

文章编号 1004-924X(2009)11-2712-07

## “日盲”紫外 ICCD 的信噪比

周 跃<sup>1,2</sup>, 闫 丰<sup>1</sup>, 谷勇强<sup>1,2</sup>, 邓博斯<sup>3</sup>, 隋永新<sup>1</sup>, 杨怀江<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:**分析了“日盲”紫外增强型电荷耦合装置(SBUV-ICCD)噪声的来源及特点。考虑 SBUV-ICCD 工作时系统增益高, 单光电子的响应会扩散到 CCD 邻近像素中去, 故将 SBUV-ICCD 作为线性时不变系统, 引入单光电子冲激响应到 SBUV-ICCD 信噪比计算中, 利用傅里叶变换原理推导出其信噪比模型。模型采用了二维高斯函数拟合 SBUV-ICCD 单光电子冲激响应的方法, 较传统间接分析的方法更为简单适用。分析了增益对 SBUV-ICCD 信噪比的影响, 测量了辐照度在  $10.3 \sim 810.6 \text{ pW/cm}^2$  内变化时 SBUV-ICCD 的信噪比。实验结果表明, 该模型的标准差为 0.78, 可用于 SBUV-ICCD 的性能分析。

**关键词:**紫外 ICCD; 信噪比; 光电冲激响应

**中图分类号:** TN386.5; TN23 **文献标识码:** A

## SNR of solar blind ultraviolet ICCD

ZHOU Yue<sup>1,2</sup>, YAN Feng<sup>1</sup>, GU Yong-qiang<sup>1,2</sup>, DENG Bo-si<sup>3</sup>, SUI Yong-xin<sup>1</sup>, YANG Huai-jiang<sup>1</sup>

- (1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*  
3. *College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

**Abstract:** The noise source and characteristics of a Solar Blind Ultraviolet Intensified Charge Coupled Device (SBUV-ICCD) are analyzed. As the single P-E(photo-electronic) response can be diffused into neighboring pixels in CCD when the system gain is to be set a higher value in working conditions, this paper takes the SBUV-ICCD as a liner and shift invariant, and imports the P-E pulse response into the calculation of SNR, then the Fourier transform is used to deduced a SNR model. This model uses a 2D Gaussian function to fit the single P-E pulse response of the SBUV-ICCD, and it is simpler than those of traditional methods. The effect of the gain on the SNR of SBUV-ICCD is analyzed and the SNR of the SBUV-ICCD is measured when the irradiance is between  $10.3 \text{ pW/cm}^2$  and  $810.6 \text{ pW/cm}^2$ . The results show that the RMS of the module is 0.78, which can be used in the analysis of performance of SBUV-ICCD.

**Key words:** ultraviolet Intensified Charge Coupled Device(ICCD); Signal to Noise Ratio(SNR); photo-electronic pulse response

**收稿日期:** 2008-11-19; **修订日期:** 2008-12-10.

**基金项目:** 吉林省科技发展基金资助项目(No. 20080516); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目

## 1 引 言

“日盲”紫外增强型电荷耦合装置(SBUV-ICCD)作为 ICCD 相机的一种,主要利用“太阳光谱盲区”的紫外波段(220~280 nm)来进行极微弱信号探测,具有增益高、动态范围大、无需致冷等优点,在战略国防、电晕探测、森林火灾监测等领域有着广泛的应用前景。由于大气对“日盲”紫外波段辐射衰减强烈,信号极其微弱(一般在 nW 级),要进行有效的信号探测,ICCD 的增益必须较高。在这种情形下,系统噪声将对图像产生严重的干扰,因此需要对 ICCD 的噪声进行详细的分析。信噪比是 ICCD 噪声特性的重要参数,对其进行详尽的分析建模,对评估 ICCD 系统性能,提高 ICCD 探测概率等有重要的意义。

ICCD 相机应用背景的特殊性使对它的研究很少公开发表。虽然国内外在 ICCD 相机的信噪比分析方面开展了一些工作<sup>[1-2]</sup>,但其应用背景限于微光夜视、天文观测等信号稍强(mW 级),增益相对较小的情形,其信噪比可以采用等效电子计数法<sup>[3]</sup>进行计算。但当相机应用于“日盲”紫外微弱信号探测领域时,ICCD 的增益一般都要求在  $5 \times 10^3$  倍以上,高增益导致像面的单光子响应不可避免地扩散,这种情况下如何计算 SBUV-ICCD 的信噪比将是本文所关注的重点。

本文首先简要分析了 SBUV-ICCD 的噪声来源及特点,然后将 ICCD 作为一个线性时不变系统,利用概率论及傅里叶变换的相关理论将单光子冲激响应引入到 SBUV-ICCD 的信噪比分析中,推导出信噪比的模型,并设计实验对其进行了比较分析。该分析结果同样适合于工作于其它波段和增益设置较高的 ICCD,因此不区分 SBUV-ICCD 和 ICCD,统称为 ICCD。

## 2 ICCD 的噪声分析

ICCD 的典型结构<sup>[7-8]</sup>如图 1 所示,主要由入射窗、光电阴极、微通道板(MCP)、荧光屏、耦合光纤、可见光 CCD 6 个部分组成。ICCD 基本工作原理为:从入射窗入射的光子照射到光电阴极

上,按一定的量子转换效率转化为光电子,在加速电场的作用下光电子进入 MCP 进行倍增,然后聚焦到荧光屏激发出可见光,通过光纤光锥将图像耦合到可见光 CCD 上,最后由电子线路读出,完成从入射光到电子图像的转换。

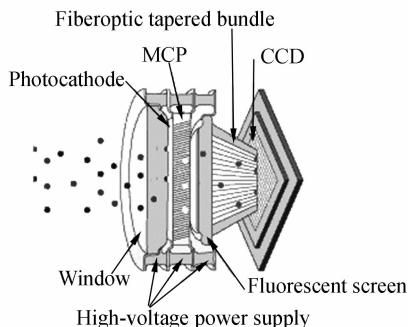


图 1 ICCD 结构示意图

Fig. 1 Construction of ICCD

由上面的分析可知,ICCD 是一个复杂的光电成像系统,在进行光电转换的各个环节均会引入不同程度的噪声。其主要的噪声源有:(1)信号内在噪声,也称为输入噪声或光子噪声,指光信号辐射过程中出现的光量子随机起伏;(2)暗电子发射噪声,由于温度的影响及材料本身的性质,即使在无光照的情况下光电阴极也会有暗电子逸出;(3)读出噪声,指从可见光 CCD 读出信号、量化过程中引入的噪声,如产生-复合噪声、复位噪声等。此外光锥与 CCD 的配合工艺等因素也会引入不同程度的噪声。在 ICCD 系统中,MCP 的电子增益倍数很高,单级在  $10^3 \sim 10^4$  之间,而用于“日盲”成像探测的 ICCD 多采用两级 V 型结构,增益高达  $10^6$ 。在这样高的增益作用下,进入到 MCP 之前引入的噪声对信号的影响将是主要因素,而其它噪声的影响则可以忽略不计。

## 3 ICCD 的信噪比

### 3.1 ICCD 信噪比的定义

为分析上述噪声对系统的影响,引入 ICCD 信噪比的概念。信噪比是一个重要的系统性能参量。对系统进行信噪比评估,建立信噪比模型可以完成成像系统的性能评价。从本质上对影响信噪比的因素进行定量分析,有助于系统开发人员

改进现有系统,提高 ICCD 的探测能力。

一般来说,当 ICCD 用于微光夜视等场合时要求增益较低,单级 MCP 已经能满足要求。这时光电子通过 MCP 倍增后其电子分布将不会超过 CCD 单位像素面积,可以通过等效电子计数法<sup>[3]</sup>对 ICCD 信噪比进行分析、计算。而对于“日盲”紫外微弱信号探测,信号十分微弱,只有通过级联 MCP 提高增益才能实现有效的目标探测。这时,单光电子通过倍增后大量倍增电子会以不同的表面角度及渡越时间在 MCP 出口处逸出,其响应将不可避免地在时间和空间域上扩散。电子在 MCP 中的渡越时间远远小于 ICCD 的积分时间,所以时间域的扩散可以忽略,而空间上扩散将对 ICCD 的信噪比产生重大的影响。根据对系统成像原理的分析,CCD 像面上的图像可以认为是一系列光电子冲激响应在像面的叠加。在下面的分析中,把 ICCD 成像系统认为是线性时不变系统,单光电子的扩散在像面的分布视为系统冲激响应。

设入射到 ICCD 光电阴极上单位时间内的光子数为  $N_{in}$ ,光电阴极的量子效率(QE)为  $\eta$ ,MCP 的开口面积比为  $\tau$ ,光电阴极在单位时间内暗电子发射数为  $N_{dark}$ ,这样进入 MCP 光电子总数为  $N_{total} = (N_{in}\eta + N_{dark})\tau$ 。 $N_{in}$  与  $N_{dark}$  相互独立,均服从泊松分布,因此  $N_{total}$  服从泊松分布。由前面的假设,入射光子图像可以用一系列单位冲激响应表示:

$$i_{in}(x, y) = \sum_{n=1}^{N_{total}} \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (1)$$

其中  $i_{in}(x, y)$  表示坐标  $(x, y)$  处输入图像信号,  $(x_n, y_n)$  表示第  $n$  个光子在 MCP 入口处的坐标。

设 ICCD 的光电冲激响应为  $h(x, y)$ ,则 CCD 的输出图像信号  $i_{out}(x, y)$  是入射图像信号  $i_{in}(x, y)$  与  $h(x, y)$  的卷积,即:

$$i_{out}(x, y) = h(x, y) * * i_{in}(x, y) = \sum_{n=1}^{N_{total}} h(x - x_n, y - y_n), \quad (2)$$

“\* \*”表示二维空间卷积。

式(2)表明输出图像为冲激响应在不同位置对  $(x, y)$  贡献的叠加。设 ICCD 的信噪比定义如式(3)所示:

$$SNR = \frac{E(i)}{\sigma(i)} = \frac{E(i)}{[E(i^2) - E^2(i)]^{1/2}}. \quad (3)$$

由该式可知需要推导信号的数学期望  $E(i)$  和二阶原点矩  $E(i^2)$ 。

### 3.2 图像信噪比的推导

首先计算信号的数学期望,设固定点  $(x_0, y_0)$  信号为  $i_0$ ,对式(2)进行二维傅里叶变换得:

$$I(u, v) = H(u, v) \sum_{n=1}^{N_{total}} e^{-j2\pi(ux_n + vy_n)}, \quad (4)$$

$H(u, v)$  是 ICCD 系统冲激响应的傅里叶变换式,该公式已将随机变量  $x_n, y_n$  与常量  $H(u, v)$  分离。设二维独立随机序列  $\{(x_n, y_n)\}$  的联合概率密度分布函数为  $p(x, y)$ ,其物理意义为入射光子分布在以坐标  $(x, y)$  为中心的微小区域内的概率。设:

$$\phi(u, v) = E(e^{-j2\pi(ux_n + vy_n)}) = \iint_{\Omega} p(x, y) e^{-j2\pi(ux_n + vy_n)} dx dy, \quad (5)$$

则式(4)的数学期望为:

$$E(I(u, v)) = H(u, v) \cdot N_{total} \cdot \phi(u, v), \quad (6)$$

对式(6)进行傅里叶反变换,代入式(4)、(5),计算可知位置  $(x_0, y_0)$  信号的数学期望如式(7)所示:

$$E(i_0) = \iint_{\Omega} E[I(u, v)] e^{j2\pi(ux_0 + vy_0)} du dv = \iint_{\Omega} p(x, y) h(x - x_0, y - y_0) dx dy, \quad (7)$$

式中  $N_{total}$  为一随机变量,故使用数学期望值。

下面计算信号的二阶原点矩  $E(i^2)$ 。由式(4)得:

$$E(i_0^2) = \iint_{\Omega} e^{j2\pi(ux + vy)} du dv \cdot \iint_{\Omega} e^{j2\pi(u'x + v'y)} E[I(u, v)I(u', v')] du' dv', \quad (8)$$

由式(5)、(6)、(7)推导可知:

$$E[I(u, v)I(u', v')] = H(u, v)H(u', v') \cdot [N_{total}\phi(u+u', v+v') + (N_{total}^2 - N_{total})\phi(u, v)\phi(u', v')], \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)计算得:

$$E(i_0^2) = (E(N_{total}^2) - E(N_{total})) \cdot \left[ \iint_{\Omega} h(x - x_0, y - y_0) p(x, y) dx dy \right]^2 + E(N_{total}) \iint_{\Omega} h^2(x - x_0, y - y_0) p(x, y) dx dy, \quad (10)$$

所以,信号  $i_0$  方差为:

$$\sigma^2(i_0) = (E(N_{total}^2) - E^2(N_{total}) - E(N_{total})) \cdot \left[ \iint_{\Omega} h(x-x_0, y-y_0) p(x, y) dx dy \right]^2 + E(N_{total}) \iint_{\Omega} h^2(x-x_0, y-y_0) p(x, y) dx dy, \tag{11}$$

$N_{total}$ 服从泊松分布,有:

$$\sigma^2(N_{total}) = E(N_{total}^2) - E^2(N_{total}) = E(N_{total}),$$

于是,式(11)前一项等于零,在 $(x_0, y_0)$ 处信号标准差为:

$$\sigma(i_0) = E^{1/2}(N_{total}) \cdot \left[ \iint_{\Omega} h(x-x_0, y-y_0) p(x, y) dx dy \right]^{1/2}, \tag{12}$$

$(x_0, y_0)$ 处信噪比为:

$$SNR = \frac{E^{1/2}(N_{total}) \iint_{\Omega} h(x-x_0, y-y_0) p(x, y) dx dy}{\left[ \iint_{\Omega} h^2(x-x_0, y-y_0) p(x, y) dx dy \right]^{1/2}}. \tag{13}$$

从上式可知,固定点 $(x_0, y_0)$ 的信噪比与入射光子数学期望、光电子冲激响应以及入射光子在像面的分布函数有关。

### 3.3 SNR 计算中的参数

为进一步简化式(13),分析信噪比与系统参数之间的关系,采用单色均匀光照射光电阴极,则入射到 MCP 进行电子倍增的光电子  $N_{total}$  的数学期望为:

$$E(N_{total}) = [E(N_{in})\eta + E(N_{dark})] \cdot \tau. \tag{14}$$

通过入射窗进入到光电阴极的光子数  $N_{in}$  数学期望可以由光谱辐照度  $E_{\lambda}(x, y)$  算出:

$$E(N_{in}) = \frac{\lambda}{hc} \int_0^{\Delta t} \iint_{\Omega} E_{\lambda}(x, y) dx dy dt. \tag{15}$$

$\Delta t$  为 ICCD 的积分时间,一般由相机的电子快门控制。 $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速。 $E_{\lambda}(x, y)$  为在位置 $(x, y)$ 的辐照度,在均匀单色光照射时,  $E_{\lambda}(x, y)$  为一常数  $E$ , 则:

$$E(N_{total}) = \left( \frac{\lambda E \eta}{hc} + I_{dark} \right) \Omega \Delta t \tau, \tag{16}$$

$\Omega$  为入射窗面积,  $I_{dark}$  为暗电流,一般由厂商给出。由于入射光子在 MCP 上的均匀分布,有:

$$p(x, y) = 1/\Omega. \tag{17}$$

式(13)系统的冲激响应  $h(x, y)$  被理解为单光电子进入到 MCP 中后通过二次电子倍增及荧光屏作用,最后成像在 CCD 上的响应。一般光学系统的  $h(x, y)$  测定通常采用刀口或点光源测试办法,通过理论计算得出。在 ICCD 系统中,增益

表示对单光电子放大倍数,增益越大,倍数越高,在 CCD 像面上扩散也将更大。在用于紫外微弱信号探测过程中,通过实际测试发现,要进行有效的探测,增益应当设置在 40% (100% 为  $10^6$  倍) 以上,此时单光电子成像已经能够在 CCD 像面上清晰看到。在这种情形下,采用固定增益多次测量单光电子响应后统计分析的方法来分析  $h(x, y)$ , 通过经标定过的图像采集卡采集数据,采用图像处理的方法大量测量单光电子响应得出  $h(x, y)$  的模型。以增益 50% 为例,通过美国国家仪器公司的 Vision Assistant 8.5 分析了 100 帧在极微弱光照情况下的 ICCD 单光电子响应, 得图 2。在图中同时画出了对测试数据进行高斯函数拟合的曲线。

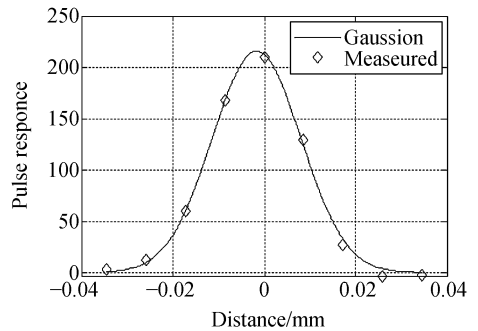


图 2 增益为 50% 时系统的冲激响应  
Fig. 2 Pulse response when gain is set to 50%

通过图 2 可以看出,采用二维高斯函数来拟合 ICCD 的单光电子冲激响应  $h(x, y)$  是合适的,考虑一般的情况,ICCD 光电阴极为圆形,而光电子冲激响应也是中心对称的,所以使用极坐标将在很大程度上简化计算,将  $h(x, y)$  用极坐标表示:

$$h(\rho, \theta) = A e^{-\rho^2/2f^2}. \tag{18}$$

设测试为坐标原点,将式(16)、(17)、(18)代入式(13)可得 ICCD 的信噪比为:

$$SNR = \frac{2\pi R f [(\lambda \eta E / hc + I_{dark}) \Delta / t \tau]^{1/2} (1 - \exp(-\frac{R^2}{2f^2}))}{(1 - \exp(-\frac{R^2}{f^2}))^{1/2}}. \tag{19}$$

## 4 测量实验与结果

为检验信噪比模型,采用如图 3 所示的实验装置对 ICCD 的信噪比进行了测量。实验光源采

用标准氙灯,通过中性衰减片实现光场辐照度调节,通过单色仪将入射光调谐到指定波长,通过狭缝将单色光照射到屏蔽的黑箱中。在屏蔽罩中通过光束旋转镜分别将入射光照射到测试相机及充当绝对参考探测器的光纤光谱仪上,光纤光谱仪已经过定标,用于入射光场绝对辐照度测量,同时将测试相机的输出视频输入到工控机中进行计算处理。为简化实验数据处理,采用 Labview 可视化编程软件及视觉开发模块 Vision 开发了相应的信噪比处理软件,这样在实验中可以快速、准确地处理数据。

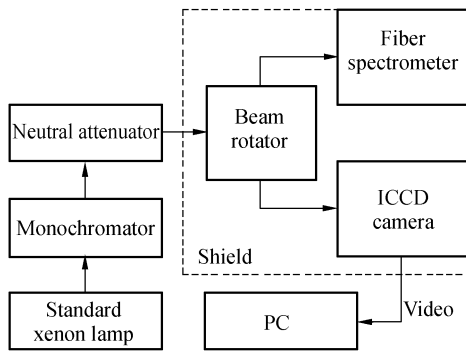


图 3 实验配置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

以某型 SBUV-ICCD 相机为测试对象,该相机采用两级 V 型 MCP,其最大增益可达  $10^6$ 。其部分参数如表 1 所示。

表 1 测试 ICCD 部分参数

Tab. 1 Some parameters of ICCD

| Parameters        | Values                               |
|-------------------|--------------------------------------|
| $I_{\text{dark}}$ | $3 \text{ e}^-/\text{cm}^2/\text{s}$ |
| $\eta$            | Varying with wavelength              |
| $\tau$            | 60%                                  |
| $R$               | 12.5 mm                              |
| $\Delta t$        | 20 ms                                |

为了计算图像信号的信噪比,首先测试 SBUV-ICCD 增益变化时光电子冲激响应中的参数  $f$ ,该参数表示了 SBUV-ICCD 相机冲激响应的扩散程度。采用 4.2 节所述方法测量后,通过高斯曲线拟合可得到参数  $f$ 。图 4 为增益与参数  $f$  的关系图,从该图可以看出,参数  $f$  对增益的变化并不敏感。当 SBUV-ICCD 工作时,SNR 对增

益不敏感,也就是文献[2]所说的光量子受限模式。

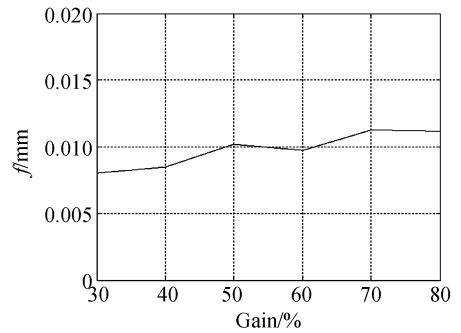


图 4 增益对参数  $f$  的影响

Fig. 4 Relationship between gain and parameter  $f$

采用了图 3 所示实验装置对信噪比模型进行了验证。设相机工作在增益为 50% 的情况下,通过单色仪控制入射波长 240 nm,此时光电阴极的量子效率为 19.0%,通过插入不同的中性衰减片实现辐照度的调节,对于不同辐照度时 SBUV-ICCD 的信噪比有如图 5 所示的关系。图中同时给出了使用式(19)计算得到的信噪比值(实线)。可以看出,理论与实测数据比较吻合,说明了该模型较好地模拟了 SBUV-ICCD 的信噪比。

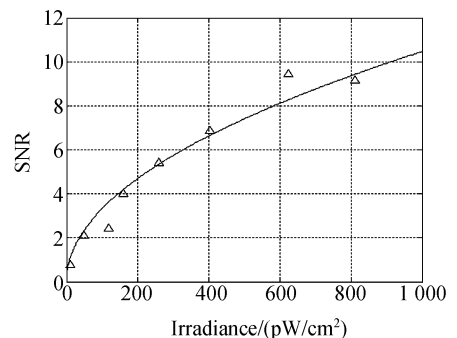


图 5 随辐照度变化的信噪比

Fig. 5 SNR varying with irradiance

## 5 结 论

考虑到 SBUV-ICCD 工作时系统增益高,单光电子通过 MCP 的二次电子倍增后其响应在像面上将不可避免地扩散到 CCD 邻近像素中去,本文将线性系统理论引入到 ICCD 相机信噪比模型中,推导出系统的信噪比模型,并设计实验进行了

模型验证。数据结果显示,该模型很好地模拟了 SBUV-ICCD 的信噪比。

通过该模型得到如下结论:SBUV-ICCD 是一个非常复杂的光电成像系统,其工作时信噪比与系统诸多参数均有关联,在设计过程中要仔细选择各种参数。而在既定参数系统中,SBUV-ICCD 的噪声主要由信号的光量子发射噪声组成,增加积分时间有助于提高 SBUV-ICCD 的信

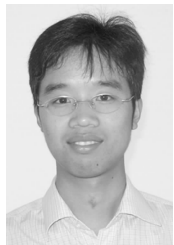
噪比;但增加 SBUV-ICCD 的增益不利于提高信噪比,反而使系统分辨率下降,在实际使用过程中应当根据实际情况选择合适的增益。该结论同样适合于工作在极微弱信号探测领域其他谱段且增益设置较高的 ICCD。上述工作在使用 SBUV-ICCD 中评估、提高系统性能方面提供了有益的参考,对后续的 SBUV-ICCD 自动增益控制等工作有重要的指导意义。

## 参考文献:

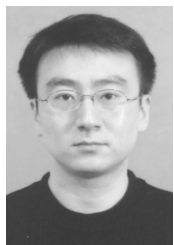
- [1] 李升才,徐宗昌,肖顺旺. 微光增强型电荷耦合装置成像系统三维噪声模型及其测量分析[J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 463-466.  
LI SH C, XU Z CH, XIAO SH W. 3-D noise measurement and analysis for a low-light-level ICCD imaging system [J]. *Acta Armamentarii*, 2006, 27(3): 463-466. (in Chinese)
- [2] FRENKEL A, SARTOR M A, WLODAWSKI M S. Photo-noise-limited operation of intensified CCD cameras [J]. *App. Opt.*, 1997, 36(22): 5288-5297.
- [3] DUSSAULT D, HOESS P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras[J]. *SPIE*, 2004, 5563: 195-204.
- [4] MARK A S. Characterization and modeling of microchannel plate intensified CCD SNR variation with image size [J]. *SPIE*, 1992, 1655: 74-84.
- [5] FRIEDEN B R. *Probability, Statistical Optics, and Data Testing* [M]. New York: Springer-Ver-

- lag, 1984.
- [6] JENTILUCCI E J. *Synthetic simulation and modeling of image intensified CCDs (IICCD)* [D]. Rochester: The College of Science Rochester Institute of Technology, 2000.
- [7] PROXITRONIC COMPANY. Introduction to image intensifier tubes [S]. Germany: PROXITRONIC. Bensheim, 2000.
- [8] PROXITRONIC COMPANY. High performance image intensifiers [S]. PROXITRONIC. Bensheim, Germany, 05, 06, 2001.
- [9] MORAN S E, ULICH B I, ELKINS W P. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance [J]. *SPIE*, 1997, 3137: 430-457.
- [10] 闫丰,于子江,于晓,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 709-713.  
YAN F, YU Z J, YU X, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 709-713. (in Chinese)

## 作者简介:



周 跃(1983—),男,四川南充人,博士研究生,2002 年于东北师范大学获得学士学位,主要从事光电探测信号处理,目标检测及跟踪算法的研究。E-mail: zhouy385@126.com



闫 丰(1975—),男,吉林长春人,助理研究员,2008 年博士后出站,主要从事光电探测器件应用的研究。E-mail: yan.feng@126.com



谷勇强(1982—),男,河北赵县人,研究实习员,博士研究生,主要从事紫外辐射定标及干涉信息处理的研究。E-mail: yqgu82@gmail.com



邓博斯(1985—),男,北京人,硕士研究生,2004 年于吉林大学获得学士学位,主要从事自动控制和嵌入式技术开发方面的研究。E-mail: bosi\_deng@yahoo.com.cn



隋永新(1970—),男,吉林长春人,副研究员,硕士生导师,主要从事信息安全、光学信息融合及辐射定标技术等方面的研究。E-mail: suiyx@sklao. ac. cn

通讯作者:



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,主要从事信息安全、光学信息融合及深紫外光刻技术的研究。E-mail: yanghj@sklao. ac. cn

● 下期预告

## 大接收角、可横向分光、非成像式聚光系统

刘 华,卢振武,张红鑫

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电技术研发中心,吉林 长春 130033)

以传统聚光系统为基础的聚光电池虽然可以减少电池量,但需要精度高的跟踪装置,同时由于电池的吸收光谱较窄,而太阳光谱却较宽,会有很多能量被浪费。针对这种弊病,对横向非成像光学系统进行了研究,设计了两套接受角、聚光比分别为  $6^\circ$ 、30 倍和  $10^\circ$ 、20 倍,并能分光的聚光光学系统。设计结果表明,这些系统的光学效率在接收角范围内均大于 90%。该类系统与高效太阳电池相结合,便会形成高效、便携式、非跟踪太阳电池组件,为那些应用于野外或战场上的技术装备如笔记本电脑、成像、测量、通讯等设备提供电源,从而改善它们的灵活性、耐受性和有效性。