

# 光纤点光源的应用研究及其球面波的评价

莫卫东 范琦 付振堂 冯明德 王云飞

空军工程大学理学院, 陕西 西安 710051

**摘要** 采用光纤点光源的光学干涉实验与检测系统, 需要的光学元件最少, 具有最好的环境与机械稳定性, 并以最简单的方法获得高精度的基准球面波, 可最大限度地减少非平面检测的系统误差。为此, 全面分析了影响光纤点光源品质的诸多因素, 应用光纤光波传输的基本理论, 提出了提高光纤点光源性能的简易方法, 并采用数字全息的方法, 对两个光纤点光源产生的球面波的干涉图进行计算分析, 实现了对光纤点光源球面波的评价。结果表明, 由光纤点光源所产生的球面波可以满足一般干涉检测对基准球面波精度的要求。

**关键词** 测量; 光学检测; 光纤点光源; 光纤耦合器; 基准球面波; 波面误差

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP51.081201

## Study on Application of Fiber Dot Light Source and Evaluation of the Spherical Wave Produced by Fiber Dot Light Source

Mo Weidong Fan Qi Fu Zhentang Feng Mingde Wang Yunfei

School of Science, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China

**Abstract** The optic interference experiment and testing inspection systems with fiber dot light sources need the fewest optical components, have the best environmental and mechanical stability, and can get high-precision benchmark spherical wave so that there are the minimum errors for the system. For this purpose, the factors that influence the quality of optical fiber dot light source are analyzed. Applying the basic theory of light transmission in fiber, the method to improve the performance of fiber dot light source has been found. By the way of digital holography, the interference patterns of spherical wave produced by two fiber dot light sources are analyzed and computed, and the precision of the spherical wave is evaluated. The results show that the spherical wave produced by fiber dot light sources can meet the requirement of general interference inspection system on precision of benchmark spherical wave.

**Key words** measurement; optical inspection; fiber dot light source; fiber coupler; benchmark spherical wave; wave front error

**OCIS codes** 120.4820; 220.4840; 120.4630; 060.2300; 0602400

## 1 引言

光纤是近代光学应用研究的一个重要领域, 光纤通信和光纤传感器是目前引人注目的两个光纤应用的研究方向, 并已取得了巨大的成功。点光源在现代光学检测以及其他应用光学系统中具有非常重要的作用。点光源不仅仅是许多光学检测系统用于产生球面波的基本光源, 产生平行光也不可或缺。尤其在点衍射干涉检测系统中, 一个高精度的球面光波直接决定了测量与误差分析的精度<sup>[1-4]</sup>。以光刻设备研制中主要用于检测光刻镜头光学元件的点衍射干涉仪为例, 对光刻元件与光学系统的波相差进行高精度测试, 首先要求必须具有一个更高精度的球面波作为基准。传统的干涉仪一般都使用标准球面镜所产生的球面波作为基准球面, 与被测球面或非球面进行干涉, 通过计算被测面反射波与基准球面波的波相差, 达到高精度检测球面或非球面表面精度的目的。因此, 其精度受限于基准球面的误差, 而点衍射干涉仪是直接使用针孔衍射产生理想的球面波作为参考球面波, 以实现对被测光学表面的高精度测量。

对于针孔产生的点光源来说, 点光源的品质取决于针孔的参数和形状。若针孔越小, 光强会越弱, 光的

收稿日期: 2013-10-06; 收到修改稿日期: 2013-11-14; 网络出版日期: 2014-07-23

基金项目: 陕西省自然科学基金(2010JM8012)

作者简介: 莫卫东(1959—), 男, 硕士, 教授, 主要从事精密光学检测方面的研究。E-mail: mwd1999@126.com

衍射效应将会极大地影响该点光源所产生球面波的波相差。若针孔大一些,光强得以增强,但孔径稍大的针孔所产生的球面波难以满足用作基准球面波的要求。因此,使用针孔产生点光源,针孔大小的选择需要在光强和需要产生的球面波的精度之间做出平衡。实验表明,采用针孔产生点光源,能满足绝大多数光学干涉检测系统对精度的要求。但是,对于需要极高精度基准球面波的光学干涉检测系统来说,如点衍射干涉仪和数字全息检测系统,采用针孔点光源所产生的球面波往往很难满足测量精度的要求,并且针孔点光源的亮度较弱,也影响了检测系统的测量范围。

为此,许多光学设计专家考虑把光纤的出光口作为点光源,以提高点光源的强度,且纤细光纤的出光口使得点光源的“点”可以足够小,由此产生的球面波具有很高的精度,这一点光源技术已经成功地应用于高精度的点衍射检测系统<sup>[6]</sup>。本文分析了影响光纤产生点光源品质的一些因素,根据光纤光波传输的基本理论,提出了提高光纤点光源性能的简易方法,并通过数字全息的方法,分析两个相干光纤点光源产生的球面波的干涉图,实现了对光纤点光源球面波的评价。

## 2 光纤点光源的产生与特性分析

### 2.1 光纤点光源的产生及特点

借助光纤产生点光源的方法非常简单,把一束激光从光纤一端输入,在光纤另一端的出光口用作点光源,即所谓的光纤点光源。

光纤点光源的光强较针孔产生的点光源具有较大的优势。由于光纤比较短,光在光纤传输中的损耗可以忽略,光纤点光源的强度决定于光纤另一端入射光的强度和入射光束与光纤的耦合程度,然而,光纤点光源在应用中,除了其强度之外,关注更多的是点光源的“点”的大小和点光源发散角。

点光源“点”的大小直接决定了点光源所产生球面波的精度,光纤点光源“点”的大小原则上就是光纤的直径。因此,为了产生更小的点光源,需要采用更细的光纤。但光纤越细,光强也相应减弱,需要根据具体检测要求在强度和球面波精度的要求上找到平衡点。本研究采用了直径为  $3\ \mu\text{m}$  和  $5\ \mu\text{m}$  的两种光纤,效果明显不同。最终实验中基本上使用的都是  $633\ \text{nm}$  的  $3\ \mu\text{m}$  光纤的出光端口作为点光源。

### 2.2 光纤点光源的发散角

光纤点光源的发散角决定了光纤点光源所产生的球面光波可用的波阵面的大小,而发散角的大小也受到诸多因素的影响。

#### 2.2.1 出射光角度与入射光角度的关系

以子午光线在光纤中的传播为例,说明光纤点光源发散角决定于哪些因素。如图 1 所示,子午光线在光纤出射端的出射角与入射光的角度相同或者相反。在实际情况下,一束很细的光束,以角度为  $\theta$  入射到光纤的入射端面,光线在光纤中传播的过程中,或多或少存在斜光线成分,使得光线的方位角将逐渐变化,在出射端就成为半角为  $\theta$  的空心圆锥。同理可得,当入射的会聚光锥与入射法线夹角为  $\theta$  时,出射方向与光轴的夹角仍为  $\theta$ ,成为一个与入射光锥角  $\delta$  相同的带有锥角的空心光锥,如图 1(b) 所示。

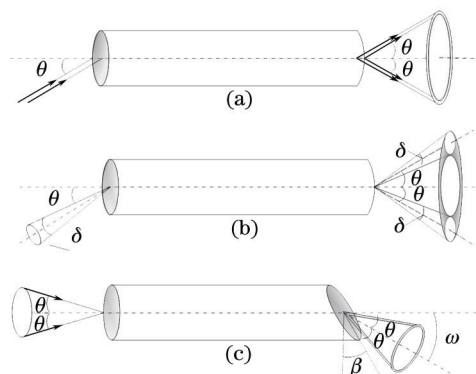


图 1 光纤点光源发散角示意图

Fig.1 Schemes of divergence angle of the fiber dot light source

在不考虑光纤对光的衍射影响的条件下,根据上述原理,若在光纤入射端口入射的光线垂直于入射面

(平行于光纤),则从光纤另一端出射的光线也将垂直于出射端面,发散角为0,出射光是一束纤细的平行光。实际上,光在纤细的光纤中传播后,光纤对光同样具有衍射作用,当光从光纤出射时也将出现与针孔相类似的衍射效应,衍射光斑的半角宽度略大于圆孔衍射的艾里斑<sup>[6]</sup>。

因此,要使光纤出射光成为点光源并具有较强的发散角,要求耦合入射到光纤的入射光不能是平行光,应该是一个会聚的点光源。也就是说,把几乎平行传播的激光直接耦合到光纤不能够产生具有较大发散角的点光源,故而在实践中使用显微物镜聚焦激光束后再耦合至光纤。一般来说,光纤点光源的发散角取决于将激光束耦合进光纤的显微物镜的焦距,考虑到光纤的衍射效应,实际的发散角会更大一点。

图2为采用激光产生的光纤点光源的点衍射干涉检测系统示意图(图中L为透镜;M为反射镜;FOP为光纤板;PBS为偏振分束器;HWP为半波片;QWP为1/4波片;PZT为压电陶瓷)。可见,对于直光纤,显微物镜的焦距决定了入射到光纤入射端面光线的角度,在光纤出射端出射的点光源发散角与显微物镜会聚光角度相同。

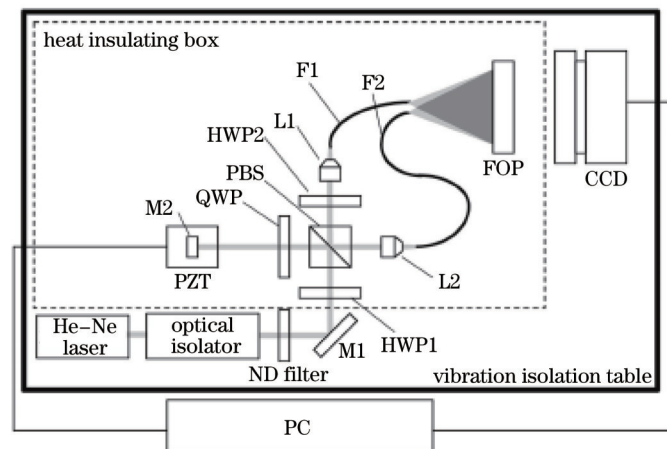


图2 应用光纤点光源的干涉检测系统

Fig.2 Optic interference testing system with fiber dot light sources

### 2.2.2 光纤出射端面倾斜对光纤点光源的影响

从图1(c)可以看到,光纤的出射面与直光纤轴线不垂直呈斜面时,出射光纤的方向将发生改变。出射光锥与光纤光轴的夹角 $\omega$ 与出射端面斜面夹角 $\beta$ 的关系为

$$\omega = (n - 1)\beta, \quad (1)$$

式中 $n$ 为光纤芯玻璃的折射率。根据(1)式可知,出射光锥的倾斜量 $\omega$ 正比于出射端面的倾斜角 $\beta$ 。实际应用中利用这一特性,可将光纤的出射面做成斜面,达到使垂直入射的会聚光在光纤出射端为斜出射的目的。

图1(b)和(c)的原理给应用带来了许多好处。例如,可在光纤的入射端调节出射光的角度,从而将非常靠近的两个光纤点光源的传播方向分得更开,分别用作参考光和物光,满足不同检测需要。

### 2.2.3 光纤弯曲对光纤点光源的影响

实际产生点光源的光纤应用中不可能是直的,总会有弯曲,一般来说弯曲的光纤所产生的点光源的发散角会因此而变化。图3为光纤弯曲对光线在光纤传播中的影响示意图。根据图3所示的光纤入射光和出射光与光纤弯曲半径的关系,设光纤的直径为 $d$ ,光纤弯曲的曲率半径为 $R$ ,入射光锥半角为 $\delta_{in}$ ,出射光锥半角为 $\delta_{out}$ ,若 $R \gg d$ ,可推导出入射会聚光的锥角与在弯曲的光纤中传播后出射发散光的发散角的关系为

$$\Delta \cos \delta_{out} = \frac{2d}{R} \cos \delta_{in}. \quad (2)$$

从(2)式可以看出,当光纤弯曲时,平行光入射( $\cos \delta_{in} = 1$ ), $\Delta \delta_{out} > 0$ ,即光纤点光源的发散角较入射会聚光的会聚锥角增大。据此可得,光纤弯曲有利于增大光纤点光源发散角,但光纤不能弯曲得太厉害,否则会使发散角过大,减弱点光源的强度,使得斜射光更多地影响光纤点光源所产生球面波的相位球面性。

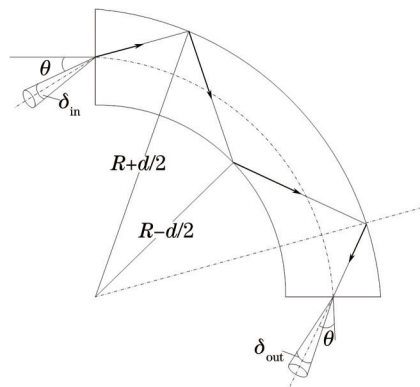


图3 光纤弯曲对光纤点光源的影响示意图

Fig.3 Effect of fiber bending on the fiber dot light source

### 2.3 提高光纤点光源发散角的研究

对于点光源的应用来说,其发散角越大,距离相同时用于测量的球面波的面积相应增加。根据上述光线在光纤中传输的基本特性可知,光纤点光源的发散角决定于入射光的会聚角。但是可以通过减小光纤出射端的界面而使出射光的发散角变大。

仍以子午光线为例,如图4所示,当光线从大端面入射时,折射光在锥形光纤界面上每次反射时入射角都将被减小 $2\varphi$  ( $\varphi$ 为锥形光纤的锥角)。经过多次内全反射之后,从锥形光纤的小端面出射光的出射角 $\theta_2$  (光纤点光源的发散角)将大于入射角 $\theta_1$ 。但要求这段锥形光纤不能太长,因为如果过长,光纤在经过多次内全反射后,在锥形光纤界面上的入射角小于保证内全反射所必需的临界角时,这条光线将在界面上通过折射而逸出光纤包层。

为此,本研究采用制作光纤探针的管腐蚀法<sup>[7-8]</sup>,使光纤出射端变得更“尖”一些,不仅能增大光纤点光源的发散角,还能够减小光纤点光源的大小,改善光纤点光源所产生球面波的波相差。

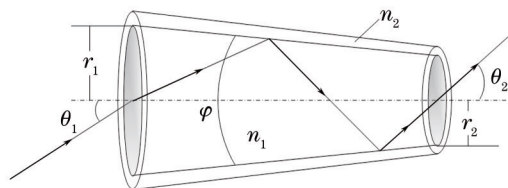


图4 锥形光纤对光纤点光源的影响

Fig.4 Effect of tapered fiber on the fiber dot light source

### 2.4 光纤点光源的相干性研究

充分利用光纤点光源亮度和所产生球面波的球面性好的特点,将光纤点光源作为点光源的使用已经有许多成功的实验系统及应用,其中都要求两个光纤点光源具有很好的相干性。普遍采用的方法为先使用分光镜把一束激光一分为二,使之成为两束相干光,再分别耦合入射到两根不同的光纤中,经过不同光纤出射的光再相遇产生干涉,用于检测(图2)。

在光纤通信应用中,常用到一种器件叫作光纤分路器,也可称之为“非波长选择性光分支器件”。该器件是一种用于实现特定波段光信号功率分路的光纤器件,是光纤链路中最重要的无源器件之一,被广泛地应用于光纤通信系统、光纤CATV系统、光纤局域网和广电网络等领域。光纤光分路器有 $1\times 2$ 、 $1\times 4$ 以及由它们组成的 $1\times N$ 的多路光纤分路器。

在使用光纤分路器架构的干涉系统的实验中发现,光纤分路器分出的子光束同样具有很好的相干性。图5为两个相干光纤点光源的干涉图样。值得注意的是,采用光纤分路器产生的相干光,相对于采用针孔产生的点光源,不仅光强较大,而且位置更加便于调整,同时可有效地减少系统光学元件,从而提高光学干涉系统的环境与机械稳定性,有利于保证干涉检测系统的精度。更重要的是,由光纤点光源发出的球面波具有很好的球面度,可作为一个标准的参考球面波进行数字化精密光学检测的分析计算,最大限度地减少实验中的误差环节。



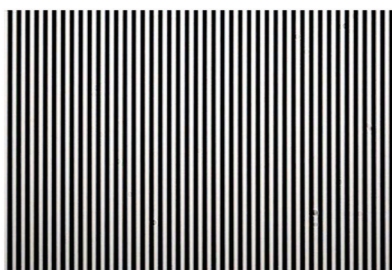


图5 两个光纤点光源球面波的干涉图

Fig.5 Interference patterns of spherical wave produced by two fiber dot light sources

### 3 对光纤点光源产生球面波的评价

作为基准应用的球面波的波相差评价有许多种方法<sup>[9-12]</sup>,已经应用于不同的检测系统精度的评价中。本研究提出了一种新的相对简单的方法,用于光纤点光源所产生的球面波波相差的分析和计算,实现了对光纤点光源产生球面波的客观评价。

从图5可以看到,把两个靠得很近的光纤点光源所产生的球面波进行相干后,所产生的干涉图在旁轴近似为直条纹,且干涉条纹平滑均匀,直观地说明了由光纤点光源产生的两球面波的球面度相当好。但是,光纤点光源所产生球面波的品质如何,仅仅观察干涉直条纹的平滑度和均匀性是不够的,还需要对干涉直条纹进行数学分析,才能准确地评价光纤点光源所产生球面波的球面度,以确定光纤点光源是否适用于数字全息等光学精密检测系统。

本研究采取的方法如下:使用CCD相机记录两个光纤点光源产生的球面波相干的干涉图像;然后对干涉图像进行傅里叶变换,在其频谱空间上选取其中任意一束光,生成一个球面波;对生成的单一球面波进行泽尼克多项式拟合分析,直接比较计算出该球面波的波相差<sup>[10]</sup>。

随后,用该球面波与一个数字标准球面波进行相干叠加,生成一个新的干涉条纹图。对新的干涉条纹图进行泽尼克多项式拟合分析,得出被测球面波与数字标准球面波的波相差,可以评价被测球面波的球面度。通过上述两种方法可以对光纤点光源所产生球面波的球面度进行客观的评价。

### 4 结 论

采用光纤点光源可以为光学干涉系统带来一些新的变化,尤其对于要求高精度的点光源干涉系统来说,采用光纤产生的点光源不仅可以提高点光源的亮度,而且保证了所产生的球面波的精度,有效地减少了光学元件,简化了光路调整方法,降低了干涉系统对环境与机械稳定性的要求。全面分析了影响光纤产生点光源品质的一些因素,根据光纤光波传输的基本理论,提出了提高光纤点光源性能的简易方法。此外,采用了数字全息方法实现了对光纤点光源球面波的评价。结果表明,由光纤点光源所产生的球面波可以满足一般干涉检测对基准球面波精度的要求。

光纤点光源作为相干光源可用于任何光学干涉检测系统,不仅可用于目前广泛应用的光纤马赫-曾德尔干涉仪或光纤迈克耳孙干涉仪等双光束干涉仪,还可独立地用于各种精密光学干涉检测系统之中,例如普通全息照相和数字全息检测系统。

#### 参考文献

- 1 Xu Jiajun, Xing Tingwen, Xu Fuchao. Calibration of the system errors in pinhole diffracted interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712003.  
许嘉俊,邢廷文,徐富超.点衍射干涉仪系统误差标定[J].光学学报,2013,33(7):0712003.
- 2 Seungwoo Kim, Hyuggyo Rhee, Jiyoung Joo, *et al.*. Two-point diffraction interferometer for absolute distance measurement [C]. SPIE, 2004, 5531: 162.
- 3 Shao Jing, Ma Dongmei. Testing the criterion wavefront diffracted by point diffraction interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508003.  
邵晶,马冬梅.点衍射干涉仪基准波前测试技术研究[J].中国激光,2011,38(5):0508003.

- 4 K Liu, Y Li. Design optimization of phase-shifting point diffraction interferometer[C]. SPIE, 2008, 7156: 71561W.
- 5 Toshiaki Matsuura, Satoru Okagaki, Takaaki Nakamura, *et al.*. Measurement accuracy in phase-shifting point diffraction interferometer with two optical fibers[J]. Opt Rev, 2007, 14(6): 401-405.
- 6 Lin Bin, Guo Fuyuan, Chen Yuqing, *et al.*. Beam characteristic analysis of scalar diffraction from weakly guiding optical fiber[J]. Chinese J Lasers, 2003, 30(9): 809-813.  
林 斌, 郭福源, 陈钰清, 等. 弱导光纤的标量衍射光束特性分析[J]. 中国激光, 2003, 30(9): 809-813.
- 7 Wang Hui, Ren Hongliang, He Jintian, *et al.*. Fabrication of nanometric optical fiber probe by tube etching method[J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 417-419.  
王 慧, 任宏亮, 何金田, 等. 管腐蚀法制作纳米光纤探针[J]. 激光技术, 2004, 28(4): 417-419.
- 8 Zhang Liyuan, Li Yonggui, Wang Qian. Preparation of optical probes for scanning near-field infrared microscopy by etching method[J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(12): 2322-2326.  
张立源, 李永贵, 王 潜. 扫描近场红外显微镜光纤探针的腐蚀制法[J]. 物理学报, 2001, 50(12): 2322-2326.
- 9 Xu Jingwei, Yan Feng, Zhang Xuejun. Testing of optical system based on point light source[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(12): 122203.  
许竞伟, 闫 锋, 张学军. 应用点光源检测光学系统[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(12): 122203.
- 10 Peng Shijun, Miao Erlong, Shi Zhenguang, *et al.*. Research on high-precision measurement of radius of curvature[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011201.  
彭石军, 苗二龙, 史振广, 等. 高精度曲率半径测量研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011201.
- 11 Zheng Meng, Li Yanqiu, Liu Ke. Design of mask for phase-shifting point diffraction interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 031201.  
郑 猛, 李艳秋, 刘 克. 相移点衍射干涉仪用衍射板结构设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 031201.
- 12 Zhong Liyun, Zhang Yimo, Lü Xiaoxu, *et al.*. Analysis of the characteristics about the digital holography of the spherical reference wave[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1209-1213.  
钟丽云, 张以谟, 吕晓旭, 等. 球面参考光波数字全息的一些特点分析及实验[J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1209-1213.