

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202205002



# 用于裂隙光源的侧面发光 塑料光纤散射点设计

龚冬梅<sup>1</sup>, 庄秀秀<sup>2</sup>, 洪雪梅<sup>1</sup>, 庄凤江<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 图书馆, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 设计一种侧面发光塑料光纤表面正四棱锥形微结构散射点,使侧面发光塑料光纤可用作裂隙灯显微镜的裂隙光源,以减小裂隙光源的体积.采用光学仿真软件分析光纤上表面(有散射点)和光纤下表面(无散射点)的散射率,当塑料光纤直径为1 mm时,得到优化后的正四棱锥散射点的底边宽度和深度均为80  $\mu\text{m}$ .仿真结果表明,光纤下表面散射光的光束发散角在垂直于光纤方向约为 $40^\circ$ ,在平行于光纤方向约为 $110^\circ$ ,经过焦距为50 mm的投射镜会聚后的光带宽度约为0.3 mm,可以满足裂隙灯显微镜的要求.

**关键词:** 裂隙光源; 塑料光纤; 微结构散射点; 侧面发光塑料光纤

中图分类号: O 439

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)02-0250-07

## Design of Scattering Point of Side-Glowing Plastic Optical Fiber for Slit Light Source

GONG Dongmei<sup>1</sup>, ZHUANG Xiuxiu<sup>2</sup>,  
HONG Xuemei<sup>1</sup>, ZHUANG Fengjiang<sup>1</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Library, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** A kind of regular pyramid microstructure scattering point is designed on the surface of side-glowing plastic optical fiber, so that the side-glowing plastic optical fiber can be used as the slit light source of slit lamp microscope to reduce the volume of slit light source. The optical simulation software is used to analyze the scattering rate of the upper surface (with scattering points) of the optical fiber and the lower surface (without scattering points) of the optical fiber. When the diameter of the plastic optical fiber is 1 mm, the width of the bottom edge and depth of the optimized regular pyramid scattering point are both 80  $\mu\text{m}$ . The simulation results show that the beam divergence angle of the scattered light on the lower surface of the optical fiber is about  $40^\circ$  in the direction perpendicular to the optical fiber and about  $110^\circ$  in the direction parallel to the optical fiber, and the light band width after being converged by the projector with a focal length of 50 mm is about 0.3 mm, which can meet the requirements of slit lamp microscope.

**Keywords:** slit light source; plastic optical fiber; microstructure scattering point; side-glowing plastic optical fiber

收稿日期: 2022-05-29

通信作者: 龚冬梅(1968-),女,高级实验师,主要从事光电子技术实验的研究. E-mail: dmcong@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技计划高校产学研合作重大项目(2016H6016); 华侨大学实验教学与管理改革课题(612-5042 1036)

裂隙灯显微镜是眼科检查必不可少的重要仪器,随着智能化设备的不断普及,裂隙灯显微镜逐渐向数码智能化、结构小型化方向发展. Shu 等<sup>[1]</sup>将传统裂隙灯和数码相机结合成一种多功能裂隙灯生物显微镜,可以定量评估眼表血管直径、血流速度和血流率,也可以创建无创性微血管灌注图. 隋成华等<sup>[2-3]</sup>设计一套 5 档式数码裂隙灯显微镜光学系统和具有集光镜、聚光镜的科勒照明系统. 黄幼萍等<sup>[4]</sup>设计一种高性能数码裂隙灯显微镜前置物镜. 为了便于出诊和临床巡查,手持式裂隙灯应运而生,并不断地改进优化<sup>[5-6]</sup>.

裂隙灯显微镜主要包括光源组件和光学观察组件,裂隙光源是裂隙灯的重要组件,上述研究中的裂隙光源由于需要透镜组件而难以实现微型化,因此,可采用一种用于裂隙光源的表面微结构侧面发光塑料光纤,该光纤结构简单,可降低裂隙灯的体积、质量和成本. 侧面发光塑料光纤是一种新型光源,具有安全性高、韧性大、尺寸小、形状多样、可靠性高、寿命长等特性,可用于发光织物<sup>[7-8]</sup>、装饰照明<sup>[9-10]</sup>和液晶显示背光源<sup>[11-12]</sup>等领域. 实现塑料光纤侧面发光的方法较多,损伤芯皮结构(表面微结构)法由于设计灵活,受到研究者的青睐<sup>[13-16]</sup>. 然而,现有的侧面发光光纤相关研究对发光光束发散角没有严格要求,使其无法直接用作裂隙光源. 因此,本文设计一种横向发散角很小的塑料光纤侧面发光光源,可用作裂隙灯显微镜的裂隙光源.

## 1 散射点设计原理

### 1.1 塑料光纤裂隙光源工作原理

传统裂隙光源和塑料光纤裂隙光源,如图 1 所示. 传统裂隙灯显微镜系统<sup>[17]</sup>主要由裂隙光源系统和显微镜系统组成,裂隙光源系统主要用于产生片状光束(裂隙光),其结构复杂,体积较大. 将塑料光纤裂隙光源(图 1(b))取代传统裂隙光源(图 1(a)),塑料光纤位于裂隙控制闸与投射镜之间. 改进后的裂隙光源结构简单,体积减小. 塑料光纤裂隙光源的塑料光纤与白光 LED 耦合部分是一个球形锥结构,用于提高白光 LED 光源的耦合效率,塑料光纤上表面有一列正四棱锥形散射点,光纤内传输的光线通过散射点散射后,先经过光纤自身柱透镜会聚,形成片状光束,然后通过投射镜二次会聚,在目标面(眼球)得到很窄的光带.

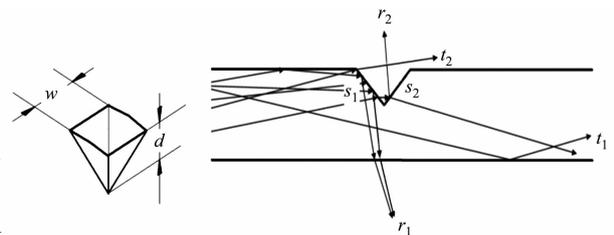


图 1 传统裂隙光源和塑料光纤裂隙光源

Fig. 1 Traditional slit light source and plastic optical fiber slit light source

### 1.2 散射点结构

正四棱锥形散射点结构和散射光线示意图,如图 2 所示. 图 2 中: $w, d$  分别为正四棱锥形散射点的底边宽度和深度; $s_1, s_2$  为面; $r_1, r_2, t_1, t_2$  均为光线. 当入射到光纤中的光线到达正四棱锥形散射点的第一个面  $s_1$  时,部分光线(光线  $r_1$ )满足全反射条件从光纤下表面散射射出;另一部分光线透过面  $s_1$  到达面  $s_2$ ,在面  $s_2$ ,大部分光线(光线  $t_1$ )透射后,再次进入光纤纤芯传输;很小一部分光线(光线  $r_2$ )反射后,从光纤上侧面散射射出. 此外,还有一小部分



(a) 散射点结构 (b) 散射光线

图 2 正四棱锥形散射点结构和散射光线示意图

Fig. 2 Sketch map of regular pyramid scattering point structure and scattered light

光线(光线  $t_2$ )透过面  $s_1$  后,直接从光纤上侧面散射射出.因此,光纤下表面散射光主要由一系列光线  $r_1$  组成,光纤上表面散射光主要由一系列光线  $r_2, t_2$  组成.

### 1.3 塑料光纤会聚光原理

塑料光纤会聚光原理图,如图3所示.图3中: $n_1$ 为折射率.塑料光纤可看作单柱面透镜,光线在折射率为  $n_1$  (塑料光纤折射率为 1.496)的光纤内散射点散射到光纤下侧面射出的过程是一个会聚过程,塑料光纤内散射光线经过光纤表面发生折射,折射面为单球面透镜,物方焦距  $f = (n_1 R)/(n_1 - 1) \approx 3R$ ,  $R$  为光纤半径.

由于散射点与光纤下侧面的距离小于  $3R$ ,故散射点经过塑料光纤会聚后形成虚像位于光纤上方.该虚像的位置是传统裂隙灯的裂隙控制闸位置,改用塑料光纤裂隙灯光源后,这个裂隙控制闸位置等价于降低到光纤上的散射点位置.此外,由于传统裂隙灯的灯泡位于裂隙控制闸的上方,而塑料光纤的入射光源 LED 位于塑料光纤同一高度,这进一步缩短了裂隙灯光源的高度,极大减小了裂隙灯光源系统的体积.

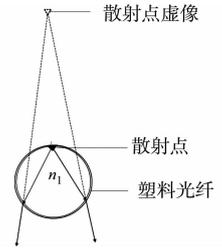


图3 塑料光纤会聚光原理图

Fig.3 Schematic diagram of plastic optical fiber converging light

## 2 散射点参数设计

根据塑料光纤正四棱锥形散射点模型,采用 TracePro 光学仿真软件进行建模仿真,模型中正四棱锥形散射点位于塑料光纤上表面.改变正四棱锥散射点底边宽度和深度,可得塑料光纤上表面和下表面的散射率,找到光纤上表面散射率最低,而下表面散射率最高的条件,从而获得最佳散射点结构参数.塑料光纤基本参数,如表1所示.

表1 塑料光纤基本参数

Tab.1 Basic parameters of plastic optical fiber

参数	典型值	参数	典型值
纤芯折射率	1.496	纤芯直径/ $\mu\text{m}$	986
包层折射率	1.363	包层直径/ $\mu\text{m}$	1 000
折射率分布	阶跃		

散射点散射率( $\alpha$ )定义为散射光通量( $\varphi_s$ )与入射光通量( $\varphi_i$ )的比值,即

$$\alpha = \varphi_s / \varphi_i. \quad (1)$$

### 2.1 散射点位置

光纤上表面和下表面的散射率变化曲线,分别如图4,5所示.图4,5中: $\alpha_u$ 为光纤上表面散射率; $\alpha_l$ 为光纤下表面散射率.

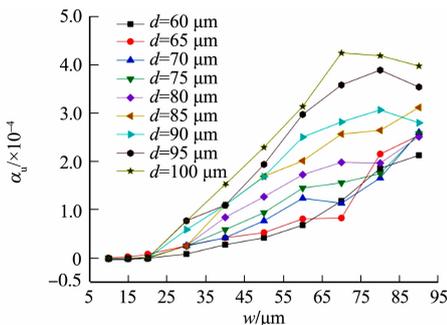


图4 光纤上表面散射率变化曲线

Fig.4 Variation curves of scattering rate of upper surface of optical fiber

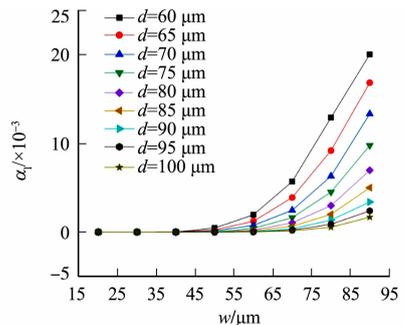


图5 光纤下表面散射率变化曲线

Fig.5 Variation curves of scattering rate of lower surface of optical fiber

由图4可知:光纤上表面散射率随着底边宽度和深度的增大而增大;当散射点深度为  $60 \sim 100 \mu\text{m}$  时,底边宽度小于  $20 \mu\text{m}$  的散射点在光纤上表面的散射率接近于0,上表面几乎没有散射光;当  $w = 70 \mu\text{m}$ ,  $d = 100 \mu\text{m}$  时,光纤上表面散射率达到最大值  $4.25 \times 10^{-4}$ .

由图 5 可知: 光纤下表面散射率随着散射点底边宽度的增大而增大, 而随着散射点深度的增大而减小, 这是因为散射点底边宽度增大, 满足全反射条件的光线  $r_1$  数量增多, 因而光纤下表面散射率增大, 同理, 当散射点深度增大, 满足全反射条件的光线  $r_1$  数量减少, 使光纤下表面散射率减小; 当散射点深度为  $60 \sim 100 \mu\text{m}$  时, 底边宽度小于  $40 \mu\text{m}$  的散射点在光纤下表面的散射率接近于 0, 光纤下表面几乎没有散射光; 当  $w=90 \mu\text{m}, d=60 \mu\text{m}$  时, 光纤下表面散射率达到最大值 0.02。

由此可知, 光纤下表面的散射率最大值约为光纤上表面的散射率最大值的 47 倍, 说明散射点的散射光大部分从光纤下表面射出, 因此, 当采用光纤下表面作为散射光出射面时, 选择散射点位于光纤上表面是正确的。

## 2.2 散射点深宽比

散射率比值变化曲线, 如图 6 所示。图 6 中:  $p$  为散射率比值, 即下表面散射率与总散射率的比值; 散射点深度变化范围为  $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

由图 6 可知: 对于固定的散射点深度, 散射率比值随着散射点底边宽度的增大而单调增大; 当  $w=d$  时, 散射率比值接近最大值 1, 此时, 光纤下表面散射率与总散射率基本相等, 即几乎全部散射光从光纤下表面射出。因此, 光纤表面正四棱锥散射点参数的第 1 个优化条件是散射点底边宽度与深度相等 ( $w=d$ )。

## 2.3 散射点大小

散射点总散射率 ( $\alpha$ , 光纤上表面散射率与下表面散射率之和) 变化曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可知: 该曲线与图 5 基本相同, 说明散射点总散射率近似等于下表面散射率; 散射点总散射率随着散射点底边宽度的增大而增大, 而随着散射点深度的增大而减小。因此, 当散射点深度不变时, 增大散射点宽度可以使散射点总散射率增大。根据光纤传输原理, 经过传输长度 ( $L$ ) 后的光通量  $\varphi_o = \varphi_i \exp(-\partial L)$ ,  $\partial$  为损耗系数。由于损耗系数正比于散射点总散射率, 光纤内传输的光通量随散射点总散射率的增大而呈现指数衰减, 影响散射点阵列的散射光强度均匀性, 所以散射点总散射率不宜过大。

如果在裂隙灯发光光纤表面设置 100 个散射点, 并使光纤末端的光通量不低于入射端的一半, 则单个散射点的总散射率应低于 0.006 8, 根据第一优化条件  $w=d$ , 并由图 7 曲线进一步优化, 得到第 2 个优化条件, 即  $w=d=80 \mu\text{m}$ 。

# 3 实验结果与分析

## 3.1 散射光极坐标 Iso 坎德拉图

在仿真实验中, 在光纤底部放置平行于水平面的检测板, 通过检测板上的极坐标 Iso 坎德拉图分析塑料光纤下表面散射光线的角度分布。极坐标 Iso 坎德拉图展示的是球坐标极轴上的球极角和方位角, 该图把一个半球映射到一个平面上, 光线角分布以极坐标的格式显示, 球坐标中心在散射点正下方的光纤轴线上, 极轴通过散射点中心。在极轴上观察, 极坐标的极就是图的中心的一个点; 极轴上的球极角为间隔  $10^\circ$  的一组圆环 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ); 方位角为间隔  $15^\circ$  的一组径向直线组成 ( $0^\circ \sim 360^\circ$ ),  $0^\circ$  方位角指向光纤入射光方向。

固定散射点深度 ( $d=80 \mu\text{m}$ ), 散射点宽度从  $40 \mu\text{m}$  变化到  $90 \mu\text{m}$ , 可得光纤下表面散射光的极坐标 Iso 坎德拉图, 如图 8 所示。图 8 中:  $I$  为辐(射)强度。由图 8 可知:  $w=40 \mu\text{m}$  的极坐标 Iso 坎德拉图只有一条散射光线位于球极角  $84^\circ$ , 方位角  $355^\circ$  (图 8(a)), 此时光纤下表面几乎无散射光; 随着散射点宽度逐渐增大至  $50, 60, 70, 80, 90 \mu\text{m}$ , 光纤下表面散射光线数量相应增加至 5, 327, 1 395, 2 677, 3 929

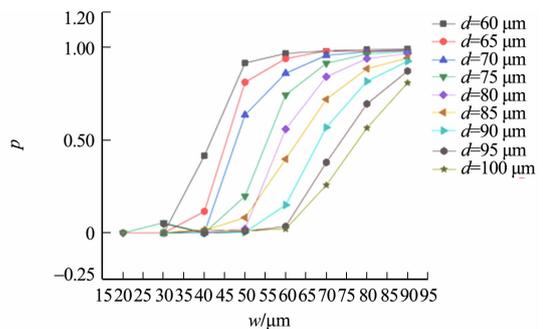


图 6 散射率比值变化曲线

Fig. 6 Variation curves of ratios of scattering rate

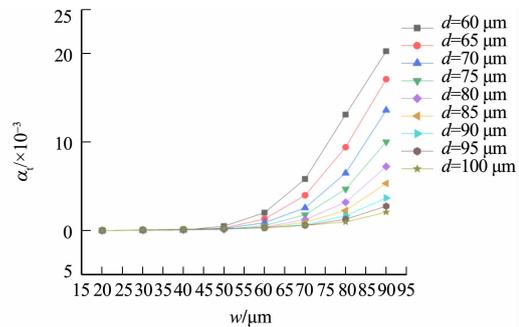


图 7 散射点总散射率变化曲线

Fig. 7 Variation curves of total scattering rate of scattering points

(图 8(b)~8(f));随着散射点宽度增大,散射光线集中区域中心从球极角  $65^\circ$  左右逐渐移动到  $40^\circ$  左右(图 8(c)~8(f)),即散射光线逐渐向光纤下表面法线靠近,同时,散射光线集中区域的方位角保持在  $160^\circ\sim 200^\circ$ ,说明光纤下表面散射光在垂直于光纤方向的光束发散角约为  $40^\circ$ 。

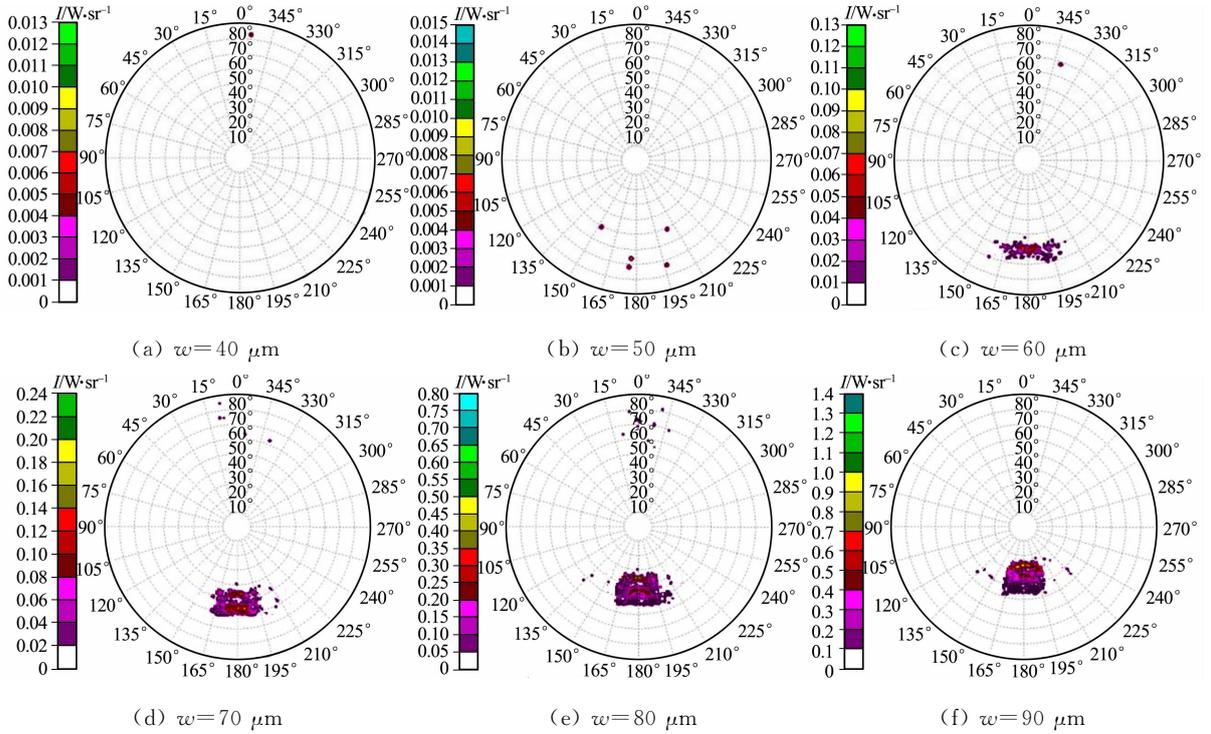


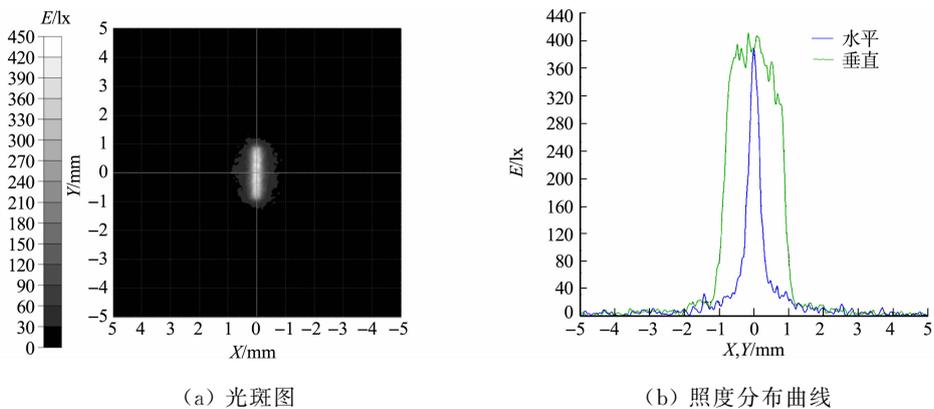
图 8 光纤下表面散射光的极坐标 Iso 坎德拉图( $d=80\ \mu\text{m}$ )

Fig. 8 Polar Iso candela diagram of scattering light of lower surface of optical fiber ( $d=80\ \mu\text{m}$ )

因此,当选择  $\omega=d=80\ \mu\text{m}$  时(图 8(e)),光纤下表面散射光的光束发散角在垂直于光纤方向约为  $40^\circ$ ,在平行于光纤方向约为  $110^\circ$ 。

### 3.2 散射光的投射光斑图和照度分布曲线

当  $\omega=d=80\ \mu\text{m}$  时,单一散射点在光纤下表面的散射光经过投射镜后,可得目标面光斑图和照度分布曲线,如图 9 所示。图 9 中: $X, Y$  为坐标轴; $E$  为照度。采用的投射镜焦距为  $50\ \text{mm}$ ,目标面与投射镜的距离为  $100\ \text{mm}$ 。LED 光源采用  $5\ \text{W}$  大功率 LED 灯珠,结合球形锥结构塑料光纤端头,使 LED 耦合到光纤的导光效率约为  $27\%$ (仿真结果),忽略光纤吸收损耗,两端输入的光纤内光功率约为  $2.7\ \text{W}$ 。



(a) 光斑图

(b) 照度分布曲线

图 9 目标面光斑图和照度分布曲线(单一散射点)

Fig. 9 Beam spot diagram and illuminance distribution curves of target surface (single scattering point)

由图 9 可知:目标面的光斑呈现长条状,光斑长度方向为光纤轴线方向,光斑照度半高宽根据仿真照度数据表显示为  $0.3\ \text{mm}$  左右;光斑图在  $1.2\ \text{mm}\times 0.2\ \text{mm}$  面积内均匀性优于  $80\%$ ,最大照度值为  $414\ \text{lx}$ ,平均照度值为  $366\ \text{lx}$ 。将多个散射点在光纤轴线方向上顺序排列,可得到满足裂隙灯显微镜要求的长条光带。

散射点间距 1 mm 的 5 个散射点散射光经投射镜投射到目标面, 其目标面光斑图和照度分布曲线, 如图 10 所示. 由图 10 可知: 在长度 5 mm 范围内, 照度均匀度能满足 80% 的要求. 若要获得 14 mm 最大光斑长度, 则需要至少 14 个正四棱锥散射点, 由于受电脑内存限制, 没有进行模拟仿真.

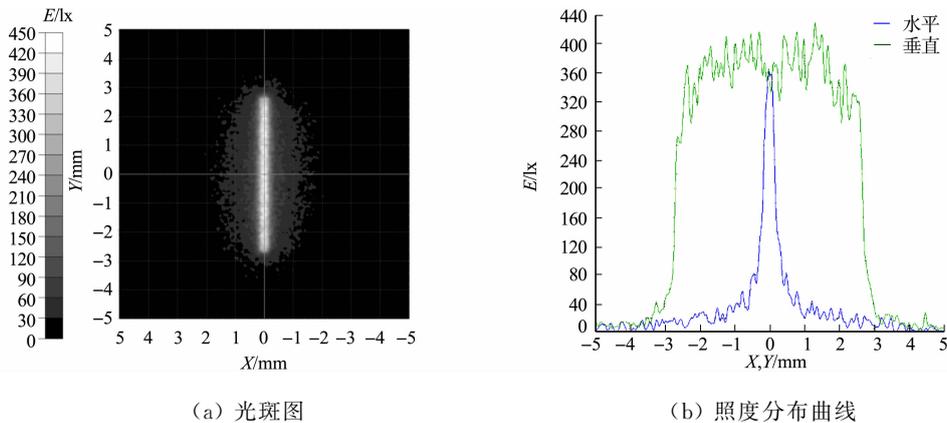


图 10 目标面光斑图和照度分布曲线(5 个散射点)

Fig. 10 Beam spot diagram and illuminance distribution curves of target surface (five scattering points)

### 3.3 实验验证

采用热压印工艺<sup>[18]</sup>在塑料光纤表面制作正四棱锥形散射点,  $w=d=80\ \mu\text{m}$ , 塑料光纤端头做成球形锥结构, LED 光源采用 5 W 大功率 LED 灯珠, 2 颗 LED 灯珠从光纤两头照射光纤.

光纤通光后, 光纤上表面和下表面的散射点亮度及其亮度分布曲线, 如图 11 所示. 由图 11 可知: 下表面观察到的散射点亮度远高于上表面的亮度, 验证了节 3.1 的理论分析结论.

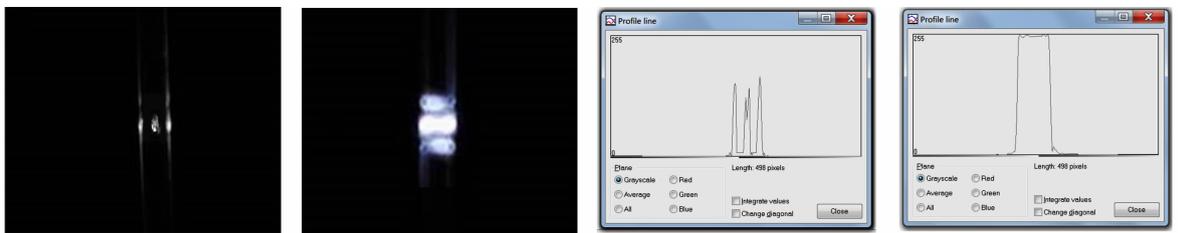


图 11 散射点照片及其亮度分布曲线

Fig. 11 Scattering point photos and their brightness distribution curves

单个散射点的下表面散射光经投射镜投射到目标面上的实验光斑图, 如图 12 所示.

由图 12, 9 可知: 两者的光斑长度和宽度基本一致, 而光斑形状有较大差别, 这是因为实验制作的散射点不是理想的正四棱锥形状, 改变了散射光的方向所致.

## 4 结束语

对塑料光纤表面正四棱锥形微结构散射点进行设计, 证明散射点分布于光纤上表面的侧面发光光纤作为裂隙灯光源时, 极大减小裂隙灯光源系统的体积. 仿真结果表明, 光纤下表面的散射率最大值约为光纤上表面的散射率最大值的 47 倍, 光纤总散射率近似等于下表面散射率; 光纤表面正四棱锥散射点结构参数的第 1 个优化条件是底边宽度与深度相等, 增大散射点尺寸可以使散射光强度增加, 因此, 散射点结构参数的第 2 个优化条件是增大底边宽度与深度. 当塑料光纤直径为 1 mm 时, 得到优化后的正四棱锥散射点的底边宽度和深度均为  $80\ \mu\text{m}$ ; 光纤下表面散射光的光束发散角在垂直于光纤方向约为  $40^\circ$ , 在平行于光纤方向约为  $110^\circ$ , 经过焦距为 50 mm 的投射镜会聚后的光带宽度约为 0.3 mm, 可以满足裂隙灯显微镜的要求.

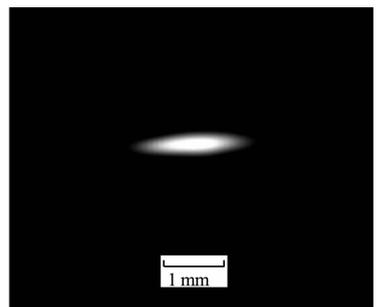


图 12 实验光斑图

Fig. 12 Experimental beam spot diagram

## 参考文献:

- [1] SHU Xupeng, WANG Jianhua, HU Liang. A review of functional slit lamp biomicroscopy[J]. *Eye and Vision*, 2019(6):1-9.
- [2] 隋成华, 沃圣杰, 高楠, 等. 数码裂隙灯显微镜光学系统的设计与实现[J]. *光子学报*, 2017, 46(7):173-181. DOI:10.3788/gzxb20174607.0722001.
- [3] 隋成华, 沃圣杰, 徐丹阳, 等. 裂隙灯显微镜照明系统的设计与实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11):6.
- [4] 黄幼萍, 林峰, 黄淑燕, 等. 数码裂隙灯显微系统前置物镜的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15):186-192.
- [5] 朱永林. 一种手持裂隙灯显微镜: 101627897A[P]. 2009-07-21.
- [6] 胡深明, 闫彬, 李博, 等. 裂隙光发生组件及手持式裂隙灯显微镜: 111419174A[P]. 2020-04-17.
- [7] 杨昆, 李美奇, 张诚. 侧面发光光纤及其发光织物的研究进展[J]. *毛纺科技*, 2019, 47(7):84-89. DOI:10.19333/j.mfkj.2018090240706.
- [8] 匡丽赞. 利用聚合物光纤制备发光针织物的研究[J]. *针织工业*, 2016(9):14-17. DOI:10.3969/j.issn.1000-4033.2016.09.004.
- [9] 江源, 司徒桂平. 侧面发光的POF在照明中的应用[J]. *照明工程学报*, 2002, 13(2):54-61. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2002.02.014.
- [10] 孔德鹏, 张大明, 袁苑, 等. 塑料光纤的研究与应用进展[J]. *光子学报*, 2019, 48(11):66-80. DOI:10.3788/gzxb20194811.1148006.
- [11] FUJIE D I, ARIZONO K, NISHI D K, *et al.* Backlight units based on light extraction from a curved optical fiber[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(6):065104.
- [12] HE Yong, LU Chaohung, LIU Chujia, *et al.* Auto-stereoscopic displays based on directional backlights with side-glowing polymer optical fiber array module[J]. *Optics Communications*, 2020, 459:125032. DOI:10.1016/j.optcom.2019.125032.
- [13] 李梓润, 林宝卿, 林青, 等. 刀刻V形槽法制备塑料光纤阵列背光板[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5):111-120.
- [14] 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):0301004.
- [15] 漆宇, 刘楚嘉, 何涌, 等. 利用激光打标法制备侧面均匀发光聚合物光纤[J]. *光学学报*, 2018, 38(12):1206001.
- [16] 郝梦梦, 杨昆, 张诚. 一种处理聚合物光纤侧发光的系统[J]. *上海纺织科技*, 2020(9):9-12.
- [17] 张静琳. 裂隙灯显微镜结构及使用[EB/OL]. (2008-12-15)[2022-01-20]. <https://www.51wendang.com/doc/cdf3009fc74ffc3aa19a9ba6/2>.
- [18] 林宝卿, 翟云, 刘荣祁, 等. 塑料表面浮雕光栅的复制及其光学特性[J]. *应用激光*, 2009, 29(2):132-136. DOI:10.3969/j.issn.1000-372X.2009.02.013.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)