

多模锥形光纤耦合与出光特性的研究

朱永涛,张书云,孔德超,毛海涛,杜章永,李方正

(河南大学物理与电子学院,河南 开封 475001)

摘要:从理论和实验两方面研究了多模锥形光纤锥端的特性。用射线理论分析了不同锥角大小条件下锥端光线传输特性,推导出了锥角大小与锥端孔径角及出光发散角的关系。按照理论指导制备了不同锥角的锥形光纤,通过激光二极管与锥形光纤耦合等实验验证了理论的正确性。

关键词:锥形光纤;孔径角;出光发散角;耦合效率

中图分类号:TN253

文献标识码:A

Coupling and Radiation Properties of the Tapered Fiber

ZHU Yong-tao, ZHANG Shu-yun, KONG De-chao, MAO Hai-tao,

DU Zhang-yong, LI Fang-zheng

(School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: The properties of multimode tapered fiber end are studied in this paper. Based on light ray theory the transmission property of the tapered fiber end on different tapered angle is analyzed. The tapered end aperture angle versus the tapered angle and the tapered end radiation angle versus the tapered angle are obtained through the analysis. Finally a best design for coupling has been suggested. In the experiment, according to the theory analysis tapered fibers of different angle are fabricated by means of melting and pulling the end of optical fiber. The correctness of the theory is validated through the experiments.

Key words: tapered fiber; aperture angle; light radiation angle; coupling efficiency

1 引言

随着光电子技术的飞速发展,锥形光纤不仅广泛应用于医学、近场光学显微镜以及光孤子通信,而且还可以融合成光锥作为传像器件。熔锥型光纤器件主要是靠锥区的特殊性质来实现光功率的分配、复用/解复用、功率耦合等方面的功能,因此研究锥型光纤器件的锥区性质是非常必要的,不但有利于熔锥型光纤器件性能的提高,也可以进一步促进光纤器件的发展^[1]。本文的主要工作是根据射线理论准确地分析了光线在锥形光纤端的传输特性,导出了锥角与锥端孔径角的关系及锥角与锥端出光发散角的关系。同时,对自制的锥形光纤孔径角进行了测量并进行了锥形光纤与激光二极管的耦合实

验,结合理论对实验结果进行了分析。

2 多模锥形光纤传输特性分析

数值孔径(NA)及其对应的孔径角一直是影响光源与光纤耦合效率大小的重要因素,NA表示光纤接受和传输光的能力,NA越大,光纤接受光的能力越强,从光源到光纤的耦合效率越高^[2]。而锥形光纤可以改变NA,增大孔径角,被用于耦合以提高耦合效率,在前面的研究中已经被提到并且取得了不错的效果^[3],因此我们需要进一步分析锥形光纤的特性,下面主要从锥形光纤锥端平面出光发散角

作者简介:朱永涛(1983-),男,在读硕士,主要从事激光应用和光纤技术方面的研究。E-mail: zhuyt2004@163.com

收稿日期:2007-09-11; **修订日期:**2007-11-09

及其入射孔径角两方面讨论。

2.1 锥端最大出光发散角的推导

如图1所示,根据全反射原理可以推算出临界角 ϕ_c 满足^[1]:

$$\sin\phi_c = \frac{n_2}{n_1} \text{ 或 } \sin\phi_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (1)$$

式中, $\phi_0 = 90^\circ - \phi_c$; n_1 为光纤芯径折射率; n_2 为光纤包层折射率。

首先利用射线理论分析锥端出光特性,如图2所示,暂不考虑光线在包层中传播,设纤芯锥角为 2θ ,从特殊光线入手,作出在锥端传播的特殊光线 L_1 , L_1 为满足全反射且无限趋近于临界光线的一条光线。为了便于分析计算,这里取极限条件,设光线 L_1 与法线的夹角大小为临界角 ϕ_c (以下的分析与此类同),可以看出 L_1 为光纤内能从锥端面出射的与光纤中轴成最大角度的光线,对应的折射角为 φ_0 ,则 φ_0 即为所求的最大出光发散角。

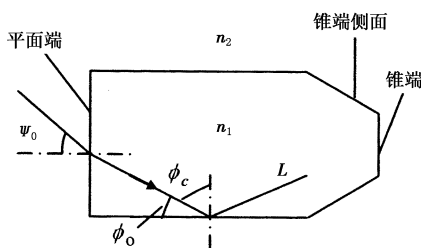


图1 光纤全反射光路图

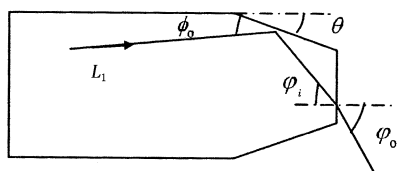


图2 出光发散角的推导辅助光路图

由图2几何关系可以得出:

$$\varphi_i = \phi_0 + \theta \quad (2)$$

上式说明 φ_i 件的大小由纤芯半锥角 θ 大小决定, θ 越大, φ_i 越大, 对应的 φ_0 也就越大。

结合光线在光纤内传播情况,由锥形光纤传输光射线理论分析可知^[2],随着锥角的增大,光线在锥形光纤锥端侧面反射次数不断减少,锥角增大到一定程度时,反射次数降为零,这时所有光线都从侧面和锥端直接出射,锥端出光发散角大小等于光纤孔径角 ψ_0 。

下面讨论光线在锥形光纤侧面反射次数有且只有一次时 θ 与出光发散角 φ_0 的关系,如图3所示, L_2 为锥形光纤内反射次数有且只有一次的

3 中各角关系如下:

$$\theta = \phi_0 + \gamma \quad (3)$$

$$\sin\varphi_0 = \frac{n_1 \sin(\phi_0 + \theta)}{n_0}$$

式(3)说明 θ 随着 γ 角的增大而增大,又有 $\gamma \leq \phi_0$, 所以 $\gamma = \phi_0$ 时 θ 有最大值 $2\phi_0$, 代入式(2)得到最大值 $\varphi_i = 3\phi_0$, 对应的最大值 $\varphi_0 = \arcsin \frac{n_1 \sin 3\phi_0}{n_0}$ 。

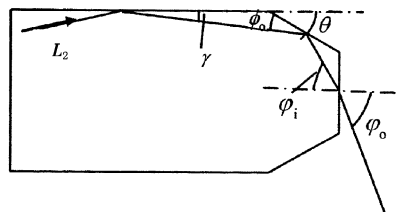


图3 锥端侧面一次反射光路图

至此得一个重要的结论,当纤芯锥角大小为 $4\phi_0$ 时,锥形端有最大出光发散角 φ_0 , $\varphi_0 = \arcsin \frac{n_1 \sin 3\phi_0}{n_0}$ 。

2.2 锥端孔径角的推导

光纤锥形端的孔径角与出光发散角有所不同,下面先分析通过锥形端面入射到光纤内的光线。

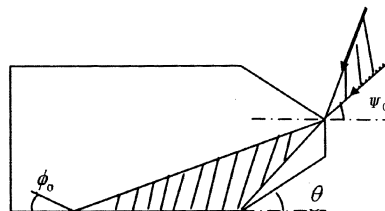


图4 孔径角的推导辅助光路图

当 $\theta \geq \phi_0$ 时,如图4所示,总会有部分光线不满足全反射条件,即入射角度大于 ψ_0 的部分入射光线,包括图4中斜线部分,这部分光线会溢出包层不能在光纤中传播,所以这时锥端和光纤平面端孔径角一样,都是 ψ_0 ,锥端不能达到增大孔径角的效果。

当 $\theta < \phi_0$ 时,如图5所示,取特殊光线 L_3 , L_3 与锥端侧面的夹角为 ϕ_0 ,与锥端侧面交点为锥端侧面与光纤纤芯侧面的交点,光线 L_3 与另一侧面交点A,取过A点的截面为锥形端面,光线 L_3 经锥形端面

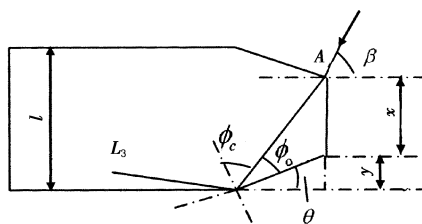


图5 特定锥角条件下锥端入射光线简图

入射,设入射角为 β ,由上面出光发散角的分析可知,入射角小于 β 的光线都可以进入光纤并在光纤中传播, β 即为对应锥形端的孔径角。

利用折射定理求出此时 β :

$$\beta = \arcsin \frac{n_1 \sin(\phi_0 + \theta)}{n_0}$$

同时利用图5中几何关系列出方程组,求出纤芯锥形端面直径 d ,锥长 h 。

$$\begin{cases} x + 2y = l \\ \frac{y}{\tan\theta} = \frac{x + y}{\tan(\phi_0 + \theta)} \end{cases}$$

式中, l 为纤芯直径; x 为锥形端面直径。

求解方程组得到:

$$x = \frac{l[\tan(\phi_0 + \theta) - \tan\theta]}{\tan(\phi_0 + \theta) + \tan\theta}$$

$$y = \frac{l \tan\theta}{\tan(\phi_0 + \theta) + \tan\theta}$$

进而得出:

$$d = \frac{l[\tan(\phi_0 + \theta) - \tan\theta]}{\tan(\phi_0 + \theta) + \tan\theta}$$

$$h = \frac{l - \frac{l \tan\theta}{\tan(\phi_0 + \theta) + \tan\theta}}{\tan(\phi_0 + \theta)}$$

我们对锥形端面位置选取做进一步的分析,这里把图5中所取的锥端面称为与 θ 对应的最大锥端面:

(1)端面向左移动,虽然增大了端面面积,但是 2β 范围内有部分入射光不满足全反射条件,孔径角 2β 没有了意义,这里不再做具体分析。

(2)端面向右移动, 2β 仍为对应的孔径角,但是耦合端面面积减小,不利于光纤的耦合要求。

至此我们可以得出这样的结论:当锥形光纤纤芯半锥角 $\theta \geq \phi_0$ 时,锥形端孔径角和光纤平面端孔径角相同,不能达到增大孔径角的效果,当锥形光纤纤芯半锥角 $\theta < \phi_0$ 时,锥形端孔径角为 $\beta = \arcsin \frac{n_1 \sin(\phi_0 + \theta)}{n_0}$,这时锥形端孔径角随纤芯锥角的增大而增大,但此时锥形端面最大面积必须随着锥角的增大而不断减小。

3 实验检测与数据分析

制作锥形光纤的方法通常有三种:一是研磨,二是化学溶液腐蚀,三是熔融拉锥^[4]。实验中我们综合两种方法制作出满足需要的锥形光纤,光纤在熔

融拉锥机上拉锥,通过控制燃烧气流的流量,拉伸速度,拉伸长度等参数可以得到锥角大小不同的光纤,然后通过光纤研磨机磨出锥端平面^[5]。实验所用光纤都是标准多模阶跃型光纤,其基本参数为: $n_1 = 1.469$, $n_2 = 1.412$, $\phi_0 = 16^\circ$,包层直径 $125\mu\text{m}$,纤芯直径 $62.5\mu\text{m}$ 。锥端结构如图6所示,从图6中几何关系可以推出:

$$D = 2d = \frac{2l[\tan(\phi_0 + \theta) - \tan\theta]}{\tan(\phi_0 + \theta) + \tan\theta}, \tan\sigma = 2\tan\theta$$

实验中分别从锥端出光发散角和LD与锥形光纤的耦合两个方面对锥形光纤的特性进行了检测。

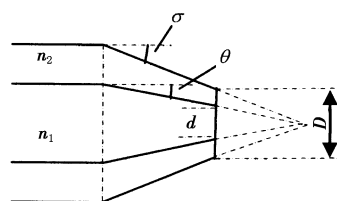


图6 光纤锥形端结构图

3.1 锥端出光发散角的测量

锥端出光发散角利用分光计进行测量^[6],如图7所示,将光纤端面放在载物台中心上,并使端面与载物面垂直,转动刻度圆盘同时观察望远镜内的光点,记下光点消失时该处的角度值 φ_1 ,然后反转刻度圆盘,记下另一光点消失处的角度值 φ_2 ,则出光发散角为 $|\varphi_1 - \varphi_2|/2$ 。测量结果如图8所示,从表中可以看出锥端的发散角随锥角的增大而增大,当锥角 90° 左右时,发散角理论值也达到 90° ,实际测量值也达到了 70° ,相对于光纤平面端发散角增大了3~4倍。这种大角度发散角锥形光纤将在激光医疗、装饰装潢、通信等领域有广阔的应用前景。

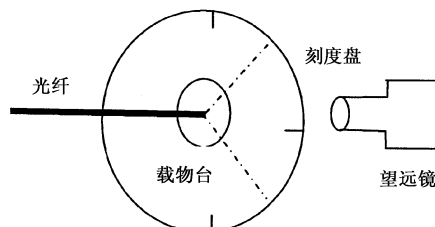


图7 锥端出光发散角测试图

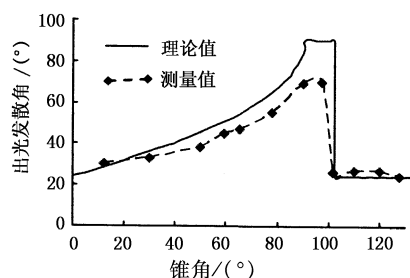


图8 锥角与出光发散角的关系

3.2 LD与锥形光纤的耦合实验

研究中所使用的LD(TO-18封装)参数为: $\lambda=650\text{nm}$, $\theta_{\perp}=32^{\circ}$, $\theta_{\parallel}=10^{\circ}$, 输出功率为5~30mW。测量耦合效率时,可以先用一个光功率计测出LD的总输出功率 P_0 ,然后在测量出经光纤耦合后的出纤功率 P_1 ,进而可以计算出耦合效率 η 。光纤和LD耦合时,光纤锥形端固定在一个五维微调节架上,实现其与光源的精密调整,以保证能测出最大的耦合效率^[7]。实验光路图如图9,数据记录如表1。

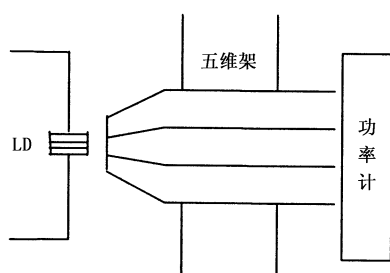


图9 LD与锥形光纤耦合光路图

表1 不同锥角对应的实测耦合效率

锥角 $\sigma/(^{\circ})$	P_0/mW	P_1/mW	$D/\mu\text{m}$	$\eta/\%$
20	23.54	6.26	45	26.6
36	21.47	7.66	30	35.7
50	25.62	16.01	42	62.5
59	23.56	10.71	28	45.5
59	22.44	17.10	40	76.2
59	21.29	9.28	56	43.6
64	23.58	9.29	43	39.4
78	24.65	10.50	45	42.6
78	23.83	9.65	60	40.5
105	21.04	9.70	42	46.1
112	23.67	9.35	38	39.5

表1给出了实验过程中不同锥角及锥端直径条件下对应的耦合效率,可以看出在锥角为 59° 耦合效率最高,超过 60° 耦合效率迅速下降很多,这可能和锥形端的入射孔径角有直接的关系,按照理论分析,当纤芯锥角小于 32° ,即对应的光纤锥角小于 60° 时,锥端入射孔径角不断增大,当纤芯锥角大于 32° ,即对应的光纤锥角大于 60° 时,入射孔径角等于平端光纤孔径角, 60° 度左右孔径角有一个突变,从实验数据上可以看出,耦合效率受锥角及其对应的入射孔径角的影响很大,同时也从侧面反映出了理论分析的正确性。影响耦合效率的另一个因素是锥端直径 D 的大小,我们也对同一锥角下不同锥端直径做了耦合实验,测量数据显示端面

直径过小或过大都会降低耦合效率,锥端直径取 $40\sim 50\mu\text{m}$ 最佳。

4 结论

本文的主要工作是通过射线理论对光纤锥形端出光特性进行了系统分析,推导出了锥角大小与出光发散角及孔径角的具体关系,通过实验测出了锥形端出光发散角,理论计算和实验测量基本吻合,由于边缘部分光线偏弱,使得测量值小于理论计算值。在LD与光纤锥形端的耦合实验中,没有考虑菲涅耳反射损耗等因素,使得耦合效率偏低^[8],可以通过在锥形端面上镀减反射膜来提高耦合效率,从实验和理论都可以看出锥角和锥形端面的大小对耦合效率有很大影响。另外,本文射线理论分析方法只限于多模光纤,因为单模光纤芯径太小,必须用波动理论分析。通过理论分析可以得到最优化的锥形光纤设计,从而有利于锥形光纤器件性能的改进,进而研制出高性能的锥形光纤器件,使得锥形光纤得到更广泛地应用。

参考文献:

- [1] 薛春荣. 熔锥光纤的特性研究[J]. 激光与红外, 2006, 36(9): 886-896.
- [2] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 5-8, 98-100.
- [3] 赵发英, 张全, 唐海青. 平端光纤与锥端球透镜光纤的耦合[J]. 光子学报, 2003, 32(2): 218-221.
- [4] 于海鹰, 邹德恕, 崔碧峰, 等. 微透镜光纤在半导体激光器中的应用研究[J]. 半导体光电, 2005, 26(5): 400-405.
- [5] Yi Yang, Jon Lee, Karl Reichard. Fabrication and implementation of a multi-to-single mode converter based on a tapered multimode fiber[J]. Optics Communications, 2005, 249(1): 129-137.
- [6] 杨瀛海, 吴金生, 俞本立, 等. 球形光纤端面效应及其应用[J]. 光学技术, 1999, 7(4): 55-58.
- [7] 牛金星, 毛海涛, 李方正, 等. 半导体激光器与变芯径光纤实用化耦合技术研究[J]. 激光与红外, 2005, 35(6): 424-426.
- [8] Kumaran Sambanthan. Method to improve the coupling efficiency of a hemispherically lensed asymmetric tapered-core fiber[J]. Optics Communications, 2005, 254(3): 112-118.