

文章编号: 0258-7025(2004)09-1045-05

衍射微柱透镜轴向光强分布特性的 严格电磁分析

冯 迪, 严瑛白, 金国藩, 邬敏贤

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 衍射聚焦器件轴向光强分布的焦深和焦移特性, 直接决定着系统接收面的装配误差和获得最佳的能量利用率。当器件的口径和面型特征尺寸可与照射波长比拟时, 必须考虑光波与衍射器件的电磁作用。利用严格电磁分析方法——时域有限差分法, 对有限口径衍射微柱透镜的轴向光强分布进行了严格分析, 并且与传统的标量分析方法进行详细比较。分析比较了 TE 和 TM 极化波入射情况下, 不同面型分布(8 台阶, 16 台阶量化面型和连续面型)的衍射微柱透镜焦深和焦移特性与透镜 F 数的关系。结果表明透镜轴向光强最大点向透镜面偏移, 焦移量的严格计算结果要大于标量计算结果, 表明透镜的快聚焦特性, 而二者得到的焦深量基本一致, 同时两种理论方法都表明透镜焦深和焦移随 F 数的增加而增加。

关键词 衍射与光栅; 轴向光强分布; 时域有限差分法; 衍射微柱透镜

中图分类号 O 438 文献标识码 A

Rigorous Vector Analysis of Diffractive Micro-Cylindrical Lenses' Characteristics of Focal Depth and Focal Shift

FENG Di, YAN Ying-bai, JIN Guo-fan, WU Min-xian

(Department of Precision Instruments, State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract It is necessary to study characteristics of axial intensity distributions, such as focal depth and focal shift, which influence the maximum energy efficiency obtained and the assembling error at the receiving plane. The rigorous electromagnetic characteristic must be considered for diffractive optical elements (DOEs) whose features are on the order of or smaller than the wavelength of the incidence illumination. The rigorous electromagnetic analysis of diffractive micro-cylindrical lenses that are finite in extent using a two dimensional finite-difference time-domain (FDTD) method is presented. Compared with the scalar theory, the axial intensity distributions of lenses with different F -numbers are analyzed rigorously, considering different incidence polarizations (transverse electric polarization and transverse magnetic polarization) and different profile structures (continuous profile, 16-level profile and 8-level profile) of lenses, respectively. It is shown that focal shifts calculated by the rigorous method are larger than those made by the scalar theory, and focal depths calculated by these two methods are consistent basically, furthermore, focal depth and focal shift increase when F -number increases for both the rigorous electromagnetic method and the scalar method.

Key words diffraction and gratings; axial intensity distribution; finite-difference time-domain method (FDTD); diffractive micro-cylindrical lenses

收稿日期: 2003-06-11; 收到修改稿日期: 2003-08-14

基金项目: 国家 863 计划资助项目。

作者简介: 冯 迪(1972—), 男, 清华大学博士研究生, 主要从事衍射光学器件的分析、设计和加工。E-mail: fengd00@mails. tsinghua. edu. cn

1 引 言

衍射光学器件(Diffractive Optical Elements, DOEs)由于具有衍射效率高、设计自由度大和材料选择性强等突出优点,被广泛应用于红外成像、红外探测、激光聚焦、光束整形和光纤通信等许多领域^[1]。随着系统小型化、阵列化和集成化技术的飞速发展,特别是在量子阱红外光电探测系统(Quantum Well Infrared Photodetect, QWIP)、垂直腔面发射激光器系统(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSE)以及灵巧元素系统(Smart Pixel System, SPS)中,要求光学器件的结构和尺寸日趋精细。同时随着微电子技术的发展带动了微型制版术、激光直写技术、电子束直写技术、离子刻蚀技术和感应耦合等离子体刻蚀等技术的进一步成熟,这些技术又为微小结构衍射光学器件的加工提供了条件。但是当衍射光学器件的特征尺寸接近甚至小于照射波长时,光波在光学器件边界的电磁耦合效应大大加强,这时传统标量衍射理论已经不再适用,必须在特定的边界条件下严格求解麦克斯韦方程,对衍射问题进行电磁分析^[2,3]。衍射光学器件特别是衍射微透镜的严格电磁分析是目前的一个研究热点,但是研究主要局限在入射极化波、透镜面型分布等因素与透镜衍射效率等横向光强分布特性的关系方面^[4,5]。Yajun Li等^[6]和 Vokinger等^[7]曾经在标量理论范围内,分析过透镜轴向光强分布的焦移特性,但对聚焦光强轴向分布特性的严格电磁分析,目前尚未见报道,而对这些特性的分析,直接决定着系统接收面的装配误差和获得最佳的能量利用率,有着重要的应用价值。本文的目的:利用二维时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)方法对衍射微柱透镜的轴向光强分布的焦深和焦移特性进行严格电磁分析,分析、比较不同极化波(TE和TM极化波)入射情况下,不同面型分布(8台阶,16台阶量化面型和连续面型)的衍射微柱透镜轴向光强分布与透镜 F 数的关系,并与标量理论得到的相应结果进行了比较。考虑实际应用和计算方便,主要将问题局限在二维情况,极化波垂直入射。

2 二维时域有限差分算法原理和角谱传播算法

假定研究的电磁场问题只涉及各向同性、线性

且与时间无关的媒质(事实上,大多数的衍射光学器件属于此类)。在无源区域,可以把麦克斯韦方程的两个旋度方程表示为

$$\begin{aligned}\nabla \times E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \sigma^* H \\ \nabla \times H &= \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \sigma E\end{aligned}\quad (1)$$

式中 E 为电场强度, H 为磁场强度, ϵ 为介电常数, μ 为磁导率, σ 为电导率, σ^* 为等效磁阻率。如果入射场和散射体的结构及形状都与某一个方向(比如 z 方向)无关,则散射场也与该方向无关,问题可以简化为二维表达。以横电波(TE极化)模式为例,电场分量垂直于入射面,此时二维麦克斯韦旋度方程在直角坐标系下可以表述如下

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right) \\ \frac{\partial H_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} + \sigma^* H_x \right) \\ \frac{\partial H_y}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \sigma^* H_y \right)\end{aligned}\quad (2)$$

式中, E_z, H_x, H_y 分别为电场和磁场分量,它们是空间位置和时间的函数。对应TM极化波,只有 H_x, E_x, E_y 三个分量,其与TE极化波的对应情况明显,只要做简单置换就可以由一种波变换为另一种波。二维时域有限差分法就是根据Yee氏采用的具有二阶精度的中心差商式^[8],对上述麦克斯韦旋度方程进行离散处理后在时间和空间域进行衍射问题的严格电磁计算,得到方程的数值解。

对于衍射光学器件,关心的观察面往往远离器件表面(比如透镜的焦面),如果将观察面也设置在二维时域有限差分的计算空间内,无疑会大大增加计算量。如何有效地解决电磁波从计算空间传播到观察面($y = y_0$)将是一件有意义的事情。由于要分析衍射光学器件的整体尺寸较小,其特征尺寸与照明光波长相当,所以传统标量理论的傍轴近似和Fresnel衍射积分将不再适合。这里采用平面波传播的角谱(Angular Spectrum, AS)算法^[9]。取二维时域有限差分计算空间中沿场传播方向离开衍射光学器件的一个面为输出面,其复振幅分布可以用二维时域有限差分算法直接求得,设为 $u(x, 0)$ 。传递函数 $H(f_x)$ 为

$$H(f_x) = \exp(j2\pi y_0 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha / \lambda}) \quad (3)$$

观察面的角谱分布表示为

$$u(f_x, y_0) = \text{DFT}^{-1}[U(f_x, y_0)] =$$

$$\text{DFT}^{-1}[U(f_x, 0) \cdot \exp(j2\pi y_0 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha / \lambda})] \quad (4)$$

式中 DFT^{-1} 表示离散逆傅里叶变换, $U(f_x, 0)$ 和 $U(f_x, y_0)$ 分别为输出面和观察面的角谱, λ 和 $\cos\alpha$ 分别为入射波长和波沿 x 方向的方向余弦。利用角谱传播算法可以大大缩减计算空间, 提高计算效率。二维时域有限差分方法和角谱算法分析衍射光学元件的系统如图 1 所示。将二维时域有限差分计算空间局限在器件附近, 用二维时域有限差分方法得到输出面的光场分布, 由该场分布, 利用角谱算法得到观察面的光场分布, 模平方后得到强度分布。为了验证角谱算法和二维时域有限差分方法在计算透镜焦区光强分布的一致性, 分析计算了一小口径, 小 F 数的透镜 (F 数定义为透镜几何焦距与透镜直径的比值), 该透镜允许将二维时域有限差分计算空间扩展到焦面位置直接求取场的复振幅, 平方后得到强度分布, 同时用角谱算法计算光强分布, 二者吻合很好, 证明角谱算法的有效性。

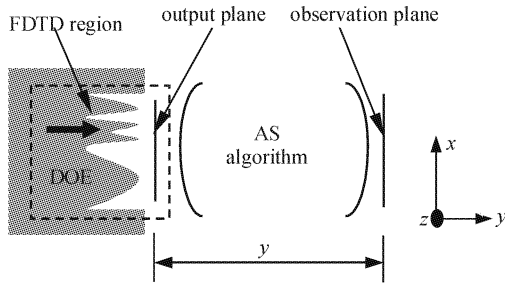


图 1 严格电磁分析方法示意图

Fig. 1 Schematic of rigorous electromagnetic analysis method

3 衍射微柱透镜的轴向光强分布特性

衍射微柱透镜轴向光强分布的焦深和焦移的表述如图 2 所示, 其中 (a) 是沿光轴截面的归一化强度

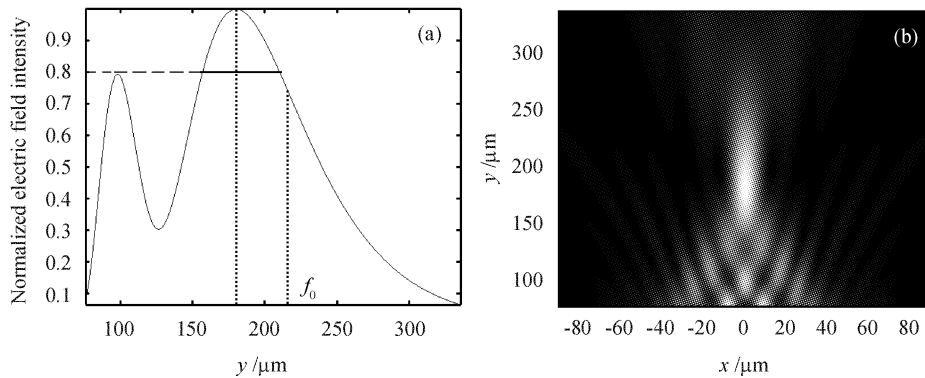


图 2 (a) 衍射微柱透镜轴向光强分布; (b) 焦区光强分布

Fig. 2 (a) Intensity distribution along axial direction of diffractive micro-cylindrical lenses; (b) Intensity distribution of the focal region

分布, (b) 是焦斑区域光强分布。焦深 (d_f) 为强度比轴向光强最大点低 20% 的轴向区域, 如图 2(a) 中粗实线所示, 焦移 (Δf) 为透镜几何焦距 f_0 与轴向光强最大点到透镜的距离 f_{max} 的偏移, 表示为

$$\Delta f = f_0 - f_{max} \quad (5)$$

如果 Δf 为正, 表示实际光强最大值靠近透镜, 反之远离透镜。本文所分析衍射柱面透镜的入射波均为垂直入射平面波, 真空波长 $\lambda = 10 \mu\text{m}$, 透镜直径 $D = 120 \mu\text{m}$, 材料为石英, 折射率 $n_1 = 1.5$, 聚焦区域为空气, 折射率 $n_2 = 1.0$ 。透镜 F 数 = 1/5, 3/5, 1 和 2。考虑到实际透镜的加工问题, 将透镜面型分为连续面型和 16 台阶, 8 台阶量化面型三种情况。因为是电磁分析, 所以要考虑入射波的偏振极化特性, 入射波分为 TE 极化和 TM 极化两种情况。为了便于比较, 同时按标量理论计算了衍射微柱透镜相应的轴向光强分布特性, 这时不考虑入射光波的偏振特性, 透镜为纯位相器件, 根据薄器件假设, 输出面的振幅恒定, 位相与透镜的面型深度成正比。由于研究情况不满足傍轴近似, 故对标量分析光场传播仍然使用角谱算法。

在非傍轴近似情况下, 透镜的位相延迟 $\varphi(x)$ 满足如下关系式

$$\varphi(x) = k_0 n_2 (f_0 - \sqrt{f_0^2 + x^2}) \quad (6)$$

式中 $k_0 = \lambda/2\pi$, 为真空中波数。将式(6)对应的连续面型, 模 2π 后, 得到衍射面型, 深度 $y(x)$ 满足下式

$$y(x) = \frac{n_2}{n_1 - n_2} (\sqrt{f_0^2 + x^2} - f_0 - m\lambda_2) \quad (7)$$

式中 $\lambda_2 = \lambda/n_2$, $m = 0, 1, \dots$ 为器件的环带数, x_m 代表透镜的环带边界。

以 F 数为 3/5 的衍射微柱透镜为例, 其几何焦

距 $f_0 = 72 \mu\text{m}$, 图 3(a), (c) 为连续面型和 16 台阶量化面型, TE 极化波入射时, 透镜焦斑光强的三维分布图; 相应的轴向光强分布示于图 3(b) 和 (d) 中, 其中实线表示标量计算结果, 虚线和点线分别为 TE 和 TM 极化波入射时轴向光强分布。从图中可以看出严格电磁分析结果和标量计算结果有较大差别, 轴向光强随入射波偏振态的不同也表现出不同的分布特性。连续面型衍射微柱透镜, 矢量计算结

果表明最大光强点并不在几何焦点处, 焦移: $+9.5 \mu\text{m}$ (TE 极化) 和 $+9.0 \mu\text{m}$ (TM 极化), 而标量计算的透镜焦移很小, 只有 $+2.0 \mu\text{m}$, 与严格电磁分析结果存在较大差距, 显示出严格电磁分析的必要性。该衍射微透镜的焦深 d_f 为 $23.5 \mu\text{m}$ (TE 极化) 和 $22.0 \mu\text{m}$ (TM 极化), 与按照标量理论计算出的焦深 ($d_f = 19.5 \mu\text{m}$) 差距不大。

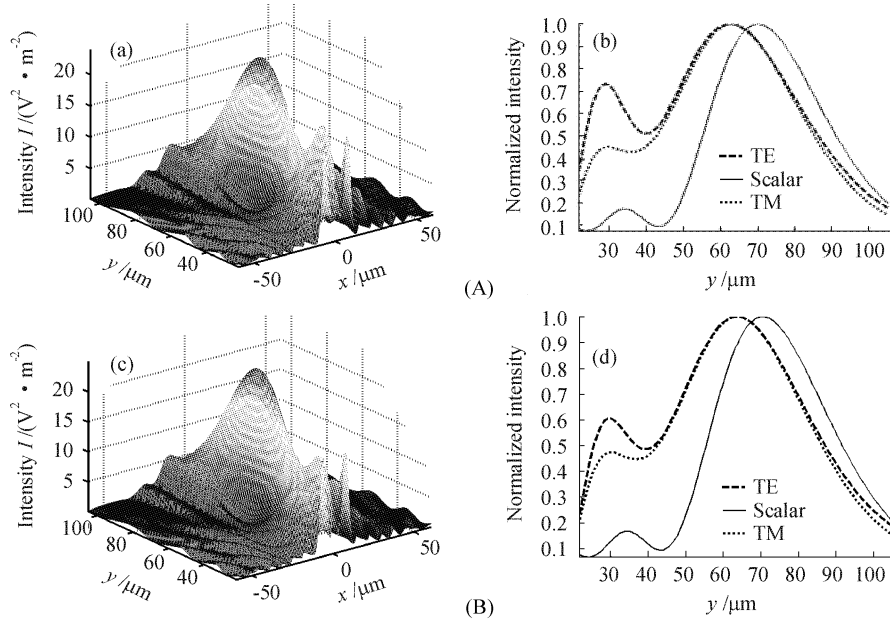


图 3 F 数 3/5: (A) 连续面型; (B) 16 台阶量化面型

(a), (c) TE 极化焦面三维光场分布; (b), (d) 轴向光场强度分布

Fig. 3 $F=3/5$: (A) continuous profile; (B) 16-level profile

(a), (c) intensity distribution of the focal region in a 3-D representation for TE polarization incidence;

(b), (d) intensity distribution along axial direction

表 1 衍射微柱透镜轴向光强分布的焦深和焦移特性与 F 数的关系 (单位: μm)

Table 1 Relationship of focal depth and focal shift with F -number of diffractive micro-cylindrical lenses (unit: μm)

| $F^\#$ | Geometric focal length f_0 | Profile | Focal shift Δf | | | Focal depth d_f | | |
|--------|------------------------------|---------|------------------------|--------|------|-------------------|--------|------|
| | | | Scalar | Vector | | Scalar | Vector | |
| | | | | TM | TE | | TM | TE |
| 1/5 | 24 | 8 | 0.0 | 6.5 | 5.0 | 7.0 | 7.5 | 7.0 |
| | | 16 | 0.0 | 7.5 | 6.0 | 7.5 | 7.5 | 6.5 |
| | | con | 0.0 | 8.0 | 6.5 | 7.5 | 7.5 | 6.5 |
| 3/5 | 72 | 8 | 1.0 | 6.5 | 7.0 | 20.0 | 21.5 | 23.0 |
| | | 16 | 2.0 | 8.5 | 8.5 | 20.0 | 23.0 | 23.0 |
| | | con | 2.0 | 9.0 | 9.5 | 19.5 | 22.0 | 23.5 |
| 1 | 120 | 8 | 6.0 | 12.0 | 12.5 | 40.5 | 42.5 | 40.5 |
| | | 16 | 7.0 | 15.5 | 16.0 | 40.0 | 42.0 | 40.5 |
| | | con | 7.0 | 16.0 | 18.0 | 40.0 | 41.5 | 39.5 |
| 2 | 240 | 8 | 38.0 | 49.5 | 58.5 | 111.0 | 107.0 | 99.5 |
| | | 16 | 42.0 | 55.0 | 63.0 | 105.5 | 102.5 | 95.5 |
| | | con | 44.5 | 59.5 | 65.5 | 103.5 | 99.5 | 95.5 |

为了进一步研究衍射微柱透镜 G 数与焦深和焦移的变化规律, 将四种 F 数的衍射微柱透镜的分析结果列于表 1。从中可以看出: 标量理论和严格电磁理论都表明衍射微柱透镜的焦移量和焦深有随 F 数增加而增加的趋势, 这和已有的标量分析结论一致^[6,7]; 对于透镜的焦深, 标量和严格电磁理论的计算结果无太大差距, 但是后者计算的透镜焦移量却远大于标量理论的结果, 焦移皆为正值, 说明最大光强点更靠近透镜, 实际衍射微柱透镜较标量理论预计的有更大的光焦度, 显示出明显的快聚焦特性; 计算发现 16 台阶, 8 台阶量化和连续面型的透镜焦移和焦深的差距不明显, 但是量化面型更有利于加工; 对于不同极化入射波, 透镜轴向光强分布表现出不同特性, 说明透镜轴向光强特性与入射光波的极化密切相关。

4 结 论

本文利用二维时域有限差分法和空间电磁场传播的角谱算法成功完成了对有限口径衍射微柱透镜轴向光强分布焦深和焦移特性的严格电磁分析。给出了不同极化入射波情况、透镜面型不同分布情况下, 焦深和焦移随透镜 F 数的变化规律, 并与标量理论进行了比较。计算表明衍射微柱透镜焦移量的严格计算结果要大于标量计算结果, 说明透镜的快聚焦特性, 而二者得到的焦深量基本一致, 同时两种

方法都表明透镜焦深和焦移随 F 数的增加而增加的规律。这些结论虽然是在垂直入射情况下得到的, 但符合大多数应用情况, 对衍射微透镜的理论分析、设计和实际应用有一定的指导意义。

参 考 文 献

- 1 Joseph N. Mait, Hans Petyer Herzig. Diffractive optics and micro-optics: introduction to the feature issue [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(14):2977~2978
- 2 D. A. Pomet, M. G. Moharam, E. B. Grann. Limits of scalar diffraction theory for diffractive phase elements [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(6):1827~1834
- 3 Yu Weixing, Lu Zhenwu, Wang Peng *et al.*. Vector analysis of two-dimensional surface-relief structure diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(8):980~986
鱼卫星, 卢振武, 王 鹏 等. 二维表面浮雕结构的矢量衍射分析 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(8):980~986
- 4 K. Hirayama, E. N. Glytsis, T. K. Gayload *et al.*. Rigorous electromagnetic analysis of diffractive cylindrical lenses [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(11):2219~2231
- 5 D. W. Prather, S. Shi. Formulation and application of the finite-difference time-domain method for the analysis of axially-symmetric diffractive optical elements [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(5):1131~1142
- 6 Yajun Li, E. Wolf. Focal shifts in diffracted converging spherical waves [J]. *Opt. Commun.*, 1984, **39**(4):211~215
- 7 U. Vokinger, R. Dandliker, P. Blattner *et al.*. Unconventional treatment of focal shift [J]. *Opt. Commun.*, 1998, **157**:218~224
- 8 A. Taflove. *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method* [M]. 1st ed, Boston: Artech House, 1995. 51~126
- 9 J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. San Francisco: McGraw-Hill, 1968. 48~56