

文章编号 1004-924X(2008)10-1977-05

基于电子倍增 CCD 噪声特性的最佳工作模式

张闻文, 陈 钱

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要:对电子倍增 CCD 的噪声特性进行了研究,并在此基础上选择最佳工作模式。介绍了反转和非反转模式的工作原理,分析了不同工作模式下暗电流与时钟感生电荷的表现并进行了对比。以工作温度、积分时间和垂直转移次数为参数,建立了最佳工作模式的数学模型,求解出最佳工作模式的积分临界点,确定了电子倍增 CCD 的最佳工作模式。最后,结合具体器件的参数模拟了最佳工作模式下电子倍增 CCD 的噪声特性曲线。仿真结果表明:室温下(293 K)的积分临界点为 $1.6 \mu\text{s}$ 。当积分时间 $> 1.6 \mu\text{s}$ 时,最佳工作模式为反转模式;当积分时间 $< 1.6 \mu\text{s}$ 时,最佳工作模式为非反转模式。研究结果为电子倍增 CCD 工作模式的选取提供了切实可行的理论依据。

关键词:微光成像;最佳工作模式;噪声分析;电子倍增 CCD

中图分类号:TN386.5;TN152 **文献标识码:**A

Optimum operation mode based on noise characteristics of electron multiplying CCD

ZHANG Wen-wen, CHEN Qian

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

Abstract: In order to obtain the best work state and optimum imaging quality for an electron multiplying CCD, the noise characteristics of electron multiplying CCDs are studied and used to select the optimum operation mode. The operation principles of inverted mode and non-inverted mode are introduced. The performance of dark current and clock induced charge is analyzed and compared with different operation modes. A mathematical model of optimum operation mode is established by taking operation temperature, integration time and total number of parallel transfers as parameters. Then, integration critical point is calculated to determine the optimum operation mode. Finally, the curve of noise performance in optimum operation mode is simulated according to the parameters of practical devices. The simulation results indicate that the integration critical point is $1.6 \mu\text{s}$ at room temperature (293 K). When integration time is longer than $1.6 \mu\text{s}$, the inverted mode is optimum operation mode, and when integration time is less than $1.6 \mu\text{s}$, the non-inverted mode is preferable. The results offer a reliable theoretical basis for the operation mode selection of electron multiplying CCDs and provide a vital instructional significance for the application and design of electron multiplying CCDs.

收稿日期:2008-01-03;**修订日期:**2008-03-13.

基金项目:国防科工委国防基础科研基金资助项目(No. A2620060242);中国兵器工业集团公司装备预研基金资助项目(No. 4040508011)

Key words: low light level imaging; optimum operation mode; noise analysis; electron multiplying CCD

1 引言

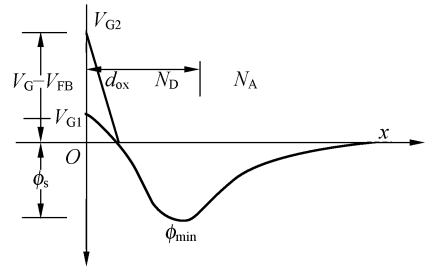
电子倍增 CCD 的出现是光电成像探测领域的重大突破,它通过嵌入可控的增益寄存器使信号载流子在转移过程中得到线性放大倍增,从而实现了全固态成像,显著提高了微光成像器件的性能,在军事侦察、天文观测、生物医学等领域具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景^[1-9]。

成像器件都有其对应的工作模式,根据器件的设计和制造工艺,应选取相应的工作模式使器件工作性能最佳。为抑制暗电流噪声,现有的电子倍增 CCD 均工作在反转模式(Inverted Mode, IMO)下,但是该模式下时钟感生电荷明显增大,当电子倍增 CCD 工作在高增益时会出现明显的尖峰,降低了成像质量。为了解决这一矛盾,本文研究了不同工作模式下电子倍增 CCD 的暗电流和时钟感生电荷特性,建立了电子倍增 CCD 最佳工作模式的函数模型,以积分时间为临界条件确定了电子倍增 CCD 的最佳工作模式,最后结合具体参数,模拟了最佳工作模式下器件的噪声性能。研究结果为电子倍增 CCD 工作模式的选取提供了切实可靠的理论依据,对电子倍增 CCD 的应用和设计具有重要的指导意义。

2 工作模式

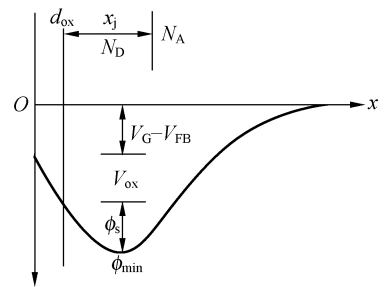
电子倍增 CCD 的工作模式分为反转(Inverted Mode, IMO)和非反转(Non-Inverted Mode, NIMO)两种。反转模式,又叫 MPP 模式^[10-11],如图 1(a)所示。在积分周期内栅压为负电压,埋沟信道反转,势阱由深变浅,当栅压达到某一负值后,势阱不再随栅压的降低而变化,此时表面势阱位于衬底电势,来自沟阻的空穴填满了 Si-SiO₂ 表面态,衬底中热运动产生的电子无法跃迁到表面,消除了表面暗电流。反转模式下,用来收集信号电荷的势阱通过注入势垒实现,即在某相电极下注入硼离子形成势垒,势垒之间构成势

阱。非反转模式,即普通模式,如图 1(b)所示。栅压在积分周期内为正电压,埋沟信道不发生反转,表面态完全耗尽,暗电流最大,各相时钟加不同的栅压形成势阱差,收集信号电荷。



(a) 反转模式下电势分布示意图

(a) Distribution of electric potential in IMO



(b) 非反转模式下电势分布示意图

(b) Distributions of electric potential in NIMO

图 1 电势分布示意图

Fig. 1 Distributions of electric potential

图 1 中, V_G 为栅压, V_{FB} 为平带电压, V_{ox} 为氧化层电压, ϕ_s 为表面势, $V_{G2} < V_{G1} < 0$, d_{ox} 为氧化层厚度, x_j 为埋沟注入深度, N_D 为施主浓度, N_A 为受主浓度。

3 不同工作模式下的噪声特性

3.1 暗电流

暗电流是由半导体内部载流子无规则的热运动产生的,不仅引起附加的散粒噪声,还形成一个暗信号图像,叠加到光信号图像上,引起固定图像噪声。由于工艺原因或半导体材料的缺陷使个别处形成暗电流尖峰,在图像上出现白斑^[12]。电

子倍增 CCD 的暗电流分为表面暗电流和体内暗电流,体内暗电流又包括扩散电流和耗尽电流,其中表面暗电流是电子倍增 CCD 暗电流的主要来源。无论是表面暗电流还是体内暗电流都明显受温度影响,而且和积分时间成正比^[13]。

反转模式下,表面暗电流被抑制,此时以体内暗电流为主。 $T < 240\text{ K}$ 时,主要是耗尽电流^[14]:

$$\delta_B = C \times T^n \times \exp(-E_g/2k_B T), \quad (1)$$

$T > 300\text{ K}$ 时,主要是扩散电流:

$$\delta_B = C \times T^n \times \exp(-E_g/k_B T), \quad (2)$$

$240\text{ K} \leq T \leq 300\text{ K}$ 时,既有耗尽电流,也有扩散电流:

$$\delta_B = 3.3 \times 10^6 T^2 \exp(-9\ 080/T), \quad (3)$$

其中, C 为常数, T 为器件工作温度, E_g 为禁带宽度, k_B 为波尔兹曼常数, $n \in [1, 3]$ 。

非反转模式下,表面暗电流一般要比体内暗电流高两个数量级,此时暗电流主要是表面暗电流:

$$\delta_s = 122T^3 \exp(-6\ 400/T), \quad (4)$$

其中, T 为器件工作温度。

从图 2 可以看出^[15], 非反转模式下的暗电流明显高于反转模式, 因此, 器件工作在反转模式有利于降低暗电流, 减小噪声。

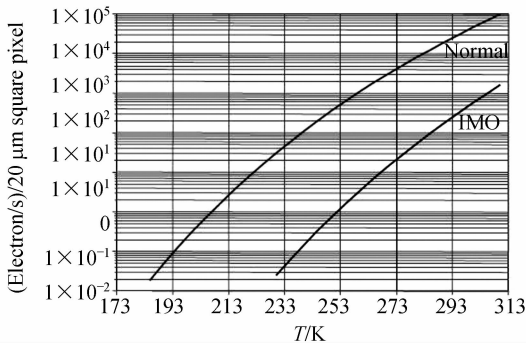


图 2 反转模式和非反转模式下暗电流关系曲线
Fig. 2 Dark currents in IMO and NIMO

3.2 时钟感生电荷

时钟感生电荷(Clock-Induced Charge, CIC)是信号电荷在转移过程中碰撞电离产生的,因此与积分时间无关^[16]。所有的 CCD 都会产生时钟感生电荷,大约 100 次转移才会产生一个电子,概率非常小,容易被读出噪声淹没,但是在电子倍增

CCD 中,高增益使得单个电子也会形成明显的尖峰,不能和普通 CCD 一样忽略。时钟感生电荷的大小跟很多因素有关,最主要的是时钟偏压的大小,即器件的工作模式是反转还是非反转,另外还有转移频率、时钟边缘等。

3.2.1 时钟感生电荷与工作模式的关系

电子倍增 CCD 正常工作时,成像区和存储区的时钟幅度应超过 11.5 V,这样有利于信号电荷完全转移。反转模式下,时钟感生电荷的典型值为 $1 \times 10^{-4}\text{ e/pixel/transfer}$,非反转模式下,时钟感生电荷的典型值为 $3 \times 10^{-6}\text{ e/pixel/transfer}$,如图 3 所示,时钟感生电荷随着时钟幅度的增加而变大,非反转模式有利于减小时钟感生电荷。

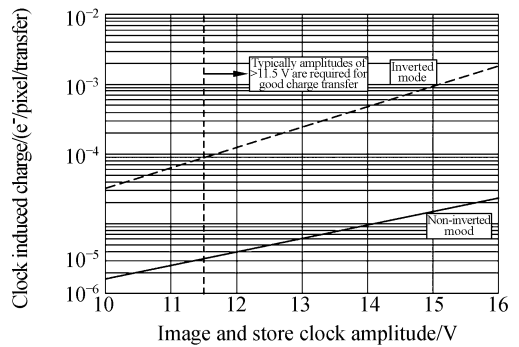


图 3 反转和非反转模式下时钟感生电荷的关系曲线
Fig. 3 Clock-induced charge in IMO and NIMO

3.2.2 时钟感生电荷与垂直转移频率的关系

时钟感生电荷与垂直转移的频率成反比,因此,为了减小时钟感生电荷,垂直转移频率应尽可能大,器件工作时应尽量达到数据手册上的最大值。

3.2.3 时钟感生电荷与时钟上升沿的关系

成像区和存储区的时钟上升沿越陡,时钟感生电荷越大,也就是说,时钟感生电荷与时钟上升沿时间成反比。因此,时钟的上升沿和下降沿时间都不能太短,一般 200~300 ns 能使时钟感生电荷值最小。

3.2.4 时钟感生电荷与温度的关系

目前研究表明,时钟感生电荷与温度无关。图 4 为反转模式下,时钟感生电荷与温度和时钟幅度的关系曲线,在 223~258 K 这个温度区间内,时钟感生电荷基本不受温度影响。

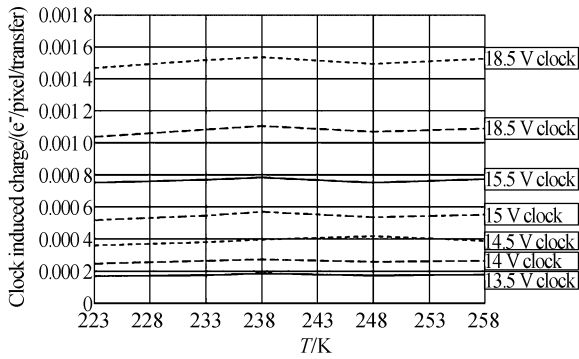


图 4 反转模式下时钟感生电荷与温度和时钟幅度的曲线

Fig. 4 Curves of clock-induced charge in different temperatures and clock amplitudes in IMO

4 最佳工作模式

通过上述分析,可以发现非反转模式下暗电流十分明显,反转模式下时钟感生电荷较大。为了让电子倍增 CCD 获得最佳工作性能,要求暗电流与时钟感生电荷的总和最小,该模式即为电子倍增 CCD 的最佳工作模式。暗电流主要受温度和积分时间影响,时钟感生电荷则与垂直转移次数有关,因此,最佳工作模式是关于温度、时间和转移次数的函数:

$$\delta(T, t, m) = \delta_D(T)t + m\delta_C, \quad (5)$$

其中, T 为器件工作温度, t 为积分时间, m 为垂直转移次数, δ_D 为暗电流, δ_C 为时钟感生电荷。

反转模式下,

$$\delta_I(T, t, m) = \delta_{DI}(T)t + m\delta_{CI}, \quad (6)$$

非反转模式下,

$$\delta_N(T, t, m) = \delta_{DN}(T)t + m\delta_{CN}. \quad (7)$$

假设积分时间为 t_0 时, $\delta_I = \delta_N$, 可将 t_0 称为最佳模式积分临界点。

$$t_0 = m \frac{\delta_{CI}(T) - \delta_{CN}(T)}{\delta_{DN}(T) - \delta_{DI}(T)}. \quad (8)$$

以英国 E2V 公司的电子倍增 CCD65 为例^[15], 时钟感生电荷可近似看作常数, 用相应模式下的典型值代替。将式(3)、(4)分别代入式(6)、(7), 绘出 δ_I 、 δ_N 和 t_0 的关系曲线, 如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出, $t_0 = 1.6 \mu\text{s}$ 时, $\delta_I = \delta_N$ 。 $t > t_0$ 时, $\delta_I < \delta_N$, 最佳工作模式为反转模式。 $t < t_0$ 时, $\delta_N < \delta_I$, 最佳工作模式为非反转模式。反转模

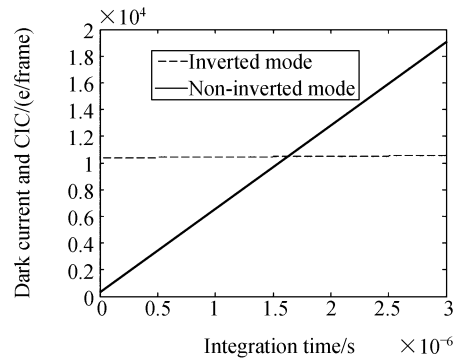


图 5 最佳工作模式下噪声性能曲线

Fig. 5 Noise performance in optimum operation mode

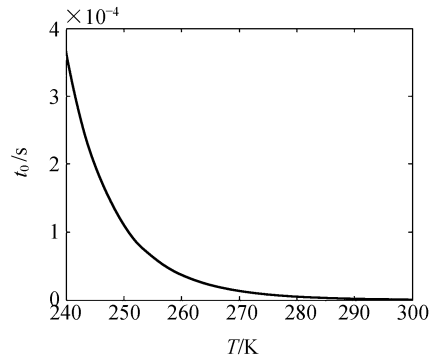


图 6 积分临界点与工作温度的曲线

Fig. 6 Curve of integration critical point and operation temperature

式下曲线斜率很小, 几乎与坐标轴平行, 说明积分时间对暗电流影响不大, 该模式有利于器件进行长时间积分, 适用于微光成像领域。随着器件工作温度的降低, 暗电流明显减小, 积分时间越来越长, 如图 6 所示。在理想条件下, 暗电流小到可以忽略不计, 此时噪声以时钟感生电荷为主, 器件应在非反转模式下。

5 结论

本文基于电子倍增 CCD 的噪声特性, 深入研究了在不同工作模式下暗电流和时钟感生电荷对器件的影响, 建立了电子倍增 CCD 的最佳工作模式函数, 经过模拟计算求解出最佳模式临界点, 以积分时间为临界条件确定了电子倍增 CCD 的最佳工作模式。仿真结果表明: 室温下 (293 K), 积分临界点为 $1.6 \mu\text{s}$ 。当积分时间 $> 1.6 \mu\text{s}$ 时, 最佳工作模式为反转模式; 当积分时间 $< 1.6 \mu\text{s}$

时,最佳工作模式为非反转模式。该方法为电子倍增 CCD 工作模式的选取提供了切实可靠的理论依据,用户可以根据不同的工作环境和应用范

围选择合适的工作模式,以便获得最佳性能,同时还助于深入理解电子倍增 CCD 的工作状态并设计高性能的器件。

参考文献:

- [1] DENVIR D, CONROY E. Electron multiplying CCDs[J]. *SPIE*, 2003, 4877:55-68.
- [2] DENVIR D, CONROY E. Electron multiplying CCD technology: the new ICCD[J]. *SPIE*, 2003, 4796:164-174.
- [3] DENVIR D, COATES C G. Electron multiplying CCD technology: application to ultrasensitive detection of biomolecules[J]. *SPIE*, 2002, 4626:502-512.
- [4] POOL P, MORRIS D, BURT D. Application of electron multiplying CCD technology in space instrumentation[J]. *SPIE*, 2005, 5902:1-6.
- [5] 王加朋,王淑荣,李福田,等. 空基紫外成像仪关键器件 ICCD 非均匀性校正技术[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9): 1353-1360.
WANG J P, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Non-uniformity correction of key device ICCD in ultraviolet imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1353-1360. (in Chinese)
- [6] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1196-1202.
LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1196-1202. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 苏学征. EMCCD 技术—单光子水平的成像探测[J]. *现代科学仪器*, 2005(2):51-53.
SU X ZH. EMCCD technology—single photon imaging detection[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2005(2):51-53. (in Chinese)
- [9] 许武军,李建伟,危峻,等. 电子倍增 CCD 在天基空间监视中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2006, 6(1):42-44.
XU W J, LI J W, WEI J, *et al.*. Application of EMCCD in space-based space surveillance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2006, 6(1):42-44. (in Chinese)
- [10] 张坤. 高帧速 CCD 摄像器件的设计[J]. *红外与激光工程*, 1999, 28(2):58-61.
ZHANG K. Design of CCD image sensor for high speed imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, 28(2):58-61. (in Chinese)
- [11] 张坤,李仁豪. 埋沟 CCD 器件工作状态的设计[J]. *半导体光电*, 2000, 21(S1):49-52.
ZHANG K, LI R H. Design of operation mode of buried channel CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, 21(S1): 49-52. (in Chinese)
- [12] 白廷柱,金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:335-336.
BAI T ZH, JIN W Q. *Photoelectric Imaging Principles and Technology*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006:335-336. (in Chinese)
- [13] SMITH N, COATES C, GILTINAN A, *et al.*. EMCCD technology and its impact on rapid low-light photometry [J]. *SPIE*, 2004, 5499:162-172.
- [14] L3Vision™ sensor technical notes—dark signal and clock-induced charge[OL]. <http://www.e2v.com/module/page-357/datasheets-and-technical-notes.cfm>.
- [15] JERRAM P, POOL P, BELL R, *et al.*. The LLLCCD: low light imaging without the need for an intensifier[J]. *SPIE*, 2001, 4306:178-186.
- [16] L3Vision™ Sensors—CCD65 series ceramic pack[OL]. <http://www.e2v.com/module/page-357/datasheets-and-technical-notes.cfm>

作者简介:张闻文(1981—),女,江苏无锡人,博士研究生,主要从事微光图像探测与成像器件的研究。E-mail: zhangwenwen1205@163.com

导师简介:陈钱(1964—),男,江苏无锡人,教授,博士生导师,“长江学者奖励计划”特聘教授,主要从事光电信息探测与图像处理的研究。E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn