

文章编号:1002-2082(2012)03-0638-06

# 锥形光纤模场直径极小值特征研究

任建国, 胡正良, 杨华勇, 张学亮, 胡永明

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**模场直径是光纤波导基模的特征参量。单模光纤中的功率密度与模场直径成反比。随着光纤激光器单模输出功率的不断攀升, 纤芯中的功率密度不断增加, 过高的功率密度会使光纤波导产生光学损伤和热损伤。基于锥形光纤模场分布近似模型, 研究发现不同参数的拉锥光纤模场直径最小值位置对应的归一化频点具有规律性。采用有限差分波束传播法(FD-BPM)对不同波长、不同数值孔径下纤芯直径和模场直径的对应关系进行模拟, 结果表明:模场直径最小值位置在归一化频率 1.8 附近, 与光纤参数和波长的选取没有直接关系。这个特征参数可为高功率激光在光纤中功率密度最大值位置的快速确定提供依据, 也为光纤光学理论增加了新的内涵。

**关键词:**光纤光学; 阶跃光纤; 模场直径极小值; 波束传播法

**中图分类号:** TN253

**文献标志码:** A

**doi:**10.5768/JAO201233.0308002

## Characteristics of minimum mode-field diameter in tapered fiber

REN Jian-guo, HU Zheng-liang, YANG Hua-yong, ZHANG Xue-liang, HU Yong-ming

(College of Opto-Electric Science and Engineering, National University of

Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Mode-field diameter (MFD) is a characteristic parameter of fundamental mode in fiber-optics waveguide. Power density in single-mode fiber is inversely proportional to the MFD. As the single-mode output power of fiber laser increasing, the power density in the fiber increases intensely. Much higher power density can cause optical damage and thermal damage of fiber waveguide. Based on the approximate mode-field distribution model, a character was found that the minimum MFDs in tapered fibers with different original fiber parameters corresponded to an invariable fiber normalized frequency. The relations between the core diameters and MFDs were simulated by the finite difference beam propagation method (FD-BPM) in different wavelengths and in different core numerical apertures (NA). The results demonstrated the supposition presented above and indicated that the minimum MFDs corresponded to the normalized frequency 1.8 nearly, without direct relations with the wavelength and fiber parameters. The results provide theoretical reference for the quick determination of the point of maximum power density in fiber, especially in high power case, as well as add new content to the fiber optics theories.

**Key words:** fiber optics; step-index fiber; minimum mode-field diameter; beam propagation method

**收稿日期:**2011-11-29; **修回日期:**2012-01-31

**基金项目:**国家自然科学基金(61077019)

**作者简介:**任建国(1979-),男,山西交口人,博士研究生,工程师,主要从事光波导仿真和制作方面的研究工作。

E-mail: r-jg@163.com

## 引言

近年来, 高功率光纤激光以其高转换效率、高光束质量等特点, 在通信、材料处理、医疗等领域得到了广泛的应用。目前, 单纤单模输出功率已达 10 kW<sup>[1]</sup>。高功率激光聚集在极小的纤芯范围内功率密度极大, 容易使光纤产生光学损伤和热损伤<sup>[2]</sup>。单模光纤中功率密度和模场直径成反比。光纤激光系统中常用的模场适配器<sup>[3]</sup>、光纤耦合器<sup>[4]</sup>、分束/合束器等都与锥形光纤有关。锥形单模光纤中随着波导尺寸的变化, 基模模场直径随之变化。很多文献<sup>[5-6]</sup>中都提到单模光纤拉锥时随着芯径的减小, 模场直径刚开始会略有下降然后迅速增加, 即光纤中的模场直径存在一个极小值, 但都只限于定性的认识。

本文从标准光纤耦合器模场分布的近似模型<sup>[7]</sup>出发, 研究发现模场直径的极小值位置和纤芯归一化频率有着特定的对应关系。继而用有限差分光束传播法(FD-BPM)对阶跃光纤模场直径极小值位置和纤芯归一化频率的对应关系进行了深入研究, 证实并修正了近似模型得出的结果, 找到了模场直径极小值对应的纤芯归一化频率。所得结论在实际应用和理论研究方面都有重要的意义。

## 1 模场分布近似模型

标准单模光纤耦合器由两根光纤熔融拉锥而

成, 外形如图 1 所示, 由腰区及其两侧的锥区组成。其外径沿纵向呈梯度(锥型)缓慢变化, 每根光纤不再能够作为单独波导进行研究, 是一种非正规的双纤复合波导, 有着自己的本征超模<sup>[8-9]</sup>, 其耦合效应基于倏逝场耦合理论<sup>[9]</sup>。复合波导的本征超模由单根光纤基模的线性叠加构成, 分为同相模和反相模。文献[7]基于适当的几何模型构建了标准熔锥型单模光纤耦合器连续渐变的模场分布, 其核心是单根锥形光纤中的模场分布。这里借用该场分布模型分析耦合器中模场分布的特点。

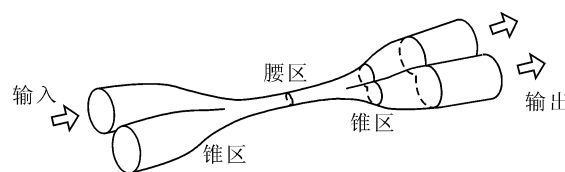


图 1 光纤耦合器示意图

Fig. 1 Schematic of fused-tapered fiber coupler

### 1.1 几何模型

光纤中的模场分布与几何结构密切相关。未拉锥光纤纤芯半径为  $A$ , 包层半径为  $B$ 。熔融拉锥后, 任意位置的纤芯半径为  $a$ , 包层半径为  $b$ , 它们都是位置参数  $z$  的函数。

根据拉伸过程中体积守恒, 单根光纤的拉锥曲线可表示为<sup>[10]</sup>

$$b(z) = \begin{cases} b_0 & |z| \leq W/2 \\ b_0 \exp[-|z|/W - 1/2] & |z| > W/2 \text{ \& } |z| \leq (W+L)/2 \\ B & |z| \geq (W+L)/2 \end{cases} \quad (1)$$

即将耦合器分为 3 部分: 腰区、锥区和标准区。 $L$  为拉伸长度,  $W$  为腰区宽度。腰区外径恒定,  $b_0 = B \exp[-L/(2W)]$ , 与拉伸长度有关; 锥区的横截面尺寸沿纵向缓慢变化; 标准区横截面尺寸等于光纤原始尺寸。图 2(a) 为拉伸曲线示意图, 其中  $z$  是光波传输方向。

假设光纤在拉伸过程中包芯比不变, 则任意位置处纤芯半径由下式得到:

$$a(z) = A/B \cdot b(z) \quad (2)$$

单根光纤的横截面如图 2(b) 所示, 其中  $2b$  为包层直径,  $r$  为考察点  $P(x, y)$  到光纤中心的距离,  $r^2 = x^2 + y^2$ 。

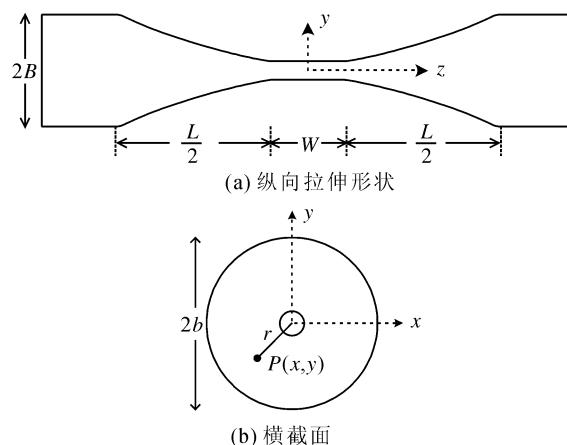


图 2 耦合器单根光纤的几何模型

Fig. 2 Geometrical configuration of individual fiber within a coupler

## 1.2 单根光纤中的模场

在腰区,复合波导由两平行熔锥光纤相互熔合组成,其横向尺寸很小,纤芯很细。为简化分析,通常的做法是完全忽略纤芯的影响,把腰区当作包层为纤芯,外部介质为包层的多模波导来处理。但文献[11]指出忽略纤芯对光纤模场的分布形状以及耦合长度有着重要的影响,在腰区内考虑纤芯的影响,单根光纤中的模场近似为三角分布 $\phi_\Delta$ ,组成腰区的单根光纤中的归一化功率分布可表示为<sup>[7]</sup>

$$\phi_\Delta^2 = 6 \cdot (\pi b_0^2)^{-1} \cdot (1 - r/b_0)^2 \quad (3)$$

标准区为标准单模光纤,其模场分布的精确解为贝塞尔函数,由于贝塞尔函数和高斯函数极为接近,在实际应用中,常常用拟合得到的高斯函数来近似表示,这样可以使很多计算大为简化。标准区单根光纤中的归一化功率分布可表示为<sup>[9]</sup>

$$\phi_G^2 = (\pi r_0^2)^{-1} \cdot \exp(-r^2/r_0^2) \quad (4)$$

式中 $r_0$ 是高斯分布的模场半径,是功率下降到峰值的 $e^{-1}$ 时对应的半宽度,由下式求出<sup>[9]</sup>:

$$V_1^2 \cdot \exp(-a^2/r_0^2) + V_2^2 \cdot \exp(-b^2/r_0^2) - 1 = 0 \quad (5)$$

式中: $a$ 为纤芯半径; $b$ 为包层半径; $V_1$ 和 $V_2$ 分别是纤芯和包层的归一化频率, $V_1 = k_0 a \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ , $V_2 = k_0 b \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , $k_0 = 2\pi/\lambda$ , $\lambda$ 为真空中的光波长, $n_0$ 、 $n_1$ 和 $n_2$ 分别是纤芯、包层和外部介质的折射率。

基于耦合器波导外形尺寸沿轴向缓变的特点和模场连续变化的物理事实,单根光纤中的模场在锥区,由腰区的三角分布逐渐过渡到标准区的高斯分布。为此用三角分布和高斯分布的加权叠加形式将3个区域的功率分布统一表示如下<sup>[7]</sup>:

$$\phi^2 = (1 - F) \cdot \phi_\Delta^2 + F \cdot \phi_G^2 \quad (6)$$

由于光纤的模场分布与其横向尺寸密切相关,

采用归一化的包层半径作为加权因子,其定义为 $F = (b - b_0)/(B - b_0)$ ,腰区 $F = 0$ ,标准区 $F = 1$ 。

(6)式中 $\phi_\Delta$ 和 $\phi_G$ 相关的包层半径和高斯模场半径都是坐标 $z$ 的函数 $b(z)$ 和 $r_0(z)$ ,因此 $\phi$ 也是 $z$ 的函数。

## 2 基于近似模型计算模场半径

取标准单模光纤的参数为: $A = 4 \mu\text{m}$ , $B = 62.5 \mu\text{m}$ , $n_0 = 1.461$ , $n_1 = 1.458$ , $n_2 = 1$ 。计算波长 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 。腰区宽度 $W = 5 \text{ mm}$ ,这样当拉伸长度为 $L = 13.8 \text{ mm}$ 时,根据(1)式和(2)式,腰区包层半径 $b_0 = 15.6 \mu\text{m}$ ,纤芯半径 $a_0 = 1 \mu\text{m}$ 。

由单根光纤中的模场模型(方程(6))可以看出,尽管不同位置的模场分布不同,但仍然与标准单模光纤中的模场分布类似,即都是中间最大,沿径向逐渐减小到零的轴对称形式。仿照基模高斯分布模场半径的定义方法,认为耦合器单根光纤中任意位置的功率衰减到峰值的 $e^{-1}$ 时对应的半宽度,称之为该位置对应的模场半径 $r_{\text{field}}$ 。模场半径反映了光纤中能量的集中程度。光纤中的功率密度和模场半径呈近似平方反比关系。令光纤中传输的总功率为1,则功率密度 $\alpha$ 可以表示为

$$\alpha = (\pi r_{\text{field}}^2)^{-1} \quad (7)$$

归一化频率 $V$ 是光纤的特性参数,其定义为<sup>[9]</sup>

$$V = 2\pi/\lambda \cdot a \cdot \text{NA} \quad (8)$$

式中: $a$ 为纤芯半径; $\text{NA} = \sqrt{n_0^2 - n_1^2}$ 为光纤的数值孔径,未拉锥光纤的归一化频率 $V_0 = (2\pi/\lambda) \cdot A \cdot \text{NA}$ 。根据(6)式和(7)式以及模场半径的定义,我们编程计算了5种 $V_0$ 不同的光纤拉制而成的耦合器单根光纤中功率密度的分布情况。工艺参数同上,光纤参数如表1所示。

表1 5种光纤参数

Table 1 5 fiber parameters

光纤编号	$A$	$B$	$n_0$	$n_1$	NA	$V_0$
1				1.460 0	0.054 0	1.281 4
2				1.459 5	0.066 2	1.569 3
3	$4 \mu\text{m}$	$62.5 \mu\text{m}$	1.461	1.459 0	0.076 4	1.811 9
4				1.458 5	0.085 4	2.025 6
5				1.458 0	0.093 6	2.218 8

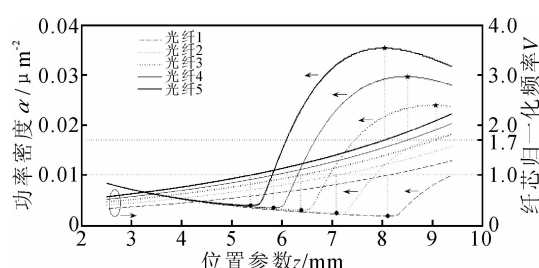


图3 锥区功率密度和纤芯归一化频率的对应关系

Fig. 3 Power density and core normalized frequency in taper region

图3中画出了这5种光纤拉制的耦合器单根光纤锥区功率密度的分布情况,图中右纵坐标为归一化频率,横坐标为耦合器纵向坐标, $2.5\text{ mm} \leq z \leq 9.4\text{ mm}$ 对应于耦合器锥区范围(图2)。可以看出从标准区到腰区,尽管光纤的外径是缓慢减小的,但功率密度并不是单调递增,而是存在极大值或极小值;外径最小的腰区并不是功率密度最大的地方;功率密度的最大值位于锥区底部附近; $V_0$ 越小,功率密度的最大值越靠近锥区底部。

对比图3中锥区纤芯归一化频率和光功率密度的分布,发现由光纤1和光纤2( $V_0 < 1.7$ )拉制的耦合器,功率密度最大值位于锥区底部(大头端);由光纤3、光纤4和光纤5( $V_0 \geq 1.7$ )拉制的耦合器,功率分布的极大值(亦是最大值)都位于 $V = 1.7$ 附近。5种光纤拉制的耦合器功率密度的极小值(亦是最小值)都位于 $V = 1$ 附近。

### 3 有限差分波束传播法(FD-BPM)数值模拟

上述分析结果具有规律性,即用归一化频率大于1.7的光纤拉制的耦合器,其模场分布的最小值都在1.7附近。这个结果虽然令人欣喜,但毕竟是由近似模型得到的,不具有一般性。为了验证其正确性和适用范围,用有限差分波束传播法(FD-BPM)结合透明边界条件<sup>[12]</sup>,计算了波长1 064 nm时,不同数值孔径下不同纤芯直径对应的模场直径,如图4(b)所示。并在模场直径极小值附近做了精细扫描,得到了相应纤芯直径的确切数值。表2列出了模场直径最小值位置对应的

归一化频率。结果证实了近似模型的分析结果,模场直径最小值的确对应一个恒定的归一化频率,如表2所示。不同的是这个归一化频率应该由1.7修正为1.8。

进而我们还计算了不同波长下的分布规律。波长在980 nm,1 310 nm,1 550 nm时,4种数值孔径下纤芯直径和模场直径的对应关系如图4(a)(c)(d)所示。相应的模场直径最小值位置对应的归一化频率值计算结果也全都在表2中列出。从表2中可以看出,结果都在1.8附近,相互之间只有微小的差别,可以认为是由数值计算的误差引入。由此得出:不同波长下,不同参数的阶跃光纤中模场直径最小值位置对应的归一化频率都在1.8附近。这个值可以作为阶跃光纤模场直径最小值的特征参数。

表2 MFD最小值对应归一化频率

Table 2 Minimum MFDs corresponding normalized frequencies

波长/nm	NA	MFD最小值 对应纤芯直径/ $\mu\text{m}$	MFD最小值位置 对应归一化频率
980	0.06	9.4	1.808 0
	0.08	6.9	1.769 6
	0.10	5.55	1.779 2
	0.12	4.65	1.788 8
1 064	0.06	10.1	1.789 3
	0.08	7.55	1.783 4
	0.10	6.1	1.786 3
	0.12	5.05	1.789 3
1 310	0.06	12.5	1.798 6
	0.08	9.4	1.803 4
	0.10	7.5	1.798 6
	0.12	6.25	1.798 6
1 550	0.06	14.95	1.818 1
	0.08	11.0	1.783 6
	0.10	8.75	1.773 5
	0.12	7.45	1.812 0

从图4中也可以看出,光纤的归一化频率低于1.8时,随着归一化频率的减小,模场直径急剧增加。而当归一化频率高于1.8时,随着归一化频率的增加,模场直径近似以2/3的斜率线性增加,变化相对较缓。纤芯直径和数值孔径都相同时,波长较大时模场直径较大。

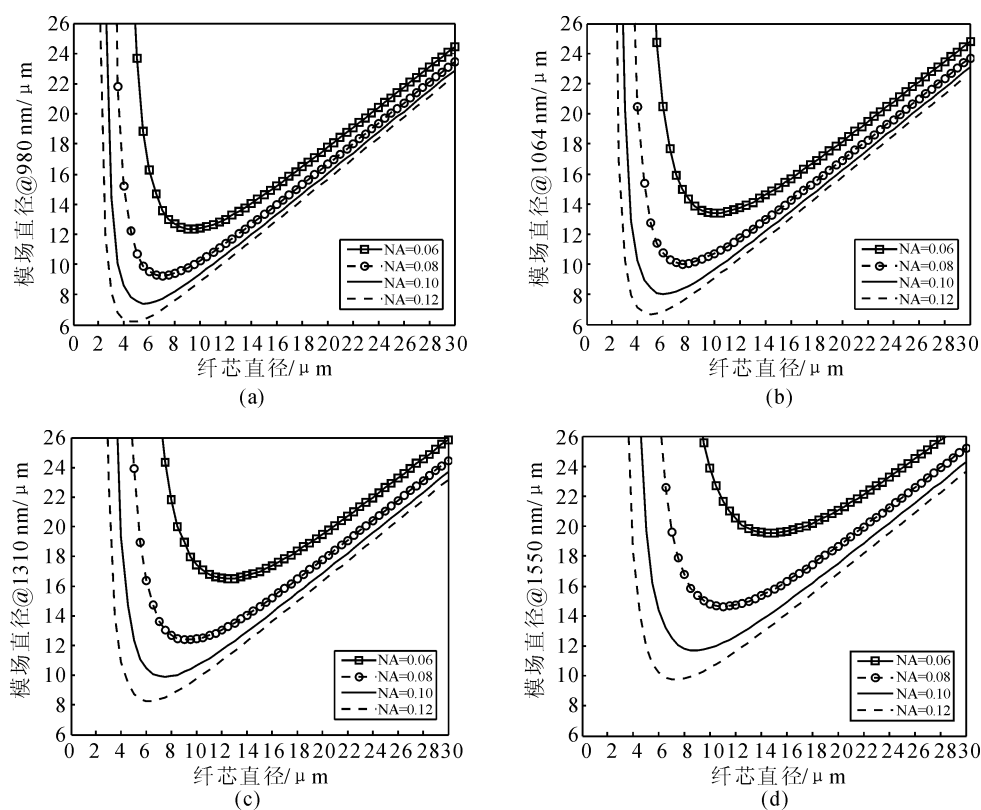


图4 不同波长下,不同数值孔径的光纤纤芯直径和模场直径的对应关系

Fig. 4 Relations between core diameter and MFD in different core NAs and different wavelengths

#### 4 总结

本文基于标准光纤耦合器模场分布的近似模型分析了拉锥光纤中模场直径的分布特点。分析发现模场直径最小值对应一个恒定的归一化频点。为了验证其正确性和适用范围,采用有限差分波束传播法(FD-BPM)计算了不同波长、不同光纤参数下模场直径最小值和归一化频率的对应关系,结果表明阶跃光纤中模场直径的最小值位置对应于归一化频率1.8附近,与波长及光纤参数的选择没有直接关系。这个值可以作为模场直径最小值的特征参数。根据单模光纤中功率密度和模场直径成反比的关系,运用此特征参数可以直接确定出给定光纤拉锥结构中功率密度的最大值位置,可为高功率下光纤波导特性的研究提供理论指导。这个特征参数的确立也为光纤光学理论增加了新的内涵。

#### 参考文献:

[1] RICHARDSON D J, NILSSON J, CLARKSON W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society

of America B, 2010, 27(11): B63-B92.

- [2] CARTER A, SAMSON B, MACHEWIRTH D P, et al. Damage mechanisms in components for fibre lasers and amplifiers[J]. SPIE, 2005, 5647: 561-571.
- [3] FAUCHER M, LIZE Y K. Mode field adaptation for high power fiber lasers[C]. Baltimore: OSA/CLEO, 2007.
- [4] 鄢达, 李铮, 唐丹.  $2 \times 2$  熔锥型单模光纤耦合器的模型[J]. 光子学报, 2003, 32(11): 1316-1320.  
FENG Da, LI Zheng, TANG Dan. Model of  $2 \times 2$  fused tapered single-mode-fiber coupler [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(11): 1316-1320. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 薛春荣, 祝生祥, 肖志刚, 等. 直锥形光纤传输性质的研究[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 45-49.  
XUE Chun-rong, ZHU Sheng-xiang, XIAO Zhi-gang, et al. The study for transforming property of right cone fiber[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 45-49. (in Chinese with an English abstract)
- [6] WANG B S, MIES E. Review of fabrication techniques for fused fiber components for fiber lasers [J]. SPIE, 2009, 7195: 71950A-71950A-11.
- [7] 任建国, 胡永明, 张学亮, 等. 熔锥型单模光纤耦合器的一致性模型[J]. 半导体光电, 2011, 32(1):

- 18-23.  
REN Jian-guo, HU Yong-ming, ZHANG Xue-liang, et al. A united model of fused single-mode fiber coupler[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2011, 32 (1): 18-23. (in Chinese with an English abstract)
- [8] LACROIX S, GONTHIER F, BURES J. Modeling of symmetric  $2 \times 2$  fused-fiber couplers[J]. Applied Optics, 1994, 33(36): 8361-8369.
- [9] SNYDER A W, LOVE J D. Optical waveguide theory[M]. London: Chapman and Hall, 1983.
- [10] EISENMANN M, WEIDEL E. Single-mode fused biconical couplers for wavelength division multiplexing with channel spacing between 100 and 300 nm [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6 (1): 113-119.
- [11] WRIGHT J V. Variational analysis of fused tapered couplers[J]. Electronics Letters, 1985, 21(23): 1064-1065.
- [12] OKAMOTO K. Fundamentals of optical waveguides [M]. Oxford: Elsevier, 2006.