

文章编号: 0258-7025(2008)07-0963-09

# 半导体照明中的非成像光学及其应用

罗毅<sup>1,2</sup> 张贤鹏<sup>1</sup> 王霖<sup>2</sup> 杨毅<sup>2</sup> 胡飞<sup>2</sup>  
钱可元<sup>2</sup> 韩彦军<sup>1</sup> 李旭亮<sup>3</sup> 张志海<sup>3</sup> 邓国强<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 清华大学电子工程系 集成光电子学国家重点实验室/清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084  
<sup>2</sup> 清华大学深圳研究生院半导体照明实验室, 广东 深圳 518057  
<sup>3</sup> 东莞勤上光电股份有限公司技术研发中心, 广东 东莞 523565

**摘要** 以 GaN 基功率型发光二极管(LED)为代表的半导体照明光源,具有其他传统光源无法比拟的诸多优点,被公认为 21 世纪最有价值的新型光源。充分发挥功率型 LED 的优势,利用非成像光学进行面向实际应用的功率型 LED 封装光学系统设计,以高端半导体照明光源的制造为突破点,带动整个半导体照明产业的快速进步,已成为半导体照明技术发展的战略选择。回顾了非成像光学的发展历史、研究进展以及在半导体照明中的应用,并通过设计实例,介绍了面向功率型 LED 光线耦合、二维给定光分布以及三维给定光分布问题的非成像光学系统设计原理与解决方案。

**关键词** 半导体照明;非成像光学;氮化镓;发光二极管

**中图分类号** TM 923.34;TN 364<sup>+</sup>.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083507.0963

## Non-Imaging Optics and Its Application in Solid State Lighting

Luo Yi<sup>1,2</sup> Zhang Xianpeng<sup>1</sup> Wang Lin<sup>2</sup> Yang Yi<sup>2</sup> Hu Fei<sup>2</sup>  
Qian Keyuan<sup>2</sup> Han Yanjun<sup>1</sup> Lee William<sup>3</sup> Zhang Ocean<sup>3</sup> Deng Guoqiang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics/Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

<sup>2</sup> Semiconductor Lighting Laboratory of Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518057, China

<sup>3</sup> Technology Research and Development Center, Kingsun Optoelectronic Co. Ltd., Dongguan, Guangdong 523565, China

**Abstract** Solid state lighting sources based on GaN-based high power light emitting diodes (LEDs) have been considered as one of the most valuable light sources in 21th century due to its many unparalleled advantages over other conventional lighting sources. It is a sensible strategy choice to promote the developments of solid state lighting industrial progress by making a breakthrough at some high class solid state lighting products, which can utilize the advantages of high power LEDs through introducing revolutionary design ideas based on non-imaging optics. In this paper, the history and development of non-imaging optics and its application in solid state lighting are reviewed. Then, the non-imaging optical system design principles and practical solutions are given through a few samples including optical system design of bundles-coupling, two-dimensional (2D) prescribed light distribution and 3-dimensional prescribed light distribution problems based on LEDs.

**Key words** solid state lighting; non-imaging optics; gallium nitride; light emitting diodes

## 1 引言

从 1962 年至今,发光二极管(LED)经历了 40

多年高速的发展;尤其是近 30 多年来,封装后的 LED 器件的亮度更是以每 18~24 个月翻一番的速

收稿日期:2007-12-29;收到修改稿日期:2008-01-30

基金项目:国家自然科学基金(60536020,60723002),国家 973 计划(2006CB302801,2006CB302804,2006CB302806,2006CB921106),国家 863 计划(2006AA03A105)和北京市科委重大计划(D0404003040321)资助项目。

作者简介:罗毅(1960—),男,江西人,博士,教授,博士生导师,目前主要从事半导体光电子器件方面的研究工作。

E-mail:luoy@tsinghua.edu.cn

度增长。1992年,红光LED的效率超越了经过滤光的白炽灯的效率而进入了汽车尾灯和交通灯市场;1993年,氮化镓(GaN)基LED在材料和器件研究上取得了突破性的进展,不仅使蓝/绿光LED器件的性能有了本质的提高,同时也使大功率紫外LED成为可能。LED以其对能源的高效利用,而被广泛应用于户内外全彩色显示、液晶显示器(LCD)背光、交通指示、建筑照明等领域。由于具有耗能小、寿命长、器件体积小、工作电压低、环保无污染等诸多优点,功率型GaN基LED成为备受瞩目的下一代照明光源<sup>[1~4]</sup>,一场以高效率功率型白光LED逐步取代白炽灯和荧光灯作为标志的照明领域革命已经悄然来临。面对世界照明工业转型的重大商机,近年来,美国、日本、欧盟、韩国都相继推出国家半导体照明计划,加大研究开发的力度。

在这种情况下,中国科技部专门设立半导体照明工程重大专项,大力促进半导体照明产业的发展。目前LED的研发和生产主要集中在美国、日本、欧盟、韩国和中国台湾等国家及地区。中国在外延片和芯片的性能上与国际巨头相比有较大的差距,但相关的研发企业正在奋起直追,发展速度日益加快,差距有望迅速缩小。与此相比,在下游封装和系统应用方面国内企业与国际企业则处于同一起跑线上。世界上LED封装企业的70%集中在中国大陆,不仅如此,中国也存在半导体照明的巨大市场。同时,中国在封装与系统应用方面与国际上的差距非常微弱。考虑到技术领域尚没有固定的制式、统一的标准,我们有极大的机会在半导体照明的封装技术领域取得更大的成功。为此,要大力发展功率型LED的高端封装及应用技术,并通过LED封装及应用产业的发展,拉动上游(材料外延)和中游(芯片制备)方面的技术进步,为中国民族半导体照明产业的发展壮大做出应有的贡献。而功率型LED的封装光学系统设计对发挥功率型LED的潜能、促进半导体照明产业发展,具有举足轻重的作用。

本文研究了LED光源的特点,介绍了半导体照明中引入非成像光学的背景,并回顾了非成像光学的历史和研究进展,最后结合具体实例介绍面向LED应用的非成像光学系统设计原理与解决方案。

## 2 LED照明光源的特点

根据用途的不同,照明光源可以分为室外景观照明灯、室内照明灯、路灯等,不同的用途对照明光源的光强分布以及光学性能指标有着不同的要求。

LED光源要在不同照明领域内得到大规模的应用,就必须满足这些性能指标。但作为半导体照明光源的核心,LED芯片本身是一个近似的朗伯(Lambertian)光源,即LED芯片的光分布是以垂直于LED发光面的轴线方向为零度角的余弦分布。图1为直接使用LED芯片作为光源的照明效果示意图,其光强分布沿其发光的旋转对称轴成余弦分布为

$$I(\phi) = I_0 \cos \phi, \quad (1)$$

式中 $I_0$ 为LED沿轴线方向的光强, $\phi$ 为出光方向与轴线之间的夹角。若忽略LED芯片的面积,则容易得到距离 $h$ 的屏幕上的照度分布为

$$P(\phi) = \frac{I_0 \cos^4 \phi}{h^2}, \quad (2)$$

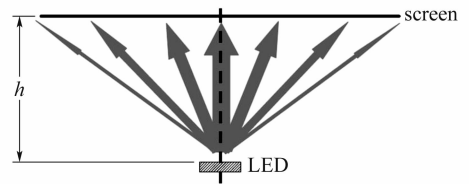


图1 LED芯片(朗伯光源)照明示意图

Fig. 1 LED chip (Lambertian source) lighting diagram

从(2)式可以看出,LED所发出的光线在屏幕上形成的照度随出射角 $\phi$ 的增大而迅速衰减。这样的光源,很难满足各种照明用途的需求。因此,必须根据不同的应用场合和需求,针对LED光源设计不同的光学系统,对LED芯片发出的光进行整形,改变其光强分布情况。这样的光学设计问题属于非成像光学的范畴<sup>[5~14]</sup>。

## 3 半导体照明中的非成像光学

相比于传统的成像光学而言,非成像光学所关心的不是能否在目标平面上成像以及成像质量如何,而是关注光源的能量利用率以及能量分布情况。图2表示了成像光学与非成像光学系统之间的区

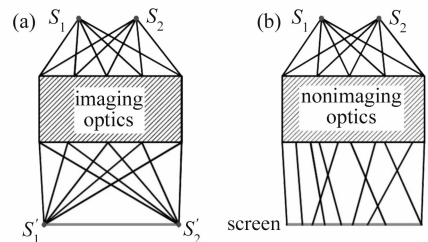


图2 成像光学系统与非成像光学系统的对比示意图

Fig. 2 Imaging optical system and non-imaging optical system

别。如图 2(a)所示,两个物点  $S_1, S_2$  发出的光经过成像光学系统传输,在屏幕上得到了其像点  $S'_1, S'_2$ ; 而图 2(b)中经过非成像光学系统,则在屏幕上得到了某种特定的照度分布。可以说,成像光学系统传递了物点的位置信息和光强度信息,而非成像光学系统则是对能量进行了重新分配和组合。

以阅读灯为例,通常出于对人眼健康的考虑,要求阅读灯在一个给定距离的平面上、一个给定的范围内,其照度不低于某一个特定值,一般为 300 lx。图 3(a)给出了一个没有适当光学系统的 LED 阅读灯使用情况示意图。根据(2)式,其在屏幕上形成一个沿径向迅速衰减的圆形光斑:中心亮度最大而边缘最暗。显然,在给定的照明区域内处处达到照度值,中心必然远远超出要求。这不仅增加了灯的能耗,而且由于中心处过于耀眼而容易造成使用者的不适;同时,由于没有对光源的发光角进行有效控制,在给定的照明区域范围之外存在相当的无效光,进一步浪费了能源。与之形成对比的是带有非成像光学系统的 LED 阅读灯,如图 3(b)所示。通过非成像光学系统对 LED 光场的整形和控制,在给定照明区域内形成均匀照度,并且区域外没有或很少有光,既保护了人眼,又节约了能源。

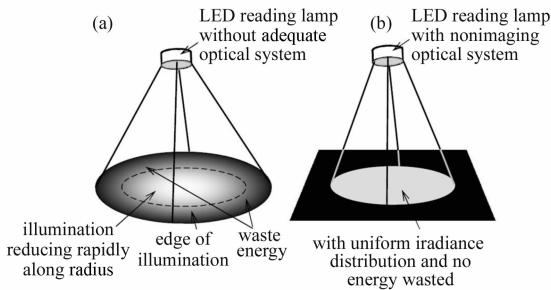


图 3 LED 阅读灯使用示意图。(a) 没有适当光学系统的阅读灯;(b) 带有非成像光学系统的阅读灯  
Fig. 3 Schematic of the use of LED reading lamps. (a) without adequate optical system; (b) with non-imaging optical system

从阅读灯的例子可以发现,非成像光学在 LED 照明中具有重要的应用价值,在节省能源、减少光污染、保护人眼健康方面具有积极意义,尤其是在路灯、室外照明等大功率照明领域有重要的经济价值。

#### 4 非成像光学的研究进展及现状

20 世纪 30,40 年代在美国的一些生产光学产品的公司中已经出现了非成像光学器件,但直到 70 年代非成像光学理论才逐渐成为一个体系<sup>[15,16]</sup>,并

随着对太阳能收集等问题研究的深入<sup>[17~22]</sup>,逐渐成为一门新兴的光学分支。非成像光学最先主要研究太阳能收集利用问题,关心如何将一个大入射孔径的入射光线收集,完全传输到一个小出射孔径,从而提高能量密度,方便利用。在研究的过程中逐渐产生一整套关于控制光线能量传输的理论。非成像光学系统简洁、能量利用率高,逐渐被照明领域所关注,也因此被借鉴到照明系统的设计中。根据不同的设计要求,非成像光学研究的问题可以分为两大类:光线耦合问题和给定光分布问题。

##### 4.1 光线耦合问题

光线耦合问题主要存在于收集利用太阳能和设计准直透镜等方面。图 4 所示为一种太阳能收集系统结构示意图。图 4(a)给出了系统的三维视图,图 4(b)为其  $x-y$  平面的剖面图。从图中可以看出,系统结构沿着  $z$  轴方向为全等平移延伸的,光学系统设计等同于在  $x-y$  平面的二维设计问题。从图 4(b)可以看到,其设计目标是使在一定角度范围内入射到该光学系统的光线,最多经过一次反射就能入射到放置在光学系统下部出口的光吸收表面而被吸收,以达到高效收集太阳能的目的。在这种设计中,应用了边缘光线理论<sup>[7~10,23,24]</sup>,根据这种理论设计的二维方案,如果不考虑反射面的吸收损耗,其光的收集效率将接近 100%。类似的具有旋转对称性的光收集器也被提出<sup>[5,15,16]</sup>,如图 5 所示。其设计方

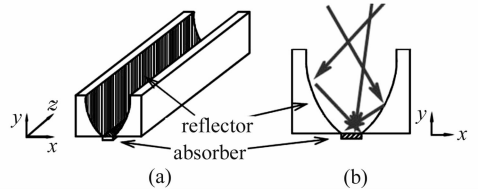


图 4 太阳能收集光学系统结构示意图  
(a) 系统三维视图;(b) 剖面图

Fig. 4 Schematic optical system structure of a solar collector. (a) three-dimensional (3D) view; (b) profiles

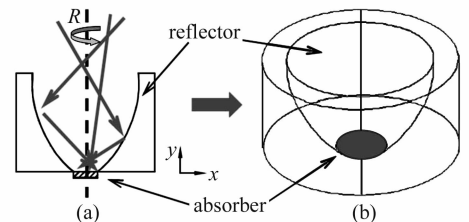


图 5 旋转对称的太阳能收集系统。(a) 剖面图;(b) 三维视图

Fig. 5 Rotationally symmetric solar collection system  
(a) cross-section; (b) 3D view

法与图 4 相同,都是应用边缘光线理论获得二维轮廓线,如图 5(a)所示;与图 4 不同的是,最后的收集系统是二维轮廓线绕其对称轴  $R$  旋转一周获得最后的反射面,如图 5(b)所示。

相关的模拟和实际结果表明,相比于一个方向上全等延伸的光收集器件,旋转对称的光收集系统的收集效率有所下降。一种比较合理的解释为<sup>[6]</sup>:平面的二维设计只能考虑子午光(即在二维设计面内的光线)的反射和传播,但在实际旋转对称系统中,存在大量不在任何一个通过旋转二维设计面而获得的子午面上的旋进光线,而平面二维设计无法有效考虑到这些光线,从而造成了收集效率的下降。而在全等延伸的系统中,由于收集器也一并延伸,因而对于旋进光仍然具有极强的收集能力。可以说,如图 4 所示的沿一个方向全等延伸的系统在设计上可以完全等同于一个二维系统;但对于图 5 所示的旋转对称系统,由于问题的存在,不能等同于二维系统,其精确设计要相对复杂和困难得多。出于这样的原因,通常称图 4 为二维设计问题,而图 5 则称为旋转对称三维设计问题或者旋转对称设计问题。如不作特别说明,文中提及的二维系统和旋转对称系统即为此二类结构。

#### 4.2 给定光分布问题

光线耦合问题关心的是光的收集问题,但随着一些相关问题研究和非成像光学理论的发展,尤其是将非成像光学引入到照明领域后,对于如何按需分配光能以及精确设计具有各种给定光分布的照明光学系统,逐渐得到了重视和初步解决<sup>[25,26]</sup>。根据采用的光源尺寸不同,给定光分布问题可以分为面向点光源的设计问题(即光源尺寸对于光学系统可以忽略不计)和面向扩展光源的设计问题(即光源的尺寸相对于光学系统不可忽略)。点光源给定照度分布是非成像光学中一类可以抽象出数学模型、求解微分方程的光学问题;而对于扩展光源,则具有相当的难度,目前没有可以求解的数学模型。此外按设计的维度分类,给定光分布问题也可以分为二维设计问题(即设计的光学系统具有旋转对称性或者平移对称性)和三维自由设计问题(即设计的光学系统不具有旋转对称性或者平移对称性)。

对于 LED 光源,由于其芯片尺寸小(目前功率型芯片的典型尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ ,小功率芯片的尺寸更小),在很多情况下忽略其尺寸对光学设计的影响,因此研究非成像光学中点光源给定光分布问题具有重要的实用意义。

## 5 面向 LED 的非成像光学系统设计实例

图 6 为常见的面向 LED 的非成像光学设计流程图,大体上可以分为确定设计条件和要求、理论计算设计模型、系统仿真模拟结果以及反馈数据修改设计等几个环节。

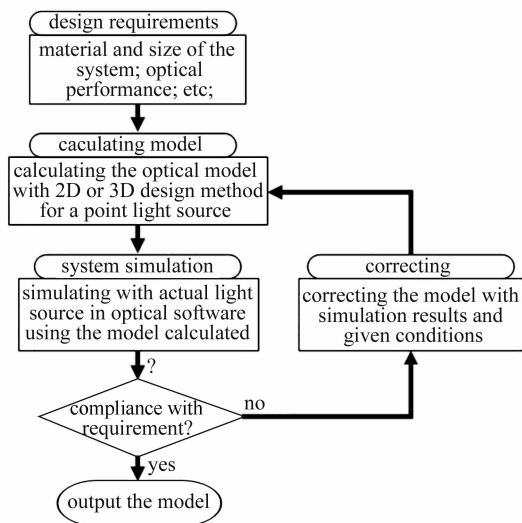


图 6 一种面向 LED 的非成像光学设计流程图  
Fig. 6 A flow diagram of non-imaging optical design for LED

设计中,首先要确定设计的条件和要求,如光学系统的结构、采用的材料、要实现的光分布情况等。根据这些条件和要求,可以确定其属于何种光学设计问题,即为二维系统、旋转对称系统还是更为复杂的三维自由设计问题,从而根据不同设计问题确定不同设计方法。通常芯片的尺寸相比于系统往往可以忽略,为简化设计常采用面向点光源的设计方案设计光学系统。但是在实际情况中,点光源设计带来的误差可能无法忽视,需要进行模拟仿真反馈数据以修正设计参数和设计方案,直至符合要求。仿真通常采用的是蒙特卡罗光线追踪法<sup>[27~29]</sup>。

### 5.1 准直光源系统设计(光线耦合系统设计)

在投影仪光源、投射灯、夜景照明灯等实际应用中常需要一个准直投射的面光源<sup>[30]</sup>,即获得一个具有较小投射角的面光源,其光线投射到被照物体后经漫反射进入人眼。但 LED 芯片可以近似看作一个朗伯光源,其发散角大、远场分布不满足要求;并且,单颗功率型 LED 芯片的输出光能量远远达不到要求的亮度。因此准直 LED 光学系统不仅要实现 LED 芯片的光在大面积内准直输出,而且还要容易扩展。为实现准直光源,一些设计方案是采用二次

光学元件,即准直透镜来和封装后的 LED 配合使用,以达到准直的目的,如图 7 所示,这就使得封装 LED 与准直透镜之间不可避免存在空气隙而带来额外损耗。设想采用一个准直透镜直接对 LED 芯片进行封装,避免产生空气隙如图 8 所示。

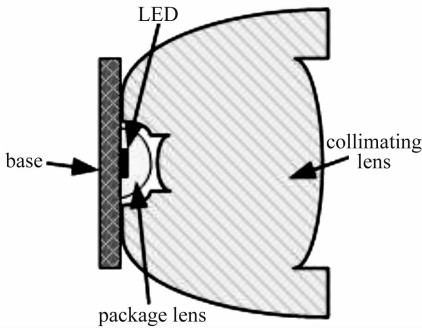


图 7 采用二次光学元件的准直 LED 光源方案示意图  
Fig.7 Schematics of collimating LED with secondary optical components

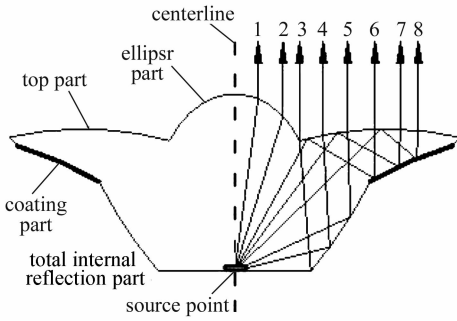


图 8 帽形封装透镜的结构和原理示意图  
Fig.8 Schematics of hat lens's structure and operation principle

图 8 所示的帽形封装透镜具有旋转对称特性,LED 芯片作为光源浸没在透镜中,LED 发出的光通过三种不同的方式进行准直,光线轨迹如图右侧所示:光线 1,2 与轴线夹角较小,通过透镜的中心表面折射后与轴线平行出射;光线 3,4,5 与轴线夹角较大,通过全内反射侧面反射后再从边缘扩展表面折射,与轴线平行出射;光线 6,7,8 与轴线的夹角适中,先通过边缘扩展表面全内反射,再通过蒸镀反射膜侧面反射,最后从边缘扩展表面折射,与轴线平行出射。因此,帽形封装透镜的二维曲线计算原理可以分为四个步骤:1) 确定中心表面曲线;2) 预设边缘扩展表面曲线;3) 逐点计算全内反射侧面曲线;4) 逐点计算蒸镀反射膜侧面曲线。

计算中,确定中心表面曲线可以通过设定的透镜高度以及折射定理计算获得,其最大光源光线角取决于折射时的菲涅耳损耗;在确定中心表面曲线

后,根据全内反射要求和最终出射要求确定边缘扩展表面曲线;然后,根据大角度光线发生全内反射的要求逐点计算圈内反射侧面,并且保证圈内反射后的光线经过边缘扩展表面的折射平行出射;其次确定蒸镀反射膜侧面;最后通过旋转二维曲线获得最终模型。为了实现大面积准直光源,设计要求透镜具有可扩展性,为此将透镜上表面修正为正六边形,获得的透镜模型如图 9 所示。其光强的远场分布如图 10 所示。可以看到封装后的 LED 光场集中在较小的发射角内,基本实现了准直光源的要求。

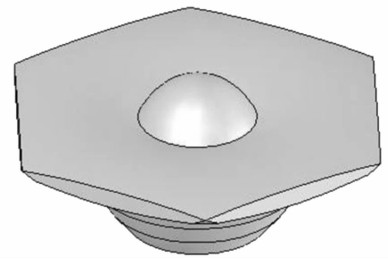


图 9 六边形准直 LED 模型  
Fig.9 Hexagon collimating LED model

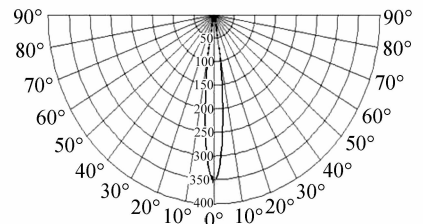


图 10 极坐标下帽形透镜的光场远场分布  
Fig.10 Polar far-field light distribution of hat lens

### 5.2 室内照明光源设计(二维给定光分布设计)

与准直光源不同,室内照明光源易被人眼直视,因此要求其发光面尽可能柔和、均匀、不刺眼;另一方面,室内照明光源需要有相当的发散角,尤其是室内主光源,其照明范围大,通常发散角要大于 120°。为实现这些要求同时保证光源光能的充分利用,必须使 LED 发出的光均匀发散到发光面上,而且发光区域没有突出的亮点才可以<sup>[28,29]</sup>。

室内照明光源尤其是主光源通常都设计在中心位置,其光场形状通常具有旋转对称性或者具有平移的对称性;在光强方面,要求在角度内具有均匀强度。图 11 给出了二维给定光分布问题的旋转对称系统和二维系统示意图。

在给定的光分布的设计中,不仅需要控制光线出射角,还需要对光源的能量传输进行控制。以图 11(a)为例,设给定光分布为  $P_R(r)$ ,朗伯光源的中心光强为  $I_{0,R}$ ,已知与对称轴夹角为  $\phi_1$  的光线

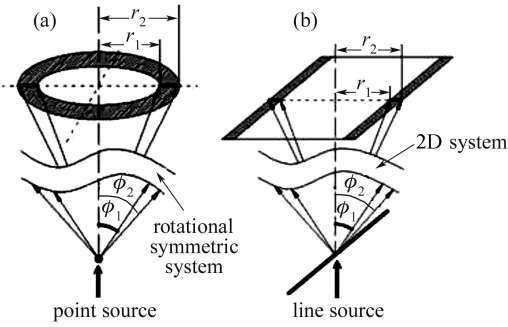


图 11 二维给定光分布问题示意图。(a) 旋转对称系统；(b) 二维系统

Fig. 11 Schematics of 2D prescribed irradiance problems (a) rotational symmetric system; (b) 2D system

入射到屏幕上半径为  $r_1$  的位置；考虑另一角度  $\phi_2$  的光线，入射位置为  $r_2$ 。根据能量守恒定理，有

$$2\pi \int_{r_1}^{r_2} P_R(r) r dr = 2\pi \int_{\phi_1}^{\phi_2} I_{0,R} \cos \phi \sin \phi d\phi, \quad (3)$$

考虑微分形式后，再化为任意  $\phi, r$  的表达式，有

$$dr_R = \frac{I_{0,R}}{P_R(r)} \frac{\sin \phi \cos \phi}{r} d\phi, \quad (4)$$

在设计中，规定了光线角度范围和屏幕范围之后，只要给定一个初始的  $\phi_0$  入射到  $r_0$ ，则考虑下一条角度为  $\phi_0 + d\phi$  的光线，根据(4)式就可以获得其入射位置  $r_0 + dr_R$ ，并依次类推获得所有光线角度与入射

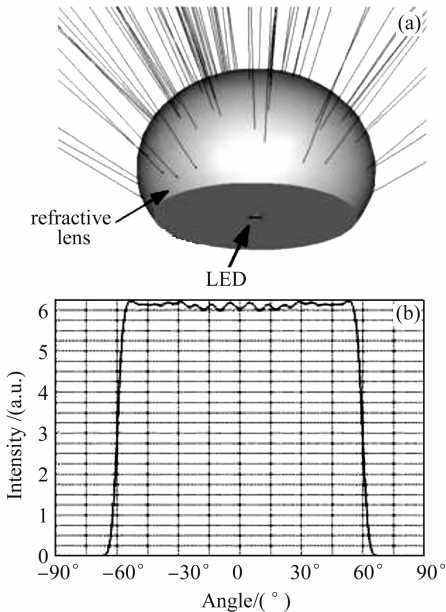


图 12 大角度均匀出光折射透镜示意图。(a) 折射透镜模型发光示意；(b) 远场光强分布随光源出光角的变化

Fig. 12 Schematics of refractive lens with wide-angle uniform light distribution. (a) luminescence refraction lens model diagram; (b) far-field intensity distribution with the emitting solid angle

到屏幕上位置的对应关系。根据光线出射角和最终入射位置的对应关系，可以计算旋转对称光学系统的二维轮廓线，最后通过旋转获得最终模型。相比于此，二维系统的模型则可以通过先计算二维轮廓线，然后平移获得光学系统模型。图 12 给出了利用折射实现均匀光强分布的 LED 旋转对称透镜模型及其效果图。从图中可以看到，采用这种设计方案的透镜，使得光源出光角度被控制在  $\pm 60^\circ$  的出光角内，并且远场光强实现了均匀分布，符合室内照明灯的要求。

### 5.3 三维给定光分布设计

当要求的照度分布或者光源的光强角分布不具有对称性时，由于缺乏足够的设计自由度，二维给定光分布设计方案就不能对各个角度的光线进行完全的控制，无法满足设计要求。目前，为了实现一些比较复杂，但更加实用的给定光分布，更多的研究围绕着三维给定光分布问题展开<sup>[29]</sup>。

在三维给定光分布问题中，由于光学系统没有了对称性，因而需要控制不同方向的光线、设计很多非对称的光分布，其求解的微分方程往往相当复杂，属于二阶非线性蒙特安培偏微分方程，目前尚缺乏通用的解法。

另外，在很多实际情况下，给定的光分布往往具有比较简单的边界条件。如在道路照明中，传统的路灯在路面上形成的照度分布往往是圆形的，一些改进的路灯也可以实现椭圆形，但最合理的形状应该是矩形，并且要求尽可能实现均匀照度；而在汽车前灯设计中，光源的光要尽可能限制在一定的水平角度和垂直角度内，并且对在路面上的照度也有一定要求。因此，研究如何设计光学系统以实现特定的照度区域形状和照度分布具有很高的科研价值和实用价值。

目前针对一些特殊边界条件下获得近似解的非成像光学设计主要有三个研究方向：1) 利用变分积分优化方法、几何近似方法求解非线性二阶蒙特安培方程<sup>[31~34]</sup>；2) 自由三维表面剪裁法<sup>[35~37]</sup>；3) 划分网格法<sup>[38,39]</sup>。

在三种方法中，利用变分积分和几何近似的方法，主要用在求解只有一个反光面的给定照度分布问题。利用变分积分或几何近似的方法，理论上都可以存在收敛的解或近似解，但是求解复杂，并且随求解精度的增加，计算量飞速增加，算法效率低下。自由表面剪裁方法的原理是构建折射或者反射表面的数学模型，目标是剪裁能够实现特定照度分布的

光学表面,最终的数学模型仍然归结为求解几个非线性二阶蒙特安培方程。与变分积分和几何近似的方法一样,也只能求解一个三维光学面,不能加入给定的光学表面进行设计,实用但并不方便。划分网格法则是一种具有直观物理意义的方法,其设计的光学系统实际上是定义一个从光源到给定光分布的映射,并且利用定义的映射来进行光学系统设计。在划分网格时,要求光源网格的端点被映射到给定光分布的端点上时,网格内的能量也进行相应的映射,以保证实现最终的能量传输要求。因此,除了要划分足够的网格以保证精度外,还需要准确地控制光学表面的形状以实现定义的映射。

根据光学原理,一个透镜表面只能在折射能力允许的范围内,控制一个入射波面到一个出射波面的变换。而在扩展光源的设计情况下,光源的尺寸不能忽略,透镜无法针对光源面上各个发光点实现符合要求的设计。目前针对扩展光源设计的只有 SMS(simultaneous multiple surface)方法<sup>[40]</sup>,可以设计两个透镜的表面,从而控制光源发出的两个波面,变换成给定的两个输出波面。但面向点光源的设计仍然具有重要意义,尤其是针对 LED 光源的光学系统设计。将给出实现具有“E”字形的均匀照度区域的点光源三维自由表面透镜设计实例,图 13 为设计的参数示意图。

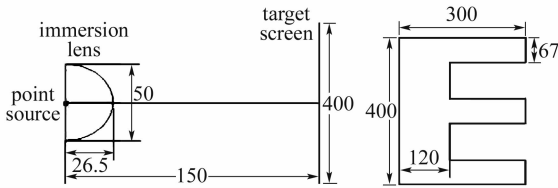


图 13 “E”形均匀照度区域透镜设计参数示意图  
(图中参数为任意单位且未等比例标注)

Fig. 13 Design sketch for the character “E” lens. Length units are arbitrary and the drawing is not to scale

假设入射到目标屏幕上的光和光源发出的光能量相等,根据能量守恒定律,有

$$\iint_{\Omega} I(\vec{\tau}) d\Omega = \iint_D E(\vec{p}) ds, \quad (5)$$

式中  $\vec{\tau}$  表示光源光线的方向,  $I(\vec{\tau})$  表示点光源的光强角分布,  $\Omega$  为光源发出光线的立体角范围,  $E(\vec{p})$  为目标屏幕上照度平面  $\vec{p}$  点位置上的给定照度,  $D$  为照度范围。定义光源角坐标系  $(u, v)$ 、照度平面坐标系  $(x, y)$ , 则根据(5)式可以得到

$$\iint_{\Omega} I(u, v) |J(u, v)| dudv = \iint_D E(x, y) |J(x, y)| dx dy, \quad (6)$$

式中  $|J(u, v)|$ ,  $|J(x, y)|$  分别代表采用参数坐标系  $(u, v)$ ,  $(x, y)$  后面积转换的 Jacobian 因子。类似的, (6)式可以转化为微分形式

$$I(u, v) |J(u, v)| dudv = E(x, y) |J(x, y)| dx dy, \quad (7)$$

(7)式表示在光源光线方向  $(u, v)$  与照射目标位置  $(x, y)$  的能量对应关系,这也是划分网络法的理论基础。

在能量对应的基础上,可以进一步采用分离变量的方法简化设计难度。首先将光源光线角按  $u$  参数,照度坐标按照  $x$  参数进行划分,并使两个坐标系内划分后的区域能量对应相等,为

$$\left( \int I(u, v) |J(u, v)| du \right) dv = \left( \int E(x, y) |J(x, y)| dx \right) dy, \quad (8)$$

(8)式为一个一阶常微分方程,给定初始条件后就可以采用数值方法或者理论计算进行求解,得到光源能量与照射区域能量分块的纵向对应关系  $y = f(v)$ 。

在纵向划分基础上,同样利用  $v$  参数和  $y$  参数可以获得进一步的对应关系

$$I(u, v) |J(u, v)| du = L(x, y) |J(x, y)| \times \frac{\int I(u, v) |J(u, v)| du}{\int E(x, y) |J(x, y)| dx} dx, \quad (9)$$

(9)式同样为一个一阶常微分方程,其边界条件为(8)式的求解结果:  $(x_0, y) = f(u_0, v)$ 。求解(9)式后,可以得到一个从光源到照度平面的一系列对应关系  $(u, v) \rightarrow (x, y)$ 。图 14 给出了分离变量进行能量划分的示意图。

在获得  $(u, v) \rightarrow (x, y)$  的对应关系后,以折射透镜为例,要得到透镜的自由三维表面,可以根据划

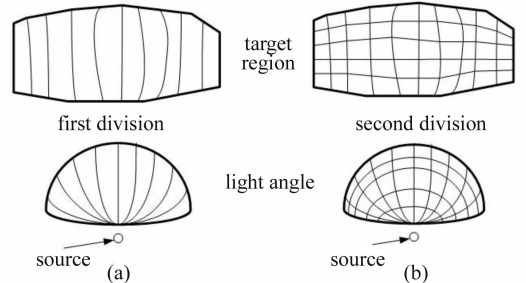


图 14 按照能量守恒原理和变量分离方法对照度平面、光源光线角度的网格划分示意图。(a) 一次划分结果;(b) 二次划分结果

Fig. 14 Slicing of the target plane and source angle region with energy conservation and variable separated method. (a) first division; (b) second division

分的网格,计算对应透镜表面的离散数据点  $P(u, v)$ ,然后通过这些点构造透镜表面。构造透镜表面的流程为:1) 利用  $(u, v) \rightarrow (x, y)$  关系,计算离散点  $P(u, v)$  处的表面法线矢量  $\mathbf{n}(P(u, v))$ ;2) 选定光学表面的初始点  $P(u_0, v_0)$ ,选定一纵向表面法线  $\mathbf{n}(P(u_0, v_0))$ ,利用叠代法逐点计算透镜表面纵向离散数据点组  $P(u, v_0)$ ,新的数据点  $P(u_{i+1}, v_0)$  位于前点  $P(u_i, v_0)$  和法线  $\mathbf{n}(P(u_i, v_0))$  决定的平面上;3) 利用获得的纵向离散数据点  $P(u_i, v_0)$  及其横向法线组  $\mathbf{n}(P(u_i, v))$ ,同样叠代计算通过点  $P(u_i, v_0)$  的横向曲线;4) 逐一计算所有横向曲线;5) 利用获得的所有横向曲线获得一个光学表面<sup>[41,42]</sup>。

利用分离变量的方法,容易获得矩形的均匀照度分布,为此将照度区域和光源分成相对应的四个矩形区域,分别进行设计,如图 15 所示。

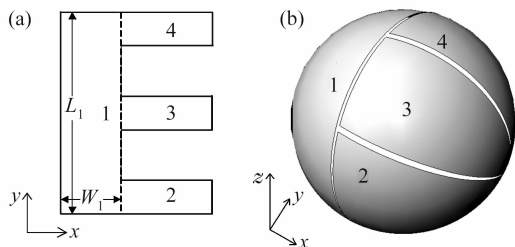


图 15 “E”形均匀照度设计方案的能量区域划分示意

(a) 照度区域划分示意;(b) 光源角度划分示意

Fig. 15 Schematics of energy division for the character “E” uniform irradiance design. (a) division of the target plane; (b) division of the emitting solid angle

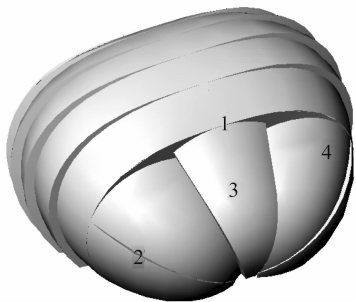


图 16 形成“E”形均匀照度区域的浸没透镜模型

Fig. 16 Model of the immersion lens that cast the character “E” on the target plane with uniform irradiance

此外,分离变量法设计光学透镜时,最后构造的曲面法线与曲面设定法线之间会存在一定误差,这种误差会导致光线出射角度产生偏差从而影响最后的照度分布。为实现设计目标,需要引入相应的曲面法线误差控制<sup>[29]</sup>。图 16 给出了最后的形成“E”形均匀照度透镜的模型,图 17 为其仿真结果。

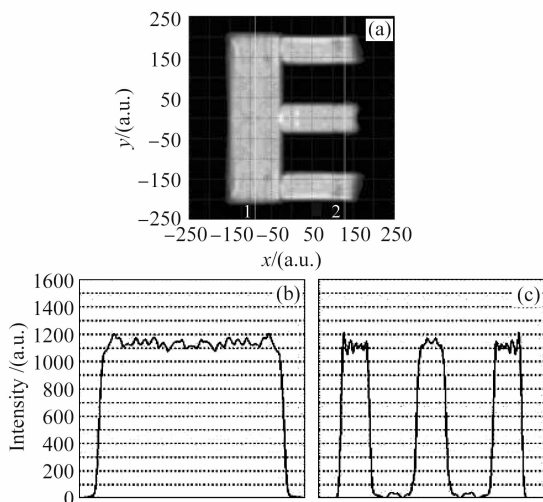


图 17 形成“E”形均匀照度区域的浸没透镜仿真结果。

(a) 区域照度分布;(b) 直线 1 上的照度分布;(c) 直线 2 上的照度分布

Fig. 17 Simulation results of the character “E” immersion lens. (a) irradiance distribution on the target plane; (b) irradiance distribution along line 1; (c) irradiance distribution alone line 2



图 18 具有矩形照度的 LED 路灯。(a) 仿真结果;(b) 实际效果

Fig. 18 LED street lamps with rectangular irradiance distribution. (a) simulation results; (b) actual results

采用分离变量的三维自由表面设计思路,非常容易实现矩形照度分布,这在 LED 路灯设计上具有重要应用前景。图 18 给出了利用这一方法设计的具有矩形照度分布 LED 路灯的仿真结果和实际效果图。

## 6 展 望

相对于半导体照明上中游技术的快速进步,功率型 LED 在封装技术以及针对不同应用领域的系统设计方面的滞后,已经成为制约半导体照明真正进入市场、替代传统光源、发挥半导体照明节能降耗战略作用的瓶颈。尤其需要指出的是,在半导体照明下游器件封装和系统应用技术上,世界处于同一起跑线。充分发挥功率型 LED 的优势,以高端半导体照明光源的制造为突破点,带动整个半导体照明



产业的快速进步,对于中国半导体照明产业的发展具有更重要的战略意义。其中,基于非成像光学面向功率型LED封装和应用的光学系统设计,对发挥功率型LED的潜能,促进整个半导体照明产业的发展具有举足轻重的作用,无论从技术角度还是实际应用角度,都具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 F. M. Steranka, J. Bhat, D. Collins *et al.*. High power LEDs-technology status and market applications [J]. *Physical Status Solid (A) Applied Research*, 2002, **194**(2):380~388
- 2 Daniel A. Steigerwald, Jerome C. Bhat, Dave Collins *et al.*. Illumination with solid state lighting technology [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(2):310~320
- 3 Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller. White light emitting diodes for illumination [C]. *SPIE*, 2000, **3938**:30~41
- 4 T. Mukai, M. Yamada, S. Nakamura. Characteristics of InGaN-based UV/blue/green/amber/red light-emitting diodes [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Eoleol Review Papers*, 1999, **38**(7A):3976~3981
- 5 R. Winston, J. C. Minano, P. Benitez. *Nonimaging Optics* [M]. Elsevier Academic Press, 2005. 159~180
- 6 D. G. Pelka, K. Patel. An overview of LED applications for general illumination [C]. *SPIE*, 2003, **5186**:15~26
- 7 P. T. Ong, J. M. Gordon, A. Rabl *et al.*. Tailored edge-ray designs for uniform illumination of distant targets [J]. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(6):1726~1737
- 8 P. T. Ong, J. M. Gordon, A. Rabl. Tailoring lighting reflectors to prescribed illuminance distributions: compact partial-involute designs [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(34):7877~7887
- 9 P. T. Ong, J. M. Gordon, A. Rabl. Tailored edge-ray designs for illumination with tubular sources [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(22):4361~4371
- 10 B. Parkyn, F. Munoz, J. C. Minano *et al.*. Edge-ray design of compact etendue-limited folded-optic collimators [C]. *SPIE*, 2004, **5185**:6~17
- 11 T. Alahautala, R. Hernberg. Generation of uniform light by use of diode lasers and a truncated paraboloid with a Lambertian scatterer [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4):949~954
- 12 Wang Weisheng, Jiang Wei, Dou Xiaoming. A LED light unit for the projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):855~859  
王蔚生,姜维,窦晓鸣.用于投影机的发光二极管照明单元[J].*光学学报*, 2005, **25**(6):855~859
- 13 Ding Yi, Gu Peifu. Freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):540~544  
丁毅,顾培夫.实现均匀照明的自由曲面反射器[J].*光学学报*, 2007, **27**(3):540~544
- 14 Zhao Xing, Fang Zhiliang, Cui Jicheng *et al.*. Study on the optical engine of the mini-projector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5):913~918  
赵星,方志良,崔继承等.微型投影机光学引擎的研究[J].*光学学报*, 2007, **27**(5):913~918
- 15 W. T. Welford, R. Winston. *The Optics of Nonimaging Concentrators* [M]. New York: Academic Press, 1978
- 16 W. T. Welford, R. Winston. *High Collection Nonimaging Optics* [M]. New York: Academic Press, 1989
- 17 R. Winston. Principles of solar concentrators of a novel design [J]. *Sol. Energy*, 1974, **16**:89~95
- 18 R. Winston, H. Hinterberger. Principles of cylindrical concentrators for solar energy [J]. *Sol. Energy*, 1975, **17**:255~258
- 19 A. Rabl, R. Winston. Ideal concentrators for finite sources and restricted exit angles [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**:2880~2883
- 20 H. Ries, A. Rabl. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10):2627~2632
- 21 B. A. Jacobson, R. D. Gengelbach. Novel compact nonimaging collectors for LED arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5185**:30~34
- 22 P. Benitez, R. Mohedano, J. C. Minano *et al.*. Design of CPC-like reflectors within the simultaneous multiple surface design method [C]. *SPIE*, 1997, **3139**:19~28
- 23 P. A. Davis. Edge-ray principle of nonimaging optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4):1256~1259
- 24 P. Benitez, J. C. Minano. Offence against the edge ray theorem [C]. *SPIE*, 2004, **5529**:108~119
- 25 R. Winston, H. Ries. Nonimaging reflectors as functionals of the desired irradiance [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1993, **10**(9):1902~1908
- 26 H. Ries, R. Winston. Tailored edge-ray reflectors for illumination [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(4):1260~1264
- 27 F. Hu, K. Y. Qian, Y. Luo. Far-field pattern simulation of flip-chip bonded power light-emitting diodes by a Monte Carlo photon-tracing method [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**:2768~2771
- 28 Y. Yang, K. Y. Qian, Y. Luo. Design of a rotational three-dimensional nonimaging device by a compensated two-dimensional design process [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**:5154~5159
- 29 L. Wang, K. Y. Qian, Y. Luo. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**:3716~3723
- 30 Edward H. Stupp, Matthew S. Brennessoltz. *Projection Displays* [M]. John Wiley & Sons Ltd, 1999
- 31 S. Kochengin, V. Oliker. Determination of reflector surfaces from near-field scattering data II. Numerical solution [J]. *Numerische Mathematik*, 1998, **79**(4):553~568
- 32 L. Caffarelli, S. Kochengin, V. Oliker. On the numerical solution of the problem of reflector design with given far-field scattering data [J]. *Contemporary Mathematics*, 1999, **226**:13~32
- 33 S. Kochengin, V. Oliker, O. von Tempski. On the design of reflectors with prespecified distribution of virtual sources and intensities [J]. *Inverse Problems*, 1998, **14**:661~678
- 34 V. Oliker. Geometric and variational methods in optical design of reflecting surfaces with prescribed irradiance properties [C]. *SPIE*, 2005, **5924**:592407
- 35 H. Ries, J. A. Muschaweck. Tailoring freeform lenses for illuminations [C]. *SPIE*, 2001, **4442**:43~50
- 36 H. Ries, J. A. Muschaweck. Tailored freeform optical surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(3):590~595
- 37 Andreas Timinger, Julius Muschaweck, Harald Ries. Designing tailored free-form surfaces for general illumination [C]. *SPIE*, 2003, **5186**:128~132
- 38 William A. parkyn. Design of illumination lenses via extrinsic differential geometry [C]. *SPIE*, 1998, **3428**:154~162
- 39 Bill Parkyn, David Pelka. Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm [C]. *SPIE*, 2006, **6338**:633803
- 40 Pablo Benitez, Juan C. Minano, Jose Blen *et al.*. Simultaneous multiple surface optical design method in three dimensions [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(7):1489~1502
- 41 L. Piegl, W. Tiller. *The NURBS Book* [M]. 2nd ed.. Springer-Verlag, Berlin, 1997
- 42 G. Farin, J. Hoschek, M. Kim. *Handbook of Computer Aided Geometric Design* [M]. Elsevier, Amsterdam, 2002