

# 亚波长孔径光纤点衍射波前质量分析

陈茜茜<sup>1</sup> 王道档<sup>1</sup> 徐杨波<sup>1</sup> 孔 明<sup>1</sup> 郭天太<sup>1</sup> 赵 军<sup>1</sup> 朱保华<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

<sup>2</sup>桂林电子科技大学, 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004

<sup>3</sup>广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 利用亚波长孔径光纤点衍射可同时得到大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前,进而解决了针孔点衍射和单模光纤点衍射中分别存在的点衍射波前能量微弱和最大孔径角小的不足。基于矢量衍射理论的时域有限差分(FDTD)方法对点衍射球面波前质量进行仿真分析,研究了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度、数值孔径范围等因素对点衍射波前误差、最大孔径角、能量透射率和强度分布均匀性的影响。仿真结果表明,当亚波长光纤孔径为0.5  $\mu\text{m}$ ,点衍射波前最大孔径角超过 $90^\circ$ ,能量透射率大于29%,对应数值孔径为0.60的点衍射波前误差均方根(RMS)值优于 $0.0011\lambda$ 。仿真结果验证了用亚波长孔径光纤点衍射实现大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前的可行性,并为实际系统中亚波长孔径光纤的相关参数的选择提供了精确的数值依据。

**关键词** 测量;点衍射;亚波长孔径光纤;波前质量;时域有限差分

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0912004

## Analysis of Point-Diffraction Wavefront with Sub-Wavelength-Aperture Fiber

Chen Xixi<sup>1</sup> Wang Daodang<sup>1</sup> Xu Yangbo<sup>1</sup> Kong Ming<sup>1</sup> Guo Tiantai<sup>1</sup>  
Zhao Jun<sup>1</sup> Zhu Baohua<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

<sup>2</sup>Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

<sup>3</sup>Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Based on the fiber with sub-wavelength aperture, the point-diffraction wavefront with both high numerical aperture (NA) and high power is obtained, by which the poor light power of pinhole point diffraction wavefront and the small aperture angle of single-mode fiber point diffraction wavefront can be solved. We analyze the point-diffraction wavefront based on the finite difference time domain (FDTD) method, and the effects of various factors such as aperture, cone angle, film thickness of sub-wavelength-aperture fiber and NA on point-diffraction wavefront error, aperture angle, light transmittance and intensity uniformity are discussed in detail. The simulation results show that an aperture angle about  $90^\circ$  and light transmittance about 29% can be obtained with 0.5  $\mu\text{m}$  sub-wavelength fiber aperture, and the corresponding testing precision is better than root mean square value

收稿日期: 2015-04-09; 收到修改稿日期: 2015-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(11404312、51375467、61205082)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ03011208)、浙江省自然科学基金(LQ13F050002)、浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科开放基金(JL150508)、广西高校光电信息处理重点实验室开放基金(KFJJ2014-03)、广西自动检测技术与仪器重点实验室开放基金(YQ15204、YQ14206)、广西自然科学基金(2013GXNSF-DA019002、2014GXNSFGA118003)

作者简介: 陈茜茜(1991—),女,硕士研究生,主要从事光电精密检测方面的研究。E-mail: 1129576046@qq.com

导师简介: 王道档(1986—),男,博士,讲师,主要从事光电精密检测、点衍射干涉技术方面的研究。

E-mail: wangdaodang@sina.com

0.0011  $\lambda$  within 0.60 NA. The simulation demonstrates the feasibility of high NA and high power of point-diffraction wavefront, and provides theoretical basis for choosing the dimension of sub-wavelength-aperture fiber in practical system design.

**Key words** measurement; point-diffraction interferometry; sub-wavelength-aperture fiber; wavefront quality; finite difference time domain

**OCIS codes** 120.3180;120.4640;120.2650

## 1 引 言

随着光学技术的不断发展,对光学元件的加工和检测精度要求已经达到了甚至优于纳米量级。泰曼-格林干涉仪等传统干涉系统是利用一个高精度的标准件来获得参考波前,其所能达到的检测精度受到标准件加工精度的限制,均方根(RMS)值最高只能达到为 $\lambda/50\sim\lambda/100$ 量级( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ),远无法满足光刻物镜等检测中所要求的优于亚纳米量级超高检测精度要求<sup>[1-4]</sup>。点衍射干涉技术利用点衍射原理来获得理想球面波作为参考球面波前,因而避免了传统干涉仪中由于标准镜所引入的误差,可达到衍射极限性能的分辨率,实现深亚纳米量级的检测精度且具有较好的精度再现性<sup>[5-7]</sup>。近年来,点衍射干涉技术得到了快速的发展,在球面和平面等面形检测以及三维坐标绝对测量等领域得到了越来越广泛的应用<sup>[8-13]</sup>。

点衍射干涉系统中的点衍射球面波前精度直接决定了系统所能达到的检测精度。因而,为确保点衍射干涉系统的超高测量精度,对点衍射参考球面波前的误差进行仿真分析是必要且非常有意义的。目前点衍射干涉系统基本都是利用针孔和单模光纤点衍射方法来产生参考球面波前<sup>[14-17]</sup>。其中,针孔点衍射是利用微米、亚微米量级甚至更小尺寸的点衍射针孔来得到大数值孔径点衍射球面波前。但是微小尺寸针孔点衍射的能量透射率非常低,进而导致所得点衍射波前能量变得非常微弱,因此对干涉系统中探测器感光灵敏度和系统的调整提出了很高的要求;同时针孔容易受灰尘堵塞,对检测环境洁净度要求非常高。而单模光纤点衍射虽然能实现较高的能量透射率并且对环境依赖度相对低,但其点衍射的球面波前数值孔径(NA)非常小,从而限制了系统的测量范围。

针对针孔点衍射和单模光纤点衍射存在的不足,为了能同时得到大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前,本文采用了一种具有亚波长孔径的光纤点衍射源,并基于矢量衍射理论的时域有限差分(FDTD)方法对其产生的点衍射球面波前质量进行了仿真分析,研究了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度等因素对点衍射波前误差、最大孔径角、能量透射率和强度分布均匀性的影响。将亚波长孔径光纤点衍射与针孔点衍射、单模光纤点衍射的仿真结果进行了对比,分析采用亚波长孔径光纤点衍射实现大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前的可行性。通过本文的分析研究,可为实际点衍射干涉系统中亚波长孔径光纤的相关参数、激光器、CCD探测器及其他光学器件的选择提供重要的指导和精确的数值依据。

## 2 亚波长孔径光纤点衍射波前误差分析原理及仿真模型

### 2.1 基于FDTD的点衍射波前误差分析流程

基于FDTD算法的亚波长孔径光纤点衍射波前误差分析流程如图1所示。考虑到实际仿真计算中计算机的储存空间有限和运算时间长等影响,难以利用FDTD算法直接计算得亚波长孔径光纤点衍射的远场电磁场分布。因此,仿真中首先基于FDTD算法计算得到亚波长孔径光纤点衍射的近场电磁场分布,然后根据惠更斯

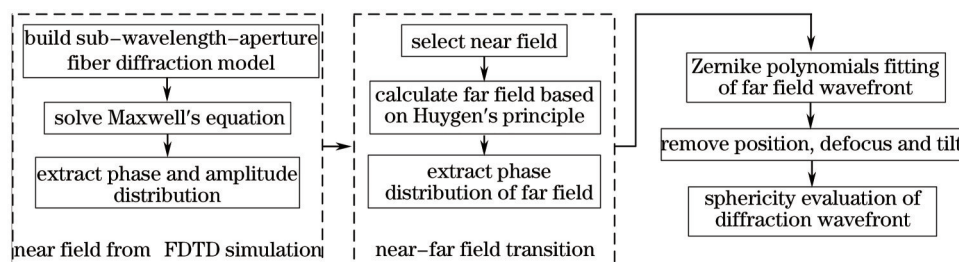


图1 基于FDTD算法的亚波长孔径光纤点衍射波前误差分析流程图

Fig.1 Procedure for analysis of point-diffraction wavefront from sub-wavelength-aperture fiber based on FDTD algorithm

原理进行近远场变换,推导出远场分析位置处的亚波长孔径光纤点衍射波前分布<sup>[1,18]</sup>。另外,亚波长孔径光纤点衍射波前相对理想球面波前中心可能存在横向和轴向偏移,因而对点衍射波前进行 Zernike 多项式拟合来消除中心偏移所引入的平移、倾斜和离焦误差,由此得到远场位置处的亚波长孔径光纤点衍射波前误差<sup>[19]</sup>。

由于亚波长孔径光纤点衍射的近场分布求解是基于 FDTD 算法,为了保证仿真结果的准确性, Yee 元胞网格沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的空间步长  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  和时间步长  $\Delta t$  必须满足 FDTD 算法稳定性条件<sup>[20]</sup>:

$$\Delta t \leq \frac{1}{c} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(\Delta x)^2} + \frac{1}{(\Delta y)^2} + \frac{1}{(\Delta z)^2}}}, \quad (1)$$

式中  $c$  为自由空间中的光速。

## 2.2 亚波长孔径光纤的加工及仿真模型

实验中使用的亚波长孔径光纤是一种光纤锥,针尖表面镀有一层 Cr 膜,图 2 为实际加工的孔径为  $0.5 \mu\text{m}$ , 锥角  $\theta$  为  $35^\circ$  的亚波长孔径光纤末端的扫描电镜(SEM)照片。在基于 FDTD 算法对亚波长孔径光纤点衍射的波面误差分析中,按照图 1 所示的仿真流程,建立了如图 3 所示的分析模型。其中,  $d$ 、 $\theta$  和  $h$  分别为亚波长孔径光纤的孔径、锥角和镀膜厚度,  $\alpha$  为点衍射波前最大孔径角(即艾里斑边缘对应最大孔径角),  $\varphi$  为点衍射艾里斑上任一点  $P$  对应的孔径角 ( $\varphi \leq \alpha$ ); 入射光的波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ , 空间步长  $\Delta l = \Delta x = \Delta y = \Delta z = \lambda/40 = 13.3 \text{ nm}$ , 时间步长  $\Delta t = \Delta l/(2c)$ ; 整个仿真区域在  $x$  方向上的大小为  $994\Delta l = 13.220 \mu\text{m}$ ,  $y$  方向上的大小为  $550\Delta l = 7.315 \mu\text{m}$ ; 同时采用大小为  $15\Delta l = 0.200 \mu\text{m}$  的完全匹配层(PML)吸收边界条件,使得平面波入射到 Cr 膜后的背向散射光被边界完全吸收从而提高 FDTD 仿真的精确性。

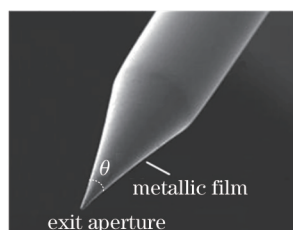


图 2 亚波长孔径光纤的扫描电镜照片

Fig.2 SEM photo of sub-wavelength-aperture fiber

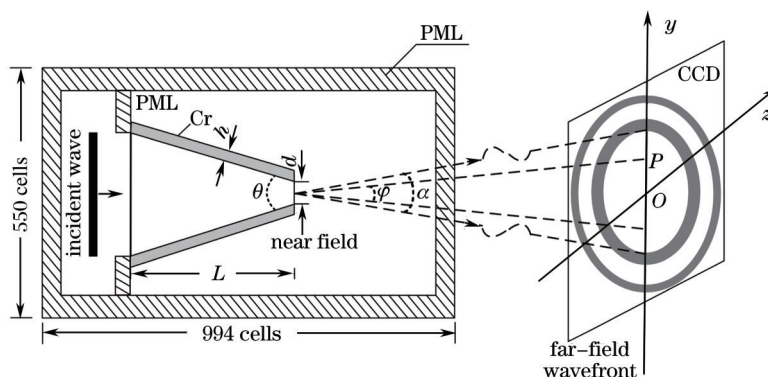


图 3 亚波长孔径光纤点衍射仿真分析模型

Fig.3 Simulation model for point-diffraction of sub-wavelength-aperture fiber

## 3 亚波长孔径光纤点衍射仿真结果

本文对所提出的亚波长孔径光纤点衍射实现大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前的可行性进行了验证,并且分析了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度、数值孔径  $[NA = \sin(\varphi/2)]$  范围等因素对于点衍射波前误差,最大孔径角,能量透射率和强度分布均匀性的影响,仿真中亚波长孔径光纤的锥体长度  $L$  取为  $7.2 \mu\text{m}$ 。

### 3.1 亚波长孔径光纤点衍射可行性分析

将亚波长孔径光纤点衍射与针孔点衍射、单模光纤点衍射的仿真结果进行了对比,以验证其可行性。

仿真中亚波长孔径光纤的镀膜厚度  $h$  和锥角  $\theta$  分别为  $0.15\ \mu\text{m}$  和  $35^\circ$ , 按照图 1 所示仿真流程计算得到点衍射波前的近场分布, 如图 4 所示。其中, 图 4(a) 和 (b) 分别为纤芯直径为  $2.5\ \mu\text{m}$  的单模光纤对应的近场振幅和相位分布, 图 4(c) 和 (d) 分别为出射孔径  $d$  为  $0.5\ \mu\text{m}$  的亚波长光纤点衍射对应的近场振幅和相位分布。从图 4 可知, 利用亚波长孔径光纤所得到的点衍射波前最大孔径角远大于单模光纤, 因而可实现更大测量范围。

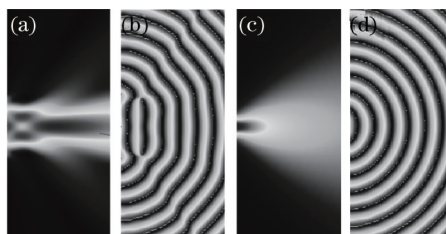


图 4 光纤点衍射波前的近场分布. (a)  $2.5\ \mu\text{m}$  孔径单模光纤光纤振幅分布; (b)  $2.5\ \mu\text{m}$  孔径单模光纤相位分布; (c)  $0.5\ \mu\text{m}$  亚波长孔径光纤振幅分布; (d)  $0.5\ \mu\text{m}$  亚波长孔径的光纤相位分布

Fig.4 Near-field distribution of fiber point-diffraction wavefront. (a) Amplitude and (b) phase distribution with  $2.5\ \mu\text{m}$ -aperture single-mode fiber; (c) amplitude and (d) phase distribution with  $0.5\ \mu\text{m}$ -aperture fiber

图 5 所示为不同的亚波长光纤孔径和点衍射针孔孔径  $d$  所对应点衍射能量透射率分布, 仿真中针孔的镀膜厚度为  $0.15\ \mu\text{m}$ 。从图 5 可以看出, 当孔径  $d$  在  $0.1\sim 1.0\ \mu\text{m}$  范围内变化时, 亚波长光纤点衍射和针孔点衍射的能量透射率都随着孔径的增大而增大, 并且亚波长孔径光纤点衍射的能量透射率远大于针孔点衍射。其中, 对应于  $0.5\ \mu\text{m}$  的出射孔径  $d$ , 亚波长孔径光纤点衍射和针孔点衍射的能量透射率分别为  $29.2\%$  和  $6.2\%$ 。由于亚波长孔径光纤点衍射的光纤入射端纤芯直径为微米量级, 因而亚波长光纤相对于亚微米量级的点衍射针孔具有更高的光耦合效率。此外, 在相同孔径的光纤和针孔点衍射中, 针孔周边的金属介质对光波的吸收要大于光纤介质。因此, 亚波长孔径光纤点衍射能够实现大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前。

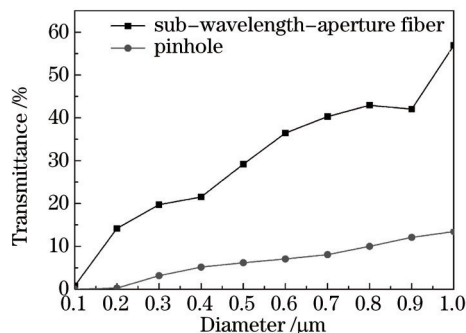


图 5 亚波长光纤和针孔点衍射的能量透射率比较

Fig.5 Comparison of light transmittance for point-diffraction wave of sub-wavelength-aperture fiber and pinhole

### 3.2 亚波长光纤尺寸对点衍射波前误差的影响

点衍射波前作为参考球面波前, 其误差决定点衍射干涉系统的测量精度, 为了得到高精度的点衍射干涉系统, 仿真分析了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度以及数值孔径范围等因素对点衍射波前误差的 RMS 值的影响。

仿真中将亚波长光纤镀膜厚度  $h$  和锥角  $\theta$  分别取为  $0.15\ \mu\text{m}$  和  $35^\circ$ 。按照图 1 所示仿真流程得到孔径  $d$  分别为  $0.1\sim 0.8\ \mu\text{m}$  时, 在不同数值孔径范围所对应点衍射波前误差 RMS 值分布如图 6 所示。由图 6 可知, 当亚波长光纤孔径一定时, 点衍射波前误差 RMS 值随着 NA 的增大而增大; 当 NA 一定时, 点衍射波前误差 RMS 值随着亚波长光纤孔径的增大而增大。其中, 对应于  $0.5\ \mu\text{m}$  的亚波长光纤孔径, 其在  $0.60\ \text{NA}$  范围内的点衍射波前误差 RMS 值分别优于  $0.0011\ \lambda$ , 可满足大数值孔径球面高精度检测要求。

将亚波长光纤孔径  $d$  和镀膜厚度  $h$  分别取为  $0.5\ \mu\text{m}$  和  $0.15\ \mu\text{m}$ , 锥角  $\theta$  分别在  $15^\circ\sim 85^\circ$  范围变化, 得到点衍射波前在不同数值孔径范围内的球面误差 RMS 值分布如图 7 所示。根据图 7 可知, 当 NA 一定, 亚波长光纤锥角在  $15^\circ\sim 85^\circ$  范围时, 点衍射波前误差 RMS 值随着亚波长光纤锥角的增大而增大。由于光束在不同锥角的亚波长孔径光纤的入射角是不同的, 导致光波在亚波长孔径光纤与金属膜界面反射时会引入不同的相移角, 进而对反射光引入不同的斜反射波前像差<sup>[21]</sup>。因而, 在实际检测中应尽量选取锥角较小的亚波长光纤。



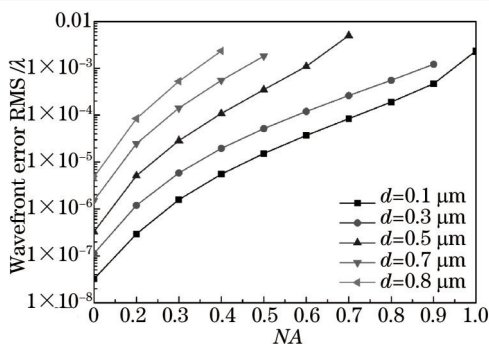


图6 不同数值孔径的点衍射波前误差

Fig.6 Point-diffraction wavefront error under various NAs

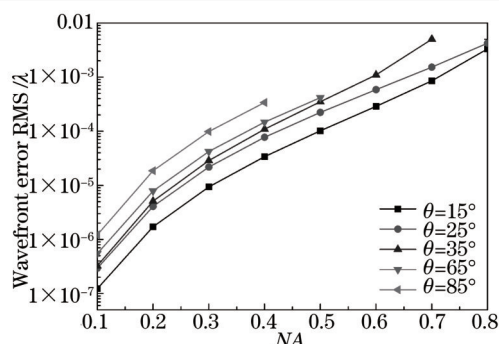


图7 点衍射波前误差与亚波长孔径光纤的锥角的关系

Fig.7 Point-diffraction wavefront error versus fiber cone angle

对于亚波长光纤孔径  $d$  和锥角  $\theta$  分别为  $0.5 \mu\text{m}$  和  $35^\circ$ , 得到  $0.30$  和  $0.50$  NA 范围内对应不同的亚波长光纤镀膜厚度的点衍射波前误差 RMS 值分布如图 8 所示。由图 8 可知, 亚波长孔径光纤的镀膜厚度在  $0.05 \mu\text{m}$  和  $0.07 \mu\text{m}$  时对应的点衍射波前误差 RMS 值明显大于  $0.10 \mu\text{m}$  的镀膜厚度, 并且当镀膜厚度在  $0.10 \sim 0.70 \mu\text{m}$  范围内时, 对应点衍射波前误差 RMS 值波动幅度很小, 其中,  $0.50$  NA 范围内对应的点衍射波前误差 RMS 值在均值  $0.0004 \lambda$  上下浮动, 波动幅度小于  $4.6\%$ 。因而, 只要亚波长孔径光纤的镀膜厚度大于  $0.10 \mu\text{m}$  时, 其对点衍射波前质量的影响可以忽略。

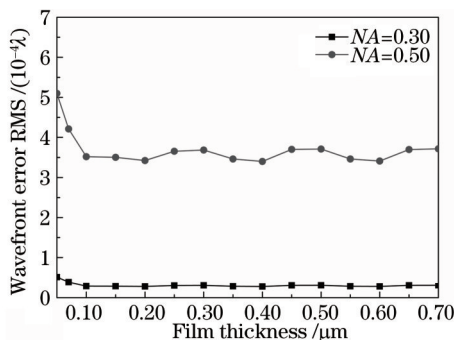


图8 点衍射波前误差与镀膜厚度的关系

Fig.8 Point-diffraction wavefront error versus film thickness

### 3.3 亚波长光纤点衍射波前最大孔径角分析

点衍射的球面波前最大孔径角决定了点衍射干涉系统的测量范围, 为了能在较大孔径角范围内得到点衍射球面波前, 对不同亚波长光纤孔径  $d$  和锥角  $\theta$  的点衍射波前最大孔径角进行仿真分析, 其中亚波长光纤镀膜厚度  $h$  为  $0.15 \mu\text{m}$ 。

图 9(a) 和 (b) 分别为  $35^\circ$  锥角对应不同孔径的亚波长光纤和  $0.5 \mu\text{m}$  孔径对应不同锥角的亚波长光纤所得到的点衍射波前最大孔径角分布曲线。从图 9 可看出, 随着亚波长光纤孔径从  $0.1 \mu\text{m}$  增大到  $1.0 \mu\text{m}$  时, 对应点衍射波前最大孔径角从  $180^\circ$  减少到  $30^\circ$ ; 当亚波长光纤锥角在  $15^\circ \sim 85^\circ$  范围内时, 对应点衍射波前最大

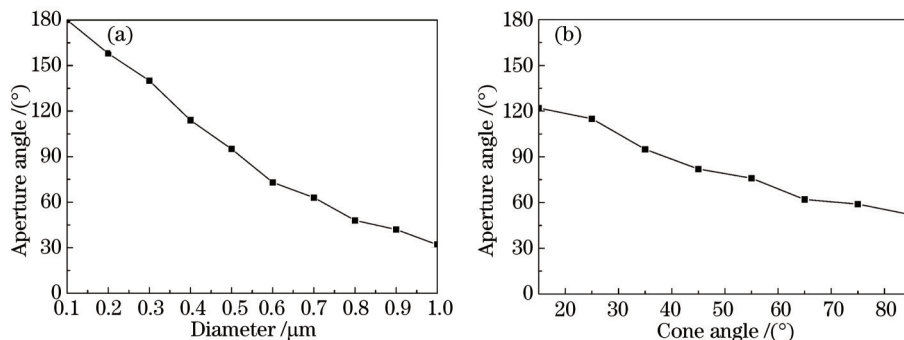


图9 不同的亚波长孔径光纤的点衍射波前最大孔径角。(a)  $35^\circ$  锥角的亚波长孔径光纤; (b)  $0.5 \mu\text{m}$  孔径的亚波长孔径光纤

Fig.9 Aperture angle of point-diffraction wavefront for various sub-wavelength-aperture fibers with (a)  $35^\circ$  cone angle; (b)  $0.5 \mu\text{m}$  aperture

孔径角为  $120^\circ \sim 50^\circ$ , 并且随着亚波长光纤锥角的增大, 点衍射波前最大孔径角减小。当采用  $0.5 \mu\text{m}$  孔径、 $35^\circ$  锥角的亚波长光纤时, 点衍射波前最大孔径角大于  $90^\circ$ 。

### 3.4 亚波长光纤点衍射能量透射率分析

点衍射的球面波前能量透射率决定了点衍射干涉系统的入射光所需强度以及对 CCD 探测器的感光灵敏度要求, 为了得到较高亮度的点衍射球面波前, 对不同亚波长光纤孔径、镀膜厚度和锥角的点衍射能量透射率进行分析。

图 10 所示为  $35^\circ$  锥角、 $0.15 \mu\text{m}$  镀膜厚度的亚波长光纤孔径所对应的点衍射能量透射率。由图 10 可知, 当亚波长光纤孔径在  $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$  范围内时, 对应点衍射能量透射率为  $0.8\% \sim 56.9\%$ , 且随着亚波长光纤孔径的增大而增大。当采用  $0.5 \mu\text{m}$  的亚波长光纤孔径时, 点衍射能量透射率为  $29.2\%$ 。

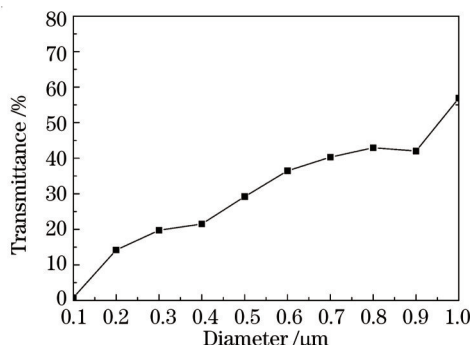


图 10 点衍射波前能量透射率与亚波长光纤的孔径关系

Fig.10 Light transmittance of point-diffraction wavefront versus fiber aperture

对于  $0.5 \mu\text{m}$  孔径的亚波长光纤, 其对应  $35^\circ$  锥角在不同镀膜厚度以及  $0.15 \mu\text{m}$  镀膜厚度在不同锥角所对应的点衍射能量透射率分别如图 11(a)和(b)所示。从图 11 可看出, 当亚波长光纤镀膜厚度在  $0.15 \sim 0.70 \mu\text{m}$  范围内时, 对应点衍射能量透射率变化很小, 在均值  $29.4\%$  上下浮动, 波动幅度小于  $1.1\%$ ; 当亚波长光纤锥角在  $15^\circ \sim 85^\circ$  范围内时, 对应点衍射能量透射率为  $46.2\% \sim 9.0\%$ , 并且随着亚波长光纤锥角的增大, 点衍射能量透射率减小。

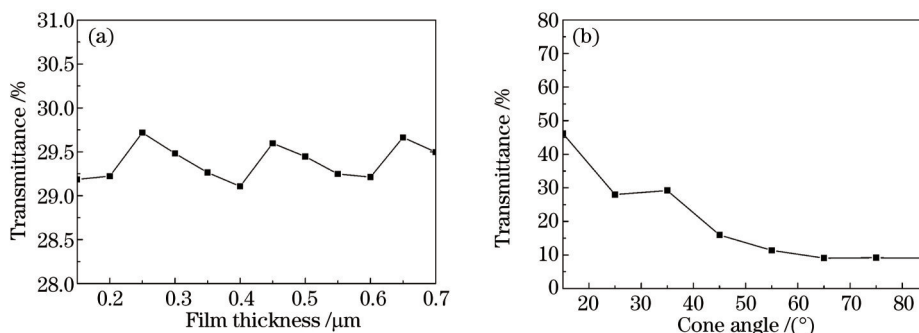


图 11 不同的亚波长孔径光纤的点衍射波前能量透射率。(a)  $35^\circ$  锥角; (b)  $0.15 \mu\text{m}$  镀膜厚度

Fig.11 Light transmittance of point-diffraction wavefront for various sub-wavelength-aperture fibers.

(a)  $35^\circ$  fiber cone angle; (b)  $0.15 \mu\text{m}$  film thickness

### 3.5 亚波长光纤点衍射波前强度分布均匀性分析

点衍射波前强度分布均匀性直接决定了点衍射干涉系统的干涉条纹对比度, 为了得到对比度较好的干涉条纹, 仿真分析了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度、数值孔径范围等因素对点衍射波前强度分布均匀性的影响。定义 NA 内点衍射波前强度的最小值  $I_{\min}$  和最大值  $I_{\max}$  的比值为波面的强度分布均匀性, 用  $\rho$  表示:

$$\rho = I_{\min} / I_{\max}, \quad (2)$$

式中  $\rho$  取值范围为  $0 \sim 1$ 。当  $\rho$  取为 1 时, 表明波面的强度分布均匀性为最佳。

为了分析亚波长光纤孔径对点衍射波前强度分布均匀性的影响, 取对应不同数值孔径范围内, 得到锥角、镀膜厚度分别为  $35^\circ$ 、 $0.15 \mu\text{m}$  的不同亚波长光纤孔径所对应的波前强度分布均匀性如图 12 所示。由图

12可知,当亚波长光纤孔径一定时,点衍射波前强度分布均匀性随着NA的减小而增大;而当NA一定时,点衍射波前强度分布均匀性随着亚波长光纤孔径的减小而增大。当亚波长光纤孔径为0.5 μm时,对应数值孔径为0.3的点衍射波前强度均匀性达到85%以上。

对于不同数值孔径范围内,得到孔径和镀膜厚度分别为0.5 μm和0.15 μm的不同亚波长光纤锥角所对应的波前强度分布均匀性如图13所示。由图13可知,当亚波长孔径光纤的锥角在15°~85°范围变化时,0.10~0.30NA范围内对应的点衍射波前强度分布均匀性均值在90%以上,且波动幅度小于3.2%。

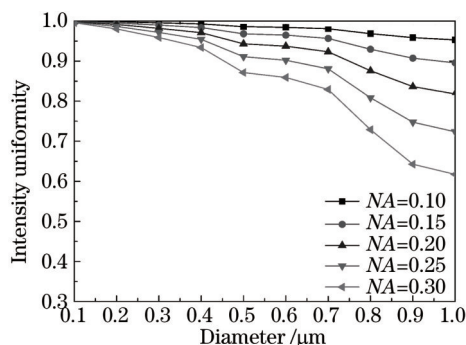


图12 点衍射波前强度分布均匀性与亚波长光纤的孔径关系

Fig.12 Relationship between intensity uniformity of point-diffraction wavefront and fiber aperture

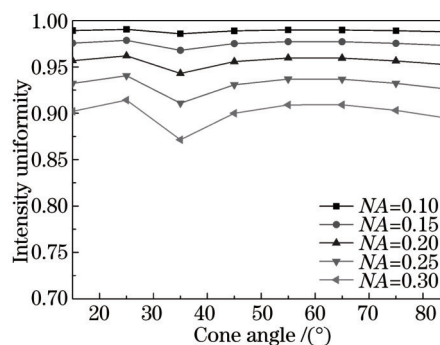


图13 点衍射波前强度分布均匀性与亚波长光纤的锥角关系

Fig.13 Relation between intensity uniformity of point-diffraction wavefront and fiber cone angle

为了分析不同亚波长光纤镀膜厚度的点衍射波前强度分布均匀性,对于不同数值孔径范围内,得到孔径和锥角分别为0.5 μm和35°的不同亚波长光纤镀膜厚度所对应的波前强度分布均匀性如图14所示。根据图14可看出,当亚波长孔径光纤的镀膜厚度在0.15~0.70 μm范围内时,对应NA在0.30内的点衍射波前强度分布均匀性波动幅度不超过0.5%。

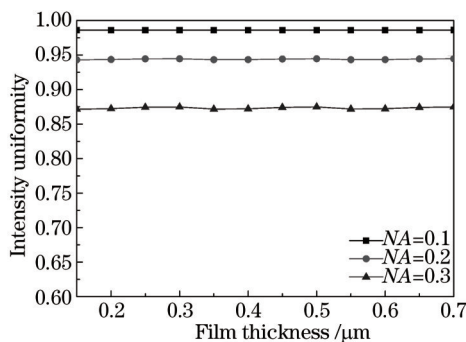


图14 不同镀膜厚度的点衍射波前强度分布均匀性

Fig.14 Intensity uniformity of point-diffraction wavefront corresponding to different film thicknesses

## 4 结 论

针孔点衍射和单模光纤点衍射中分别存在的点衍射波前能量微弱和最大孔径角小的不足,为了能同时得到大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前,本文采用了一种具有亚波长孔径的光纤点衍射源,同时基于矢量衍射理论的时域有限差分方法对其产生的点衍射球面波前质量进行仿真分析,研究了亚波长孔径光纤的孔径、锥角、镀膜厚度、数值孔径范围等因素对点衍射波前误差、最大孔径角、能量透射率和强度分布均匀性的影响。仿真结果表明:1)减少亚波长光纤的孔径,锥角和数值孔径可以有效减少点衍射波前误差;2)减小亚波长光纤孔径和锥角可以增大点衍射波前最大孔径角;3)亚波长光纤点衍射波前能量透射率随着孔径的增大和锥角的减小而增大;4)亚波长光纤点衍射波前强度分布均匀性随着孔径和数值孔径的减少而增大;5)0.5 μm孔径的亚波长光纤点衍射波前最大孔径角超过90°,能量透射率大于29%,强度均匀性超过85%,对应数值孔径为0.60的点衍射波前误差RMS值优于0.0011 λ。另外,通过与针孔点衍射、单模光纤点衍射的仿真结果的对比,验证了用亚波长孔径光纤点衍射实现大数值孔径和高亮度的点衍射球面波前的可

行性。通过本文的分析研究,可为实际点衍射干涉系统设计中的亚波长孔径光纤、激光器、CCD探测器及其他光学器件的选择提供重要的指导和精确的数值依据。

## 参 考 文 献

- 1 Li Jie, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. System errors analysis of grating lateral shearing interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508006.  
李 杰,唐 锋,王向朝,等.光栅横向剪切干涉仪及其系统误差分析[J].中国激光,2014,41(5):0508006.
- 2 Huang Hanlu, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.*. Design of the high spectral resolution lidar filter based on a field-widened Michelson interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0913003.  
黄寒璐,刘 东,杨雨英,等.基于视场展宽迈克尔孙干涉仪的高光谱分辨率激光雷达滤光器设计研究[J].中国激光,2014,41(9):0913003.
- 3 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yan Su, *et al.*. Precise alignment of separated Sagnac interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0416001.  
张学敏,魏儒义,闫 肃,等.分体型萨格奈克干涉仪的精密装调[J].中国激光,2013,40(4):0416001.
- 4 Liu Guogang, Zhang Xuejun, Wang Quandou, *et al.*. Fiber point diffraction interferometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(2): 142-145.  
刘国淦,张学军,王权陡,等.光纤点衍射干涉仪的技术研究[J].光学精密工程,2001,9(2):142-145.
- 5 Wang Daodang, Wang Fumin, Zou Hui, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer[J]. Appl Opt, 2013, 52(31): 7602-7608.
- 6 Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen, *et al.*. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. Appl Opt, 2011, 50(16): 2342-2348.
- 7 Yang Pengqian, Miao Jie, Zhang Yanli, *et al.*. Smart and quantitative near-infrared point-diffraction interferometer based on the self-referencing wavefront sensor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0508001.  
杨朋千,缪 洁,张艳丽,等.基于自参考的高精度红外点衍射干涉仪研制[J].中国激光,2013,40(5):0508001.
- 8 Wang Daodang, Wang Fumin, Chen Xixi, *et al.*. Three-dimensional coordinate measurement with point-diffraction interferometer based on Levenbery-Marquardt algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812001.  
王道档,王福民,陈茜茜,等.基于Levenbery-Marquardt算法的点衍射三维坐标测量方法[J].光学学报,2014,34(8):0812001.
- 9 Wang Huilin, Su Xianyu, Yang Huandong. Point-diffraction interferometry based on Fourier transform[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(2): 51-55.  
王惠临,苏显渝,杨焕东.基于傅里叶变换的点衍射干涉术[J].光电工程,2008,35(2):51-55.
- 10 Nie Liang, Hu Mengmeng, Liu Baoyuan, *et al.*. Fiber point diffraction interferometer for measuring spherical surface[C]. SPIE, 2010, 7749: 77490B.
- 11 Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, *et al.*. Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.  
师 途,杨雨英,张 磊,等.非球面光学元件的面形检测技术[J].中国光学,2014,7(1):26-46.
- 12 Chen Xiaoyu, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.*. Digital calibration method for defects evaluation of large fine optical surfaces [C]. SPIE, 2014, 9281: 92812R.
- 13 Wang Shitong, Liu Dong, Yang Yongying, *et al.*. Distortion correction in surface defects evaluating system of large fine optics [J]. Opt Commun, 2014, 312: 110-116.
- 14 Gao Fen, Jiang Zhuangde, Li Bing. Analysis of diffraction wavefront error caused by alignment error of pinhole[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0812004.  
高 芬,蒋庄德,李 兵.不同对准误差下的小孔衍射波面误差分析[J].光学学报,2014,34(8):0812004.
- 15 Chen Chen, Yang Yongying, Wang Daodang, *et al.*. Analysis of point-diffraction wavefront error based on finite difference time domain method [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908003.  
陈 琛,杨雨英,王道档,等.基于时域有限差分方法的点衍射波前误差分析[J].中国激光,2011,38(9):0908003.
- 16 Qi Yuejing, Lu Zengxiong, Yang Guanghua, *et al.*. Analysis of effect of numerical aperture of illumination objective lens on quality of wavefront diffracted by tiny pinhole[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0208001.  
齐月静,卢增雄,杨光华,等.照明物镜数值孔径对微孔衍射波前质量影响分析[J].中国激光,2015,42(2):0208001.
- 17 Silin DE, Kozhevnikov IE. A single-mode-fiber-based point diffraction interferometer[J]. Optics and Spectroscopy, 2012, 113(2): 216-221.



- 18 J A Kong. Electromagnetic Wave Theory[M]. New York: John Wiley & Sons, 1986: 380-382.
- 19 Wang Li, Rao Changhui, Rao Xuejun. Analysis of wave-front error for nanometer pinhole vector diffraction[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 499-505.  
王 俐, 饶长辉, 饶学军. 纳米级针孔矢量衍射波前误差分析[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 499-505.
- 20 Jiang Yu, Gao Hongyou, Yu Shaopeng, *et al.*. The influence of different grid length to the FDTD calculation[C]. 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2008: 651-654.
- 21 Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen, *et al.*. Calibration of oblique-reflection aberration in point-diffraction interferometer for high-precision spherical surface testing[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612003.  
王道档, 杨甬英, 陈 琛, 等. 点衍射球面检测中的斜反射波前像差校正[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612003.

栏目编辑: 何卓铭