

用于双端投射LED日光灯的扩散管研究

庄琳玲 庄其仁 王巨锋 胡奕彬 刘士伟

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 针对普通扩散管应用于双端投射发光二极管(LED)日光灯中存在出光效率低等缺陷,研究了一种内表面为三角形微结构、外表面为凹面微透镜结构的扩散管。介绍了双端投射LED日光灯扩散管原理,给出了扩散管内表面三角形微结构底角计算公式。采用Tracepro软件仿真分析了扩散管微结构参数对透光率的影响。结果表明:内表面微结构三角形底角确定后,三角形底边宽度 D 不会对透光率产生影响;外表面微透镜直径 d 对透光率影响较大(当 $d=D/2$ 时透光率最低),而其形状决定扩散角度大小(横截面为样条曲线的凹面微透镜的扩散角大于正圆曲线和椭圆曲线),但透射率相当。优化后的扩散管透光率约为0.92,其轴向光束角约为 180° ,径向光束角为 360° 。采用改进的双三角形内表面微结构可使日光灯管轴向光照度均匀性优于90%。

关键词 光学器件; LED日光灯; 扩散管; 表面微结构; 双端投射; 透光率

中图分类号 O435 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.062301

Research of Diffusion Tube for Double-Capped Cast LED Daylight Lamp

Zhuang Linling Zhuang Qiren Wang Jufeng Hu Yibin Liu Shiwei

Fujian Provincial Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In order to overcome the defects such as low light emitting efficiency of double-capped cast light emitting diode (LED) daylight lamp using a general diffusion tube, a new diffusion tube with triangular microstructure as inner surface and with concave micro-lens microstructure as outer surface is studied. The principles of such a diffusion tube used for double-capped cast LED daylight lamp is introduced. A formula to calculate triangle microstructure's base angles is derived. The influences of the parameters of the diffusion microstructure on the efficiency of the transmitted light are analyzed by simulations using TracePro software. The results show that, when triangle microstructure's base angles are certain, triangular bottom width D has no effect on the light transmittance. Diameter d of the outer micro-lens surface has a greater impact on the transmittance, and the transmittance is the lowest when $d=D/2$. The shape of the outer micro-lens surface determines the divergence angle of light beam from this diffuser, and the divergence angle for a concave micro-lenses with cross-section being spline curve is greater than that with cross-section being perfect circular or elliptic curve. However, their transmittances are similar. The transmittance of this diffuser after optimization is about 0.92, the axial beam divergence angle is about 180° , and the radial beam divergence angle is 360° . The axial illumination uniformity of the daylight tube is better than 90% when using the improved double triangle inner surface microstructure.

Key words optical devices; LED daylight lamp; diffusion tube; surface microstructure; double-capped cast; transmission efficiency

OCIS codes 230.1980; 240.3990; 220.0220; 220.4880; 290.1990

1 引言

发光二极管(LED)照明灯因具有效率高、寿命长、光线柔和、色彩饱和度高等特点而得到广泛研究^[1-4]。LED为朗伯型光源,为有效利用光能量和避免眩光现象,需要设计相应的二次光学透镜或扩散器来约束光

收稿日期: 2015-01-13; 收到修改稿日期: 2015-01-25; 网络出版日期: 2015-05-28

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2012H0029)、福建省泉州市科技计划项目(2014Z105)

作者简介: 庄琳玲(1989—),女,硕士研究生,主要从事LED照明方面的研究。E-mail: 844546674@qq.com

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

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

束^[5-8]。普通LED日光灯管通过将长条形LED阵列发出的光照射在扩散管内表面,在穿过扩散管时发生折射、反射和散射,之后从扩散管的外表面射出,形成扩散光源。但现有LED日光灯管将驱动电路板、LED阵列固定在灯管管体内,这种设计方式的缺点是当其中一个结构出现问题时,往往不能够局部更换,只能将LED日光灯整个报废。此外,使用大量LED芯片需要大面积的电路板和散热器^[9-10],材料成本和人工成本较高。

LED日光灯管多采用全塑型,在制作时为避免LED光线直接射出所产生的眩光对人眼的伤害,人们通常在管材内层上拉条纹,或者在管材塑料中添加扩散剂,作为日光灯扩散管。在管材内层上拉条纹来克服眩光的扩散管通常条纹较粗,且只能产生一维扩散(垂直条纹方向),柔光效果不好。在管材塑料中添加扩散剂存在扩散剂大小和分布不均匀造成灯管光场不均匀和“热点”等缺陷,加上扩散剂对光线的吸收,将导致灯管出光率下降。而通过在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)或聚碳酸酯(PC)材料表面设置微结构以起到扩散作用是设计光扩散板的新方法,此类表面微结构型扩散板透光率高,光场可控性好,设计灵活,适用于多种场合^[11-12]。

为克服普通LED日光灯管的缺点,设计了一种将LED光源安装在灯管两侧的双端投射LED日光灯^[13],与现有的LED日光灯不同,这种投射式LED日光灯分为灯头和管体两部分,灯头包括LED发光组件、驱动电路和散热器,灯头安装在灯管两端,灯头和管体采用可拆卸式连接,当其中一个部分出现问题需要检修或更换时,只需针对性地处理,维修方便。双端投射LED日光灯将发光组件整形后的LED光束以与扩散管中心轴线成很小的夹角投射在扩散管的内表面上。由于LED光束在扩散管内表面的光入射角很大,采用普通LED日光灯扩散管将会产生强烈的Fresnel反射,光的透过率很低。本文研究一种用于双端投射LED日光灯的扩散管,扩散管内表面截面呈不等腰三角形微结构、外表面截面为凹面微透镜结构。基于几何光学和Fresnel公式,分析扩散管设计原理和相关结构参数计算公式,讨论影响扩散管光利用率的因素,并结合TracePro软件进行光线追迹仿真和优化。

2 双端投射LED日光灯扩散管原理

双端投射LED日光灯工作原理图如图1所示,朗伯型LED光源经过投射器整形为光强基本均匀分布且发散角很小的光束,整形后的光束斜入射在扩散管的内表面上,经过扩散管后成为扩展面光源。

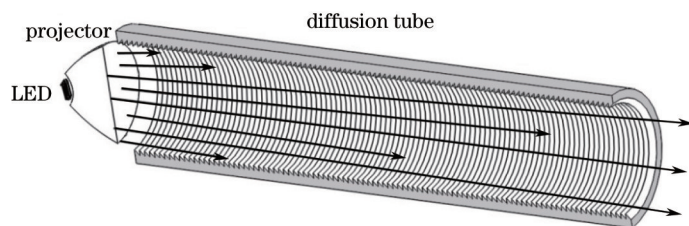


图1 双端投射LED日光灯原理图

Fig.1 Principle diagram of double-capped cast LED daylight lamp

表面微结构型扩散管的横截面结构与光路如图2所示,其入射表面微结构截面为不等腰三角形,出射表面凹面微透镜结构截面为正圆曲线,或椭圆曲线,或样条曲线,扩散管整体由截面绕中轴线旋转360°构造而成。

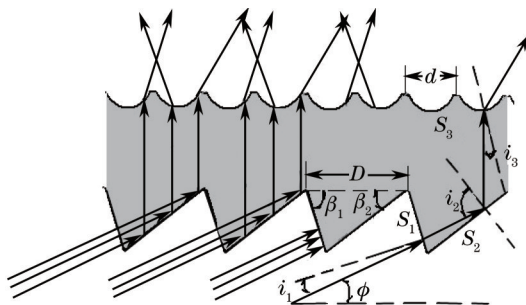


图2 扩散管截面和光路示意图

Fig.2 Diffusion tube section and its light path diagram

光线在扩散管中的传输过程为:来自LED光源的斜入射光线垂直入射 S_1 表面,使 S_1 表面的Fresnel反射最小,透射光线在 S_2 表面产生全内反射,并使反射光线垂直于扩散管的轴线入射扩散管出射表面 S_3 (S_3 为带曲率的微结构),最后以较小的入射角在外表面 S_3 折射输出产生角度扩散,根据Fresnel公式,可得扩散管的

透光率公式为

$$\eta = T_1 R_2 T_3 = \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\cos(i_1) - n \sqrt{1 - \left[\frac{1}{n} \sin(i_1) \right]^2}}{\cos(i_1) + n \sqrt{1 - \left[\frac{1}{n} \sin(i_1) \right]^2}} \right\}^2 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sqrt{1 - \left[\frac{1}{n} \sin(i_1) \right]^2} - n \cos(i_1)}{\sqrt{1 - \left[\frac{1}{n} \sin(i_1) \right]^2} + n \cos(i_1)} \right\}^2 \right\} \cdot \left\{ \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \cos(i_2) - \sqrt{1 - [n \sin(i_2)]^2}}{n \cos(i_2) + \sqrt{1 - [n \sin(i_2)]^2}} \right\}^2 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \sqrt{1 - [n \sin(i_2)]^2} - \cos(i_2)}{n \sqrt{1 - [n \sin(i_2)]^2} + \cos(i_2)} \right\}^2 \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \cos(i_3) - \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2}}{n \cos(i_3) + \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2}} \right\}^2 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2} - \cos(i_3)}{n \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2} + \cos(i_3)} \right\}^2 \right\}, \quad (1)$$

式中 T_1 为 S_1 面的透射率, R_2 为 S_2 面的反射率, T_3 为 S_3 面的透射率, i_1 、 i_2 、 i_3 分别为 S_1 、 S_2 和 S_3 面的光入射角。

若以 PMMA 作为扩散管材料, 取 $n = 1.49$, 当 $i_1 = 0$ (光线在 S_1 表面垂直入射), 可得 S_2 表面产生全内反射条件为 $i_2 \geq 42.16^\circ$, 此时扩散管的透光率公式可简化为

$$\eta = T_1 R_2 T_3 = 0.96 \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \cos(i_3) - \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2}}{n \cos(i_3) + \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2}} \right\}^2 - \frac{1}{2} \left\{ \frac{n \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2} - \cos(i_3)}{n \sqrt{1 - [n \sin(i_3)]^2} + \cos(i_3)} \right\}^2 \right\}. \quad (2)$$

由(2)式得到的扩散管透光率曲线如图3所示, 从图中可见, i_3 小于 30° 时能够得到较高的透光率 ($0.924 \geq \eta \geq 0.91$)。因此扩散管设计时应尽量使 i_3 取值小于 30° 。

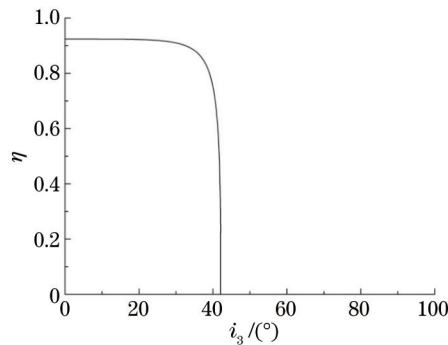


图3 扩散管透光率曲线

Fig.3 Transmittance curve of diffusion tube

设入射光以与中心轴线夹角 ϕ 投射在扩散管的内表面上, 由几何关系容易得出截面三角形的两个底角 β_1 、 β_2 分别为^[12]

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} - \phi, \quad (3)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} \left(\phi + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4)$$

3 结构和参数的仿真结果与分析

3.1 仿真模型及基本参数设定

以型号为 T8 的 LED 日光灯管为例, 灯管的外径为 2.54 cm, 内径为 1.94 cm (扩散管厚度 0.3 cm), 投射器可根据非成像光学中的边缘光线原理、Snell 折射定律, 采用直接法和重叠法设计得到^[6], 本文将 LED 光源与投射器简化为发光装置, 如图 4(a) 所示, 发光装置中心光线投射距离为 30 cm, 根据中心光线的几何关系知入射光线与扩散管轴线的夹角 $\phi = \arctan\left(\frac{1.94}{2 \times 30}\right) = 1.852^\circ$ 。模拟仿真时, 取光线在 S_1 面的入射角 $i_1 = 0$, 光线在 S_2 面为全内反射, 且 S_2 面的反射光线与扩散管出光面垂直。根据(3)式、(4)式求得扩散管内表面微结构三角形的底角分别为 $\beta_1 = 88.148^\circ$ 和 $\beta_2 = 45.926^\circ$, 采用 solidworks 三维(3D)建模得到扩散管模型。

将扩散管模型导入 Tracepro 仿真软件进行模拟仿真实验, 扩散管的基材选用 PMMA^[14], 取折射率 $n = 1.49$, 光源光通量设置为 10 lm, 采用十万条光线进行追迹, 如图 4(b) 所示。

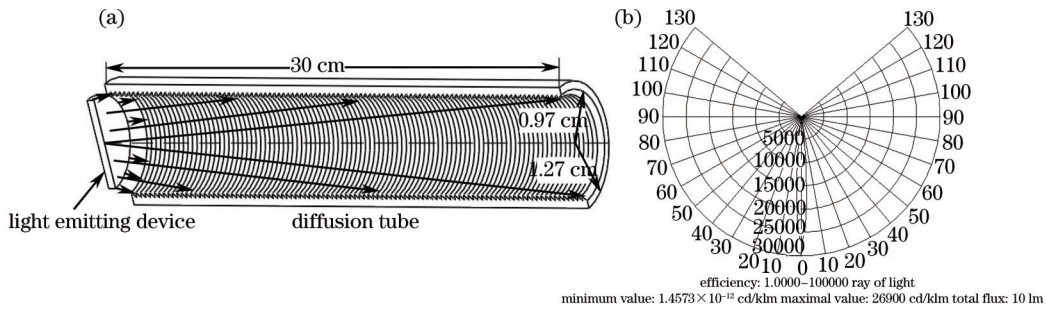


图4 (a)仿真模型和(b)光源配光曲线

Fig.4 (a) Simulation model and (b) its light distribution curve

3.2 微结构参数对透光率的影响

在基本参数 $\beta_1 = 88.148^\circ$ 和 $\beta_2 = 45.926^\circ$ 固定不变条件下,设扩散管外表面为光滑面,改变内表面微结构不等腰三角形底边宽度 D ,从 0.1 mm 变化到 1.0 mm,仿真结果如图 5(a)所示,可见扩散管的透光率 η 几乎没有变化。这是由于底角一旦确定,三角形的深宽比即已确定,通过计算可知上述仿真模型的三角形微结构深宽比为 0.68。根据文献[11]可知,深宽比大于 0.5 的三角形微结构扩散板的入射面透光率均可达到最大值并基本保持不变,因此对于深宽比为 0.68 的三角形微结构, D 的变化不会影响扩散管的入射面透光率,而扩散管出光面已假设为光滑面,且光线垂直出射面,出射面的光损失很小,图 5(a)显示扩散管的透光率可达 $\eta = 0.923$ 。

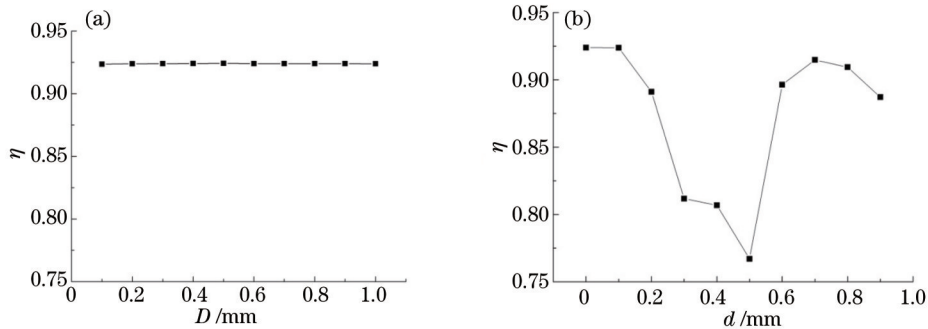


图5 微透镜参数对透光率的影响曲线。(a) 三角形底边宽度 D 的影响; (b) 凹面微透镜直径 d 的影响

Fig.5 Curve of microlens parameters effect on the light transmittance. (a) Influence of the triangle bottom width D ;

(b) influence of the concave microlens diameter d

在上述基本参数 β_1 、 β_2 不变, $D=1$ mm 条件下,改变扩散管外表面凹面微透镜(设凹面为半球面)直径 d ,可得到透光率 η 的变化曲线,如图 5(b)所示。由图可知, d 对透光率有较大的影响。如图 6 所示,当直径 d 分别为 0.2 mm 和 0.5 mm 时,上表面微透镜与内表面微结构不等腰三角形底边宽度 D 呈对称分布(例如直径 $d=0.2$ mm 时,一个周期 D 对应有 5 个上表面微透镜单体),因此入射光分布在 S_3 微透镜单体表面的位置相同,当直径 d 分别为 0.1 mm 和 0.2 mm 时,入射光线分布在 S_3 微透镜单体的凹面中心附近,入射角 i_3 较小,因此具有较大的透射率;当 d 为 0.5 mm 时,入射光线分布在 S_3 微透镜单体的边缘,入射角 i_3 较大,透射率变小;当直径 d 分别为 0.3 mm 和 0.4 mm 等其他值时,入射光随机分布在微透镜单体凹面上(如 $d=0.8$ mm),当凹面微透镜的直径从 0.1 mm 增大到 0.5 mm 时(0.7 mm 增大到 0.9 mm 同理),分布在 S_3 凹面中心的大部分光线逐

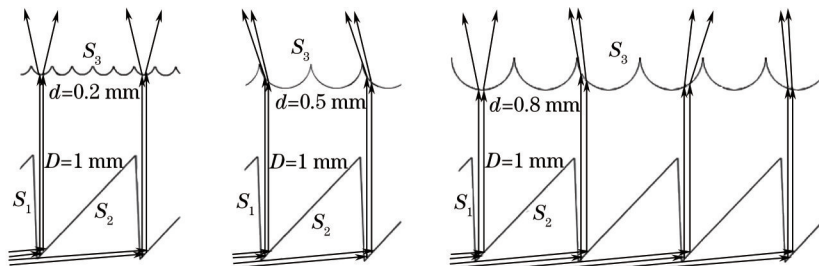


图6 d 变化使光线在 S_3 凹面上的位置发生偏移

Fig.6 Change of d makes the light position shift on the S_3 concave shift

渐向凹面边缘偏移,入射角 i_3 增大,扩散管的透光率逐渐减小;当直径从 0.5 mm 增大到 0.7 mm 时,大部分入射光线向 S_3 凹面中心汇聚,入射角 i_3 减小,扩散管的透光率逐渐增大。

3.3 凹面微透镜形状的影响

在基本参数 β_1 、 β_2 不变,以及 $D=1$ mm、 $d=0.1$ mm 和 $h=0.05$ mm(凹面微透镜深度)条件下,采用正圆曲线、椭圆曲线和样条曲线(通过 3 点平滑过渡形成)构造扩散管外表面凹面微透镜形状,研究凹面微透镜形状对透光率的影响。图 7 为上述 3 种凹面微透镜的仿真配光曲线图,可以看出,扩散管的光束角在 0° 方向(轴向)约为 180° ,而在 90° 方向(径向),样条曲线凹面微透镜得到的光束角约为圆形曲线和椭圆曲线凹面微透镜的 2 倍,但透光率相当,约为 0.92。可见,凹面微透镜形状对扩散角度有影响,其原因是经过 S_2 面反射的分散光束入射在凹面微透镜中心时,由于中心曲率半径不同,光线折射角也不同,样条曲线的中心曲率半径小于圆形曲线和椭圆曲线,所以光线折射角较大,扩散角度也随着增大。

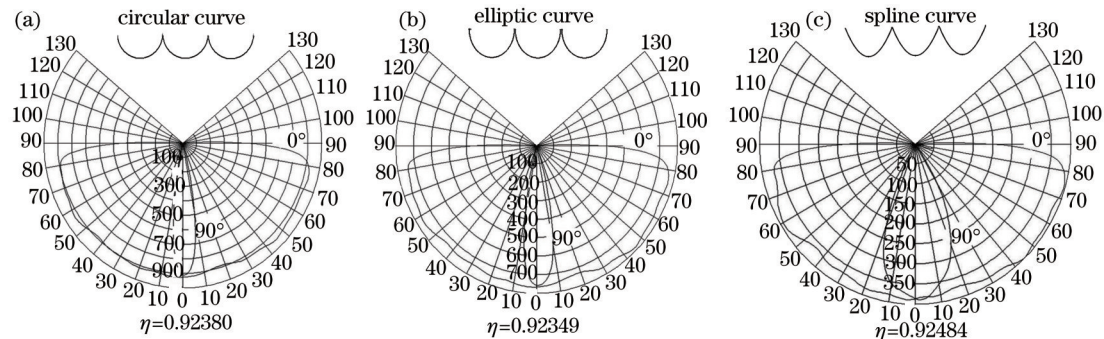


图 7 3 种凹面微透镜的配光曲线。(a) 以圆形曲线构造凹面微透镜; (b) 以椭圆曲线构造凹面微透镜; (c) 以样条曲线构造凹面微透镜

Fig.7 Light distribution curves of three kinds of concave microlens. (a) Concave microlens constructed by circular curve; (b) concave microlens constructed by elliptic curve; (c) concave microlens constructed by spline curve

3.4 改变 β_1 和 β_2 对透光率的影响

设扩散管内表面三角形微结构底边宽度 $D=1$ mm 固定不变,出射表面为样条曲线凹面微透镜, $d=0.1$ mm。 β_1 和 β_2 取不同值进行仿真,得到扩散管透光率如表 1 所示。结果表明,当扩散管内表面为光面 ($\beta_1 = \beta_2 = 0^\circ$) 时,扩散管透光率很低(不到 0.2),原因是内表面强烈的 Fresnel 反射。而其他不同角度的 β_1 和 β_2 的透光率也都低于 0.8,比上述仿真模型确定的 $\beta_1 = 88.148^\circ$ 和 $\beta_2 = 45.926^\circ$ 的扩散管透光率(0.92)低很多。

表 1 内表面微结构三角形底角对透光率的影响

Table 1 Transmission efficiency under the influence of triangle's base angles of the inner surface microstructure

	0	10	20	30	40	50	60	70	80
0	0.15								
10		0.75	0.77	0.75	0.75	0.77	0.76	0.76	0.77
20		0.74	0.72	0.68	0.77	0.78	0.77	0.78	0.76
30		0.66	0.65	0.71	0.76	0.78	0.74	0.77	0.75
40		0.63	0.64	0.69	0.74	0.72	0.73	0.65	0.64
45.926									0.92
50		0.67	0.63	0.71	0.76	0.70	0.71	0.71	0.67
60		0.69	0.70	0.75	0.76	0.76	0.64	0.61	0.61
70		0.69	0.73	0.76	0.74	0.70	0.47	0.65	0.53
80		0.67	0.74	0.77	0.77	0.75	0.67	0.54	0.37

4 结构和参数优化

根据以上讨论分析,当采用 PMMA($n=1.49$)材料时,双端投射 LED 日光灯用扩散管的最佳结构参数为管内表面微结构三角形 $D=1$ mm, $\beta_1 = 88.148^\circ$, $\beta_2 = 45.926^\circ$;管外表面为样条曲线凹面微透镜 $d=0.1$ mm, $h=0.05$ mm。如上所述,采用 Tracepro 仿真软件仿真得到的扩散管透光率约为 0.92,其配光曲线的光束角

在轴向为 180° 。由于 LED 光源和扩散管是轴对称的,因此双端投射 LED 日光灯在径向方向的光照度是 360° 均匀的。下面只考虑轴向方向的光照度情况。在扩散管下方(距离扩散管外表面切面 1 mm)放置长宽均为 200 mm 的接收平板(由于计算机运算能力所限,只仿真单端光源,并对灯管进行分段仿真),将接收面(面向扩散管的表面)属性设置为 perfect absorber,光线追迹得到 LED 日光灯管不同位置的分段光照度图如图 8 所示。从图 8 中可见,扩散管轴上与光源距离为 1 mm 和 20 mm 处的各段在轴向具有很好的局部照度均匀性,在 20 mm 处约为 1 mm 处照度值的一半,由图 6 可以看到,光线只存在于三角形顶角附近,三角形的其他区域都不是工作面,因此可以将微结构三角形改造为如图 9(a)所示的双三角形形状,实现两端光线的叠加,由图 9(b)可知,叠加后的日光灯管照度值明显提高,且轴向光照度均匀性优于 90% 。同时,图 9(a)所示双三角形结构还可减小扩散管的厚度。

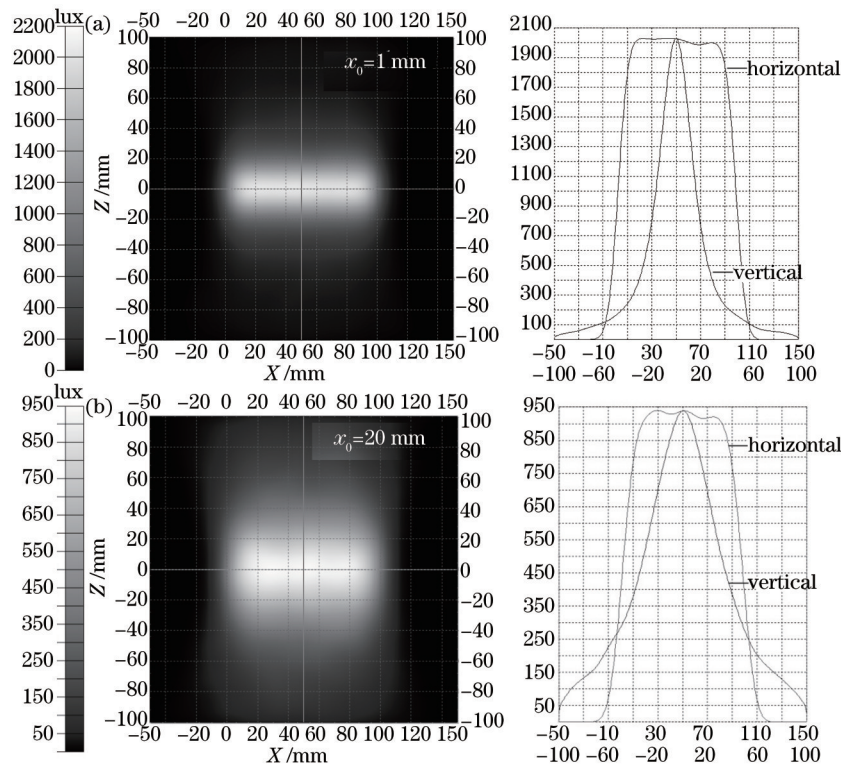


图 8 双端投射 LED 日光灯模拟照度图

Fig.8 Simulation of illuminance diagram for side cast type LED daylight lamp

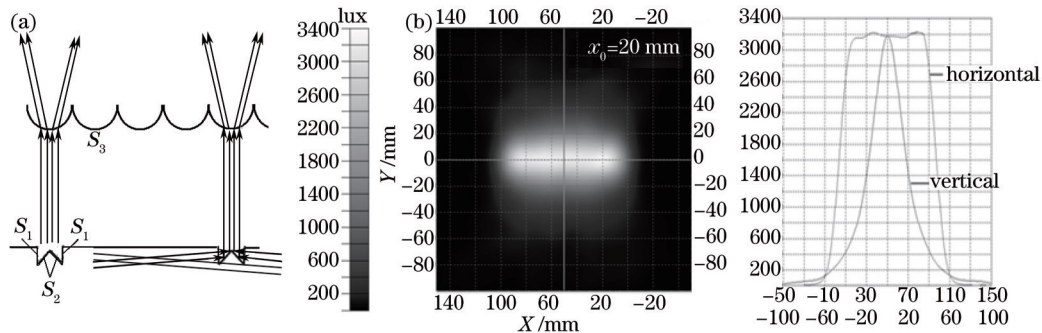


图 9 (a)表面微结构的优化和(b)优化后的照度图

Fig.9 (a) Optimization of surface microstructure and (b) its illumination map

5 结 论

研究了一种内表面为三角形微结构、外表面为凹面微透镜结构的扩散管,用于提高双端投射 LED 日光灯的透光率。以 T8 型 LED 日光灯为例,理论分析和模拟仿真结果表明,当光线与灯管轴线夹角 $\phi = 1.852^\circ$ 时,三角形底角为 $\beta_1 = 88.148^\circ$ 和 $\beta_2 = 45.926^\circ$ 可以得到最大透光率;对于外表面无结构(光滑)的扩散管,三

角形底边宽度 D 的变化不会影响扩散管的透光率;当三角形底边宽度 D 确定后,改变扩散管外表面凹面微透镜直径 d 对透光率有较大影响,当 $d = D/2$ 时透光率最低。横截面为样条曲线的凹面微透镜的扩散角大于正圆曲线和椭圆曲线,而透过率相当。根据仿真软件 Tracepro 对双端投射 LED 日光灯管的照度图分析结果,优化了扩散管内外表面的微结构形状和参数,优化后的扩散管透光率约为 0.92,其轴向光束角为 180° 左右,径向光束角为 360° ,高于普通直下式 LED 日光灯的光束角,且双端投射 LED 日光灯轴向光照度均匀性可达 90%以上。

参考文献

- 1 Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *et al.*. Design of an efficient projector for LED flat lamp without light guide plate[J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(6): 0441-0445.
- 2 Liang Dejuan, Zhuang Qiren, Zhi Jiajun, *et al.*. Design and realization of edge-lighting LED flat panel light with no LGP [J]. Journal of Optoelectronics·Lasers, 2014, 25(3): 465-471.
梁德娟, 庄其仁, 智佳军, 等. 侧入式无导光板 LED 平板灯的设计与实现[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3): 465-471.
- 3 Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0123004.
徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0123004.
- 4 Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 052203.
辛迪, 刘华, 卢振武, 等. 可变视场角 LED 照明光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 052203.
- 5 Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *et al.*. Investigation of uniform illumination of the near-field on the lateral panels using LED projectors[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0322002.
赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的 LED 投射器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322002.
- 6 Meng Xiangxiang, Liu Weiqi, Feng Rui, *et al.*. Design of LED collimator for uniform illumination with double freeform surfaces[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 1-5.
孟祥翔, 刘伟奇, 冯睿, 等. 双自由曲面 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 1-5.
- 7 H P Kuo, M Y Chuang, C C Lin. Design correlations for the optical performance of the particle-diffusing bottom diffusers in the LCD backlight unit[J]. Powder Technology, 2009, 192(1): 116-121.
- 8 Liu Mingyan, Wu Daming, Zhang Yajun, *et al.*. Optimization and design of LCD diffuser plate with microsemisphere structure[J]. Procedia Engineering, 2011, 16: 306-311.
- 9 Zhou Quansheng, Zhang Xian. Discussion on the structural design of linear LED lamp[J]. China Light & Lighting, 2012, (1): 24-27.
周泉生, 张暹. LED 日光灯结构设计研讨[J]. 中国照明电器, 2012, (1): 24-27.
- 10 徐朝丰, 孙文利. LED 日光灯散热器: 中国, 201020210962.7[P]. 2011-01-12.
- 11 Liang Dejuan, Lai Liping, Chen Chunyu, *et al.*. Research of diffusion panel with double-sided triangular prism arrays for use in grazing incidence LED flat panel light[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0622005.
梁德娟, 赖丽萍, 陈春玉, 等. 掠射式双面三棱柱阵列微结构扩散板的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0622005.
- 12 Zhuang Linling, Zhuang Qiren, Chen Chunyu, *et al.*. Design of uniform diffuser plate for oblique incident light with high-performance Fresnel anti-reflection microstructure[J]. Journal of Optoelectronics·Lasers, 2014, 25(10): 1892-1899.
庄琳玲, 庄其仁, 陈春玉, 等. 高效抑制斜入射光线 Fresnel 反射的扩散板设计[J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1892-1899.
- 13 庄其仁, 庄琳玲, 梁德娟. 投射式 LED 日光灯: 中国, 201320891672.7[P]. 2014-07-02.
- 14 Chen Lusong, Huang Zhengming, Xue Cong, *et al.*. PC nanofiber reinforced PMMA transparent composites incorporated with TiO_2 nano-particles[J]. Journal of Inorganic Materials, 2009, 24(3): 469-474.
陈卢松, 黄争鸣, 薛聪, 等. TiO_2 改性 PC 纳米纤维增强 PMMA 透光复合材料[J]. 无机材料学报, 2009, 24(3): 469-474.

栏目编辑: 张雁