

# 导光板网点平均密度范围的最优化研究

黄炳乐<sup>1,2</sup> 郭太良<sup>1</sup> 陈恩果<sup>1</sup> 徐 胜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>福州大学物理与信息工程学院, 福建 福州 350002

<sup>2</sup>福建船政交通职业学院信息工程系, 福建 福州 350007

**摘要** 针对导光板(LGP)网点分布设计进行了研究,提出了以导光板网点最佳平均密度(BANDD)范围的定义来阐述导光板网点的最佳设计。根据导光板导光理论建立背光源模组(BLM)的光学模型,并仿真了模型在不同均匀网点密度(NDD)下性能的变化,结果表明在0.1~0.4之间的网点密度其出光效率与均匀性达到相对平衡。进一步对0.1~0.4范围内的网点密度进行网点排布优化以提高其均匀性,仿真结果表明网点密度在0.2~0.35范围内的网点可以达到设计阶段对均匀性指标的要求。加工了相应的实验样品,验证了导光板最佳平均网点密度范围在0.25左右,与理论相符合。该研究结果对于实际开发具有一定的指导意义,将有助于加快背光源模组的开发进度,减少开发版次,并降低背光源模组的开发成本。

**关键词** 光学设计; 最佳平均网点密度; 背光源模组; 导光板; 出光效率; 均匀性

中图分类号 O439; TN141 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0522002

## Study on Optimal Scale of Average Netted Dot Density for Light Guide Plate

Huang Bingle<sup>1,2</sup> Guo Tailiang<sup>1</sup> Chen Enguo<sup>1</sup> Xu Sheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China

<sup>2</sup>Information Engineering Department, Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou, Fujian 350007, China

**Abstract** The definition of best average netted dot density(BANDD)is proposed based on the research of the pattern of the netted dot for light guide plate(LGP), in order to elaborate the optimal design for the netted dot of LGP. A backlight module(BLM) is modeled in the light simulation software based on the theory of LGP guiding light, a group of differently uniform netted dot density (NDD) are applied in the model to test the effect on performance, the results indicate that the NDD from 0.1 to 0.4 relatively balances efficiency and uniformity. Further more the layout of the netted dot in the scale mentioned above is optimized to improve the uniformity; the results of simulation state clearly with the NDD from 0.2 to 0.35 can reach the requirement of uniformity in development stage. The corresponding experimental samples are made; the result of the experiment demonstrations that the BANDD is located in 0.25, it agrees well with the theoretical predictions. It has certain guiding significance that the conclusion of the study are applied in the actual development, and will accelerate the procedure of BLM and reduce the counts of designing editions, and cost down the development expense of the BLM.

**Key words** optical design; best average netted dot density; backlight module; light guide plate; light efficiency; uniformity

**OCIS codes** 220.2945; 120.2040; 160.3710; 130.3120; 260.6970

收稿日期: 2014-12-10; 收到修改稿日期: 2015-01-05

基金项目: 福建省教育厅A类项目(JA13376)、国家863计划(2013AA030601-2)、国家青年科学基金(61405037); 福建省自然科学基金项目(2010J01333)

作者简介: 黄炳乐(1982—),男,博士研究生,讲师,主要从事光学设计和电子信息技术等方面的研究。

E-mail: 22826639@qq.com

导师简介: 郭太良(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事场致发射和信息显示等方面的研究。

E-mail: gt\_l\_fzu@hotmail.com(通信联系人)

## 1 引 言

液晶显示器(LCD)属于被动发光显示器件,其本身不发光;因此其需要一个光源——背光源模组(BLM)。背光源模组的亮度和均匀性等性能参数的好坏会直接影响LCD的显像质量。而消费者对液晶显示器在亮度和均匀性方面要求越来越苛刻,因此对光源的提供者背光源模组的要求也越来越高。背光源模组中重要部件导光板(LGP)其作用是引导光的传播,其设计与制造是背光源模组的关键技术之一<sup>[1-3]</sup>。目前,国内陈祥贤等<sup>[4]</sup>提出导光板底面熔合微棱镜出射亮度规律研究,张鹤等<sup>[5]</sup>提出一种用于大尺寸液晶照明的直下式导光板模块设计;但他们都是针对导光板的微结构提出新设计思路并没对微结构布局进行研究;国外Joo B Y等<sup>[6]</sup>提出了在液晶显示器中印刷在导光板上的图案网点材料的光学散射分析, Kim Y C等<sup>[7]</sup>提出了导光板网点布局优化设计,但也没有对网点密度(NDD)的设计提出一个参考的基准。

综上所述,在导光板开发的过程中,导光板的性能仍然决定于导光网点的分布,而在目前的设计方法中,均存在网点设计效率低、效果无法得到保证的问题<sup>[4-7]</sup>。因此,高效地设计导光板网点分布,并形成可靠的理论,成为目前业界普遍关心并尚待解决的问题。为此,本文从导光板导光理论出发,并结合仿真实验和样品验证,提出了导光板网点的最佳网点平均密度,并验证了其可靠性。该理论的提出将有助于提高背光源模组的开发效率,并可极大的降低开发成本。

## 2 导光板照度分布及网点密度的理论推导

当光从折射率大于空气的透明介质中射入空气时,由于透明介质的折射率比空气中的大,当入射角 $\theta$ 大于临界角时光将在界面发生全反射,此时不再有光射出介质,也就是说光在介质内部的传输损耗仅取决于介质对光的吸收,而在界面上反射时没有损失。当某种材料的折射率大到一定程度、光在其中的临界角小于 $45^\circ$ 时,特定方向的光线才能在其相互平行和垂直的界面内反复反射从而减少光能的损失<sup>[8-10]</sup>。LCD背光源的工作原理正是利用了这个特性;其中导光板将由发光二极管(LED),光源发出点光源的光从入光面导入并扩散到整个导光板变成面光源;以导光板的材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为例,其对可见光的折射率 $n=1.49(25^\circ\text{C})$ ,根据

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1}{n}\right), \quad (1)$$

可得其临界角约为 $42.2^\circ < 45^\circ$ ,能够满足特定方向的光在导光板的相互平行和垂直的界面内反复反射而没有折射从而减少光能损失的要求。

光在导光板中的传输示意图如图1所示,当导光板内的传导光照射到导光板背面印刷的白色网点时发生漫反射,从与光源入射面垂直的出光面射出。导光板照明通过运用光在其界面内全反射的原理,将从入射面射入的光偏转 $90^\circ$ ,从出光面射出,从而起到照明的作用<sup>[11-12]</sup>。

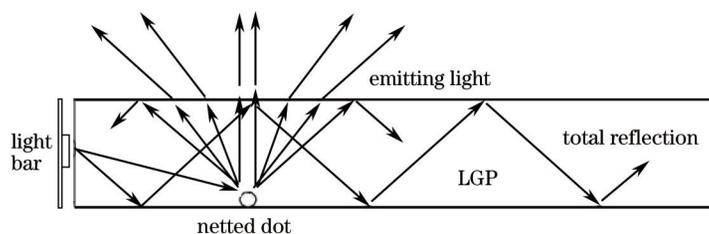


图1 导光板工作原理示意图

Fig.1 Scheme of LGP principle

### 2.1 背光源照度分布

根据照度公式<sup>[13-14]</sup>,设LED出射光强满足朗伯发光体分布,且有一平面垂直于光源法向,如果该平面上有一点与点光源的距离为 $r$ ,光源指向该点的方向与法向的夹角为 $\theta$ ,则该点处的照度可表示为:

$$E(r, \theta) = \frac{I_0}{r^2} \cdot \cos^2 \theta, \quad (2)$$

该式为直射照度计算的余弦定律<sup>[15]</sup>,其中, $I_0$ 为 $\theta=0$ 时光面法向的光强。

在笛卡尔直角坐标系中,假设LED位于 $(x_0, y_0, z_0)$ 处,其发射面的法向为 $y$ 轴正方向,在(2)式中,

$$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}, \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{y-y_0}{r}, \quad (4)$$

则在空间任意一点 $(x, y, z)$ 处的照度分布可表示为:

$$E(x, y, z) = \frac{I_0(y-y_0)^2}{[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2]^2}. \quad (5)$$

对于背光源模组的LED灯条光源,假设其 $N$ 个LED灯沿 $x$ 轴正方向等间距排成一行,其间距为 $d$ ,且中间的LED灯位于坐标原点。假设有一垂直于 $y$ 轴且与 $x$ 轴距离为 $y_1$ 的平面,在这平面某点观察到的照度为:

$$E(x, y_1, z) = \sum_{i=1}^N \frac{I_0 y_1^2}{[(x-id)^2 + y_1^2 + z^2]^2}, \quad (6)$$

式中 $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm [N/2]$ 。其中, $N$ 为奇数, $[N/2]$ 表示 $N$ 除2后取整。

## 2.2 导光板网点密度与距离光源距离的关系

导光板网点密度分布一定程度上取决于距光源的距离,也就是单位面积内网点大小由光源至导光板的距离所决定。一般而言,导光板上的网点形状为圆形,网点大小由半径决定,在该情况下,单位面积内网点的大小与光源至导光板的距离之间的关系问题转变为圆形网点半径与距光源距离的关系。假定随坐标变化的导光板底面网点密度数为:

$$d(x, y) = s(x, y)/a^2, \quad (7)$$

式中 $s(x, y)$ 为 $(x, y)$ 处网点的大小, $a^2$ 为网格面积。

当光源和导光板尺寸确定时,导光板上表面的出光亮度应正比于 $(x, y)$ 处导光板网点的密度函数 $d(x, y)$ ,且正比于入射到 $(x, y)$ 处下底面上的传导亮度,而入射到 $(x, y)$ 处下底面上的传导亮度可看成与光源在这点的照度 $E(x, y)$ 成正比<sup>[16]</sup>,因此有:

$$B(x, y) = kE(x, y)d(x, y), \quad (8)$$

式中 $k$ 为比例系数, $B(x, y)$ 为 $(x, y)$ 处导光板上表面的出光亮度。

由(7)、(8)式可得

$$s(x, y) = \frac{a^2 B(x, y)}{kE(x, y)}. \quad (9)$$

若网点在 $xy$ 平面投影为圆形,即 $s(x, y) = \pi r^2(x, y)$ ,有

$$r(x, y) = a \sqrt{\frac{B}{\pi k E(x, y)}}. \quad (10)$$

进一步讨论导光板上某一个在LED灯的中心法向方向上( $y$ 轴上)的网点,根据(5)、(10)式,可得到该网点的半径表达式为:

$$r(x, y) = a \sqrt{\frac{B}{\pi k E(x, y)}} = ay \sqrt{\frac{B}{\pi k I_0}}, \quad (11)$$

式中 $a, B, k, I_0$ 为常数,从该式可以看出,网点大小与其离LED的距离 $y$ 成正比,具体表现为在远离光源处的网点半径取最大值,在入光侧的网点半径取最小。以最常见的圆形网点形状为例,当半径 $r$ 等于网格边长 $a$ 的一半时,其网点密度取最大,此时由(7)式可以计算出最大密度约为0.785,这个是网点密度的最高极限值,因为如果密度到达这个值时,将会出现相邻网点边界距离为0的情况,实际制作中不能出现这种情况。为了避免在导光板网点印刷制程中出现糊板现象,业界要求印刷网点的间距控制在80 mm以上。因此,网点的密度不能达到最大密度,设定网点密度最大值为0.75时可以满足网点间最小间距的要求。

背光源模组的性能要求不仅要有高的出光效率,更重要的是要具有良好的均匀性。假设网点的平均密度达到0.75,那么在实际的背光源设计中为了得到均匀亮度,根据(11)式就必然会出现某些局部区域的网点密度要大于0.75,此时无法满足上述网版印刷工艺中的最小网点间距的要求;因此网点的平均密度范围应该

在最大值的一半以下,即大约 0.38 以下。理上网点密度应从入光侧的 0 开始向远离光源处逐渐增大到 0.75。因此,为了得到最佳平均网点密度(BANDD),将对背光源模组进行建模,并对网点密度为 0.001~0.75 的背光源模组进行光学仿真,最后再在小范围内进行验证,从而确定最佳网点平均密度范围。

### 3 仿真与优化

以 5.9 inch (149.86 mm) 背光源为例进行建模与仿真,背光源从下到上的结构分别是反射片、导光板、下扩散片、上扩散片、增光片和胶框。LED 灯条由 9 盏灯等间距排布,LED 的规格为 4014,导光板厚度 2 mm。背光源结构示意图如图 2 图所示。

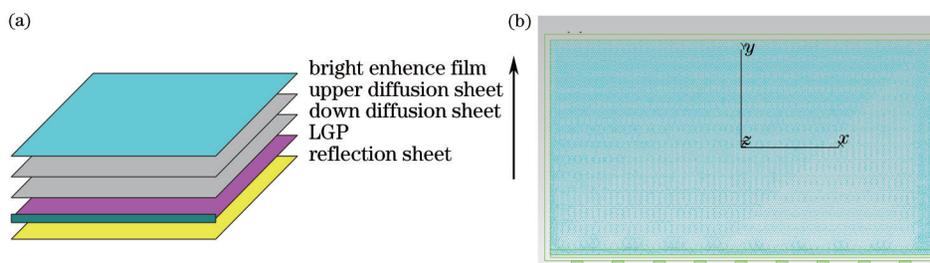


图 2 背光源模组结构图。(a) 结构示意图; (b) 仿真模型俯视图

Fig.2 Scheme of the BLM. (a) Diagram of the structure; (b) top view of the simulation model

#### 3.1 平均网点密度光学仿真

每盏 LED 灯光线追踪 12 万条,总共模拟仿真追踪光线 108 万条。设置导光板网点密度从 0.01 变化到 0.75,通过 BacklightFly 软件将对应的网点密度生成出光学仿真软件所要求的网点属性文件<sup>[17]</sup>,然后将其导入到光学仿真软件并做相应的设置;分别对对应网点密度的背光源模型进行光学性能仿真,由仿真数据总结出网点密度为 0.01~0.75 的背光源的出光效率与均匀性如图 3 图所示。

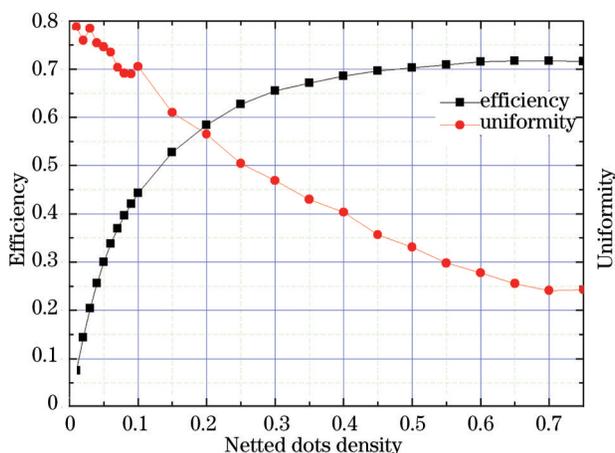


图 3 出光效率和均匀性随平均网点密度的变化曲线

Fig.3 Change curves of the light efficiency and uniformity along with the average netted dots density

由图 3 可以看出,总体上出光效率是随着网点平均密度的变大而提高,在密度较小区域提高的变化率比较大,在密度较大区域提高的变化率相对平稳。这个仿真结论与上述的导光板上表面的出光亮度与底面散射网点的密度成正比理论相符合。而均匀性与网点平均密度的关系恰好与出光效率相反,其在网点平均密度较小的区域,随着网点密度的增大均匀性急剧下降,而在网点平均密度较大的区域均匀性下降的比较平缓。由于背光源不仅要求效率高同时一个很重要的指标参数是均匀性。从图 3 可以看出网点平均密度为 0.1~0.4 时,其出光效率与均匀性都达到比较好的一个平衡。因此,选取平均网点为 0.1~0.4 的网点密度进行局部网点排布的变化,来调整其均匀性和出光效率,以便找出最佳的平均网点密度范围。

#### 3.2 网点排布优化及仿真

根据 0.1~0.4 网点密度的仿真数据,将背光源发光面屏幕分成 72×128 个等分小格子,根据仿真数据所对

应的亮度调整每个格子的密度,亮度较小和较大区域对应的格子分别增大网点密度和减少网点密度,但前提条件是保持平均网点密度基本不变的情况下进行调整。具体优化调整方法为

$$m_{i,j} = m_{i,j} \times (L_{ave}/L_{i,j}), \quad (12)$$

式中  $m_{i,j}$  和  $L_{i,j}$  分别表示第  $i$  行第  $j$  列格子所对应的网点密度和仿真亮度值,  $L_{ave}$  表示背光源发光面的亮度平均值。

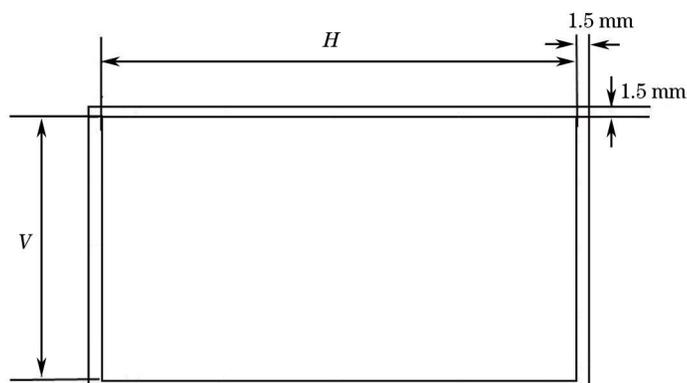


图4 计算仿真亮度均匀性方法示意图

Fig.4 Schematic of the method of the uniformity calculated for simulation luminance

仿真阶段均匀性的计算方法如图4所示,在背光源的出光面扣除边缘1.5 mm后,剩下的长  $H$ ,宽  $V$  分别按等间距来取出  $7 \times 7$  个点,总共49点亮度数值。均匀性为

$$U = \frac{L_{min}}{L_{max}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中  $L_{min}$  和  $L_{max}$  分别表示49点仿真亮度值中的最小值和最大值。

密度优化调整的结束条件是均匀性达到75%以上或局部网格的网点密度超过0.75即可停止继续调整格子密度值。局部优化调整后的0.1~0.4出光效率与均匀性曲线如图5所示。

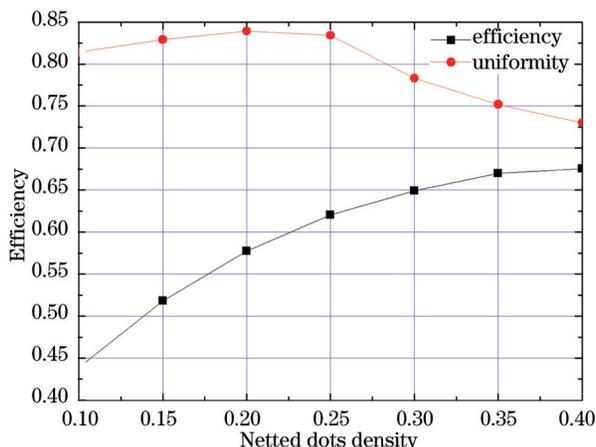


图5 网点布局优化后出光效率和均匀性随平均网点密度的变化曲线

Fig.5 Change curves of the light efficiency and uniformity along with the average netted dots density after the netted dots pattern optimization

由图5与图3比较可知,网点优化调整后出光效率与原来对应平均网点密度的出光效率是大致相同,但都略有下降。这个是由于网点调整的趋势是入光侧的网点变小,而出光侧的网点变大。当光从入光侧进入导光板后再从出光面射出时,调整后入光侧出射的光相应变小,变小部分的光要在导光板内以全反射的形式继续向远离入光侧传播,直到遇到散射网点再从出光面射出;因此有更多的光要在导光板内传播,所以相应的光损耗就增加了,导致平均网点密度相同的情况下,优化调整后的出光效率会降低。

进一步观察图5可以发现,网点平均密度为0.1~0.25时,均匀性可以调整到80%以上;但当网点密度大于0.35时均匀性低于75%,这个是由于在调整优化过程中出现入光侧网点调到接近零同时出光侧网点密度

接近 0.75 时,均匀性还是低于 75%,就停止继续优化。

因此,从以上仿真数据来看,为了平衡出光效率和均匀性可调整性,最佳平均网点密度范围为 0.2~0.35,可见,仿真结果进一步缩小了最佳平均网点密度的范围。

### 4 实验验证

在网点排布局部优化后仿真的基础上,选取网点平均密度为 0.2~0.35 优化后的网点布局进行制作网版,并印刷在导光板上。实验中 LGP 采用 PMMA 为材料,其具体尺寸结构与以上仿真模型完全一致。LGP 尺寸为 130 mm×73 mm×2 mm,尺寸公差为 ±0.02 mm,导光板表面的平整度公差约为 ±0.005 mm,表面光洁度在 20 nm 以内。网点的高度约为 0.05 mm,油墨型号为 WJP,油墨与稀释剂的配比为 MP18: P750=100: 3。背光源结构从下到上分别是反射片(JAR235)、LGP、下扩散片(TDF107)、上扩散片(TDF107)、增光片(AOS-C10B);LED 灯是 4014 封装,总共 9 盏,测试电流为 75 mA。采用如图 6(a)所示的 19 点测试方法检测导光板的均匀性和平均辉度;测试采用的设备是 BM-7 测试系统如图 6(b)所示;测试及经过计算处理后的数据如表 1 所示。

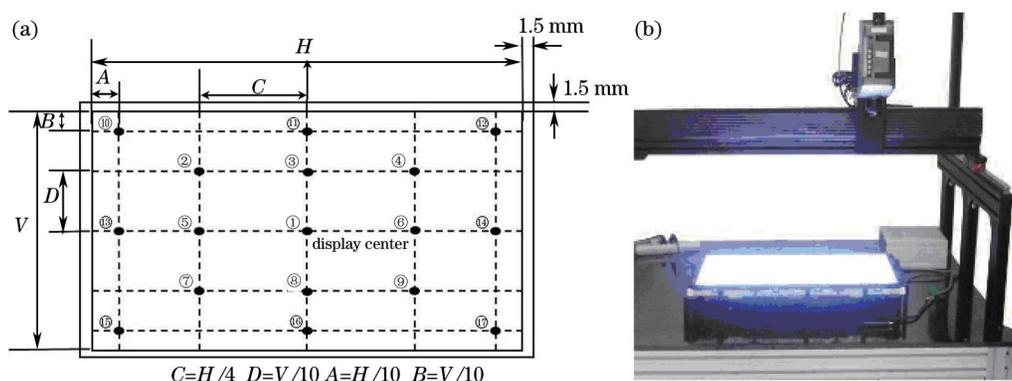


图 6 实验测试条件。(a) 19 点测试方法 (b) BM-7 测试系统

Fig.6 Testing condition of the experiment. (a) Testing method of 19 points; (b) testing system of BM-7

表 1 均匀性与平均亮度

Table 1 Uniformity and average luminance

Parameter	Value			
Netted dot average density	0.2	0.25	0.3	0.35
Uniformity /%	78.2	77.4	61.4	54.2
Average luminance / (cd · m <sup>-2</sup> )	5805	6275	6368	6445

从表 1 中可以看出只有网点平均密度为 0.2~0.25 的均匀性大于开发设计阶段均匀度 75 % 的要求;但 0.25 对应的平均亮度比 0.2 的提高了 8%,因此平均网点密度为 0.25 时,其均匀性和亮度可以达到最佳的平衡,这个结论与仿真结果基本吻合。

### 5 结 论

为了提升导光板开发效率,减少加工版次并节约开发成本,本文提出并验证了导光板网点平均密度的最佳范围,并对网点密度为 0.01~0.75 的背光源模组进行光学仿真,仿真结果表明其均匀性随网点密度的增大而减小,而出光效率则随网点密度的增大而增大;并从仿真数据找出网点平均密度为 0.2~0.35 时可以满足对均匀性和出光效率的要求;最后对平均密度为 0.2~0.35 进行实验验证,实验结果表面最佳平均网点密度为 0.25。该研究结果在实际应用中对提高导光板的设计开发效率具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

1 Su Teli, Chen Huawei, Lu Chienfu. Systematic optimization for the evaluation of microinjection molding parameters of light guide plate with TOPSIS-based Taguchi method[J]. Advances in Polymer Technology, 2010, 29(1): 54-63.  
 2 Teng Tunchien, Kuo Kingfeng. Highly precise optical model for simulating light guide plate using LED light source[J]. Opt Express,

- 2010, 18(21): 22208-22214.
- 3 Huang Bingle, Guo Tailiang, Yao Jianmin, *et al.*. Design of high dynamic range display[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(6): 906-910.  
黄炳乐, 郭太良, 姚剑敏, 等. 一种高动态范围显示系统的设计[J]. 液晶与显示, 2013, 28(6): 906-910.
- 4 Chen Xiangxian, Xu Ping, Huang Jiefeng, *et al.*. Research on law of luminance in light guide plate with fused micro-prisms on bottom surface[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2516-2519.  
陈祥贤, 徐平, 黄洁锋, 等. 导光板底面熔合微棱镜出射亮度规律研究[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2516-2519.
- 5 Zhang He, Zhu Jun, Zhao Yan, *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.
- 6 Joo B Y, Kang J J, Hong J P, *et al.*. Analysis of the light-scattering power of patterned dot material printed on the light guide plate in liquid crystal display[J]. Displays: Technology and Applications, 2012, 33(4/5): 178-185.
- 7 Kim Y C, Oh T S, Lee Y M, *et al.*. Optimized pattern design of light-guide plate(LGP)[J]. Optica Applicata, 2011, 41(4): 863-872.
- 8 Zhu Zhenmin, Qu Xinghua, Liang Haiyu, *et al.*. Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0115001.  
祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0115001.
- 9 Huang Bingle, Guo Tailiang, Yao Jianmin. Design of slanted zigzag staggered barrier for autostereoscopic display[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(10): 1005002.  
黄炳乐, 郭太良, 姚剑敏. 自由立体显示器倾斜锯齿交错狭缝光栅的设计[J]. 光子学报, 2014, 43(10): 1005002.
- 10 Chen Ezhen, Guo Zhenning, Zhi Jiajun, *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.
- 11 Gao Yanfei, Yu Zhinong. Design and simulation of micro-structure in the integrated light guide plate[J]. Optical Technique, 2008, 34(5): 690-692.  
高雁飞, 喻志农. 一体化导光板中微结构的设计与仿真[J]. 光学技术, 2008, 34(5): 690-692.
- 12 Xiao Xiao, Wen Shangsheng, Chen Jianlong, *et al.*. Optical performance of secondary lightguide-diffusive component in direct LED backlight module[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2013, 24(4): 679-686.  
肖箫, 文尚胜, 陈建龙, 等. 直下式LED背光源模组第二扩散导光板光学特性分析[J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 679-686.
- 13 Moreno I, Avendano-Alejo M, Rumen I, *et al.*. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. Appl Opt, 2006, 45(10): 2265-2272.
- 14 Sun Jianmin. Electrical Lighting Technology[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998, 145-146.  
孙建民. 电气照明技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998, 145-146.
- 15 Yu Daoying, Tan Hengying. Optical Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 80-85.  
郁道银, 谈恒英. 光学工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 80-85.
- 16 Ji Lingling. Side-Emitting and Flat-Panel LED Backlight Design and Optimization[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010, 22-25.  
纪玲玲. 侧入平板式LED背光源设计与优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2010, 22-25.
- 17 Febees. BacklightFly[EB/OL]. [2014-12-8]. <http://www.febees.com/>

栏目编辑: 韩峰