

电子倍增 CCD 性能参数测试方法研究

张闻文, 钱月红, 陈 钱, 顾国华

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 电子倍增 CCD(EMCCD)性能参数测试是电子倍增 CCD 芯片及其成像系统研制的重要辅助手段和设计依据。在对 EMCCD 的工作原理进行了阐述之后,介绍了 EMCCD 的各项特性参数,分析了相关参数的测试方法。针对测试过程中出现的单位转换问题,引入了转换增益的概念,提出了基于改进的光子转移技术的 EMCCD 性能参数的测试方法,建立了 EMCCD 性能参数测试系统,该系统包括高稳定度可控标准钨灯、光学系统、暗箱、数据采集与处理系统等。对 Andor Luca 相机的转换增益、满阱容量、倍增增益、读出噪声、时钟诱导噪声和暗电流进行了测试。实验结果表明:测试值与相机的指标值基本一致,测试结果准确,证明了所提出的测试方法有效可靠。

关键词: 电子倍增 CCD; 测试; 光子转移技术; 转换增益; 噪声

中图分类号: TN223 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3390-06

Performance parameters test of electron multiplying CCD

Zhang Wenwen, Qian Yuehong, Chen Qian, Gu Guohua

(School of Electronic Engineering & Photoelectric technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The performance test of Electron multiplying CCD (EMCCD) is an important adjunct and design basis of electron multiplying CCD chip and the whole imaging system. In this paper, the working principles of EMCCD were introduced, and then the characteristic parameters of EMCCD was presented. Aiming at the problem of unit conversion in the process of testing, the concept of conversion gain was introduced. The parameters test of the electron multiplying CCD was proposed based on improved photon transfer technology, the EMCCD performance parameter testing system also was established. The system included a high stability and controllable standard tungsten lamp, optical system, the black box, data acquisition and processing system. These parameters were tested, such as convert gain, full well, multiplication gain, noise factor, readout noise, dark current noise and clock induced charge noise of Andor Luca camera. The experimental results are really good and agree with the device specifications. These also verify the feasibility and reliability of the test method.

Key words: electron multiplying CCD; test; photon transfer technology; convert gain; noise

收稿日期: 2013-04-09; 修订日期: 2013-05-10

基金项目: 核高基国家重大专项(2013ZX01015001); 装备预研项目(40405030202); “紫金之星”资助项目(AB41378)

作者简介: 张闻文(1981-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微光图像探测与成像器件方面的研究。Email: zhangww@mail.njust.edu.cn

0 引言

很多国家在 EMCCD 的研发、生产和应用领域开展了广泛的工作。不同于传统的微光成像器件,EMCCD 具有高信噪比,使用寿命长、及其带电子倍增功能等众多优点,它的出现成为微光成像的重大突破。在军事监测、生物医学等领域具有广阔的应用前景^[1]。EMCCD 参数测试系统是 EMCCD 研制过程中不可缺少的部分,也就是说参数测试系统的发展必须与 EMCCD 工艺技术的发展同步。一方面,器件在长时间使用过程中,出现不同程度的老化,使得器件手册的参数指标失去参考价值。另一方面,在研制 EMCCD 相机调试过程中,需要随时测试其相关指标,保证系统最终达到预期目标^[2]。而目前,恰恰缺乏这样一套比较完善的参数测试系统。

CCD 的原始输出是光生电子,以电子为单位。经过模数转换器之后以数字图像的形式被读出。由于这些图像数据没有实际物理学单位数值,通常以数字单位(DN)表示^[3-4]。但是这里出现了单位转换的问题,一个数字单位对应多少光生电子数,为此引入了 Janesick 提出的转换增益概念。通常,用来测量转换增益的是光子转移技术(Photon Transfer Technique)^[5]。一般认为信号噪声服从泊松分布,将 CCD 器件的总噪声分解为读出噪声与信号噪声,两者以平方和关系构成了器件总噪声的平方,与 CCD 输出信号的平方根成正比。

但是,Janesick 的光子转移技术是针对普通 CCD 的,EMCCD 属于新型的微光成像器件,倍增寄存器会产生倍增增益,倍增增益会令原本可以忽略不计的时钟诱导噪声变的十分明显,这些都是普通 CCD 不具有的特性,因此在实验过程中,需要将光子转移技术改进以适用于 EMCCD^[6]。

1 光子转移曲线

图 1 所示为光子转移曲线,它表示 CCD 在不同强度的均匀光照下噪声响应曲线。CCD 输出信号强度为横坐标,CCD 输出噪声为纵坐标,并以对数形式表示。曲线中有三个明显的噪声模式,可以近似地分为三个噪声区域:第一部分是读出噪声区,代表在全暗条件下所测的随机噪声,主要来自片上输出放

大器和外部处理电路^[7]。随着光强的逐渐增强,信号的散粒噪声超过读出噪声,占据主导地位,如图中曲线的中间部分所示。散粒噪声服从泊松分布,它是由输入光子数的随机性引起,与器件无关。图 1 的曲线采用对数坐标,散粒噪声被特征化为一条斜率为 1/2 的线段。曲线第三部分是固定图案噪声区域,这种噪声是由像元间灵敏度差异引起的,通常固定图案噪声与输入信号的强度成正比,在光子转移曲线图中的斜率为 1,表达式为:

$$\sigma_{FP} \propto (P_i \times PRUN) \quad (1)$$

式中: σ_{FP} 为固定图案噪声; P_i 为光生电子数。

随着输入照度的增加,信号电荷慢慢把势阱填满。多余的电荷不能进入势阱从而向外溢出,进入邻近势阱。如图 1 中,曲线从峰值急剧下降,峰值点即为 CCD 到达满阱容量。

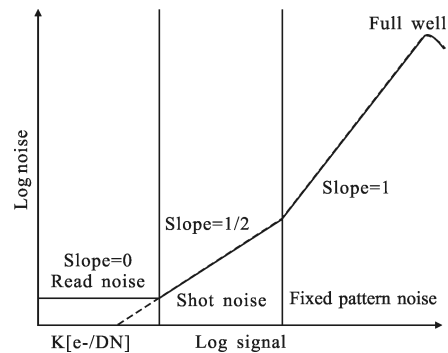


图 1 光子转移曲线

Fig.1 Photon transfer curve

由图 1 完整地给出了光子转移曲线。但在实际应用中,只需要对散粒噪声区的数据进行拟合,其拟合直线在横轴的截距就是转换增益。通常,用差值法消除固定图案噪声以避免它在拟合过程中带来的误差。如图 2 所示,散粒噪声区以斜率为 1/2 延伸到峰值点,这就是经典光子转移曲线^[8]。

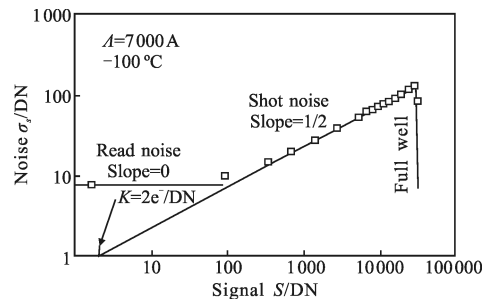


图 2 经典光子转移曲线

Fig.2 Classic photon transfer curve

在经典光子转移曲线测量过程中, CCD 需要在能够提供均匀稳定入射光下, 从完全黑暗状态到满阱饱和状态。图中横坐标 由统计区内的所有像素的均值扣除本底均值后得到, 称为 CCD 输出信号的强度, 表示为:

$$S(DN) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pix}} [S_i(DN)]}{N_{pix}} - S_{Bias}(DN) \quad (2)$$

式中: S_i 为 CCD 统计区域中第 i 个像素的信号值; N_{pix} 为统计区域内的像素个数; S_{Bias} 为本底均值。

纵坐标 $\sigma_s(DN)$ 是 CCD 输出信号的标准差, 即噪声。计算噪声前先要去除图像中的固定图案噪声。具体的实验方法是在同一光强条件下, 连续采集两幅均匀图像, 再将这两幅图像相减。然后计算生成的差值图像的方差:

$$\sigma_s^2(DN) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{pix}} [S_i(DN) - S(DN)]^2}{2N_{pix}} \quad (3)$$

式中: $S_i(DN)$ 为差值图像第 i 个像素的信号值; $S(DN)$ 为差值图像的信号均值^[9]。

2 实验与分析

2.1 实验原理及装置

实验原理框图如图 3 所示。

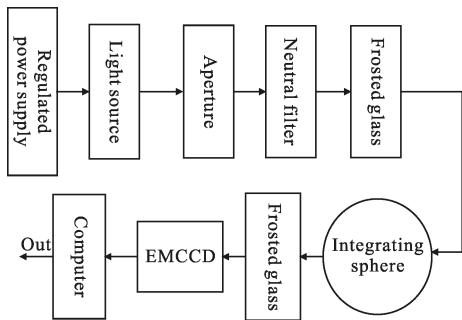


图 3 实验原理框图

Fig.3 Experimental setup

(1) 光源: 高稳定度可控标准钨灯 (2 856 K); (2) 光学系统: 光阑、中性密度衰减片、积分球和白色毛玻璃; (3) 遮光装置: 暗箱; (4) EMCCD 相机: 型号为英国 Andor 公司的 Luca, 芯片为 TI 公司的 TC-247, 有效像素为 680 pixel×500 pixel, 像素大小为 10 μm×10 μm, 14 bit 模/数转换器, 半导体制冷, 工作温度为 -20 ℃; (5) 数据采集与处理系统: 计算机。

实验时, 光源发出的光依次通过光阑、中性密度衰减片、积分球和白色毛玻璃后形成均匀出射光后到达 EMCCD 相机, 输出的图像信号进入计算机进行后续处理。

2.2 EMCCD 光子转移曲线

具体测量步骤如下: (1) 关闭光源、EMCCD 相机的增益和镜头光圈, 连续采集 $N(N \geq 10)$ 幅本底图像求本底均值; (2) 打开光源, 调节光源强度, 分别采集两幅数字图像 F1 和 F2; (3) 将 F1 与 F2 相加后求平均, 得到数字图像 F4, 计算数字图像 F4 的信号均值, 减去步骤 (1) 的本底均值后即为 $S(DN)$; (4) 将 F1 与 F2 相减, 计算差值图像的标准 $\sigma_s(DN)$; (5) 逐渐增加光照强度直至饱和, 重复步骤 (2)~(4), 根据 $S(DN)$ 和 $\sigma_s(DN)$ 绘出 EMCCD 的光子转移曲线, 如图 4 所示。

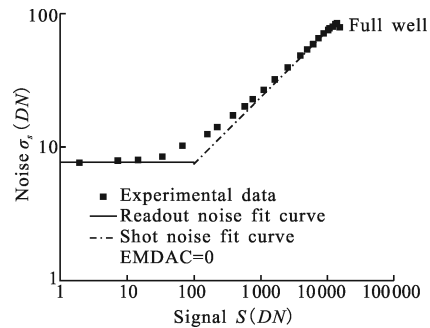


图 4 EMCCD 的光子转移曲线

Fig.4 Photon transfer curve

2.3 转换增益和满阱容量

对图 4 中散粒噪声区域内的实验数据进行拟合, 该曲线在横轴上的截距即为转换增益。最佳拟合曲线为:

$$\sigma_s(DN) = \sqrt{0.56S(DN)} \quad (4)$$

令 $\sigma_s=1$, 则 $S=1.786$, 即转换增益 $K=1.786e^{-1}DN$ 。

对 EMCCD 而言, 转换增益是一个重要的参数, 在下面的实验中, 凡是涉及单位转换的计算均会用到它。

当输出信号强度 $S(DN)=14\ 430DN$ 时, EMCCD 达到满阱容量, 乘以转换增益后为:

$$S_{FW} = KS(DN) = 25\ 771 e^{-} \quad (5)$$

2.4 读出噪声

从图 2 可以看出, 读出噪声是斜率为 0 的水平直线。于是, 对图 4 中读出噪声区域的实验数据进行拟合, 最佳拟合曲线为:

$$\sigma_s = 7.544DN \quad (6)$$

乘以转换增益后计算出 EMCCD 的读出噪声为

$$\sigma_r = K\sigma_s(DN) = 1.78 \times 7.544 \approx 13.5 e^- \quad (7)$$

2.5 倍增增益

实验中使用的 Andor Luca 相机的倍增增益是通过一个 8 bit 的数模转换器 (EM DAC) 进行调节的,调节范围 0~255。0 表示倍增增益关闭,1~255 表示倍增增益打开,且倍增增益随着 EM DAC 的增加而升高。255 表示倍增增益调至最大。但是,EM DAC 的数值并不等于实际的倍增增益。因此,必须对相机的倍增增益进行标定。假设倍增寄存器的输入信号为 Q_{in} ,输出信号为 Q_{out} ,则倍增增益 G 表示为:

$$G = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \quad (8)$$

测试方法如下:(1) 令 EM DAC=0, 连续采集 $N(N \geq 10)$ 幅本底图像,计算出本底均值 $B_0(DN)$;(2) 调节 EM DAC 数值,从 1 逐级增加到 255,重复步骤(1),计算出不同 EM DAC 时的本底均值 $B_x(DN)$;(3) 令 EM DAC=255, 调节光源照度和 EMCCD 相机镜头光圈,保证此时相机的输出图像没有饱和,即输出图像的平均灰度小于 $2^{14}-1$,并且像素最大灰度值亦小于 $2^{14}-1$;(4) 令 EM DAC=0, 连续采集 $N(N \geq 10)$ 幅数字图像,计算出信号均值 $S_0(DN)$;(5) 调节 EM DAC 数值,从 1 逐级增加到 255,重复步骤(4),计算出不同 EM DAC 时的信号均值 $S_x(DN)$;(6) EMCCD 相机倍增增益的计算公式为:

$$G = \frac{S_x(DN) - B_x(DN)}{S_0(DN) - B_0(DN)} \quad x=1, 2, 255 \quad (9)$$

将上述步骤中的参数代入公式(11)即可计算出实际的倍增增益。以 EM DAC 为横坐标,实际倍增增益为纵坐标,生成曲线如图 5 所示。

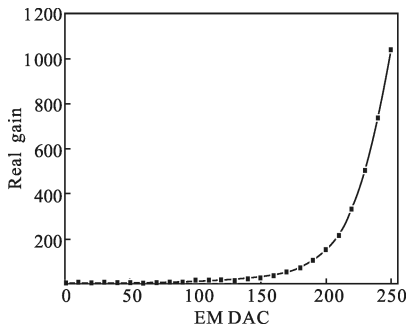


图 5 EMCCD 真实增益与 EM DAC 的关系曲线图

Fig.5 Relationship between real gain of electron multiplying CCD and EM DAC

从图中可以看出,EMCCD 相机的实际倍增增益随着 EM DAC 的增加呈指数式增长。当 $0 < EM DAC \leq 150$ 时,曲线形状比较平坦,倍增增益缓慢增长;当 $150 < EM DAC \leq 200$ 时,曲线逐渐上升,倍增增益明显增大;当 $200 < EM DAC \leq 255$ 时,倍增增益急剧上升。

2.6 时钟诱导噪声

时钟诱导噪声在普通 CCD 中很少被提及,因为其数量极少,不是主要的噪声来源,相对于读出噪声和暗电流噪声可以忽略。而在 EMCCD 中,极个别的时钟诱导噪声经过倍增寄存器倍增后也会变得十分明显。图 6 分别为无增益和高增益时 EMCCD 的本底值。从图中可以看出,无增益时 EMCCD 相机的本底噪声较小且无明显起伏。高增益时,图中出现很多脉冲尖峰,本底噪声迅速增大。

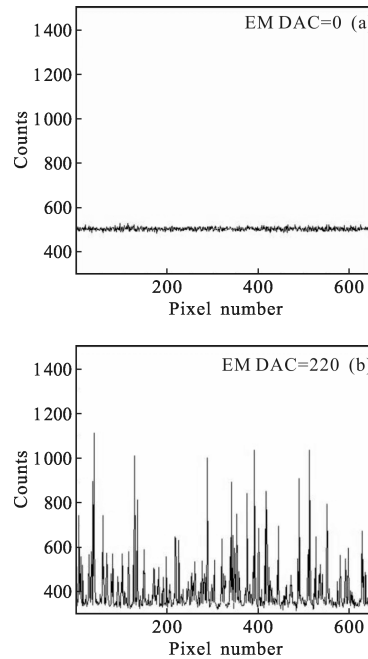


图 6 EM DAC=0 和 EM DAC=220 EMCCD 的本底值

Fig.6 Background values of electron multiplying CCD when EM DAC=0 and EM DAC=220

本底噪声由时钟诱导噪声和读出噪声组成。从文中可知,读出噪声与倍增增益无关,提高倍增增益并不会使读出噪声增大。由此可以推断,图 6(b)中的脉冲尖峰是时钟诱导噪声引起的。时钟诱导噪声的计算公式为:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{\sigma_B^2 - \sigma_r^2}{GF}} \quad (10)$$

式中: σ_B 为本底噪声; σ_r 为读出噪声; G 为 EMCCD

的倍增增益; F 为噪声因子。

其中 $F=\sqrt{2}$, $\sigma_r=13.5e^-$ 。实验时,采集一系列不同增益下的本底图像,分别计算出它们的本底噪声,根据公式(11)算出不同增益条件下的时钟诱导噪声及其均值,如表 1 所示。

表 1 不同增益条件下的本底噪声和时钟诱导噪声
Tab.1 Background noise and clock induced charge noise under different gains

EM DAC	G	Background noise (e ⁻ /pixel)	Clock induced charge noise (e ⁻ /pixel)	Average of clock induced charge noise (e ⁻ /pixel)
170	54.428	26.720 7	0.299 809	0.323 142
180	74.461 7	35.553 54	0.312 456	-
190	103.634	49.336 82	0.323 842	-
200	153.607	70.237 66	0.317 327	-
210	215.077	104.699 8	0.341 36	-
220	332.043	162.123 4	0.344 058	-

2.7 暗电流

暗电流与工作温度和积分时间有关,随着工作温度的降低迅速减小,与积分时间成正比。

实验使用的 Andor Luca 相机采用半导体制冷,工作温度为-20℃,暗电流被有效抑制,经过长时间积分也不太明显。暗场是相机在黑暗环境中经过一定积分时间后输出的图像,记录了器件的暗电流大小。实验采集了无增益时不同积分时间下 EMCCD 相机的暗场图像,如图 7 所示。

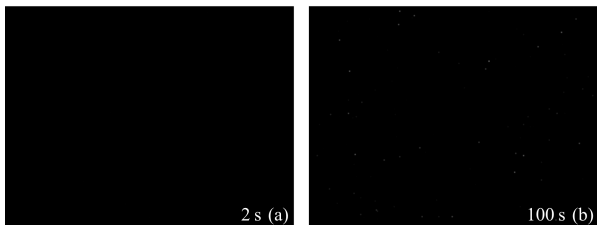


图 7 暗场图像
Fig.7 Dark images

从图中可以看出,不同像素中暗电流数值也不

一样,长时间积分后,有些像素特别亮,即暗电流大,这部分像素称为“热点”。分析了不同积分时间下的暗场图像,选出四个“热点”计算出其中的暗电流,如表 2 所示。

表 2 EMCCD“热点”中的暗电流

Tab.2 Dark current in hot pixels of electron multiplying CCD

Integration time coordinates	2 s	5 s	10 s	20 s	60 s	100 s
(409,32)	180	514	1 071	2 179	6 264	9 950
(409,418)	103	316	649	1 315	3 823	6 201
(642,8)	99	275	595	1 180	3 358	5 373
(649,442)	115	337	694	1 401	4 216	6 779

根据表 2 中的实验数据绘出 EMCCD “热点”中暗电流曲线,如图 8 所示。

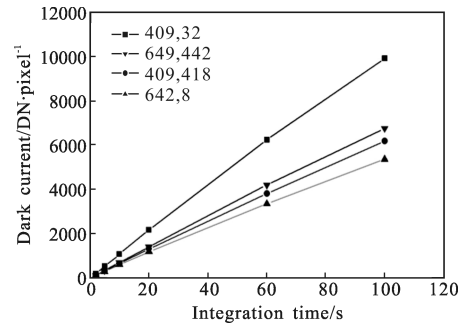


图 8 EMCCD“热点”中的暗电流曲线

Fig.8 Dark current in hot pixels of Electron multiplying CCD

从图中可以看出,“热点”中的暗电流随着积分时间延长越来越大,符合一般的暗电流特性。不同“热点”中的暗电流也不一样,斜率越大,暗电流越大。

2.8 实验分析

为了验证测试方法的可行性和准确性,将实验测试值与相机的指标值进行对比分析,如表 3 所示^[10]。

表 3 测试值与指标值对比

Tab.3 Test values compared with index values

Parameter	Full well(e ⁻)	Readout noise(e ⁻)	Gain
Index values	26 000	15	1-1 000
Test values	25 771	13.5	1-1 027

从表中可以看出,文中的测试值与指标值基本一致,证明提出的测试方法准确有效。(注:由于数据手册中没有转换增益、时钟诱导噪声和“热点”的指标值,故未进行对比)。

3 结 论

文中提出了基于改进的光子转移技术的 EMCCD 性能参数的测试方法,建立了 EMCCD 性能参数测试系统,对 Andor Luca 相机的转换增益、满阱容量、倍增增益、读出噪声、时钟诱导噪声和暗电流进行了测试。实验结果表明,测试值与相机的指标值基本一致,测试结果准确,证明了所提出的测试方法有效可靠。

参 考 文 献:

- [1] Xu Hongtao, Shao Xiaopeng, WangYang. Automated performance parameter measurement system for charge-coupled devices[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(6): 271-275. (in Chinese)
许宏涛, 邵晓鹏, 王杨. CCD 芯片性能参数测量系统[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(6): 271-275.
- [2] Li Binhua, Wei Mingzhi, Ye Binxun, et al. Experiment study on low light level imaging characteristics of KAF-4301ECCD at low temperatures[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(1): 3-7. (in Chinese)
李彬华, 魏名智, 叶彬浔, 等. KAF-4301E CCD 在低温下微光成像特性的实验研究[J]. *光学技术*, 2006, 32(1): 3-7.
- [3] Li Binhua, Ye Binxun. Improvement on test and reduction methods for readout noise and charge transfer efficiency of CCD camera [J]. *Astro nautical Research & Technology*, 2005, 2(3): 177-185. (in Chinese)
李彬华, 叶彬浔. CCD 相机读出噪声、电荷转移效率的测试和归算的改进方法 [J]. *天文研究与技术*, 2005, 2(3): 177-185.
- [4] Song Qian, Ji Kaifan, Cao Wenda. Laboratory evaluation of CCD for astronomical application [J]. *Acta Astrophysica Sinica*, 1999, 19(3): 333-337. (in Chinese)
宋谦, 季凯帆, 曹文达. 天文用电荷耦合器件的实验室检测[J]. *天体物理学报*, 1999, 19(3): 333-337.
- [5] Janesick J R. Scientific Charge Coupled Devices [M]. USA: SPIE Press, 2001.
- [6] Deweert M J. Photon transfer methods and results for electron multiplication CCDs[C]//SPIE, 2004, 5558: 248-259.
- [7] Zeng Zhirong. CCD calibration of solar X-EUV imaging telescope [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2009. (in Chinese)
曾智蓉. 太阳 X-EUV 成像望远镜 CCD 标定方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [8] Janesick J R. CCD transfer method-standard for absolute performance of CCDs and digital CCD camera systems[C]//SPIE, 1997, 3019: 70-102.
- [9] Zhang Wenwen. Optimum operation mode of electron multiplying CCDs based on the noise performance [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010.
张闻文. 基于噪声特性的电子倍增 CCD 最佳工作模式研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [10] Luca^{EM} S Specifications-Andor Technology [EB/OL]// http://www.andor.com/pdfs/specifications/Andor_Luca_-_S_658M_Specifications.pdf, 2008.