

文章编号: 1001-9014(2004)04-0303-05

## 用迭代 Chebyshev 方法设计密集型 波分复用窄带滤光片

王懿喆, 张凤山

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

**摘要:**提出了一种简单而有效的设计方法,即迭代 Chebyshev 方法.通过对 Chebyshev 带通滤光片设计过程的研究,指出由于多层  $\lambda_0/4$  反射堆与原型滤光片的相位特性差异,造成最终带宽显著变窄.从某个给定的比较大带宽初值出发,经过一系列简单的迭代过程,即可得到满足要求的最终结构,从而避免对反射膜堆相位特性的计算.同时,文中还讨论了在优化过程中加入对干涉级次即间隔层厚度和波纹因子进行迭代的结果,最后给出了用迭代 Chebyshev 方法设计波分复用窄带滤光片的过程、框图及实际设计结果,并指出通过不同的迭代过程实现方向受控的优化过程,是该种设计方法的基本原理.

**关键词:**波分复用;Chebyshev 滤光片;迭代;优化

**中图分类号:** TN74 **文献标识码:** A

## DESIGN OF DWDM NARROW BAND FILTERS WITH ITERATIVE CHEBYSHEV METHOD

WANG Yi-Zhe, ZHANG Feng-Shan

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** A simple but valuable iterative Chebyshev design method was presented. By studying the design procedure of Chebyshev band pass filters, we pointed out that it is the phase variation that results in the remarkable narrowing in the final pass band. Beginning with some larger initial values, one can arrive at satisfactory results after several simple iterations without calculating the phase property of reflective stacks. The results of adding interference orders and ripples to the iteration procedures was discussed. The design block diagrams and some actual design results were given. The basic principle of this method is to realize a direction-controlled optimization through different iterative procedures.

**Key words:** DWDM; Chebyshev filter; iteration; optimization

### 引言

用薄膜干涉极窄带滤光片来实现不同通道信号的分波和合波,是目前光通信领域中密集型波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexed, DWDM)系统的主要方式<sup>[1-4]</sup>.由于 DWDM 系统对带通滤光片的技术指标要求非常高<sup>[1,4,5]</sup>,通常这样的膜系都是三腔或三腔以上、膜层数超过一百层的结构,因此如何快速、合理地设计这种窄带滤光片,是一项非常有挑战意义的任务.从制造技术的角度考虑,基于  $\lambda_0/4$  的规整膜系,仍然是设计这种极窄带干涉滤光

片的首选<sup>[1,4-7]</sup>.目前,许多作者已经从不同的途径,提出了许多有价值的设计方法<sup>[4,8-10]</sup>,其中较快速、比较直观的方法是 Chebyshev 滤光片.

用 Chebyshev 多项式的等环特性来设计光学薄膜窄带滤光片,最早是 Young<sup>[11]</sup>和 Knittl<sup>[12]</sup>从电路网络理论与光学多层膜滤波原理的相似性出发而发展起来的.后来,Thelen<sup>[13]</sup>、Baumeister<sup>[14-17]</sup>、Seeley 及其同事<sup>[18-21]</sup>等在此基础上分别发展了一系列具体的设计方法.其中 Seeley 的等环方程方法最为简单易行,他采用了原型滤光片的概念,并最终将其发展成为一种完整的、系统的带通滤光片的设计方法.

收稿日期:2003-03-03,修回日期:2003-09-23

基金项目:中国科学院国防科技创新基金资助项目(CXJJ-104)

作者简介:王懿喆(1971-),男,甘肃镇原人,工程师,在职博士生,主要从事光学薄膜器件的设计理论与工业研究.

Received date: 2003-03-03, revised date: 2003-09-23

用 Seeley 的方法设计 Chebyshev 滤光片,不需要烦琐的矩阵运算和优化过程,从原始的滤光片数据(如腔数、带宽、波纹因子等)出发,通过一系列简单的算式计算,就可以得到比较理想的结果.但是,正如文献[17]中指出的那样,由于引入的原型滤光片与实际光学多层介质膜在相位特性上有本质的不同,用多层介质结构来近似替代原型滤光片中的反射层时,会出现带宽变窄的情况,在反射堆包含很多膜层的 DWDM 极窄带滤光片中尤其如此. Kajikawa<sup>[24]</sup>根据多腔串置结构可视为多个谐振子耦合的原理,通过附加膜堆以改变谐振子的负载因子  $Q$  值来设计带宽可以控制的窄带滤光片; Baumeister<sup>[17]</sup>从相位色散出发,通过修正驻波比来设计等环滤光片的带宽.他们的方法由于最终的结果中包含了多层非  $\lambda_0/4$  厚度的膜层,因此对于一般用途的窄带滤光片而言是成功的,但是当运用到 DWDM 极窄带滤光片时,因可加工性比较低而受到某些限制.

本文提出一种迭代方法,从给定的某个较大的带宽值出发,在 Chebyshev 等环方程的基础上设计窄带滤光片,通过不断逼近来最终获得最佳方案.如果进一步将干涉级次、波纹因子与带宽一起进行迭代计算,还可优化膜系结构、减少膜层总数.

### 1 用 Chebyshev 等环方程设计 DWDM 滤光片

Seeley 等人<sup>[18,19]</sup>详细推导了设计 Chebyshev 带通滤光片的公式和步骤,这里不再详述.假定要设计一个 100G 的滤光片,中心波长在 1550nm 处,0.5dB 处的带宽大于 0.4nm,25dB 处的带宽小于 1.5nm,假定通带中的波纹度小于 1%,根据文献[18],计算出波纹因子的值为 0.1.设计时基片用 WMS-02 玻璃( $n_s = 1.658$ ),两种镀膜材料是  $Ta_2O_5$  和  $SiO_2$ ,对应的折射率分别是  $n_H = 2.06, n_L = 1.465$ .下面用这种方法来进行 DWDM 滤光片的设计,并研究其带宽和波纹因子的变化特性.

用 Chebyshev 等环方程来设计窄带滤光片,首先要确定间隔层即腔的数目  $k$ ,这与所要求的滤光片的矩形度有关.目前的 DWDM 窄带滤光片一般需要三腔或三腔以上的结构,但腔数太多,镀制的难度大大增加.从已经发表的文献<sup>[2,4]</sup>来看,四腔结构是比较常见的.本文以四腔结构为例,先写出原型滤光片的基本结构,假定以低折射率的  $SiO_2$  为间隔层:

$$R_1 2L R_2 2L R_3 2L R_4 2L R_5$$

其中,  $R_{1,2,\dots}$  是反射层,  $2L$  是半波厚度的间隔层.各个

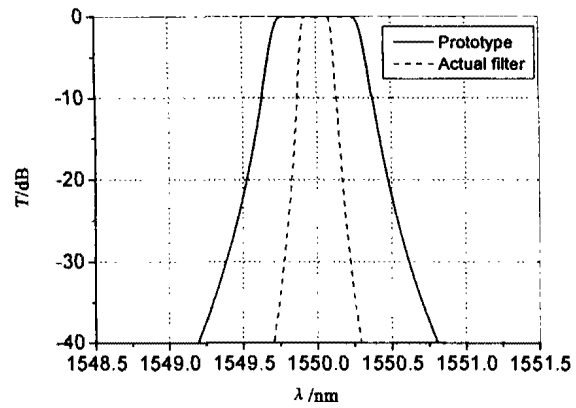


图 1 由给定目标值设计得到的原型(实线)与实际结果(虚线)的比较

Fig. 1 Comparison of prototype (solid line) and actual filter (dash line) derived from given filter specifications

反射层的折射率由以下各式计算:

$$R_1 = (n_s V_1)^{1/2}, \tag{1}$$

$$R_j = n_s (V_j)^{1/2}, \tag{2}$$

$$R_{k-j+2}, \quad j = 2, 3 \dots k \tag{3}$$

$$R_{k-j+2} = n_j, \quad j = 1, 2 \dots k + 1 \tag{4}$$

上式中

$$V_1 = G_1/t, \tag{5}$$

$$V_j = G_j G_{j-1}/t^2, \tag{6}$$

$$V_{k-j+2} = V_j. \tag{7}$$

$G$  是 Chebyshev 等环响应方程应用在电路网络分析时得到的回路导纳( $G$  因子):

$$G_0 = 1, \tag{8}$$

$$G_1 = 2\sin(\pi/2k)/x, \tag{9}$$

$$x = \sinh((\sinh^{-1}(1/h))/k). \tag{10}$$

式中,  $h$  是波纹因子;  $t$  是频率比例因子,可以根据相对带宽计算得出:  $t = \sin(BW\pi/2)$ ,  $BW$  是相对带宽.

根据以上算法得到的原型滤光片透射率如图 1 中实线所示,该原型滤光片基本满足了目标要求.现在,用  $\lambda_0/4$  反射膜堆替代原型中各反射层并插入基片,得到完整的滤光片设计方案如下:

$$AIR(1H 1L)^9 1H 2L(1H 1L)^{21} 1H 2L(1H 1L)^{22} 1H 2L(1H 1L)^{21} 1H 2L(1H 1L)^{10} 1H SUB \tag{D.1}$$

其中 AIR 和 SUB 分别是入射媒质与基片,  $H$  和  $L$  分别是  $\lambda_0/4$  厚度的高、低折射率膜层,以下相同.该滤光片的透射率由图 1 中虚线给出.可见,与原型滤光片及目标要求相比,实际设计结果在通带波纹度方面与原型相差不大,并且满足设计要求,但是带宽明显变窄,超出了目标要求,这是由于多层  $\lambda_0/4$  反射堆与原型中反射层的相位特性差异造成的:原

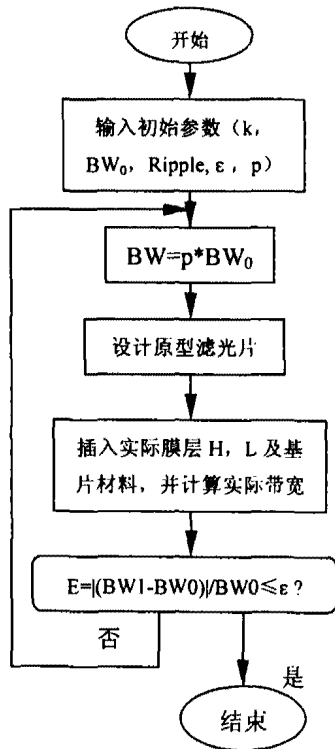


图2 基于带宽的迭代框图

Fig. 2 Iteration blocks about bandwidths

型中相位厚度为  $\pi/2$  的  $R_1$  反射层被替换成  $(1H 1L)^N 1H$  的对称反射堆, 其等效相位远远超过了单层膜的相位厚度, 因此有必要寻求控制带宽的方法. Thelen<sup>[13]</sup> 针对 Chebyshev 等环窄带滤光片设计时的情形, 计算了一系列多种材料的膜层不同的组合堆, 通过调整膜的厚度来获得合适的带宽, 但是只能适合于结构比较简单、层数比较少的滤光片设计. 下面给出的迭代方法可以很好地解决这个问题.

## 2 用迭代逼近法控制带宽

图1的结果表明, Chebyshev 等环滤光片的通带波纹受反射堆相位影响比较小, 而带宽所受影响非常大, 因此可以用迭代的方法来设计 Chebyshev 等环型 DWDM 滤光片的带宽. 假定所要设计的 DWDM 滤光片参数要求不变, 但将初始设计参数中相对带宽  $BW_0$  值放大到某个比较大的值  $BW$ , 如  $BW = 5BW_0$ , 从该带宽值开始计算, 主要过程如下:

- 1) 从给定的  $BW$  出发, 计算原型滤光片;
- 2) 插入反射膜堆和基片, 得到滤光片的完整结构, 其带宽为  $BW_1$ ;
- 3) 比较  $BW_1$  与  $BW_0$ , 如果满足设计要求, 则停止迭代, 否则继续;
- 4) 按给定的迭代逼近方式计算  $BW$ , 并转到

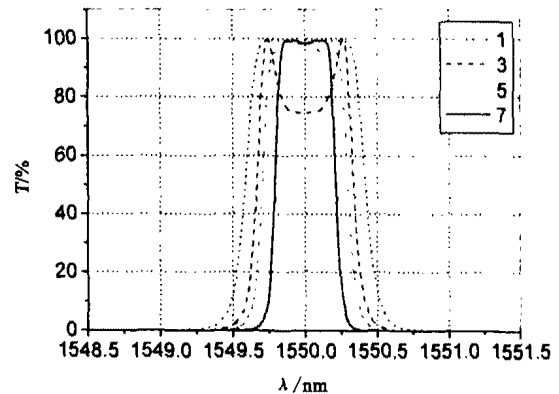


图3 带宽迭代过程中带宽与通带特性的变化(图中数字表示迭代次数)

Fig. 3 Variation of bandwidth and passband property during iteration procedure

1). 上述迭代过程如图2所示. 注意, 由于用  $\lambda_0/4$  反射膜堆来替代原型中的反射层时总存在一定的近似, 因此需要合理设计满足设计要求的条件, 否则迭代过程有可能无法自动终止.

图3表明了从  $5BW$  开始时, 经过7次迭代, 得到的透射率结果. 为了清楚地表达通带波纹变化情况, 透射率是以百分比形式给出. 图中给出了第1, 3, 5, 7次迭代的结果. 可见, 迭代最终将趋近于所要设计的目标带宽. 在这过程中通带的波纹变化很大, 这是不同反射堆之间的结构失配造成的, 但在目标带宽附近却能找到一个合适的结构, 使得通带波纹度仍能满足要求. 这种迭代过程完全简化掉了膜堆相位特性的计算, 方便快捷, 最终的膜系结构如下:

$$\text{AIR}(1H 1L)^8 1H 2L (1H 1L)^{19} 1H 2L (1H 1L)^{20} 1H 2L (1H 1L)^{19} 1H 2L (1H 1L)^9 1H \text{SUB} \quad (\text{D. 2})$$

该结构完全满足前文提出的指标要求.

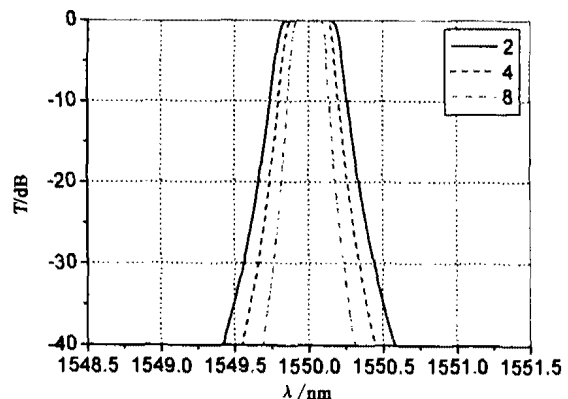


图4 提高干涉级次对通带特性的影响

Fig. 3 Influence of increasing interference orders upon passband properties

### 3 干涉级次的影响

第2目中得到的膜系是最基本的标准型多腔对称结构,各间隔层均是半波厚度.这种基本型结构是通过不断提高原型中的反射层等效折射率来获得比较窄的带宽的,因此最终得到的滤光片的反射堆中包含了比较多的 $\lambda_0/4$ 厚度膜层,其直接的结果是采用极值法监控时,各腔及其附近层的信噪比较低,从而产生比较大的随机误差<sup>[1,9,25]</sup>.因此,在实际设计中,需要尽量减少膜层数量.通过提高间隔层的干涉级次,如采用双半波、3半波甚至4半波厚度,可以直接减小带宽而无需提高原型中的反射层的等效折射率,从而减少反射堆中的膜层数.因此,如果在带宽的迭代过程中适当增加对干涉级次的迭代和控制,就可以获得比较好的优化效果,同时计算时间大大减少.以上述100G的DWDM窄带滤光片为例,从一个比较宽裕的带宽初值10BW出发,经过3次迭代,干涉级次提高到8半波厚度,在此基础上进行带宽的精细优化,得到最终结果.图4表示了迭代过程中得到的不同带宽结果.根据上述原理,我们得到的一个比较合理的结构是:

$$\text{AIR}(1\text{H } 1\text{L})^7 1\text{H } 8\text{L} (1\text{H } 1\text{L})^{17} 1\text{H } 6\text{L} (1\text{H } 1\text{L})^{18} 1\text{H } 6\text{L} (1\text{H } 1\text{L})^{17} 1\text{H } 8\text{L} (1\text{H } 1\text{L})^8 1\text{H } \text{SUB} \quad (\text{D. } 3)$$

需要指出的是,提高干涉级次意味着腔的厚度误差灵敏度提高,因此如何选择反射堆膜层和腔的厚度,是一个与所使用的镀膜设备有关的综合性问题.

### 4 关于波纹因子

从上述各个计算实例中可以看出,采用Chebyshev等环设计,不仅最终结果中的通带波纹比较平坦,而且迭代过程对最终结果的通带波纹影响也比较小.这种情况不是偶然的,而是由Chebyshev滤光片的本身特性决定的.图5给出了初始条件中仅仅改变波纹因子,并且采用相同的迭代过程得到的结果.由计算结果知道,在初始条件中给定的波纹因子值越小,结果中通带越平坦,而矩形度越差;相反,增大波纹因子值,虽然通带特性有所变差,但是矩形度变好.因此,在设计中可以根据波纹度的允许范围来选择最佳结构,得到最大的矩形度,同时可以微调带宽.整个迭代过程如图6所示.与其他一些设计方法<sup>[13,14,22-24]</sup>相比,这种方法能够很好地控制带宽和通带波纹度,对DWDM窄带滤光片而言,无疑具有

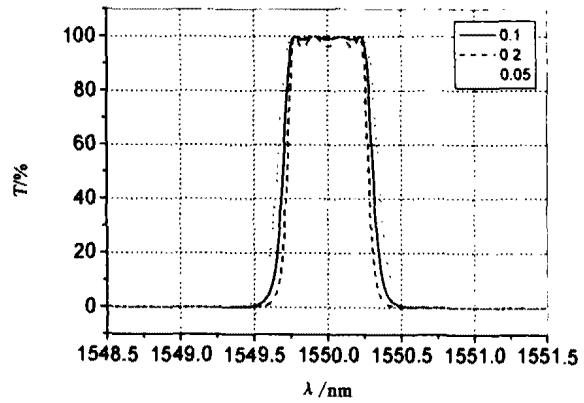


图5 通带波纹因子对矩形度的影响(原型)  
Fig.5 Influence of ripples upon band shapes(prototype)

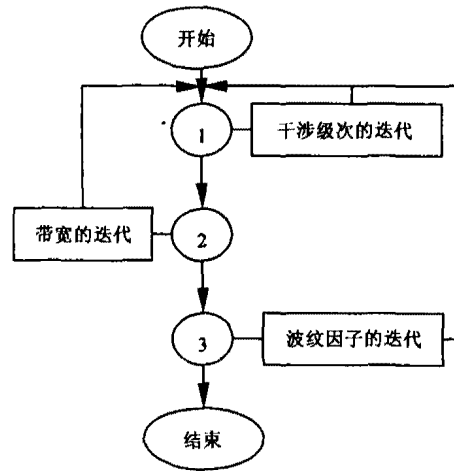


图6 用Chebyshev方法设计DWDM滤光片的全部迭代过程  
Fig.6 Whole iterative procedure to design DWDM filters

相当大的优越性.

### 5 结语

DWDM窄带滤光片的设计,是一项非常复杂的工作.由于是以 $\lambda_0/4$ 为基础的规整膜系的设计,有人把它归结为多变量的整数值优化过程<sup>[9]</sup>.显然,当变量的维数非常大,且维数的具体值不能确定时,单纯的数学优化很难获得比较圆满的解.本文中提出的迭代Chebyshev设计方法从本质上说,是一种给定方向的多变量整数数值优化过程,而优化方向的控制,是由Chebyshev滤光片本身的特性决定的.这种既包括带通滤光片特性计算,又包括整数数值优化的求解过程,尽管不能算是全局优化求解,但由于不需要太多的初始条件和约束条件,通过比较少的迭代次数就能获得比较圆满的解,因此在实际的DWDM滤光片设计中是一种比较好的方法.

## REFERENCES

- [1] Angus M. Challenges in the design and production of narrow band filters for optical fiber telecommunications[J]. *Proc. SPIE*, 2000, **4094**: 46—57.
- [2] Jerome P, Patrice D, Valery B, et al. DWDM multielectric narrow-band optical filters manufacture [J]. *SPIE*, 1998, **3048**: 168—171.
- [3] Willey R R. Achieving narrow bandpass filters which meet the requirements for DWDM[J]. *Thin Solid Films*, 2001, **398**: 1—9.
- [4] Ralf F, Keqi Z, Alfons Z, et al. Design and manufacturing of WDM narrow band interference filter[J]. *Proc. SPIE*, 2000, **4094**: 58—64.
- [5] Ronald R W. Simulation of errors in the monitoring of narrow bandpass filters[J]. *A. O.*, 2002, **41**(16): 3193—3195.
- [6] Angus M. Turning value monitoring of narrow band all-dielectric thin film optical filters[J]. *Optica Acta.*, 1971, **19**: 1—28.
- [7] Angus M, Richmond D. The effect of errors on the optical monitoring of narrow-band all-dielectric thin film optical filters[J]. *Optica Acta*, 1974, **21**: 429—443.
- [8] GU Pei-Fu, BAI Sheng-Yuan, LI Hai-Feng. et al. Design of DWDM thin film interference filters[J]. *Acta Optica*(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. *光学学报*), 2002, **22**(7): 794—797.
- [9] Alexander V T, Michael K T. Automated design and sensitivity analysis of wavelength-division multiplexing filters[J], *A. O.*, 2002, **41**(16): 3176—3182.
- [10] LI Fang, LIM Yongchang. Design of optical interference filters for DWDM [J]. *Proc. SPIE*, 2001, **4581**: 384—389.
- [11] Leo Y. Synthesis of multiple antireflection films over a prescribed frequency band [J]. *J. O. S. A.*, 1961, **51**(9): 967—974.
- [12] Zdenek K. A rational function approach to multilayer synthesis[J]. *A. O.*, 1967, **6**(2): 33—40.
- [13] Alfred T. *Design of Optical Interference Coatings* [M]. New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1988, Chapter 10: 206—215.
- [14] Philip B. Use of microwave prototype filters to design multilayer dielectric bandpass filters [J]. *A. O.*, 1982, **21**(16): 2965—2967.
- [15] Philip B. Simplified equations for maximally flat all dielectric bandpass design [J]. *A. O.*, 1983, **22**(13): 1960.
- [16] Philip B. Bandpass design-applications to nonnormal incidence[J]. *A. O.*, 1992, **31**(4): 504—512.
- [17] Philip B. Bandpass filters for wavelength division multiplexing-modification of the spectral bandwidth [J]. *A. O.*, 1998, **37**(28): 6609—6614.
- [18] John S S. Extraction of techebysheff design data for the low-pass dielectric multilayer [J]. *Optica Acta.*, 1973, **20**(8): 641—661.
- [19] John S S, Young K L, Shiou-Yun W. et al. New algorithms for synthesized design of optical filters [J]. *A. O.*, 1985, **24**(6): 875—878.
- [20] Shiou-Yun W, John S S. Tschebyshev optical filter design [J]. *SPIE*, 1986, **652**: 57—63.
- [21] ZHENG An-Min. Design and fabrication of novel IR bandpass filters [D]. Ph. D thesis. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences(郑安民.新型红外带通滤光片的设计和研制.中国科学院上海技术物理研究所博士学位论文), 2001: 8—43.
- [22] David C. Band shape improvement techniques [J]. *Proc. SPIE*, 2000, **3738**: 65—73.
- [23] Verly P G. Accurate design of square bandpass interference filters [J]. *SPIE*, 1999, **3738**: 262—267.
- [24] Mitsugi K, Izumi K. A design method of optical bandpass filters [J]. *J. L. T.*, 1997, **15**(9): 1720—1727.
- [25] WANG Yi-Zhe. Error analysis and auto-compensation in DWDM extremely narrow band interference filters [J]. *Journal of Applied Optics*(王懿喆. DWDM 极窄带干涉滤光片的误差分析与自动补偿效应. *应用光学*), 2004, **25**(1): 46—51.