

自由立体显示器定向背光侧面发光光纤

何涌, 李梓润, 郜飞飞, 刘楚嘉, 漆宇, 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 设计并研究了一种采用激光打标机在塑料光纤(POF)表面雕刻散射点的侧面均匀发光光纤, 可用作自由立体显示器的定向背光源。通过建立激光打标凹形散射点的 POF 均匀发光模型, 推导了 POF 均匀发光的散射点坐标计算公式。针对设计的凹形散射点参数, 用 SolidWorks 软件构建侧面发光光纤模型, 用 TracePro 软件进行光线追迹仿真。结果表明, 散射点长度半圆心角(用于表征凹形散射点的深度和横向长度)的微小变化对发光亮度均匀度影响较大, 而凹形散射点轴向宽度的微小变化对 POF 侧面发光均匀度影响很小。对各参数进行设计优化后, 得到 POF 半径 $R=0.25$ mm, 凹形散射点宽度 $d=0.15$ mm, 散射点长度半圆心角 $\theta=15^\circ$, POF 长度 $L=600$ mm, TracePro 软件仿真得到 POF 侧面发光亮度均匀度为 87.5%。根据设计优化后的参数采用激光打标机进行激光雕刻 POF 表面散射点, 得到单根 POF 的侧面发光亮度均匀度为 80.90%。将 100 根侧面发光 POF 紧密排布成面光源, 得到面光源发光亮度均匀度为 88.91%。实验结果表明所提出的设计方法和制作的 POF 面光源能满足自由立体显示器指向性背光源设计的要求。

关键词 激光技术; 侧面发光光纤; 激光打标; 发光均匀度; 塑料光纤

中图分类号 TN873+.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1106003

Side-Glowing Optical Fiber as Directional Backlight in Autostereoscopic Display

He Yong, Li Zirun, Gao Feifei, Liu Chujia, Qi Yu, Zhuang Qiren*

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

Abstract A kind of uniformly-side-glowing optical fiber is designed and studied, which is obtained by scattering points graved on the plastic optical fiber (POF) by laser marking. This new fiber can be used as a directional backlight source for the autostereoscopic display. The model for a uniform side-glowing POF with laser marking engraved concave scattering points is established and used to derive the formula for calculating the scattering point coordinates. With the designed concave scattering point parameters, the model of side-glowing plastic optical fiber is established by the SolidWorks software, and the light ray tracing simulation is carried out based on the TracePro software. The results show that the tiny length semicircular angle change of scattering points, used for the characterization of depth and horizontal length of concave scattering points, has a large impact on the luminance uniformity. In contrast, the tiny axial width change of concave scattering points has a little impact on the side-glowing luminance uniformity. When the parameters are optimized, one can get the POF radius of $R=0.25$ mm, the concave scattering point width of $d=0.15$ mm, the scattering point length semicircular angle of $\theta=15^\circ$, the POF length of $L=600$ mm and the POF side-glowing luminance uniformity of 87.5% obtained by the TracePro simulation. According to the optimized design parameters, laser marking is used for graving scattering points on the POF surface and the obtained side-glowing luminance uniformity of single POF is 80.90%. Furthermore, a luminescence uniformity of 88.91% can be realized if the surface light source is composed of 100 side-glowing POFs. The experimental results show that the proposed design method and the fabricated POF surface light sources can meet the requirements of the directional backlight source design for 3D autostereoscopic display.

Key words laser technique; side-glowing optical fiber; laser marking; luminescence uniformity; plastic optical fiber

OCIS codes 220.1250; 060.1810; 080.4298; 080.3620; 080.2740

收稿日期: 2018-05-14; **修回日期:** 2018-06-10; **录用日期:** 2018-06-22

基金项目: 福建省科技计划(高校产学合作)重大项目(2016H6016)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(17013082005)

* **E-mail:** qrzhuang@hqu.edu.cn

1 引言

自由立体显示技术无需眼镜或头盔等穿戴设备就可实现立体视觉效果,被认为是未来主流的立体显示技术^[1]。采用时分定向背光技术的自由立体显示具有保持液晶面板原有分辨率不变等优点,因此成为立体显示技术的一个研究热点^[2-4]。目前采用时分定向背光的方法主要有两类:一类是由一个多指向背光单元和液晶显示(LCD)屏作为分时光开关所组成的时分定向背光方案^[5-6],另一类是通过控制光源开关并改变光源投射角度的时空混合时分定向背光方案^[7-8]。上述第一类时分定向背光方案需要在原有液晶显示器上再增加一个液晶屏开光板,结构比较复杂,显示屏模组厚度大,成本较高;第二类时分定向背光方案的光源投射系统结构复杂,加工和安装精度要求高,光源投射系统占用空间比较大。

近年来,不断有将侧面发光光纤应用于平面显示 LCD 屏背光模组的研究报道。Okuda 等^[9-10]实验研究了基于侧面发光光纤的激光背光模组,采用一种侧面有许多 V 形槽的塑料光纤(POF)以螺旋结构的形式实现二维平面发光,V 形槽是用加热的刀口挤压成型的。他们随后研究了一种利用 POF 弯曲损耗发光的波浪形光纤排布结构,结合匹配油和散射膜制作了光纤背光模组。赵致童等^[11]研究了一种液晶显示器激光背光光源侧体发光光纤模型,采用 TracePro 软件进行光线追迹,模拟分析了光纤侧面漏光孔不同孔深、孔面积、孔几何结构等参数对光纤光场的影响。但文献^[9-11]都没有对单根 POF 的侧面发光均匀度进行分析。Spigulis 等^[12]研究了传统侧面发光光纤的设计和参数,提出一种简化的光纤侧面发光模型,模型基于固定散射效率和可变散射效率进行理论分析,改善了单根光纤发光均匀度。但由于理论模型简单,无法对散射点的实际加工进行定量指导。杨涛等^[13]提出了一种在光纤内部嵌入散射体的通体发光光纤的理论模型,从理论上证明了制作侧面散射光光强均匀分布的侧面发光光纤的可行性,但未进行进一步的实验验证,且填充散射体材料的操作复杂,不易实现。Bisyarin 等^[14]利用化学气相沉积法在包层中掺杂 P_2O_5 和少量氟化物,纤芯中掺杂 GeO_2 ,制成超长度侧面发光光纤。由于采用纤芯传输光能量、包层向外界散射光的结构,故该方法制作的光纤直径都比较大(文献^[14]中报道光纤直径为 22 mm)。

本文提出将侧面发光 POF 用于时分定向背光

自由立体显示屏的背光模组中,基本原理是利用侧面均匀发光的 POF 作为线光源,再经过柱透镜变换为定向光束,相邻光纤的白光 LED 光源分时工作,从而可实现时分定向背光自由立体显示。根据 LCD 屏的亮度均匀性要求和分辨率要求,本方案中单根 POF 的侧面发光均匀度应达到 80% 以上,光纤直径应不大于 0.5 mm。而传统侧面发光光纤(通体发光光纤)的侧面散射光强度沿光纤的传播方向呈指数衰减^[15],这就使得靠近光纤耦合端的散射光强度比光纤末端处的散射光强度大。同时,由于通体发光光纤是径向 360° 均匀发光,发光亮度较低,因此光纤直径都比较大(一般在 1.5 mm 以上)。本方案采用激光打标法制作 POF 侧面发光光纤,散射光具有方向性,可以获得散射点正面(打标面)较高亮度,由此可见现有传统侧面发光光纤难以满足本方案自由立体显示定向背光光源的要求。激光加工光纤侧面发光散射点具有参数控制容易、加工速度快等优点。Wang 等^[16]利用二氧化碳激光器在光纤侧面雕刻长周期光栅结构,用于信号衰减方面的研究。Roufael 等^[17]利用光纤激光啁啾脉冲放大飞秒激光系统,在 POF 侧面加工长周期光栅结构。本文采用 1.06 μm 激光雕刻 POF 侧面凹形散射点,研究均匀发光散射点的设计方法和理论模型,并进行实验验证,实现了发光亮度高度均匀的单根 POF 侧面发光线光源和多根 POF 组合面光源,可作为时分定向背光自由立体显示器的背光源。

2 模型的设计与优化

2.1 理论模型

侧面发光 POF 作为背光源的自由立体显示器原理图^[5-6]如图 1 所示。图 1 中编号为 1 的 POF 和

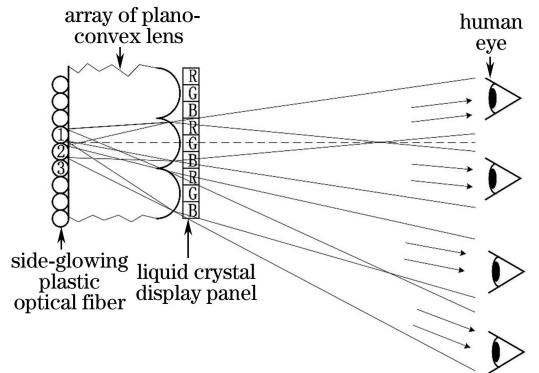


图 1 侧面发光 POF 时分定向背光自由立体显示原理图
Fig. 1 Schematic of autostereoscopic display with directional backlight based on side-glowing plastic optical fiber

编号为 2 的 POF 按时序轮流发光,编号为 3 的光纤不发光。侧面发光 POF 发出的光线经过平凸柱面透镜阵列板的柱透镜转换为定向投射光束,分别投射到观察者的左眼和右眼。定向投射光束透过 LCD 屏将左右视差图像分别投向观察者的左眼和右眼,在人脑中形成立体图像。采用侧面发光 POF 可以使整个定向背光模组成为很薄的模,从而有效避免了时分定向背光自由立体显示屏厚度大、结构复杂的问题。因光源被设置在背光模组的外部,这种结构设计也能够避免光源散热引起的液晶显示面板的发热问题。

设白光发光二极管(WLED)光源从 POF 单端口处耦合,光线进入光纤后遇到侧面凹形散射点时发生散射,散射光大部分从光纤损伤处出射,光纤纤芯内总光通量减少。为了使 POF 侧面发光均匀,激光加工散射点间距需要随着光通量的减少而减小^[18]。侧面发光 POF 散射点分布示意图如图 2 所示。

图 2 中,光线从左侧入射,假定所有散射点的形状都相同,且发光强度的角度分布也相同。若入射光纤的光功率为 P_0 ,散射点在 Y 方向的长度为 b ,在 X 方向的宽度为 d ,每个散射点的散射率为 K 。散射率与散射点的结构和尺寸有关,对于均匀散射点理想模型,可认为散射率 K 与散射点的面积 S 成正比,满足

$$K = \gamma S, \quad (1)$$

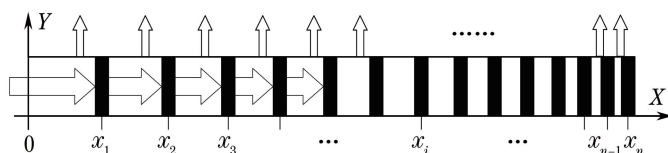


图 2 侧面发光 POF 散射点分布示意图

Fig. 2 Schematic of scattering point distribution in side-glowing plastic optical fiber

由图 3 和(4)式可以看出,当凹形散射点宽度 d 不变时,散射点面积由 θ 唯一决定。图 4 给出了散射点长度半圆心角 $\theta = 13^\circ \sim 26^\circ$ 的散射点面积的变化曲线。由图可以看到散射点宽度 d 为 0.05 ~ 0.20 mm 时,散射点面积 S 与散射点长度半圆心角 θ 具有很好的线性关系。

2.2 参数设计

侧面发光 POF 的参数依据(2)~(6)式进行设计,并借助 SolidWorks 软件进行建模,利用 TracePro 软件进行光线追迹仿真。POF 侧面发光光纤仿真模型如图 5 所示,模型包括环形 POF 和侧面发光 POF 两个部分。环形部分用于加速 POF 的

式中: γ 为比例系数。第 i 个散射点与第 $i-1$ 个散射点的中心间距为 Δx_i ,要使光纤在侧面均匀发光,单位面积上的发光功率必须相等,即

$$\frac{KP_0}{\Delta x_1 b} = \frac{K(P_0 - KP_0)}{\Delta x_2 b} = \frac{K[P_0 - KP_0 - K(P_0 - KP_0)]}{\Delta x_3 b} = \dots = \frac{P_0(1-K)^i}{\Delta x_i b} = \dots$$

整理可得散射点中心间距计算式为

$$\Delta x_i = \Delta x_1 (1-K)^{i-1}. \quad (2)$$

且满足

$$\sum_{i=1}^N \Delta x_i = L, \quad (\Delta x_i \geq d), \quad (3)$$

式中: N 为散射点总数量; L 为侧面发光光纤长度。根据(1)式可计算得到散射点中心位置坐标为

$$x_n = \sum_{i=1}^n \Delta x_i = \sum_{i=1}^n \Delta x_1 (1-K)^{i-1}. \quad (4)$$

根据几何关系可得到凹形散射点面积为

$$S = 2\pi\theta \cdot R^2 - \sin(2\theta) \cdot R^2 + 2\sin\theta \cdot R \cdot d, \quad (5)$$

式中: θ 为凹形散射点长边 b 所对应的光纤轴心圆心角的一半。由(1)式和(5)式可以得到凹形散射点的散射率为

$$K = \gamma [2\pi\theta \cdot R^2 - \sin(2\theta) \cdot R^2 + 2\sin\theta \cdot R \cdot d]. \quad (6)$$

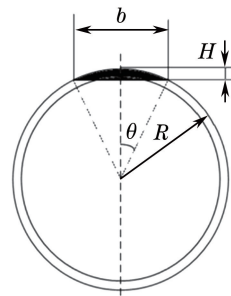


图 3 激光雕刻散射点模型

Fig. 3 Model of scattering points graved by laser marking 模式耦合^[19],使光纤内传输模式稳定。侧面发光 POF 部分为直线形状,仿真模型结构是在阶跃型塑

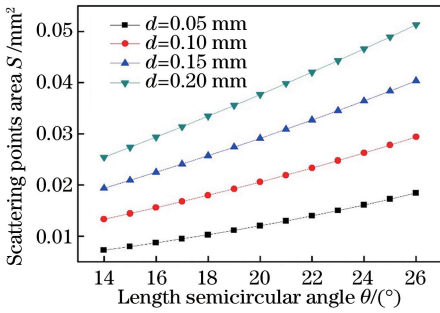


图 4 散射点面积 S 与散射点长度半圆心角 θ 的关系

Fig. 4 Relationship between scattering point area S and scattering point length semicircular angle θ

料光纤侧面进行几何开孔,开孔形状为矩形。实验所用 POF 为日本 ESKA 三菱光纤 SK-20,相关参数如表 1 所示(参见 <http://www.pofeska.com/product/01/index.html>)。

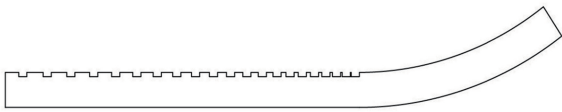


图 5 侧面发光 POF 仿真模型

Fig. 5 Simulation model of side-glowing POF

表 1 POF 参数

Table 1 Parameters of POF

Item	Specification
Core material	Polymethyl-methacrylate resin
Cladding material	Fluorinated polymer
Core refractive index	1.496
Cladding refractive index	1.363
Numerical aperture	0.5
Refractive index profile	Step index
Core diameter / μm	486
Cladding diameter / μm	500

图 5 中,当没有散射点时,POF 输出的光通量可作为光纤中的光通量,而当 POF 上只有一个凹形(矩形开孔)散射点时,单散射点发射光通量与光纤中的光通量的比值就可作为散射率 K ,采用 TracePro 软件仿真并计算了散射点宽度 d 分别为 0.05,0.10,0.15,0.20 mm 时,散射率 K 随散射点长度半圆心角 θ 的变化曲线,如图 6 所示。模拟仿真结果表明同一散射点宽度下,散射率 K 与散射点长度半圆心角 θ 近似呈正比例关系,且散射点宽度 d 增加,散射率 K 也随之增大。由图 6 数据,根据(1)式和(5)式,可得比例系数 γ 约为 0.006。

首先设计散射点参数为 $d=0.15$ mm, $\theta=16^\circ$,根据图 6 可知散射率 K 约为 7×10^{-5} 。POF 半径

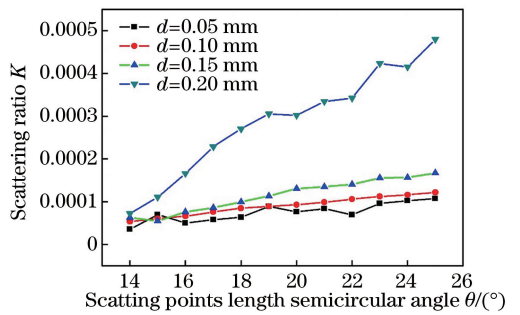


图 6 散射率随散射点长度半圆心角 θ 的变化

Fig. 6 Scattering ratio versus length semicircular angle θ of scattering points

$R=0.25$ mm,长度取为 54 吋 LCD 屏的高度,约为 $L=600$ mm,根据(1)~(3)式,取 $x_1=0.3$ mm,计算出散射点间距和激光加工散射点坐标,散射点分布情况如图 7 所示。

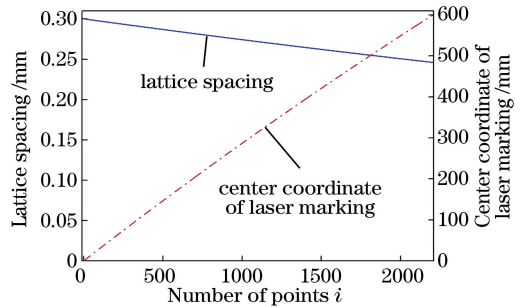


图 7 散射点中心间距、散射点坐标与散射点数的关系图

Fig. 7 Relationship among center spacing, center coordinate and number of scattering points

2.3 模型参数对均匀度的影响分析与参数优化

激光打标侧面发光 POF 凹形散射点的参数设计是否正确,可以通过光学软件 TracePro 模拟仿真 POF 侧面发光亮度均匀度进行判断。理论上均匀度越高,POF 散射点的参数设计越合理。发光亮度均匀度 $M^{[20]}$ 可以表示为

$$M = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: L_{\min} 、 L_{\max} 分别表示 POF 侧面发光最小和最大亮度值。

2.3.1 散射点长度半圆心角对发光均匀度的影响

根据图 5 所示 POF 侧面发光光纤仿真模型,在 SolidWorks 软件中按照图 7 数据设定模型中的参数,光源模型由中心波长为 546 nm、边长为 1 mm 的正方形 LED 和直径为 30 mm、焦距为 10 mm 的透镜组成。透镜位于 LED 前方 50 mm 处,将 LED 发散光束会聚成具有光锥结构的光束,且会聚光束的光线最大角度大于 POF 数值孔径(约为 0.5)对应

的角度 30° ,使其满足 POF 的满注入条件,从而在光纤中激励出所有高阶模。通过 TracePro 软件模拟仿真散射点长度半圆心角 θ 的微小变化对 POF 侧面发光亮度均匀度的影响。POF 侧面发光亮度与检测板上对应点的照度成正比,故发光亮度均匀度的测量可通过在紧贴 POF 的侧面设置一个光照度检测板,根据检测板上的照度分布图得到。 θ 的取值分别为 $14.0^\circ, 14.5^\circ, 15.0^\circ, 15.5^\circ, 16.0^\circ$ 光照度检测板上的照度分布图如图 8(a)~(e)所示。由图 8 可以看到,散射点长度半圆心角 $\theta=15.0^\circ$ 时,光纤侧面发光照度图最均匀,对应图 8(c)的情况,此时发光亮度均匀度 $M \approx 87.5\%$ 。图 8(a)和图 8(e)所示分别为散射点长度半圆心角 $\theta=14.0^\circ$ 和 $\theta=16.0^\circ$ 时的照度分布图。对比可见,图 8(a)靠近光源端(图中上端)的照度明显低于远离光源端的照度,而图 8(e)靠近光源端的照度明显高于远离光源端的照度,两图对应发光亮度均匀度分别为 $M \approx 66\%$ 和 $M \approx 65\%$,亮度均匀度明显下降。这是由于散射点

长度半圆心角的减小或增大会使散射点面积和散射效率成比例地减小或增大(见图 4 和图 6),靠近光源端的散射点由于间距较大,散射点密度小,散射点面积和散射效率的变化对平均发光亮度影响较小;而远离光源端的光纤散射点间距较小,散射点密度大,散射点面积和散射效率的变化对平均发光亮度影响大,使整根光纤的发光亮度均匀度下降。随着散射点长度半圆心角接近 15.0° ,发光亮度均匀度逐渐提高,不同散射点长度半圆心角的发光均匀度如表 2 所示。优化后的散射点长度半圆心角为 $\theta=15.0^\circ$ 。最优散射点长度半圆心角与初始设计值存在差异的主要原因是散射率 K 的取值误差,由于 TracePro 光线追迹仿真时取的光线数有限,不能完全反映出散射点的散射光线数。此外,由表 2 还可以看到,散射点长度半圆心角对发光亮度均匀度影响较大,因此打标 POF 散射点时需要稳定的激光功率和聚焦透镜高度^[21],以稳定凹形散射点深度和横向宽度,即散射点长度半圆心角 θ 。

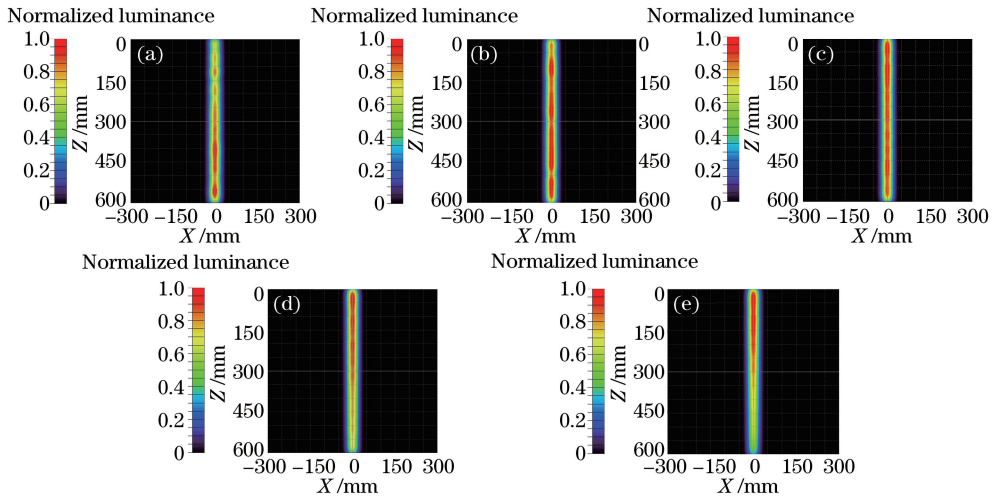


图 8 散射点长度半圆心角对 POF 侧面发光照度分布的影响。(a) $\theta=14.0^\circ$; (b) $\theta=14.5^\circ$; (c) $\theta=15.0^\circ$; (d) $\theta=15.5^\circ$; (e) $\theta=16.0^\circ$

Fig. 8 Influence of length semicircular angle of scattering points on side-glowing luminance distribution of POF.

(a) $\theta=14.0^\circ$; (b) $\theta=14.5^\circ$; (c) $\theta=15.0^\circ$; (d) $\theta=15.5^\circ$; (e) $\theta=16.0^\circ$

2.3.2 散射点宽度对发光均匀度的影响

在 SolidWorks 软件中建立模型时,固定 θ 为 15.0° ,散射点间距同图 7 曲线数据,改变散射点宽度 d 分别为 $0.140, 0.145, 0.150, 0.155, 0.160$ mm,进行建模和仿真。TracePro 仿真所得的散射点宽度对 POF 侧面发光照度分布的影响如图 9 所示。

图 9(a)~(e)分别为散射点宽度 $d=0.140, 0.145, 0.150, 0.155, 0.160$ mm 时的照度分布图,不同散射点宽度的发光均匀度如表 3 所示。由

图 9 可见,各情况下发光亮度均匀度最小值为 $M=86\%$,最大值为 $M=87.5\%$,变化不大。这是由于光纤中光线主要是沿着与光纤轴线平行或很小夹角的方向进行传输,散射点宽度的变化在光线传输方向横截面上的投影被缩小了,因此对散射点的散射率影响不大。可见,利用所提出的设计方法设计的散射点参数进行激光雕刻 POF 表面散射点时,雕刻线宽的微小变化对 POF 侧面发光均匀度影响不大。

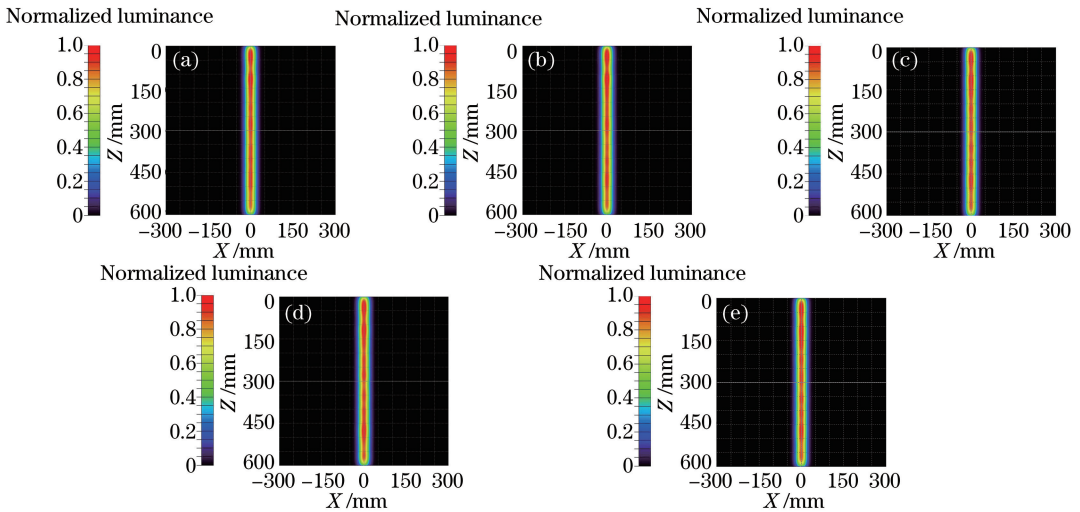


图 9 散射点宽度对 POF 侧面发光照度分布的影响。(a) 0.140 mm;(b) 0.145 mm;(c) 0.150 mm;(d) 0.155 mm;(e) 0.160 mm
 Fig. 9 Influence of scattering point width on side-glowing illuminance distribution of POF. (a) 0.140 mm;
 (b) 0.145 mm; (c) 0.150 mm; (d) 0.155 mm; (e) 0.160 mm

表 2 不同散射点长度半圆心角的发光均匀度

Table 2 Luminance uniformity under different length semicircular angles of scattering points

Length semicircular angle of scattering points $\theta /(^{\circ})$	Luminance uniformity of scattering points $M / \%$
14.0	66.0
14.5	80.0
15.0	87.5
15.5	72.0
16.0	65.0

表 3 不同散射点宽度的发光均匀度

Table 3 Luminance uniformity of scattering points with different widths

Width of scattering point d / mm	Luminance uniformity of scattering points $M / \%$
0.140	86.0
0.145	87.0
0.150	87.5
0.155	87.0
0.160	86.5

3 实验结果与讨论

3.1 激光打标 POF 凹形散射点参数确定

实验中,根据图 5 所示 POF 侧面发光光纤模型和上述仿真优化后的参数,采用“大族 YLP-X20 激光打标机”对直径为 0.5 mm 的 POF 进行表面雕刻凹形散射点。POF 表面激光雕刻凹形散射点最大深度 H 与散射点长度半圆心角 θ 的关系为

$$H = R(1 - \cos \theta). \quad (8)$$

根据优化后的参数 $\theta = 15^{\circ}$ 可得激光雕刻最大深度 H 为 0.0085 mm。设定激光打标凹形散射点宽度

为 0.15 mm,打标速度为 $500 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,激光功率为 20 W,打标次数为一次。利用 POF 吸收激光的热效应使表面熔化,同时产生的热气压使 POF 表面形成凹坑。因调节聚焦透镜的高度对激光打标散射点深度和宽度的影响很大^[22],为此,进行了聚焦透镜高度变化的打标深度对比实验。保持打标机激光功率不变,调节打标机上的手动升降台指示标尺显示的打标高度(聚焦透镜相对高度)从 368 mm 开始减小,每减小 2 mm 打标一个散射点。利用 NIKON ECLIPSE 80i 显微镜观察光纤凹形散射点,不同聚焦透镜高度得到的 POF 散射点显微照片如图 10 所示。

由图 10 可以看到,图 10(a)~(e)的 POF 凹形散射点深度和宽度呈现逐渐增大的趋势,图 10(f)~(j)的散射点深度和宽度呈现逐渐减小趋势,因此可以判断图 10(e)打标高度标尺指示在 360 mm 时,POF 表面处于焦点附近。此外,由图 10(c)~(e)可见,打标高度略大于或等于 360 mm 时散射点边缘凸起较高,宽度变窄。相比之下,对比图 10(f)~(h),打标高度略小于 360 mm 时,凹形散射点边缘较平坦,宽度不变。其中,图 10(h)打标高度标尺指示值为 354 mm,打标凹形散射点最大深度约为 0.01 mm,宽度约为 0.15 mm,与设计值最大深度 0.0085 mm 和散射点宽度 0.15 mm 最接近,因此 354 mm 可作为上述仿真优化模型的 POF 散射点打标高度。激光在 POF 表面雕刻矩形孔径时,光纤内部其他部分尽管也会受到激光的照射,但因 POF 表面熔化已吸收了大量激光能量,加上光纤内部不在激光焦点上,达不到光纤的损伤阈值^[23],因此不会对光纤内部造成破坏。

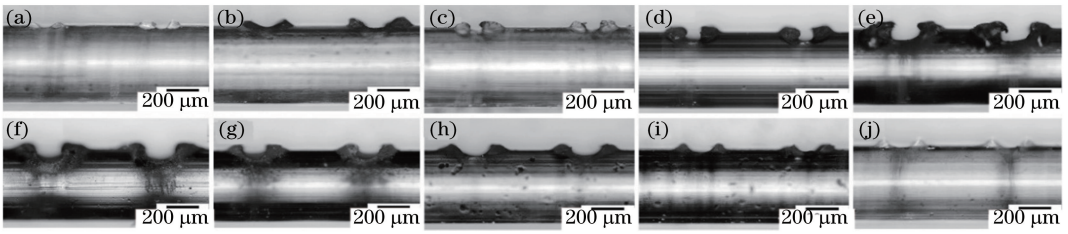


图 10 不同聚焦透镜高度得到的 POE 散射点显微照片。(a) 368 mm;(b) 366 mm;(c) 364 mm;(d) 362 mm;(e) 360 mm;(f) 358 mm;(g) 356 mm;(h) 354 mm;(i) 352 mm;(j) 350 mm

Fig. 10 Photomicrographs of scattering points on POE with different focusing lens heights. (a) 368 mm;

(b) 366 mm; (c) 364 mm; (d) 362 mm; (e) 360 mm; (f) 358 mm; (g) 356 mm; (h) 354 mm; (i) 352 mm; (j) 350 mm

3.2 POE 发光亮度均匀度检测

采用远方 CX-2B 成像亮度计和尼康相机分别对加工好的侧面发光 POE 进行检测,将功率为 1 W 的 WLED 与聚焦透镜和光纤耦合器组合成光纤光源,输出的白光耦合进入 POE,使光纤侧面散射点发光。侧面发光 POE 与成像亮度计距离约 30 cm,POE 侧面发光亮度均匀度检测系统如图 11 所示。

实验制作了长度为 600 mm 的侧面发光 POE,该 POE 的尼康相机照片如图 12 所示。由图可见,制作的侧面发光 POE 具有很好的发光目视均匀度。定量检测采用远方 CX-2B 成像亮度计,基于 6 点法进行侧面发光亮度均匀度测量。6 点采样位置如图 13 所示,为了减小背景噪声干扰带来的误差,每个测量点取光亮度大于 $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ 的平均值。

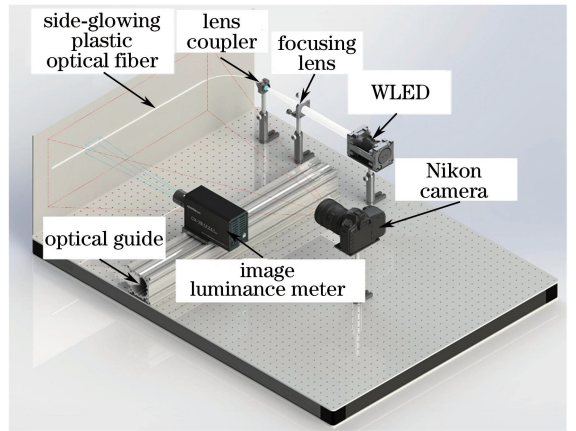


图 11 POE 侧面发光亮度均匀度检测系统

Fig. 11 Detecting system of side-emitting luminance uniformity of POE



图 12 长度 600 mm 的侧面发光 POE 的尼康相机照片

Fig. 12 Nikon camera photo of 600-mm length side-emitting POE

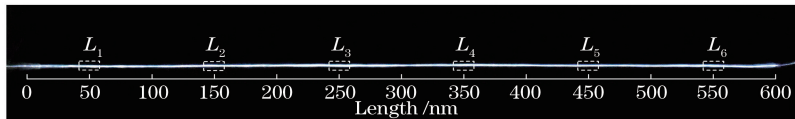


图 13 6 点采样位置

Fig. 13 Six sampling locations

对采样区域进行亮度测量,得到 6 点光亮度测量结果如表 4 所示。根据(5)式计算得到侧面发光 POE 发光均匀度为 80.90%。

3.3 POE 面光源实现及其发光亮度均匀度

实验制作了多根 POE 光纤组合的面光源。首先根据上述优化设计的侧面发光散射点参数进行批量 POE 激光打标,接着将制作好的多根侧面发光 POE 紧密排布在一起,并在表面覆盖一层仅改

表 4 6 点光亮度测量结果

Table 4 Luminance measurement results for six sampling points

Sampling point coordinate /mm	50	150	250	350	450	550
Luminance / ($\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$)	9.57	10.87	10.21	11.82	10.35	11.43

变出射光线角度分布而不影响其照度分布的散射膜^[24],用于消除光纤散射点的影像,形成POF侧面发光面光源。实验制作的面光源模块尺寸为600 mm×50 mm,由100根直径为0.5 mm、打标区域长度为600 mm的光纤排布而成。将WLED光源通过能量均匀耦合器^[25]耦合进入侧面发光POF光纤束中,采用尼康相机对POF面光源照相观察,得到实验制作的POF面光源照片如图14所示。由图可见,POF面光源具有很好的发光均匀度。

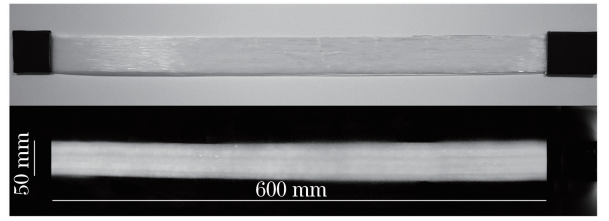


图14 实验制作的POF面光源照片

采用与单根光纤发光亮度均匀度检测相同的6点测量方法,并在同一测量点附近重复测量3次,测量数据如表5所示。

表5 6点侧面发光POF面光源的亮度均匀度测量结果

Table 5 Measurement results of luminance uniformity for six-point side-glowing POF light area sources

No.	Measurement results / (cd·m ⁻²)					
	50 mm	15 mm	25 mm	35 mm	45 mm	55 mm
1	16.715	16.077	14.933	15.363	15.076	15.033
2	16.353	15.934	14.479	14.741	14.551	14.761
3	16.674	16.055	14.985	15.667	14.603	15.324
Average	16.581	16.022	14.799	15.257	14.743	15.039

计算3次实验测量数据的平均值,最后得到侧面发光POF面光源的亮度均匀度为88.91%。

从上述实验结果可以看到,单根光纤的侧面发光亮度均匀度低于模拟仿真结果。这是由于受环境(如抖动、温度波动)、激光功率波动和POF表面洁净度等因素的影响,凹形散射点形状的一致性变差,导致发光亮度均匀度下降。而侧面发光POF面光源的发光亮度均匀度与单根光纤的模拟仿真结果比较接近,其原因主要是多根光纤侧面发光散射点的平均效果,消除了散射点形状和面积的随机变化影响。

4 结 论

研究了一种用于定向背光自由立体显示器背光源的POF侧面发光光纤,采用激光打标技术在POF侧面雕刻凹形散射点。模拟仿真结果表明,散射点长度半圆心角 θ 的微小变化对发光亮度均匀度影响较大,而凹形散射点轴向宽度的微小变化对POF侧面发光均匀度影响不大。对参数进行设计优化,当POF半径 $R=0.25$ mm,凹形散射点宽度 $d=0.15$ m,散射点长度半圆心角 $\theta=15^\circ$,POF长度 $L=600$ m时,模拟仿真得到POF侧面发光亮度均匀度为87.5%。采用激光打标机雕刻POF表面散射点,实验测试得到单根POF的侧面发光亮度均匀度为80.90%。将100根侧面发光POF紧密排布成面光源,得到面光源发光亮度均匀度为88.91%。说

明所设计方法和制作的POF面光源能满足自由立体显示器指向性背光源均匀度高于80%设计要求。

参 考 文 献

- [1] Zhuang Z F, Zhang L, Surman P, *et al.* Directional view method for a time-sequential autostereoscopic display with full resolution [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(28): 7847-7854.
- [2] Su J B, Liang H W, Chen H Y, *et al.* Optimization of backlight scanning on auto-stereoscopic display with spatial and sequential hybrid control [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 877-882.
苏剑邦, 梁浩文, 陈海城, 等. 时空混合控制式自由立体显示系统背光刷新方式优化研究 [J]. *液晶与显示*, 2015, 30(5): 877-882.
- [3] Krebs P, Liang H W, Fan H, *et al.* Homogeneous free-form directional backlight for 3D display [J]. *Optics Communications*, 2017, 397: 112-117.
- [4] Fan H, Zhou Y G, Wang J H, *et al.* Full resolution, low crosstalk, and wide viewing angle auto-stereoscopic display with a hybrid spatial-temporal control using free-form surface backlight unit [J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(7): 620-624.
- [5] Choi H J. A time-sequential multiview autostereoscopic display without resolution loss using a multi-directional backlight unit and an LCD panel [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8288: 82881Y.
- [6] Chen F P, Zhang X T, Liu C J, *et al.* Design on the

- directional backlight of crosstalk eliminated autostereoscopic display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(5): 0522004.
- 陈芳萍, 张晓婷, 刘楚嘉, 等. 消除自由立体显示串扰的定向背光源设计[J]. *光子学报*, 2017, 46(5): 0522004.
- [7] Fan H, Zhou Y G, Liang H W, *et al.* Glasses-free 3D display with glasses-assisted quality: key innovations for smart directional backlight autostereoscopy [C] // 2015 IEEE Visual Communications and Image Processing, December 13-16, Singapore: IEEE, 2016: 1-4.
- [8] Liang H W, An S Z, Wang J H, *et al.* Optimizing time-multiplexing auto-stereoscopic displays with a genetic algorithm[J]. *Journal of Display Technology*, 2014, 10(8): 695-699.
- [9] Okuda Y. Laser backlight unit based on a leaky optical fiber[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(7): 074001.
- [10] Fujieda I, Arizono K, Nishida K, *et al.* Backlight units based on light extraction from a curved optical fiber [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53 (6): 065104.
- [11] Zhao Z T, Zhang H, Zou Y G, *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): 0301004.
- 赵致童, 张贺, 邹永刚, 等. 液晶显示器激光背光源侧体发光光纤的设计与研究[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0301004.
- [12] Spigulis J. Glowing optical fiber designs and parameters[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, 2967: 231-236.
- [13] Yang T, Tao Q, Liang Z C. Research and design of uniform side-glowing optical fiber [J]. *Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 16(1): 17-21.
- 杨涛, 陶庆, 梁忠诚. 通体均匀发光光纤的研究与设计[J]. *淮海工学院学报(自然科学版)*, 2007, 16(1): 17-21.
- [14] Bisyarin M A, Eronyan M A, Kulesh A Y, *et al.* Light-emitting optical fibers with controllable anomalous small-angle scattering [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(11): 2396-2399.
- [15] Jiang Y, Ling G H, Yin Z D. Preparing principle and applications of side glowing optical fiber [J]. *Optical Fiber & Electric Cable and their Applications*, 2000 (4): 10-16.
- 江源, 凌根华, 殷志东. 侧面发光光纤的制备原理及其应用[J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2000(4): 10-16.
- [16] Wang Y P, Wang D N, Jin W, *et al.* Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO₂ laser to carve periodic grooves on the optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 151105.
- [17] Roufael H, Castellon-Urbe J, Lomer M, *et al.* Fast laser POF side long period gratings fabrication [C] // Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications, August 28-30, Sigtuna, Sweden: Optical Society of America, 2013: F2. 29.
- [18] Gao S H, Yang J Y, Wang L, *et al.* Design of scattering netted dots on light guide plate of edge-lighting LED used in illumination [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2012, 23(6): 103-106.
- 高双红, 杨俊逸, 王蕾, 等. 用于照明的侧光式 LED 导光板网点设计[J]. *照明工程学报*, 2012, 23(6): 103-106.
- [19] Zhang Y S, Xie Z G, Zheng R S, *et al.* Mode coupling in polymer optical fiber and its enhancement to transmission bandwidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1234-1238.
- 张永生, 谢志国, 郑荣升, 等. 聚合物光纤中的模式耦合及其对带宽的提高[J]. *中国激光*, 2006, 33(9): 1234-1238.
- [20] Huang B L, Guo T L, Chen E G, *et al.* Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522002.
- 黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0522002.
- [21] 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): 737-744.
- [22] Chen E G, Huang B L, Xu S, *et al.* Demonstration of an edge-lit light-guide plate using laser micro-machining technique [J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1122002.
- 陈恩果, 黄炳乐, 徐胜, 等. 侧入式导光板的激光微加工技术的验证研究(英文)[J]. *光子学报*, 2015, 44(11): 1122002.
- [23] Hu C J, Yan F, Yu H B, *et al.* Technological research on polypropylene plastics using laser marking [J]. *Applied Laser*, 2015, 35(3): 351-355.
- 胡崇镜, 闫飞, 俞鸿斌, 等. 聚丙烯塑料激光打标工艺研究[J]. *应用激光*, 2015, 35(3): 351-355.
- [24] Zhang H, Zhu J, Zhao Y, *et al.* A design of light guide plate for direct illumination of large-sided liquid crystal panel [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9):

2668-2673.

张鹤, 朱钧, 赵燕, 等. 一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2668-2673.

- [25] Zhang X T, Liu C J, Qi Y, *et al.* Design of lens coupler with uniform energy distribution based on

LED source and polymer optical fiber bundle [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0208001.

张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 等. 基于LED光源与聚合物光纤束的能量均匀透镜耦合器设计[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0208001.