

·光电器件与材料·

不同针孔直径下衍射波面的标量和矢量分析

王瑞林^{1,2}, 张丽霞^{1,2}, 邢廷文¹

(1.中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:针孔作为点衍射干涉仪中的关键元件, 针孔的制作精度将会严重影响干涉仪的检测精度。对于大多数衍射问题, 标量衍射理论是一种比较好的近似, 但是当衍射孔径较小时, 矢量衍射理论更能说明衍射波面的实际情况。针对可见光入射针孔时, 分别从标量和矢量衍射理论出发, 分析针孔尺寸对衍射波质量的影响, 并计算衍射波面的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值。结果表明, 标量衍射理论下, 当孔径为400 nm时, 衍射波面误差RMS最小, 且随着材料厚度的变化误差变化不大。矢量衍射理论下, 孔径为200 nm时, 衍射波面误差RMS最小, 且材料厚度的不同, 衍射误差变化较大。

关键词:物理光学; 光学检测; 针孔衍射; FDTD

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2011)06-0058-04

Scalar and Vector Analysis of Diffraction Wave with Different Pinhole Diameter

WANG Rui-lin^{1,2}, ZHANG Li-xia^{1,2}, XING Ting-wen¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pinhole is a key component in phase-shifting point diffraction interferometer (PS-PDI), therefore the production precision of pinhole will seriously affect the detection accuracy of interferometer. For most of the diffraction problems, the theory of scalar diffraction is a good approximation. However, the theory of vector diffraction is more suitable to explain the actual situation of diffraction wave surface when the diffraction aperture is very small. On the basis of the scalar and vector diffraction theory, effects on the quality of diffraction wave-front produced by the size of pinhole are analyzed, in the meantime, the peak and valley (PV) value and root mean square (RMS) value of diffraction wave front errors are calculated while visible lights entranced the pinhole. The results show that with the scalar diffraction theory, when aperture is 400 nm, RMS of diffraction wave front error is the minimum and changes little with the material thickness. As well, with the vector diffraction theory, when aperture is 200 nm, RMS of diffraction wave front error is the minimum, but it changes greatly with the material thickness.

Key words: physical optics; optical testing; pinhole diffraction; finite difference time domain (FDTD)

点衍射干涉仪^[1]作为一种新型的干涉仪, 有现有干涉仪无法比拟的优点。由于它不需要标准镜头, 避免了高精度标准镜头的加工, 同时也使得它的结构简单。

针孔作为点衍射干涉仪中的关键元件, 因此针孔的制作精度将严重影响点衍射干涉仪的测量精度^[2]。

如果想得到高检测精度的点衍射干涉仪, 就需要对针孔的衍射特性做严格的仿真分析。如果针孔的制作精度达到要求, 点衍射干涉仪的检测精度可达到亚纳米。

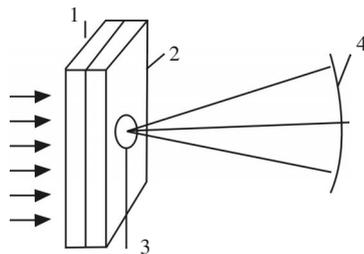
对于针孔的衍射分析, 无论是在可见光波段下还是在紫外光波段下, 关于这方面国内外已做过很多研究。马强等研究了标量情况的针孔直径大小对

衍射波面误差的影响,K.Otaki, Y.Zhu, M.Ishii 等采用矢量理论对二维针孔在可见光条件下做了衍射仿真分析^[3],卢增雄等采用矢量理论对极紫外波段下的三维小孔进行了分析^[4],曾经有人对光纤点衍射干涉仪做过研究^[5],也有人对矢量衍射的级数解给出了定量计算^[6],由于采用不同的分析方法,计算出针孔衍射波面的误差有所不同。因此,要想制作出满足要求的针孔,还需要更严格的计算分析。文中主要从时域有限差分(FDTD)^[7]理论出发,首先计算平面波经针孔衍射后的近场光波,然后分别根据标量衍射理论和矢量瑞利-索莫非衍射理论^[8]将近场数据外推,通过对远场数据提取相位来计算针孔衍射波面误差的PV(峰谷值)和RMS(均方根值)。

1 衍射仿真模型及分析理论

1.1 仿真模型及方法

针孔衍射仿真模型如图1所示。入射光波经玻璃平板后在针孔处发生衍射,形成近场光波,然后光波根据矢量瑞利-索莫非衍射理论由近场传播至远场,形成远场波前,然后进行Zernike拟合^[9-11],从而对远场波前进行误差分析。



注: 1—玻璃平板; 2—针孔材料;
3—针孔; 4—针孔在远场的衍射波前

图1 针孔衍射的仿真模型

模型中主要采用可见光($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),针孔材料为金属材料铬,分别计算当入射波偏振方向为 x 和 y 时,材料厚度为 300 nm 和 400 nm 时针孔衍射波面的误差,并计算衍射波波面误差的PV(峰谷值)值和RMS(均方根)值。

1.2 分析理论基础

光波作为一种电磁波,光波衍射的处理方法可

以用电磁场的传播理论。电磁场传播的处理方法有很多,有限元分析法(FEM)、矩阵法、FDTD法等。文中主要采用FDTD算法计算近场的衍射光波。时域有限差分就是由微分形式的麦克斯韦旋度方程进行差分离散得到时域推进的公式。

FDTD中表示对麦克斯韦方程组的差分离散基本思想为,在直角坐标系中的6个方程沿3个坐标轴划分很多网格单元,每个单元长度作为空间变量,相应地得出时间变量,用有限差分式表示关于场分量对空间和时间变量的微分。用 Δx 、 Δy 、 Δz 表示单元沿3个轴向的长度, Δt 表示时间增量。网格的顶点坐标可记为: $(i, j, k) = (i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$,任一空间和时间函数可表示为

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \quad (1)$$

任一点对时间和空间的有限差分可表示为

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} = \frac{F^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - F^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} = \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (2)$$

对于远场数据如果采用FDTD的方法,计算量过大。文中主要采用矢量衍射理论,与标量衍射理论相比,矢量衍射更加准确、更能说明远场的电磁波分布情况。矢量瑞利-索莫非衍射的基本公式为

$$E(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \nabla \times \iint_{\Sigma} (n \times E) \frac{e^{ikR}}{R} dx' dy' \quad (3)$$

电场在各个坐标轴上的分量为

$$E_x(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} A_{0x}(p, q) \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq$$

$$E_y(x, y, z) = \int \int_{-\infty}^{\infty} A_{0y}(p, q) \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq$$

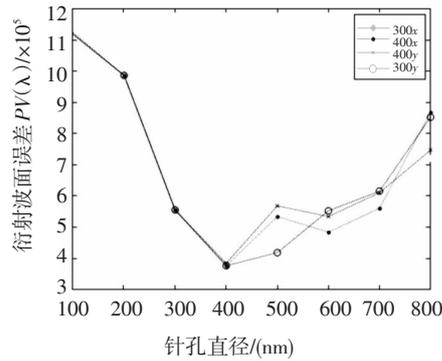
$$E_z(x, y, z) = - \int \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{p}{m} A_{0x}(p, q) + \left[\frac{q}{m} A_{0y}(p, q) \right] \right] \exp[ik(px + qy + mz)] dp dq \quad (4)$$

2 仿真结果分析

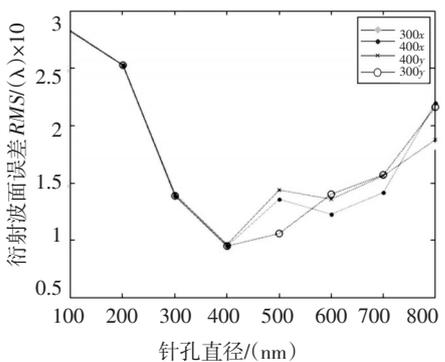
2.1 标量衍射波面质量分析

标量衍射理论,对于大多数的衍射问题都能适用,但是当衍射孔直径与波长相当或者小于波长时,标量衍射理论将会出现一定的偏差。文中对针孔直

径在100~800 nm,入射波为可见光波($\lambda = 632.8 \text{ nm}$)照射金属膜时,衍射波面的质量进行了分析。仿真结果如图2a和图2b所示:图2中300_x、300_y分别表示材料厚度为300 nm,入射光波入射偏振方向为 x 和 y ,400_x、400_y分别表示材料厚度为400 nm,入射光波入射偏振方向为 x 和 y 。随着孔径的增大,衍射波面误差并不是单调变化,而是在某个位置出现低点。当孔径为400 nm时,衍射波面误差PV和RMS都达到最小值;当孔径小于400 nm时,随着孔径的减小,衍射波面误差增大且与材料厚度和入射波偏振方向无关。当孔径大于400 nm时,不同偏振方向和不同厚度对衍射波面误差有微小的影响。孔径为800 nm时,材料厚度为400 nm的衍射波面误差较材料厚度为300 nm时有所下降。



(a) 标量衍射理论下衍射波面误差的PV值



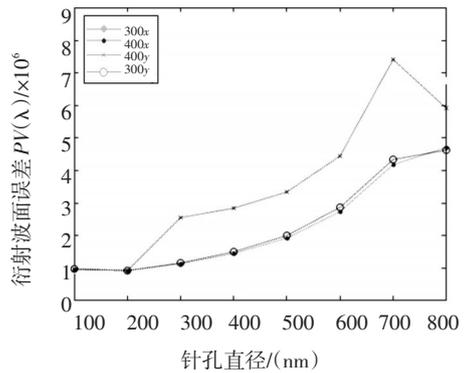
(b) 标量衍射理论下衍射波面误差的RMS值

图2 标量衍射仿真结果

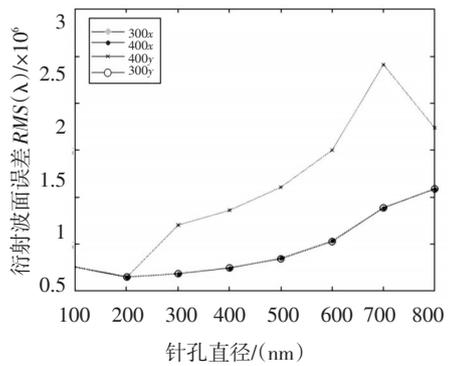
2.2 矢量衍射波面质量分析

由于文中计算的针孔直径小于入射光的波长,标量衍射理论有其局限性,故采用矢量衍射理论更能说明问题。矢量衍射仿真结果如图3a和图3b所示:随着孔径的增大,衍射波面误差并不是单调变化,当针孔直径为200 nm时,衍射波面误差的PV值

和RMS值达到最小。当孔径小于200 nm时,衍射波面误差增大,这是由于针孔直径过小,矢量近似也不再适用,应该采用更加严格的多极子展开进行更加严格的分析计算。当孔径大于200 nm时,衍射波面误差随着孔径的增加而增加,但是当材料厚度为400 nm时,衍射波面误差在700 nm附近出现一个拐点,在这个拐点附近观察泽尼克拟合的第八项系数(即慧差)突然减小。对于不同材料厚度时,衍射波面误差在孔径较小时变化不大,在孔径增大时,衍射波面误差出现较大的差别;入射光不同的偏振方向对衍射波面的误差影响不是很大。



(a) 矢量衍射理论下衍射波面误差的PV值



(b) 矢量衍射理论下衍射波面误差的RMS值

图3 矢量衍射仿真结果

2.3 结果分析

表1分别给出了标量和矢量衍射理论计算下的针孔衍射波的波面误差RMS值,从表1中可以看出,标量衍射理论和矢量衍射理论的计算结果有很大的差距,在孔径较小时,矢量衍射理论计算结果要小标量衍射理论两个数量级,随着孔径的增大,标量衍射理论和矢量衍射理论的计算结果差距有所减小。改变材料厚度和入射光的偏振方向,仍会得到相似的结果。

表1 材料厚度为400 nm时衍射波面误差的RMS值比较

针孔直径/nm	100	200	300	400	500	600	700	800
波面误差 RMS(λ) (标量)	2.83E-05	2.57E-05	1.40E-05	9.63E-06	1.44E-05	1.20E-05	1.42E-05	1.82E-05
波面误差 RMS(λ) (矢量)	2.49E-07	1.31E-07	7.10E-07	8.84E-07	1.16E-06	1.61E-06	2.61E-06	1.96E-06

3 结论

针孔作为点衍射干涉仪中的关键元件,针孔的误差将严重影响整个干涉仪的检测误差,通过对针孔的分析,对点衍射干涉仪的测量误差以及点衍射干涉仪的搭建有一定的指导意义。文中对材料为金属材料,入射光波为可见光波,针孔直径在100~800 nm之间的针孔衍射波进行了标量和矢量分析。结果表明:不同的分析方法,结果有所不同,入射光的偏振方向对衍射波的波面误差影响不是很大。标量计算时,材料厚度对衍射波影响不是很大,矢量计算时,厚度影响也是衍射波质量误差的主要原因。以前的研究有的只是给出标量计算的结果,有的是没有给出材料厚度而是对材料厚度为零的一个近似。文中综合考虑了材料厚度和衍射理论的立足点,但是对于针孔直径极小时,标量衍射理论和矢量衍射理论都显示出他们的不足之处。因此,对于针孔小于200 nm时孔径对衍射波波面质量的影响仍需进一步计算分析。

参考文献

[1] Smartt R N, Strong J. Point diffraction interferometer[J]. Opt.

Soc. Am., 1974, 62: 737-742.

- [2] Katsura Otaki, Florian Bonneau. Absolute Measurement of Spherical Surface by Point Diffraction Interferometer[J]. SPIE, 1999, 3740: 602.
- [3] K Otaki, Y Zhu, M Ishii, et al. Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL [C]// SPIE, 2004, 5193: 182-190.
- [4] 卢增雄, 金春水, 张立超, 等. 极紫外三维小孔矢量衍射波面质量分析[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2849-2854.
- [5] Gao Fen, Zhuang Dejiang, Li Bing. Diffraction wave front analysis of point diffraction interferometer for measurement of aspherical surface[C]//SPIE, 2010, 7656: 1-8.
- [6] 邓小玖, 李怀龙, 刘彩霞, 等. 矢量衍射理论的比较研究及标量近似的有效性[J]. 量子电子学报, 2007, 24(5): 543-547.
- [7] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 11-34.
- [8] (美)杰克逊. 经典电动力学[M]. 朱培豫. 北京: 人民教育出版社, 1978: 481-500.
- [9] 张伟, 刘剑锋, 龙夫年, 等. 基于Zernike多项式进行波面拟合研究[J]. 光学技术, 2005, 31(5): 675-678.
- [10] 惠梅, 牛憨笨. 运用泽尼克多项式进行物面波前数据拟合[J]. 光子学报, 1999, 28(12): 1113-1116.
- [11] 单宝忠, 王淑岩, 牛憨笨, 等. Zernike多项式拟合方法及应用[J]. 光学精密工程, 2000, 10(3): 318-322.

版权声明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,并加入中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸板、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。