

设计参数变化对衍射微透镜的影响*

刘玉玲, 卢振武, 孙 强

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要:给出了多台阶衍射微透镜的设计公式,并阐述了旋转体时域有限差分法。通过采用该方法对设计的多台阶衍射微透镜进行分析,说明了设计参数(包括焦距、入射波长、透镜材料折射率)的变化与微透镜衍射效率、爱里斑半径、最大场强变化的关系,对部分结果的定性讨论与数值分析结果一致。

关键词:衍射; 微透镜; 时域有限差分法

中图分类号:O436.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)04-0414-04

Effect of changing design parameters on diffractive microlens*

LIU Yu-ling, LU Zhen-wu, SUN qiang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China)

Abstract: The designing formula of multilevel diffractive microlenses is presented. Body-of-revolutionary finite-difference time-domain method (BOR FDTD) is illustrated. The multilevel diffractive microlenses are analyzed by use of BOR FDTD. The effects of changing design parameters (including focal length, incident wavelength, refractive index of microlens material) on multilevel diffractive microlens are investigated. The results show that changing design parameters have effects on diffractive efficiency, airy diffraction disc radius and maximum electric magnitude of microlens. The qualitative analyses of microlenses are consistence with some of numerical results.

Key words: Diffractive; Microlens; Finite-difference time-domain method

0 引 言

衍射透镜有会聚光能和成像的作用,由于它体积小、质量轻、集成度高、易于复制而被广泛地应用于红

外光电探测器^[1]、图像识别和处理、光通讯、激光医学、空间光学等许多领域。由于连续浮雕面形难于加工,常用多台阶衍射微透镜来等效连续浮雕衍射微透镜。多台阶衍射微透镜的最小特征尺寸常小于入射波长,标量衍射理论已经不能对其进行精确分析,必

收稿日期:2003-09-13. 修订日期:2003-11-10

* 基金项目:中国科学院创新课题资助项目(2002LQ.04)

作者简介:刘玉玲(1971-),女,吉林长春人,博士生,研究方向为微光学元件的设计和分析。

须采用严格的矢量衍射分析方法,其中时域有限差分法是国际上广泛使用的分析衍射微透镜的方法^[2,3]。

由于计算较复杂,目前研究各种设计参数变化对微透镜影响的文献非常少,而这方面的研究对微透镜的设计与使用都很有意义。文中以此为出发点采用时域有限差分法的一种扩展方法——旋转体时域有限差分法(BOR FDTD)对设计出的多台阶衍射微透镜进行分析,研究了设计参数(焦距、入射波长、透镜材料折射率)的变化对微透镜的影响。

1 多台阶衍射微透镜

多台阶衍射微透镜为多台阶浮雕结构,它的面形可以由环带半径和台阶深度来确定。

如果设计焦距为 f 、入射波长为 λ ,并用 m 表示第 m 个波带、 l 表示第 l 层台阶,则第 m 带第 l 层半径 $r_{m,l}$ 为^[4]:

$$r_{m,l} = \sqrt{2\lambda f[(m-1) + l/L] + \lambda^2[(m-1) + l/L]^2}$$

$$l = 1, 2, \dots, L \quad (1)$$

式中 L 为台阶总数。

台阶深度为:

$$h_l = h_M(l-1)/L \quad (2)$$

式中 h_M 为最大浮雕深度,可表示为:

$$h_M = \lambda/\Delta n \quad (3)$$

式中 Δn 为微透镜材料折射率与周围介质折射率之差。

2 分析方法

对于特征尺寸小于入射波长的衍射微透镜的分析,标量衍射理论已经不再适用,需要采用严格的矢量分析方法。本文采用旋转体时域有限差分法^[5]来分析多台阶衍射微透镜。使用该方法的好处是:它不但能对轴对称的微透镜进行精确地模拟,而且能将三维问题转化为二维问题,并且只需分析半个微透镜结构,因此大大简化了计算,节约了时间。

该方法分析微透镜的原理如图 1 所示,图中 z 轴为旋转对称轴。BOR FDTD 的计算空间被分为总场和散射场,被分析的元件位于总场内,垂直入射的平面波由总场和散射场的连接边界引入。为了减小计算空间和消除非物理因素引起的电磁波的反射,采用

匹配层(PML)吸收边界条件^[6]截断散射场。在 BOR FDTD 空间内计算出的是靠近元件的电磁场分布,观察屏处的场分布可以由平面波谱传播算法^[7]较容易地算出。

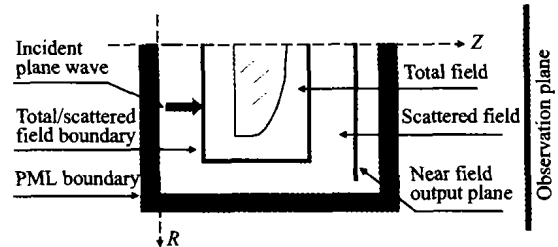


图 1 BOR FDTD 分析微透镜的原理图

Fig. 1 Schematic of microlens analysis with BOR FDTD

使用以上算法能够得到焦平面的场分布,从而可以方便地计算出微透镜的衍射效率。本文的衍射效率按下式计算:

$$\eta = \frac{\int_0^a |E_{focal}|^2 2\pi r dr}{\int_0^{\frac{D}{2}} |E_{inc}|^2 2\pi r dr} \quad (4)$$

式中 E_{inc} 为入射平面波的电场强度; D 为衍射微透镜的直径; E_{focal} 为焦平面上的电场强度, a 为爱里斑半径。

3 数值分析

根据公式(1)、(2)、(3)设计多台阶衍射微透镜,波带数是任意的,台阶总数为 2^N (N 为正整数),为了便于分析和比较,以下分析的衍射微透镜的波带数和台阶数均相同,并任意选取 5 个波带 8 个台阶。采用上述的旋转体时域有限差分法对它们进行分析,分析中保持 3 个设计参数(焦距 f 、入射波长 λ 、透镜材料折射率 n)中的两个不变,依次变化另一个,然后分析中心最大场强、爱里斑半径及衍射效率的变化规律。

3.1 焦距变化

保持入射波长和微透镜材料折射率不变,增大设计焦距,根据公式(1),衍射微透镜的直径会增大, f 数(焦距与微透镜直径的比)也增大。

取入射波长 λ 为 $1 \mu\text{m}$,折射率 n 为 1.5,并分别取焦距为 20、40、80 μm ,根据公式(1)~(3)设计出三个微透镜,面形结构通过计算机模拟得出,如图 2 所示。微透镜 a 的焦距为 20 μm ,直径为 30.00 μm , f

数为 0.67; 微透镜 b 的焦距为 $40\ \mu\text{m}$, 直径为 $41.23\ \mu\text{m}$, f 数为 0.97; 微透镜 c 的焦距为 $80\ \mu\text{m}$, 直径为

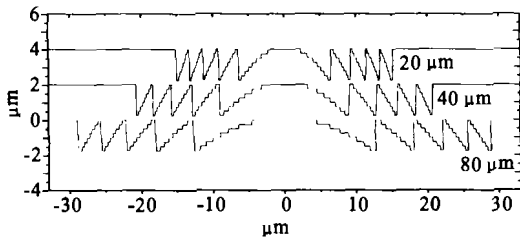


图 2 焦距分别为 20、40、80 μm 的 3 个微透镜

Fig. 2 Three microlenses with focal length 20, 40, 80 μm , respectively

$57.45\ \mu\text{m}$, f 数为 1.39。3 个微透镜在焦平面上的电场强度分布(具体计算公式和计算过程见参考文献[5])如图 3 所示。根据公式(4)计算出 3 个微透镜的衍射效率分别为 61.2%、69.7%、73.5%, 可见衍射效率增加。从图 3 可以看出爱里斑半径和最大光强略增大。

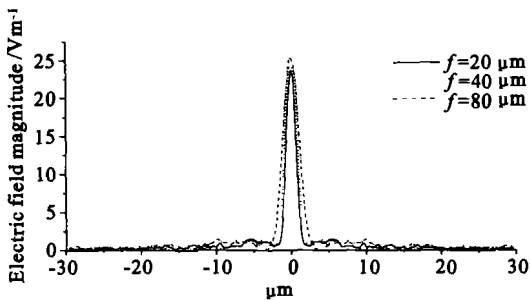


图 3 不同焦距的微透镜在焦平面上的电场强度分布

Fig. 3 Distribution of electric field intensity on focal planes of microlenses with difference focal length

3.2 折射率变化

保持焦距和入射波长不变, 微透镜的直径和 f 数不变, 增大微透镜材料的折射率, 台阶的最大深度减小。

取焦距为 $20\ \mu\text{m}$, 入射波长为 $3\ \mu\text{m}$, 选择折射率分别为 1.5、2.5、3.5, 设计的 3 个微透镜的台阶最大深度为 5.25 、 1.75 、 $1.05\ \mu\text{m}$ 。分析结果如图 4 所示, 可以看出爱里斑半径基本不变, 中心最大光强随着折射率的增大而减小, 对应于折射率为 1.5、2.5、3.5 的 3 个微透镜算得衍射效率分别为 55%、40%、24%, 衍射效率随折射率增大而减小。

介质折射率的增大会使反射率增大, 透射率减小, 爱里斑的半径基本不变时, 衍射微透镜的透射率

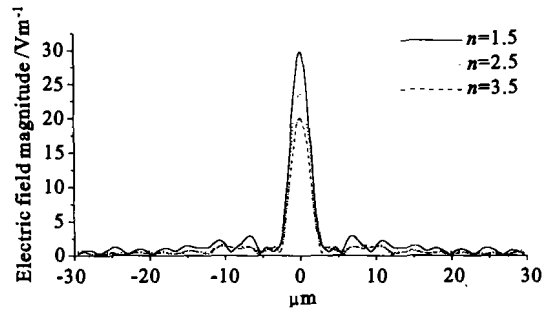


图 4 不同折射率的微透镜在焦平面上的电场强度分布

Fig. 4 Distributions of electric field intensity on focal planes of microlenses with difference refractive index

减小会使爱里斑内的总能量减小, 用相同的入射光照射 3 个直径相同的微透镜时, 入射光的总能量相同, 因此由衍射效率的定义得出的衍射效率减小。

3.3 入射波长变化

保持焦距和折射率不变, 增大入射波长, 微透镜的直径增大, f 数减小, 台阶的最大深度增大。

取焦距为 $40\ \mu\text{m}$, 折射率为 1.5, 入射波长分别为 1、3、6 μm , 对应的透镜直径为 41.23 、 75.50 、 $114.89\ \mu\text{m}$, 分析结果如图 5 所示。得出的衍射效率分别为 41.23%、58.4%、51.12%, 可见衍射效率有变化, 但没有单方向增大或减小的变化规律。最大光强和爱里斑半径都随设计的入射波长的增大而增大。

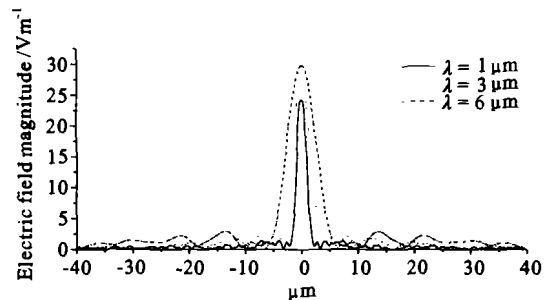


图 5 不同设计波长的微透镜在焦平面上的电场强度分布

Fig. 5 Distributions of electric field intensity on focal planes of microlenses with difference design wavelength

4 讨论

采用旋转体时域有限差分法对多台阶衍射微透镜进行分析, 研究了改变设计参数对微透镜衍射效率、爱里斑半径、最大场强的影响。微透镜的波带数与台阶数为定值, 微透镜的结构仅由 3 个设计参数(焦距 f 、入射波长 λ 和折射率 n)来决定, 分析过程中保持其中两个参数不变, 依次改变另一个参数。数值

分析结果为:只增大焦距时,微透镜的衍射效率增大,爱里斑半径和最大场强略增加;只增大折射率时,微透镜的衍射效率降低,最大光强减小,爱里斑半径基本不变;只增大入射波长时,爱里斑半径和最大光强都增大。

对上述部分结果进行了定性讨论。根据爱里斑半径的计算公式 $R=1.22\lambda f/\#$,可以讨论爱里斑半径的变化:只有焦距增大时, λC 不变,根据公式(1), $f/\#$ 增大,爱里斑半径也增大;只有折射率增大时, λ 和 $f/\#$ 都不变,因此爱里斑半径不变;只有入射波长增大时, $f/\#$ 减小,但是 $\lambda f/\#$ 增大,爱里斑半径也增大。当折射率增大时,微透镜的反射率增加,透射率减小,会使衍射效率降低。可见本文的数值分析结果与定性讨论相一致。

参考文献:

[1] 孙强,王肇圻,刘宏波,等. 应用于双色探测器的谐衍射/折射光

学系统[J]. 红外与激光工程,2003,32(3):317-321.

[2] Shi Shou-yuan, Tao Xiao-dong, Yang Liu-qing, et al. Analysis of diffractive optical elements using a nonuniform finite-difference time-domain method[J]. Opt Eng, 2001,40(4):503-510.

[3] Mark S Mirotznic, Dennis W Prather, Joseph N Mait, et al. Three-dimensional analysis of subwavelength diffractive optical elements with the finite-difference time-domain method[J]. Applied Optics, 2000,39(6):2871-2880.

[4] Nishihara H, Suhara T. Micro fresnel lenses[M]. Wolf; Progress in Optics XXIV, 1987. 3-37.

[5] 刘玉玲,卢振武,任智斌,等. 旋转体时域有限差分法对轴对称亚波长衍射光学元件的分析[J]. 光子学报,2003,32(10):1259-1263.

[6] Liu Yu-ling, Lu Zhen-wu, Ren Zhi-bin, et al. Perfectly matched layer absorbing boundary conditions in rigorous vector analysis of axially symmetric diffractive optical elements[J]. Optics Communications,2003,223(8):39-45.

[7] Shi Shou-yuan, Dennis W Prather. Vector-based plane-wave spectrum method for the propagation of cylindrical electromagnetic fields[J]. Optics Letters, 1999,24(21):1445-1447.

《红外与激光工程》征稿简则

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊,由中国航天科工集团公司主管,双月刊,国内外公开发行人。本刊主要报导国内外红外与激光技术在航天、卫星和战术导弹武器系统中应用的学术论文、科研报告,各类新的光电技术实验方法和成果,新工艺、新材料等,也报导国内领先的光电技术在民用方面的最新科研成果。2002年起,本刊刊登英文稿件,欢迎广大读者踊跃来稿。

来稿要求及注意事项:

1. 来稿须论点明确,数据可靠,文字简炼,逻辑严谨,一般5000字左右为宜,凡属国家自然科学基金资助的重点科研项目,请予以注明。

2. 来稿用A4纸按标准格式打印,并留有图空,版心为174mm×246mm,公式、图表中量符号的大小写及上、下角标须标清楚。

3. 中、英文稿要有中、英文对照的摘要,中文文摘200~300字左右,英文摘要100个单词左右,中、英文关键词3~6个。按中国图书馆分类法(第四版)对来稿分类,标注中图分类号。

4. 来稿中的表、图均不超过8个。中文稿须有中、英文对照的图标及表头,图表中的文字须译成英文,或用相应的符号表示。

5. 参考文献应择最主要的列出,应是国内外公开发表的文献,按著者、文题、刊名或书名、出版地、出版者、年卷期、页码顺序列出,并参考清华光盘版检索规范加注标识码,在正文用上角标标出。

6. 文稿不应涉及保密内容及他人利益,文责自负。

7. 请勿一稿多投。文稿一旦录用,编辑部发录用通知单。录用的稿件编辑部有权删改。来稿录用与否,在3个月内通知作者。

8. 文稿一经发表,按规定支付稿酬,并赠送本期刊物两本。

来稿请寄天津225信箱32分箱《红外与激光工程》编辑部收,邮编300192。欢迎使用电子邮件投稿, Email:irla@vip.sina.com。