文章编号:1001-5078(2017)06-0767-06

·光纤及光通讯技术 ·

斜端面光纤不同倾斜角度下出射光的研究

张恩隆,韦 锦,赵 霞,徐国庆 (江苏法尔胜光电科技有限公司,江苏无锡 214434)

摘 要:斜端面光纤的一端为平端面,另一端为斜端面,光从平端面输入,若斜端面的倾斜角度 大于某一数值,光线将不再从斜端面出射,而是会经斜端面反射后从光纤表面出射,但此时的 出射光斑严重变形,为此提出了在光纤斜端面部分套上一个空心玻璃管的结构。用 LightTools 的光线追迹功能进行仿真分析,仿真结果表明,当斜端面的倾斜角度在 48°~54°的范围内时, 光纤的传输效率均能超过 75%,并且具有较为理想的出射光斑分布。最后,研制出了倾斜角 为 45°和 53°的斜端面光纤,并分别在裸斜端面光纤和带有空心玻璃管的斜端面光纤下对传输 效率和出射光斑分布进行了实验验证。

关键词:光纤;斜端面;传输效率;光斑分布 中图分类号:TN253 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2017.06.022

Research on emitted light of fiber with tilted end at different tilt angles

ZHANG En-long, WEI Jin, ZHAO Xia, XU Guo-qing

(Jiangsu Fasten Optoelectronics Technology Co. Ltd., Wuxi 214434, China)

Abstract: Fiber with tilted end includes a flat end and a tilted end. When the light enters the fiber from the flat end, light will not output from the tilted end if the tilt angle is greater than a certain value, but the light will output from fiber surface after reflecting at the tilted end. However, emitted facula will be seriously distorted in this way, so the configuration of adding a hollow glass tube in the part of the tilted end is proposed. Simulation and analysis were carried out by using ray tracing of LightTools. The simulation results show that the transmission efficiency of this fiber can exceed 75% and emitted facula distribution is ideal when the tilt angles are from 48° to 54°. Finally, the fibers with the tilt angles of 45° and 53° are manufactured, and the transmission efficiency and emitted facula distribution under the configurations of fiber with tilted end and the one with a hollow glass tube are verified through the experiments, respectively.

Key words: optical fiber; tilted end; transmission efficiency; facula distribution

1 引 言

随着激光技术的发展,大大扩展了光纤的应用 范围。如今通信光纤已经成为现代通信的主要传输 媒介。而传能光纤^[1-2]则能被应用在工业加工、医 疗美容和武器设备等方面。对于医疗美容来说,就 是要用传能光纤引导激光光束,通过光纤头出射到 待治疗处。纯石英光纤^[3]具有较高的激光损伤阈 值,传输波长范围广,并且传输效率高。因此,用作 传能的时候一般都选用纯石英光纤。目前,纯石英 大芯径光纤已经成为医疗激光传输系统的标准元

作者简介:张恩隆(1975-),男,本科,工程师,主要从事无源器件技术方面的研究。E-mail:112098926@qq.com 收稿日期:2016-10-20

件,广泛应用在美容、手术治疗和光动力疗法^[4-5]等 方面。在对人体内部病变组织进行照射时,平端面 光纤将不能满足需求,这时就需要根据病变组织的 部位以及形状设计不同出射角度的光纤头。

本文运用 LightTools 的光线追迹^[6]功能对特定倾 斜角度的斜端面^[7]光纤进行了仿真分析,针对出射光 斑分布不佳的情况,提出了在光纤斜端面部分套上一 个空心玻璃管的结构,基于此结构还分析了斜端面的 倾斜角度在一定范围内时光纤的传输效率^[8]和出射光 斑分布^[9],并研制了某一倾斜角度的斜端面光纤,对光 纤的传输效率和出射光斑分布进行实验验证。

2 仿真分析

选用的是纯石英光纤,光纤参数为:纤芯折射率 $n_1 = 1.46$,包层折射率 $n_2 = 1.4433$,纤芯直径a = 0.6 mm,包层直径b = 0.84 mm。工作波长为 532 nm。光纤结构如图1所示,左端为平端面,右端 为斜端面,斜端面的倾斜角(斜面与光纤纵向的夹 角)为 $\alpha(0^\circ < \alpha < 90^\circ)$ 。在斜端面的纤芯 - 空气 界面,由全反射公式反推可知,当倾斜角 $\alpha \ge \arcsin$ $\frac{1}{n_1} = 43.23^\circ$ 时,沿着光纤中心轴传播的光线将不能 从右端的斜端面出射,而是经斜端面反射后从光纤 表面出射。当倾斜角 $\alpha = 45^\circ$ 时,沿着光纤中心轴 传播的光线经斜端面将会偏折 90°。此情况最为简 单,这也是斜端面光纤最常用的倾斜角度,因此,我 们先对倾斜角 $\alpha = 45^\circ$ 时的斜端面光纤进行分析。



图1 斜端面光纤的基本结构

Fig. 1 The configuration of the inclined optical fiber

所设计的斜端面光纤必须具有较高的传输效率, 另外根据医疗光纤的实际用途,光纤出射光的光斑分 布最好是圆形的,因为这样便于控制能量对病变组织 进行照射。我们用 LightTools 软件对倾斜角 α =45° 的斜端面光纤进行仿真分析。将光源设为平行光,从 光纤的平端面入射,并使光线充满纤芯,光源的输出 功率为1 W,设置接收面在光纤正上方 20 mm 处。在 此理想情况下,光线在光纤中均沿着中心轴传播,即 所有光线经斜端面反射后都将偏折 90°。然后在经过 纤芯 – 包层界面与包层 – 空气界面光线会发生折射,

导致光斑分布发生变形,接收面处的光斑分布如图2 所示,图中的x轴代表垂直于中心轴的方向,y轴代 表平行于中心轴的方向。由图可见,光斑分布是一个 狭长的椭圆形,光斑垂直于中心轴方向的长度是平行 于中心轴方向的长度的三倍多。这不难理解,因为光 线经斜端面反射后从光纤上表面输出的过程中,纤芯 -包层界面和包层-空气界面都是弧面,平行于中心 轴方向的光线主要分布在弧面顶端,趋近于平面,光 线偏折的较小,因此光斑平行于中心轴方向上的长度 小;而垂直于中心轴方向的光线跨度整个弧面,光线 在弧面两端的偏折很大,因此光斑垂直于中心轴方向 的长度大。而此时接收面处的功率为 0.798 W, 即传 输效率达到 79.8%。光几乎不会从斜端面射出造成 能量损耗,绝大部分能量损耗是由于光在纤芯-包层 界面和包层-空心界面会有少量的反射,再经斜端面 反射后回到平端面。但在平行光入射、直线传播的理 想情况下,出射光斑仍然发生了严重变形。说明裸的 斜端面光纤无法满足医用光纤的要求,需要对光斑进 行整形。



为此,我们考虑对原结构进行改进,在光纤斜端 面部分套一个空心的玻璃管,基本结构如图 3 所示。 玻璃管的内径为 0.92 mm,外径为 1.78 mm,玻璃管 的折射率视为 1.46。保持其他参数都不变,此时接 收面的光斑分布如图 4 所示。可以明显发现,光斑 在垂直于中心轴的方向上有收缩的趋势,其长度仅 比平行于中心轴方向的长度略大。与裸斜端面光纤 相比,套有空心玻璃管时光斑平行于中心轴方向的 长度并未变化,但是光斑垂直于中心轴方向的长度 大大减小。这说明在斜端面套一个空心玻璃管对经 斜端面反射后的光线在垂直于中心轴的方向上有向 中心聚合的作用。能把畸形的光斑分布矫正为圆形 的光斑分布,这正是我们所希望的。并且此时接收 面处的功率仍为 0.798 W,说明在光纤斜端面添加 一个空心玻璃管未对光纤造成额外损耗。因此,我 们采用在光纤斜端面套上一个空心玻璃管的结构, 下面的仿真分析都是对这种结构而言的。







结构下斜端面倾斜角45°时的光斑

Fig. 4 The facula for the inclination angle of 45° with a hollow glass tube when the input light is collimated

但是在实际应用中,光源不可能是理想化的平 行光,并且光纤弯曲也会打破这种理想化。为了更 加趋近于实际情况,对光源重新设置,使光线的入射 角度在0°~10°范围内,仍使光线充满纤芯。仍是 倾斜角α = 45°的斜端面光纤,在接收面处的光斑 分布如图5所示,与图4相比,光斑在水平于中心轴 和垂直于中心轴的方向上长度都有所增大,后者是 前者的两倍不到。此时接收面处的功率减少到 0.543 W,即传输效率仅为54.3%。这是因为尽管 此时斜端面的倾斜角度略大于43.23°,沿着中心轴 传播的光线不能从斜端面出射,但是光纤中还存在 大量的不是沿着中心轴传播的光线,它们不能经斜 端面反射,仍会从斜端面出射,从而导致此倾斜角度 下光纤的传输效率较低。出射光斑分布不够理想, 并且传输效率不高,这都说明倾斜角α = 45°不是 医用斜端面光纤的理想角度。基于此,我们又考虑 对斜端面倾斜角α的角度对光纤传输效率和光斑分 布的影响进行分析。



当入射光不是平行光,并且斜端面的倾斜角 α 不是特殊角 45°时,光纤的传输效率和光斑分布将 与接收面的选择紧密相关。为使接收面尽可能多的 接收到出射的光,并能获得较好的出射光斑分布,使 接收面垂直于出射的主体光线,同样距离出射处约 20 mm。表1给出了斜端面不同倾斜角下的光纤的 传输效率。由表可知,斜端面的倾斜角 α 由 45°增 加到 49°的过程中,光纤的传输效率也随着增大,并 在倾斜角 α 为 49°处,光纤的传输效率达到最大值 79.1%。之后随着倾斜角 α 的增大,光纤的传输效 率开始降低。但是倾斜角 α 在 48°~54°的范围内, 光纤的传输效率均大于 75%,即当倾斜角 α 在此范 围内光纤的传输效率能满足要求。

图 6 给出了斜端面的倾斜角 α 从 48°到 54°时 接收面处的光斑分布。由图可见,光斑在垂直于 中心轴方向和平行于中心轴方向的长度都基本相 等。与斜端面的倾斜角 α = 45°时的光斑相比,倾 斜角 α 在 48°~54°的范围内的光斑垂直于中心轴 方向的长度基本保持不变,而平行于中心轴方向 的长度明显增大,以至光斑分布接近圆形。并且光 表 1

76.8

75.7

65.3

67.8

| Tab. 1 The transmission efficiencies of the fiber with different inclination angles | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|
| Inclination angle $\alpha / (^\circ)$ | 45 | 46 | 47 | 48 | 49 | 50 | 51 | 52 | | |
| Transmission efficiency/% | 54.3 | 62.2 | 70.0 | 75.3 | 79.1 | 78.9 | 78.4 | 77.7 | | |
| Inclination angle $\alpha/(\circ)$ | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 | | |

74.7

斜端面不同倾斜角下的光纤的传输效率

73.3

71.7

| y/mm | | | v/mm | | |
|-------|------------|------------|---------|--------------------|--------------|
| 10 - | | | 10 | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| 0 - | | | 0 | IOI | |
| | | | | - | |
| -10 | | | 10 | | |
| -10 1 | | 10 | -10 -10 | | 10 |
| | (a) | x/mm | -10 | (b) | x/mm |
| y/mm | | | y,mm | | |
| 10 - | | | 10 | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | 0- | | |
| | | | | | |
| -10 | | | -10 | | |
| -10 | 0 | 10 | -10 | | 10 |
| | (c) | x/mm | | (d) | <i>x</i> /mm |
| y/mm | | | y/mm | | |
| 10 | | | | | |
| | | | | - | |
| 0 - | | | 0 | | |
| | | | - | | |
| - | | | - | | |
| -10 | | | -10 | | |
| -10 | 0 | 10 x/mm | -10 | 0 | 10 |
| | (e) | | | (f) | ı∕/mm |
| | y/,mm + | | | | |
| | 10- | | | | |
| | | | | | |
| | | 1 | | | |
| | 0 - | 16 | -11 | | |
| | | 1 | | | |
| | - | | | | |
| | 10 | | | | |
| | -10 -1 | | 0 | 10 | |
| | -10 | | (g) | x/mm ¹⁰ | |
| 图 6 | 带有玻璃套管的 | 内结构下 | ,不同斜端 | 面倾斜角时的 | 光斑 |

Fig. 6 Faculae of the fiber added a hollow glass tube with different inclination angles

斑的直径约为10 mm,光斑的直径大小也合适。所 以,通过对光斑分布的分析,当倾斜角 α 在 48°~ 54°的范围内时,光斑分布也能符合要求。以上,我 们就从光纤的传输效率和出射光斑分布两个方面, 理论上证实了 48°~54°能够作为斜端面光纤倾斜 角的取值范围。

69.9

3 实验验证

由表1可知,当斜端面的倾斜角 $\alpha = 53^{\circ}$ 时,光 纤的输出效率达到 76.8%,并且结合图 6(f),出射 光斑分布很理想,因此对倾斜角 $\alpha = 53^{\circ}$ 和 $\alpha = 45^{\circ}$ 的斜端面光纤进行实验对比。斜端面需要对光纤倾 斜研磨,光纤很容易断裂,所以在光纤外套一个陶瓷 插芯,通过填胶的方式使陶瓷插芯与光纤固定在一 起,从而能够一起研磨。将套有陶瓷插芯的光纤用 夹具固定到研磨机上,将夹具的倾斜角度调为合适 角度进行研磨。整个端面研磨过程分为五步:初磨、 粗磨、中磨、细磨和抛光。所用的研磨纸分别是 30 μm 的碳化硅纸, 9、3 和 1 μm 的金刚石纸, 0.5 µm 的氧化硅纸。待研磨完毕后,对端面进行检 查,若无崩边和划痕则说明研磨的端面合格。平端 面可以通过切割刀完成,如此斜端面光纤就制作完 毕了。

将光纤的平端面接上光纤连接器,这样可以直 接与激光器的输出口连接。使用全固态半导体激光 器,将激光器的输出功率调为100 mW。确定接收 面位置的方法与仿真分析中的一样,在该处放置一 张白纸,同样距离出射处 20 mm。倾斜角 $\alpha = 45^{\circ}$ 的斜端面光纤的出射光斑分布如图7所示。图7 (a)为裸斜端面光纤的出射光斑分布,中心能量聚 集部分呈狭长型。图7(b)为带有空心玻璃套管的 斜端面光纤的出射光斑分布,与仿真分析结果(如 图5所示)吻合,中心能量聚集部分的形状有圆润 的趋势。用光功率计测得此倾斜角度下光纤的出光 功率为 52.25 mW,即传输效率为 52.25%。倾斜角

Т

Transmission efficiency/%

 $\alpha = 53°$ 的斜端面光纤的出射光斑分布如图 8 所示。 图 8(a)为裸斜端面光纤的出射光斑分布,中心能量 聚集部分呈椭圆形。图 8(b)为带有空心玻璃套管 的斜端面光纤的出射光斑分布,与仿真分析结果 (如图 6(f)所示)吻合,中心能量聚集部分的形状基 本为圆形。测得此倾斜角度下光纤的出光功率为 72.52 mW,即传输效率为 72.52%。测得的出光功 率略低于仿真分析的结果,若考虑到平面端反射和 斜端面透射等因素,则测得的结果与仿真分析的结 果大致相符。在实际应用中,可以通过对平端面镀 透射膜和对斜端面镀反射膜的方法来提高的光纤的 出光功率。实验结果显示,空心玻璃套管对出射光 斑有很好的整形效果,另外倾斜角 $\alpha = 53°$ 比 $\alpha =$ 45°的斜端面光纤的出射光斑效果更好,传输效率 更高。



图 7 斜端面倾斜角 45°时的实际光斑 Fig. 7 The actual facula for the inclination angle of 45°



(a)裸斜端面光纤
 (b)带有空心玻璃套管的斜端面光纤
 图 8 斜端面倾斜角 53°时的实际光斑
 Fig. 8 The actual facula for the inclination angle of 53°

4 结 论

先前提出的斜端面光纤的斜端面倾斜角度通常 为45°,来实现光垂直于光纤出射,但实际上斜端面 倾斜角度为45°时,光纤的传输效率较低,并且出射 光斑分布严重变形。为此,提出了在光纤的斜端面 部分套上一个空心玻璃管的结构,来对出射光斑进 行整形。另外,还对斜端面的倾斜角度对光纤的传 输效率和出射光斑分布进行了分析。仿真分析的结 果显示,斜端面的倾斜角度 48°~54°的范围内时, 光纤的传输效率均大于 75%,并且出射光斑分布是 圆形的。为了验证仿真分析的结果,研制出了斜端 面倾斜角度为 45°和 53°的斜端面光纤,实验结果与 仿真分析的结果基本吻合。

本文从提高光纤的传输效率和对出射光斑进 行整形两个方面出发,提出了在光纤的斜端面部 分套一个空心玻璃管的结构,并发现了合适的斜 端面的倾斜角度的范围,增加了此类斜端面光纤 在医疗领域的实用性价值。但由于此时光纤的出 射光不再垂直于光纤,为使出射光的能量分布均 匀,即能获得较为圆形的光斑分布,必须使接收面 垂直于出射光的主体光线。这在实际运用中,特 别是在医疗领域对病变组织照射治疗时,如何确 定该斜端面光纤与被照射物的角度位置关系是以 后需要解决的问题。

参考文献:

- [1] HAN Shumin, ZHOU Guiyao, HOU Lantian, et al. Progress in research on infrared hollow optical fiber[J]. Materials Review, 2002, 16(6):35-38. (in Chinese)
 韩树民,周桂耀,侯蓝田,等. 红外空芯传能光纤的研究进展[J]. 材料导报,2002,16(6):35-38.
- [2] HOU Lantian, ZHOU Guiyao, YANG Yulin, et al. Research and development of polycrystalline GeO₂ hollow-core transmitting energy fibers [J]. Materials Review, 2000,14(6):12-13. (in Chinese) 侯蓝田,周桂耀,杨育林,等. 多晶空芯传能光纤的研究与进展[J]. 材料导报,2000,14(6):12-13.
- [3] JIANG Yuan, CHEN Li, ZHU Yunqing, et al. Application of optical fiber to laser medical therapy [J]. Laser Journal, 2007, 28(4):9-11. (in Chinese)
 江源,陈莉,朱云青,等. 光纤在激光医学治疗上的应用[J].激光杂志, 2007, 28(4):9-11.
- [4] LIU Wei, YUAN Dan, WANG Qian, et al. The clinical observation of using optical fiber irradiation photodynamic to treat 15 cases of rosacea[J]. Chinese Journal of Aesthetic Medicine, 2015, 24(19):41 - 44. (in Chinese)

刘伟,袁丹,王倩,等.利用光纤导入组织内光动力疗 法治疗酒渣鼻15例疗效观察与分析[J].中国美容医 学,2015,24(19):41-44.

- [5] SANG Hong. The present situation in the study on application of photodynamic therapy [J]. Journal of Clinical Dermatology,2002,31(5):332-334. (in Chinese)
 桑红. 光动力疗法的应用研究现状[J]. 临床皮肤科杂志,2002,31(5):332-334.
- [6] LI Mengyuan, SUN Jialue, ZHANG Dawei, et al. Optical system design for ultraviolet-led curing based on the structure of freeform surface [J]. Acta Optica Sinica, 2014, (12):236-241. (in Chinese)
 李梦远,孙伽略,张大伟,等. 基于自由曲面透镜结构的紫外发光二极管固化系统光学设计[J]. 光学学报, 2014, (12):236-241.
- [7] LI Shiyu, TAN Xudong, HUANG Danhua, et al. Analysis of reflection mechanism of ROSA with tilted fiber stub end

face[J]. Study on Optical Communications, 2006, (6): 58 - 60. (in Chinese)

李世瑜,谭旭东,黄丹华,等.带斜面光纤结构的同轴 光接收组件的反射分析[J].光通信研究,2006,(6): 58-60.

- [8] YAO Shun, PANG Xiaolin, DAI Jingjing, et al. Transmission efficiency of bending fiber with small radius[J]. Acta Optica Sinica, 2011, (1):44-47. (in Chinese)
 尧舜, 庞晓林, 代京京, 等.小半径弯曲条件下传能光 纤传输效率研究[J]. 光学学报, 2011, (1):44-47.
- [9] JING Hongqi, WANG Cuiyuan, WU Xia, et al. Study on uniformity of fiber optical spots of semiconductor lasers
 [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(6):914 – 917. (in Chinese)

井红旗,王翠鸾,吴霞,等.半导体激光器光纤耦合输 出光斑均匀性的研究[J].半导体光电,2015,36(6): 914-917.