

正三角型结构三光纤出射光场干涉理论模型及其实验*

苑立波¹ 林沛² 肖德航³

(1 哈尔滨工程大学理学院,物理系,哈尔滨 150001)

(2 黑龙江中医药大学佳木斯学院,佳木斯 154007)

(3 黑龙江大学,技术物理学院,哈尔滨 150001)

摘要 利用三根光纤以正三角形的方式组合在一起,实现了三光纤 Moiré 干涉,建立了纤端出射场干涉模型,并进行了理论计算. 实验结果与理论计算结果符合较好. 为光纤莫尔传感技术的应用和发展提供了理论和实验依据.

关键词 Moiré 干涉; 光纤; 正三角型; 纤端出射场; 位相角

中图分类号 文献标识码 A

0 引言

传统的莫尔现象是基于两块成一定小夹角的光栅产生的,观察到的是低频条纹^[1,2]. 与上述 Moiré 条纹形成机理完全不同,光纤莫尔干涉的基础是多光源干涉理论^[3,4]. 采用传统的莫尔条纹生成方法,1970年英国的 Meadows 和日本的 Takasaki 分别提出了应用光栅投射的莫尔轮廓测量方法^[5,6]. 1971年日本的吉泽彻和铃本正根又提出了使用双光栅的投影莫尔轮廓测量方法^[7,8]. 1977年, Idesawa 等人又提出了激光扫描型莫尔轮廓测量法^[9]. 自1997年,提出了三光纤莫尔干涉光场生成技术后^[3], 光纤莫尔轮廓测量技术成为莫尔检测领域中的一项重要研究内容之一. 众所周知,单模偏振保持光纤的纤芯很细,对于波长为 633 nm 的 He-Ne 激光,光纤芯径为 4 μm. 出射端可以看成点光源,本文将讨论三光纤端排布成正三角形所形成的纤端光场干涉特性,为进一步实现光纤莫尔干涉轮廓测量提供一种干涉光场编码方法.

1 正三角型三光纤端结构

采用三根高双折射 (HiBi) 保偏光纤排成正三角形,如图1. 光信号入射端的双折射方向保持一致,而光信号出射端的双折射方向设计成如图所示

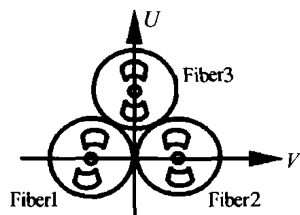


图1 光纤出射端端面
Fig. 1 The cross-section of three HiBi fiber output end

的情形.

2 纤端出射光场干涉模型

如图1,将三根同样的光纤以正三角形的方式排列,则当其另一端用同一光源入射时,其出射端的光场为

$$E(r, t) = E_1(r, t) + E_2(r, t) + E_3(r, t) \quad (1)$$

设振动方向相同,则

$$\begin{aligned} E_1(x, y, z, t) &= E_1 e^{-j(\omega t + \varphi_1)} \\ E_2(x, y, z, t) &= E_2 e^{-j(\omega t + \varphi_2)} \\ E_3(x, y, z, t) &= E_3 e^{-j(\omega t + \varphi_3)} \end{aligned} \quad (2)$$

故出射光强为

$$\begin{aligned} I = E(r, t) \cdot E(r, t)^* &= |E(r, t)|^2 = [E_1 e^{-j(\omega t + \varphi_1)} + E_2 e^{-j(\omega t + \varphi_2)} + E_3 e^{-j(\omega t + \varphi_3)}] \times [E_1^* e^{j(\omega t + \varphi_1)} + E_2^* e^{j(\omega t + \varphi_2)} + E_3^* e^{j(\omega t + \varphi_3)}] \\ &= I_1 + I_2 + I_3 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + 2\sqrt{I_3 I_1} \cos(\varphi_3 - \varphi_1) + 2\sqrt{I_2 I_3} \cos(\varphi_3 - \varphi_2) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $I_1 = E_1 E_1^*$, $I_2 = E_2 E_2^*$, $I_3 = E_3 E_3^*$.

相位分别为

$$\begin{cases} \varphi_1 = (2\pi/\lambda)(n_c l_1 + r_1) + \varphi_{10} \\ \varphi_2 = (2\pi/\lambda)(n_c l_2 + r_2) + \varphi_{20} \\ \varphi_3 = (2\pi/\lambda)(n_c l_3 + r_3) + \varphi_{30} \end{cases} \quad (4)$$

式中 n_c 为光纤芯折射率, l_1, l_2, l_3 分别为光纤 1, 2, 3 的长度, r_1, r_2, r_3 分别为三光纤端面中心到观测场点 P 间的距离. $\varphi_{10}, \varphi_{20}, \varphi_{30}$ 则为三光纤光场之初相位.

由式(4)有

$$\begin{cases} \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) + \frac{2\pi}{\lambda}[n_c(l_2 - l_1)] + \varphi_{20} - \varphi_{10} \\ \varphi_3 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_3 - r_1) + \frac{2\pi}{\lambda}[n_c(l_3 - l_1)] + \varphi_{30} - \varphi_{10} \\ \varphi_3 - \varphi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(r_3 - r_2) + \frac{2\pi}{\lambda}[n_c(l_3 - l_2)] + \varphi_{30} - \varphi_{20} \end{cases} \quad (5)$$

即

*教育部高校优秀青年教师教学科研奖励计划项目的资助
Tel: 0451-82519754 Email: lbyuan@vip.sina.com
收稿日期: 2003-07-21

$$\begin{cases} \varphi_{21} = (2\pi/\lambda) [n_c(l_2 - l_1)] + \varphi_{20} - \varphi_{10} \\ \varphi_{31} = (2\pi/\lambda) [n_c(l_3 - l_1)] + \varphi_{30} - \varphi_{10} \\ \varphi_{32} = (2\pi/\lambda) [n_c(l_3 - l_2)] + \varphi_{30} - \varphi_{10} \end{cases} \quad (6)$$

则当三光纤长度一定且不受外界扰动时,式(6)为三个不变的相位角. 将式(5)中 r_1, r_2 和 r_3 在图 2 所示的坐标系中展开, 并取一级近似, 有

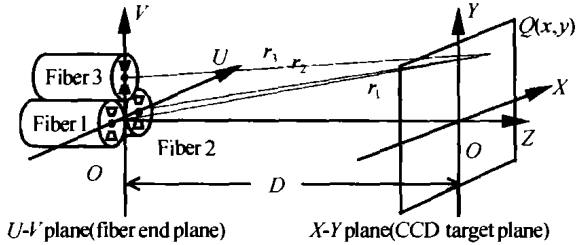


图 2 坐标分析
Fig. 2 Analysis coordinate system

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{D^2 + (x+d)^2 + y^2} \approx D \left[1 + \frac{(x+d)^2 + y^2}{2D^2} \right] \\ r_2 = \sqrt{D^2 + (x-d)^2 + y^2} \approx D \left[1 + \frac{(x-d)^2 + y^2}{2D^2} \right] \\ r_3 = \sqrt{D^2 + x^2 + (y-\sqrt{3}d)^2} \approx D \left[1 + \frac{(x + (y-\sqrt{3}d))^2}{2D^2} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式中 D 为光纤端面与观测平面间的距离, d 为正三角形光纤端面两光纤芯之间距离的一半. $F_1(-d, 0), F_2(d, 0), F_3(0, \sqrt{3}d)$ 分别为三光纤芯在图 1 所示光纤端平面内的函数值.

于是式(5)化为

$$\begin{cases} \varphi_2 - \varphi_1 = (2\pi/\lambda D) [-2xd] + \delta_{21} \\ \varphi_3 - \varphi_1 = (2\pi/\lambda D) [-d(x + \sqrt{3}y)] + \delta_{31} \\ \varphi_3 - \varphi_2 = (2\pi/\lambda D) [+d(x - \sqrt{3}y)] + \delta_{32} \end{cases} \quad (8)$$

式中

$$\begin{cases} \delta_{21} = \varphi_{21} \\ \delta_{31} = \varphi_{31} + (2\pi/\lambda D) d^2 \\ \delta_{32} = \varphi_{32} + (2\pi/\lambda D) d^2 \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)代入式(3), 得正三角形光纤端干涉光场强度分布为

$$\begin{aligned} I = & I_1 + I_2 + I_3 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda D} [-2xd] + \delta_{21} \right\} + \\ & 2 \sqrt{I_3 I_1} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda D} [-d(x + \sqrt{3}y)] + \delta_{31} \right\} + \\ & 2 \sqrt{I_3 I_2} \cos \left\{ \frac{2\pi}{\lambda D} [+d(x - \sqrt{3}y)] + \delta_{32} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

3 实验结果

3.1 实验装置

光纤 Moiré 图形发生装置如图 3, 实验装置如图 4, 该实验装置由光源-氦氛激光器、三光纤传导光纤、光纤起偏器、偏振片和测微目镜组成. 用氦氛激光器照射光纤入射端, 则在出射端得到同频率的出

射光, 由于在光纤传导装置的制作过程中很难保证光纤出射端光的偏振方向一致, 故在光纤出射端和测微目镜之间放一块偏振片, 调整偏振片可观察到清晰的 Moiré 干涉条纹.

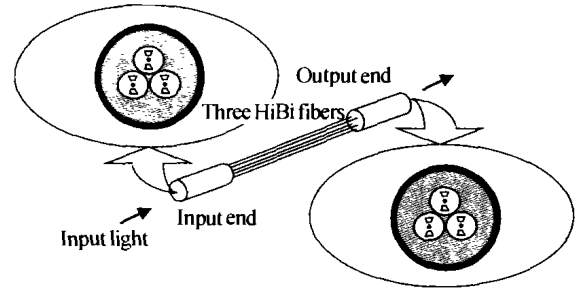


图 3 光纤 Moiré 图形发生装置
Fig. 3 Fiber optic Moiré interference pattern generator

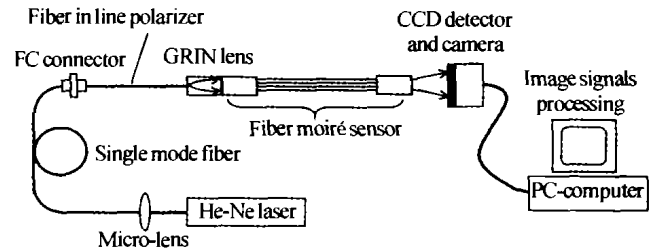


图 4 实验装置
Fig. 4 Diagram of experimental set-up

3.2 实验结果与模拟结果的比较

用 CCD 摄像机, 经图像采集卡进行数据采集后, 得到的正三角形三光纤干涉的 Moiré 纹如图 5(a). 实验中所用光纤端面参数 $d = 0.065 \text{ mm}$; CCD 测量靶面到光纤端的距离 $D = 10 \text{ mm}$. 根据前面给出的模型及公式, 将各项参数代入式(10), 计算可得 D 处的光场分布(计算中为简便, 将初相位 δ_{21}, δ_{31} 和 δ_{32} 均取为零), 模拟结果如图 5(b).

比较图 5(a) 和 (b), 两者在光场分布结构上均

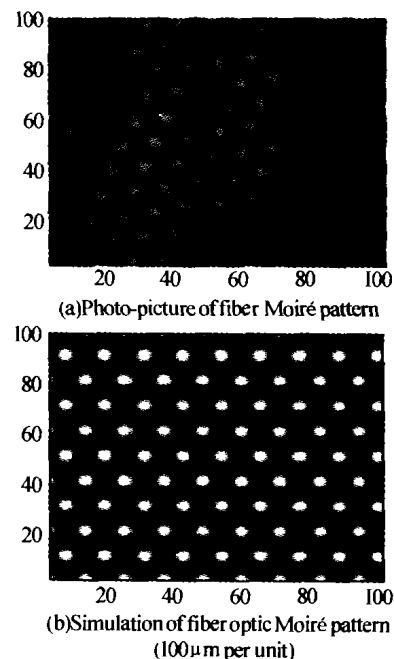


图 5 实验结果与理论结果的比较
Fig. 5 Comparing of experimental and theoretical results

由正三角形点阵构成周期性亮暗排列. 具有相同的晶格常数. 由图中可以看出,两者在强度上有一定的差别,实验图片的调制深度明显较理论模拟结果的调制深度要小,这一方面是由于实验上三光纤的偏振方向难于严格保证如图3所示的理想情况. 另一方面,则是由于理论模型是采取了近场的一阶近似所致.

为了确定三角形结构三光纤端所形成的莫尔纹的空间周期特性,图6给出了其出射光场的二维空间频谱分布特性.

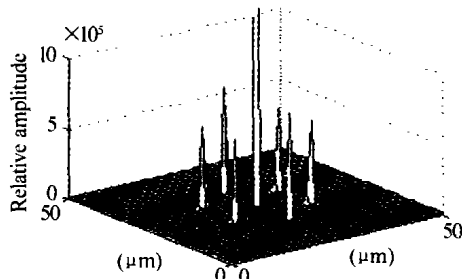


图6 正三角形结构光纤端出射光场的空间频谱分布特性的数值模拟

Fig.6 Spatial domain frequency distribution characteristics simulation result of right triangle three HiBi fiber output optical field

4 结论

采用多光纤干涉技术实现光场的莫尔编码,具有方法简单、光路柔韧可变等特点. 利用这种方法,可制作成正三角形、正方形等多种干涉光场编码器. 本文采用三根光纤以正三角形的方式组合在一起,实现了三光纤 Moiré 干涉,建立了纤端出射场干涉模型,进行了理论计算. 并将实验结果与理论计算结果进行了比较. 为进一步将光纤莫尔干涉技术用

于非接触反射测量提供了理论和实验依据. 如果进一步采用相关的图像处理技术^[10,11],可使图像的质量获得较大的改进.

参考文献

- 1 Sciammarella C A. The Moiré method: A review. *Exp Mech*, 1982, **22**:418 ~ 422
- 2 Reid G T. Moiré fringes in metrology. *Opt Lasers Eng*, 1984, **5**(1):63 ~ 69
- 3 Yuan Libo. Fiber-optic Moiré interferometer. *Chinese Physics Letters*, 1997, **14**(9):675 ~ 677
- 4 Yuan Libo, Zhou Limin. Fiber optic Moiré interference principle. *Optical Fiber Technology*, 1998, **4**(2):224 ~ 232
- 5 Meadows D M, Johnson W O, Allen J B, et al. Moiré Topography. *Appl Opt*, 1970, **9**(4):942 ~ 947
- 6 Takasaki H. Generation of surface contours by Moiré pattern. *Appl Opt*, 1970, **9**(6):1467 ~ 1472
- 7 吉泽彻,清水茂九. 昭和46年度精机学会学术讲演会, 1971. 245 ~ 249
- 8 铃木正根,铃木喜义,金谷元德. 昭和46年度精机学会学术讲演会, 1971. 239 ~ 243
- 9 Idesawa M, Yatagai T, Soma T. Scanning Moiré method and automatic measurement of 3-D shapes. *Appl Opt*, 1977, **16**(8):2152 ~ 2162
- 10 相里斌,计忠瑛,黄旻,等. 空间调制干涉光谱成像仪定标技术研究. *光子学报*, 2004, **33**(7):850 ~ 854
Xiangli B, Ji Z Y, Huang M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7):850 ~ 854
- 11 屈有山,田维坚,李英才,等. 基于小波双三次插值提高光学遥感图像空间分辨率的研究. *光子学报*, 2004, **33**(5):601 ~ 605
Qu Y S, Tian W J, Li Y C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):601 ~ 605

The Optical Output Field Interference Theoretical Model and Experimental Results of Three Fibers End Arranged in Right Triangle

Yuan Libo¹, Lin Pei², Xiao Dehang³

¹ Department of Physics, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001

² Jamusi College, Heilongjiang Traditional Medicine University, Jiamusi 154007

³ School of Technical Physics, Heilongjiang University, Harbin 150076

Received date: 2003-07-21

Abstract Based on a three HiBi fibers bundle arranged in a right triangle, a three fiber Moiré interference pattern has been demonstrated. The theoretical model of the optical output field was established and the theoretical pattern was also simulated. It is shown that the experimental result is agreement with the simulation results.

Keywords Moiré interference pattern; Fiber; Right triangle; Output optical field of fibers end; Phase angle



Yuan Libo was born in 1962 in Heilongjiang Province, China. He is with the Opto-electronics Department as a professor and dean of school of science of Harbin Engineering University. He has received his Ph. D. (Fiber optic Smart Structures 2003), M. S. (Communication & Electronic Systems 1990) and B. S. (Physics 1984) degrees in The Hong Kong Polytechnic University, Harbin Shipbuilding Engineering Institute and Heilongjiang University, respectively. His general area of research is in optical waveguide theory, optical fiber devices, fiber-optic sensors and its applications. Over 150 of his research papers have been published.