

# 多点实时光刻机光源照度均匀度检测系统设计

赵可为<sup>1,2</sup>, 谭艾英<sup>2</sup>, 尹韶云<sup>2</sup>, 蔡文涛<sup>2</sup>, 杨若夫<sup>2\*</sup>, 陈建军<sup>2</sup>, 佟首峰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>中国科学院重庆绿色智能技术研究院集成光电中心, 重庆 400714

**摘要** 提出了一种光刻机照度均匀度多点测量方法,该方法利用紫外增强 PIN 光电二极管,同时快速测量曝光机照面多点的光强,通过传统电流-电压放大电路的基础上进行改进,同时使用复合放大的方法,大大提高了曝光机照度均匀度多点测量方法的重复性,使每一测量单点测量重复性控制在  $0.02 \text{ mW/cm}^2$ 。利用紫外增强 PIN 光电二极管光刻机光源进行实验,结果表明,多点测量一致性小于  $0.1 \text{ mW/cm}^2$ ,且检测的照度均匀性符合要求。

**关键词** 测量; 照度均匀度; 多点测量; 光刻技术; 光刻机; 实时检测

中图分类号 TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.061203

## Design of Multi-Point Real-Time Lithography Light Source Uniformity Detection System

Zhao Kewei<sup>1,2</sup>, Tan Aiyong<sup>2</sup>, Yin Shaoyun<sup>2</sup>, Cai Wentao<sup>2</sup>, Yang Ruofu<sup>2</sup>,  
Chen Jianjun<sup>2</sup>, Tong Shoufeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Measurement & Control and Optical Information Transfer Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup>Center of Integrated Optoelectronic Technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China

**Abstract** A multi-point measurement method for illuminance uniformity of lithography machines is proposed. The method of using ultraviolet (UV) enhanced PIN photodiode can rapidly measure the light intensity of the exposure machine, and the combination of improvement on the basis of traditional current-voltage amplifying circuit and composite amplification greatly improves the repeatability of exposure machine illuminance uniformity multi-point measurement method, and makes every single point measurement repeatability of measurement below  $0.02 \text{ mW/cm}^2$ . Experimental results show that with the use of UV enhanced PIN photodiode exposure machine light source, multi-point measurement consistency is less than  $0.1 \text{ mW/cm}^2$ , and the detection of the illuminance uniformity meets the requirements.

**Key words** measurement; illumination non-uniformity; multi-point detection; lithography; lithography machines; real-time detection

**OCIS codes** 120.1880; 120.4640

收稿日期: 2017-11-16; 收到修改稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(61605208, 61475199)、重庆市重点产业共性关键技术创新专项项目(2015zdcy-ztxx70006)

作者简介: 赵可为(1992—),男,硕士研究生,主要从事光电探测与空间光通信方面的研究。

E-mail: zkwheny@foxmail.com

导师简介: 佟首峰(1972—),男,教授,博士生导师,“长江学者”特聘教授,主要从事航天遥感及卫星激光通信方面的研究。E-mail: tsf1998@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: yangruofu@igit.ac.cn

# 1 引言

当前电子行业正在向高精度、高集成度方向飞速发展<sup>[1]</sup>。大型集成电路、印刷电路板、液晶面板等是电子产品的核心部分。在它们的制作过程中,光刻机都是不可缺少的重要设备<sup>[2]</sup>。光刻工艺是一个进行信息传递的过程<sup>[3]</sup>,光源透过掩模板将其上的图形成像到涂覆于硅片表面的光刻胶上,然后通过显影、刻蚀等工艺将图形转移到硅片上<sup>[4]</sup>。硅片上入射的紫外光与光刻胶发生化学反应,经过显影液的清洗,将发生反应的光刻胶去除,即可在硅片上得到预期的线条图案,完成投影曝光<sup>[5]</sup>。光刻机的照度均匀度越高,得到的线条图案越好。因此,对光刻机来说,照度均匀度是一个非常重要的指标<sup>[6]</sup>。

传统的照度均匀性工业检测方法是,利用单一探头光功率计,在照面内采用五点测量法或九点测量法分区域逐块测量对应点的光强大小,计算得到光刻机照面的照度均匀度。这种方法比较耗费时间,而且无法进行实时检测。采用此方法时,光学系统的每一个部分调整后都需要重新测量照度均匀度,安装效率低下。另外,由于LED的发光强度会受到实时温度的影响,非实时的均匀度测量方法会带来检测误差,这就需要一种能够对光刻机照度均匀度进行快速、实时、精确检测的方法,以大大提高光刻机光学系统的装调效率,缩短光刻机的生产周期。军械工程学院提出了一种利用线阵CCD测量照明光场均匀度<sup>[7]</sup>的方法,利用线阵CCD作为探测器,采用二次机械扫描进行光场均匀度的检测。该方法分两步进行,第一步是利用电机使CCD旋转进行圆周扫描;第二步是利用转台使CCD径向平移扫描。该测量方法使用两种电机进行轴向与镜像扫描,结构复杂且检测的实时性不强。文献<sup>[8]</sup>使用菲涅耳透镜将平行光会聚,利用光电探测器进行探测。在接收装置前放置一个步进平台,在步进平台上放置不同直径的圆柱体,步进平台从左至右移动,圆柱体在探测器前从左至右遮挡入射光。根据探测器探测到的光遮挡情况,计算得到光场均匀分布的情况。该方法需要选用不同直径的圆柱体进行照度均匀性测量,无法进行实时测量。长春光学精密机械与物理研究所采用面阵CCD对光学系统的像面照度进行检测<sup>[9]</sup>;将标定好的CCD置于光学系统像面,利用图像采集卡将CCD采集到的图像传输至计算机,对图像进行矫正之后,利用检测软件得到系统像面照度均匀度的检测结果。Kang等<sup>[10]</sup>对该方法进行

了改进,增大了其动态探测范围。但以上方法仅限于小尺寸照面的均匀性测量,无法对大尺寸照面、工作距离短的光刻机光源系统的均匀性进行测量。蔡怀宇等<sup>[11]</sup>提出将GaAsP光电二极管制成线阵器件,利用步进电机进行扫描的方法测量照度均匀度。该方法需要利用步进电机,结构相对复杂,且检测的实时性不高。综上,目前尚没有一种结构简单的能够对光刻机照度均匀度进行实时快速检测的方法或系统,且近期对光刻机照度均匀度的研究也较少。基于此,本文提出了一种多点同时检测光刻机光源照度均匀度的检测方法,并研制出一种光刻机光源照度均匀度多点实时检测系统,所提检测方法简化了检测步骤,提高了检测效率,有效地解决工业光刻机光源照度均匀度检测耗时长的的问题。

## 2 系统检测方法

### 2.1 系统组成

光刻机光源照度均匀度检测系统构成如图1所示,实物图为图2。其分为多路探测器单元(MDU)与数据处理单元(DPU)。探测器单元由光信号探测模块(OSDM)与信号放大模块(SAM)组成。光信号探测模块采用紫外增强PIN光电二极管,它具有结电容小、渡越时间短、灵敏度高的优点,可以将探测到的光信号转化为微小的电流信号<sup>[12]</sup>。信号放大模块采用改进型复合电流-电压放大电路<sup>[13-14]</sup>,如图3所示。A1、A2组合形成的复合放大电路可以在保证信号放大倍率的情况下,有效衰减高频噪声增益,提高信噪比。有源滤波电路大大提高了输出信号的稳定性。信号放大模块将PIN光电二极管输出的微小电流信号转化为可测范围内的输出电压信号。数据处理单元实时接收多路探测器单元探测到的光信号,并对其进行模数(A/D)转换与信号处理,进而得到光刻机光源照度均匀度的实时检测结果。

### 2.2 探测器单元的标定

由于每一个光电二极管的响应度、暗电流、响应时间和线性度参数不一致<sup>[15]</sup>,每一路信号放大模块的电路参数之间的偏差会给测量结果带来误差,因此,在对光刻机光源系统的照度均匀度进行检测之前,需要对每一路探测器单元进行标定。标定的具体步骤:

1) 将标准光功率计的探测器置于光刻机光源照面中心,探测距离满足光刻机光源系统的工作距离。调整光刻机光强的大小,使标准光功率计测到

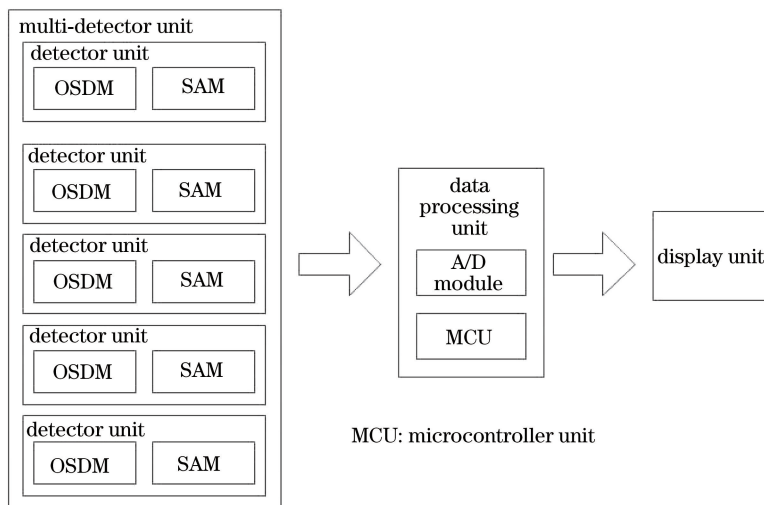


图 1 照度均匀性检测系统组成示意图

Fig. 1 System structure of the illuminance uniformity detection equipment

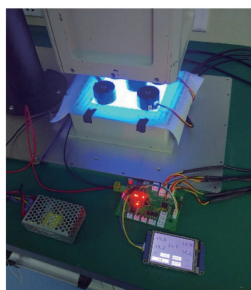


图 2 照度均匀性检测系统实物图

Fig. 2 Picture of illuminance uniformity detection equipment

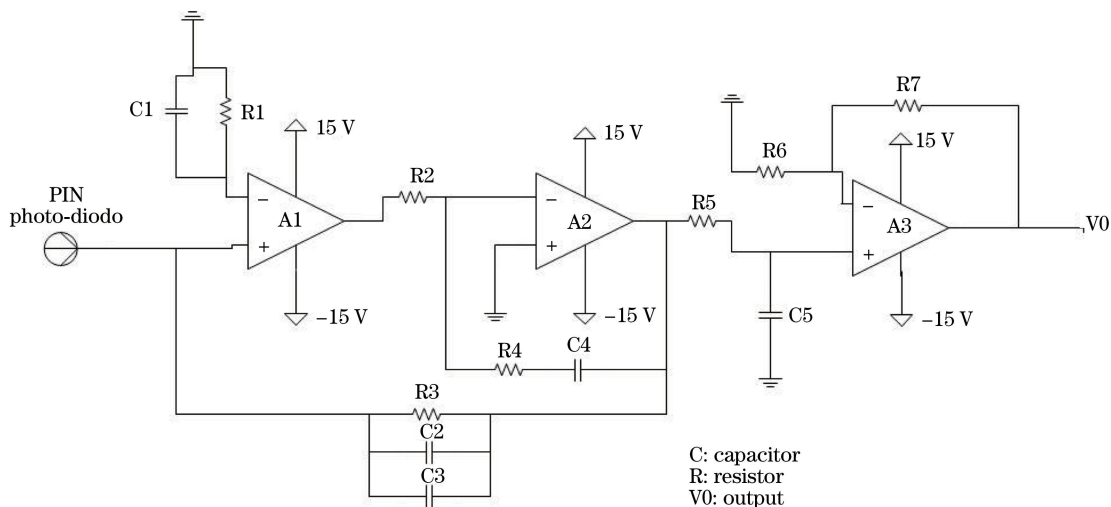


图 3 改进型电流-电压放大电路

Fig. 3 Improved current-voltage amplifying circuit

的光刻机光功率值为 PIN 光电二极管线性工作区的最小光功率值。

的探测单元放置在光刻机照面中心,同时探测距离与 1)中的工作距离相同。记录此时探测单元的电

2) 移除标准光功率计,将照度均匀度检测系统

电压值。

3) 重复步骤 1)、2), 每重复一次, 将光刻机光功率值增加  $0.5 \text{ mW/cm}^2$ , 记录探测单元的电压值, 直至光刻机光功率值增至 PIN 光电二极管线性工作区的最大光功率值。得到探测器单元的光电特性曲线方程。

4) 将每一路探测单元按照 1)~3) 的方法进行标定, 得到每一路探测器单元的光电特性曲线方程。

### 2.3 测量修正方法

在光电探测器的线性区, 探测器单元的光电特性曲线方程满足线性方程:

$$P = AU + B, \quad (1)$$

式中:  $A$  为探测器单元的增益;  $B$  为探测器单元的零点;  $P$  为探测的光功率值;  $U$  为探测器单元的输出电压。

由于探测器与电子器件的偏差, 每一路探测器单元会具有不同的增益和零点, 导致每一路探测器单元的测量结果不一致。为保证每一路探测器单元测量的一致性, 通过修正算法<sup>[16]</sup>可以使它们的增益和零点修正到一致。修正时, 以第一路探测器单元作为标准, 根据标定的数据, 设第一路探测器单元测得的三个光强度  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  下的输出电压为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ , 待修正一路探测器单元测得的三个光强度  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  下的输出电压为  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ , 利用公式  $b'_3 = \frac{a_3 - a_1}{a_2 - a_1}(b_2 - b_1) + b_1$  得到修正值  $b'_3$ 。利用此方法对每一路探测器单元进行修正。

### 2.4 照度均匀性测试

将标定后的探测器单元依次放置在光刻机照面的指定位置, 如图 4 所示。其中 9 个方格表示将光刻机照面分为 9 个区域, 数字 1~5 表示第一路探测器单元至第五路探测器单元在照面的探测位置。

1		2
	3	
4		5

图 4 探测器单元放置在照面的位置

Fig. 4 Positions of the detector units placed

利用多路探测器单元的电压-光强修正结果, 根据(2)式计算照度均匀度:

$$N_U = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}}, \quad (2)$$

式中:  $N_U$  为照面不均匀度;  $P_{\max}$  为照面最大光功率值;  $P_{\min}$  为照面最小光功率值。将(1)式代入(2)式可以得到:

$$N_U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min} + 2B_0/A_0}, \quad (3)$$

式中:  $U_{\max}$  为 5 个探测点中最大探测器单元输出电压,  $U_{\min}$  为 5 个探测点中最小探测器单元输出电压;  $B_0$  为标准探测器单元的零点;  $A_0$  为标准探测器单元的增益。

由(3)式可以知道, 探测器单元检测结果经过修正后, 仅根据探测器单元的输出电压与标准探测器单元的增益与零点, 即可得到光刻机光源系统照面不均匀度。

## 3 检测结果与讨论

利用该检测系统对光源进行照面均匀度检测实验。实验采用波长为 365 nm、照面尺寸为  $5 \text{ inch} \times 5 \text{ inch}$  ( $1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$ ) 的光刻机照明系统作为探测光源。实验前, 利用探测尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的工业用标准光功率计, 采用传统逐点照度均匀性检测方法对照度均匀度进行检测, 检测结果为 96.7%。为与测得的照度均匀度进行对比, 检测系统光信号探测模块选用探测尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的紫外增强型 PIN 光电二极管对光源进行照面均匀度检测。检测实验如图 5 所示。

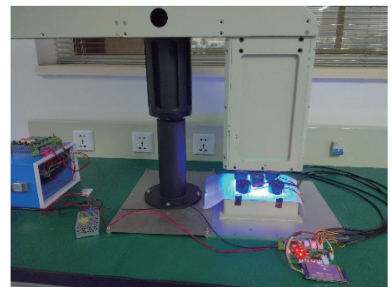


图 5 曝光机照度均匀度检测实验图

Fig. 5 Picture of exposure machine illumination uniformity test

检测前, 按照第二部分标定方法对检测系统探测器单元进行光电特性标定, 标定结果见图 6。图 6 中横坐标为探测到的光功率值, 纵坐标为输出电压。ch1~ch5 代表 5 路探测器单元。从图中可以看出, 光电特性曲线具有不一致的斜率与零点, 说明了每一路探测器单元具有不同的增益和零点。

为保证测量一致性, 利用第 2 节所述的修正算法修正探测器单元的增益, 使之和零点一致。图 7 展示了修正之后每一路探测器单元的光电特性曲

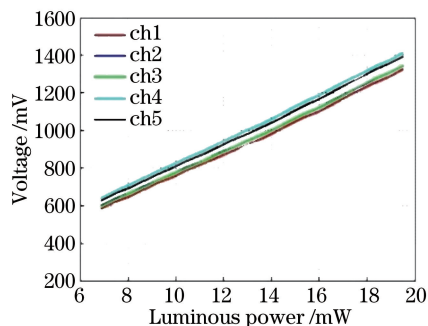


图6 探测器单元的光电特性标定曲线

Fig. 6 Photoelectric characteristic calibration curve of detector unit

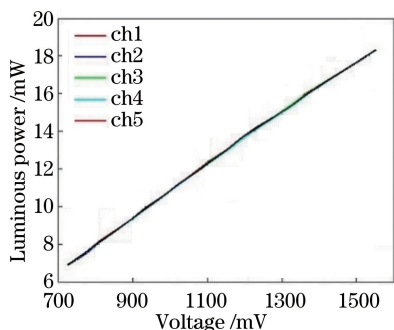


图7 修正后的探测器单元的光电特性标定曲线

Fig. 7 Calibration curves of photoelectric characteristic of the detector unit after correction

线,其增益和零点具有较好的一致性。

探测器单元重复性影响了检测系统对照度均匀度检测的重复性。为验证其检测重复性,在光刻机中心照面光功率分别在 9.6, 12.5, 15.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$  下,对每一路探测器单元每隔 30 s 测量一次输出电压值,测量 5 组,结果如表 1~3。由表 1~3 可知,单路探测器单元输出电压的重复性在 8 mV 以内,按照标定得到的增益和零点可得重复性在 0.02  $\text{mW}/\text{cm}^2$  以内。

表1 中心照面光功率为 9.6  $\text{mW}/\text{cm}^2$  的探测器单元输出电压的重复性

Table 1 Repeatability of output voltage of detector units with the luminous power of 9.6  $\text{mW}/\text{cm}^2$

No.	Output voltage /mV				
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
1	735	736	731	738	738
2	746	749	749	750	747
3	749	740	746	741	745
4	796	799	792	792	794
5	782	781	788	783	785

对检测系统进行准确度实验,每隔 30 s 检测一次照度均匀度,测量 5 组。实验结果如表 4 所示。

表2 中心照面光功率为 12.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$  的探测器单元输出电压的重复性

Table 2 Repeatability of output voltage of detector units with the luminous power of 12.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$

No.	Output voltage /mV				
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
1	895	893	893	896	891
2	917	918	919	916	918
3	915	919	919	919	912
4	970	968	974	973	971
5	953	951	956	954	953

表3 中心照面光功率为 15.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$  的探测器单元输出电压的重复性

Table 3 Repeatability of output voltage of detector units with the luminous power of 15.5  $\text{mW}/\text{cm}^2$

No.	Output voltage /mV				
	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4	Group 5
1	1075	1073	1073	1076	1071
2	1086	1088	1089	1086	1088
3	1085	1089	1089	1089	1082
4	1153	1158	1154	1153	1151
5	1133	1131	1136	1134	1133

表4 检测系统的准确度

Table 4 Accuracy of the detection system

Group1	Group1	Group1	Group1	Group1
97.0%	97.0%	96.9%	97.0%	97.1%

由结果可得,照度均匀度检测准确度小于 0.2%。与传统方法检测结果 96.7% 相比,实际误差小于 1%,符合工业检测要求。

## 4 结论

通过分析和实验检测,证明了所提方法可以实现对光刻机照度均匀度的高精度检测。通过采用多路检测方法达到了实时检测的目的。采用了修正算法对探测器单元进行了一致性修正,实现了对照面照度均匀度的定量测量。最终的检测结果表明,检测的照度均匀性符合要求。在波长为 365 nm、照度均匀度为 96.7% 的光刻机光源系统下,检测绝对误差在 1% 以内,准确度小于 0.2%。单点测量重复性控制在 0.02  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ,系统测量一致性小于 0.1  $\text{mW}/\text{cm}^2$ ,可以用于工业生产中实现光刻机照度均匀度实时在线检测。

## 参考文献

- [1] Liu P F, Yang B, Lu K. 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.
- [2] Gao X. The research of UV-LED lithography system and process [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.  
高轩. UV-LED 曝光系统及曝光工艺研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- [3] Xu S. Theory and method for *in-situ* lens aberration measurement in optical lithographic tools based on image intensity[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.  
许爽. 基于成像光强的光刻机像差原位检测理论与方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [4] Wang J. Litho polyimide layer resist reduction and CD uniformity research [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.  
王军. 光刻工艺中聚酰亚胺层光阻减量和线宽均匀性研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] Zhao Y. Design of complex illumination optical system for deep ultraviolet lithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2010.  
赵阳. 深紫外光刻复杂照明光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [6] Yan J X, Fan W H, Li L W, *et al.* On-line monitoring methods for the exposure uniformity of the stepper[J]. *Semiconductor Inspection & Testing Technologies*, 2012, 37(7): 577-581.  
闫建新, 范伟宏, 李立文, 等. 光刻机曝光均匀性在线检测方法[J]. *半导体检测与测试技术*, 2012, 37(7): 577-581.
- [7] Sun Y J, Wang Y F. Measurement of uniformity of illumination field using linear array CCD[J]. *China Measurement Technology*, 2003(4): 26-32.  
孙玉杰, 汪岳峰. 利用线阵 CCD 测量照明光场均匀度[J]. *中国测试技术*, 2003(4): 26-32.
- [8] Liu X G, Li Y J, Gao J. Research for measuring the energy distribution uniformity of laser parallel light curtain [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2010, 25(5): 12-14.  
刘新刚, 李仰军, 高健. 激光平行光幕光能分布均匀性测量研究[J]. *光电技术应用*, 2010, 25(5): 12-14.
- [9] Shen X H, Yang L, He G X, *et al.* Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2531-2536.  
沈湘衡, 杨亮, 贺庚贤, 等. 光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2531-2536.
- [10] Kang D, Yang H, Sha D, *et al.* Measurement of image plane illumination uniformity of photoelectric imaging system [C]. *International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, 2014: 92822O.
- [11] Cai H Y, Liu T G, Fu W Q, *et al.* A system for examining the illumination uniformity of camera imaging planes[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(5): 392-394.  
蔡怀宇, 刘铁根, 傅维乔, 等. 一种照相机成像平面照度均匀度检测系统[J]. *光学技术*, 2000, 26(5): 392-394.
- [12] Zhang Y, Zeng G Y, Hong Z G. Research of the silicon PIN diode detecting system [J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 20(2): 391-393.  
张燕, 曾光宇, 洪志刚. 硅 PIN 光电二极管探测系统的研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2008, 20(2): 391-393.
- [13] Graeme J. Photodiode amplifiers and OP AMP solutions[M]. Beijing: Science Press, 2012.  
Graeme J. 光电二极管及其放大电路设计[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] Wilmar H. Input-output transfer function analysis of a photometer circuit based on an operational amplifier [J]. *Sensors*, 2008, 8(1): 35-50.
- [15] Xu S, Xu Y Z, Chen E G, *et al.* Study on the new models of high power LED current-voltage characteristics [J]. *Journal of Optoelectronics & Laser*, 2015, 26(11): 2076-2082.  
徐胜, 徐玉珍, 陈恩果, 等. 大功率 LED 伏安特性模型研究[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(11): 2076-2082.
- [16] Liu M, Yang Y Q. Instant measurement for physical parameter special distribution uniformity[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2001, 21(6): 56-61.  
刘民, 杨亦强. 均匀性的瞬态测量[J]. *宇航计测技术*, 2001, 21(6): 56-61.