

含二元光学元件的光学系统 成像特性和设计方法

张 新

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 二元光学元件(BOE)用于常规光学系统可以提供附加设计参数和选择光学材料的自由度。本文主要研究了基面为平面或球面的旋转对称 BOE 的成像特性以及设计制作的方法;用两种等效模型推导了 BOE 的初级象差,分析了产生差别的物理实质;给出一、三级成像特性与色差公式,编制了程序可解析求解满足初级象差平衡的折/衍混合系统的初始结构参数,用 CODE-V 校算,结果吻合;给出了生成掩膜的算法,编制了程序,在激光照排机上输出了掩膜图。最后结合可见、紫外、红外波段的 3 个典型系统设计例子,讨论了二元光学元件在光学系统中应用的场合和限制。

关键词:二元光学;衍射;光学设计;

1 引 言

二元光学的概念是衍射光学,并与微电子工艺技术、计算技术互相渗透、交叉而形成的前沿学科。二元光学元件(Binary Optics Element—BOE)就是通过 CAD,利用微细加工技术,把台阶化的表面浮雕图案做在介质或金属基片上而形成的纯位相型同轴衍射光学元件。BOE 既可用于构成新型功能元件,又可使光学器件实现微型化、阵列化、集成化及经济化,因而被推为“九十年代光学技术”,预计将给传统光学设计理论及加工工艺带来一次革命。

BOE 与传统光学元件(COE)混合构成成像系统,不仅可在宽带光下使用,而且还具有简化结构,减轻重量,增加光学设计和选择光学材料的自由度等显著优点。

2 二元光学基础理论

2.1 理论模型

一般有三种理论模型:矢量衍射模型、标量衍射模型(付里叶光学)、扩展标量衍射模型,分别适用于等效光栅周期与使用波长之比(T/λ)为: ≈ 1 , > 5 , $1 \leq T/\lambda \leq 5$ 的情况。

2.2 BOE 的衍射原理和衍射效率的理论限制

对于同轴衍射光学元件(DOE,将其相位量化即是 BOE),当其 $T/\lambda > 5$ 时,由标量衍射模型可严格证明:

透射函数为 $\exp(i2\pi|\varphi(x)|_1)$ 的 DOE 和 $\exp(i2\pi\varphi(x))$ 的折射元件在光学上是对偶的,即 DOE 的 +1 级射光与折射元件的折射光一致,且其衍射效率为 100%。

注: $|\varphi(x)|_1$ 定义为调制度为 1 的 $\varphi(x)$ 的周期性函数。

BOE 的衍射效率:

$$\eta_m^N = \left[\frac{\sin(m\pi/N)}{m\pi/N} \right]^2 \quad (1)$$

主衍射级次为 m ,相位台阶数为 N (一般取 2, 4, 8, 16...) 当 $m=1, N=16$ 时, $\eta_1=98.7\%$ η_1 受蚀刻深度误差 ϵ 影响关系式:

$$\eta_1 = \left[\frac{\sin(\pi\epsilon)}{\pi\epsilon} \right]^2 \quad (2)$$

BOE 在光谱范围内为 $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$ 使用时的平均衍射效率:

$$\eta_1 \approx \left[1 - \left(\frac{\pi\Delta\lambda}{6\lambda_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

2.3 DOE 的相移函数

DOE 的透射函数 $t(x) = e^{i\psi(x)}$, 定义 $\psi(x)$ 为相移函数。

设计 BOE, 实际就是设计相移函数, 再将其量化。

对于旋转对称非球面型 DOE:

$$\psi(r) = 2\pi/\lambda \cdot (Ar^2 + Gr^4 + \dots) \quad (4)$$

3 DOE 高斯成像特性和初级象差理论

对(4)式描述的 DOE, 用光线追迹等效模型建立其成像特性和初级象差理论。

3.1 公式推导

Buralli 和 Morris 在 1991 年给出的 DOE 等效透镜追迹模型是 W. G. Sweatt 在 1977 年提出的全息透镜等效薄透镜模型的发展, 即将 DOE 等效为球透镜和提供 $\psi(r)$ 中的 Gr^4 项的非球面无光焦度校正板。用此模型给出的初级象差理论仅适合 DOE 基面是平面的情况, 而不适合 DOE 的基面是球面的情况。

我们将 DOE 看作是用重合的两点源记录并叠加任意波前的 HOE, 由全息光学模型严格推导出 DOE 的初级像差理论(三级特性):

$$\left. \begin{aligned} S_I &= y^4 \varphi^2 / 4(1 + 3T^2 + 4BT) - 8mGy^4 \\ S_{II} &= -y^2 \varphi^2 J / 2(B + 2T) + \epsilon S_I \\ S_{III} &= J^2 \varphi - \epsilon y^2 \varphi^2 J(B + 2T) + \epsilon^2 S_I \\ S_{IV} &= 0 \\ S_V &= 3\epsilon J^2 \varphi - 3/2 \epsilon^2 y^2 \varphi^2 J(B + 2T) + \epsilon^3 S_I \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 ϵ 为光栏换面量 $\epsilon = \bar{y}/y$, y —主光线在 DOE 上交高, y_1 —第 1 近轴光在 DOE 上交高, B —弯曲参量, T —共轭参量, J —拉格朗日不变量。

上式不仅适合透射式 DOE,也适合于反射式 DOE。

高斯成像特性(一级特性):

$$\text{光焦距} \quad \varphi = 2Am \quad (6)$$

m—衍射级次,一般为+1级

DOE 可看作是无限薄弯月透镜,节点位置为基面顶点,两主面重合与基面在顶点处相切。

将(5)式作消奇异值处理就可与(6)一起用于程序设计了,在 CIOE(CAOD)光学工程分析软件中增加 DOE 的定义,重新编制了近轴追迹和初级像差分析模块,使程序可直接计算 DOE 与折、反混合系统的初级像差。

对一实例计算的结果(表 1)与 CODE—V 实际像差追迹结果吻合,并证明 Buralli 和 Morris 给出的初级像差的确有误。

在物理等效前提下,我们提出了 DOE 的球透镜/广义光栅混合模型,用此模型推导出的初级像差理论与(5)式是一致的,指出了 Brralli 和 Morris 理论的错误所在;同时还发现在数学等效的意义上,可以将 DOE 等效为球镜和非球面的混合,因而用常规光学设计软件就可以分析 DOE 的初级像差和进行初级像差平衡的优化设计。

3.2 DOE 与薄透镜的初级像差特性

DOE 的初级球差是弯曲参量的线性函数,而薄透镜的初级球差则是弯曲的二次函数,如图 1。

表 1 Buralli 数据例

由 DOE 初级像差的公式计算的结果

```

SCAN
NIS      UD      DOBJ      HOBJ      ISTOP
4      -.020878      -.450000E+03      -.75.000      1
NO.      RADIUS      SEPH      INDEX      DISPH      HCA      GL:NO      LS
1      .0000      .000      1.0000000      .0000000      .000      0      0
2      -600.0000      150.000      1.0000000      .0000000      .000      0      0
3      -600.0000      .000      -1.0000000      .0000000      .000      0      11
4      .0000      -120.910      1.0000000      .0000000      .000      0      0
MAS= 0
HDOE= 1
NO.      C1      C2      HOR
1      .33370E-02      -.57043E-08      -1
NGL      NW      1      WL
1      1      .6328000
1      K9      1.5146609
      DFO      DHO      FLO      DFI      DHI
      49.9933      150.0000      -100.0067      -100.0067      .0000
      EFL      U1      DIMA      MAG      J
      -100.0067      -.104192      -120.0096      .2000      1.5629
      DFO      DFI      SINUPD      SINUPI      HIMA
      .0000      -300.0600      -.164399      -.082193      15.0012

```

```

PRIMARY ABERRATIONS:
NO.      S1      S2      S3      S4      S5      C1      C2
1      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000
2      .003861      -.000416      -.000919      .000000      .029635      .000000      .000000
Coef:   .003861      -.000416      -.000919      .000000      .029635      .000000      .000000
Aber:   .494094      -.000133      -.209451      .000000      .009481      .000000      .000000

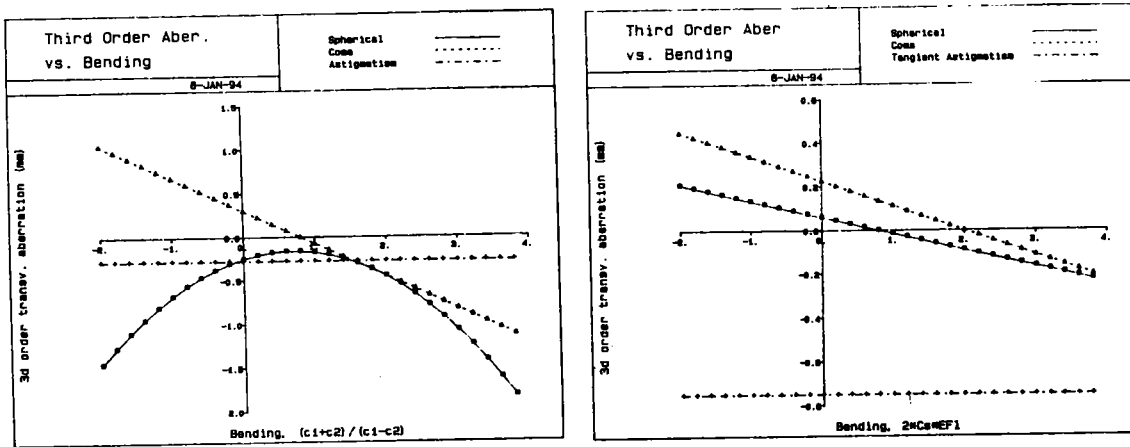
```

由透镜模型计算初级像差

```

-----
PRIMARY ABERRATIONS :
NO.      S1      S2      S3      S4      S5      C1      C2
1      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000      .000000
2      .000000      .000003      .003967      -.004051      .039646      .000000      .000000
3      .005430      .002677      .001319      .004067      .002637      .000000      .000000
Asph.
1      -.001564      -.003085      -.006084      .000000      -.012000
Coef:   .003866      -.000405      -.000797      .000016      .030283      .000000      .000000
Aber:   .494790      -.000130      -.204027      .002082      .009688      .000000      .000000
-----

```



(a)透镜

(b)DOE

图1 初级球差、彗差、像散与弯曲的关系

注:DOE的初级球差线随G变化是可平移的,图(b)中只画出一个位置

DOE在弯曲时可同时消除初级球差和慧差,而薄透镜则不能。

DOE无Petzval场曲。

4 折/衍混合光学系统设计

旋转对称DOE有三个自由度与初级像差,(和高斯特性即光焦度),加上DOE与光栏距离 l ;可校正三种独立初级像差。

4.1 DOE的色差特性和折/衍消色差,消二级光谱

DOE的等效阿贝数和等效部分色散:

$$V_d = \frac{\lambda_0}{\lambda_s - \lambda_l}$$

$$P_d = \frac{\lambda_s - \lambda_0}{\lambda_s - \lambda_l} \quad (7)$$

其中 λ_s —短波长, λ_l —长波长, λ_0 —中心波长

$V_d < 0$,而折射元件的 $V_r > 0$,而且数值上 V_d 要小于 V_r 一个数量级以上,利用这个原理我们用折/衍混合来消色差。消色差后二级光谱量一般为负值,与普通冕、火石玻璃对消色差透镜相反,可以考虑来消二级光谱。

论文给出了消色差和消二级光谱的设计公式组。

4.2 DOE等效P,W和C

由(5)式可推得DOE等效P,W和色差常数C

$$\bar{P}_\infty = (1-B)8mG/\varphi^3 \quad (8)$$

$$\bar{W}_\infty = 1-B/2$$

$$C = \varphi/V_d$$

其中 B, G, M, φ 意义同前, 对于折/衍组元和反/衍组元的 $\bar{P}_\infty, \bar{W}_\infty$ 和 C 依此类推。

4.3 求解初始结构程序算法和框图

确定折/衍混合系统的高斯参数后, 按初级像差平衡要求求出各组元的 P_∞, W_∞ 和 C , 并据此大致确定各组元内具体形式, 解出初始结构参数(透镜的 C_1, C_2, N , DOE 的 C 和 A, G)。

求解 P, W, C 的程序框图如图 2。

求解具体结构参数这一步一般是非线性的, 我们用矩阵广义逆法求其最小二乘近似解, 程序框图如图 3。

程序是用 FORTRAN 语言编制的

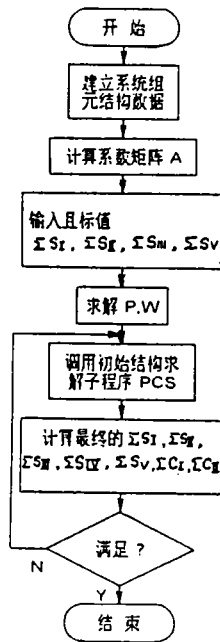


图 2 程序框图

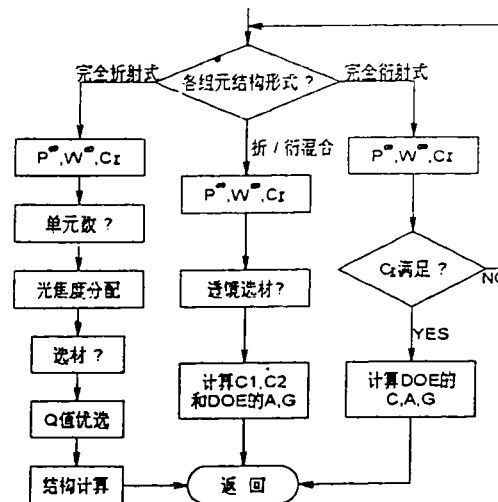


图 3 程序框图

4.4 计算实例

论文给出了用上述程序设计的三个典型混合系统实例, 紫外消色差 F/9 物镜, 可见光波段复消色差 F/10 物镜、红外 F/1.0 PETZVAL 物镜。实例 1 轴上点像质达到衍射极限; 实例 2 在焦距为 1000mm 时二级光谱横向量为 0.1mm, 小于 1 倍焦深(0.24mm)的 1/2; 实例 3 的成像质量比有非球面的设计稍差一点, 但从加工难度考虑是优于后者的。

论文还对 DOE 应用于成像系统中的限制作了简要探讨, 指出衍射效率、杂光和色像差是限制其应用的主要因素。

5 制作工艺的初步研究

论文综述了制作 BOE 的各种微细加工技术,考虑目前的实际条件,提出一个可能的制作工艺,即用微机设计掩膜,在激光照排机上输出掩膜图,再经过粗缩,精缩,光刻就可制得 BOE,采用所内低档的激光照排机 JZJ-300(1000dpi)时,理论上可制作特征尺寸为 $10\mu\text{m}$ 的 BOE。

论文给出了设计掩膜公式组和具体算法,用 FORTRAN 语言编制了程序,对于旋转对称 DOE,利用对称性可节省 1/2 的计算量,用 Compaq 389/256(有协处理器)计算一个 $20 \times 20\text{mm}^2$ 的掩膜,每层的计算时间不超过 1 个小时,掩膜文件由 8Mb 可压缩为不超过 600kb。

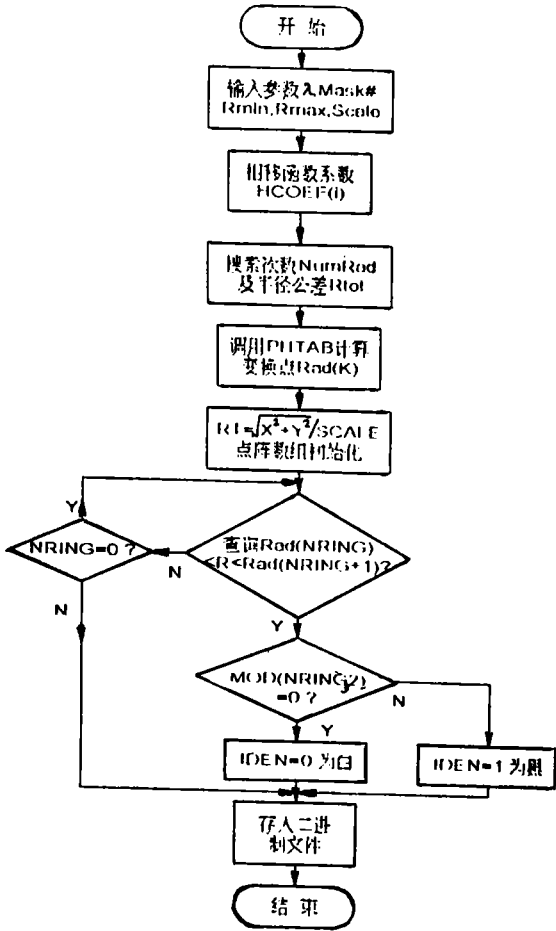


图 4 HCOMASK 流程图

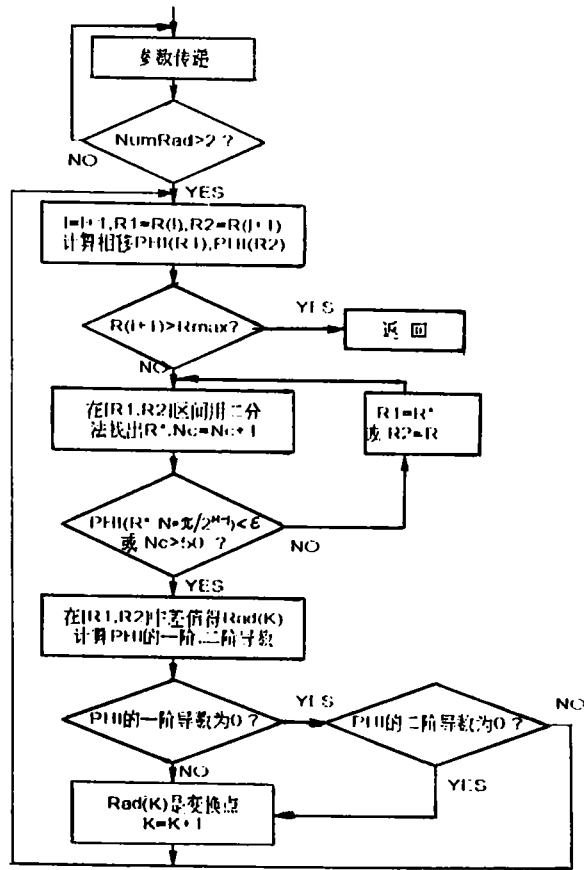


图 5 PHTAB 子程的流程图

JZJ-300 输出的掩膜图形如图 6。

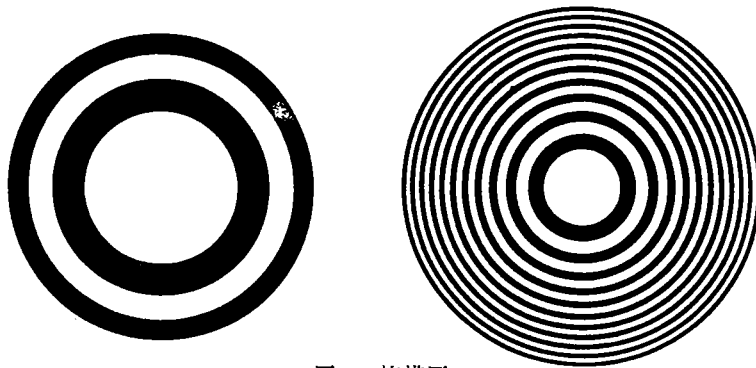


图 6 掩模图

6 结 束 语

二元光学是一门有前途的新兴学科。对含二元光学元件的混合光学系统设计理论和方法的研究,未见国内有文献报道。本文从文献检索和调研起步,对二元光学作了较全面、深入的了解,并具体完成了:旋转对称 BOE 透镜模型的建立和成像特性公式的推导,纠正了 Burralli 和 Morris 初级像差理论的错误之处,并用于分析折/衍混合系统的初级像差,以及解析求解初给结构;对各种 BOE 制作工艺进行了分析比较,在 PC 机上实现了多层掩膜设计,并选择激光照排机输出,为现阶段研究提出了一种成本低而精度适中的 BOE 制作方法。

Imaging Properties & the Methods of Design for Optical System with Binary Optics Elements

Zhang Xin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

Binary optics element (BOE) used in conventional system can provide additional parameters, freedom for material selection in optical design. This thesis mainly studies the image properties & the methods of design and fabrication. By using two equivalent models, BOE's primary aberrations are deduced, the reason for the difference of these two models is analyzed; 1st order and 3rd order image properties and chromatic aberrations are presented, and the program for the aberration analysis and the preliminary solutions of refractive-diffractive hybrid system which satisfies the balance of primary aberrations is accomplished, the results are consistent with those given by CODE-V; The algorithm and program for mask generating are presented, and the mask film is output using laser imager. With the design examples for some typical systems in visible, ultra-violet, infrared band, the applications of the BOE and its limitations are discussed in the end.

Key Words: Binary optics, Diffraction, Optical design, CAD