

# 光纤折射率剖面的折射近场法测量的研究

殷爱娥 姜仲玄 张一龙  
(上海科技大学光纤技术与现代通讯研究所)

## 提 要

本文叙述了折射近场法(简称 RNF)测量光纤折射率剖面的基本原理及实验方法。提供了对单模光纤和多模光纤的测量结果,并与反射法、近场法进行了比较。实验中获得空间分辨率优于  $0.8\mu\text{m}$ , 折射率灵敏度优于  $2 \times 10^{-4}$ 。

关键词: 光纤, 折射率剖面, 折射近场法。

## 一、引 言

光纤折射率剖面是光纤的一个重要参数,它决定了光纤的光学特性,并可进一步确定光纤的传输特性。

光纤折射率剖面的测量,目前已有很多方法。折射近场法是“OCITT”\* 规定的光纤剖面测量的基本方法。它不象干涉法需要对样品进行特殊准备,不象近场法要对漏模进行修正,也不象聚焦法有繁杂的数据处理。国外专家认为 RNF 测量光纤折射率剖面,其分辨率和精度是其他方法无可比拟的。但是结构复杂,技术难度大,国内至今还未见报道。

## 二、原理和实验

图 1 是折射近场法的图解。一束比光纤数值孔径大的会聚光束射到浸在匹配液里的光纤端面上,它将在光纤里激励出导模、漏模和折射模。导模和一部分漏模在光纤里传输,其余部分则从侧面逸出,其中包括全部折射模和另一部分漏模。一条射入匹配液盒进入光纤,又从光纤包层折出离开匹配液盒的光线,其输入角  $\theta_i$ 、输出角  $\theta_o$ 、入射处光纤折射率  $n(r)$ 、匹配液折射率  $n_o$  间有如下关系<sup>[1]</sup>:

$$\sin^2 \theta_i - \sin^2 \theta_o = n^2(r) - n_o^2 \quad (1)$$

根据任意折射率分布的光纤的漏模传播常数的特点<sup>[2]</sup>可以得出激发漏模的入射角有一个范围,于是可以设计挡板,

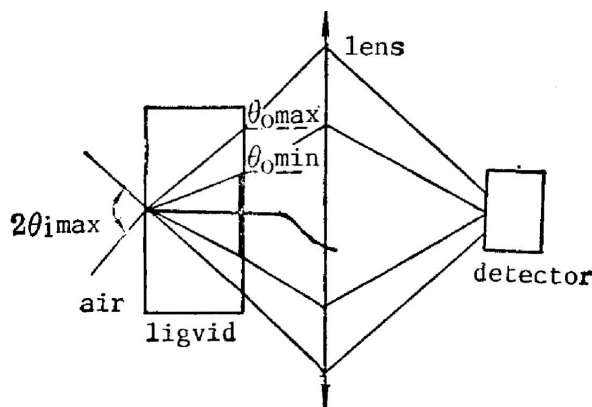


Fig. 1 The diagram of refracted near-field technique

收稿日期: 1987年10月26日; 收到修改稿日期: 1988年1月25日

\* “OCITT” 为国际电话电报通讯咨询委员会。

挡住所有从匹配液盒射出的漏模光线, 这个挡板所对应的最小角度<sup>[1]</sup>为:

$$\sin^2 \theta_{0 \min} = [n_c^2 - n^2(a)] + \frac{\alpha}{2} N^2, \quad (2)$$

式中  $N$  是光纤的轴向数值孔径,  $\alpha$  是剖面形状参数。

从匹配液盒出射的光束, 经过挡板后, 成为一个空心光锥, 其中只含折射模光线。在朗伯光源的条件下, 该空心光锥的功率  $P(r)$  遵从朗伯定律<sup>[3]</sup>:

$$P(r) = \pi I_0 (\sin \theta_{0 \max} - \sin^2 \theta_{0 \min}), \quad (3)$$

式中  $I_0$  为光源辐射强度,  $\theta_{0 \max}$ 、 $\theta_{0 \min}$  分别为输出空心光锥的外半锥角及内半锥角。输出空心光锥在光学上等效于输出空心光锥, (3)式又可改写为:

$$P(r) = \pi I_0 [(\sin^2 \theta_{0 \max} - \sin^2 \theta_{0 \min}) - (n^2(r) - n_c^2)]. \quad (4)$$

分别对会聚光束射到光纤芯层、包层、光纤外匹配油中进行分析, 得到:

$$n^2(r) - n^2(a) = \frac{1}{\pi I_0} [P(a) - P(r)]. \quad (5)$$

令  $\Delta n(r) = n(r) - n(a)$ ,

$$\Delta n(r) \approx \frac{1}{2n(a)\pi I_0} [P(a) - P(r)]. \quad (6)$$

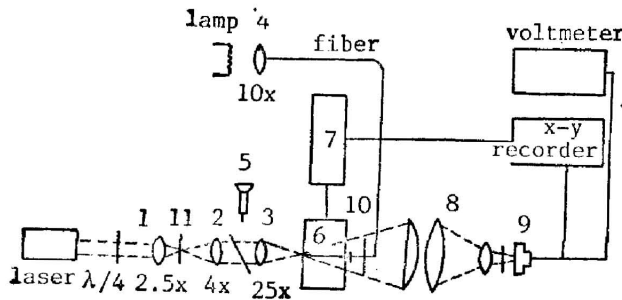


Fig. 2 Apparatus used for the RNF

(1), (2), (3), (4) microscope objective. (5) microscope. (6) liquid cell. (7) electronic micrometer. (8) a group of condensing lens. (9) detector. (10) disk. (11) screen with  $50 \mu\text{m}$  pinhole

使图 1 中的会聚点沿光纤端面的直径扫描, 在挡板后面探测空心光锥的功率分布, 由于它与光纤折射率分布成比例通过定标, 即可直接得到折射率剖面。

图 2 是实验装置。在实验中, 我们选用了低功率、高稳定、线偏振输出的氦氖激光器作为光源, 工作波长为  $0.633 \mu\text{m}$ 。输出光束首先通过  $\lambda/4$  片, 线偏振光变为圆偏振光, 减少偏振对界面反射率的影响; 然后通过  $2.5 \times$  物镜、 $50 \mu\text{m}$  小孔、 $4 \times$  物镜组成的滤波器,

滤去光束中高阶模并予以扩束, 在  $25 \times$  物镜前形成一个近似均匀的光强分布; 最后由会聚物镜将光束会聚在光纤的输入端面上。光纤的输入端安放在匹配油盒内。从匹配油盒出射的光线经挡板由一组透镜会聚到带有滤色片的探测器上。光纤的另一端注入白光, 它与扫描点在盒窗口的反射一起进入观察显微镜, 以监视扫描点在端面的位置。匹配液盒用马达驱动, 可高精度沿垂直光轴的水平方向移动, 由电子微米计记录位移量。光功率信号与微位移信号同时送到 X-Y 记录仪, 画出剖面曲线。数字电压表显示与光功率成比例的电压数, 作定标用。以上一系列透镜均调整在同一光轴上, 并处在象差最小的工作状态。

实验中, 我们由 (2) 式估计挡板所对应的角度  $\theta_{0 \min} \approx 14^\circ$ , 但是挡板的存在使得输入光束相当于一个具有环状孔径的会聚光束, 会聚点的光强分布由环孔衍射决定。Stewart 指出当挡板的数值孔径是会镜物镜数值孔径的  $1/\sqrt{2}$  时, 分辨率为最佳。由  $25 \times$  物镜的数值孔径是 0.4, 我们最后制作的挡板所对应的角度约为  $16^\circ$ 。

为了保证原理成立,我们校验了注入光纤的实际光源其辐射符合朗伯定律。(2)式可改写成:

$$\sin^2\theta = \frac{1}{\pi I_0} [P_0 - P(\theta)]. \quad (7)$$

$P_0$  为半锥角为  $\theta_{\max}$  的实心光锥功率,  $P(\theta)$  为半锥角在  $\theta_{\max} \sim \theta$  间的空心光锥的功率。改变本实验系统中的内锥角,测得  $\sin^2(\theta) \sim P(\theta)$  为一直线,相关系数达到 0.99995。

定标的方法已有多种报道,我们采用确定轴向折射率差的方法。由(6)式,当扫描点位于芯层中央  $r=0$  时,有

$$2n_a \Delta n = \frac{1}{\pi I_0} [P(a) - P(0)]. \quad (8)$$

比较(7)、(8)两式,左边系数  $\frac{1}{\pi I_0}$  相同,即为校正过程中得到的  $\sin^2\theta - P(\theta)$  拟合直线斜率,用最小二乘法可求得。因此记下扫描点处于芯层中央、包层所接收的光功率从(8)式可定出芯-包层折射率差,作为剖面图上折射率轴的定标。

### 三、实验结果

图 3 是我们对梯度型多模光纤 A 的剖面测试,图 4 是该剖面图的中央区放大。图中可以清楚地看到芯区、沉积包层和外包层。剖面中由 MOVD 工艺过程形成的中央凹陷极为明显,并可计算出此凹陷的半最大全宽度为  $2.4 \mu\text{m}$ 。中央两侧附近有明显的波纹,且左右对称。我们曾在一年多时间里反复测试过多根多模光纤,对同一根又在不同位置测试,尽管工作条件、端面处理、端面位置各异,但这种有规律的波纹均清晰可辨。因此,这种波纹被认为是由于 MOVD 过程形成的折射率有微小差别的层结构。图 4 中折射率涨落的最小幅度  $\sim 1.7 \times 10^{-4}$ ,我们取该值为折射率灵敏度。实验的空间分辨率定义为光点越过包层、液体界面时 20%~80% 光强点之间的横向距离。图 3 中分辨率为  $0.78 \mu\text{m}$ 。我们曾得到  $0.5 \mu\text{m}$  的最佳值。

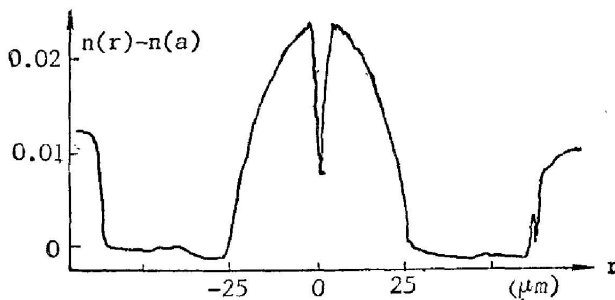


Fig. 3 The profile of multi-mode fiber A measured by the RNF system

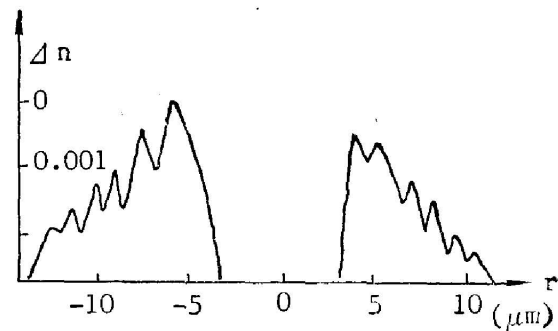


Fig. 4 The amplified core area of the multi-mode fiber A

图 5 是多模光纤 B 的折射率剖面。分别由日本安立公司反射法测试仪测试(图 5(a))和本 RNF 系统测试(图 5(b))。比较两个剖面图显然 5(b) 的层次结构清晰,分辨率高,灵敏度高。

图 6 是多模光纤 C 的折射率剖面。分别由近场法图 6(a) 和本 RNF 系统定性测试这一对剖面也说明 RNF 的优点。

图 7 是单模光纤 GEC 的折射率剖面。图 7(a) 是英国 YORK 公司的 RNF 仪器在英国测试结果。图 7(b) 是本 RNF 系统的测试。测试数据接近, 分辨率、灵敏度性能也很相近。

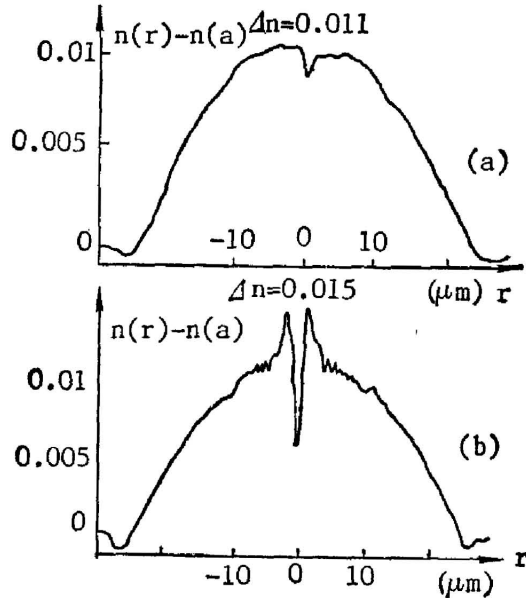


Fig. 5 The profile of multi-mode fiber B  
(a) by reflection technique, (b) by the RNF technique

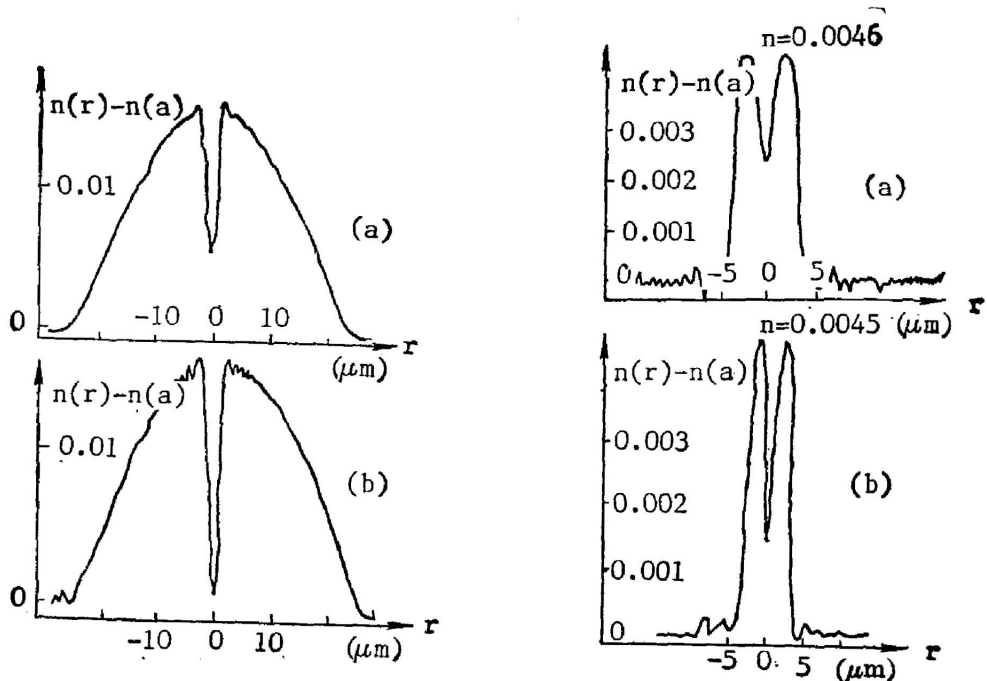


Fig. 6 The profile of multi-mode fiber C  
(a) by near-field technique;  
(b) by the RNF technique

Fig. 7 The profile of mono-mode fiber GEC  
(a) by FOM-1000 (YORK Company);  
(b) by the RNF technique

## 五、结 论

我们完成的 RNF 测量系统对单模光纤、多模光纤多次测量结果表明,它与国外同类产品性能相近,比反射法近场法明显优越。

本系统除了作出光纤折射率剖面图,还可确定光纤的数值孔径、芯-包层折射率差,光纤外径、芯径及光纤的不对称性。

由于我们精密加工的条件不足,稳定度仅限于芯区,测量精度也因此受影响。现有的技术指标与国外实验室指标尚有差距。本系统的完成说明我们掌握解决了 RNF 技术关键,有条件达到国际水平。

研究过程中得到汪道刚、杜锡畴同志大力帮助,深表感谢。

## 参 考 文 献

- [1] K. I. White; *Opt. Quant. Elect.*, 1979, 11, No. 2 (Mar), 185.
- [2] M. J. Adams, D. N. Payne *et al.*; *Elect. Lett.*, 1975, 11, No. 11 (May), 238.
- [3] D. Marcuse; *«Principles of Optical Fiber Measurements»*, (Academic Press, INC. London LTD. U. K., 1981), 132.

## Refracted near-field technique for the measurement of optical fiber refractive index profiles

YIN AIE, JIANG ZHONGXUAN AND ZHANG YILONG

(The Institute of Optical Technique and Modern Communication,  
Shanghai University of Science and Technology)

(Received 26 October 1987; revised 25 January 1988)

## Abstract

The basic principle and experimental method of refracted near-field technique for the measurement of optical fiber refractive index profiles are described. The measured results for multimode and mono-mode fiber profiles are provided and compared with that by reflection technique and near-field technique. The spatial resolution better than  $0.8\mu\text{m}$ , and refractive index sensitivity better than  $2 \times 10^{-4}$  are obtained in the experiment.

**Key words:** optical fiber; refractive index profile; refracted near-field technique.