

采用衍射掩模产生白光横向平顶光束

陈芳萍 张晓婷 刘楚嘉 漆宇 庄其仁

Horizontal white light flat-topped beams produced by the diffraction mask

Chen Fang-Ping Zhang Xiao-Ting Liu Chu-Jia Qi Yu Zhuang Qi-Ren

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 144202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180030

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180030>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I14>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于最优化线性波数光谱仪的谱域光学相干层析成像系统](#)

Optimized linear wavenumber spectrometer based spectral-domain optical coherence tomography system

物理学报.2018, 67(10): 104208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172606>

[基于位相变更的非相干数字全息自适应成像](#)

Adaptive imaging by incoherent digital holography based on phase change

物理学报.2018, 67(4): 044202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.044202>

[对称照明在傅里叶叠层成像中的应用](#)

Symmetric illumination in Fourier ptychography

物理学报.2017, 66(22): 224201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.224201>

[面阵探测下的污染云团红外光谱仿真](#)

Simulation of pollutant-gas-cloud infrared spectra under plane-array detecting

物理学报.2017, 66(11): 114203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.114203>

[基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则](#)

An evaluation criterion of infrared image complexity based on background optimal filter scale

物理学报.2015, 64(23): 234202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234202>

采用衍射掩模产生白光横向平顶光束^{*}陈芳萍 张晓婷 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, 厦门 361021)

(2018年1月4日收到; 2018年3月21日收到修改稿)

白光横向平顶光束在定向背光式自由立体显示器中有重要应用. 本文提出一种采用带蝶形小孔阵列的衍射掩模片获得白光横向平顶光束的方法. 根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和多波长叠加原理, 推导出光强分布计算式. 设计一套实验装置, 数值模拟并实验验证出射光束在不同距离的横向光强分布以及小孔蝶形凹度(蝶形中心高度与边长的比值)对横向光强分布的影响. 结果表明: 当选择小孔蝶形凹度为0.50—0.66时, 可以得到平顶因子 $F \geq 0.89$ 的白光横向平顶光束, 横向平顶光束的宽度随着传输距离的增大而增大, 而平顶因子基本不变. 实验还发现柱面透镜的折射色散和衍射色散可以互相抵消, 使白光横向平顶光束基本无色散.

关键词: 白光横向平顶光束, 衍射掩模, 惠更斯-菲涅耳衍射积分, 柱面透镜

PACS: 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.67.20180030

1 引言

在自由立体显示技术中, 基于时间复用技术的定向背光自由立体显示能实现全分辨率、低串扰立体显示^[1-6], 是自由立体显示技术的一个重要发展方向. 但传统定向背光白光光束的空间强度分布呈高斯分布, 导致观看区域亮度分布不均匀, 严重影响视觉舒适度, 因此需要将定向背光白光光束整形为横向平顶光束^[7]. 在现有的平顶光束研究与应用中, 主要是针对激光光束的整形. 激光光束整形方法有光阑拦截法^[8]、相位型光束整形法^[9]、微透镜阵列整形法^[10]、二元光学元件衍射法^[11]、液晶空间光调制器法^[12]、离焦望远镜系统合成法^[13]、超高斯反射镜腔^[14]和非球面透镜组法^[15]等. 由于液晶显示器(LCD)背光源为白光面光源, 与激光光源完全不同, 因此这些用于激光高斯光束整形的方法不能直接用于定向背光白光光束整形. 近年来, 光束整形文献的研究兴趣集中在用光束合成的方法来产生和模拟平顶光束, 相继提出了用偏心高斯光束叠加、多束高斯光束叠加和复宗量拉盖尔-高

斯光束叠加等^[16-18]模拟平顶光束的新方法. 本文基于衍射积分和多波长叠加原理, 提出采用带蝶形小孔阵列的衍射掩模片获得白光横向平顶光束的新方法.

采用衍射掩模和柱面透镜获得白光横向平顶光束的方法是在LCD背光源表面覆盖一层衍射掩模片, 光场经过柱面透镜变换成为白光横向平顶光束. 根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论分析柱面透镜出射光场的分布特性, 通过数值模拟进行参数优化, 并由实验装置进行验证. 该方法结构简单, 易于实现, 为基于时间复用技术的定向背光自由立体显示提供一种新的白光平顶光束实现途径.

2 理论模型

衍射掩模产生横向平顶光束原理如图1所示. 在LCD背光源的出光面覆盖一个衍射掩模片, 衍射掩模片在竖直方向整齐紧密排列着蝶形小孔, 蝶形小孔结构如图1(b)所示. 蝶形小孔高度和宽度相等, 均为 h . 定义小孔蝶形凹度 β 为中心高度 a 与 h 的比值, 即 $\beta = a/h$. 在衍射掩模片前无间隙放置

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 61178015, 61605049)和福建省科技重大项目(批准号: 2016H6016)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

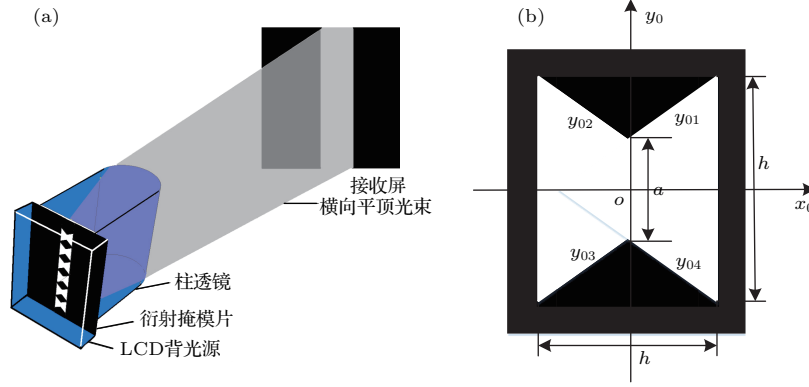


图1 (a) 衍射掩模产生横向平顶光束原理图; (b) 蝶形小孔结构

Fig. 1. (a) Schematic diagram of diffraction mask for generating horizontal flat-topped beams; (b) structural of butterfly-shaped holes.

一个平凸柱面透镜, LCD 背光源均匀光场经衍射掩模和柱面透镜变换为白光横向平顶光束投射到接收屏进行检测。

柱面透镜结构剖面图如图2所示。图中 d_0 为平凸柱面透镜的中心厚度, b 为柱面透镜单元宽度。设 x_1 处平凸柱面透镜的厚度为 $d(x_1)$, 则柱面透镜的透过率函数为

$$t(x_1) = \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [(n-1)d(x_1) + d_0] \right\}, \quad (1)$$

式中 n 为柱面透镜折射率。根据图2的几何关系可知

$$d(x_1) = (d_0 - R) + \sqrt{R^2 - x_1^2}. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式并整理得

$$t(x_1) = \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[nd_0 + (n-1) \left(\sqrt{R^2 - x_1^2} - R \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

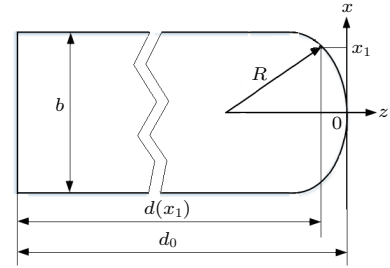


图2 柱面透镜的结构参数

Fig. 2. Structural parameters of the cylindrical lens.

根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分公式, 波长为 λ 的光波在 $z = 0$ 平面的衍射光场可写为

$$u_1(x_1, y_1, \lambda) = \sum_m \iint_{S_m} u_{m0}(x_0, y_0, \lambda) \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[nd_0 + (n-1) \left(\sqrt{R^2 - x_1^2} - R \right) \right] \right\} \\ \times \exp \left\{ - \frac{i\pi}{\lambda d_0} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2] \right\} dx_0 dy_0, \quad (4)$$

式中 m 表示第 m 个蝶形单元, $u_{m0}(x_0, y_0, \lambda)$ 为衍射掩模平面的光场复振幅分布函数, 由于衍射掩模片紧贴 LCD 背光源均匀发光面, 可认为衍射掩模与光源在同一个平面, 衍射掩模起到了改变光源发光面形状的作用, 因此(4)式中面积元 $dx_0 dy_0$ 的积分面积 S_m 为蝶形的两个直边 $x_0 = -h/2$, $x_0 = h/2$ 以及 4 个斜边 y_{01} , y_{02} , y_{03} , y_{04} 围成的面积, 积分限分别为:

$$\begin{cases} y_{m01} = \frac{h-a}{h}x_0 + \frac{a}{2} + mh, & 0 \leq x_0 \leq \frac{h}{2} \\ y_{m02} = -\frac{h-a}{h}x_0 + \frac{a}{2} + mh, & -\frac{h}{2} \leq x_0 \leq 0 \\ y_{m03} = \frac{h-a}{h}x_0 - \frac{a}{2} + mh, & -\frac{h}{2} \leq x_0 \leq 0 \\ y_{m04} = -\frac{h-a}{h}x_0 - \frac{a}{2} + mh, & 0 \leq x_0 \leq \frac{h}{2} \end{cases} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (5)$$

考虑到LCD背光源白光光谱宽度大,柱面透镜材料的折射率不是常数,而是波长的函数 $n = n(\lambda)$,可由Sellmeier色散公式表示为

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3}}, \quad (6)$$

式中 B_1, B_2, B_3 和 C_1, C_2, C_3 为柱面透镜材料系数.将接收屏放置在 $z = z_2$ 处,可得接收屏上的单波长衍射光场为:

$$\begin{aligned} u_2(x_2, y_2, z_2, \lambda) &= \frac{\exp(-i2\pi z_2/\lambda)}{i\lambda z_2} \sum_m \iiint_{S_m} u_{m0}(x_0, y_0, \lambda) \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[n(\lambda)d_0 + (n(\lambda) - 1)(\sqrt{R^2 - x_1^2} - R) \right] \right\} \\ &\times \exp \left[-\frac{i\pi}{\lambda d_0} ((x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2) \right] \exp \left[-\frac{i\pi}{\lambda z_2} ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2) \right] dx_0 dy_0 dx_1 dy_1. \end{aligned} \quad (7)$$

由于LCD背光源为白光光源,不同波长的光为非相干光,所以接收屏上的光强度分布等于各波长衍射光强度的线性叠加^[19].通过测量光源的光谱强度分布,再按一定波长间隔取不同波长 λ_l 代入(7)式计算衍射光强度分布,可得到接收屏上的总光强分布为

$$I_{\text{total}}(x_2, y_2, z_2) = \sum_{l=1}^L c_l I_l(x_2, y_2, z_2, \lambda_l), \quad (8)$$

式中 c_l 为白光光源光谱中 λ_l 的相对强度值.

接收屏上的光强分布横向平顶特性可用平顶因子 F 来衡量^[20],公式为

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{K-1} \frac{I_j + I_{j+1}}{2}}{I_P \cdot K}, \quad (9)$$

其中 I_j 为大于设定阈值的光强, I_P 为峰值光强, K 为光强大于阈值的分割份数,阈值通常取半峰值高度. F 值越大($0 \leq F \leq 1$),白光横向平顶光束的平顶度越好.

3 数值模拟

首先采用光谱仪测量实验所用正白光发光二极管(LED)光源的光谱相对强度,如图3所示.LED白光光谱为连续光谱,数值模拟时将光源光谱按 $\Delta\lambda = 10$ nm波长等间隔取样,由图3曲线数据可得到各波长对应的相对强度值 c_l .

数值模拟采用的基本参数为:蝶形单元宽度 $h = 50$ μm ,小孔蝶形凹度 $\beta = 0.4$;柱面透镜宽度 $b = 1.411$ mm,柱面透镜曲率半径 $R = 2.67$ mm,柱面透镜厚度 $d_0 = 8$ mm(近似等于柱面透镜的焦

距);柱面透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),根据文献^[19]计算得到PMMA的Sellmeier色散公式材料系数见表1;光源波长 λ_l 取值范围400—700 nm,按(8)式进行数值模拟.

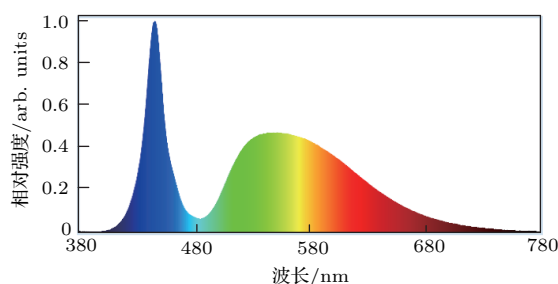


图3 白光LED的光谱相对强度分布曲线

Fig. 3. Relative spectral strength distribution curve of white LED.

表1 PMMA的Sellmeier色散公式材料系数

Table 1. PMMA material coefficient of Sellmeier dispersion formula.

B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
0.25209	0.25209	0.17284	0.00992	0.17284	0.00992

改变接收屏与柱面透镜出射面距离为 $z_2 = 500, 1000, 1500$ mm和2000 mm,数值模拟得到接收屏横向白光光强分布曲线如图4所示.可以看到它们的光强分布曲线形状基本一致,采用(9)式计算平顶因子 F ,结果表明传播距离不改变横向白光光强分布的平顶特性($F \approx 0.89$),如图6(a)示.随着传播距离的增大,平顶光束的横向宽度随着增大.这是由于掩模片的蝶形小孔有一定宽度,因此小孔出射光束经过柱透镜变换后不是理想的横向准直光束,存在一定发散角.对于平顶光束,其半高

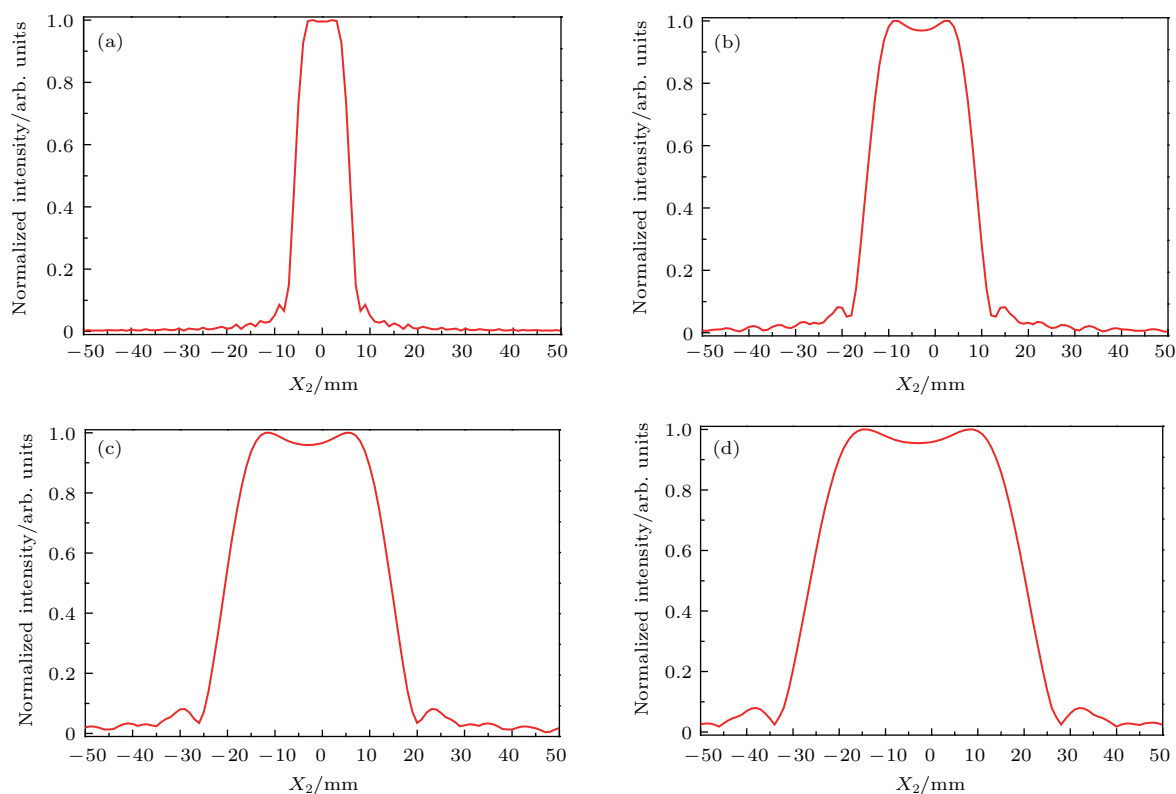


图4 数值模拟得到的接收屏横向白光光强分布曲线随距离 z_2 的变化 (a) $z_2 = 500$ mm; (b) $z_2 = 1000$ mm; (c) $z_2 = 1500$ mm; (d) $z_2 = 2000$ mm.

Fig. 4. Simulated distribution curves of the horizontal white light intensity on the receiving screen vs. the distance z_2 : (a) $z_2 = 500$ mm; (b) $z_2 = 1000$ mm; (c) $z_2 = 1500$ mm; (d) $z_2 = 2000$ mm.

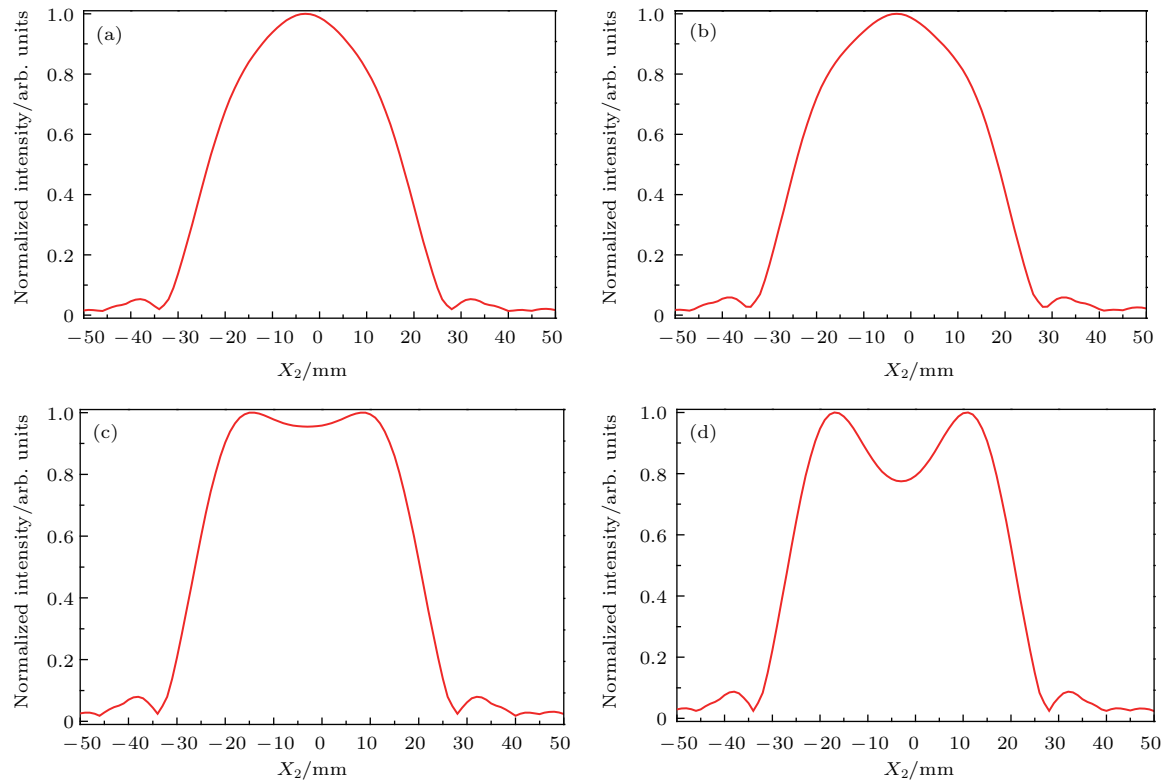


图5 数值模拟得到的横向光强分布曲线随小孔蝶形凹度 β 的变化 (a) $\beta = 1.0$; (b) $\beta = 0.8$; (c) $\beta = 0.6$; (d) $\beta = 0.4$

Fig. 5. Simulated distribution curves of the horizontal light intensity vs. the concavity of butterfly-shaped hole: (a) $\beta = 1.0$; (b) $\beta = 0.8$; (c) $\beta = 0.6$; (d) $\beta = 0.4$.

全宽 (FWHM) 发散角可近似表示为 $\theta_1 \approx h/(d_0 - R)$, 代入相关参数可得 $\theta_1 \approx 0.00938$. 另外柱透镜出射光束属于细光束, 衍射效应比较明显. 衍射发散角 θ_2 可近似表示为 $\theta_2 \approx 2\lambda/b_1$, 可得波长 650 nm 的红光衍射发散角 $\theta_2 \approx 0.00093$. 因 θ_1 和 θ_2 为独立变量, 都会使横向平顶光束发散, 所以平顶光束横向宽度 FWHM 将随着传播距离的增大而增大.

将接收屏与柱面透镜出射面距离固定为 $z_2 = 2000$ mm, 改变小孔蝶形凹度 β 值, 其余初始参数不变, 数值模拟得到接收屏横向白光光强分布曲线如图 5 所示. 图 5(a) 为 $\beta = 1$ 的光强分布曲线, 此时蝶形小孔为正方形, 可以看到接收屏横向白光光强分布曲线接近为高斯分布. 图 5(a)—(d) 的光强分布曲线显示, 小孔蝶形凹度 β 减小, 光强分布曲线形状由高斯型向平顶型演变. 同时可以看到, $\beta = 0.6$ 的横向光强分布曲线比 $\beta = 0.4$ 的顶部更为平坦, 平顶因子值更大, 前者 $F = 0.892$, 后者 $F = 0.890$, 说明 β 值太小反而会降低平顶因子值. 小孔蝶形凹度对柱透镜输出横向光强的影响主要来自小孔纵向衍射的叠加, 小孔出射光束经柱透镜变换在纵向上与自由空间菲涅耳衍射基本相同. 当蝶形小孔在纵向排成一个阵列时, 就可以看成一个特殊结构的单缝. 由于每个小孔的中心高度小于两边的高度, 因此透过特殊单缝的光场中心能量密度小于两边的能量密度. 经过一定衍射距离后, 这种光场能量分布的不均匀使单缝衍射的光场能量分布特性发生改变, 出现横向衍射光场中心能量下降的趋势. 小孔蝶形凹度值越小, 光场中心能量下降越明显, 横向光强分布曲线越平坦, 平顶因子 F 值越大. 但当小孔蝶形凹度值小于一定值时, 光场中心能量下降太多而出现中心明显凹陷, 平顶因子 F 值反而下降, 因此存在一个最佳小孔蝶形凹度使 F 达到最大值, 如图 5(c) 所示. 为了找出最优的 β 取值, 模拟计算了平顶因子 F 随不同蝶形凹度 β 的变化规律, 如图 6(b) 所示, 图中二次拟合曲线显示 $\beta = 0.5$ 时平顶因子达到最大值 $F = 0.894$. 由于 $\beta = 0.4—0.6$ 之间 F 的变化量很小 ($<0.5\%$), 所以 β 取值从 0.4—0.6 都能得到很好的横向平顶光束.

上述模拟结果说明, 当柱面透镜曲率半径和材料确定后, 选择合适的小孔蝶形凹度 β , 可以将 LCD 背光源均匀光场经过衍射掩模和柱面透镜变

换为横向平顶光束, 横向平顶光束的宽度随着传输距离的增大而增大, 且平顶因子基本不变.

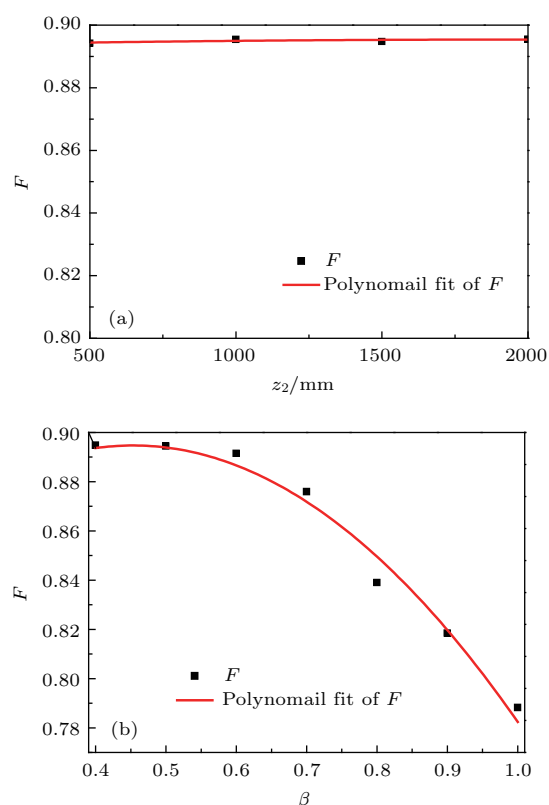


图6 模拟计算得到的平顶因子 F 随距离 z_2 (a) 和蝶形凹度 β (b) 的变化

Fig. 6. Simulated top-flat factor as a function of distance of dissemination z_2 (a), and concavity of butterfly-shaped hole β (b).

4 实验结果与分析

4.1 实验结果

实验装置如图 7 所示. 其中柱面透镜采用 PMMA 柱面透镜光栅板, 厚度 $d_0 = 8$ mm, 光栅密度 18 线/英寸 (即柱面透镜宽度 $b = 1.411$ mm), 柱面透镜曲率半径 $R = 2.67$ mm. 为了获得足够强度的均匀背光源, 实验中将单只功率为 3 W 的正白

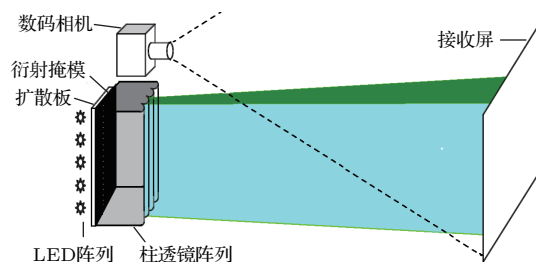


图7 实验装置原理图

Fig. 7. Experimental setup.

光LED阵列放置于扩散板后面, 组成直下式平板灯结构, 代替LCD背光源. 实验掩模板的制备采用菲林输出技术, 先把小孔蝶形阵列经过栅格图像处理器(RIP)处理成点阵图像, 利用激光菲林机使菲林片相应部位曝光, 再通过显影机的显定影过程, 把未曝光部分冲洗掉, 就在菲林片上形成小孔蝶形阵列. 菲林机最大分辨率2880 dpi, 最小网格间距8 μm , 因此实际加工后的掩模板小孔蝶形参数为: 高48 μm , 宽48 μm , 小孔蝶形凹度 $\beta = 1$, $\beta = 0.83$, $\beta = 0.66$ 和 $\beta = 0.50$. 接收屏为漫反射的

白屏, 屏上的亮度分布与光束的强度分布成正比, 因此可以用数码相机拍照并进行数据处理获得归一化光强度分布曲线.

图8为接收屏上白光光斑图样的数码相机照片及横向光强分布曲线. 其中图8(a)—(d)分别对应蝶形凹度 $\beta = 1.00$, $\beta = 0.83$, $\beta = 0.66$ 和 $\beta = 0.50$ 的横向白光光强分布图. 对图8数据按(9)式计算平顶因子 F , 得到接收屏上的实验光强分布图平顶因子 F 随蝶形凹度的变化规律如图9(b)所示. 可以看到随着 β 值的减小, 光强分布

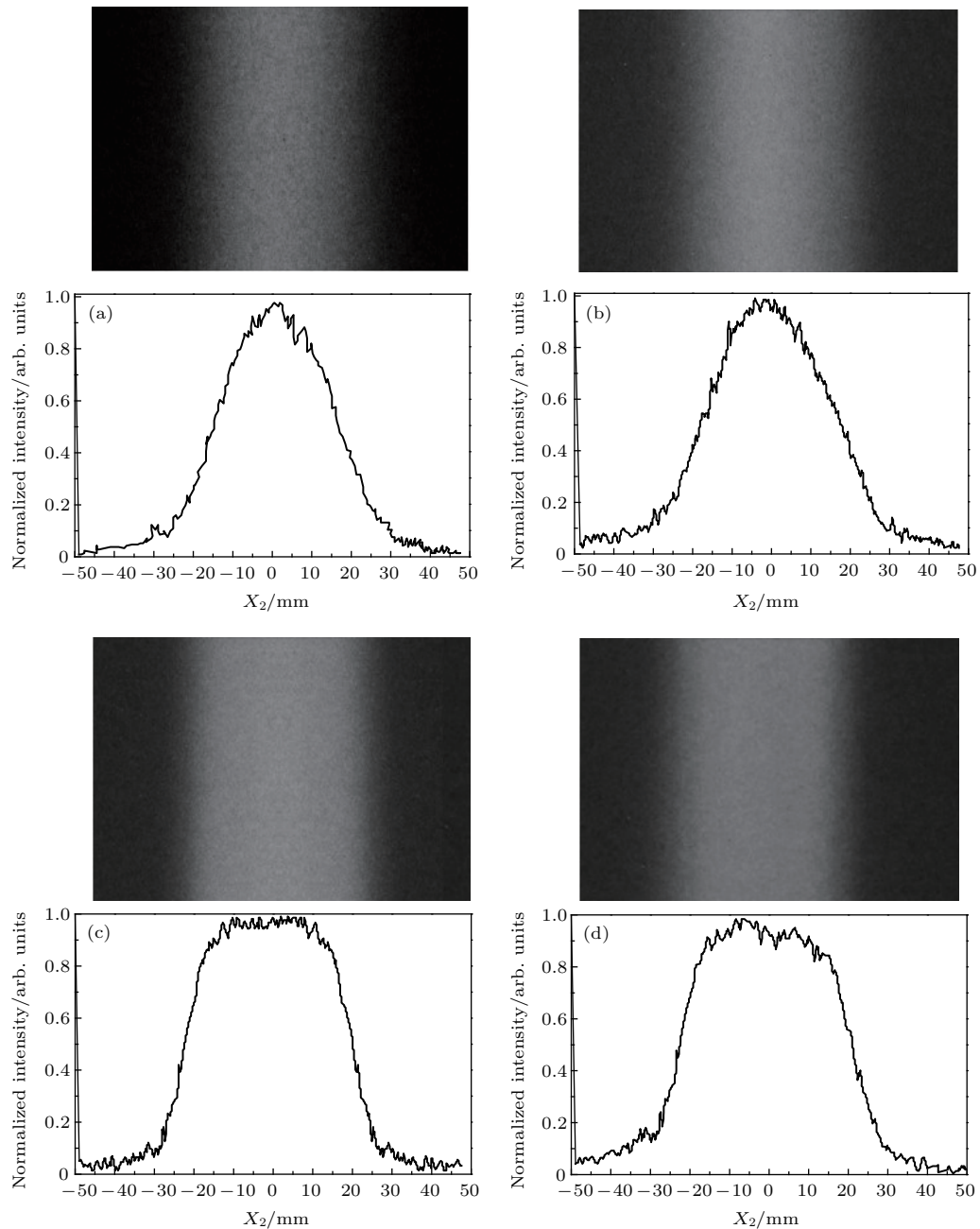


图8 实验得到的横向光强分布曲线随小孔蝶形凹度 β 的变化 (a) $\beta = 1.00$; (b) $\beta = 0.83$; (c) $\beta = 0.66$; (d) $\beta = 0.50$

Fig. 8. Experimental horizontal light intensity distribution vs. the concavity of butterfly-shaped hole: (a) $\beta = 1.00$; (b) $\beta = 0.83$; (c) $\beta = 0.66$; (d) $\beta = 0.50$.

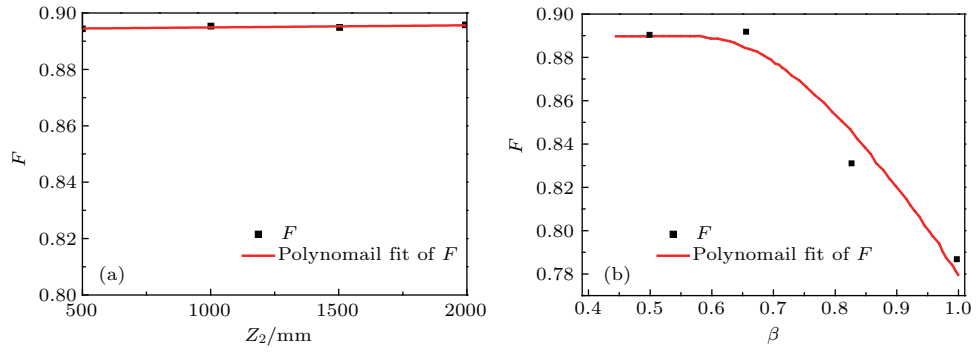

 图9 实验得到的平顶因子 F 随距离 z_2 (a) 和蝶形凹度 β (b) 的变化

Fig. 9. Experimental top-flat factor as a function of distance of dissemination z_2 (a) and concavity of butterfly-shaped hole β (b).

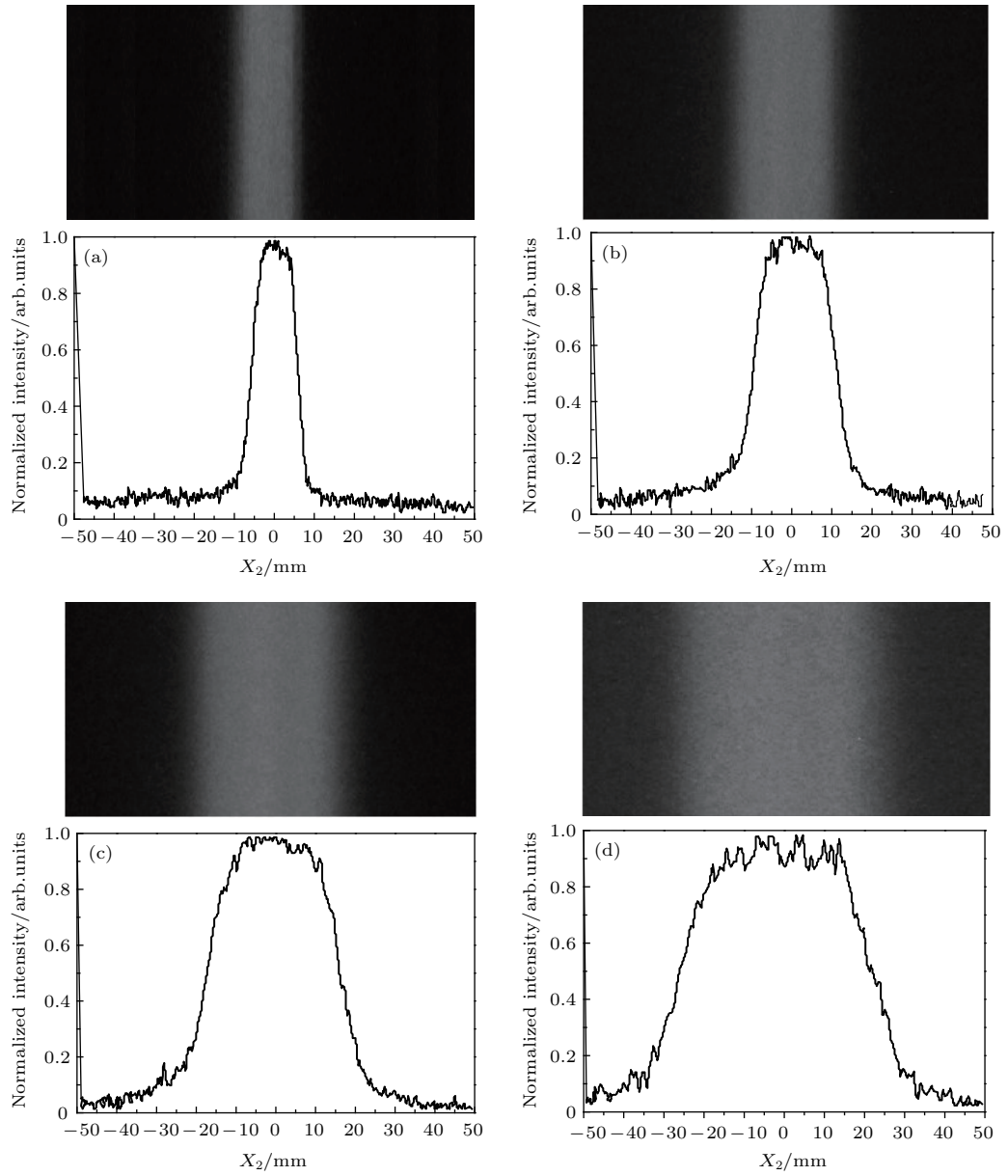

 图10 实验得到的横向光强分布曲线随传播距离 z_2 的变化 (a) $z_2 = 500$ mm; (b) $z_2 = 1000$ mm; (c) $z_2 = 1500$ mm; (d) $z_2 = 2000$ mm

Fig. 10. Experimental horizontal light intensity distribution vs. the distance of dissemination: (a) $z_2 = 500$ mm; (b) $z_2 = 1000$ mm; (c) $z_2 = 1500$ mm; (d) $z_2 = 2000$ mm.

曲线从高斯型向平顶型的转变. $\beta = 0.50$ 时横向白光光强分布平顶因子 F 达到最大值 $F = 0.89$. 比较图 5 和图 8 可以看到, 当蝶形凹度 $\beta = 1.00$ 和 $\beta = 0.83$ 时横向白光光强分布曲线呈现高斯型分布, 而当 β 值减小为 $\beta = 0.66$ 和 $\beta = 0.50$ 时, 光强分布曲线出现明显的平顶特征, 说明实验结果与模拟计算结果符合.

根据范西特-泽尼克定理^[21], 一个扩展不相干准单色光源在离它距离为 z 的受照面上可产生一个近乎完全相干的照明区, 其直径为

$$D = \frac{0.16z\bar{\lambda}}{\rho}, \quad (10)$$

其中 ρ 为光源半径, $\bar{\lambda}$ 为可见光平均波长. 若将 LCD 背光源经蝶形小孔后的发光区作为扩展不相干准单色光源, 并将蝶形小孔近似为圆孔, 则 $\rho \approx 25 \mu\text{m}$, 取 $\bar{\lambda} = 550 \text{ nm}$, 由 (10) 式可计算得到传输距离为 2000 mm 的完全相干照明区直径约为 7.04 mm, 可见图 8 中的光强度分布存在部分相干光叠加. 部分相干光叠加降低了衍射图样的对比度, 使实验曲线中 $\beta = 0.66$ 和 $\beta = 0.50$ 的横向白光光强分布中心凹陷被填平, 如图 8(c) 和图 8(d) 所示. 图 9(b) 为实验得到的平顶因子 F 随蝶形凹度 β 的变化曲线, 说明小孔蝶形凹度对平顶因子的影响实验结果与数值模拟结果一致.

图 10 为 $\beta = 0.5$, 接收屏与柱面透镜出射面距离 $z_2 = 500, 1000, 1500 \text{ mm}$ 和 2000 mm 时, 实验得到的接收屏上白光光斑图样和横向光强分布曲线. 可以看到横向光强分布曲线的平顶特性基本不随传播距离的变化而变化, 经计算可知图 10(a)–(d) 的平顶因子 F 均大于 0.89, 如图 9(a) 曲线. 比较图 4 和图 10 可知传播距离不改变横向白光光强分布的平顶特性, 实验结果与数值模拟结果相一致.

4.2 色散对轴上平顶光束的影响

由于柱面透镜折射光束发散角和衍射光束发散角都是波长的函数, 两者都会引起白光横向平顶光束的色散. 图 11 给出了 $\beta = 0.5$, 接收屏与柱面透镜出射面距离 $z_2 = 500, 1000, 1500 \text{ mm}$ 和 2000 mm 时, 实验得到的接收屏上红绿蓝 (RGB) 三基色光强度分布曲线. 这里三基色是采用 BMP 图形文件格式存储的 RGB 数据进行处理, 将数

码相机拍摄的接收屏照片通过图像分析软件 Image Analyzer 分析得到光强度分布曲线. 可以看到图 11(a)–(d) 的 RGB 三基色光强度都具有平顶分布特性, 且两边沿 RGB 三基色基本是重合的, 即没有产生色散现象. 这是因为柱面透镜折射率随波长增大而减小, 蝶形小孔出射光束经柱面透镜圆柱面折射后引起的光束发散角随波长增大而减小 (透镜色差); 而衍射引起的光束发散角刚好与之相反, 衍射光束发散角随波长增大而增大, 两者相互抵消, 结果降低了波长对横向平顶光束发散角的影响. 根据几何光学原理和图 2 柱面透镜结构参数, 求得柱面透镜圆柱面折射光线与光轴的夹角:

$$U' = U + \sin^{-1} \left((d_0 - R) \frac{\sin U}{R} \right) - \sin^{-1} \left(n(\lambda)(d_0 - R) \frac{\sin U}{R} \right), \quad (11)$$

式中 U 为圆柱面入射光线与光轴的夹角, 其值为负值. (11) 式对波长求导数可得 U' 随波长的变化率:

$$\frac{dU'}{d\lambda} = \frac{-(d_0 - R) \sin U}{\sqrt{R^2 - n(\lambda)^2(d_0 - R)^2 \sin^2 U}} \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}. \quad (12)$$

(12) 式说明柱面透镜圆柱面折射光线与光轴夹角 U' 随波长的变化率 (色散特性) 与柱面透镜折射率随波长的变化率成负比例关系, 将 (6) 式和柱面透镜参数代入 (12) 式可求得具体色散角度值.

柱面透镜出射平行光束的发散角 $\theta(\lambda)$ 可近似由夫琅和费衍射公式表示为

$$b_1 \sin[\theta(\lambda)] = \lambda, \quad (13)$$

式中 b_1 为柱面透镜实际出射光束宽度, 则衍射发散角随波长的变化率为

$$\frac{d[\theta(\lambda)]}{d\lambda} = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - \lambda^2}}. \quad (14)$$

(14) 式表明衍射光束发散角随波长增大而增大, 当

$$\frac{d[\theta(\lambda)]}{d\lambda} = -\frac{dU'}{d\lambda}$$

时, 可消除折射色散和衍射色散的影响, 如图 12 中的两曲线交叉点, 其横坐标值约为 0.35 mm, 即柱面透镜宽度为 0.35 mm 时, 接收屏上白光光斑可完全消色差.

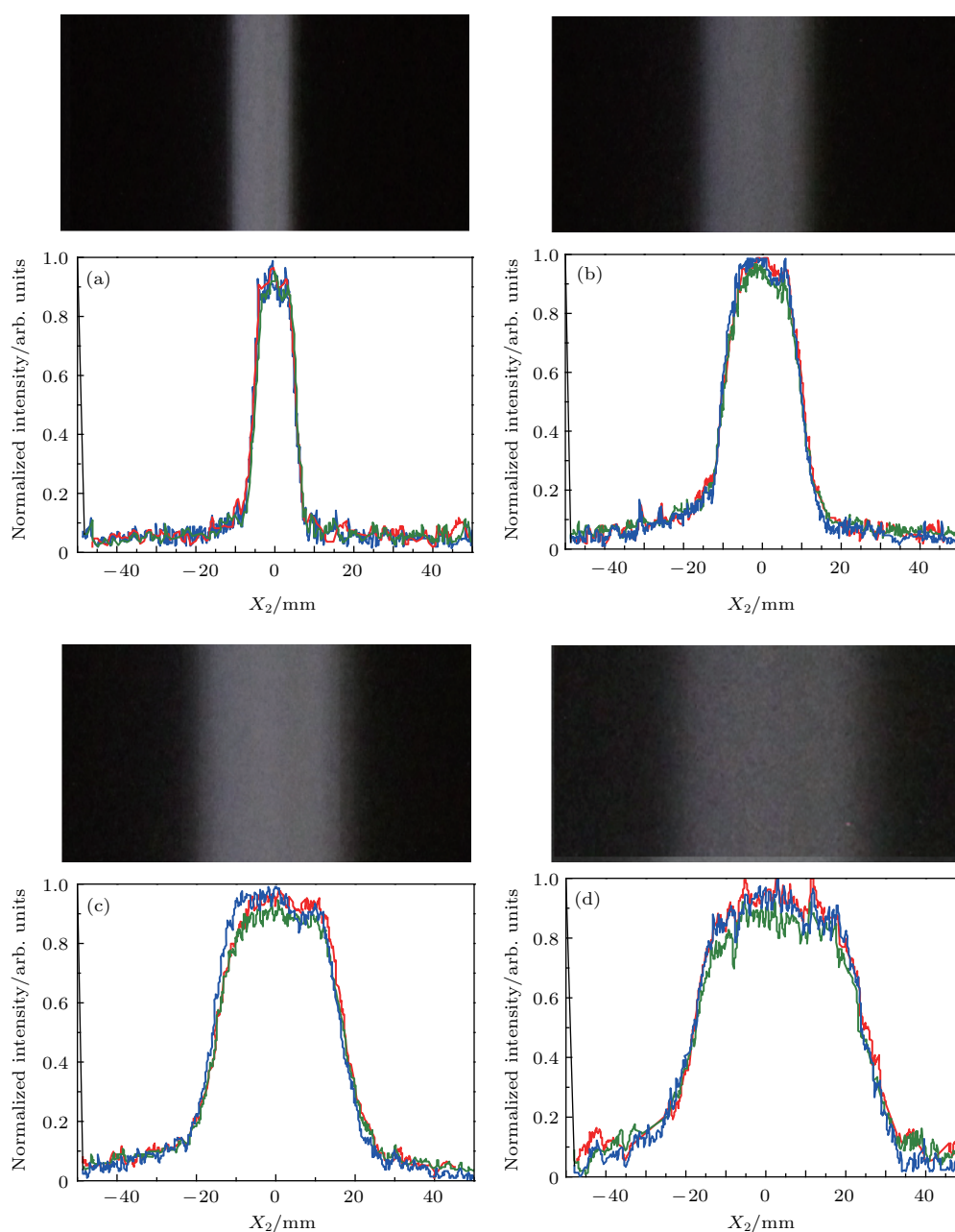


图 11 实验得到的 RGB 三基色光强度分布曲线

Fig. 11. Experiment colored light intensity distribution curves of RGB.

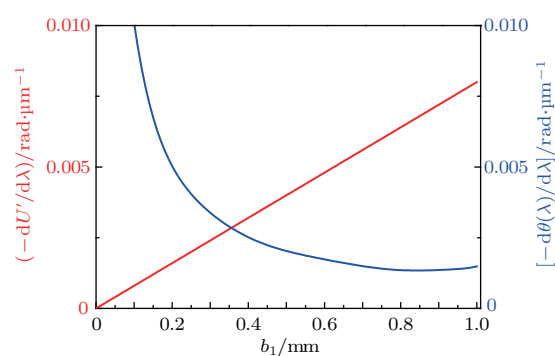


图 12 折射色散和衍射色散与柱面透镜出射光束宽度的关系

Fig. 12. Relationship between the dispersion and diffraction dispersion with the width of the beam.

4.3 色散对轴外平顶光束的影响

当蝶形小孔偏离柱面透镜光轴较大时, 光束在光轴的上方或下方, 折射色散为非对称结构, 不能抵消对称结构的衍射色散, 其结果是波长较短的蓝光和波长较长的红光形成的平顶光束存在相对位

移, 不同波长平顶光束存在的相对位移使白光光束展宽、边沿颜色分离和平顶因子变小, 如图 13(b) 所示 (其中蝶形小孔偏离光轴距离 R , R 为柱面透镜半径). 与图 13(a) 所示的轴上衍射图相比, 在图 13(b) 中可以看到明显的彩色条带和三基色光强分布曲线错位, 光束平顶特性变差.

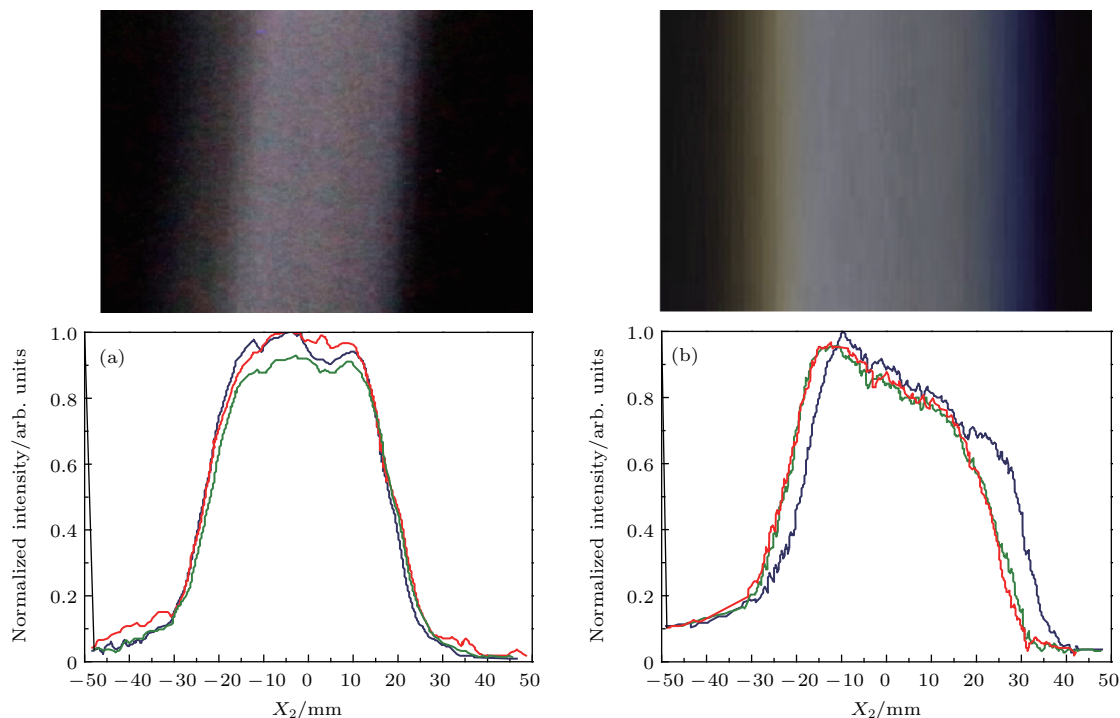


图 13 柱透镜轴上的衍射光强分布 (a) 和轴外的衍射光强分布 (b)

Fig. 13. Diffraction intensity distribution at optical axis of a cylindrical lens (a), and at off axis of a cylindrical lens (b).

4.4 其他因素对轴外平顶光束的影响

1) 像差的影响

从图 13(b) 还可以看到, 蝶形小孔在柱面透镜轴外位置产生的衍射光束横向光强分布顶部出现明显的倾斜, 这是由柱面透镜的像差引起的衍射像中的光强分布不均匀现象. 柱面透镜的像差主要考虑初级球差、初级慧差和初级像散的影响, 而初级慧差是轴外物点宽光束经光学系统后产生失对称像的主要因素.

2) 蝶形小孔尺寸的影响

当蝶形小孔尺寸远小于柱面透镜曲率半径时, 蝶形小孔类似点光源, 其经过柱面透镜后的衍射光束横向光强分布接近高斯分布, 而不具备平顶特性. 当蝶形小孔尺寸接近柱面透镜曲率半径时, 由于像差的影响将使平顶特性变差 (如图 13(b)).

可见蝶形小孔尺寸应选择比柱面透镜曲率半径小 1—2 个数量级之间为宜.

5 结 论

由广义惠更斯-菲涅耳衍射积分和多波长叠加原理推导出白光 LED 背光源均匀光场经过蝶形小孔阵列衍射掩模片和柱面透镜后的光强分布并进行了数值模拟和实验验证. 实验用蝶形小孔阵列衍射掩模片产生了白光横向平顶光束, 实验得到的横向光强分布、横向平顶光强分布与距离的关系和平顶因子计算结果均与数值模拟结果相符. 结果表明: 当蝶形小孔的宽度 $h = 48 \mu\text{m}$, 凹度 $\beta = 0.50\text{—}0.66$, 柱面透镜曲率半径 $R = 2.67 \text{ mm}$, 厚度 $d_0 = 8 \text{ mm}$ 时, 在可视距离 500—2000 mm 范围内得到平顶因子 $F \geq 0.89$ 的白光平顶光束,

且平顶光束的横向宽度随着传播距离的增大而增大. 对白光横向平顶光束消色差进行了讨论, 证明了折射色散和衍射色散可以互相抵消, 实现无色差白光横向平顶光束. 研究结果对于定向背光式自由立体显示器中的应用有重要参考价值和指导意义.

参考文献

- [1] Yoon K H, Kang M K, Lee H, Kim S K 2018 *Appl. Opt.* **57** A101
- [2] Su Y F, Cai Z J, Liu Q, Lu Y F, Guo P L, Shi L Y, Wu J H 2018 *Opt. Rev.* **25** 254
- [3] Yao S J, Wang L H, Lin C L, Zhang M 2018 *J. Real-Time Image PR.* **14** 481
- [4] Fan Z C, Chen G W, Wang J C, Liao H G 2018 *IEEE T. Bio-Med. Eng.* **65** 378
- [5] Su J B, Liang H W, Chen H Y, Zhou Y G, Fan H, Lin D K, Zhou J Y, Wang J H 2015 *J. Disp. Technol.* **30** 887 (in Chinese) [苏剑邦, 梁浩文, 陈海城, 周延桂, 范杭, 林岱坤, 周建英, 王嘉辉 2015 液晶与显示 **30** 887]
- [6] Ma H Q, Wang X L, Fan H, Wang J H, Zhou J Y, Zhou Y G 2017 *Las. Optoelect. Prog.* **54** 118 (in Chinese) [马鸿钦, 王晓露, 范杭, 王嘉辉, 周建英, 周延桂 2017 激光与光电子学进展 **54** 118]
- [7] Chen F P, Zhang X T, Liu C J, Qi Y, Zhuang Q R 2017 *Acta Phot. Sin.* **46** 95 (in Chinese) [陈芳萍, 张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 庄其仁 2017 光子学报 **46** 95]
- [8] Liang H W, An S Z, Wang J H, Zhou Y G, Fan H, Peter Krebs, Zhou J Y 2014 *J. Disp. Technol.* **10** 695
- [9] Luo S R, Lü B D 2000 *Laser Technol.* **24** 256 (in Chinese) [罗时荣, 吕百达 2000 激光技术 **24** 256]
- [10] Liu L H 2013 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [刘丽红 2013 博士学位论文 (长春: 中国科学院大学)]
- [11] Nie S Z, Yu J, Fan Z W, Ge W Q, Liu Y, Zhang X 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 25 (in Chinese) [聂树真, 余锦, 樊仲维, 葛文琦, 刘洋, 张雪 2013 光学学报 **33** 25]
- [12] Li S, Wang Y L, Lu Z W, Ding L, Cui C, Chen Y, Yuan D P, Ba D X, Zheng Z X, Yuan H, Shi L, Bai Z X, Liu Z H, Zhu C Y, Dong Y K, Zhou L X 2016 *Opt. Commun.* **367** 181
- [13] Zhao B Y, Lü B D 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2919 (in Chinese) [赵保银, 吕百达 2008 物理学报 **57** 2919]
- [14] Liu Z, Wang X, Zhao D 2015 *Opt. Laser Technol.* **69** 154
- [15] Liu J, Yang Y F, He Y, Liu G W, Zheng X 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 235 (in Chinese) [刘健, 杨艳芳, 何英, 刘国威, 郑晓 2014 光学学报 **34** 235]
- [16] Wu P, Zhuang J, Lu B D 2004 *Chin. J. Lasers* **31** 48 (in Chinese) [吴平, 庄建, 吕百达 2004 中国激光 **31** 48]
- [17] Jiang H, Zhang X T, Guo C S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244203 (in Chinese) [江浩, 张新廷, 国承山 2012 物理学报 **61** 244203]
- [18] Zhang M J, Gao W Y, Niu Q Y, Yuan X Q 2015 *Infrar. Laser Eng.* **44** 2411 (in Chinese) [张明军, 高文英, 牛泉云, 袁兴起 2015 红外与激光工程 **44** 2411]
- [19] He X, Wu F T, Li P, Chen Z Y 2014 *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.* **7** 705 (in Chinese) [何西, 吴逢铁, 李攀, 陈姿言 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **7** 705]
- [20] Li H X, Lou Q H, Ye Z H, Dong J X, Wei Y R, Ling L 2004 *High Power Laser Particle Beams* **16** 729 (in Chinese) [李红霞, 楼祺洪, 叶震寰, 董景星, 魏运荣, 凌磊 2004 强激光与粒子束 **16** 729]
- [21] Born M, Wolf E (translated by Yang J Q) 2009 *Principles of Optics* (Beijing: Electronic Industry Press) pp478–479 (in Chinese) [马科斯·玻恩, 埃米尔·沃耳夫 著 (杨葭荪 译) 2009 光学原理 (北京: 电子工业出版社) 第 478—479 页]

Horizontal white light flat-topped beams produced by the diffraction mask^{*}

Chen Fang-Ping Zhang Xiao-Ting Liu Chu-Jia Qi Yu Zhuang Qi-Ren[†]

(Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering,

Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

(Received 4 January 2018; revised manuscript received 21 March 2018)

Abstract

The flat-topped beam is a special beam with wide applications in the directional backlight autostereoscopic display, and it is used as a directional backlight in the horizontal direction. However, it is still challenge to white light flat-topped beams with the traditional flat-topped beam shaper. In this paper, it is proposed that diffraction mask with butterfly-shaped hole arrays and cylindrical lens be used to produce the horizontal flat-topped white beams. The surface of the LCD backlight mask is covered by a layer of diffraction mask, where the butterfly-shaped holes are arranged in line along the vertical direction. Simultaneously, the height and width, hole center height are kept identical, and the ratio between the center depth and the perimeter of butterfly-shape hole is defined as the concavity. A flat convex cylindrical lens is placed in front of diffraction mask gaplessly. The uniform light field from LCD backlight is transformed into the white light flat-topped beams and projected on the receiving screen by the diffraction mask and cylindrical lens. Based on the Huygens-Fresnel diffraction integral, the intensity distribution formula of diffraction of the single wavelength light source on the receiving screen is derived. Furthermore, the intensity distribution formula on the screen is derived by super positioning the multiple wavelengths. The proposed method is verified by both numerical simulation and experimental validation. Numerical simulations elucidate the effects of the different transmission distance and butterfly hole concavity on the white light flat-topped beam flat-topped factor. The stimulated results show that the propagation distance does not influence the white light beam transverse intensity distribution characteristics of flat top. With the beam propagation distance increasing, the horizontal width of flat-topped beam becomes larger. When the concavity of the butterfly hole decreases, light intensity distribution shifts from Gaussian to flat type. However, the flat-topped factor decreases when the butterfly concavity is too small. The optimal concavity varies from 0.4 to 0.6, where the flattened factor of the transverse flat-topped beams reaches 0.89. In the experiments, films are produced with the diffraction of butterfly hole array mask. The height and width of butterfly are both 48 μm , and the concavities of the butterfly are 1, 0.83, 0.66 and 0.83 respectively. The cylindrical lens adopts PMMA cylindrical lens grating plate, with a thickness of 8 mm, a grating density for 18 line/inch, and the cylindrical lens curvature radius R is 2.67 mm. The experimental results show that the beam transmission is consistent with the result of numerical simulation. When concavity of the butterfly is 0.5, the flat factors of the white light horizontal of flat-topped beams are higher than 0.89 in a range from 500 mm to 2000 mm. Moreover, we also discuss the dispersion effects of shaft flat-topped beams and off-axis flat-topped beams, showing that the refraction and dispersion of the cylindrical lens can cancel out each other, so that the horizontal flat-topped white beams is basically dispersionless.

Keywords: horizontal flat-topped white beams, diffraction mask, generalized Huygens-Fresnel diffraction integral, cylindrical lens

PACS: 42.30.-d, 42.30.Rx, 42.30.Wb

DOI: 10.7498/aps.67.20180030

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61178015, 61605049) and the Technology Key Projects of Fujian Province, China (Grant No. 2016H6016).

[†] Corresponding author. E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn