

引用格式: LI Yue, YUAN Yinlin, YE Yingjie, et al. Design and Performance Test of Low Light Level Illumination Source with Wide Dynamic Range[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0812004

李越,袁银麟,叶英杰,等. 宽动态范围微光照度源的设计与性能测试[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0812004

# 宽动态范围微光照度源的设计与性能测试

李越,袁银麟,叶英杰,孔德垚,肖岚,翟文超,郑小兵

(中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院,合肥 230026)

**摘要:**为满足微光像增强器等微光传感器的高精度辐射定标需求,设计了宽动态范围微光照度源。该微光照度源由子积分球、母积分球、可调光阑和圆筒光阑组成。调节可调光阑面积,改变子积分球导入母积分球的辐射通量,实现了光源照度 6 个量级的调节功能,且保证了光源色温不变。圆筒光阑是具有双微孔光阑和消杂光挡板的筒状结构,可以将积分球亮度光源转化为均匀的照度光源。母积分球上设置了集成了半导体制冷片的硅光电二极管监视探测器,可实现光源照度的监测与设置。开展了宽动态范围微光照度源性能测试,测试结果表明:微光照度源的照度覆盖  $3.8 \times 10^{-6}$  lx~12 lx,非稳定度小于 0.001 8%。

**关键词:**微光;光源;积分球;照度;亮度;定标;光电探测器

中图分类号:O432.1;TH741

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235208.0812004

## 0 引言

高精度的现场性能检测和定标是微光仪器及传感器的研制和性能评估的重要环节之一<sup>[1]</sup>,其作用在于可准确建立辐射响应输出与已知入射辐射量基准之间的定量化关系<sup>[2]</sup>,确定辐射响应动态范围,检测辐射响应线性、稳定性和信噪比等性能参数<sup>[3,4]</sup>。随着微光夜视仪、光子显微镜、微光荧光成像、生物学成像和深空探测等领域的快速发展,对微光器件的定标光源提出了更高的要求<sup>[5,6]</sup>。以微光像增强器为例,其照度响应范围需低至  $10^{-4}$  lx,其信噪比等技术参数应得到精确测量<sup>[7,8]</sup>。

微光仪器高精度的辐射性能检测和定标,一般采用积分球光源,它是一种较为理想的均匀漫射参考光源,可实现均匀的亮度输出,具有长时间稳定性<sup>[9-12]</sup>。南京理工大学和中国兵器工业第 205 研究所等科研单位,采用积分球和多级可调衰减片等部件研发的微光照度源,配合微弱照度校准系统可在实验室内满足微光探测传感器宽动态范围辐射特性的检测和校准要求<sup>[13-15]</sup>。在现场环境使用条件下,如何实现宽动态范围的照度输出和实时监测,并保持高精度的辐射定标精度仍有一定的技术难度。本文介绍一种体积功耗小型化的宽动态范围微光照度源,可应用于现场的测试。采用了带有可调光阑的级联积分球和圆筒光阑,实现等色温 6 个量级的照度调节。采用基于半导体制冷片(Thermoelectric Cooler, TEC)制冷的硅光电二极管作为参考探测器,实现照度值的监测与设置,操作简单便捷。针对微光探测器的现场辐射响应特性测试要求,介绍宽动态范围微光照度源的总体设计方案、结构组成,讨论了照度源的工作原理,模拟了宽动态范围微光照度源的照度输出范围,确定了设计参数,最后开展了照度源的性能测试,验证了设计的合理性。

## 1 宽动态范围微弱照度源设计

如图 1 所示,宽动态范围微弱照度光源是由可调动态范围积分球光源单元、圆筒光阑和反馈与控制单元组成。可调动态范围积分球光源单元包含有卤钨灯、子积分球、可调光阑和母积分球。圆筒光阑是具有入

基金项目:中国科学院重点实验室基金(No. CXJJ-22S002)

第一作者:李越, yueli822@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:郑小兵, xbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期:2023-02-12;录用日期:2023-03-20

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

口光阑和出口光阑的筒式结构,内部有消杂散光挡板<sup>[16]</sup>。反馈与控制模块包括监视探测器、电流计、上位机。

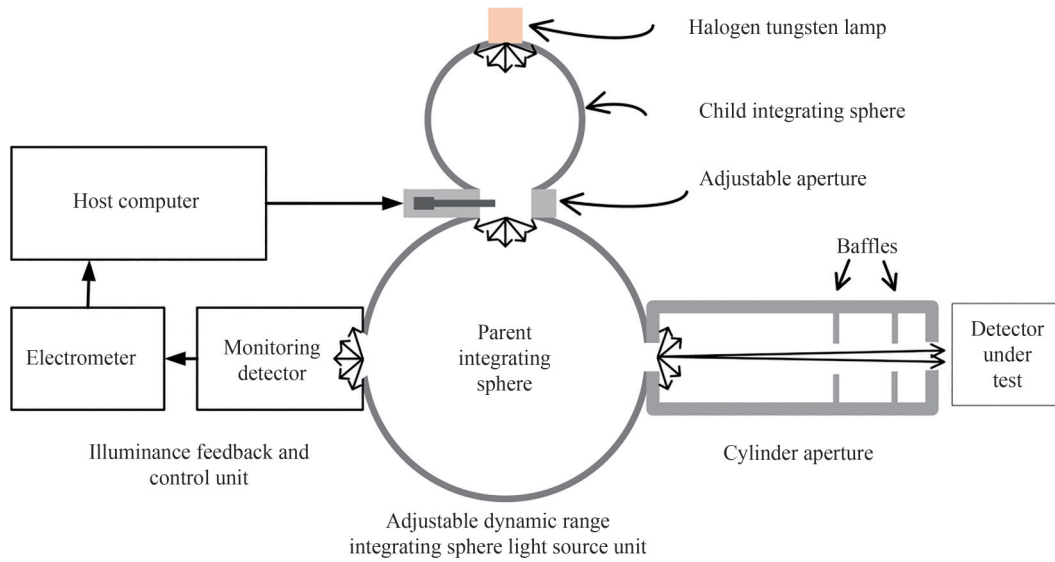


图1 宽动态范围微光照度光源示意图  
Fig.1 Scheme drawing of illuminance source

### 1.1 可调动态范围积分球光源单元设计

如图2所示,可调动态范围积分球光源单元采用子母积分球结构。子积分球内置卤钨灯光源,光在子积分球内部多次反射,实现出口处的亮度均匀。子母积分球之间有可调光阑,用于实现宽动态范围光通量调节功能。可调光阑的面积决定子积分球进入母积分球的光通量,与电流调节卤钨灯光通量的方式相比,可以保证光源在输出不同量级的亮度时,色温几乎保持一致。母积分球对光源进行亮度均匀,通过两个开孔分别给监视探测器以及圆筒光阑输出光通量。

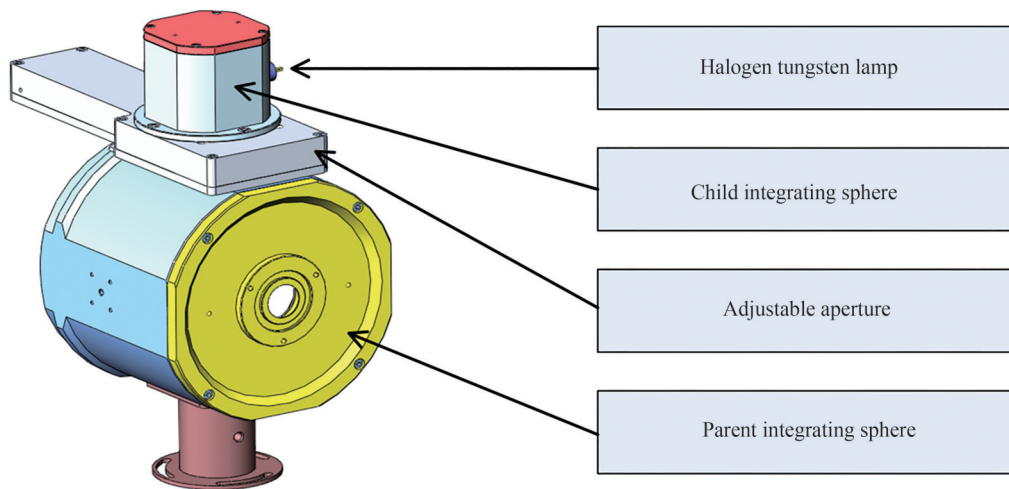


图2 可调动态范围积分球光源模块设计图  
Fig.2 Design drawing of adjustable dynamic range integrating sphere light source unit

如图3所示为可调光阑的设计图,通过调节光阑的面积,可以决定子积分球向母积分球导入的光通量。可调光阑采用双正方形光阑设计,其中正方形光阑B结构位置固定,正方形光阑A与直线伺服电机的丝杆连接,随着丝杆的平移实现水平位移。正方形光阑B固定在母积分球的入口处,可移动的正方形光阑A在子积分球出口和正方形光阑B之间活动。

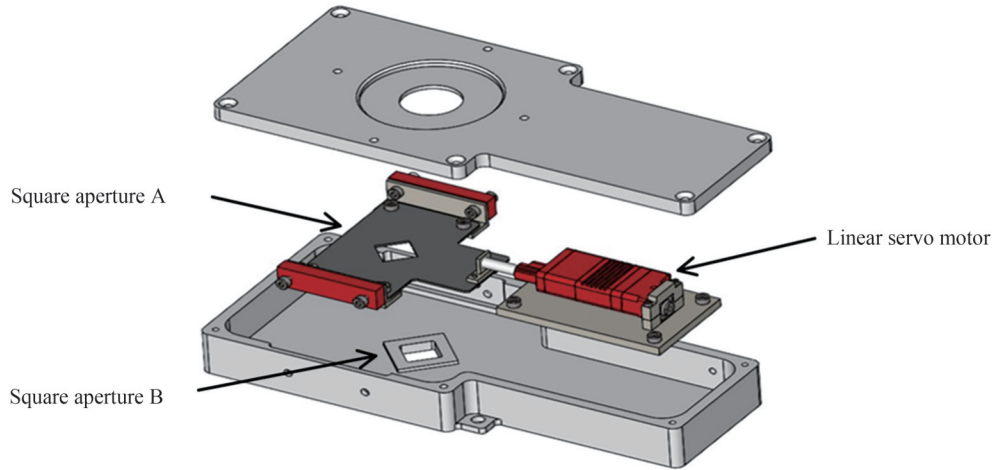


图3 可调光阑机械设计图  
Fig.3 Mechanical design drawing of adjustable aperture

### 1.2 圆筒光阑设计

圆筒光阑安装在母积分球出口处,位置与母积分球出口同轴。如图4所示,圆筒光阑是具有入口光阑与出口光阑的筒状结构, $a$ 为入口光阑半径, $b$ 为出口光阑半径, $c$ 为光阑筒长度。 $\theta$ 是出口光阑圆心与入口光阑边缘的连线与轴向的角度, $\phi$ 是入口光阑圆心与出口光阑边缘的连线与轴向的角度。积分球光源在圆筒光阑的入口光阑处形成亮度为 $L$ 的均匀余弦发光圆盘,出口光阑处的轴向照度 $E_o$ 为<sup>[9]</sup>

$$E_o = \pi L \sin^2 \theta \quad (1)$$

令  $c/a = r_{ca}$  则有

$$E_o = \pi L \frac{1}{1 + 4r_{ca}^2} \quad (2)$$

发光圆盘在出口光阑边缘的照度为 $E_e$ 可以近似为

$$E_e = E_o \cos^4 \phi \quad (3)$$

当 $\theta = \phi$ 时,圆筒光阑的出射照度平面均匀性 $U$ 可以表示为

$$U = \frac{E_e}{E_o} = \left( \frac{4r_{ca}^2}{1 + 4r_{ca}^2} \right)^2 \quad (4)$$

经过计算,当 $r_{ca} > 50$ 时,光源的平面均匀性大于99.98%,出口光阑处可以看作一个均匀的平面照度源。为了减小杂散光的影响,在光阑筒内设置了两个杂散光挡板,消杂散光效率大于99%。

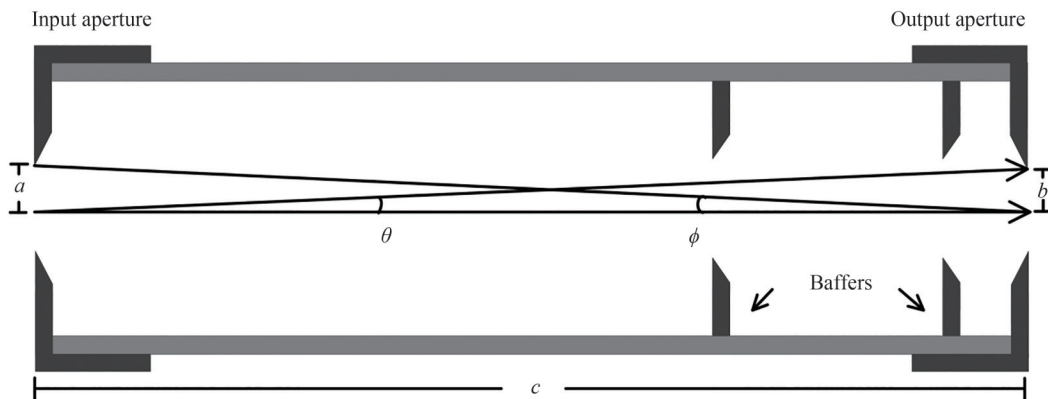


图4 圆筒光阑示意图  
Fig.4 Schematic diagram of cylinder aperture

### 1.3 反馈控制模块设计

照度反馈与控制模块用于实时显示光源的照度值以及实现照度值的设定。反馈模块由监视探测器以及静电计组成,监视探测器接收母积分球的光通量后生成电流信号,由静电计实现模数转换,输出给上位机。上位机软件将输入的电流信号换算得到光源输出照度值,并将其显示。上位机根据设定照度值与反馈照度值的误差,生成控制信号,发送给直线伺服电机。直线伺服电机的推杆带动正方形光阑 A 实现水平位移,改变可调光阑面积,从而实现目标照度值的设置。由于伺服电机存在定位误差,因此在完成上述控制过程后,可以通过上位机控制电机移动指定步长,实现光阑面积的微调。需要注意的是,母积分球在监视探测器开口处的光通量产生的探测器光电流与照度源实际输出照度的关系是由微光照度计标定的,具体的标定方法与结果在下文中详细介绍。

## 2 宽动态范围微弱照度光源设计原理

积分球出射的亮度可以由空腔的辐射传递理论推导得到<sup>[9]</sup>

$$L = \frac{\Phi}{\pi A} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (5)$$

式中, $L$ 是积分球输出亮度; $\Phi$ 是发光单元的总发光通量; $A$ 是积分球内表总面积; $\rho$ 是积分球内壁涂层反射率; $f$ 是积分球的开口比,即所有开孔面积与内壁总面积的比值。

假设子积分球出口的面积远远大于其它开孔面积,则子积分球产生的光通量 $\Phi_c$ 为

$$\Phi_c = \frac{\Phi}{\pi A_c} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f_c)} \cdot \pi A_c f_c = \frac{\rho f_c \Phi}{1 - \rho(1 - f_c)} \quad (6)$$

式中,下标 c 代表子积分球参数。子积分球光通量利用率 $\eta$ 表示为

$$\eta = \frac{\Phi_c}{\Phi} = \frac{\rho f_c}{1 - \rho(1 - f_c)} \quad (7)$$

子积分球输出到母积分球的光通量由可调光阑的面积决定。假设可调光阑调节系数为 $T(l)$ , $l$ 是电机丝杆的位移量。 $T(l)$ 是子积分球输出的光通量与进入母积分球光通量的比值,实际上也就是可调光阑最大面积与实际面积的比值。如图 5 所示,虚线表示的是正方形光阑 A 在起点位置,在该位置光阑 B 刚好被光阑 A 完全遮挡。实线绘制的是正方形光阑 A 平移了 $l$ 后的位置。点线绘制的是正方形光阑 B 的位置,是固定不动的。 $L$ 是正方形光阑对角线方向的长度,光阑 A 与光阑 B 的尺寸一致。

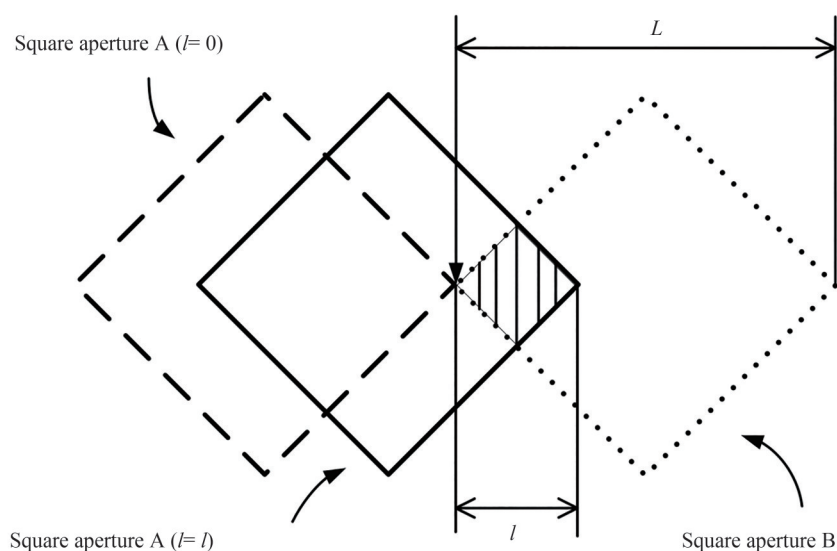


图 5 可调光阑调节系数分析图

Fig.5 Adjustable aperture adjustment coefficient analysis diagram

正方形孔 A 移动平移 $l$ 后,可调光阑的面积就是图中阴影部分的面积。可调光阑调节系数 $T(l)$ 为

$$T(l) = \frac{l^2}{L^2} \quad (8)$$

进入母积分球的光通量为 $\eta\Phi T(l)$ ,带入式(5)得到母积分球的亮度,其中下标 $p$ 代表母积分球参数。

$$L_p = \frac{\eta_c \Phi T(l)}{\pi A_p} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f_p)} \quad (9)$$

圆筒光阑利用积分球亮度源,形成平面照度源,积分球光源输出的亮度与照度源输出的照度之间的关系为

$$E = \frac{L_p}{K} \quad (10)$$

$E$ 为由圆筒光阑出口的照度, $K$ 为圆筒光阑转换系数,可通过圆筒光阑的长度 $c$ ,入口光阑半径 $a$ 和出口光阑半径 $b$ 得到<sup>[17]</sup>

$$K = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \sqrt{F \cdot \pi} \quad (11)$$

令

$$\begin{cases} X = b/c \\ Y = c/a \\ Z = 1 + (X^2 + Y^2)Y^2 \end{cases} \quad (12)$$

则照明因子 $F$ 为

$$F = 2(Z - \sqrt{Z^2 - 4X^2Y^2}) \quad (13)$$

### 3 微光照度源动态范围模拟

微光照度源为微光器件的信噪比,非线性等性能参数测试提供 $10^1 \sim 10^{-5}$  lx的宽动态范围照度,均匀性优于99.9%。微光照度源6个量级的照度调节功能是由程控可调光阑实现的,程控可调光阑选用的直线伺服电机分辨率为 $15 \mu\text{m}$ ,行程为30 mm。当可调光阑面积最小时,电机的位移为最小值 $15 \mu\text{m}$ ,由式(8)可以计算出,为了使调节系数为 $10^{-6}$ ,正方形可调光阑的对角线长度需要在15 mm左右,边长在10.6 mm左右。因此将矩形可调光阑的边长定为10 mm,调节系数与电机步数的关系如图6所示,调节系数范围为 $1 \sim 1.09 \times 10^{-6}$ 。

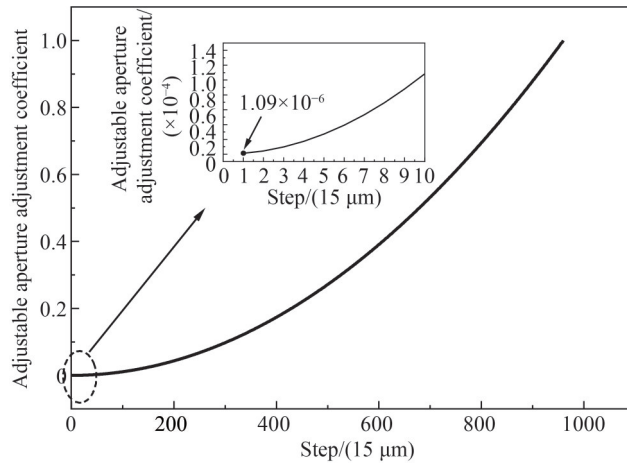


图6 可调光阑调节系数 $T(l)$

Fig.6 Adjustable aperture adjustment coefficient  $T(l)$

子积分球的开口直径不能小于可调光阑的对角线长度,所以将子积分球开口直径设计为15 mm。通常积分球开口比在2%~5%范围内,子积分球开口比小于5%,则子积分球直径需大于33.5 mm,因此将子积分球的半径设计为35 mm。

微光照度源的监视探测器为Si光电二极管,光敏面为正方形,积分球对监视探测器的开口面积 $S_d$ 为 $1.2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。监视探测器安装在母球上,其接受的光通量 $\Phi_d$ 与母球亮度的关系为

$$\Phi_d = \pi L_p S_d \quad (14)$$

监视探测器接收的光通量大于  $10^{-8}$  lm, 信噪比优于 0.01%。因此将监视探测器接收的光通量的动态范围设计  $10^{-8} \sim 10^{-2}$  lm。根据式(14)可以得出母积分球的亮度范围为  $2.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^3$  cd/m<sup>2</sup>。根据式(6)可知, 母球的亮度与积分球内壁反射率、子积分球开口比、母积分球开口比、母积分球内壁表面积以及卤钨灯的光功率有关。通常积分球内壁涂层材料的反射率在 94%~99% 之间, 微光照度源的涂层材料为聚四氟乙烯, 反射率为 98%。母积分球的开口比假设为 2.5%, 卤钨灯光通量假设为 10 lm。根据公式(5), 当母积分球亮度为  $2.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^3$  cd/m<sup>2</sup> 时, 计算得出母积分球的直径分别为 80.7 mm 和 77.6 mm, 因此母球的直径最终选择为 80 mm, 开口直径设计为 20 mm。

微光照度源的照度输出范围要求为  $10^1 \sim 10^{-5}$  lx, 而母积分球的输出的亮度范围为  $2.6 \times 10^{-3} \sim 2.4 \times 10^3$  cd/m<sup>2</sup>, 根据式(10)可以计算圆筒光阑转换系数需要在  $10^2$  量级。圆筒光阑模块的出口光阑尺寸的设计依据来自待测探测器的光敏面面积, 常见的微光探测器单个面元的直径在  $10 \mu\text{m} \sim 1 \text{mm}$  范围内, 因此将出口光阑直径设计为 1 mm。圆筒光阑的长度与入口光阑半径影响着照度源的照度范围, 也影响着照度源的面均匀性, 为了选取合适的尺寸参数, 选取圆筒光阑长度在 50~200 mm 范围, 入口光阑半径 0.5~4 mm 范围内, 对光源照度的最大值与最小值进行模拟。图 7(a) 是光源最大值的模拟结果, 照度值大于 8 lx, 长度  $c$  与入口光阑半径  $a$  的比值大于 40 的数据满足设计要求, 采用空心圆标记, 不满足条件的数据采用实心点标记。图 7(b) 是光源最小值的模拟结果, 照度值小于  $1.2 \times 10^{-5}$  lx, 长度  $c$  与入口光阑半径  $a$  的比值大于 50 的数据满足设计要求, 采用空心圆标记, 不满足条件的数据采用实心点标记。

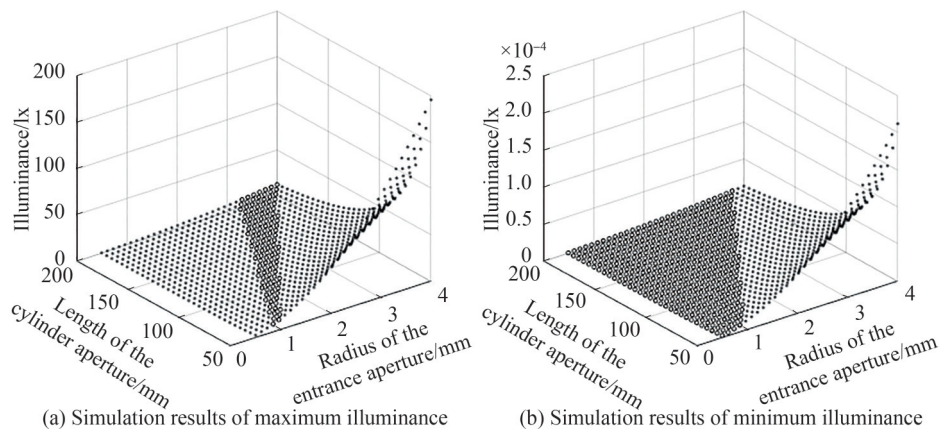


图 7 微光照度源的输出照度模拟结果图

Fig.7 Simulation results of output illumination of low light level illuminance source

最终在满足条件的数据中选择圆筒光阑长度为 120 mm, 入口光阑半径为 2 mm, 总结微光照度源的参数如表 1 所示。

表 1 宽动态范围微光照度源参数

Table 1 Parameters of wide dynamic range low light level illuminance source

Parameter	Value
Reflectivity of inner wall of integrating sphere $\rho/\%$	98
Opening ratio of child integrating sphere $f/\%$	4.59
Opening area of child integrating sphere/mm <sup>2</sup>	176.71
Opening ratio of parent integrating sphere $f/\%$	2.44
Opening area of parent integrating sphere/mm <sup>2</sup>	314.16
Adjustment coefficient of adjustable aperture $T(l)/\%$	$1 \sim 1.09 \times 10^{-6}$
Radius of input aperture of cylinder aperture $a/\text{mm}$	2
Radius of output aperture of cylinder aperture $b/\text{mm}$	0.5
Length of cylinder aperture $c/\text{mm}$	120

运用以上参数计算照度源的输出照度范围,理论微光照度源的输出范围为  $9.26 \times 10^{-6} \sim 8.5 \text{ lx}$ 。图 8 是宽动态范围微光照度源的实物图。

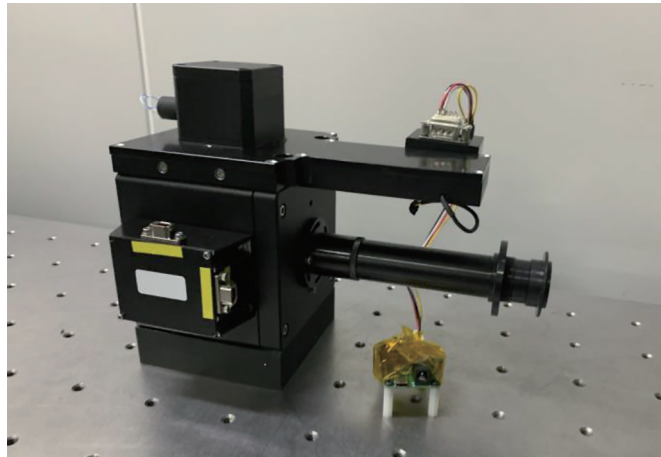


图 8 微光照度源实物图

Fig.8 Picture of low light level illuminance source

## 4 宽动态范围微光照度源测试

### 4.1 照度动态范围测试

微光照度光源的监视探测器用于实时监测光源照度,将监视探测器产生的光电流与光源照度的比值称为监视探测器的照度反馈系数,该系数由微光照度计定标。微光照度计是基于单光子探测器的一套光照度测量系统,它包含了光子计数器和光子计数处理系统,可以将单光子探测器输出的电脉冲信号进行采集,计算标定后输出为照度数据。将监视探测器安装在母积分球上,由静电计(Keithley-6517b)采集监视探测器的光电流,取平均值后得到电流  $I_d$ 。将微光照度计置于圆筒光阑的出口后,采集的数据取平均值后得到照度  $E_d$ 。监视探测器的照度反馈系数  $D$  可以表示为

$$D = \frac{E_d}{I_d} \quad (15)$$

在微光照度源的动态范围内进行照度反馈系数测试,将电机位置由 190 开始,每隔 100 步测试一组照度反馈系数,直到电机位置调节至 1 390。将每个电机位置上测得的数据取平均,代表该电机位置上监视探测器的照度反馈系数,将结果绘制为图 9。

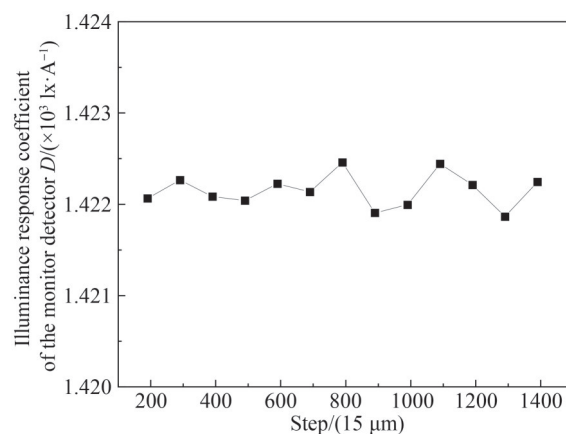


图 9 监视探测器的照度响应系数

Fig.9 Illuminance response coefficient of the monitor detector

将各位置上的照度反馈系数取平均值,得到监视探测器照度反馈系数转换系数为  $1.422 \times 10^3 \text{ lx/A}$ 。微

光照度源的照度动态范围由监视探测器测得,测试方法可简述为:将光源开启后,预热2小时。上位机控制电机运动步长,从10~1 600每间隔10步长测一组电流数据。将电流数据乘以监视器照度响应系数,得到照度源的照度输出范围,如图10所示。

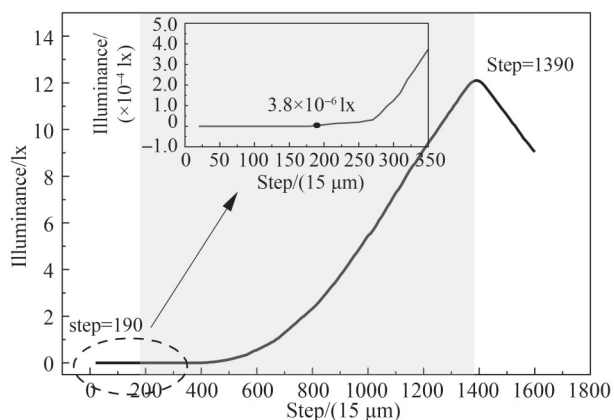
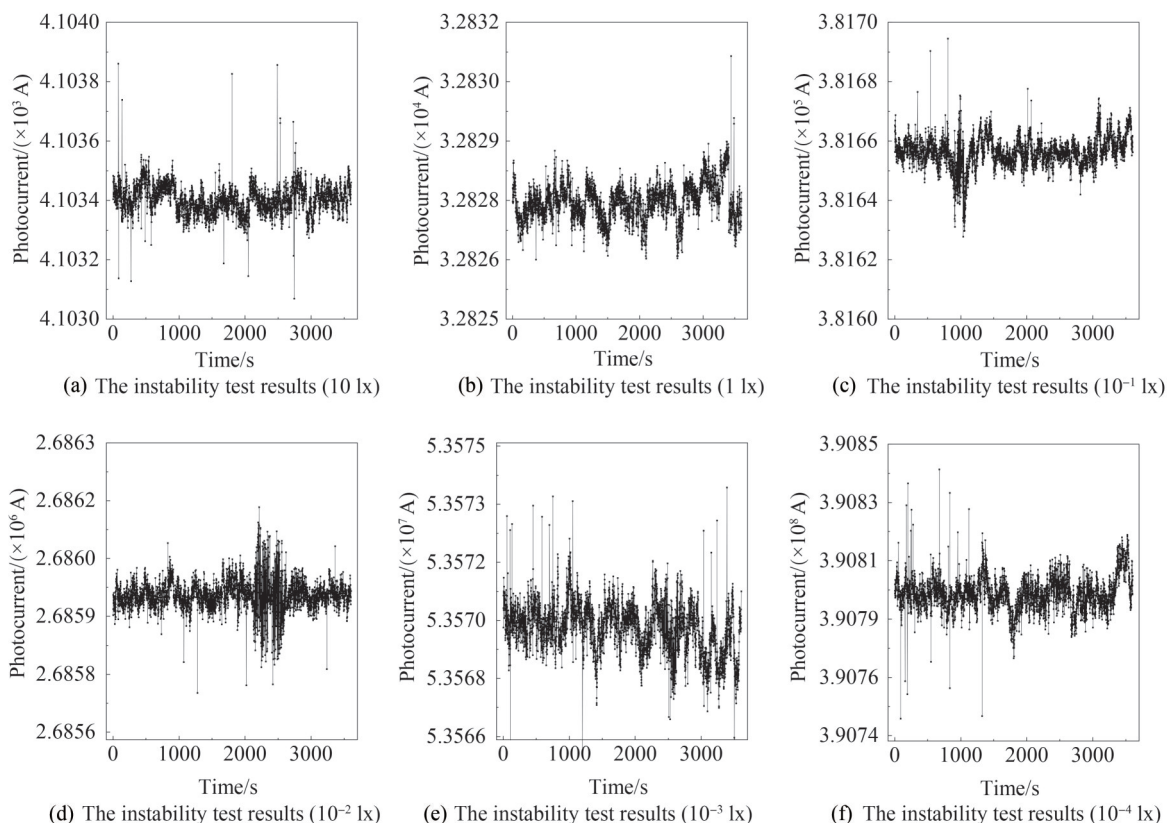


图10 照度动态范围测试结果  
Fig.10 Test results of illuminance dynamic range

结果表明,可调光阑的步数从190~1 390,照度源的照度输出范围为 $3.8 \times 10^{-6} \text{ lx} \sim 12 \text{ lx}$ ,实现了超过6个量级的动态范围输出。由实验结果可以看出,有效的光阑调节步数大于设计值,这可能是由于可调光阑存在漏光的原因。

#### 4.2 非稳定度测试

由定标过的标准探测器测试微光照度源的非稳定度。标准探测器为Si光电二极管探测器,其绝对功率响应度溯源于国内计量部门的低温绝对辐射计。采用跨阻放大器将探测器电流信号转化为电压,由数据采集器(Keysight-32970A)采集电压信号。控制照度源实现6个量级的照度输出,并测试了各量级的光源非稳定度,测试时间为1 h,结果如图11(a)~(g)所示。微光照度源的非稳定性由Si光电二极管光电流的标准差





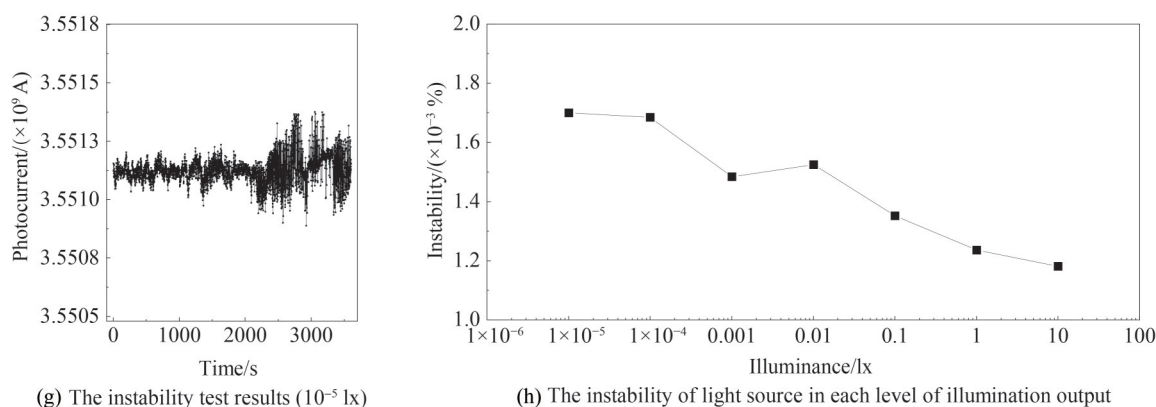


图 11 宽动态范围微光照度源 1 h 的非稳定度测试

Fig.11 Instability test of wide dynamic range low light illuminance source for 1 h

与光电流的平均值的比值计算得出,结果如图 11(h)所示,微光照度源在其动态范围内的 1 h 的非稳定度小于 0.001 8%。

## 5 结论

本文针对微光仪器及微光探测器的高精度辐射特性检测和校准要求,设计了一种在现场环境使用的宽动态范围微光照度源。设计了可调光阑,可通过调节光阑面积,决定级联子积分球导入母积分球的辐射通量,实现等色温的 6 个量级的照度调节功能。提出了采用双微孔光阑和消杂光挡板的筒状结构,研制圆筒光阑,将级联积分球输出亮度,转换为照度输出。级联母积分球上布置了基于 TEC 制冷的硅光电二极管监视探测器,可实现照度值的实时监测和反馈。介绍了宽动态范围微光照度源的设计原理,详细讨论了光源的设计参数,对照度源的动态范围进行模拟。最终对宽动态范围微光照度源进行了性能测试,测得其照度输出范围为: $3.8 \times 10^{-6}$  lx~12 lx,非稳定度小于 0.001 8%。满足微光器件测试光源宽动态范围,高稳定性的需求。宽动态范围微光照度源具有宽动态范围调节、高稳定性等多方面的技术优点,在微光像增强器等微光探测器的现场和实验室辐射特性检测和校准中具有一定的应用价值。下一步的研究工作是利用优化设计的宽动态范围微光照度源开展微光探测器的辐射定标和辐射特性测试等应用示范性研究。

## 参考文献

- [1] DATLA R U, PARR A C. Introduction to optical radiometry[M]. Experimental Methods in the Physical Sciences, 2005, 41:1-34.
- [2] 光辐射探测器光谱响应的确定方法. 中国标准书号: GB/Z 26209-2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [3] YOON H W, KACKER R N. Guidelines for radiometric calibration of electro-optical instruments for remote sensing [EB/OL]. 2015-05-08 [2023-01-23]. <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.HB.157>.
- [4] CHEONG W F, PRAHL S A, WELCH A J. A review of the optical properties of biological tissues[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1990, 26(12): 2166-2185.
- [5] CHEUNG J Y, CHUNNILALL C J, WOOLLIAMS E R, et al. The quantum candela: a re-definition of the standard units for optical radiation[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(2-3): 373-396.
- [6] CHUNNILALL C J, DEGIOVANNI I P, KÜCK S, et al. Metrology of single-photon sources and detectors: a review [J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 089801.
- [7] MORAN S E, ULICH B L, ELKINS W P, et al. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance[C]. SPIE, 1997, 3173:430-457.
- [8] XIANG Shiming, FAN Xuewu, HE Na, et al. Review on low light level remote sensing imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020009.  
向世明,樊学武,何娜,等.微光遥感成像技术研发动态评述[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):020009.
- [9] CARR K F. Integrating sphere theory and applications-Part I: Integrating sphere theory and design[J]. J. J. Soc. Surf Coat Int, 1997, 80(8): 380-385.
- [10] CARR K F. Integrating sphere theory and applications-Part II: Integrating sphere applications[J]. J. J. Soc. Surf Coat Int, 1997, 80(10): 485-491.

- [11] MCKEE G, BUTLER J J, XIONG J, et al. Design and characterization of a large area uniform radiance source for calibration of a remote sensing imaging system[C]. *Earth Observing Systems VII*, 2007, 6677:667706.
- [12] GATEBE C K, BUTLER J J, COOPER J W, et al. Characterization of errors in the use of integrating-sphere systems in the calibration of scanning radiometers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(31): 7640-7651.
- [13] HAN S, NI L, TAN J, et al. Programming implementation of performance testing of low light level ICCD camera based on LabVIEW software[C]. *International Symposium on Optical Measurement Technology and Instrumentation*, IEEE, 2016.
- [14] NI Li, QIAN Yunsheng, SUN Yunan, et al. Measurement technology of signal-to-noise of low-light-level ICCD [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(11): 1081-1084.  
倪莉,钱芸生,孙宇楠,等.微光ICCD信噪比测试技术研究[J].*红外技术*,2018,40(11):1081-1084.
- [15] QIU Y, CHANG B K, SUN L J, et al. The relationship of Image quality of Image intensifier and the luminance of its background[C]. *International Conference on Photoelectronic Detection and Imaging*, 2008:R6210.
- [16] JOHNSON B C, BRUCE S S, EARLY E A, et al. The fourth SeaWiFS intercalibration round-robin experiment (SIRREX-4)[J/OL]. (1996-5) [2023-01-23]. <https://www.researchgate.net/publication/24324392>.
- [17] MEYNART R, COOPER J W, NEECK S P, et al. Radiometric characterization of the NASA GSFC radiometric calibration facility primary transfer radiometer[C]. *Conference on Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VIII*, SPIE 2004, 5570: 472-481.

## Design and Performance Test of Low Light Level Illumination Source with Wide Dynamic Range

LI Yue, YUAN Yinlin, YE Yingjie, KONG Deyao, XIAO Lan, ZHAI Wenchao,  
ZHENG Xiaobing

(*School of Environment Science and Optoelectronic, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230026, China*)

**Abstract:** High-precision radiometric performance test and calibration of field detectors are one of the important steps in the development of low-light level instruments and sensors. With the rapid development of low-light night vision instrument, photon microscope, low-light fluorescence imaging, biomedical imaging, and deep space exploration, higher requirements are put forward for the calibration light source of low-light level devices. Image intensifier is the core component of low-light night vision system, and its illuminance response range should be as low as  $10^{-4}$  lx. The signal-to-noise ratio and optical gain of image intensifier play a decisive role in the imaging quality of the whole low-light detection system. To meet the high precision calibration requirements of low-light level sensors such as low-light image intensifier, a wide dynamic range low level illumination source with small volume and low power consumption is designed. Aiming at the requirements of the field radiometric response characteristics test of low-light level detectors, the design scheme, structure, and working principle of the wide dynamic range low-light level illumination source are first introduced. The wide dynamic range illumination source is composed of an adjustable dynamic range integrating sphere light source unit, a cylinder aperture and a feedback and control unit. The integrating sphere light source adopts the structure of child integrating sphere and parent integrating sphere. A halogen lamp source is built into the child integrating sphere, and the light is reflected several times inside the integrating sphere to achieve uniform brightness at the outlet. An adjustable aperture between the parent and child integrating spheres is used to realize the function of wide dynamic range flux adjustment. The area of the adjustable aperture determines the flux of light from the child integrating sphere into the parent integrating sphere. Compared with the way in which the flux of halogen light is regulated by the current of the source, it ensures that the color temperature of the light source is nearly consistent at different orders of magnitude of brightness output. The integrating sphere provides luminous flux to the monitoring detector and the cylinder aperture through two openings. The cylinder aperture is arranged at the outlet of the parent integrating sphere, and the position is coaxial with the parent integrating sphere outlet. The cylinder aperture is a cylindrical structure with an entrance aperture and an exit aperture, and has a stray light baffle inside, which can convert the brightness source of the integrating

ball into a uniform illuminance source. Illuminance feedback and control module is used to display illuminance value of light source in real time and realize the setting of illuminance value. The dynamic range of low-light illuminance source is derived in detail, and the design parameters of light source are analyzed and simulated. Finally, the illuminance source performance test is carried out to verify the rationality of the design. The stability of the light source is tested. The standard detector is placed at the light source outlet to monitor the photocurrent of the detector. The test results show that the instability of the light source is less than 0.001 8%. The illumination feedback coefficient of monitor detector is calibrated by a standard illuminance meter, the illumination range of the light source measured by the monitoring detector is  $3.8 \times 10^{-6} \text{ lx} \sim 12 \text{ lx}$ . The experimental results show that the wide dynamic range low-light level illuminance source has many technical advantages, such as wide dynamic range regulation, high stability. In the field or laboratory environment, it has a certain application value for radiometric calibration and characteristic test of low-light level detector such as image intensifier.

**Key words:** Low light level; Light source; Integrating sphere; Illuminance; Luminance; Calibration; Photodetector

**OCIS Codes:** 120.4570; 120.5630; 120.0280; 040.3780