

一种快速评价和优化导光板网点散射效率的方法

于文文¹, 王健², 张琦³, 王雪琨¹, 洪存存¹, 钱维莹¹, 曹建军¹, 高淑梅^{1*}

¹江南大学理学院江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122;

²苏州天禄光科技股份有限公司, 江苏 苏州 215500;

³江苏新广联科技股份有限公司, 江苏 无锡 214122

摘要 导光板(LGP)网点的散射能力直接影响了背光模组的光能利用率和网点密度,快速选出最佳网点结构对企业生产非常重要。提出了用LGP网点散射效率评价网点有效导光能力的方法,基于企业已量产的LGP网点密度档,分别从理论和实验分析了网点倾角对散射效率的影响,并将获得的最佳网点结构应用于实际加工。结果表明,该方法能给出网点散射效率与光能利用率、有效发光面积和网点密度的关系,并得到光能利用率最大时对应的倾角范围为 $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$,在该范围内网点散射效率与倾角呈正相关。以散射效率较高的网点对LGP重新进行均匀优化设计,发现网点数量可减少60%,光能利用率仅降低2%,且LGP实际加工效果与仿真结果相吻合。

关键词 光学设计; 网点散射效率; 导光板; 网点结构

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.072201

Fast Method for Evaluating and Optimizing the Scattering Efficiency of Light Guide Plate Dots

Yu Wenwen¹, Wang Jian², Zhang Qi³, Wang Xuekun¹, Hong Cuncun¹,
Qian Weiyang¹, Cao Jianjun¹, Gao Shumei^{1*}

¹Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Opto-Electronic Engineer and Technology,
School of Physics, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

²Suzhou Tianlu Technology Company LTD., Suzhou, Jiangsu 215500, China;

³Jiangsu Xinguanglian Technology Company LTD., Wuxi, Jiangsu 214122, China

Abstract The scattering ability of light guide plate (LGP) dots directly affects the light energy utilization and dot density of backlight module, so quick selection of the best dot structure is very important for manufacturers. This paper proposed a method to evaluate the effective light guiding ability of dots by LGP dot scattering efficiency. Based on the LGP dot density file that has been mass-produced by the manufacturers, the influence of the dot inclination angle on the scattering efficiency was studied theoretically and experimentally, and the best dot structure obtained was applied to actual processing. The results show that the method can reveal the correlation among the dot scattering efficiency, the light energy utilization rate, the effective light-emitting area and the dot density. An inclination angle range of $25^{\circ}\sim 60^{\circ}$ corresponding to the maximum light energy utilization rate can be obtained. In this range, the dot scattering efficiency and inclination angle are positively correlated. By re-optimizing the LGP uniformly with dots with higher scattering efficiency, it is found that the number of dots could be reduced by 60%, the light energy utilization rate is only reduced by 2%, and the actual machining effect of LGP is consistent with the simulated effect.

Key words optical design; scattering efficiency of dots; light guide plate; dot structure

OCIS codes 220.2740; 220.2945; 120.2040; 160.3710

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-10-31; 录用日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(61605067)、2018年江苏省研究生实践创新计划(SJCX18_0633)

* E-mail: gaosm@126.com

1 引言

液晶显示器(LCD)广泛应用于电视、电脑、手机等电子设备中,作为被动发光的显示器件,需要背光模组(BLM)提供照明,因此 BLM 的光学性能(如亮度和均匀性)直接影响了 LCD 的显示质量。导光板(LGP)是 BLM 中最重要的部分^[1-2],目前市场主流的侧入式 LGP 是利用分布在底面的散射网点破坏光线在 LGP 中的全反射,将侧边入射的光线从上表面导出,其关键指标为光能利用率和出光均匀度^[3-4]。研究表明,散射网点的密度分布和结构会直接影响 LGP 的光能利用率和出光均匀度^[5-7]。

针对 LGP 的优化设计主要有两种:一种是通过改变网点的结构(如采用半球形、圆锥形、圆台形^[8])改变网点的半径、高度、角度等达到优化目的^[9],该方法虽然可调参数多,但加工难度较大。另一种是优化网点的密度分布^[10-12],该方法优化参数单一、易于掌握、方便工业加工。实际中任何结构的网点,都能通过第二种方法实现 LGP 的均匀发光,但光能利用率差异较大。

光能利用率 η 是出光面光通量 E 与光源总光通量 E_0 的比值,由于 E_0 仅与光源有关,因此 η 由 E 决定。影响 E 的主要因素有入光口的结构、网点结构、网点密度分布和材料的吸收特性等。当入光口的结构和所用材料确定时,提高 η 的关键就是如何选择网点结构和密度分布。这方面研究^[13-15]大多通过选择不同的网点结构和密度分布进行对比实验^[16],缺乏系统性和有规律的可操作性。研究发现,不同网点的散射效率不同,且 η 和网点的散射效率并不完全呈正相关。选用散射效率较高的网点结构,会促进 LGP 的优化设计,同时提高产品的效益。因此,本文从理论和实验两方面研究网点结构与网点散射效率的关系,给出了一种能有效定性评价任意结构网点散射效率的方法,并分析了几种常见网点的散射效率,为企业快速选定最优网点结构提供了方案。

2 理论分析

2.1 网点散射效率

设入射到 LGP 中单个网点上的所有光线能量为 e_i ,经网点散射并从 LGP 上表面出射的光线能量为 e_o ,则该网点的散射效率 P 可表示为

$$P = \frac{e_o}{e_i} \quad (1)$$

实际中 P 不仅与网点的自身结构有关,还与入射到网点上的光线角度有关。即 LGP 中结构相同的网点位置不同时,其散射效率也不同,特别是在边缘的网点。单个网点的 e_o 很难检测,因此可通过检测出光面的光通量 E 计算出网点的平均散射效率 \bar{P}

$$\bar{P} = \frac{E}{e_i N} \quad (2)$$

式中, N 为有效发光区域的网点数量。将 $E = \eta E_0$ 代入(2)式得

$$\bar{P} = \frac{\eta E_0}{e_i N} \quad (3)$$

设单个网点的底面积为 a , e_i 与 aE_0 成正相关,即 $e_i \propto aE_0$,可得

$$\bar{P} \propto \frac{\eta}{aN} \quad (4)$$

设有效发光区域面积为 S ,网点密度为 ρ ,即网点底面积与所处网格面积之比,网点平均密度为 $\bar{\rho}$,可将 N 表示为

$$N = \frac{1}{a} \int_S \rho dS = \frac{\bar{\rho} S}{a} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式,得

$$\bar{P} \propto \frac{\eta}{\bar{\rho} S} \quad (6)$$

由(6)式可知, \bar{P} 与 η 成正相关,与 $\bar{\rho} S$ 成负相关。当网点的平均密度确定后,就能根据 η 和 S 判定网点的平均散射效率。

2.2 网点结构分析

导光板的横截面如图 1 所示,LED 光源从侧方进入 LGP 的入射角为 α ,入射到网点表面后在该点作切平面 G ,与 LGP 底面夹角为 γ ,反射后的光线入射到 LGP 的上表面 D 点,反射角为 θ ,入射角为 β , n_1 和 n_2 分别为 LGP 和空气的折射率。

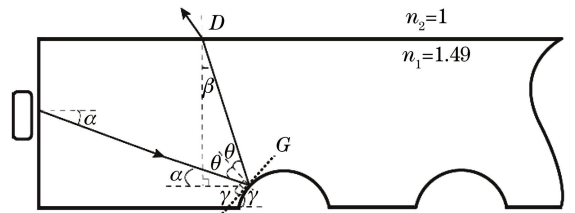


图 1 导光板网点横截面图

Fig. 1 Cross section of the light guide plate

从图 1 中可以看出

$$\alpha + \gamma + \theta = 90^\circ \quad (7)$$

$$\alpha + \beta + 2\theta = 90^\circ \quad (8)$$

联立(7)式、(8)式可得

$$\beta = 2\gamma + \alpha - 90^\circ \quad (9)$$

可以看出 γ 与 α 、 β 都有关系。因 LGP 的入光口为平面结构,光源的发散角为 120° ,由折射定律可知 $\alpha \in (0^\circ, 35.5^\circ)$,要使光线从 LGP 上表面射出,则 $\beta < 42.2^\circ$ 。根据菲涅耳公式可得到光在两介质表面的反射率为^[17]

$$\mu = \frac{W_1}{W_2} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (10)$$

式中, W_1 和 W_2 分别为反射光和入射光的能量, θ_1 和 θ_2 分别为入射角和折射角, Matlab 仿真得到 μ 和 θ_1 的关系如图 2 所示。可以发现,当 $\theta_1 \leq 30^\circ$ 时, μ 变化很小;当 $30^\circ < \theta_1 < 40^\circ$ 时, μ 变化加快;当 $\theta_1 \geq 40^\circ$ 时, μ 迅速增大。在 LGP 内主要存在两处反射面,即散射网点表面和 LGP 的上表面。为使出射光线能量更多,则散射网点表面的 μ 需尽可能大, LGP 上表面的 μ 需尽可能小。

当 $|\beta| < 40^\circ$ 时折射光比值(折射光比值与反射光比值之和为 1)仍可达 70% 以上。由(9)式得

$$|2\gamma + \alpha - 90^\circ| < 40^\circ \quad (11)$$

将 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 35.5^\circ$ 分别代入(11)式,得 $\gamma \in (25^\circ, 75^\circ)$ 和 $\gamma \in (7^\circ, 47.5^\circ)$,取交集 $\gamma \in (25^\circ, 47.5^\circ)$ 时光可以从导光板上表面逸出,但 \bar{P} 还无法判定。上述分析仅考虑了 LGP 某一横截面内的光线走势,而处于不同位置的网点实际散射情况也可能不相

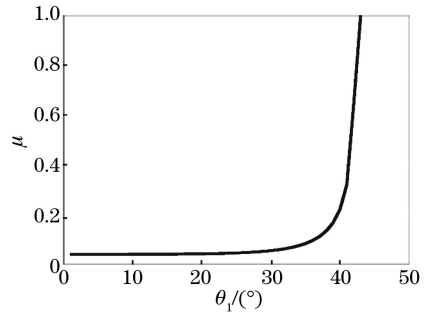


图 2 反射率与入射角的关系

Fig. 2 Relationship between reflectivity and the angle of incidence

同,因此需要通过仿真实验进行分析。

3 仿真与分析

3.1 背光模组模型

为了更接近实际,选择企业已经量产的 13" LGP 密度档,考虑到企业在设计 LGP 时,通常组装成 BLM 进行实际发光检测,故所有仿真和实验均基于 BLM 进行,BLM 的结构如图 3 所示。其中 LGP 规格为 $173 \text{ mm} \times 296 \text{ mm} \times 0.55 \text{ mm}$,材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),折射率为 1.49。光源为 LED 灯条,由 46 颗 LED 等间距排列,出射角为 120° ,每颗 LED 光通量为 22 lm,底面反射膜的反射率设置为 50%,扩散膜的高斯散射角设置为 25° ,棱镜膜的属性与美国 3M 公司生产的 BEF II 一致,两层膜的微棱方向相互垂直^[18]。

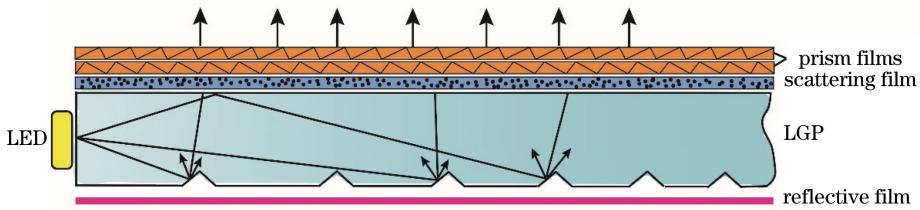


图 3 BLM 结构图

Fig. 3 BLM structure diagram

3.2 仿真实验

为便于比较分析,保持 BLM 结构和网点密度不变,将网点结构变为图 4 所示的三棱柱形。 γ 的取值范围在 $5^\circ \sim 90^\circ$ 之间,取值间隔为 5° 。

用 Lighttools 软件进行光线追迹,结果如图 5 所示。可以发现,当 $\gamma \leq 20^\circ$ 时,近光侧的照度值较低,说明在近光侧网点对入射光的散射效率不高,大部分光传播到另一端被反射回来;而远光侧由于网点密度高,照度值也相对较高。当 $\gamma > 20^\circ$ 时,近光侧的照度值逐渐增高,而远光侧由于所剩光能不多,

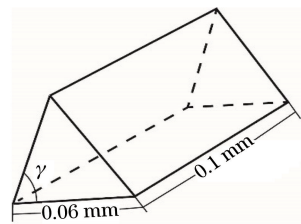


图 4 三棱柱形网点结构

Fig. 4 Triangular prismatic dot structure

照度值逐渐降低,甚至为 0,即有效发光面积和网点数量都在减小。

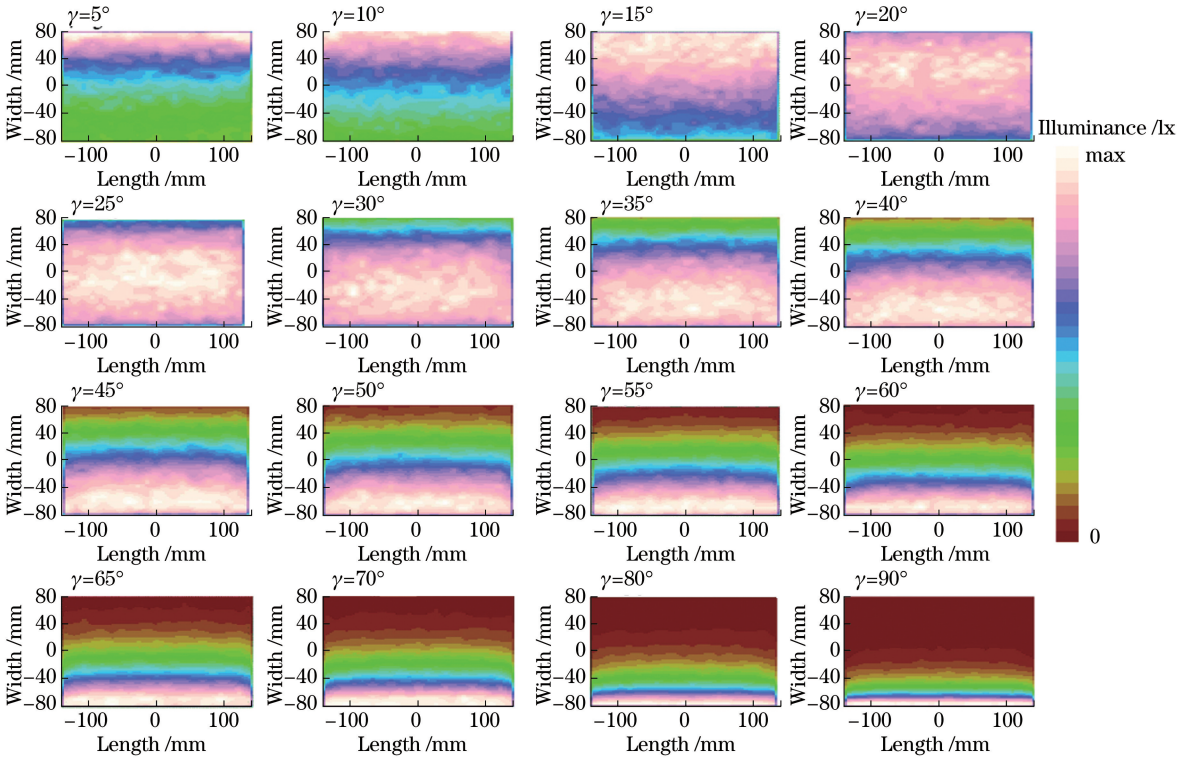


图 5 不同 γ 的照度分布

Fig. 5 Illumination distribution of different γ

3.3 分析

为进一步分析 BLM 的 η 与 \bar{P} 之间的关系, 仿真出 η 随 γ 的变化曲线, 如图 6 所示。可以发现, 当 γ 属于 $5^\circ \sim 25^\circ$ 时, η 与 γ 呈正相关; 当 γ 属于 $25^\circ \sim 60^\circ$ 时, η 几乎达到饱和, 在 41% 左右, η 与 γ 几乎无相关性, 从图 5 中可以看出此时有效发光区域面积 S 变小, 即发光的网点变少, 说明 \bar{P} 变大, \bar{P} 与 S 呈负相关, 与理论推导一致; 由 (6) 式可知 $\gamma = 60^\circ$ 时 \bar{P} 达到最大值, 当 $\gamma > 60^\circ$ 时, η 开始下降, 有效发光区域更小, 此时 η 与 γ 呈负相关。

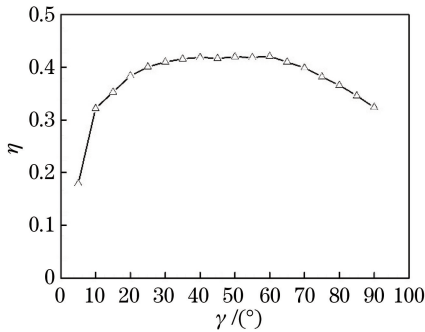


图 6 γ 和 η 的关系

Fig. 6 Relationship between γ and η

响, 在 $\gamma = 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ$ 时分别对网点结构的 BLM 重新进行均匀性优化。将网点的密度设置为优化变量, 网点间的最小间隔作为约束条件, 出光面照度均匀度作为评价函数, 利用 Lighttools 中的背光图案优化功能进行自动优化, 结果如表 1 所示。可以发现, 三者的均匀度 U 都可达到 83% 以上, 且网点数量 M 均减少了 60% 以上, η 仅下降 2%, 当 $\gamma = 60^\circ$ 时三棱柱形网点所用数量最少, 且 η 最大, 这证明了此时 \bar{P} 最高。实际加工导光板时, 减少网点数量会大大缩短加工时间, 从而节约生产成本, 提高生产效率。表 1 中 η 略微下降的主要原因: 一是由于传播到远处的光吸收量增加; 二是因为发光的边界面积增大, 增加了边界损耗量。

为验证本方法的通用性, 将上述方法应用于几种常用网点结构中, 分别为激光加工热压网点、圆台形、半球形和圆锥形网点, 为保证网点密度一致, 网点的底面积和高度都相同, 仿真照度结果如图 7 和表 2 所示。表 2 中 T 为发光区域面积与 LGP 上表面面积的比值, 可以发现应用于热压网点的 BLM 均匀度最高, 但 η 最低仅有 35%, 发光面积 S 最大几乎为 100%, \bar{P} 最小, 而另外三种 BLM 的 η 均为 43%, 有效发光区域面积各不相同, 其中圆台形网点的发光面积最小, 发光网点的数量也最少, 因此在三者中的 \bar{P} 最大。

为分析网点散射效率 \bar{P} 对 BLM 优化设计的影

表 1 优化前后 BLM 结果比较

Table 1 Comparison of BLM results before and after optimization

γ	55°		60°		65°	
	Original	Optimized	Original	Optimized	Original	Optimized
η / %	41	39	42	40	41	39
U / %	49	85	37	84	34	83
M	1269957	538353	1269957	489914	1269957	498589

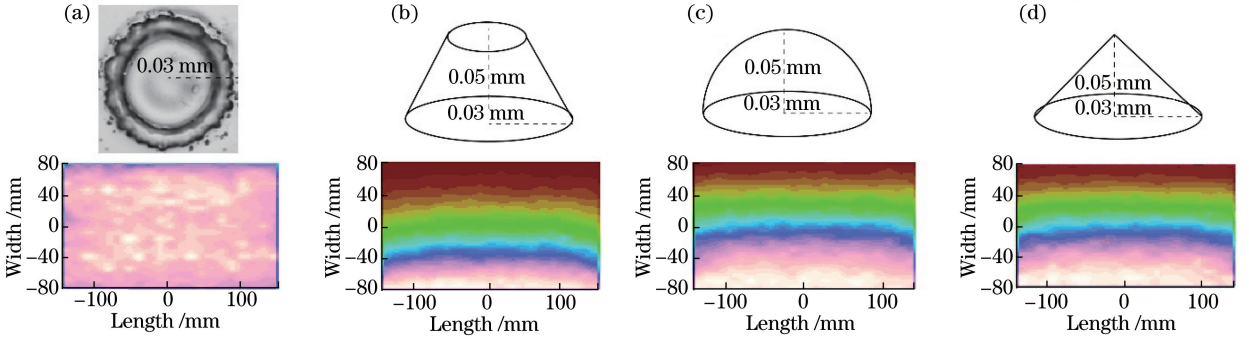


图 7 四种网点结构的 BLM 仿真结果。(a)热压;(b)圆台形;(c)半球形;(d)圆锥形

Fig. 7 BLM simulation results using four dot structures. (a) Hot-embossing; (b) frustum of cone; (c) hemisphere; (d) cone

表 2 四种网点结构的 BLM 的均匀度和发光面积比

Table 2 BLM simulation uniformity and light-emitting area ratio using four dot structures

Dot structure	Hot-embossing	Frustum of cone	Hemisphere	Cone
T / %	100	25	48	42
η / %	35	43	43	43

4 实验验证

上述分析可得 $\gamma=60^\circ$ 时三棱柱网点的散射效率最高,实际加工所用的尺寸大小与仿真模型完全一致,反射膜、扩散膜、棱镜膜也与仿真时保持一致,用 BM-7A 测试平台对组成 BLM 进行亮度和均匀度测试,结果如图 8 所示。图 8(a)为 BLM 的实际发光效果,可以发现

均匀性很好,人眼基本分辨不出明显的亮点或暗点。图 8(b)为测得的 13 点的亮度值,椭圆内的数字表示该点的亮度值,计算得出均匀度为 84.3%,其中 L 和 W 分别为背光模组的长和宽,与表 1 仿真结果的 84% 基本吻合。另一方面测得该 LGP 加工网点数量约为 50 万,与仿真时网点数量十分接近,这说明此时网点的散射效率很高。

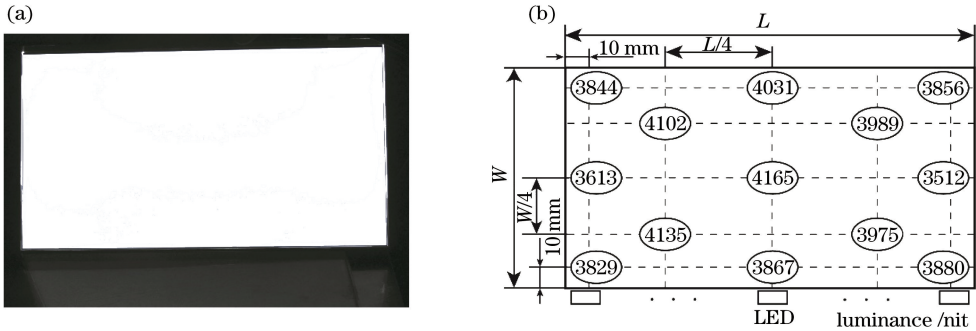


图 8 测试结果。(a)实际发光效果;(b) BM-7A 系统测量的 13 点亮度值

Fig. 8 Test results. (a) Actual luminescence effect; (b) 13-point luminance value measured by BM-7A system

5 结论

基于光传输理论和企业量产的导光板密度档,

从理论和实验两方面研究了导光板的光能利用率、网点散射效率与网点结构之间的关系,发现理论与实验结果基本吻合。网点散射面倾角对光能利用率

和散射效率有直接影响,对于确定的导光板,光能利用率存在最佳范围,网点散射效率存在最佳极值,且有对应的最优网点结构;以网点散射效率表征网点结构的优化设计准确性更高,选择合适的密度档能有效地优化网点结构;采用散射效率较高的网点结构进行导光板的优化设计,网点数量可降低 60%,均匀度提高至 85%, η 仅降低 2%。大幅度降低了生产导光板的加工能耗、时间和成本,该方法适用于任何形状的网点结构,同时降低了导光板的开发周期。另外,实验中所给的网点结构未必是最佳的,未来工作将主要研究不同形状网点的最优化结构。

参 考 文 献

- [1] Huang B Y, Lin Z X, Chen E G, et al. Design and implementation of optical coupling module in side-LED backlight system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0222003.
黄碧云,林志贤,陈恩果,等. 侧入式 LED 背光模组中光耦合模块的设计与实现[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0222003.
- [2] Zhang H, Zhu J, Zhao Y, et al. A design of light guide plate for direct illumination of large-sided liquid crystal panel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2668-2673.
张鹤,朱钧,赵燕,等. 一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2668-2673.
- [3] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, et al. Research of micro-prism distribution on the bottom surface of the small-size integrated light guide plate[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4887-4896.
- [4] Kim Y C. Optimize pattern design for the thin LGP [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(15): 2171-2173.
- [5] Luo J Z, Chen Z, Zhang Y L, et al. Design and simulation analysis of scattering netted dots on edge-lighting flat light guide plate[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, 21(3): 206-213.
骆健忠,陈哲,张永林,等. 侧光平板式导光板散射网点设计及仿真分析[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(3): 206-213.
- [6] Xu P, Huang Y Y, Zhang X L, et al. Integrated micro-optical light guide plate[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20159-20170.
- [7] Yoon G W, Bae S W, Lee Y B, et al. Edge-lit LCD backlight unit for 2D local dimming [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20802-20812.
- [8] Chen E Z, Guo Z N, Zhi J J, et al. Study on dot shape for the light guide plate of backlight [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(3): 032203.
陈俄振,郭震宁,智佳军,等. 背光源导光板散射网点形状的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 032203.
- [9] Huang Y F, Li X, Gao P L, et al. Automatic optimization design of dot patterns for edge-lit LGP [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, 37(6): 751-757.
黄逸峰,李潇,高培丽,等. 侧入式导光板网点全自动优化设计研究[J]. *发光学报*, 2016, 37(6): 751-757.
- [10] Xu P, Huang Y Y, Su Z J, et al. Algorithm research on microstructure distribution on the bottom surface of an integrated micro-optical light guide plate [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(7): 1322-1327.
- [11] Huang B L, Guo T L, Chen E G, et al. Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522002.
黄炳乐,郭太良,陈恩果,等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0522002.
- [12] Li P, Qian W Y, Ding Z W, et al. Evaluation and optimization design on luminous quality of light guide plate [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 062202.
李萍,钱维莹,丁峥伟,等. 导光板发光质量评价与优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 062202.
- [13] Xie H B, Li T, Li F L, et al. Relationship between the length and emitted light property of side-emitting light pipe in LED back light source [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(9): 934-938.
谢洪波,李韬,李富琳,等. LED 背光源中侧发光导光管长度与出光性能的关系[J]. *发光学报*, 2011, 32(9): 934-938.
- [14] Huang B L, Guo T L. Fast optimization method based on the diffuser dot density for uniformity of the backlight module [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(6): 1494-1499.
- [15] Xu P, Yang W, Zhang X L, et al. Two-dimensional distribution design of micro-prism for partial integrated light guide plate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(3): 038502.
徐平,杨伟,张旭琳,等. 集成化导光板下表面微棱

- 镜二维分布设计[J]. 物理学报, 2019, 68(3): 038502.
- [16] Xu S, Xu Y Z, Chen E G, et al. Simplified simulation model and optical characteristics of back light system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2016, 43(9): 78-83.
徐胜, 徐玉珍, 陈恩果, 等. 背光源导光结构仿真模型及其光学特性研究[J]. 光电工程, 2016, 43(9): 78-83.
- [17] Yu D Y, Tan H Y. Optical Engineering [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 320-321.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 320-321.
- [18] Yang Z Z. The design and optimization of a 47 inch single-short-edge-lit LGP [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012: 56-60.
杨泽洲. 47 寸单短边入光型导光板的设计与优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 56-60.