

# 微孔光纤双折射的研究\*

胡薇薇 钱景仁

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230026)

**摘 要** 采用有限元方法对新型微孔光纤和熊猫与微孔组合的熊猫型微孔光纤双折射给出计算和特性分析。并着重介绍微孔光纤应力双折射和几何双折射的理论及实验研究的最新成果。

**关键词** 微孔光纤, 双折射, 有限元方法。

## 1 引 言

近年来, 各种特种光纤的研究成果丰硕, 新型特种光纤层出不穷。据报导已出现的特种光纤的品种不下 200 余种, 其中大部分是为相干光通信和传感技术而研究开发的, 新型微孔光纤就是其中较为新颖的一种。所谓微孔光纤, 就是在一般单模光纤靠纤芯附近的包层区沿轴向做出一个孔, 其截面如图 1 所示。

中国科技大学光纤实验室对用微孔光纤研制新型保偏光纤做了大量的研究工作<sup>[1-3]</sup>。他们采用边界元法从理论上定性分析了圆形孔、D 形孔等各种形状微孔光纤的材料应力双折射, 得出 D 形孔光纤的双折射效应最为明显、且 D 形孔光纤的应力双折射和几何双折射是相加的等重要结论。本文对微孔光纤双折射进行了理论与实验两方面的深入研究。

他们采用边界元法从理论上定性分析了圆形孔、D 形孔等各种形状微孔光纤的材料应力双折射, 得出 D 形孔光纤的双折射效应最为明显、且 D 形孔光纤的应力双折射和几何双折射是相加的等重要结论。本文对微孔光纤双折射进行了理论与实验两方面的深入研究。

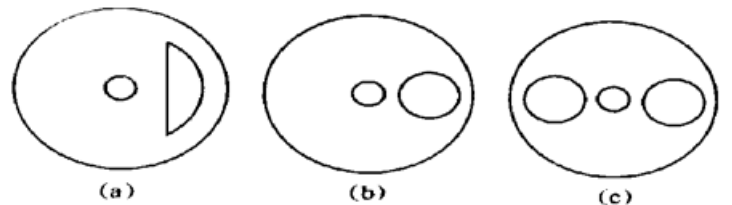


Fig. 1 Cross sections of micro-hole fibers (a) D-shaped micro-hole, (b) one circular micro-hole, (c) two circular micro-holes

## 2 微孔光纤几何双折射的有限元分析

采用有限元法对新型微孔光纤本征值问题进行的理论分析<sup>[4,5]</sup>, 可用来计算微孔光纤的几何双折射。由于微孔的存在使光纤产生几何不对称使光纤中两正交基模场的传输常数略有差异, 其差值便是几何双折射  $B_g = (\beta_x - \beta_y)/k$ 。式中,  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别为两正交线偏振基模的传播常数,  $k = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数,  $\lambda$  为工作波长。计算结果如图 2 所示。从图中可见, 当  $V$  值(归一化频率)大于 1.5 时, 微孔光纤的几何双折射值很小, 一般不大于  $10^{-6}$ ; 当值很大时, 由于能量集中于圆形结构的纤芯传输, 包层中微孔的存在并无影响, 因而, 几何双折射

\* 国家自然科学基金及教委博士点基金资助项目。

趋于零。由此可见，在光纤正常工作 ( $V$  值) 的区间内，微孔光纤的几何双折射值可以忽略不计。

### 3 微孔光纤应力双折射的有限元分析<sup>[6~9]</sup>

图 3 示出新型微孔光纤截面图。由于所分析的光纤在  $Z$  方向的平移不变性，因此，光纤中的热应力问题可以简化成二维平面应变问题。它包含三个应力分量、三个应变分量和二个位移分量：

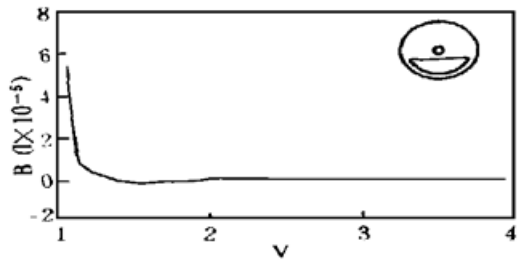


Fig. 2 The relation between birefringence  $B_g$  and normalized frequency  $V$

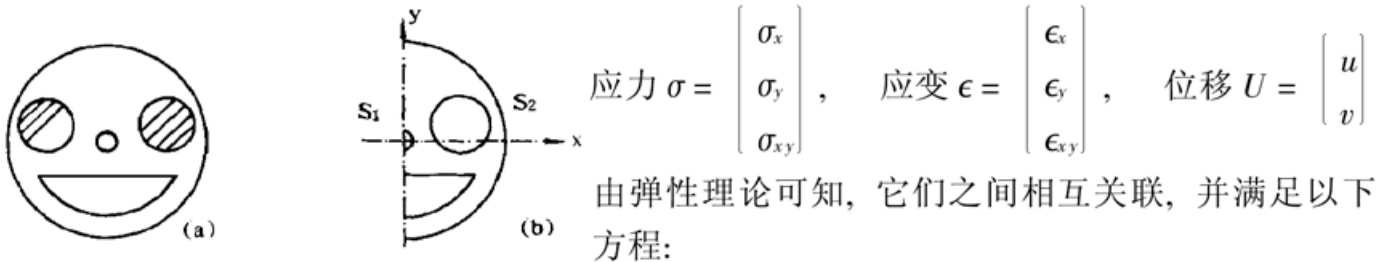


Fig. 3 Cross sections of new-style micro-hole fibers

$$\text{应力 } \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}, \quad \text{应变 } \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}, \quad \text{位移 } U = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$$

由弹性理论可知，它们之间相互关联，并满足以下方程：

$$\text{几何方程: } \epsilon = BU, \quad \text{其中 } B = \begin{bmatrix} \partial/2\partial x & 0 \\ 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial y & \partial/\partial x \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\text{物理方程: } \sigma = D(\epsilon - \epsilon_T), \quad \text{其中: } \epsilon_T = \alpha T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \lambda + 2G & \lambda & 0 \\ \lambda & \lambda + 2G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{其中: } G = \frac{E}{2(1 + \mu)}, \quad \lambda = \begin{bmatrix} \mu E / (1 - \mu^2) \\ \mu E / (1 + \mu)(1 - 2\mu) \end{bmatrix}$$

$$\text{平衡方程: } B^T \sigma + F = 0, \quad \text{其中: } F = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ 为体力}, \quad (3)$$

$E$  为杨氏模量， $\mu$  为泊松比， $G$  为剪切模量， $\alpha$  为线膨胀系数， $T$  为温变。联立(1)~(3)式得

$$B^T(BDU - \epsilon_T) + F = 0 \quad (4)$$

边界条件：图 3 中，边界  $s_1$  上：取中心原点处位移为零，且由于对称性  $u = 0$

边界  $s_2$  上：取自由边界条件

$$\text{内边界上: } \begin{bmatrix} \sigma_x & \sigma_{xy} \\ \sigma_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}$$

其中， $\theta_0$  为边界上某点的外法线方向， $P$  为表面力。引入虚位移矢量  $\Phi(x, y)$ ，(4) 式及边界条件下的泛函分析可等效为如下的单元积分：

$$\iint (B\Phi)^T DBU \, dx \, dy = \iint (B\Phi)^T D \epsilon_T \, dx \, dy \quad (5)$$

采用简单的三角形单元进行图形剖分，选用线性插值函数，线性方程组的迭代选用松弛迭代法，最终计算出纤芯处的应力分量  $\sigma_x, \sigma_y$ 。

由于光纤中的残余应力将引起截面折射率的微小变化，设  $n_{x0}, n_{y0}$  和  $n_x, n_y$  分别代表变化前后的二个主轴方向的折射率，则有：

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{x0} \\ n_{y0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_2 & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix}$$

其中,  $C_1, C_2$  称为应力光弹性系数, 对  $\text{SiO}_2$  玻璃有:  $C_1 = 7.421 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{kg}$ ,  $C_2 = 4.104 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$ , 则  $B = n_x - n_y = C(\sigma_x - \sigma_y)$ 。对于石英光纤, 式中  $C = 3.36 \times 10^{-5} \text{ mm}^2/\text{kg}$  称为材料的相对应力光学常数。利用 486 微机进行编程计算,  $\sigma_x, \sigma_y$  的计算精度取为  $2 \times 10^{-5}$ , 编程较为流畅, 收敛速度较快。

### 4 应力双折射计算结果分析

为了计算方便, 取光纤截面各区域材料的杨氏模量和泊松比相同为:  $E = 7830 \text{ kg}/\text{mm}^2$ ,  $\mu = 0.186$ , 光纤包层为  $\text{SiO}_2$  玻璃材料, 其线膨胀系数为  $\alpha = 5.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。

光纤在拉制过程中从熔融状态  $T_s = 1500^\circ\text{C} - 2000^\circ\text{C}$  迅速冷却至室温  $T_c = 20^\circ\text{C}$ , 计算其应力的温变参数  $T$  并非等于  $T_c - T_s$ 。在这个过程中, 光纤从熔融状态到软化状态经过转变点达到固化状态。在转变点, 光纤的粘性系数为  $10^{12} \text{ Pa}$  左右, 其温度  $T_g$  称为转变温度, 以这个温度迅速冷却才可能在纤芯处凝结残余应力, 因此温变  $T = T_c - T_g \cong -T_g$ , 不同掺杂物质和不同掺杂浓度, 对应不同的温变  $T$  和线膨胀系数, 表 1 示出芯区掺  $\text{GeO}_2$  时的对应关系:

Table 1. Thermal expansion coefficients and temperature change

doping percent (%)	0.2	0.4	0.8	1.6
$\alpha (\times 10^{-7}/^\circ\text{C})$	6.6	8.0	10.6	17.6
$T (^\circ\text{C})$	- 980	- 950	- 850	- 700

#### 4.1 方法验证

取温变  $T = -850^\circ\text{C}$ , 应力区的线膨胀系数  $\alpha = 0.145 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ , 将计算结果与有解析解的熊猫型<sup>[1]</sup>和领结型<sup>[1]</sup>结果进行比较, 其曲线见图 4。从图中可见, 计算结果与各解析解曲线吻合得较好。(图中虚线为解析解)

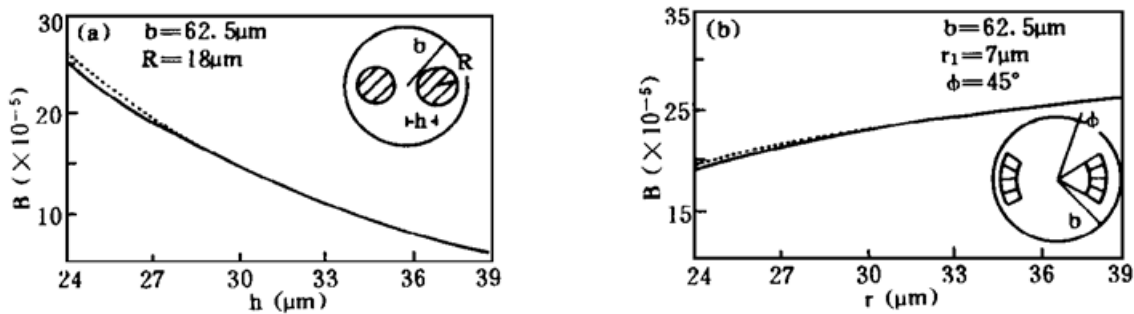


Fig. 4 Comparison between theory and numerical analysis for the stressed birefringence

(a) the panda fiber (b) the bow-tie fiber

#### 4.2 D 型微孔光纤应力双折射的分析

在分析了圆形孔、D 形孔等各种形状微孔光纤的材料应力双折射, 得出 D 形孔光纤的应力双折射效应最为明显的重要结论之后, 着重对 D 形微孔光纤双折射进行分析。图 5 示出 D 型微孔光纤应力双折射随各参数变化曲线。从图中可见, D 型微孔光纤应力双折射随微孔的增大或是微孔向纤芯的拉近而单调提高, 其应力双折射大小一般为  $10^{-5}$  数量级。由于光纤的双折射  $B$  是由几何双折射  $B_g$  和应力双折射  $B_s$  共同产生的。前面已经指出 D 型微孔光纤几何双折射的大小仅为  $10^{-6}$  这一数量级, 因此在 D 型微孔光纤中以  $B_s$  占主导地位。

从图 5 中可见, 当  $d = 10 \mu\text{m}$ 、 $r = 35 \mu\text{m}$  时, 其应力双折射可达到  $5 \times 10^{-5}$  数量级。作为高双折射保偏光纤, 这一结果是远远不够的。为了获得高双折射微孔光纤, 可将微孔引入

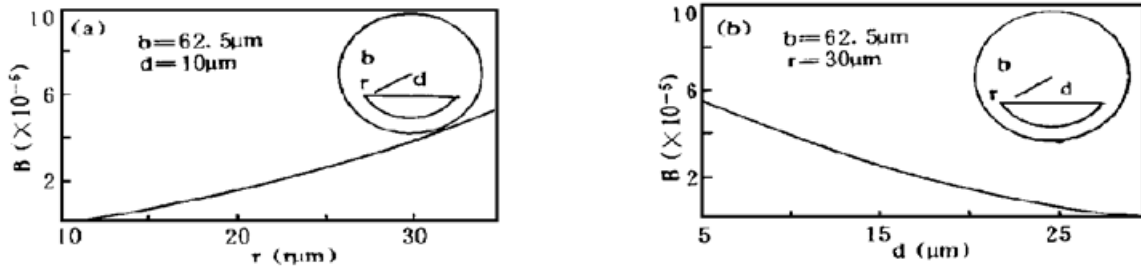


Fig. 5 The stressed birefringence of D-micro-hole fiber as a function of (a) the relative difference in  $r$ , (b) the relative difference in  $d$

熊猫型应力双折射保偏光纤。由于在应力型保偏光纤中， $B_s$  占主导地位，因此在以后的分析中，仅讨论光纤的应力双折射。

### 4.3 新型熊猫型微孔光纤双折射分析

图 6 示出新型熊猫微孔光纤(也称娃娃光纤)的双折射随各参数的变化曲线。图 7 所示新型单应力 D 孔光纤双折射随各参数变化曲线，图中虚线为无微孔应力型光纤的双折射曲线。从图中可见，D 孔的引入，增强了熊猫型保偏光纤的双折射，却削弱了单应力型光纤的双折射，换句话说，D 孔的引入削弱了与 D 孔直边相垂直的光轴上的拉伸应力。

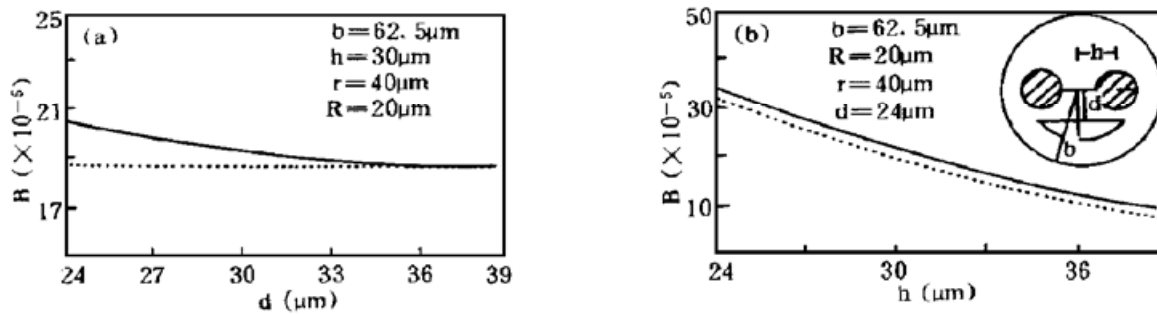


Fig. 6 Birefringence of new-style micro-hole fiber as a function of (a) the relative difference in  $d$ , (b) the relative difference in  $h$

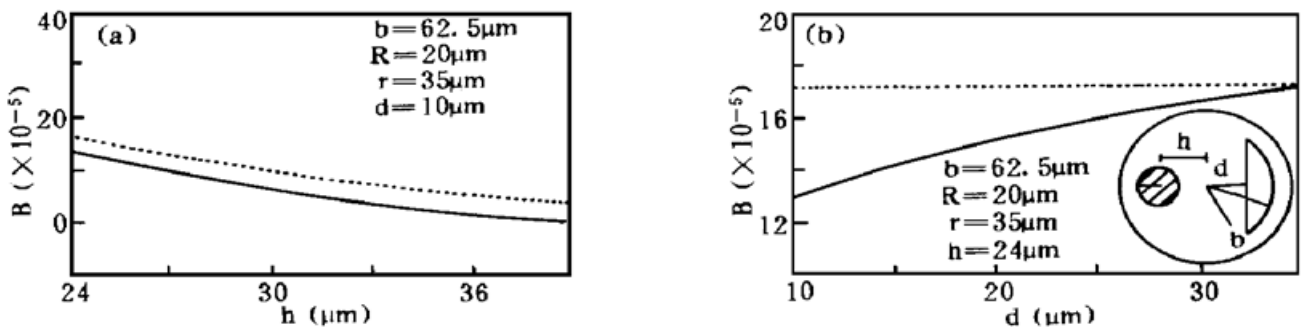


Fig. 7 Birefringence of new-style micro-hole fiber as a function of (a) the relative difference in  $h$ , (b) the relative difference in  $d$

### 4.4 熊猫光纤应力区偏轴时双折射分析

在制作熊猫型微孔光纤时，为了提高微孔的作用将微孔向芯区靠近，使得熊猫型光纤的应力区有一定的偏轴，为此，需要分析熊猫光纤应力区偏轴时对双折射的影响。图 8 示出两种  $h$  尺寸下双折射随偏轴角  $\theta$  的变化曲线，图中虚线为  $B = 0$ 。从图中可见，双折射随应力区的偏轴角增大而减小，当偏轴夹角接近  $45^\circ$  时，由应力区所产生的应力双折射达到最小值；另外，熊猫光纤应力区偏轴时，其应力双折射的最大值并不在  $\theta = 0$  处，而是在  $\theta$  为某个角度的

时候, 并且, 这一峰值点随  $h/b$  的减小向  $\theta = 0$  处移动。产生这一现象的原因是由于纤芯处各方向上的应力分量  $\sigma_x, \sigma_y$  随  $\theta$  变化的速率不同而造成的。

利用熊猫型光纤的应力区有一定的偏轴时其应力双折射并无减少这一特点, 设计熊猫应力区稍有偏轴, 这一计算在理论近似分析中得以证实<sup>[10]</sup>。此设计的优点是可以在制做熊猫型微孔光纤时, 将微孔向纤芯拉近以达到提高其应力双折射的目的。分析的结果示于图 9, 图中虚线为标准熊猫型保偏光纤。熊猫应力区稍有偏轴并将微孔向纤芯拉近的设计, 使得光纤的应力双折射提高许多。

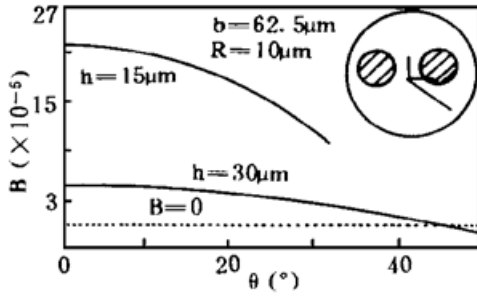


Fig. 8 Relation between  $B$  and  $\theta$

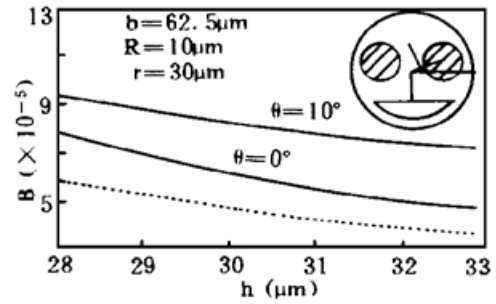


Fig. 9 Relation between  $B$  and  $h$

经过多年的努力, 目前, 在电子工业部天津四十六所和淮南八所的协作下控制成功了几种单模 D 形孔保偏光纤, 图 10 为其中两种微孔光纤的参数和截面照片。

4.5 D 型微孔光纤双折射的实验分析

用压力法测量保偏光纤拍长的双折射测量方法<sup>[11]</sup>对以上几种微孔光纤进行了测试, 再用本文所述计算理论对其进行了计算, 并加入芯区几何双折射修正, 两者结果比较列于表 2:



Fig. 10 The photograph of micro-hole fiber

Table 2. Birefringent comparison of micro-hole fiber

micro-hole fiber	geometrical birefringence	stress-induced birefringence	birefringent calculation	birefringent measurement fiber
fiber a	$- 3.1 \times 10^{-5}$	$(1.2 \sim 1) \times 10^{-5}$	$(1.9 \sim 2.1) \times 10^{-5}$	$(1.6 \sim 2.1) \times 10^{-5}$
fiber b	$- 3.7 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-4}$

从表中可见, 微孔光纤的双折射理论计算与实际测量符合较好, 分析观察现有已研制出的微孔光纤截面, 当微孔距离纤芯较远时, 由于它受纤芯和包层应力区影响较小、微孔尺寸不大, 因此, 其形状规则与设计基本相符; 而当微孔距离纤芯较近时, 较大的微孔尺寸致使光纤在拉制中微孔的形状极难保持规则。可见, 要想获得较好的微孔形状, 首先, 应选择适中的微孔到纤芯距离, 以  $d = 10 \sim 15 \mu\text{m}$  左右为宜; 其次, 微孔尺寸也不可太大, 应取  $r = 30 \mu\text{m}$  左右。合适的孔径可以改善熊猫光纤应力区偏轴和变形程度, 改善纤芯的椭圆度和光纤边界形状, 降低光纤的损耗, 促进微孔光纤的实用化进程。

**结 论** 采用有限元方法, 分析并计算了应力型保偏光纤双折射, 并对微孔光纤双折射及熊猫与微孔组合的熊猫型微孔光纤双折射进行了详细分析, 还研究了熊猫应力区偏离轴线时对双折射的影响。采用本文论述的计算理论对现有微孔光纤进行验证, 理论与实践符合较好。另外, 对微孔光纤截面参数和双折射的分析, 为微孔光纤的实用化拉制提供设计指导。可以预料, 利用微孔光纤的各种特点, 研制高品质的光纤器件, 可以大大推动其实用化进程。

感谢为实验拉制光纤的电子工业部淮南 8 所和天津 46 所的同志们。

### 参 考 文 献

- [1] J. Hong, J. R. Qian, Geometrial birefringence in fibers with D-shaped hole. *Electron. Lett.*, 1989, **25** (23) : 1574~ 1575
- [2] J. Hong, J. R. Qian, Simple method for calibration of stress-induced birefringence in fibers with arbitrary structures. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(9) : 598~ 599
- [3] 钱景仁, 鲁家龙, 微孔光纤的研制与制造. 第五届全国光通信学术会议论文集, 天津, 中国光学学会, 1991 : 107~ 109
- [4] 徐善驾, 非均匀介质填充波导本征值问题的有限元分析. 电子科学学刊, 1983, **5**(1) : 6~ 15
- [5] 胡薇薇, 汪治州, 钱景仁, 有限元分析新型微孔光纤本征值问题. 中国通信学会第四届学术年会论文集, 北京, 中国建材工业出版社, 1995 : 395~ 397
- [6] J. Noda, K. Okamoto, Y. Sasaki, Polarization-maintaining fibers and their applications. *J. Lightwave Technol.*, 1986, **4**(8) : 1071~ 1089
- [7] K. Okamoto, T. Hosaka, T. Edahiro, Stress analysis of optical fibers by a finite element method. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(10) : 2123~ 2129
- [8] R. Passy, A. L. Gama, N. Gisin *et al.*, Pressure dependence of polarization mode dispersion in HiBi fibers. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11) : 1527~ 1531
- [9] 竹内洋一郎, 热应力, 北京, 科学出版社, 1978
- [10] 胡薇薇, 钱景仁, 朱 冰, 一种简单方法——计算应力型保偏光纤双折射. 光子学报, 1996, **25**(增刊 1) : 65~ 69
- [11] 胡薇薇, 钱景仁, 压力法测量保偏光纤拍长参数的系统分析. 中国科技大学学报, 1996, **26**(2) : 250 ~ 256

## Study on the Birefringence of the Microhole Fiber

Hu Weiwei      Qian Jingren

(Department of Electronic Engineering and Informantion Science,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

(Received 1 May 1996; revised 3 October 1996)

**Abstract** The finite element method was used to analyse the birefringence of the new-type microhole fiber which consists of D-shaped micro hole and two circular stress in the cladding of the fiber.

**Key words** microhole fiber, birefringence, finite element method.