

# 用光学相关识别方法测量单模光纤 的折射率分布和色散

陈鹤鸣 蔡祥宝 施伟华

(南京邮电学院物理教研室, 南京 210003)

**摘 要** 介绍了一种测量单模光纤剖面折射率分布和色散的新方法——光学相关识别方法。应用计算全息制作高斯-拉盖尔模的匹配滤波器, 根据光学相关识别原理测出单模光纤场分布的展开系数, 由此推得剖面折射率分布和色散, 给出了实际测量结果。

**关键词** 单模光纤, 折射率分布, 色散, 计算全息, 光学相关识别。

## 1 引 言

单模光纤的色散和折射率分布直接确定单模光纤的带宽、模场直径等重要参数, 目前常用的测量方法有近场法<sup>[1, 2]</sup>、远场法<sup>[3-5]</sup>、散射图形法<sup>[6]</sup>、解析法<sup>[7]</sup>和数值算法<sup>[8]</sup>。本文提出计算全息和光学相关识别相结合的方法测量单模光纤的折射率分布和色散, 该方法应用计算全息技术制作高斯-拉盖尔模的匹配滤波器, 根据光学相关识别原理测出单模光纤场分布的展开系数, 由此推得剖面折射率分布和色散, 它具有不受振动干扰, 无光学放大畸变, 测量简单、方便, 所需光电检测器动态范围小等独特优点, 实验表明, 该方法的结果与其它方法结果相当一致。

## 2 测量原理

对于弱轴对称单模光纤, 纤芯内的场分布  $\psi(r)$  满足标量亥姆霍兹方程, 即

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{d\psi}{dr} \right) + (k_0^2 n^2 - \beta^2) \psi = 0 \quad (1)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为自由空间中的波数,  $\lambda$  为真空中的波长,  $n(r)$  为单模光纤剖面折射率分布,  $\beta(r)$  为单模光纤中基模的传播常数, 根据线性空间理论, 单模光纤中的场分布  $\psi(r)$  可按一组正交基元函数  $\Phi_\nu(x, y)$  展开

$$\begin{aligned} \psi(x, y) &= \sum_{\nu} C_{\nu} \Phi_{\nu}(x, y) \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{\nu}(x, y) \Phi_{\nu'}^*(x, y) dx dy &= \delta_{\nu\nu'} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\Phi_\mu$  为归一化正交函数,  $\delta_{\mu\mu'}$  为 Kronecker 记号, 从(2)式可得到展开系数  $C_\mu$  为:

$$C_\mu = \int\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x, y) \Phi_\mu^*(x, y) dx dy, \quad \sum_\mu |C_\mu|^2 = 1 \quad (3)$$

考虑到尽量减少测量点数, 展开项数越少越好, 即  $C_\mu$  的收敛要快, 则选择高斯-拉盖尔函数 (GL 模)  $Q_{0\mu}^{(X)}(r)$  作为正交基元函数。则:

$$\psi(r) = \sum_{\mu=1}^M C_\mu Q_{0\mu}^{(X)}(r) \quad (4)$$

$$Q_{0\mu}^{(X)}(r) = X \exp\left(-\frac{X^2 r^2}{2}\right) L_{\mu-1}(X^2 r^2) \quad (5)$$

式中  $X = \sqrt{2}/w_0$ ,  $w_0$  为基模的模场半径,  $\mu$  为径向脚标,  $L_{\mu-1}$  是拉盖尔多项式。  $Q_{0\mu}^{(X)}(r)$  满足正交、归一和完备条件:

$$2 \int_0^\infty Q_{0\mu}^{(X)}(r) Q_{0\mu'}^{(X)*}(r) r dr = \delta_{\mu\mu'}, \quad \sum_{\mu=1}^M |C_\mu|^2 = 1 \quad (6)$$

式中  $M$  为展开项数。从以上分析可以看出, 只要能制得该正交基元函数的光学匹配滤波器,  $C_\mu$  可方便地利用光学相关识别方法进行测量和确定。考虑图 1 中的光学  $4f$  系统, 在输入面  $I$  上放置单模光纤的输出端, 在频谱面  $F$  上放置由计算全息技术制得正交基元函数的光学匹配滤波器  $\tilde{\Phi}_\mu^*(k_x, k_y)$ , 则在  $F$  面上得到单模光纤场分布的傅立叶变换  $\Psi(k_x, k_y)$  与正交基元函数的光学匹配滤波器  $\tilde{\Phi}_\mu^*(k_x, k_y)$  的乘积:  $\Psi(k_x, k_y) \tilde{\Phi}_\mu^*(k_x, k_y)$ , 根据卷积定理, 在输出面  $K$  上得到<sup>[9]</sup>:

$$C_\mu(x_k - x_0, y_k) = \int\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x, y) \Phi_{0\mu}^*(x + x_k - x_0, y + y_k) dx dy \quad (7)$$

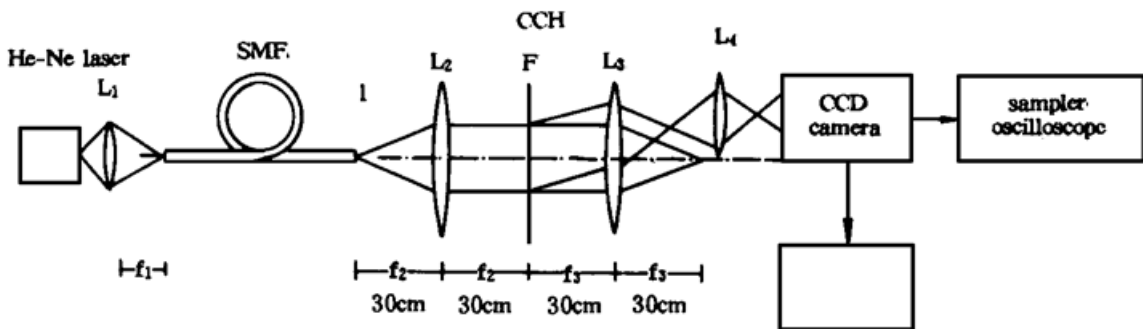


Fig. 1 Experimental set-up

将所选的正交基元函数(GL 模)  $Q_{0\mu}^{(X)}(r)$  代入式(7), 得到

$$C_\mu(x_k - x_0, y_k) = \int\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x, y) Q_{0\mu}^*(x + x_k - x_0, y + y_k) dx dy \quad (8)$$

因此展开系数  $C_\mu$  可利用平方律检测得到, 即在输出面  $x_k - x_0 = y_k = 0$  处测出各个高斯-拉盖尔模的相关项光强。将(4)式代入(1)式可得单模光纤的剖面折射率分布:

$$k_{0n}^2(r) - \beta^2 = -2X^2 - X^4 r^2 + 4X^2 \sum_{\mu=1}^M \mu C_\mu Q_{0\mu}^{(X)}(r) / \sum_{\mu=1}^M C_\mu Q_{0\mu}^{(X)}(r) \quad (9)$$

在上式中只要单模光纤包层折射率  $n_2$  已知, 则单模光纤中基模的传播常数  $\beta(r)$  和剖面折射率分布  $n(r)$  都可求得。

按照文献[4], 单模光纤的波导色散可由下式直接计算:

$$G_w = \frac{\lambda}{4\pi^2 n_{2c}} \frac{d}{d\lambda} (\lambda \overline{K^2}) \quad (10)$$

式中  $\overline{K^2}$  是下列积分的缩写:

$$\overline{K^2} = \frac{\int_0^{\infty} [d\psi(r)/dr]^2 r dr}{\int_0^{\infty} \psi^2(r) r dr} \quad (11)$$

按照文献[10, 11]给出的关系式, 得到波导色散与展开系数的关系为:

$$G_w = \frac{\lambda}{\pi^2 n_{2c}} \left( \frac{1}{w_0^2} - \frac{1}{a^2} \right) \sum_{\mu=1}^M \left[ \left( \mu + \frac{1}{2} \right) C_\mu^2 + \frac{\mu}{2} C_\mu C_{\mu-1} + \frac{\mu+1}{2} C_\mu C_{\mu+1} \right] \quad (12)$$

式中  $a$  为单模光纤纤芯半径。因此, 只要测出展开系数  $C_\mu$ , 就可得到剖面折射率分布和波导色散。

实验中所用的高斯-拉盖尔模匹配滤波器, 采用计算全息方法制作<sup>[12]</sup>。应用罗曼III型迂回位相编码方法, 为了制作高质量的高斯-拉盖尔模匹配滤波器, 在计算全息程序中采用了误差综合修正<sup>[13]</sup>, 计算全息样品大小为  $80 \times 80 \text{ cm}^2$ , 采样点数为  $81 \times 81$ , 包含了 6 个低阶高斯-拉盖尔模, 经缩微后匹配滤波器的大小为  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 。

### 3 实 验

图 1 为实验系统示意图。实验中所用光源为 He-Ne 激光器, 输出功率为 30 mW, 它的工作波长为 632.8 nm; SMF 是工作波长为 632.8 nm、数值孔径为 0.038 的被测单模光纤, 长为 2 m; CGH 为用计算全息制作的 6 个高斯-拉盖尔模的光学匹配滤波器;  $L_2$ 、 $L_3$  是傅里叶变换透镜, 它们的焦距为 300 mm, 组成  $4f$  系统; I、F、K 分别表示  $4f$  系统的输入面、频谱面和相关面;  $L_1$ 、 $L_4$  为 40 倍放大物镜。氦氖激光器发出的激光经  $L_1$  物镜耦合到被测单模光纤, 单模光纤的输出端放置在  $4f$  系统的输入面 I 上, 由单模光纤输出端发出的光经第一个傅里叶变换透镜  $L_2$  进行傅立叶变换, 在频谱面 F 上得到单模光纤场分布的频谱, 在频谱面 F 上放 6 个低阶高斯-拉盖尔模的匹配滤波器, 经第二个傅里叶变换透镜  $L_3$  进行傅里叶变换, 在相关面 K 的  $x$  方向的一级衍射中可得到 6 个低阶高斯-拉盖尔模与单模光纤场分布相关图像。该相关图像经透镜  $L_4$  放大, 用 CCD 和采样示波器可方便准确地测得 6 个低阶高斯-拉盖尔模与单模光纤场分布相关图像中心点的光强, 经简单的数据处理, 得到各展开系数为

$$\begin{aligned} C_{01} &= 0.9434, & C_{02} &= -0.1158, & C_{03} &= 0.07323, \\ C_{04} &= -0.2081, & C_{05} &= 0.1985, & C_{06} &= -0.0995, \end{aligned}$$

且满足

$$\sum_{\mu=1}^6 C_\mu^2 \approx 1$$

将各展开系数  $C_\mu$  代入(8)式得到剖面折射率分布曲线如图 2 所示, 用折射近场法测量取自同一单模光纤样品上另一段的剖面折射率差分布曲线如图 3 所示。比较图 2 和图 3 可以看出, 两种结果基本一致, 差异是由于图 2 是折射率平方之差而图 3 是折射率差, 而且它们取自同一单模光纤的不同段。同样可将各展开系数  $C_\mu$  代入(11)式, 可算得被测单模光纤在波长  $\lambda$

= 632.8 nm 时的波导色散  $G_w = -1.61 \text{ ps} \cdot \text{Km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ , 按照文献[4]给出的经验公式

$$\overline{K^2} = 0.9255 \mu\text{m}^{-2} \exp(-2.248\lambda/\mu\text{m})$$

可算得被测单模光纤在波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  时的波导色散  $G_w = -3.5 \text{ ps} \cdot \text{Km}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ , 两种结果基本符合。

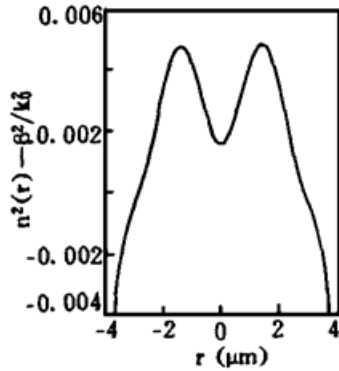


Fig. 2 Refractive-index profile of single-mode fiber computed by the present method with  $M = 6$

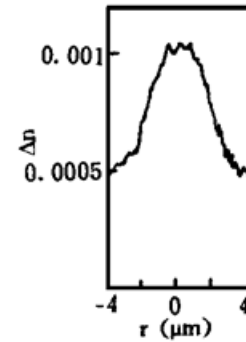


Fig. 3 Refractive-index profile of single-mode fiber measured with refracted near-field method

**结 论** 本文提出的计算全息和光学相关识别相结合的方法测量单模光纤剖面折射率分布和波导色散, 它具有不受振动干扰, 无光学放大畸变, 测量简单、方便, 所需光电检测器动态范围低等独特优点, 实验表明, 用本方法得到结果与其它方法给出的结果基本一致。

本文提出的方法仅对轴对称单模光纤进行实验, 但从原理上说对特种光纤也适用, 对于矩形光波导, 可选高斯-厄密模作为正交基元函数, 因此本文提出的方法有较好的适用性。

### 参 考 文 献

- [1] G. Coppa, P. Di Vita, U. Rossi, Characterisation of single-mode fibers by near-field measurement. *Electron. Lett.*, 1983, **19**(3) : 293~ 294
- [2] K. I. White, Practical application of the refracted near-field technique for the measurement of optical fiber refractive index profile. *Opt. & Quantum Electron.*, 1976, **11**(4) : 669~ 671
- [3] K. Hotate, T. Okoshi, Measurement of refractive-index profile and transmission characteristics of a single-mode optical fiber from its exit radiation pattern. *Appl. Opt.*, 1979, **19**(10) : 3265~ 3271
- [4] W. Freude, A. Sharam, Refractive-index profile and modal dispersion prediction for a single-mode optical waveguide from its far-field radiation pattern. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(6) : 628~ 634
- [5] R. K. Boncek, D. L. Rode, Far-field radiation and modal dispersion of 1310 nm dispersion-optimized fiber at 850 nm. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **LT-9**(1) : 18~ 21
- [6] M. Tateda, Single-mode-fiber refractive-index profile measurement by reflection method. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3) : 475~ 478
- [7] S. P. Pogossian, A new approach to determining the waveguide mode index distribution. *Opt. & Quantum Electron.*, 1993, **25**(2) : 417~ 422
- [8] 姚珪, 杨治安, 康翠荣等, 光波导折射率分布的数值算法. *光学学报*, 1996, **16**(4) : 515~ 519
- [9] W. Freude, G. Grau, B. Wueppermann, Computer-generated holograms for mode excitation and measurement of the mode power distribution in multimode fibres. *J. Instn. Electronics & Engrs.*, 1986, **32**(4) : 243~ 252
- [10] W. Wang, S. Guo, S. Jian, Interplay of fiber parameters in a single-mode fiber. *Proc. OFSET '95*, 天津, 天津科技出版社, 1995, A165~ A168
- [11] G. K. Grau, *Optische Nachrichtentechnik*, 1st, Springer-Verlag, Berlin, 1981

- [12] 陈鹤鸣, 一种新型光学匹配滤波器的研制. 南京邮电学院学报, 1994, 14(1): 41~ 44  
[13] 陈鹤鸣, 杜建昌, 杨大容, 计算全息的误差综合修正. 南京邮电学院学报, 1991, 11(2): 79~ 83

## Refractive-Index Profile and Modal Dispersion Prediction for Single-Mode Fibers Using Optical Correlation Method

Chen Heming    Cai Xiangbao    Shi Weihua  
(*Nanjing University of Posts and Telecommunications,  
Teaching and Research Section of Physics, Nanjing 210003*)  
(Received 3 August 1996; revised 30 October 1996)

**Abstract** Refractive-index profile and modal dispersion in single-mode optical fibers are computed from the measured expansion coefficients of the near-field, which is expanded in a series of Gauss-Laguerre functions. The coefficients of the series are measured from the correlation intensity between the near-field of single-mode fibers and the Gauss-Laguerre mode of filter fabricated by computer-generated holograms. The main advantage of the proposed method lies in its inherent insensitivity against random measurement errors and low optical dynamic range of a detector.

**Key words** single-mode fibers, refractive-index profile, dispersion, computer-generated holograms, optical correlation method.