

The Secondary Optical Design of LED

Shaolei Wang, Li Zhang, Zhihua He, Min Li

China Jiliang University, Hangzhou

Email: 864335681@qq.com

Received: Aug. 12th, 2013; revised: Aug. 21st, 2013; accepted: Sep. 3rd, 2013

Copyright © 2013 Shaolei Wang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The paper is based on the secondary optical design of LED. Firstly, we introduced some unique advantages of LED in the field of lighting and summarized relevant theoretical knowledge of photometry in the imaging optical system. Then, we analyzed and compared the methods of the secondary optical design. Finally, we discussed the development direction in the future of secondary optical design of LED.

Keywords: Photometry Theory; Free Surface; Empirical Method; Partial Differential Equation Method; Cutting Method; Meshing Method; Simultaneous Multiple Surface

LED 二次光学设计

王少雷, 张 莉, 贺志华, 李 敏

中国计量学院, 杭州

Email: 864335681@qq.com

收稿日期: 2013 年 8 月 12 日; 修回日期: 2013 年 8 月 21 日; 录用日期: 2013 年 9 月 3 日

摘 要: 本文以 LED 二次光学设计为主线。首先介绍了 LED 在照明领域的一些独特的优点。对非成像光学系统中关于光度学的一些相关理论知识进行了概述。然后对二次光学设计的几种方法进行分析与比较。最后, 对二次光学设计今后的发展方向做出了展望。

关键词: 光度学理论; 自由曲面; 经验法; 偏微分方程法; 裁剪法; 网格划分法; 同步多曲面设计法

1. 引言

LED被认为是继白炽灯、荧光灯和高压气体放电灯(HID)之后的第四次照明革命。它具有能耗低、光电效率高、寿命长、节能环保等优点, 是传统光源所无法比拟的。这也使得LED成为21世纪最具前途的照明解决方案。

但是LED光源是一种近似的朗伯发光体, 即光源分布是以垂直于发光面的轴线为零度角的余弦分布:

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

其中, I_0 是LED沿轴线的光强, ϕ 是光线与对称轴的

夹角。对于这样的光源, 在接收面上形成的是分布不均匀的圆形光斑, 所以不能直接用于照明。它必须进行适当的一次光学设计、二次光学设计甚至是后续光学设计, 以改善其光强的分布, 使之满足于照明要求。

而LED光源的特点在于其可以作为点光源处理, 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境遇^[1]。本文主要介绍了LED二次光学设计在实际设计过程中的一些基本方法, 对这些方法进行了分析与探讨。并对LED光学设计者设计过程提出了一些建议。最后, 对二次光学设计今后的发展进行了展望。

2. 光度学理论^[2]

2.1. 光通量(Flux)

光通量是指辐射能量中经过人眼视见函数折算到能引起人眼光刺激的那部分的辐射能量。假设某辐射体的辐射波长为 λ 的单色光, 该辐射体的辐射通量为 $d\Phi_e$ 。可以根据视见函数的意义, 人眼产生的视觉强度与辐射通量 $d\Phi_e$ 和视见函数 $V(\lambda)$ 成正比, 于是光通量即为:

$$d\Phi = C \cdot V(\lambda) \cdot d\Phi_e \quad (2)$$

其中, C 为单位换算常数。光通量的单位是流明(lm)。

2.2. 发光强度

发光强度是人眼所接收的光通量 $d\Phi$ 与辐射体对瞳孔所张立体角 $d\Omega$ 的比值(如图 1), 即:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3)$$

其中, 发光强度的单位是坎德拉(cd)。

2.3. 光照度(Illuminance)

光照度是某一被照物体表面上单位面积内所接收到的光通量大小。假设发光体光通量 $d\Phi$ 照射在被照物体表面的微元 dS 上, 那么该物体表面的光照度为:

$$E = d\Phi/dS \quad (4)$$

其中, 光照度的单位是勒克斯(lx)。

2.4. 光亮度(Luminance)

光亮度是发光表面不同位置 and 不同方向的发光特性。假设在发光面上的小面积元 dS (如图 2), 与 dS 法线 N 的夹角为 θ 的方向上单位立体角 $d\Omega$ 内发出的光通量为 $d\Phi$ 。那么, 该方向上的光通量即为:

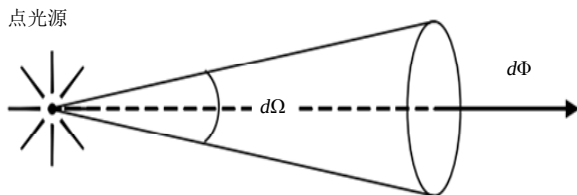


Figure 1. The luminous intensity of a point source^[3]
图 1. 点光源的发光强度^[3]

$$L = \frac{d\Phi}{\cos \theta \cdot dS d\Omega} \quad (5)$$

2.5. 朗伯定律

由于均匀发光体表面各个方向的光亮度是一样的。假设发光微元 dS 在与该微元垂直方向上的发光强度为 I_N (如图 3)。则可得与 I_N 方向成角度为 θ 的发光强度 I_θ 有如下公式:

$$I_\theta = I_N \cos \theta \quad (6)$$

3. LED 二次光学设计方法

LED 在封装过程中的设计被称为一次光学设计。它主要考虑的是让 LED 发出更多的光能, 以保证其出光质量。

而二次光学设计则是在一次配光设计的基础上, 解决如何让 LED 器件发出的光线照射到预定的照明区域上, 使照明系统发出的光满足设计的要求。它更

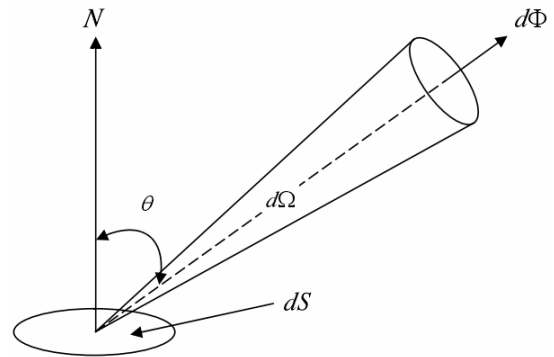


Figure 2. The intensity of light source^[3]
图 2. 光源发光亮度^[3]

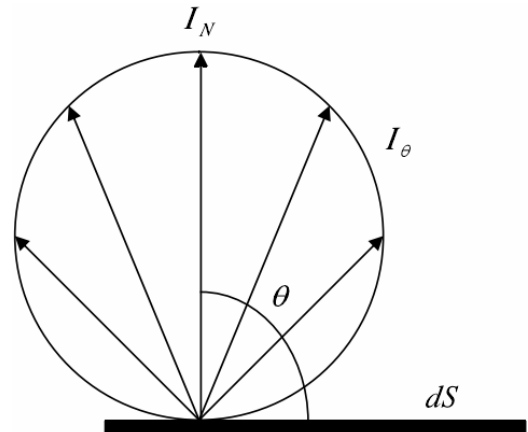


Figure 3. Lambert radiator^[3]
图 3. 朗伯辐射体^[3]

多考虑的是光度学的一些问题,如:光通量、发光强度、光照度与光亮度等,这些也新兴学科——非成像光学研究范畴^[4]。LED 的二次光学设计主要依托于非成像光学理论,这一理论最早由 Hinterberger 和 Winston 提出^[5]。现今,LED 的二次光学设计主要是经验法和非成像设计方法等。

3.1. 经验法

经验法又称试错法^[6],是设计人员进行二次光学设计中应用相当广泛的一种方法,它主要靠设计者凭自己的设计经验进行。这种方法是根据用户的需要,设计人员在三维建模软件如 Solidworks、PRO/E 或 UG 中绘出光学元器件(如反光杯、透镜、折光板等)的结构,然后将设计出的结构导入非序列光线追迹软件中(Tracepro、Lighttools 或 ASAP 等)。在二次光学元件材料表面光学参数的设定后,进行光线追迹与模拟,得到整个灯具的光强分布曲线和照明面的照度分布图。由于经验法的设计随意性强,设计出的光学元件结构往往不能一次性成功,需要多次修改光学元件的结构,并进行照明模拟,直至其满足设计要求为止(如图 4)。

3.2. 非成像设计方法

随着用户对 LED 光照性能要求的提高,传统透

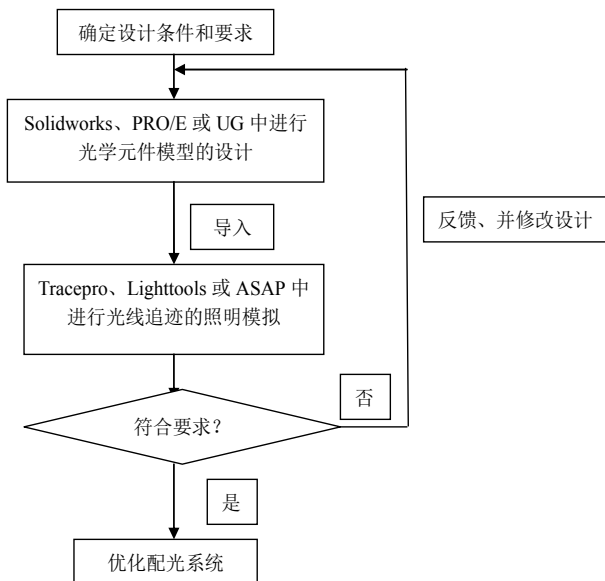


Figure 4. The steps of the secondary optical design for empirical method

图 4. 用经验法进行二次光学设计的步骤

镜和反光杯等光学元件已经难以满足设计要求了^[7]。

为了实现均匀照明,设计者也曾设计出了方棒(积分棒)^[8],复眼透镜等^[9]光学元件。但这些照明系统设计起来非常复杂。并且对于方棒照明系统,它经过多次反射,会造成光能的损失。复眼透镜经过透镜时也会造成光能的损耗,因此降低光能的利用率。所以这两者不适用于普通照明,只适合于特定场合下的均匀照明。

近些年来,光学设计者们开始把眼光转向了自由曲面的设计。通过非成像设计的方法^[10]获得自由曲面透镜^[11]以及自由曲面反射器^[12]等。取得了非常好的效果,这也引起了世界各地照明设计者们对这一方法的浓厚兴趣。非成像设计理论包括偏微分方程求解法^[13]、裁剪法^[14]、网格划分法^[15]和同步多曲面设计法^[16]。图5是运用非成像理论进行LED二次光学设计的步骤。

3.2.1. 偏微分方程求解法^[17-19]

此类偏微分方程的建立是基于非成像光学理论、自由曲面理论和微分几何理论。然后把得到的偏微分方程在matlab里编程求解,求得自由曲面的一些数据,把这些求得的数据在三维建模软件进行曲线拟合,并

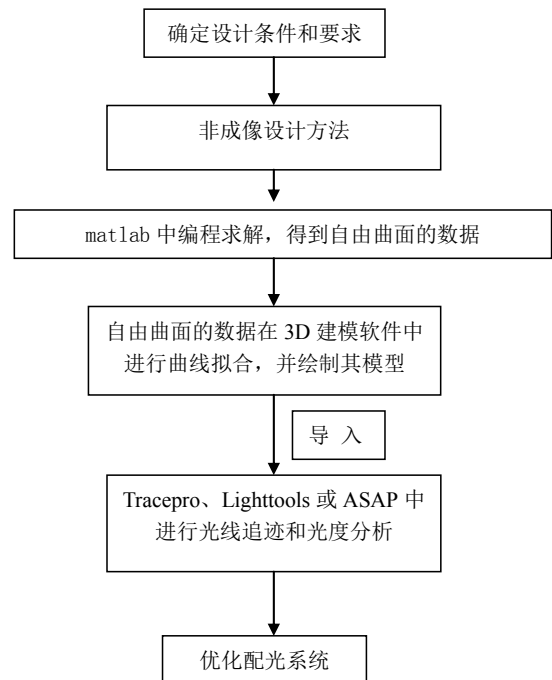


Figure 5. The steps of the secondary optical design for the design method of nonimaging

图 5. 非成像设计方法进行二次光学设计的步骤

完成其三维实体模型的建立。最后把模型导入光度分析软件中进行光线追迹和光度分析。

其中,建立偏微分方程依据斯涅尔定律、边缘光线原理、光束扩展度守恒等原理^[20]。例如边缘光线原理^[21],光源发出的光线的边缘尽量能落在目标面的边缘,那么边缘内部的光线就会落在目标面内,即可消除中心亮斑。非成像光学理论的核心就是能精确控制每一根光线,使光线“指到哪儿打到哪儿”的效果。

早在2001年,OEC公司的Ries等人通过能量守恒等关系,构建非线性偏微分方程,通过数值求解得到该自由曲面的离散面型数据^[22]。他用该方法实现了一个带“oec”字样的方形照明图案(如图6)。这一研究震惊世界。从此,世界各地照明领域专家学者纷纷对该方法做出了研究。

2007年,浙江大学丁毅等利用微分方程数值解成功构造了自由曲面反光器^[23]。点光源和面光源照度分别达到86.14%和89.03%。随即在2009年,上海大学吴仍茂,屠大维等^[24]采用折射-全反射(TIR)光学系统,建立TIR折射面及全反射面轮廓曲线上的点所满足的常微分方程,构造出了一款投射器。该投射器模拟结果:目标平面的光照均匀达92.6%,系统效率达91.8%。当时,利用偏微分方程求解法,取得了非常广泛的应用。

但是偏微分方程的可解性比较低,有时得到的是虚数解。并且这种设计只适合小光源、近照明面的具有旋转对称结构的简单情况。正因为偏微分方程求解法的这些局限性,所以,该方法在其后没有被广泛采用。

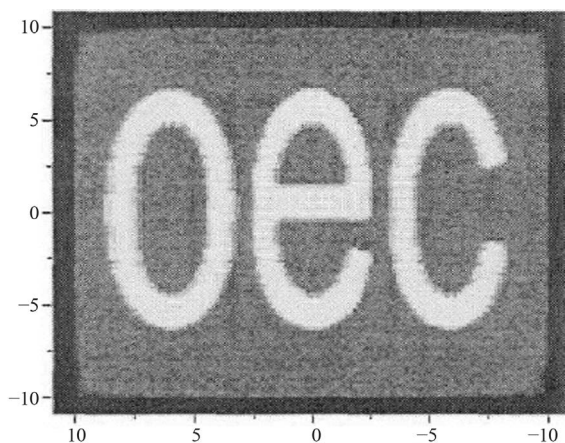


Figure 6. The effect of lighting system by Ries et al.^[22]
图 6. Ries 等人研制的照明系统的效果图^[22]

3.2.2. 裁剪法^[25,26]

裁剪法^[27]是H. Ries等人在2002年提出的。它是通过裁剪光学透镜的面形以控制波前走向,从而获得均匀的能量或照明分布。运用裁剪法进行照明设计,是比较流行的一种方法,其成果也是比较普遍的。2007年,中国计量学院的余桂英、金骥等利用裁剪法设计出了一款针对体视显微镜LED照明系统的反射器^[28]。该反射器均匀性可达90.6%,能量利用率高达99%。该设计方案为实现照明系统小型化和简单化提供了一种有效的途径。

但这种方法数学模型需要求解二阶Monte-Ampère方程,由于其方程不易求解,所以该方法还是具有一定的局限性。

3.2.3 网格划分法^[29,30]

网格划分法最早在2006被提出^[31],这种方法是根据能量守恒原理定义光源光线和光线在目标接收面位置的映射,将定义的映射作为设计条件,构造出自由曲面型方程,得到面型的数据。该方法容易得出解析解,求解出的结果精度高,并且不用进行误差校验。该方法一般适用于道路照明设计。

2007年,王霖^[32]等人提出这种基于变量可分离映射关系的自由曲面设计方法,采用该方法实现了“E”字照明光斑(如图7)。

2008年,香港理工大学的蒋金波、杜雪等应用划分网格的方法,得到自由曲面的LED路灯透镜。其路灯发出的所有光线都集中在路面,实现了光污染几乎为零的效果。

4. LED 二次光学设计方法的优缺点

目前,LED二次光学设计普遍采用经验法进行设计。对于设计者而言,这种方法上手快,简单易行,不需要太多复杂的计算并且步骤单一。但是,其缺点在于设计的随意性强,设计者往往需要对模型结构进行十几次甚至几十次反复修改,并且反复进行仿真模拟。且效果还不定能达到设计者初试的设计要求,这就使得这种方法执行起来费时费力。

非成像设计方法是世界性的研究课题,也是今后LED二次光学设计的一个及其重要的发展方向。用该方法设计出来的光学元器件模型,它的光学效率和光斑均匀度都要远远优于用经验法得到的模型。但这

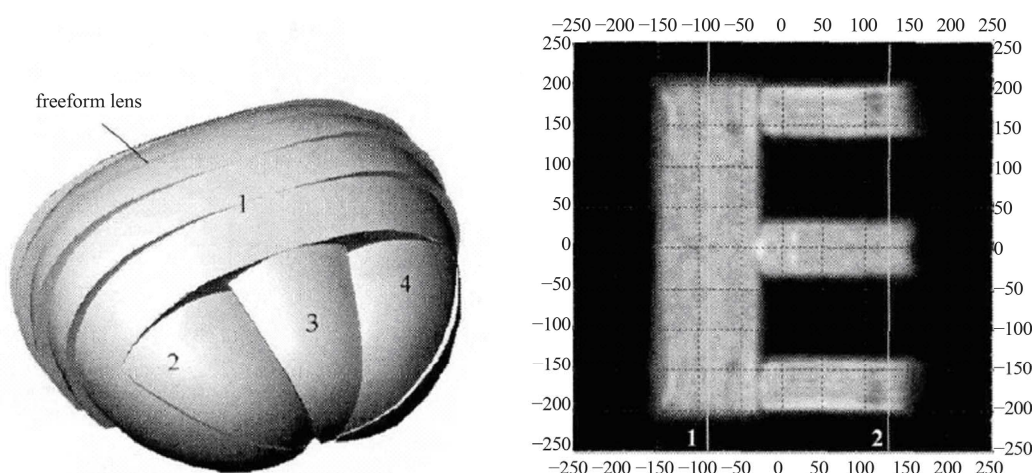


Figure 7. The model and illumination facula of free surface lens^[32]
图 7. 自由曲面透镜模型及照明光斑^[32]

种方法至今仍然没有获得设计者的广泛采用。原因主要在于其对光学设计者的要求很高。设计者不仅需要具备扎实的几何光学、数学建模和用matlab编程的能力，而且还需要掌握用三维软件建模，并且用光学软件进行光学分析的能力。这就迫切需要照明领域的研究者设计出更多简单易行且效果高的软件，或是设计方案，来进行光学设计。

5. 结语

随着人们对物质生活要求的提高，二次光学设计的要求也越来越高。根据用户的需求，设计者需要设计出各种照度均匀的照明系统。这就对二次光学元件的设计出了很大的难题。于是设计者把眼光纷纷投向了二次自由曲面的研究。因为自由曲面具有高度的灵活性和自由度，它将大大提高系统的光学性能并简化系统的结构。因此自由曲面是目前光学设计领域研究的前沿课题。

目前，基于非成像光学理论与几何理论求解出自由曲面的数值点，并通过这些数据点拟合出自由曲面，是二次自由曲面设计的主要方法。根据非成像理论可以精确控制每一根光线的光路方向，这是用经验法进行二次光学设计所无法达到的。

目前为止，对于点光源二次光学设计理论模型已经相对完善。但是针对作为光源发展趋势的大尺寸、大功率面光源二次光学设计方法，却只有同步多曲面设计法(SMS 法)，并且没有相应的数学模型。这就要求 LED 二次光学设计们必须在不断完善点光源配光

理论的同时，加大对面光源配光理论的研究。并且能创造出光学设计的软件或是提出更好的光学设计方案。虽然这个过程是艰辛而漫长的，但它的前景必定是诱人的。

参考文献 (References)

- [1] 罗毅, 张贤鹏, 韩彦军, 等 (2007) 半导体照明关键技术研究. *激光与光电子进展*, 3, 17-28
- [2] 李林, 等 (2009) 现代光学设计方法. 北京理工大学出版社, 北京, 9.
- [3] 周壹义 (2012) 大功率 LED 照明系统的二次光学设计研究, 华南理工大学, 广州, 5.
- [4] 闫瑞, 肖志松, 等 (2011) LED 光学设计的现状与展望. *照明工程学报*, 2, 38-42.
- [5] 深圳雷曼光电科技股份有限公司 (2010) 简论 LED 二次光学设计. *现代显示*, 4, 111.
- [6] Bort, J., Shat, N. and Pitou, D. (2000) Optimal design of a non-imaging projection lens for use with an LED source and a rectangular target. In: Sasian, J.M., Ed., *Novel Optical Systems Design and Optimization, Proceedings of SPIE*, 4092, 130-138.
- [7] 丁纾姝 (2012) 大功率 LED 均匀照明设计理论的研究. 中国计量学院, 杭州, 3.
- [8] 吕勇, 郑臻荣, 等 (2004) 方棒照明系统的光学扩展量传递分析. *北京航空航天大学学报*, 6, 569-571.
- [9] 史永胜, 买迪, 宁磊 (2011) 实现不同场合中 LED 均匀照明的方法研究. *应用光学*, 4, 613-617.
- [10] 丁毅, 顾培夫, 等 (2007) 实现均匀照明的自由曲面反射器. *光学学报*, 3, 540-544.
- [11] Ding, Y., Liu, X. and Zheng Z.-R., et al. (2008) Freeform LED lens for uniform illumination. *Optics*, 17, 12958-12966.
- [12] 丁毅, 顾培夫, 陆巍, 等 (2007) 利用微分方程数值解构造自由曲面反光器. *浙江大学学报: 工学版*, 9, 1516-1518.
- [13] 杨毅, 钱可元, 罗毅, 等 (2007) 一种新型的基于非成像光学的 LED 均匀照明系统. *光学技术*, 1, 110-113.
- [14] Ries, H. and Muschawec, J.K. (2002) Tailored freeform optical surfaces. *Optical Society of America*, 3, 590-595.
- [15] 蒋金波, 杜雪, 李荣彬, 等 (2008) 自由曲面的 LED 路灯透镜的设计. *液晶与显示*, 5, 589-594.

- [16] 吴仍茂, 屠大维, 等 (2009) 一种基于同步多面方法的 LED 定向照明设计. *光学技术*, **4**, 561-565.
- [17] 郝翔 (2008) 基于自由曲面的 LED 照明系统研究. 浙江大学, 杭州.
- [18] 丁毅, 郑臻荣, 顾培夫 (2009) 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计. *光子学报*, **6**, 1486-1490.
- [19] 林雪琴 (2010) 大功率白光 LED 道路照明系统的设计与实现. 华南理工大学, 广州.
- [20] 吴仍茂, 屠大维, 等 (2009) 一种基于同步多面方法的 LED 定向照明设计. *光学技术*, **4**, 561-565.
- [21] 刘欣 (2011) LED 照明的透射 - 全反射型复合曲面二次光学透镜的设计. *应用光学*, **5**, 976-980.
- [22] Ries, H. (2001) Tailored free form lenses for illumination. *Proceedings of SPIE*, **4442**, 43-50.
- [23] 丁毅, 顾培夫, 等 (2007) 利用微分方程数值解构造自由曲面反光器. *浙江大学学报*, **9**, 1516-1518.
- [24] 吴仍茂, 屠大维, 等 (2009) 一种实现大功率 LED 均匀照明的投射器设计. *应用光学*, **3**, 372-376.
- [25] Winston, R., Minano, J.C. and Benitez, P. (2005) Nonimaging Optics. Elsevier Academic Press, Burlington, 3-48.
- [26] Timinger, A., Muschawegk, J. and Ries, H. (2003) Designing tailored free-form surfaces for general illumination. *Proceedings of SPIE*, **5186**, 128-132.
- [27] Ries, H. and Muschawegk, J. (2002) Tailored freeform optical surfaces. *J. Opt. Soc. Am. A*, **19**, 590-595.
- [28] 余桂英, 金骥, 等 (2009) 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计. *光学学报*, **8**, 2297-2301.
- [29] Zheng, Z.R., Hao, X. and Liu X. (2009) Freeform surface lens for LED uniform illumination. *Optical Society of America*, **48**, 6627-6634.
- [30] Sun, L.W., Jin, S.Z., et al. (2009) Design of free-form microlens for led general illumination. *SPIE-OSA-IEEE*, **7635**, 763509-1.
- [31] Parkyn, B. and Pelka, D. (2006) Free-form illumination lenses designed by apseudo-rectangular lawnmower algorithm. *Proceedings of SPIE*, **6338**, 633808-1.
- [32] Wang, L., Qian, K.Y. and Luo, Y. (2007) Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance. *Applied Optics*, **46**, 3716-3723.