

文章编号 : 0258-7025(2001)03-0242-03

# 用 GRIN 透镜斐索干涉仪检测光纤 端面的质量\*

梁忠诚 明海 孙晓红 吴云霞 谢建平

(中国科技大学物理系 合肥 230026)

**提要** 采用梯度折射率(GRIN)透镜干涉仪,对用加热、切割和研磨三种方法获得的平面光纤端面进行质量检测,得到反映端面不同平整度的干涉图样。实验结果表明,GRIN 透镜干涉仪结构简单,操作方便,可作为定性和定量检测光纤端面质量的一种新工具。

**关键词** 梯度折射率透镜,GRIN 干涉仪,光纤端面,质量检测

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

## Quality Detection of Optical Fiber Face by Using GRIN Lens Interferometer

LIANG Zhong-cheng MING Hai SUN Xiao-hong WU Yun-xia XIE Jian-ping

(Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

**Abstract** A newly developed GRIN lens interferometer was employed to detect the quality of optical fiber faces. This paper introduces the principle of GRIN lens interferometer and exhibits some experimental results, which shows the qualitative discrepancy of fiber faces treated with different methods.

**Key words** GRIN lens, interferometer, optical fiber face, quality detection

### 1 引 言

在科学研究和工程技术实践中经常会遇到微小区域光学表面的检测问题,例如:在微重力环境下研究毛细热对流现象,需要对液桥自由表面形貌进行监测,以确定产生毛细对流的温差阈值<sup>[1]</sup>;在光纤的各种应用中,光纤端面处理和检测是一种最基本的技术,如设计中的大天区多目标光纤光谱望远镜(LAMOST)需采用数千根多模光纤将焦面星光传送到光谱仪,对光纤接收端面质量的检测,则是摄谱仪高性能正常运作的重要保障。上述液桥表面和光纤端面的线性尺寸仅在毫米和亚毫米量级,且要求光学精度的测量。常规的面形干涉仪因体积较大,很难应用于微小区域表面的实时干涉测量;而专门的光纤显微干涉仪也因结构复杂、操作不便,使用受到很大限制。

最近,我们研制了一种斐索型梯度折射率(GRIN)透镜干涉仪,该装置结构简单,操作方便,且具有测量面形、振动和位移多种功能<sup>[2]</sup>。由于 GRIN 透镜具有直径小、数值孔径大、长度可调和探针型特点,使 GRIN 透镜干涉仪可以小型化、便携化,方便地应用于微小区域表面的实时干涉检测。本文通过矩阵光学和物理光学方法,介绍了 GRIN 透镜干涉仪的工作原理;利用我们研制的 ZKD-1 型 GRIN 透镜干涉仪,对光纤端面质量进行检测实验,给出了采用加热、切割和研磨三种不同方法<sup>[3]</sup>所获得的平面光纤端面干涉条纹图和定性分析结果。

### 2 检测原理

GRIN 透镜干涉仪对光纤端面的检测原理可以通过图 1 所示的光路来说明。图中  $m_1, m_2$  为 GRIN 透镜的两个平行端面, $m_3$  为待测的光纤端面。激光束通过分束镜 BS 反射后,平行于光轴方向进入 GRIN 透镜。入射光束部分被  $m_2$  面反射作为参考光波,透射光则投向待测面  $m_3$ ,并由  $m_3$  反射回来作为测试光。两束光再次经过 GRIN 透镜、分束镜 BS

\* 航天 863-2 项目和江苏省重点光电技术实验室开放基金资助项目。

收稿日期:1999-11-01;收到修改稿日期:1999-12-27

后,在屏  $S$  处会合形成干涉条纹。

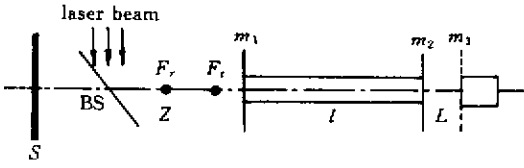


图 1 GRIN 透镜干涉仪工作原理图

Fig.1 Schematic diagram showing the principle of GRIN lens interferometer

GRIN 透镜径向折射率分布可表示为

$$n(r) = n_0 \left( 1 - \frac{1}{2} a^2 r^2 \right) \quad (1)$$

式中  $r$  为离轴线距离,  $n_0$  为轴线上光折射率,  $a$  为 GRIN 透镜参数,  $a$  与拍长  $Z_0$  的关系为  $Z_0 = 2\pi/a$ 。以 GRIN 透镜轴线为  $z$  轴, 设 GRIN 透镜长度为  $l$ ,  $m_2$  与  $m_3$  之间的距离为  $L$ ,  $m_3$  为理想平面光纤端面, 则各单元光线矩阵为<sup>[4]</sup>

$$M_{21} = \begin{pmatrix} \cos al & \frac{1}{an_0} \sin al \\ -an_0 \sin al & \cos al \end{pmatrix}$$

$$M_{32} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $M_{ji}$  表示光线从  $m_i$  到  $m_j$  的透射矩阵,  $M_i$  表示  $m_i$  面的反射矩阵。对于  $m_i$  到  $m_j$  面对称分布的介质而言,  $M_{ji} = M_{ij}$ 。  $m_1$  面的右侧构成折反系统, 以  $m_1$  面为第一和第二参考面, 参考光的传递矩阵为

$$M_r = M_{12} \cdot M_2 \cdot M_{21} = \begin{pmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

测试光的传递矩阵为

$$M_t = M_{12} \cdot M_{23} \cdot M_3 \cdot M_{32} \cdot M_{21} = \begin{pmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{pmatrix} \quad (4)$$

若参考光与测试光第二焦点  $F_r$  和  $F_l$  距参考面距离分别为  $Z_r$  和  $Z_l$ , 则  $F_r$  与  $F_l$  间距为

$$\delta(l, L) = Z_l - Z_r = \frac{A_r}{C_r} - \frac{A_t}{C_t} \quad (5)$$

当平行光入射 GRIN 透镜时, 出射的参考光和测试光分别是顶点在  $F_r$  与  $F_l$  的球面光锥, 两光束在距  $m_1$  为  $Z$  的屏  $S$  上任一点的复振幅为

$$U_r = \frac{U_{r0}}{Z - Z_r} \exp(jkS_r)$$

$$U_t = \frac{U_{t0}}{Z - Z_l} \exp(jkS_t)$$

$$S_r = \frac{\rho^2}{2(Z - Z_r)} + (Z - Z_r) + S_{r0}$$

$$S_t = \frac{\rho^2}{2(Z - Z_l)} + (Z - Z_l) + S_{t0} \quad (6)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为波长,  $\rho$  为屏上观察点到光轴的距离,  $S_{r0}$  和  $S_{t0}$  分别对应  $F_r$  和  $F_l$  两点固定光程差。观察点的亮条纹满足条件

$$S_t - S_r = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (7)$$

记

$$\sigma^2 = 2(Z - Z_l)(Z - Z_r), \quad \delta_0 = S_{t0} - S_{r0} \quad (8)$$

则亮条纹条件可表示为

$$\rho^2 = \sigma^2 (1 + \delta_0/\delta + m\lambda/\delta) \quad (9)$$

可见光纤端面的干涉图样为一系列同心圆环。

干涉仪系统特性可由相邻两圆环半径平方差  $\lambda\beta$  表征, 其中

$$\beta(l, L, Z) = \frac{\sigma^2}{\delta} = \frac{(A_r + ZC_r)(A_t + ZC_t)}{A_t C_r - A_r C_t} \quad (10)$$

### 3 实验装置

ZKD-1 型 GRIN 透镜干涉仪结构如图 2 所示。装置中增加的一个分光镜  $BS_2$  用于将干涉光束分成两路: 透射光在屏  $S$  上形成的干涉条纹由 CCD 接收, 送入微机 PC 进行处理; 反射光路中设置光电探测器 PD, 检测干涉场中固定点的光强变化, 可同时得到物面  $m_3$  的振动信息。GRIN 透镜、分光镜、观察屏、激光器、光电探测器和 CCD 摄像机均置于可调平台上, 由微机控制实现三维调节。

仪器采用的光源为 LD 抽运的小型 Nd:YVO<sub>4</sub>, LBO 固体倍频激光器(CASIX 公司), 其单纵模连续输出波长为 532 nm。  $BS_1, BS_2$  均是楔角为 3° 的楔形分束器, 分束器的一个平面蒸镀 Au 半透膜, 反射率为 50%。三维调节台由步进电机驱动, 每一维最大

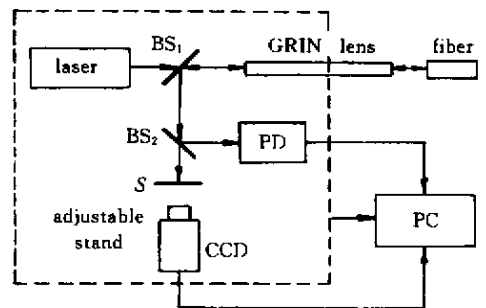


图 2 GRIN 透镜干涉仪结构

Fig.2 Structure of GRIN lens interferometer

行程为 100 mm, 步进精度为 2.1 m/步, 经接口电路由计算机控制。

采用日本 Nippon Sheet Glass 公司制造的复合 GRIN 透镜, 它包括一根长 GRIN 棒 (拍长  $Z_{01} = 140.7$  mm, 长度  $Z_1 = 1.00Z_{01}$ , 轴线折射率  $n_{01} = 1.61$ ), 一根短 GRIN 棒 ( $Z_{02} = 37.36$  mm,  $Z_2 = Z_{02}/4$ ,  $n_{02} = 1.61$ ) 和一平行玻璃板 (厚度  $Z_3 = 1.35$  mm, 折射率  $n_{03} = 1.62$ )。三者直径均为 2.7 mm, 胶合后形成完整的复合元件, 对应的单元光线透射矩阵分别为

$$M_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_{02} = \begin{pmatrix} 0 & 1/a_2 n_{02} \\ -a_2 n_{02} & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{03} = \begin{pmatrix} 1 & Z_3/n_{03} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

故复合 GRIN 透镜的等效透射矩阵为

$$M_{21} = M_{03} \cdot M_{02} \cdot M_{01} = \begin{pmatrix} -0.2256 & 3.693 \\ -0.2708 & 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{12} = M_{01} \cdot M_{02} \cdot M_{03} = \begin{pmatrix} 0 & 3.693 \\ -0.2708 & -0.2256 \end{pmatrix} \quad (11)$$

仪器中 GRIN 透镜  $m_1$  面到观察屏的距离固定为  $Z = 200$  mm,  $m_2$  面到待测面  $m_3$  的距离  $L$  可根据测量要求进行调节。根据 (3) (4) 及 (10) 式, 可得干涉仪的系统特征参数为  $\beta = (3745 + 4688L)/L$ 。

## 4 实验结果

实验采用北京玻璃研究所提供的多模玻璃光纤。检测前首先将光纤固定于微调节架上, 使其一端与 GRIN 透镜  $m_2$  端面接近。然后调节俯仰角度, 当光纤端面与 GRIN 透镜端面相互平行时, 在屏  $S$  处可观察到同心环状干涉条纹。我们使用 GRIN 透镜干涉仪检测了不同外径和不同处理方式得到的平面光纤端面, 图 3 给出的是外径  $500 \mu\text{m}$  的玻璃光纤端面干涉图例。图 3 (a) (b) 和 (c) 分别是采用加热法、切割法和研磨法得到的光纤端面干涉条纹。

与 (b) (c) 图相比 (a) 图的条纹没有圆对称性, 说明加热法得到的光纤端面很不平整, 类双曲线

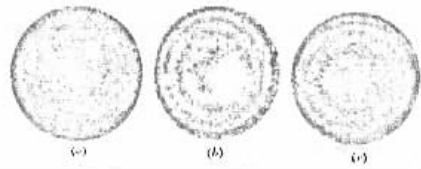


图 3 不同制备法获得的光纤端面干涉条纹图

(a) 加热法 (b) 切割法 (c) 研磨法

Fig. 3 Fringe patterns of fiber faces obtained by means of heating (a), cutting (b) and grinding (c)

条纹分布则与表面尖劈形貌有关。与 (c) 图相比, (a) (b) 图的条纹对比度不高, 且有较大的散斑噪声, 说明未经研磨处理的光纤端面粗糙度较大。干涉条纹 (c) 不仅圆对称性好, 而且对比度大, 散斑噪声小。通过亮条纹和暗条纹灰度平均值可求出对应图 3 各干涉图的条纹可见度  $V_a$ ,  $V_b$  和  $V_c$ , 其相对值为  $V_a/V_c = 0.362$ ,  $V_b/V_c = 0.847$ , 表明研磨端面平整光滑, 质量最高。对干涉条纹的进一步定量分析, 还可以给出光纤端面的形貌以及平整度参数。

## 5 结 论

GRIN 透镜斐索干涉仪结构简单、操作方便, 为光纤端面等微小区域表面的质量检测提供了新的工具。对平面光纤端面的定性和定量分析表明, 不同处理方法得到的光纤端面质量以研磨法最好, 切割法次之, 加热法最差。通过对干涉条纹对称性、对比度和散斑噪声的特征分析, 还可以得到光纤端面平整度等定量结果。在 GRIN 透镜干涉仪中, GRIN 透镜既作为传光介质, 又起透镜聚焦作用, 具有不同于普通透镜的新特点, 给干涉仪设计带来更大的灵活性。

### 参 考 文 献

- 1 J. Z. Shu, H. Ming, X. H. Sun *et al.*. A GRIN Fizeau interferometer for the measurement of deformation and oscillation of free surface. *Proc. 8th International Symposium on Flow Visualization*, Italy, 1998. 91.1 ~ 91.5
- 2 H. Ming, X. H. Sun, M. Bai *et al.*. Measurement for both vibration and deformation of micro-surface by Fizeau interferometer of composite self-focus rod sensor. *SPIE*, 1998, **3555**: 169 ~ 173
- 3 D. M. Liu, Q. Xiang, D. X. Huang. *Techniques and Applications of Optical Fiber*. Chengdu: The Publishing House of Electronics Technology University, 1994. 42 (in Chinese)
- 4 M. Yi. *Modern Geometrical Optics*. Nanjing: The Publishing House of Nanjing University, 1986. 88, 93 (in Chinese)