

文章编号: 0258-7025(2007)09-1271-05

增透膜的遗传算法设计

徐江峰¹, 陈秋灵^{1,2}

(¹ 中国计量学院信息工程学院, 浙江 杭州 310018; ² 上海理工大学光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

摘要 用遗传算法设计了多层光学膜。设计时只要事先确定最大层数, 算法就可自动优化选择合适的层数, 同样每层的镀膜材料及厚度也由算法自动优化选择。设计中采用了不同以往的评价函数。在 LBO(LiB₃O₅) 晶体上用两种评价函数设计了 1064 nm, 532 nm 二倍频增透膜。前一种评价函数设计的增透膜在 1064 nm 和 532 nm 处的透射率分别达到 99.98% 和 99.99%, 后一种评价函数设计的增透膜在两处的透射率均达到 100.00%。在 K9 玻璃上设计了可见光宽带增透膜, 450 ~ 650 nm 范围的宽带增透膜的透射率均超过 99.91%, 390 ~ 780 nm 范围的宽带增透膜的透射率均超过 99.30%。采用的评价函数对膜系结构的变化敏感时, 用遗传算法设计才有效。

关键词 薄膜; 增透膜; 遗传算法; 二倍频; 宽带; 膜系设计

中图分类号 O 484 文献标识码 A

Anti-Reflection Coating Designed by Genetic Algorithm

XU Jiang-feng¹, CHEN Qiu-ling^{1,2}

¹College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China
²College of Optical & Electronics Information Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract An approach for designing multilayer optical coatings is presented by use of genetic algorithm. With a predetermined maximum layer number, the algorithm automatically specifies the appropriate layer number and material and thickness of each layer. Evaluation function used here is different from the others before. The 1064 nm, 532 nm frequency-doubled anti-reflection coating is designed on LBO (LiB₃O₅) substrate with two evaluations functions. Two coating structures are found with high transmissivities, one with transmissivity 99.98% at 1064 nm and 99.99% at 532 nm, the other with transmissivity of 100.00% at both wavelengths. The broad-band anti-reflection coating on K9 glass substrate is designed. The transmissivities of two broad-band antireflection coatings optimized over a range of wavelength (450~650 nm) and (390~780 nm) are above 99.91% and 99.30% respectively. If the evaluation function is sensitive to the deviation of coating structure, the approach by genetic algorithm is effective.

Key words thin film; anti-reflection coating; genetic algorithm; frequency-doubled; broad-band; multilayer optical coatings design

1 引言

设计膜系的方法分为解析法、图解法(矢量合成法)^[1]和数值法。由于镀膜材料没有理论计算所要求的任意数值的折射率, 解析法、图解法对层数、膜料和膜厚选择是试探性的。数值法是基于评价函数的一种自动设计方法, 已得到广泛应用。前期的数值法主要是修正法^[2~5], 首先用解析法设计一个初

始结构, 然后根据理论构造评价函数, 用计算机自动设计和修正膜系结构, 这种方法只适用于膜系较简单的情况。后来发展了针法^[6~8], 针法仍是一种局部优化方法。遗传算法是一种高效全局搜索技术, 已广泛应用于科学研究和工程设计的各个领域。已有用遗传算法对膜系进行设计的报道^[9~11], 但设计时层数一般是确定的, 甚至每层的膜材也是确定的, 只有很少能自动设计层数^[12]。本文采用遗传算法

收稿日期: 2006-10-10; 收到修改稿日期: 2007-05-08

基金项目: 浙江省自然科学基金(M603033)资助项目。

作者简介: 徐江峰(1962—), 男, 副教授, 主要从事电介质微波测量和电磁场模拟计算。E-mail: cimjfxu@yahoo.com.cn

对双频增透膜和宽带增透膜进行设计,膜系的初始结构由计算机随机产生,层数、膜材、膜厚都由遗传算法进行优化设计,而且采用不同以往的评价函数。

2 理论分析

若在折射率为 n_i 的基底上镀了 N 层膜系的增透膜,每层的折射率为 n_1, n_2, \dots, n_N , 相应的厚度为 h_1, h_2, \dots, h_N , 则光谱透射率为

$$T = 1 - \left| \frac{B\eta_0 - C}{B\eta_0 + C} \right|^2, \quad (1)$$

膜系的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{bmatrix} \cos\delta_i & (j/\eta_i)\sin\delta_i \\ j\eta_i\sin\delta_i & \cos\delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

对 TE 偏振: $\eta_i = n_i \cos\theta_i / z_0$, 对 TM 偏振: $\eta_i = n_i / z_0 \cos\theta_i$, $z_0 = 120\pi$ 为真空波阻抗, $\delta_i = 2\pi n_i h_i \cos\theta_i / \lambda_i$, θ_i 和 λ_i 为光在第 i 层膜中的入射角和波长, 正入射时 $\theta_i = 0$, TE, TM 偏振简并。

膜系的结构可以用二进制数进行编码。假定可选择的膜材有 m 种, 若 $m = 2^n$, 可用 n 位二进制数表示第 i 层膜材的选择

$$C_i = c_i^1 c_i^2 \dots c_i^n, \quad (3)$$

若 m 介于 2^{n-1} 和 2^n 之间, 那么多出的二进制数可弃之不用。第 i 层膜厚度也可用 p 位二进制数表示

$$D_i = d_i^1 d_i^2 \dots d_i^p, \quad (4)$$

第 i 层膜的实际厚度

$$h_i = h_{\max} \frac{\sum_{j=1}^p d_i^j 2^{j-1}}{2^p - 1}, \quad (5)$$

h_{\max} 为设定的一层膜的最大可能厚度。那么 N 层膜

系的结构就可以表示为一串二进制数

$$L = C_1 D_1 C_2 D_2 \dots C_N D_N. \quad (6)$$

在应用遗传算法时, 每个二进制数相当于一个染色体, 二进制数的每一位相当于染色体的一个基因。遗传算法的具体过程为:

1) 产生初始种群; 随机产生 n_{pop} 个 $B = (n + p)N$ 位的二进制数作为初始种群。

2) 计算每个二进制数对应膜系的透射率 T 作为染色体的评价函数, 抽出评价函数最大和最小的染色体, 淘汰最差的染色体, 保留最佳染色体; 其余 $n_{\text{pop}} - 2$ 个染色体采用转轮法根据与评价函数成正比的概率选出新的种群。

3) 在新种群中按一定交叉比例 p_c 随机选择 $p_c \times (n_{\text{pop}} - 2)$ 个染色体, 然后对这些染色体进行随机配对, 采用单断点交叉法进行交叉。所谓单断点交叉法, 就是在 B 个基因中随机抽取一个, 配对的两个染色体相互交换在该基因前的部分。

4) 对 $n_{\text{pop}} - 2$ 个染色体(包括交叉和未交叉的)以一定变异率 p_m 作染色体基因变异的随机选择, 即每个染色体的每个基因都以 p_m 的概率变异(从 0 变到 1 或者相反)。

5) 补充 2 个上一代最佳染色体(第 2 步抽出的), 得到 n_{pop} 个染色体的新一代种群。重复 2)~5) 步。

3 结果与讨论

用遗传算法设计了双频和宽带两种增透膜。选用 8 种镀膜材料, 可以用 3 位二进制数表示, 相应的折射率见表 1。

表 1 所用的膜材和折射率

Table 1 Materials used and the refractive indices at 550 or 500 nm

Code	000	001	010	011	100	101	110	111
Material	14 [#]	13 [#]	Al ₂ O ₃	13 [#]	PbF ₂	13 [#]	14 [#]	14 [#]
Refractive index	1.36	1.46	1.63	1.69	1.75*	1.96	2.049	2.2

: materials used in the reference; * : refractive indices at 500 nm.

3.1 双频增透膜

LBO 是一种性能优良的非线性晶体, 广泛应用于激光二极管抽运固体激光器系统。为了减少因反射引起的损耗, 必须在其表面镀增透膜^[13]。其中二倍频增透膜主要为 1064 nm 和 532 nm, 946 nm 和 473 nm, 1319 nm 和 671 nm 等。

设计了 LBO 晶体 1064 nm 和 532 nm 二倍频增透膜。LBO 晶体折射率 $n_i = 1.562$ 。所用膜材参数见表 1; 膜系最大可能层数为 8 层, 每层用 15 位

二进制数表示, 前 3 位表示这层的材料, 后 12 位表示这层的厚度; 每一膜系结构可表示为 120 位二进制数, 即一个染色体。选择种群数 100, 交叉概率 $p_c = 0.6$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 进化代数 5000。

表 2 是遗传算法在两种评价函数下搜索到的两种结构的双频增透膜。两个膜系的层数都是 3 层, 每一层对应膜材也是一样的。虽然初始确定是 8 层, 但若相邻层的折射率一样时就把它归并为一层。用 1064 nm 和 532 nm 处透射率的乘积 $T_{532} \cdot$

T_{1064} 作为遗传算法的评价函数搜索到的增透膜在 1064 nm 处的透射率是 99.98%，在 532 nm 处的是 99.99%；用 $\exp(T_{532} \cdot T_{1064})$ 作为评价函数搜索到的增透膜在 1064 nm 和 532 nm 处透射率均为 100.00%。搜索中由于评价函数只用 6 位数表示(加上小数点)，当透射率接近于 1 时，前一种评价函数对膜层厚度变化已不敏感了(饱和了)，后一种不存在这一问题，所以后一种评价函数搜索到的膜层厚度更精确。实际上，镀膜时厚度控制无法达到上述精度，膜材折射率值的误差及膜材的吸收都会引起

增透膜实际效果下降，膜材折射率的偏差对透射率影响要大于膜厚偏差的影响^[13]，并且透射率对低折射率层厚度更敏感。

图 1 是第一种结构的透射率随波长从 500~1100 nm 变化的理论曲线。因为两种结构光谱曲线差不多，第二种结构的光谱曲线没有给出。从图 1 可以看出在 532 nm 和 1064 nm 波长处透射率接近 100%。透射率超过 99.9% 的光谱范围，第一种结构：525~533 nm 和 1040~1069 nm，第二种结构：528~536 nm 和 1048~1082 nm。

表 2 两种评价函数下搜索的增透膜结构

Table 2 Anti-reflection coating design for LBO with two evaluation functions

Evaluation	Layer	1	2	3	Transmissivity
$(T_{532} \cdot T_{1064})$	Refractive index	1.46	1.69	1.96	$T(532 \text{ nm})=99.99\%$
	Thickness /nm	254.2	200.3	172.7	$T(1064 \text{ nm})=99.98\%$
$\exp(T_{532} \cdot T_{1064})$	Refractive index	1.46	1.69	1.96	$T(532 \text{ nm})=100.00\%$
	Thickness /nm	245.6	209.2	178.8	$T(1064 \text{ nm})=100.00\%$

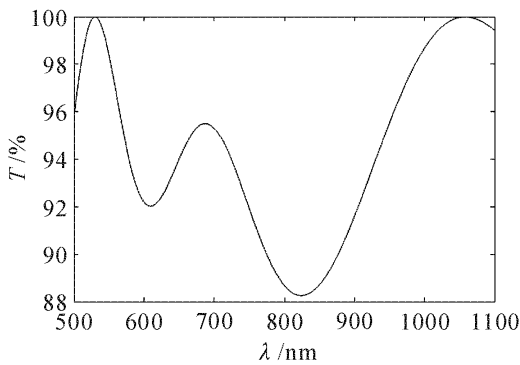


图 1 双频增透膜的透射光谱理论曲线

Fig. 1 Theoretical transmissivity curve of frequency-doubled anti-reflection coating

用遗传算法搜索时一般^[8~12]采用的评价函数为

$$F = \sum_i W_i |T(\lambda_i) - \tau(\lambda_i)|, \quad (7)$$

式中 $\tau(\lambda_i)$ 为设置的透射率， $T(\lambda_i)$ 为某种膜系结构的透射率， λ_i 为采样点的波长， W_i 为相应的权重因子，遗传算法搜索的目的就是使评价函数趋于零；采用的评价函数为

$$F = \prod_i T(\lambda_i), \quad (8)$$

或
$$F = \exp[\prod_i T(\lambda_i)], \quad (9)$$

遗传算法搜索的目的就是使评价函数越来越大，程序运行表明采用的评价函数是有效的，收敛也很快。

3.2 宽带增透膜

在折射率为 $n_t = 1.52$ 的 K9 玻璃上设计了宽

带增透膜。所用膜材参数见表 1；膜系最大可能层数为 8 层，每层用 13 位二进制数表示，前 3 位表示这层的材料，后 10 位表示这层的厚度，每一膜系结构可表示为 104 位二进制数，即一个染色体；选择种群数 100，交叉概率 $p_c = 0.6$ ，变异概率 $p_m = 0.1$ ，进化代数 2000。

在 450~650 nm 波长间每隔 10 nm 算出相应的透射率，以 $\exp[\prod_i T(\lambda_i)]$ (把 21 个透射率乘积作为 e 的指数)为染色体的评价函数进行搜索，表 3 中第一种结构就是这样搜索得到的。在整个可见光区 390~780 nm 用同样方法进行了搜索，这就是表 3 中的第二种结构。

表 3 中第一种结构膜系共有 7 层，用了 4 种膜材，第 2 层、第 3 层折射率一样，其实是同一层；图 2 显示这种结构的增透膜在 450~650 nm 透射率大于 99.91%。文献[14]也设计了 450~650 nm 的宽带增透膜。他们的膜系共有 8 层，用了 5 种膜材，在 450~650 nm 反射光谱的理论反射率小于 0.6%。本文设计的膜系简单，透射性能更好。

国内采用 4 层结构的增透膜，透射率大于 99.5%，带宽一般 400~680 nm，理论计算最好是 400~710 nm^[15]。表 3 中第二种结构共有 7 层，用了 5 种膜材，结构虽然复杂一些，但在整个可见光光谱范围 390~780 nm 的透射率均超过 99.30%。

表 3 不同光谱范围下搜索的增透膜结构

Table 3 Structure of anti-reflection coating design in different spectral range

Range of λ	Layer	1	2	3	4	5	6	7	8
450~650 nm	Refractive index	1.36	2.049	2.049	2.2	1.36	1.96	1.36	1.96
	Thickness /nm	96.4	99.7	20.6	11.0	22.5	10.1	11.5	11.1
390~780 nm	Refractive index	1.36	1.75	1.75	1.96	1.63	1.36	1.96	1.46
	Thickness /nm	95.7	91.9	18.3	20.6	19.3	20.0	16.0	10.6

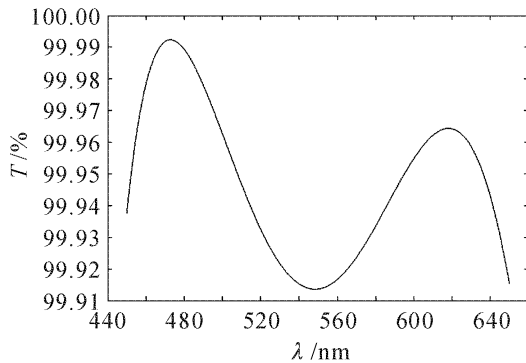


图 2 宽带增透膜(450~650 nm)的透射光谱理论曲线
Fig. 2 Theoretical transmissivity curve of a broad-band anti-reflection coating (450~650 nm)

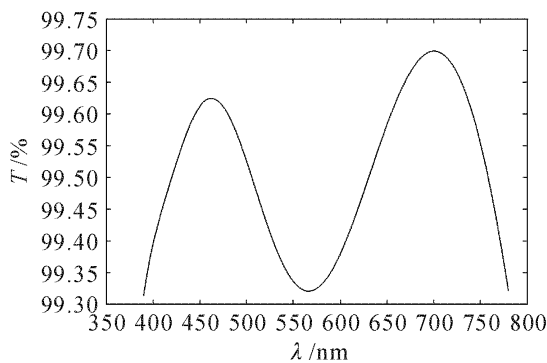


图 3 宽带增透膜(390~780 nm)的透射光谱理论曲线
Fig. 3 Theoretical transmissivity curve of a broad-band anti-reflection coating (390~780 nm)

4 结 论

用遗传算法设计增透膜快捷、简单、方便,初始结构由计算机随机产生,膜系的层数、膜材和膜厚由算法自动优化选择,搜索到的是全局最优解。遗传算法也可以用于设计其他膜系,如干涉滤光片,只不过要选择不同的参量作为评价函数,比如高反膜的评价函数要用反射率。选择的评价函数对膜系结构的微小变化敏感时,用遗传算法设计才能获得好的结果和高的效率。用遗传算法设计了二倍频和可见光增透膜。二倍频增透膜在1064 nm和532 nm处的透射率均为100.00%。宽带增透膜在450~650 nm范围的透射率均超过99.91%;在390~780 nm范围的透射率均超过99.30%。

参 考 文 献

- Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 5~192
唐晋发,顾培夫,刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 5~192
- J. A. Aguilera, J. Aguilera, P. Baumeister *et al.*. Antireflection coatings for germanium IR optics; a comparison of numerical design methods [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2832~2840
- J. A. Dobrowolski, R. A. Kemp. Refinement of optical multilayer systems with different optimization procedures [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(19):2876~2893
- Li Li, J. A. Dobrowolski. Computation speeds of different optical thin-film synthesis methods [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19):3790~3799
- Alexander V. Tikhonravov. Some theoretical aspects of thin-film optics and their applications [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28):5417~5426
- Zhou Jian, Lin Yongchang. A new method of coatings design—needle method [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10):1445~1449
周健,林永昌. 一种新的膜系设计方法——Needle法[J]. 光学学报, 1997, **17**(10):1445~1449
- Lin Yongchang, Gu Yonglin, Zhang Chang *et al.*. Needle method and initial coating design [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10):1433~1436
林永昌,顾永琳,张诚等. 针法与初始膜系设计[J]. 光学学报, 1999, **19**(10):1433~1436
- Li Fang, Zhang Cheng, Lin Yongchang. Indistinct input and improvement of merit function automatic design of coatings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(1):68~71
李芳,张诚,林永昌. 膜系优化设计中的模糊输入及评价函数的改进[J]. 光子学报, 2000, **29**(1):68~71
- Jinn-Moon Yang, Cheng-Yan Kao. Efficient evolutionary algorithm for the thin-film synthesis of inhomogeneous optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(19):3256~3267
- Ye Meiyang. A coating design method based on a whole annealing genetic algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2000, **27**(3):12~15
叶美盈. 基于整体退火遗传算法的膜系设计方法[J]. 光电工程, 2000, **27**(3):12~15
- Wang Xia, Wang Xiaodong, Lü Kui. Optical thin film optimization design using adaptive real-coded genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(1):51~55
王霞,汪晓东,吕崑. 基于实数编码自适应遗传算法的膜系优化设计[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(1):51~55
- J. A. Hageman, R. Wehrens, H. A. van Sprang *et al.*. Hybrid genetic algorithm-tabu search approach for optimising multilayer optical coatings [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **490**:211~222

- 13 Tan Tianya, Huang Jianbing, Zhan Meiqiong *et al.*. Design and error analysis of 1064 nm, 532 nm frequency-doubled antireflection coating for LBO [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):242~247
谭天亚, 黄建兵, 占美琼 等. LBO 晶体上 1064 nm, 532 nm 二倍频增透膜的设计及误差分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):242~247
- 14 Miao Yiqiang, Mao Shuzheng, Luo Qikun. Correction of deviation between theory and experiment for reflection spectrum of broad-band anti-reflection coating [J]. *Journal of Infrared Millm. Waves*, 2001, **20**(6):429~432
缪毅强, 毛书正, 罗琦琨. 宽带增透膜反射光谱的理论及实测偏差的修正[J]. *红外和毫米波学报*, 2001, **20**(6):429~432
- 15 Wang Xiquan. Theoretical calculation of high anti-reflective film in visible spectrum region [J]. *Apply Optics*, 2000, **21**(3):47~49
王希权. 可见光高增透膜的理论计算[J]. *应用光学*, 2000, **21**(3):47~49

征 订 启 事

第八届全国激光加工学术论文集——《中国激光》2007 年增刊, 已于 2007 年 3 月出版。论文集较全面地反映了近年来我国激光加工技术研究、应用和产业化的最新成果, 包括激光连接(焊接、钎焊), 激光去除(切割、打孔、清洗、抛光等), 激光强化(合金化、熔覆、沉积等), 激光制备新材料, 激光快速成形与激光快速制造, 激光复合加工技术, 激光微纳米技术, 激光加工新技术与新应用, 激光加工过程检测与控制, 新型激光器件与光加工系统等领域, 作者来自于国内近 40 个大专院校、科研机构和企业。是广大激光加工领域工作者的非常有价值的参考资料。

论文集约 400 页, 定价 100 元, 进口雅光纸精印, 光盘版定价 80 元, 欢迎读者订阅。

联系人: 高先生 电 话: 021-69918253