

## 塑料光纤激光打标散射点实验研究

刘楚嘉, 漆宇, 郜飞飞, 何涌, 庄其仁

(华侨大学 信息科学与工程学院 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)纤芯散射点的形状和大小尺寸控制对基于半导体激光器(LD)和侧面发光 POF 的 LCD 背光源设计具有重要意义。研究了一种表面无损伤的 POF 纤芯散射点的激光打标方法,基于非成像光学的边缘光线原理分析了激光打标制作 POF 纤芯散射点的二次聚焦过程,推导出激光侧面入射在 POF 上表面时的焦点坐标的表达式计算式。实验研究了 1.06  $\mu\text{m}$  波长激光在 POF 纤芯制作打标散射点时,激光光束半径(打标聚焦透镜高度)、激光功率和重复打标次数对 POF 散射点形状和体积尺寸的影响。纤芯内散射点的检测采用 650 nm 激光的散射光相对光强分布进行检测,通过显微照片的对比判断散射点的形状和尺寸。实验结果表明,POF 纤芯散射点的形状决定于激光光束半径(打标聚焦透镜高度),当聚焦透镜高度激光光束半径为束腰半径透镜焦距时,可以得到光纤径向细而长的条散射点;。当聚焦透镜高度小于聚焦透镜焦距时,在 POF 上下两个表面附近形成漏斗状散射点。而随着激光功率增大和重复打标次数增加,散射点的体积尺寸随着增加。单次打标时 POF 的激光损伤阈值约为 80  $\text{W}/\text{mm}^2$ ,而要使 POF 散射点具有稳定的细长条状,激光功率密度应大于 140  $\text{W}/\text{mm}^2$ 。

**关键词:** 散射点; 塑料光纤; 激光打标; 侧面发光

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0506002

## Experimental study on laser marking for scattering points of plastic optical fiber

Liu Chujia, Qi Yu, Gao Feifei, He Yong, Zhuang Qiren

(Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The controllable parameters of shape and size of the scattering points of the plastic optical fiber (POF) core are of great significance to the design of the LCD backlight based on the semiconductor laser diode (LD) and the side-glowing POF. A laser marking method for POF core scattering points with surface damage free was researched. Based on the principle of edge-ray in non-imaging optical theories, the secondary focusing at laser beam for marking POF core scattering points was analyzed, and the formulas for focal point coordinates of laser incident on the POF was derived. The effects of focusing lens height, laser power and marking repeat times on the shape and size of scattering points in the fiber core of POF were studied experimentally by using a 1.06  $\mu\text{m}$  laser marking system. Relative intensity

收稿日期: 2018-12-17; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H6016); 华侨大学研究生科研创新能力培育项目(1611301002)

作者简介: 刘楚嘉(1995-), 男, 硕士生, 主要从事照明与显示技术方面的研究。Email: 1291673576@qq.com

导师简介: 庄其仁(1960-), 男, 教授, 主要从事照明与显示技术和光电检测技术方面的研究。Email: qrzhuang@hqu.edu.cn

distribution of the scattered laser at 650 nm was used to detect scattering points in fiber core, the shape and size of the scattering points are judged by comparison of their micrographs. The experimental results showed that the shape of scattering points in the fiber core was determined by focusing lens height. When the focusing lens height was the focal length of the lens, elongate scattering points along the radial direction can be obtained. With the increase of laser power or marking repeat times, the size of scattering points increased. The laser damage threshold of POF was about 80 W/mm<sup>2</sup> under single laser marking. However, the laser power density should be greater than 140 W/mm<sup>2</sup> in order to make the scattering points have steady elongated shapes.

**Key words:** scattering points; plastic optical fiber; laser marking; side-glowing

## 0 引言

塑料光纤(Plastic Optical Fiber, POF)于 1966 年由美国杜邦公司发明, 后由三菱公司实现商业化。POF 为高透明聚合物聚苯乙烯(PS)<sup>[1]</sup>、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)<sup>[2]</sup>、聚碳酸酯(PC)<sup>[3]</sup>、环烯烃共聚物<sup>[4]</sup>、氟化聚合物<sup>[5]</sup>和硅树脂<sup>[6]</sup>等组成的一类光导纤维。塑料光纤凭借高弹性极限, 大弹性变形量, 高断裂韧性, 加工容易, 连接简单和成本低等优点, 替代石英光纤用作本地到因特网间的短距离数据传输, 以及作为光纤传感器用于工程领域和生物医学等领域的参量测量<sup>[7]</sup>。在 POF 上加工散射点的研究也得到研究者的重视, 如在 POF 上加工光栅散射点制作长周期光栅。Li Z 等<sup>[8]</sup>利用特殊材料组分 POF 的光敏特性, 采用水银灯的部分紫外光谱在 POF 的纤芯制作长周期光栅, 只需一块滤光玻璃和掩模板, 工艺简单, 但该制作方法不适合于常规 PMMA 材料的 POF。Roufael H 等<sup>[9]</sup>利用光纤激光啁啾脉冲放大飞秒激光系统, 在 POF 的侧面加工长周期光栅结构。这种加工方法利用飞秒激光加工的非线性效应, 超短激光脉冲和高强度激光能量使材料几乎没有熔化、液化和变形的过程而直接气化, 用来制作光纤表面微结构, 该方法加工速度快, 精度高, 但难以制作出表面无损伤的 POF 纤芯散射点。在照明应用领域, Fujieda I<sup>[10]</sup>利用带有散射点的 POF 制作 LCD 背光单元, 散射点是用加热的刀口挤压 POF 表面形成凹槽实现的, 因此此方法也不能用于制作表面无损伤 POF 纤芯散射点。

表面无损伤 POF 纤芯散射点可使光纤的高弹性极限, 大弹性变形量和高断裂韧性特性基本不变, 同时保持散射点的散射光学特性不受外界因素影响,

因此应用范围更广, 如作为侧面发光光纤背光源时, 容易实现均匀发光的设计。为此, 文中利用 PMMA 为纤芯材料的 POF 对 1.06 μm 激光的吸收特性, 研究激光打标法制作表面无损伤 POF 纤芯散射点的方法。通过理论分析和实验选择合适的激光打标参数, 经过 POF 的二次聚焦, 使纤芯内激光功率密度大于损伤阈值, 而包层上下表面激光功率密度低于 POF 熔化破坏阈值, 从而形成纤芯散射点, 并避免表面雕刻现象<sup>[11]</sup>。

研究 POF 的激光打标散射点技术可直接应用于基于半导体激光器(LD)和 POF 的新型 LCD 背光源设计<sup>[12]</sup>, 将 LD 发射光转换为平面点阵光源, 以代替传统导光板的改进技术<sup>[13]</sup>, 提高 LCD 背光源的光效率和色域<sup>[14]</sup>。

## 1 原理

采用激光打标法在 POF 纤芯制作散射点的原理图如图 1 所示。激光打标机的激光束以会聚角  $\varphi$  入

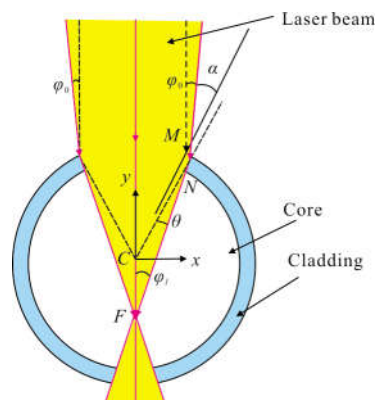


图 1 激光打标制作 POF 纤芯散射点原理图

Fig.1 Schematic diagram of the preparation of scattering points in POF fiber core using laser marking

射 POF 上表面,设激光束沿  $y$  轴反向传输,光轴经过 POF 中心  $C$  点(坐标原点),并在纤芯内会聚于  $F$  点。设 POF 纤芯折射率为  $n_1$ ,包层折射率为  $n_2$ ,光纤直径为  $D$ ,纤芯直径为  $d$ 。

激光束从垂直于光纤的侧面进入 POF 时,由于光纤产生柱面折射,激光束经过包层进入纤芯的会聚角变为  $\varphi_1$ 。若激光束在 POF 上表面的光束半径为  $w$ ,根据非成像光学的边缘光线原理,考察光束边缘光线在  $M(w, \sqrt{D^2 - w^2})$  处进入光纤后的路径,由图 1 知入射角  $\alpha$  为:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{2w}{D}\right) - \varphi_0 \quad (1)$$

根据折射定律,可得激光束边缘光线在  $M$  点进入包层的折射角为:

$$\theta_M = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right) \quad (2)$$

边缘光线在纤芯包层界面  $N$  点处的坐标可由下式计算:

$$\begin{cases} (\sqrt{D^2 - w^2} - y_N)^2 + (w - x_N)^2 = \frac{(D-d)^2}{4\cos^2\theta_M} \\ x_N^2 + y_N^2 = \frac{d^2}{4} \end{cases} \quad (3)$$

边缘光线进入纤芯的折射角:

$$\theta = \arcsin\left[\frac{n_2}{n_1} \sin\left(\arctan\left(\frac{(D-d)\tan\theta_M}{d}\right) + \theta_M\right)\right] \quad (4)$$

激光束在纤芯的会聚角为:

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{x_N}{y_N}\right) - \theta \quad (5)$$

最后可得激光束纤芯内的焦点  $F(0, y_F)$  的纵向坐标为:

$$y_F = \left(y_N - \frac{x_N}{\tan\varphi_1}\right) \quad (6)$$

由公式(1)~(6)可求得激光束经过 POF 的聚焦点  $F$  坐标,当 POF 内部的激光功率密度足够高时,根据 POF 纤芯材料 PMMA 在  $1.06 \mu\text{m}$  波长时具有较强的光吸收特性,如图 2 所示,可认为纤芯存在较强的热效应,出现热降解老化,同时由于非线性吸收、微量水分、酸、碱等杂质的作用而导致纤芯聚合物大分子的分子量降低、大分子结构改变等化学变化,最终导致折射率改变<sup>[5]</sup>,成为散射点,而不像  $\text{CO}_2$  激光打

标中只出现 PMMA 表面的融化但组织结构没有变化的现象<sup>[2]</sup>。

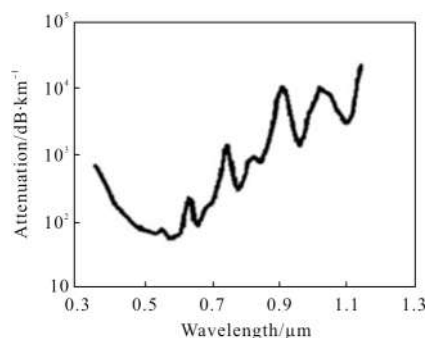


图 2 PMMA 的光吸收谱

Fig.2 Optical absorption spectra of PMMA

## 2 实验

### 2.1 实验装置原理、参数和实验方法

实验采用型号 YLP-D20 的激光打标机,激光最大功率 20 W,波长  $1.06 \mu\text{m}$ 。激光打标机工作原理如图 3 所示。内部激光扩束后直径 10 mm,聚焦透镜焦距 360 mm,可得激光打标机的光束会聚角  $\varphi_0 = 0.796^\circ$ 。实验用 POF 的参数为:纤芯折射率  $n_1 = 1.496$ ,包层折射率  $n_2 = 1.363$ ,光纤直径  $D = 0.5 \text{ mm}$ ,纤芯直径  $d = 0.48 \text{ mm}$ 。

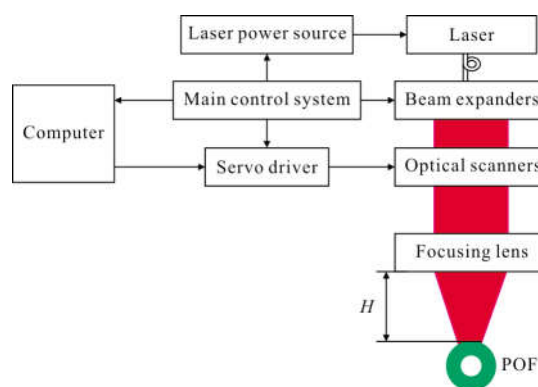


图 3 激光打标 POF 实验装置原理框图

Fig.3 Block diagram of experimental setup for laser marking of POF

采用定点打标方法对光斑的对准精度要求很高,所以实验采用扫描打标方法。激光束在  $x$  轴方向上以直线往返扫描,这样就能保证激光束在某一时刻从  $y$  轴垂直入射 POF。根据激光打标机的基本参数,设定扫描图形为一个长 1 mm,宽 0.1 mm 的矩形。经激光打标后的 POF 产生的内部散射点主要是

因为折射率的变化,其形状和尺寸很难从外观检测到,为此采用半导体激光器的 650 nm 红光在 POF 纤芯传输时的散射光相对强度分布检测方法,对散射点进行显微照片对比,根据相对强度变化判断散射点的形状和尺寸。

### 2.2 聚焦透镜高度(激光光束半径)对散射点的影响实验

物体表面的常规激光打标,聚焦透镜高度直接影响打标小孔的深度和宽度<sup>[16]</sup>。将 POF 放在打标区域的不同高度,即改变聚焦透镜高度,在 POF 上表面就得到不同激光入射光束半径。图 4 所示为根据公式(1)~(6)模拟计算得到的激光束在 POF 内部的光路图。图 4(a)~(d)分别为 POF 上表面入射激光光束半径等于 0.2、0.15、0.1、0.05 mm 时的 POF 内部光路轮廓。可见 POF 上表面光束半径越小,POF 内部光束二次会聚现象越不明显,因而功率密度变化也不明显。

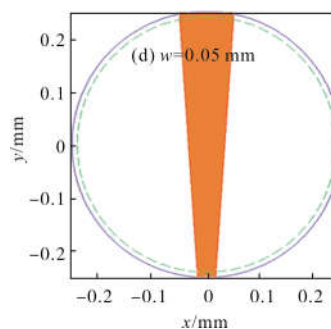
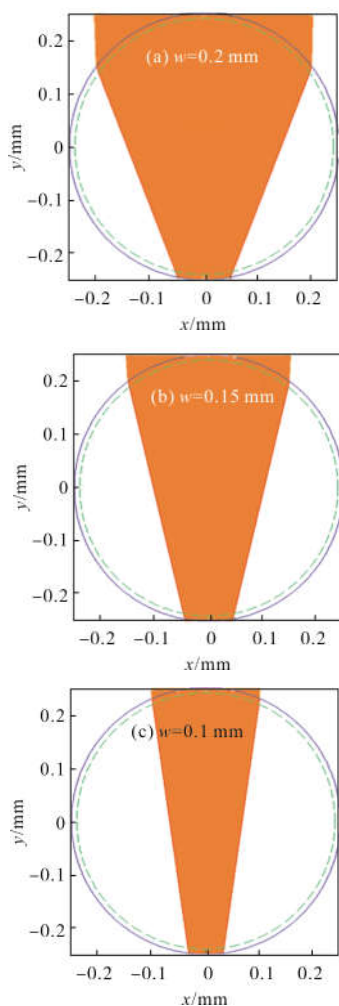


图 4 透射激光光束的轮廓随入射激光光束半径的变化模拟结果

Fig.4 Simulation results of the profile of the transmitted laser beam varies with the radius of the incident beam

设定激光打标参数为:打标次数 1 次,打标速度 1 mm/s,激光功率 18 W。手动调节升降主梁改变聚焦透镜高度,从而改变打标光束半径。聚焦透镜位于 POF 上方高度  $H$  分别为 340、345、350、355、360、365 mm,由激光束会聚角  $\varphi_0=0.796^\circ$  可得到打标光束半径为 0.326、0.257、0.188、0.119、0.05 mm(激光束束腰半径)和 0.119 mm。实验结果如图 5 所示。图 5(a)的打标光束半径大于 POF 半径,激光能量分散,密度低,POF 几乎不产生散射点;图 5(b)的打标光束半径略小于 POF 半径,根据图 4(a)的光路图,激光束经过 POF 二次聚焦后会聚在光纤下表面,光纤下表面功率密度高而出现散射点,但由于光束较大,形成的散射点还不明显;图 5(c)的打标光束半径与图 4(b)的光路图接近,POF 上表面的光束功率密度已足够使 POF 产生折射率改变,在上表面形成散射点,而激光能量被 POF 上表面吸收后功率密度降低,经过 POF 二次聚焦后,光束功率密度在光纤下表面再次提高到足以产生散射点;图 5(d)的打标光束半径已减小到 0.119 mm,由图 4(c)的光路图可以看到,此时 POF 内部光束二次会聚已不显著,考虑到 POF 的光吸收损耗,POF 上表面到内部的光路中激光束功率密度相差不大,因此在整个内部光路的大部分都能形成散射点,并且散射点尺寸较大。图 5(e)的打标光束半径为激光束的束腰半径,位于聚焦透镜的焦点处,此时参考图 4(d)的光路图,激光束能量集中在一个狭窄的区域,功率密度很高,因此散射点是一个横穿光纤的细长条状;图 5(f)的打标光束束腰在 POF 上方,所以光束是发散的,经过 POF 二次聚焦,焦点在 POF 下方,但由于光束半径较大(约 0.112 mm),只

有靠近光轴的部分其功率密度才足以产生散射点, 所以散射点为 POF 下方的一个细长条状。

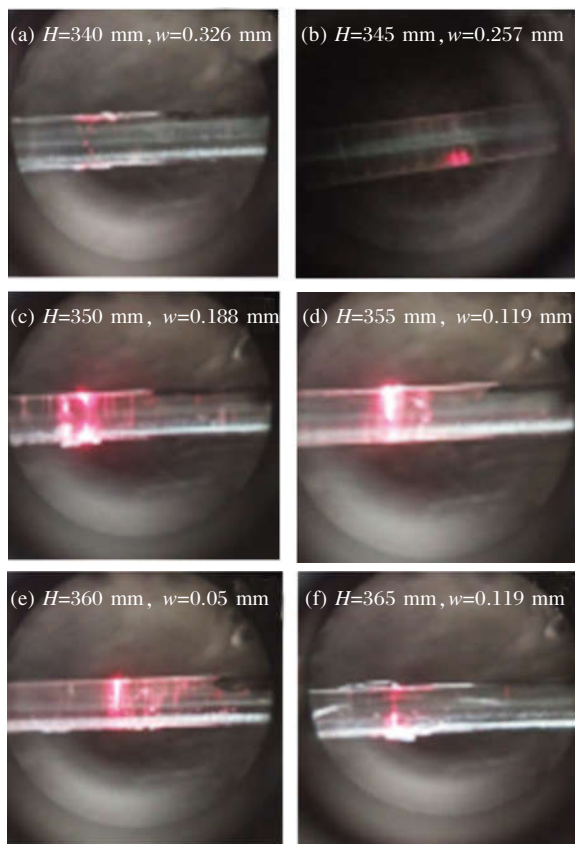


图 5 不同聚焦透镜高度下激光打标得到的 POF 散射点显微照片

Fig.5 Photomicrographs of the POF scattering points prepared by laser marking with different focusing lens heights

### 2.3 激光功率对散射点的影响实验

设定激光打标参数为: 打标次数 1 次, 打标速度 1 mm/s。固定聚焦透镜高度  $H$  为聚焦透镜焦距 360 mm, 即打标光束半径  $w=0.05$  mm, 改变激光功率从 2~20 W 每隔 2 W 进行一次 POF 打标实验, 实验结果如图 6 所示。图 6(a)~(c) 为打标功率 2、4、6 W 的 POF 散射图, 可见没有出现散射点; 图 6(d)~(f) 为打标功率 8、10、12 W 的 POF 散射图, 可以看到光纤已出现散射点, 但散射点形状不确定, 尺寸较小; 图 6(g)~(i) 为打标功率 14、16、18 W 的 POF 散射图, 散射点形状较稳定, 为一个横穿光纤的细长条状, 而且打标功率越大, 散射点尺寸越大。

打标激光功率对散射点的影响可以用激光损伤阈值来表示, 它是衡量一个光学元件承受光辐射能力的参数, 代表元件可以承受的最大光功率密度。从

图 6 可以看出, 当打标功率为 8 W 时, POF 开始出现散射点, 因此可以认为此时 POF 已出现损伤。打标扫描图形为一个长 1 mm, 宽 0.1 mm 的矩形, 打标速度 1 mm/s, 假定光束分布为矩形时, 可得 POF

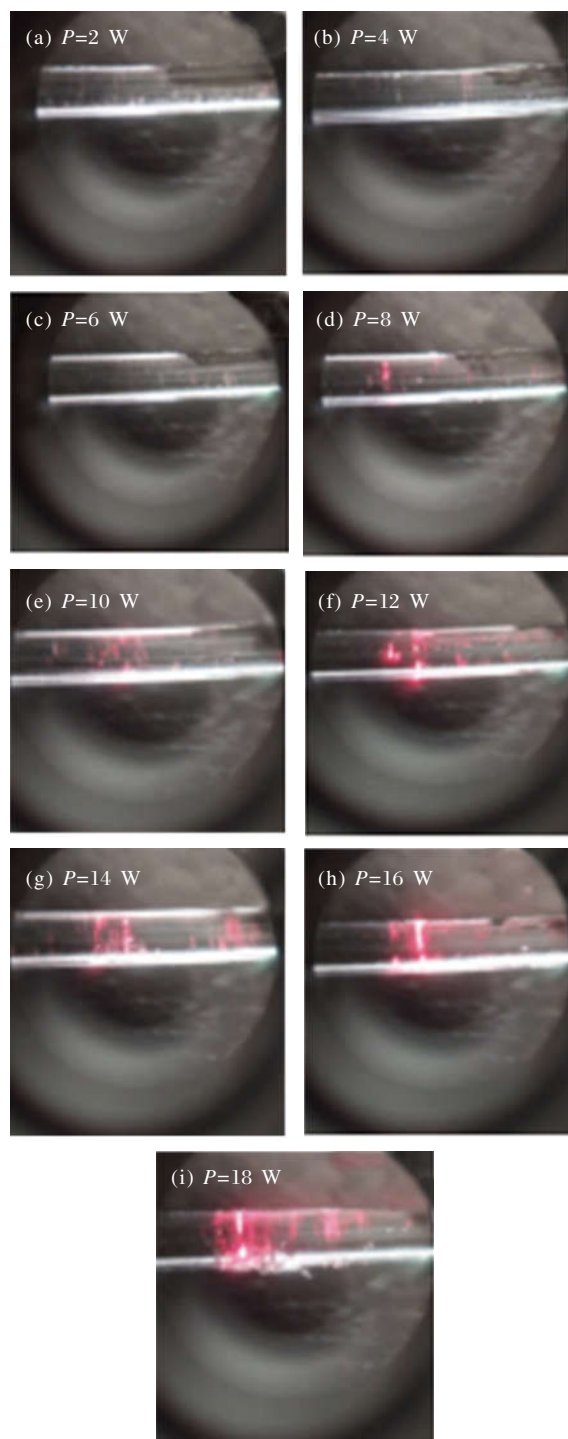


图 6 不同激光功率下激光打标 POF 散射点的显微照片  
Fig.6 Photomicrographs of the POF scattering points prepared by laser marking with different laser powers

的激光损伤阈值为  $80 \text{ W/mm}^2$ 。要使 POF 散射点具有稳定的线条状和较大的尺寸, 由图 6 知需要激光功率大于  $14 \text{ W}$ , 即激光功率密度应大于  $140 \text{ W/mm}^2$ 。

### 2.4 重复打标次数对散射点的影响实验

设定激光打标参数为: 打标速度  $200 \text{ mm/s}$ , 聚焦透镜高度  $H=400 \text{ mm}$ , 打标图形为  $0.5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  的矩形。先设定打标激光功率为  $18 \text{ W}$  (功率密度约为  $36 \text{ W/mm}^2$ ), 分别改变打标次数为 50 次, 100 次, 150 次, 200 次, 得到 POF 散射点如图 7(a)~(d) 所示。可以看到打标次数 50 次时 POF 没有出现散射点, 打标次数增加到 150 次和 200 次时可以看到 POF 表面有明显的散射点, 说明虽然激光功率密度没有达到损伤阈值, 但由于累积效应, 重复打标次数的增加使 POF 表面首先产生热降解老化而出现散射点。改变打标激光功率为  $20 \text{ W}$  (功率密度约为  $40 \text{ W/mm}^2$ ), 得到 POF 散射点如图 8(a)~(d) 所示。可以看到, 当打标功率增大时, 随着打标次数的增加, 散射点不仅在 POF 表面出现, 而且在 POF 内部也有明显的散射点。而随着打标次数的增加, 散射点的尺寸随着增大。

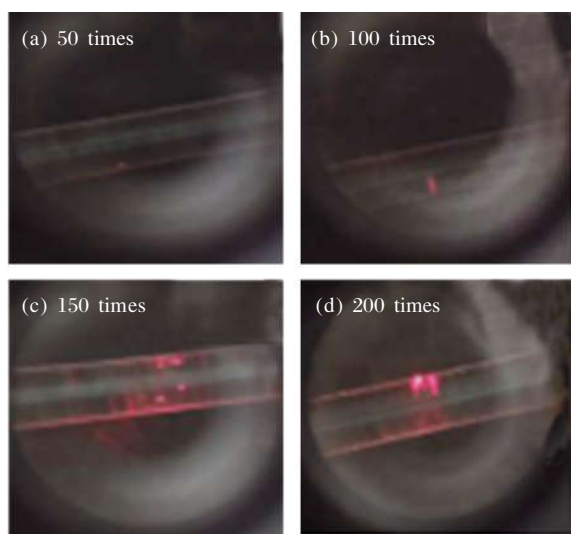


图 7 打标功率  $18 \text{ W}$  时重复打标次数对散射点的影响  
Fig.7 Effect of marking repeat times on scattering points at laser power of  $18 \text{ W}$

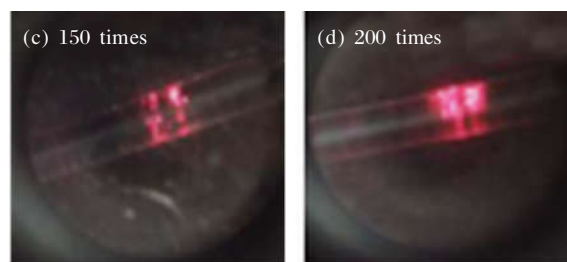
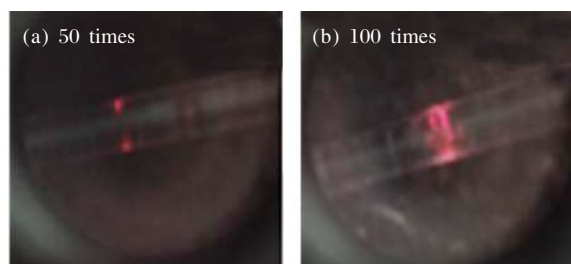


图 8 打标功率  $20 \text{ W}$  时重复打标次数对散射点的影响  
Fig.8 Effect of marking repeat times on scattering points at laser power of  $20 \text{ W}$

### 3 结 论

采用  $1.06 \mu\text{m}$  波长的激光打标机制作光纤纤芯散射点, 实验研究了激光光束半径 (聚焦透镜高度)、激光功率和重复打标次数对制作散射点形状的影响。结果表明, 在激光功率  $18 \text{ W}$  不变条件下, 当聚焦透镜高度使打标光束半径大于 POF 半径 ( $250 \mu\text{m}$ ) 时 POF 纤芯内不产生散射点; 随着聚焦透镜高度的降低打标光束半径减小, 激光束经过 POF 二次聚焦后会聚在光纤下表面, 光纤下表面首先出现散射点, 随后在上表面和下表面同时产生散射点; 当降低聚焦透镜高度使打标光束半径减小到  $120 \mu\text{m}$  时, 在 POF 纤芯和包层出现一个较宽的径向长条状散射点; 当继续降低聚焦透镜高度到打标机聚焦透镜焦距长度时, 打标光束半径为激光束的束腰半径, 得到的散射点是一个横穿光纤的细长条状; 当激光束焦点在 POF 下方时, 散射点为 POF 下方的一个短细条状。上述实验结果与理论分析结果一致。进一步实验结果表明, 在打标光束半径为激光束的束腰半径条件下, 增大激光功率和增加重复打标次数, 都会使散射点的尺寸向纵深方向扩大。一次打标时 POF 的激光损伤阈值约为  $80 \text{ W/mm}^2$ , 而要使 POF 散射点具有稳定的线条状, 激光功率密度应大于  $140 \text{ W/mm}^2$ ; 随着重复打标次数增加, 激光损伤阈值随着降低。通过选择合适的激光光束半径 (聚焦透镜高度)、激光功率和重复打标次数, 可以得到所需要的散射点形状和尺寸。

### 参考文献:

[1] Sun X, Zhou B, Zhao W, et al. Passively Q-switched Erbium-doped fiber lasers using PbS polystyrene film as

- saturable absorber [C]//International Conference on Optical Communications and Networks. IEEE, 2017: 1-2.
- [2] Tan Wensheng, Zhou Jianzhong, Huang Shu, et al. Analysis on melting morphology and tissue features of PMMA laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206002. (in Chinese)  
谭文胜, 周建忠, 黄舒, 等. PMMA 激光辐照融化形貌和组织特征分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1206002.
- [3] Woyessa G, Fasano A, Markos C, et al. Low loss polycarbonate polymer optical fiber for high temperature FBG humidity sensing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(7): 575-578.
- [4] Chen Q, Zhu W, Kong D, et al. Development of 2.5 THz suspended porous microstructured fiber based on cyclic-olefin copolymer[J]. *Optik*, 2017, 145: 56-60.
- [5] Cong Z, Liu H, Wang W, et al. Alternating polymers based on fluorinated alkoxyphenyl-substituted benzo[1,2-b:4,5-b'] dithiophene and isoindigo derivatives for polymer solar cells [J]. *Dyes & Pigments*, 2017, 146: 529-536.
- [6] Sandmeyer F, Funk E, Loessel G. Silicone resin composition for optical semiconductors: US, 9688819[P]. 2017-06-27.
- [7] Ma Q, Ni K, Huang R, et al. Simultaneous temperature and refractive index measurement based on optical fiber sensor[C]//International Conference on Optical Communications and Networks. IEEE, 2017: 1-3.
- [8] Li Z, Tam H Y, Xu L, et al. Fabrication of long-period gratings in poly (methyl methacrylate-co-methyl vinyl ketone-co-benzyl methacrylate)-core polymer optical fiber by use of a mercury lamp [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1117-1119.
- [9] Roufael H, Castrellon-Urbe J, Lomer M, et al. Fast laser POF side long period gratings fabrication[C]// Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications. 2013: F2. 29.
- [10] Fujieda I. Laser backlight unit based on a leaky optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 4001.
- [11] Wang Yanhu, Chen Xizhang. Engraving technology of synthetic glass by fiber laser[J]. *Laser Journal*, 2015, 36(8): 90-93. (in Chinese)  
王艳虎, 陈希章. 光纤激光雕刻有机玻璃工艺研究 [J]. 激光杂志, 2015, 36(8): 90-93.
- [12] Fu Hanyi, Liu Weiqi, Liu Hua, et al. Color-recurrent system in high-definition laser display [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1774-1780. (in Chinese)  
付瀚毅, 刘伟奇, 柳华, 等. 高清激光显示中的色彩再现系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(7): 1774-1780.
- [13] Luo Zhenyue, Chenb Yu Wen, Wu Shin-Tson. Polarization-preserving light guide plate for a linearly polarized backlight [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(3): 208-214.
- [14] Zhao Zhitong, Zhang He, Zou Yonggang, et al. Design and research of side lighted fiber of laser backlight source in liquid crystal display [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(3): 32-40. (in Chinese)  
赵致童, 张贺, 邹永刚, 等. 液晶显示器激光背光光源侧体发光光纤的设计与研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 32-40.
- [15] Ju Zhongkai. Preparation of the grating structure in polymer optical fiber by femtosecond laser [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)  
鞠忠凯. 聚合物光纤光栅结构的飞秒激光制备 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [16] Chen M F, Hsiao W T, Huang W L, et al. Laser coding on the eggshell using pulsed-laser marking system [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(2): 737-74.