

文章编号: 0258-7025(2003)01-0057-03

基于遗传算法的窄带滤光片的优化设计

杨明红, 刘劲松, 张波

陈清明

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

(武汉金石凯激光技术公司, 湖北 武汉 430073)

摘要 提出了基于遗传算法的窄带滤光片的优化设计方法,建立了遗传算法的理论分析模型。根据开发的程序,优化设计出一组 50 GHz 的窄带滤光片,通过与针法设计的膜系比较,遗传算法得到的膜系具有更低的通带插入损耗、纹波系数和更高的矩形度。

关键词 薄膜物理学;窄带滤光片;遗传算法;优化设计

中图分类号 O 484.4 **文献标识码** A

Optimal Design of Narrow-band Filter with Genetic Arithmetic

YANG Ming-hong¹, LIU Jin-song¹, ZHANG Bo¹, CHEN Qingming²

(¹State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; ²Wuhan Goldensky Laser Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract A narrow band filter design method based on genetic arithmetic is provided in this paper. Theoretical analysis model is built up. A 50GHz filter is optimized according to the programme. Compared with the films system obtained by needle design, it has less bandpass loss, ripple coefficient and higher rectangle degree.

Key words film physics; narrow bandpass filter; genetic arithmetic; optimal design

1 引言

在膜系优化设计中,以膜系结构为参数的评价函数是一个非常复杂的多峰函数。通常当膜系层数超过 6~8 层时,膜系评价函数的峰值急剧增多,使传统的梯度法等优化方法容易陷入到局部极值中去,从而无法得到一个满意的结果。尽管近年来发展的针法自动设计采用隧行技术可从一个局部极值隧行到另一个局部极值,在一定程度上解决了膜系优化设计问题,但其本质上仍是一种局部优化方法,在全局寻优能力上显得不足,而传统的随机搜索方法在膜系层数多时效率又很低。因此,目前在薄膜自动设计领域内,尚缺乏有力的全局寻优的手段^[1]。

遗传算法^[2,3](GA)的发展,为解决膜系设计中陷入局部极值的问题提供了条件。GA 作为一种通用的全局寻优智能计算方法,与传统随机搜索方法不同的是 GA 为一个群体优化过程,它不是从一个

初值出发,而是从一组初始值出发进行优化,且这些初始值好比一个生物群体,优化的过程就是这个群体繁衍、竞争和遗传、变异的过程;是一个有指导性的搜索过程,可以保证搜索过程向更优化的方向发展。因此,GA 寻优效率更高。GA 被认为是对今后十年的计算技术有重大影响的关键技术,已得到了越来越多的关注与重视^[4,5]。本文将讨论把遗传算法引入到窄带滤光片的膜系优化设计过程中,摆脱传统设计方法陷入局部极值的情况,使优化过程趋向于全局的最优解,从而可以得到最佳的膜系组合,获得性能更好的膜系结构。

2 理论模型

多腔 F-B 型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四分之一的整数倍,设其表示为 Y

收稿日期:2001-10-08;收到修改稿日期:2002-03-14

作者简介:杨明红(1975—),男,湖北人,华中科技大学激光技术重点实验室博士研究生,主要从事红外光学薄膜和光通信薄膜器件的研究。E-mail: hust4mhyang@yahoo.com

$$Y = \text{Sub.} \mid D_1 N_1 \mid D_2 N_2 \mid \cdots \mid D_i N_i \mid \cdots \mid D_m N_m \mid \text{Air}$$

其中 Sub. 表示基片, N_j 表示折射率为 n_j 的第 j 层膜 ($j = 1, 2, \dots, m; n_i \in [n_H, n_L]$), D_i (正整数) 为该层膜的光学厚度(其单位为 $\lambda_0/4$, λ_0 是该膜系的中心波长), 总膜层数为 m 。基片的折射率为 n_g , 入射介质(空气)的折射率为 n_0 , 那么, 膜系 Y 在波长 λ 处的特征矩阵为

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \left[\prod_{j=1}^m \begin{pmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j / n_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} 1 \\ n_g \end{pmatrix}$$

$$\delta_j = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda(q)} D_j \cos \theta_j & (s \text{ 偏振}) \\ \frac{\pi}{2} \frac{\lambda_0}{\lambda(q)} \frac{D_j}{\cos \theta_j} & (p \text{ 偏振}) \end{cases} \quad n_0 \sin \theta_0 = n_j \sin \theta_j$$

薄膜对波长为 λ 的光的透过率为

$$T(\lambda) = \frac{1}{2} [T_s(\lambda) + T_p(\lambda)]$$

其中, $T_{s,p}(\lambda) = \frac{4n_g n_0}{(n_0 B + C)(n_0 B + C)^*}$

规定窄带滤光片的矩形度为 ϵ , 通带内的纹波系数为 ξ , 定义它们为

$$\epsilon = BW_{0.9} / BW_{0.1} \quad \xi = (T_{\max} - T_{\min}) / T_0$$

以镜层参数、腔层参数和腔层特征参数为自变量构造评价函数的形式为

$$\psi(s_i, \omega_i, t_i) = \tilde{\omega}_\xi (10\xi)^2 + \tilde{\omega}_\epsilon (1 - \epsilon)^2$$

其中, 评价函数 $\psi(s_i, \omega_i, t_i)$ 中的自变量 s_i, ω_i, t_i 分别表示窄带滤光片膜系中第 i 腔的镜层参数、腔层参数和腔层特征参数。如 (6, 3, 1) 表示某一单腔窄带滤光片, 其镜层参数为 6, 即 (HL) 6; 腔层参数为 3, 即干涉级次为 3; 腔层特征值决定了腔层的材料特性, 1 表示腔层由高折射率材料组成, 0 表示腔层由低折射率材料组成, (6, 3, 1) 即代表膜系 (HL) 6 6H (LH) 6。 $\tilde{\omega}_\xi$ 和 $\tilde{\omega}_\epsilon$ 分别是关于纹波系数和矩形度的权重因子。

3 遗传算法的实现

遗传算法用于窄带滤光片的优化设计, 其算法的过程如下: $k = 0$ 选择初始化的窄带滤光片膜系 P_0

重复

第一步: 从群体中按适应度大小(即评价函数值的大小), 随机地选取父本群体 F_k ;

第二步: 由父本群体 F_k 经交配产生子代 C_{k+1} ;

第三步: 变异 C_{k+1} 得到中间群体 M_{k+1} ;

第四步: 由父代群体和中间群体共同组成新的群体 P_{k+1} (父代参与竞争) 或中间群体 M_{k+1} 作为新的群体 P_{k+1} (父代不参与竞争)

$k = k + 1$

until 停机准则满足。

按照这种思路, 我们设计了基于遗传算法的窄带滤光片的优化程序, 其程序的主流程结构如图 1。

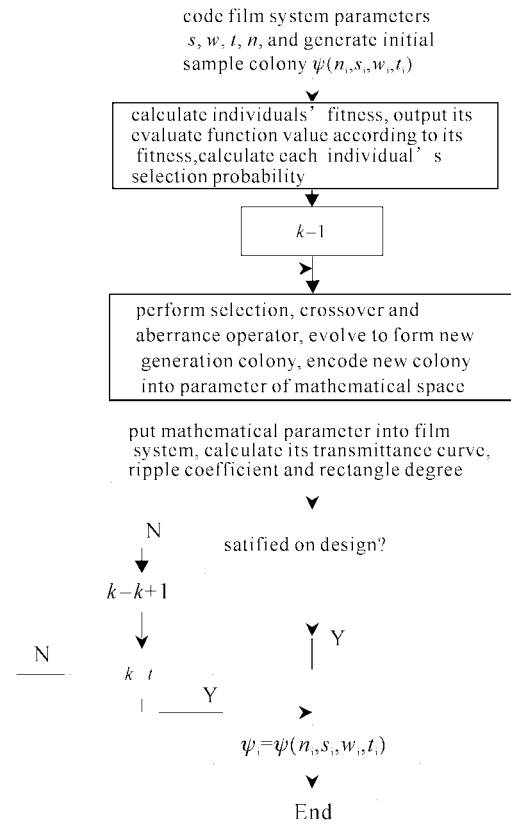


图 1 基于遗传算法的窄带滤光片程序设计流程图
Fig. 1 Main flowchart of narrow band filter design based on GA

由于窄带滤光片一般是由一百多层的高、低折射率材料的膜层交替叠加而成的多谐振腔的组合, 其每层膜都为四分之一波长的规整膜层。对于实际的窄带滤光片膜系优化设计的数学描述, 可设计的参数包括每一单腔的镜层数、腔层数和腔层特征值以及腔数^[6,7]。在遗传算法的设计中, 首先将解空间的解参数镜层数、腔层数和腔层特征值等通过编码表示成遗传空间的基因型串结构数据, 选择一个由若干初始解组成的初始群体; 然后利用评价函数对个体进行适应度评估检测, 分别执行选择算子(采用赌轮方式)、交叉算子(随机配对, 随机设定交叉处, 采用一点交叉生成两个子体)、变异算子(按位随机变异)操作, 从而进化产生下一代子体, 完成一次

遗传进化。通过评价函数判断,新的个体的确是朝我们所期望的方向进化了。按照程序进行多次叠代处理,即群体不断地一代代进化下去,最终可以得到最优解或近似最优解。

4 结果分析

本文以折射率分别为 2.16, 1.45 的 Ta_2O_5 和 SiO_2 作为高、低折射率膜料,设计用于信道间隔为 50 GHz 的 DWDM 光纤通信系统的窄带滤光片,该窄带滤光片要求通带损耗小于 0.2 dB,峰值下 0.5 dB 的带宽不小于 0.2 nm,峰值下 25 dB 的带宽不大于 0.7 nm。为使通带有较高的矩形度,多腔 F-B 型窄带滤光片的腔数必须为四腔以上,每一腔的膜层层数至少为 21 层^[8]。

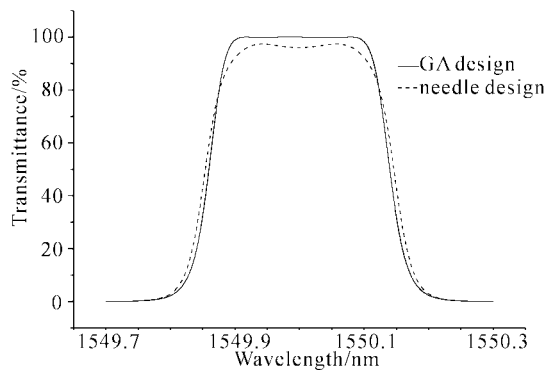


图 2 50 GHz 滤光片遗传算法设计与针法设计的比较
Fig. 2 Comparison of 50 GHz filter designed by GA and needle

由于窄带滤光片的设计是有约束条件的规整膜系的设计,可设计参数都应属于某一范围内。根据实际情况,我们设定镜层参数的取值为 6, 7, 8, 9, 可分别将其二进制编码为 (00), (01), (10) 和 (11), 同样,将腔层参数 1, 2, 3, 4 也二进制编码为 (00), (01), (10) 和 (11), 腔层特征值 0\1 直接编码为 0 和 1, 腔层数 4, 5, 6, 7 二进制编码为 (00), (01), (10) 和 (11)。这样,每一套滤光片参数即构成一个个体,如 $X_1 = (01010111001110101)$ 表示的膜系参数为 $\phi(5, 721-821-831)$, 个体的链长为 17。于是个体的空间为 $S = (0, 1)^{17}$ 。

按此遗传算法,利用 Matlab 语言编写了窄带滤光片的设计程序,利用该程序优化得到了一组最佳的 50 GHz 窄带滤光片的膜系设计,同时将此膜系和针法设计的结果进行了比较,其性能指标的对比如图 2。从图中可以看出,利用遗传算法设计的窄带滤光片膜系比针法设计的膜系有更小的通带损耗和纹波系数,以及更好的矩形度。

5 结 论

基于遗传算法的窄带滤光片的优化设计是一种高效的全局优化算法的设计。这种全局优化设计的方法一定能找到全局的最优解。与采用了隧行技术的针法相比,用遗传算法进行膜系设计可以得到较优的结果,而且无需优化初始膜层厚度,有利于自动设计的完成。因此,这种方法有望在实际中得到应用。

参 考 文 献

- 1 Philip Baumeister. Evolution of the solutions for two design problems presented at the 1998 Optical Interference Coatings Conference [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(13):2230~2234
- 2 D. E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning [M]. Reading: Addison Wesley, 1989. 58~64
- 3 S. Martins, J. Rivory, M. Schoenauer. Synthesis of optical multiplayer systems using genetic algorithms [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(13):2247~2254
- 4 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, G. W. DeBall. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28):5493~5508
- 5 J. A. Dobrowolski, R. A. Kemp. Refinement of optical multiplayer systems with different optimization procedure [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(19):2876~2893
- 6 Li Li, J. A. Dobrowolski. Computation speeds of different optical thin film synthesis methods [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19):3790~3799
- 7 P. Baumeister. Starting designs for the computer optimization of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22):4835~4843
- 8 H. A. Macleod. Thin-film Optical Filters [M]. 2nd ed. New York: Macmillan, 1986. 164~187