

文章编号 1004-924X(2009)10-2406-05

不同入射角激光束在大芯径 SI-PDF 光纤中的传输损耗

张 美¹, 魏福利¹, 邱孟通¹, 王奎禄¹, 王培伟¹, 盛 亮¹, 彭博栋¹, 李志来²

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为得到纯石英阶跃光纤(SI-PDF)中漏泄模式光线功率的传输特性,应用光线投影积分法,推导了不同入射角的激光束在大芯径 SI-PDF 光纤中的传输功率计算公式,在不同入射角激光束照射下,分别对 3、67、140 m SI-PDF 光纤的输出功率特性进行了理论和实验研究,用最小二乘法原理对对数坐标下的实验数据进行拟合,得出了损耗系数。结果表明:入射角在 0~12°内时,不同入射角功率输出和损耗系数近似一常量,其中损耗系数约为 13 dB/km;入射角 >12°时,不同入射角光功率随入射角增加呈指数衰减规律,其损耗系数随入射角增大而增大,在 12°时损耗系数值为 26 dB/km,在 28°时达到了 82 dB/km。

关键词: SI-PDF 光纤;漏泄模式光线;光线投影积分法;损耗系数

中图分类号: TN25 **文献标识码:** A

Transmission attenuation of laser beams with different incident angles in large-core SI-PDF optical fibers

ZHANG Mei¹, WEI Fu-li¹, QIU Meng-tong¹, WANG Kui-lu¹, WANG Pei-wei¹,
SHENG Liang¹, PENG Bo-dong¹, LI Zhi-lai²

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to obtain transmission property of tunneling rays in a short length large-core SI-PDF fiber, a formula is derived by a light-ray projection integral method to calculate the power coupled from laser beam with different incident angles in the SI-PDF fiber. The output power characteristics of laser beams of 3, 67, 140 m length fibers at different incident angles are achieved respectively by measurements and theoretic calculations. The loss coefficients are obtained by the least square fitting to experimental data at a logarithm coordinate. Results show that the coupled power and the loss coefficients with different incident angles in the SI-PDF fiber keep almost a constant at 0~12°, and the coupled power goes down exponentially with different incident angles beyond 12°. Moreover, the loss coefficients increase with increase of incident angles, it is 26 dB/km at 12° and 82 dB/km at 28°.

Key words: large-core optical fiber; tunneling ray; light-ray projection integral method; loss coefficient

收稿日期:2008-06-04;修订日期:2008-08-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10035020)

1 引 言

SI-PDF 光纤是以纯石英玻璃作为芯层,以掺氟石英玻璃为包层的纯石英阶跃光纤。这种光纤耐辐照性能好,具有良好的抗光学损伤能力,以及较低衰减和较高的光透过率(从近紫外波段到近红外波段 400~1 600 nm),在通信、高能量激光传输和辐射场诊断信号传输方面都有着广阔的应用前景^[1]。

对于应用于辐射场诊断的光纤阵列探测系统,光纤的耦合传输损耗是影响系统时间响应、空间分辨和系统灵敏度的重要因素之一^[1,3]。在过去长距离(几百米~1 千米)小芯径梯度光纤阵列探测器设计中,只需考虑束缚光线的传播特性,而在短距离(一般为十几米~几十米)传输的大芯径 SI-PDF 光纤阵列系统中,各模式间的功率分布未能趋于统计平衡状态——稳态模分布^[1-2,4-5],而且光纤内的高阶漏泄光线还未全部辐射衰减掉。在分析和计算短距离 SI-PDF 光纤的功率耦合和传输性能时,仅考虑束缚光线(数值孔径内光线)去计算系统灵敏度和系统空间分辨率是不够准确的,必须考虑漏泄光线(数值孔径外除去折射的光线)的贡献,因此有必要对 SI-PDF 光纤中这两类光线的传输损耗特性进行研究。

本文理论推导了不同入射角激光光束照射下光纤中的耦合传输功率计算公式,并通过实验对烽火通讯公司生产的 SI-PDF 光纤进行了研究,给出了不同入射角激光束在光纤中的传输损耗系数,特别是对漏泄光线的传输损耗研究,为 SI-PDF 光纤阵列探测系统的灵敏度、空间分辨和时间响应参数的获取提供了重要依据。

2 激光束照射下 SI-PDF 光纤的传输功率理论计算

2.1 计算公式的建立

设以 θ 角入射的激光束在 SI-PDF 光纤端面处的照度为:

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2/\omega_0^2), \quad (1)$$

式中, I_0 为光束的中心光照度; $I(r)$ 是距光束中心 r 处的光照度; ω_0 为光束的束腰半径。

根据参考文献[5],则光纤耦合输出的光功率可由式(2)计算:

$$P(\theta) = \int I(r) \exp(-(\alpha_l + \alpha) \cdot z) \cos \theta T(\theta) ds, \quad (2)$$

式中, z 为 SI-PDF 光纤的长度; $T(\theta)$ 是考虑到端面反射引入的系数,由菲涅尔公式给出; α 为光纤纤芯材料的损耗系数; α_l 为在光纤内传播的光线束的辐射衰减,束缚光线束的 $\alpha_l = 0$,漏泄模式光线束 α_l 可按照式(3)进行计算^[6]:

$$\alpha_l \cong 2 \left(\frac{\sin \theta_c}{a \cos \theta_z} \right) R^2 (1 - R^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \exp(-2V(1 - R^2 \sin^2 \phi)^{3/2} / (R^2 - 1)/3). \quad (3)$$

式中, $R = \frac{\sin \theta_z}{\sin \theta_c}$, θ_z 是与入射角 θ 所对应的光线在光纤内的传播角; $\sin \theta_c = \frac{NA}{n_1}$, n_1 为 SI-PDF 光纤纤芯材料的折射率, NA 为光纤的数值孔径; a 为光纤纤芯的半径; V 为光纤波导归一化频率; ϕ 为光线的偏斜角,即光线在光纤截面上的投影与反射点处切线的夹角。

由式(3)可知,辐射衰减系数 α_l 与入角 θ 和偏斜角 ϕ 有关,要计算得到不同入射角激光束的传输功率,必先得到微元面 ds 与角度 θ 、 ϕ 的关系。

2.2 光线投影积分法计算传输功率^[7]

微元面可按照图 1 的计算模型得到,图中的圆面为 SI-PDF 光纤横截面,圆面上的矩形面积为满足角度 ϕ 投影在光纤截面上所有入射光线的积分,在矩形上任取一微元 ds ,其放大图见右上图, r 为微元面 ds 到光纤横截面中心的距离。

由图 1 中的几何关系得到微元面 d 可表示为 $ds = dh \cdot dr$ 。

其中:

$$dh = r \left(\frac{1}{\cos \varphi} - \frac{1}{\cos(\varphi + d\varphi)} \right) = r \sec^2 \varphi d\varphi, \quad (4)$$

则:

$$ds = r \sec^2 \varphi dr d\varphi. \quad (5)$$

考虑光纤中每条光线有两种取向,在光纤横截面上全积分,则式(2)可化为:

$$P(\theta) = 8 \iint_b^a I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\cos^2 \varphi \cdot \omega_0^2}\right) \cos \theta T(\theta) \cdot \exp(-(\alpha_l + \alpha) \cdot z) r \sec^2 \varphi d\varphi dr, \quad (6)$$

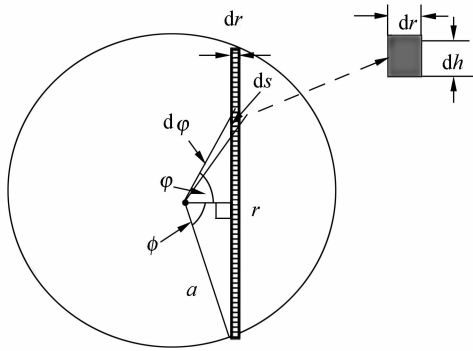


图 1 光纤耦合功率计算模型

Fig. 1 Model for calculating fibre coupled power

式中, b 为积分参量, 表征光线入射点距光纤端面中心的距离, 计算束缚模式光线功率时 $b=0$; 计算漏泄模式光线功率时, 由图 1 可得到 $b = a \cos \phi$ 。

根据漏泄模式光线的传输特性^[2,5]可知, 式(6)中 ϕ 要满足式(7):

$$\sin \phi \cdot \sin \theta \leq \frac{\text{NA}}{n_1} \quad (7)$$

3 SI-PDF 光纤传输功率实验测量

3.1 实验测量装置

实验装置示意图如图 2 所示^[8], He-Ne 激光器激光器的发光中心波长为 635 nm, 谱半宽 < 4 nm, 相对稳定度为 1.6%, 光束的发散角为 0.02 rad, SI-PDF 光纤的长度分别为 3、67、140 m, NA 为 0.2, 对应的入射角 θ 为 12° , 纤芯直径为 0.2 mm, SI-PDF 光纤在 635 nm 处光谱损耗系数 α 为 10 dB/km (厂家推荐值)。光学精密三维角度调节仪的调节精度为 0.005 rad。在实验前, 光纤的端面在研磨机上经过粒度为 9、3 和 $1 \mu\text{m}$ 的磨料进行严格延展性模式研磨加工, 光纤端面质量和重复性良好^[9], 相应引入的测量不确定度与功率计的相对不确定度相当, 其相对标准不确定度 $< 2\%$ 。

在实验中通过精密角度调节仪调节激光束对 SI-PDF 光纤的入射角, 数字化 CCD 计算机成像系统用来实时监测激光束中心与光纤中心的对心情况, 如果两中心不重合, 调节三维旋转调节台, 当由半反半透镜反射后激光束光斑和由光纤端面反射后并经半反半透镜透射后的光斑相重

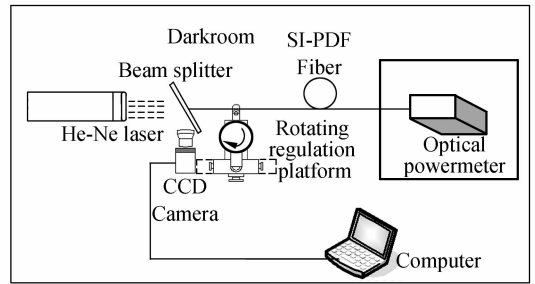


图 2 实验测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

合, 并且使光功率计输出值为最大。每间隔 2° 测一次功率输出, 则可得到入射角不同功率相同激光束照射下 SI-PDF 光纤的输出功率。

3.2 计算结果与实验结果对比

根据式(6)和式(7), 采用 matlab 语言编程计算, 对 SI-PDF 光纤输出功率随光纤的长度和光束入射角变化规律进行了数值模拟, 并与实验测量结果进行比较。模拟计算的条件与实验测量条件一致。

计算和实验测量的结果如图 3 所示, 图中的曲线分别是 3、67 和 140 m 长的 SI-PDF 光纤在不同入射角激光束照射下相对输出功率的计算值和实验测量值, 该值是各计算值、测量值与其最大值相比的结果。线型数据是计算值, 点数据是实验测量值。如图 3 所示, 入射角在 $0 \sim 12^\circ$ 以内, 对应光纤内的束缚光线功率, 同一长度功率输出近似不变, 在入射角 $> 12^\circ$ 外, 对应于光纤内传输的漏泄光线部分, 这部分光线随入射角的增加, 功率输出近似呈指数衰减。

从式(6)和式(7)可分析出其中的原因: 在束缚光线传输条件下, 不同入射角 θ 的光线束在光纤内近似无辐射传播, 由菲涅尔反射引入的衰减因子差别较小, 且 $b=0$, 意味着入射在光纤的全端面上的光线都能被接收传输; 而在漏泄光线传输条件下, 随入射角 θ 增加端面反射损耗增大, 光线束辐射衰减增大, 而且式(6)的积分下限 $b = a \cos \phi$ 随入射角 θ 增大, 即能满足被光纤接收的光线入射点位置离芯包的界面更近, 能被耦合传输的光线在光纤端面上的积分区域随入射角的增大而减少。

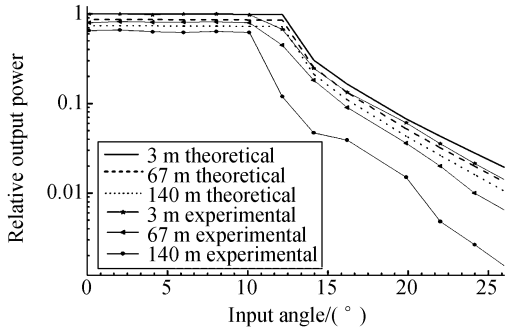


图 3 不同长度光纤传输功率随入射角的关系(理论与实验对比)

Fig. 3 Transmitted power of different length fibers vs incident angles(comparison between theory and measurement)

从不同长度的光纤输出结果可以看出,入射角为 12°时,功率输出已经下降,3 m 长光纤相对输出功率是 0.67,67 m 光纤相对输出功率是 0.45,而 140 m 光纤相对输出功率只有 0.12,该结果表明光纤所传输束缚光线的最大入射角比理论给出的临界入射角 θ_c 小。在入射角达到 16°时,3 m 长光纤输出功率为 0.13,67 m 光纤相对输出功率为 0.09,140 m 光纤相对输出功率只有 0.04。

从图中理论计算和实验对比结果可知,随光纤长度增加,计算值和实验测量值的偏差增大,3 m 光纤的计算值和实验值较为吻合,而 140 m 光纤输出的漏泄光线功率的计算值比理论值约大 50%。这是因为随着光纤长度增加,在沿光纤的长度方向上,由于材料密度的微观变化、成分的起伏、结构的不完善以及制造过程的缺陷导致的模式耦合和宏观上的微弯所引起附加损耗增加,这些附加损耗多产生于高阶的漏泄模式光线^[2,4],且无法通过理论计算,在计算过程中没有考虑这些附加损耗,因此计算值要比实测值偏大。

实际上,在阶跃折射率(SI)光纤中,不可能对每条传输的光线给出一个损耗系数,通常给出以同一角度入射的一个光线组的损耗系数 $\alpha(\theta)$,这一组光线具有相近的传播常数,因而 $\alpha(\theta)$ 更具有实际意义。

4 传输损耗系数 $\alpha(\theta)$

根据最小二乘法原理,用对数坐标上的一条

直线对图 3 中的实验数据 (θ, z_i, P_i) 进行拟合,拟合公式为:

$$\alpha(\theta) = 10 \frac{\sum_{i=1}^3 \lg(P_i) - 3 \sum_{i=1}^3 z_i \lg(P_i) / \sum_{i=1}^3 z_i}{\sum_{i=1}^3 z_i - 3 \sum_{i=1}^3 z_i^2 / \sum_{i=1}^3 z_i}, \quad (8)$$

式中, (θ, z_i, P_i) 为以 θ 角入射相同的功率经长为 z_i 的光纤输出的功率 P_i 。

图 4 是经拟合得到的损耗系数与 $\alpha(\theta)$ 与入射角的关系曲线。如图所示, θ 在 0~12°内,损耗系数 $\alpha(\theta)$ 近似一常数,其值在 13 dB/km,在 $\theta > 12^\circ$ 后,入射光线束损耗系数 $\alpha(\theta)$ 随着角度增加增大, $\alpha(\theta)$ 从 26 dB/km($\theta = 12^\circ$)一直增加到 82 dB/km($\theta = 28^\circ$)。

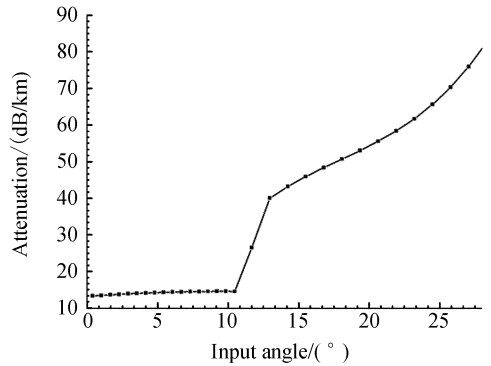


图 4 $\alpha(\theta)$ 随入射角度的关系

Fig. 4 $\alpha(\theta)$ of fiber as a function of input angles

5 结 论

本文推导了不同入射角激光束在 SI-PDF 光纤中的功率耦合传输公式,利用该公式分析了漏泄模光功率的传输特性,并和实验结果进行了比对和分析。最后用最小二乘法对对数坐标下的实验数据进行拟合,给出了不同入射角激光束的损耗系数。结果表明:入射角在 0~12°内,不同入射角的传输功率和损耗系数近似一常数,其中损耗系数为 13 dB/km;入射角 > 12°后,耦合进入光纤的功率随入射角增加成指数衰减规律;不同入射角激光束在光纤内损耗系数随角度增加而增加,在 12°时损耗值为 26 dB/km,在 28°时达到了 82 dB/km;随着光纤长度增加,由于光纤结构不

完善、模式耦合和宏观弯曲引入的附加损耗增大,理论计算的漏泄模传输功率和实验测量结果间的

偏差增大,在 140 m 长度时,实测的输出功率比理论计算的要小 50%。

参考文献:

- [1] 吕敏,王奎禄.核试验脉冲射线测量技术[M].北京:国防工业出版社,2006.
LÜ M, WANG K L. *Detecting Technology of Pulsed Ray in Nuclear Test*[M]. Beijing: National Defence Industry Publishing Company, 2006. (in Chinese)
- [2] A. W. 斯奈德, J. D. 洛夫 著,周幼威,张一龙等译.光波导理论[M].北京:人民邮电出版社,1991:602-623.
SNYDER A W, LOVE J D, ZHANG Y W, et al., translate. *Optical Waveguide Theory*[M]. Beijing: The People's Post and Telecommunications press, 1991:602-623. (in Chinese)
- [3] SHIKAMAL T, TOHL K, NAGATAL S. Radiation sensitive scintillator-optical fiber system for radiation dosimetry in burning plasma machine[J]. *Nucl. Fusion*, 2006, (46):46-50.
- [4] KEISER G 著,李玉权,崔敏,等译.光纤通信(第三版)[M].北京:电子工业出版社,2002.
KEISER G, LI Y Q, CUI M, et al., (Translate). *Optical Fiber Communications* [M]. Beijing: Pub-

- lishing House of Electronics Industry, 2002. (in Chinese)
- [5] 李玉权,崔敏.光波导理论与技术[M].北京:人民邮电出版社,2002.
LI Y Q, CUI M. *Optical Waveguide Theory and Technology*[M]. Beijing: The People's Post and Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)
- [6] ANKIEWICZ A, PASK C. Tunneling rays in graded-index fibres[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1978(10):83-89.
- [7] NICIA A. Lens coupling in fiber-optic devices: efficiency limits[J]. *App. Opt.*, 1981, 20(18):3136-3140.
- [8] ZHENG SH L, ZHANG X M, CHEN K SH. Far field pattern and differential mode attenuation of POF[J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2003, 32(12):1434-1437.
- [9] 刘德福,段吉安.光纤端面研磨加工机理研究[J].光学精密工程,2004,12(6):570-575.
LIU D F, DUAN J A. Mechanism research on lapping of optical fiber end-face [J]. *Opt. precision Eng.*, 2004, 12(6):570-575. (in Chinese)

作者简介:



张 美(1979-),男,助理研究员,2001年于成都理工大学获得学士学位,2008年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事光纤辐射探测技术的研究。E-mail: zandwnever@gmail.com

魏福利(1973-),男,陕西临潼人,硕士,副研究员,1996年于西北工业大学获得学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事辐射探测技术及光纤阵列传感器的研究。E-mail: weifuli@163.com

邱孟通(1970-),男,江苏连云港人,博士,副研究员,1992年于国防科技大学获得学士学位,2003年于西北核技术研究所获得博士学位,主要从事辐射探测技术及高速图像摄影技术的研究。E-mail: bqian@ns. nint. ac. cn

导师简介:

王奎禄(1939-),男,甘肃甘谷人,研究员,博士生导师,1963年于兰州大学获得学士学位,主要从事辐射探测技术及图像信号处理与复原技术研究。E-mail: zandwnever@gmail.com

王培伟(1976-),男,陕西宝鸡人,硕士,助理研究员,1999年于国防科技大学获得学士学位,2003年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事辐射探测技术的研究。E-mail: wyj2013@163.com

盛 亮(1979-),男,山东青岛人,博士,助理研究员,2007年于清华大学获得博士学位,主要从事辐射探测技术的研究。E-mail: shengliang@tsinghua.org.cn

彭博栋(1980-),男,河北衡水人,硕士,助理研究员,2006年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事辐射探测技术的研究。E-mail: bdpeng163@163.com

通讯作者:

李志来(1965-),男,吉林长春人,研究员,主要从事空间光学遥感器结构设计方面的研究。E-mail: lizl2004@sohu.com