

# 基于周期反转模式的表面暗电流抑制

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** 为了抑制电子倍增 CCD 的表面暗电流, 运用 Shockley-Read-Hall 理论解释了表面暗电流的产生过程, 通过曲线拟合建立了表面暗电流的理论模型, 定量分析了电子倍增 CCD 从反转模式切换到非反转模式后表面暗电流的恢复特征时间。根据这一时间特性提出了周期反转模式的概念, 在信号积分期里对成像区时钟进行调制, 加入周期反转脉冲, 使器件以小于表面暗电流恢复特征时间的周期在反转与非反转模式之间切换。仿真结果表明, 随着周期反转频率的提高, 表面暗电流明显减小。当时钟周期为 0.2 ms 时, 平均表面暗电流降低到 0.051 nA/cm<sup>2</sup>, 接近反转模式的水平, 与理论分析完全一致, 验证了周期反转模式的可行性。

**关键词** 图像处理; 微光成像; 表面暗电流抑制; 周期反转模式; 电子倍增 CCD

**中图分类号** TN223; P111.49 **文献标识码**: A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1283

## Suppression of Surface Dark Current Based on Periodic Inverted Mode

Zhang Wenwen Chen Qian

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

**Abstract** In order to suppress surface dark current of electron multiplying CCDs, Shockley-Read-Hall theory is applied to describe the generation progress of surface dark current. The theoretical model of surface dark current is established by curve fitting. Recovery characteristic time of surface dark current is obtained through a quantitative analysis when the device is switched from inverted mode to non-inverted mode. Periodic inverted mode is proposed based on the timing character. Imaging clocks are modulated by periodic inverted pulses during signal integration. The device is switched from inverted mode to non-inverted mode at a period less than surface dark current recovery time. Simulation results show that surface dark current dramatically decreases as periodic inverted frequency increases. When the period equals 0.2 ms, average surface dark current is 0.051 nA/cm<sup>2</sup>, approaching inverted mode level. The results are in good agreement with theoretical analysis and the feasibility of periodic inverted mode is proved.

**Key words** image processing; low-level light imaging; suppression of surface dark current; periodic inverted mode; electron multiplying CCD

## 1 引 言

CCD 中降低暗电流<sup>[1~6]</sup>最有效的手段是对 CCD 芯片进行制冷, 但是真空制冷设备价格高昂, 而且深度制冷会降低电荷转移效率<sup>[7]</sup>。电子倍增 CCD 的暗电流主要是 Si-SiO<sub>2</sub> 界面态产生的表面暗电流。反转模式 (Inverted Mode) 通过在信号积分周期里将所有电极都加反相偏置 (即负电压), 使硅

衬底中热运动产生的电子无法跃迁到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面态, 从而消除了表面暗电流。该模式省去了昂贵的制冷设备, 或用半导体制冷即可达到理想效果, 但是, 这需要在某一相电极下额外注入势垒才能构成势阱, 制造工艺复杂, 而且积分期内栅压为负。比起非反转模式 (Non-inverted mode), 即普通模式时, 器件的满阱容量减小了<sup>[8~11]</sup>。研究表明<sup>[12]</sup>, 器件从

**收稿日期**: 2007-10-23; **收到修改稿日期**: 2008-01-25

**基金项目**: 国防基础科研项目 (A2620060242) 和装备预研项目 (4040508011) 资助课题。

**作者简介**: 张闻文 (1981—), 女, 博士研究生, 主要从事微光图像处理和微光成像技术等方面的研究。

E-mail: zhangwenwen1205@163.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成像技术等方面的研究。

E-mail: chenq@mail.njust.edu.cn

反转模式切换到非反转模式时,表面暗电流需要一定的特征时间才能恢复到稳态值。

基于这一时间特性,本文提出了周期反转模式的概念,通过时钟调制使器件周期性地介于反转和非反转模式,只要非反转模式持续的时间小于恢复特征时间,就能动态地抑制表面暗电流,使其接近反转模式水平。该模式既不需要反转模式的额外掺杂,又能保持非反转模式的大满阱容量。

## 2 表面暗电流的产生过程

以 P 衬底电子倍增 CCD 为例,非反转模式下,表面暗电流的产生分为两个过程:首先电子从价带热激发跃迁到界面态,然后从界面态跃迁至导带成为自由电子并被收集到势阱中。

界面态对载流子的俘获和发射服从 Shockley-Read-Hall 方程<sup>[13,14]</sup>:

$$\frac{dn_{ss}}{dt} = e_p(N_{ss} - n_{ss}) - e_n n_{ss} - c_p n_{ss}, \quad (1)$$

$$e_n = \sigma_n v_{th} n_i \exp[(E - E_i)/kT], \quad (2)$$

$$e_p = \sigma_p v_{th} n_i \exp[-(E - E_i)/kT], \quad (3)$$

$$c_p = \sigma_p v_{th} p_s, \quad (4)$$

式中  $n_{ss}$  为能值  $E$  处单位能量间隔内单位面积上被电子占据的界面态密度,  $N_{ss}$  为能值  $E$  处单位能量间隔内单位面积上的界面态密度,  $e_n$  为电子发射率,  $e_p$  为空穴发射率,  $c_p$  为空穴俘获率,  $\sigma_n$  为电子俘获截面,  $\sigma_p$  为空穴俘获截面,  $p_s$  为表面处单位体积内的空穴浓度,  $v_{th}$  为载流子的热运动速率,  $n_i$  为本征载流子浓度,  $E_i$  为本征费米能级,  $k$  为玻尔兹曼常量,  $T$  为绝对温度,  $E=0$  对应价带顶端。

$t=0$  时,器件从反转模式切换到非反转模式,空着的界面态逐渐被价带热激发过来的电子占据,  $p_s=0$ , (1) 式转换为

$$\frac{dn_{ss}}{dt} = e_p(N_{ss} - n_{ss}) - e_n n_{ss}, \quad (5)$$

解微分方程,初始条件为  $n_{ss}(E,0)=0$ ,

$$n_{ss} = \frac{e_p N_{ss} [1 - \exp(e_p + e_n)t]}{e_p + e_n}, \quad (6)$$

能值  $E$  处的界面态电子产生率  $G(E,t)$  为

$$G(E,t) = e_n(E)n_{ss}(E,t) = \sigma_n \sigma_p v_{th}^2 n_i^2 N_{ss} \frac{1 - \exp(-Pt)}{P}, \quad (7)$$

$$P(E) = n_i v_{th} \{ \sigma_p \exp[-(E - E_i)/kT] + \sigma_n \exp[(E - E_i)/kT] \}, \quad (8)$$

表面暗电流  $J_s$  为

$$J_s(t) = e \int_0^{E_g} G(E,t) dE, \quad (9)$$

式中,  $E_g$  为禁带宽度,  $e$  为电子电量。

令  $x = \sqrt{\sigma_n/\sigma_p} \exp[(E - E_i)/kT]$ ,  $\sigma = \sqrt{\sigma_n \sigma_p}$ ,  $J_s(\infty) = \frac{e}{2} \pi n_i \sigma v_{th} N_{ss} kT$ , 则(9) 式可写成

$$J_s(t) = \frac{2}{\pi} J_s(\infty) \int_0^{\infty} \frac{1 - \exp[-n_i v_{th} \sigma t (x + x^{-1})]}{1 + x^2} dx = J_s(\infty) \left\{ 1 - \frac{4}{\pi} \int_0^1 \frac{\exp[-n_i v_{th} \sigma t (x + x^{-1})]}{1 + x^2} dx \right\}, \quad (10)$$

$$n_i = 3.10 \times 10^{16} T^{3/2} \exp(-0.603/kT), \quad (11)$$

$$v_{th} = 1.0 \times 10^7 (T/300)^{1/2}, \quad (12)$$

式中  $\sigma$  为俘获截面的几何平均值,  $J_s(\infty)$  为非反转模式下表面暗电流的稳态值。

(10) 式为超越函数积分,无法直接求出表达式,采用数值法求解。先计算出部分数据点,再根据莱文伯-麦夸特法(Levenberg-Marquardt)和通用全局优化法进行曲线拟合,得到最佳拟合多项式

$$J_s(t) = p_1 t^{1/2} + p_2 t + p_3 t^{3/2} + p_4 t^2 + p_5 t^{5/2} + p_6 t^3 + p_7 t^{7/2}, \quad (13)$$

式中,

$$p_1 = 5.76622625793412,$$

$$p_2 = 1294.6937847491,$$

$$p_3 = -29161.8874578355,$$

$$p_4 = 288942.133971609,$$

$$p_5 = -1514425.07948998,$$

$$p_6 = 4089063.43021786,$$

$$p_7 = -4469385.8538104.$$

拟合曲线如图 1 所示,电子倍增 CCD 由反转模式切换至非反转模式后, $0 \leq t \leq 0.01$  s 时,表面暗电流从 0 开始迅速增大; $0.01 < t < 0.02$  s 时,表面暗电流缓慢增加, $t \geq 0.02$  s 时,趋于平稳;表面暗电流不再增加,达到稳态值(由文献[15]可知, $T = 300$  K 时,非反转模式下电子倍增 CCD 的表面暗电流稳态值为  $1.79$  nA/cm<sup>2</sup>)。由此可见,器件进入非反转模式后,表面暗电流要经历一定的特征时间才能恢复到稳态值,温度越低,恢复得越慢。

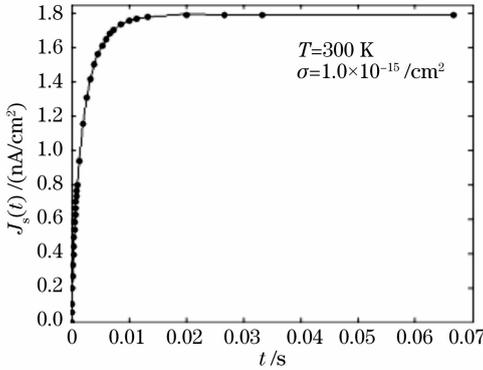


图 1 表面暗电流拟合曲线

Fig. 1 Surface dark current fitting curve

综上所述, $T = 300$  K 时,非反转模式下电子倍增 CCD 的表面暗电流可以用分段函数表示为

$$J_s(t) = \begin{cases} p_1 t^{1/2} + p_2 t + p_3 t^{3/2} + p_4 t^2 + p_5 t^{5/2} + p_6 t^3 + p_7 t^{7/2}, & 0 < t < 0.02 \text{ s} \\ 1.79, & t \geq 0.02 \text{ s} \end{cases} \quad (14)$$

### 3 周期反转模式

如果积分期内对成像区的时钟进行调制,加入一系列周期反转脉冲,使器件高电平时处于非反转模式,低电平时进入反转模式,只要高电平持续的时间小于恢复特征时间,就能有效抑制表面暗电流,这就是周期反转模式。调制期间始终有一相时钟栅压为正,因此无需对器件进行额外掺杂形成势垒。该模式既可以获得大的满阱容量,又能使表面暗电流接近反转模式的水平,需要注意的是衬底电压必须足够高,保证低电平时器件进入反转模式。

成像区积分期内的时序如图 2 所示, $I_1$  为电荷收集相, $I_2$  为电荷转移相, $I_3$  始终为低电平,处于反转模式。 $I_1$  由若干个周期为  $T$  的脉冲组成, $t_0$  为高电平, $t_1$  为低电平, $t_0 \gg t_1$ 。

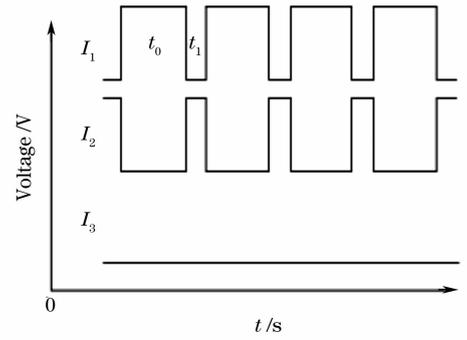


图 2 周期反转模式的时序波形图

Fig. 2 Timing waveform of periodic inverted mode

为

$$\bar{J}_s = \frac{A_c/A_p}{t_0} \int_0^{t_0} J_s(t) dt, \quad (15)$$

$$A_c/A_p \approx 1/3, \quad (16)$$

$A_c/A_p$  为收集相的栅极面积与整个像素面积的比值。

将(14)式代入(15)式,得到

$$\bar{J}_s = \begin{cases} \frac{1}{3} \left( \frac{2}{3} p_1 t_0^{1/2} + \frac{1}{2} p_2 t_0 + \frac{2}{5} p_3 t_0^{3/2} + \frac{1}{3} p_4 t_0^2 + \frac{2}{7} p_5 t_0^{5/2} + \frac{1}{4} p_6 t_0^3 + \frac{2}{9} p_7 t_0^{7/2} \right), & 0 < t_0 < 0.02 \text{ s} \\ -1.3 \times 10^{-3} t_0 + 0.6, & t_0 \geq 0.02 \text{ s} \end{cases} \quad (17)$$

$t_0$  期间平均暗电流的变化关系如图 3 所示。与图 1 相比,平均表面暗电流增长较为缓慢,恢复到稳态值需要的特征时间比表面暗电流大两个数量级。

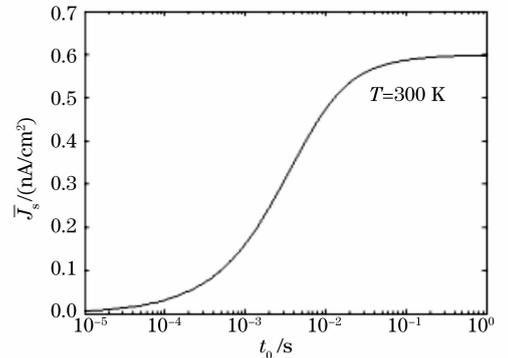


图 3 平均表面暗电流曲线

Fig. 3 Average surface dark current curve

$t_1$  时电荷被转移到  $I_2$  下储存, $I_1$  处于反转模式,价带的空穴被电子占据的界面态俘获,复合率为

$$\frac{dn_{ss}}{dt} + c_p n_{ss} = 0, \quad (18)$$

$t_0$  时  $I_1$  下形成势阱收集电荷,平均表面暗电流

解微分方程

$$n_{ss}(t) = n_{ss}(0) \exp(-\sigma_p v_{th} p_s t), \quad (19)$$

由(20)式得到复合特征时间

$$\tau = 1/(\sigma_p v_{th} p_s). \quad (20)$$

当  $p_s = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\sigma_p = 1 \times 10^{-16} \text{ cm}^{-2}$ ,  $v_{th} = 1.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$  时,  $\tau = 1.0 \text{ ns}$ 。选取  $t_1 = 2 \mu\text{s}$ , 远大于复合特征时间, 确保反转的时间足够长, 空穴与电子完全复合, 消除  $t_0$  期间产生的表面暗电流。

由定义可知, 反转脉冲的周期为

$$T = t_0 + t_1, \quad (21)$$

则反转脉冲的频率为

$$f = 1/(t_0 + t_1). \quad (22)$$

将(22)式代入(17)式即可得到平均表面暗电流与反转脉冲频率之间的关系, 如图4所示。水平直线表示反转模式下的暗电流水平(由文献[15]可知,  $T=300 \text{ K}$  时, 反转模式下电子倍增 CCD 的暗电流值为  $0.0213 \text{ nA/cm}^2$ )。随着反转脉冲频率变大, 平均表面暗电流不断减小, 当  $f = 5000 \text{ Hz}$  时,  $\bar{J}_s = 0.051 \text{ nA/cm}^2$ , 接近反转模式的水平。

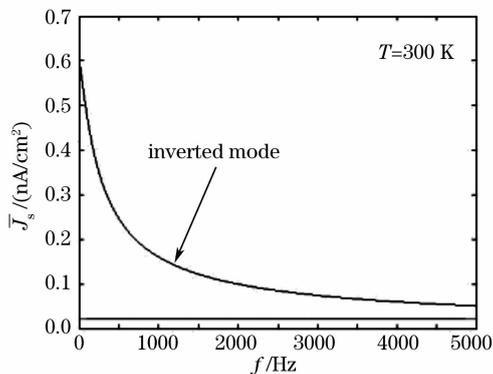


图4 平均表面暗电流随反转脉冲频率变化曲线

Fig. 4 Curve of average surface dark current versus periodic inverted pulses frequency

## 4 结 论

研究了非反转模式下电子倍增 CCD 表面暗电流的产生过程, 定量分析了表面暗电流的恢复特征时间, 在此基础上提出了周期反转模式的概念。仿真结果表明, 表面暗电流随着反转脉冲频率的提高迅速减小。当时钟周期为  $0.2 \text{ ms}$  时, 平均表面暗电流降低到  $0.051 \text{ nA/cm}^2$ , 接近反转模式的水平, 与理论分析完全一致, 从而验证了周期反转模式的可行性, 为下一步的硬件实现提供了切实可行的理论

依据。

## 参 考 文 献

- Bai Tingzhu, Jin Weiqi. *Photoelectric Imaging Principles and Technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 335~336
- 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
- Fan Hui, Lu Yutian. Improved numerical model of metal-semiconductor-metal photodetector[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1032~1036
- 范辉, 陆雨田. 一种改进型金属-半导体-金属光电探测器数学模型[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1032~1036
- Zhang Wentao. Sub-pixel resolution of CCD in optical communication[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(6): 788~790
- 张文涛. 空间光通信中 CCD 亚像素的分辨率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 788~790
- Ma Xiaoyu, Rao Changhui, Zhang Xuejun. Performance comparison of photon-multiplier-tube-based and CCD-based photoelectric devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(5): 882~888
- 马晓焯, 饶长辉, 张学军. 三种光电器件用于天体光度测量时的性能比较[J]. *光学学报*, 2007, **27**(5): 882~888
- Hu Xinqi, Yu Xin, Zhao Dazun. Influence of scene structure and noise on precision of correlating Hartmann-Shack wavefront sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1415~1418
- 胡新奇, 俞信, 赵达尊. 目标图像结构和噪声对相关哈特曼-夏克波前传感精度的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1415~1418
- Su Xuezheng. EMCCD technology—Single photon imaging detection[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2005, (2): 51~53
- 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
- Yu Ning. The current status and progress of the CCD for astronomical observations in recent years [J]. *Progress In Astronomy*, 1991, **9**(1): 69~77
- 余宁. 天文 CCD 的技术现状与发展[J]. *天文学进展*, 1991, **9**(1): 69~77
- Zhang Kun, Li Renhao. Design of operation mode of buried channel CCD[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(S1): 49~52
- 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
- J. Hyneczek. Virtual phase CCD technology[J]. *IEEE Electron Devices Meeting*, 1979, **25**: 611~614
- N. S. Saks. A technique for suppressing dark current generated by interface states in buried channel CCD imagers[J]. *IEEE Electron. Device Lett.*, 1980, **1**(7): 131~133
- Barry E. Buprke. Suppressing dark current in charge-coupled devices[P]. United States Patent 5008758
- Paul R. Jordan, Peter Pool, Simon M. Tulloch. Secrets of E2V technologies CCDs (ex Marconi CCDs) [J]. *Experimental Astronomy*, 2002, **14**(2): 69~75
- Barry E. Burke, Stephanie A. Gajar. Dynamic suppression of interface-state dark current in buried-channel CCDs[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1991, **38**(2): 285~290
- Dewitt G. Ong, R. F. Pieeret. Thermal carrier generation in charge-coupled devices[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 1975, **22**(8): 593~602
- Low-Light Technical Note 4: Dark Signal and Clock-Induced Charge in L3Vision™ CCD Sensors. <http://www.e2vtechnologies.com/index.htm>