

光纤连接器端面的显微干涉测试系统

李 路, 王 鸣

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 介绍了一种基于显微干涉的光纤连接器端面的测试系统, 干涉仪由 Mirau 干涉物镜和镜筒透镜组成, CCD 相机采集干涉图样, 经处理后得到相位分布图. 采用 Carré 相位提取算法, 无需进行特定步长的相移. 对光纤连接器端面的表面形貌、曲率半径、顶点偏移进行测量, 测量系统的横向分辨率可达到 $0.9\text{ }\mu\text{m}$, 重复性测量精度为 9.5 nm .

[关键词] 光纤连接器, 显微干涉, Mirau 物镜, 相移干涉, 相位提取

[中图分类号] O 348.1 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292(2009)01-0084-04

A Testing System for Optical Fiber Connector End Surface Based on Microscopic Interferometry

Li Lu Wang Ming

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract This paper introduces a testing system for optical fiber connector end surface based on microscopic interferometry. The interferometer consists of a Mirau interference objective and a tube lens. A CCD camera captures the interferograms to get the phase distribution. The Carré algorithm is adopted to extract algorithm, so the determine step size of phase-stepping method is unnecessary. This method can obtain geometrical parameters of the optical fiber connector end surface such as surface topography, radius of curvature and apex displacement. The result shows that the lateral resolution is $0.9\text{ }\mu\text{m}$ and the vertical repeatability is 9.5 nm of the measurement system.

Key words optical fiber connector, microscopic interferometry, mirau interference objective, phase-shifting interference, phase extracting

光纤连接器是光纤通讯系统中不可缺少的重复通断用无源器件, 在光通信系统、光信息处理系统、光学仪器仪表中被广泛应用. 光纤连接器按端面研磨形态可以分为 PC 型、APC 型、SPC 型和 UPC 型等, PC 型连接器端面研磨抛光成微凸球型; APC 型一方面在端面形成 8° 倾角, 另一方面在端面形成凸球型; SPC 型和 UPC 型端面研磨成凸球面.

光纤连接器端面的几何参数包括曲率半径、顶点偏移以及纤芯高度, 只要测得以上几个方面的几何参数就可以对光纤连接器连接性能进行完整的评价. 曲率半径是指插针端面研磨成球面的半径, 其大小与连接器互联时光纤端面间隙及连接器的稳定性有密切关系^[1]. 顶点偏移也称研磨偏移、研磨偏心, 是指端面研磨后最高点与光纤纤芯中心的水平间距, 是由于抛光不精确引起的, 从而使传输损耗增大. 国际上采用的 Telcordia GR-326 Issue 3 标准, 对合格的光纤连接器规定为: 曲率半径应为 $7\sim 25\text{ mm}$, 顶点偏移量小于 $50\text{ }\mu\text{m}$; 纤芯高度在 $-100\text{ nm}\sim 100\text{ nm}$ 之间.

1 测量原理

Mirau 型干涉显微镜^[2]如图 1 所示. 从光源发出的光束经显微物镜后透过参考板, 被分光板上的半透半反膜分成两路: 一路透过分光板后

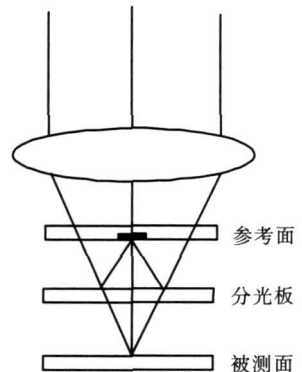


图 1 Mirau 干涉物镜

Fig.1 Mirau interference objective

收稿日期: 2008-02-14

通讯联系人: 王 鸣, 教授, 博士生导师, 研究方向: 激光应用与传感. E-mail wangming@njnu.edu.cn

透射到被测面上, 反射后经分光板和参考板回到显微物镜; 另一路被分光板反射到参考板上表面的小镜面上, 从小镜面上反射回的光束再次被分光板反射, 然后穿过参考板到达显微物镜; 两束光在显微物镜视场中会合并发生干涉。

Mirau型干涉显微镜的特点是只使用了一个显微物镜。由于测量光路和参考光路几乎共用一个光路, 物镜对参考光束和测量光束的影响相同, 因此在测量时不会引入附加光程误差。另外, 参考光路和测量光路的工作条件较为接近, 可以排除很多干扰因素。为了得到光纤连接器端面的形貌, 本文采用步进相移干涉技术, 通过对干涉图的处理计算出被测光纤连接器端面对应的相位, 进而计算出光纤连接器端面的形貌。

图 2 为 Mirau 显微干涉仪的结构示意图。被测光纤连接器与 PZT 连接沿光轴移动, 实现相移, 干涉条纹经过镜筒透镜放大后在 CCD 上成像。干涉仪采用 Nikon 公司的 Mirau 干涉物镜, 放大倍数 $20\times$, 数值孔径 0.4, 工作距离 4.7 mm, 视场范围 $690\times 460\text{ }\mu\text{m}$ 。面阵 CCD 尺寸为 $2/3$ 英寸, 像素数为 800×600 。

2 数值模拟

空间两束光干涉时, 形成稳定的光强强弱分布, 可以表示为^[3]:

$$I(x, y) = I_a(x, y) (1 + A \cos(\phi(x, y))). \quad (1)$$

式中, $I_a(x, y)$ 和 A 分别表示平均光能量分布和干涉场的干涉调制系数。 $\phi(x, y)$ 为被测面和参考面对应点的相位差, 对于确定的位置来说 $\phi(x, y)$ 是一个常数。所以如果在干涉测量过程中, 在测量光或参考光中引入已知相移量 σ , 干涉条纹光强分布为:

$$I(x, y) = I_a(x, y) (1 + A \cos(\phi(x, y) + \sigma)). \quad (2)$$

采用 Carré 相位提取算法, 不需要知道每次相移的具体数值, 只需要保证在几次相移过程中相移量保持一致, 这给相移过程带来了方便。由 4 幅干涉图可计算得到相位分布, 被测光纤连接器端面上点 (x, y) 对应的相位可以表示为^[4]:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{[(I_1 - I_4) + (I_2 - I_3)][3(I_2 - I_3) - (I_2 - I_4)]}}{(I_2 + I_3) - (I_1 + I_4)} \right\}. \quad (3)$$

式中, $I_{1\sim 4}$ 分别为 4 步的光强值。

由反正切函数得到的相位定义域为 $[-\pi/2, \pi/2]$, 可以根据正弦余弦判断将相位扩展到 $[-\pi, \pi]$ 。通过解包裹可以得到被测表面真实相位 $\phi(x, y)$, 由 $\phi(x, y)$ 可以得到被测面各点高度值进而得到表面形貌:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y). \quad (4)$$

式中, λ 为光源波长。

在测量的过程中, 系统装置的振动会产生噪声, 同时 CCD 采集图像的时候也会产生电噪声, 考虑这些噪声对测量结果的影响, 用计算机对光纤连接器表面形貌进行了数值模拟。

基于 Carré 算法的步进相移干涉术中, CCD 探测到的干涉图为:

$$I_i(x, y) = I_a(x, y) \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \left(i - \frac{5}{2} \right) \alpha \right] \right\}. \quad (5)$$

式中, α 为每一步的相移量, $i = 1, 2, 3, 4$ 。

由于在测量过程中, 系统中噪声对干涉图影响不能被忽略, 设由装置振动导致的相位差 $\phi(x, y)$ 随时间的漂移为 $n_M(x, y, t)$, CCD 产生的电噪声为 $n_A(x, y, t)$, 则对式 (5) 进行修正得:

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \left\{ 1 + \gamma \cos \left[\phi(x, y) + \left(i - \frac{5}{2} \right) \alpha + n_M(x, y, t) \right] \right\} + n_A(x, y, t). \quad (6)$$

假设 $n_M(x, y, t)$ 和 $n_A(x, y, t)$ 都遵循均值等于 0 方差分别等于 σ_M^2 、 σ_A^2 的正态分布, 则信噪比 (SNR) 分别为:

$$\text{SNR}_M = 1/2\sigma_M^2, \text{SNR}_A = I_0^2/2\sigma_A^2. \quad (7)$$

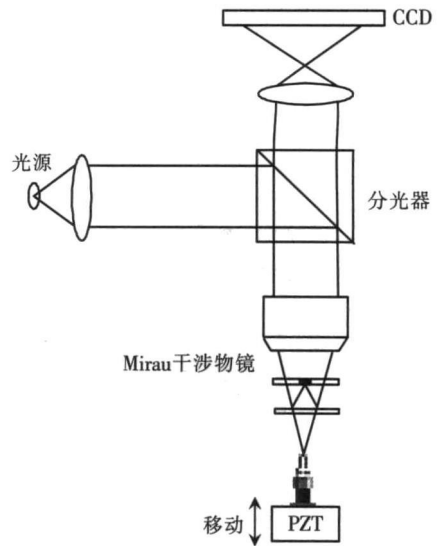


图 2 Mirau 显微干涉仪
Fig.2 Mirau microscopic interferometer

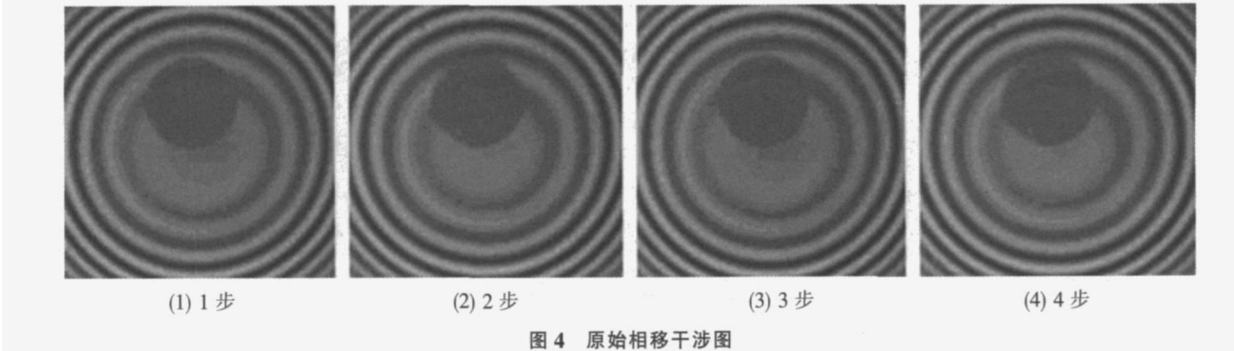
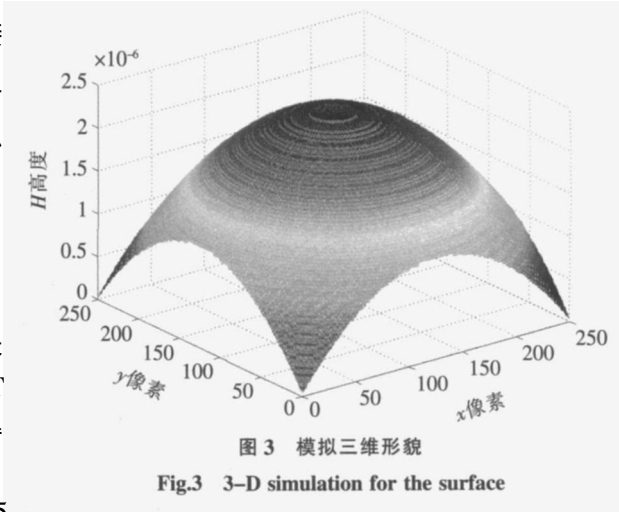
取 $SNR_M = SNR_A = 200$ $\alpha = \frac{2}{5}\pi$, 假设光纤连接器端面曲率半径为 15mm, 对光纤连接器端面对应于 CCD 的 250×250 像素的区域进行测量, 经计算机模拟得到的轮廓图如图 3

3 实验结果

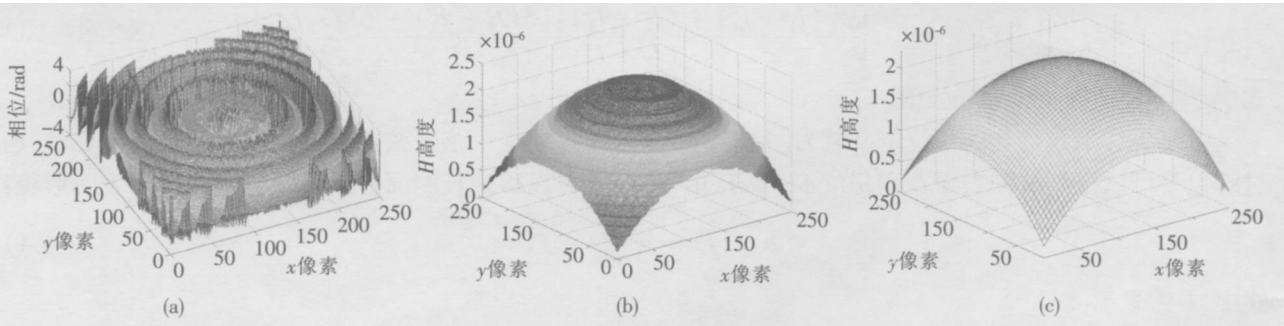
3.1 表面形貌和光纤高度的测量

虽然 Carrié 算法的相移步长是任意的, 但不能是 180° 的整数倍, 理想的相移步长为 110° 左右^[5]. 由 PZT 电压-位移关系可知电压每次增加 2 V, 相移 4 步所得的干涉图如图 4 所示.

对干涉图进行相位提取得到相位包裹图, 如图 5



(a)^[6]所示. 通过解包裹可以得到被测表面真实相位 $\phi(x, y)$, 计算出表面各点的高度信息, 得到表面轮廓图, 如图 5(b)^[7]所示. 从表面轮廓图上选取 2 500 点的坐标通过最小二乘法拟合得到拟合球面如图 5(c)^[8].



由纤芯中心位置处的纤芯端点 $H(x_o, y_o)$ 坐标值和此处对应的拟合球面上点的 $H(x_o, y_o)$ 坐标值, 获得光纤高度值 h 对光纤高度进行多次测量, 得到的平均高度为 53.8 nm.

此测量系统中, 横向分辨率为:

$$\delta = 0.56 \lambda / NA = 0.9 \mu m . \tag{8}$$

式中, $\lambda = 589.3 \text{ nm}$, 数值孔径 $NA = 0.4$

3.2 端面曲率半径和顶点偏移的测量

对于端面的曲率半径的测量, 可以采用牛顿环法, 只需在一幅静态干涉图上进行^[9]:

$$R = \frac{r_{k+m}^2 - r_k^2}{m \lambda} \tag{9}$$

式中, r_{k+m} 和 r_k 分别为第 $k + m$ 级和第 k 级暗环的半径.

如图 6 所示, 取第一幅干涉图来计算表面曲率半径和顶点偏移, 先进行二值化和边缘检测. 从条纹轮廓图中可以检测出各级条纹的圆心、半径和纤芯的圆心, 从而计算出端面曲率半径和顶点偏移. 经过多次测量得到曲率半径平均值为 16.38 mm, 最大误差为 0.33 mm, 顶点偏移平均值为 40.24 μm , 最大误差为 0.97 μm .

3.3 误差分析

在相移过程中, 如果相移器有一个固定的移相误差, 则实际相移为:

$$\delta' = \delta + \varepsilon \quad (10)$$

在 Carré 算法中, 将 (10) 式和 (3) 式结合, 可得:

$$\tan \phi'(x, y) = (1 + \varepsilon^2 / 2) \tan \phi(x, y), \quad (11)$$

则

$$\Delta \phi(x, y) = \phi'(x, y) - \phi(x, y) \approx \frac{\varepsilon^2}{4} \sin 2\phi(x, y). \quad (12)$$

由式 (12) 可以看出, 由移相误差引起的相位探测误差是一个二阶小量, 相移器线性差所引起的相位测量误差是一个周期性误差, 其空间频率是干涉条纹空间频率的两倍, Carré 算法属于等步长算法, 它对线性相移误差具有免疫性.

由此可见, 对于线性误差, Carré 算法不受影响; Carré 算法对于二次非线性误差有很大的抑制作用; 且 Carré 算法无需确知 PZT 灵敏度.

4 结 论

通过一种 Mirau 型显微干涉仪对光纤连接器端面进行了测量, 得到了端面曲率半径、顶点偏移、表面形貌物理量. 系统横向分辨率可达 0.9 μm , 垂向分辨率为 0.58 nm. 多次测量得到的曲率半径平均值为 16.38 mm, 顶点偏移平均值为 40.24 μm . 对光纤高度进行了多次测量, 得平均高度为 53.8 nm, 重复性测量精度为 9.5 nm.

[参考文献] (References)

- [1] Kanayan A K, Ando Y, Nagase R, et al. Advanced physical contact technology for optical connectors [J]. IEEE Photo Technol Lett, 1992, 4(11): 1284-1287.
- [2] Gordon S K, Inq Stanley S C, Chin M. Mirau correlation microscope [J]. Appl Opt, 1990, 29(26): 3775-3783.
- [3] Hariharan P, Oreb B F, Eiju T. Digital phase-shifting interferometry: A simple error compensating phase calculation algorithm [J]. Appl Opt, 1987, 26: 2504-2506.
- [4] Peter de Groot, Xavier Colonna de Lega, Jin Kramer, et al. Determination of fringe order in white-light interference microscopy [J]. Appl Opt, 2002, 41: 4571-4578.
- [5] 钱克矛, 续伯钦, 伍小平. 对相移结束中 Carré 算法的相移步长的讨论 [J]. 实验力学, 2000, 15(2): 188-191.
Qian Kemaq, Xu Boqin, Wu Xiaoping. A discussion on the phase step in Carré algorithm of phase shifting interferometry [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(2): 188-191. (in Chinese)
- [6] Hart M, Vass D G, Begbie M L. Fast surface profiling by spectral analysis of white-light interferograms with Fourier transform spectroscopy [J]. Appl Opt, 1998, 37(10): 1764-1769.
- [7] 李岩, 井文才, 周革, 等. 纳米检测轮廓仪相移干涉图处理 [J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(1): 14-19.
Li Yan, Jing Wencai, Zhou Ge, et al. Phase-shift interferogram processing of the profilometry with nanometer resolution [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(1): 14-19. (in Chinese)
- [8] 路元刚, 王向朝, 钟向红, 等. 光纤连接器端面几何参量自动测量仪 [J]. 光学学报, 2005, 25(3): 341-345.
Lu Yuangang, Wang Xiangzhao, Zhong Xianghong, et al. Interferometer for endface geometry parameter measurement of optical fiber connector [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(3): 341-345. (in Chinese)
- [9] 徐永祥, 陈磊, 朱日宏. 用重叠四步平均算法测量光纤连接器端面的曲率半径 [J]. 光学技术, 2005, 31(3): 360-363.
Xu Yongxiang, Chen Lei, Zhu Rihong. Overlapping averaging 4-frame algorithm on the measurement of the radius of curvature of a fiber optic connector end face [J]. Optical Technique, 2005, 31(3): 360-363. (in Chinese)

[责任编辑: 严海琳]

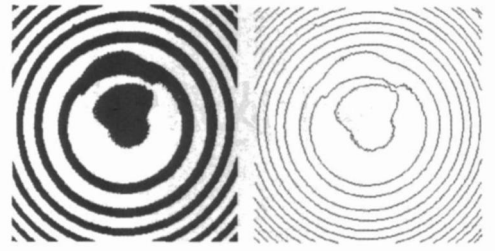


图 6 干涉图二值化和边缘检测

Fig.6 Binarization processing and edge detection of first interferogram