

doi: 10.3788/gzxb20174601.0112004

基于光源近场模型的 LED 光学扩展量测量方法

桂立^{1,2}, 尹韶云¹, 蔡文涛¹, 孙秀辉¹, 杜春雷¹, 丁学专²

(1 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 集成光电技术研究中心, 重庆 400714)

(2 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘 要: 基于精确的 LED 光源近场模型, 提出了一种 LED 光学扩展量测量方法. 通过追迹 LED 近场光源模型中的光线数据, 可获得 LED 光功率关于光学扩展量的关系曲线, 直观反映出 LED 光源的光学扩展量特性和光能利用率等信息. 以紫外曝光系统中的 UV-LED 阵列面光源为例, 对三款不同型号的 UV-LED 进行了实际测量. 通过测量得到的光学扩展量和光能利用率曲线, 可以对 UV-LED 的光束质量作出判断, 并为阵列面光源的优化设计提供帮助.

关键词: 非成像光学; 光学扩展量; 光源近场; 发光二极管; 光学设计

中图分类号: O432.2; O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)01-0112004-6

Measurement Method of LED Etendue Based on Near-field Source Model

GUI Li^{1,2}, YIN Shao-yun¹, CAI Wen-tao¹, SUN Xiu-hui¹, DU Chun-lei¹, DING Xue-zhuan²

(1 *Optoelectronic Technology Integration Center, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China*)

(2 *Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract: A method for measuring the étendue of LED was proposed based on the near-field model of the LED source. The curve of luminous power on étendue can be obtained by tracing rays data in LED near-field model, which can directly reflect the étendue characteristics and the energy efficiency of LED source. Taking the UV-LED array surface source in the exposure system as an example, the actual measurement of the three different models of UV-LED were carried out. The designer can make a judgment on the UV-LED beam quality by the étendue and energy efficiency curve, which can provide help for the optimization design of the UV-LED array surface source.

Key words: Non-imaging optics; Etendue; Light source near-field; Light-emitting diode; Optical design

OCIS Codes: 120.0120; 080.2175; 080.4295; 220.2945

0 引言

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)具有体积小、寿命长、光电转换效率高等诸多优点, 被誉为照明史上的第四代光源. 在基于 LED 光源的高功率特种照明系统中, 如 LED 路灯、医用无影灯、紫外 LED (Ultraviolet LED, UV-LED) 曝光光源等, 为提高系统的输出光功率, 通常需要将大量低功率的 LED 进行阵列组合, 组成高功率的 LED 面光源^[1-7]. 在这类设计中, 紧密的排列方式限制了 LED 二次透镜的通光口径, 自然也限制了其光学扩展量^[8]. 根据非成像光学中的光学扩展量守恒原理, 当二次透镜的光学扩展量小于 LED 的光学扩展量时, 二次透镜将限制光线的传播, 导致光能利用率的下降^[9-10]. 在这类存在光学扩展量限制的

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61475199, 61275061), 国家高技术研究发展计划(No. 2014AA123202)资助

第一作者: 桂立(1990-), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为 LED 光学设计. Email: ibrahim_gui@163.com

通讯作者: 蔡文涛(1990-), 男, 研究实习员, 硕士, 主要研究方向为紫外 LED 应用研究. Email: caiwentao@cigit.ac.cn

收稿日期: 2016-07-11; 录用日期: 2016-09-29

<http://www.photon.ac.cn>

照明系统中,从LED光源光束质量出发,选择光学扩展量尽可能小、光功率尽可能高的LED光源,成为了提升照明系统光能利用率的关键.研究LED的光学扩展量特性对于阵列面光源的优化设计也显得尤为重要.

1996年,飞利浦实验室的研究人员对基于反光碗的光源进行了光学扩展量测量,为投影系统光能利用率的评估提供了理论依据^[11].在之后的多项研究中该方法得到了进一步发展和验证^[12-13],光学扩展量理论也逐渐发展成为非成像光学设计中的核心概念.本文提出一种基于光源近场模型的LED光学扩展量测量方法.该方法基于精确的LED光源近场模型,在利用小光源测试系统SIG-400测量得到LED光源的近场模型^[14]之后,只需要追迹其中的光线数据便能实现光学扩展量的测量,具有可重复性好、方便快捷的优点.采用本文提出的方法对三款UV-LED光源的光学扩展量进行了测量.测量得到的光学扩展量和光能利用率曲线可以直观地反映UV-LED的能量分布特性,为阵列面光源选择高质量UV-LED灯珠,提升系统能量利用率提供了理论依据.

1 光学扩展量基本原理

光学扩展量(Etendue)是非成像光学理论中的核心概念,它指由一定面积和角度构成的区域在四维空间中占据的体积^[15],即

$$U = \int du = \iiint n^2 dx dy dL dM \quad (1)$$

式中 n 为所在空间的折射率, $dx dy$ 为发光面上单位发光元的面积, $dL dM$ 为该发光元发出光线的立体角.通过光学扩展量可以清楚地反映一束光线的扩展程度.例如,与激光光源相比,气体放电光源的发光面积和发光角度都比较大,因此其光学扩展量也会很大.

光学扩展量的概念除了描述光束本身的扩展程度以外,还可以用于评价光学系统的光能利用率^[10].假如光学元件的光学扩展量大于光源的光学扩展量,那么光学元件将有能力收集光源发出的所有光线;相反,如果光学元件的光学扩展量小于光源的光学扩展量,那么光源发出的光线在传播经过光学元件的过程中必然会受到限制,并导致光能利用率的下降.光学设计人员可以根据这一原理对光源和光学元件进行选型并合理搭配,实现光能量的合理利用.

2 光学扩展量测量方法

2.1 利用双可变光阑选取光学扩展量

为测量LED光学扩展量,需要建立适当的模型对LED发出的光束进行选择.如图1(a)所示,LED光源可视为 xoy 平面内的平面光源.用于收集LED光能量的二次透镜通常属于旋转对称光学系统,二次透镜的入瞳孔径可表示为光轴方向的一个可变圆光阑 D_2 , D_2 与LED光源之间的距离记作 L .通过调节 D_2 的大小,便能够获得来自LED的不同范围的光学扩展量以及其对应的光功率.然而,考虑到LED发光面能量分布的不均匀性,例如,LED发光面边缘的能量密度相比中心而言往往较弱,这种单一变量的测量方式将可能导致对LED光学扩展量特性的误判.

因此,更为合理的做法是在LED光源的前方再放置一个可变圆光阑 D_1 ,用于截取来自发光面不同区域的光线.通过同时调节两个光阑 D_1 和 D_2 的大小,完成光学扩展量的测量,如图1(b)所示.

考虑到系统的旋转对称性,两个光阑范围内的光学扩展量可以按照图2所示的线积分计算得到.由图中几何关系,角度 θ 可以表示为

$$\theta = \theta_2 - \theta_1 = \arctan\left(\frac{D_o/2 - y}{L}\right) - \arctan\left(\frac{-D_o/2 - y}{L}\right) \quad (2)$$

根据式(1),两个可变光阑范围内的光学扩展量 U 可以表示为

$$U = \int_{-D_1/2}^{D_1/2} \left(\sin\left(\arctan\left(\frac{D_o/2 - y}{L}\right)\right) - \sin\left(\arctan\left(\frac{-D_o/2 - y}{L}\right)\right) \right) dy \quad (3)$$

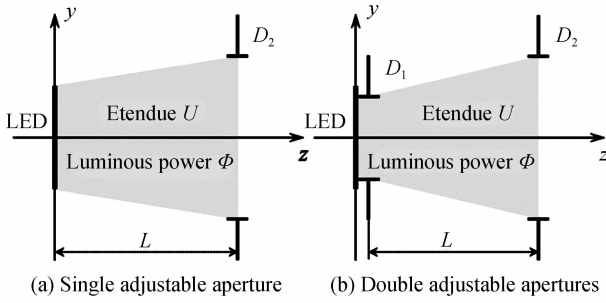


图1 利用光阑选取LED发出的光学扩展量
Fig.1 Selecting étendue of LED by apertures

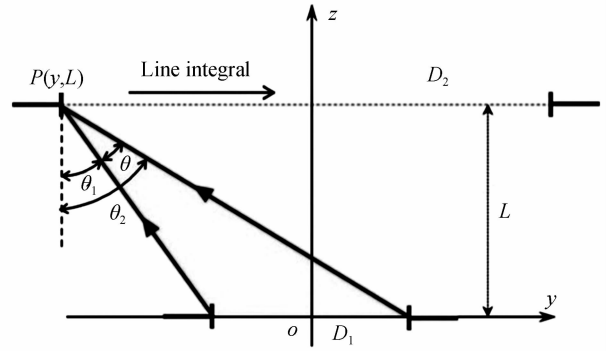


图2 双光阑约束范围内光学扩展量计算
Fig.2 Calculating étendue within two apertures

2.2 LED光源近场模型

双光阑约束范围内光线的光功率值可以借助功率计或积分球得到测量^[11-13].然而,这类方法在测量过程中需要对光阑进行多次的调节,除了较大的工作量外,还会不可避免地引入人为测量误差,影响测量数据的准确性.

LED近场光源模型为光功率的测量提供了一个新途径.近场光源模型可以利用美国 Radiant 公司的小光源测试系统 SIG-400 测量得到,并以 RSM 格式的文件保存.通过 Prosource 软件可以将 RSM 文件转化生成由任意数量光线组成的光线数据.这些光线数据精确地反映了 LED 光源的近场发光情况,包括光源的发光尺寸、发散角、以及 LED 光源在空间的辐射分布^[14].近场光线数据是光线追迹和照明光学仿真的基础.通过追迹 LED 光源的近场光线数据,可以快速地获得两个可变光阑范围内的光功率值.此外,由于完成的是对静态数据的多次处理,因而不会产生测量误差.

3 应用举例

由于近年来快速发展的 UV-LED 光源具有光电转换效率高、寿命长、节能环保等优点,在紫外曝光照明领域中,UV-LED 正逐步取代传统高压汞灯成为新一代紫外曝光光源^[6,16].在基于 UV-LED 的紫外光学系统中,如:UV-LED 曝光机、光刻机,为提高系统的输出光功率,需要将 UV-LED 进行阵列排布,组成大面积、高功率的阵列面光源,如图 3 所示.这样紧密的排列方式限制了二次透镜的口径,导致二次透镜的光学扩展量通常小于 UV-LED 光源的光学扩展量,并存在严重的光能损耗.在此背景之下,挑选光学扩展量小、能量集中的 UV-LED 光源对阵列面光源的优化设计具有十分重要的意义.

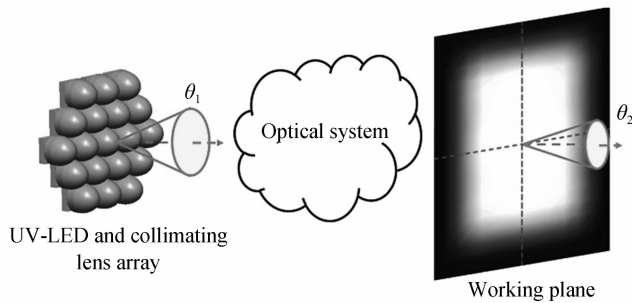


图3 基于UV-LED阵列面光源的曝光光学系统
Fig.3 Exposure optical system based on UV-LED array surface source

本节以 UV-LED 阵列面光源为应用背景,采用第三节介绍的光学扩展量测量方法对三款不同型号的 UV-LED 光源进行实际测量.三款 UV-LED 光源为日本日亚化学公司的 NVSU033B、NVSU233A,以及韩国 LG 公司的 6060 1in1 G1.三款灯珠的中心波长均为 365 nm,其余性能参量如表 1 所示.

采用 SIG-400 小光源测试系统对三款 UV-LED 近场模型进行测量,获取的发光影像如图 4 所示.利用 Prosource 软件将近场模型转化为离散的光线数据,光线数均为 50 万.采用第三节的方法对三款 UV-LED 的光学扩展量进行测量,测量时假设距离 L 为 2 mm,两个光阑的大小 D1、D2 按照各个光源的实际发光情况

表 1 三款 UV-LED 的参量
Table 1 Three UV-LED parameters

Sample	NVSU033B	6060 1in1 G1	NVSU233A
Luminous area/mm ²	0.7×0.7	1.0×1.0	1.4×1.4
Luminous power/mW	450	816	1 010
Divergence angle/(°)	±60	±60	±60

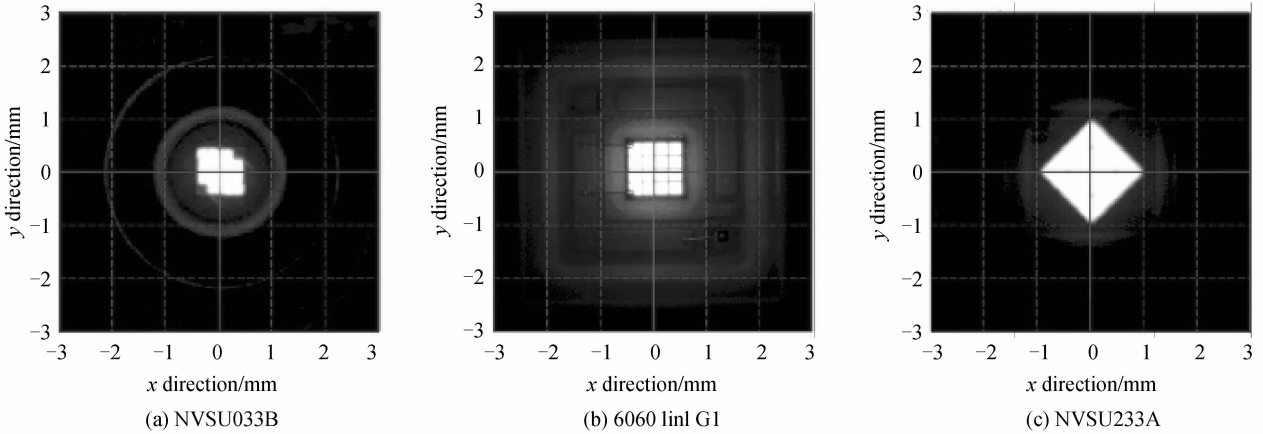


图 4 三款 UV-LED 的发光影像
Fig. 4 Luminous images of three UV-LED

进行划分. 采用 Matlab 编程进行光线追迹, 得到的三款 UV-LED 光功率关于光学扩展量的数据如图 5 所示.

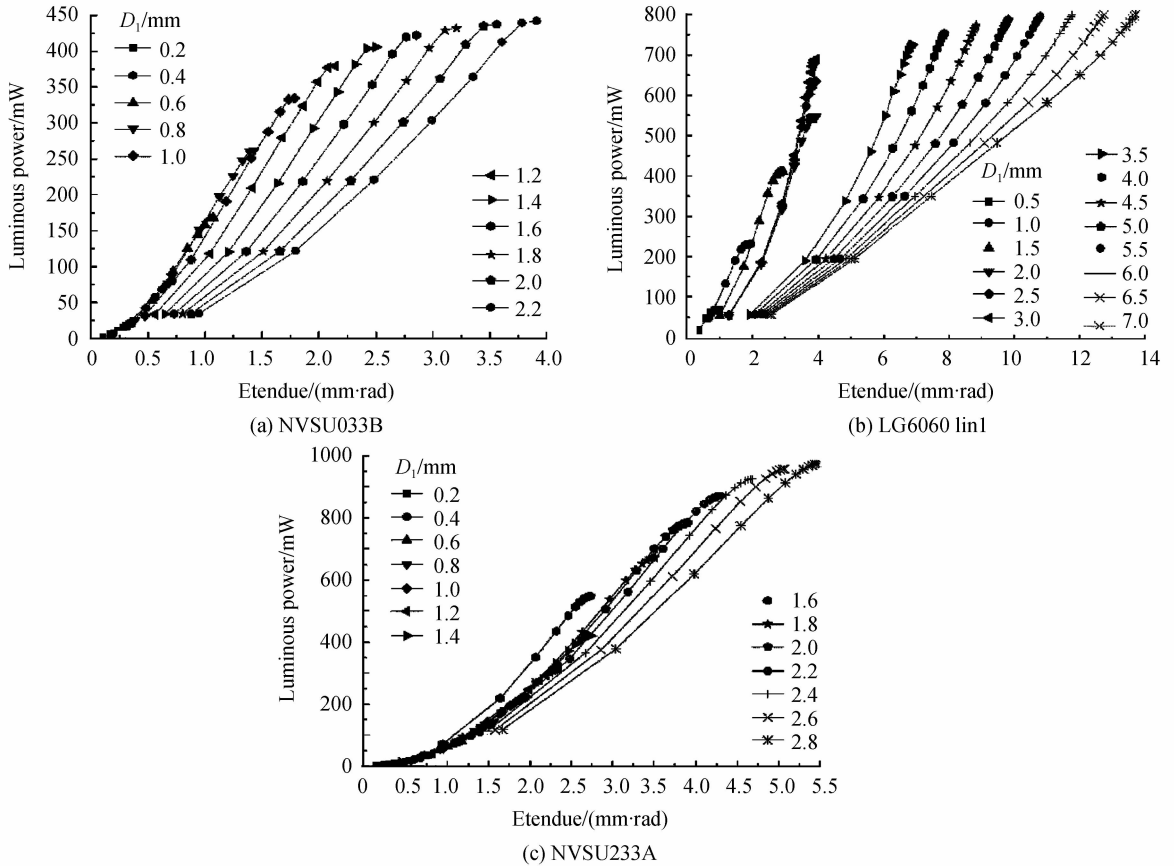


图 5 不同光阑组合下 UV-LED 的光学扩展量特性
Fig. 5 The étendue of UV-LED within different aperture

可以看出, 图 5 中部分数据点光功率值明显低于其他数据点, 这说明这些数据点对应的光阑组合光功率较低. 因此将这部分数据点舍弃, 只保留最上方数据点用于描述 UV-LED 的光学扩展量特性, 得到的曲线如图 6. 进一步将图 6 的光功率除以三款 UV-LED 各自的总功率值, 可以获得它们的光能利用率曲线, 如图 7.

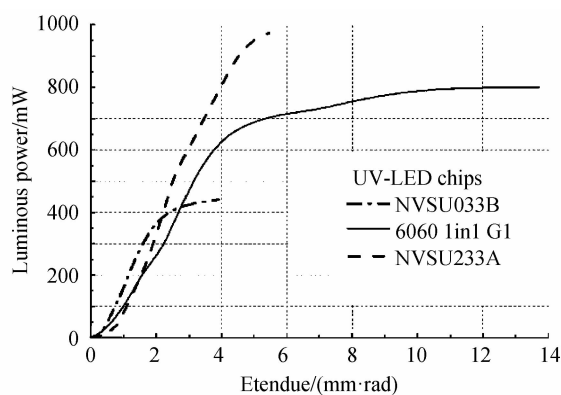


图6 UV-LED的光学扩展量曲线

Fig. 6 The étendue curves of UV-LED

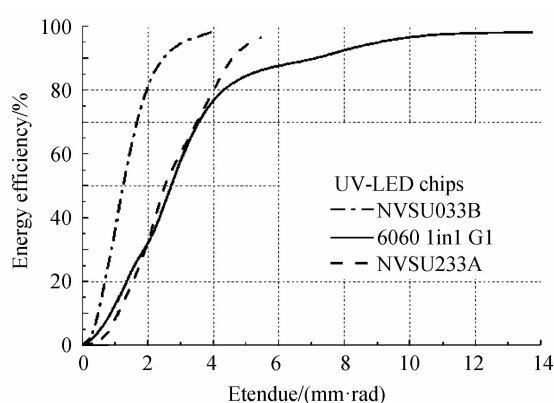


图7 UV-LED的光能利用率曲线

Fig. 7 The energy efficiency curves of UV-LED

根据图6和图7所反映的光学扩展量和光能利用率信息可以看出:

6060 1in1 G1与其他两款光源相比,其光功率分布在较大的光学扩展量范围内.因此,想要提高该光源的光能利用率,必须采用大口径、大光学扩展量二次透镜,这将直接导致面光源输出功率密度的下降,不利于阵列面光源的输出功率的提高.因此,不宜选择6060 1in1 G1作为光源.

与之相反,与其它两款灯珠相比 NVSU033B的总光功率虽然不高,但是它的光功率取集中在较小的光学扩展量范围内.在对其进行二次光学设计的时候,仅需要采用小口径、小光学扩展量的二次透镜便能得到较高的光能利用率功率.因此选择 NVSU033B作为曝光系统的光源最为合理.

4 结论

本文介绍了一种测量LED光学扩展量的新方法.该方法测量过程基于LED光源近场模型展开,仅需要追踪光源模型中的光线数据便能够实现光学扩展量的测量,具有可重复性好、方便快捷等优点.借助测量得到的光学扩展量曲线,设计人员可以对LED的光能利用率做出直接的判断,为光学设计挑选优秀的LED光源提供帮助.目前,调节两个圆形光阑的光学扩展量测量方法能够满足具有旋转对称性质光学系统的应用需求.对于其它类型的光学系统,测量时可以改变两个可变光阑的形状,以模拟不同形状的人瞳孔径.

参考文献

- [1] PAN Shi-fa, GUO Zhen-ning, YAN Wenping, *et al.* Design and simulation of freeform-surface large angle lens for LED advertising light boxes[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0222002.
潘诗发, 郭震宁, 颜稳平, 等. 用于LED广告灯箱的自由曲面大角度透镜设计与仿真[J]. *光子学报*, 2016, **45**(2): 0222002.
- [2] 刘鹏. 光谱可调的自由曲面LED无影灯及其视觉感知的研究[D]. 浙江大学, 2014.
- [3] WANG Jia-wen, SU Zhou-ping, YUAN Zhi-jun, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(8): 16-22.
王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. *光子学报*, 2014, **43**(8): 16-22.
- [4] HU Hai-lei, LAI Ai-guang, XIE Shu-sheng. Study of illuminance distribution of LED arrays for road illumination[J]. *China Illumination Engineering Journal*, 2009, **20**(1): 77-80.
胡海蕾, 赖爱光, 谢树森. 基于道路照明的LED阵列光照度分布研究[J]. *照明工程学报*, 2009, **20**(1): 77-80.
- [5] XU Wen-hai, ZHAO Huan, LU Yong-Jun. Design of an optical system for UV curing source with LED array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(7): 1032-1037.
许文海, 赵欢, 芦永军. LED阵列式紫外固化光源光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(7): 1032-1037.
- [6] LI Ren-yuan, SUN Xiu-hui, GOU Jian, *et al.* UV-LED system to obtain high power density in specific working-plane[C]. SPIE, 2014, **9272**(927204): 1-6.
- [7] SHI Chen-yang, WEN Shang-sheng, CHEN Ying-cong. Study on curved surface LED array illumination problem based on Taguchi method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(3): 348-354.
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于Taguchi方法的曲面LED阵列照度问题研究[J]. *发光学报*, 2015, **36**(3): 348-354.
- [8] LAI Chun-feng. Characteristics of GaN-based photonic crystal micro-vertical light-emitting diodes for étendue-limited applications [J]. *Journal of Physics*, 2015, **1**(2): 76-79.
- [9] KARI T, GADEGAARD J, SØNDERGAARD T, *et al.* Reliability of point source approximations in compact LED lens designs

- [J]. *Optics Express*, 2011, **19** suppl **6**(23): A1190-A1195.
- [10] DONG Li, LIU Hua, WANG Yao, *et al.* Reliability of light source modeling for distribution design on compact LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 2220033.
董丽, 刘华, 王尧, 等. 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究[J]. 光子学报, 2014, **43**(2): 222003.
- [11] BRENNESHOLTZ M S. Light collection efficiency for light valve projection systems[C]. SPIE, 1996, **2650**: 71-79.
- [12] WU M H. Design issues in liquid crystal projection displays[M]. 1996.
- [13] SUN Xu-tao, ZHENG Zhen-rong. Analysis for optical extent of ultrahigh-pressure mercury lamp [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(11): 63-65.
孙旭涛, 郑臻荣. 超高压汞灯光学扩展量的分析[J]. 光电工程, 2004, **31**(11): 63-65.
- [14] FAN Hong-zhong, CAO Min, LI Shu-zhi, *et al.* Application and investigation of near-field goniophotometer measurement in LED optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 122201.
范红忠, 曹民, 李抒智, 等. 光源近场测量在 LED 光学设计中的应用与研究[J]. 光学学报, 2012, **32**(12): 122201.
- [15] CHAVES J. Introduction to non-imaging optics[M]. CRC Press, 2008.
- [16] LIU Peng-fei, YANG-bo, LU Kan. Design and research on the uniform illumination system of UV exposure machine[J]. *Optical Instruments*, 2012, **34**(2): 31-36.
刘鹏飞, 杨波, 陆侃. 紫外曝光机均匀照明系统的设计与研究[J]. 光学仪器, 2012, **34**(2): 31-36.