

等效可变孔径远场法测量 单模光纤模场半径

白 爱 民

(武汉邮电科学研究院)

提 要

本文提出等效远场的可变孔径方法,由测量光纤远场累积分布求得模场半径。并且利用 Petermann 关于模场半径的新定义,推出了一种对非高斯模场分布也适用的求模场半径的方法。实验表明,这种测量方法简便可靠,在不同的制备端面下,重复测量的标准误差小于 $0.04 \mu\text{m}$ 。

关键词: 等效可变孔径,单模光纤。

一、引 言

单模光纤模场半径是表征光纤特性的重要参数,对模场半径的测量是确定单模光纤的连接损耗、微弯损耗、截止波长、ESI 参数、后向散射特性和预测模色散的有效手段^[1,2]。目前,有关的定义和测量技术很多^[2],其中常用的一种技术是可变孔径远场法(VAFF)^[3],它用二维取样的简化扫描处理,提高了测量的光学效率,避免了通常一维取样所要求的高精度扫描装置和高质量的制备端面。为了在光纤远场获得孔径可变的圆孔,常用的方法是在一个圆盘上开有限数目的、不同孔径的圆孔。但是,有限的圆孔对采集光纤输出的总功率不利。

本文提出的用固定孔径圆孔沿光纤辐射远场轴向位移以等效远场可变孔径的方法(EVAFF),克服上述缺点,连续地测出光纤远场的累积分布,从而提高了数值计算的精度。同时,圆孔可以任意地接近光纤输出端面,保证了对光纤输出总功率的采集。

二、原 理

如图 1 所示,在光纤辐射远场,固定孔径圆孔在位置 z_1 、 z_2 处所通过的光功率与在一固定位置 z_L 处,圆孔半径分别为 R_1 、 R_2 时通过的光功率是相等的。因此,圆孔与光纤端面的距离 z 的变化,可以等效转换为在 z_L 处圆孔半径 R 的变化。

通常的单模光纤,纤芯中的场和辐射远场分布能以高斯函数进行良好地近似^[4],对这种模场分布近似为高斯函数的情况,可以采用高斯函数拟合实测远场分布的办法求出模场半径。由文献 [3] 可知

$$-\ln\left[1 - \frac{P(z)}{P_{\max}}\right] = m(R/z)^2, \quad (1)$$

式中 $P(z)$ 表示半径为 R 的圆孔在 z 处所通过的光功率; $P_{\max} = P(\pi/2)$ 是光纤辐射出的总功率; $\operatorname{tg} \theta = (R/z)$, θ 是圆孔所对的远场半锥角; $m = (2\pi^2/\lambda^2)w_0^2$, 故模场半径为

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{m}{2} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

将实测的 $-\ln \{1 - [P(z)/P_{\max}]\}$ 随 $(R/z)^2$ 的变化关系, 按 (1) 式拟合成一条通过原点, 斜率为 m 的直线, 结合 (2) 式就可得出模场半径。

(1) 式是在光纤中模场分布为高斯型时严格成立, 对通常的单模光纤在接近 LP_{11} 模截止波长时, 它可以给出较好的结果。但是, 当光纤中传输波长为较长的光波时, 或对一些特殊结构的光纤 (如多包层光纤, 三角型光纤等), 光纤中的模场分布不再近似为高斯函数, 对这种非高斯模场分布的情况, 可以通过求远场均方根宽度得出模场半径。下面给出对高斯模场和非高斯模场分布都适用的模场半径的求法。

Petermann 根据光纤近场功率分布 $\psi^2(r)$ 提出了模场半径的新定义^[5] 为

$$\bar{w}^2 = 2 \int_0^\infty \psi^2(r) r dr / \int_0^\infty [\partial \psi(r) / \partial r]^2 r dr, \quad (3)$$

其远场均方根宽度为

$$w_{ff}^2 = \int_0^\infty \psi^2(u) u^3 du / \int_0^\infty \psi^2(u) u du, \quad (4)$$

式中 $\psi^2(u)$ 是远场功率分布, $u = k \sin \theta$, k 是波数, θ 是远场半锥角。模场半径与远场均方根宽度的关系为

$$\bar{w}^2 = \frac{2}{w_{ff}^2}. \quad (5)$$

由 $\psi(u)$ 和 u 可得远场功率 P 为

$$P = \int_0^u \psi(u') u' du'. \quad (6)$$

对 (6) 式进行微分, 结合 (4) 式得

$$w_{ff}^2 = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{u_{\max}} \left(\frac{dP}{du} \right) u^2 du = u_{\max}^2 - \frac{2}{P_{\max}} \int_0^{u_{\max}} P u du, \quad (7)$$

式中 $u_{\max} = k \sin \theta_{\max}$, θ_{\max} 是接收到最大功率 P_{\max} 时的远场半锥角。由实测的远场功率 P , 按 (7) 式进行数值积分, 结合 (5) 式可得出模场半径。

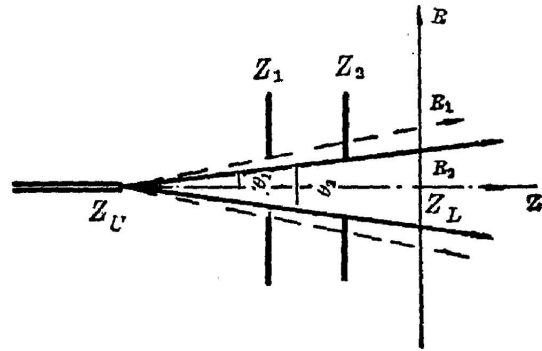


Fig. 1 Schematic diagram of the equivalent relationship between EVAFF and VAFF

三、测量结果和讨论

实验装置如图 2 所示, 稳定光源通过一个光纤活接头将波长为 $1.3 \mu\text{m}$ 的激光注入待测光纤样品, 在光纤的输出端, 辐射光束经过位置可变的固定孔径圆孔后由会聚透镜会聚在光电探测器上, 由功率计读出功率值。测量过程中, 由远到近, 调节圆孔到光纤端面的距离

z , 记录下不同的 z 值和相应的功率值 $P(z)$, 最后记录下测得的功率最大值 P_{max} 和相应的

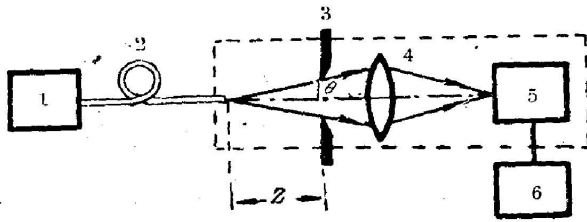


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental set-up

- 1—light source stabilized at 1.3 μm ;
- 2—fiber sample to be measured;
- 3—fixed aperture;
- 4—convergent lens;
- 5—opto-electronic detector;
- 6—power meter

z 值。为避免背景光干扰, 如图 2 虚框所示, 整个远场测量是在遮光筒中完成的。

本实验对四根不同的单模光纤分别进行了多次测量, 以 DS-112 光纤为例, 图 3 给出了部分实测值和用最小二乘曲线拟合得出的远场累积分布。图 4 是根据文献[3]的理论计算, 在 $\theta = \text{tg}^{-1}(R/z) < 4^\circ$ 内, 采用高斯函数拟合实测远场分布得出的结果。表 1 是四根光纤分别用 EVAFF 法和 VAFF 法*的测量结果, 从表中可以看出两种方法的测量结果具有很好的一致性。

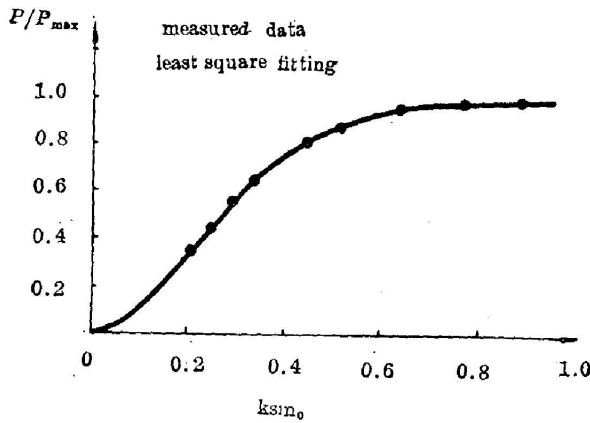


Fig. 3 Normalized far-field power as a function of α obtained using EVAFF

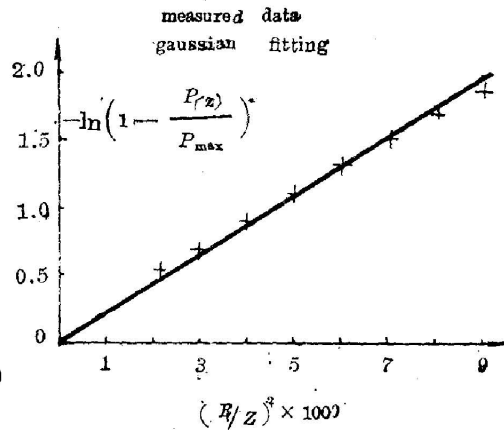


Fig. 4 Relationship between $-\ln\{1 - [P(z)/P_{max}]\}$ and $(R/z)^2$

Table 1 Measured data by EVAFF and VAFF for 4 fiber

Measuring methods		Fiber Number			
		DS-91	DS-110	DS-112	DS-125
EVAFF	Gaussian fitting w_0	3.980	4.165	4.268	4.536
	Meant square root \bar{w}	3.897	4.055	4.145	4.448
VAFF		4.01	4.15	4.25	

本实验中所测光纤的折射率分布是近似阶跃型的, 其模场分布可以用高斯函数很好地近似^[4], 因此, 采用高斯拟合处理实测远场分布其结果与用 VAFF 法测量的结果差别很小。采用远场均方根宽度处理, 所得结果比 VAFF 法略小, 一方面是由于使用了新的定义^[6], 另一方面也说明光纤中的模场分布不是严格的高斯型。本实验对四根光纤在不同的制备端面

* 本实验中的 VAFF 法测量是在商用测试仪器上进行的, 该仪器采用的是高斯拟合处理。

下进行了反复测量,表 1 给出了测量结果的平均值,重复测量的标准误差均小于 $0.04 \mu\text{m}$ 。

本方法是在光纤远场小角度的情况下进行的,圆孔轴向位移的定位误差对等效在横向的孔径变化影响很小,从而提高了测量精度,同时也可以简化测量程序。根据文献[3],当 $w(z) = R$ 时, $[P(z)/P_{\max}] = 0.8647$, $w_0 = (\lambda z/\pi R)$,若取 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$, $R = 5 \text{mm}$,则 $w_0 = 8.28 \times 10^{-5}z$,在保证 w_0 的测量误差小于 $0.01 \mu\text{m}$ 时,则要求圆孔的定位误差要小于 0.12mm ,这样的定位要求是容易达到的。因此,只要测出 P_{\max} 把圆孔定位在使 $P(z) = 0.8647P_{\max}$ 的位置 z 上,就可由 $w_0 = (\lambda z/\pi R)$ 得到模场半径。测量程序的简化对光纤的多波长测量是很有意义的。

在实验中,曾得到本院光纤光缆室邹林森和杨新民同志的帮助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] F. Alard *et al.*; *Proc. 8th ECOC*, 1982, AIV-2, 89.
- [2] W. T. Anderson, D. L. Philen; *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1983, 1, No. 1 (Jan), 20.
- [3] E. Nicholaisen, P. Danielsen; *Electron. Lett.*, 1983, 19, No. 1 (Jan), 27~29.
- [4] D. Marcuse; *J. O. S. A.*, 1978, 68, No. 1(Jan), 103, No. 1 (Jan), 103~109.
- [5] C. Pask; *Electron. Lett.*, 1984, 20, No. 3 (Feb), 144~145.
- [6] P. D. Vita *et al.*; *Proc. 10th ECOC*, 1984, 48.

Measurement of mode field radius using equivalent variable aperture method in far-field of single mode fibers

BAI AIMIN

(Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications)

(Received 9 July 1986; revised 15 September 1986)

Abstract

An equivalent variable aperture method for mode field radius measurement of single mode fibers is proposed. It involves measurement of the integrated far-field distribution with a circular aperture moved axially in the far-field of the fiber. In addition, calculation method of the mode field radius, which is also suitable for non-Gaussian field distributions, is derived by using Petermann's new definition of mode field radius. Experiments have shown that this method is simple and reliable. The typical deviation of repeated measurements of the mode field radius of a given fiber with different ends is less than $0.04 \mu\text{m}$.

Key Words: equivalent variable aperture; single mode fiber.