

文章编号:1007-1180(2011)08-0012-05

深紫外光照射针孔衍射特性研究

陈 峰

(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 130033)

摘 要: 采用一种非旁轴衍射理论分析了深紫外光照射系统中的参考波面, 分别对理想和实拍圆孔的参考波前进行了计算。结果显示, 孔的不规则度对波面的 P-V 值影响较大, 但如果孔的不规则度在 0.02 之内、波面的 P-V 值控制在 1.5% 波长范围以内, 能够满足实际需要。结果表明, 孔的不规则度对光强的均匀性影响不大, 如果要提高波面的均匀度, 需要减小波面的 NA 大小。

关键词: DUV 检测系统; 波前; P-V 值; 孔的不规则度

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112808.0012

Diffraction Analysis of Deep Ultra-violet Illuminating Aperture System

CHEN Feng

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The non-paraxial diffraction theory was used to analyze the wavefront of deep ultra-violet illuminating system in this paper. Based on the theory, the reference wave-fronts which were diffracted from the standard and practical apertures were calculated. The results turned out that the irregular degree of an aperture had a great impact on the P-V value. If the irregular degree of the aperture was limited to 0.02, the P-V value of the wave-front could be controlled below 1.5% wave length, the system could satisfy the practical application. Meanwhile, the results also showed that the irregular degree of aperture was not a big factor for intense uniformity, and it could be enhanced by decreasing the NA value of the wavefront.

Keywords: DUV testing system; wavefront; P-V value; irregular degree of an aperture

*基金项目: 02专项 (No.2009ZX02202)

1 引言

深紫外光照射系统设计中一个关键技术是参考波面的产生,参考波面质量的好坏直接关系到干涉仪的检测水平。而波面一般是由入射光波经小孔衍射产生的,所以如何选择小孔来产生参考波面是非常重要的。在小孔的诸多参数中,孔径的选择非常关键。一般来说,相同的波面大小(数值孔径NA相同),孔径越小,所产生的参考波面质量(P-V值)越高,但这会降低衍射光波的强度,并且还要受到实际加工水平的影响。如果NA随着孔径变化,使波面充满整个Airy斑,则需要考虑更多的影响因素。以电磁波为理论基础的衍射计算,可以给出小孔和波面质量之间的关系,该值可以作为实际加工的上限值,具有很好的指导意义^[1-2]。

在光学仪器设计方面,经典的标量理论得到了很好的应用^[1-2];但其适用条件仅限于孔径大小比光波波长大很多的情况,并且由于其违背了Maxwell方程,因而在近场处给出的结果和实际相差甚远。而在点衍射干涉仪情况下,通常孔径大小和波长在一个数量级,并且有些场点不能当作远场点来对待,这时就需要使用矢量理论来计算。如今有很多研究者致力于小孔衍射研究,例如,文献[3]~[6]中提出的各种方法。但是,这些方法有些过于复杂,有些只适用于近轴计算。时域差分法^[7](The finite difference time domain)是Maxwell方程的一种数值表达形式,能够在近场点准确地描述电磁场的分布,但由于随着场域的增加,其计算量急剧增加,使得其计算远场点不太现实。

本文以一种非旁轴矢量衍射理论^[7]为基础来计算深紫外光照射系统的小孔孔径和波长在一个数量级情况下的参考波面,该方法可用于计算小孔平面及其远端各个场点,其适用条件仅需要孔径和波长之比>0.1。然后,对平面波入射圆孔和实拍圆孔的波面进行了计算,给出了P-V值和强度不均匀度分布图,

并且对实验结果进行了分析。

2 原理

2.1 Hertz 势

由于在深紫外光照射系统中关注的只是电场的干涉,所以只需要给出电场大小的表达形式。设光波波长为 λ ,则该光波在真空中任意一点的电场(E)可以用Hertz势(Π)^[8]来表示,即

$$E = k^2 \Pi + \nabla(\nabla \Pi) \quad (1)$$

其中 k 为波数。如果平面光波沿着 $Z+$ 传播,偏振方向为 X 方向,则有如下标量表达形式:

$$\begin{aligned} E_x &= k^2 \Pi_x + \frac{\partial \Pi_x}{\partial x^2} \\ E_y &= \frac{\partial^2 \Pi_x}{\partial y \partial x} \\ E_z &= \frac{\partial^2 \Pi_x}{\partial z \partial x} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 波前计算原理

如图1所示,小孔位于 $Z=0$ 平面,假设除小孔以外掩膜为良好导体,忽略掩膜厚度,这样需要将掩膜表面电场切向(X,Y 方向)和垂直方向磁场(Z 方向)大小设为0。把边界条件应用于电磁场,并且满足Maxwell方程,则 X 方向Hertz势在空间各个点可以表示为:

$$\Pi_x(x,y,z) = \frac{iE_0}{2\pi k} \iint \frac{e^{-i\rho}}{\rho} dx_0 dy_0 \quad (3)$$

其中, E_0 是入射场强度, ρ 为掩膜上一点到场点的距离,积分区域为整个掩膜平面。

需要指出的是:在深紫外光照射系统中,只需要计算和被测波面相同偏振方向(X 方向)的分量,这是由于与其他垂直方向和参考波的干涉是常量,不含检测信息。

为了方便计算,对上述物理量可以进行归一化处理,选取小孔半径大小 a 为基本参量,并且假设 $z_0 = ka^2$ 和 $p_1 = 2\pi a/\lambda$,则归一化参数 $r_1(x_1, y_1, z_1)$, $r_{01}(x_{01}, y_{01}, 0)$ 和 ρ_1 可以表示为:

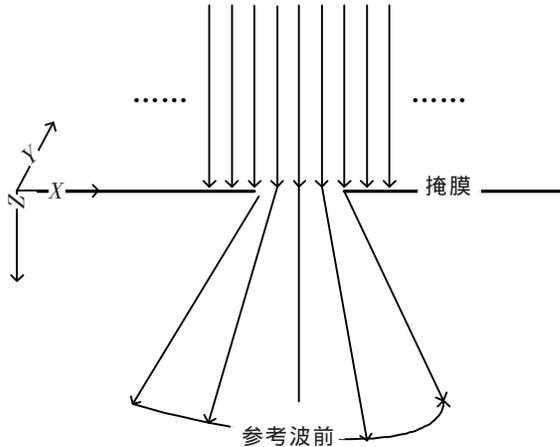


图1 小孔衍射图

$$\begin{cases} x_1 \equiv \frac{x}{a}, & y_1 \equiv \frac{y}{a}, & z_1 \equiv \frac{z}{z_0} \\ x_{01} \equiv \frac{x_0}{a}, & y_{01} \equiv \frac{y_0}{a} \end{cases} \quad (4)$$

$$\rho_1 \equiv \sqrt{(x_1 - x_{01})^2 + (y_1 - y_{01})^2 + \rho_1^2 z_1^2} \quad (5)$$

则

$$E_x(x_1, y_1, z_1) = \frac{iE_0 \rho_1}{2\pi} \iint f_1 \left[(1+s_1) - (1+3s_1) \frac{(x_1-x_{01})^2}{\rho_1^2} \right] dx_{01} dy_{01} \quad (6)$$

其中

$$f_1 \equiv \frac{e^{-ip_1 \rho_1}}{\rho_1} \quad (7)$$

$$s_1 = \frac{1}{ip_1 \rho_1} \left(1 + \frac{1}{ip_1 \rho_1} \right) \quad (8)$$

3 实验结果与分析

根据以上结果，分别对标准圆孔和实拍图形的远场点进行了计算。具体参数如表1所示。

表1 实验参数

| 波长/nm | 孔径/nm | 距离孔/mm |
|-------|---------|--------|
| 193 | 150~500 | 22 |

用基尔霍夫标量衍射模型给出初始波面数值孔径 NA 大小，即 $NA=0.61\lambda/r$ ， λ 取 193 nm。具体数据如表2所示。

表2 基于基尔霍夫模型孔径与Airy斑NA的关系

| 半径/nm | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|-------|------|------|------|------|------|
| NA | 0.79 | 0.59 | 0.39 | 0.29 | 0.24 |

3.1 标准圆孔

图2和图3为孔径大小和波面 P-V 值、以及强度不均匀度^[9]之间的关系对应图。(为了显示方便，对 P-V 值取了对数，下同)

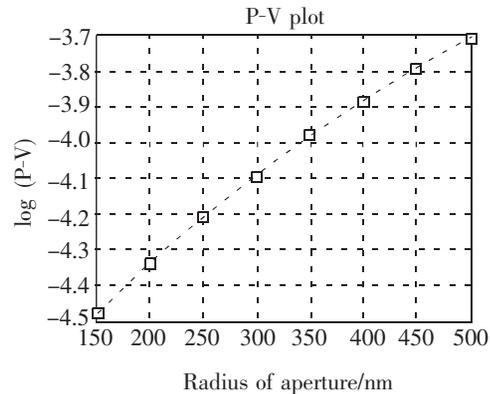


图2 标准圆孔衍射波前的Log (P-V) 值和孔径大小之间的关系图

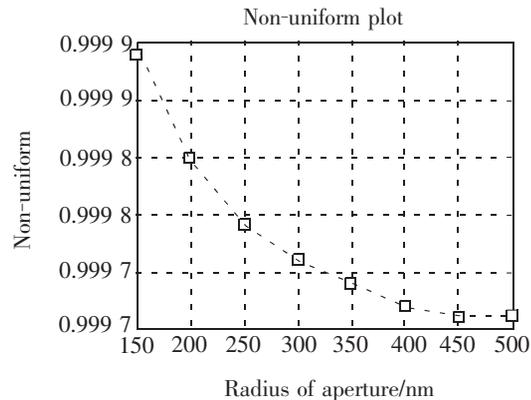


图3 标准圆孔衍射波前的强度不均匀度和孔径大小之间的关系图

3.2 实拍图像

为了进一步研究波面的影响因素，结合图像处理算法^[10]对实拍图进行了仿真计算，孔径大小为圆孔形心到边缘的最长距离。定义圆的不规则度如下：

$$cu = \frac{\text{std}_{p \in \text{edge}}(r(p))}{\text{mean}_{p \in \text{edge}}(r(p))} \quad (9)$$

其中, p 为圆孔边缘上一点, r 为圆孔形心到该点距离, std 为标准差运算, $mean$ 为平均值运算。可以看出, r 变化越大, 不规则度 cu 越大。对于标准圆, 不规则度为 0, 图 4 中所示圆孔的不规则度为 0.02。

图 5, 图 6 为该圆孔的衍射 P-V 图和强度不均匀度图。

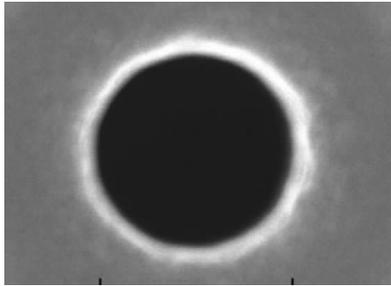


图 4 实拍圆孔

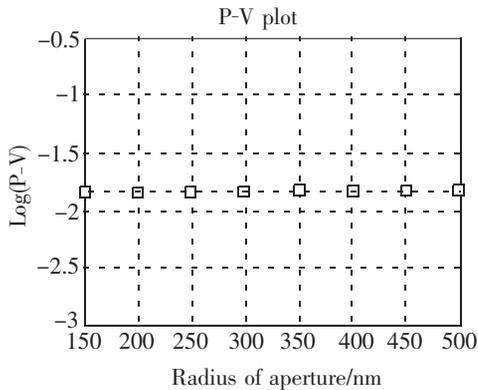


图 5 实拍圆孔衍射波前的 Log(P-V)值和孔径之间的关系图

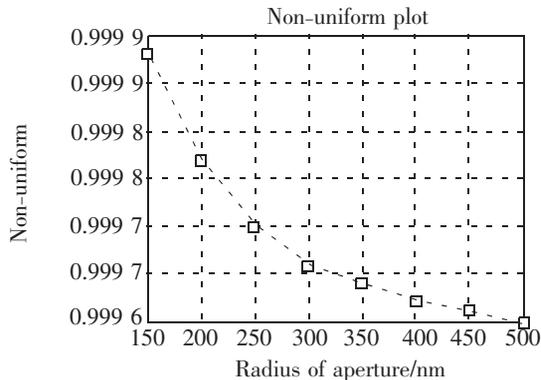


图 6 实拍圆孔衍射波面的 P-V 值和孔径大小之间的关系图

3.3 实验分析

从以上计算值可以看出, 小孔的不规则度对波面质量参数 P-V 值影响比较大, 实拍图像比标准圆

小孔高了 3 个数量级; 并且对于标准圆孔, 随着孔径的增加, 波面质量是呈现指数下降的 (P-V 值增加); 而对于实拍图像, P-V 值随着孔径的增加并没有太大变化, 这可能是由于小孔圆的不规则影响程度超过了孔径大小对波面的影响。对实拍小孔衍射波面的 RMS 值进行了计算, 结果显示, 随着小孔的增大, RMS 值增加, 这验证了圆的不规则度对波面 P-V 值的重要影响。

两种情况下, 强度不均匀度在相同孔径下是接近的, 这说明圆的不规则度对强度的不均匀度影响不大。两种情况下强度的不均匀度都很高, 这主要是因为所取波面大小基本充满了整个 Airy 斑 (如图 7), 而强度在斑点中心为极大值, 在斑点边缘接近于 0。所以, 如果想要使波面的不均匀度下降 (更加均匀), 需要减小波面 (降低 NA 值)。从两幅实验数据还可以看出, 不均匀度随着孔径的增加会稍微减小。

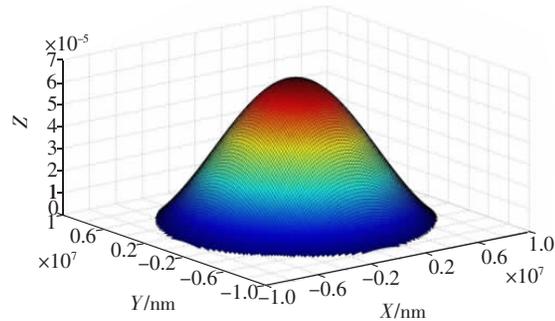


图 7 波面强度分布图

4 结 论

本文运用一种非旁轴衍射理论计算小孔衍射的 P-V 值和不均匀度同孔径大小的关系, 并对实验结果进行了分析。分别在标准圆孔和实拍不规则圆孔上进行了计算, 结果显示: 不规则度为 0.02 的孔径比标准圆的 P-V 值大了 3 个数量级, 说明孔的不规则度对波面影响很大。然而, 其波面质量还在深紫外光照射系统允许的范围内, 所以实际加工小孔的不规则度应该小于或者接近 0.02。另一方面, 相对于小孔的不规则度, 光强的不均匀度对孔径大小的依赖较大。如果要得到更加均匀的波面, 需要减小波面。

参考文献

- [1] 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 164-236
- [2] Born M, Wolf E. *Principles of Optics*[M]. The seventh edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 412-514.
- [3] Youngworth K S, Brown T G. Focusing of high numerical aperture cylinder-vector beams[J]. *Optics Express*, 2000, 7(2): 78-97.
- [4] Gillen G D, Seck C M, Guha S. Analytical beam propagation model for cipped focused-Gaussian beams using vector diffraction theory[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4023-4040.
- [5] Wang Xueen, Fan Zhaozhong, Tang Tiantong. Numerical calculation of a converging vector electromagnetic wave diffracted by an aperture by using Borgnis potentials. I. General theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2006, 23(4): 872-877
- [6] Jabbour T G, Kuebler S M. Vector diffraction analysis of high numerical aperture focused beams modified by two- and three-zone annular multi-phase plates[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1033-1043.
- [7] Kane Y. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [8] Gillen G D, Baughman K, Guha S. Application of Hertz vector diffraction theory to the diffraction of focused Gaussian beams and calculations of focal parameters[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1478-1492.
- [9] Goldberg K A. *Extreme Ultraviolet Interferometry*[D]. U.S.: UC Berkeley, 1997.
- [10] 董菁, 吴胜利, 王丰. 选择调整的亮度增强算法[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(4): 437-441.

作者简介: 陈峰 (1982-), 男, 河南焦作人, 硕士, 研究实习员, 2009年于北京航空航天大学获得硕士学位, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: achenfengb@126.com