

文章编号:1004-4213(2010)05-0860-6

用于固态照明的自由曲面微透镜设计*

孙理伟,金尚忠[†],岑松原

(中国计量学院 光学与电子科技学院 LED 照明研究中心,杭州 310018)

摘要:针对 LED 照明应用中,现有二次光学设计过程对 LED 初始光强空间角分布的依赖性,讨论了用于 LED 照明的自由曲面微透镜器件的设计方法.根据斯涅尔定律和边缘光学理论,研究了自由曲面微透镜的面形构造算法,建立了自由曲面微透镜器件的光学模型,并用光学模拟软件对其照明性能进行了模拟实验.结果显示,该微透镜器件能够在目标面上获得满足预期要求的照度分布,照明均匀度在 92% 以上,且其结构有效解决了 LED 初始光强空间角分布复杂化的现状和现有二次光学设计对光源初始光强空间角分布依赖性的矛盾.

关键词:光学设计;自由曲面微透镜;边缘光学理论;非成像光学;全反射准直器

中图分类号:TM923.02

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103905.0860

0 引言

LED 作为 21 世纪最具前途的照明解决方案,其具有高电光转换效率、使用寿命长和体积小等特点.LED 在通用照明条件下可以看作点光源处理,便于二次光学设计,可以解决传统光源一直无法进行有效光学设计来获得精确配光的局面^[1].

推广 LED 照明应用的最关键问题之一是通过二次光学设计使得从 LED 出射的光能高效、准确地分布到目标照明面上,实现精确照明配光.但是现有用于 LED 照明的二次光学设计均存在这样的缺点:光学面形算法对 LED 光源理想初始光强空间角分布的依赖性^[2-4].现有光学设计都以理想朗伯体分布的光源模型作为设计基础,直接对 LED 初始光强进行能量的再分布,采用单一整体自由曲面的形式对光源进行配光,所构造自由曲面面形的偏微分方程体系庞大且解法繁琐常面临无解情况^[2-3],或采用近似方法逼近,设计繁琐而低效,最终获得的光强分布均匀度和准确度均不高.更为重要的是这样的设计存在一致致命缺点:一个器件只能匹配一种对应初始光强空间角分布的 LED 光源^[2-3],若将其用于其它类型的 LED 光源,便无法实现预期的照明效果.随着 LED 封装技术的多样化,LED 产品的初始光强角分布愈加复杂^[5],在 LED 产品初始光强角分布多样化的情况下,现有设计的缺陷限制了 LED 的应用,其局限性愈加突出.

另一方面,现有的用于照明的微透镜设计只局限于简单的旋转对称球面或非球面微透镜设计,这些微透镜设计的算法采用较为简单的二维平面非成像光学设计方法设计,通常只能实现简单的照明分布,无法自由实现诸如矩形等非对称光强分布.而随着 LED 应用的推广,在 LED 道路照明、投影照明等需要非对称照明光强分布的应用领域,现有二维平面非成像光学设计设计已无法满足要求.

针对这些问题,本文讨论了一种基于自由曲面微透镜结构的光学器件的设计方法,采用全反射准直器和三维自由曲面微透镜设计相结合的设计方法,较好地解决了现有其他自由曲面光学设计对 LED 光源初始光强分布依赖性的问题.设计首先利用内部全反射准直器对 LED 出射光进行准直处理,再利用自由曲面微透镜阵列对准直光能进行准确控制和重新分布,最终在目标面上获得任何所需的照明光强分布.设计不用考虑所用 LED 光源的初始光强角分布,使得 LED 二次光学设计过程更加独立化和模块化,且相比现有其他设计更具广泛的应用价值.

1 自由曲面微透镜光学设计结构

自由曲面微透镜光学器件主要由两部份组成-光学准直器和自由曲面微透镜阵列板,如图 1.根据自由曲面微透镜的结构,设计分成两个步骤:

1) 准直器设计.用于 LED 照明的光学准直器主要有两种,菲涅尔透镜和内部全反射(Total Internal Reflection, TIR)准直器.自由曲面微透镜设计采用 TIR 准直器对来自光源的所有光线进行准直处理.

* 国家高技术研究发展计划(2006AA03A130)资助

[†] Tel:0571-86914581

Email:jinsz@cjlu.edu.cn

收稿日期:2009-08-24

修回日期:2009-10-13

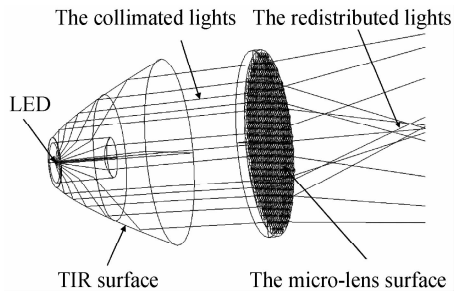


图1 自由曲面微透镜设计的结构和光路示意图

Fig.1 The schematic ray path of the micro-lens free-form secondary optics design for LED illuminations

2) 微透镜阵列板设计. 来自 LED 光源的初始光线在经过 TIR 反射杯全反射准直之后, 都以同一准直方向出射, 在通过微透镜阵列之后在目标面上获得满足相应要求的均匀照明光强分布.

来自 LED 光在透过 TIR 准直器后, 准直出射. 以 TIR 准直器顶面为参考面, 将透过 TIR 顶面的准直光能进行微分 (如图 2), 通过任意单个微分区域的准直能量统计上可看作均匀分布. 这样整个设计转化为设计一相应微透镜自由曲面, 能够对通过各个微分区域的均匀分布准直能量进行重新分布, 使得在目标面上获得满足特定要求的均匀光强分布.

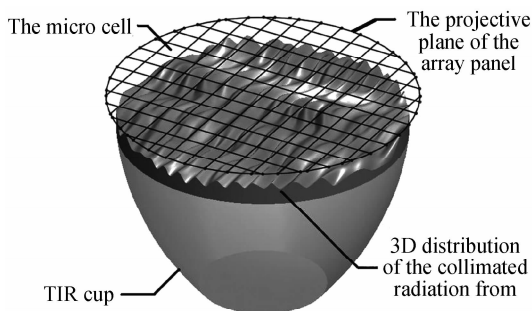


图2 对透过 TIR 准直器准直光能的微分

Fig.2 The tailoring of the collimated radiation from TIR cup

由于通用照明距离和二次光学器件尺寸之间存在 2 个以上数量级差距, 因而所有阵列微透镜可近似看作与目标面具有相同的相对位置. 因此对于一特定的照明要求只需设计一个自由曲面微透镜, 对其进行阵列复制即可获得所需的微透镜阵列板. 每个微透镜最终在目标照明面均能获得各自的均匀照明光斑, 这些光斑具有相同的形状、均匀度和位置. 那么最终在目标照明面上的总体照度分布是由所有微透镜均匀光斑的叠加获得的, 亦具有准确的照明形状和高均匀度. 光能在各部分之间的能量传输方程为.

$$\iint_A E_f ds = \sum_{i=0}^N \iint_{C_i} E_i ds = E_{\text{total}} \quad (1)$$

设目标面上的均匀照明光斑是 A , 照度可认为是常量 E_f ; 通过 N 个微透镜中第 i 个微透镜的均匀分布准直光能的照度为 E_i , C_i 为该微透镜在 TIR 准直

器顶面的上投影面, 即微透镜基底. E_{total} 是 LED 光源的初始出射总光能.

2 边缘光学理论和三维光线追迹

边缘光学理论是非成像光学的重要理论组成部分之一^[6]. 边缘光学理论可以简述为: 任何光源其边界上的所有光线不管经过多少连续光滑 (可导) 的光学界面 (反射或折射), 最终仍将对应落在目标面上光强分布的边界处. 同样, 光源边界内的所有光线也将对应全部落在目标面光强分布的边界内^[6].

自由曲面微透镜设计是以边缘光学理论为基础, 结合三维光线追迹来构造其面形算法的. 通过对经过曲面上特定点的光线进行光线追迹, 计算获得该点的法向量、坐标等信息. 只要获得曲面上足够多点的信息, 即可通过 B 样条曲线拟合的方法^[7], 获得所要光学曲面面形. 如图 3, 假设一光线以方向 I 入射到曲面上某点 P , 以方向 I' 反射到目标面, 根据斯涅尔定律则入射方向矢量 I 、曲面点 P 处的法向量 N , 反射方向矢量 I' 三者关系可表达为光线追迹形式^[9]

$$I' = I - 2(N \cdot I)N \quad (2)$$

同理, 在折射条件下, 设 n' 为折射光线侧介质的折射率, n 为入射光线侧介质的折射率. 在入射方向矢量 I 和折射方向矢量 O 都为已知的条件下, 所需计算的是曲面上点 P 的法向量 N . 设 $|I| = n$, $|O| = n'$, 则折射条件下的光线追迹公式可表达为^[8]

$$N = \frac{I - O}{|I - O|} \quad (3)$$

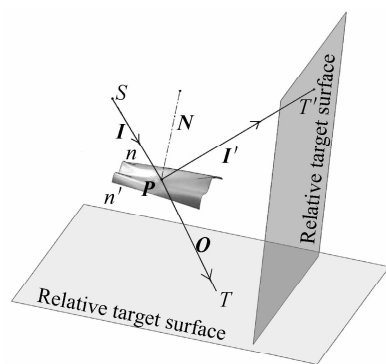


图3 折、反射条件下的光线追迹

Fig.3 Ray tracing of law of refraction (reflection)

3 TIR 准直器设计

TIR 准直器采用旋转对称结构, 主要设计计算外围反射杯面的轮廓线, 因此是二维光学设计问题, 二维非成像设计已经非常成熟. 这里只简述 TIR 准直器的算法, 采用二维条件下的光线追迹方法即可计算获得 TIR 准直器的侧面轮廓线^[9].

如图 4(a), 设轮廓线的方程为 $y=f(x)$, 对于任何入射光线, 其入射方向已知, 出射方向均为准直方向, 因而对于任何轮廓线上的点 (x, y) , 其法线方向可以通过公式 (2), 根据简单的几何关系直接得到, 因此点 (x, y) 的切线方向为已知, 即轮廓线 $f(x)$ 任意点的导数为已知. 因此 TIR 准直轮廓线的计算可认为是解常微分方程 $f'(x)=P(x)$. 设轮廓线初始起点 $(x_0, 0)$ 为常微分方程 $f'(x)=P(x)$ 的初始条件, 可方便解得 TIR 反射面轮廓线 $f(x)$.

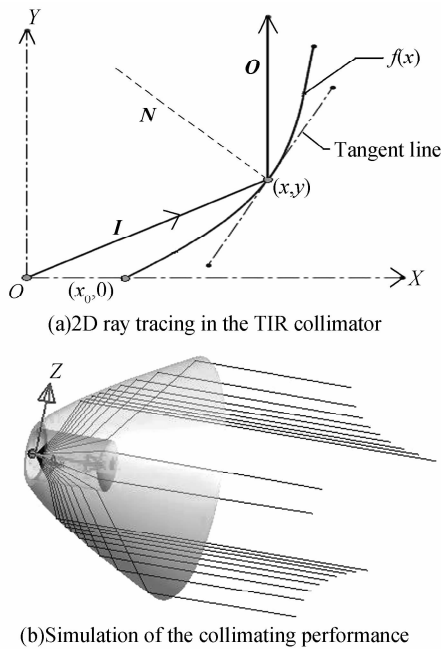


图 4 TIR 准直器的模型设计原理和模拟测试
Fig. 4 Principle and simulation testing of the TIR collimator

同理可计算 TIR 中心非球面透镜的面形. 准直器几何模型如图 4(b), 通过光学模拟软件对其准直性能和全反射光能传输效率进行评估分析. 模拟实验结果显示, 准直性能与预期相符 (见图 4(b)), 光线准直最大偏角小于 0.1° . 不考虑材料吸收等损耗, 准直器传输效率约为 99.68%. TIR 准直器的准直效果和光能传输效率均满足设计要求.

4 自由曲面微透镜的面形计算

以计算实现一可在目标面上获得矩形均匀照明光斑的自由曲面微透镜为例. 设单个微透镜的基底 (在 TIR 顶面上的投影) 为一边长为 $a \times b$ 的矩形, 目标面到微透镜垂直距离为 R , 要在目标面上获得 $W \times L$ 的矩形光斑. 则微透镜面型计算可分成 3 步:

1) 如图 5, 用 N 条经线和 M 条纬线, 将微透镜基底等分成 $(N+1) \times (M+1)$ 个面元格. 同样, 把目标面上矩形光斑也用相同数量经纬线进行等分, 将通过微透镜基底各面元格的等分准直光能一一对应镶嵌到矩形光斑的相应面元格上.

2) 根据边缘光学理论, 若通过微透镜基底上某面元格边缘的光线经过自由曲面微透镜之后折射到光斑上对应面元格的边缘上, 那么通过微透镜上该面元格内所有光线将全部落在目标面上对应面元格内, 因而光斑各面元内具有相同的光能.

3) 随着 N 和 M 的增大, 矩形光斑的光强分布均匀度增大. 利用公式 (3), 对这些经过基底面元格边缘折射到光斑面元格对应边缘的光线进行光线追迹, 计算获得对应点的法向量, 以微透镜基底为初始边界条件, 结合 B 样条曲线拟合法, 最终获得自由曲面微透镜面形.

为优化算法, 在 N 和 M 数值足够大的情况下, 只对经过面元格顶点 (经纬线交点) 的光线进行三维光线追迹. 如图 5, 假设一准直光线经过微透镜基底上面元格顶点 $P_{i,j}$, 经过微透镜之后, 对应折射到目标面上面元格顶点 $Q_{i,j}$, 三维笛卡尔坐标参照系如图所示. 光线的入射方向矢量 $I_{i,j}$ 、折射方向矢量 $O_{i,j}$ 、点 $P_{i,j}$ 处的法向量 $N_{i,j}$ 可分别设为

$$I_{i,j} = (I_{i,j,x}i, I_{i,j,y}j, I_{i,j,z}k) \quad (4)$$

$$O_{i,j} = (O_{i,j,x}i, O_{i,j,y}j, O_{i,j,z}k) \quad (5)$$

$$N_{i,j} = (N_{i,j,x}i, N_{i,j,y}j, N_{i,j,z}k) \quad (6)$$

显然所有光线入射方向均为准直方向, 则在三维光线追迹条件下, $I_{i,j}$ 可表达为

$$I_{i,j} = (0, 0, n \cdot k) \quad (7)$$

n 表示微透镜材料的折射率.

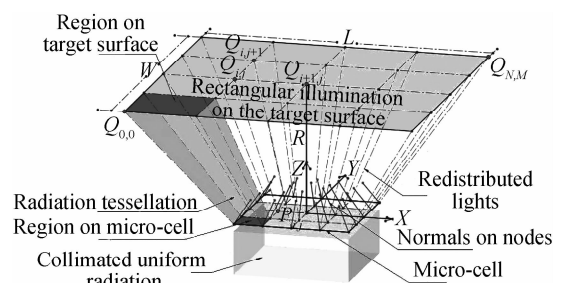


图 5 边缘光学理论下, 微透镜基底和目标面光斑的面元格分割及之间的能量镶嵌示意图

Fig. 5 The schematic ray tracing through the micro cell by "Edge-ray principle"

由于器件尺寸和照明距离及照明光斑尺寸之间存在的两个以上数量级的差别, 微透镜基底上不同面元格顶点的相对位置可以忽略不计, 因此经过顶点 $P_{i,j}$ 的光线的折射方向矢量是由其折射到目标面上的目标点 $Q_{i,j}$ 的坐标决定的, 且空气介质折射率 n' 可近似为 1. 因此折射方向矢量 $O_{i,j}$ 可表示成

$$O_{i,j} = \left[L^2 \left(\frac{i}{M+1} - \frac{1}{2} \right)^2 + W^2 \left(\frac{j}{N+1} - \frac{1}{2} \right)^2 + R^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[\left(\frac{L \cdot i}{M+1} - \frac{L}{2} \right) i, \left(\frac{W \cdot j}{N+1} - \frac{W}{2} \right) j, Rk \right] \quad (8)$$

$$i=0, 1, 2 \dots N+1; j=0, 1, 2 \dots M+1$$

n 表示微透镜材料的折射率,将等式(7)和等式(8)代入等式(3),则可获得点 $P_{i,j}$ 处的法向量 $\mathbf{N}_{i,j}$

$$\mathbf{N}_{i,j} = \left[L^2 \left(\frac{i}{M+1} - \frac{1}{2} \right)^2 + W^2 \left(\frac{j}{N+1} - \frac{1}{2} \right)^2 + \left(n - \frac{R}{|\mathbf{O}_{i,j}|} \right)^2 \right]^{-1/2} \cdot \left[\left(\frac{L}{2} - \frac{L \cdot i}{M+1} \right) \mathbf{i}, \left(\frac{W}{2} - \frac{W \cdot j}{N+1} \right) \mathbf{j}, n - \frac{R}{|\mathbf{O}_{i,j}|} \mathbf{k} \right]$$

$$i=0,1,2 \cdots N+1; j=0,1,2 \cdots M+1 \quad (9)$$

利用等式(9)可以计算获得微透镜曲面上 $(N+2) \times (M+2)$ 个点的三维法向量信息,以拟设的微透

镜基底作为初始边界条件,对这 $(N+2) \times (M+2)$ 个点进行 B 样条曲线拟合^[10],最终获得所需的自由曲面微透镜面形。

5 设计实例及光学模拟实验

根据上述方法,计算获得了一自由曲面微透镜二次光学器件模型,如图 6。配合 LED 光源,模型可在距之 3 m 远的垂直目标面上获得 $3 \times 2.5 \text{ m}^2$ 的高均匀度矩形照明光斑。

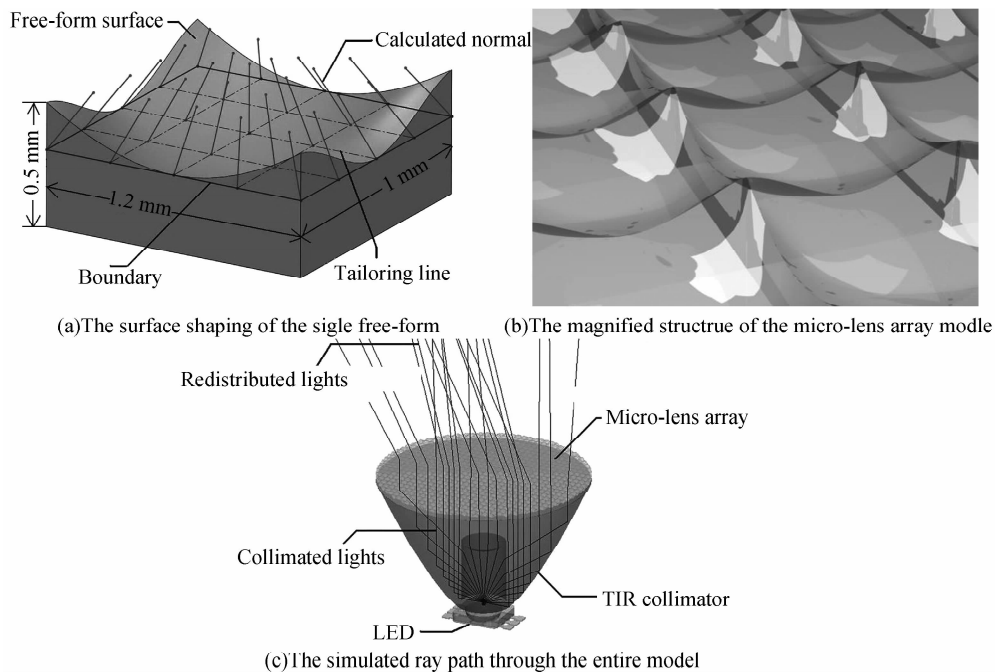


图 6 能够实现 $3 \times 2.5 \text{ m}^2$ 高均匀度矩形光斑的自由曲面微透镜设计几何模型

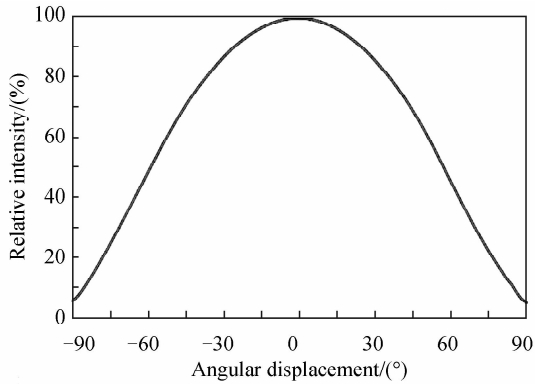
Fig. 6 The calculated model of the free-form microlens optics for $3 \times 2.5 \text{ m}^2$ rectangular illumination

利用光学模拟软件对该模型进行了模拟分析。模拟实验中,LED 光源模型为一 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 正方形面光源,在模拟中对从光源出射的 6×10^6 条光线进行了“蒙特卡罗”光线追迹。为证明单个自由曲面微透镜二次光学器件可用于不同类型光强角分布的 LED 光源,在模拟实验中对 LED 光源模型设置了两种不同的初始光强空间角分布(朗伯体分布和边翼型分布,如图 7(a)、(b),两组模拟通过器件在目标面上获得的相应照明光强分布分别如图 7(c)、(d)。

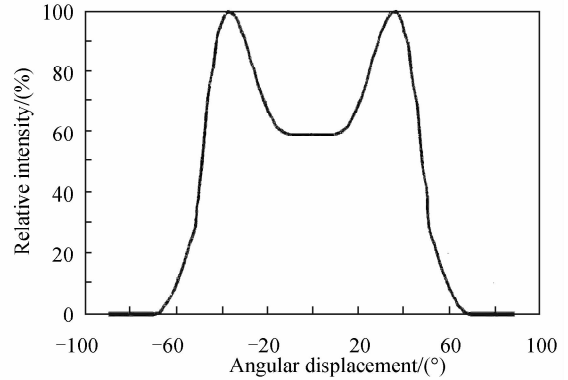
模拟结果显示,该器件在使用朗伯体、边翼型两种不同光型的 LED 光源情况下,最终均能获得准确均匀的矩形光斑,尺寸均接近预期 $3 \times 2.5 \text{ m}^2$ 。在使用两种光源光强空间角分布设置下最终获得矩形照明光斑的光强均匀度均在 92% 以上,如图 8。不考虑材料对光能的吸收等损耗,该设计模型在使用这两种光源设置下的能量传输效率分别为 97.01% 和 97.22%。上述结果充分说明了最终目标面上光斑的形状和均匀不受所使用光源的光强空间角分布影

响,目标面的光强分布形状、均匀度只和微透镜的自由曲面面形相关,解决了二次光学设计对光源初始光强空间分布的依赖性问题,且拥有比现有其他设计更高的传输效率和均匀度,以及更加稳定的照明性能表现。

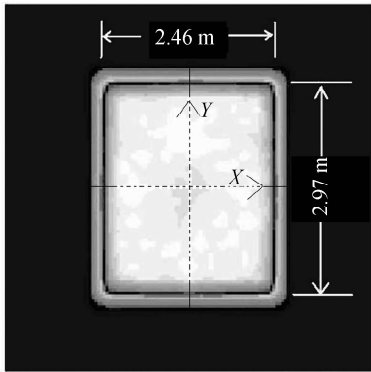
照明均匀度对照明的中间视觉效应、照明舒适度都有至关重要的作用,是评价照明性能最重要指标之一。从自由曲面微透镜算法和模拟结果分析可知,目标面光强分布的均匀度和 3 个因素有关:1) TIR 准直器的准直精度。准直精度越高,后期自由曲面微透镜面形计算越可靠,最终目标面的光强分布准确度和均匀度越高;2) 微透镜的阵列密度(准直光能微分精细度)。单位面积里的微透镜数量越多,最终在目标上的光强分布越精确,均匀度越高;3) 微透镜计算时的基底分割精细度,即 N 和 M 的数值,分割越精细,计算获得的曲面越精确,最终获得光斑均匀度越高、形状越精确,计算中 N 和 M 一般要大于 1 000。



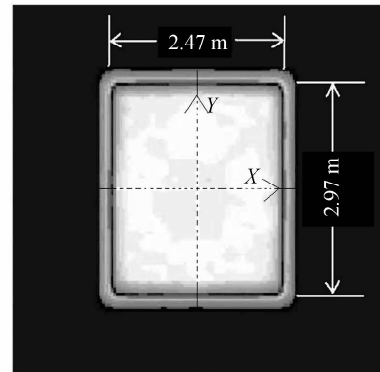
(a)The radiation pattern of the used lambertian LED source model



(b)The radiation pattern of the used non-lambertian LED source model

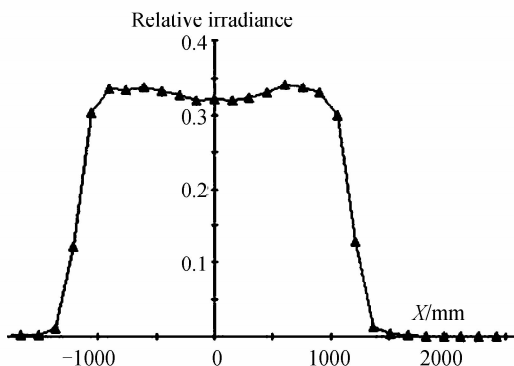


(c)The simulated illumination on the target surface of (a)

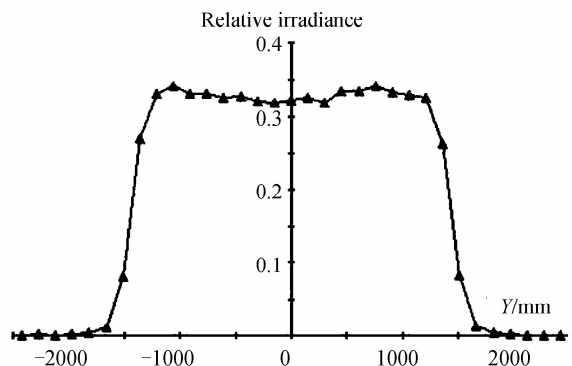


(d)The simulated illumination on the target surface of (b)

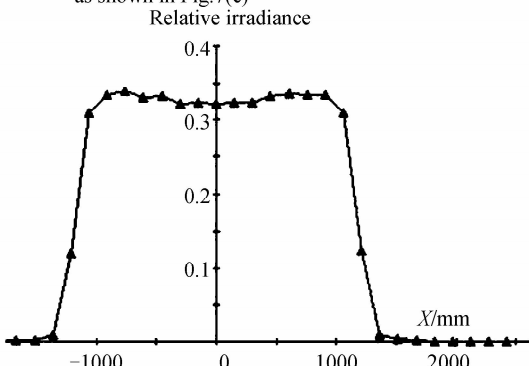
图 7 自由曲面微透镜模型在使用朗博体和边翼型 LED 光源下在目标面上模拟所获得的照度分布
Fig. 7 The simulated distribution achieved by the free-form microlens optics with Lambertian and non-Lambertian LED sources



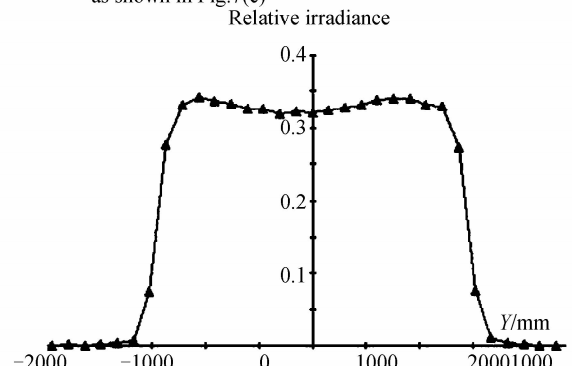
(a)The relative irradiance distribution along X axis as shown in Fig.7(c)



(b)The relative irradiance distribution along Y axis as shown in Fig.7(c)



(c)The relative irradiance distribution along X axis as shown in Fig.7(d)



(d)The relative irradiance distribution along Y axis as shown in Fig.7(d)

图 8 如图 7(b)、(d)矩形光斑 X 和 Y 两个方向的相对照度分布

Fig. 8 Relative irradiance distribution of the along X axis and Y axis, as shown in Fig. 7(b), (d)

6 结论

本文介绍了一种用于 LED 照明的新型二次光学设计——自由曲面微透镜设计. 设计采用 TIR 准直器和自由曲面微透镜组合的方法, 先对来自 LED 光源的光线进行准直处理, 再通过自由曲面微透镜对准直光能进行再分布, 最终在目标面上获得满足要求的均匀照明光斑. 设计解决了现有其他二次光学设计算法完全依赖光源理想初始光强空间角分布的缺点, 在使用不同初始光强空间角分布的 LED 光源下, 仍能稳定地获得所需的照明光强分布. 突破了现有 LED 光强空间角分布的多样化和不规则性对二次光学器件应用的局限性, 且能获得比现有设计更高的均匀度、传输效率和光强分布准确性, 实用价值更高.

另一方面, 从自由曲面微透镜的设计算法看到, 光能在经过准直器准直处理之后, 便可以将设计要点转换到微透镜自由曲面面形和照明光强分布参数之间的算法关系上, 舍弃了不必要的考虑因素, 使得二次光学设计更加模块化、独立化和富有针对性. 由于准直器设计已经较为成熟, 因此自由曲面微透镜设计可应用于其他准直器. 随着制造加工工艺的进步, 可进一步设计一种拥有类似微透镜阵列结构的

光学薄膜, 与任何准直器表面结合即可获得所需照明光强分布, 进而使 LED 照明应用上升到更高的水平.

参考文献

- [1] LUO Yi, ZHANG Xian-peng, HAN Yan-jun, *et al.* Key technologies for solid-state lighting [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3):17-28.
罗毅, 张贤鹏, 韩彦军, 等. 半导体照明关键技术研究[J]. 激光与光电子进展, 2007, **44**(3):17-28.
- [2] WANG L, QIAN K, LUO Y. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. *Appl Opt*, 2008, **46**(18): 3716-3723.
- [3] DING Y, LIU X, ZHENG Z, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination[J]. *Opt Express*, 2008, **16**(17): 12958-12966.
- [4] RIES H, MUSCHAWECK J. Tailored freeform optical surfaces[J]. *JOSA A*, 2002, **19**(3):590-595.
- [5] Philips Lumileds, Inc. Technology of radiation patterns[EB/OL]. [2009-08-20]. <http://www.philipslumileds.com/technology/radiationpatterns.cfm>.
- [6] WINSTON R, MINANO J C, BENITEZ P, *et al.* Nonimaging optics[M]. Elsevier, 2005:421-432.
- [7] DAVID S. Curves and surfaces for computer graphics[M]. Springer, 2006:404-441.
- [8] JULIO C. Introduction to nonimaging optics[M]. Taylor & Francis Group, 2008:403-414.
- [9] THOMAS M. LED collimation optics with improved performance and reduced size:US,6547423[P]. 2003-04-15.
- [10] DAVENPORT T L R. 3D NURBS representation of surface for illumination[C]. *SPIE*, 2002, **4832**:293-301.

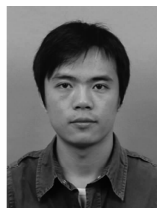
Free-form Micro-lens Design for Solid State Lighting

SUN Li-wei, JIN Shang-zhong, CEN Song-yuan

(LED Lighting Research centre, Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To solve the archetypal problem of LED illumination; redistribute the irradiance of a given LED source or any quasi-point sources onto a desired target surface to achieve any prescribed illumination distribution, the free-form micro-lens optics is designed based on the Snell's law and "edge-ray principle". This secondary optics can redistribute any LED radiations onto the target surfaces to achieve prescribed uniform illuminations without concerning the initial radiation patterns of LED sources. According to the practical illumination requirements, the surface shape of the single free-form micro-lens can be calculated by using the ray tracing method and B-spline fitting way. Some modules of free-form micro-lens optics were constructed to achieve rectangular illumination. The simulation results show that the achieved illuminations have high uniformities and precise illuminating shapes as prescribed. The free-form micro-lens optics is applicable in LED lighting, with cogent competitive advantages.

Key words: Optical design; Free-form micro-lens; Edge-ray principle; Non-imaging optics; Total internal reflection collimator



SUN Li-wei was born in 1984. He is currently pursuing his M. E. degree, and his research interests focus on nonimaging optics designs and their applications in illumination fields.

JIN Shang-zhong was born in 1963. He is a professor with Ph. D. degree. His research interests focus on optoelectronic technique and fiber optic sensors and system.