

doi:10.3788/gzxb20174602.0222001

用于 CF-LCoS 投影偏置 LED 照明光棒的角度分割原理及其偏振复用系统

刘鹏, 周海洋, 江城, 余飞鸿

(浙江大学 光电科学与工程学院, 杭州 310027)

摘 要:研究了 LED 相对光棒中心位置存在偏置时光棒对 LED 的角度分割与虚像形成原理, 籍此计算了不同偏置以及不同尺寸 LED 的光棒尺寸, 再将计算所得的光棒与前端成像透镜、中间像面偏振复用系统、后端积分透镜及偏振分束器等进行综合优化设计, 然后根据所得中间像确定不同情况下的偏振复用系统具体结构, 确保 LED 发散角范围内光能的偏振复用, 并实现对滤色片式硅基液晶芯片的均匀照明. 最后设计了一款以白光 LED 为光源的滤色片式硅基液晶芯片微型投影光引擎, 在 1W LED 功耗下实现 12.8 lm 投射亮度(114 lm/W), 均匀性达 93%. 对比没有应用偏振光复用的微型投影光引擎, 在保证均匀性的前提下, 提升了微型投影系统的光效率, 丰富了光棒偏振复用的内容.

关键词:滤色片式硅基液晶芯片; 角度分割; 偏振转换系统; 光棒; LED; 投影系统; 成像系统

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)02-0222001-13

Principle of Biased LED Illuminated Light Pipe Angle Segmentation and Polarization Recovery System for CF-LCoS Projection

LIU Peng, ZHOU Hai-yang, JIANG Cheng, YU Fei-hong

(College of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The biased LED illuminated light pipe angle segmentation and its virtual image array forming principle were reserached. The light pipe size was calculated according to the biased LED position and divergence angles, and then optimized with front imaging lens, intermediate image polarization conversion system, backend integral lens and polarization beam splitter. The polarization conversion system structure was determined by the optimized intermediate image distribution to insure the polarization conversion of luminous energy within the range of LED divergence angle and realize the uniform illumination to color-filter liquid crystal on silicon. A color-filter liquid crystal on silicon projection optical engine was finally designed with the white LED, wich can output light flux of 12.8 lumens per watt(the LED efficiency is about 114 lm/W) with 93% irradiance uniformity. Comparing with the optical engine without polarization conversion, the proposed optical engine enhances the light efficiency of the color-filter liquid crystal on silicon micro-projection system and enriches the light pipe applications while maintaining the homogeneity.

Key words: Color-filter liquid crystal on silicon; Angle segmentation; Polarization conversion system; Light pipe; LED; Optical projection systems; Imaging systems

OCIS Codes: 220.2945; 080.1510; 080.1753; 080.2740; 080.3620; 080.3685

0 引言

随着滤色片式硅基液晶芯片(Color-Filter Liquid Crystal on Silicon, CF-LCoS)技术的不断成熟, 基于

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60177013)资助

第一作者: 刘鹏(1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光学工程. Email: lpeng@zju.edu.cn

导师(通讯作者): 余飞鸿(1964-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光学工程与智能化光学仪器. Email: feihong@zju.edu.cn

收稿日期: 2016-08-15; 录用日期: 2016-10-17

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

CF-LCoS 的投影衍生了很多新的应用. 但由于 CF-LCoS 基于液晶双折射偏振干涉原理^[1-2], 只能对偏振光进行偏振调制, 常见的 LED 光源为自然光. CF-LCoS 的这一特性导致光源另一个偏振方向的偏振光不能被利用. 如何在 CF-LCoS 微型投影光引擎中应用偏振复用技术以提升光效率成为 CF-LCoS 微型投影显示研究的重点.

液晶投影技术经过多年的发展, 形成了多种偏振光复用技术与照明技术. 其中, 偏振光复用技术有基于复眼偏振复用系统 (Polarization Conversion System, PCS) 方法^[3-4]、晶体双折射法^[5]、偏振分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) + 液晶偏振旋转器法^[6]、光棒出射端 1/4 波片 + 反射式偏振片法^[7]、光棒出射准直 + 偏振转换光棒 + 混合会聚法^[8] 以及基于反射式偏振膜的方法^[9] 等.

照明技术是通过简单的自由曲面透镜实现准直与均匀照明, 主要有平凸自由曲面透镜准直法^[10]、单透镜双自由曲面透镜准直法^[11]、双透镜自由曲面准直法^[12]、单自由曲面透镜 + 柱面镜实现圆光斑转椭圆光斑准直法^[13].

针对复眼偏振复用技术^[3-4] 加工难而自由曲面透镜准直照明方法^[10-13] 设计复杂、均匀性差与光效率低等问题, 根据光棒虚像原理的偏振复用方法^[14], 通过模拟 LED 发出光束经过光棒的虚像形成原理及前端透镜实现虚光源分离实像, 该实像经过 PCS 阵列偏振复用整形后, 两个偏振态的光能量都能被后继的积分透镜收集并传递至 CF-LCoS 上形成均匀照明. 与传统偏振复用方法相比, 光棒偏振复用方法^[14] 没有使用复眼^[3-4]、锥形光棒^[8] 或双折射晶体^[5]; 其照明区域通过准直叠加, 不存在拼接^[8] 带来的照度均匀性问题; 反射式偏振膜复用技术^[9] 利用多次反射来提升光效率, 尽管照明系统口径并没有扩大, 但光效率提高并不多.

光棒偏振复用^[14] 方法新颖, 但限于当时的认识, 对光棒 PCS 偏振复用整形分析的重点只有 LED 光源经光棒匀光并产生虚光源阵列, 对偏置 LED 与光棒角度分割分析几乎没有涉及, 而这正是形成虚像阵列的关键所在. 对 LED + 光棒的光能利用考虑也不充分.

本文在文献^[14] 的基础上, 重点研究偏置 LED 照明光棒的角度分割原理以及如何设计以减少渐晕提升效率. 主要研究了在尽可能小的渐晕情况下光棒尺寸的计算理论, 并利用成像光学软件进行模拟验证. 通过将偏置 LED 照明下的光棒尺寸、CF-LCoS 尺寸设置为物与像, 通过成像光学软件优化确定前端成像透镜、后继积分透镜、PBS, 再将系统参数输入非成像光学软件进行光线追迹, 确定不同 LED 与光棒配置照明情况下中间像的分布, 并据此设计了不同的 PCS 结构. 最后设计了一款光棒偏振复用 CF-LCoS 投影系统, 以实现微型投影系统的光能高效利用与均匀照明.

1 偏置 LED 照明光棒角度分割原理

早期对光棒照明系统的研究主要集中在光棒的光学扩展量以及如何得到均匀照明上, 很少考虑光棒的偏振复用. 光棒主要有三个参数, 即光棒材料、端面尺寸和长度. 光棒端面尺寸可根据 CF-LCoS 尺寸、可接收光线角和 LED 的发光角度综合确定.

1.1 光棒虚光源形成原理及其尺寸确定

平面型 LED 光源在光棒中的多次全反射, 会对 LED 不同角度区域光束进行分割并在光棒入射端形成虚光源阵列. 对于矩形光棒而言, 可运用镜像法来判断一条特定的光线是来自于光源还是光源的虚像.

图 1(a) 表示的是偏置 LED + 光棒剖面图, 图 1(b) 为 xz 平面虚光源形成原理. 在图 1(b) 中, LED 与光棒紧密接触, 依次向光棒右端边缘处交叉画直接出射的光线 (实线)、经光棒 lp_{zd} 面反射 1 次光线 (点线) 以及分别经过光棒 lp_{zd} 面和光棒 lp_{zd} 面连续反射 2 次光线 (划线). 图 1(b) 中多次反射的光线, 最后都经过光棒出射端面 AA' 区交汇出射.

假定 LED 的尺寸为 $2L_x \times 2L_y$, CF-LCoS 尺寸为 $S_x \times S_y$, 光棒端面尺寸为 $P_x \times P_y$, 光棒长度为 L , 光棒材料折射率为 n . 在理想情况下, 由于 CF-LCoS 的最大半接收角 ϕ_{LCoS} 的限制, 往往要求光棒出射端面与 CF-LCoS 之间进行 M 倍中继放大, 将光棒出射端尺寸为 $P_x \times P_y$ 的区域放大以准确匹配尺寸为 $S_x \times S_y$ 的 CF-LCoS. 根据中继系统横向尺寸放大与角度缩小原理, LED 的发散半角 ϕ_{LED} 刚好反向缩小 $1/M$ 倍, 以满足照明 CF-LCoS 光束的角度限制条件^[15], 实现 LED 出射光能利用率最大化, 表示为

$$\begin{cases} M = \frac{\phi_{\text{LED}}}{\phi_{\text{LCoS}}} \\ M = \frac{S_x}{P_x} = \frac{S_y}{P_y} \end{cases} \quad (1)$$

自光棒直接出射的光线角度由光棒端面尺寸及其长度决定,假定 LED 紧贴光棒,其间隙近似为 0,LED 相对光棒中心位置偏置为 (C_x, C_y) ,考虑到对称性以及 LED 光源出射光束全部利用,常见情况是 $C_x = 0$. 参考图 1(b),得到 xz 平面光棒将 LED 发散光束分割的三个角度为

$$\begin{cases} \theta_{x0} = \arctan\left(\frac{0.5P_x}{L}\right) \\ \theta_{x1} = \arctan\left(\frac{1.5P_x}{L}\right) \\ \theta_{x2} = \arctan\left(\frac{2.5P_x - L_x}{L}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中仅要求 LED 最大出射角光能全部收集. 角度在 θ_{x0} 与 $-\theta_{x0}$ 之间的光线从光棒端面 AA' 直接出射,角度位于 θ_{x0} 与 θ_{x1} 之间或 $-\theta_{x0}$ 与 $-\theta_{x1}$ 之间的光线,会在光棒之内各经 lp_{xu} 面或 lp_{xd} 面反射一次,形成相当于由虚光源 S_{-1} 或 S_1 直接出射的光线. 角度位于 θ_{x1} 与 θ_{x2} 之间或 $-\theta_{x1}$ 与 $-\theta_{x2}$ 之间的光线,会在光棒内 lp_{xu} 面或 lp_{xd} 面各反射两次,分别相当于虚光源 S_{-2} 或 S_2 直接出射的光线(上端虚光源可根据对称性原理确定,限于空间,并没有在图 1(b)中标出).

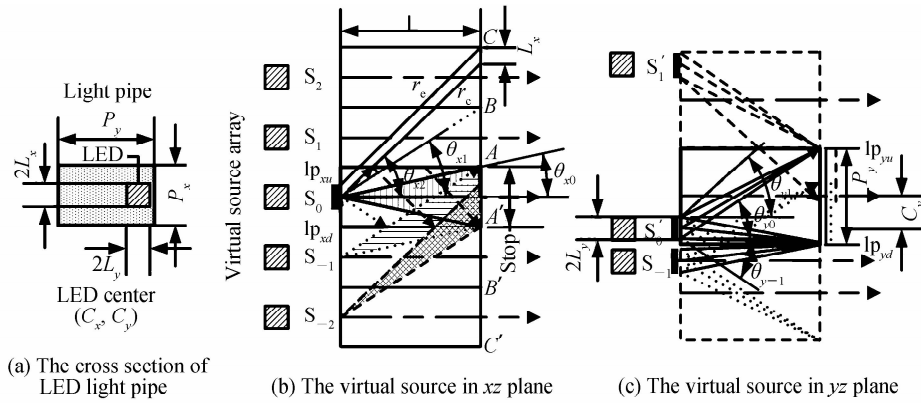


图 1 LED+光棒在 xz 同 yz 平面虚光斑形成原理

Fig. 1 The virtual sources formed by LED+light pipe in xz and yz planes

同样地,图 1(c)中 yz 平面考虑了 LED 尺寸大小 L_y 及其偏置量 C_y ,其图示过程较复杂,根据需要,仅给出了经光棒 lp_{yu} 面或 lp_{yd} 面各反射一次虚光源的形成原理,其中角度界限用带箭头不同线型表示,其角度分割表示为

$$\begin{cases} \theta_{y0} = \arctan\left(\frac{0.5P_y - C_y + L_y}{L}\right) \\ \theta_{y1} = \arctan\left(\frac{1.5P_y - C_y - L_y}{L}\right) \\ -\theta_{y-1} = \arctan\left(\frac{1.5P_y + C_y - L_y}{L}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, θ_{y0} 表示由真实 LED 光源在 yz 平面光棒出射端 AA' 直接出射光束的最大角度,产生实光源 S_0' . 另外两个虚光源,在考虑了 LED 的尺寸以及偏置后,希望 LED 最边缘的光线不会在光棒的 lp_{yu} 面或 lp_{yd} 面发生二次反射,而只产生虚光源 S_1' 或 S_{-1}' . 其中 θ_{y1} 表示由真实 LED 光源上端经光棒 lp_{yu} 反射一次后在光棒出射端的最大出射角度. $-\theta_{y-1}$ 表示由真实 LED 光源下端经光棒 lp_{yd} 面反射一次以后在光棒出射端的最大出射角度. 当 LED 光源在 y 方向的偏置量 $C_y = 0$ 时,式(3)与式(2)一致.

从图 1(c)可以发现,当 LED 光源相对光棒偏置的时候,即使虚光源角度满足了角度限制条件,由于光束对称性原理,通过反射到光棒出射端的光束仍会存在比较严重的渐晕. 图 1(c)中在光棒出射端 AA' 用不同线型表示了不同位置虚光源的光束尺寸范围.

如果希望在 LED 尺寸 $2L_x \times 2L_y$ 范围内最大发散角 $\phi_{LED} \sim -\phi_{LED}$ 内的光线至少在 xz 与 yz 平面全部被利用,对 xz 与 yz 平面的限制条件为

$$\phi_{LP} \leq \theta_{x2} = \arctan\left(\frac{2.5P_x - L_x}{L}\right) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \phi_{LP} \leq \theta_{y0} = \arctan\left(\frac{0.5P_y - C_y + L_y}{L}\right) \\ \phi_{LP} \leq \theta_{y1} = \arctan\left(\frac{1.5P_y - C_y - L_y}{L}\right) \\ \phi_{LP} \leq -\theta_{y-1} = \arctan\left(\frac{1.5P_y + C_y - L_y}{L}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)与(5)中, ϕ_{LP} 为 LED 最大发散角在光棒中的角度. 根据折射定理,有 $\phi_{LP} = \arcsin[\sin(\phi_{LED})/n]$.

至此不难得出 xz 与 yz 平面在 LED 尺寸为 $2L_x \times 2L_y$, 偏心为 (C_x, C_y) 情况下, LED 发散角内 $\phi_{LED} \sim -\phi_{LED}$ 内光线完全出射利用的计算步骤为:

- 1) 根据式(1)第一行公式确定中继系统的放大倍率 M ;
- 2) 根据式(1)第二行公式确定光棒的出射面尺寸 $P_x \times P_y$;
- 3) 根据市场可提供的 LED 型号, 确定 LED 的尺寸 $2L_x \times 2L_y$, LED 相对光棒的位置 (C_x, C_y) 可根据需要自行确定, 但要注意符号;
- 4) 根据式(4)和(5)以及图 1 确定 xz 与 yz 平面轴上虚光源最大发散角 θ_{x2} , θ_{y1} 和 θ_{y-1} , 确保 LED 尺寸范围内发出的光在 xz 与 yz 平面规定的光斑数下完全在光棒出射端 AA' 区间出射即可确定光棒的长度 L .

如果光棒偏心量 C_y 不等于 0, 一定有渐晕发生, 渐晕的发生情况如图 1(c). 光棒的尺寸全部确定以后就可以设计光棒中继系统及 PCS.

镜像法的实质是来自光源的光线经过镜面反射后, 在几何上等价于一条由光源的虚像所直接发出的光线. 光线经光棒上下表面多次全反射后会产生一维线性光源反射像, 而光线在光棒四个内表面上多次全反射将会产生一个二维的虚光源阵列^[6-7]. 通过对 LED 尺寸以及 LED 的偏置位置、光棒的尺寸以及材料进行选择, 在光棒入射端附近可以得到一个按特定规律分布的二维虚光源阵列. 图 2 所示为 LED 相对光棒偏心的情况下 5×3 共 15 个虚光源阵列位置分布.

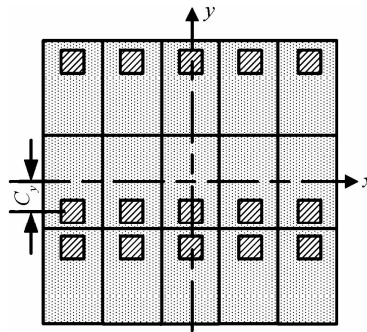


图 2 偏置 LED 经光棒形成的虚光源阵列

Fig. 2 Virtual source array formed by bias LED and light pipe

为验证理论研究, 利用光学成像软件模拟了光棒的虚像形成原理. 假定 LED 端面有效发光尺寸为 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$, 考虑到要求 LED 在 $\pm 75^\circ$ 以内的光线形成要求的 5×3 光斑, 光棒选用 SF4 材料, 其折射率为 1.761 66, 得到 LED 在光棒内的最大发散角为 33.3° . 根据 LCoS 的尺寸 $3.84 \text{ mm} \times 6.4 \text{ mm}$ 以及可以接收的光线角度为 $\pm 18^\circ$, 计算得到整个中继系统放大倍率约在 4 倍左右, 由式(1)得出光棒端面尺寸为 $1.3 \text{ mm} \times 2.2 \text{ mm}$. 根据式(4)和式(5)计算得到光棒长度为 4.18 mm, 取整为 4.2 mm.

图 3 给出了 LED+光棒的虚光源形成机制, 其光线结构验证了理论推导. 图 3(a)中, xz 平面 S_2 光斑同 S_{-2} 光斑均不存在渐晕. 图 3(b)中, yz 平面 LED 上端或下端经光棒上下两个表面反射形成的 S'_1 或 S'_{-1} 虚光源也不存在渐晕, 但 LED 下端或上端光线, 经光棒的上或下表面反射形成的虚光源却存在渐晕. 这是由于 LED 尺寸引发的两个平面上下端都只能满足一个平面不存在渐晕的原因.

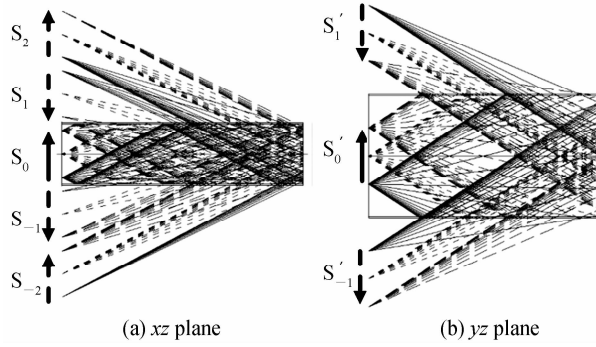


图 3 无偏置 LED 在 xz 与 yz 平面形成虚光源

Fig. 3 The no biased LED formed virtual image in xz and yz planes

为进一步验证 LED 偏置情况下光棒对 LED 的角度分割情况,利用成像光学软件模拟了偏置 LED 情况.其他参数同图 3,LED 完全偏置为 $C_y = -0.55 \text{ mm}$,LED 端面有效发光尺寸为 $1.2 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ (比光棒尺寸稍微小一点).在 LED 完全偏置情况,仅考虑 yz 平面偏置端 LED 可以通过光棒形成镜像即可,由于 LED 离光棒表面比较远,只有其上端少量的光线经光棒上表面反射,于是只需要考虑式(5)中的第一个条件与第三个条件即可.根据式(4)和(5)计算得到光棒长度为 3.35 mm ,取整为 3.4 mm .该尺寸即可以保证光能利用最大化.偏置 LED 虚像光束形成分布如图 4.

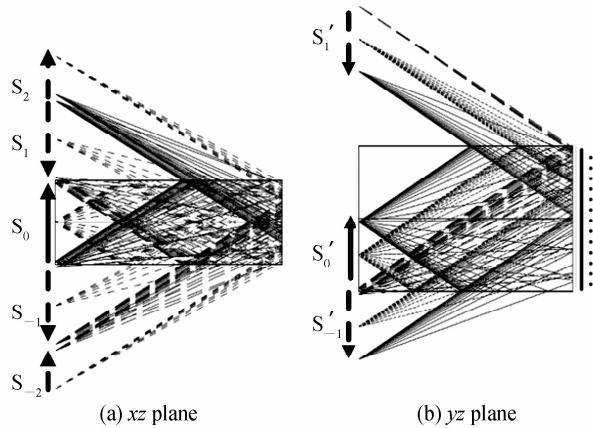


图 4 LED 偏置情况下 xz 与 yz 平面的虚光源

Fig. 4 The biased LED formed virtual image in the xz and yz planes

从图 4(a)发现,光棒缩短后, xz 平面基本上只有 3 个虚光斑,但由于光棒长度往上取整,其延长部分没有满足设计要求,在最外围会有微量的第 2 次反射现象存在.从图 4(b)可以发现,直接出射的光线(实线)形成光束叠加区;经光棒下端反射的光,由于存在一定程度的渐晕,上端光会有部分缺失但不多(点线);而经光棒上表面反射的光,渐晕程度要严重(划线).这一结论与图 1(c)完全一致.

1.2 光棒虚光源阵列的中继及其偏振利用

光棒中继系统 yz 平面原理如图 5.图 5 中 LED 经光棒(LP)形成虚光源(Virtual Source Array, VSA)+前端成像透镜 L_1 +PCS+后端积分透镜 L_2 +PBS.位于光棒前端加粗小线段 S'_1, S'_0, S'_{-1} 表示光棒入射端面的 VSA 或 LED.分离的 LED VSA 经前端成像透镜 L_1 形成 VSA 中间实像(VSA Image),该实像也为分离的阵列.在光棒的 y 方向,由于光棒尺寸 P_y 相对 LED 光源尺寸 L_y 较大,实像分离得比较开.

类似于复眼偏振复用原理,如果在实像分离得比较开的位置考虑加入 PCS(在成像光学模拟时可以用平板玻璃代替),将 VSA 的中间像自然光转变为同一偏振态的线偏振光,后端积分透镜 L_2 再将中间像 VSA 像成像到无穷远,最后在 LCoS 芯片上交叉形成均匀照明.

前端成像透镜 L_1 与后端积分透镜 L_2 组合的整体,将光棒出射端面以一定的比例放大成像于 LCoS 面上.由于光棒自身具有很好的匀光特性,因此在光棒出射端将会获得均匀的照度分布,进而在 LCoS 显示芯片上得到均匀的照明.

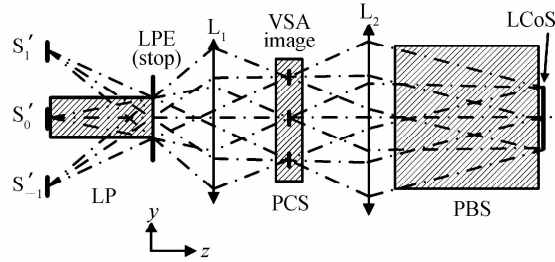


图 5 基于光棒偏振复用原理
Fig. 5 Schematic of the light-pipe based polarization recovery system

2 设计实例

2.1 LED 尺寸相对光棒尺比较小时的 PCS 设计

表 1 给出了 CF-LCoS 的参数,表 2 给出了根据表 1 的参数以及理论计算的光棒参数.

对 LED 和光棒尺寸均比较小的情况,根据 LED 的发光特性曲线,LED 端面尺寸 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$,要求 LED 发光角度在 $\pm 75^\circ$ 以内的光线形成 5×3 光斑,光棒选用 SF4 材料,其折射率为 1.761 66,得到 LED 在光棒内的最大发散角为 33.3° .根据 CF-LCoS 的尺寸以及可以接收的角度 $\pm 18^\circ$,计算得到光棒端面尺寸为 $1.3\text{ mm} \times 2.2\text{ mm}$.在 5×3 光斑时根据式(4)与(5)计算得到 xz 与 yz 平面光棒长度为 4.57 mm ,取整为 4.6 mm .

表 1 设计使用的 CF-LCoS 参数

Table 1 CF-LCoS specification

Item	Size/diagonal	Resolution	Pixel size	Width/length	Reflectivity	Display mode
Parameter	$0.29''$	800×480	$8\ \mu\text{m} \times 8\ \mu\text{m}$	$6.4\text{ mm} / 3.84\text{ mm}$	24%	CF-LCoS

表 2 LED 同光棒参数计算

Table 2 Parameters of LED and light pipe

Item	ϕ_{LED}	ϕ_{LCoS}	S_x/S_y	M	P_x/P_y	θ_{x2} and θ_{y1}	$2L_x \times 2L_y$	L
Parameter	75°	18°	$3.84\text{ mm} / 6.4\text{ mm}$ (3 : 5)	3.4	$1.3\text{ mm} / 2.2\text{ mm}$ (3 : 5)	33.3°	$0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$	4.6 mm

图 6 仅给出了光棒中间像以及根据中间像的分布设计的 PCS. CF-LCoS 面的照明则如图 7.

由图 6 发现,光棒形成的中间像光斑,与复眼光斑相比差别还是比较大.由于光棒前端成像系统是大视场系统,像面存在严重弯曲.同时,由于存在一定的渐晕,各个光斑的强度也不一样.所以必须根据该光斑的分布,合理设计 PCS 的尺寸才可以实现高效偏振复用.另一方面,由于光斑数对称并且足够多,所以图 7 显示的 LCoS 面均匀性还是得到了一定程度的保证.

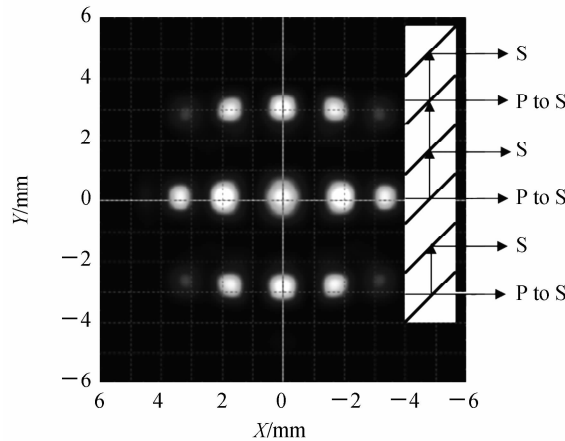


图 6 LED+光棒形成经前端成像透镜形成中间像及其 PCS
Fig. 6 The intermediate image formed by LED+light pipe with the front imaging lens and PCS

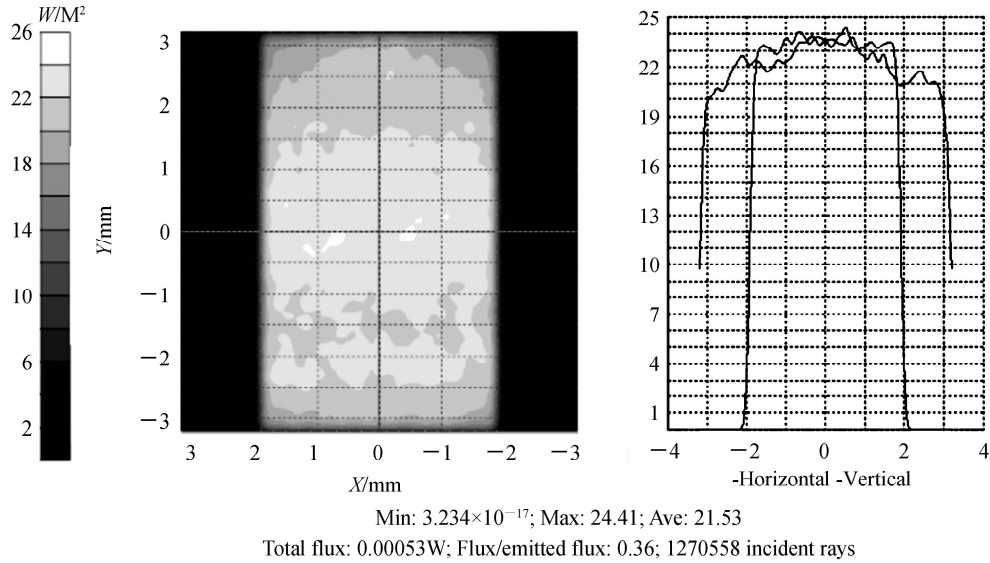


图 7 CF-LCoS 面的照度分布图
Fig. 7 The irradiance map on the CF-LCoS plane

2.2 偏置 LED 尺寸为光棒尺寸一半 PCS 设计

根据表 1 中 CF-LCoS 的尺寸以及可以接收光束角度,假定 LED 端面有效发光尺寸 $1.1 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$,其中 LED 在 y 方向尺寸刚好为光棒 y 方向尺寸的一半(小于一半也可以).光棒仍然选用折射率为 1.76166 的 SF4 材料.LED 完全放置在光棒下半部分,则仅考虑 yz 平面靠近光棒底部的 LED 通过光棒形成镜像即可.光棒上端只有很少的 LED 上半部分光线经光棒上表面反射,因此只需要考虑式(5)中的第一个条件与第三个条件即可.根据式(4)与(5)计算得到 xz 与 yz 平面光棒长度为 3.35 mm,取整为 3.4 mm.根据该尺寸即可以保证光能利用最大化.这时虚光源中间实像分布如图 8.

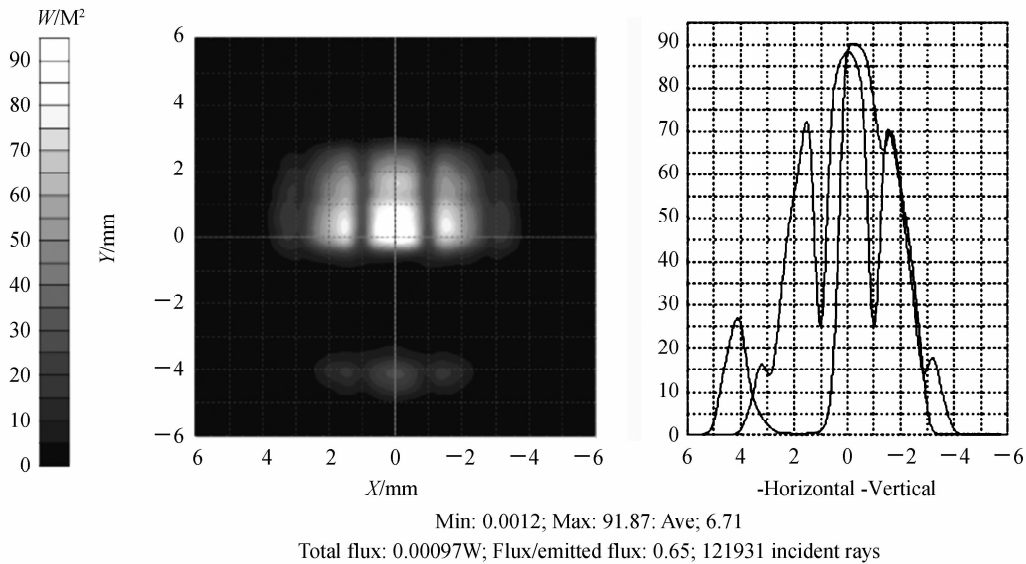


图 8 LED 尺寸为光棒 1/2,LED 在 yz 平面有偏置时 LED 经光棒+前端中继透镜成像
Fig. 8 The intermediate image formed by biased LED and front image lens in the yz plane

图 8 显示的中间像主要是 LED 光源经光棒下表面反射形成的镜像,由于 LED 偏离光棒上表面相当远,大部分经上表面反射的光都直接从光棒出射,其强度几乎可以忽略不计.很显然,由于光棒分割 LED 发散光束的分割数不多,所以在 CF-LCoS 面形成的照明并不均匀,即使在中间像面加入 PCS,将另一半偏振方向的光转到下半部,再通过积分透镜将上下偏振方向一样的光进行积分,其均匀性仍然不能满足投影系统的均匀性要求.

因此,在其他参数不变的情况下,在 LED 与光棒之间插入 PBS,先进行偏振复用,然后再将该 PBS 与光

棒耦合,则照明均匀性会完全不一样.图9给出了系统原理.

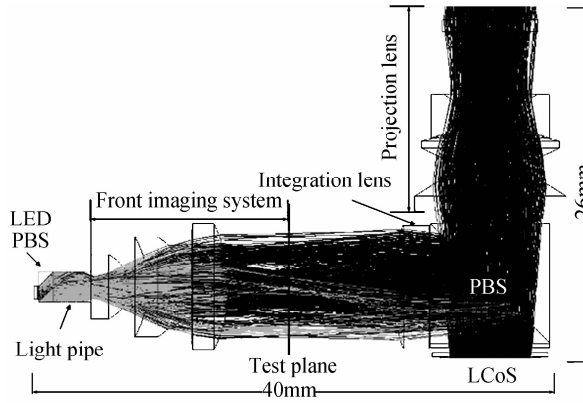


图9 偏置LED+PBS+光棒系统模拟图
Fig. 9 The biased LED+PBS+ lightpipe system

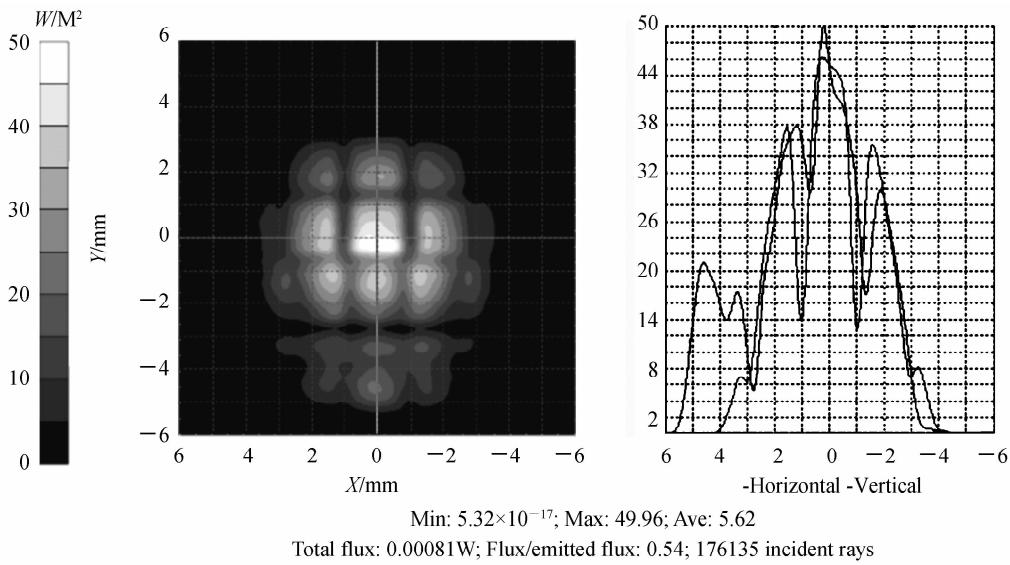


图10 偏置LED,PBS+光棒耦合结构中间像面光斑分布
Fig. 10 The intermediate image formed with biased LED, PBS, light pipe and imaging lens

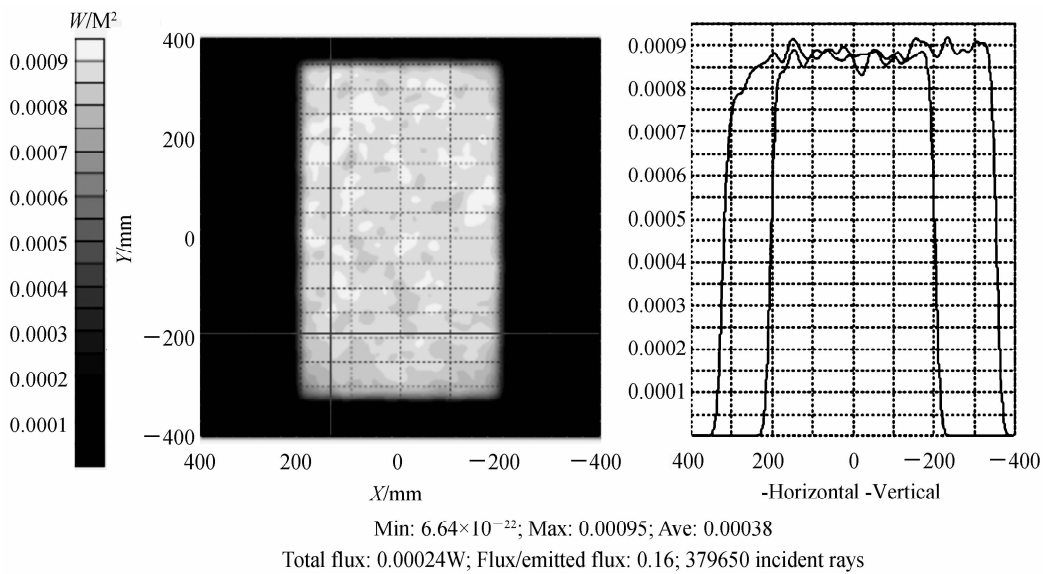


图11 偏置LED,PBS+光棒耦合情况最终投影像面的光强分布
Fig. 11 The final screen irradiance map with the biased LED, PBS and the light pipe

LED+PBS 经过光棒后,通过前端成像系统(Front Imaging System),积分透镜(Integration Lens),PBS,再经过 LCoS 反射,其 P 偏振光穿过 PBS,将 P 偏振光经过投影物镜(Projection Lens)投影到像面.图 10 给出了这种情况下的中间像(Test Plane),该中间像分布并不对称,图 11 给出的 LCoS 上的照明分布看起来均匀,但是其照度从上到下慢慢下降.但从图 11 可以发现,系统的均匀性较好,完全满足 LCoS 微型投影系统的要求.

2.3 LED 尺寸充满整个光棒的照明系统

LED 充满整个光棒的情况比较简单,这时 LED 一定是对称放置.根据表 1 中 CF-LCoS 尺寸及其可以接收的角度,LED 端面有效发光尺寸假定与光棒端面尺寸一样为 $1.3\text{ mm}\times 2.2\text{ mm}$,其他参数不变.在 5×3 的光斑情况下,根据式(4)与式(5)计算得到 xz 与 yz 平面光棒长度为 3.35 mm ,取整为 3.4 mm .该尺寸即可以保证光能利用最大化.除了不能再用 PCS 以外(中间像已完全充满),这种情况效果较好.这里限于篇幅,不再列出模拟分析结果.

2.4 LED 无偏心光棒偏振利用微型投影系统设计

设计了一款 CF-LCoS 微型投影光引擎.显示芯片对角线尺寸为 $0.29''$,分辨率为 800×480 ,LED 功率为 1 W ,光通量为 150 lm .CF-LCoS 的参数仍然见表 1,根据理论计算的光棒参数见表 3,LED 的尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$.

表 3 参数中,光棒截面尺寸稍微放大了一点,为 $1.3\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$,一方面是考虑到光棒加工边缘缺陷问题,另一方面是考虑了 LCoS 照明留边问题.

表 3 LED 同光棒参数计算
Table 3 Parameters of LED and light pipe

Item	ϕ_{LED}	ϕ_{LCoS}	S_x/S_y	M	P_x/P_y	θ_{x2} and θ_{y1}	$2L_x\times 2L_y$	L
Parameter	75°	18°	$3.84\text{ mm}/6.4\text{ mm}$ (3:5)	3.4	$1.3\text{ mm}/2.4\text{ mm}$ (3:5)	33.3°	$1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$	4.6 mm

根据表 3 的参数可直接用光学成像软件对 LED 经光棒+前端成像+PCS+后端积分+PBS 进行综合优化.其中,光棒模型利用非序列表面构建.图 12 给出了光棒照明系统在 xz 与 yz 平面经软件优化设计的最终成像结构.

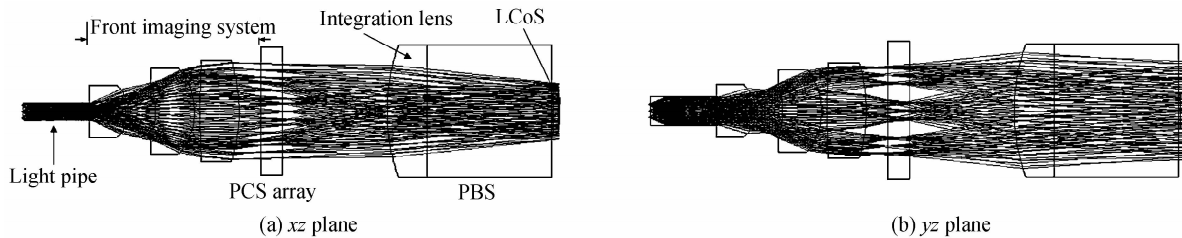


图 12 LED+光棒+PCS+PBS 在 xz 同 yz 平面中继成像过程
Fig. 12 LED+light pipe+PCS+PBS relay optics system in the xz and yz planes

从图 12(a)可以发现,由于 LED 的尺寸同光棒在 x 方向尺寸比较接近,所以 xz 平面中间像面上的像基本上靠在一起,但 LED 的尺寸与光棒在 y 方向尺寸相差比较大,比例达到 $2:1$,所以,中间像分开的间隔也达到同样的比例.将光学系统输入到非成像光学软件中进行光线追迹,得到的中间像面光强分布如图 13.

从图 13 发现,该中间像光斑之间存在一定的空间,在这一中间像面加入 PCS 阵列,可以在较小扩大光束口径的情况下,实现光棒偏振复用.图 13 的右边给出了根据这一中间像设计的特殊 PCS 阵列.由于中间一行虚光源实像尺寸比较大,如果采用传统的 PCS 阵列,会有很大一部分光线同 PCS 阵列相邻的单元交错,导致系统效率下降.这一现象可以通过优化,使得虚光源实像中间一行较好会聚,再利用传统 PCS 实现偏振复用.这里采用对称结构,设计了新的反向对称 PCS 阵列,实现偏振复用.其优点是上下两端对称,光效率增加,系统均匀性也提高.但另一方面,如果尺寸太小,会增加 PCS 阵列加工的难度.但对大型 LCD 投影系统,则不存在这类问题.

将该 PCS 加入到虚光源中间像面位置附近,再进行光线追迹.最终非成像光学模拟结果如图 14.

从图 14 发现,整个系统与图 9 并没有太大区别,只是 LED 在光棒中心,PCS 的引入与常规有所区别.PCS 两端光线分别经上下端的反 S 光棱镜,有一部分光线打到了 CF-LCoS 外面,所以显得稀少,这一现象可

通过改变上下端反射面的角度进行微调实现 LED 光束的高效利用.

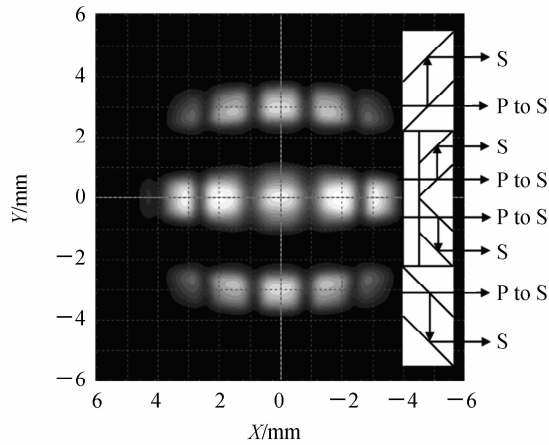


图 13 LED+光棒经前端透镜成像形成中间像以对应的 PCS
Fig. 13 The intermediate image formed by LED+light pipe with the front imaging lens and its PCS

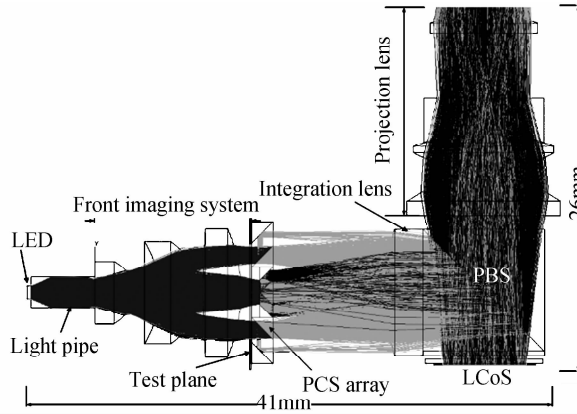
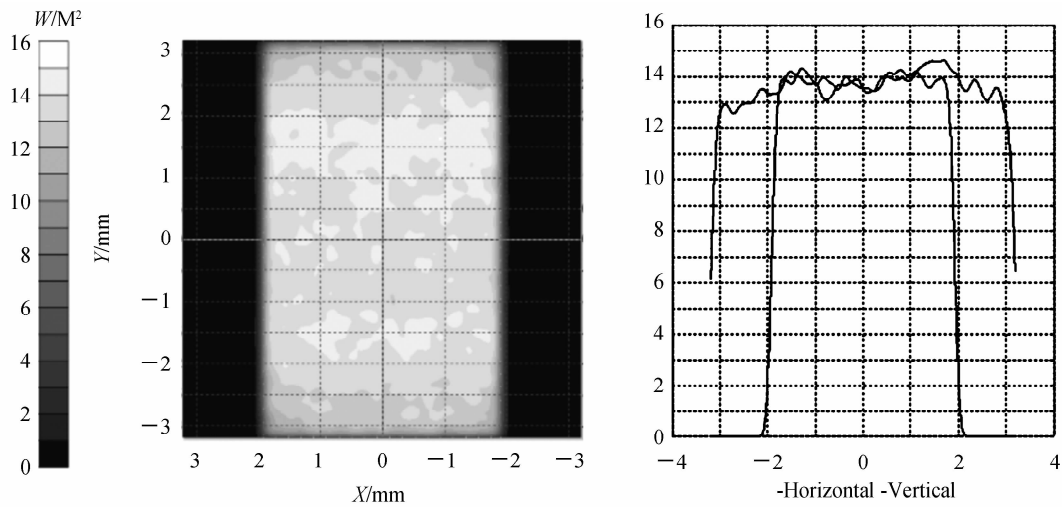


图 14 LCoS 微型投影照明与投影光学系统
Fig. 14 The illumination and projection system of CF-LCoS projector

图 15 给出 CF-LCoS 面的照度分布,为了提高系统整体效率,照明 CF-LCoS 光斑尺寸等于光棒后端尺寸与中继系统放大倍率 M 乘积,这里的 M 选择得比较靠近理论值,导致边缘照度稍微有一点下降.



Min: 1.03×10^{-17} ; Max: 15.01; Ave: 13.38
Total flux: 0.00033W; Flux/emitted flux: 0.22; 1171003 incident rays

图 15 LCoS 面的照度分布图
Fig. 15 The irradiance map on the CF-LCoS plane

图 16 给出了入射到 LCoS 边框外未被利用的光照度分布. 从图 16 发现,系统外围分布留有的余量足够 LCoS 位置的调整.

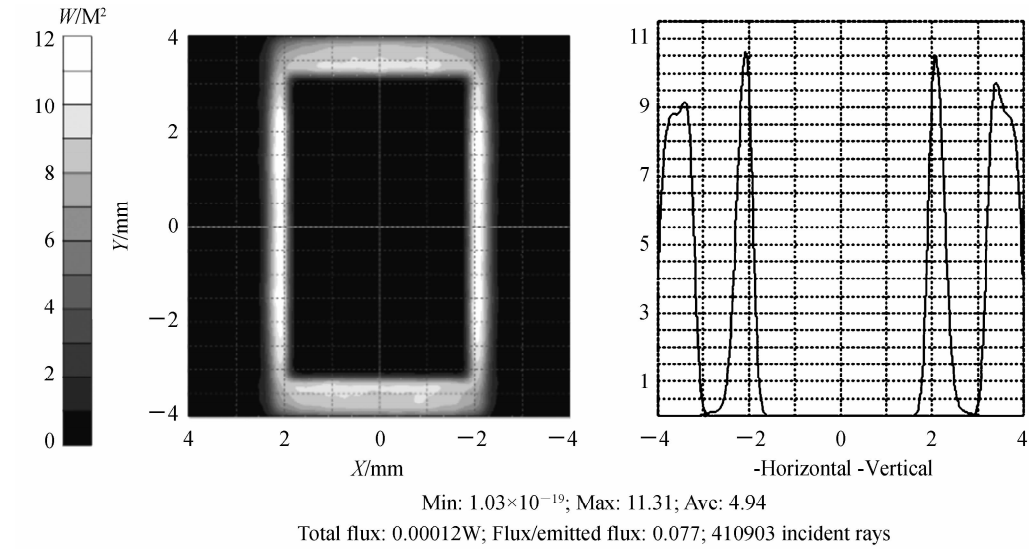


图 16 LCoS 功能区外的光强分布图
Fig. 16 The irradiance map outside of the CF-LCoS plane

图 14 中照明系统到达 CF-LCoS 的照明光束经过 CF-LCoS 调制反射后再经过 PBS 和投影物镜投射到 0.5 m 投影物距的 12”投影屏幕上,其仿真照度分布如图 17. 约 66% 的 LED 光强最终到达 CF-LCoS,从 CF-LCoS 到屏幕的过程中仅有 4% 的光能量损失. 屏幕上的照度从中心到边缘连续光滑缓慢地变化. 如果以 ANSI^[17]方法中 1~9 点照度的最小值除以这 9 点照度的平均值来计算微型投影光引擎的均匀性,则屏幕上均匀性指标为 93%,对 150 lm/W 的 LED,其流明数可以达到 17,对 200 lm/W 的 LED,其流明数可以达到 22. 整个系统的光效率见表 4. 表 4 最后一行给出了文献[8]、[14]、[15]中系统的光效率比较,文献[8]、[14]与本文一样,都考虑了光棒的偏振复用,所以与本文的差别不大;文献[15]只是利用透镜的横向放大及角度缩小原理实现光棒与 CF-LCoS 的匹配,并没有考虑偏振复用,所以效率与普通的光棒系统并无区别. 这四种系统都采用了 CF-LCoS,也说明了光棒偏振复用思想,特别是 PCS 阵列的设计可以相当灵活,但 PCS 设计一定是通过成像光学与非成像光学,在确定中间像以后,再确定 PCS 阵列的具体结构. 这是本文的关键所在.

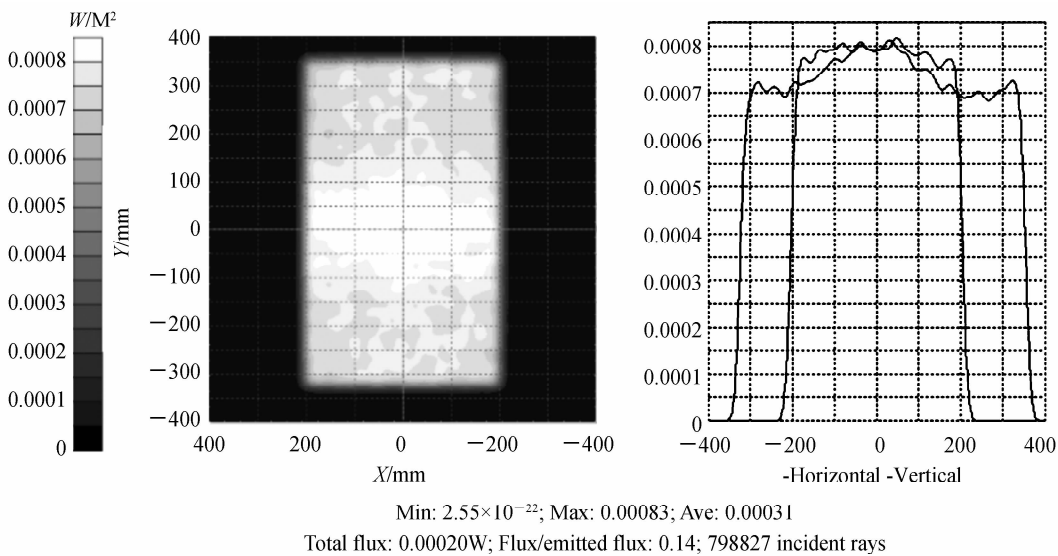


图 17 光棒 PCS 投影系统最终屏幕面照度分布图
Fig. 17 The final screen irradiance map with the light pipe PCS projection system

表 4 CF-LCoS 投影系统光效率分解

Table 4 The optical efficiency of the CF-LCoS projection system

Item	Value	Notes
Collection efficiency	66%	Simulation with perfect model
CF-LCoS reflectivity	24%	CF-LCoS
Anti-reflective coating	89%	0.5% average reflectivity for each AR-coated surface
PCS efficiency	91.5%	PCS array
PBS efficiency	87%	F/1.9 PBS
Total efficiency of proposed system	11.3%	16.9lm@1w
Total efficiency in Refs. [8,14,15]		9.3% ^[8] , 10% ^[14] , 5.28% ^[15]

从本节的研究发现,相对于复眼偏振复用,光棒偏振复用的特点有:1)对 LED 特别适用,不需要准直;2)从加工性能上来看,光棒相对比较简单,用一块普通棱镜即可;3)从光斑特点来看,光棒的中间光斑由虚光源经过透镜成实像,属于大角度系统,光斑存在严重的像面弯曲,其尺寸差别也比较大;另外当 LED 相对光棒中心存在偏置时,光斑分布多样化,PCS 的设计可以根据光斑的分布进行灵活设计,而复眼光斑大小相差不大、位置分布均匀,其 PCS 比较常规;4)复眼同光棒的积分系统原理一样,但由于光棒的中间像存在像面弯曲,所以积分重叠效果在加入 PCS 以后,会有所不同,如果不引入 PCS,则区别不大;5)如果考虑 LED 准直,复眼偏振复用系统尺寸并没有太大的优势,光棒偏振复用其 LED 不需要准直,比较紧凑,但中间成像+积分系统尺寸稍微偏大一点。

3 结论

本文针对偏置 LED 照明光棒以后光棒的角度分割原理以及虚光源形成机制进行了扩展研究,给出多个设计实例,验证光棒偏振复用的可能性与多样性。最后将该偏光复用方法成功地应用于 CF-LCoS 微型投影光引擎,使得光引擎的光效率与均匀性在未增加光学系统尺寸的情况下较其他 CF-LCoS 微型投影光引擎有了较大的提高,但其结构却要利用自由曲面+复眼照明系统要简单得多^[16]。随着 LED 技术进一步发展,光棒偏振复用方法在 CF-LCoS 微型投影光引擎中会获得更高的光能效率与均匀性,得到更加广泛的应用。

参考文献

- [1] YU Fei-hong, KWOK Hoi-sin. Comparison of extended Jones matrices for twisted nematic liquid-crystal displays at oblique angles of incidence[J]. *Journal of Optical Society of America*, 1999, **16**(11): 2272-2280.
- [2] BLEHA W P, ALICE L J. Advances in liquid crystal on silicon spatial light modulator technology[C]. SPIE, 2013, **8736**: 87360A.
- [3] STUPP EH, BRENNESHOLTZMS. Projection displays[M]. Wiley, 1998: 135.
- [4] SHUI Ci-feng, YIN Shao-yun, Liu Xian-ming, et al. Homogenized white light beam generated by red, green and blue lasers based on double fly-eye lens[J]. *Optical Acta Sinica*, 2016, **36**(3): 0314002.
帅词凤,尹韶云,刘显明,等.基于双复眼透镜的三色基色激光合成均匀白光束[J]. *光学学报*, 2016, **36**(3): 0314002.
- [5] LIU Qing-xiao, ZHANG Wen-zi, GAO Hui-fang, et al. A new multiplexing method for the micro CF-LCoS projector optical system[C]. SPIE, 2009, **7506**: 75061A.
- [6] YIP WC, HUANG HC, KWOK HS. Efficient polarization converter for projection displays[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(25): 6453-6457.
- [7] DUELLI M, MCGETTIGAN T, PENTICO C. Integrator rod with polarization recycling functionality [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2002, **33**(1): 1078-1080.
- [8] ZHANG Wen-zi, QU Bi-xiang, YU Fei-hong. Polarization recovery method for CF-LCoS pico projection[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(9): 093001-093007.
- [9] YU XJ, HO YL, TAN L, HUANG HC, et al. LED-based projection systems[J]. *Journal of Display Technology*, 2007, **3**(3): 295-303.
- [10] CHEN En-guo, LIU Peng, YU Fei-hong. Optical design of single plano-convex freeform lens-based illumination system for color filter liquid crystal on silicon pico projectors[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(3): 0330021-0330029.
- [11] CHEN En-guo, YU Fei-hong. Optimization design of single freeform lens based illumination system for CF-LCoS handheld pico-projectors[J]. *Optik*, 2013, **124**(14): 1912-1916.
- [12] CHEN En-guo, LIU Peng, YU Fei-hong. Synchronized parameter optimization of the double freeform lenses illumination system used for the CF-LCoS pico-projectors[J]. *Optics and Laser Technology*, 2012, **44**(7): 2080-2087.

- [13] CHEN En-guo, YU Fei-hong. Design of an elliptic spot illumination system in LED-based color filter-liquid-crystal-on-silicon pico projectors for mobile embedded projection[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(16), 3162-3170.
- [14] ZHANG Qian, LIU Zhen-jie, ZHANG Wen-zi, *et al.* Polarization recycling method for light-pipebased optical engine [J]. *Applied Optics*, 2013, **12**(17):8827-8823.
- [15] ZHANG Wen-zi, YU Fei-hong, ZHOU Jian-jun, *et al.* The compact optical engine for CF-LCoS; China, 200920306053. 0[P]. 2010-07-13.
张文字,余飞鸿,周建军,等. 基于微显示芯片的紧凑型光学引擎系统:中国,200920306053. 0[P]. 2010-07-13.
- [16] PENGW J, CHEN CC, HUANG CY, *et al.* Freeform mirror for illumination system of color-sequential LCOS pico projector[C]. SPIE, 2014,**9193**: 930-939.
- [17] ANSI, International standard; Electronic projection-fixed resolution projectors, Geneva, Switzerland; IEC. , No. IT7. 228 (1997).