

# 单模光纤 ESI 参数测量的一种简易方法

张一龙 王子华 陈振宜  
(上海科学技术大学)

## 提 要

本文叙述了单模光纤等效阶跃折射率(ESI)参数测量的一种简便方法及其原理。ESI参数是通过测量某一波长下的模斑和截止波长或二个波长下的模斑得到的。文中给出了实验测量的典型结果。

## 一、引 言

阶跃折射率分布单模光纤实际制造时, 折射率分布总是与理想阶跃存在着某些偏离。Matsumura 等<sup>[1]</sup>根据任意折射率分布的单模光纤中的场与某一阶跃折射率分布的场相等, 则可用一等效阶跃折射率分布来描述该单模光纤, 而这种等效阶跃折射率分布的单模光纤与该任意折射率分布的单模光纤具有相同的传输特性。如果能测得单模光纤的等效阶跃折射率(ESI)参数, 如: 模斑  $W_0$ 、纤芯半径  $a_0$ 、归一化频率  $V_0$  及相对折射率差  $\Delta_0$ , 那末, 不需要知道单模光纤的确切折射率剖面就可求得单模光纤的传输特性。

关于 ESI 参数的测量已经发展了几种方法, 如测量谱模斑法<sup>[2]</sup>, 可变数值孔径法<sup>[3]</sup>, 连接损耗法<sup>[4]</sup>等。本文提出一种 ESI 参数测量的方法, 与其它方法比较, 具有简便和设备简单的优点。

## 二、原 理

### 1. 高斯场与模斑

单模光纤端面辐射为高斯场, 设端面处模斑为  $W_0$ , 离开端面  $z$  处的模斑为  $W(z)$ , 则有<sup>[5]</sup>

$$W^2(z) = W_0^2 + \left( \frac{2z}{k_0 W_0} \right)^2, \quad (1)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为自由空间波数,  $\lambda$  为工作波长。当  $z$  很大, 即在远场辐射区, 有

$$X(z) \cong \frac{2z}{k_0 W_0}. \quad (2)$$

(2)式表明: 如果测得  $z$  处的模斑  $W(z)$ , 则单模光纤的基模模斑为

$$W_0 = \frac{\lambda z}{\pi W(z)}. \quad (3)$$

(3)式也可由远辐射求得。

单模光纤端面开口处场的高斯波束表示为<sup>[6]</sup>

$$E_y = \left[ \frac{4\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} P}{\pi n_2 W^2} \right]^{\frac{1}{2}} e^{-\left(\frac{r^2}{W^2}\right)} e^{-i\beta z}, \quad (4)$$

式中  $W$  为场模斑,  $\beta$  为传播常数,  $P$  为传输功率,  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空中的介电常数和磁导率,  $n_2$  为包层折射率。圆孔径 Fraunhofer 衍射公式为

$$F(\theta) = 2\pi \int_0^\infty E_y(r) J_0(k_0 \sin \theta r) r dr, \quad (5)$$

式中  $\theta$  为辐射角,  $J_0$  为零阶贝塞尔函数。将(4)式代入(5)式, 得到归一化远场光强分布

$$\frac{I(\theta)}{I(0)} = \exp\left(-\frac{W^2 k_0^2 \sin^2 \theta}{2}\right), \quad (6)$$

当  $\theta = \theta'$  时, 光强降为  $e^{-1}$ , 得到功率模斑为

$$W' = \frac{\sqrt{2}}{k_0 \sin \theta'}, \quad (7)$$

考虑到单模光纤  $\theta'$  很小以及场模斑等于  $\sqrt{2}$  倍功率模斑, (7)式与(3)式的结果一致。这正是高斯场的特点决定的。

### 2. 模斑与 ESI 参数

若实验中测得波长为  $\lambda$  时, 等效阶跃单模光纤的模斑  $W_s$ , 以及该单模光纤的截止波长  $\lambda_c$ , 则可由 Marcuse 公式<sup>[6]</sup>求得 ESI 参数:

$$V_s = \frac{2.405\lambda_c}{\lambda}, \quad (8)$$

$$a_s = W_s \sqrt{2} [0.65 + 1.619V_s^{-1.5} + 2.879V_s^{-6}]^{-1}, \quad (9)$$

$$d_s = \frac{\lambda^2 V_s^2}{8\pi^2 a_s^2 n_2^2}, \quad (10)$$

式中  $n_2$  为纤芯折射率。

若在单模工作区域中, 测得两个工作波长  $\lambda_1, \lambda_2$  处的模斑分别为  $W_{s1}$  和  $W_{s2}$ , 可类似于文献[2]中的假定, 由(9)式得到

$$\frac{W_{s1}}{W_{s2}} = \frac{0.65 + 1.619V_{s1}^{-1.5} + 2.879V_{s1}^{-6}}{0.65 + 1.619\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} V_{s1}\right)^{-1.5} + 2.879\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} V_{s1}\right)^{-6}}, \quad (11)$$

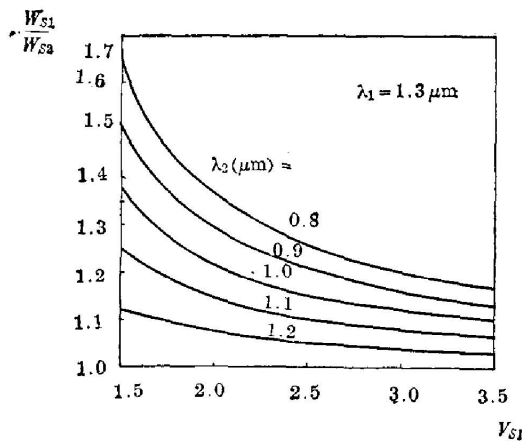


图1  $W_{s1}/W_{s2}$  与  $V_{s1}$  的关系  
Fig. 1  $W_{s1}/W_{s2}$  vs.  $V_{s1}$

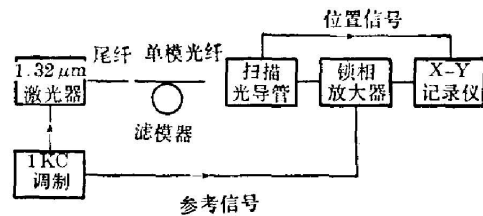


图2 实验装置  
Fig. 2 Experimental set up

式中  $V_{s1}$  为  $\lambda_1$  时的等效归一化频率。(11)式说明:  $W_{s1}/W_{s2}$  是  $V_{s1}$  的单值函数, 由两个波长的模斑之比可确定  $V_{s1}$  (或  $V_{s2}$ ,  $V_{s2}$  为  $\lambda_2$  时的等效归一化频率)。  $\lambda_1=1.3\mu\text{m}$ ,  $\lambda_2$  为不同值时的  $W_{s1}/W_{s2}$  和  $V_{s1}$  的关系示于图 1。由(9)、(10)式可得到  $a_s$  与  $\Delta_s$ 。

### 三、测量与结果

#### 1. 由模斑、截止波长测量 ESI 参数

根据上节所述原理, 在  $1.3\mu\text{m}$  波长处, 测量了单模光纤的模斑。实验装置如图 2 所示。模斑大小由自动光导管扫描系统在单模光纤的远场辐射区测量。位置信号经 160 倍放大, 可提高测量精度。

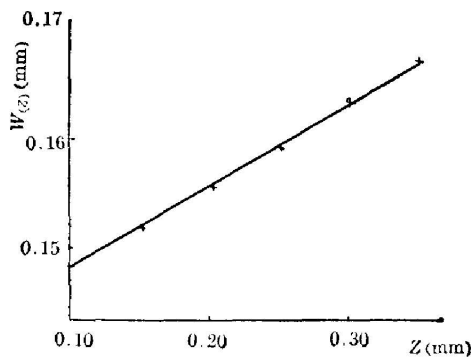


图 3  $W(z)$  与  $Z$  的关系“+”为测量值  
Fig. 3  $W(z)$  vs.  $Z$  “+” measured value

(3)式提供了一个非常重要的信息, 即在远场区域, 高斯场模斑随距离线性增加。若以  $Z$  为横坐标,  $W$  为纵坐标,  $W_0$  也可以由直线的斜率求得, 即  $W_0 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{1}{\Delta W(z)/\Delta z}$ 。实验证实了以上结论, 测量结果如图 3 所示。这一点对于实际测量工作具有重要的意义, 因为光纤端面离开光导管的位置很难测准, 因此, 避开  $z$  的测量, 以  $\Delta z$  代之得到模斑值, 既简便又准确。

单模光纤的  $\lambda_c$  由弯曲附加损耗法测得。ESI 参数的典型测量结果列于表 1。同一光纤采用远场法<sup>[7]</sup>进行了参数测量, 所得结果如下:  $V_s=2.20$ ,  $a_s=4.89\mu\text{m}$ ,  $\Delta_s=2.10 \times 10^{-3}$ , 所得结果基本一致, 误差为 5%。

表 1 ESI 参数测量的典型结果

Table 1 Typical results of the measurement on ESI parameter  
(from  $W_s$  and  $\lambda_c$ ,  $\lambda=1.3\mu\text{m}$ )

光纤编号	6*
模斑 $W_s$	$3.83\mu\text{m}$
归一化频率 $V_s$	2.30
纤芯半径 $a_s$	$4.80\mu\text{m}$
相对折射率差 $\Delta_s$	$2.22 \times 10^{-3}$

#### 2. 由两个波长下的模斑确定 ESI 参数

采用波长为  $1.15\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光器进行另一波长下模斑的测量。

Snyder 指出<sup>[8]</sup>: 实际光纤中, 由于存在缺陷, 使高阶模辐射损耗增加, 因此,  $V$  值稍大也仍能单模工作。如阶跃光纤  $V \leq 3$  即可。另一方面, 实验中采取滤除高阶模的措施, 使  $1.3\mu\text{m}$  的单模光纤在以上两个波长上实现单模辐射。ESI 参数测量的典型结果列于表 2。

表 2 ESI 参数测量的典型结果

Table 2 Typical results of the measurements on ESI parameter  
(from  $W_{s1}$  and  $W_{s1}/W_{s2}$ )

光纤编号	9#
模斑 $W_{s1}$	3.48 $\mu\text{m}$
模斑 $W_{s2}$	3.11 $\mu\text{m}$
归一化频率 $V_{s1}$	1.93
纤芯半径 $a_s$	3.76 $\mu\text{m}$
相对折射率差 $\Delta_s$	$2.71 \times 10^{-3}$

#### 四、结 论

单模光纤端面为高斯场, 根据该场在自由空间中的传播规律, 找到了一种确定模斑尺寸的方法, 从而由确定波长下的模斑和截止波长, 或由两个波长下的模斑测量得到单模光纤的 ESI 参数。作者所提出的方法, 测量原理与装置简单, 测试结果不需进行复杂的计算, 并给出了实验测量的典型结果。

本文是在黄宏嘉教授指导下完成的。工作中得到周幼威老师的帮助, 向他们表示深切的谢意。

#### 参 考 文 献

- [1] H. Matsumura *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 18 (Sep), 3151.
- [2] C. A. Millar; *Elec Lett.*, 1981, **17**, No. 13 (Jun), 458.
- [3] F. Alard *et al.*; *Elec. Lett.*, 1981, **17**, No. 25 (Dec), 958.
- [4] R. Yamauchi *et al.*; *Elec. Lett.*, 1982, **18**, No. 13 (Jun), 550.
- [5] J. A. Arnaud; *Beam and Fiber Optics*, Academic Press, 1976, **60**.
- [6] D. Marcuse; *B. S. T. J.*, 1977, **56**, No. 5 (May-Jun), 703.
- [7] 张一龙等; 《通信学报》, 1983, **4**, No. 4 (Oct), 91.
- [8] A. W. Snyder; *Proc. IEEE*, 1981, **69**, No. 1 (Jan), 6.

## Measurement of ESI parameters for single mode fiber

ZHANG YILONG WANG ZIHUA AND CHEN ZHENYI

*(Shanghai University of Science and Technology)*

(Received 23 April 1984; revised 11 June 1984)

### Abstract

A simple method for measuring equivalent step index (ESI) parameters of the single mode fiber is presented. ESI parameters are obtained by measuring spot size at certain wavelength and cut-off wavelength; and by measuring spot sized at two different wavelengths. The theory and method of measurement are described and the typical experiment results are given.