

# LED 近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化

钱可元

清华大学深圳研究生院半导体照明实验室, 广东 深圳 518055

**摘要** LED光源自身物理模型的准确测量和建模对光学设计和计算机软件仿真模拟结果至关重要。分析了常用光源模型的特性,对白光LED与理想点光源的偏差和原因进行了研究,比较分析了在直下式背光源透镜光学系统中由于LED实际光源特性偏离理想点光源和简单面光源而造成的设计偏差,并以白光LED光源近场测量的光线文件为基础,采用反馈修正逐次逼近的方法,优化设计了背光系统距高为5.5的内外折射曲面光学透镜,在实际发光面积为 $1.7\text{ mm}\times 1.7\text{ mm}$ 的条件下,光斑均匀性为0.83。

**关键词** 光学设计; 建模; 近场测量

**中图分类号** O435.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0522001

## Near Field Optical Modeling of LED and Design Optimization for Direct-Type Backlight Optical System

Qian Keyuan

*Semiconductor Lighting Laboratory, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University,  
Shenzhen, Guangdong 518055, China*

**Abstract** Accurate measurement of physical properties of LED light source and an appropriate modeling are crucial for LED optical system design and computer simulation. The characteristics of common light source model are analysed. A comparative analysis of the design and simulation results for an actual optical system is given caused by the deviation of actual LED light source characteristics from that of an ideal point light source and simple plane surface light source. A feedback method of lens design consisted of internal and external refractive surface is presented for a real direct-type backlight system with a white LED light source luminance data. Simulation results show that the uniformity of illumination reaches 0.83 when the distance-height ratio is 5.5 and the source area is near  $1.7\text{ mm}\times 1.7\text{ mm}$ .

**Key words** optical design; modeling; near field test

**OCIS codes** 120.4570; 220.3620; 220.4830

### 1 引言

作为半导体发光器件,LED芯片本身的发光特性为一 $2\pi$ 立体角发光的朗伯光源,在许多LED应用系统中,由于要求被照目标面或要求的光能空间分布不符合原始LED器件的出光分布特性,必须需要加上必要的光学系统,这也包括一次光学及二次光学系统。对于LED阵列均匀照明的场合,其典型的应用为大尺寸液晶电视直下式背光源,要求照明均匀度高,系统厚度薄,并且使用的LED数量较少,即实现较大的距高比,因此对于透镜系统的设计要求也较高<sup>[1-4]</sup>。

在进行光学系统设计时,通常会使用各种光学软件辅助设计,在对具体的照明系统进行模拟时,需要对光源的相关参数进行设计。无论使用哪一款光学设计软件,针对于LED光源模拟,都需要设置下列参数:光源的类型、发光体的空间分布、光通量或辐射通量、光谱范围及其分布、出光角度范围、空间能量分布以及角度能量分布形态等<sup>[5]</sup>。而实际的LED光源又由于其芯片的结构、封装形式和一次光学器件的影响,其出光特性会大大偏离理想的点光源或均匀的面光源,这些都会给系统的光学设计带来较大的影响。

收稿日期: 2014-11-24; 收到修改稿日期: 2014-12-29

作者简介: 钱可元(1957—),男,研究员,主要从事光电器件和半导体发光器件的研究。E-mail: qianky@sz.tsinghua.edu.cn

## 2 光源的发光特性

通常在任意一个光学系统中,光源作为系统的起点,如果光线束具有尺寸的变化和角度的伸展,同时还需要使用物理光学特性来对光学系统进行描述时,常用广义光学扩展量来描述其光学特性,这时的光学扩展量定义需要考虑包括波长、偏振和衍射在内的物理光学特性。当应用于该种场合时,光学扩展量的广义表达式为<sup>[6]</sup>:

$$E_p = \sum_{P_i} \iiint U d\lambda dx dy dp dq, \quad (1)$$

式中  $U$  为对应波长的光能量分布,  $P_i$  为偏振分量,  $p=nL, q=nM, L, M$  为光线的方向余弦,  $n$  为折射率。

光学系统中如没有其他光阑切档光线,则这个系统各处的  $E_p$  是一个守恒不变量。在照明系统中,光源是这个系统的起点,因此在进行光学计算和计算机仿真实验时,必须考虑光源的上述各项特性。LED 光源建模是整个光学系统的设计、计算机仿真优化的基础,光源建模的准确性直接影响目标面的光场及能量分布,也是 LED 光学设计研究的重点之一。

一般对于 LED 二次配光设计,通常认为 LED 芯片的出光,近似为一点光源,其发光强度满足余弦分布:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta, \quad (2)$$

式中  $\theta$  为考察方向与轴线的夹角,这类通常称为朗伯发光体,即其亮度  $L$  与方向无关。图 1 为其光强分布的示意图。

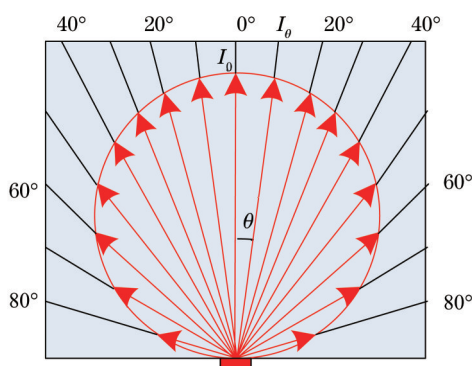


图 1 朗伯光源光强分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of Lambertian light intensity distribution

LED 芯片的发光多数近似于朗伯光源,芯片发出的总光通量  $\Phi$  与法向光强  $I_0$  的关系可以由下式给出:

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} I_0 \cdot \cos \theta \sin \theta \cdot d\theta = \pi \cdot I_0. \quad (3)$$

光学仿真常用的另一种光源模型为面光源,即默认光源的发光面为一空间能量分布均匀的规则平面,这就要求 LED 的表面是均匀出光,同时 LED 发光能量的角度分布默认为朗伯分布。但在实际应用中,由于 LED 电极设置、芯片结构的不同,以及荧光粉涂敷方式的影响等,一般 LED 光源的真实出光状态较为复杂,其表面的能量和颜色并不是均匀分布的,且能量的空间角度分布也是非均匀的。这时要对光学系统进行准确的设计仿真,就必须对光源进行近场特性测量。

## 3 LED 光源的发光特性

目前 LED 器件由于芯片结构、封装结构、封装材料及工艺的不同,表现出的发光特性也不尽相同,一般都会偏离上述提到的理想光源的光色特性,大致可分成几类:

### 1) 扩展光源

一般光学系统的设计都是针对点光源来进行,而实际的 LED 器件则在很多场合并不能在看作点光源。图 2 为常用表面贴装器件表面贴装(SMD)封装的 LED 光源结构示意图,芯片本身具有尺度  $d_c$ ,由于荧光粉层的散射作用<sup>[7]</sup>,实际的发光面将扩展至尺度  $d_s$ 。

### 2) 非平面出光

对于一些大功率封装结构,由于荧光粉涂覆技术工艺的限制,使得最后器件的实际出光面不但面积大于原来芯片尺寸,发光面形状也偏离了简单平面的范畴,如图 3 所示的结构,图 3(a)为保型荧光粉结构,它可

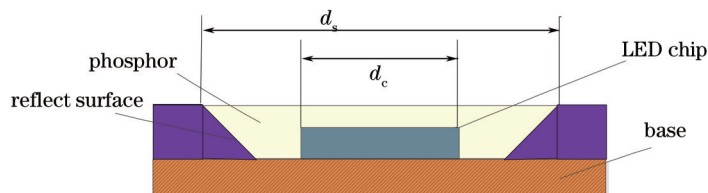


图2 SMD封装的LED光源结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of SMD packaged LED structure

以保证较均匀的空间光色一致性,但最后的发光面已成为一个五面体,在光学系统设计时侧面发光就不宜忽略。图3(b)则是一般常用的点胶荧光粉工艺所形成的结构示意图,荧光粉表面为一不规则的曲面,曲面各点的发光强度也各不相同,同时由于支架反射面对大角度光的反射作用,使得光源的等效发光面更为复杂。

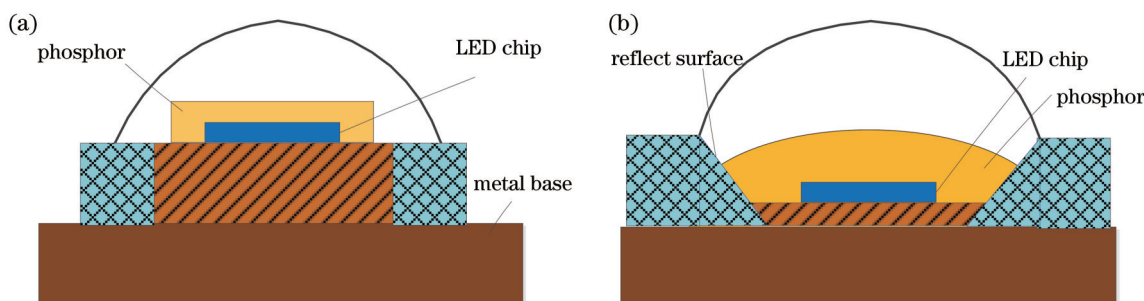


图3 不同荧光粉工艺形成的非单一平面出光面示意图

Fig.3 Non-single-plane emission surface caused by different fluorescent powder processes

### 3) 光色分布不均匀

白光LED的色温角空间均匀性是衡量其出光质量的重要标准。提高白光LED的色温角空间均匀性可以提高光源的出光质量,提高以白光LED为光源的产品对白光的利用率,简化相应的二次光学设计<sup>[8]</sup>,反之则会给光学设计带来意想不到的麻烦。而事实上目前很多封装工艺都在白光LED的色温角空间均匀性方面做得不够理想,图4是国外白光产品的实测数据<sup>[9]</sup>。

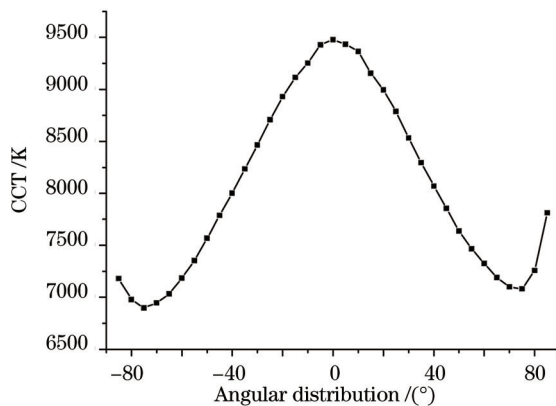


图4 均匀薄膜涂层的白光LED产品的空间色温分布

Fig.4 Color temperature distribution of white LED with an uniform thin film coating

采用一般的荧光粉涂覆工艺都会得到类似图5所示的色温空间分布,中间法线方向出射的光色色温高,而大角度出射的光色偏黄,这种白光LED在积分球中测得的整灯光色度完全可以满足给定的数值,而空间的不均匀性在一些应用中会显露无疑。

## 4 LED光源模型对直下式背光透镜设计的影响

在光学系统设计模拟中,不同的光源模型会获得很大差异的结果,带来不可忽视的误差。对于用于大尺寸液晶电视直下式背光源的二次透镜设计,随着LED光效的提高,单位面积所用的LED颗数不断减小,而有效混光距离也应整机厚度的要求而不断减小,这就意味着透镜阵列的距高比要不断增大。图5为一直下

式背光源中实现均匀照度分布的光学透镜,  $D=110\text{ mm}$ , 它能在距离为  $20\text{ mm}$  的屏幕上实现直径  $110\text{ mm}$  的均匀光斑, 它的距高比为  $110/20=5.5$ 。

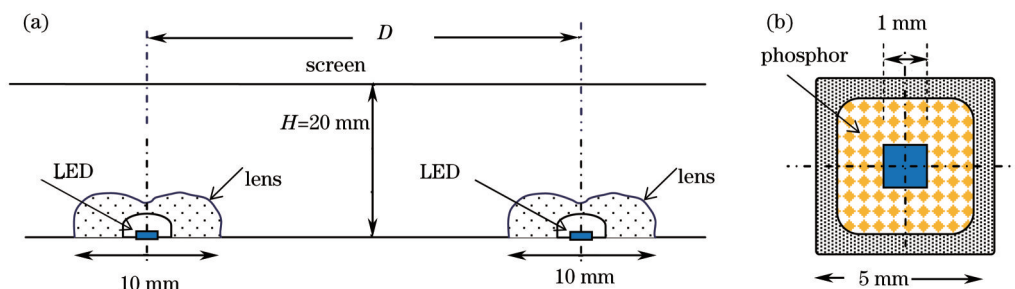


图 5 (a) 背光源中的透镜系统示意图; (b) LCD 背光源中的 LED 器件尺寸图

Fig.5 (a) Schematic diagram of lens system in LCD backlight source; (b) Schematic diagram of LED device in LCD backlight source

多数光学系统的设计都是基于点光源出发的假设, 图 5(a) 的透镜曲面也是按点光源设计获得。定义在规定的直径  $110\text{ mm}$  屏幕范围内, 最小照度与平均照度之比为照度的均匀度:

$$U = I_{\min} / I_{\text{av}}, \quad (4)$$

在点光源近似下, 可以得到规定直径内的照度均匀度  $U > 0.85$ , 如图 6 所示。

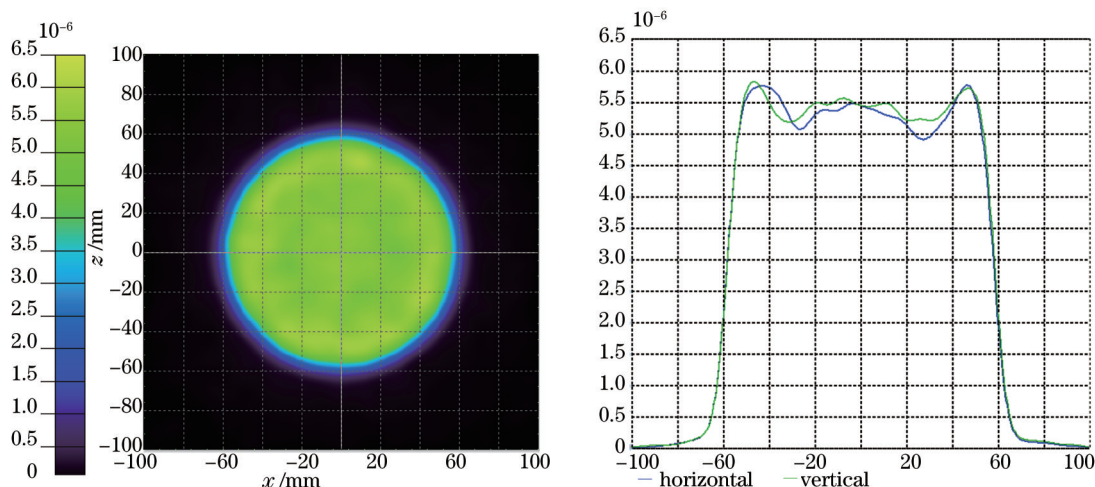


图 6 点光源近似下的屏幕照度分布

Fig.6 Screen illuminance distribution under the point source approximation

然而实际的光源往往具有一定的尺寸, 称为扩展光源, 它会对光学设计的最后结果产生不可忽视的偏差。在上述实际例子中, LED 芯片的尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ , 作为最简单的近似, 可以将模拟的光源用一  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  的面光源来替代实际的光源, 这时就会在屏幕上得到如图 7 所示的照明效果, 它已经大大偏离了点光源的模拟效果, 计数可得这时的照度均匀度  $U \approx 0.85$ 。

对于扩展光源以及非简单平面的光源, 在光学设计中一般要采取一些必要的方法来修正透镜的实际曲面形状, 而各种修正的方法的准确性首先取决于光学模拟所用的光源与实际光源的发光特性偏差要足够小。采用专门测试光源近场数据的影像式分布光度计可以获得实际器件光源表面每一点的亮度分布数据<sup>[10]</sup>, 通常也称为近场分布光度计, 它由具有二维 CCD 阵列的成像色度亮度计组成, 它能够通过一次取样测得光源在某一方向的发光平面内各点的色度和亮度值。也就是让设计者能够了解光源的光从哪里出来, 射向哪个方向, 各光线的通量是多少, 甚至各个不同波长的光通量及分布。这些测得的数值专用通过软件的处理, 将不同角度的光源亮度和色度分布图转变为光源的光线分布文件, 以便于用各类光学仿真软件调用。

采用 Radiant Zemax 公司的近场分布光度计, 对图 5(b) 中 LED 器件实际的发光面进行近场数据测试, 结果用光学软件再现如图 8 所示, 可见 LED 光源由于荧光粉的散射, 其形状和亮度分布也完全不同于一个简单的朗伯面光源, 器件的发光面积已经大大超过了芯片的范围, 整个荧光粉区域都构成了整个光源的一部分, 并且发



光面的光强辐射强度也不均匀,中心最强而边缘光弱。

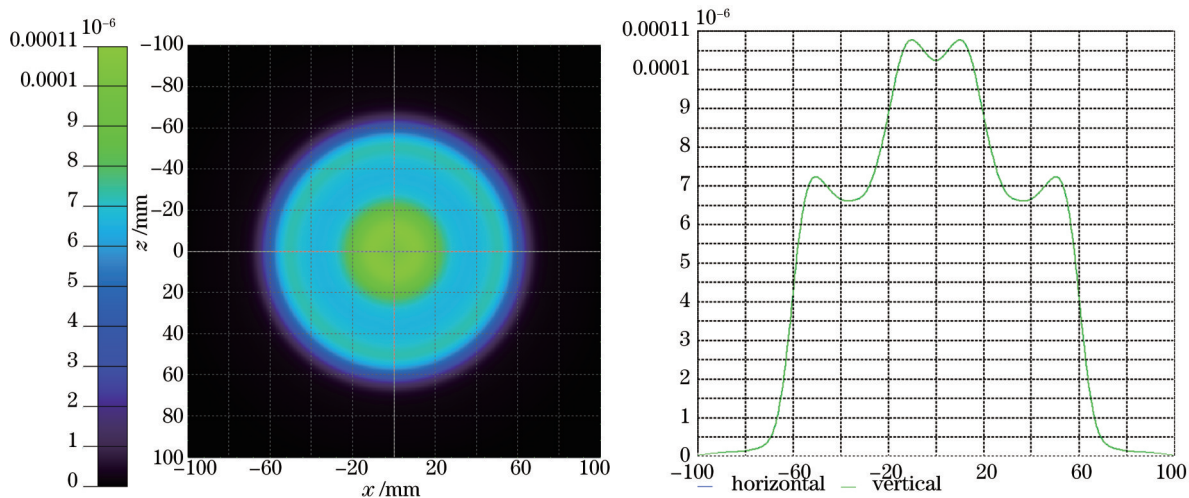


图7 用1 mm×1 mm的面光源模拟的结果

Fig.7 Simulation results with a 1 mm×1 mm surface light source

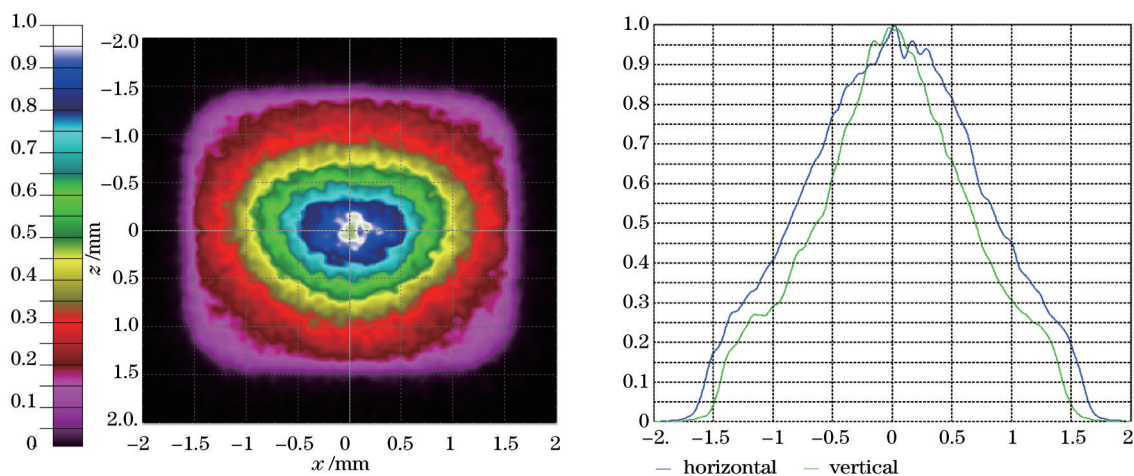


图8 实测SMT封装LED光源的发光面特性图

Fig.8 Light-emitting surface characteristics of SMT packaged LED light source

用实测的近场数据代表发光光源的特性来模拟上述光学系统,可以得到图9所示的屏幕照度图,对比图7、图8可以看到,实际的光学效果与1 mm面光源近似的结果(图7)有着较大的差距,而由点光源近似出发设计的透镜系统在此也完全不合适,这时的均匀度为 $U \approx 0.17$ 。若要求0.80的最低均匀度要求,则在20 mm混光距离上就只能得到直径为70 mm左右的光斑,显然无法满足背光系统的要求。

在实测光源仿真基础上,可以通过反馈法来调整透镜设计的曲面形状。透镜外形曲面的设计根据非成像光学理论中的光学扩展量守恒概念<sup>[11,12-13]</sup>,透镜内外轴对称折射面的设计,利用Matlab软件编程求出透镜入射旋转折射曲线上的离散点,再导入到Rhion软件中对其进行曲线拟合得到透镜横截面曲线并旋转得到三维模型<sup>[14-15]</sup>。

初始设计过程中,将LED视为理想点光源,用实测的实际LED近场光线文件进行光学仿真,得到与原设计要求的光分布有偏离的结果,在引入反馈过程对初始结构进行优化时,简单起见,只对外曲面进行优化。记第*i*次反馈优化后屏幕的照度分布为 $E_i(r)$ ,目标照度分布为 $E_t(r)$ ,相应的修正因子 $\varepsilon_i(r)$ 表示为屏幕的目标照度分布与实际照度分布之差:

$$\varepsilon_i(r) = E_t(r) - E_i(r), \quad (5)$$

在进行第*i*+1次反馈计数时,修正屏幕的目标照度分布为 $E_{i+1}(r)$ :

$$E_{i+1}(r) = E_i(r) + k\varepsilon_i(r), \quad (6)$$

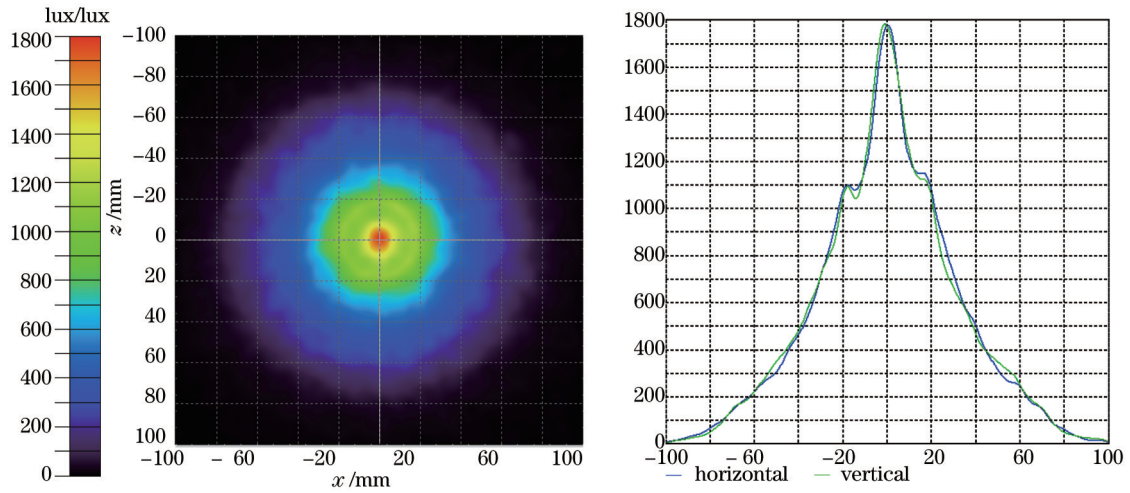


图 9 用实测的光源数据进行模拟的结果

Fig.9 Simulation results using the source data of actual measurement

式中  $K$  为每次反馈的调整系数, 一般选在 0.5~1.0 之间, 过大会引起最后结果的震荡起伏。由这一新的目标面照度分布设计得到第  $i+1$  次新的透镜曲面, 用实际光源的近场光线文件模拟仿真, 以目标区域内照度的均匀度作为优化目标, 逐次逼近所要求的 LED 光斑照度分布结果。图 10 为这一过程的流程示意图。

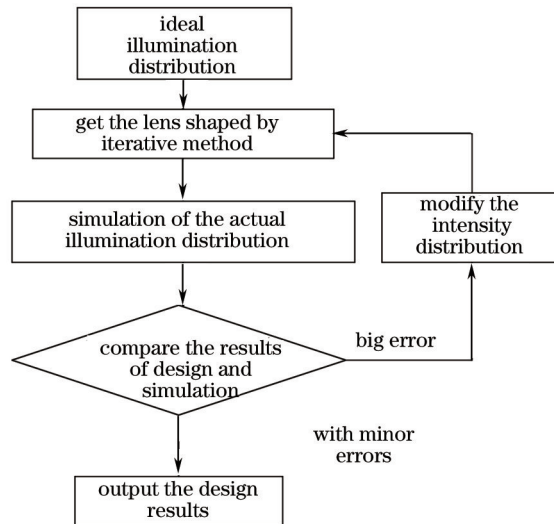


图 10 反馈法调整透镜设计的流程示意图

Fig.10 Flow chart of feedback method to adjust the lens design

采用此方法优化的透镜最后的结构见图 11, 从中可以看到, 由于根据实测的近场光线文件为基础进行反馈修正, 最后的光学效果显示即使是在 LED 的实际发光面积几乎达到  $1.7 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ , 发光面照度的均匀度仍能达到  $U=0.81$

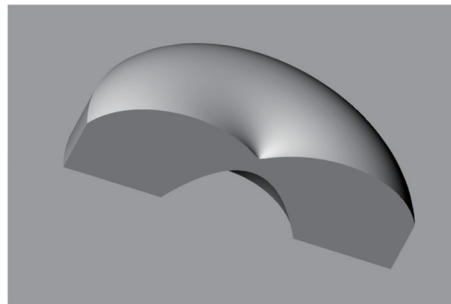


图 11 采用反馈法设计优化后的透镜

Fig.11 Optimized lens using feedback design method

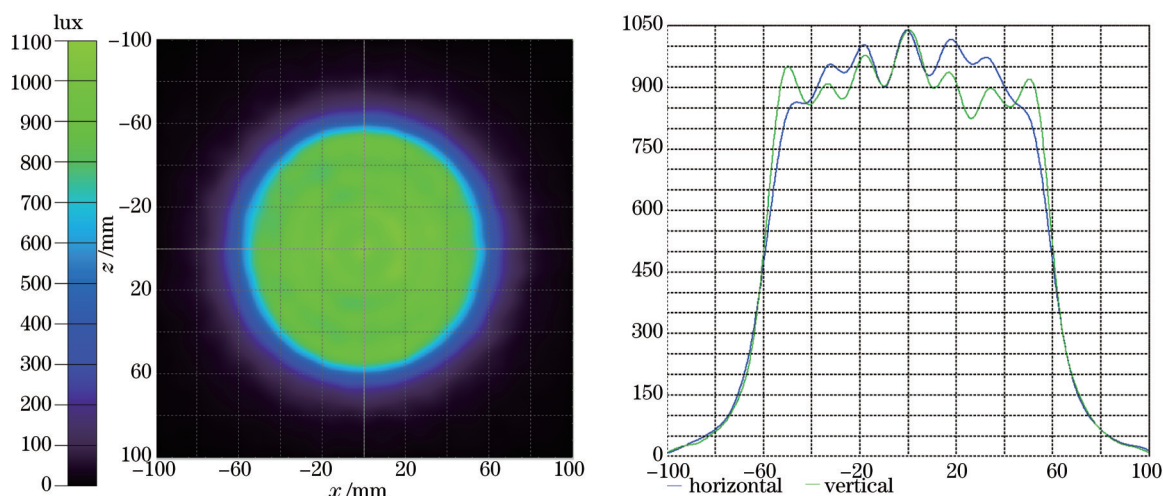


图 12 采用近场光线文件优化后的照明效果

Fig.12 Illumination effect optimized by near field light data

## 4 结 论

分析研究了LED光源在模型采用上的一些不同方案,对比了不同光源模型仿真对直下式背光光学透镜设计所产生的误差,并对表面贴装技术封装的白光LED进行了近场测试数据的设计模拟分析,使得仿真模型更加接近于真实模型。根据器件实际测量的光学属性,对光学设计进行反馈优化,最后在混光距离为20 mm的条件下,获得了5.5的大距离比,在LED的实际发光面积为 $1.7\text{ mm}\times 1.7\text{ mm}$ 的条件下,获得了被照区域的照度均匀度为0.81。尽管在研究中以均匀照度作为设计目标,但设计方法对于如何目标照度分布的情况也都是适用的,特别是对于多颗LED组成一个LED光源阵列的整体均匀性而言,单颗LED的照度分布 $E(r)$ 在应满足一定的条件时,能获得最佳的整体均匀性。考虑光源模型与理想点光源的偏差,采用实测光线文件辅以反馈优化方法,可以较精确地达到 $E(r)$ 的设计要求。

## 参 考 文 献

- 1 Hu Run, Luo Xiaobing, Zheng Huai, *et al.*. Design of a novel freeform lens for LED uniform illumination and conformal phosphor coating[J]. *Opt Express*[J]. 2012, 20(13): 13727–13737.
- 2 Whang Allen Jong-Woei, Yiyung Chen, Yuanting Teng. Designing uniform illumination systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays[J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 94–103.
- 3 Luo Yi, Feng Zexing, Han Yaju, *et al.*. Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. *Opt Express*, 2010, 18(9): 9055–9063.
- 4 Ding Yi, Liu Xu, Zheng Zhenrong, *et al.*. Freeform LED lens for uniform illumination[J]. *Opt Express*, 2008, 16(7): 12958–12966.
- 5 R. F. Rykowski, C. B. Wooley. Source modeling for illumination design[C]. SPIE, 1997, 3130, 204–208.
- 6 Roland Winston, Juan C. Minano, Pablo G. Benitez, *et al.*. *Nonimaging Optics* [M]. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. 185–190.
- 7 Qian KeYuan, Ma Jun, Fu wei, *et al.*. Research on scattering properties of phosphor for high power white light emitting diode based on Mie scattering theory[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(20): 204201.  
钱可元, 马 骏, 付 伟, 等. 基于Mie散射理论的白光发光二极管荧光粉散射特性研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(20): 204201.
- 8 Wang Kai, Wu Dan, Chen Fei, *et al.*. Angular color uniformity enhancement of white light emitting diodes integrated with freeform lenses[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(11): 1860–1862.
- 9 Liu Zhibin, Qian Keyuan, Luo Yi. Influence of phosphor layers with different shapes on white LED's CCT uniformity in Space[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(5): 651–655.  
刘志彬, 钱可元, 罗 毅. 荧光粉层形状对白光LED空间色温均匀性的影响, [J]. *半导体光电*, 2012, 33(5): 651–655.
- 10 D. R. Jenkins, H. Monch. Source imaging goniometric method of light source characterization for accurate projection system design [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2000, 31(1): 862–865.

- 11 Luo yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, *et al.*. Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(7):963-971.  
罗 毅, 张贤鹏, 王 霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 963-971.
- 12 Zheng Jinbo, Qian, Keyuan. Designing single LED illumination distribution for direct-type backlight[J]. Appl Opt, 2013, 52(28): 7022-7027.
- 13 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): 032202.
- 14 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): 0522003.  
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): 0522003.
- 15 Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.*. Research on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1008001.  
程治明, 曾 平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1008001.

栏目编辑: 韩 峰