

文章编号: 0253-2239(2010)11-3306-05

# 层叠微透镜阵列光扩散片特性研究

庄孝磊 周芳申 溯 陈林森

(苏州大学信息光学工程研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 提出了一种新型的层叠微透镜阵列光扩散片。在入射侧具有大口径低数值孔径微透镜阵列结构, 在出射侧具有小口径高数值孔径微透镜阵列结构。分析了层叠结构对光线在视场内的扩散增益原理。利用光线追迹法模拟了微透镜高度、口径等结构参数对光学性能的影响。模拟结果表明, 正面亮度随出射侧微透镜高宽比增大而增加, 在入射侧增加一层高宽比在 0.01~0.15 的低数值孔径微透镜阵列, 能够将正面亮度再提高 3%~5%。实验测试结果表明其增益率可达 40.06%, 较单层微透镜阵列扩散片提高了 4.2%。

**关键词** 光学器件; 光扩散片; 光线追迹; 微透镜阵列

中图分类号 TN27; TM923.01 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3306

## Characteristics of Diffusers with Cascaded-Microlens Arrays

Zhang Xiaolei Zhou Fang Shen Su Chen Linsen

(Institute of Information Optical Engineering, Suzhou University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** A new type of optical diffuser with cascaded microlens arrays (MLAs) is proposed. The diffuser is composed of a layer of MLAs with small aperture and high numerical aperture (NA) on output side and a layer of MLAs with large aperture and low NA on incident side. The influence of the parameters (such as sag height, aperture etc.) of cascaded MLAs on the diffusing behavior is investigated by using of ray tracing method. The results show that the maximum luminance increases with the ratio of sag height to aperture and an additional 3%~5% optical gain can be accomplished by inserting another layer of MLAs with a height-aperture ratio of 0.01~0.15 on incident side. Experimental results are also demonstrated and the optical gain is measured as 40.06%.

**Key words** optical devices; diffuser; ray tracing method; microlens array

## 1 引 言

光扩散片是使得光束光强在空间一定范围内均匀分布的光器件, 在平板显示、激光、LED 照明、成像等系统中有重要应用<sup>[1,2]</sup>。基于对入射光扩散原理的不同, 扩散片分为两类: 掺杂粒子型和表面微结构型。目前, 掺杂粒子型扩散片在平板显示中得到了广泛应用, 但其透射率低, 出射光场不可控, 且存在“热点”等缺陷。表面微结构扩散片分为毛玻璃型、全息型<sup>[3,4]</sup>和微透镜阵列型<sup>[5~9]</sup>。

这一类扩散片利用材料表面微纳米结构对光波

的折衍射实现扩散光的作用, 因而透射率较高。然而, 毛玻璃扩散片虽然可方便地通过注塑或者压印技术制备, 但扩散角通常小于 30°, 不满足 LED 背光模组扩散光的要求。全息型扩散片的扩散角大于 40°, 但制备成本昂贵, 通常只适合小幅面样品。基于微透镜阵列的光扩散片透射率高, 通过调整微透镜阵列形状和排布可以改变扩散角度、光场的空间和能量分布, 因此引起研究人员的高度关注。

本文提出了一种基于层叠微透镜阵列的扩散片。入射侧由大口径低数值孔径微透镜阵列组成,

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2010-06-13

基金项目: 苏州市科技计划科技专项项目(ZXG0802)和江苏省基础研究计划项目(BK20082766)资助课题。

作者简介: 庄孝磊(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学信息处理及其器件等方面的研究。

E-mail: xiaolei.zhuang@139.com

导师简介: 陈林森(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光信息器件与微纳米结构制造等方面的研究。

E-mail: lschen@suda.edu.cn

用于改变入射光的传播方向,出射侧由小口径高数值孔径微透镜阵列组成,进一步调制出射光方向,提高器件的正面亮度。理论分析和实验结果表明,层叠微透镜阵列扩散片不但具有优良的扩散性能,而且还具有在一定角度扩散增亮的作用。

本文介绍了层叠微透镜阵列结构对光的扩散原理,建立了相应的物理模型,利用光线追迹法对其性质进行了数值模拟,分析了微透镜结构对器件扩散性能的影响。结果表明所提出结构可以在提高正面亮度基础上实现光束扩散,雾度可达到 90%,正面亮度提高 40% 以上。

## 2 层叠微透镜阵列扩散增益原理

假设未加入膜片时检测到的背光模组的正面亮度为  $I_0$ ,加入膜片检测到的正面亮度为  $I_1$ ,则增益率  $g$  定义为  $g = I_1/I_0 \times 100\%$ ,表示膜片提高背光模组正面亮度的能力。棱镜片是当前最常用的增亮膜片,利用微棱镜结构的折反射作用可以将杂散的背光集中在膜片法线  $70^\circ$  范围内,有效提高模组的正面亮度<sup>[12]</sup>。微透镜阵列扩散片不仅具有类似于微棱镜的增亮作用,同时还具有扩散作用,使得背光更亮更均匀。但由于微透镜由于球面微透镜的表面法线从球冠中央到底部逐渐趋向于水平方向使得它的增益率不及棱镜片。为了更好的提高微透镜阵列扩散片的增益率提出了层叠微透镜阵列结构。

层叠微透镜阵列扩散片的底层为低深宽比微透镜阵列,其作用在于它可以改善底层入射光线的传播方向,提高扩散片的正面亮度和透射率。如图 1(a)所示,低深宽比微透镜阵列可以将大角度的入射光线向扩散片的法向方向偏折,改善光线传播方向从而提高增益率。如图 1(b)所示,低深宽比微

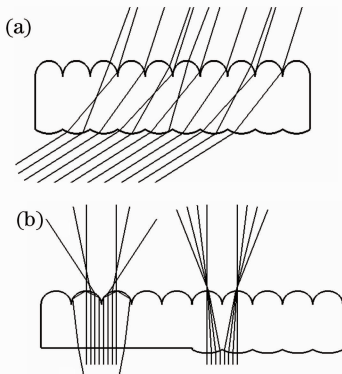


图 1 低深宽比微透镜改善光线传播方向示意图

Fig. 1 Microlens array with low aspect ratio improve the light beam orientation

透镜阵列可以将微透镜边缘的小角度入射光线偏折,以此减少经过高深宽比微透镜阵列时的全反射光线,提高透射率。通过优化设计层叠微透镜阵列的各项参数,可以实现层叠微透镜阵列扩散片较好的扩散增益特性。

## 3 光学特性的数值模拟

### 3.1 物理建模

采用光线追迹法<sup>[10,11]</sup>模拟层叠微透镜阵列扩散片的光学特性,结构如图 2 所示。光源为朗伯面光源,波长为 555 nm,发光功率为 1 W。基底材料取为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA,  $n = 1.49$ )。模拟区域长度  $L = 10$  mm,宽度  $W = 10$  mm,厚度  $H = 0.2$  mm,忽略材料吸收。设定出射侧和入射侧的球面微透镜口径为  $D_1$  和  $D_2$ ,相应的球冠高度为  $h_1$  和  $h_2$ 。接收器用于接受总出射光能量和不同方向的发光强度,尺寸为  $15$  mm  $\times$   $15$  mm,距离光扩散片 1 mm。

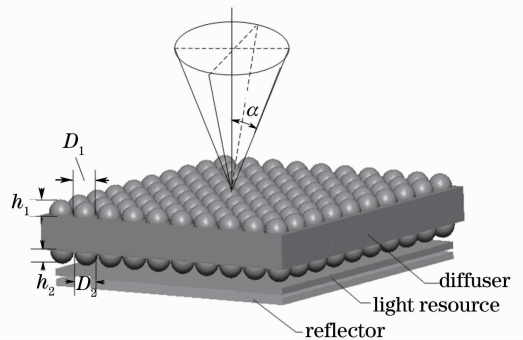


图 2 层叠微透镜扩散片结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the proposed cascaded microlens diffuser

### 3.2 微透镜阵列参数对光学性能的影响

下面就层叠微透镜结构参数对光学性能的影响进行讨论。

#### 3.2.1 出射侧小口径高数值孔径微透镜阵列参数的影响

图 3(a)和(b)表示了入射侧没有微透镜结构,出射侧不同微透镜孔径和球冠高度时,系统正面亮度和透射光通量的变化关系图。

根据模拟数据,三条不同透镜口径的亮度曲线均近似满足线性关系。设原光源的正面亮度为  $I_0$ ,则通过微透镜阵列扩散片后的正面亮度  $I$  可表示为

$$I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{D/2} d + I_0 = 2(I_{\max} - I_{\min}) \cdot \frac{h}{D} + I_0, \quad (1)$$

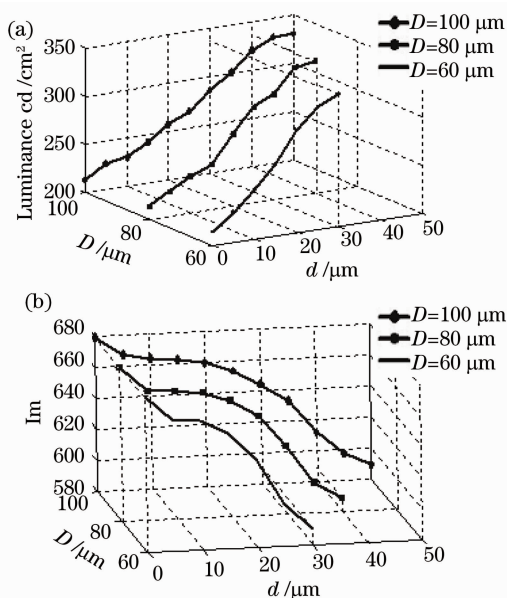


图3 正面亮度和透射光通量随透镜不同孔径(a)和球冠高度的变化规律(b)

Fig. 3 (a) Maximum luminance and (b) total luminous flux vary with micro lens aperture and sag height on the output side

式中  $h/D$  可表示为微透镜的深宽比。可以看出,在忽略了材料的吸收后,微透镜阵列扩散片的增益率仅与微透镜深宽比有关。

### 3.2.2 入射侧低数值孔径微透镜参数的影响

扩散片入射侧增加低数值孔径微透镜阵列的透射特性模拟结果如图4所示。当入射侧微透镜参数  $h/D$  在  $0.01 \sim 0.15$  之间时,正面亮度有  $3\% \sim 5\%$  提高。该比率进一步增大时,正面亮度反而减小。究其原因,入射侧微透镜改变大角度入射角光线的传播方向,对垂直方向的入射光线影响不大。随着微透镜曲率增大,会使得后者部分的入射光线折射和反射影响增大,从而导致亮度下降。

图5表示了朗伯光源经过层叠微透镜阵列后扩散角度的情况。从图中可以看出层叠微透镜阵列扩

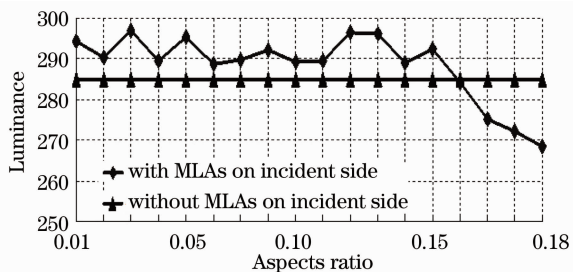


图4 不同入射侧微透镜高宽比时的正面亮度

Fig. 4 Max luminance varies with the ratio of sag height to aperture of the microlens on incident side

散片具有明显的增益,半强度视角为  $35^\circ$ ,达到了在较大视角范围实现高亮度的目的。

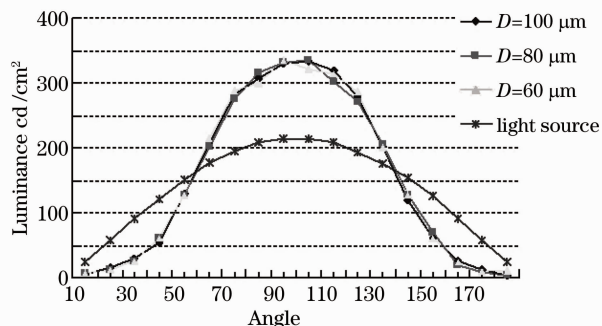


图5 层叠微透镜阵列扩散片亮度分布图

Fig. 5 Luminance pattern of the proposed cascaded microlens diffuser

## 4 层叠微透镜阵列光扩散片实验制作

当前制作微透镜阵列方法很多<sup>[13~15]</sup>,实验中上层小孔径高数值孔径微透镜阵列通过光刻胶热熔法<sup>[16,17]</sup>制得。设曝光后圆柱的底面半径(即掩模板半径)为  $r$ 、高度(即涂胶厚度)为  $t$ ,融化后球冠曲率半径为  $R$ ,球冠高度为  $h$ ,如图6所示。

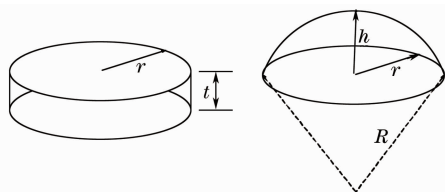


图6 光刻胶热熔结构参数图

Fig. 6 Variables describing the production of photoresist reflow method

假设融化后,球冠的体积  $V_2 = \frac{1}{3}\pi h^2(3R - h)$  变为圆柱体积  $V_1 = \pi r^2 t$  的  $k$  倍,即  $V_2 = kV_1$ ,其中  $k$  为影响因子。则可求出制作此微透镜阵列所需涂胶的厚度  $t$

$$t = \frac{h^2}{3kr^2}(3R - h). \quad (2)$$

根据球冠的几何关系  $R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$  以及透镜焦距公式  $f = \frac{R}{n-1}$  可求出透镜的球冠高度  $h$  可以表示成透镜焦距  $f$  和光刻胶折射率  $n$  的函数

$$h = (n-1)f - \sqrt{(n-1)^2 f^2 - r^2}. \quad (3)$$

由以上理论推导可知,涂胶厚度  $t$  完全由所需的透镜焦距  $f$  和透镜口径  $r$  决定。实验制作的层叠微透镜阵列扩散片结构如图7(a)所示。图7(b)所

示为上层微透镜阵列的扫描电子显微镜(SEM)检测图,其中透镜孔径  $D=80\ \mu\text{m}$ ,球冠高度  $d=30.2\ \mu\text{m}$ 。

由于光刻胶热熔法在制作较大孔径微透镜时存在局限性,因此层叠微透镜阵列扩散片下层大孔径低数值孔径微透镜阵列利用微区微纳米压印技术制作<sup>[18]</sup>,图 7(c)所示为其台阶仪检测图,其中透镜孔径  $D=200\ \mu\text{m}$ ,球冠高度  $d=10.6\ \mu\text{m}$ 。

利用色度亮度计 BM-7A 分别对单层微透镜阵列扩散片和层叠微透镜阵列扩散片进行性能测试,测得两种扩散片增益率分别为 36.4% 和 40.6%。层叠微透镜阵列扩散片较单层微透镜阵列扩散片增益率提高 4.2%。图 7(d)为层叠微透镜阵列增亮效果图。区域 1 内为三颗白光 LED 灯,区域 2 为由导光板直接导出光区域,区域 3 为导光板上覆盖有层叠微透镜阵列扩散片导光区域。可以看到,尽管区域 3 距离光源较远,却具有较高的亮度。

20 inch (1 inch=2.54 cm)]模版的制作,具有重要应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 D. J. Schertler, N. George. Uniform scattering patterns from grating-diffuser cascades for display applications [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(2): 291~303
- 2 M. Parikka, T. Kaikuranta, P. Laakkaonen *et al.*. Deterministic diffractive diffusers for displays[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2239~2246
- 3 S. I. Kim, Y. S. Choi, Y. N. Ham *et al.*. Holographic diffuser by use of a silver halide sensitized gelatin process [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(14): 2482~2491
- 4 James M. Tedesco. Holographic diffusers for cock-pit displays [P]. US Patent, 5471327, 1995
- 5 S. I. Chang, J. B. Yoon, H. Kim *et al.*. Microlens array diffuser for a light-emitting diode backlight system [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(20): 3016~3018
- 6 C. Y. Wu, T. H. Chiang, C. C. Hsu. Fabrication of microlens array diffuser films with controllable haze distribution by combination of breath figures and replica molding methods[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(24): 19978~19986
- 7 Tasso R. M. Sales, Donald J. Schertler, Stephen Chakmakjian. Deterministic microlens diffuser for lambertian scatter [C]. *SPIE*, 2006, **6290**: 629005
- 8 Frank C. Wippermann, Daniela Radtke, Peter Dannberg *et al.*. Stochastic tandem microlens arrays for beam homogenization[C]. *SPIE*, 2006, **7062**: 70620Q
- 9 D. S. Lee, S. S. Min, M. S. Lee. Design and analysis of spatially variant microlens-array diffuser with uniform illumination for short-range infrared wireless communications using photometric approach[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **219**(1): 49~55
- 10 Ye Qin, Tang Zhenfang, Zhang Jie *et al.*. Ray tracing simulation of volume scattering light guide plate for LCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1627~1631  
叶 勤,唐振方,张 杰等.体散射液晶导光板的光线追迹模拟[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1627~1631
- 11 Sun Wei, Ying Jinping, Li J jiang *et al.*. Monte-Carlo method study of light propagation in tissues [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(1): 98~101  
孙 威,应金品,李 江等.用蒙特卡罗方法研究生物组织中的光分布[J]. *光学学报*, 1994, **14**(1): 98~101
- 12 Adiel Abileah. Lighting assembly for a backlit electronic display including an integral image splitting and collimating means [P]. US Patent, 5161041, 1992
- 13 Wang Wei, Zhou Changhe. New technology for fabrication of polymer microlens arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2869~2872  
王 伟,周常河.一种新型聚合物微透镜阵列的制造技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2869~2872
- 14 Zhan Zhenxian, He Jianhui, Yao Haitao *et al.*. Aspherical liquid micro-lens manipulated by electrostatic forces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 361~364  
詹珍贤,何建慧,姚海涛等.电场作用下的变焦非球面液滴微透镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 361~364
- 15 Zhan Zhenxian, Wang Keyi, Yao Haitao *et al.*. Study on curing control and focal spot measurement of aspherical liquid microlens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3212~3216  
詹珍贤,王克逸,姚海涛等.非球面液滴微透镜固化控制和焦斑测量研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3212~3216
- 16 Ren Zhibin, Zhu Lisi, Zeng Hao *et al.*. Fabrication technology of microlens array by melting photoresist [J]. *J. Changchun*

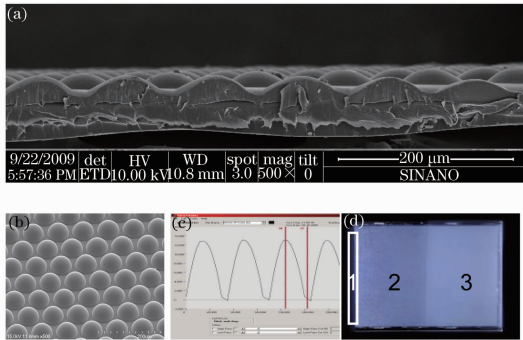


图 7 层叠微透镜阵列扩散片检测图。(a)纵向截面; (b)上层微透镜阵列;(c)下层微透镜阵列;(d)增亮效果图

Fig. 7 Scanning electron microscopy photos of the fabricated cascaded microlens array diffuser. (a) cross section; (b) SEM photos of microlens array on output side; (c) surface profile of microlens array on incident side; (d) brightness enhancement pattern

## 5 结 论

提出了新型的光扩散片结构。扩散片由层叠微透镜阵列组成,入射侧为大口径的数值孔径微透镜阵列,出射侧为小口径高数值口径微透镜阵列。利用光线追迹数值模拟了入出射侧微透镜高度、孔径对扩散片增益性能的影响。结果表明,出射侧微透镜阵列球冠高度越大增益率越高,入射侧微透镜阵列深宽比在 0.01~0.15 范围内时,可提高扩散片增益率 3%~5%。这种新型的增亮扩散片集成了传统扩散片和增亮片的作用,轻薄且适合大幅面[大于

- University of Science and Technology*, 2006, **29**(4): 12~15  
任智斌, 朱丽思, 曾 皓 等. 微透镜阵列的光刻胶热熔制作技术[J]. 长春理工大学学报, 2006, **29**(4): 12~15
- 17 F. T. O'Neill, J. T. Sheridan. Photoresist reflow method of microlens production. Part 1: background and experiments[J]. *Optik (Jena)*, 2002, **113**(9): 391~404
- 18 Shen Su, Zhou Lei, Wei Guojun *et al.*. Design of distributed micro-area micro/nano-imprinting lithographic system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(4): 807~812  
申 溯, 周 雷, 魏国军 等. 微区微纳米压印技术及设备[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(4): 807~812