

文章编号 1004-924X(2019)07-1426-09

用于汽车抬头显示器的光学增亮膜设计

冯奇斌¹, 武晨晨¹, 李德华², 王梓¹, 吕国强^{2*}

(1. 合肥工业大学 特种显示技术国家工程实验室

现代显示技术省部共建国家重点实验室 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 为了降低直下式背光的厚度并提升亮度, 设计了一种光学增亮膜。基于 Snell 定律设计了对单个 LED 发出光线起均匀照度作用的二维微结构曲线。该微结构曲线是把 LED 看做理想点光源设计并计算的, 但考虑到实际的 LED 是一个正方形发光面, 因此对该微结构曲线进行了优化, 提升了它对实际尺寸 LED 的均匀照度作用。根据 LED 的排布规律提出了一种正六边形蜂窝拼接排布方案, 并进行了仿真分析。仿真结果表明: 使用光学增亮膜的背光中心亮度提升了 172.4%。根据微结构设计结果采用无掩膜直写光刻工艺制作了实际样品并进行了效果测试, 测试结果表明: 中心亮度提升了 136.2%, 厚度降低了 13 mm。采用本文设计的光学增亮膜可以有效地提高背光亮度同时降低背光厚度, 满足汽车抬头显示器的直下式背光亮度高、体积小的要求。

关键词: 直下式背光; 微结构; 增亮膜; 抬头显示器

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192707.1426

Design of optical brightness enhancement film for direct-lit backlight in automobile head-up display

FENG Qi-bin¹, WU Chen-chen¹, LI De-hua², WANG Zi¹, LÜ Guo-qiang^{2*}

(1. *Academy of Photoelectric Technology, National Key Lab of Advanced Display Technology, National Engineering Lab of Special Display Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;*

2. *School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)*

* *Corresponding author, E-mail: guoqiangle@hfut.edu.cn*

Abstract: The direct-lit backlight used in an automobile head-up display must have high brightness and a small size. To reduce the thickness of a direct-lit backlight and improve its brightness, an optical brightness enhancement film is designed. First, a two-dimensional microstructure curve for the uniform illumination of light emitted by a single light-emitting diode (LED) is designed according to Snell's law. A microstructure curve is designed and calculated with an LED as an ideal point light source. Based on the consideration that the actual LED is a square luminous surface, the microstructure curve

收稿日期: 2018-12-29; **修订日期:** 2019-02-07.

基金项目: 安徽省科技重大专项 (No. 17030901053, No. 18030901002); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61805065)

is optimized and its uniform illumination function to a real LED is improved. Then, based on the arrangement of LEDs, a hexagonal honeycomb arrangement is proposed and a simulation analysis is conducted. Simulation results show that the central brightness of use of the optical brightness enhancement film is increased by 173.2%. From the results of the microstructural design, a practical sample is produced by using the maskless direct lithography process and its effect is tested. Test results show that the central brightness is increased by 136.2% and the thickness is reduced by 13 mm. The proposed optical brightness enhancement film can effectively improve brightness and reduce the thickness of backlight units.

Key words: direct-lit backlight; microstructure; brightness enhancement film; head-up display

1 引言

液晶显示器经过多年的发展,已经成为主流的平板显示技术,其应用范围越来越广泛。除了在传统的电视、笔记本、手机等领域的应用,在汽车领域,为了降低驾驶员低头观看仪表盘带来的安全隐患,出现了一种新型的液晶显示器,叫做抬头显示(Head Up Display, HUD),其作用就是把时速、导航等重要信息投影到驾驶员前面的挡风玻璃上,让驾驶员尽量做到不低头、不转头就能看到时速、导航等驾驶信息^[1-2]。由于驾驶信息是投射到前挡风玻璃上,显示的背景是外界环境,为了保证在高环境亮度下驾驶员仍能清晰观看显示信息,HUD 背光模块需要较高的显示亮度,同时汽车的空间范围有限,背光模块的体积应尽量小。

液晶本身不发光,需要背光提供照明光线。目前,由于发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有寿命长、显色性好、光效高、无污染等优点^[3],已经成为主流的背光照明光源。LED 背光的亮度和体积对 HUD 的亮度和体积有直接影响。按照 LED 相对于液晶屏的位置,背光分为直下式和侧出式。为了提高直下式背光的亮度,自由曲面透镜^[4-7]和 LED 反射镜^[8]相继被提出。侧出式背光通常针对导光板进行设计,即在导光板出光面上设计了不同形貌的微结构^[9-12],可以有效提升主视角的亮度。Huang 等则是利用特殊设计的具有微结构的光学膜来提高亮度^[13-17]。对

于 HUD 来说,通常采用直下式背光结构,用于 LED 的透镜高度一般在 6~8 mm 之间,加上光线匀光需要的混光高度,背光模块的体积较大。

本文针对一款用于 HUD 的 LED 直下式背光设计并制备了一种表面具有微结构的光学增亮膜(以下简称光学增亮膜),在提升车载 HUD 直下式背光模块亮度的同时,降低了背光模块的体积。

2 光学增亮膜表面微结构理论设计

光学增亮膜的整体设计原理如图 1(a)所示。采取分段设计的思路,首先确定微结构半径和排布方式,根据无掩膜光刻直写加工工艺、光刻胶性能及单个微结构尺寸确定分段数,基于斯涅耳定律和能量守恒定律设计每段的微结构形貌,最后将所有分段相连,即可得到整体的微结构形貌。

光学增亮膜每段的设计原理如图 1(b)所示,光线在经过微结构底面时发生第一次折射,在微结构的表面发生第二次折射,通过设计光线在第二次折射所经过表面的形貌,控制出射光线的走向,在目标面上形成照度均匀的光斑。为了保证接收面的照度均匀且连续,根据一定角度内光通量的积分与其对应接收面内照度的积分相等的能量守恒关系, $x''_{(i,j)}$ 需要满足如下方程:

$$\frac{\int_0^\alpha \sin(\alpha) d\alpha}{\int_0^{60} \sin(\alpha) d\alpha} = \frac{x''_{(i,j)}}{R}, \quad (1)$$

其中 R 是单个微结构的半径。

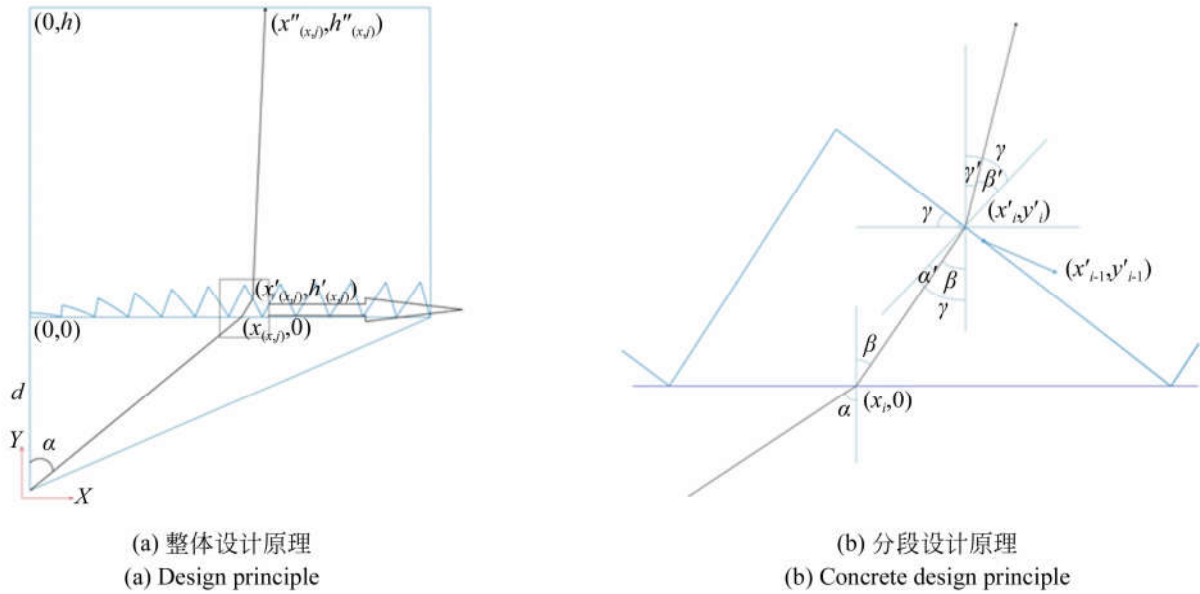


图 1 光学增亮膜表面微结构设计原理

Fig. 1 Microstructure design for optical brightness enhancement film

按照斯涅耳定律和上述能量守恒的关系式以及图 1 中的几何关系可以列出如下方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{(i,j)} = \arctan\left(\frac{x_{(i,j)}}{0+d}\right) \\ \beta_{(i,j)} = \arctan\left(\frac{x'_i - x_i}{y'_i - 0}\right) \\ \gamma_{(i,j)} = \arctan\left(\frac{y'_i - y'_{i-1}}{x'_{i-1} - x'_i}\right) \\ \gamma'_{(i,j)} = \arctan\left(\frac{x''_{(i,j)} - x'_{(i,j)}}{y''_{(i,j)} - y'_{(i,j)}}\right) \\ x''_{(i,j)} = R \times \left[\frac{\int_0^\alpha \sin(\alpha) d\alpha}{\int_0^{60} \sin(\alpha) d\alpha} \right] \\ \alpha_{(i,j)} = \gamma_{(i,j)} - \beta_{(i,j)} \\ \beta'_{(i,j)} = \gamma_{(i,j)} - \gamma'_{(i,j)} \\ \sin(\alpha_{(i,j)}) - 1.5 \times \sin(\beta_{(i,j)}) = 0 \\ 1.5 \times \sin(\alpha'_{(i,j)}) - \sin(\beta'_{(i,j)}) = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

通过上述方程组迭代计算可以得到微结构第 j 段的面型结构, 计算微结构每一段面型时都遵循上述方程组。在计算得到所有段面型后将其首尾相连即可得到整个微结构的面型。

为了计算微结构面型, 首先需要确定微结构的半径和排布方式。图 2 是某款 HUD 直下式背光 LED 的排布, 其 LED 呈正三角形排布, LED 阵列的间距为 7.898 mm。

单个微结构切割拼接后应当覆盖整个背光模块, 而且每个切割后的微结构在设计时的光源位

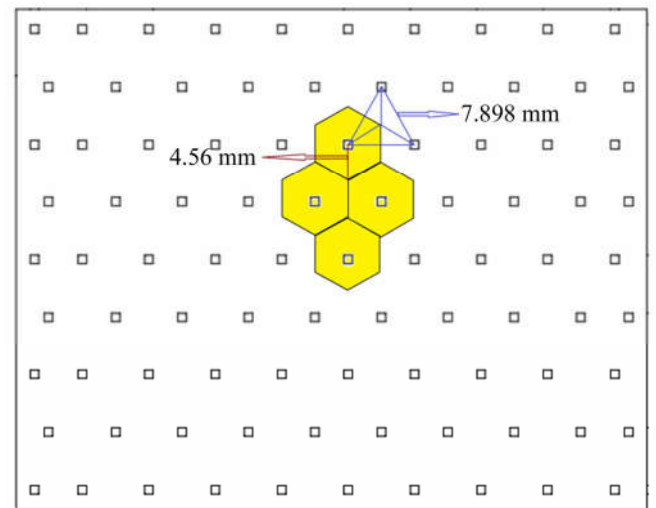


图 2 LED 阵列排布方式

Fig. 2 LED array arrangement

置应当与上图中 LED 位置一一对应, 本文采用正六边形蜂窝排布方式, 该排布可以完整覆盖背光模块, 且每个微结构的光源位置与图中 LED 的位置一一对应, 根据几何关系可以得出微结构的半径为 4.56 mm。

在计算光学增亮膜表面微结构的过程中, 需要确定微结构每段的间距, 考虑到无掩膜直写光刻工艺和现有光刻胶的性能, 加工高度为 $15 \mu\text{m}$ 左右的三维结构效果较好, 那么这里将微结构最大高度限制为 $15 \mu\text{m}$, 分析分段数和微结构最大高度的关系, 不同分段数的最大高度如图 3 所示。如图所示, 当微结构的最大高度为 $15 \mu\text{m}$ 时, 对应微结构分段数为 337 段。确定微结构分段数后

由微结构的边缘向中心计算微结构的整体面型, 计算得到的面型如图 4 所示。

分别如图 6 和图 7 所示。

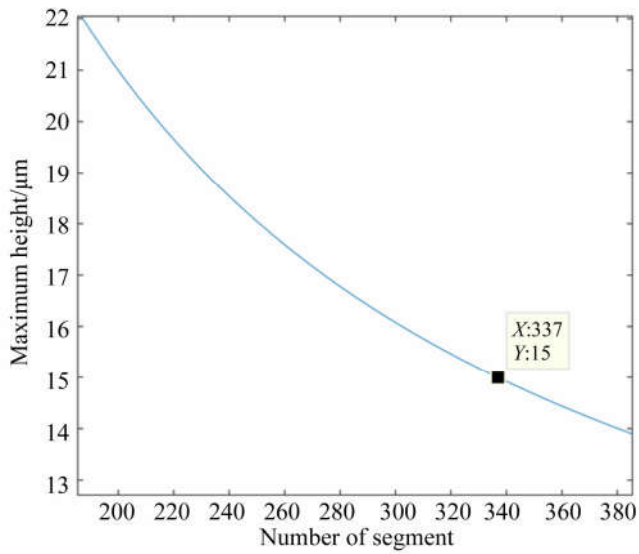


图 3 分段数与最大高度的关系

Fig. 3 Relationship between number of segment and maximum height

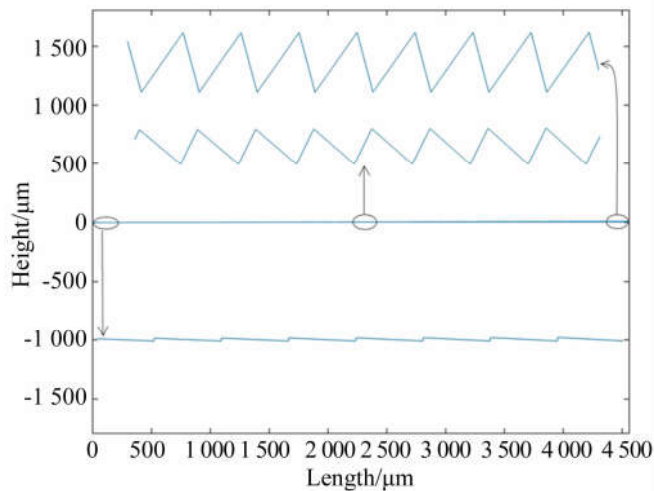


图 4 光学增亮膜表面微结构面型

Fig. 4 Microstructure surface of brightness enhancement film

由图 4 可以看到,微结构的面型近似为三角形,且高度由中心向边缘增加。微结构高度最大处为 13.5 μm 。

3 光学增亮膜的仿真与优化

根据上面所设计的光学增亮膜的微结构面型数据,在光学设计软件 LightTools 中建立仿真模型,模型如图 5 所示。仿真分析了不加光学增亮膜和加光学增亮膜两种情况下的照度分布,结果

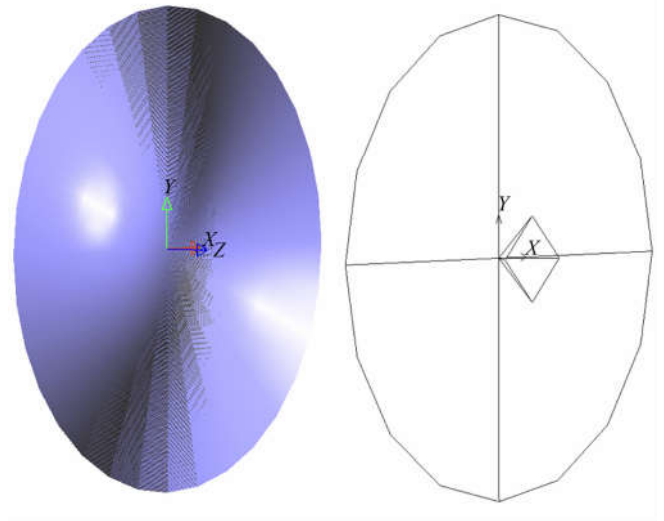


图 5 点光源时光学增亮膜的仿真模型

Fig. 5 Simulation model of optical brightness enhancement film when LED is set to spot light source

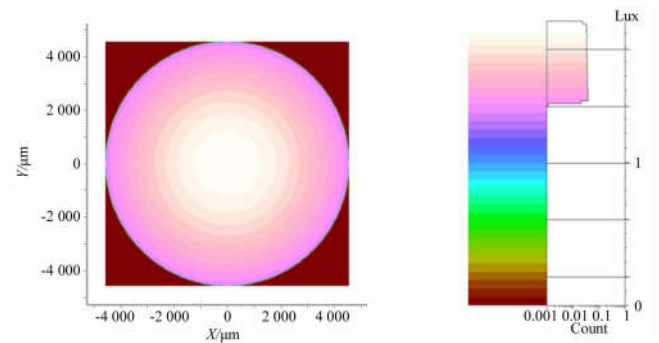


图 6 点光源时未加光学增亮膜的照度分布

Fig. 6 Illuminance distribution without optical brightness enhancement film when LED is set to spot light source

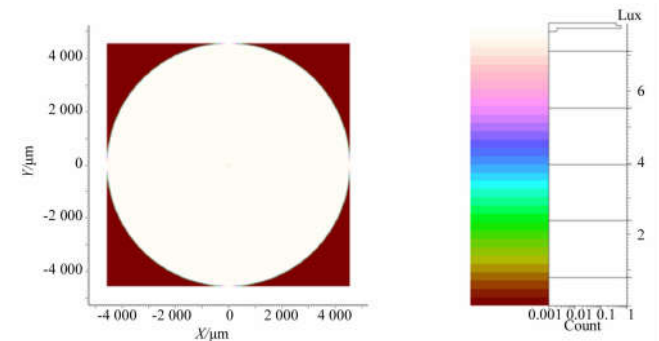


图 7 点光源时加了光学增亮膜的照度分布

Fig. 7 Illuminance distribution with optical brightness enhancement film when LED is set to spot light source

对比图 6 和图 7 发现,在没有使用光学增亮膜时,照度由中心向边缘递减,最高照度为 2.014 0 lux;在使用了光学增亮膜时,整体照度均匀,由中心到边缘的照度几乎没有变化,最高照度为 7.902 5 lux,相比没有使用光学增亮膜的情况,最高照度提升了 292.37%。计算其均匀性(光斑内照度最大值和照度最小值的比值)可得,无光学增亮膜的均匀性为 68.27%,加了光学增亮膜的均匀性提升到 87.84%。

实际的 LED 并非理想的点光源,根据实际情况将 LED 的尺寸改为 1 mm×1 mm 的正方形面光源,其仿真模型如图 8 所示,不加光学增亮膜和加光学增亮膜的照度分布分别如图 9 和图 10 所示。

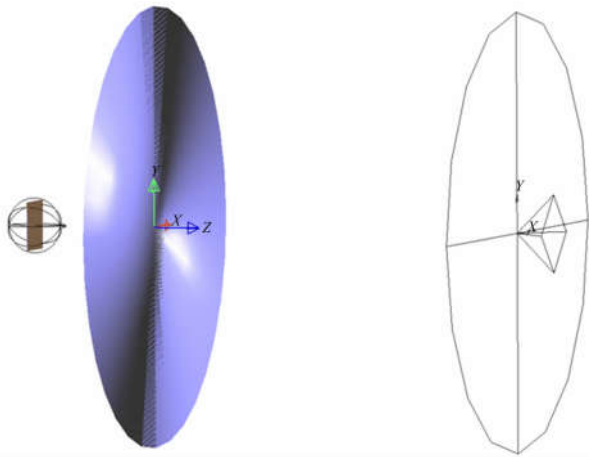


图 8 面光源时光学增亮膜仿真模型

Fig. 8 Simulation model of optical brightness enhancement film when LED is set to planar light source

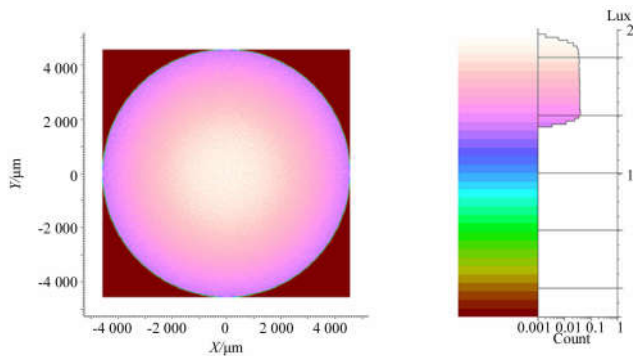


图 9 面光源时未加光学增亮膜的照度分布

Fig. 9 Illuminance distribution without optical brightness enhancement film when LED is set to planar light source

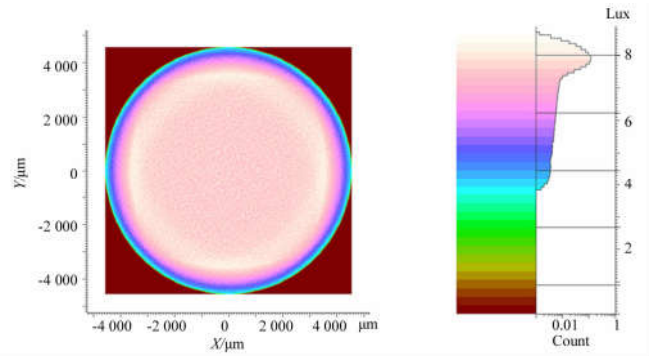


图 10 面光源时加了光学增亮膜的照度分布

Fig. 10 Illuminance distribution with optical brightness enhancement film when LED is set to planar light source

加了光学增亮膜的照度均匀性为 44.86%,比未加光学增亮膜的照度均匀性 65.74%还降低了 20.88%。利用 LightTools 的光线反向追迹功能发现,图 10 中照度不均的原因主要是因为非 LED 面光源中心点发出的光线在经过光学增亮膜后的出射角度和位置与 LED 中心点发出光线的出射角度和位置有偏差,这个偏差与发出光线位置与 LED 中心位置的距离有关,距离越大则偏差越大,而 LED 最边缘位置发出光线的偏差最大,这是图 10 中照度分布均匀性较低的原因,为了降低这个偏差对均匀性的影响,本文采用虚拟点光源法对微结构面型进行优化。

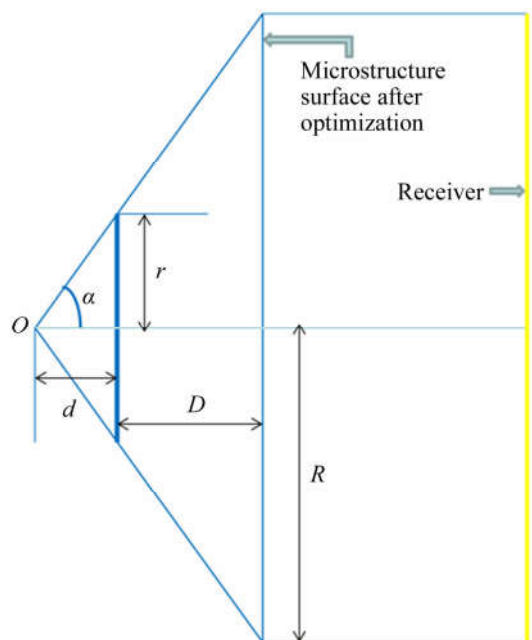


图 11 光学增亮膜微结构面型优化原理

Fig. 11 Optimization of microstructure surface for optical brightness enhancement film

如图 11 所示, r 为 LED 对角线尺寸, LED 尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的正方形, 那么 r 为 $\sqrt{2}\text{ mm}$; D 为 LED 到光学增亮膜的距离, 为 2.054 mm ; α 为最大出光角, 设为 60° 。为了改善 LED 边缘出射光线的误差, 将 LED 投射到假想的点光源 O 上, 根据几何关系, d 为 0.577 mm 。将 O 点作为理想点光源的位置, 计算新的面型且使用实际尺寸的 LED 建模仿真, 仿真照度分布如图 12 所示, 照度不均得到改善。

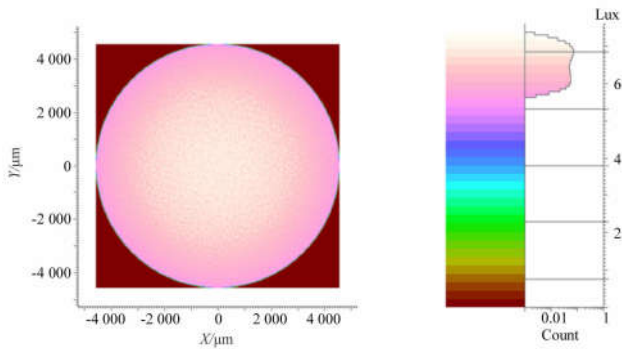


图 12 优化后光学增亮膜的照度分布

Fig. 12 Illuminance distribution with optimized optical brightness enhancement film

根据 LED 灯的实际分布情况, 将单个微结构切割成正六边形并形成 3×3 的阵列进行仿真, 仿真模型和相应的照度分布如图 13 和图 14 所示。光学增亮膜微结构在阵列后的照度分布在切割拼接处存在明显条纹。为了去除该条纹, 添加了一层扩散膜, 仿真结果如图 15 所示。可以看到, 在加入扩散膜后拼接处的条纹消失。在加光学增亮膜时仿真的最大照度为 8.81 lux , 不加光学增亮膜时仿真的最大照度为 3.23 lux , 其照度提升了 172.4% 。

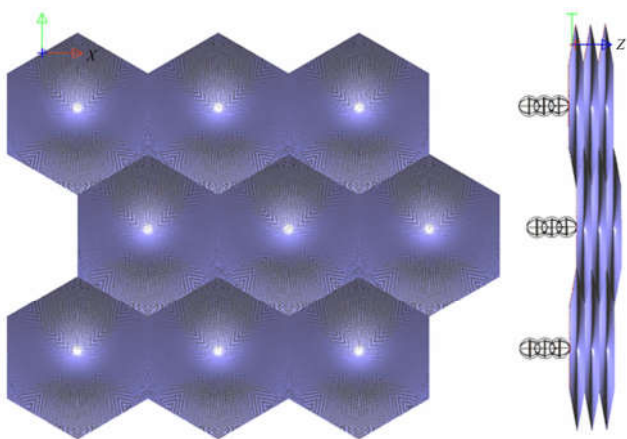


图 13 微结构阵列模型

Fig. 13 Microstructure array model

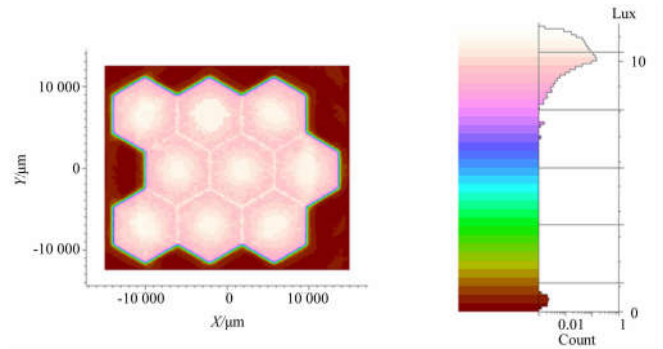


图 14 微结构阵列的照度分布

Fig. 14 Illumination distribution of microstructure array

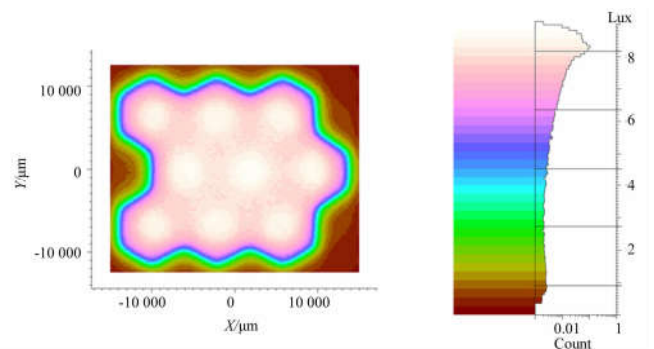


图 15 加扩散膜的照度分布

Fig. 15 Illumination distribution with diffuse film

4 实际制作与测试结果

使用无掩膜直写光刻工艺制作光学增亮膜。在玻璃基片上涂覆 AZ4562 光刻胶, 使用海德堡公司的无掩膜光刻机 MLA100 加工了光学增亮膜微结构面型, 并进行了测试。激光共聚焦显微镜 LSM700 检测光学增亮膜, 其形貌如图 16 所示, 其中第一幅到第三幅图分别是由微结构中心到微结构边缘截取的三部分。

实际制作的光学增亮膜如图 17 所示, 图 18 为实际直下式背光 LED 阵列。没有使用光学增亮膜时, 原有背光采用两层扩散膜, 为了形成均匀的面光源, 两层扩散膜分别放置在距离 LED 灯板 5 mm 和 18 mm 的地方。放入光学增亮膜后, 将一层扩散膜放置在 5 mm 的地方, 就可以形成均匀的面光源, 背光模块厚度可以降低 13 mm 。采用光学增亮膜和一层扩散膜的背光点亮后的效果如图 19 方框内所示, 方框外是只有一层扩散膜的效果, 人眼依稀能看到灯影, 而使用光学增亮膜的

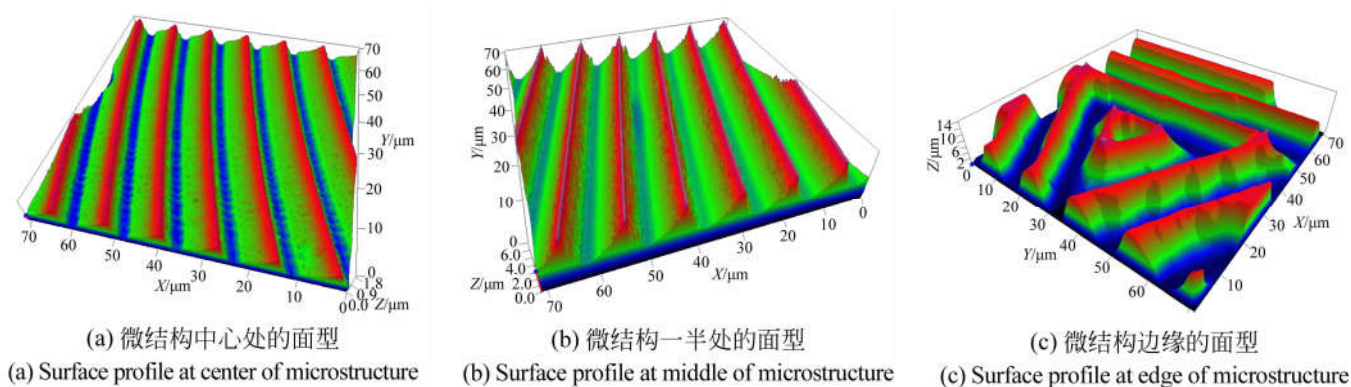


图 16 光学增亮膜共聚焦显微镜测试图

Fig. 16 Test results of optical brightness enhancement film by laser confocal microscope

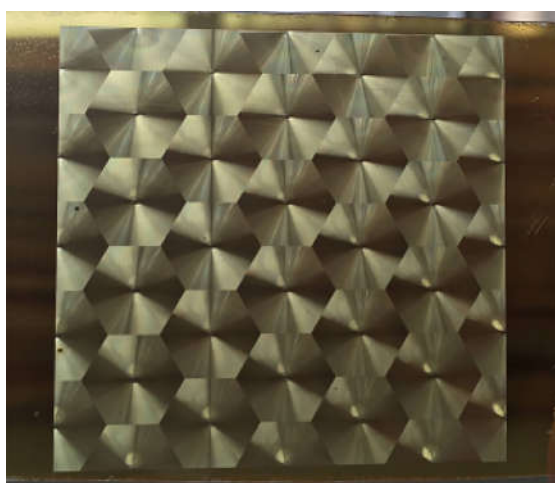


图 17 实际制作的光学增亮膜

Fig. 17 Photo of optical brightness enhancement film

一层涂覆光刻胶(厚度与光学增亮膜一致)的基片,测量衰减后的亮度,结果如表 1 所示。

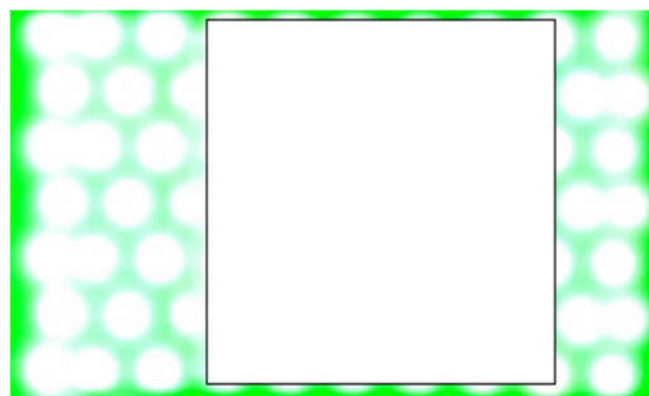


图 19 加入一层光学增亮膜一层扩散膜的效果图

Fig. 19 Backlight unit with one optical brightness enhancement film and one diffuse film

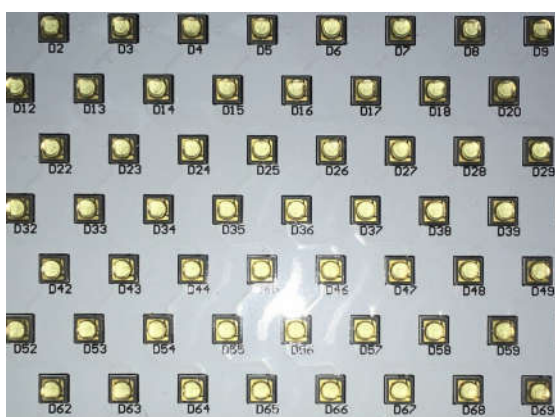


图 18 直下式背光 LED 阵列

Fig. 18 Photo of backlight LED arrays

表 1 透过率测试结果

Tab. 1 Transmittance test results

背光功率 /W	背光亮度 /nit	透过基片后的亮度/nit	透过率 /%
0.25	2.14×10^3	1.36×10^3	63.56
0.50	5.00×10^3	3.20×10^3	64.00
0.75	8.12×10^3	5.19×10^3	63.92
1.00	1.08×10^4	6.88×10^3	63.70
1.25	1.35×10^4	8.61×10^3	63.78

方框内则较为均匀。考虑到采用的 AZ4562 光刻胶是正胶,本身带有颜色,可能对亮度造成影响,故使用日本 TOPCON 公司的亮度色度计 BM-7A 测试了光刻胶在该背光模块下的透过率。测试所使用的背光模块在不同功率下使用双层扩散膜形成均匀面光源的亮度,随后在背光光源加上

通过以上测试推出光刻胶的透过率约为 63.8%。采用两层扩散膜的原有背光中心亮度为 1.95×10^4 nit,使用光学增亮膜和一层扩散膜的中心亮度为 2.94×10^4 nit,背光光源的中心亮度提升了 50.7%。考虑通过纳米压印技术去除^[18]光

刻胶,其中心亮度有望提升 136.2%。

5 结 论

本文设计了一种光学增亮膜,与传统双层扩

散膜结构的直下式背光相比,中心亮度可以提升 136.2%,且背光厚度降低了 13 mm。本文提出的光学增亮膜可以在相同功率下有效提高中心亮度,并降低背光模块的厚度,满足车载显示器亮度高、体积小要求。

参考文献:

- [1] CHAND T, DEBNATH S K, RAYAGOND S K, *et al.*. Design of refractive head-up display system using rotational symmetric aspheric optics[J]. *Optik*, 2017, 131: 515-519.
- [2] AUSTIN R L, DENNING B S, DREWS B C, *et al.*. Qualified viewing space determination of near-eye and head-up displays[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(9): 567-575.
- [3] 李建功. LED 背光模组发光效率的研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2012.
- LI J G. *Study of Optical Efficiency of LED Backlight Module* [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2012. (in Chinese)
- [4] FENG Q B, LI Y N, LI Q G, *et al.*. Secondary optical design for LED backlight luminance improvement of helmet-mounted display[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(6): 577-582.
- [5] GANNON C, LIANG R G. Using spherical harmonics to describe large-angle freeform lenses[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(28): 8143-8147.
- [6] ZHAO Z L, ZHANG H H, ZHENG H, *et al.*. New reversing freeform lens design method for LED uniform illumination with extended source and near field[J]. *Optics Communications*, 2018, 410: 123-129.
- [7] ZHENG J B, QIAN K Y. Designing single LED illumination distribution for direct-type backlight[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(28): 7022-7027.
- [8] KIM B, KIM J, OHM W S. Eliminating hotspots in a multi-chip LED array direct backlight system with optimal patterned reflectors for uniform illumination and minimal system thickness[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8595-8604.
- [9] CHEN B T, PAN J W. High-efficiency directional backlight design for an automotive display[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4386-4395.
- [10] YEON J, LEE J H, LEE H S, *et al.*. An effective light-extracting microstructure for a single-sheet backlight unit for liquid crystal display[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, 22(9): 095006.
- [11] ZHANG R. Directional backlighting system using a light guide with paired microstructures[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(24): 6735-6741.
- [12] PARK S R, KWON O J, SHIN D, *et al.*. Grating micro-dot patterned light guide plates for LED backlights[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 2888-2899.
- [13] HUANG B L, GUO T L. Integrated backlight module to provide a collimated and uniform planar light source[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7307-7313.
- [14] SEKIGUCHI Y, KONNO A, TSUMURA M. Design method for a thin uniform direct backlight using a diffuser plate with a pattern on the surface and optical films[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(3): 482-491.
- [15] TENG T C, LAI W C. Optimization of an optical film for highly collimating the emerging light[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, 11(4): 386-394.
- [16] QIN Z. Luminance enhancement without sacrificing the viewing angle in a direct-lit backlight by addressing the angle-dependent characteristic of the prism film[J]. *Displays*, 2017, 50: 49-56.
- [17] 苏拾, 张国玉, 王凌云, 等. 基于 LED 阵列光源的太阳模拟器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 307-315.
- SU SH, ZHANG G Y, WANG L Y, *et al.*. Solar simulator based on LED array light source[J]. *Opt. precision Eng.*, 2018, 26(2): 307-315. (in Chinese)
- [18] 兰红波, 郭良乐, 许权, 等. 大面积纳米压印光刻

晶圆级复合软模具制造[J]. 光学精密工程, 2018, 26(4): 894-905.

LAN H B, GUO L L, XU Q, *et al.*. Wafer-level

composite mold for large-area nanoimprint lithography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4):

894-905. (in Chinese)

作者简介:



冯奇斌(1970—),女,天津人,副教授,1992年于上海机械学院获得学士学位,1995年于华东工业大学获得硕士学位,2006年于维也纳工业大学获得博士学位,主要从事立体显示、LED背光等方面的研究。E-mail: fengqibin@hfut.edu.cn

通讯作者:



吕国强(1962—),男,浙江新昌人,教授,博士生导师,1982年、1986年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn