

## 遗传算法在光栅面形优化设计中的应用\*

王强<sup>1</sup>, 沈国土<sup>1</sup>, 杨宝成<sup>1</sup>, 蔡继光<sup>1</sup>, 郑继红<sup>2</sup>, 顾玲娟<sup>2</sup>, 庄松林<sup>2</sup>

(1. 华东师范大学物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062;

2. 上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093)

**摘要:**衍射效率高、偏振相关损耗低的衍射光栅是集成波分复用/解复用器件的一种核心元件,在光通信中具有很重要的应用价值,而一般面形的光栅很难达到此要求,为此需要在光栅衍射效率计算的基础上,利用遗传算法对光栅面形进行优化。采用二次函数来描述光栅面形,选取一定的原始样本,利用耦合波方法计算光栅的衍射效率;然后采用遗传算法中的各种算子对样本进行变换,计算变换后光栅面形的衍射效率,选择其中接近所确定条件的样本进行保留;再继续下一次变换和选择,直到满足设定的要求。通过优化最后得到衍射效率高、偏振相关损耗小的光栅面形,这些面形的光栅衍射效率达到90%以上,而相应的偏振相关损耗小于0.1 dB,已经达到光通信中的相应要求。在光栅面形设计中采用了遗传算法进行光栅面形优化为有特定要求光栅的制作提供了理论指导,可以节省一定的人力和物力。

**关键词:**遗传算法; 光栅面形; 衍射效率; 偏振相关损耗

**中图分类号:** TN929.11; TH741.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)04-410-05

## Application of genetic algorithm in the design optimization of grating profile\*

WANG Qiang<sup>1</sup>, SHEN Guo-tu<sup>1</sup>, YANG Bao-cheng<sup>1</sup>, CAI Ji-guang<sup>1</sup>, ZHENG Ji-hong<sup>2</sup>,  
GU Ling-juan<sup>2</sup>, ZHUANG Song-lin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University,

Shanghai 200062, China; 2. College of Optics and Electronics Information Engineering, University of Shanghai

for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Diffraction grating of high diffraction efficiency and low polarization dependent loss is a key component of the integrated wavelength division-multiplexing device and is of importance in optical communication. But it is difficult for traditional gratings to meet the special requirement of optical communication. A genetic algorithm was used to optimize the profile of grating based on the theoretical calculation method of grating efficiency. A quadratic function was used to describe the grating profile, some original samples were selected, and diffraction efficiency of the sample gratings was calculated by using the

收稿日期: 2004-07-24; 修订日期: 2004-09-20

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60478045)

作者简介: 王强(1977-), 男, 山西河曲县人, 硕士生, 从事材料表面特性研究。

couple -wave approach. Furthermore a few transformations of coefficient of quadratic functions were made by using different operators of genetic algorithm. The diffraction efficiencies of the gratings described by those transformed quadratic function were calculated, the grating profiles that were close to the special requirement were chosen, and others were rejected. Next the transformations of the new sample gratings were made again, the diffraction efficiency of the gratings described by those transformed quadratic function were calculated again, and then above process was repeated, it was continued until the request was satisfied. By using the method mentioned before, finally we have achieved some optimizational grating profiles that have high diffraction efficiency and low polarization dependence loss. Diffraction efficiency of the gratings achieves more than 90 percent and polarization dependence loss is less than 0.1 dB. It meets the special requirement of optical communication. It is showed that genetic algorithm was used to optimize the profile of grating based on the theoretical calculation method of grating efficiency, it provides theoretical guidance for grating fabrication, and much manpower and material resource were saved.

**Key words:** Genetic algorithm; Grating profile; Diffraction efficiency; Polarization dependence loss

## 0 引言

光栅是一种很重要的光学元件,已广泛应用于集成光学、声光学、量子电子学、全息、光谱学、光学数据处理、光学测试、航天技术、光通信等领域,光栅的效率是评价其性能最重要的指标之一,不同衍射性能的光栅具有不同的应用价值<sup>[1]</sup>,因此,研究人员从不同的角度对光栅的衍射特性在实验和设计理论上进行了大量的研究。迄今为止,对面反射型衍射光栅的理论研究主要集中在衍射效率的模拟计算方法、各种形状光栅的总衍射效率<sup>[2]</sup>以及数值计算的稳定性<sup>[3]</sup>和收敛性<sup>[4]</sup>等问题。一般对光栅的偏振相关损耗问题研究不多。在高速光通信系统中,偏振相关损耗和偏振模色散相结合,使脉冲展宽更加严重,增加系统的误码率,显著降低通信系统的性能<sup>[5]</sup>。随着计算机和网络技术的飞速发展,波分复用技术被提出来,它是提高光通信容量的一种有效途径。实现波分复用的核心器件是波分复用器和解复用器,用于耦合和分离不同光波长(即信道)。多层介质膜滤波器、光纤布拉格光栅、自由空间衍射光栅及集成光波导光栅等不同的技术已用于实现这类器件,其中集成光波导器件是最有前景的一类。基于复用器和解复用器的衍射光栅具有相对成本低、投资收益高、插入损耗小、串扰小、易于实现光电集成等优点<sup>[6]</sup>,但衍射光栅本身具有偏振敏感

性,大大限制了波分复用技术的应用,因此在红外波段能够设计出一些面形的光栅使其衍射效率高、偏振敏感性小具有很重要的意义。

在优化问题上,传统数值优化方法(如最速下降法、Newton法和共轭梯度法等)有相对较快的收敛速度,计算精度高,但求得的是局部最优解。对全局优化问题,下降轨线法、隧道法等收敛快,计算效率高,但算法复杂,求得全局极值的概率不大;Monte-Carlo随机试验法、模拟退火方法等容易实现,但收敛较慢、效率低。而遗传算法以其能以较大概率求得全局最优解、计算时间相对较少等特点受到广泛重视<sup>[7]</sup>。特别在图像处理领域有不少的应用<sup>[8,9]</sup>,同时遗传算法在热分析等领域中的面形优化也有报道<sup>[10]</sup>,而对光栅面形的研究<sup>[11-14]</sup>主要集中于优化矩形光栅空间占空比,采用的算法也主要是局部搜索算法。本文采用遗传算法<sup>[15]</sup>对光栅面形进行优化,目的是得到衍射效率高、偏振相关损耗小的光栅,从而达到光通信应用的要求。

## 1 遗传算法的基本原理

遗传算法(GA)是一种模仿自然选择与生物遗传进化机制进行搜索寻优的方法,其本质上是一个群体迭代过程,从一个任意选定的初始群体出发,根据优胜劣汰的原则,通过选择、交叉、变异等遗传算子作

用,产生出新的、性能更加优良的下一代群体。如此一代一代重复地进化迭代下去,直到产生满足求解需要的优良个体为止。

通常,使用遗传算法求解一个具体问题包括以下五个必须步骤:(1)对问题的可能解进行编码;(2)创建初始群体;(3)确定适应度函数;(4)执行遗传算子;(5)指定控制算法的参数、变量以及中止条件。图 1 给出了遗传算法的基本流程。

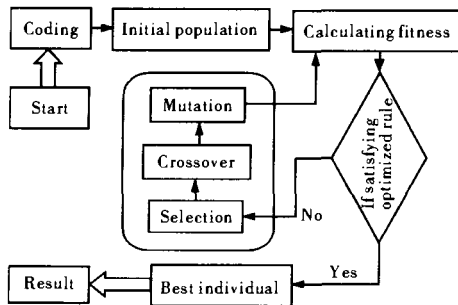


图 1 遗传算法的基本流程

Fig.1 Basic flow of genetic algorithm

## 2 光栅面形的数学模型

在使用遗传算法进行光栅面形优化设计时,首先要建立优化模型。在已知的光栅面形中,主要是二元光栅的台阶形、闪耀光栅的三角形、正弦形等形状。对于一维光栅来说,它们的形状都可以表达为一个函数形式,即 $f(x)$ 。 $f(x)$ 如何表示, $f(x)$ 表达式中系数如何设定、优化得到的结果是否实际可行等都是需要考虑的因素。对光栅面形进行优化主要是为了得到衍射效率高、偏振相关损耗小的光栅,考虑到实际光栅的制作,光栅的面形越简单越好。同时尽量少用参数,以便减少优化时间,提高优化效率。为此将 $f(x)$ 表示为:

$$f(x)=A_1+A_2x+A_3x^2 \quad (1)$$

或

$$f(x)=A_1+A_2(\Lambda-x)+A_3(\Lambda-x)^2 \quad (2)$$

式中 $\Lambda$ 表示光栅周期。

### 2.1 确定设计变量

在给出的光栅面形函数(1)、(2)中,只要确定系数 $A_i, i=1, 2, 3$ ,也就确定光栅面形,故可将 $A_i, i=1, 2, 3$ 作为优化设计变量。

### 2.2 建立目标函数

由于优化光栅面形的目的是使得到的光栅具有衍射效率高、偏振相关损耗小的特点,即在 TE 波和 TM 波下的光栅衍射效率 $ep$ 和 $es$ 的值大而且比较接近(偏振相关损耗小),而光栅的衍射效率与光栅的面形有关,二者之间没有显式的函数关系,其计算也是一个很复杂的过程,一旦光栅的面形确定就可通过参考文献[2]中的耦合波理论得到衍射效率,故将目标函数确定为 $ep(A_1, A_2, A_3)$ 和 $es(A_1, A_2, A_3)$ 。

### 2.3 建立约束

考虑到光栅结构的合理性及工艺条件,需对设计变量给出一定的限制范围。对于所给定的光栅周期 $\Lambda$ ,函数 $f(x)$ 的最大值表示光栅深度,其值一般不要超过光栅周期的大小。考虑到计算光栅效率的实际情况,当光栅面形函数对应的函数值小于 0 可将其取为 0,即将光栅面形函数值表示为非负的。对于变量范围的选择另有研究,公式(1)中变量取 $A_i \in [0.0, 0.5], i=1, 2, 3$ ,公式(2)中变量 $A_1 \in [1.0, 1.5], A_i \in [-0.5, 0.0], i=2, 3$ 。

### 2.4 完整的优化数学模型

根据以上分析可建立光栅面形优化的完整数学模型为:

$$\begin{cases} \max ep(A_1, A_2, A_3) \\ \max es(A_1, A_2, A_3) \\ \min |ep(A_1, A_2, A_3) - es(A_1, A_2, A_3)| \end{cases}$$

边界限制条件如表 1 所示。

表 1 光栅面形函数的变量范围

Tab.1 Range of variable of grating profile

Function	$A_{1,\min}$	$A_{1,\max}$	$A_{2,\min}$	$A_{2,\max}$	$A_{3,\min}$	$A_{3,\max}$
(1)	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.5
(2)	1.0	1.5	-0.5	0.0	-0.5	0.0

## 3 遗传算法的确定

光栅面形优化是一个非常费时的问题,用遗传算法优化设计,需要确定一个具体的遗传策略和方式。

### 3.1 编码方式

编码是应用遗传算法时首要解决的问题。光栅面形优化中含有 3 个设计变量,采用最常用的二进制编

码方式,并且将它们的染色体串长设定为相同的,这样通过设置一个循环就可以产生3个设计变量的染色体串。

### 3.2 适应度函数

在遗传算法中,用适应度函数描述个体的适应程度。引进适应度函数的目的在于可以根据其适应度对个体进行评估比较,定出优劣程度。一般个体的适应度值越大,个体的性能越好;反之,个体适应度值越小,其性能越差。光栅面形优化的适应度函数可以构造为:

$$\text{maxe}(A_1, A_2, A_3) = \frac{ep(A_1, A_2, A_3) + es(A_1, A_2, A_3)}{2} - \left| \frac{ep(A_1, A_2, A_3) - es(A_1, A_2, A_3)}{2} \right|$$

### 3.3 遗传算子

(1) 选择算子 选择一些父代个体用来重组个体,遗传算法有几种选择策略,本文采用最常见的轮盘赌选择。

(2) 交叉算子 把一个父个体的部分结构加以替换重组而生成新个体,在众多二进制交叉方式中,本文选择最基本的单点交叉方式。

(3) 变异算子 交叉完成后即可进行变异操作,变异的目的在于增强遗传算法的搜索能力。对于采用二进制编码的个体,变异就是变量的翻转。

### 3.4 遗传算法运行参数

遗传算法有5个运行参数需要在运行前确定,分别是初始种群数( $pop_{size}$ )、染色体长度( $l_{chrom}$ )、交叉概率( $p_{cross}$ )、变异概率( $p_{mutation}$ )和进化代数( $max_{gen}$ )。现在确定为: $pop_{size}=20$ ;  $l_{chrom}=10$ ;  $p_{cross}=0.4$ ;  $p_{mutation}=0.3$ ;  $max_{gen}=50$ 。

### 3.5 适应度计算中的改进

在遗传算法中,种群初始化后,计算种群中每个个体的适应度,据此评价这一种群中个体的优劣程度。然后将初始种群中的个体经遗传算子作用产生新一代种群,再计算新种群中个体的适应度,据此来评价新种群中个体的优劣程度。由于计算适应度需要的时间较长,如果能够减少其次数就能达到减少计算时间、提高计算效率的目的,加快遗传算法的进程。考虑到初始种群产生后,经遗传算子作用的仅仅是部分个

体,即原来种群中的部分个体被保留下来,如果不再去计算其适应度,只计算经遗传算子作用过的个体将大大减少计算时间,提高计算效率。为此引入一个标志符号,记录经选择算子作用后的个体是否进行交叉、变异操作,如新的个体未经交叉、变异算子作用过,那这个个体的适应度不需计算;如新的个体经交叉、变异作用过,那就重新计算这个个体的适应度。

## 4 优化结果分析

采用Fortran 编制的程序进行优化计算,光栅周期为1.6667 nm,入射角为30°,镀金表面,由于最终计算1530~1560 nm波段,在优化过程中光波波长取1550 nm。将优化得到的结果代入相应光栅面形函数 $f(x)$ 中,得到如下的光栅面形,其中图2是 $f(x)$ 采用公式(1)得到的结果,图3是 $f(x)$ 采用公式(2)得到的结果。图4和图5分别是用优化得到的光栅面形计算得到的光栅-1级衍射效率。图6和图7分别是优化得到光栅面形后计算得到的-1级偏振相关损耗。

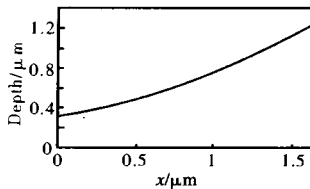


图2 光栅面形示意图

Fig.2 Geometry for the grating

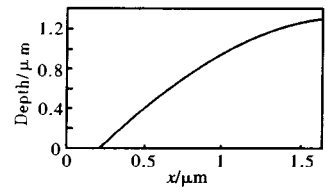


图3 光栅面形示意图

Fig.3 Geometry for the grating

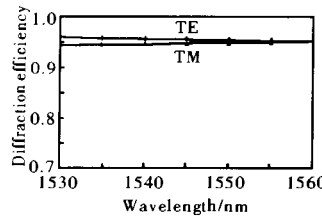


图4 TE波、TM波光栅-1级衍射效率随波长的变化

Fig.4 Diffraction efficiency curves of the reflected negative first-order for TE-polarization and TM-polarization changing with the wavelength

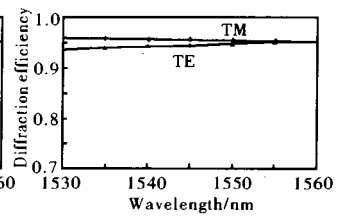


图5 TE波、TM波光栅-1级衍射效率随波长的变化

Fig.5 Diffraction efficiency curves of the reflected negative first-order for TE-polarization and TM-polarization changing with the wavelength

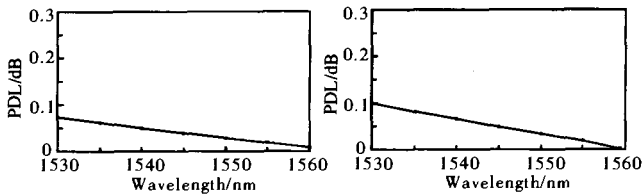


图 6 光栅的偏振相关损耗 (PDL) 随波长的变化

Fig.6 PDL as a function of wavelength for the grating

图 7 光栅的偏振相关损耗 (PDL) 随波长的变化

Fig.7 PDL as a function of wavelength for the grating

计算结果表明,优化得到的光栅面形,不论是 TE 波还是 TM 波,衍射光的-1 级衍射效率都超过 90%,对于光通信中的偏振相关损耗一般要求不大于 0.3 dB,这里偏振相关损耗已达到要求。

## 5 结论

通过利用光栅效率计算程序用遗传算法进行了光栅面形设计优化,得到了衍射效率高、偏振相关损耗小的光栅面形,达到了预期的目的。按照建立的这套方法还可以对其他类似要求的光栅进行优化设计,从而大大提高光栅设计的效率,这也对实际的光栅制作有一定的指导作用。

## 参考文献:

- [1] DENG Luo-gen. Study on laser doppler grating vibrometer for directional discrimination [J]. *Infrared and Laser Engineering* (邓罗根. 辨向激光光栅测振仪的研究. 红外与激光工程), 2001, 30(3): 193-197.
- [2] Moharam M G, Grann Eric B, Pomment Drew A, et al. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous couple-wave analysis of binary gratings [J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [3] Moharam M G, Grann Eric B, Pomment Drew A, et al. Stable implementation of the rigorous couple-wave analysis for surface relief grating: enhanced transmittance matrix approach [J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(5): 1077-1086.
- [4] Lalanne P, Morris G M. Highly improved convergence of the coupled-wave method for TM polarization [J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(4): 779-784.
- [5] SHEN Xiao-qiang, YU Juan, SHAO Zhong-hao. Polarization dependent loss in fiber [J]. *Jiangsu Communication Technology* (沈晓强, 于娟, 邵钟浩. 光纤中的偏振相关损耗. 江苏通信技术), 2002, 18(5): 12-14.
- [6] SHENG Zhong-yan, HE Sai-ling, HE Jian-jun. Simulation for etching diffraction grating by use of scalar diffraction theory [J]. *Opto-Electronic Engineering* (盛钟延, 何赛灵, 何建军. 标量衍射理论模拟蚀刻衍射光栅. 光电工程), 2001, 28(6): 29-32.
- [7] ZHAO Ming-wang. A hybrid numerical algorithm for function optimization based on genetic algorithm and steepest decent algorithm [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice* (赵明旺. 基于遗传算法和最速下降法的函数优化混合数值算法. 系统工程理论与实践), 1997, 7: 59-64.
- [8] HE Ren-fang, WANG Cheng, YANG Wen-bing. Image matching based on chaos genetic algorithms [J]. *Infrared and Laser Engineering* (何仁芳, 王乘, 杨文兵. 基于混沌遗传算法的图像匹配. 红外与激光工程), 2003, 32(1): 13-16.
- [9] WANG Chun-bai, ZHAO Bao-jun, HE Pei-kun. Adaptive segmentation method based on immune genetical algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering* (王春柏, 赵保军, 何佩琨. 基于免疫遗传算法的自适应图像分割方法. 红外与激光工程), 2004, 33(2): 178-180, 193.
- [10] Fabbri G. A genetic algorithm for fin profile optimization [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1997, 40(9): 2165-2172.
- [11] Grosz S I, Skigin D C, Fantino A N. Resonant effects in compound diffraction gratings-influence of the geometrical parameters of the surface [J]. *Phys Rev E*, 2002, 65(5): 056619.
- [12] Gerritsen H J, Jepsen M L. Rectangular surface-relief transmission gratings with a very large first-order diffraction efficiency (~95) for unpolarized light [J]. *Appl Optics*, 1998, 37(25): 5823-5829.
- [13] Bernd Nhammer, Christian David, Jens Gobrecht, et al. Optimized staircase profiles for diffractive optical devices made from absorbing materials [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(13): 1087-1089.
- [14] Hessler T, Rossi M, Kunz R E, et al. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements [J]. *Appl Opt*, 1998, 37(19): 4069-4079.
- [15] WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm - Theory, Application and Software Implementation [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press (王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社), 2001. 1-50.