

doi: 10.3788/gzxb20134202.0181

基于遗传算法的斜入射窄带滤光片膜系优化设计

俞侃, 廖剑锋, 张晓丹, 包佳祺, 尹娟娟

(华中科技大学 文华学院, 武汉 430074)

摘 要:根据薄膜窄带滤光片在斜入射时的偏振特性,提出了基于遗传算法的斜入射薄膜窄带滤光片膜系优化设计方法.根据开发的程序,设计并制备了一组可用于 18° 倾斜入射的 0.8 纳米信道间隔的五腔薄膜窄带滤光片.该滤光片能有效地抑制斜入射时偏振光中心波长的分离现象,降低器件的偏振相关损耗,通过角度调谐能实现选择波长的改变.通过与针法设计的滤光片膜系相比,遗传算法得到的膜系具有更高的矩形度、更大的波长调谐范围以及更低的偏振相关损耗.实验结果表明其满足设计要求并有超过 25 纳米的波长调谐范围.

关键词:薄膜;窄带滤光片;遗传算法;斜入射;优化设计

中图分类号: T0484

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0181-5

Optimal Design of Narrowband Filter in Oblique Incidence Based on Genetic Arithmetic

YU Kan, LIAO Jian-feng, ZHANG Xiao-dan, BAO Jia-qi, YIN Juan-juan

(Wenhua College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the polarization characteristics of the thin film narrowband filter, the stack of narrowband filter used in oblique incidence is provided based on the genetic arithmetic in this paper. A 100GHz five-cavity thin film filter used in 18° incidence is optimized based on the programme. The stack can eliminate the phenomenon of polarization light central wavelength separation used in oblique incidence and it has low polarization dependent loss. It can be used as an angle-tuned thin film filter for wavelength modulation. Compared with the thin film filter stack obtained by needle arithmetic design, it has higher rectangle degree, larger wavelength tunable range and less polarization dependent loss. The experimental results show it meets the demand of design and its tunable range is more than 25 nm.

Key words: Thin film; Narrowband filter; Genetic arithmetic; Oblique incidence; Optimal design

0 引言

多腔窄带薄膜滤光片由于具有插入损耗低、通带窄和温度稳定性好等诸多优点,被广泛应用于密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)系统中^[1].随着入射角度的增大,滤光片的透射峰值和通带会向短波方向移动,依此原理可以实现波长调谐^[2-3].但是其透射光谱在斜入射由于偏振光中心波长的分离增大会产生严重的偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)^[4],限制了器件在系统中的使用.为了抑制该

现象,可在膜系设计时通过调整间隔层的等效折射率实现在一定角度范围内偏振光中心波长的对准^[5].

在膜系设计中,以膜系结构为参量构建的评价函数是一个复杂的多峰值函数^[6].对于 DWDM 系统的多腔窄带滤光片,为了保证矩形度要求其膜层数通常都在 100 层以上,因此导致膜系评价函数的峰值尤其多.尽管传统的针法(needle)设计采用了隧行技术可从单个局部极值隧行到另一个局部极值,但其本质仍是一种局部寻优方式^[7],在设计间隔层结构尤为复杂的斜入射窄带滤光片时效率很低.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61205062)、湖北省自然科学基金(No. 2012FFB02701)和华中科技大学文华学院创新基金(No. J02005301)资助

第一作者:俞侃(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为光学薄膜. Email: onlyfish@126.com

收稿日期: 2012-08-13; 录用日期: 2012-10-15

与随机搜索不同,遗传算法(Genetic Arithmetic,GA)的寻优不是从单一初值出发,而是从一组初值出发并进行优化,是一种全局寻优的计算方法,效率极高.这些初值可视为一个生物群体,其优化过程就是该群体繁衍、竞争、遗传和变异的过程^[8],可以保证搜索过程向最优化的方向发展.本文将遗传算法引入到斜入射窄带滤光片的膜系设计中,设计并制备了可应用于 18° 斜入射的100 GHz信道间隔的五腔窄带角度调谐滤光片,设计和测试结果表明其满足设计指标并具有25 nm的波长调谐范围.同时该设计较之前期利用针法设计的膜系,具有更高的矩形度和更大的波长调谐范围.

1 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,每层的光学厚度都是四分之一参考波长的整数倍^[9].一个 r 层的多层薄膜的结构可表示为

$$(d_1 n_1)(d_2 n_2) \cdots (d_r n_r) \quad (1)$$

式中 n_r 为第 r 层薄膜的折射率, d_r 为该层薄膜的光学厚度, λ_0 滤光片正入射时的设计参考波长.根据薄膜特征矩阵理论,整个多层薄膜的等效特征矩阵可以表示为

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

其中 $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$ 为第 j 层薄膜的相位厚度^[10], $n_A \sin \theta_0 = n_j \sin \theta_j$, 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

$$T_{s,p}(\lambda) = \frac{4n_G n_A}{(n_A B + C)(n_A B + C)^*}$$

当以 θ_0 角度斜入射时,滤光片的中心波长为

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n^2}}, n \text{ 为膜系间隔层的等效折射率.}$$

同时在斜入射时,不同偏振光的光学导纳值会产生变化,对于S偏振光为 $n_s = n \cos \theta_0$,对于P偏振光为 $n_p = n / \cos \theta_0$.因此两个偏振光的中心波长会随着入射角度的增大出现越来越明显的分离现象,其中心波长偏振分离量 $\Delta\lambda_{p,s}$ 可表示为^[11]

$$\Delta\lambda_{p,s} = \lambda_0 \left(\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0 \cos^2 \theta_0}{n^2}} - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta_0}{n^2 \cos^2 \theta_0}} \right) \quad (3)$$

对于窄带滤光片,在斜入射时其偏振光中心波长分离现象会导致严重的PDL,影响器件的性能和在DWDM系统中的使用.该问题可通过优化滤光

片的膜系结构加以改善.在间隔层中同时使用不同厚度的高、低折射率材料,能调整其等效折射率,以做到特定角度范围内偏振光中心波长的对准^[12].

2 膜系设计

我们的设计目标是能实现25 nm以上波长调谐范围的100 GHz信道间隔的角度调谐窄带滤光片,正入射时的中心波长在1563 nm处.选用的高折射率材料是 Ta_2O_5 ,折射率 $n_H = 2.08$,低折射率材料为 SiO_2 ,其折射率为 $n_L = 1.45$.由于窄带滤光片是由多层高、低折射率膜层交替叠加形成的多谐振腔组合,为便于制备其每层膜都为四分之一参考波长整数倍的规整膜层.对于滤光片膜系优化设计的数学描述,可设计的参量包括每一腔的镜层参量、间隔层结构特征参量、干涉级次参量以及串接腔数等.在遗传算法中,首先可将上述参量通过编码表示为遗传空间的基因型数据串,选择一个由若干初值构成的群体,然后利用评价函数对该群体进行适应度评估检测,再分别执行选择算子、交叉算子和变异算子操作,从而进化产生下一代子体,完成一次遗传进化.通过评价函数来判断新的群体是否向所期望的方向进化.按照程序进行多次叠代处理,使群体不断地进化下去,最终得到最优的解.

2.1 评价函数

常规用于正入射的窄带滤光片其间隔层仅由2 mL或2 MH组成, m 为干涉级次.但在斜入射的窄带滤光片设计中,为避免偏振光中心波长分离现象,在不使用新材料的情况下,其间隔层中需要同时使用高、低折射率材料,经过合理搭配以达到合适和等效折射率.作为对称结构,改进的间隔层中高、低折射率材料的膜层数应为奇数,可为3,5或7层.间隔层结构的中心为低折射率材料,两边对称搭配高、低折射率材料以调整等效折射率,其单腔结构为: $(\text{HL})^p(\text{H})^{s_1}(\text{L})^{s_2} \cdots (\text{H})^{s_i}(\text{LH})^p$.这样角度调谐滤光片的基本光谱特性就由串接的单腔膜系的个数 q ,各单腔反射层HL的对数 p ,间隔层中高、低折射率膜料的特征搭配层数 i 以及对应的高、低折射率材料的干涉级次 s_i 决定.同时角度调谐滤光片还要同时考虑斜入射时的光谱特性,所以还需要有正入射和最大斜入射角这样的角度参量指标.这样将上述为正整数的各参量作为自变量,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.

对于一个最优化问题,合理的构建评价函数直接决定了寻优结果的好坏.设系统的截止带宽为 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 ,斜入射时两个偏振分量的中心波长

偏离度为 σ , 矩形度定义为 $\epsilon = BW_{0.5\text{dB}}/BW_{25\text{dB}}$, 其中 $BW_{0.5\text{dB}}$ 和 $BW_{25\text{dB}}$ 分别为透射带在 -0.5 dB 和 -25 dB 处的带宽, 纹波系数定义为 $\xi = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})/T_0$. 在 100 GHz 的 DWDM 系统中, $\alpha = 0.4\text{ nm}$, $\beta = 1.2\text{ nm}$, l 取为 0.1 dB , σ 取为 0.01 nm . 则斜入射窄带滤光片设计的需要满足的设计约束条件为

$$\begin{aligned} \tau(\lambda - \alpha/2, \lambda + \alpha/2) &\leq l, BW_{0.5\text{dB}} \geq \alpha \\ BW_{25\text{dB}} &\leq \beta, CWL \leq \sigma \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\tau(\lambda) = -10\log(T(\lambda))$.

考虑到以上各项指标要求, 评价函数在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、带宽最优和在特定入射角度下两个偏振分量的中心波长分离最小的解. 因此, 我们构建了式(5)的评价函数

$$\psi(\{p, si\}) = \omega_\xi(10\xi)^2 + \omega_\epsilon(1-\epsilon)^2 + \omega_\sigma(10\sigma)^2 \quad (5)$$

式中 ω_ξ 和 ω_ϵ 分别为纹波系数和矩形度的权重因子, ω_σ 是为其偏振光中心波长偏离度的权重因子, 经试验这些权重因子的值都可取为 1.

2.2 算法设计

窄带滤光片的设计是有约束条件的规整膜系设计, 可设计的参量都在某一范围内的整数. 根据实际情况, 我们设定镜层参量的取值为 6, 7, 8, 9, 将其二进制编码为 (00), (01), (10) 和 (11); 将串接腔的数量 2, 3, 4, 5 用二进制编码 (00), (01), (10) 和 (11) 表示; 将间隔层特征值 1, 3, 5, 7 用二进制编码 (00), (01), (10) 和 (11) 表示; 将表示干涉级次的间隔层高、低折射率光学厚度参量 2-9 的整数用二进制编码 (000)-(111) 表示; 入射角度参量的取值 (正入射和最大角度斜入射) 直接编码为 0 和 1. 这样每一组膜系结构参量构成一个群体, 群体的链长 L 为 24, 群体的空间为 $S = (0, 1)^{24}$.

利用 Matlab 6.5 的遗传算法工具箱, 可在编程中将前面设计的膜系评价函数引入. 其他遗传算子则可以直接调用工具箱中的库函数. 利用线性排序算子, 根据评价函数对群体中的个体分配适应度, 采用基于适应度的随机遍历抽样作为选择算子, 单点交叉算子的交叉概率选为 0.7, 变异操作使用变异概率为 $0.7/L$ 的变异算子, 采用基于适应度的重插入算子来实现群体种群恢复和精英选择. 由于算法收敛条件以评价函数为主要依据, 故最大遗传代数的设定可设为 500.

2.3 结果分析

按照此程序和算法, 经过计算机寻优计算, 得到如下的最优规整膜系结构为

$$\left[\begin{array}{l} (\text{HL})^6 5\text{H}6\text{L}5\text{H}(\text{LH})^6 \text{L}(\text{HL})^7 5\text{H}6\text{L}5\text{H}(\text{LH})^7 \\ \text{L}(\text{HL})^7 5\text{H}6\text{L}5\text{H}(\text{LH})^7 \text{L} \\ (\text{HL})^7 5\text{H}6\text{L}5\text{H}(\text{LH})^7 \text{L}(\text{HL})^6 5\text{H}6\text{L}5\text{H}(\text{LH})^6 \end{array} \right] \quad (6)$$

首先在正入射条件下, 将此遗传算法得到的膜系式(6)与采用针法设计的膜系透射曲线结果进行了比较, 如图 1 所示. 从图 1 中可以看出, 利用遗传算法设计的窄带滤光片膜系比针法设计的膜系具有更小的插损以及更高的矩形度.

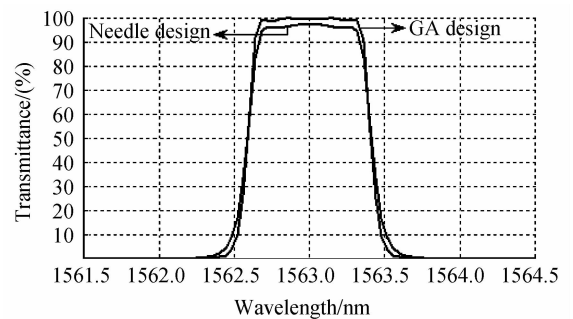


图 1 遗传算法设计与针法设计的透射曲线比较

Fig. 1 Comparison of transmitting curve by GA and needle

同时在斜入射状态下将两种算法的设计结果进行了比较. 对于遗传算法设计的结果, 当以 18° 倾斜入射时, 透射曲线如图 2 所示. 从计算结果看, 其中心波长从正入射时的 1563 nm 移动到约 1538 nm 处. 整个膜系在 $0^\circ \sim 18^\circ$ 内的各项指标均满足设计要求, 其偏振分量的中心波长得到有效的对准, PDL 低于 0.1 dB . 膜系的可调谐范围达到了 25 nm 以上, 按照国际电信联盟 (ITU) 规定的 100 GHz 系统 0.8 nm 信道间隔的指标, 单片角度调谐滤光片的可调谐信道数可达 30 个以上. 继续增加入射角度时仍能保持偏振光中心波长的对准, 只是由于偏振光带宽的分离加大, 使得平均光的通带指标不再满足设计要求.

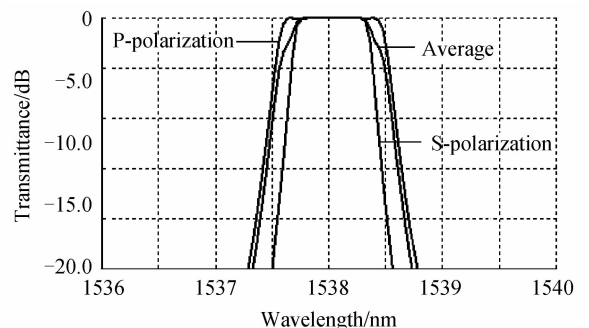


图 2 膜系(6)在 18° 时的透射曲线

Fig. 2 Transmitting curve of the stack(6) at 18°

对于针法设计的膜系, 其斜入射角度只在 15° 以内求出了有效解. 当以 17.6° 斜入射时, 该膜系的

中心波长才能从正入射时的 1 563 nm 移动到 1 538 nm 处实现 25 nm 的波长调谐量. 但此时偏振光的中心波长产生了明显的分离, 导致平均光的透射曲线有缺陷不再对称. 因此其有效波长和角度调谐范围均小于遗传算法所得结果.

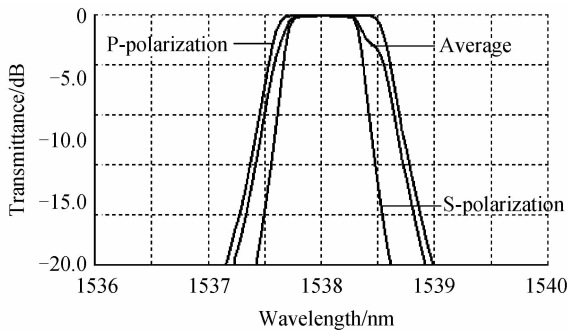


图3 针法设计膜系在 17.6°时的透射曲线

Fig. 3 Transmitting curve of the needle design at 17.6°

3 实验结果

测试所用的角度调谐滤光片是根据遗传算法设计的膜系式(6)由 BK 公司制备的. 为了增加透射率和抑制纹波, 我们给膜系设计了增透膜, 其厚度分别为 0.71H 和 0.58L. 图 4 和图 5 分别是该角度调谐滤光片在正入射和 18°斜入射时在光谱仪上的测试曲线, 空心圆点处为 -25 dB 截止带的带宽位置. 如图所示, 滤光片正入射时的透射曲线和理论设计一致, 光谱的矩形度较高且通带平坦. 当滤光片的入射角度增大到 18°时, 由于透射模斑展宽引起的接收耦合度降低, 导致透射光谱矩形度略有降低, 但其带宽指标仍满足设计要求. 其透射光谱的谱形对称, 没有产生明显的偏振光中心波长分离现象. 在 18°倾斜入射时其中心波长由正入射时的 1 563 nm 移至 1 538.2 nm, 能够完成 25 nm 的波长调谐, 说明该滤光片具有较大的波长和角度调谐量, 且适用于斜入射状态.

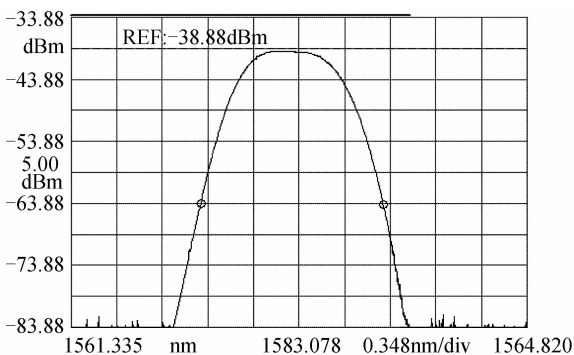


图4 滤光片在正入射时的测试光谱

Fig. 4 The measured spectrum at normal incidence

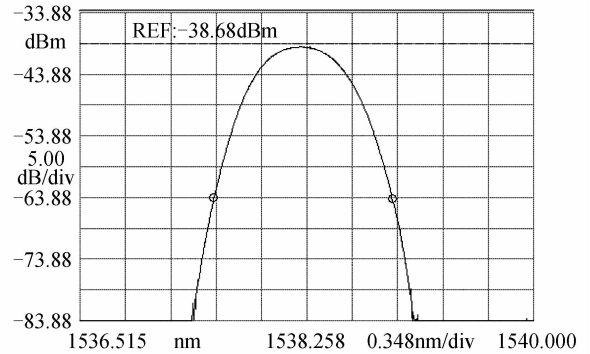


图5 滤光片在 18°时的测试光谱

Fig. 5 The measured spectrum at 18° incidence

4 结论

基于遗传算法的窄带滤光片膜系优化设计是一种高效的全局优化设计方法. 与采用逐行技术的针法相比, 用遗传算法在进行斜入射窄带滤光片膜系设计可以得到更优的结果. 通过本文构建的模型以及利用遗传算法设计的窄带滤光片, 可以有效地通过调整滤光片间隔层高、低折射率膜料的干涉级次及等效折射率来抑制偏振分离等现象. 理论设计和实验测试证明该算法是简单可行的, 对斜入射窄带滤光片以及角度调谐滤光片的设计具有一定的指导意义, 同时具有较大的应用前景.

参考文献

- [1] MU Xin, FU Xiu-hua, ZHAO Yan, *et al.* Design and manufacture interference filter applied in criminal investigation and test optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 259-262.
牟鑫, 付秀华, 赵燕, 等. 刑侦检测光学系统中干涉滤光片的设计与制备[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 259-262.
- [2] SUEMURA Y, TAJIMA A, HENMI N, *et al.* An 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.
- [3] DOMASH L, WU M, NEMCHUK N, *et al.* Tunable and switchable multiple-cavity thin film filters[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(1): 126-135.
- [4] YU Kan, JI Zi-juan, HUANG De-xiu, *et al.* Transmitting intensity distribution after a Gaussian beam incident obliquely on a narrowband filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1971-1975.
俞侃, 季紫娟, 黄德修, 等. 高斯光束斜入射窄带滤光片的透射光强分布[J]. *光子学报*, 2010, **39**(11): 1971-1975.
- [5] YU Kan, LIU Wen, HUANG De-xiu, *et al.* Characteristics analysis and stack design of the angle-tuned filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(6): 1175-1179.
俞侃, 刘文, 黄德修, 等. 角度调谐滤光片的特性分析及膜系设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(6): 1175-1179.
- [6] NIE Ming-ju, LIU De-ming. Optimized algorithm of polarization controlling for thin-film filters at oblique incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 2015-2018.

- 聂明局,刘德明. 倾斜入射薄膜滤光片偏振控制的优化算法[J]. 光子学报,2009, **38**(6):2015-2018.
- [7] LI Da-qi, LIU Ding-quan, ZHANG Feng-shan. Control of polarization for the visible infrared broadband dichotic beamsplitter at oblique incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(1): 5-8.
李大琪,刘定权,张凤山. 可见红外宽光谱分色片偏振调控的设计[J]. 光子学报,2011, **40**(1):5-8.
- [8] CHEN Rui, WANG Feng-li, ZHU Jing-tao, *et al.* Design of 30.4 nm multilayer based on genetic algorithms[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1819-1824.
陈锐,王凤丽,朱京涛,等. 基于遗传算法的 30.4nm 多层膜设计[J]. 光子学报,2008, **37**(9):1819-1824.
- [9] LI Cun-xia, WANG Zhan-shan, WANG Feng-li, *et al.* Design and fabrication of high reflection multilayer for the wavelength range 50~110 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1862-1866.
李存霞,王占山,王凤丽,等. 50~110 nm 波段高反射率多层膜的设计与制备[J]. 光子学报,2007, **36**(9):1862-1866.
- [10] DING Wen-ge, YUAN Jing, LI Wen-bo, *et al.* Thickness and optical constants calculation of hydrogenated amorphous silicon film based on transmission and reflectance spectra[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1096-1100.
丁文革,苑静,李文博,等. 基于反射和透射光谱的氢化非晶硅薄膜厚度及光学常量计算[J]. 光子学报,2011, **40**(7): 1096-1100.
- [11] YU Kan, LIU Wen, HUANG De-xiu *et al.* Optimal design and arithmetic on the stack of the 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.
- [12] GU Pei-fu, LI Hai-feng, ZHANG Yue-guang, *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.



• 下期预告 •

InP 阵列波导光栅的误差分析

潘盼,安俊明,王亮亮,张俪耀,王玥,胡雄伟

(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

摘要:在 InP 阵列波导光栅的制作过程中会引入不同的误差,从而影响器件的性能.为了最大限度地控制误差,提高半导体器件性能,本文采用传输函数法对 InP 基阵列波导光栅的系统误差和随机误差分别进行了分析.从系统误差的模拟结果中可以得到如下结论:深脊型波导的有效折射率 n_e 平均每偏移 ± 0.0001 ,中心波长偏移 $\pm 0.05\text{nm}$.相邻阵列波导长度差 ΔL 每偏移 $\pm 0.01\ \mu\text{m}$,中心波长将偏移 $\pm 0.44\ \text{nm}$. n_e 和 ΔL 仅仅会影响到传输谱中心通道及其他各通道对应的波长,使得传输谱发生整体漂移,而信道间隔及串扰不会改变.罗兰圆半径 R 偏移不会影响器件的中心通道对应的波长,但会使其它通道对应的波长发生变化,最终使得信道间隔改变, R 增加 $50\ \mu\text{m}$,信道间隔减小 $0.03\ \text{nm}$.从随机误差模拟结果中,得出:波导芯区折射率、上包层折射率、衬底折射率、波导宽度和波导芯层厚度的随机波动会对阵列波导光栅的串扰产生较大的影响.根据以上分析,可以通过控制不同参量来调节器件的中心波长以及信道间隔等来优化阵列波导光栅的光学性能.

关键词:InP 阵列波导光栅;简单传输函数法;系统误差;随机误差