

文章编号 1004-924X(2024)09-1371-13

# 热压印成型复合微透镜阵列的微光学照明特性

胡满凤<sup>1</sup>, 李磊<sup>2</sup>, 谢晋<sup>2\*</sup>

(1. 广州铁路职业技术学院 电气工程学院, 广东 广州 511300;

2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**在LED照明中,光线分布不均产生的眩光及光线中的紫外光、蓝光成分容易造成视觉疲劳和眼睛损伤,目前主要是以调节光源为主,纳米级光波段调节的表面结构加工成本较高。因此,利用热压印快速成型技术开发了一种微米尺度的复合微透镜阵列导光板,探究健康照明的复合微透镜尺度效应。首先分析微棱镜表面小微透镜的深宽比与反射电场分布的关系,然后研究导光板的微结构参数对漫反射率、镜面反射率和透射率的影响。最后,对比市面上丝网印刷微点、微棱镜阵列等结构导光板,研究复合微透镜微米尺度对照度、均匀度等微光学性能的影响。分析表明:当小微透镜深宽比在0.6~1内时,紫外光和蓝光的反射面有更小的反射电场变异系数,说明其漫反射大。实验结果表明:热压印技术可以在4 s内将微透镜高5~30  $\mu\text{m}$ 和微棱镜高10~80  $\mu\text{m}$ 的复合微透镜阵列导光板加工成型;照度均匀度随着小微透镜深宽比的增大而增大,照度分别比微棱镜和丝网印刷微点阵列提高45%和83%;与微棱镜相比,紫外光和蓝光的漫反射率分别提高8%和18%,镜面反射率下降80%~83%。控制复合微透镜的深宽比可以减少照明眩光,抑制紫外光和蓝光。

**关键词:**复合微透镜阵列;热压印微成型;微光学性能;健康照明

**中图分类号:**TH74;TN383.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243209.1371

## Micro-optical illumination properties of hierarchical microlens arrays formed by hot-embossing

HU Manfeng<sup>1</sup>, LI Lei<sup>2</sup>, XIE Jin<sup>2\*</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangzhou Railway Polytechnic, Guangzhou 511300, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

\* Corresponding author, E-mail: jinxie@scut.edu.cn

**Abstract:** In LED lighting, glare from uneven light distribution, along with ultraviolet and blue light, can lead to visual fatigue and eye damage. Currently, adjustments are primarily made to the light source, and modifying the surface structure at the nanoscale is costly. To address this, a microscope-scale hierarchical microlens array light guide plate (LGP) has been developed using hot-embossing rapid prototyping technology to examine the impact of the scale of hierarchical microlenses on health lighting. The study first analyzes the relationship between the microlens aspect ratio and the distribution of the reflected electric field on the surface of the microprism. It then explores how the microstructure parameters of the LGP affect diffuse

收稿日期:2023-10-27;修订日期:2023-12-16.

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金资助项目(No. 2020A1515111200);广州铁路职业技术学院新引进人才科研启动项目(No. GTXYR2319);国家自然科学基金资助项目(No. 52375493)

and specular reflection, as well as transmission. The study further compares the effects of the microscale of hierarchical microlenses on micro-optical properties such as illuminance and uniformity with existing market solutions like screen-printed microdots and microprism arrays. Findings indicate that the reflected light monitoring surface for ultraviolet and blue light shows a smaller variation in the reflection electric field when the microlens aspect ratio is between 0.6-1, suggesting higher diffuse reflection. Experiments demonstrate that the hierarchical microlens array LGP, with microlens heights of 5-30  $\mu\text{m}$  and microprism heights of 10-80  $\mu\text{m}$ , can be produced in just 4 seconds. Illuminance uniformity improves as the microlens aspect ratio increases, with illuminance 45% and 83% higher than that of the microprism and screen-printed microdot, respectively. Moreover, compared to the microprism, the diffuse reflectance of ultraviolet and blue light is 8% and 18% higher, respectively, and the mirror reflectance is 80%-83% lower. Thus, controlling the aspect ratio of the hierarchical microlens can effectively reduce lighting glare and mitigate the effects of ultraviolet and blue light.

**Key words:** hierarchical microlens array; micro hot-embossing; micro-optical performance; health lighting

## 1 引言

在光学照明领域,LED灯因其高效的发光效率带动照明在节能环保上大幅度前进<sup>[1]</sup>。然而,信息化时代下市场对健康护眼照明的需求愈发凸显。然而,由于LED的发光角度为 $120^\circ$ ,中心光线过于强烈会引起眩光,尤其是高亮度的蓝光对眼球有害<sup>[2]</sup>。为了减少眩光程度,可以通过调整LED发光参数,或者通过纳米透镜或纳米颗粒增加漫反射率来实现<sup>[3]</sup>,但纳米器件的制造成本高。在LED灯罩经表面涂覆漫反射颗粒可形成良好的漫反射效果,但其出光效率低<sup>[4]</sup>。

复合微透镜阵列具有三维紧凑的空间结构,小微透镜分布在平面微结构的表面,在LED照明、传感识别等领域具有良好的应用前景<sup>[5]</sup>。受昆虫复眼的启发,仿生复合微透镜阵列具有优异的抗反射功能<sup>[6]</sup>。此外,PDMS材料表面的微平台和微半球结合具有高光利用效率和宽视角<sup>[7]</sup>。复合微透镜阵列比平面微结构更能提高LED的出光效率,但复杂三维微结构的微光学性能尚不明确<sup>[8]</sup>。

导光板(Light Guide Plate, LGP)的微结构阵列主要包括丝网印刷油墨微点阵列、喷墨印刷微条纹阵列、激光加工微结构阵列等形式<sup>[9]</sup>。丝网印刷技术工艺成熟,但油墨微点易挥发<sup>[10]</sup>。飞

秒激光用于在石英玻璃上制造微透镜阵列,但 $\text{CO}_2$ 激光抛光耗时较高<sup>[11]</sup>。高质量的微透镜可以通过磨削制造,但它效率较低,难以大批量生产<sup>[12]</sup>。由于这些传统的微结构仅限于二维平面,其光提取效率和防眩光性能的提升空间有限。在复合微结构制造方面,分步压印法可以制造出具有超强黏附效果的复合微结构阵列,但制备时间超过10 min<sup>[13]</sup>。通过光刻结合聚合物拉伸回弹可以得到复合微结构的减反膜,但光刻效率低下且会产生光刻胶等废料污染<sup>[14]</sup>。这些工艺都难以快速、经济地加工复合微透镜阵列。

本文研究了复合微透镜阵列导光板的出光性能,并提出一种采用微结构衬体和微槽型模芯一起快速热压印成型复合微透镜阵列的方法。该方法制备的复合微透镜阵列的照度、均匀性和亮度均优于微棱镜阵列、复合微透镜及市场上的导光板。

## 2 仿真分析

如图1所示,光滑平面容易产生镜面反射,光线集中于一个区域。在导光板上加工复合微透镜阵列,由于光线在复合微透镜结构表面不同位置的折射、反射情况各不相同,有助于提高其漫反射率和出光均匀性。

复合微透镜反射电场的时域有限差分(Fi-

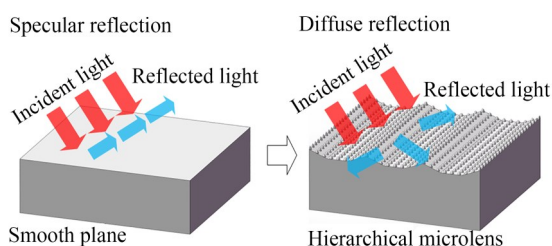


图1 微结构上的漫反射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of diffuse reflection on micro-structure

nite-Difference Time-Domain, FDTD) 仿真分析模型如图2所示。在仿真中,将相位为 $0^\circ$ 的平面光源置于复合微透镜上方。电磁波源设置为 $0.2\sim 0.4\ \mu\text{m}$ 的紫外光、 $0.4\sim 0.48\ \mu\text{m}$ 的蓝光、 $0.4\sim 0.78\ \mu\text{m}$ 的可见光。将功率监测器设置为反射光监测面,位于光源上方。网格间距设置为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。

模拟的复合微透镜由V形微棱镜基底及其表面抛物球形小棱锥微透镜阵列组成(见图2)。 $d_2$ 为小微透镜最低点与其对称轴的距离的两倍, $\zeta$ 为深宽比。依据微棱镜的光学性能,微棱镜角 $\theta$ 设置为 $120^\circ$ ,微棱镜高度 $h$ 设置为 $65\ \mu\text{m}$ <sup>[15]</sup>。根据实际热压印的成型情况,小微透镜宽度 $d_2$ 和深宽比 $\zeta$ 分别设置为 $30\ \mu\text{m}$ 和 $0.2\sim 1$ 。小微透镜的间距 $s_2$ 为宽度 $d_2$ 的1.7倍。复合微透镜材料设置为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率为1.49。

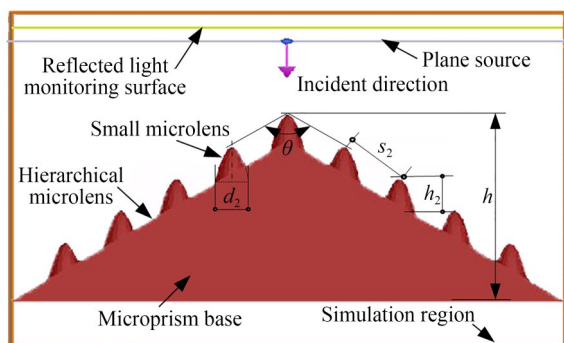


图2 复合微透镜反射电场的FDTD仿真分析模型

Fig. 2 FDTD simulation analysis model of reflected electrical field of hierarchical microlens

平面、微棱镜和复合微透镜的反射电场强度分布如图3所示。结果表明,无论是何种波段的光波,平面结构的反射电场各处均匀。受微棱镜

侧面的影响,反射电磁波经反射后会向两边传播,因此,中间的电场强度与两侧不同,紫外光中间部分的强度高于两侧,蓝光和可见光中间部分的强度低于两侧。两侧的光强分布呈现条纹状,这表明微棱镜对于光线传播的改变能力很大。复合微透镜阵列的反射电场呈现点状分布,尤其中间区域的反射电场强度相比于微棱镜的更加均匀,这是由于复合微透镜阵列中小微透镜对入射光线方向的改变较大。小微透镜阵列可以在大微棱镜阵列折射、反射光线的基础上再次折射、反射光线。因此,在导光板的应用中,复合微透镜由于受小微透镜的影响,光线入射后复合微透镜的漫反射现象更加明显。适当引入小微透镜有利于提高漫反射率。

为了反映结构的漫反射情况,微结构电场强度变异系数 $V$ 的定义如下:

$$V = \frac{\text{Std}(Re(E))}{\text{Ave}(Re(E))}, \quad (1)$$

其中: $\text{Std}(Re(E))$ 是反射光线监测平面的电场强度方差, $\text{Ave}(Re(E))$ 是电场强度平均值。

图4为不同结构和深宽比下反射平面的电场强度变异系数。光滑平面反射的变异系数 $V$ 几乎为0,这是因为面光源传播时遇到平面发生反射,其传播方向不发生改变,导致光线接收平面内所有地方的电场强度差异不大。对于蓝光和紫外光,微棱镜的 $V$ 显著增大,这是因为光在微棱镜表面发生了镜面反射,导致两侧的电场强度显著大于中间。此外,随着复合微透镜阵列深宽比的增大,蓝光和紫外光的变异系数整体趋势呈现下降状态。这是由于微棱镜表面的小微透镜阵列会折射和反射光线的传播方向,电磁波会向四周漫反射,整体反射到正上方接收面两侧的电场强度更均匀。从而使得其变异系数相对下降。当 $\zeta=0.6\sim 1$ 时,变异系数较小,小微透镜对光线传播具有较大的改变。可见光的变异系数显著小于紫外光和蓝光。复合微透镜难以减少可见光波段的变异系数,这是因为可见光波长较长,折射率小,因此小微透镜对其光线的改变能力弱。

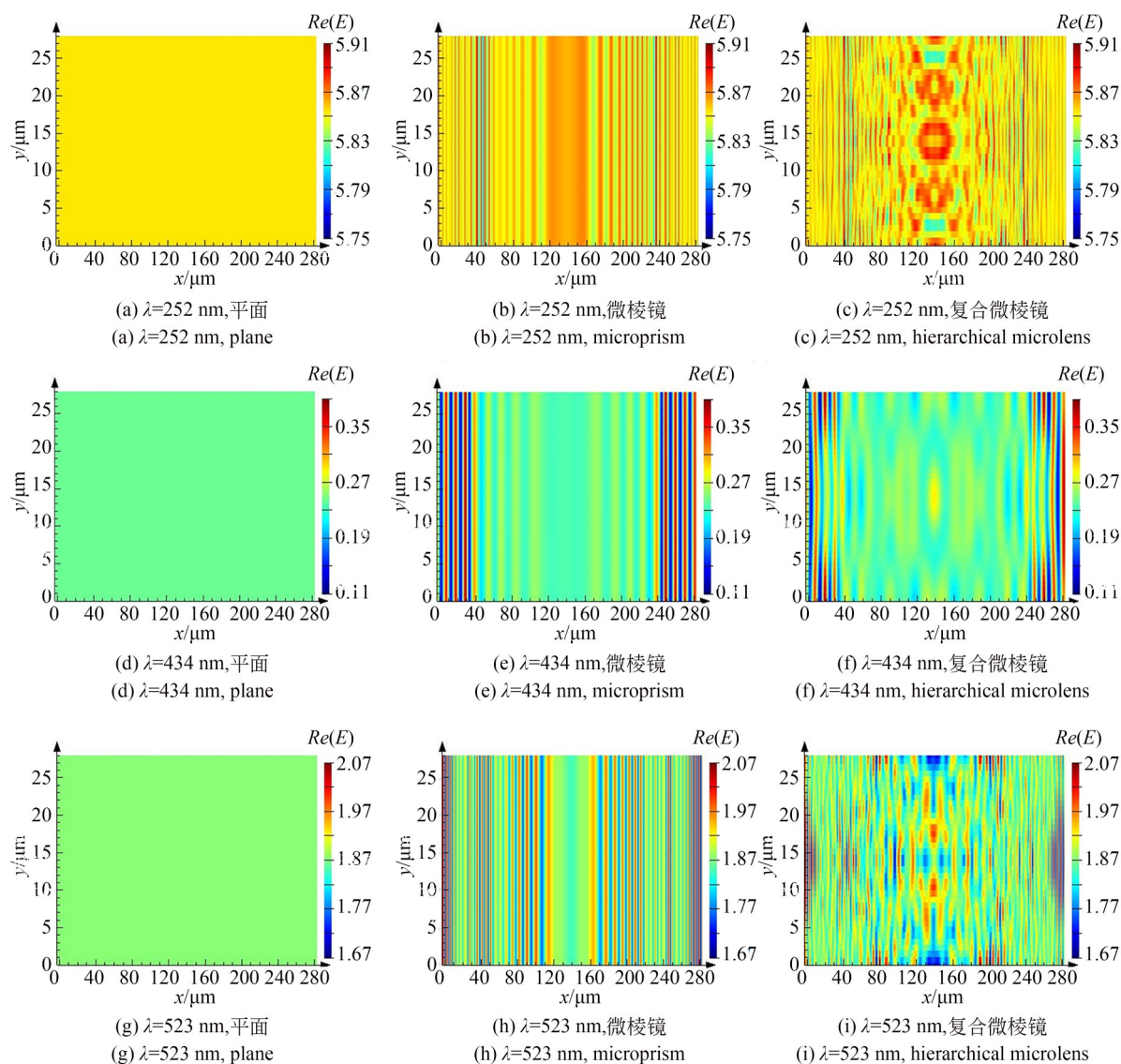


图 3 不同波段下平面、微棱镜和复合微透镜的反射电场强度分布

Fig. 3 Distribution of reflected electric field intensity of plane, microprism and hierarchical microlens in different wavebands

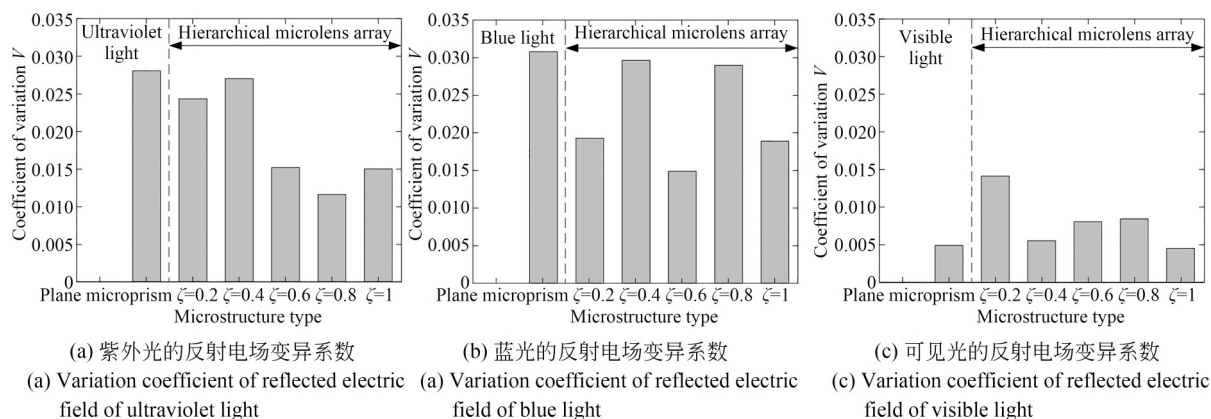


图 4 光滑平面、微棱镜和复合微透镜反射电场的平均强度

Fig. 4 Average intensity of reflected electrical field of smooth plane, microprism and hierarchical microlens

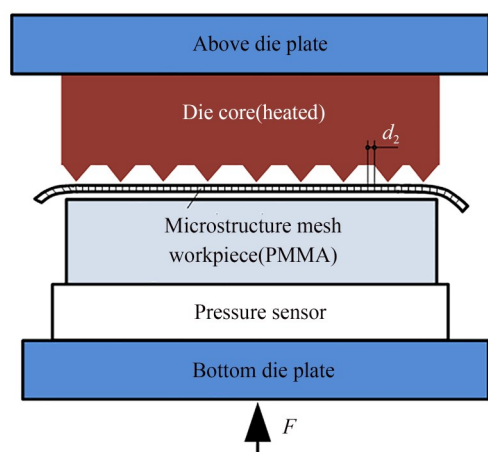
### 3 复合微透镜阵列的热压印及微光学测试

#### 3.1 热压印实验装置及方法

图5为热压印复合微透镜阵列的实验装置及原理。在实验过程中,将微结构衬体、工件和压力传感器从上到下放置在底部模板上。模芯固定在上模板上,并通过上模板加热。采用尺寸为 $85\text{ mm}\times 85\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 的PMMA聚合物工件,其玻璃化转变温度为 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,折射率为1.49。使用微磨削加工的微槽阵列模芯,模芯材料为S136H模具钢,微槽的角度为 $120^{\circ}$ ,高度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ,微槽与微槽连接处有微平台<sup>[16]</sup>。微结构的衬体材料为尼龙(聚酰胺纤维),表面分布方形微

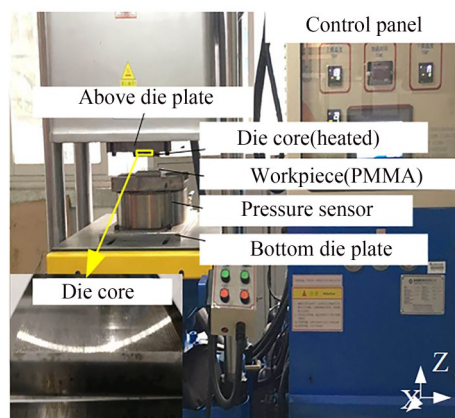
孔阵列,不同方向的尼龙丝编织而成。微孔宽度 $d_2$ 分别为 $75\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ ,平均微孔间距 $s_2$ 为微孔宽度 $d_2$ 的1.7倍。

实验采用非等温热压印法。首先在液压驱动下,使下模板相对于上模板移动,然后进行热压印微成型加工,加工过程主要包括加载、保压和脱模,具体的实验控制过程和参数可参考前期研究<sup>[16]</sup>。保压时间设置为 $1\sim 4\text{ s}$ ,加载、保压和脱模在线加工的总时间可以在 $15\text{ s}$ 内完成。脱模后,将工件与衬体一起离线自然冷却 $5\text{ min}$ 后,撕下衬体。自然冷却过程设备可以加工其他工件。最后,利用扫描电子显微镜 Zeiss Merlin 和轮廓扫描仪 Talysurf CLI1000 对复合微透镜阵列的形貌和尺寸进行测量,取3次测量的平均值作为最终值。



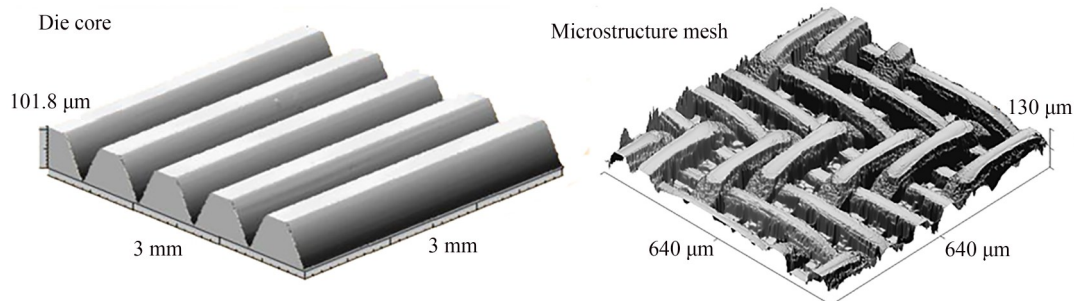
(a) 复合微透镜阵列热压印成型示意图

(a) Schematic diagram of hot embossing hierarchical microlens array



(b) 复合微透镜阵列热压印成型设备

(b) Hot embossing experiment devices for hierarchical microlens array forming



(c) 模芯和微结构衬体的表面形貌

(c) Surface topography of die core and microstructure mesh

图5 热压印复合微透镜阵列实验装置及原理

Fig. 5 Experiment devices and schematic diagram of hot embossing hierarchical microlens array

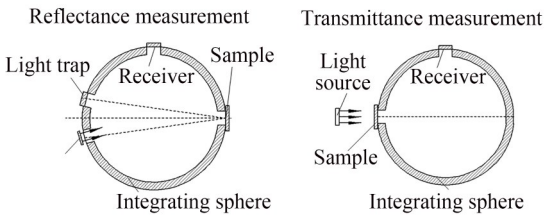
快速热压印可以在短时间内快速大面积成型,较铣削、刻蚀等工艺生产效率高,对比注塑需要将聚合物加热至熔融状态更节能便捷,故该工艺方法成本较低,适合大规模批量生产。虽然模芯微结构决定了热压印微结构的大体形貌,但是形状尺寸精度受工艺参数的影响较大,改变工艺参数会成型不同尺寸的微结构。因此,需要研究不同复合微透镜阵列的光学照明特性,探究微结构参数对漫反射率、镜面反射率和透射率的影响。

3.2 复合微透镜阵列的微光学性能测试

微光学性能测试设备及原理如图 6 所示。使用紫外/可见/近红外分光光度计 LAMB-DA950 测试微棱镜和复合微透镜阵列的漫反射、镜面反射率和透射率。设光源的光通量为  $I_A$ ,将样品放置在积分球后端,接收器接收样品反射的光通量  $I_R$ 。然后,打开光陷阱检测剩余的漫反射光通量  $I_m$ 。由于可以通过关闭光陷阱来测试全反射率,因此,通过从全反射率  $R$  中减去漫反射率  $m_1$  得到镜面反射率  $m_2$ 。在检测透过率  $c$  时,光源通过微透镜阵列进入积分球,然后通过积分球接收透射光通量  $I_c$ (见图 6(a))。相关参数定义如下:

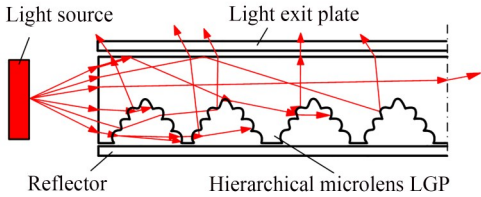
$$\begin{cases} m_1 = I_m / I_A \\ R = I_R / I_A \\ m_2 = R - m_1 \\ c = I_c / I_A \end{cases} \quad (2)$$

为了检测复合微透镜阵列导光板的照明性能,在 LED 显示灯的中间安装了一块尺寸为  $85\text{ mm} \times 85\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  的复合微透镜阵列导光板,测试其微光学性能。导光板无微透镜一侧面向出光板,复合微透镜阵列一侧面向反射面,左右两侧分别放置 2 个 LED 灯条光源,每个光源的总功率为  $3\text{ W}$ (见图 6(b))。由于市面导光板的加工工艺不同,随机选取每种工艺加工的 5 个导光板进行对比,采用 9 点法进行测量<sup>[17]</sup>。测量平均照度  $I_{av}$  和平均照度均匀度  $U$ 。此外,还测试了丝网印刷加工的微点阵列 LED 和复合微透镜阵列 LED 灯的亮度。首先,将 LED 灯面法线与亮度计探头安装在同一轴线上,LED 灯与亮度计探头之间的距离保持在  $1.5\text{ m}$ ,然后将灯的发光面划



(a) 导光板的反射和透射测量原理

(a) Reflectance and transmittance measurement principle for LGP



(b) 装有复合微透镜阵列导光板的 LED 灯

(b) LED lamp equipped with hierarchical microlens array LGP

图 6 微光学性能测试设备及原理

Fig. 6 Micro-optical performance testing equipment and principle

分为 9 个相等的区域,最后测量各中心区域的亮度。

表征微透镜导光板出光的参数包括照度  $I$ ,照度均匀度  $U$  和出光效率  $q$ 。其中,  $I$  表示单位面积接收到的可见光光通量,  $U$  定义为最小照度  $I_{\min}$  与平均照度  $I_{av}$  之比<sup>[18]</sup>,  $q$  是出光面光通量与光源光通量之比。

如图 7 所示,市面上的导光板主要有丝网印刷微点阵列、喷墨打印微条纹、刻蚀微坑阵列和铣削微网格阵列。本文将复合微透镜阵列导光板的出光效果与以上 4 种结构导光板做对比,旨在从微结构的角度进一步提高蓝光和紫外光的抑制效果。这 4 种导光板的微结构参数如表 1 所示。表中,尺寸“Size”定义为圆形微结构的直径

表 1 市面上导光板的微结构参数

Tab. 1 Microstructure parameters of LGP on market (μm)

| Type                       | Structure | Size | Gap   | Height |
|----------------------------|-----------|------|-------|--------|
| Screen-printed microdot    | Circle    | 480  | 1 360 | 25     |
| Inkjet-printed microstripe | Stripe    | 300  | 700   | 25     |
| Etched-micropit            | Circle    | 330  | 450   | 36     |
| Milled-microgrid           | Grid      | 460  | 2 500 | 30     |

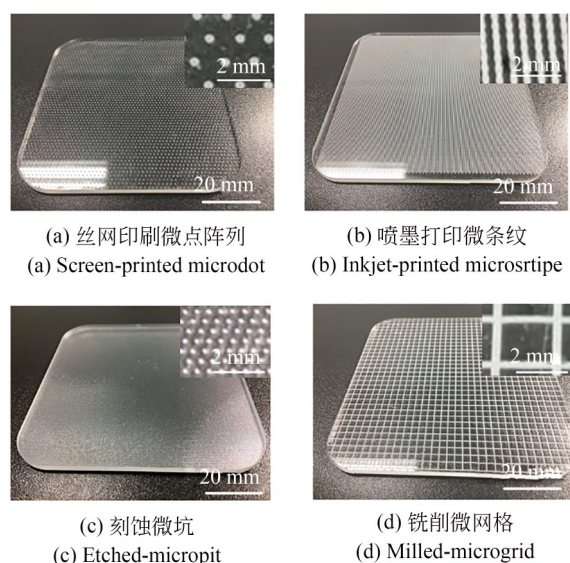


图7 市面上导光板的表面形貌

Fig. 7 Surface topography of light guide plate on market

或条纹、网格微结构的宽度,间距“Gap”为两个微结构之间的距离。

## 4 实验结果及讨论

### 4.1 热压印复合微透镜阵列形貌

热压印微棱镜阵列和复合微透镜阵列的表面形貌如图8所示。热压压力为59 kN,保温时间为4 s,比传统的等温热压最短时间45 s还要短<sup>[19]</sup>。热压印微棱镜的整体外观是透明的,而复合微透镜阵列呈现乳白色,这是因为复合微透镜表面的小微透镜增加了漫反射率,其表面粗糙度在150~250 nm(见图8(a)和8(b))。当模芯温度为110 ℃时,微透镜阵列高度 $h$ 达到65  $\mu\text{m}$ 左右,复合微透镜阵列尺寸为: $h=65 \mu\text{m}$ , $d_2=30 \mu\text{m}$ , $h_2=18 \mu\text{m}$ , $\zeta=0.6$ 。调整工艺参数可以热压印成型微透镜高5~30  $\mu\text{m}$ 和微棱镜高10~80  $\mu\text{m}$ 的复合微透镜阵列。结果表明,微结构衬体辅助微成型的复合微透镜高度 $h$ 比微棱镜阵列的略小。

### 4.2 微透镜尺寸对漫反射的影响

图9显示了不同微透镜阵列的漫反射率 $m_i$ 与光波长 $\lambda$ 的关系。结果表明,无微透镜的光滑平面几乎没有漫反射,且 $h=10 \mu\text{m}$ 的复合微透镜的漫反射也很低,这可能是因为整个复合微透镜的高度较低且微透镜体积较小。与 $h=65 \mu\text{m}$ 和 $h=80 \mu\text{m}$ 的复合微透镜阵列相比,前者的漫

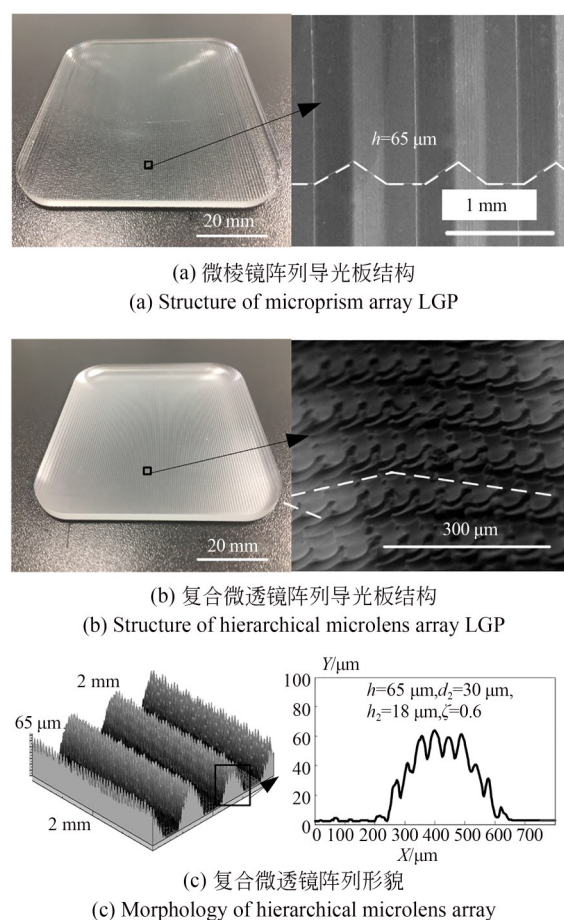


图8 热压印微棱镜与复合微透镜阵列的表面形貌

Fig. 8 Surface morphologies of hot-embossed microprism and hierarchical microlens array

反射率略高于后者,这是由于表面小微透镜的平均深宽比更高。这与仿真深宽比 $\zeta=0.6\sim 1$ 时复合微透镜阵列反射表面的变异系数更小。

高度为 $h=65 \mu\text{m}$ 的复合微透镜在紫外光谱波段的平均漫反射率 $m_i$ 比丝网印刷微点阵列、微棱镜阵列分别提高13%和8%(见图9(a)),在蓝色光谱波段的平均漫反射率比丝网印刷微点阵列和微棱镜阵列和分别高33%和18%。这与仿真中复合微透镜阵列接收面的变异系数要小于微棱镜阵列的结果一致,通过仿真结构可以基于反射电场强度来模拟预测实际复合微透镜阵列的漫反射特性。因此,复合微透镜可以有效地散射高能紫外光和蓝光,从而在一定程度上抑制皮肤癌和眼外伤。

在可见光谱波段,平均漫反射比微棱镜阵列和丝网印刷微点阵列分别高16%和21%(见图9

(b))。红外光平均漫反射率比微棱镜高 24%，比丝网印刷微点阵列高 23% (见图 9(c))。因此，可

利用复合微透镜对红外光的漫反射性能来减少其产生的热效应。

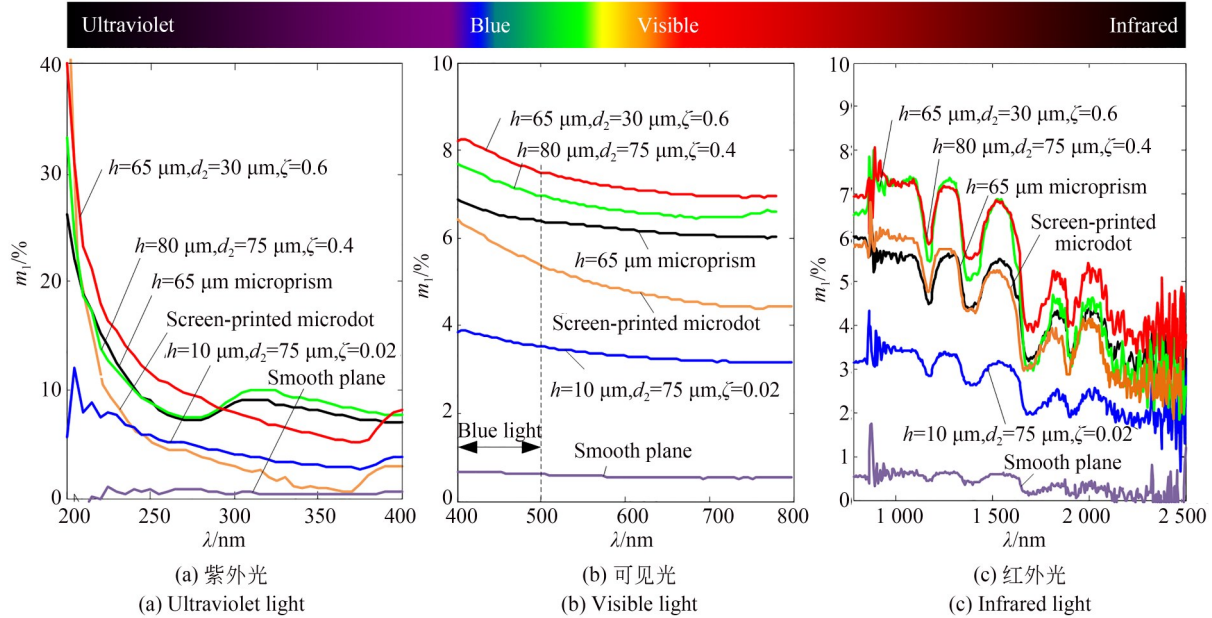


图 9 不同微透镜阵列的漫反射率与波长的关系

Fig. 9 Diffuse reflectance of different microlens arrays versus light wavelength

#### 4.3 微透镜尺寸对镜面反射率的影响

不同微透镜阵列的镜面反射率  $m_s$  随光波长  $\lambda$  的变化如图 10 所示。结果表明,无微透镜光滑平

面在紫外、可见光和红外光谱上的平均镜面反射率分别为 5.5%, 7.8% 和 6.9%。丝网印刷微点阵列在紫外、可见光和红外光谱的镜面反射率分

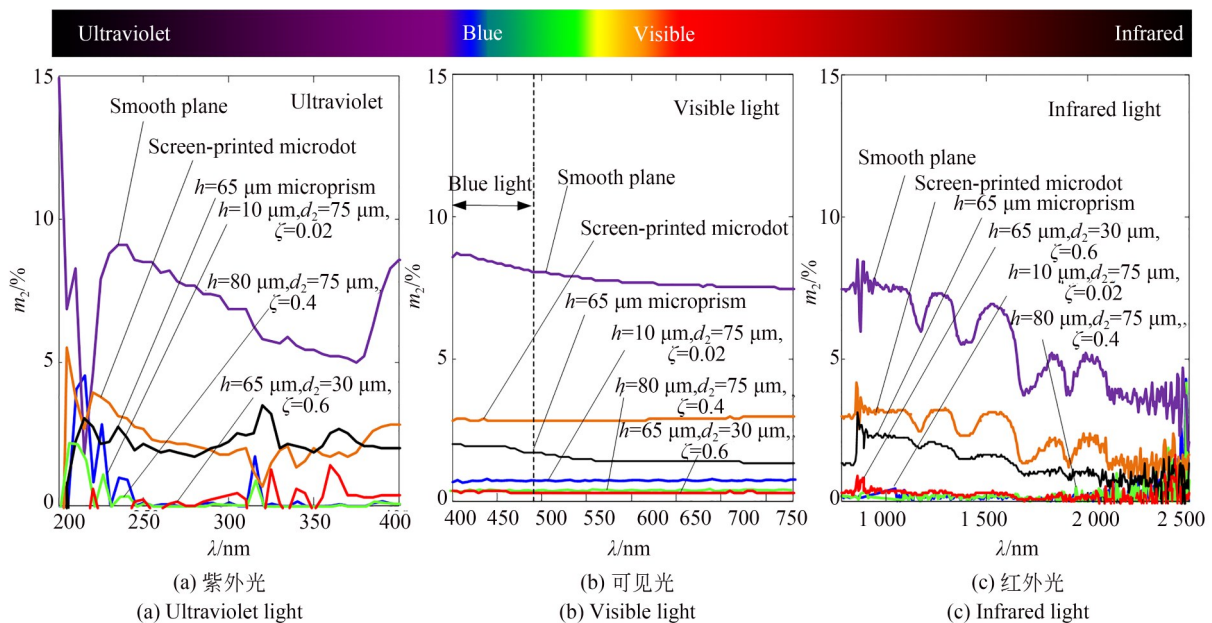


图 10 不同微透镜阵列的镜面反射率随波长的变化

Fig. 10 Specular reflectance of different microlens arrays versus light wavelength

别为2.4%,2.8%和2.0%。微棱镜阵列在各光谱上的镜面反射率约为1.5%,深宽比的升高有助于减少镜面反射率,深宽比为0.6的复合微透镜阵列的镜面反射率在0~1.2%,相比微棱镜大幅下降。该结果低于纳米光刻和反应离子蚀刻处理的蛾眼结构,其镜面反射率在0.1%~3%之间<sup>[20]</sup>。

因此,可以推断复合微透镜阵列可以有效地减少镜面反射,从而减少眩光,特别是在蓝色波段,可以减少对眼睛的伤害。否则,高度集中的蓝光进入眼睛,会对眼睛造成伤害。

#### 4.4 微透镜尺寸对透光率的影响

图11显示了不同微透镜阵列的透射率 $c$ 与光波长 $\lambda$ 的关系。结果表明,微棱镜阵列和复合微透镜阵列的透光率随波长的增加而缓慢降低。当深宽比 $\zeta=0.6$ 时,复合微透镜阵列的透射率最低,分别比微棱镜阵列和无微透镜阵列的光滑平面低18%和23%左右。复合微透镜阵列的透射率随着小微透镜深宽比的减小而增大。

使用复合微透镜阵列可以过滤掉一部分蓝光,有利于保护眼睛。此外,可以通过调整复合微透镜阵列的尺寸来改变透射光强。

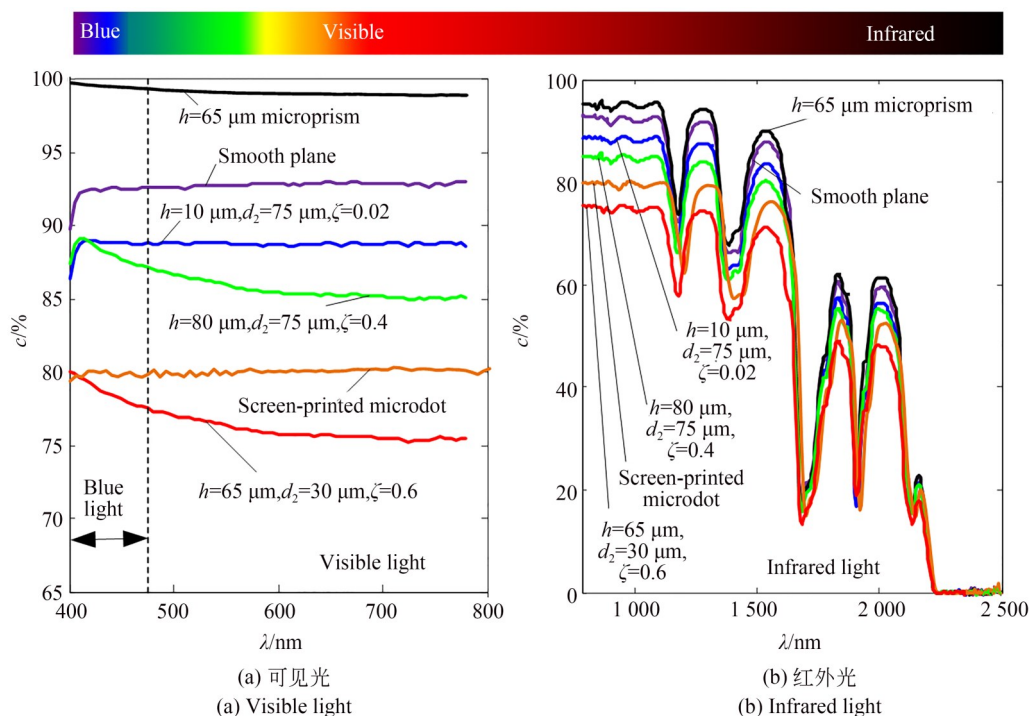


图11 不同微透镜阵列的透射率随波长的变化

Fig. 11 Transmittance of different microlens arrays versus light wavelength

#### 4.5 不同微结构阵列导光板的LED照明性能

图12为不同微结构阵列导光板下LED的平均照度 $I_{av}$ 和照度均匀度 $U$ 。结果表明,复合微透镜导光板的平均照度 $I_{av}$ 最高,微棱镜阵列次之,铣削微网格和丝网印刷的微点阵列导光板的平均照度 $I_{av}$ 最低。复合微透镜( $h=65\mu\text{m}$ ,  $d_2=30\mu\text{m}$ ,  $h_2=18\mu\text{m}$ ,  $\zeta=0.6$ )的平均照度为5300 lx,比微棱镜和丝网印刷微点阵列分别高45%和83%。微棱镜的平均照度比丝网印刷微点阵列高26%。复合微透镜阵列的照度均匀度

$U$ 达到82%,比丝网印刷的微点阵列及其他市面上导光板高约40%。对比发现,漫反射率越大,照度均匀度和平均照度越大。这是因为,漫反射率 $m_1$ 越大代表光线在该结构上各个方向的传播能力较强,因此照度均匀度会更大。由于LED灯是侧面安装的,透射率 $c$ 和镜面反射率 $m_2$ 较大会导致光线导光板在侧面多次反射传播,而多次反射会损失光效,此时平均照度会较低。

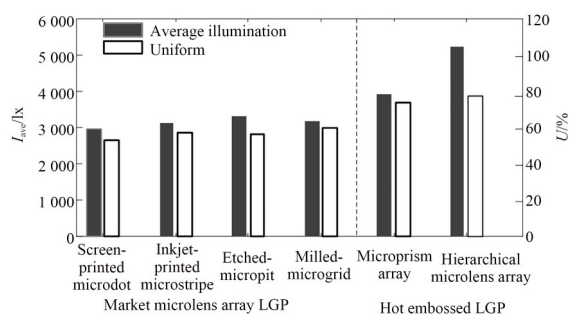


图 12 不同微透镜阵列的平均照度和照度均匀度

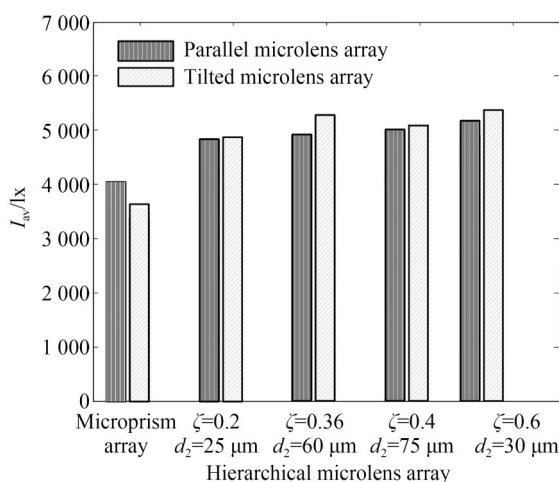
Fig. 12 Average illuminance and illumination uniformity of LED with different microlens array LGP

#### 4.6 复合微透镜尺寸对 LED 照明性能的影响

图 13 显示了采用复合微透镜阵列导光板的 LED 的平均照度  $I_{av}$  和照度均匀度  $U$  与小微透镜

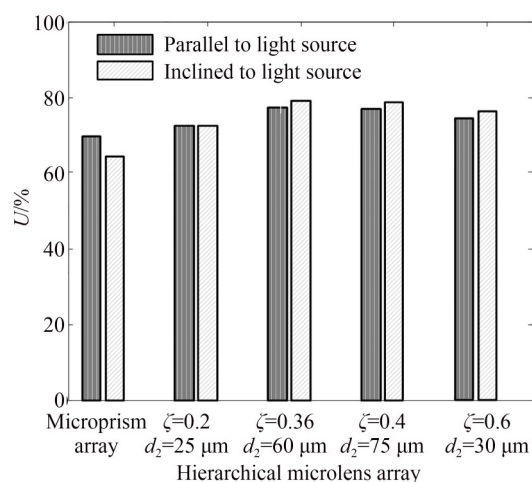
深宽比  $\zeta$  的关系。图中,平行微透镜阵列是指微棱镜或复合微透镜的微棱镜基底平行于导光板侧面,倾斜微透镜阵列是指微棱镜基底与 LED 灯光源所在侧倾斜  $45^\circ$ 。结果表明,复合微透镜的导光板平均照度  $I_{av}$  比微棱镜高约 25%,且随小微透镜深宽比  $\zeta$  的增大而增大(见图 13(a))。光照均匀度  $U$  在 75%~82% 内变化,随小微透镜宽度  $d_2$  的增大而增大(见图 13(b))。与文献报道的均匀度为 42%~79% 的 V 槽型导光板相比<sup>[21]</sup>,其变化范围更小,说明复合微透镜阵列导光板的照度均匀性更高。

倾斜复合微透镜导光板的平均照度  $I_{av}$  和照度均匀度  $U$  比平行复合微透镜 LGP 高 7% 左右。也就是说,小微透镜的分布方向对出光均匀度和照度有很大的影响。



(a) 平均照度与小微透镜深宽比的关系

(a) Average illuminance versus the aspect ratio of small microlens



(b) 照度均匀度与小微透镜深宽比的关系

(b) Illuminance uniformity versus the aspect ratio of small microlens

图 13 采用复合微透镜阵列的 LED 的平均照度和照度均匀度与小微透镜长宽比的关系

Fig. 13 Average illuminance and illumination uniformity of LED with hierarchical microlens array LGP of versus the aspect ratio of small microlens

#### 4.7 复合微透镜阵列导光板的 LED 灯亮度与光效

图 14 显示了丝网印刷微点阵列和热压印复合微透镜阵列导光板的 LED 灯亮度对比结果。结果表明,采用复合微透镜阵列导光板的 LED 灯比采用丝网印刷微点阵列更亮、更均匀。微透镜阵列的宽度  $d_2$  为  $75 \mu m$ ,深宽比  $\zeta$  为 0.4。丝网印刷微点阵列 LGP 的平均亮度为  $5635.48 \text{ cd/}$

$m^2$ ,复合微透镜阵列导光板的平均亮度提高到  $11912.38 \text{ cd/m}^2$ ,提高了 111%。

采用丝网印刷微点阵列导光板的 LED 灯的光通量为  $183.59 \text{ lm}$ ,光效  $q$  为  $33.81 \text{ lm/W}$ 。复合微透镜阵列导光板的光通量和光效率分别为  $266.46 \text{ lm}$  和  $49.25 \text{ lm/W}$ 。与丝网印刷微点导光板相比,光通量提高了 265.46%,光效率提高了 48.25%。

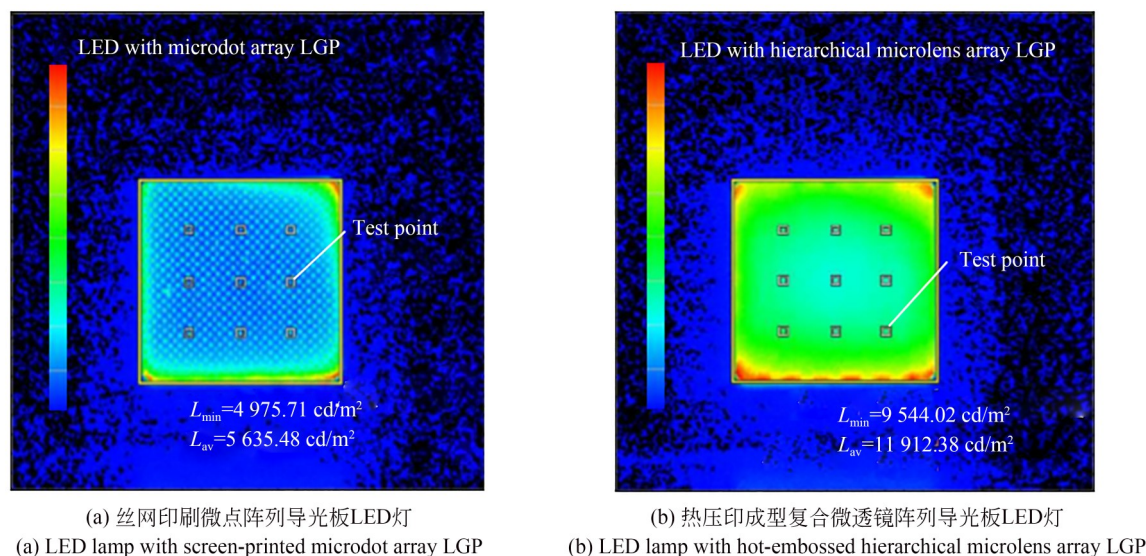


图14 采用丝网印刷微点阵列和热压印复合微透镜阵列的LED亮度

Fig. 14 Brightness of LED with screen-printed microdot array LGP and hot-embossed hierarchical microlens array LGP

## 5 结 论

本文针对不同复合微透镜阵列结构对紫外光、蓝光和可见光波段反射、透射特性进行了研究,并将带有此结构的导光板应用于LED侧入式平板灯中。仿真结果表明,与平面微棱镜相比,复合微透镜的反射电场更均匀,且深宽比在0.6~1时其反射面场强的变异系数较小。微棱镜改变光线传播能力大,小微透镜可以在微棱镜基础上进一步改变光线传播方向,从而达到高漫反射特性。采用微结构衬体与微结构模芯组合可以在4 s内热压印成型深宽比为0.2~1的抛物球形小微透镜的复合微阵列,在线热压印总时长仅为15 s,全程无化学液、切削液污染,可实现大面积、大批量复合微阵列的快速成型。

复合微透镜阵列的镜面反射几乎消失。增大微透镜的深宽比有助于提高微透镜的漫反射率,与微棱镜相比,紫外光和蓝光的漫反射率分别提高8%和18%,镜面反射率下降80%~83%;比市场丝网印刷微点阵列的漫反射率分别提高13%和33%。复合微透镜阵列导光板的平均照度比微棱镜阵列高45%,照度均匀度可达75%~82%。与丝网印刷导光板相比,复合微透镜阵列导光板的光效、平均照度和平均亮度分别提高了48%,83%和111%。复合微透镜阵列结构具有大的表面积比,可以滤除紫外光和蓝光,有利于大功率LED节能散热,在健康照明领域有着广泛的应用前景,未来可以进一步探究跨尺度纳米结构与微结构复合产品的微光学性能。

## 参考文献:

- [1] 唐华,吕俊鹏. 国家自然科学基金视角下我国光电器件领域发展的分析和展望[J]. 科学通报, 2023, 68(24): 3137-3145.  
TANG H, LÜ J P. Analysis and prospects of the development of optoelectronic devices in China from the perspective of National Natural Science Foundation of China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(24): 3137-3145. (in Chinese)
- [2] 王雨思,周贤建,李青原,等. 截止斜率可控的蓝

光防护光学薄膜[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 544-551.

WANG Y S, ZHOU X J, LI Q Y, *et al.* Blue-blocking optical thin films with controllable cutoff slope[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 544-551. (in Chinese)

- [3] 冯阿阳,李乐,周莉,等. 白光LED不舒适眩光模型的验证和优化[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0733001.

FENG A Y, LI L, ZHOU L, *et al.* Validation and optimization of discomfort glare model for white

- LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37 (7) : 0733001. (in Chinese)
- [4] SONG S S, SUN Y J, LIN Y D, *et al.* A facile fabrication of light diffusing film with LDP/polyacrylates composites coating for anti-glare LED application [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 273: 652-660.
- [5] 朱启凡, 蔡懿, 曾选科, 等. 多视场宽时域仿生极高速成像[J]. 光子学报, 2023, 52(1): 0111001.
- ZHU Q F, CAI Y, ZENG X K, *et al.* Bionic ultra-fast imaging for multi-FOV and wide time range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(1): 0111001. (in Chinese)
- [6] 朱帅民, 郭文阁, 刘韬, 等. 基于仿生曲面复眼相机的目标定位技术[J]. 光子学报, 2023, 52(9): 0911003.
- ZHU SH M, GUO W G, LIU T, *et al.* Target localization technology based on biomimetic curved compound eye camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(9): 0911003. (in Chinese)
- [7] WANG L, LUO Y, LIU Z Z, *et al.* Fabrication of microlens array with controllable high NA and tailored optical characteristics using confined ink-jetting [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 442: 417-422.
- [8] 谢晋, 江宇宁, 卢阔, 等. 微拱形阵列导光板快速热压成型与微光学应用[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2421.
- XIE J, JIANG Y N, LU K, *et al.* A rapid hot embossing of micro-arch array LGP and micro-optics application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (9): 2421. (in Chinese)
- [9] 惠炜, 王宝华, 宋霖. 钙钛矿太阳能电池的产业化: 丝网印刷钙钛矿[J]. 材料导报, 2022, 36 (22): 5-6.
- HUI W, WANG B H, SONG L. Perovskite solar cells toward industrialization: screen printed perovskite films[J]. *Materials Reports*, 2022, 36 (22): 5-6. (in Chinese)
- [10] 苏亚辉, 秦天天, 许兵, 等. 飞秒激光双光子聚合方法加工图案化微透镜及其成像测试[J]. 光学精密工程, 2020, 28(12): 2629-2635.
- SU Y H, QIN T T, XU B, *et al.* Patterned microlens processed using two-photon polymerization of femtosecond laser and its imaging test[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28 (12): 2629-2635. (in Chinese)
- [11] 乌李瑛, 刘丹, 刘民, 等. 硅微透镜阵列的制备工艺[J]. 半导体光电, 2023, 44(3): 389-394.
- WU L Y, LIU D, LIU M, *et al.* Fabrication process for microlens array on silicon[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2023, 44 (3): 389-394. (in Chinese)
- [12] 任小柯, 黄辉, 苏珍发. 金刚石砂轮轴向进给磨削硬质合金时的磨削力实验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(5): 567-577.
- REN X K, HUANG H, SU ZH F. Experimental study on grinding force in axial feed grinding of cemented carbide with diamond grinding wheel[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2022, 42(5): 567-577. (in Chinese)
- [13] RAUT H K, BAJI A, HARIRI H H, *et al.* Gecko-inspired dry adhesive based on micro-nanoscale hierarchical arrays for application in climbing devices[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(1): 1288-1296.
- [14] 何鑫, 周伯川, 张耀举, 等. 微米-纳米分层阵列结构减反膜的制备[J]. 太阳能学报, 2021, 42 (8): 146-152.
- HE X, ZHOU B CH, ZHANG Y J, *et al.* Preparation of micro-nano layered array structure anti-reflection film [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(8): 146-152. (in Chinese)
- [15] 胡满凤, 谢晋, 刘继楠, 等. 导光均光微槽透镜阵列精密磨削及其热压微成型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 190-196.
- HU M F, XIE J, LIU J N, *et al.* Precision grinding and micro hot embossing of the microgroove lens array for light transmitting and uniforming[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53 (23): 190-196. (in Chinese)
- [16] XIE J, JIANG Y N, LIU J N, *et al.* A rapid and precision hot embossing of LGP micro-arch lens array inside core microgrooves: simulation and experiment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95 (1) : 171-180.
- [17] CHEN Y S, LIN C Y, YE H C M, *et al.* Anti-glare LED lamps with adjustable illumination light field [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (5) : 5183-5195.
- [18] NIAN S C, TSAI T H, HUANG M S. Novel inductive hot embossing for increasing micromolding efficiency [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016, 70: 38-46.

- [19] BRUNNER R, KRAUS M, HIRTE J, *et al.* Black and white fused silica: modified sol-gel process combined with moth-eye structuring for highly absorbing and diffuse reflecting SiO<sub>2</sub> glass[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32499-32516.
- [20] PARK S, SHIN Y. Light guide plate with curved V-groove patterns in edge-lit backlight[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(1): 015103.

## 作者简介:



胡满凤(1988—),女,博士,2019年于华南理工大学获得博士学位,主要从事精密加工、机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: humanfeng@gtxy.edu.cn

## 通讯作者:



谢 晋(1963—),男,博士,教授,博士生导师,2002年于日本北见工业大学获得博士学位,主要从事微细磨削技术、光学制造、精密制造工艺过程控制技术等方面的研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn