

高性能可调谐滤波片的优化设计方法

谢钟涛*, 余桂英**

中国计量大学计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

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来调整其等效折射率, 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。根据与密集波分复用(DWDM)系统相关的通道频率、插损、带宽、隔离度、偏振相关损耗(PDL)等八个标准, 结合薄膜矩阵理论与新构造的评价函数, 构建了一个可调谐滤光片膜系, 通过改变各参数的权重因子, 得到满足不同要求的最优膜系。利用构建的系统, 优化设计了分别用于 O 波段和 C 波段 100 GHz 密集波分复用系统的具有高隔离度、低偏振相关损耗的角度调谐窄带滤光片。C 波段膜系的最大调谐角度达 11° , 相邻通道隔离度可达 -30.3 dB, 最后对其透射特性以及影响调谐角度极限的因素进行了分析。

关键词 薄膜; 光通信; 倾斜入射; 大角度调谐; 窄带滤光片; 膜系设计

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0831001

Optimization Design Method for High Performance Tunable Filter

Xie Zhongtao*, Yu Guiying**

College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University,
Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract According to the characteristics of a thin film narrowband filter at oblique incidence, an angle-tunable narrowband filter with stable transmission peak and bandwidth can be designed by improving the structure of spacer film system to adjust its equivalent refractive index. According to the eight standards related to the dense wavelength division multiplexing (DWDM) system such as channel frequency, insertion loss, bandwidth, isolation degree, polarization dependent loss (PDL) and so on, in combination with the theory of thin film matrix and the newly constructed evaluation function, a tunable filter membrane system is constructed, and the optimal membrane systems satisfying different requirements are obtained by changing the weighting factor of each parameter. Using the built system, the angle-tunable narrowband filters with high isolation and low polarization-dependent loss for 100 GHz DWDM system on O-band and C-band are designed. The maximum tuning angle of the film system on C-band is 11° , and the isolation degree of adjacent channels is up to -30.3 dB. Finally, the transmission characteristics and the factors influencing the tuning angle limit are analyzed.

Key words thin films; optical communication; oblique incidence; large angle tuning; narrow band filter; film system design

OCIS codes 310.4165; 310.6860; 060.4510

1 引 言

随着 5G 时代的来临, 极大的数据传输量迫使波分复用(WDM)模块向着更低能耗、更高效的方向发展, 同时也使得光通信信号传输频率范围从单一 C 波段逐渐向 O 波段扩展。较之 C 波段, O 波段的延时性和色散性更好^[1-4], 能够获得更高的传输速率和更大的传输距离。

薄膜干涉滤光片由于其插入损耗低、温度稳定

性好等诸多优异特性而在波分复用系统中得到广泛应用^[5]。在斜入射时, 滤光片的透射光通带和峰值随着入射角度的增大逐渐向短波方向移动, 基于该原理可设计出角度可调谐滤光片^[6-7], 将其用于密集波分复用(DWDM)系统中, 利用一片滤光片可同时实现多路信号复用, 在很大程度上提高了系统效率并降低了成本。俞侃等^[8]设计了两种可调谐角度范围为 15° , 通道间隔度小于 -25 dB 的用于 C 波段 DWDM 系统的可调谐滤光片膜系, 所用评价函数仅

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-11-23; 录用日期: 2020-01-06

基金项目: 浙江省公益技术研究计划项目(LGG18F050001)

* E-mail: 1406530134@qq.com; ** E-mail: guiying-yu@cjl.edu.cn

包括三个光参数:波纹系数、带宽与偏振分量中心波长偏离度,不能够完全满足实际需求。本文设计了包含 8 个评价参数的新评价函数,并结合寻优算法构建了一个计算最佳膜系的系统,可根据不同的需求改变各项参数的权重,得到最合适的膜系。据此设计了两种插损小于 0.5 dB,通道隔离度小于 -30 dB 的适用于 O 波段和 C 波段 100 GHz DWDM 系统的四腔窄带调谐滤光片,最大可调谐角度达 11°。

2 理论分析

2.1 薄膜特征矩阵与角度调谐原理

基于多光束干涉原理的窄带滤光片通常由数十层甚至上百层的高、低折射率膜层交替叠加组成,其中每层薄膜的光学厚度都为 1/4 参考中心波长的整数倍。 k 层的多层薄膜结构可表示为

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

式中:sub 表示玻璃基板;air 表示入射介质空气; n_j 和 d_j 分别为第 j 层薄膜的折射率和厚度^[8-11]。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

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -i \sin \delta_j / \eta_j \\ -i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: M_{11} 、 M_{12} 、 M_{21} 、 M_{22} 为等效特征矩阵的矩阵元;第 j 层薄膜的相位厚度 $\delta_j = 2\pi n_j d_j \cos \beta_j / \lambda$, 其中, β_j 为光束透过第 j 层膜时的入射角; η_j 为第 j 层薄膜的光学导纳。光学导纳值与入射光的偏振态有关,对于 s 分量,光学导纳 $\eta_{js} = n_j \cos \beta_j$;对于 p 分量, $\eta_{jp} = n_j / \cos \beta_j$ 。则 s 分量的透过率 $T_s(\lambda)$ 为

$$T_s(\lambda) = \frac{2\eta_A}{\left[(M_{11,s} + \eta_G M_{12,s}) \eta_A + (M_{21,s} + \eta_A M_{22,s}) \right]} \times \frac{2\eta_A}{\left[(M_{11,s} + \eta_G M_{12,s}) \eta_A + (M_{21,s} + \eta_A M_{22,s}) \right]^*}, \quad (3)$$

式中: $M_{11,s}$ 、 $M_{12,s}$ 、 $M_{21,s}$ 、 $M_{22,s}$ 为 s 分量下膜层的等效特征矩阵的矩阵元;* 为取共轭; η_A 、 η_G 分别为空气层与基板的光学导纳。p 分量的透过率 $T_p(\lambda)$ 与 s 分量的透过率 $T_s(\lambda)$ 的形式相同,区别在于由(2)式计算得到的两个分量的矩阵特征值不同。整个膜系的透射率 $T(\lambda)$ 为

$$T(\lambda) = [T_s(\lambda) + T_p(\lambda)]/2. \quad (4)$$

若将滤光片膜层等效成折射率为 N 的单层膜,

则可得到

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta' & -i \sin \delta' / \eta' \\ -i \eta' \sin \delta' & \cos \delta' \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中:等效层薄膜的相位厚度 $\delta' = 2\pi N h \cos \beta_0 / \lambda$, 其中, h 为等效膜层的光学厚度, β_0 为光束的入射角。对于 s 分量,光学导纳 $\eta' = N \cos \beta_0$;对于 p 分量, $\eta' = N / \cos \beta_0$,由(5)式可以得到 $\eta' = \sqrt{M_{21}/M_{12}}$,联立(2)式计算即可得到等效膜层折射率 N 。

根据多光束干涉原理,光入射角为 β 时透过薄膜的波长 $\lambda(\beta)$ 满足

$$2Nh \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{N^2}} = m\lambda(\beta), \quad (6)$$

式中: m 为干涉级次。

正入射时中心波长为 λ_0 ,根据(6)式可得到 $\lambda(\beta)$ 与 λ_0 的关系为

$$\lambda(\beta) = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{N^2}}, \quad (7)$$

从(7)式可以看出,当入射角变大时,透射光的中心波长逐渐向短波移动。倾斜入射时波长向短波的偏移量为

$$\Delta\lambda(\beta) = \lambda_0 - \lambda(\beta) = \lambda_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{N^2}} \right). \quad (8)$$

根据这一特性,将角度可调谐滤光片用于 WDM 系统中,通过调整各个通道的光束入射角度,使得出射光的中心波长变化符合国际电信联盟标准部(ITU-T)对 WDM 系统参考波长的要求,从而达到仅用一块滤光片就可实现对多个通道复用的目的。

角度可调谐滤光片的调谐范围即是在限定入射角的范围内,中心波长的有效变化范围。从(8)式可以看出,影响调谐范围的因素主要有两个:一是 λ_0 ,即滤光片的单层膜厚度;另一个是 N ,也就是滤光片的膜系结构。当 λ_0 固定时,改变膜系的膜层结构就可实现滤光片角度调谐范围的调整。

2.2 膜系评价的关键参数及计算方法

WDM 系统性能的评价参数主要有插损、带宽、矩形度、波纹(Ripple)、偏振相关损耗(PDL)、隔离度,这些参数在薄膜滤波系统中代表着滤光片膜系的质量,在膜系结构设计的过程中作为边界条件起着决定性的作用。光束经过某膜系结构后,透射光的所有参数符合所规定的标准时,则认为膜系合格。

设滤光片透射光中心波长为 λ_0 ,通信系统通道

间隔为 α , 滤光片对各波长光的透射率为 $T(\lambda)$, 则各参数定义与计算如下。

通带带宽:指各通道需要通过的频谱宽度, 在 WDM 系统中表示为在光信号最大透过率下降 0.5 dB 范围内的最大波长宽度, 即 $W_{0.5 \text{ dB}}$ 。

插损:指光信号通过滤光片后损耗的能量大小, 表示为通带带宽范围内透射光的最小透过率 L , 即

$$L = |\min \tau(\lambda)|, \quad \lambda \in [\lambda_0 - W_{0.5 \text{ dB}}/2, \lambda_0 + W_{0.5 \text{ dB}}/2], \quad (9)$$

式中: $\tau(\lambda) = -10 \lg T(\lambda)$, 单位为 dB。

矩形度:代表着 WDM 系统选择通带内有用信号, 抑制带外干扰信号的能力, 表示为最大透过率下降 30 dB 的波长宽度 $W_{30 \text{ dB}}$ 与下降 0.5 dB 的波长宽度 $W_{0.5 \text{ dB}}$ 的比值, 即

$$\eta = W_{30 \text{ dB}}/W_{0.5 \text{ dB}}. \quad (10)$$

Ripple:指光信号在通带带宽范围内频谱的起伏程度, 表示为通带内光束最大透过率与最小透过率之差, 即

$$r = \max \tau(\lambda) - \min \tau(\lambda), \quad \lambda \in [\lambda_0 - \alpha/4, \lambda_0 + \alpha/4]. \quad (11)$$

PDL:指光信号以不同的偏振态输入时, 对应输出端口插入损耗的最大变化量, 表示为通带带宽范围内, 相同波长光的 s 分量与 p 分量透过率的最大差值, 即

$$\sigma = |\max \tau_s(\lambda) - \min \tau_p(\lambda)|, \quad \lambda \in [\lambda_0 - \alpha/4, \lambda_0 + \alpha/4], \quad (12)$$

式中: $\tau_s(\lambda)$ 、 $\tau_p(\lambda)$ 分别是透射光 s 分量与 p 分量的损耗。

隔离度:指某一波长的光信号进入非指定输出端口的光能量大小, 表示为透射光中与通道中心波长 λ_0 相距 $3\alpha/4$ 处光信号的透过率, 即

$$P = \tau(\lambda_0 + 3\alpha/4). \quad (13)$$

3 膜系优化算法设计

常规用于正入射的滤光片的间隔层仅由 $2mL$ 或 $2mH$ 组成, H 代表高折射率层, L 代表低折射率层。对于角度调谐滤光片的膜系结构, 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。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。角度调谐滤光片的整体结构是由若干个(至少三个)单腔膜系组成, 单腔膜系结构为 $(HL)^p(H)^{m_1}(L)^{m_2} \dots (H)^{m_t}(LH)^p$, 其中, p 和 m_t 分别是单腔内反射层和第 t 层材料层的层数。其光谱特性主要由串接

的单腔腔数 q 以及单腔的膜系结构决定, 因此, 膜系的设计实质上也就是通过优化腔数 q 和各腔中高低材料层的层数, 得到理想的、符合标准的结构模型。

3.1 评价函数的构造

在滤光片膜系优化设计中, 评价函数的构造可以将膜系优化问题转化为评价函数最优解问题。评价函数的优劣直接影响优化结果的质量, 考虑到密集波分复用窄带滤光片的各项参数要求, 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, 并从中选出插损、带宽、矩形度、Ripple 值、PDL 值、隔离度、可调谐角度及膜层层数等 8 个指标。前 7 个参数为技术参数, 膜层层数主要约束的是镀膜成本因素。为避免各参数间数量级差异带来的影响, 对各个参数进行归一化处理, 因此构建如下评价函数:

$$F = [\omega_L(L/L_0) + \omega_W(W_0/W) + \omega_\eta(\eta/\eta_0) + \omega_r(r/r_0) + \omega_\sigma(\sigma/\sigma_0) + \omega_P(P_0/P) + \omega_\theta(\theta/\theta_0) + \omega_K(K/K_0)]/\omega, \quad (14)$$

$$\omega = \omega_L + \omega_W + \omega_\eta + \omega_r + \omega_\sigma + \omega_P + \omega_\theta + \omega_K, \quad (15)$$

式中: K 为膜层层数; ω 为权重因子综合值; W 为带宽; θ 为可调谐角度; L_0 、 W_0 、 η_0 、 r_0 、 σ_0 、 P_0 、 θ_0 、 K_0 分别是插损、带宽、矩形度、Ripple、PDL 值、隔离度、可调谐角度及膜层层数 8 个参数的归一化标准参考值; ω_L 、 ω_W 、 ω_η 、 ω_r 、 ω_σ 、 ω_P 、 ω_θ 、 ω_K 为 8 个参数的权重因子, 均为正值。评价函数 F 的最小解即对应最佳膜系。选择不同权重值可得不同的膜系结构。当所有权重系数均取值 1 时, 所得膜系为平均考虑 8 个参数要求的最佳膜系; 当 $\omega_K = 0$, 得到膜系结构为仅考虑技术参数需求的最优膜系。

3.2 优化方法

3.2.1 腔数的选择

在角度调谐滤光片膜系的优化设计过程中, 为了提高优化的效率, 可以首先对腔数 q 进行优化选择, 这样几十甚至上百层的膜层结构分析就变为对单腔结构的分析。在选择合适腔数时, 要保证具有不同腔数的膜层结构的中间层一致, 这里以单腔结构: $(HL)^7 2L3H4L3H2L(HL)^7$ 为例, 图 1 是 0° 入射角下具有不同腔数和相同间隔层的四种膜系的透过率曲线对比图。可以看出, 四腔、五腔和六腔膜系的矩形度较三腔好, 而四腔的膜系相对于其他三种, Ripple 明显要小很多, 频谱平坦度最好, 因此, 可调谐滤光片的膜系可按照四腔来设计。

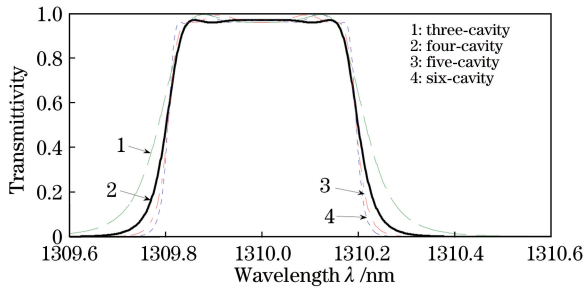


图 1 0°入射角下不同腔数的透过率曲线

Fig. 1 Transmittivity curves under different numbers of cavities at 0° incident angle

3.2.2 单腔结构的优化设计

确定腔数后,滤光片的膜系结构就由单腔的结构决定。膜层过多会导致加工难度增大,因此,将间隔层限制在五层材料层以内,四腔膜系模型(1)为

$$G/ \begin{bmatrix} (HL)^{p_1} L^{m_1} H^{m_2} L^{m_3} H^{m_2} L^{m_1} (LH)^{p_1} L \\ (HL)^{p_2} L^{m_1} H^{m_2} L^{m_3} H^{m_2} L^{m_1} (LH)^{p_2} L \\ (HL)^{p_3} L^{m_1} H^{m_2} L^{m_3} H^{m_2} L^{m_1} (LH)^{p_3} L \\ (HL)^{p_4} L^{m_1} H^{m_2} L^{m_3} H^{m_2} L^{m_1} (LH)^{p_4} \end{bmatrix} / A, \text{ 其中}$$

G表示玻璃基层,A表示空气层,将第*l*层材料层的层数*m_l*与第*h*层反射层层数*p_h*作为自变量,改变两个变量可以得到不同的膜系,所有光参数符合边界条件的膜系为合格膜系。引进评价函数后,每一个膜系都有相对应的评价值,根据评价值选择合适的膜系结构。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:*m_l* ∈ {1, 2, ..., 10}; *p_h* ∈ {5, 6, ..., 10}。光参数边界条件为:*L* - *L*₀ < 0; *W* - *W*₀ > 0; *η* - *η*₀ < 0; *r* - *r*₀ < 0; *σ* - *σ*₀ < 0; *P* - *P*₀ < 0, 所有边界条件均为光参数结果值与标准参考值的偏差。算法流程如图2所示。

根据各光参数标准以及寻优算法和评价函数,构建了一个膜系设计系统,运行得到最优的膜系结构参数以及在最大可调谐角度下该膜系的透过率曲线图。

4 100 GHz DWDM 滤波片的膜系设计及结果分析

设计用于 DWDM 系统的滤光片膜系,首先需要知道系统中各通路的中心波长以及各光参数标准,即角度调谐滤光片的优化设计中的边界条件。根据 ITU-T 的建议,C波段 100 GHz 标准 DWDM 系统的参考频率为 193.1 THz,中心频率范围为 192.1~196.1 THz,对应的中心波长范围为 1560.61~1528.77 nm,100 GHz 的频率间隔对应的波长相差

0.8 nm。相应扩展至 O 波段,中心频率范围为 220.5~237.9 THz,对应的中心波长范围为 1359.6~1260.16 nm,100 GHz 的频率间隔对应的波长差变为 0.57 nm,因此在两个不同波段内的光参数标准也不同。

表 1 给出了中心波长在 1310 nm/1552 nm 附近的 100 GHz DWDM 系统所需滤光片的参数^[5]。

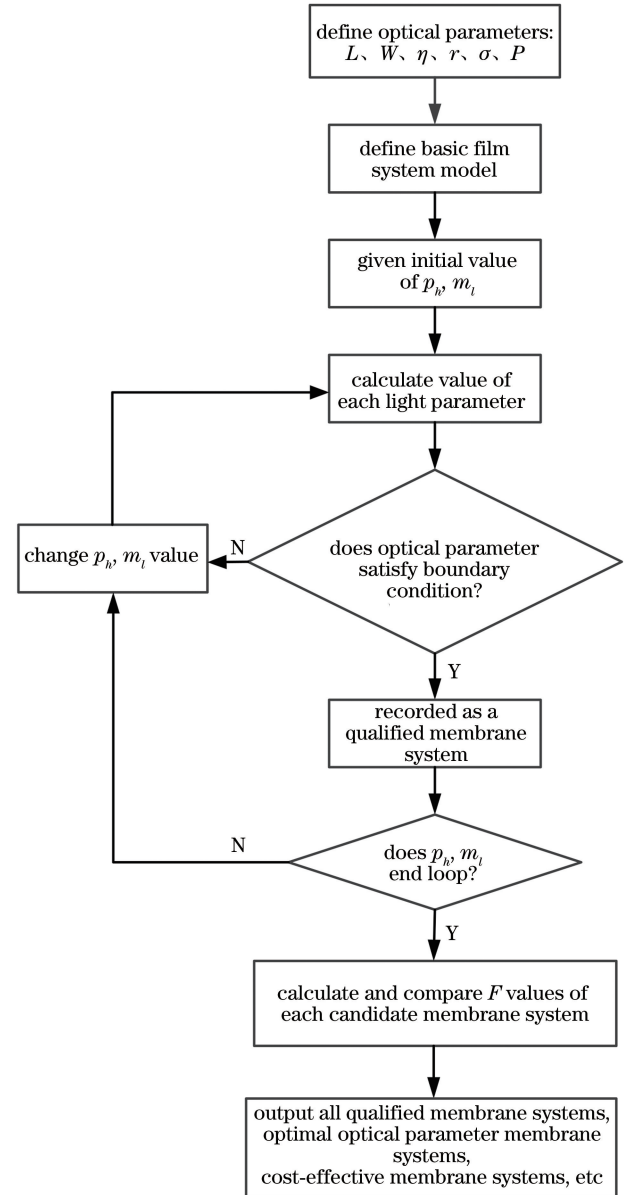


图 2 膜系优化算法流程图

Fig. 2 Flow chart of membrane system optimization algorithm

利用所设计的软件系统进行 O 波和 C 波 100 GHz 的可调谐滤光片膜系优化设计,选用的高折射率镀膜材料是 Ta₂O₅,折射率 *n_H* = 2.05,低折射率材料为 SiO₂,其折射率 *n_L* = 1.46。选用的 8 个参数的权重因子均为 1,光参数标准值分别为:*L*₀ = 0.5 dB、*W*₀ = 0.4 nm、*η*₀ = 3、*r*₀ = 0.3 dB、*σ*₀ =

表 1 DWDM 系统滤光片参数指标

Table 1 Filter parameter index of DWDM system

Parameter type	Content
Channel spacing /GHz	100
Center wavelength /nm	1260.16–1359.6(O band), 1528.77–1560.61(C band)
$W_{0.5\text{ dB}}$ /nm	$>0.285/0.4$
$W_{30\text{ dB}}$ /nm	$<0.855/1.2$
η	<3
L /dB	<0.5
r /dB	<0.3
σ /dB	<0.1
P /dB	<-30

0.1 dB, $P_0 = -30$ dB, $\theta_0 = 15^\circ$, $K_0 = 50$ 。图 3 为软件设计的 C 波段的所有合格膜系,可以看出,6 个光参数都符合设计要求的膜系有 15 个, O 波段的合格膜系有 8 个,其中 F 值最小的最优解分别为膜系 II 和膜系 III。膜系 II 为 O 波段 DWDM 系统的最佳

膜系,膜系结构为 $G/\left[\begin{array}{l} (\text{HL})^7 3\text{H}10\text{L}3\text{H} (\text{LH})^7 \text{L} \\ (\text{HL})^8 3\text{H}10\text{L}3\text{H} (\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^8 3\text{H}10\text{L}3\text{H} (\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^7 3\text{H}10\text{L}3\text{H} (\text{LH})^7 \end{array} \right] / \text{A}$ 。

p1	p2	p3	p4	m1	m2	m3	L/dB	W/nm	η	r/dB	P/dB	σ /dB	$\theta /^\circ$	F
7	8	8	7	0	1	10	0.207	0.468	2.506	0.040	-33.116	0.094	8	0.784
7	8	8	7	2	1	8	0.200	0.469	2.493	0.036	-30.290	0.053	11	0.671
7	8	8	7	2	1	10	0.381	0.427	2.382	0.152	-35.930	0.066	4	1.070
7	8	8	7	2	3	6	0.208	0.455	2.404	0.054	-33.224	0.091	8	0.786
7	8	8	7	2	4	8	0.182	0.462	2.472	0.037	-31.984	0.092	11	0.724
7	8	8	7	2	4	10	0.251	0.443	2.391	0.082	-34.477	0.077	6	0.882
7	8	8	7	3	4	10	0.138	0.496	2.403	0.002	-30.107	0.020	8	0.681
7	8	8	7	4	1	6	0.192	0.469	2.487	0.033	-30.474	0.050	11	0.677
7	8	8	7	4	1	8	0.395	0.427	2.380	0.158	-36.008	0.067	4	1.083
7	8	8	7	4	2	8	0.137	0.497	2.404	0.003	-30.028	0.017	8	0.676
7	8	8	7	4	2	10	0.195	0.460	2.437	0.045	-32.369	0.083	10	0.740
7	8	8	7	4	3	4	0.200	0.454	2.407	0.050	-33.269	0.080	8	0.773
7	8	8	7	4	4	4	0.182	0.462	2.472	0.037	-31.983	0.091	11	0.724
7	8	8	7	4	4	6	0.251	0.443	2.391	0.082	-34.477	0.077	6	0.882
7	8	8	7	4	4	8	0.481	0.419	2.377	0.200	-36.660	0.081	4	1.154

图 3 C 波段合格膜系结构参数及光参数值

Fig. 3 Structural parameters and optical parameters of qualified membrane systems at C-band

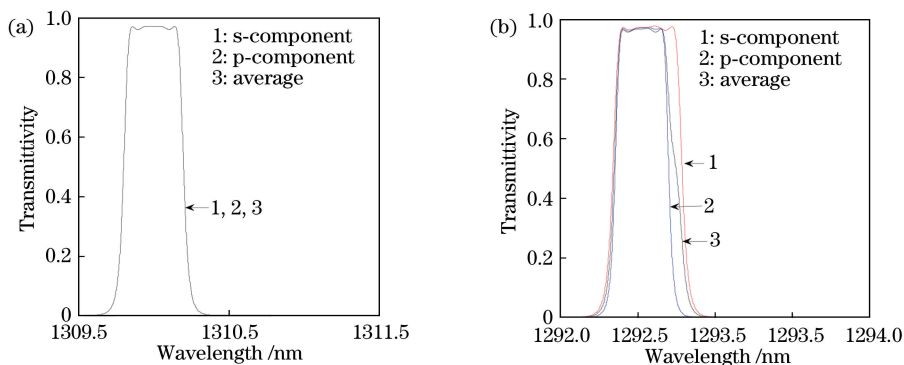


图 4 膜系 II 在不同入射角下的透射率-波长曲线。(a) 0° ; (b) 15°

Fig. 4 Transmittivity-wavelength curves of membrane system II at different incident angles. (a) 0° ; (b) 15°

膜系 III 为 C 波段 DWDM 系统的最佳膜系,膜系结

构为 $G/\left[\begin{array}{l} (\text{HL})^7 2\text{LH}8\text{LH}2\text{L} (\text{LH})^7 \text{L} \\ (\text{HL})^8 2\text{LH}8\text{LH}2\text{L} (\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^8 2\text{LH}8\text{LH}2\text{L} (\text{LH})^8 \text{L} \\ (\text{HL})^7 2\text{LH}8\text{LH}2\text{L} (\text{LH})^7 \end{array} \right] / \text{A}$ 。

通过计算可得到上述两个膜系分别在 0° 与 15° 入射角下透射光的光参数值,如表 2 所示,光谱曲线如图 4、5 所示。

表 2 膜系 II、III 光参数值

Table 2 Optical parameter values for membrane systems II and III

Parameter	Membrane system II		Membrane system III	
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 15^\circ$
L /dB	0.14	0.48	0.14	0.4
W /nm	0.34	0.31	0.49	0.43
η	2.38	2.84	2.38	2.8
r /dB	0.01	0.21	0	0.13
$ P $ /dB	31.20	25.75	31.25	26.37
σ /dB	0	0.39	0	0.32

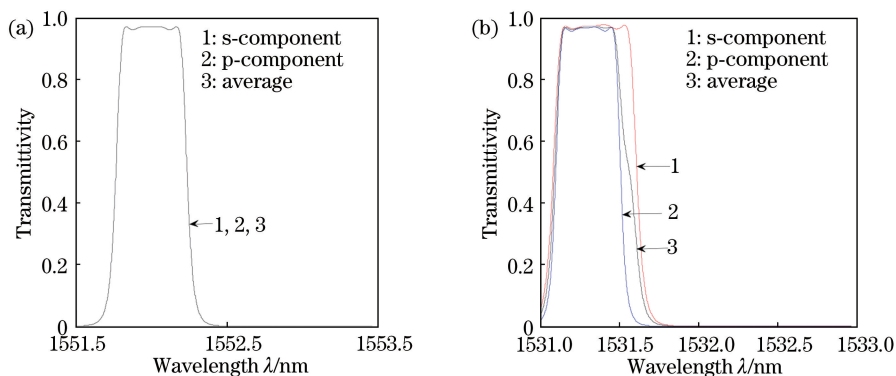


图 5 膜系 III 在不同入射角下的透射率-波长曲线。(a) 0°; (b) 15°

Fig. 5 Transmittivity-wavelength curves of membrane system III at different incident angles. (a) 0°; (b) 15°

由图 4 和图 5 可以看出,在正入射时,s 分量与 p 分量完全重合,带宽、PDL、隔离度等指标良好;在 15°倾斜入射时,矩形度变差,s 分量与 p 分量出现明显分离,导致 PDL 增大。膜系 II 与膜系 III 在各角度

下的光参数和标准值的偏差值($\Delta X = X - X_0$, X 为各光参数, X_0 为标准值)与入射角度的关系如图 6 所示。可以看出,在设计结果中,矩形度均小于 3; 插损、带宽、矩形度、Ripple 等四个参数在入射角

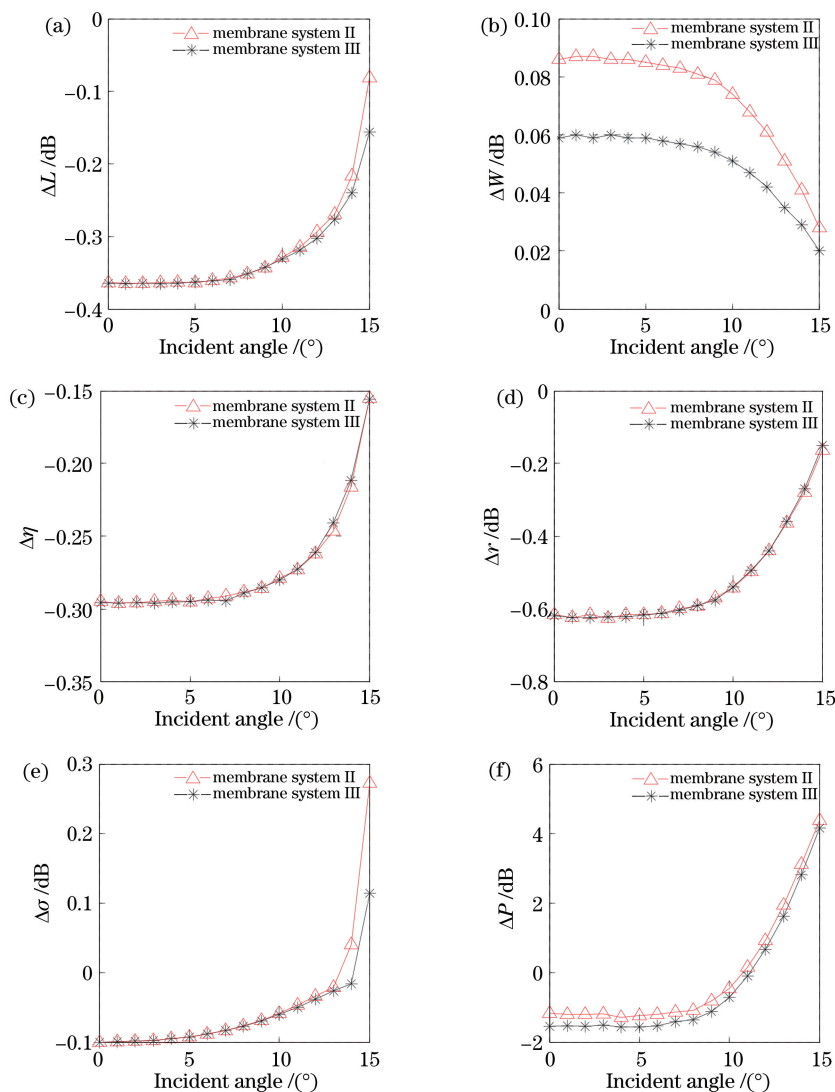


图 6 膜系 II、III 光参数偏差值与入射角关系图

Fig. 6 Relationship between deviation of optical parameter and incident angle for membrane systems II and III

15°内均符合表1的要求;PDL在入射角13°内均符合要求;参照隔离度要求,膜系II的最大可调谐角度为10°,膜系III的最大可调谐角度为11°。

5 最大可调谐角度的影响因素分析

滤光片的透射特性与滤光片间隔层的等效折射率 N 有关,图7为入射中心波长为1552 nm时所有合格膜系的间隔层等效折射率 N 与最大可调谐角度 θ_t 的关系图,可以看出, θ_t 相同的膜系中存在若干个不同的 N ,可见 θ_t 与 N 之间并不存在直接联系。而 θ_t 是由所选膜系决定,膜系选择的评价标准有插损、带宽、Ripple等,因此, θ_t 与各个光参数的标准可能存在联系。

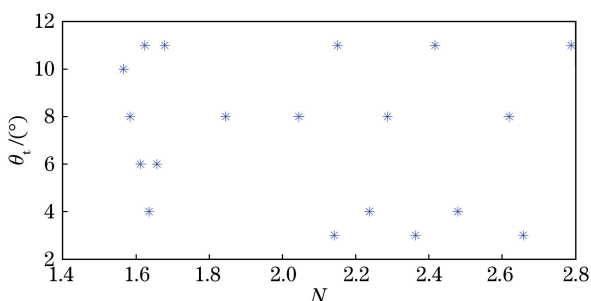


图7 等效折射率与最大可调谐角度关系图

Fig. 7 Maximum tunable angle versus equivalent refractive index

图8是各合格膜系的光参数和标准值的比值 ($Y' = Y/Y_0$, Y 为各光参数, Y_0 为标准值) 与相对应的膜系 θ_t 的关系图,可以看出,插损与Ripple两项的相对值与 θ_t 存在明显的变化关系,随着 θ_t 的增大,前两者急速减小,而其余几个光参数的相对值变化不明显。可知,若要得到大角度可调谐滤光片膜系,在设计过程中可在允许范围内适当降低插损与Ripple的指标要求。

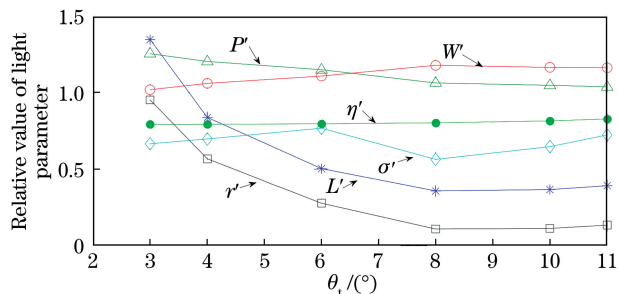


图8 各光参数相对值与最大可调谐角度关系图

Fig. 8 Relative value of each optical parameter versus maximum tunable angle

6 结 论

薄膜窄带滤光片在倾斜入射条件下,其透射曲

线会出现中心波长向短波移动、偏振相关损耗增大和偏振中心波长分离等现象。基于光通信中光传输参数标准,构造了评价函数,通过结合构建的膜系模型,提出了一个膜系优化设计系统,可以满足WDM系统使用要求的高标准大角度可调谐窄带滤光片;通过改变评价函数中各参数权重因子,可以得到所有合格膜系、技术参数最优膜系、成本最优膜系等,更加符合滤光片实际使用的需求。该设计系统中评价函数的改进对可调谐滤光片膜系的进一步优化有一定的指导作用,该系统具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Li C Y, An J M, Zhang J S, et al. Design and fabrication of O band 8 channel flat-top arrayed waveguide grating based on silica on silicon[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 0823003.
李超懿, 安俊明, 张家顺, 等. O波段8通道硅基二氧化硅平坦化阵列波导光栅的设计及制备[J]. 光子学报, 2017, 46(8): 0823003.
- [2] Mostert W, Emms D. WDM technology for optical fiber transmission on O-band—Aurora Networks white paper of O-band technology [J]. Huang D, Transl. Cable Television Technology, 2009, 16(7): 47-49.
Mostert W, Emms D. 光纤传输 O 波段的波分复用技术——Aurora Networks O 波段技术白皮书 [J]. 黄笛, 译. 有线电视技术, 2009, 16(7): 47-49.
- [3] Zhu Z. Chromatic dispersion compensation for high-speed communication systems[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(2): 51-54.
朱震. 高速光通信系统中的色散补偿技术 [J]. 光电与控制, 2003, 10(2): 51-54.
- [4] Zhang J S, Tao Z Y, Yun X. Optical WDM technology [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002: 1-15.
张劲松, 陶智勇, 韵湘. 光波分复用技术 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002: 1-15.
- [5] Gu P F, Bai S Y, Li H F, 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.
- [6] Suemura Y, Tajima A, Henmi, et al. Adaptive wavelength tunable optical filter employing an angle-tuned interference filter and an intelligent digital controller [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(6): 1048-1055.

- [7] Frenkel A, Lin C. Angle-tuned etalon filters for optical channel selection in high density wavelength division multiplexed systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1989, 7(4): 615-624.
- [8] Yu K, Liu W, Huang D X, et al. Optimal design and arithmetic on stack of angle-tuned filter [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(9): 1287-1291.
俞侃, 刘文, 黄德修, 等. 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 K, Liu W, Huang D X. Characteristics analysis and stack design of angle-tuned filter [J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(6): 1175-1179.
俞侃, 刘文, 黄德修. 角度调谐滤光片特性分析及膜系设计 [J]. 光子学报, 2008, 37(6): 1175-1179.
- [10] Shen W D, Liu X D, Huang B Q, et al. Analysis on the tunable optical properties of MOEMS filter based on Fabry-Perot Cavity [J]. Optics Communications, 2004, 239(1-3): 153-160.
- [11] 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.
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.