

掠射式双面三棱柱阵列微结构扩散板的研究

梁德娟 赖丽萍 陈春玉 杜团结 庄其仁

(华侨大学信息科学与工程学院, 厦门 361021)

摘要 研究了一种适用于无导光板侧入掠射式发光二极管(LED)平板灯的双面三棱柱阵列微结构扩散板。通过菲涅耳公式理论分析了双面三棱柱阵列增透原理,利用光线追迹软件 TracePro 模拟仿真了三棱柱阵列深宽比和三棱柱底边宽度对扩散板透射率的影响。模拟结果表明,入射面的透射率随深宽比的增大而增大,对于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚碳酸酯(PC)光学材料,当深宽比为 0.5 左右时透射率达到最大,并不再随深宽比增大而改变。出射面三棱柱阵列微结构深宽比在 0.5 附近由于两次全内反射导致透射率出现一个下降区域,而三棱柱阵列间距对扩散板的透射率影响很小,结果表明优化后的三棱柱微结构阵列扩散板对掠射光线的透射率可达 93%。

关键词 光学设计;扩散板;菲涅耳公式;三棱柱微结构

中图分类号 O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.0622005

Research of Grazing Incidence Diffuser with Microstructure of Double-Sided Triangular Prism Arrays

Liang Dejuan Lai Liping Chen Chunyu Du Tuanjie Zhuang Qiren

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

Abstract A grazing incidence diffuser with double-sided triangular prism arrays is researched, which is suitable for edge-lighting light emitting diode (LED) flat panel light without light guide plate. Based on Fresnel equations, the anti-reflection principles of triangular prism arrays are analyzed. The influence of parameters of the triangular prism arrays, i. e. the ratio of depth to width and the bottom width, on the diffuser transmittance is investigated by using the simulation of ray tracing software TracePro. Simulations reveal that the transmittance of entry surface increases with the ratio of depth to width, both for polymethyl methacrylate (PMMA) and polycarbonate (PC). The transmittance achieves the maximum while the ratio of depth to width is about 0.5, and keeps invariant when the ratio increases. The transmittance of exit surface decreases when the ratio of depth to width is close to 0.5, because the light has been total reflected twice in the diffuser. The results show that the transmittance of grazing incident ray can be up to 93% in the optimized diffuser.

Key words optical design; diffuser; Fresnel equation; microstructure of triangular prism

OCIS codes 220.4000; 230.1980; 220.0220; 290.1990

1 引 言

近年来,高亮度发光二极管(LED)照明发展迅速^[1],LED 平板灯^[2-4]也应运而生。侧入式 LED 平板灯^[5-6]拥有光线柔和、发光面积大、光照均匀、节能环保等优点。然而出光效率低和制造成本高的问题一直是 LED 平板灯进一步发展的障碍,其主要原因是 LED 平板灯中的导光板存在与 LED 的耦合损

耗、吸收损耗和多次反射损耗,以及高透射率的导光板材料成本很高。为此,本课题组研究了一种无导光板的侧入掠射式 LED 平板灯,将 LED 光束直接投射到扩散板上,避免了导光板存在的问题。但由于掠射式结构存在严重的菲涅耳反射,采用现有的扩散板都不能满足 LED 平板灯高出光效率的要求。

现有 LED 平板灯采用的扩散板类型有掺杂粒

收稿日期: 2013-11-06; **收到修改稿日期:** 2014-02-11

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012H0029)

作者简介: 梁德娟(1988—),女,硕士研究生,主要从事 LED 照明方面的研究。E-mail: liangdejuanok@163.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,教授,主要从事半导体照明技术和光电检测技术方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

子和表面微结构两种类型,掺杂粒子型透过率低,光场不可控。表面微结构型主要有毛玻璃扩散板、全息扩散板和表面微结构阵列扩散板^[7-9]。表面微结构阵列扩散板可以通过改变表面微结构阵列形状和排布来调整光线角度和扩散角度,以及光场的空间和能量分布,具有极大的灵活性,是目前研究较多的扩散板类型^[10]。

本文基于无导光板侧入掠射式 LED 平板灯的应用,研究了一种双面三棱柱阵列扩散板。通过理论分析,结合软件 Solidworks 和 TracePro 的建模仿真,证明了这种微结构阵列扩散板不但对掠射光

线具有很高的透射率,而且还具有很好的柔光效果。

2 双面三棱柱阵列扩散板增透原理

双面三棱柱阵列扩散板结构与光路图如图 1 所示。光从一种具有折射率为 n_1 的介质向另一种具有折射率为 n_2 的介质传播时,在两者的交界处将会发生光的反射与折射^[11-12],设入射的光束为平行光,且与水平方向成微小角度 θ 入射,光线在扩散板中无吸收。

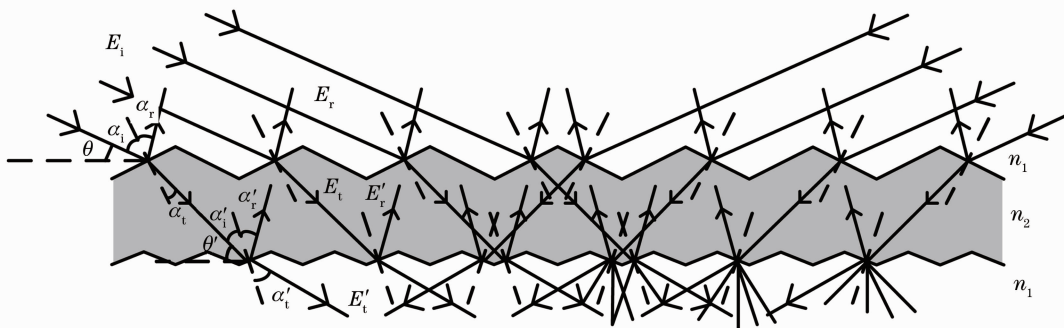


图 1 光线传播示意图

Fig. 1 Schematic of beam propagation

根据菲涅耳公式,入射面(上表面)反射光线的 s 分量和 p 分量反射系数可表示为

$$r_s = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_1 \cos \alpha_i - n_2 \cos \alpha_t}{n_1 \cos \alpha_i + n_2 \cos \alpha_t}, \quad (1a)$$

$$r_p = \frac{E_r}{E_i} = \frac{n_2 \cos \alpha_i - n_1 \cos \alpha_t}{n_2 \cos \alpha_i + n_1 \cos \alpha_t}, \quad (1b)$$

式中 α_i 为入射角, α_t 为折射角, n_1, n_2 分别为空气和扩散板基底板材的折射率。由折射定律 $n_1 \sin \alpha_i = n_2 \sin \alpha_t$, 可得光强反射率 R 为

$$R = r_s^2 + r_p^2 = \left\{ \frac{n_1 \cos(\alpha_i) - n_2 \sqrt{1 - \left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_i) \right]^2}}{n_1 \cos(\alpha_i) + n_2 \sqrt{1 - \left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_i) \right]^2}} \right\}^2 + \left\{ \frac{n_1 \sqrt{1 - \left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_i) \right]^2} - n_2 \cos(\alpha_i)}{n_1 \sqrt{1 - \left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\alpha_i) \right]^2} + n_2 \cos(\alpha_i)} \right\}^2. \quad (2)$$

设入射面三棱柱横截面三角形的高度为 h_2 , 底边长为 D_2 , 三角形的顶角为 $2\beta_2$, 定义深宽比为 $c_2 = h_2/D_2$, 则有 $\cot \beta_2 = 2c_2$, 即 $\beta_2 = \text{arccot}(2c_2)$ 。

由图 1 知, $\alpha_i = \beta_2 - \theta$, 且 $\theta \ll 1$, 可得

$$\sin \alpha_i = \sin \beta_2 \cos \theta - \cos \beta_2 \sin \theta \approx \sin[\cot^{-1}(2c_2)] - \theta \cos[\cot^{-1}(2c_2)], \quad (3)$$

$$\cos \alpha_i = \cos \beta_2 \cos \theta + \sin \beta_2 \sin \theta \approx \cos[\cot^{-1}(2c_2)] + \theta \sin[\cot^{-1}(2c_2)]. \quad (4)$$

光在两介质之界面上为能量守恒,即反射率与透射率之和为 1,则透射率 T 为

$$T = 1 - R. \quad (5)$$

由(2)~(5)式可得

$$T = 1 -$$

$$\left\{ \frac{n_1 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_2)] + \theta \sin[\cot^{-1}(2c_2)] \} - n_2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_1}{n_2} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_2)] - \theta \cos[\cot^{-1}(2c_2)] \} \right\}^2}}{n_1 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_2)] + \theta \sin[\cot^{-1}(2c_2)] \} + n_2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_1}{n_2} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_2)] - \theta \cos[\cot^{-1}(2c_2)] \} \right\}^2}} \right\}^2 - \left\{ \frac{n_1 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_1}{n_2} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_2)] - \theta \cos[\cot^{-1}(2c_2)] \} \right\}^2} - n_2 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_2)] + \theta \sin[\cot^{-1}(2c_2)] \}}{n_1 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_1}{n_2} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_2)] - \theta \cos[\cot^{-1}(2c_2)] \} \right\}^2} + n_2 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_2)] + \theta \sin[\cot^{-1}(2c_2)] \}} \right\}^2 \right\}. \quad (6)$$

同理可得扩散板内到达下表面的光线与水平方向的夹角 $\theta' = \beta_2 - \arcsin\left[\frac{n_1}{n_2}\sin(\alpha_i)\right] = \arctan(2c_2) - \arcsin\left[\frac{n_1}{n_2}\sin(\alpha_i)\right]$, 则出射面(下表面)的透射率 T' 为

$$T' = 1 -$$

$$\left\{ \frac{n_2 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_1)] + \theta' \sin[\cot^{-1}(2c_1)] \} - n_1 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_2}{n_1} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_1)] - \theta' \cos[\cot^{-1}(2c_1)] \} \right\}^2}}{n_2 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_1)] + \theta' \sin[\cot^{-1}(2c_1)] \} + n_1 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_2}{n_1} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_1)] - \theta' \cos[\cot^{-1}(2c_1)] \} \right\}^2}} \right\}^2 - \left\{ \frac{n_2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_2}{n_1} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_1)] - \theta' \cos[\cot^{-1}(2c_1)] \} \right\}^2} - n_1 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_1)] + \theta' \sin[\cot^{-1}(2c_1)] \}}{n_2 \sqrt{1 - \left\{ \frac{n_2}{n_1} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_1)] - \theta' \cos[\cot^{-1}(2c_1)] \} \right\}^2} + n_1 \{ \cos[\cot^{-1}(2c_1)] + \theta' \sin[\cot^{-1}(2c_1)] \}} \right\}^2 \right\}, \quad (7)$$

其中 $c_1 = h_1/D_1$ 为下表面微三棱柱阵列的深宽比, 并且

$$\left\{ \frac{n_2}{n_1} \{ \sin[\cot^{-1}(2c_1)] - \theta' \cos[\cot^{-1}(2c_1)] \} \right\}^2 \leq 1.$$

显然, 扩散板总透射率 T_t 为

$$T_t = T \cdot T'. \quad (8)$$

(6)~(8)式给出了入射面透射率、出射面透射率和总透射率与三棱柱微结构深宽比的关系, 当光束入射角 θ 一定时, 存在最大透射率及其对应的深宽比 c_1 和 c_2 。设材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 折射率为 1.49, 图 2 和图 3 为根据(6)~(8)式计算得到的透射率与深宽比和入射角度的关系曲线, 从中可以看到双面三棱柱阵列扩散板具有很强的增透作用, 并且深宽比在 $0 \sim 0.3$ 时扩散板总透射率 T_t 随深宽比的增大而增大。

3 光学特性的仿真模拟

为了全面分析图 1 所示双面三棱柱阵列微结构扩散板的光学特性, 建立无导光板 LED 平板灯仿真模型如图 4 所示, 设 LED 光源为经过光束整形的光强均匀分布的平行光, 光强均匀分布的平行光可根据非成像光学理论^[13]中的边缘光线原理, 采用反射

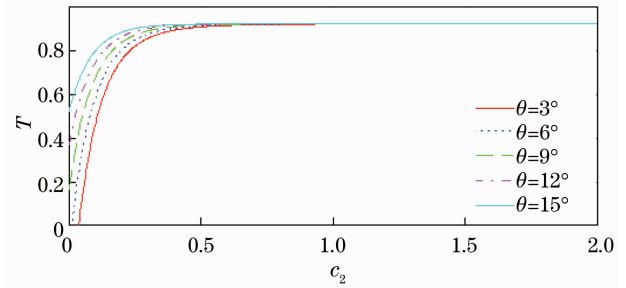


图 2 入射面透射率 T 随深宽比 c_2 变化曲线

Fig. 2 Transmittances of incident plane T vary with the ratio of depth to width c_2

旋转面^[14]和折射旋转面设计的自由曲面投射器获得^[15-16], LED 光源安装在扩散板的两个相对的侧边上, 与扩散板表面成 θ 角入射。扩散板的基材分别选用 PMMA(折射率 1.49)和聚碳酸酯(PC)(折射率为 1.59)。模拟区域尺寸为 $240 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 忽略材料的吸收特性。设入射面和出射面的三棱柱阵列微结构三角形底边宽度分别为 D_2 和 D_1 , 相应的微结构三角形高度为 h_2 和 h_1 。同时设置一片模拟接收板(图中没有画出), 用于接收出射光能量并给出出射光能量分布, 尺寸为 $240 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。

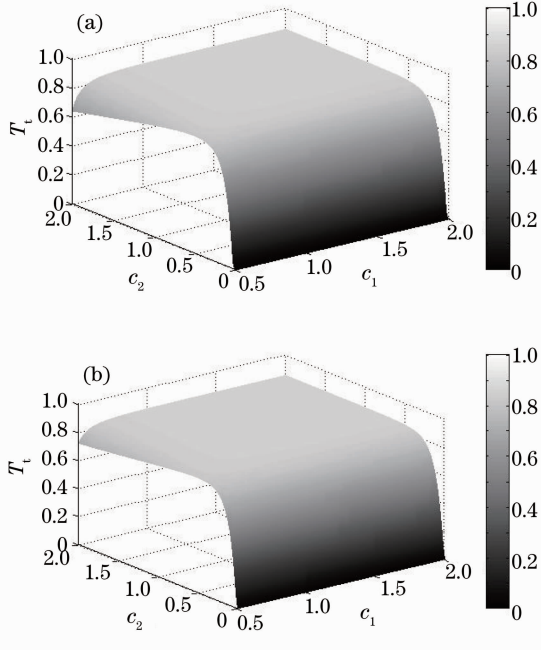


图 3 微结构深宽比对扩散板总透射率的影响。
(a) $\theta=3^\circ$; (b) $\theta=6^\circ$

Fig. 3 Effect of the ratio of depth to width of microstructure on total transmittance of diffuser. (a) $\theta=3^\circ$; (b) $\theta=6^\circ$

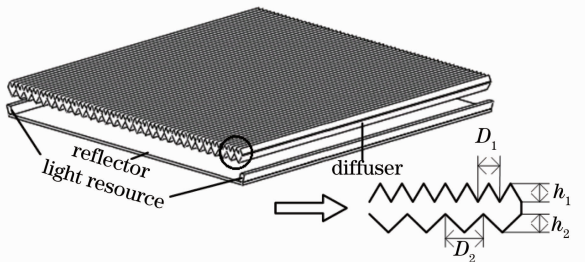


图 4 仿真模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of simulation model

3.1 入射面三棱柱阵列

根据图 2 曲线(a)可知,当入射面三棱柱阵列的深宽比 $c_2 > 0.5$ 时,入射面可以达到最大透射率。为了验证理论计算结果的正确性,采用 TracePro 光线追迹软件进行仿真验证。在图 4 所示的仿真模型中,将模拟接收板放置在距离入射面 1 mm 处,用于直接接收入射面的透射光。图 5 为扩散板入射面透射率特性的模拟结果,在固定 LED 光束方向(如 $\theta=6^\circ$)的情况下,当入射面三棱柱阵列深宽比 $c_2 \leq 0.5$ 时,透射率的值随 c_2 增大而增大,当 $c_2 > 0.5$ 时, c_2 继续增大透射率基本不变,与图 2(a)理论计算曲线相符。透射率随 c_2 增大的原因是当三棱柱阵列深宽比 c_2 很小时,入射光线的入射角很大,菲涅耳反射明显,导致反射损耗很大。随着深宽比 c_2 的增大,入射面菲涅耳反射减小,透射率随之增大。继续

增大深宽比 c_2 ,入射光线入射角变小,菲涅耳反射也很小,透射率达到最大值后基本稳定不变。从图 5 还可以看到,不同入射方向角 θ 对深宽比 $c_2 \leq 0.5$ 时的入射面透射率影响较大,当 $c_2 > 0.5$,透射率基本不受入射面深宽比 c_2 和入射方向角 θ 的影响,同时 PMMA 材质与 PC 材质的入射面透射率具有基本相同的变化特性。

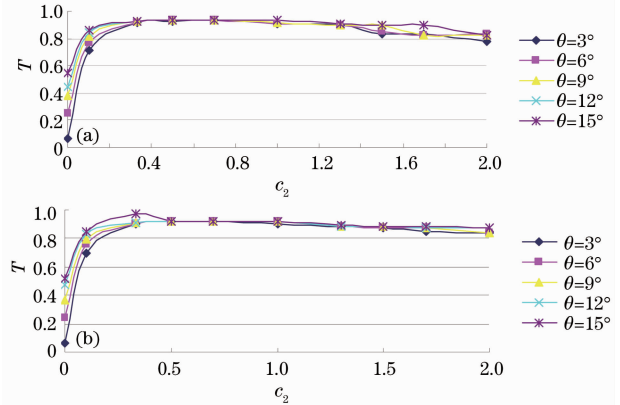


图 5 入射面三棱柱阵列不同深宽比的透射率曲线。
(a)材料为 PMMA; (b)材料为 PC

Fig. 5 Transmittance curves as a function of different depth width ratios of triangular prism arrays on incident plane with material of (a) PMMA and (b) PC

3.2 出射面三棱柱阵列

根据 3.1 节的分析,入射面三棱柱阵列的深宽比 $c_2 > 0.5$ 时,入射面可以达到最大透射率基本不变,所以以入射面三棱柱阵列深宽比 $c_2 = 0.7$ 为条件,采用光线追迹法仿真模拟出射面三棱柱阵列深宽比 c_1 对扩散板的总透射率 T_t 的影响,结果如图 6

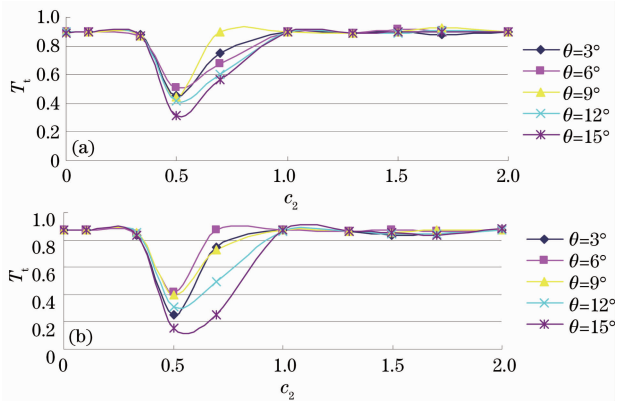


图 6 出射面三棱柱阵列深宽比对扩散板总透射率的影响。(a)材料为 PMMA; (b)材料为 PC

Fig. 6 Influence of depth width ratio of microstructure on total transmittance of diffuser with material of (a) PMMA and (b) PC

所示。当三棱柱阵列深宽比 $c_1 < 0.5$ 时,透射率较高,这是因为扩散板内光线在出射面的入射角较小,产生内反射也小,光线 1 射出扩散板时损耗就小,如图 7(a)所示;而当 c_1 接近 0.5 时,扩散板内光线 1 在出射面的三棱柱两个表面均满足全内反射条件,形成反射光线 3,如图 7(b)所示,此时由于这类全内反射的存在,使扩散板的总透射率降低。继续增大 c_1 ,当 $c_1 > 1$ 时,扩散板内光线 1 经过出射面三棱柱第一个反射面后将光线直接反射出扩散板(光线 4),没有产生二次全反射,因而没有全内反射损耗,使总透射率达到最大并基本保持不变。图 6 还给出了 LED 光束与扩散板入射面夹角 θ 变化时,扩散板透射率与出射面三棱柱阵列深宽比的变化规律,

PMMA 材质与 PC 材质的仿真结果相似。比较图 6 和图 3 可以发现,图 6 中深宽比 c_1 在 0.5 附近总透射率有较大的损耗,而图 3 中 c_1 在 0.5 附近的总透射率是平坦的,这是因为图 3 的计算没有考虑扩散板出射面的全内反射损耗等因素的影响。

由图 5 与图 6 可见,LED 光束与扩散板入射面夹角 θ 变化时,PMMA 材质与 PC 材质的扩散板透射率随出射面三棱柱阵列深宽比的变化规律相似,说明材质光学性能的差异对透射率影响不大。但由于 PMMA 具有更好的耐候性、机械强度和化学稳定性,而且价格低廉,玻璃化温度低,易于成型,因此设计侧入掠射式 LED 平板灯的扩散板时以 PMMA 材质为最佳。

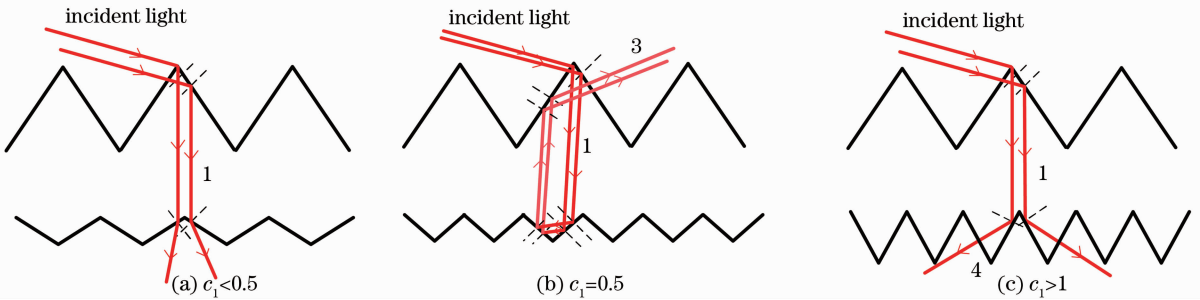


图 7 扩散板内光线路径示意图

Fig. 7 Schematic path of beam in the diffuser

3.3 三棱柱底边宽度对扩散板透射率的影响

在最佳深宽比($c_1 = 1.5, c_2 = 0.7$)条件下,改变三棱柱底边宽度(即三棱柱阵列条纹宽度),观察扩散板透射率的变化。图 8(a)为出射面条纹宽度 $D_1 = 0.2 \text{ mm}$ 不变,扩散板的透射率随入射面条纹宽度 D_2 的变化曲线。图 8(b)所示为入射面条纹宽度 $D_2 = 0.858 \text{ mm}$ 不变,扩散板的透射率随出射面条纹宽度 D_1 的变化曲线。从图中可见,无论是 D_1

还是 D_2 改变,对扩散板的透射率影响都不大。图 9 所示为入射面条纹宽度 $D_2 = 0.858 \text{ mm}$ 时,出射面采用不同条纹宽度的接收面照度分布图,可看出射面为细条纹($D_1 = 0.2 \text{ mm}$)的扩散板的光强分布均匀性优于宽条纹($D_1 = 0.6 \text{ mm}$)的效果。因此,从制作成本和视觉效果两方面考虑,入射面三棱柱阵列宜采用宽条纹(D_2 较大),而出射面三棱柱阵列宜采用细条纹(D_1 较小)的方案。

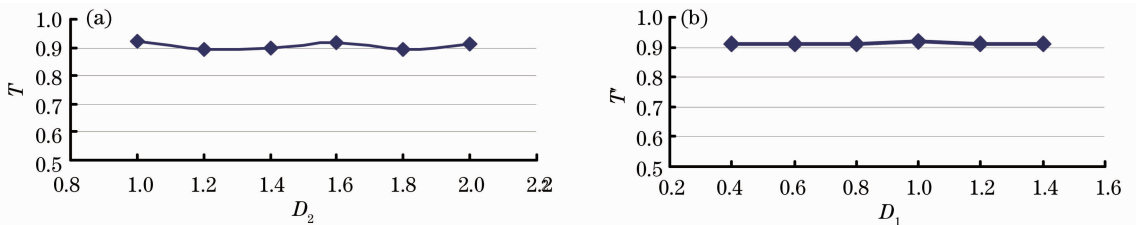


图 8 透射率随条纹宽度变化曲线。(a) D_2 变化; (b) D_1 变化

Fig. 8 Variation curves of transmittance as a function of the width (a) D_2 and (b) D_1

选取扩散板的微结构参数为: $\theta = 3^\circ, c_2 = 0.7, c_1 = 1.5, D_1 = 0.858 \text{ mm}, D_2 = 0.2 \text{ mm}$,运用光线追迹法模拟仿真的照度图和配光曲线如图 10 所示,仿真结果表明三棱柱阵列扩散板的透射率可达 93%,优于文献[17]报道的圆锥非球形微结构、球形微结

构和金字塔非球形微结构的直下式 PMMA 扩散板的最好透射率(84.2%),与文献[9]报道的直下式腔内多次反射扩散板的最高透射率(92%)相当。而目前雾度为 90%左右的掺杂粒子的 PC 光扩散板、PMMA 光扩散板和聚苯乙烯(PS)光扩散板的直下

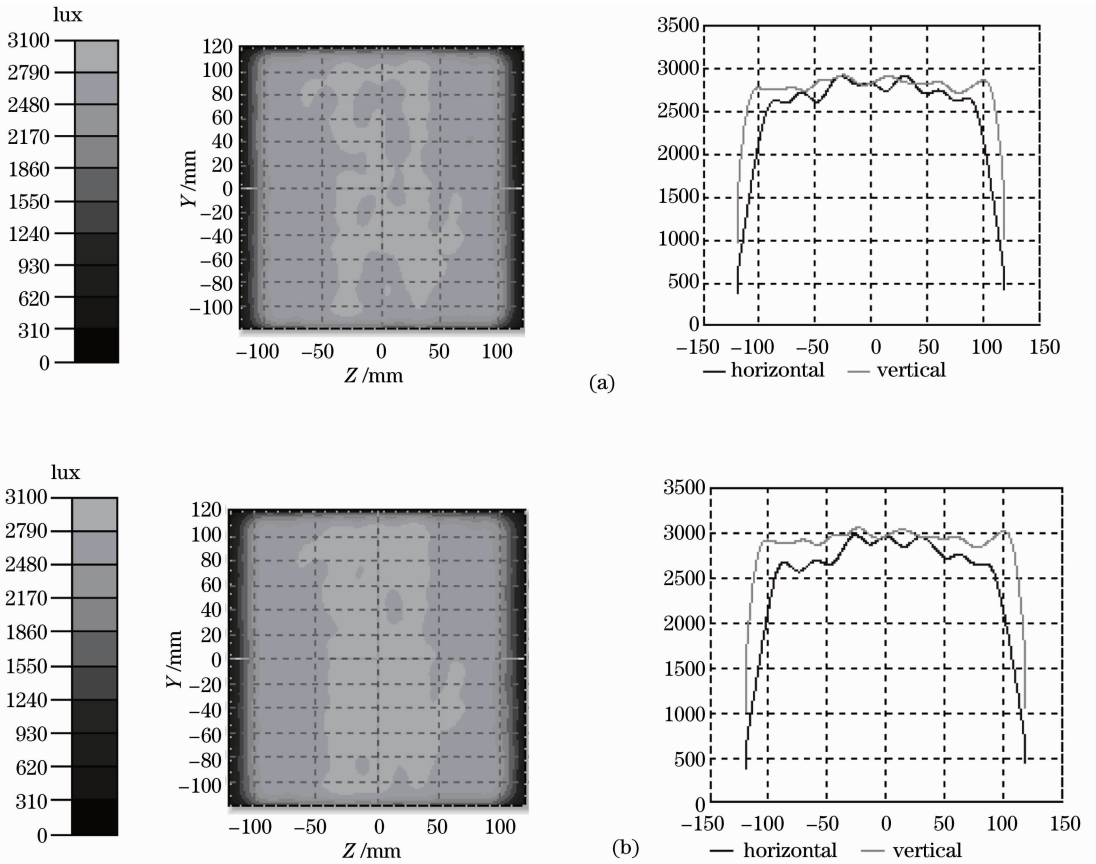


图 9 出射面微结构三棱柱阵列宽度对照度分布的影响。(a) $D_1=0.2$ mm; (b) $D_1=0.6$ mm
Fig. 9 Uniformity of illumination as a function of the width of exit surface triangular prism arrays.

(a) $D_1=0.2$ mm; (b) $D_1=0.6$ mm

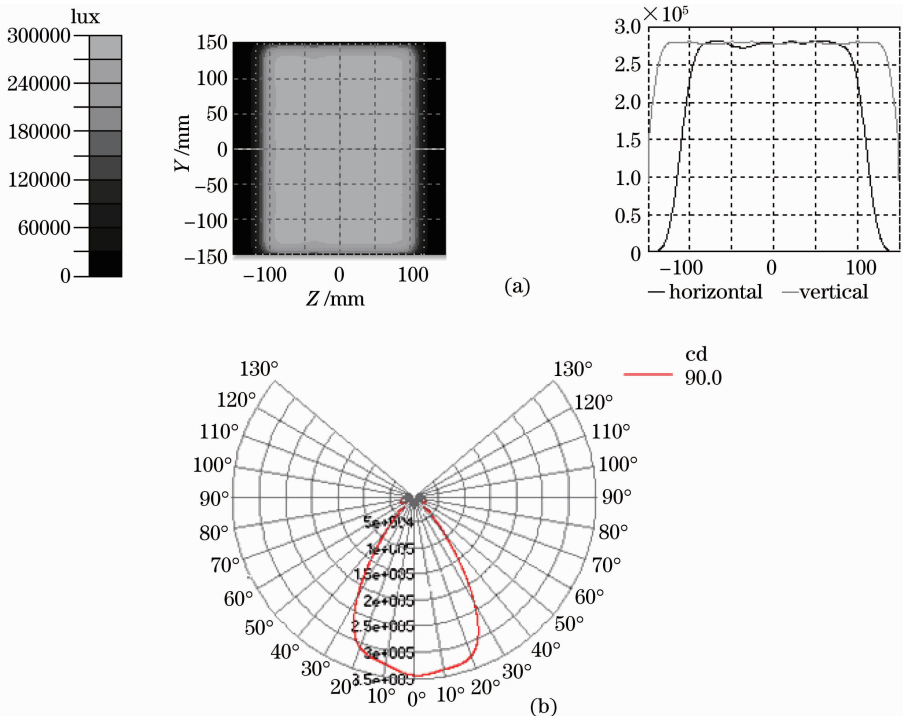


图 10 双面三棱柱阵列微结构扩散板的 (a) 照度图和 (b) 配光曲线

Fig. 10 (a) Illumination map and (b) distribution curve of diffuser with double-sided triangular prism arrays

式透射率分别只有 80%、85% 和 68% 左右。图 10(b) 的配光曲线则显示了三棱柱阵列扩散板可以将侧面平行掠射在扩散板上的光线扩散为正向 60° 左右(光束角)的均匀发散光线,可见具有很好的扩散(柔光)效果。

3.4 与现有导光板光学效果的对比

为了表明双面三棱柱阵列微结构扩散板对掠入射光线的的光学效果优势,模拟比较了现有常见表面微结构扩散板和掺杂粒子的 PC、PMMA 和 PS 平面扩散板的透射率,面板均匀度,柔光效果的比较如表 1 所示,其中设表面微结构的间距均为 0.28 mm^[17],掺杂粒子的 PC、PMMA 和 PS 平面扩散板的光吸收率分别为 20%、15% 和 32%,入射光线掠射角为

表 1 现有扩散板均匀度、透射率和柔光效果的比较($\theta=3^\circ$)

Table 1 Comparison of uniformity, transmittance and soft lighting effect of existing diffusers ($\theta=3^\circ$)

Types of diffuser	Surface of microspheres	Surface of micro-cones	Surface of micro-pyramids	Doped plate PC	Doped plate PMMA	Doped plate PS	Surface of new microstructure
Transmittance /%	41	36	39	12	14	11	93
Uniformity /%	84	82	87	99	99	99	95
Soft lighting grade	B	B	B	A ⁺	A ⁺	A ⁺	A

4 结 论

由于常规扩散板不适于侧入掠射式 LED 平板灯,研究了一种新型双面三棱柱微结构阵列扩散板。根据菲涅耳公式证明了双面三棱柱阵列扩散板对掠射式光线具有明显的增透作用,采用光线追迹软件 Tracepro 的模拟仿真结果表明,入射面三棱柱阵列微结构对 3°~5° 掠射光线的透射率随深宽比的增大而增大,对于 PMMA 和 PC 光学材料,深宽比在 0.5 左右达到最大并基本保持不变。出射面三棱柱阵列微结构深宽比在 0.5 附近由于两次全内反射而出现一个下降区域,而后透射率随深宽比的增大而增大。仿真结果还显示了三棱柱阵列间距对扩散板的透射率影响很小,结果表明优化后的三棱柱微结构阵列扩散板对掠入射光线的透射率可达 93%,远高于现有扩散板的透射率,具有显著的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Wang Hong, Ye Feifei, Huang Huamao, *et al.*. Design and realization of reflective current barrier for high-brightness LED chips [J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(6): 1077-1081.
王洪,叶菲菲,黄华茂,等.高照度 LED 芯片的反射型电流阻挡层设计与实现[J].*光电子·激光*, 2012, 23(6): 1077-1081.
- 2 Y K Park, J Y Joo, C B Lee, *et al.*. Design and fabrication of a light emitting diode-based diffuser sheet-less light guide plate for lighting applications [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(6): 1017-1022.

$\theta=3^\circ$ 。

从表 1 可以看到,现有表面微结构扩散板对掠射角为 $\theta=3^\circ$ 的入射光线的透射率在 36%~41% 范围内,远低于实验中三棱柱微结构扩散板的透射率(93%),而掺杂粒子的 PC、PMMA 和 PS 平面扩散板的透射率则更低,只有 11%~14%,主要原因是现有扩散板的入射面对掠入射光线产生强烈的菲涅耳反射,而透射面则产生全内反射,导致扩散板的透射率很低。表 1 还显示了扩散板的光均匀度和柔光效果以掺杂粒子的 PC、PMMA 和 PS 平面扩散板为最优,而三棱柱微结构扩散板次之,但优于现有表面微结构扩散板。

- 3 Li Jungyu, Chen Shihpu, Lin Yiping, *et al.*. A lighting mechanism for flat electron emission lamp [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(9): 091501.
- 4 Lee Hsiao Wen, Lin Bor Shyh. Improvement of illumination uniformity for LED flat panel light by using micro-secondary lens array [J]. *Opt Express*, 2012, 20(s6): A788-A798.
- 5 C H Tsuei, J W Pen, W S Sun. Simulating the illuminance and the efficiency of the LED and fluorescent lights used in indoor lighting design [J]. *Opt Express*, 2008, 16(23): 18692-18701.
- 6 M D Tsai, J J Chen, K L Huang. A design of LED panel lamp for indoor illumination [C]. *Intelligent Technologies and Engineering Systems*. Springer New York, 2013: 487-493.
- 7 X H Lee, J L Tsai, S H Ma, *et al.*. Surface-structured diffuser by iterative down-size molding with glass sintering technology [J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6135-6145.
- 8 C Sun, W T Chien, I Moreno, *et al.*. Calculating model of light transmission efficiency of diffusers attached to a lighting cavity [J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 6137-6148.
- 9 S Yu, R Hu, M Chen, *et al.*. Improvement of light extraction efficiency of white LEDs using microstructure array on phosphor silicone layer [C]. 2012 International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, 2012: 674-677.
- 10 Zhuang Xiaolei, Zhou Fang, Shen Su, *et al.*. Characteristics of diffusers with cascaded-microlens arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3306-3310.
庄孝磊,周芳,申溯,等.层叠微透镜阵列光扩散片特性研究[J].*光学学报*, 2010, 30(11): 3306-3310.
- 11 Sun Yanyan, Han Lu, Shi Xiaoyu, *et al.*. General laws of reflection and refraction for metasurface with phase discontinuity [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(10): 104201.
孙彦彦,韩璐,史晓玉,等.用于相位突变界面的广义的反射定律和折射定律[J].*物理学报*, 2013, 62(10): 104201.
- 12 J G Chang, Y B Fang. Dot-pattern design of a light guide in an edge-lit backlight using a regional partition approach [J]. *Opt*

- Eng, 2007, 46(4): 043002.
- 13 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics [J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(3): 680—684.
金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 680—684.
- 14 Liu Zhengquan, Sun Yaojie, Lin Yandan. Freeform reflector design for rectangular illuminance distribution based on differential geometry [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022006.
刘正权, 孙耀杰, 林燕丹. 基于微分几何的矩形照度分布自由曲面反射器设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022006.
- 15 Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan. Design of an efficient projector for LED flat lamp without light guide plate [J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(6): 441—445.
- 16 Huang Qilu, Wu Fengtie. Investigation of uniform illumination of near-field targets using a conic light-emitting diode array [J]. Acta Optical Sinica, 2010, 30(10): 3039—3043.
黄启禄, 吴逢铁. 基于近场均匀照明的 LED 二次曲线阵列的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 3039—3043.
- 17 He Xiaoxiang, Wu Daming, Zheng Xiuting. Effect of microstructure of light diffuser plate on uniformity and transmittance [J]. Chinese J Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(2): 153—157.
何晓祥, 吴大明, 郑秀婷. 扩散板表面微结构对均匀度与透射率的影响[J]. 液晶与显示, 2012, 27(2): 153—157.

栏目编辑: 韩 峰