

文章编号:1002-2082(2009)03-0386-05

# 电子倍增 CCD(EMCCD)的噪声特性分析

唐红民<sup>1,2</sup>, 魏宏刚<sup>1</sup>, 廖 胜<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**介绍了EMCCD的结构原理,详细分析了EMCCD的噪声来源。利用在EMCCD芯片内嵌入独特的全固态电子倍增结构,实现放大信号,抑制噪声的功能。通过对几种主要噪声的数学模型进行分析,总结出EMCCD噪声的3点特性:EM增益有效抑制了读出噪声;EM增益过程产生的噪声因子对倍增结构之前的噪声有放大作用;时钟感生电荷(CIC)的影响在EMCCD中变得重要。提高增益、深度制冷、时钟波形优化等方法可有效抑制噪声。

**关键词:**电子倍增 CCD; 噪声因子; 时钟感生电荷(CIC)

中图分类号: TN223

文献标志码: A

## Analysis of noise performance of EMCCD

TANG Hong-min<sup>1,2</sup>, WEI Hong-gang<sup>1</sup>, LIAO Sheng<sup>1</sup>

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** The structure of EMCCD is introduced. The functions of signal amplification and noise restraint were realized by inserting the all-solid-state electron multiplying structure in the EMCCD chip and amplifying the charge coming out in horizontal transfer before detection according to the noise resources of EMCCD. Through a theoretical analysis of mathematical models for the main noises of EMCCD, three characteristics of EMCCD noise were summed up: the EM gain can effectively restrain the read out noise; the noise factor generated during the EM gain process has the function of amplifying the noise produced before the multiplying structure; the effect of CIC on the EMCCD performance is serious. It is pointed out that the improvement of EM gain, aggravation of cooling and optimization of clock wave form can effectively restrain the noise.

**Key words:** electron multiplying CCD; noise factor; CIC

## 引言

在微光成像领域,常规 CCD 因为灵敏度相对较低而无法与 ICCD(intensified CCD)和 EBCCD(electron bombardment CCD)相比。ICCD 最大的优点是可以通过微通道板 MCP(micro channel plate)获得很高的电子增益,但 ICCD 量子效率不高,噪声因子很大,空间分辨率低。EBCCD 克服了 IBCCD 的一些缺点,性能上具有与 ICCD 类似的高

增益,噪声因子比 ICCD 小得多,具有比 ICCD 更高的空间分辨率。但是 EBCCD 容易因曝光过度而损坏,而且它结构复杂,造价高。EMCCD(electron multiplying CCD)的出现是 CCD 技术一个新的突破,它采用了芯片上电子增益技术,不仅具有与 ICCD 和 EBCCD 一样的高灵敏度,还具有高分辨率、高读出速度、低噪声等诸多优点,特别适合各种微光快速成像领域的应用。2001 年,美国德州仪器

收稿日期:2008-09-27; 修回日期:2008-11-24

作者简介:唐红民(1983-),男,湖南东安县人,硕士研究生,主要从事 EMCCD 在热环境中的应用研究工作。  
E-mail:hmtang@yahoo.cn

公司(Texas instrument)、英国 Marconi 应用技术公司和 E2V 公司相继推出了自己的 EMCCD 芯片产品。同年,Andor 公司也推出了他们的 EMCCD 相机产品。几年来,EMCCD 在技术和应用上都得到较快的发展。

## 1 EMCCD 的结构原理

EMCCD 在结构上较常规 CCD 有重要的改进,增加了实现信号放大的电子倍增寄存器结构,其结构原理如图 1 所示。

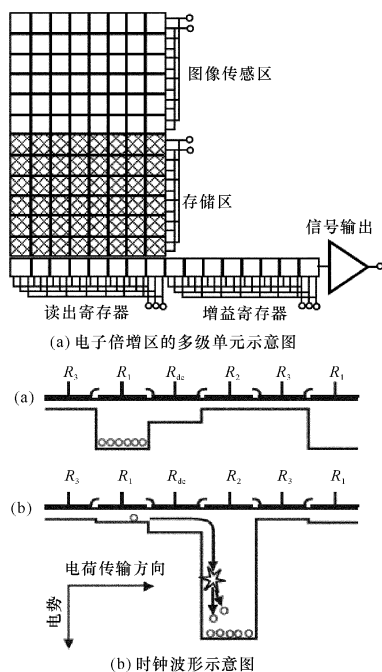


图 1 EMCCD 结构原理图

Fig. 1 Structural principle of EMCCD

如图 1(a)所示,EMCCD 是在读出端之前添加了一个电子倍增寄存器(multiplication register)。图 1(b)是这个倍增寄存器结构中倍增单元示意图,其结构类似于四相 CCD,但与一般的四相 CCD 不同的是此处的电极  $R_2$  的电压高(如 30~40V)。电极  $R_2$  与  $R_{dc}$  间形成一个较大的电势差,当电荷载流子从  $R_{dc}$  下的势阱流入  $R_2$  下的势阱时,会发生碰撞电离(impact ionization),产生更多的电荷载流子,从而实现电荷载流子倍增(CCM: charge carrier multiplication)。这种在倍增单元中发生的通过碰撞电离实现载流子增加的过程是个随机过程,每单元的平均增益在 1%~1.5%之间(记为  $R$ ),经过  $N$

级后得到总的增益  $G$  为

$$G = (1 + R)^N \quad (1)$$

如取  $R$  为 1.3%,  $N$  为 600,则  $G$  为 2 321,可见增益寄存器可以极大地放大水平转移过来的电荷。

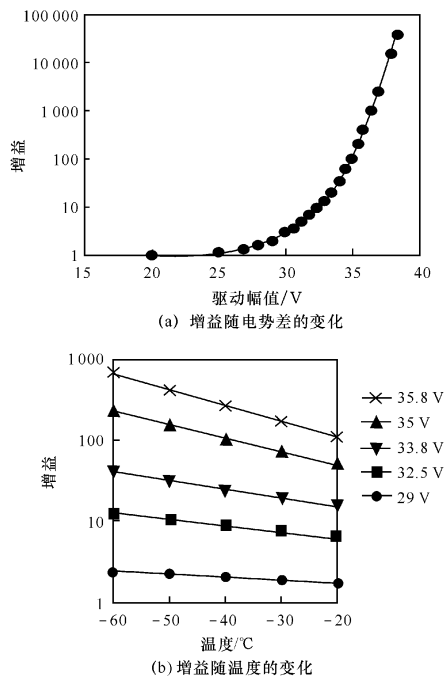


图 2 电压和温度对增益的影响<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Effect of voltage and temperature on gain

已有的理论研究和实验结果都表明增益受  $R_2$  和  $R_{dc}$  之间的电势差  $\Delta\varphi (=R_2 - R_{dc})$  控制。因此,可以通过调节  $\Delta\varphi$  来实现 EMCCD 增益可调,使用中可以通过软件实时地调节增益。图 2 表明温度对增益有较大的影响。在可行范围内,增加增益寄存器的级数,增大电压幅值,以及降低芯片温度等都可以提高增益倍数。获得增益  $G$  后,在一个读出端情形下,EMCCD 的信噪比<sup>[2]</sup>可以表示为

$$SNR = \frac{S_{\text{signal}}}{\sqrt{F^2(S_{\text{signal}} + S_{\text{dark}} + S_{\text{spurious}}) + \frac{\sigma_{\text{real}}^2}{G^2}}} \quad (2)$$

式中:  $F$  为倍增过程导致的噪声因子;  $S_{\text{signal}}$  为信号电荷;  $S_{\text{dark}}$  为暗电流电荷;  $S_{\text{spurious}}$  为电荷转移过程中产生的假信号 CIC(clock induced charge)。

## 2 EMCCD 的噪声特性

CCD 相机(包括 EMCCD)噪声可以分为片上噪声和片外噪声。其中片上噪声是指产生在 CCD

芯片上的噪声,包括暗电流、光子散粒噪声、假信号、固定图形噪声、胖零噪声、转移噪声、复位噪声和残像等。片外噪声则包括前置放大噪声、ADC 量化噪声、时钟波动噪声、电磁干扰、以及串扰等<sup>[3]</sup>。CCD 片上噪声也可以分为随机噪声和固定图案噪声。固定图案噪声容易用数字图像处理的方法去除,随机噪声中影响相对较大的有光子散粒噪声、读出噪声和暗电流噪声。在此主要讨论片上随机噪声,故 CCD 相机总的噪声<sup>[4]</sup>可以简写成

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{signal}}^2 + \sigma_{\text{dark}}^2 + \sigma_{\text{readout}}^2} \quad (3)$$

图 3 表示了 3 种主要噪声对信号的影响。对于 EMCCD 而言,主要的噪声依然是光子散粒噪声、暗电流噪声和读出噪声,但是噪声因子和假信号噪声也不容忽视。如(2)式,EMCCD 总的等效噪声为

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{F^2(S_{\text{signal}} + S_{\text{dark}} + S_{\text{spurious}}) + \frac{\sigma_{\text{real}}^2}{G^2}} \quad (4)$$

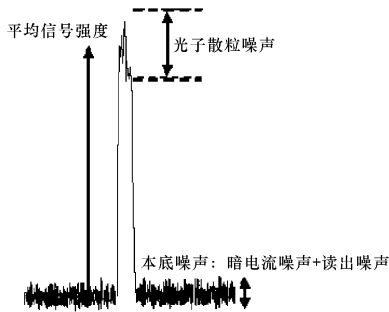


图 3 加在信号上的几种主要噪声

Fig. 3 Several main noises exerted on signal

### 2.1 光子散粒噪声与暗电流噪声

(4)式中  $S_{\text{signal}}$  项对应光子散粒噪声。光子散粒噪声是光子入射及光电转化过程随机性造成的,它决定 EMCCD 的噪声极限。其表达式<sup>[4]</sup>为

$$\sigma_{\text{shot}} = G \times F \times \sqrt{\eta \varphi_p \tau} = F \sqrt{S_{\text{signal}}} \quad (5)$$

式中:  $\eta$  为 EMCCD 的量子效率;  $\varphi_p$  为平均光子强度(photon/pixle. sec);  $\tau$  为曝光时间。(5)式表明光子散粒噪声随着光信号的增大而增大,100 个光电子的光子散粒噪声为 10 个。(5)式同时还表明,其值与噪声因子  $F$  也有关。

(4)式中  $S_{\text{dark}}$  对应的项是指暗电流噪声。EMCCD 中的暗电流同常规 CCD 一样,由 3 部分组成,他们分别是:耗尽层内通过复合(形成中心)产生的暗电流,通过表面态产生的暗电流,通过本征跃迁过程产生的暗电流。EMCCD 中的暗电流噪

声<sup>[4]</sup>可以表示为

$$\sigma_{\text{dark}} = F \sqrt{S_{\text{dark}}} = F(2.55 \times 10^{15} N_{\text{dc0}} \tau \cdot d_{\text{pix}}^2 T^{3/2} e^{\frac{-E_g}{2kT}})^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $E_g$  为禁带宽度;  $N_{\text{dc0}}$  为 300K(绝对温度)时电流(以 nA/cm<sup>2</sup> 为单位);  $d_{\text{pix}}$  为像元的边长(以 cm 为单位);  $k$  为波尔兹曼常数;  $\tau$  为积分时间。由(6)式可见,温度对暗电流的影响非常大。

### 2.2 读出噪声

读出噪声是信号电荷包被转换为电压并在读出过程中产生的总噪声,它包括复位噪声、转换噪声和闪烁噪声等。对于常规 CCD 而言,读出噪声是影响最大的噪声。因为读出噪声是随着 CCD 的读出速率增加而增大,为了降低读出噪声通常采用慢扫描技术,如此则降低了 CCD 读出速度。EMCCD 在信号读出之前将信号进行了放大,得到非常小的等效读出噪声,在较高读出速率下克服了读出噪声的影响。等效读出噪声的定义为  $\sigma_{\text{effective\_readout}} = \sigma_{\text{real\_readout}}/G$ , 其中,  $\sigma_{\text{real\_readout}}$  为实际的读出噪声,  $\sigma_{\text{effective\_readout}}$  为等效读出噪声。当  $G$  很大时,等效读出  $\sigma_{\text{effective\_readout}}$  变得很小。如取  $G$  为 1 000,假定实际的读出噪声为 200 个电子,则等效读出噪声为 0.2 个电子,读出噪声被抑制。这是 EMCCD 的灵敏度高于常规 CCD 的关键。

### 2.3 噪声因子 $F$

电荷在增益寄存器中倍增的过程是个随机的过程。在一定增益设置下,一定数量的电子经过增益寄存器后会以很小的概率输出不同数目的电子。由于电子倍增过程的这种随机性,以及增益区中某些电荷损失机制,倍增过程会引入一个额外的噪声。这个额外的噪声被描述成噪声因子。由(4)式知,光子散粒噪声、暗电流噪声和 CIC 要被噪声因子  $F$  倍乘,可见噪声因子对 EMCCD 的噪声性能有重要影响。噪声因子的定义表达式为<sup>[8]</sup>

$$F^2 = \frac{1}{G^2} \cdot \frac{\sigma_{\text{out}}^2}{\sigma_{\text{in}}^2} \quad (7)$$

式中:  $G$  为总增益;  $\sigma_{\text{out}}^2$  为增益区的输出电荷方差;  $\sigma_{\text{in}}^2$  为增益区输入电荷的方差。Hynecek<sup>[5]</sup>分析得出,当输入的电子数目  $N_i$  较大时(假定输入电子数服从泊松分布),则输出电子数的概率分布函数为

$$P(n, N_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi F^2 G^2 N_i}} \exp\left(\frac{-(n - GN_i)^2}{2F^2 G^2 N_i}\right) \quad (8)$$

由中心极限定理,当输入  $N_i$ (如  $N_i=100$ )和增

益倍数 $G$ 都较大时,输出信号的概率分布趋于正态分布,分布函数曲线的最大值对应于 $N_i \times G$ 。

Robbins 和 Hadwen 给出了求噪声因子的可测的公式<sup>[6]</sup>:

$$F^2 = 2(G-1)G^{-(N+1)/N} + \frac{1}{G} \quad (9)$$

式中 $N$ 为增益寄存器中的增益单元数。由(9)式可知 $G$ 和 $N$ 的增大使得 $F$ 趋向于 $\sqrt{2}$ 。此外,Michael J. DeWeert 等人给出了另外一种估算 $F$ 的方法<sup>[9]</sup>。

#### 2.4 假信号电荷

假信号电荷主要是指时钟感生电荷(CIC: clock induced charge)。CIC的形成机理是:在电荷转移的过程中,当时钟电压反转,空穴载流子停止迁移,其中很小部分空穴被 $\text{SiO}_2$ 表面陷阱捕获。当下一个时钟周期到来时,被捕获的空穴从 $\text{SiO}_2$ 表面被加速,以足够的能量撞击Si原子产生电子-空穴对,产生的电子被收集到最近的势阱中成为假电荷。CIC在成像区、存储区(以帧转移结构为例)和增益区都会产生。CIC的大小与许多因素有关,其中基底偏置电压的幅值、时序脉冲波形和并行转移频率对其影响较大。CIC与并行转移工作频率大致成反比,要减小CIC就应该尽可能增大并行转移频率。CIC会随着时钟上升沿的变窄而增大,将时钟周期设置在200 ns~300 ns之间较为合适。需要注意的是,电荷包每转移一次产生的CIC很小,约为 $10^{-5}$ 个电子,总的CIC幅值随着电荷包的被转移次数增加而累积增大。以CCD97反转模式为例,一个电荷包在读出前总的转移次数为1 056次,最后总的CIC电荷约为0.1个电子。

任何CCD中都有CIC,但只是在EMCCD中才被观察到。因为对常规CCD而言,CIC相对于读出噪声和暗电流噪声较小,被淹没于其中。而在微光照条件下,EMCCD的其他噪声被很好地抑制,CIC经倍增而被观察到。可以通过仔细地选择时钟参数,优化时钟波形和适当提高并行转移频率来降低CIC。

#### 2.5 EMCCD 噪声综合分析

由以上对EMCCD噪声的分析,可得出几点:

1) 若在强光照下应用,EMCCD的光子散粒噪声比读出噪声大很多。但在微光照情况下,光子散粒噪声与读出噪声相当或者更小。

2) 读出噪声与读出速率有关,当读出速率较高,而增益 $G$ 较小时,读出噪声较大(如1elec(rms)@1 MHz,22倍增益)。可以通过在合适范围内通

过提高增益倍数来降低读出噪声。

3) 从(6)式可知暗电流噪声受温度影响非常大,因此通常要对EMCCD进行制冷以抑制暗电流噪声,如在芯片内封装制冷片(如TI公司TC247芯片),以及采用密封半导体制冷技术等。如图2(b)所示,EMCCD芯片通常工作在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。Andor公司的iXon<sup>EM</sup>系列产品可以通过热电制冷将芯片温度降低到 $-100\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。

4) EMCCD的假信号噪声一般相对很小,但在光子计数模式下其他噪声被很好抑制后,假信号噪声就成为进一步提高EMCCD探测器灵敏度所必须关注的一种噪声。CIC可以通过时钟优化设置,适当提高电荷转移频率和降低基底偏置电压等措施得以抑制。

5) 增益寄存器的电子倍增过程引入了噪声因子。噪声因子对上述几种噪声产生放大效果。(9)式表明噪声因子与增益寄存器的级数和增益等因素有关,随着级数的增加,增益倍数的增大,噪声因子趋近于 $\sqrt{2}$ 。文献[10]在 $10^{-2}\text{ lx}$ 的照度条件下,比较了EMCCD与其他3种CCD噪声性能后得出:EMCCD噪声因子介于ICCD和EBCCD之间为1.4,EMCCD的信噪比远大于常规CCD和ICCD。

总之,EMCCD独特的电子倍增结构导致了它独特的噪声性能。EMCCD的噪声特性主要有三点:1) EM增益的存在有效抑制了读出噪声;2) EM增益过程引入了新的噪声,即噪声因子,它对除读出噪声以外的其他噪声有倍乘放大作用;3) CIC在总噪声中变得重要。要充分发挥EMCCD的优势,在常规CCD降噪措施的基础上,应该适当提高增益倍数,对芯片进行充分制冷,优化时钟设置和电荷的并行转移频率。EMCCD最适合于灵敏度和读出速度要求较高的微光快速成像领域的应用。

### 3 结论

本文在阐释EMCCD结构原理的基础上详细分析了EMCCD的噪声特性。EMCCD在结构上增加了基于碰撞电离现象的全固态电子倍增(CCM)结构,将水平转移出来的电荷在被检测之前进行放大,抑制了读出噪声,但同时也带来了额外的噪声因子。对EMCCD有重要影响的噪声有光子散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声、噪声因子和假信号噪声等,它们分别可以通过提高增益、制冷、优化时钟设置等措施降低。

EMCCD 具有单光子探测能力,再加上它在信噪比、量子效率、分辨率、读出速率和便捷性等优势,已经在生物学、物理学、天文学以及空间技术等众多领域得到较多应用。随着EMCCD 技术的不断提升和完善,其应用必将越来越广泛。

#### 参考文献:

- [1] DENVIR D J, EMER C. Electron multiplying CCDs [J]. SPIE, 2003, 4877: 55-68.
- [2] OLIVIER D. L3CCD results in pure photon counting mode[J]. SPIE, 2004, 5499: 219-227.
- [3] JANESICK J R. Scientific charge-coupled devices [M]. USA: SPIE Press, 2001: 605-719.
- [4] DAVID D, PAUL H. Noise performance comparison of ICCD and EMCCD cameras [J]. SPIE, 2004, 5563: 159-204.
- [5] HYNCEK J. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs [J]. IEEE Transactions on Electron Devices. 2003, 50(1): 239-245.
- [6] ROBBINS M S, HADWEN B J. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2003, 50: 1227-1232.
- [7] PLAKHOTNIK T, CHENNU A, ZVYAGIN A V. Statistics of single-electron signals in electron multiplying charge coupled devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006, 53(4): 618-622.
- [8] HYNCEK J. Impactron—a new solid state image intensifier [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(10): 2238-2241.
- [9] DEWEERT M J. Photon transfer methods and results for electron multiplication CCDs [J]. SPIE, 2004, 5558: 248-259.
- [10] 许武军, 曾艳, 危峻, 等. 微光视觉 CCD 在卫星云图观测中的应用[J]. 上海航天, 2006(3): 28-31.  
XU Wu-jun, ZENG Yan, WEI Jun, et al. Application of L3 vision CCD in satellite nephograph [J]. Aerospace Shanghai, 2006 (3): 28-31. (in Chinese with an English abstract)