

文章编号: 0253-2239(2008)06-1161-06

电子倍增 CCD 的电荷倍增特性研究

何伟基 陈 钱 屈惠明 秦 剑

(南京理工大学电子信息工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 建立了电子倍增 CCD 的载流子倍增寄存器的电荷倍增模型, 分析了电子倍增 CCD 的结构特征和载流子倍增寄存器的工作原理及其电荷倍增特性。利用 Z 域分析方法得到载流子倍增寄存器的电荷倍增传递函数及其幅频响应。计算表明, 提高载流子倍增寄存器的电荷倍增系数可以提高电子倍增 CCD 的幅频响应。同时, 用增益起伏因子来分析载流子倍增寄存器的增益起伏特性, 得到了电荷倍增率, 寄存器级数与增益起伏因子的数值关系。在寄存器级数 $N=400$ 条件下, 当电荷倍增系数 $\alpha \leq 0.15$ 时, 增益起伏因子随电荷倍增系数增大而增大; 而当 $\alpha \geq 0.15$ 时, 增益起伏因子随电荷倍增系数的增大而减小。通过典型的电子倍增 CCD 相机的实验验证了建立的模型。

关键词 电子倍增 CCD; 电荷倍增; Z 域变换; 增益起伏因子

中图分类号 TN223 文献标识码 A

Charge Multiplication of CCD Based on Electrons Multiplication

He Weiji Chen Qian Qu Huiming Qin Jian

(School of Electronic Engineering and Optoelectronics Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract A charge multiplication model of charge carrier multiplier (CCM) in electron-multiplication charge-coupled-device (EMCCD) was proposed. The EMCCD architecture and the theory of CCM with its performance on electrons multiplication were analyzed. The transform function of charge multiplication in CCM was presented based on Z transform, as well as the amplitude-frequency response. The results show that amplitude-frequency response of CCM increases as the charge multiplication ratio increases. Then gain-fluctuation was studied with the gain-fluctuation factor, and the relation between gain-fluctuation factor, charge multiplication ratio α and CCM stages N was obtained. The numerical results show that the gain-fluctuation factor increases as α increases for $\alpha \leq 0.15$ and $N=400$, but the gain-fluctuation factor decreases as α increases for $\alpha \geq 0.15$. Those numerical results are validated with practical experience.

Keywords EMCCD; charge multiplication; Z transform; gain-fluctuation factor

1 引 言

在 21 世纪初, 电子倍增电荷耦合器件 (EMCCD) 的面世使低照度成像技术从“真空电子图像增强时代”跨入了“全固态图像增强时代”。EMCCD 与普通 CCD 不同, 在读出寄存器和读出放大器之间增加了电荷载流子倍增寄存器 (CCM)。电荷载流子倍增寄存器利用载流子的碰撞电离效应实现了电荷载流子接近零噪声的电荷级放大倍增,

从而有效提高传感器的探测灵敏度。

EMCCD 在低照度条件下的良好性能, 使 EMCCD 及以 EMCCD 为核心的成像技术的研究成为崭新而重要的研究领域。Jaroslav Hrynciek^[1] 和 Paul Jerram^[2] 等人的论文论述了 EMCCD 的基本结构, 论述了 EMCCD 内载流子倍增的基本原理, 但没有给出载流子倍增寄存器的倍增模型; Mark Stanford Robbins^[3] 和 Takahiro Nishiwaki^[4] 则根

收稿日期: 2007-09-04; 收到修改稿日期: 2007-12-12

基金项目: 国防基础科研(A2620060242)和武器装备预先研究(4040508011)资助课题。

作者简介: 何伟基(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光电成像器件理论与应用等方面的研究。

E-mail: njustheweiji@yahoo.com

导师简介: 陈 钱(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测与光电成像理论等方面的研究。

E-mail: developer_plus@163.com

据噪声因子的定义,推导了 EMCCD 的噪声因子的理论表达式,同时通过实验测试证明了 EMCCD 的良好性能。当前,大多数的研究工作主要围绕 EMCCD 成像的应用^[5,6]。

针对 EMCCD 内的载流子倍增寄存器,通过建立其电荷传输的模型,研究其电荷倍增的频率特性和增益起伏特性。利用离散时间系统的 Z 域分析方法建立载流子倍增寄存器电荷倍增的数学模型,得到其幅频响应的理论计算方法。针对噪声因子依赖于输入噪声,不能完全反映 EMCCD 的载流子倍增寄存器的增益起伏特性的不足,本文利用增益起伏因子来衡量其增益起伏特性,并得到了增益起伏因子的计算方法。

2 电荷倍增的数学模型

EMCCD 与普通 CCD 的不同之处在于增加的载流子倍增寄存器。信号电荷在进入读出放大器转换为电压信号之前进入载流子倍增寄存器,与晶体发生碰撞电离,产生新的电子-空穴对。在 n 沟道器件中,电子-空穴对中的电子将加入到信号电荷包中,而空穴将漂移到器件衬底。从而实现了对信号的电荷级放大。

与普通的串行读出寄存器相比,载流子倍增寄存器用倍增相 Φ_{CM} 取代了转移相 Φ_2 。以两相 CCD 为例,单级倍增寄存器的原理示意图如图 1 所示。

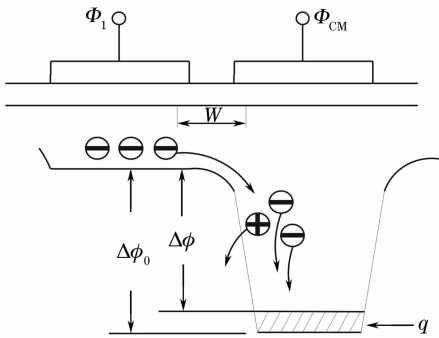


图 1 单级倍增寄存器的示意图

Fig.1 Schematic of a single CCM stage

Jaroslav Hyneczek 分析了实现载流子倍增寄存器的实现电荷倍增的基本条件:1)图 1 中的 W 区域的电场强度 $E \geq 10^5$ V/cm;2) W 区域的宽度与载流子的平均自由程相当。由上述分析可知:信号电荷通过 W 区域时将不产生延时。

考虑电荷转移损失率和电荷倍增,令 ϵ 为单次电荷传输损失率, η 为单次电荷传输率, α 为单次电荷倍增率。假定 EMCCD 的采样频率为 f_s ,时

钟频率为 f_c ,且 $f_s = f_c$,由于电荷寄存器是一个离散的采样系统^[7],因此电荷寄存器的工作频率为 $-f_c/2 \leq f \leq f_c/2$ 。该电荷寄存器为二相转移,共 N 级。

应用模拟延迟线的方法,建立载流子倍增寄存器的电荷传输模型,其单级电荷传输的示意图如图 2 所示。

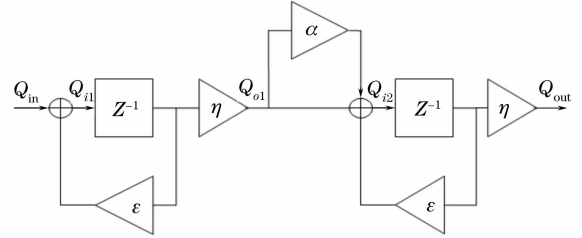


图 2 单级载流子倍增寄存器的电荷传输示意图

Fig.2 Schematic of charge transfer through a single CCM stage

根据图 2,用 Q 表示电荷,可以得到

$$Q_{i1} = Q_{in} + Q_{i1} \cdot z^{-1} \cdot \epsilon, \quad (1)$$

$$Q_{o1} = \eta \cdot Q_{i1} \cdot z^{-1}, \quad (2)$$

$$Q_{i2} = Q_{o1} + Q_{o1} \cdot \alpha + Q_{i2} \cdot z^{-1} \cdot \epsilon, \quad (3)$$

$$Q_{out} = Q_{i2} \cdot z^{-1} \cdot \eta, \quad (4)$$

解上述方程组,可以得到

$$Q_{out} = Q_{in} \cdot \left[\frac{(1-\epsilon)^2(1+\alpha)}{(1-z^{-1} \cdot \epsilon)^2} \right] (z^{-1})^2, \quad (5)$$

定义电荷传输因子为

$$T = \left[\frac{(1-\epsilon)^2(1+\alpha)}{(1-z^{-1} \cdot \epsilon)^2} \right], \quad (6)$$

由此可以得到载流子倍增寄存器的传递函数的 Z 变换为

$$H(z) = T^N(z) z^{-2N}, \quad (7)$$

N 级载流子倍增寄存器的电荷传输因子可以表示为

$$T^N(z) = \left[\frac{(1-\epsilon)^2(1+\alpha)}{(1-z^{-1} \cdot \epsilon)^2} \right]^N, \quad (8)$$

对(8)式取对数并应用泰勒级数展开,舍去高次项可得

$$\ln T^N(z) \approx 2N \cdot (-\epsilon) + N \cdot \alpha - 2N \cdot (-z^{-1}\epsilon), \quad (9)$$

即

$$T^N(z) \approx \exp \left[-2N \cdot \left(\epsilon - \frac{\alpha}{2} - z^{-1}\epsilon \right) \right], \quad (10)$$

将 $z = \exp(j2\pi f \frac{T_c}{2})$ 代入(10)式可得到所需的幅频响应如(11)式所示:

$$|T^N(f)| = \exp\{-2N[\epsilon - \alpha/2 - \epsilon \cos(\pi f T_C)]\}. \quad (11)$$

应用(11)式结合典型器件的计算结果如图 3 所示。器件型号为 TC246CYM-B0。其相关的技术参数可以从公开的技术文档中得到,计算过程中取 $N=400, \epsilon=1 \times 10^{-5}$ 。

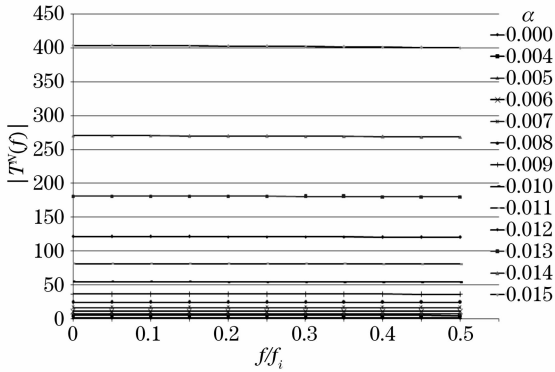


图 3 载流子倍增寄存器的幅频响应

Fig. 3 Amplitude-frequency response of CCM

计算结果表明,载流子倍增寄存器提高了 EMCCD 在器件工作频率范围内的幅频响应的幅度。同时其在工作频率范围内的幅频响应的均匀性,避免了高频信号的能量衰减,具有良好的高频特性。这是提高载流子倍增寄存器的电荷倍增率可以使 EMCCD 相机的图像细节增加的理论依据。在本文的实验中得到了验证。

然而,直接应用式(11)来评价载流子倍增寄存器的幅频响应是非常困难的。通常用总增益系数来评价其倍增效果。令电荷倍增系数 $\alpha=0$ 作为载流子倍增寄存器的输入。因此,总增益系数可以表示为

$$M = \frac{|T_{\alpha=\alpha}^N(f)|}{|T_{\alpha=0}^N(f)|} = \exp(N\alpha), \quad (12)$$

(12)式表明总增益系数仅依赖于寄存器的级数和单级电荷倍增率,与输入信号的频率无关。

3 载流子倍增寄存器的增益起伏特性

本文的第二部分已经证明载流子倍增寄存器的总增益系数是寄存器级数和单级电荷倍增系数的函数。但是由于碰撞电离过程是一个随机过程,在实现载流子倍增的同时不可避免地引入随机噪声,导致随机的增益起伏误差。Mark Stanford Robbins 等人用噪声因子来描述 EMCCD 的总噪声,但噪声因子依赖于输入信号。因此,噪声因子不能完全描述载流子倍增寄存器的增益起伏特性。电子倍增级联系统的增益特性可以用增益起伏因子来描述^[8]。

考虑多级载流子倍增寄存器的电荷倍增的级联特性,本文利用增益起伏因子来描述载流子倍增寄存器的增益起伏特性。

当 EMCCD 的载流子倍增区的宽度与载流子的平均自由程相当时,载流子的二次碰撞电离被抑制,即在单级的载流子倍增寄存器中,进入倍增区的信号电荷与晶格发生碰撞电离的次数只有 0,1 两种情况,如图 4 所示。

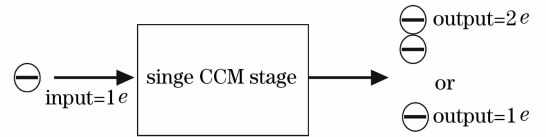


图 4 电荷倍增示意图

Fig. 4 Schematic of charge multiplication

令 α 为单次电荷倍增率,则在单个电子注入的情况下,单级载流子倍增寄存器输出的电子数服用以下概率分布:

$$p = \begin{cases} \alpha, & \text{output} = 2e \\ 1 - \alpha, & \text{output} = 1e \\ 0, & \text{others} \end{cases}$$

其输出电子数方差 $\sigma_{\text{out}}^2 = \alpha(1 - \alpha)$ 。

输出电子数的期望值 $E_{\text{out}} = \alpha$ 。

由于载流子发生碰撞电离的概率与吸收的能量密切相关,并受其他能量散射机制影响。在单级载流子倍增寄存器,信号电荷发生的碰撞电离的概率远小于 1^[9]。

下面推导 N 级载流子倍增寄存器的倍增方差。

如图 5 所示, α_i 为第 i 级电荷倍增率; g_i 为第 i 级的电荷倍增寄存器的增益系数并有 $g_i = \exp(\alpha_i)$; $\sigma_{i,G}^2$ 为 i 级载流子倍增寄存器后的串联后的总增益方差。

只考虑第一,二级电载流子倍增寄存器串联的情况,可得

$$\sigma_{2,G}^2 = \sigma_{1,G}^2 g_2^2 + g_1 \sigma_2^2, \quad (13)$$

利用嵌套方法可得不同级数的载流子倍增寄存器串联后的增益方差。因此, N 级载流子倍增寄存器的总增益方差为:

$$\sigma_{N,G}^2 = \sigma_{N-1,G}^2 g_N^2 + g_1 g_2 g_3 \cdots g_{N-1} \sigma_N^2. \quad (14)$$

记 $G = g_1 g_2 \cdots g_N$ 为系统的总增益,并将总增益方差展开,可得(15)式:

$$\sigma_{N,G}^2 = G^2 \left[\frac{\sigma_1^2}{g_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{g_1 g_2^2} + \frac{\sigma_3^2}{g_1 g_2 g_3^2} + \cdots + \frac{\sigma_N^2}{g_1 g_2 g_3 \cdots g_{N-1} g_N} \right]. \quad (15)$$

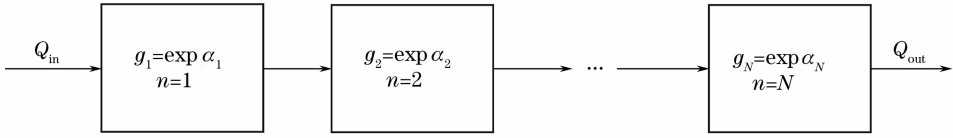


图 5 载流子倍增寄存器示意图

Fig. 5 Schematic of CCM

假设图中各级载流子倍增寄存器的增益特性一致,输出电子数的概率分布如(12)式所示,则

$$g_i = \exp(\alpha_i) = \exp(\alpha) = g, \quad (16)$$

$$\sigma_i^2 = \alpha_i(1 - \alpha_i) = \alpha(1 - \alpha) = \sigma^2, \quad (17)$$

将(16)式,(17)式代入(15)式,可得

$$\sigma_{N,G}^2 = G^2 \sigma^2 \left[\frac{1}{g^2} + \frac{1}{g^3} + \frac{1}{g^4} + \dots + \frac{1}{g^{N+1}} \right] = G^2 \cdot \alpha(1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{g^{i+1}}. \quad (18)$$

记 F_G 为载流子倍增寄存器的增益起伏因子,有

$$F_G = \frac{\sigma_{N,G}^2}{G^2} = \alpha(1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^N \frac{1}{g^{i+1}}. \quad (19)$$

当载流子倍增寄存器具有不同的级数和不同的电荷倍增系数($0 \leq \alpha \leq 0.015$)时,应用(19)式计算的结果如图 6 所示。

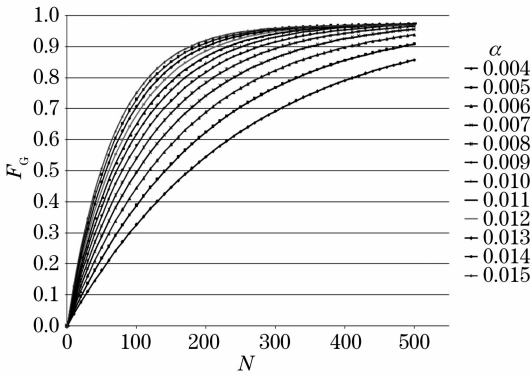


图 6 增益起伏因子的与寄存器级数,电荷倍增系数的数值关系

Fig. 6 Computation results of relation for gain-fluctuation factor, charge multiplication ratio and CCM stages

从图 6 可以看到,当载流子倍增寄存器的增益系数一定时,随着级数的增加,增益起伏因子变大,表明 EMCCD 的增益起伏明显。当载流子倍增寄存器的级数一定时,随着电荷倍增系数的变大,增益起伏因子变大,表明 EMCCD 的增益起伏明显。这为载流子倍增寄存器设计过程中尽量减小增益起伏提供了理论基础。

当载流子倍增寄存器的级数 $N=400$ 时,应用(19)式计算结果如图 7 所示。

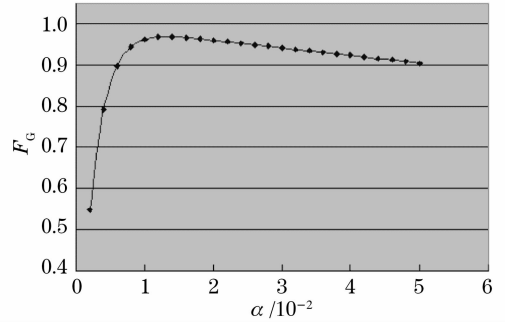


图 7 增益起伏因子与电荷倍增系数函数关系图

Fig. 7 Gain-fluctuation factor as a function of charge multiplication ratio

计算结果表明:当电荷倍增系数 $\alpha \leq 0.15$ 时,增益起伏因子随电荷倍增系数增大而增大;当 $\alpha \geq 0.15$ 时,增益起伏因子随电荷倍增系数的增大而减小。因此,选择合适的电荷倍增系数可以尽量避免由增益起伏引入的噪声。

4 实验方法与结果

上述 EMCCD 的电荷倍增特性可以通过对典型的 EMCCD 的成像测试来验证。实验设备包括:

- 1) EMCCD 相机,美国 TI 公司,TC246CYM-B0,相关的参量可以从技术资料上获得,且载流子倍增寄存器的电荷倍增率可调。
- 2) 图像采集系统,英国 ANDOR 实验室, SOLIS 图像数字采集系统。

令 S 为 EMCCD 的读出放大器的电荷-电压转换函数; Q_{in} 为载流子倍增寄存器的输入电子数; Q_{out} 为载流子倍增寄存器的输出电子数; V_{out} 为读出放大器的电压输出信号。忽略热生电荷的影响,并假设光生电荷在帧转移,行转移过程中没有损失,如图 8 所示。

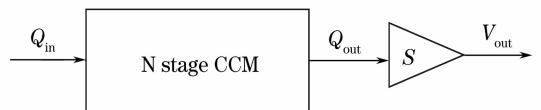


图 8 电荷-电压转换示意图

Fig. 8 Schematic of charge-voltage conversion

根据图 8,可以得到

$$V_{out} = S(Q_{out}). \tag{20}$$

由本文第二部分可知,当电荷倍增率 $\alpha=0$ 且电荷转移损失率很低时,有

$$Q_{in} \approx Q_{out}. \tag{21}$$

设 EMCCD 的像素时钟频率为 f_c ,信号采样频率 f_s 与像素时钟频率相等,则载流子倍增寄存器的输入信号的频率 f 可以根据信号占据的像素数 n 来确定。利用摄像机拍摄静止图像时,若图像中某一细节占用像素数为 n_p ,可以得到其频率 $f=f_c/n_p$ 。因此,图像信号频率的最大值 $f_{max} \leq f_c/2$,满足(11)式的计算条件。

实验采集了不同的电荷倍增率下 EMCCD 相机的输出图像,如图 9 所示。图 9 的电荷倍增率已知,记为 $\alpha_i (i=0,1,2,3,4,5)$ 。通过 SOLIS 数字图像采集系统改变施加在 EMCCD 的倍增极电压使电荷倍增率逐渐增大。选取图 9(a)~图 9(f)中位置相同,大小为 100×100 的部分。取 $E(M_0)=1$ 分别计算其总增益系数的期望值:

$$E(M_i) = \frac{1}{100 \times 100} \sum_{x=h, y=v}^{h+100, v+100} \frac{I_{\alpha=\alpha_i}(x, y)}{I_{\alpha=0}(x, y)}, \tag{22}$$

$i = 0, 1, 2, 3, 4, 5$

结果如图 10 所示。

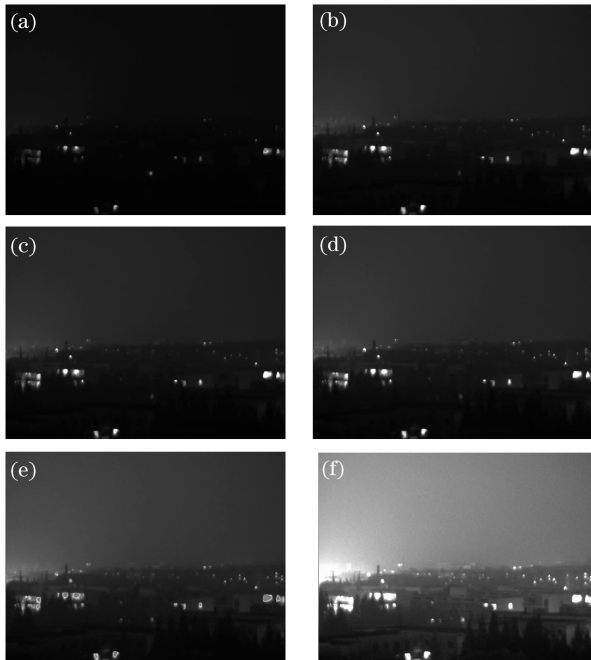


图 9 相同场景在不同电荷倍增率下 EMCCD 相机的成像
Fig. 9 Image of the same scene with different charge multiplication ratio

由图 9 表明,随着电荷倍增率的增大,图像细节

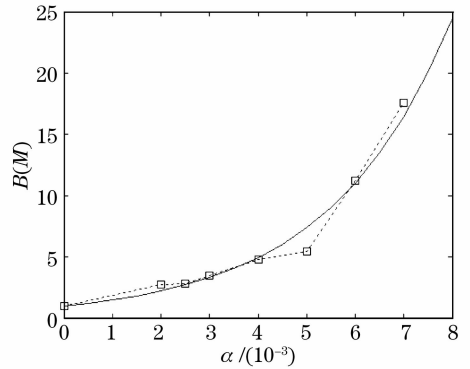


图 10 载流子倍增寄存器级数 $N=400$ 时,总增益系数与单级电荷倍增系数的函数关系

Fig. 10 Total CCM gain as a function of charge multiplication ratio with CCM stages $N=400$

增加,图像质量明显提高,从而证明了载流子倍增寄存器可以提高对 EMCCD 成像性能。细节增加也表明 EMCCD 的传递函数在高频部分改善,这是其他的信号增强的方法不具备的优势。图 10 是实验测试结果与本文模型计算的对比。图中实线是用本文的增益模型计算的结果,虚线是实验测试结果。应用本文增益模型进行计算过程中,假设各级载流子倍增寄存器的增益特性一致。然而,由于耗尽层掺杂的不均与性等器件制备因素,实际器件的各级增益寄存器存在非一致性。因此,实验测试值与理论计算值存在误差。但从图 10 可以看到,本文提出的模型与实验测试情况基本吻合。

5 结 论

通过提高载流子倍增寄存器的电荷倍增率可以有效地改善其幅频响应,其在器件工作频率范围内响应的均匀性避免了高频信号的衰减。与普通 CCD 相比,载流子倍增寄存器具有良好的传递特性,EMCCD 成像系统的细节分辨力有一定提高。这对于成像系统非常重要。总增益系数仅依赖于寄存器的级数和单级电荷倍增率,与输入信号的频率无关。从增益起伏因子的表达式可以分析电荷倍增率及寄存器级数对增益起伏的影响,为载流子倍增寄存器的设计选择合理的参量提供了理论计算依据。选择合适的寄存器级数和电荷倍增率可以使载流子倍增寄存器的增益起伏最小化。

参 考 文 献

1 Jaroslav Hynecck. Impactron—a new solid state image intensifier [J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2001, **48**(10): 2038~2041

- 2 P. Jerram, Peter Pool, Ray Bell *et al.*. The LLLCCD: Low light imaging without the need for an intensifier[C]. *Proc. SPIE*, 2001, **41**(6): 178~186
- 3 Mark Stanford Robbins, Benjamin James Hadwen. The noise performance of electron multiplying charge-devices[J]. *IEEE Trans. on Electron. Devices*, 2003, **50**(5): 1227~1231
- 4 Jaroslav Hrynciek, Takahiro Nishiwaki. Excess noise and other important characteristics of low light level imaging using charge multiplying CCDs[J]. *IEEE Trans. on Electron. Device*, 2003, **50**(1): 239~245
- 5 Donal J. Denvir, Colin G. Coates. Electron multiplying CCD technology: application to ultra-sensitive detection of bio-molecules[C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4626**: 502~512
- 6 Gerralt A. de Vree, Albert H. Westra, Jan Moody *et al.*. Photon-counting Gamma camera based on an electron-multiplying CCD[J]. *IEEE Trans. on Electron Devices*, 2005, **52**(3): 580~588
- 7 Geng Fulu. *Modern Analog Signal Processing and its Application* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 26~30
耿富禄. 现代模拟信号处理技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990. 26~30
- 8 Shen Feng, Zhang Xuejun, Rao Changhui *et al.*. Optical performance of image intensified CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 601~606
沈 锋, 张学军, 饶长辉 等. 像增强型 CCD 探测器的光学特性[J]. 光学学报, 2002, **22**(5): 601~606
- 9 Y. Okuto, C. R. Crowell. Energy-conservation considerations in the characterization of impact ionization in semiconductors[J]. *Phys. Rev. B*, 1972, **6**(8): 3076~3081
- 10 Yu Jun, Lin Jiaming, Yang Jianyu *et al.*. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1440~1442
余 俊, 林家明, 杨建宇 等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报, 2007, **27**(8): 1440~1442
- 11 Lu Jin, Chen Weimin, Cen Junbo. Effect of distance on modulation transfer function of imaging sensor using rectangle template contact method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1021~1026
鲁 进, 陈伟民, 岑军波. 间距对图像传感器调制传递函数矩形模板接触测量的影响[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1021~1026