

背光源导光板散射网点形状的研究

陈俄振 郭震宁 智佳军 李建功 胡治伟 曾海

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 根据 LED 的光强分布推导出侧光式背光源导光板平面上某点的照度公式,并得出导光板中散射网点的排布公式。主要通过对导光板散射网点形状的研究,找出最适合导光板的网点形状。以半球形网点形状为基础,根据在两个方向上耦合进导光板的光线经半球形网点反射后恰好输出的条件,得出顶角在 $90^\circ \sim 132.2^\circ$ 的圆锥体网点为最佳的形状。最后在达到一定的输出光通量均匀性的情况下,经过光学软件 TracePro 模拟仿真,比较不同顶角圆锥体网点导光板的总输出光通量。实验结果与理论结果相一致。

关键词 光学设计;背光源;LED;导光板;网点排布;网点形状

中图分类号 TB21 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/LOP50.032203

Study on Dot Shape for the Light Guide Plate of Backlight

Chen Ezhen Guo Zhenning Zhi Jiajun Li Jiangong Hu Zhiwei Zeng Hai

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract According to the light distribution of LED, we figure out the formula of a dot illuminance on the plane of the edge-lighting backlight light guide plate (LGP), and an arrangement formula of scattering dots in the LGP as well. The main purpose of this paper is, by studying the shape of the scattering dots in the LGP, to find out the scattering dots shape which is the most suitable for the LGP. Based on the hemispherical dots shape, according to principle that the light coupled into the LGP in two directions is reflected by the hemispherical scattering dots and just outputs from the LGP, it is obtained that the optimum shape of scattering netted dots is the cone whose apex angle between 90° and 132.2° . Under the condition of a certain uniformity of output light flux, by means of TracePro software simulation, the total output light flux is compared for the LGP with different apex angles of cone scattering dots. The experimental and theoretical results match well with each other.

Key words optical design; backlight source; LED; light guide plate (LGP); dot distribution; dot shape

OCIS codes 220.2740; 080.27400; 230.3670; 230.6080

1 引言

背光模组是液晶显示器(LCD)光源的提供者,背光源性能的好坏会直接影响 LCD 的显像质量。液晶显示在亮度、色度方面要求越来越苛刻,因此对背光模组的要求也越来越高。导光板的作用是引导光的散射方向,用来提高亮度和控制亮度的均匀性,因此,导光板的设计与制造是背光模组的关键技术之一。

侧光式背光模组主要由光源、反射膜、导光板、两片散射板和两片菱形板组成^[1~6]。光源主要有冷阴极荧光管(CCFL)和发光二极管(LED)^[7,8]。LED 是一种固态冷光源,是继白炽灯、荧光灯和高强度放电(HID)灯(如高压钠灯和金卤灯)之后的第四代新光源^[9~11],有效率高、光色纯、功耗低、寿命长、可靠耐用和无污染等优点,目前 LED 作为背光源在市场中扮演着重要的角色。导光板中散射网点的大小和密度决定着输出光的亮度和均匀度。本文将讨论影响输出光亮度的因素之一——网点形状。从半球形网点出发,经过

收稿日期: 2012-12-05; **收到修改稿日期:** 2012-12-24; **网络出版日期:** 2013-02-28

基金项目: 厦门市科技计划重点项目(3502Z20093033)、泉州市科技计划重点项目(2008G7)、福建省科技计划重点项目(2009H0034)和福建省自然科学基金(2010j01338)资助课题。

作者简介: 陈俄振(1986—),男,硕士研究生,主要从事半导体照明方面的研究。E-mail: 99214252@163.com

导师简介: 郭震宁(1958—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事半导体发光器件及其光学设计与应用等方面的研究。
E-mail: znguo2003@yahoo.com.cn

理论分析计算,推算最合适的网点形状及其角度,最后得出一定顶角的圆锥体网点对出光更有利。

2 导光板的光传输原理及网点排布规律

导光板的材料一般为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC),PMMA的折射率为1.49,其临界角 $\theta_c=42.2^\circ$ 。本文导光板材料用PMMA来讨论。图1为光在导光板中传输的示意图。

当光耦合进入导光板后,由于在上下表面的最小入射角为 $90^\circ-\theta_c=47.8^\circ>\theta_c$,因此,光在导光板的上下表面来回全反射,直到碰到散射点改变全反射条件使光线从上表面输出^[12]。

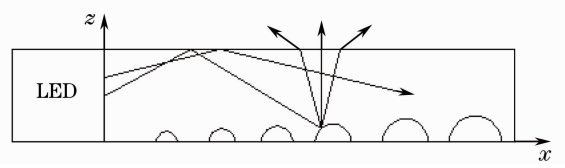


图1 导光板中光传输示意图

Fig.1 Schematic diagram of light transmission in light guide plate

2.1 LED 光强分布

LED的光强分布为旋转对称,可表示为

$$I_\theta = I_0 \cos^m \theta, \quad (1)$$

式中 I_0 为 $\theta=0$ 即发光面法向的光强。对于不同的点光源,

m 取不同的值,如 m 的值为1时,则LED光强分布遵循朗伯分布^[9,13]:

$$I_\theta = I_0 \cos \theta. \quad (2)$$

根据照度公式^[14],设有一平面垂直于光源法向,该平面上有一点距点光源 r ,光源指向该点的方向与法向的夹角为 θ ,则该点处的照度可表示为

$$E(r, \theta) = \frac{I_\theta}{r^2} \cdot \cos \theta. \quad (3)$$

(3)式为直射照度计算的余弦律。将(2)式代入(3)式可得

$$E(r, \theta) = \frac{I_0 \cos^2 \theta}{r^2}. \quad (4)$$

在笛卡儿坐标系中,假定LED置于点 (x_0, y_0, z_0) 处,其发射面的法向为 y 轴正方向,在(4)式中, $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}$, $\cos \theta = \frac{y-y_0}{r}$,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 N 个LED灯,沿 x 轴正方向等间距排成一行,间距为 d 。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

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

式中 $i=1, 2, \dots, N$ 。

2.2 导光板网点的分布规律

定义随 x, y 变化的导光板底面网点填充函数为^[15]

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

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

由于导光板上表面的出光亮度与底面散射网点的填充密度成正比,设点 (x, y) 对应的导光板表面亮度为 $B(x, y)$,由散射网点散射的光的亮度为 $B_1(x, y)$,则有

$$B = kB_1, \quad (8)$$

式中 k 为比例系数。若要求导光板的出光亮度 B 恒定,则要求 B_1 也为恒定值。当光源一定、导光板尺寸一定时, B_1 应正比于 (x, y) 处导光板网点的填充密度函数 $f(x, y)$,且正比于射到 (x, y) 处下底面上的传导光亮度,而射到 (x, y) 处下底面上的传导光亮度可看成与光源在这点的照度 $E(x, y)$ 成正比,即

$$B_1(x, y) = k_1 E(x, y) f(x, y), \quad (9)$$

k_1 是不随 (x, y) 变化的比例系数。由(8),(9)式得

$$B(x, y) = kk_1 E(x, y) f(x, y), \quad (10)$$

故有

$$f(x, y) = \frac{B(x, y)}{kk_1 E(x, y)}. \quad (11)$$

以上各式可得

$$s(x, y) = \frac{a^2 B(x, y)}{kk_1 E(x, y)}. \quad (12)$$

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

$$r(x, y) = a \sqrt{\frac{B}{\pi k k_1 E(x, y)}}. \quad (13)$$

由(13)式可知, 要求导光板表面出光亮度 $B(x, y)$ 为恒定值 B , 则导光板底面 (x, y) 处网点大小与表面亮度成正比, 与光源在这一点上的照度成反比。当光源和导光板的尺寸确定时, 根据(12)式或(13)式, 利用光学设计软件进行仿真, 选择合适的常数 k, k_1 , 即可得到亮度一定且均匀的网点排布方法。由以上公式可知, 在靠近光源处网点直径小, 远离光源处网点直径大, 在两灯之间的网点直径也较大。

3 网点形状的推算与仿真

目前实际中的诸多网点形状是半球形, 下面讨论光从各个方向耦合进入导光板经散射点反射后光的传播路线及光从上表面出射的情况。

为方便分析, 令导光板的长、宽、高分别在 x 轴、 y 轴、 z 轴上, 坐标轴的原点设在导光板下表面的宽边的中心, 则导光板关于 xz 平面对称, 由于半球型网点(或以下的圆锥型网点)是旋转对称的结构, 导光板内的任意耦合光线矢量与 z 轴组成平面, 取导光板被该平面所切的截面, 在截面内分析光线的路径。该截面与 $y = 0$ 的光线矢量情况相类似, 这样可以在二维的情况下讨论。下面仅在 xz 截面上进行分析。

3.1 平行于 x 轴的光线出光情况

LED 发出的光线中, 其中有一组平行于 x 轴的光线耦合进入导光板, 部分光线经散射点反射后由上表面射出(部分被上表面反射回来), 假设有一束光线照在半球的 A 点处, 反射后由上表面射出, 其在上表面的入射角恰好为 42.2° , 如图 2 所示。

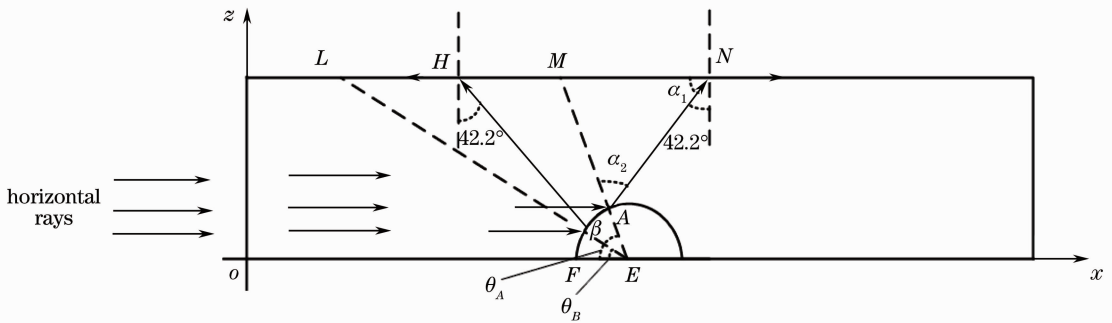


图 2 平行于 x 轴的入射光线的出光示意图

Fig. 2 Schematic diagram of emergence of the incident light parallel to x axis

由几何光学知识

$$\alpha_1 = 90^\circ - 42.2^\circ = 47.8^\circ, \quad \alpha_2 = \frac{180^\circ - 47.8^\circ}{2} = 66.1^\circ,$$

可以算出 $\theta_A = \alpha_2 = 66.1^\circ$ 。图 2 中 E 点是圆心, F 点是半圆的一端点, ME 是点 A 处的法线。又假设有一束光线照在半球的 B 点处, 反射后由上表面射出, 入射角恰好为 42.2° , 如图 2 所示, 同理可算出 $\theta_B = 23.9^\circ$ 。平行于 x 轴的所有光线在弧 AB 上有反射部分和折射部分, 由此得出反射部分的光线均可以从上表面射出而不再发生反射, 而平行于 x 轴的所有光线在 AB 之外的弧上反射后, 将再次被上表面反射回到导光板中。当然, 照在弧 AB 上的光线由于未能满足全反射条件, 将有部分光线在弧 AB 上发生折射后由下表面射出, 为了提高效率, 在制作过程中常在下表面加上反射膜。这里讨论的是经网点反射后的光线在上表面是否发生反射

的情况,即在网点反射部分的光线。

3.2 沿 z 轴耦合进入的光线出光情况

另外,LED发出的光线中有一组沿 z 轴(或接近 z 轴)耦合进入导光板,先由上下表面反射后照在网点上,再由网点反射后部分光线从上表面射出(部分被上表面反射回来)。设有一束光线照在半球的 C 点处,反射后由上表面射出,其入射角为 42.2° ,如图3所示,可知 $\theta_C = 87.2^\circ$;若有一束光线照在半球的 D 点处,假设其反射后由上表面射出,其入射角恰好为 42.2° ,如图3所示,则可算出 $\theta_D = 45^\circ$ 。沿 z 轴耦合的光线照在弧 CD 上有反射部分和折射部分,反射部分的光线均可以从上表面射出而不再发生发射。从图中可以看出, A 点在弧 CD 之间, D 点在弧 AB 之间。

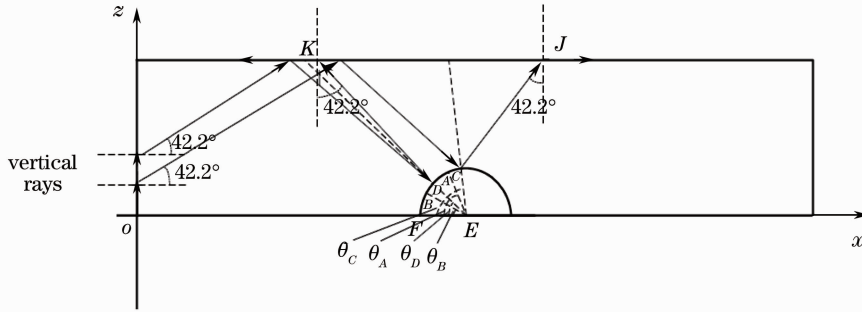


图3 沿 z 轴的人射光线的出光图

Fig. 3 Schematic diagram of emergence of the incident light parallel to z axis

综合以上所述可推知,任意方向的光线耦合进入导光板后若均照在弧 AD 上,在表面反射的光线都可以出上表面射出而不再在上表面发生反射。此处也有网点表面未满足全反射条件的光线,但讨论的是经网点反射后的光线在上表面是否发生反射的情况。

3.3 圆锥形的散射网点

下面用圆锥型的网点代替半球形的网点。由于光线在弧 AD ($\theta_A = 66.1^\circ, \theta_D = 45^\circ$) 上的反射光线均可以在上表面射出而不再反射,分别在弧上的点 A, D 处作切线,则切线与 x 轴的夹角分别是 $23.9^\circ, 45^\circ$ 。相应地,转换成顶角在 $90^\circ \sim 132.2^\circ$ 之间的圆锥,即任意光线照在顶角 $90^\circ \sim 132.2^\circ$ 之间的圆锥上的反射光线均可以从上表面射出而不在上表面反射。需要说明的是,与半球形网点的情况一样,在圆锥表面未满足全反射条件的光线将从下表面射出被反射膜反射后再次利用,在此,同半球形网点一样的考虑,即讨论的仅是经网点反射后光线在上表面是否发生反射的情况,如图4所示。

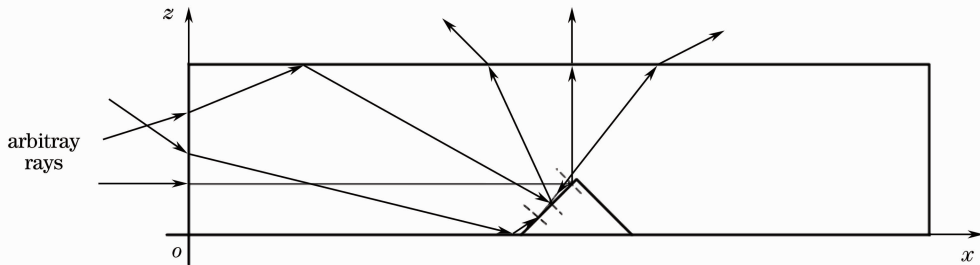


图4 任意方向入射光线的出光示意图

Fig. 4 Schematic diagram of emergence of the incident light in arbitrary direction

3.4 建模与仿真

在 AutoCAD 中给导光板布点,网点的大小根据(13)式的网点排布规律,单个网点的底面直径为 $0.3 \sim 0.6$ mm,在导光板底面分别在 x 轴方向和 y 轴方向等间距不等底面直径排布网点,网点的形状为圆锥形。例如,设置圆锥的高与底面半径的比例为 $0.5/0.5$,即圆锥顶角为 90° ,如图5(b)所示;在 TracePro 光学软件中设置导光板的尺寸 30 mm \times 20 mm \times 0.4 mm,导光板的材料属性设置为 plastic 类别中的 PMMA 并且底面为 mirror。LED 个数为 9 个,每个的尺寸 0.4 mm \times 0.4 mm \times 0.1 mm,如图5(a)所示,其仿真结果的照度图如图6所示,均匀性达到 85% 以上。

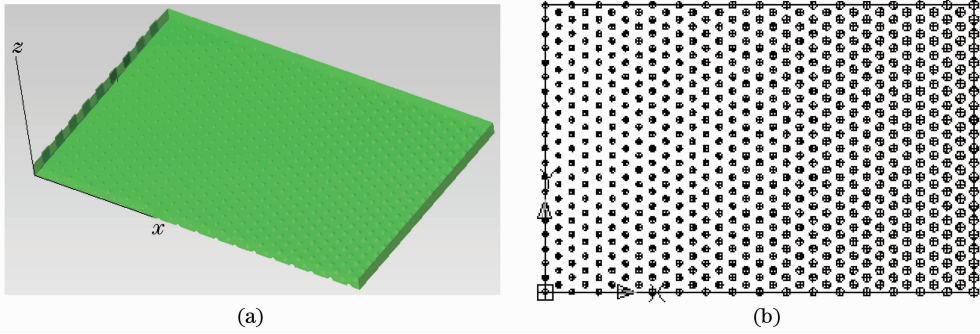


图 5 (a)导光板和(b)网点分布的示意图

Fig. 5 Schematic diagrams of (a) light guide plate and (b) dot distribution

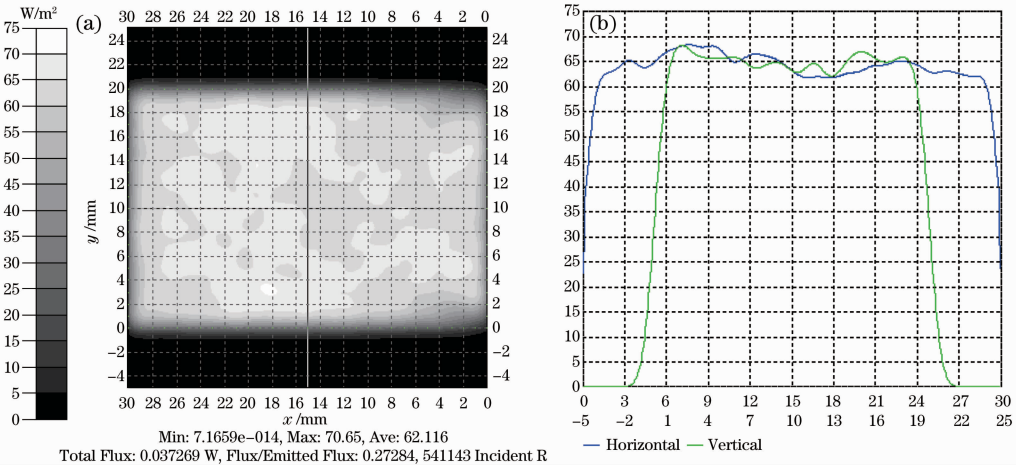


图 6 模拟照度分布图

Fig. 6 Illuminance distribution of the model

在保证导光板上表面的均匀性在 85% 以上的同时,只改变圆锥体的顶角,即改变圆锥型网点的高和底面半径的比例,比较不同顶角圆锥型网点的导光板的亮度(本文仅给出顶角为 90° 的圆锥型网点导光板上表面的照度图,图 6),经模拟仿真得到表 1 所示结果。

表 1 不同顶角导光板光通量的比较

Table 1 Flux comparison of light guide plate with cones of different apex angles

Angle / ($^\circ$)	Height/radius	Flux / W
53	1/0.5	0.028195
60	0.86/0.5	0.033313
90	0.5/0.5	0.037269
100	0.4/0.5	0.037395
120	0.3/0.5	0.037091
140	0.2/0.5	0.023055
150	0.13/0.5	0.009845

从表 1 可以直观地看出,圆锥角在 90° 、 100° 和 120° 时接收面接收到的总光通量最多,与理论结果相符。其原因是:对于 $90^\circ \sim 132.2^\circ$ 顶角范围内的圆锥型网点,光线经网点反射后直接从上表面射出而不再发生反射,而对于其他角度的圆锥型网点,光线经网点反射后射向上表面时,因为有部分光线满足全反射条件,在上表面发生全反射后再次回到导光板中,当这些光线射向导光板的侧面时,不再满足全反射条件而直接射出,造成光能的浪费。

4 结 论

针对背光源导光板散射网点形状问题,由半球形的网点推及圆锥形的网点,从推导结论可知,顶角在

90°~132.2°之间的圆锥可使照在其表面的光线大部分从上表面射出不再被上表面反射,有利于提高出射光的亮度。此分析方法适用于背光源的导光板,也适用于大面积平板照明。从分析可知,圆锥形网点的导光板可以减少设计者修改次数,从而缩短设计周期,降低成本。对于此模型的网点,为方便工程上的加工,也可以使用圆弧面或平面替代圆锥尖顶。

参 考 文 献

- 1 Su Teli, Chen Huawei, Lu Chienfu. Systematic optimization for the evaluation of the 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 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]. *光电技术*, 2008, **34**(5): 690~692
- 4 Huang Chong, Jiang Yansen, Shen Yi *et al.*. Design of scattering netted dots on light guide plate of edge-lighting LED back light[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(5): 689~692
黄 翀, 姜言森, 沈 奕 等. 侧光式 LED 背光源的导光板网点设计[J]. *应用光学*, 2008, **29**(5): 689~692
- 5 Chien Chaoheng, Chen Zhipeng. The study of integrated LED-backlight plate fabricated by micromachining technique[J]. *Microsyst. Technol.*, 2009, **15**(3): 383~389
- 6 Jyh-Cheng Yu, Pei-Kai Hsu. Design optimization and stamper fabrication of light guiding plates using silicon based micro-features[J]. *Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS*, 2009, **1**(3): 202~207
- 7 Teng Hesong, Tian Mingjun. The flat panel backlighting system[J]. *Optoelectronic Technology*, 2001, **21**(3): 210~215
滕鹤松, 田明均. 平板背光照明系统[J]. *光电子技术*, 2001, **21**(3): 210~215
- 8 Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu *et al.*. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222001
荆 雷, 刘 华, 赵会富 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222001
- 9 Mao Xingwu, Zhang Yanwen, Zhou Jianjun *et al.*. A New Generation of Green Light Source—LED and Its Application Technology[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2008
毛兴武, 张艳雯, 周建军 等. 新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008
- 10 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al.*. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297~2301
余桂英, 金 骥, 倪晓武 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2297~2301
- 11 Cao Yujie, Jin Shangzhong, Cen Songyuan. Design for LED lamps with high color rendering index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1222002
曹宇杰, 金尚忠, 岑松原. 高显色指数 LED 灯的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1222002
- 12 Li Xiaojian. Research on Design and Fabrication of Light Guide Plate[D]. Suzhou: Soochow University, 2009. 14~16
李晓建. 导光板的设计及制作[D]. 苏州: 苏州大学, 2009. 14~16
- 13 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
- 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 Luo Jiangzhong, Chen Zhe, Zhang Yonglin *et al.*. Design and simulation analysis of scattering netted dots on edge-lighting flat light guide plate[J]. *Chinese J. 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