

# 用于指向光源的侧面发光塑料光纤阵列设计

郜飞飞, 何涌, 李梓润, 王孝艳, 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** 为了克服指向光源裸眼三维显示器光源结构复杂的问题, 研究了一种侧面发光塑料光纤(POF)阵列背光源的设计和制作方法。通过分析侧面发光 POF 阵列和柱面微透镜阵列组成的定向成像光路, 得到了侧面发光 POF 阵列的排布公式。实验制作了一种用于指向光源的侧面发光 POF 阵列, 测量了指向光源的串扰度。结果表明, 在设计视区最佳距离 530 mm 处, 横向 -200~200 mm 区域内的最低串扰度可达 1% 以下。最后分析了柱面透镜像差、POF 阵列光纤错位和视区视角增大对 POF 阵列指向光源串扰度的影响。

**关键词** 测量; 成像系统; 裸眼三维显示; 指向光源; 串扰度; 侧面发光塑料光纤; 发光塑料光纤阵列

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1011001

## Design of Side-Glowing Plastic Optical Fiber Array for Directional Backlight

Gao Feifei, He Yong, Li Zirun, Wang Xiaoyan, Zhuang Qiren\*

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

**Abstract** To address the problem of the complex light source structure of a directional backlight in naked eye 3D display, a design and fabrication method for a kind of side-glowing plastic optical fiber (POF) array backlight is researched. An arrangement formula of the side-glowing POF array is obtained by analyzing the directional imaging optical path composed of side-glowing POF array and cylindrical micro-lens array. A kind of side-glowing POF array for directional backlight is fabricated and the crosstalk from the directional backlight is measured. The results show that the minimum crosstalk in the transverse regions of -200 mm to 200 mm is less than 1% at the optimal distance of 530 mm in the designed viewing area. Finally, the effects of cylindrical lens aberration, POF array optical fiber dislocation, and increasement of viewing angle on crosstalk degree of POF array directional backlight are analyzed.

**Key words** measurement; imaging systems; naked eye three-dimensional display; directional backlight; crosstalk; side-glowing plastic optical fiber; plastic optical fiber array

**OCIS codes** 110.6880; 120.2040; 160.3710; 350.2770

## 1 引 言

随着三维(3D)立体显示技术的发展, 裸眼 3D 显示成为技术研发的主流<sup>[1]</sup>。目前, 裸眼 3D 显示主要基于双目视差原理<sup>[2-3]</sup>, 包括光栅式、透镜阵列式和定向时分背光式三种技术<sup>[4-5]</sup>, 其中: 光栅式裸眼 3D 显示技术存在屏幕亮度和分辨率较低等问题; 透镜阵列式裸眼 3D 显示技术存在分辨率低、串扰大等问题; 而定向时分背光裸眼 3D 显示技术解决了前述 3D 显示技术的主要缺陷<sup>[6]</sup>。薛亚兰等<sup>[7]</sup>

提出一种新型指向性背光结构, 利用菲涅耳透镜与多组透镜光栅形成指向性出瞳, 同时, 系统中还增加了人眼跟踪模块, 将用户信息及时同步传递至背光源模块并进行适时调整, 以实现多视点供多人观看; 但是, 该系统仍存在着背光源结构复杂、体积大等问题。陈芳萍等<sup>[8]</sup>提出一种采用蝶形液晶开关获得柱透镜式指向光源横向平顶光束的原理和方法, 将液晶显示屏(LCD)单元设计成纵向的、中间窄两边宽的蝶形结构, 输出横向平顶光束, 蝶形开关依次有序闭合以产生有序变化的背光源输出,

收稿日期: 2019-03-21; 修回日期: 2019-05-11; 录用日期: 2019-06-03

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(17013082004)

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

利用柱面微透镜阵列使光线偏转,配合视点图像同步进行指向光源立体显示;但是,该结构需要增加一个蝶形开关板,系统仍较复杂。Zhuang 等<sup>[9]</sup>提出了时间序列的裸眼 3D 显示技术,指向光源光束与液晶显示屏幕上的左、右图像交替显示,但是受造价昂贵和商用推广的限制,该技术难以得到实质性的应用。此外,现有常见的指向光源裸眼 3D 显示屏结构还有利用两组 LED 和对称结构的导光板组成的背光源系统,结合特殊结构的裸眼 3D 显示膜片形成指向光源<sup>[7,10]</sup>,但这种结构的加工精度要求高,结构复杂。

光纤阵列在器件探测、光纤通信,以及光学成像等领域都有广泛的应用<sup>[11-14]</sup>。需研究一种适用于定向时分背光裸眼 3D 显示指向光源的侧面发光塑料光纤(POF)阵列,这种 POF 阵列背光源可代替传统导光板和液晶开关板,从而简化指向光源裸眼 3D 显示屏的结构并减小其体积。光纤阵列的制作方法有很多,如利用 V 型沟槽进行精密控制加工,通过 V 型槽口进行光纤定位,控制平行光纤间距<sup>[15-17]</sup>,但这种方法对沟槽加工精度的要求高,并且一种 V 型沟槽板只能对应一种光纤阵列节距,加工效率低、

成本较高。光纤绕制应力控制中已有的方法是,基于供纤轮与绕纤轮之间速度差的数学模型进行旋转绕制,使用舞蹈轮微控设备实现张力波动的小范围控制<sup>[18]</sup>。本文引入一种新型绕制装置<sup>[19]</sup>,采用铜线填补缝隙的紧密绕制方案,并利用图像监测设备实时检测光纤阵列布线精度,以控制光纤导引装置的角度,实现高精度布线,减少光纤错位。

## 2 设计原理

受 LCD 刷新频率的限制,定向时分背光裸眼 3D 显示技术的图像视点数量有限。本设计采用 3 视点方案,如图 1 所示,侧面发光 POF 阵列指向光源主要包括侧面发光 POF 阵列、柱面微透镜阵列、LCD 和不能反射可见光的背板。

侧面发光 POF 阵列在入射段为光纤束结构,所有侧面发光 POF 按顺序进行编号,编号顺序为 1, 2, 3, 1, 2, 3…。相同编号的侧面发光 POF 为 1 组,共分成 3 组,所以有 3 个编号的光纤束。每个编号的光纤束与相同编号的发光二极管(LED)耦合连接,通过控制 LED 驱动脉冲实现侧面发光 POF 分时发光。

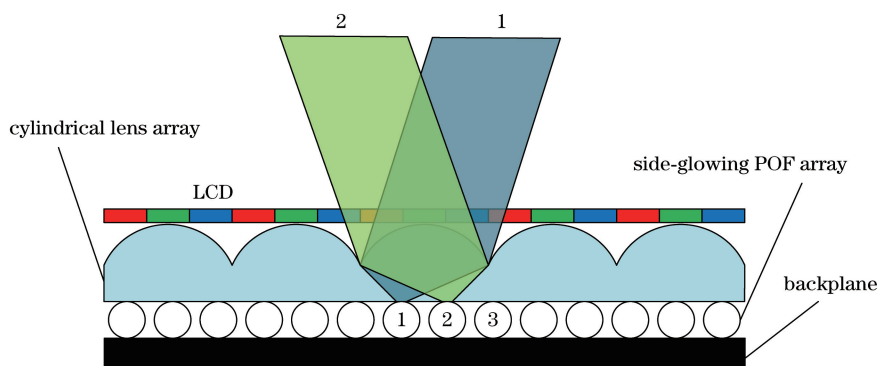


图 1 侧面发光 POF 阵列指向光源原理图

Fig. 1 Schematic of directional backlight with side-glowing POF array

每一个柱面透镜单元的焦平面上对应 1, 2, 3 三组侧面发光光纤。侧面发光光纤 1 发出的光线经过柱面透镜转换为定向投射光束 1, 投射到观察者的左眼(视点 1);侧面发光光纤 2 发出的光线经过柱面透镜转换为定向投射光束 2, 投射到观看者的右眼(视点 2)。LCD 放置于定向投射光束的光路中,当侧面发光光纤 1 和 2 分别发光时,定向光束 1 和 2 透过 LCD 分别显示的左视差图像和右视差图像投射到观察者的左眼和右眼,产生立体感。

在多视点裸眼 3D 系统中,视点图像是按照视差原理顺序排列的,例如按视点 1, 2, 3 顺序排列。但在某些位置,会出现视点顺序颠倒现象,如 1, 2,

3, 1, 2, 3 排列中的 3, 1 排列顺序是颠倒的,从而导致左眼图像进入人的右眼、右眼图像进入人的左眼,这样不但看不到立体效果,还会引起头晕等不适。为了消除视点顺序颠倒现象,将视点 3 设计为暗屏,当观看者左眼或右眼处于视点 3 位置时,只能看到视点 1 或视点 2 的图像,不会看到顺序颠倒的图像,这样可避免引起观看者头晕等不适。

为了使每个柱面微透镜焦平面上相同编号的侧面发光 POF 发出的光线都会聚到相同的视角区域内,需要对 POF 的排布进行合理设计。因此,侧面发光 POF 阵列指向光源的核心部件为侧面发光 POF 阵列。侧面发光 POF 阵列的主要作用是形成

指向光源立体显示所需的平面线光源。POF 阵列整齐排列在背板上,背板吸收杂散光,减少了线状光源之间的串扰。

图 2 所示为侧面发光 POF 经柱面透镜定向成像的光路图。其中,侧面发光 POF 直径为  $d$ ,经过柱面透镜在观察面形成对应的像为  $D$ ,柱面微透镜阵列单元宽度为  $b$ ,柱面微透镜横截面为圆弧,曲率半径为  $r$ ,圆弧圆心为  $O$ ,柱面微透镜阵列板厚度(物距)为  $l$ ,侧面发光 POF 像距(眼睛位置)为  $l'$ 。在像距位置处,相邻视点间距(约为人眼瞳距) $S = 65 \text{ mm}$ 。侧面发光 POF 与柱面微透镜组成偏轴光学系统<sup>[20-21]</sup>。

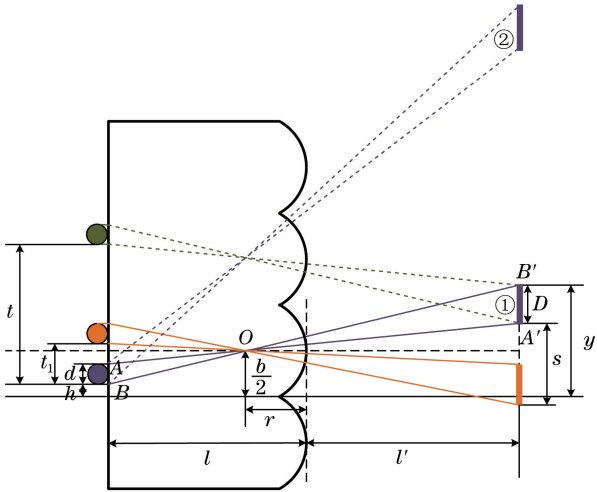


图 2 侧面发光 POF 阵列定向成像光路图  
Fig. 2 Diagram of directional imaging optical path of side-glowing POF array

将侧面发光 POF 放置于柱面微透镜阵列的焦平面处。设置参考轴为两个柱面透镜交界处,  $A$ 、 $B$  对应侧面发光 POF 的两个边沿,  $A'$ 、 $B'$  为  $A$ 、 $B$  所成像点,  $h$ 、 $y$  分别代表 POF 的一个边沿及其对应像相对于参考轴的偏移量。根据相似三角形可得

$$\frac{l' + r}{l - r} = \frac{y - b/2}{b/2 - h} = \frac{D}{d}, \quad (1)$$

令

$$\frac{l' + r}{l - r} = \beta, \quad (2)$$

则(1)式可写为

$$y = \frac{b}{2}(1 + \beta) - \beta h, \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为像物垂直放大倍率。

在图 2 中,若  $B$  点向上移动到同一个视点的下一个列周期位置  $t + h$  ( $t$  为形成同一视点的相邻两

个侧面发光 POF 的中心距离),再经过曲率中心与参考轴的距离为  $3b/2$  的相邻柱面微透镜成像,同样可将光束投射到  $B'$  点,则由(3)式可得

$$y = \frac{3}{2}b(1 + \beta) - \beta(t + h), \quad (4)$$

整理得

$$t = \frac{1 + \beta}{\beta}b. \quad (5)$$

(5)式表明,柱面微透镜阵列单元宽度  $b$  是侧面发光 POF 投射到相同视点的同一光纤编号间距  $t$  的  $\frac{1 + \beta}{\beta}$ 。

每一个柱面微透镜单元内包含  $m$  列侧面发光光纤,所以侧面发光 POF 阵列的节距为

$$t_1 = \frac{t}{m} = \frac{(1 + \beta)}{\beta m}b. \quad (6)$$

### 3 实验制作

实验采用的侧面发光 POF 的直径  $d = 0.25 \text{ mm}$ ,柱面微透镜阵列单元宽度  $b = 1.41 \text{ mm}$ ,柱面微透镜曲率半径  $r = 1.97 \text{ mm}$ ,柱面微透镜阵列板厚度  $l = 6 \text{ mm}$ ,材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)。每一个柱面透镜单元的焦平面上平行放置编号为 1, 2, 3 的 3 根侧面发光 POF,即  $K = 3$ ,因此相邻两根 POF 的间距  $t'_1 \approx 0.47 \text{ mm}$ ,  $t'_1$  可用于估算放大倍率  $\beta$ 。根据人眼瞳距  $S = 65 \text{ mm}$ ,可知柱面微透镜成像的放大倍率  $\beta \approx S/t'_1 = 138$ ,代入(6)式可得 POF 阵列的节距  $t_1 = 0.4734 \text{ mm}$ ,再由(2)式求得像距为  $l' \approx 530 \text{ mm}$ ,即为裸眼 3D 视区的最佳观看距离。由于相邻两根光纤之间存在较大空隙,容易造成光纤弯曲,实验采用铜线进行填充,铜线的直径  $d' = 0.22 \text{ mm}$ 。

为了得到整齐等间距排列的 POF 阵列,设计了一个光纤绕线装置,如图 3 所示。该装置由光纤绕制板、滑动导轨、光纤引导装置和监测相机等组成。将光纤绕制板设计成具有一定厚度的长方体,两个长边在厚度方向为半圆柱体结构,以便光纤阵列在绕制时能够顺利过渡到绕制板正面,实现整齐排列。滑动导轨使被绕制光纤可以在光纤绕制板长度方向移动,实现顺序排列。光纤引导装置使光纤处于恒定拉力状态,并使光纤准确绕制在设定位置。光纤与铜线同时绕制在光纤绕制板上,实现紧密排列。监测相机实时监测光纤绕制过程中的布线情况,以减少错位。

将绕制好的 POF 阵列粘贴在背板上,再经过激

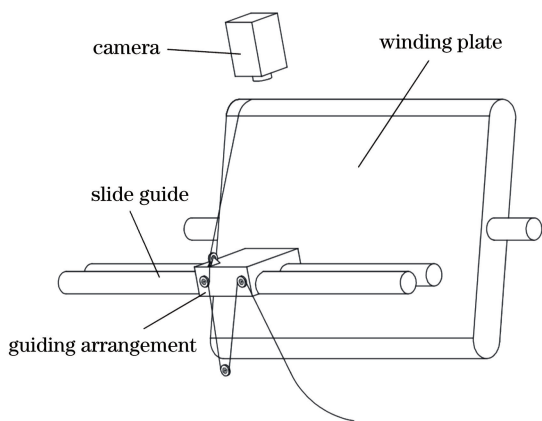


图 3 侧面发光 POE 阵列绕制装置示意图

Fig. 3 Diagram of winding device with side-glowing POE array

光打标散射点<sup>[22]</sup>,使之成为侧面发光光纤阵列。图 4 所示为实验制作的 POE 阵列实物照片局部放大图,可以看出,光纤分布均匀,排列整齐。

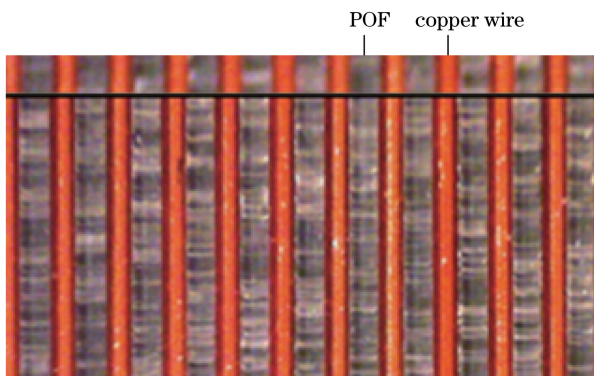


图 4 侧面发光 POE 阵列局部放大图

Fig. 4 Partial enlarged drawing of side-glowing POE array

## 4 实验测试

### 4.1 测试结果

侧面发光 POE 阵列指向光源的平均亮度值测量装置原理如图 5 所示,将 POE 阵列板与柱面透镜阵列板贴合成为指向光源,将其垂直放置在标有角度的转盘上,并使指向光源的中心垂线与转盘的旋转轴重合。测量时,转动转盘以  $1^\circ$  间隔测量各角度下指向光源的平均亮度。亮度计(远方 CX-2 型成像亮度计,可以直接测量整个背光源的平均亮度值)放置在距离背光源  $l'_0$  的位置,成像光轴通过背光源面板中心。

分别单独点亮编号为 1(视点 1)和 2(视点 2)的侧面发光 POE 阵列,记录成像亮度计在各个角度位置的测量值,再将角度转换为横向距离  $y$ 。当  $\theta = 0$  时,  $l' = l'_0 = 530$  mm;将背光源面板旋转角度  $\theta$ ,同

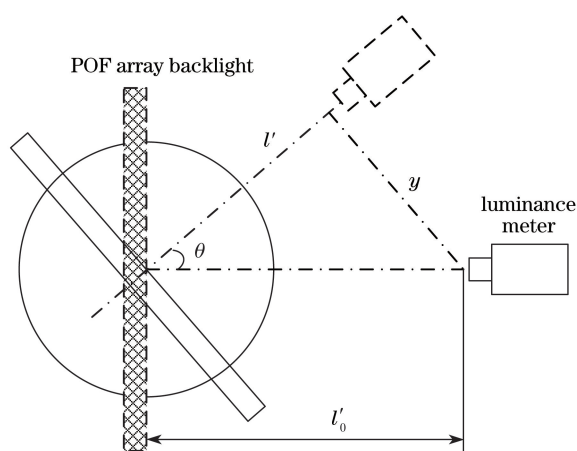


图 5 指向光源亮度测量原理图

Fig. 5 Measurement principle of directional backlight luminance

时改变测量距离  $l'_0 = l' / \cos \theta$ ,最后将测量角度  $\theta$  转换为横向距离  $y = l' \cdot \tan \theta$ 。实验测试结果如图 6 所示。

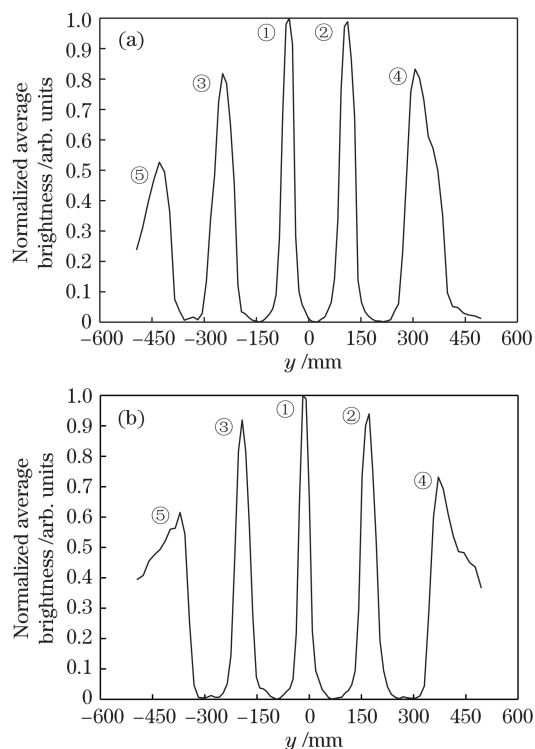


图 6 实验得到的侧面发光 POE 阵列指向光源平均亮度变化曲线。(a)视点 1;(b)视点 2

Fig. 6 Average luminance of directional backlight with side-glowing POE array obtained in experiment.

(a) Viewpoint 1; (b) viewpoint 2

由图 6 可知,视点 1 和视点 2 的亮度分布具有显著的指向光源特性,这里的峰值①、②与图 2 所示成像光路中的①、②发光光纤像相对应。随着横向位置的变化,在横向( $y$  方向)  $-500 \sim 500$  mm 范围



内测量指向光源的视点亮度变化曲线,得到 5 个峰值和 4 个谷值,且几个谷值亮度都很低。从图 6 还可以看出,两相邻峰值的距离均在 183~204 mm,因指向光源按 3 视点设计,所以相邻两视点的峰值间距是上述同一视点两相邻峰值距离的 1/3,约为 61~68 mm,与人眼瞳距接近。

#### 4.2 对比分析

为了说明采用铜线填充线隙绕制侧面发光 POF 阵列方法的可靠性,建立了由均匀排列侧面发光 POF 阵列和柱面微透镜阵列组成的指向光源理想模型,将仿真结果与实验结果进行对比。

首先使用 SolidWorks 软件对柱面微透镜阵列和侧面发光 POF 进行建模,模型参数与上述实验材料相同,然后将模型导入 TracePro 软件进行仿真。设 PMMA 折射率为 1.49,侧面发光 POF 表面均匀发光。将侧面发光 POF 阵列无间隙地贴合在柱面微透镜阵列板的后表面(焦平面)上,仿真时接收面设置于距离透镜 530 mm 处,与实验测试相同。接收面的光照度分布仿真结果如图 7 所示。串扰计算中的分子或分母都是接收器接收到的指向光源整个面板亮度的叠加,当光源面积不变时,叠加结果使得接收器接收到的光照度值与指向光源平均亮度成正比,所以图 7 所示的归一化光照度值与图 6 所示的指向光源平均亮度具有相同的物理意义。

根据实验数据计算图 6(a)、(b)实验测试曲线和图 7(a)、(b)仿真曲线中心①、②、③三个峰值的相邻两峰值间距的平均值,可得二者分别为 190 mm 和 194 mm,平均偏差约为 2%。由此可得,仿真曲线相邻两视点峰值平均间距为 64.7 mm,与设计值 65 mm 基本一致。图 6(a)视点的峰值①的坐标为 -57 mm,图 6(b)视点的峰值①的坐标为 7 mm,相邻两视点峰值间距为 64 mm;图 7(a)视点的峰值①的坐标为 -43 mm,图 7(b)视点的峰值①坐标为 22 mm,相邻两视点峰值间距为 65 mm。相邻两视点峰值间距实验值与仿真值相差 1 mm。由图 3 成像光路图可知,相邻两视区中心位置(光纤像)偏差  $\Delta S = 1$  mm,相当于侧面发光 POF 在阵列中的位置偏差  $\Delta t_1 = \Delta S / \beta \approx 0.007$  mm,约为光纤阵列节距的 1.5%。光纤排列的位置误差主要来自 POF 直径的不均匀,以及绕制 POF 阵列时 POF 和铜线之间存在的微小缝隙。从峰值宽度看,实验测试曲线略小于仿真曲线,说明实际制作的侧面发光

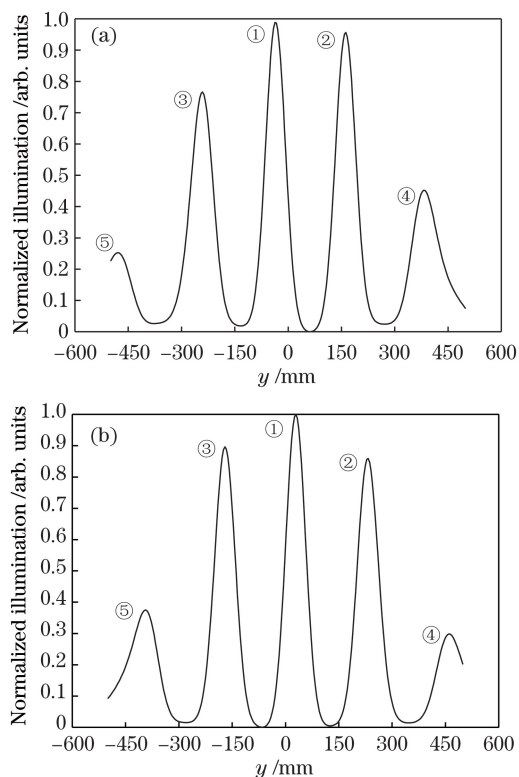


图 7 软件仿真得到的侧面发光 POF 阵列指向光源照度分布曲线。(a)视点 1;(b)视点 2

Fig. 7 Illuminance distribution curve of directional backlight with side-glowing POF array obtained by software simulation. (a) Viewpoint 1; (b) viewpoint 2

POF 并不是均匀发光面,光纤的中心轴线发光亮度大于边缘发光亮度,如图 8 所示,图 8(a)为 POF 侧面发光光纤的局部照片,图 8(b)为 POF 侧面发光亮度的横向空间分布曲线。

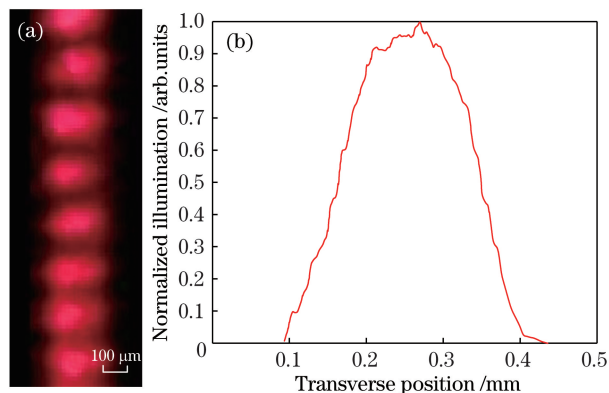


图 8 POF 侧面发光亮度空间分布。(a) POF 局部照片;(b)亮度横向分布曲线

Fig. 8 Spatial distribution of side-glowing luminance of the POF. (a) Local photo of POF; (b) transverse distribution curve of brightness

## 5 串扰分析

### 5.1 串扰模型

对裸眼 3D 的显示质量进行客观的定量评价<sup>[23]</sup>。串扰程度是衡量指向光源裸眼 3D 显示器光学质量的重要参数。通常,采用串扰度<sup>[24-25]</sup>来定量描述指向光源裸眼 3D 显示的串扰程度,它是指在某视点眼睛观看区域测量来自全部其他视点全亮图像的亮度与来自本视点全亮图像的亮度的比值。设从视点  $j$  区域屏幕中心高度  $(x, y)$  处观察到第  $i$  列侧面发光 POF 的亮度为  $L_{i,j}(x, y)$ , 则人眼在该视点区域看到的图像串扰度可用所有侧面发光 POF 的平均亮度计算。如图 9 所示, 柱面微透镜阵列面板宽度为  $W$ , 人眼在视点  $k$  区域可通过光束  $1, \dots, i, \dots, N$  观察到侧面发光 POF 阵列面板的亮度。若柱面微透镜阵列面板有  $N$  列, 则具有  $K$  个视点的视点  $k$  的串扰度可表示为

$$C_k(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq k}^K L_{i,j}(x, y)}{\sum_{i=1}^N L_{i,k}(x, y)} \times 100\% = \frac{\sum_{j \neq k} L_j(x, y)}{L_k(x, y)} \times 100\%, \quad (7)$$

式中:  $L_k = \sum_{i=1}^N L_{i,k}(x, y)$  为在视点  $k$  的位置  $(x, y)$  测量到的对应该视点的侧面发光 POF 阵列点亮时指向光源的平均亮度测量值;  $L_j(x, y) = \sum_{i=1}^N L_{i,j}(x, y)$  为在视点  $k$  的位置  $(x, y)$  测量到的其他视点的侧面发光 POF 阵列点亮时指向光源的平均亮度测量值。

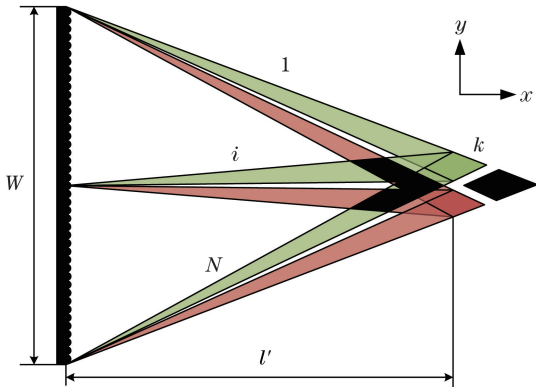


图 9 侧面发光 POF 阵列指向光源串扰示意图  
Fig. 9 Crosstalk diagram of directional backlight with side-glowing POF array

### 5.2 串扰计算

根据(7)式计算串扰度, 视点 3 为全黑, 所以只需考虑另外两视点的情况, 即  $K=2$ 。设视点 1 的串扰度为  $C_1(x, y)$ , 视点 2 的串扰度为  $C_2(x, y)$ 。由图 6 的实验数据计算距离背光源  $l' \approx 530$  mm 处、横向范围  $y = -200 \sim 200$  mm 的图像串扰度分布曲线(图 10)。可以看出, 大部分区域的  $C_1(x, y)$  和  $C_2(x, y)$  值均小于 20%, 最低串扰度可达 1% 以下, 该区域与图 6 和图 7 中的曲线谷值相对应。

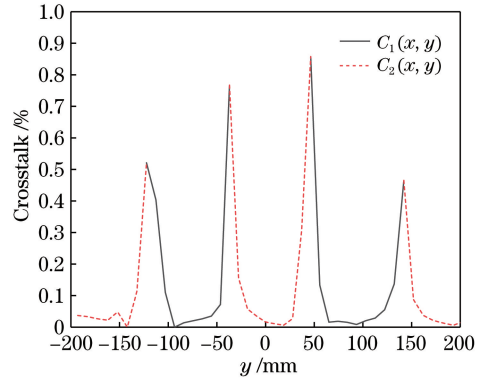


图 10 侧面发光 POF 阵列指向光源的串扰度分布曲线  
Fig. 10 Crosstalk distribution curve of directional backlight with side-glowing POF array

### 5.3 柱面透镜像差引起的串扰

利用图 2 所示的成像光路, 并不能获得理想成像。这是由于柱面透镜存在几何像差和波像差, 侧面发光 POF 在像面(眼睛位置所在平面)的影像是一个弥散的条形光斑, 这会使得本来完全分离的相邻两根发光光纤的像产生交叠, 引起串扰。这种串扰是固有串扰, 与柱面透镜的结构参数有关, 可以通过光学软件仿真获得像差引起的串扰程度。由图 7 可以看到, 接收面光照度分布的每一个峰值呈现为高斯分布特征, 已不再是照度均匀的该视点发光光纤的清晰像。根据图 7 曲线数据计算得到视点 1 和视点 2 的串扰度(图 11)。比较图 10 和图 11 可见, 柱面透镜存在的像差是柱面透镜式指向光源产生串扰的主要原因。

### 5.4 POF 阵列错位产生的串扰

实际制作 POF 阵列时, 由于光源面积较大, 侧面发光 POF 与柱面微透镜阵列的相对位置可能偏离理想位置, 即出现错位, 原有的视角位置分布将发生改变, 这会引发更严重的串扰问题。设错位偏移量为  $\Delta h$ , 则由(4)式可知, 在视点区域的像偏移量为

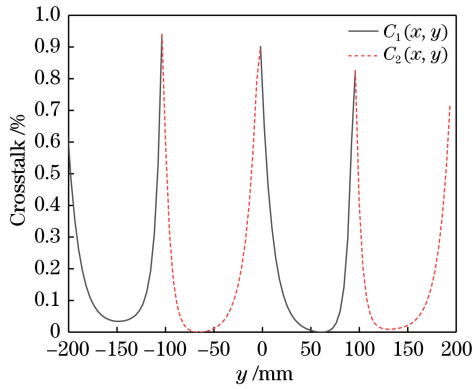


图 11 POF 等间距理想排列时串扰分布曲线的仿真结果  
Fig. 11 Crosstalk distribution curve obtained by simulation in the condition of POF equidistant arrangement

$$\Delta y = (1 + \beta) \left( 3 \cdot \frac{b}{2} \right) - \beta(t + h) - \left[ (1 + \beta) \left( 3 \cdot \frac{b}{2} \right) - \beta(t + h + \Delta h) \right] = \beta \Delta h, \quad (8)$$

由此引起的串扰增加量约为

$$\Delta C_k \approx \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq k}^K [L_{i,j}(x, y + \beta \Delta h_i) - L_{i,j}(x, y)]}{\sum_{i=1}^N L_{i,k}(x, y)} \times 100\%. \quad (9)$$

由图 2 可知,  $\Delta h = -\Delta t_1$ , 所以  $\beta \Delta h = -\beta \Delta t_1 = -\Delta S$ ;  $\Delta h_i$  为第  $i$  根侧面发光 POF 的错位偏移量。根据图 6 和图 7 的数据比较, 可得  $\Delta S = 1$  mm, 所以 POF 阵列错位产生的串扰影响范围在 1 mm 内, 属于次要串扰影响因素。

### 5.5 视角增大产生的串扰

通常, 最佳观看距离是指眼睛与屏幕中心的垂直距离, 视线与法线的夹角为 0。当增大观看角度时, 眼睛与屏幕不同位置的距离差异增大, 引起来自 POF 光源不同方向的指向光束宽度差异增大, 从而引起更大的串扰。另外, 在指向光源裸眼 3D 显示中, 每一个视点的视区形状可视为菱形<sup>[26]</sup>。当视区位于显示屏幕正前方时, 低串扰区[图 12(a)所示的菱形区域]为等边长菱形。图 12(b)所示为观看角度增大后的视区菱形示意图。比较图 12(a)和(b)可以看到, 观看角度增大后的视区菱形锐角  $\alpha$  变小, 低串扰区面积减小,  $k$  视区的指向光束  $i$  和  $i+3$  进入  $k+1$  视区的面积比例增大, 使  $k+1$  视区的串扰度增大。因此, 在图 6 和图 7 所示的曲线中,  $|y|$  大于 200 mm 的光亮度变化曲线和光照度分布曲线的谷值都比较高, 说明串扰较大。

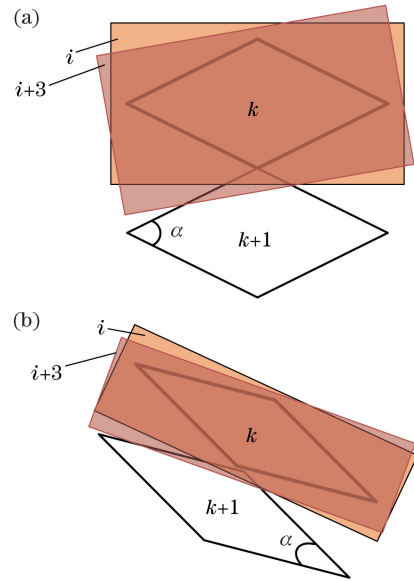


图 12 视区位置与视区菱形关系的示意图。  
(a) 屏幕正前方视区; (b) 屏幕斜前方视区

Fig. 12 Relationship between position of visual area and rhomboid of visual area. (a) Forward view area of screen; (b) beveled forward viewing area of screen

## 6 结 论

采用侧面发光 POF 阵列和柱面微透镜阵列组成的模组设计了 3 视点指向光源, 相关参数为: 柱面微透镜阵列半径  $r = 1.97$  mm, 厚度  $l = 6$  mm, 节距  $b = 1.41$  mm; 侧面发光 POF 直径  $d = 0.25$  mm; 指向光源最佳视区距离  $l' = 530$  mm。提出一种铜线填充线隙实现侧面发光 POF 阵列均匀排布的绕制方法, 并通过实验验证其可行性。实验测得指向光源在距离  $l' = 530$  mm 处的横向  $-500 \sim 500$  mm 范围内的视点亮度变化曲线有 5 个峰值和 4 个谷值, 且谷值处的串扰度可达 1% 以下, 具有显著的指向光源特征。测量结果表明, 实验制作的侧面发光 POF 阵列光纤位置平均偏差为 0.007 mm, 约为光纤阵列节距的 1.5%, 横向范围  $-200 \sim 200$  mm 内大部分区域的串扰度小于 20%, 且最低串扰度可达 1% 以下。

### 参 考 文 献

- [1] Hill L, Jacobs A. 3-D liquid crystal displays and their applications[J]. Proceedings of the IEEE, 2006, 94(3): 575-590.
  - [2] Wang Y Q. Auto-stereoscopic display based on LCD [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2003, 18(2): 116-120.
- 王元庆. 基于 LCD 的自由立体显示技术[J]. 液晶与

- 显示, 2003, 18(2): 116-120.
- [3] Lü G J, Zhao B C, Wu F, *et al.* Autostereoscopic 3D display with high brightness and low crosstalk [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2792-2795.
- [4] Wang Q H, Zhao W X, Tao Y H, *et al.* Stereo viewing zone in parallax-barrier-based autostereoscopic display[J]. *Optik*, 2010, 121(22): 2008-2011.
- [5] Huang Q M. Multi-view naked eye 3D TV technology[J]. *Electronic Design Engineering*, 2015, 23(3): 191-193.  
黄庆敏. 多视角裸眼 3D 电视的技术实现 [J]. *电子设计工程*, 2015, 23(3): 191-193.
- [6] Qin K H, Luo J L. Techniques for autostereoscopic display and its development[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(10): 1934-1941.  
秦开怀, 罗建利. 自由立体显示技术及其发展 [J]. *中国图象图形学报*, 2009, 14(10): 1934-1941.
- [7] Xue Y L, Wang Y Q, Cao L Q, *et al.* Backlight control system of autostereoscopic display with less crosstalk[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(7): 69-72.  
薛亚兰, 王元庆, 曹利群, 等. 自由立体显示中降低串影干扰的背光控制系统 [J]. *电光与控制*, 2014, 21(7): 69-72.
- [8] 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): 95-102.  
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): 95-102.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Hsu S W, Jiaan Y D, Huang M S. Measurement of core position of fiber array by a calibrated mask method[J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295/296: 227-232.
- [12] Jin C F, Wang Y, Cao L, *et al.* Design of fiber-array imaging laser radar system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(11): 115-123.  
靳辰飞, 王野, 曹璐, 等. 光纤阵列成像激光雷达系统的设计 [J]. *光电工程*, 2012, 39(11): 115-123.
- [13] Wang R L, Chen Q S. Precision measurement of fiber array based on micro-vision[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(3): 288-292.  
王润兰, 陈青山. 基于显微视觉的光纤阵列精密测量研究 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(3): 288-292.
- [14] Chen L G, Zhu J F, Wang M Y. Detection system for distances between the fiber centers in fiber array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 728-732.  
陈立国, 朱吉锋, 王明月. 光纤阵列中纤芯间距的检测系统 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(4): 728-732.
- [15] Lei Y. Fabrication of Si-V groove used for fiber array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, 31(5): 447-450.  
雷莹. 用于光纤阵列的 Si-V 型槽的制作 [J]. *红外与激光工程*, 2002, 31(5): 447-450.
- [16] Hao Y Q, Zhong J C, Zhao Y J, *et al.* Design of fiber array coupled with ridge waveguides[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2004, 25(5): 349-352.  
郝永芹, 钟景昌, 赵英杰, 等. 脊形波导耦合的光纤阵列设计 [J]. *半导体光电*, 2004, 25(5): 349-352.
- [17] Xie J, Feng Y K, Cheng J, *et al.* Precision grinding of micro V-groove array on optical fiber quartz glass substrate[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(8): 2243-2249.  
谢晋, 冯彦科, 程剑, 等. 光纤石英玻璃基板微 V 槽阵列的精密磨削 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8): 2243-2249.
- [18] Qiao L J, Yang R F, Zhang P, *et al.* The research of tension control and high precision winding in optical fiber winding system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(25): 272-277, 316.  
乔立军, 杨瑞峰, 张鹏, 等. 光纤环绕制中张力控制与高精度排线的研究 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(25): 272-277, 316.
- [19] Gao F F, Zhuang Q R, Li Z R, *et al.* A manufacturing device of parallel optical fiber array for directional backlight in naked eye 3D display: ZL201821252680.6[P]. 2019-02-19.  
郜飞飞, 庄其仁, 李梓润, 等. 一种定向背光源裸眼 3D 平行光纤阵列制作装置: ZL201821252680.6[P]. 2019-02-19.
- [20] Wang L L, Teunissen K, Tu Y, *et al.* Crosstalk evaluation in stereoscopic displays [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(4): 208-214.
- [21] Ren B C. The study on vector aberration theory for off-axis optical system [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2012: 29-38.  
任百川. 偏轴光学系统矢量像差理论研究 [D]. 长春: 中国科学院大学, 2012: 29-38.



- [22] Qi Y, Liu C J, He Y, *et al.* Uniform side-glowing polymer optical fiber fabricated by laser-marking[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206001.  
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.
- [23] Fan Z C, Zhang S, Weng Y T, *et al.* 3D quantitative evaluation system for autostereoscopic display[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(10): 1185-1196.
- [24] Wang L L, Tu Y, Chen L, *et al.* Cross-talk acceptability in natural still images for different (auto) stereoscopic display technologies[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2010, 18(6): 405-414.
- [25] Liou J C, Lee K, Huang J F. Low crosstalk multi-view tracking 3-D display of synchro-signal LED scanning backlight system[J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 7(8): 411-419.
- [26] Son J Y, Saveljev V V, Kim J S, *et al.* Viewing zones in three-dimensional imaging systems based on lenticular, parallax-barrier, and microlens-array plates[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(26): 4985-4992.