离度。

这样寻优的数学问题就可以描述为在约束条件(5)下的:

$$\text{Min(最小化): } \psi(\{p, s_i\})$$

作为规整膜系, 其各单腔的膜系结构的整数参数取值范围为: $p \in (6, 7, 8); s_i \in (2 \sim 8); i \in (1 \sim 5)$ 。在此范围和约束条件下, $\{p, s_i\}$ 的取值范围是有限的。

3.2 评价函数的构造

对于一个最优化问题, 合理地构建评价函数直接决定了寻优结果的好坏。考虑到 100 GHz 密集波分复用窄带滤光片的各项指标要求, 评价函数在该最优化问题中的主要作用是衡量满足这些设计指标的膜系结构, 并从中选出纹波最小、带宽最优和在一定的倾斜入射角度下两个偏振分量的中心波长对得最准的解来。因此, 构建了评价函数

$$\psi(\{p, s_i\}) = \omega_\xi (10\xi)^2 + \omega_\epsilon (1 - \epsilon)^2 + \omega_\sigma (10\sigma)^2, \quad (6)$$

式中 ω_ξ 和 ω_ϵ 分别为纹波系数和矩形度的权重因子, 这在常规窄带滤光片的设计中较常见, 其值都可以取 1。而 ω_σ 是角度调谐窄带滤光片的一个关键, 为其中心波长对准度的权重因子, 经实验可以取其值为 1。

3.3 算法实现及设计结果

首先计算膜系的初始结构((7, 2, 5), (7, 2, 5), (7, 2, 5), (7, 2, 5))(即基本膜系结构为

$$G/ \begin{bmatrix} (HL)^7 2L2H2L2H2L(LH)^7 L \\ (HL)^7 2L2H2L2H2L(LH)^7 L \\ (HL)^7 2L2H2L2H2L(LH)^7 L \\ (HL)^7 2L2H2L2H2L(LH)^7 \end{bmatrix} /A \text{ 的透射率曲}$$

线, 其正入射时中心波长设为 1563 nm, 这是 C 波段的上限附近。由于膜层较多的间隔层的等效折射率通常较大, 在相对同样的入射角度下向短波移动更多, 所以为了获得更大的调谐量, 选择按五层不同厚度的高低折射率材料来设计。随着入射角度的加

大, 可调滤光片透射光中两个偏振分量的带宽也会产生越来越大的变化, P 偏振分量的带宽会展宽而 S 偏振分量的带宽会变窄, 所以角度过大会影响平均光透射带宽的稳定, 同时也给接收端准直器的耦合带来困难。根据四腔窄带滤光片的特点, 角度调谐最大值初步定为 15°。

然后分别用 $p = 6, 7, 8; s_i \in (2 \sim 8), i \in (1 \sim 5)$ 依次替换初始结构对应的参数, 组成 $\psi(\{p, s_i\})$ 的可搜索域, 入射角度设为 0° 和 15°。

再以适当的步长计算在该角度倾斜入射时通带内的透过率值, 将满足约束指标 $\tau(\lambda - \alpha/2, \lambda + \alpha/2) \leq l, BW_{0.5 \text{ dB}} \geq \alpha, BW_{25 \text{ dB}} \leq \beta, CWL \leq \sigma$ 的膜系结构保存在可能解的集合 L 中。

最后根据建立的评价函数计算集合 L 中不同膜系结构的评价函数数值, 将其中最小的 5 种膜系结构作为设计结果输出。

按照此算法, 利用 Matlab 语言编写了角度调谐窄带滤光片的设计程序, 经过计算机寻优计算, 并对输出结果进行容差分析后得到最优膜系结果为

$$G/ \begin{bmatrix} (HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7 L \\ (HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L \\ (HL)^8 2L3H4L3H2L(LH)^8 L \\ (HL)^7 2L3H4L3H2L(LH)^7 \end{bmatrix} /A. \quad (7)$$

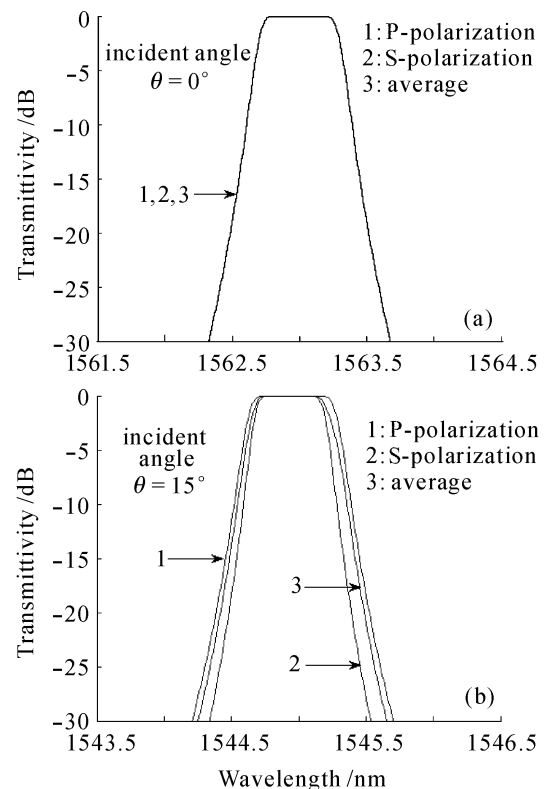


图 1 膜系(7)在入射角为 0°(a)和 15°(b)时的透射率曲线
Fig. 1 Transmittivity curves of the stack (7) at the incident angle of 0° (a) and 15° (b)

当倾斜入射角度达到 15° 时,其中心波长从正入射时的 1563 nm 移动到约 1545 nm 处,如图 1 所示。整个膜系在 $0\sim 15^\circ$ 内的各项指标都满足设计要求,其偏振分量的中心波长得到有效的对准,其偏振相关损耗(PDL)很小,小于 0.03 dB 。膜系的可调谐范围达到了 18 nm 以上,按照国际电信联盟(ITUT)规定的 100 GHz 密集波分复用系统信道间隔为 0.8 nm 的指标,单片角度调谐滤光片的可调谐信道数可达 20 多个。这样,使用两片不同正入射中心波长的该种角度调谐滤光片就可以基本满足对整个 C 波段约 40 个信道的调谐量。

4 实验结果

实验所用的滤光片是深圳飞莱特镀膜公司根据设计的膜系(7)在 Veeco 公司的设备上制备的^[10],使用的高低折射率膜料分别为 Ta_2O_5 和 SiO_2 ,其正入射的中心波长为 1563 nm 。为了增加透射率和降低纹波,在膜系的最外两层设计了增透膜,其厚度分别为 1.65H 和 0.66L 。测量是在武汉光迅公司搭建的实验平台上完成的,使用光源是 Agilent 83438A ASE 宽带可调谐激光测试系统,实验所用的光准直器是光迅公司生产的,损耗小于 1 dB 。图 2(a),(b) 分别为该角度调谐滤光片在正入射和 15° 倾斜入射时在光谱仪上的测量曲线。

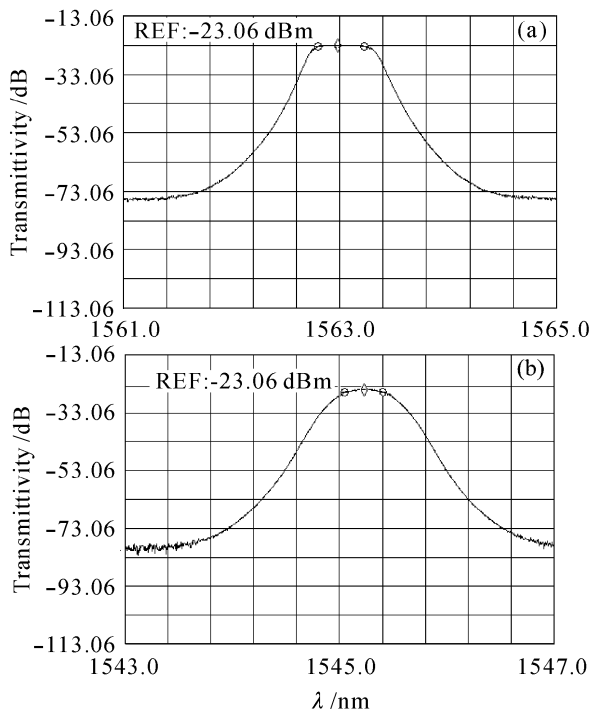


图 2 滤光片在入射角为 0° (a)和 15° (b)时的测量光谱
Fig. 2 Measured spectrum at the incident angle of 0° (a) and 15° (b)

从图 2 中所示的结果可以看出,滤光片正入射时和设计一致,透射光谱谱形良好,通带平坦。当滤光片的入射角度调谐到 15° 时,其透射光谱与设计结果也基本一致,没有产生较大的偏振相关损耗和偏振分离现象。制备的误差通常会导致制备的滤光片插入损耗较大,不能满足设计要求,但是该滤光片在正入射和大角度倾斜入射时的插入损耗不大,故说明使用 Veeco 设备镀制密集波分复用滤光片具有较高的误差控制精度。在大角度倾斜入射时透射光谱出现带宽略有展宽,矩形度略微降低,但是带宽指标仍基本满足 100 GHz 密集波分复用系统的要求。在调制角度小于 15° 时,波形更加接近正入射的透射波形。出现这种现象的原因主要是由于该滤光片的膜层较厚,折射在入射角度较大时其透射光路会出现一定程度的位移,增加了接收端准直器的接收难度,损耗略有增加;在入射角度增大时,透射光的光斑也会同正入射时有所不同,会由圆形逐渐椭圆化,使得接收端准直器的耦合难度增加,导致了带宽的展宽和矩形度的降低。 15° 倾斜入射时其中心波长由 1563 nm 移至 1545.2 nm ,考虑到实验时控制角度偏转的误差,实验结果和模拟计算结果基本吻合,满足了设计要求,说明该角度调谐滤光片具有较大的调谐量。

5 结论

常规窄带滤光片设计方法只适用于正入射时的膜系设计,当薄膜窄带滤光片倾斜入射时,其透射曲线会出现偏振相关损耗增大和偏振中心波长分离等现象。通过本文构建的模型以及该算法设计的窄带滤光片,可以通过调整滤光片间隔层高低折射率膜料的干涉级次解决倾斜入射时偏振分离等现象,利用全局寻优的方式找到满足设计条件的膜系结构,得到具有稳定的透射特性并具有较大调谐范围的角度调谐窄带滤光片。理论设计和实验证明该算法简单可行,对角度调谐滤光片的设计具有一定的指导意义,同时该滤光片具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 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
- Yoshihiko Suemura, Abio 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 Lin. 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 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
 - 7 Zhang Ziya, Zhou Dongping, Zhang Fengshan *et al.*. Three half-wave filter and analysis of layer thickness [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):710~712
张子亚,周东平,张凤山等. 三半波带通滤光片的制作与膜厚分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(5):710~712
 - 8 Cao Changsheng, Luo Bin, Pan Wei *et al.*. A linear tuning filter based on thin-film interference filters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8):1055~1058
曹昌盛,罗 斌,潘 炜等. 基于薄膜干涉滤光片的线性调谐激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8):1055~1058
 - 9 Gao Weidong, Huang Jianbing, Xu Xueke *et al.*. Laser-induced damage of Ta₂O₅/SiO₂ two-cavity narrowband interference filters [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):384~388
高卫东,黄建兵,徐学科等. Ta₂O₅/SiO₂ 硬膜双腔滤光片激光损伤特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):384~388
 - 10 Fan Ping, Shao Jianda, Yi Kui *et al.*. Optical properties and minimal continuous thickness of molybdenum nano-films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):977~981
范 平,邵建达,易 葵等. 纳米 Mo 膜的光学特性及最小连续膜厚研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):977~981