

# 双锥光纤模拟理论方法\*

陈智浩

(福建师范大学激光研究所, 福州 350007)

顾东华 彭江得 周炳琨

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

**摘 要** 从双锥光纤的工艺实现和技术应用目的出发, 建立了可与实验上易测量的工艺参数相联系的高斯型等效双锥光纤模拟理论方法, 可用于双锥光纤的制作及光学特性的分析, 数值模拟结果与实验符合得很好。

**关键词** 双锥光纤, 模拟方法, 拉锥。

## 1 引 言

双锥光纤的特点是制作简单, 与光纤系统兼容, 附加损耗小, 对偏振不敏感, 无背向反射, 成本低。从双锥光纤和器件研制及应用角度看, 发展一套实用的双锥光纤及器件设计理论, 具有十分重要的意义。在制作中, 工艺参数如何影响双锥光纤及器件的特性, 不同的应用如何对双锥光纤甚至研制工艺参数提出不同的要求, 如何进一步开辟双锥光纤的新应用等等, 都需要人们建立一个实用的双锥光纤及器件设计模型。

已报道的双锥光纤理论模型<sup>[1-7]</sup>, 可用于理解双锥光纤的基本特性。但这些模型没有与研制工艺参数联系, 不能直接指导研制工作。尽管少数文献<sup>[8-12]</sup>曾经报道过将理论模型与研制工艺参数相联系, 但要么适用范围窄, 要么需要知道不易测量的温度分布和粘度, 这些模型对于具体指导双锥光纤及器件的设计研制及应用来说是远远不够的。因此, 需要建立一种能用来直接指导双锥光纤和器件研制及应用的较全面的设计理论。但是, 由于工艺的高度敏感性以及缺乏更深入的研究, 至今在这方面的文献报道很少。已报道的模型有很大的局限性, 难以对双锥光纤及器件的设计研制应用进行较全面的指导。

本文从双锥光纤的工艺实现和技术应用目的出发, 根据双锥光纤成形原理和光纤电磁理论并结合实验事实, 提出了一种新的双锥光纤几何成形及光学特性等效模拟原理方法。其要点有二: 一是采用实验容易测量的研制工艺参数(熔锥条件), 二是采用双锥光纤几何成形的高斯等效模型。根据该方法进行的数值模拟与实验结果吻合得很好, 在具体指导双锥光纤器件研制及应用工作中起了十分重要的作用。

\* 福建省自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1998-06-01

## 2 双锥光纤成形的等效模拟

图 1 是光纤熔融拉锥工艺简化图。

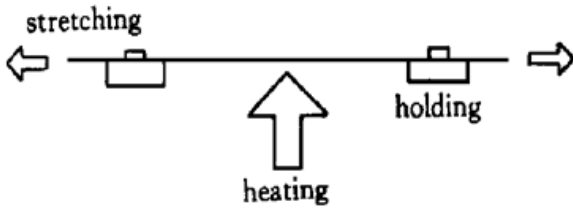


Fig. 1 A technique for fiber tapering

当被加热的光纤段软化后，光纤直径随着拉伸逐渐收缩并在中央处形成腰部，如图 2 所示，这是熔融光纤受轴向拉伸的一种变形。一般认为，光纤在高温熔融状态下的流变行为是服从牛顿流体规律的。理论与实验研究表明，工艺参数象拉伸速度、时间、温度等将影响双锥光纤的成形。在锥腰处，通常温度最高，其直径最小。在相同融锥温度下，拉伸长度越长，锥腰就越小。在相同拉伸速度和时间下，温度越高，锥腰就越小。

对双锥光纤成形来说，光纤粘度是一个很重要但又很难直接测量的量。而且粘度与光纤组成有关系，这更增加了实用的复杂性。为了实用，有必要建立一个既符合粘度变化物理规律又避开粘度这一物理量的模型。

温度分布  $T(z)$  对双锥光纤的成形起十分关键的作用。进一步研究双锥光纤成形基本原理可以发现，只要融锥温度分布  $T(z)$  不变，成形后的光纤直径  $d$  分布函数形式也不变。导致双锥光纤形成抛物型、高斯型、指数型、梯形等分布的本质是融锥温度分布  $T(z)$  的不同。由于拉伸速度慢，拉伸速度对双锥光纤的成形影响不大。

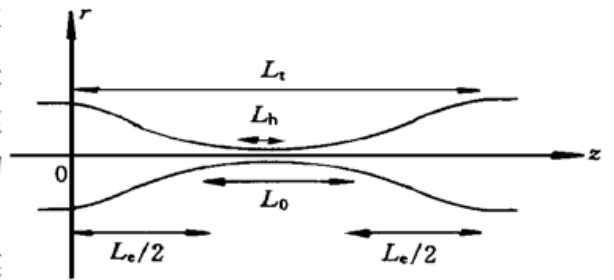


Fig. 2 A typical biconical fiber

尽管温度分布是不均匀的，但是，对于任一峰值融锥温度  $T_p$  (由光纤高温计监测)，可以引入加热器有效加热区长度  $L_0$  的概念。光纤在这有效加热区长度之外，是“冷”的，即粘度很大，不软化。在有效加热区长度之内的光纤，最后形成双锥结构。根据体积不变，可以得出下列方程<sup>[8, 12]</sup>

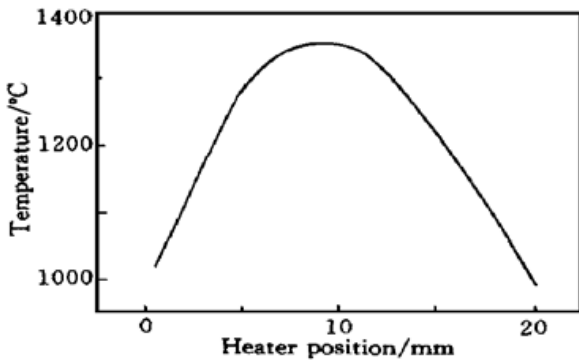


Fig. 3 Temperature distribution of a heater

引入加热器有效加热区长度  $L_0$  的概念。光纤在这有效加热区长度之外，是“冷”的，即粘度很大，不软化。在有效加热区长度之内的光纤，最后形成双锥结构。根据体积不变，可以得出下列方程<sup>[8, 12]</sup>

$$\pi \left(\frac{d_0}{2}\right)^2 L_0 = \int_0^{L_1} \pi \left[\frac{d(z)}{2}\right]^2 dz \quad (1)$$

式中  $d_0$  为光纤初始直径， $d(z)$  为双锥光纤位于  $z$  处的直径， $L_1$  为双锥长度。实验测量表明，对于图 3 所示的加热器温度分布， $d(z)$  比较符合高斯分布。

设双锥光纤的几何分布为高斯函数形式，经推导可得双锥几何分布为

$$d(z) = \begin{cases} d_0 \exp \left[ - \pi z^2 / 2L_0^2 \right] & (0 < z < \frac{L_1 - L_h}{2}) \\ d_0 \exp \left[ - \pi (L_0 + L_e - L_h)^2 / 8L_0^2 \right] = d_w & (\frac{L_1 - L_h}{2} < z < \frac{L_1 + L_h}{2}) \\ d_w \exp \left[ (z - 0.5L_0 - 0.5L_e - 0.5L_h)^2 / 2L_0^2 \right] & (\frac{L_1 + L_h}{2} < z < L_1) \end{cases} \quad (2)$$

三个实验易测的工艺参数  $L_0$ 、 $L_h$ 、 $L_e$  分别为加热器有效加热区长度、加热器有效等温加热区长度和拉伸长度。(2) 式就是双锥光纤结构参量等效模拟结果，等效模拟结果既遵循基本的物理规律，又十分简单，并与研制工艺参数相联系，因此十分实用。

加热器有效加热区长度  $L_0$  与加热器的结构有关。例如, 对于燃烧器来说, 火嘴越宽,  $L_0$  越长。参数  $L_0$  可通过测量双锥的长度  $L_t$  和拉伸长度  $L_e$  的关系而确定,

$$L_t(T_p) = L_0(T_p) + L_e \quad (3)$$

测出  $L_t-L_e$  关系曲线, 经直径拟合即可求出加热器有效加热区长度  $L_0$ 。加热器有效等温加热区长度  $L_h$  与  $L_0$  一样, 不仅与加热器结构及加热方式有关, 而且与拉伸长度也有关系。 $L_h$  也可通过简单的实验来确定,

$$L_h(T_p) = A(T_p) + B(T_p)L_e \quad (4)$$

式中系数  $A$ 、 $B$  通过测量  $L_h-L_e$  关系曲线确定。与双锥长度相比, 通常  $L_h$  很短。拉伸长度  $L_e$  可直接从拉伸机构读出。

利用双锥光纤成形等效模拟结果, 可以方便地根据融锥条件预测双锥光纤的成形。图 4 是不同拉伸长度下双锥光纤直径的分布, 其余融锥条件相同。从图中可以看出, 当拉伸长度为 10 mm 时, 双锥长度为 18 mm, 锥腰为  $22 \mu\text{m}$ ; 当拉伸长度为 15 mm 时, 双锥长度为 23 mm, 锥腰减小到  $7.5 \mu\text{m}$ 。可见, 当有效加热区长度  $L_0$  相同时, 拉伸长度越长, 双锥长度越长, 锥腰就越小。

图 5 是不同有效加热区长度  $L_0$  下双锥光纤直径的分布, 其余融锥条件相同。从图中可以看出, 当有效加热区长度从 8 mm 减小到 6.4 mm 时, 双锥长度从 18 mm 降到 16.4 mm, 锥腰从  $22 \mu\text{m}$  降到  $13 \mu\text{m}$ 。可见, 当拉伸长度相同时, 有效加热区长度  $L_0$  越短, 则双锥长度就越短, 锥腰就越小。

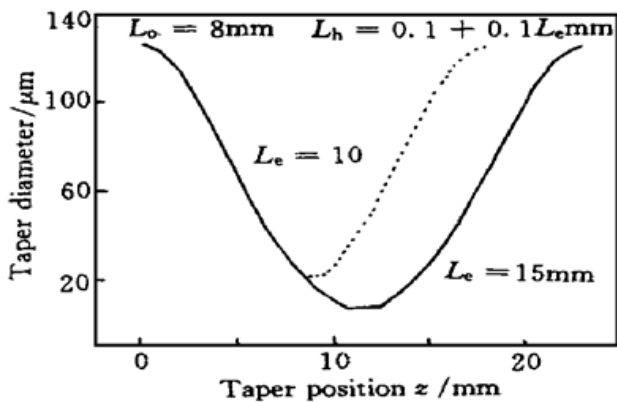


Fig. 4 Profile of the taper diameter with different elongation lengths

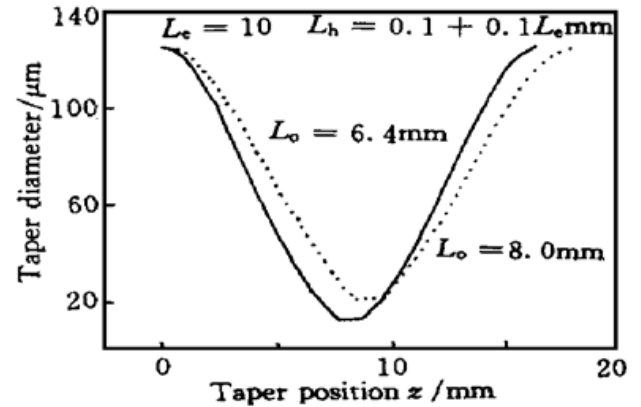


Fig. 5 Profile of the taper diameter with different lengths of effectively heating zone

由于模型采用了实验可测参数  $L_0(T_p)$ 、 $L_h(T_p)$ 、 $L_e$  作为基本参数, 这些参数反映了设备的熔锥条件, 因而具有很高的实用价值。

根据双锥光纤成形等效模拟方法, 对于一个固定的加热器及加热方式来说, 双锥光纤几何分布  $d(z)$  函数形式是一定的。它可能是抛物型、指数型或高斯型等。这通过简单的实验测量即可确定。该等效模拟方法把需要知道光纤中的融锥温度分布、光纤粘度这样复杂的很难测量的物理参数简化成只要测量实验易测的熔锥参数  $L_0(T_p)$ 、 $L_h(T_p)$ 、 $L_e$  这样简单的几何问题。

### 3 双锥光纤光学特性的等效模拟

实际上, 双锥光纤的光学特性强烈依赖于双锥光纤的几何分布。一旦几何分布和光纤类

型确定, 双锥光纤的传播特性也就完全确定了。

### 3.1 双锥光纤等效光学模型

由于拉锥, 形成双锥结构的单模光纤的直径(包括芯径)变小, 导致光场渗透至包层。这样, 来自双锥光纤输入端的芯模  $HE_{11}$  模在锥区被转换成包层模  $HE_{11}$  和  $HE_{1m}$  模。在双锥光纤的输出端, 包层模又转换成单模光纤中的芯模  $HE_{11}$  模, 高阶模则在包层中损耗掉。这种模式转换与波长有关, 所以双锥光纤的透射特性也与波长有关。

为了避免分析双锥光纤模式耦合区间模式转换的复杂性, 本文采用等效阶跃不连续模型近似<sup>[13]</sup>。该模型假设, 在锥的斜率小于 Stewart-Love 临界斜率的区间, 符合绝热近似; 在锥的斜率大于 Stewart-Love 临界斜率的区间, 符合突变近似, 此时, 总场保持不变。经推导可得双锥光纤透射谱的周期  $\Lambda$

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{N_b}{\lambda} \quad (5)$$

式中振荡次数  $N_b$  (定义为双锥光纤输出功率与拉伸长度关系曲线中输出功率最大值的个数) 为

$$N_b = \frac{1.251\Lambda}{n_{cl}d_w^2} [L_e + L_0 - 2Z_B] \quad (6)$$

$$d_w = d_0 \exp[-\pi(L_0 + L_e - L_h)^2/8L_0^2] \quad (7)$$

式中  $\lambda$  为光波波长,  $n_{cl}$  为光纤包层的折射率,  $d_w$  为双锥锥腰直径,  $Z_B$  为绝热区长度起点的位置。根据这些十分简单的公式, 即可研究熔锥条件对双锥光纤光学特性的影响, 用以指导研制和应用。

### 3.2 双锥光纤光学特性的理论分析

利用双锥光纤光学特性等效模拟方法, 对双锥光纤的光学特性进行详细的分析。计算所选参数如下: 光纤纤芯半径为  $4 \mu\text{m}$ , 光纤包层半径为  $62.5 \mu\text{m}$ , 包层折射率为 1.46, 光纤相对折射率  $\Delta$  为 0.3%。加热器有效加热区长度  $L_0 = 8 \text{ mm}$ , 加热器有效等温加热区长度  $L_h = 0.1 + 0.1L_e$ 。

#### 3.2.1 场分布

双锥光纤作为光束扩束器或压缩器应用中, 需要了解光场沿轴向的演化。根据前面分析, 在绝热区, 模式特性可以用局部正规模来描述。

图 6 是未拉伸时和拉伸使纤芯径从  $4 \mu\text{m}$  降到  $3.2 \mu\text{m}$  时双锥光纤腰部中心光场的分布, 其中激光波长  $\lambda$  为  $1300 \text{ nm}$ 。从图 6 可以看出, 由于拉伸长度很短, 光场主要集中在双锥光纤的芯层。

在其它工艺条件相同情况下, 随着拉伸长度的增加, 光场从纤芯渗透到包层, 如图 7 所示。这是由于纤芯减小, 使归一化频率  $V < 1$ , 芯模被截止, 纤芯已不起主要导引光的作用, 代之的是包层模在传播。此时, 光束被扩大。随着拉伸长度进一步增加 ( $L_e = 15.7 \text{ mm}$ ), 波导边界完全由包层-空气边界来确定。由于包层直径很小 ( $6.3 \mu\text{m}$ ), 所以光束被缩小。同样可以计算其它工艺参数对光场演化的影响。

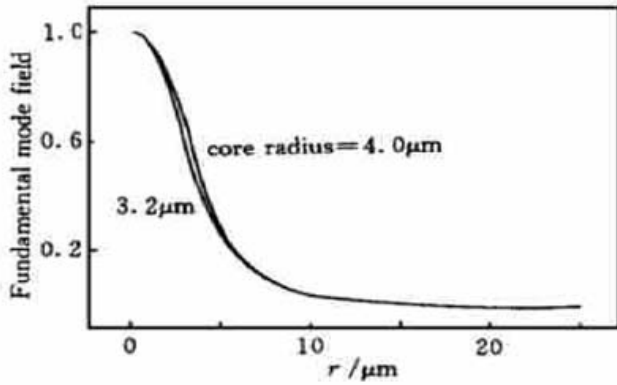


Fig. 6 Field profile of the biconical fiber at the waist with and without slightly tapering

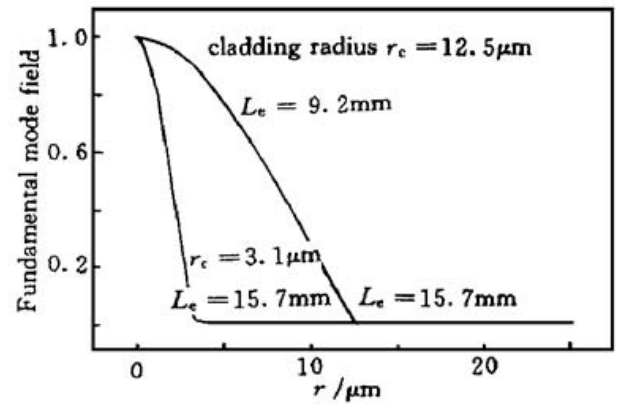


Fig. 7 Field profile of the biconical fiber at the waist with largely tapering

### 3. 2. 2 双锥光纤输出功率振荡特性

当归一化频率  $V > \sqrt{2/\ln S}$  ( $S$  为包层与芯层半径比) 时,  $HE_{11}$  模绝热传输<sup>[1]</sup>, 所以双锥光纤输出功率不出现振荡; 当  $V < \sqrt{2/\ln S}$  时, 出现多模传输<sup>[1]</sup>。由于出现多模传输(主要出现  $HE_{11}$  和  $HE_{12}$  双模传输), 单模输出功率依赖它们的相位差, 所以双锥光纤输出功率出现了随拉伸长度的振荡变化。图 8 是双锥光纤单模输出功率振荡次数与拉伸长度的关系, 其中激光波长  $\lambda = 1523 \text{ nm}$ , 绝热区长度起点的位置  $Z_B = 8 \text{ mm}$ ,  $L_0 = 8 \text{ mm}$ ,  $L_h = 0.1 + 0.1L_e$ 。

从图 8 可以看出, 除了曲线拐弯区域, 振荡次数与拉伸长度近似成线性关系。这一特性对研制工作很有帮助。从工艺角度看, 拉伸长度容易监测和控制。

### 3. 2. 3 双锥光纤的滤波特性

双锥光纤的滤波特性是其最重要的特性之一。理论计算所用的熔锥条件与上面相同。图 9 是拉伸长度  $L_e = 13 \text{ mm}$ 、 $L_0 = 8 \text{ mm}$  时双锥光纤输出的滤波特性曲线, 可以看出, 其周期为  $36 \text{ nm}$ 。

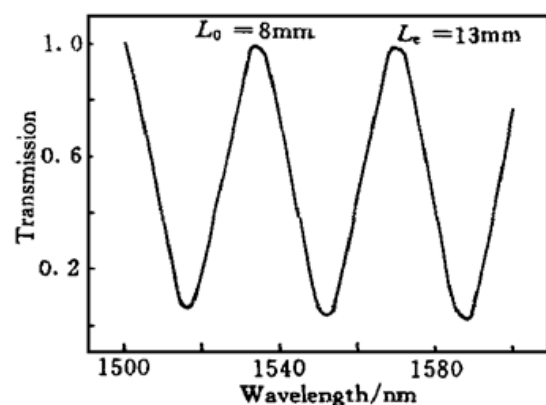


Fig. 9 Filter properties of the biconical fiber at the elongation length  $L_e = 13 \text{ mm}$

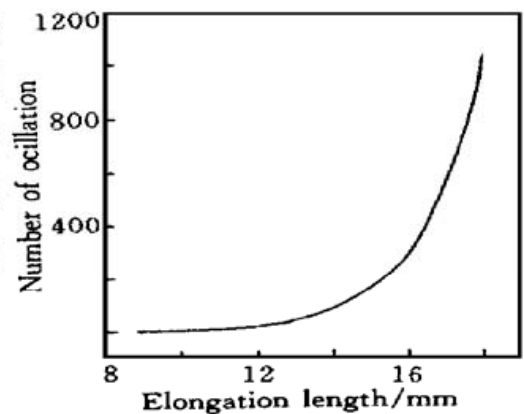


Fig. 8 The number of oscillations in the output power of the biconical fiber with the elongation length

当拉伸长度  $L_e = 15 \text{ mm}$  时, 其周期减小到  $11 \text{ nm}$ , 如图 10 所示。比较图 9 和图 10 可以看出, 在其他熔锥条件相同时, 拉伸长度越长, 滤波谱的周期就越短。对于相同的拉伸长度 ( $L_e = 13 \text{ mm}$ ), 当加热器有效加热区长度  $L_0$  从  $8 \text{ mm}$  减小到  $7 \text{ mm}$  时, 滤波谱的周期就从  $36 \text{ nm}$  减小到  $20 \text{ nm}$ , 如图 11 所示。可见对于相同的拉伸长度, 加热器有效加热区长度越短, 滤波谱的周期就越短。

从 (5) 式可以看出, 周期倒数与振荡次数成正比, 而当振荡次数较多时, 双锥光纤输出功率振荡次数与拉伸长度近似成线性关系。所以周期倒数与拉伸长度也近

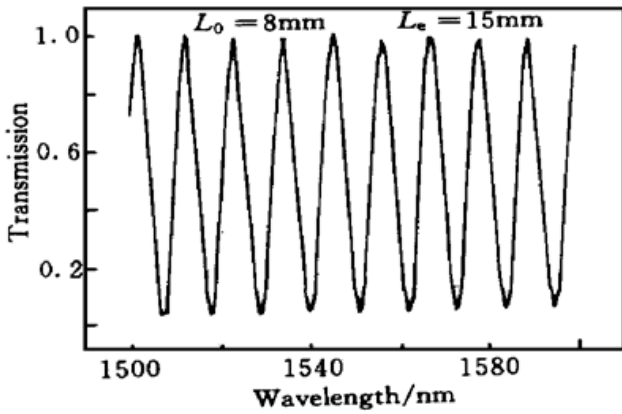


Fig. 10 Filter properties of the biconical fiber at the elongation length  $L_e = 15$  mm and  $L_0 = 8$  mm

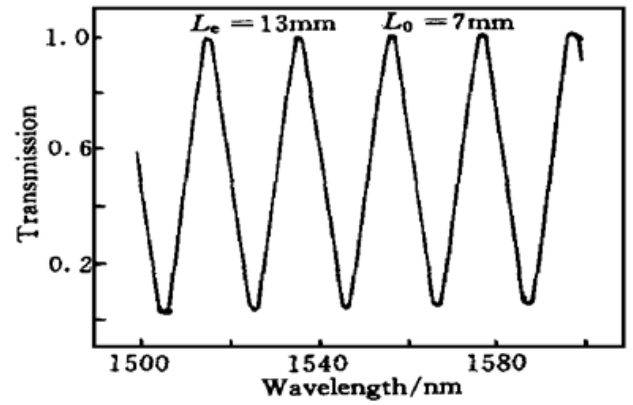


Fig. 11 Filter properties of the biconical fiber at  $L_e = 13$  mm and  $L_0 = 7$  mm

似呈线性关系。实验已证实了这一关系<sup>[12, 14]</sup>。这一特性对工艺参数的确定十分有用。

根据双锥光纤光学特性等效模拟公式(5)式至(7)式计算的三种融锥条件下双锥光纤滤波谱的周期与实测的比较如表 1 所示。可见理论计算的滤波谱周期与实验结果十分吻合。

Table 1. The filtering period of the biconical fiber: comparison between the theory and experiment

fusion condition	$L_0 = 8.1$ mm $L_h = 0.1 + 0.1L_e$ $L_e = 13$ mm, $Z_B = 8$ mm	$L_0 = 8.1$ mm $L_h = 0.1 + 0.1L_e$ $L_e = 14.5$ mm, $Z_B = 8$ mm	$L_0 = 6.4$ mm $L_h = -1 + 0.2L_e$ $L_e = 13$ mm, $Z_B = 6.5$ mm
period (experiment)	36 nm	13 nm	7 nm
period (theory)	34 nm	14 nm	6.6 nm

**结 语** 从双锥光纤和器件的研制及应用角度出发, 提出了一套实用的双锥光纤等效模拟方法, 该方法基于容易测量的研制工艺参数(熔锥条件), 以十分简单的公式定量反映出工艺参数如何影响双锥光纤的传播特性, 它能具体指导双锥光纤和器件的设计研制及应用。根据双锥光纤等效模拟方法进行的数值模拟与实验结果吻合得很好。在具体指导我们的研制及应用工作中起了十分重要的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Black R J, Bourbonnais R. Core-mode cutoff for finite-cladding lightguides. *IEE Pt. J*, 1986, **133**(6) : 377~ 384
- [2] Black R J, Lapierre J, Bures J. Field evolution in doubly clad lightguides. *IEE Pt. J*, 1987, **134**(2) : 105~ 110
- [3] Henry W M, Love J D. Spot size variation in non-adiabatic single mode fibre tapers. *IEE Pt. J*, 1989, **136**(4) : 219~ 224
- [4] Black R J, Bures J, Lapierre J. Finite-cladding fibres:  $HE_{12}$  and local-normal-mode coupling evolution. *IEE Pt. J*, 1991, **138**(5) : 330~ 336
- [5] Love J D, Henry W M, Stewart W J *et al.*. Tapered single-mode fibres and devices Part 1: Adiabaticity criteria. *IEE Pt. J*, 1991, **138**(5) : 343~ 354
- [6] Black R J, Lacroix S, Gonthier F *et al.*. Tapered single-mode fibres and devices Part 2: Experimental and theoretical quantification. *IEE Pt. J*, 1991, **138**(5) : 355~ 364

- [7] Boucouvalas A C, Georgiou G. Tapering of single-mode optical fibers. *IEE Pt. J*, 1986, **133**(6) : 385 ~ 392
- [8] Burns W K, Abebe M, Villarruel C A. Parabolic model for shape of fiber taper. *Appl. Opt.*, 1985, **24** (17) : 2753~ 2755
- [9] Kenny R P, Birks T A, Oakely K P. Control of optical fiber taper shape. *Electron. Lett.*, 1991, **27** (18) : 1654~ 1656
- [10] Lochmann S, Labs J M, Sharma A B. Accurate physical fusion taper shape model for waveguide analysis. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(2) : 1785~ 1786
- [11] 吴芳, 张明华, 黄肇明. 单模光纤双圆锥体的传输特性. *光子学报*, 1997, **26**(2) : 121~ 127
- [12] 陈智浩, 彭江得, 顾东华等. 双锥光纤滤波器的研制. *光学学报*, 1997, **17**(8) : 1117~ 1120
- [13] Lacroix S, Bourbonnais R, Gonthier F *et al.*. Tapered monomode optical fibers: Understanding large power transfer. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(23) : 4421~ 4425
- [14] 陈智浩, 顾东华, 彭江得等. 熔烧温度对双锥光纤光学特性的影响. *中国激光*, 1998, **A25**(3) : 257~ 260

## Modeling of Optical Biconical Fibers

Chen Zhihao

(*Institute of Lasers, Fujian Normal University, Fuzhou 350007*)

Gu Donghua Peng Jiangde Zhou Bingkun

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

(Received 1 June 1998)

**Abstract** A Gaussian-equivalent model of taper shape is proposed for the simulation of biconical fibers in order that the biconical fibers can be designed and fabricated easily. This model is completely characterized from the easily measured parameters. The modeling can be used to direct taper fabrication and to analyze optical properties of biconical fibers. Simulation results agree well with the experimental data.

**Key words** biconical fiber, modeling, tapering.