

基于 Z 域变换的 CCM 电荷传输模型研究

何伟基, 陈 钱, 徐 融, 寇松峰

(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: 分析了 EMCCD 的结构特征及载流子倍增寄存器利用碰撞电离实现电荷倍增的原理, 建立了一种基于离散系统 Z 域变换的 CCM 电荷传输模型. 该模型描述了在 CCM 电荷传输的电荷转移损失和电荷倍增过程. 利用该模型的电荷传输的传递函数, 本文推导了 CCM 电荷传输幅频响应的计算表达式并结合 CCM 的典型参数进行了数值计算. 计算结果与实验观察表明随着电荷倍增率越大, CCM 电荷传输的幅频响应改善越明显.

关键词: Z 域变换; CCM; 电荷倍增; 幅频响应

中图分类号: TN223 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 06 1140-04

Research on Model of Charge Delivering in CCM Based on Z Transform

HE Wei ji, CHEN Qian, XU Rong, KOU Song feng

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

Abstract: A model describes both of charge lose and charge multiplication when charge delivering in CCM based on Z transform, which relates to the architecture of EMCCD and the theory of CCM that using impact ionization to multiply photo generated charge was proposed here. From transfer function of charge delivering in CCM, the amplitude frequency response was obtained as well as its numerical values with the typical parameters of a CCM. Numerical values and experimental results show that the higher the charge multiplication ratio in CCM, the better improvement the amplitude frequency response of CCM gets.

Key words: Z transform; CCM; charge multiplication; amplitude frequency response

1 引言

在本世纪初, 电子倍增电荷耦合器件 (EMCCD, Electron Multiplication Charge Couple Device) 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, Charge Carrier Multiplier). 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, 从而有效提高的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 Hynecek^[1] 和 Paul Jerram^[2] 等人的论文论述了 EMCCD 的基本结构和工作原理; Mark Stanford Robbins^[3] 和 Takahiro Nishiwaki^[4] 则从噪声理论与测试方面证明了 EMCCD 的良好性能. 当前, 大多数的研究工作主要围绕 EMCCD 的工程应用^[5~7]. 而对 EMCCD 中最为关键的电荷载流子倍增寄存器的研究开展较少.

本文拟针对 EMCCD 内的载流子倍增寄存器, 分析其电荷传输特性. 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传输的数学模型, 得到其幅频响应和相频响应的理论计算方法. 最后, 本文给出该数

学模型在典型参数条件下的幅频响应的数值计算结果, 得到了不同参数对载流子倍增寄存器不同参数对载流子倍增寄存器的电荷传输特性的影响.

2 CCM 电荷传输特性分析

EMCCD 与普通 CCD 的不同之处在于增加的载流子倍增寄存器, 如图 1.

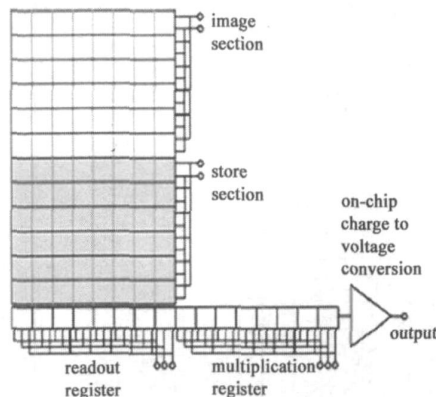


图 1 EMCCD 结构示意图

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, 而空穴将漂移器件衬底. 从而实现了信号电荷的电荷级放大.

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 2.

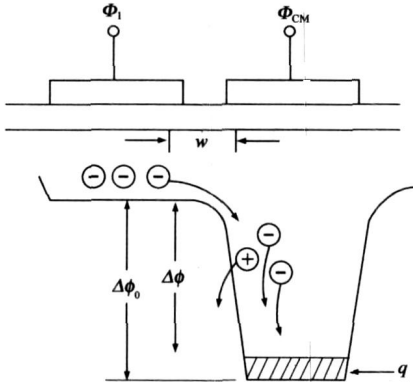


图 2 单级倍增寄存器的原理示意图

忽略耗尽层电荷的影响, 可以得到:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 - \frac{q}{C_{eff}} \quad (1)$$

$$\Delta\phi_0 = V_{\Phi_{CM}} - V_{TD} - V_{\Phi_1} \quad (2)$$

式中: $\Delta\phi$: Φ_1 与 Φ_{CM} 的电势差;

q : Φ_{CM} 下的电荷;

C_{eff} : 等效电容;

$V_{\Phi_{CM}}$, V_{Φ_1} : 施加在 Φ_{CM} 和 Φ_1 的电平;

V_{TD} : Φ_{CM} 和 Φ_1 的电压差阈值。

载流子倍增寄存器工作时, 倍增相 Φ_{CM} 施加大于 20V 的高电平, 即 $V_{\Phi_{CM}} \geq 20V$. 由于边缘场效应, 使图 2 中的 W 区域形成强电场 $E \geq 10^5 V \cdot cm^{-1}$. 因此, 通过该区域的电子被加速. 当电子的能量大于发生碰撞电离的阈值能量 E_T 时, 电子的碰撞电离率 $\alpha \geq 0$. Okuto 和 Crowell^[8] 论述了碰撞电离率 α 与电场强度 E 的数学关系.

$$\alpha(E) = \frac{eE}{E_T} \exp(a - \sqrt{a^2 + x^2}) \quad (3)$$

式中: $a = 0.217 \cdot (E_T / \hbar \omega_0)$;

$x = E_T / eEL$;

E : 电场强度;

$\hbar \omega_0$: 声子能量;

$\hbar \omega_0$: 载流子平均自由程.

如图 2 所示, W 区域的电场强度 E 与 $\Delta\phi$ 有关, 即: $E = E(\Delta\phi)$.

通过近似处理可以得到碰撞电离率 α 与倍增相 $V_{\Phi_{CM}}$ 的近似数学关系

同时, 载流子倍增寄存器在电荷转移过程中还将产生时钟感生电荷. 时钟感生电荷与输入电荷无关, 取决于驱动时钟的幅度, 上升沿和下降沿的陡峭程度. 由于其发生的概率非常小, 因此通常可以忽略.

3 CCM 电荷传输的数学模型

对于不产生新电荷且不丢失电荷的理想电荷寄存器, 假定其采样频率为 f_s , 时钟频率为 f_c , 且: $f_s = f_c$. 该电荷寄存器为二相转移, 共 N 级. 其电荷转移示意

图 3 单级理想电荷转移示意图

图如图 3 所示:

对于一级理想电荷转移, 传递函数为:

$$H_i(f) = \left[e^{-j2\pi f \cdot \left(\frac{T_c}{2} \right)} \right]^2 = e^{-j2\pi f \cdot T_c} \quad (4)$$

式中:

$$T_c = 1/f_c \quad (5)$$

因此, 对 N 级的电荷寄存器的传递函数为:

$$H_n(f) = \left[e^{-j2\pi f \cdot \left(\frac{T_c}{2} \right)} \right]^{2N} \quad (6)$$

式(6)的 Z 变换表示为:

$$H_n(z) = (z)^{-2N} \quad (7)$$

其中:

$$z = e^{-j2\pi f \cdot \left(\frac{T_c}{2} \right)} \quad (8)$$

由于电荷寄存器是一个离散的采样系统, 式(4), (6), (7)只有在 $-f_c/2 \leq f \leq f_c/2$ 时成立.

通过对载流子倍增寄存器电荷传输特性的分析可以知道: 载流子倍增寄存器内电荷传输主要受电荷倍增和电荷转移损失两个因素的影响.

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. 图 2 所示的载流子倍增寄存器的单级电荷传输的示意图如图 4 所示:

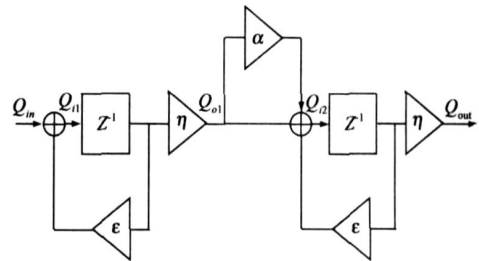


图 4 单级电荷传输的示意图

根据图 4, 用 Q 表示电荷, 我们可以得到:

$$Q_{i1} = Q_{in} + Q_{i1} \cdot z^{-1} \cdot \epsilon \quad (9)$$

$$Q_{o1} = \eta \cdot Q_{i1} \cdot z^{-1} \quad (10)$$

$$Q_{i2} = Q_{o1} + Q_{o1} \cdot \alpha + Q_{i2} \cdot z^{-1} \cdot \epsilon \quad (11)$$

$$Q_{out} = Q_{i2} \cdot z^{-1} \cdot \eta \quad (12)$$

解上述方程组, 可以得到:

$$Q_{out} = Q_{in} \cdot \left[\frac{(1 - \epsilon)^2 (1 + \alpha)}{(1 - z^{-1} \cdot \epsilon)^2} \right] (z^{-1})^2 \quad (13)$$

定义电荷传输因子为:

$$T = \left[\frac{(1 - \epsilon)^2 (1 + \alpha)}{(1 - z^{-1} \cdot \epsilon)^2} \right] \quad (14)$$

由此可以得到载流子倍增寄存器的传递函数的 Z

变换为:

$$H(z) = T(z)^N z^{-2N} \quad (15)$$

N 级载流子倍增寄存器的电荷传输因子可以表示为:

$$T^N(f) = \left[\frac{(1-\varepsilon)^2(1+\alpha)}{(1-z^{-1}\varepsilon)^2} \right]^N \quad (16)$$

对式(16)取对数, 得:

$$\ln T^N(f) = 2N \ln(1-\varepsilon) + N \ln(1+\alpha) - 2N \ln(1-z^{-1}\varepsilon) \quad (17)$$

将式(17)的两边应用泰勒级数展开, 得:

$$\ln T^N(f) = 2N \sum_{n=0}^{\infty} -\frac{\varepsilon^n}{n!} + N \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\alpha^n}{n!} - 2N \sum_{n=0}^{\infty} -\frac{(z^{-1}\varepsilon)^n}{n!} \quad (18)$$

由式(3)可以知道, $\alpha \ll 1$; 同时, $\varepsilon \ll 1$, 因此, 式(18)可以近似为:

$$\ln T^N(f) \approx 2N \cdot (-\varepsilon) + N \cdot \alpha - 2N \cdot (-z^{-1}\varepsilon) \quad (19)$$

即:

$$T^N(f) \approx \exp[-2N \cdot (\varepsilon - \frac{\alpha}{2} - z^{-1}\varepsilon)] \quad (20)$$

式(6)代入式(20)可得到式(21), 如下:

$$T^N(f) = \exp\{2N[\varepsilon - \frac{\alpha}{2} - \varepsilon \cos(\pi \cdot f \cdot \frac{1}{f_c}) + j \cdot \varepsilon \sin(\pi \cdot f \cdot \frac{1}{f_c})]\} \quad (21)$$

因此, 根据离散时间系统 Z 变换系统频率响应的定义, 可以得到所需的幅频响应和相频响应如式(22)、(23)所示

幅频响应特性为:

$$|T^N(f)| = \exp\{-2N[\varepsilon - \alpha/2 - \varepsilon \cos(\pi \cdot f \cdot T_c)]\} \quad (22)$$

相频响应特性为:

$$\varphi(f) = -2N \varepsilon \sin(\pi \cdot f \cdot T_c) \quad (23)$$

通过对幅频特性的计算, 我们可以分析电荷转移损失率 ε 和电荷倍增率 α 对载流子倍增寄存器的电荷传输特性的影响。

4 结果与分析

应用式(22)进行计算的结果如图 5 所示:

在计算中, 我们采用 TI 公司推出的具有载流子倍增寄存器的 TC246 的参数。假设没有电荷转移损失和电荷倍增的条件下的电荷输出为单位输出。

在 $N=400$, $\alpha=0$ 时, 不同的电荷损失率 ε 下, 载流子倍增寄存器的传递函数的幅频特性如图 5(a) 所示:

在 $N=400$, $\varepsilon=1 \times 10^{-5}$ 时, 不同的电荷倍增率 α 下, 载流子倍增寄存器的传递函数的幅频特性如图 5(b) 所示:

在 $N=400$, $\varepsilon=5 \times 10^{-5}$ 时, 不同的电荷倍增率 α 下, 载流子倍增寄存器的传递函数的幅频特性如图 5

(c) 所示:

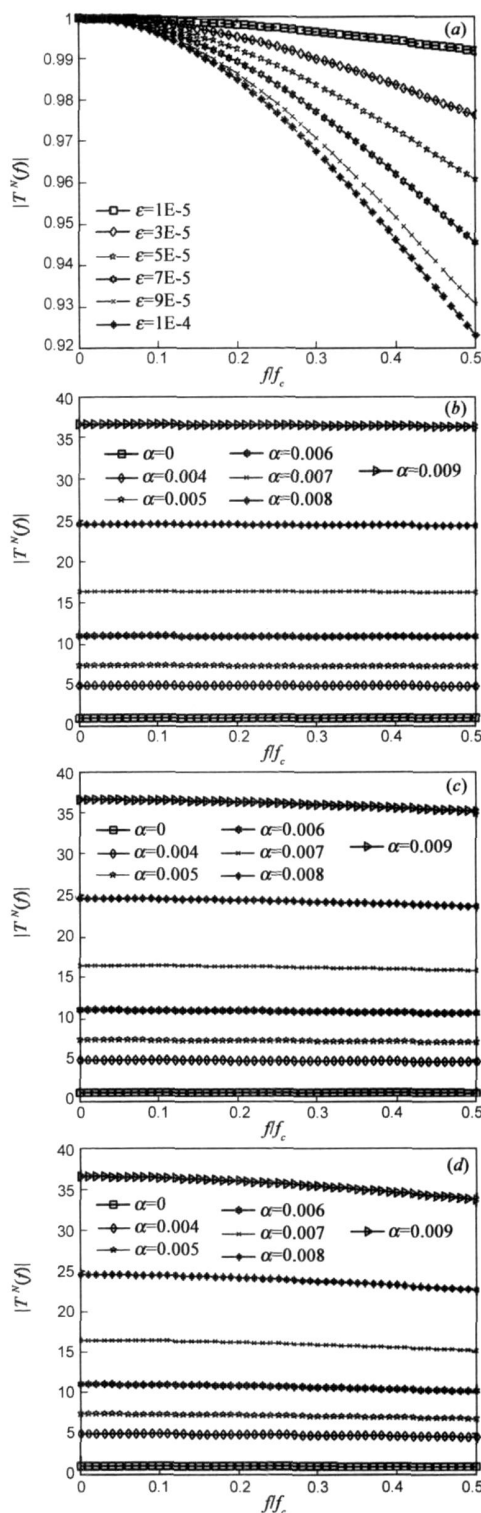


图 5

在 $N=400$, $\varepsilon=1 \times 10^{-4}$ 时, 不同的电荷倍增率 α 下, 载流子倍增寄存器的传递函数的幅频特性如图 5(d) 所示:

从上述不同参数条件下载流子倍增寄存器的幅频

特性可以得到以下结论: 在电荷转移损失率接近极限值的条件下, 电荷转移损失率对载流子倍增寄存器的幅频特性的影响不明显. 与之相反, 电荷倍增率可以有效地提高载流子倍增寄存器的幅频响应. 计算结果表明, 载流子倍增寄存器提高了 EMCCD 在器件工作的频率范围内的幅频响应的均匀性, 增加了高频信号的通过率. 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.

为进一步验证该结论, 我们采集了在相同照度下, 具有载流子倍增寄存器的 TC246 相机载不同电荷倍增率下的输出图像, 如图 6. 图 6(a) 中 $\alpha = 0$; 图 6(b) 中 $\alpha = 0.004$; 图 6(c) 中 $\alpha = 0.009$.

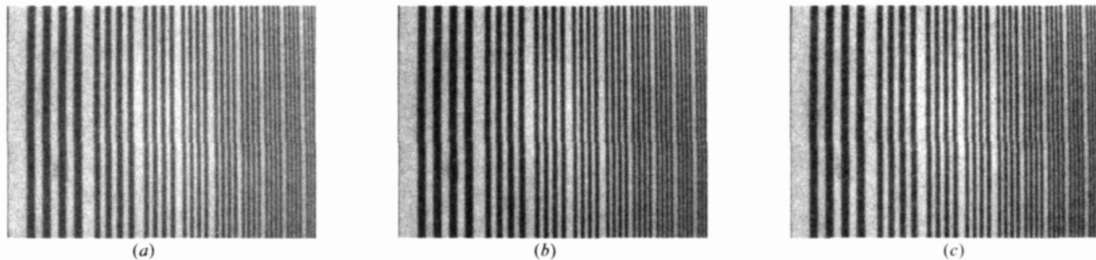


图 6

从图 6 可以看出随着电荷倍增率的增加, 图像对比度增强, 细节明显. 该现象表明: 随着电荷倍增率的增大, 图像细节增加, 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 EMCCD 成像性能. 细节增加也表明 EMCCD 的传递函数的幅频响应在高频部分得到改善.

5 讨论

本文通过对载流子倍增寄存器电荷传输特性的分析, 建立了电荷传输的数学模型. 然而, 载流子倍增寄存器的电荷传输现象极为复杂. 需要结合完备的数学物理理论模型和测试分析来描述和分析其电荷传输特性.

参考文献:

- [1] Jaroslav Hynccek. Impactron—A new solid state image intensifier[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2001, 48(10): 2038–2041.
- [2] P Jerram, Peter Pool, et al. The LLLCCD: Low light imaging without the need for an intensifier[J]. SPIE, 2001, 4306: 178–186.
- [3] Mark Stanford Robbins, Benjamin James Hadwen, et al. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices[J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2003, 50(5): 1227–1231.
- [4] Jaroslav Hynccek, Takahiro Nishiwaki, et al. 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 biomolecules[J]. SPIE, 2002, 4626: 502–512.
- [6] Gerralt A de Vree, Albert H Westra, et al. Photon counting

Gamma camera based on an electron multiplying CCD [J]. IEEE Trans on Electron Devices, 2005, 52(3): 580–588.

- [7] N Smith, C Coates, et al. EMCCD Technology and its impact on rapid low-light photometry [J]. SPIE, 2004, 5499: 162–172.
- [8] Y Okuto, C R Crowell, et al. Energy conservation considerations in the characterization of impact ionization in semiconductors[J]. Physical Review B, 1972, 6(8): 3075–3081.
- [9] 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.
- [10] 唐本奇, 肖志刚, 等. 电荷耦合器件辐射效应理论分析与模拟试验方法研究[J]. 电子学报, 2007, 35(8): 1481–1484.

Tang Ben qi, Xiao Zhi gang, et al. Mechanism analysis and experiment simulation on radiation effects of CCDs[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1481–1484. (in Chinese)

作者简介:



何伟基 男, 1981 年 9 月生于广东省兴宁市, 南京理工大学博士研究生. 主要研究方向为光电器件与光电成像.
E-mail: njstheweiji@163.com



陈 钱 男, 1964 年 11 月生于江苏省无锡市, 现为南京理工大学教授, 博导, 长江学者, 光学工程学科带头人. 获省部级以上科技奖 11 项. 在国内外发表论文 80 余篇.
E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn