

# 纯石英芯掺氟玻璃包层光纤的数值孔径

高亚明,冯光,刘永建,李昌峰,周述文,潘蓉,刘笑东  
(中国电子科技集团公司第四十六研究所,天津 300220)

**摘要:**纯石英芯掺氟玻璃包层光纤是一种新结构的大芯径光纤,纤芯材料是纯石英玻璃,包层材料是掺氟石英玻璃,由于氟杂质可以降低石英玻璃的折射率,故纤芯材料与低折射率的包层材料可以组成传光波导。国外是采用 POD(等离子体外相沉积)技术生产这种光纤,我们采用的是国内首创的管棒熔融套装法,制成了相同结构的光纤,为了提高光纤的性能,我们对光纤进行了低、高折射率双层涂料涂覆,在测试中发现光纤的数值孔径参数随着光纤测试样品涂覆长度的变化而变化,变化范围为 0.1889~0.3152。

**关键词:**纯石英芯;掺氟包层;传能光纤;大芯径

**中图分类号:**TN253      **文献标识码:**A

## Numerical aperture of optical fiber with pure quartz core and fluorine-doped glass cladding

GAO Ya-ming, FENG Guang, LIU Yong-jian, LI Chang-feng, ZHOU Shu-wen, PAN Rong, LIU Xiao-dong  
(The 46 Institute of China Electronic Science and Technic Group Corporation, Tianjin 300220, China)

**Abstract:** Optical fiber with large pure quartz core and fluorine-doped glass cladding is a new structure of large core fiber, the material of core is pure quartz glass, and the cladding is quartz glass doped with fluorine, because the fluorine impurity can reduce the refractive index of the quartz glass, so the core and cladding material with low refractive index can consist of the light waveguide. It is made by POD(plasma outside deposition) technic in abroad, we use creatively the rode in tube method to make it with the same structure in domestic, in order to promote the property of the fiber, we coat it with double coating material, i. e. in-coating with low refractive index and out-coating with high refractive index, we found that the numerical aperture of the fiber is influenced greatly, which changes from 0.1889 to 0.3152 with the coating length changes shorter and shorter.

**Key words:** pure quartz core; cladding with F-doped glass; optical fiber transfer energy; large core diameter

### 1 引言

人们一直使用大芯径光纤传输光能<sup>[1]</sup>,以前是采用传统的 MCVD 工艺进行制作,在光纤芯部玻璃的沉积过程中,人们向 SiO<sub>2</sub> 玻璃中掺入 GeO<sub>2</sub> 以提高其折射率,由于与石英基底管之间存在折射率差,使得光纤的数值孔径得到提高,但该工艺有明显的缺点,光纤的芯径不能做大,成本较高,容易炸裂,工艺过程复杂。

目前国外采用 POD(等离子体外相沉积)工艺制作出一种新的纯石英芯掺氟玻璃包层结构的大芯径光纤,即纤芯材料为光导级纯石英玻璃,外围包以一薄层低折射率的掺氟石英玻璃,形成光波导进行光能传输<sup>[2]</sup>。这是一种全新结构的大芯径光纤,由

于是管外沉积,光纤预制件的芯径可以做的很大,使光纤成本大幅度降低,实验表明,这种光纤完全可以代替传统的大芯径光纤使用<sup>[3]</sup>。由于国内没有 POD 设备,中国电科集团第四十六研究所在国内首创出一套新的管棒熔融套装工艺,用 PCVD(等离子体化学气相沉积)工艺制作掺氟石英管,用 MCVD 工艺在高温条件下加套石英芯棒,制成了同样结构的光纤,既克服了传统 MCVD 工艺制作大芯径光纤的缺点,又避免了购买昂贵的 POD 设备,具有工艺

作者简介:高亚明(1960-),男,高级工程师,主要从事特种光纤的研制工作。E-mail: gym46@yahoo. cn

收稿日期:2010-08-11;修订日期:2010-09-14

简单、成本低、成品率高、适于大批量生产等优点,制作的光纤“纤芯直径/包层直径”比大,损耗低<sup>[4]</sup>。

为了进一步提高光纤的性能,我们对光纤进行了低、高折射率双层涂料涂覆,在测试中发现光纤的数值孔径参数随着光纤测试样品涂覆长度的变化而变化,这样就使得调整光纤的入射和出射数值孔径参数成为了可能,这一点深受用户的欢迎,使得这种光纤更适于使用。

### 2 试验

#### 2.1 光纤制作

首先对采用中国电科集团第四十六研究所工艺制作的纯石英芯掺氟玻璃包层结构光纤预制件表面进行酸水清洁处理,并进行拉丝,如图1所示,拉成的光纤结构与预制件结构相同,纤芯直径/包层直径比为1:1.1,光纤包层直径通常为 $\phi 110\ \mu\text{m}$ , $\phi 220\ \mu\text{m}$ , $\phi 440\ \mu\text{m}$ , $\phi 660\ \mu\text{m}$ 和 $\phi 880\ \mu\text{m}$ 几种。光纤采用双层涂覆,内层涂料为紫外光固化低折射率

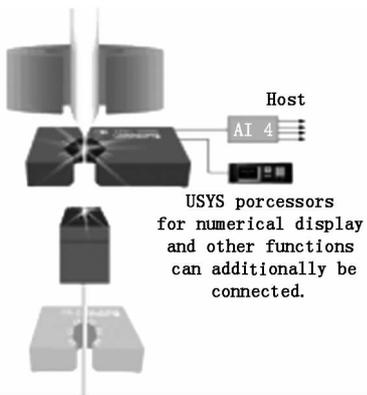


图1 拉丝示意图

Fig.1 the picture of draw process

硅橡胶,外层涂料为普通的光纤外层涂料,由于内层硅橡胶涂料与石英光纤表面间的浸润性不是很好,所以拉丝速度一般控制在较慢的水平上。如果拉丝中发现有漏光点,说明出现了不浸润问题,要做好记录,在光纤筛选中予以去除。制作的光纤结构及折射率分布如图2所示,折射率分布呈现阶梯状,石英芯部分折射率较高,掺氟包层部分折射率较低,低折射率紫外光固化硅橡胶涂覆层部分更低。

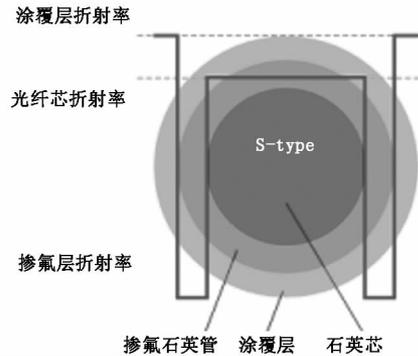
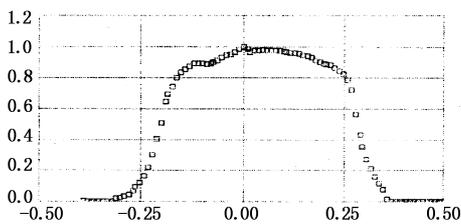


图2 纯石英芯掺氟玻璃包层光纤结构及其对应的折射率分布示意图

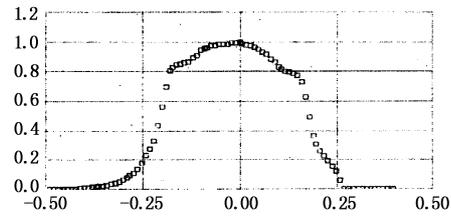
Fig.2 the structure of the optic fiber with pure quartz core and F-doped cladding and the corresponding refractive index profi

#### 2.2 试验结果

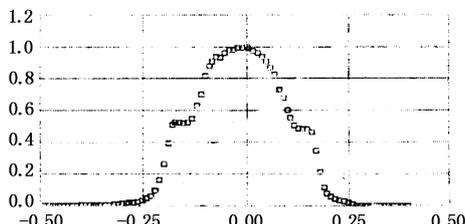
我们对上述工艺制作的光纤样品进行数值孔径参数测量,光纤样品长度为2 m,光纤两端涂层剥离长度相同,发现测量值与光纤两端的涂覆层剥离长度有明显的关联关系,随着样品两端涂覆层剥离长度的增加,数值孔径测量值逐渐变小。图3中给出几张数值孔径参数的测量曲线和测量值,在图3(a)



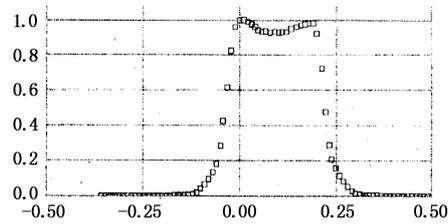
(a) NA = 0.3152 涂覆层剥离长度:30 mm



(b) NA = 0.2934 涂覆层剥离长度:50 mm



(c) NA = 0.2255 涂覆层剥离长度:95 mm



(d) NA = 0.1889 涂覆层剥离长度:2 m(裸光纤)

图3 同一个光纤样品的数值孔径随着涂覆层剥离长度的变化及测试曲线

和图 3(b) 两张测量曲线中, 光纤两端涂覆层剥离长度相加分别为 30 mm 和 50 mm, 从图中可以发现, 随着光纤两端涂覆层剥离长度的增加, 数值孔径在逐渐减小, 分别为 0.3152 和 0.2934, 从测量图中我们发现在测量曲线的头部有一个小台阶, 图 3(b) 比图 3(a) 中的明显; 在图 3(c) 中就更明显了, 它的涂覆层剥离长度为 95 mm, 而且随着剥离长度的增加, 这个台阶在逐渐下移, 数值孔径降低为 0.2255; 图 3(d) 为裸光纤(2 m), 即把涂覆层全部去掉, 可以看到台阶完全消失了, 最终数值孔径降低为 0.1889。

### 3 讨论

光纤数值孔径参数 NA 的定义为:

$$NA = \sin\theta = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

其中,  $\theta$  为最大入射角, 当入射角小于它的入射光线在光纤内传输时, 可以形成全反射并低损耗传输, 它等于接受光圆锥的半角, 这个角是由光纤本身的光学参数决定的, 掺氟玻璃包层中氟的浓度越高, 说明纤芯和包层间的折射率差越大<sup>[5]</sup>, 即数值孔径越大, 如图 4 所示。 $n_1$  为纯石英芯的折射率, 为 1.457;  $n_2$  为掺氟玻璃包层的折射率, 在 1.442 左右, 即掺氟玻璃较纯石英的折射率低 0.015; 在我们制作的纯石英芯掺氟玻璃包层光纤中, 低折射率涂料的折射率为 1.42。运用上述计算公式可知, 石英芯与掺氟玻璃包层间的理论数值孔径为 0.208, 石英芯与低折射率涂料间的理论数值孔径为 0.326<sup>[6]</sup>。

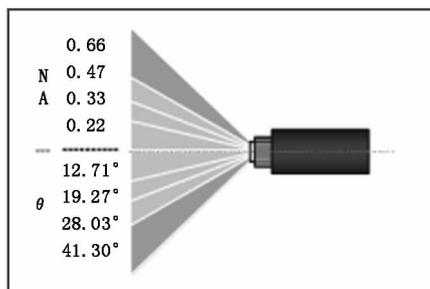


图 4 光纤的数值孔径与临界角间的对应关系

图 5 表示出纯石英芯掺氟玻璃包层光纤中各种角度入射光的传输路线图, 其中,  $\alpha$  表示由于石英芯与掺氟玻璃包层间的折射率差形成的数值孔径对应的最大入射角;  $\beta$  表示由于石英芯与低折射率涂料间的折射率差形成的数值孔径对应的最大入射角。

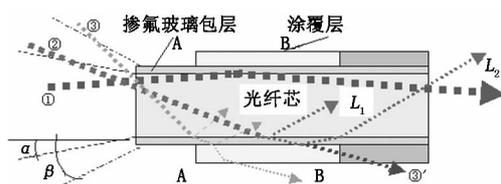


图 5 光纤中各入射角度的光传输路线示意图

为了分析涂覆层剥离长度对光纤数值孔径的影响, 我们先考虑将涂覆层剥离到 A - A 位置的情况: 由图 5 可见①号光线的入射角小于  $\alpha$ , 在光纤中传输到掺氟玻璃包层界面处全反射, 形成低损耗传输, 与低折射率涂覆层的剥离情况无关。②号光线的入射角大于  $\alpha$ , 但小于  $\beta$ , 在纤芯中传输到与掺氟玻璃包层界面处形成泄露光, 一部分光  $L_1$  反射回光纤芯部继续传输, 另一部分光  $L_2$  泄露出光纤芯和掺氟层, 到达紫外固化低折射率涂料界面, 它被全反射回光纤芯部继续传输。③号光的入射角大于  $\beta$ , 由于超出了光纤芯部材料和涂覆层间形成的最大全反射临界角, 所以当光线入射到掺氟玻璃包层时, 除一小部分光反射回纤芯继续传输外, 其他的光能透射出石英纤芯, 但当这部分透射光到达低折射率涂料界面时, 除有一小部分光反射回纤芯外, 大部分光都泄露进涂覆层内, 经过几个周期的反射后, ③号入射光的能量很快被泄露干净。当我们将涂覆层的剥离长度加长, 从 A - A 位置延长到 B - B 位置时, 详如图 5 所示, 此时对①号和③号入射光影响都不大, 但对②号入射光的影响非常明显, 因为涂覆层在 A - A 位置时, 低折射率涂料界面是②号入射光线的反射界面, 光被全反射进光纤中继续传输, 但当这部分涂覆层被延长剥除到 B - B 位置时, ②号入射光线在最初原来的反射点位置反射条件不复存在, 由于光纤表面吸附了大量的其他杂质, 因此大部分的光能量在此被泄露掉, 即形成图中的③'号光线, 造成损耗增大。

把以上的分析与图 3 进行对照比较, 图 3 中的横坐标为入射角度, 向两边延伸表示入射角度逐渐增大, 纵坐标为检测光功率, 中间位置对应零度入射角。从图 3(a) 和图 3(b) 中发现, 随着入射角度的增加, 尽管数值孔径参数在变小, 但功率曲线比较平滑, 没有大的异常, 说明光纤中传输的光功率变化较小, 曲线上基本没有明显显示出来, 我们分析认为, 这是由于涂覆层的剥离长度相对较短, 入射角度介于  $\alpha \sim \beta$  圆锥角间的光学模式绝大部分都能够有效的在光纤内传输, 属于 A - A 剥离位置的那类情况。图 3(c) 和图 3(d) 的情况则不同, 随着涂覆层剥离长度的进一步增加, 介于  $\alpha \sim \beta$  圆锥角间的光学模式会有相当部分成为泄露光③', 并且这一比例会随着涂覆层剥离长度的加长会进一步增加。图 3(c) 功率曲线上出现了明显的台阶, 它与涂覆层剥离长度位置相对应, 并且会随着涂覆层剥离长度的增加, 数值孔径参数的逐渐变小, 台阶会逐渐下移, 当我们把涂覆层彻底剥离干净后, 这个台阶会彻底消失, 如

图3(d)所示。

此外,我们注意到数值孔径的理论值与实际测量值间存在较大的出路,理论值范围为0.208~0.326,实际测量值范围为0.1889~0.3152,对此我们认为下限值的差异可能与光纤的掺氟层表面状态有关,比如气泡、杂质等,造成在该反射面有意想不到的光的泄露,从而降低了传输功率,造成数值孔径的降低<sup>[7]</sup>;上限值的差异是由于测试人员在实际测量数值孔径时,必须要剥离一定长度的光纤涂覆层,一般每端为10 mm左右,根据以上的分析,这样做必然要降低光纤的数值孔径,所以光纤实际的数值孔径参数要比理论值小一些。

#### 4 结论

国外同类型的纯石英芯掺氟玻璃包层光纤产品的标准数值孔径是 $0.22 \pm 0.02$ ,内外层涂料都是UV固化高折射率涂料,而我所开发的该类型光纤与它们不同,内层涂料为低折射率涂料,但在用户使用过程中,没有发现它们之间有大的不同。试验结果证明,这种结构不仅可以有效提高光纤的数值孔径,而且随着涂覆层剥离长度的增加,数值孔径会逐渐变小。我们可以利用这一特点提高该光纤的性能,比如在光纤的入射端尽量少剥离涂覆层,增大光纤的数值孔径,使其达到0.3152,以提高其接受光的能力,而在出射端则多剥离一些涂覆层,降低其数值孔径,使其降低到0.2,使得出射光线的发散角尽量小,提高输出光能的集中度,这种性能有利于工程人员拓宽该类传能光纤的使用领域。

#### 参考文献:

- [1] Blomster, Ola I, Roos, et al. Fiber optic for high-power diode lasers [J]. High-Power Diode Laser Technology and Application, 2003, 4973: 54 - 59.
- [2] Suzannf R N, Macchesney J B, Walker K L. An overview of the modified chemical vapor deposition (MCVD) process and preform [J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 1982, MTT - 30(4): 305 - 321.
- [3] A S Biriukov, E M Dianov, K M Golant, et al. Synthesis of fluorine-doped silica glass by means of an outside deposition technique using a microwave plasma torch [J]. Sov. Lightwave commun. Printed in the UK, 1993, (3): 1 - 12.
- [4] Gao Yaming, Feng Guang, Liu Yongjian, et al. Optica fiber with pure quartz core and flurine-doped glass cladding [C]. 14<sup>th</sup> optica fiber communication & 15<sup>th</sup> integrated optics science meeting, Tianjin, China, 2009, 10: 43 - 46. (in Chinese)  
高亚明, 冯光, 刘永建, 等. 纯石英芯掺氟玻璃包层光纤 [C]. 全国第14次光纤通信暨第15届集成光学学术会议, 2009, 10: 43 - 46.
- [5] Paul M C, Sen R, Yopadhyay T B. Fluorine incorporation in silica glass by MCVD process-a critical study [J]. J Materials Sci, 1997: 3511 - 3516.
- [6] Lee J H, Kwak S J, Yoon J W, et al. A study of polymer clad resin with higher modulus for high NA fiber [J]. 2008, SPIE, 7135E: 70L.
- [7] Chomat Miroslav, Mrazek Jan, Matejec Vlastimil, et al. Investigation of the sensitivity of PCS fibers to changes of light absorption coefficient of the cladding: Photonics, Devices, and Systems II [J]. Proceedings of the SPIE, 2003, 5036: 72 - 77.