

doi: 10.3788/gzxb20144305.0506004

光纤微缺陷的激光检测方法

王荣^{1,2}, 李振华¹, 卞保民¹, 刘成林², 纪运景¹

(1 南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

(2 盐城师范学院 物电学院, 江苏 盐城 224002)

摘 要:针对光纤微缺陷检测问题,提出了一种基于激光的光纤微缺陷检测方法,分析了光纤微缺陷的基本结构以及激光检测法的原理,并以此搭建了实验装置,进行了缺陷检测实验.实验中用准直氦氖激光束横向入射光纤,在光屏上得到光纤前向散射图样的分布图像,然后对图像进行处理.通过与显微镜观察法的实验结果比较,发现激光检测方法可有效地进行缺陷检测,其检测结果与显微镜直接观察法一致,可以作为光纤拉制后、涂覆层前的缺陷复测.

关键词:光纤光学;物理光学;光学检测;强弯曲;散射图样;缺陷检测

中图分类号:TN 252

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)05-0506004-5

A Laser Detection Method of Micro-defects for Optical Fibers

WANG Rong^{1,2}, LI Zhen-hua¹, BIAN Bao-min¹, LIU Cheng-lin², JI Yun-jing¹

(1 Department of Information Physics and Engineer, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 School of Physics and Electronics, Yancheng Teachers University, Yancheng, Jiangsu 224002, China)

Abstract: In order to solve the problem of inspecting the optical fiber defects, a detection method based laser was proposed to inspect the optical fiber defects in this paper. Though analyzing the basic structure of optical fiber defects theoretically the principle of detection, a kind of experimental device was designed and established, which was used to carry out the detection experiments of the defects. In the experiment, a collimated He-Ne laser beam transverse incident fiber and the distribution image of optical forward scattering pattern on the optical scree were obtained for the next step image processing. Compared to the experimental results of the microscope method, it is found that the laser detection method is more effective to detect the defect of the optical fiber and has the same detection accuracy as the microscope method. The method can be used as a fiber drawing repetition measurement before coating the optical fiber.

Key words: Fiber optics; Physical optics; Optical detection; Strong bending; Scattering pattern; Defect-inspection

OCIS Codes: 060.2300; 260.0260; 120.4630; 120.4830

0 引言

光纤在制造过程中不可避免地会出现一些微小缺陷,这些缺陷在强弯曲(毫米量级)情况下易引起强应变效应,影响光信号的传输,严重时甚至导致制导光纤折断,在某些特殊应用场合上是不允许的.因此对光纤进行快速、准确、高效、实时微缺陷检测,对准确可靠预

测光纤在使用过程中的安全系数起至关重要的作用^[1-2].

目前实现光纤缺陷检测的方法有两类^[3-10]:一是基于光纤内部精细结构成像的监测方法,其操作简单、测量结果的准确度也令人满意,但测量速度慢、快速性差;二是基于测量光纤各种几何尺寸,但其最大缺点是对气泡等不会引起光纤几何尺寸变化的缺陷无效.采

基金项目:国家自然科学基金(No. 11175152)资助

第一作者:王荣(1965-),男,讲师,博士,主要研究方向为激光测量与信息感知. Email: yctcwangrong@163.com

收稿日期:2013-09-26;录用日期:2013-12-05

<http://www.photon.ac.cn>

用显微镜对包层表面的裂缝进行统计时,不能以裂缝的个数作为单位.一方面由于裂缝大小迥异,裂缝的个数并没有实际意义;另一方面,对于某些裂缝无法判断它的具体数目.而利用光纤缺陷激光检测法可以得到缺陷存在的准确位置,及被测缺陷对干涉图样的影响程度.

本文从光纤制造特点出发,通过研究光纤受到激光束横向入射时产生的前向散射光强的分布特性,建立了一套光纤缺陷激光检测方法,并搭建了检测实验装置进行光纤实际检测与分析.通过与显微镜测量结果的比较,发现该检测方法可有效实现缺陷数目检测,是一种有效的光纤缺陷检测手段.

1 光纤微缺陷基本结构

光纤一般由纤芯、包层和涂覆层组成.光纤在预制

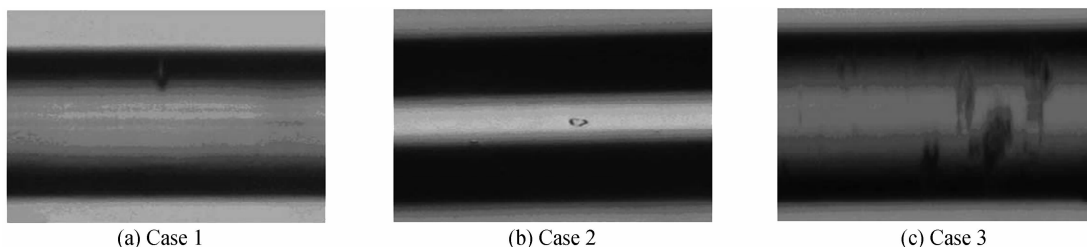


图1 光纤微缺陷基本结构
Fig. 1 Basic structure of the fiber micro-defects

2 光纤缺陷激光检测法

2.1 光纤前向散射图样的组成

光纤缺陷的激光检测法最基本的原理是:当一束准直的激光横向入射光纤的时候,沿着激光的前进方向将得到光纤的前向散射图样,如图2.

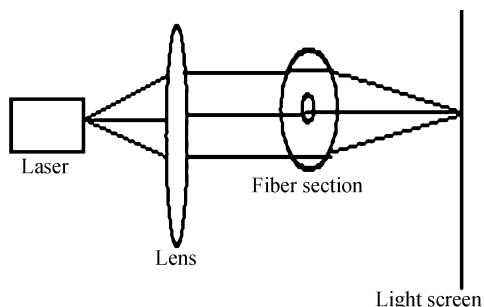


图2 光纤缺陷的激光检测法的原理
Fig. 2 Schematic diagram for the fiber defect detection method of the laser

图2所示散射图样主要由两部分组成:1)光纤边界在一束准直的激光横向入射下的夫琅和费衍射图像;2)经光纤折射的光线与光纤表面反射的光线所形成的干涉图像.

通常情况下,光纤的夫琅和费衍射光强衰减很快,对于前三级次极大的衍射角小于 1.5° ,它的光强已衰减到不及中央最大光强的1%;在图像处理中,用图像

棒的制备、拉丝和涂覆等过程中,容易产生气泡、缩颈及裂缝等缺陷而使光纤强度及损耗增大,其中裂缝缺陷对强弯曲的损耗影响大,尤其是横向裂缝有可能导致制导光纤折断^[11-13].

通过显微镜拍摄了大量制导光纤照片,发现光纤缺陷主要以裂缝的形式存在,有的光纤在一个视场内,(即大约 $700\ \mu\text{m}$ 长的范围)缺陷数目超过30个,有的光纤在一个视场内,缺陷数目1到4个.绝大多数位于光纤包层的表面附近并与纤芯垂直,如图1(a).同时,包层内部存在少量边缘光滑的气泡型缺陷如图1(b).缺陷在一般情况下对光纤内光信号传输不会产生明显影响,只是在弯曲半径小到毫米量级时,才显著影响.放线后的光纤存在着数目很大的缺陷(包层表面的裂缝)聚集如图1(c).

相减得到缺陷的相关信息,夫琅和费衍射的影响被消除,可以不考虑.

2.2 干涉图样的理论模型

当激光照射光纤时,可将激光分成表面反射光线和透射光线两个部分,这两部分光线在相遇时又发生干涉,所以整个系统可以近似于一个分振幅干涉系统^[14-15].

考虑光纤的内部结构,则进入光纤包层的光线被分成两个部分,一部分经过纤芯,一部分不经过纤芯,由于三类光线在空间分布的角度范围是不同的,对应于某一角度,参与干涉的光线也是不同的.假设光纤的半径为 r_1 ,折射率为 n_1 ,纤芯半径为 r_2 ,折射率为 n_2 ,屏的位置在无穷远处,如图3.

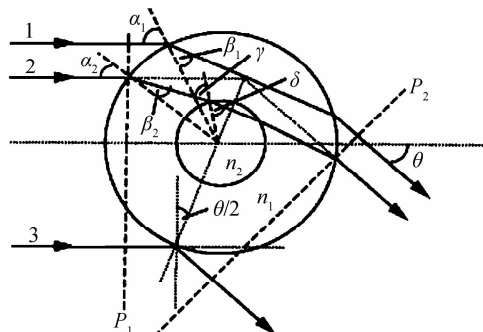


图3 具有相同出射角的相干光线
Fig. 3 Coherent lights of the same emergence angle

当光纤内部的光线与纤芯相切时,光线被分成反射光与折射光,对于不经过纤芯的反射光线来说,它的出射角达到极小值,定义为 θ_1 ;对于经过纤芯的折射光线来说,它的出射角达到极大值,定义为 θ_2 ,如图 4. 当光线与包层的外径相切时,不经过纤芯的光线的出射角达到极大值,定义为 θ_3 .

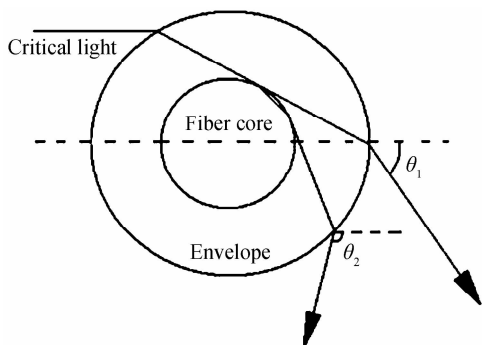


图 4 透射光线的出射角度 θ_1, θ_2 的定义

Fig. 4 Definition of the transmitted light emergence angle θ_1 and θ_2

当出射角度在 $[0, \theta_1]$ 区间内,经过纤芯的透射光线与表面反射光线相干涉;当出射角度在 $[\theta_1, \theta_2]$ 区间内,两类透射光线同时与表面反射光线相干涉;当出射角度在 $[\theta_2, \theta_3]$ 区间内,不经过纤芯的透射光线与表面反射光相干涉.

2.3 典型缺陷(包层表面裂缝)对干涉光强分布特性的影响

包层表面裂缝的缺陷对于干涉光强分布特性的影响是由以下两个因素决定:首先是缺陷本身的特性,例如缺陷的形状、大小;其次是缺陷所存在的位置.

很明显,当照明激光束和光纤的位置相对固定时,转动光纤使缺陷处于不同的位置,缺陷对于干涉图样光强分布特性的影响也会改变.

假设缺陷所影响的仅仅是经过光纤的透射光线,其实,假如裂缝同时影响了折射和反射的光线,情况都是类似的.若包层表面存在裂缝,它的形状和摆放位置如图 5.

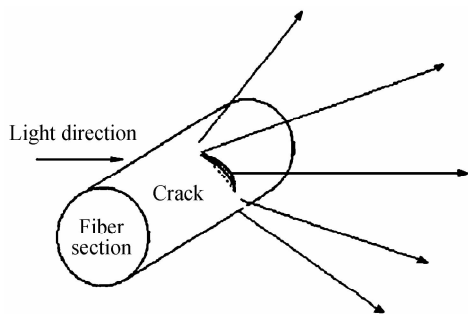


图 5 理想缺陷及其所在位置

Fig. 5 Ideal defect and its location

不考虑缺陷所引起的效应,而仅仅考虑由于光路提前进入空气所引起的光程差的改变.与正常的情况

相比,不同的裂缝深度会引起光程差不同,反映到干涉光强的分布特性如图 6.

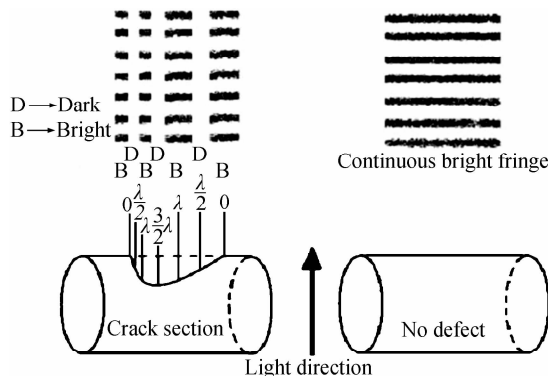


图 6 裂缝对光强分布的影响

Fig. 6 Effect of the crack on the light intensity distribution

实验中,采用缺陷图样与正常图样相减的方法,能够去掉干扰,仅留下缺陷的信息,很显然,相减之后的图样如图 7. 最终得到的图样(由若干条竖直的条纹组成)是包含着缺陷的信息的,显然条纹之间的间隔、条纹的条数、条纹的总宽度都是由缺陷本身的特性所决定的.

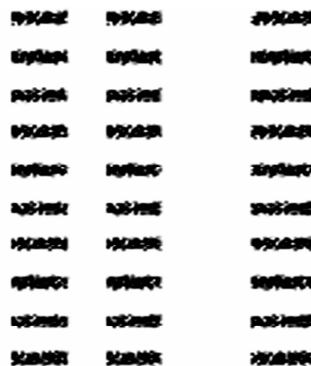


图 7 处理后的缺陷图样

Fig. 7 Defects pattern after treatment

3 光纤缺陷激光检测法的实验研究

3.1 实验装置及各项参数

用准直氦氖(He-Ne)激光束横向入射光纤,在距离光纤较远的光屏上得到光纤的前向散射图样的分布情况.然后,利用数码相机照相,最后再对这些图像进行处理.

使准直的激光束直接入射在光纤上,会遇到两个问题,一个是所形成的干涉图样在光屏上过于密集(为 1 mm 宽),人的肉眼难以识别其中的变化;另一个问题是激光器的光束的直径略大于光纤直径,这样的粗光束直接照射于光纤,会使受到缺陷影响的光束在整个光束中所占的比重非常小,(因为用显微镜观察可知,光纤上绝大部分裂缝的宽度不超过 $10 \mu\text{m}$),使得光屏上缺陷的信息掩盖在比它强得多的背景之中,无论对于识别还是后期的图像处理都很不方便.

实验中采用焦距为 3.5 cm 透镜,实验装置如图 8. 另外在实验装置中还会用到一面平面镜,能够使照相机不妨碍光路的情况下能够正对光屏,把散射图样拍摄下来. 另一个方面,光线通过反射镜的反射,使得在光屏上所得到的图样散开,给观察和后期的处理带来了更大的方便.

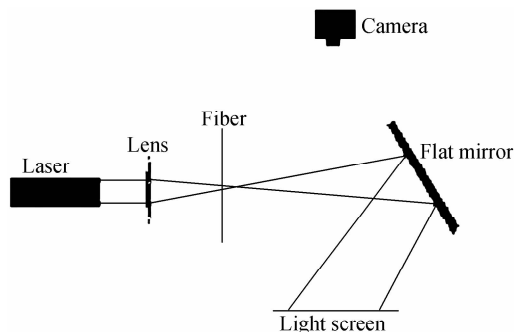


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental installation picture

实验的参数为:高速 CMOS 相机型号为 MC1300; 激光器波长为 $0.6328\mu\text{m}$; 透镜的焦距为 3.5 cm; 光纤距离透镜焦点的距离 2 cm; 光纤到反射镜的距离 41 cm; 反射镜放置的角度 60° ; 反射镜到屏的中央的距离 24 cm.

3.2 实验结果分析

图 9 为光纤散射图样的照片,它们分别截取了其中靠近中央的一部分. 图 9(a)显示的是完好光纤的散射图样,它是由明暗相间的横条纹组成,每一个横条纹都是完整的. 图 9(b)和图 9(c)是两张有缺陷的光纤散射图样,可以看出存在一些竖直的暗条纹,这吻合了前面的理论及假设.

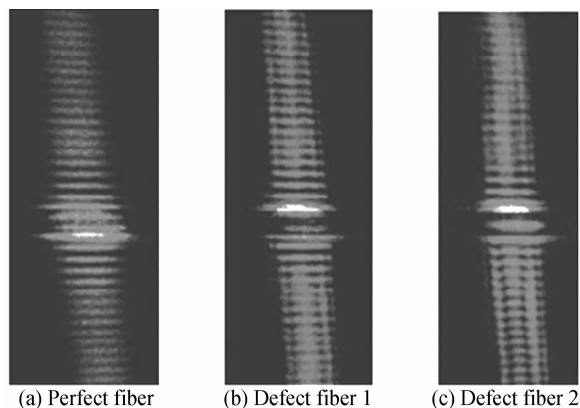


图 9 光纤的散射图样

Fig. 9 Optical fiber scattering pattern

在进行图像处理,即用有缺陷的图样(见图 9)与在相同条件下拍摄的没有缺陷的图样相减之后,得到了与图 7 相吻合的结果(见图 10).

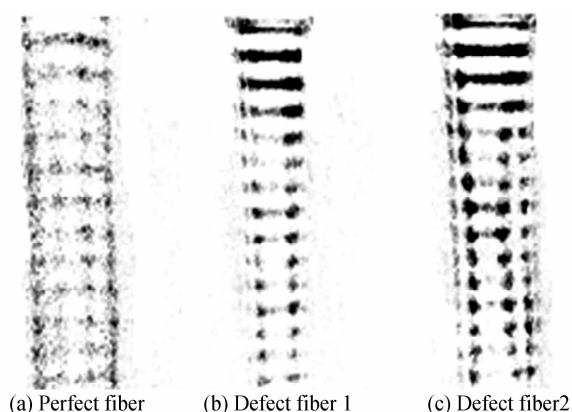


图 10 相减处理后的缺陷散射图样

Fig. 10 The defect scattering pattern after subtracting

这些包含缺陷信息的图样虽然存在着一些噪声的干扰,但是图 10(b)和图 10(c)中仍旧可以看出由多条竖直的暗条纹组成的缺陷,可以断定这类现象是由包层表面的裂纹所引起的.

3.3 两种方法对光纤缺陷的统计

在利用激光检测法进行缺陷统计时,由于实测光纤在固定的支架上每次只能移动 2 cm,所以每一段的统计长度限于 2 cm. 对于光纤缺陷的激光检测法,无法知道缺陷存在的具体情况,并且由于固定的支架可以移动 2 cm,调节旋钮一共可以转 20 圈,一圈对应 1 mm. 在统计时,记录下每一个光强分布异常在调节旋钮旋转多大的范围之内存在,并以此来对缺陷进行分类.

利用显微镜观察的缺陷统计,理论上由于使用显微镜观察只能看到光纤的一个面,对缺陷的检出率约为 50%. 在实验中通常遵循的原则为:

1) 对于相互靠的很近的缺陷,在一个视场内,(即大约 $700\mu\text{m}$ 长的范围)内陷数目超过 30 个,且无法把它们分开的缺陷,记作一个缺陷密集段.

2) 对于分散的比较开的缺陷,通常是 1 到 4 个靠的比较近(大致在 $125 \times 62.5\mu\text{m}^2$ 即光纤的直径乘以半径的范围内),而在附近没有其他缺陷,假如缺陷的总面积大于 $100\mu\text{m}^2$ 时,记作一个大缺陷存在点;总面积在 $20\mu\text{m}^2$ 到 $100\mu\text{m}^2$ 之间,记作一个小缺陷存在点;总面积小于 $20\mu\text{m}^2$ 时,忽略不计.

激光检测法与显微镜法对光纤缺陷的统计数据如表 1 所示. 从表 1 数据可以看到两种方法对于光纤缺陷的统计结果基本一致,例如第一段光纤的缺陷很少,在两种方法中都反映出来;第二段的缺陷很多,在显微镜下非常的密集,在激光检测中出现了连续旋转调节旋钮 12 圈(12 mm)都能连续看到缺陷这种情况. 在其它段中也有类似的关联,不再重复. 对光纤缺陷的激光检测法来说,在 2 cm 的光纤段中,平均可以检测出超

过 11 处缺陷点,对于一些实际使用中所需要达到的精度来说已经足够.

另外,由表 1 数据可知,在统计过程中观察到所谓

的缺陷密集段大多数存在于剥涂覆层时起始和结束的地方,由此可以看出剥离涂覆层的过程中,会产生大量的缺陷.

表 1 激光检测法与显微镜法对光纤缺陷的统计

Table1 statistics of the defect optical fiber for laser detection method and microscopy method

Segment of optical fiber (2cm)	Statistics of the defects by microscopy method			Statistics of the defects by laser detection method				
	Defect intensive segments	Count of big defects	Count of small defects	<0.5 mm	0.5~1 mm	1~1.5 mm	1.5~2 mm	>2mm
1	/	1	2	1	1	1	/	/
2	4	7	12	3	1	/	1	12mm there is one
3	1	2	3	3	2	1	/	/
4	2	3	15	13	1	/	2	/
5	1	3	13	15	1	/	/	/
6	/	8	29	14	3	/	/	/
7	/	6	13	13	5	/	1	/
8	/	3	8	8	3	1	1	/
9	2	5	12	1	4	1	1	2.5~3mm there is one 3~3.5mm there is one
10	1	2	9	8	3	/	/	6mm there is one
11	2	5	16	3	8	2	/	3mm there is one

4 结论

提出了一种光纤缺陷的激光检测方法,并进行了该方法的理论分析与实验.将实验结果与显微镜直接观察法得到的光纤缺陷进行统计比较,发现光纤缺陷的激光检测法可有效地进行缺陷检测,其检测精度与显微镜直接观察法保持一致.该激光检测方法具有可靠、稳定、可检测微缺陷、缺陷捕获概率高等特点,可用于光纤生产过程中光纤拉制后的缺陷复测.

参考文献

[1] WANG Xue-zhen, BIAN Bao-min, JI Yun-jing, et al. Theoretical model modify of bending loss of mono-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):819-823.
王雪珍,卞保民,纪运景,等.单模光纤弯曲损耗理论模型的修正[J].光子学报,2006, **35**(6):819-823.

[2] YOU Shan-hong, HAO Su-jun, YIN Zong-min, et al. Analysis and test of bend loss in single mode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 409-412.
游善红,郝素君,殷宗敏,等.单模光纤中弯曲损耗的测试及分析[J].光子学报,2003, **32**(4): 409-412.

[3] CHEUNG Y N, ZHU Y, CHENG C H, et al. A novel fluidic strain sensor for large strain measurement [J]. *Sensors and Actuators*, 2008, **147**(5): 401-408.

[4] ZHANG H, TAO X M, YU T X, et al. A novel sensate 'string' for large strain measurement at high temperature [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(2): 450-458.

[5] KIESEL S, PETERS K, HASSAN T, et al. Large deformation in fiber polymer optical fiber sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, **20**(6): 416-418.

[6] RENG L J, WANG T Y, DU B L. Analysis on transmission loss and optical spectrum properties of polymer optical fibers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(2): 162-164.
任丽静,王廷云,杜柏林.聚合物光纤损耗及光谱特性的测量分

析[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(2):162-164.

[7] SCHERMER R T, COLE J H. Improved bend loss formula verified for optical fiber by simulation and experiment [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, **43**(10): 899-909.

[8] 周树同. *光纤理论与测量*[M]. 上海:复旦大学出版社,1998: 219.

[9] KONG Y, Guo M X, Lu Y T. The influence of the fiber amplifier bending loss on fiber's gain [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 900-903.
孔勇,郭明秀,陆雨田.掺铒光纤放大器的弯曲损耗对增益的影响[J].光子学报,2003, **32**(8): 900-903.

[10] LIU Y G, TIAN J G, DONG X Y, et al. Expression and analysis on forward light scattering pattern in the inspection of optical fiber defects [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(7): 717-721.
刘艳格,田建国,董孝义,等.光纤缺陷检测中前向散射图样的表达与分析[J].光电子激光,2002, **13**(7):717-721.

[11] LIANG Hong, SHI Jian-hua. Measurement diameter of tapered fibers using Noncontact modes [J]. *Journal of communication University of China Science and Technology*, 2007, **14**(2):67-70.
梁红,史建华.非接触法测量锥形光纤直径的研究[J].中国传媒大学学报自然科学版,2007, **14**(2):67-70.

[12] 朱世国,付克祥. *纤维光学原理及实验研究*[M]. 成都:四川大学出版社,1992. 5-11.

[13] FAUSTINI L, MARTINI G. Bend loss in single-mode fibers [J]. *Journal of Light wave Technology*, 1997, **15**(4): 671-679.

[14] ZHENG S L, ZhANG X M, ChENK S. Far field pattern and differential mode attenuation of POF [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(12): 1435-1437.

[15] MIRIANASHVILI M, ONO K, HOTTA M. Coupled-mode analysis of loss in bent single-mode optical fibers [J]. *Japanese Journal Of Applied Physics (B)*, 2000, **39**(3): 1468-1471.