

文章编号 1004-924X(2012)04-0733-06

光子计数法测量类针孔成像光斑照度

崔东旭^{1,2}, 史继芳², 李宏光^{2*}, 孙宇楠², 曹 锋²

(1. 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094;
2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:为了精确测量三代微光像增强器的信噪比,采用光子计数法研制了瞬态类针孔弱光照度计来实现微光像增强器阴极面上 $\Phi 0.2$ mm 类针孔成像光斑的 1.08×10^{-4} lx 照度测量。首先,分析了色温为 2 856 K 的光源形成的类针孔弱光光斑的光子分布概率及光子数涨落偏差等光子统计特性,计算了平均光子通量。然后,针对类针孔弱光光斑的光子通量特点及成像特性,研究了光子计数法测量弱光照度原理。最后,介绍了瞬态类针孔弱光照度计的组成及测量方法。对三代微光像增强器的信噪比进行了测量实验,结果显示:三代微光像增强器信噪比测量装置的照度测量偏差为 0.4%,像增强器信噪比测量不确定度为 5.0%,表明基于光子计数法研制的瞬态类针孔弱光照度计有效提高了类针孔光斑极弱照度测量的准确度。

关键词:弱光照度;光子计数;类针孔光斑;像增强器

中图分类号: TN144 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122004.0733

Illuminance measurement of quasi-point source with photon counting method

CUI Dong-xu^{1,2}, SHI Ji-fang², LI Hong-guang^{2*}, SUN Yu-nan¹, CAO Feng²

(1. School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;)
* Corresponding author, E-mail: optics_lihg@126.com

Abstract: To improve the measuring accuracy of Signal to Noise Ratio(SNR) of the third-generation low level image intensifiers, a transient low light level illuminometer was designed based on photon counting principles to measure the illuminance value of 1.08×10^{-4} lx from a circular area with diameter of 0.2 mm for the quasi-point imaging source on a photocathode. Firstly, the photon distributing probability and fluctuated deviation were analyzed for the quasi-point light source at a color temperature of 2 856 K, and the average photon flux was calculated. Then, the low light level illuminance measuring principle by the photon counting method was studied according to the photon flux and imaging characteristics. Finally, the composition of the transient quasi-point low light level illuminometer was introduced, and the SNR of a third-generation low light level image intensifier was measured. Experimental

收稿日期:2011-12-31;修订日期:2012-02-22.

基金项目:微光夜视技术国防科技重点实验室基金资助项目(No. J20110509)

results indicate that the illuminance deviation and uncertainty of the SNR are 0.4% and 5.0%, respectively. It concludes that the proposed low light level illuminometer based on photon counting can effectively improve the accuracy of illuminance measurement for quasi-point low level light sources.

Key words: low light level illuminance; photon counting; quasi-point source; image intensifier

1 引言

随着科学技术的发展,空间天文探测、荧光探测、微光夜视技术等领域对于类针孔光斑的弱光测量要求越来越高。由于类针孔光斑的直径很小,照度测量时需要光敏面很小且灵敏度很高的探测器。三代微光像增强器的信噪比参数决定着微光夜视器件从微弱景物的目标中探测光子的能力。因此,信噪比参数的精确测量在微光像增强器的研制生产和应用过程中起着重要作用^[1]。国军标规定,在三代微光像增强器的信噪比测量中,照射像增强器阴极面中心区的光源光斑为 0.2 mm,输入照度为 1.08×10^{-4} lx。在目前微光像增强器信噪比测量设备中,弱光光源经过共轭透镜聚焦在像增强器阴极面位置形成了所要求的类针孔成像光斑^[2]。该类针孔成像光斑照度的直接测量存在着两个难点:(1)类针孔成像光斑直径很小,而目前国内普遍使用的弱光照度计以中国测试技术研究院研制的弱光照度计为代表^[2],其光电倍增管探测器光敏面直径均大于 5 mm,测量时类针孔光斑不会充满光电倍增管的光敏面,导致信噪比大幅降低。(2)照度值为 1.08×10^{-4} lx 时,类针孔成像光斑可看作一系列离散的光子信号,一般的弱光照度计采用连续型光电倍增管把光转换为直流信号,导致较弱的类针孔光斑测量时输出的直流信号淹没在噪声中,致使其探测能力不足,达不到测量要求。

因此,目前国内外普遍使用的微光像增强器信噪比测量设备主要利用硒光电池和光电检流计测量光源的强光照度,通过若干减光片逐级衰减后,转换为 10^{-4} lx 量级的照度值^[3]。但这种方法衰减时传递误差大,不能适应三代微光像增强器信噪比参数精确测量的要求。为保证三代微光像增强器信噪比参数的测量精度,本文分析类针孔弱光光斑的光子特性,提出了一种基于光子计数法测量类针孔成像光斑照度的方法。该方法采用瞬态类针孔微弱光照度计,对三代微光像增强器

阴极面上 0.2 mm 微小光斑的 1.08×10^{-4} lx 照度值进行准确测量,为三代微光像增强器性能评价提供量值计量保障。

2 类针孔弱光光斑的光子理论分析

2.1 弱光光斑的光子统计特性

在可见光波段,当所测光源极弱时,光可看作一系列分离的光子。某一面积内的光子具有不确定性,不能同时具有确定的位置和动量。由于光的波动性,光极弱时光子具有统计性质,光子涨落随时间变化,可形成光子概率波。利用统计力学的各态历经假说,当光源从任一初态开始运动,在足够长的时间内,经过一切可能的微观状态,不需要了解涨落的时间函数关系,可求得时间平均,即求得光子数的时间平均。因此,一般用平均光子和光子分布概率描述大量光子出现在某一面积内的可能性^[4]。

当用于弱光照度测量的卤钨灯色温为 2 856 K 时,其处于热平衡状态,可激发出光子。测量光场中光子分布概率 P_n 用于衡量光子数 n 对平均光子数 \bar{n} 的涨落大小,同时代表了热光场中有 n 个光子的概率,由公式(1)表示。 \bar{n} 代表温度为 T 时,占有能级 $h\omega$ 的单波长的平均粒子数, $\{n_\lambda\}$ 代表了每个模中的一组光子数 $n_{\lambda_1}, n_{\lambda_2}, n_{\lambda_3}, \dots$, 表述了光的统计性质。

$$P_{\{n_\lambda\}} = \prod_{\lambda} \frac{(\bar{n}_\lambda)^{n_\lambda}}{(1 + \bar{n}_\lambda)^{1 + n_\lambda}}, \quad (1)$$

$$\bar{n}_\lambda = (e^{\beta h \omega_\lambda} - 1)^{-1}. \quad (2)$$

辐射场涨落是引起辐射噪声的原因。光子数的涨落由偏差的方均根表征:

$$\Delta n = [(\bar{n})^2 + \bar{n}]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

可以看出,光子数的偏差总比平均光子数要大。当平均光子数很大时,计算公式(4),并决定光子计数探测的范围。

$$\Delta n = \bar{n} + \frac{1}{2} \quad (\bar{n} \gg 1). \quad (4)$$

标准 A 光源采用卤钨灯,由大量钨原子无序

随机激发而发射,在照度测量时把光场作量子化处理,不考虑谐振光子之间的相互作用,把光源看作大量独立光子,近似采用线性理论处理。各态历经假说要求光子的计数测量为瞬时测量才能成立。光子计数结果的可靠性依赖于测量仪器的分辨时间和光子数涨落的特征时间的相对大小。

2.2 类针孔成像光斑的光子通量原理

照度是一个光度量,与人眼的视觉特性有关,因此照度计必须经过照度值标定后才能用于照度测量。为统一照度量值,国际照明委员会 CIE 规定照度值标定和照度计检定时照明光源为色温 2 856 K 的标准 A 光源。在弱光照度计量标准中,一般采用卤钨灯作光源,其具有与同色温黑体相同的辐射光谱分布。

标准 A 光源的光谱辐射通量可以用光谱辐射量 $\phi(\lambda)$ 和光谱平均光子数通量 $\phi_p(\lambda)$ 两种单位度量表示^[6],分别由公式(5)和公式(6)计算。

$$d\phi(\lambda) = \frac{2\pi\epsilon hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (5)$$

$$d\phi_p(\lambda) = \frac{2\pi\epsilon c^2}{\lambda^4} (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (6)$$

其中, $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 2.997925 \times 10^8 \text{ m/s}$, $k = 1.38054 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, ϵ 为光源的发射率, T 为光源色温。

在可见光波段,照度和人眼的视觉效应有关。在照度测量时,辐射量必须经过光谱视觉函数后由公式(7)计算,标准 A 光源的辐射通量用光通量 ϕ_v 表示。

$$\phi_v = K_m \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\phi(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

其中, K_m 是最大光谱光视效能,为 683 lm/W; $V(\lambda)$ 为光谱视觉函数。

根据理论计算并经过照度计计量后,光通量为 1 lm,色温为 2 856 K 的标准 A 光源的平均光子通量 $\bar{N}_p = 1.3 \times 10^{16} \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7]。

在目前三代微光像增强器信噪比测量设备中,弱光光源经过共轭透镜聚焦在像增强器阴极面位置形成了 $\Phi 0.2 \text{ mm}$ 的类针孔成像光斑。照度为 $1.08 \times 10^{-4} \text{ lx}$ 时, $\Phi 0.2 \text{ mm}$ 阴极面接收到的平均光子通量为

$$\bar{N}_1 = E_0 \cdot A \cdot N_p = 4.41 \times 10^4, \quad (8)$$

其中, E_0 为 $1.08 \times 10^{-4} \text{ lx}$, A 为 $\Phi 0.2 \text{ mm}$ 阴极面面积。

经过三代微光像增强器信噪比测量装置的共轭透镜聚焦后,平均光子通量变为 \bar{N}_2 。

$$\bar{N}_2 = \tau_1 \cdot N_1 = 4.41 \times 10^4 \cdot \tau_1. \quad (9)$$

其中, τ_1 为共轭透镜的光子能量透过率。

3 类针孔弱光照度的测量原理

3.1 瞬态类针孔照度计光子计数测量原理

当所测光源入射到照度探测器的光子数量小于 $10^8 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,入射光可看作一系列分离的光子,需要采用光子计数原理探测照度^[8]。对微光像增强器进行信噪比测量时,在阴极面接收到的光源光子通量在 $10^4 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级,其照度值必需依据光子计数原理测量,才能达到信噪比要求。

瞬态类针孔弱光照度计采用光子计数管,把光子数转换成脉冲信号输出,输出脉冲的个数正比于入射光子个数。瞬态类针孔照度计如图 1 所示,包括余弦校正片、视觉函数校正片、针孔、光子计数探测器、制冷系统、温控电路、光子计数处理系统和计算机。入射光子经过余弦校正和视觉函数 $V(\lambda)$ 校正后入射到光子计数管探测面上,转换为电脉冲信号。电脉冲信号经甄别、计数输出到计算机,软件把输出脉冲速率标定为照度值。

光子计数器采用双计数方式,最大计数能力为 2^{32} ,采集周期为 $50 \mu\text{s} \sim 10 \text{ s}$,最小时间分辨率为 $50 \mu\text{s}$ 。光子计数系统的输出脉冲宽度为 30 ns ,光敏面为 $\Phi 5 \text{ mm}$ 。噪声特性主要由光子统计

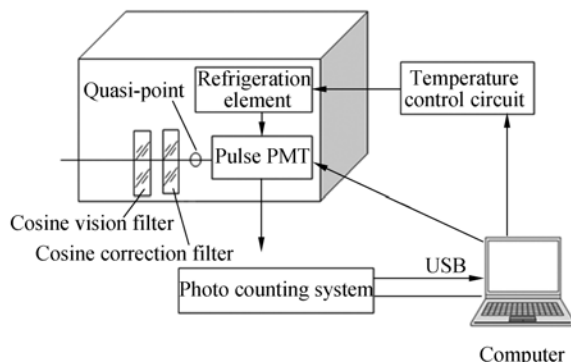


图 1 瞬态类针孔弱光照度计原理图

Fig. 1 Transient quasi-point low light luminometer

涨落引起,符合正态分布,采用制冷器制冷降低噪声,制冷后光子计数器工作在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,大大降低了暗噪声电脉冲,用脉冲速率表示^[9]。当光强弱到一定程度,暗计数速率为 20 s^{-1} 决定了系统测量到的最弱光强的下限^[10]。当光强度升高到一定程度,光电倍增管输出速率足够高时,出现双光子堆积现象。当光强更强时,出现更多光子脉冲重叠的现象,限制了光子计数系统只能在光子速率小于 33 MHz 的计数,这决定了照度探测的上限,进而决定了系统的动态范围^[11]。

由于光子具有统计特性,经光子计数器转换后的脉冲也具有统计性质。利用统计力学的各态历经假说,瞬态类针孔弱光照度计必须在足够长的时间内分周期测量光子分布,克服光子数随时间的涨落影响,求得光子数的时间平均,由公式(10)计算出照度值。

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{k_{\beta} L_i}{T'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{\beta} N_2 \cdot \eta \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \epsilon, \quad (10)$$

式中, E 是测量时间内的平均照度值, L_i 是第 i 个周期对应的脉冲计数, T' 是所选的采样周期, n 是所选的测量次数, k_{β} 是与所选照度档位相对应的照度标定系数, η 为光子计数管的量子效率, τ_1 、 τ_2 分别是 $V(\lambda)$ 校正片和余弦校正片的透过率, ϵ 是弱光度标准装置的照度均匀性校正系数, N_2 为入射到照度计探测面的光子通量。

瞬态类针孔弱光照度计在 500 s 内每隔 100 ms 对 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 光斑在 $1.08 \times 10^{-4}\text{ lx}$ 时测量到的瞬时光子脉冲分布如图2所示,图2表示了光子脉冲个数随采集周期的变化,采集周期为 100 ms 。每个采集周期内的光子数是在一定范围内变化,具有统计分布特点。因为弱光度标准装置

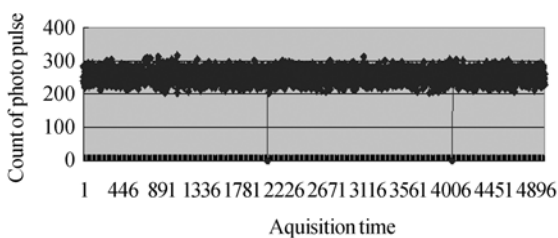


图2 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 成像光斑瞬时光子脉冲分布图

Fig. 2 Transient photon pulse distribution of $\Phi 0.2\text{ mm}$ source

在照度计标定时形成了 30 mm 的照射面,其各点处照度不完全相同,而类针孔照度计的接收面为 0.2 mm ,需要在标定时进行均匀性校正,分析出照度均匀性校正系数 ϵ 。

3.2 瞬态类针孔弱光照度计照度标定方法

在光度学中采用弱光度标准装置对瞬态类针孔弱光照度计进行了照度标定。在弱光度标准装置中积分球出口处形成均匀光源,通过5个衰减倍数为10的滤光片在距离积分球出口 1 m 处形成了照度在 $10^{-1} \sim 10^{-8}\text{ lx}$ 的均匀光照射面,用于校准和标定各种弱光照度计。标定时均匀光通过照度计上 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 的类针孔光阑被类针孔弱光照度计的光敏面接收。根据弱光度装置的标准照度值,由公式(10)得到 10^{-4} lx 档位对应的照度标定系数。

经过标定后,照度计可测量的照度为 $10^{-2} \sim 10^{-5}\text{ lx}$,在此范围内照度计示数随光能量线性变化。当类针孔弱光照度计去掉 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 类针孔时,经过弱光度标准装置标定,此时照度计可测量的照度为 $10^{-4} \sim 10^{-8}\text{ lx}$ 。

4 测量实验与结果分析

4.1 类针孔成像光斑照度测量实验

三代微光像增强器信噪比测试时,光源发出的光在积分球出口处形成均匀光斑, $\Phi 0.2\text{ mm}$ 类针孔光阑位于积分球出口处,经过共轭透镜 $1:1$ 成像,在微光像增强器阴极面形成一直径为 0.2 mm 的圆光斑,如图3所示。为保证在信噪比测量装置上待测光斑的大小和照度标定时相同,需要验证 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 类针孔光阑的大小及共轭透镜是否严格按 $1:1$ 成像。本文采用了德国蔡司公司的CCD万能显对二者进行了测量。类针孔弱光照度计在照度标时光阑直径为 0.2027 mm ,信噪比测量装置中积分球出口处针孔光阑为 0.2033 mm ,经过共轭透镜成像后光斑尺寸为 0.2025 mm 。因此,信噪比测量装置上待测光斑和照度标时光斑的直径误差小于1,对照度测量误差影响很小。

根据聚焦透镜的相对孔径、焦距和光斑发散角等参数,计算出 $\Phi 0.2\text{ mm}$ 成像光斑距离照度计中光子计数管探测面 7 mm 时,成像光斑刚好充满光子计数管 $\Phi 5\text{ mm}$ 探测面。在此位置测量

光子计数管响应最均匀,可获得最佳的信噪比。

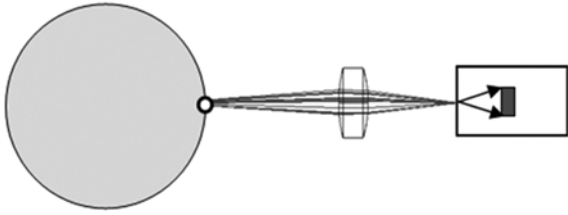


图 3 信噪比测试仪内类针孔成像光斑照度测量光路示意图

Fig. 3 Illuminance principle of quasi-point source in SNR tester

4.2 三代微光像增强器信噪比装置 10^{-4} lx 量级照度测量实验

在三代微光像增强器信噪比装置中,用类针孔弱光照度计测量 $\Phi 0.2$ mm 成像光斑,改变积分球出光孔处光阑直径,进而改变 $\Phi 0.2$ mm 成像光斑的照度。调整信噪比装置中光源积分球光阑大小,测量 50 次,测量照度值如图 4 所示,测量平均值为 1.0819×10^{-4} lx,标准偏差为 0.0039×10^{-4} lx。

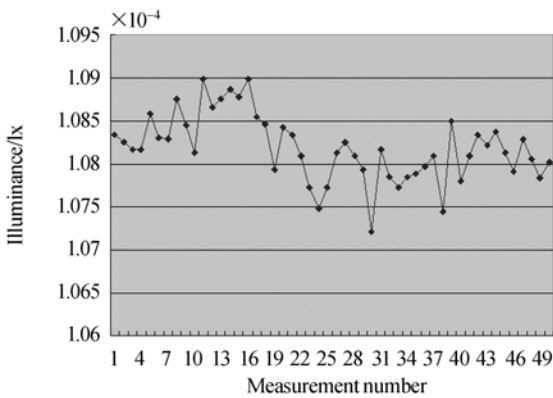


图 4 信噪比装置中类针孔成像光斑测量照度值

Fig. 4 Illuminance of quasi-point source in SNR tester

4.3 照度校准后三代微光像增强器信噪比测量实验

照度校准后,对管号为 5634207,5701026,5735411 的三代微光像增强器的信噪比参数进行

了测量,测量结果如图 5 所示。三只管子出厂的信噪比值分别为 27.1,29.6,30.27,对应的测量值分别为 27.8,31.0,29.72。照度测量引入的不确定分量由之前的 4%降低到 3%,从而使三代微光像增强器信噪比测量不确定度达到 5.0%。

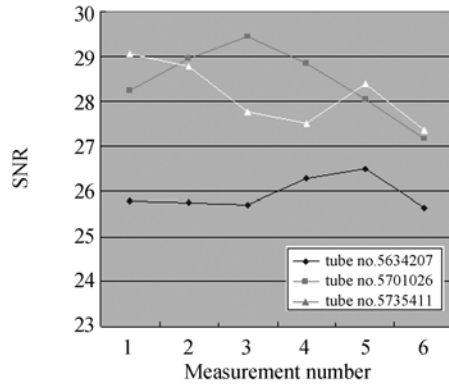


图 5 像增强器信噪比测量值

Fig. 5 Results of SNR measurement of image intensifier

5 结 论

本文对采用光子计数原理研制的瞬态类针孔照度计用国防科技工业光学一级计量站的弱光度标准装置进行了照度标定试验。对于类针孔光斑,类针孔弱光照度计可测量的照度为 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ lx。对大面积光斑,类针孔弱光照度计去掉 $\Phi 0.2$ mm 类针孔时,可测量照度为 $10^{-4} \sim 10^{-8}$ lx。对微光像增强器信噪比弱光光源聚焦的 0.2 mm 光斑进行了测量,发现在光斑照度为 1.08×10^{-4} lx 时,照度测量偏差为 0.4%,信噪比测量不确定度为 5.0%。在准确分析类针孔弱光光斑的光子统计特性及光子通量特点的基础上,采用光子计数法测量类针孔成像光斑照度的方式,解决了三代微光像增强器信噪比测量装置中,微光像增强器阴极面上类针孔成像光斑的弱光照度测量难题,避免了传统间接测量方法带来的传递误差,提高了三代微光像增强器信噪比的测量精度。

XIANG R, CHANG B K. Study on improved and analyzed LLL image intensifier signal-to-noise tester [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2002:14-18. (in Chinese)

参考文献:

[1] 向嵘,常本康.微光像增强器信噪比测试仪的分析与改进研究[D].南京:南京理工大学,2002:14-18.

- [3] 曹远生. 宽量程弱光照度计的研制[J]. 实用测试技术, 1996, 1: 19-21.
CAO Y SH. Development of wide range weak illuminometer [J]. *Practical Measurement Technology*, 1996, 1: 19-21. (in Chinese)
- [4] 钱芸生. 微光像增强器信噪比测试技术研究[J]. 真空科学与技术, 2002, 22(5): 389-391.
QIAN Y SH. Development of signal-to-noise ratio tester for LLL image intensifier [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2002, 22(5): 389-391. (in Chinese)
- [5] 王忠和. 光子学物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 57-75.
WANG ZH H. *Photons Physical Property* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 57-75. (in Chinese)
- [6] 潘君骅. 计量测试技术手册第 10 卷光学[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997: 8-9.
PAN J H. *Handbook of Optical Measurement Technology* [M]. Beijing: China Metrology Press, 1997: 8-9. (in Chinese)
- [7] SCHAGEN P. 夜视电子器件与电子成像[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1979: 27-29.
SCHAGEN P. *Night Vision Intensifier and Electron Imaging* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1979: 27-29. (in Chinese)
- [8] 安毓英. 光电探测原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 219-228.
AN Y Y. *Photoelectricity Detecting Principle* [M]. Xi'an: Xi'an university Press, 2004: 219-228. (in Chinese)
- [9] YIN L J. Design and experiments of photon counting imaging test platform[J]. *IEEE*, 2009, 978-1: 3817-3821.
- [10] 孙立群. 微光图像光子计数器象管光子增益测试研究[J]. 光子学报, 1997, 26(6): 498-503.
SUN L Q. Measurement study on the photon gain of LLL image photon counting intensifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6): 498-503. (in Chinese)
- [11] 孙立群. 光子计数技术及其在弱光计量中的应用[J]. 应用光学, 1993, 14(6): 46-49.
SUN L Q. The photon counting technique and its application in low-light-level metrology[J]. *Journal of Applied Optics*, 1993, 14(6): 46-49. (in Chinese)

作者简介:



崔东旭(1965—),男,河南开封人,博士研究生,研究员,主要从事微光夜视检测技术的研究。E-mail: cuidongxu656@163.com



史继芳(1964—),女,河南鲁山人,硕士生,研究员,主要从事微光夜视计量技术的研究。E-mail: shijifangyeah@126.com



孙宇楠(1979—),女,山东栖霞人,本科生,工程师,主要从事微光夜视计量技术的研究。E-mail: sylina_2009@126.com



曹 锋(1979—),男,陕西富平人,本科生,工程师,主要从事弱光信号处理技术的研究。E-mail: bingshanbing@sina.com

通信作者:



李宏光(1981—),男,山东冠县人,硕士生,高级工程师,2006年于西安工业大学获得硕士学位,主要从事微光与光谱光度计量技术的研究。E-mail: optics_lihg@126.com