

空间辐射对 CCD 器件暗电流的影响研究

侯 睿¹, 赵尚弘¹, 么周石², 姜晓峰¹, 石 磊¹, 李勇军¹, 占生宝¹

(1. 空军工程大学电讯工程学院,陕西西安 710077;2. 中国空间技术研究院西安分院,陕西 西安 710077)

摘要 电荷耦合器件 CCD(Charge Coupled Device, CCD)作为卫星光通信系统中光信标子系统的关键部件,它的工作性能直接影响着光通信系统的整体性能。根据 Shockley - Read - Hall 理论,对粒子辐照条件下 CCD 器件的暗电流变化进行了深入的理论分析,依据理论分析展开数值模拟计算。结果表明:P 沟道 CCD 辐照后的平均暗电流密度随温度的升高而增加、随辐照注量的提高而增大,暗电流尖峰产生的位置具有强烈的随机特性;温度较粒子辐照注量更能有效影响平均暗电流密度以及暗电流尖峰的产生,温控器件以及温控技术将是决定 CCD 定位精度的重要环节。

关键词 CCD;空间辐射;暗电流密度;温控技术

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.04.014

中图分类号 TN929 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)04-0064-05

在卫星光通信系统中,电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)是其捕获、跟踪、瞄准(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)子系统的关键部件。在空间辐射环境中,CCD 器件的电荷转移效率(Charge Transfer Efficiency, CTE)会随着器件工作寿命的增加而有所降低^[1-2], CTE 的变化导致输出端信号强度起伏,会引起光信标系统的定位误差,对此我们已经开展了相关深入的研究^[3]。然而空间辐射除了会造成信号强度的变化外,还可能引起 CCD 器件表面暗电流和体暗电流起伏。暗电流作为噪声附加到信号上进入探测系统,也可能会造成光信标系统的定位误差,因而很有必要开展空间辐射对 CCD 器件暗电流的影响研究。

1 物理机制

位移损伤诱发 CCD 体内产生缺陷能级,从而导致暗电流增大,其增大来源可分为耗尽区内位于禁带中的缺陷能级引起的电子热运动跃迁,以及半导体基片无电场区向耗尽区的载流子扩散。缺陷能级 E_t 的存在,使得载流子的跃迁提供了中间过渡能级,示意图见图 1。从图中可以看出,载流子的跃迁主要包含以下 4 个过程^[4]:①电子俘获过程:电子从导带 E_c 跃迁到缺陷能级 E_t ;②电子发射过程:电子从缺陷能级 E_t 跃迁到导带 E_c ;③空穴俘获过程:电子从缺陷能级 E_t 跃迁到价带 E_v ;④空穴发射过程:电子从价带 E_v 跃迁到缺陷能级 E_t 。缺陷能级 E_t 的存在,增大了载流子的跃迁机率,从而增大了暗电流,在工作温度较高的情况下,这种暗电流增强表现得更为明显。

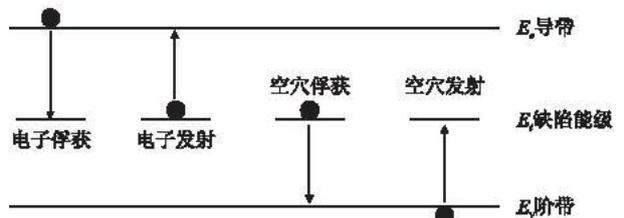


图 1 载流子通过缺陷能级进行跃迁的过程

Fig. 1 Transmission process of carrier through trap band

* 收稿日期:2010-12-15

基金项目:国家“863”计划资助项目(2007AA01Z294);中国博士后科研基金资助项目(20090461466);陕西省自然科学基金资助项目(2009JQ8013)

作者简介:侯睿(1983-),女,陕西西安人,博士生,主要从事卫星光通信技术研究。

E-mail: houruirachel@yahoo.com.cn

2 理论分析

根据 Shockley - Read - Hall 理论,位移损伤所导致的填充缺陷密度 n_{ss} 由如下微分方程所决定^[5]:

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

式中: N_t 为缺陷密度; e_n 和 e_p 分别为电子和空穴的发射速率; c_p 为空穴俘获速率,其表达式如下:

$$e_n = \sigma_n v_{\tau\eta} v_i \varepsilon^{(E_\tau - E_i)/K_B T} \quad (2)$$

$$e_p = \sigma_p v_{th} n_i e^{-(E_i - E_i)/K_B T} \quad (3)$$

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

式中: σ_n 和 σ_p 分别为电子和空穴的俘获截面积; p_s 是表面空穴密度; v_{th} 是载流子热速率; n_i 是本征载流子密度; E_i 是本征费米能级; K_B 是波尔兹曼常数; T 是绝对温度。

当 CCD 器件处于稳态时,填充缺陷密度的变化率为零^[5],即 $dn_{ss}/dt = 0$,得到:

$$\frac{n_{ss}}{N_{ss}} = \left[1 + \frac{\sigma_n}{\sigma_p} e^{2(E_i - E_i)/K_B T} + \frac{p_s}{n_i} e^{(E_i - E_i)/K_B T} \right]^{-1} \quad (5)$$

当 CCD 器件处于深耗尽状态时,电子和空穴密度均远小于本征载流子密度,此时部分缺陷被受激发的电子所填充^[6-7]。由于空穴密度非常小,可以令 $p_s = 0$,得到电子 - 空穴对产生率 $G(E_i, t)$ 一种简化形式:

$$G(E_i, t) = e_n(E_i) n_{ss}(E_i, t) \quad (6)$$

根据式(1)及其初始条件 $G(E_i, 0) = 0$,可进一步将产生率 $G(E_i, t)$ 表示为:

$$G(E_i, t) = \sigma_n \sigma_p v_{th}^2 n_i^2 N_t \frac{(1 - e^{-P_t})}{P} \quad (7)$$

暗电流密度 $J_s(t)$ (单位为 nA/cm²) 可依据产生率 $G(E_i, t)$ 表示为:

$$J_s(t) = q \int_0^{E_g} G(E_i, t) dE_i \quad (8)$$

式中 E_g 为带隙能量。为了简便计算,作如下变量代换:

$$x = \sqrt{\frac{\sigma_n}{\sigma_p}} \exp[(E_i - E_i)/K_B T] \quad (9)$$

暗电流密度 $J_s(t)$ 可进一步表示为^[5]:

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

式中 $\sigma = (\sigma_n \sigma_p)^{1/2}$ 为俘获截面积的几何平均。

$J_s(\infty)$ 是稳态时耗尽区的暗电流密度,其表达式为:

$$J_s(\infty) = q n_i s_0 \quad (11)$$

$$s_0 = \sigma v_{th} N_t \pi K_B T / 2 \quad (12)$$

3 空间辐射对 CCD 器件暗电流的影响

根据以上理论分析,式(10) - (12)是开展 CCD 器件暗电流研究的理论依据。很明显,空间辐射诱发的 CCD 器件暗电流的变化主要取决于 3 个关键参数,即缺陷能级 E_i 、工作温度 T 以及粒子辐照剂量^[8] (表现为俘获截面积 σ 的变化)。为了定量分析空间辐射对 CCD 器件暗电流造成的影响,我们首先需要确定辐射前一般性 CCD 器件的体暗电流大小。

3.1 辐射前 CCD 器件的暗电流

辐射前 CCD 器件的暗电流主要由电子热运动跃迁和载流子扩散所决定。James P. Spratt 等人给出了典型 CCD 器件的暗电流密度,使得我们对其能有更直观的认识和了解,其实验测量所用的 CCD 分别标记为: 1. PCCD - W19 - D23; 2. PCCD - W19 - D24; 3. PCCD - W19 - D28; 4. PCCD - W21 - D21; 6. NCCD - W13 - D50; 7. NCCD - W13 - D72; 8. NCCD - W14 - D20,辐照前 CCD 器件的暗电流测量结果见图 2^[5,9-10]。从图中可以看

出,同类型的 CCD 体暗电流密度相差不大,对于 P 沟道 CCD 体暗电流密度约为 600 PA/cm^2 ,而对于 N 沟道 CCD 则只有 $10 \text{ PA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 左右;N 沟道 CCD 的体暗电流密度远小于 P 沟道 CCD,这主要是由掺杂元素以及 CCD 加工工艺所决定。

3.2 辐射后 CCD 器件的暗电流

为便于获取更加明确直观的对比结果,下面选取暗电流密度较大的 P 沟道 CCD 进行分析。James P. Spratt 等人通过实验测量了 P 沟道 CCD 受质子辐照后暗电流密度的变化情况,其结果见图 3、图 4^[5]。从图 3 可以看出,P 沟道 CCD 器件的暗电流密度随着温度的升高而不断增大。温度每升高 20 K 暗电流密度约增大一个量级左右,这主要是由于温度升高增强了电子-空穴对的活跃程度,增大了器件的热扩散电流。从图 4 可以看出,暗电流密度受粒子辐射注量的影响并不十分显著,在 $2\text{E}+10 \text{ P/cm}^2$ 粒子注量辐射下

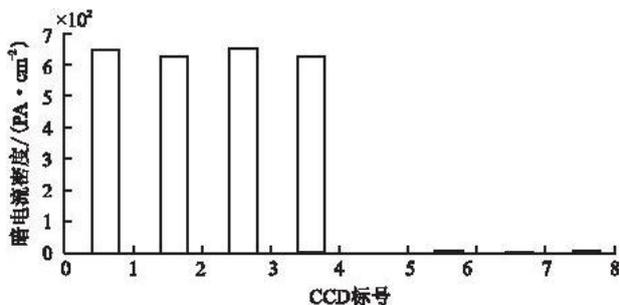


图 2 辐照前 CCD 器件的暗电流密度

Fig. 2 Pre-radiation dark currents of typical CCDs

的暗电流密度较 $5\text{E}+9 \text{ P/cm}^2$ 粒子注量下有所增加,但是增加幅度与图 3 相比并不明显。这说明在粒子辐射注量变化不大的情况下,辐射诱发的 CCD 体缺陷密度变化不大,缺陷引入的暗电流变化与温度所决定的热扩散电流相比成分较小^[11]。在暗电流随温度的变化基本可以忽略情况下,暗电流起伏主要由粒子辐照注量所决定,根据图 4,此时的暗电流密度变化应该较小。

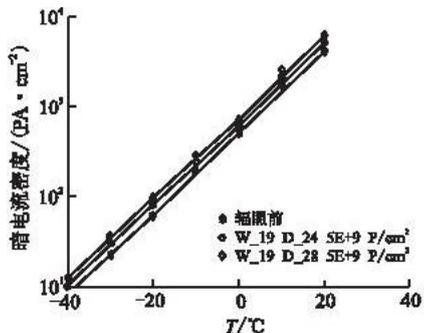


图 3 获得阵列参数流程图

Fig. 2 Flow chart of array parameter obtaining

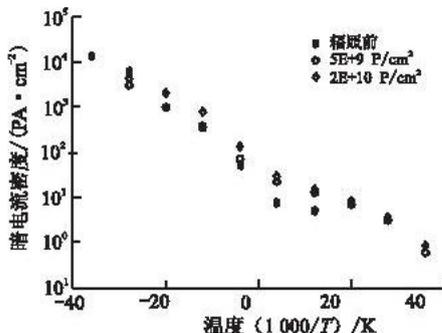
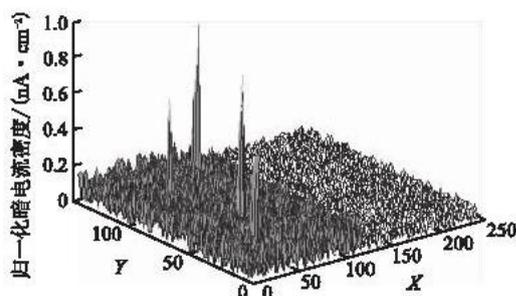
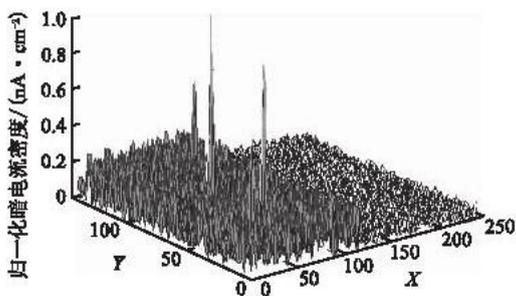


图 4 暗电流密度随辐照注量的变化关系

Fig. 4 Relation between dark current density with particle fluence for P-CCD

图 3 和图 4 给出的是高能粒子辐照下 CCD 器件平均暗电流的变化情况,粒子辐射位移损伤不仅诱发 CCD 器件平均暗电流密度增大,而且还会导致暗电流的不一致性增大,表现为暗电流尖峰(Hot Spike)。一般认为暗电流尖峰的产生是由于单个粒子非弹性核反作用,导致大量的位移能量沉积在一个像元。位移能量沉积在几个像元的情况很罕见,至少在低辐照注量下是很罕见的^[12]。根据上述理论分析,联立式(8)-(12),并在其中加入一些随机变量,可以数值模拟计算得到高能粒子辐照下 CCD 器件平均暗电流以及暗电流尖峰随温度以及辐照注量的变化关系,见图 5、图 6。



(a) 粒子辐照注量 $2\text{E}+9 \text{ P/cm}^2$

(b) 粒子辐照注量 $5\text{E}+10 \text{ P/cm}^2$

图 5 平均暗电流密度及暗电流尖峰随辐照注量的变化关系

Fig. 5 Relation between mean dark current, hot spike and particle fluence

图5中 CCD 器件的工作温度设定为 20°C , 图5(a)中右半部分为辐照前 CCD 器件的暗电流密度, 左半部分为粒子辐照注量 $2\text{E}+9\text{ P}/\text{cm}^2$ 下 CCD 器件的暗电流密度的变化情况。从图中可以看出, 受粒子辐照后 CCD 器件的平均暗电流密度较辐照前有所增大, 表现为图中暗电流基座的抬高, 数值计算结果与 James P. Spratt 等人的实验测量结果符合较好; 同时可以看到, 受辐照后的 CCD 器件部分出现了明显的暗电流尖峰, 其归一化度量值较平均暗电流密度要大很多, 一般为 $1-8\text{ nA}/\text{cm}^2$ 。图5(b)是 CCD 器件在更高粒子辐照注量下暗电流的变化情况, 与图5(a)相比, 高的辐照注量导致了更高的平均暗电流密度, 同时也出现了较为明显的暗电流尖峰, 然而暗电流尖峰出现的像元位置与图5(a)明显不同, 这说明暗电流尖峰具有强烈的随机特性。

图6(a)中右半部分为温度 $T=0^{\circ}\text{C}$ 时 CCD 器件的暗电流密度, 左半部分为同样粒子辐照注量下温度 $T=20^{\circ}\text{C}$ CCD 器件的暗电流密度的变化情况。从图中可以看出, 温度升高同样导致 CCD 器件平均暗电流密度的增大, 并且由于温升所导致的平均暗电流密度增大较辐照注量导致的平均暗电流密度的变化要大; 图中同样也出现了较为明显的暗电流尖峰。图6(b)与图6(a)类似, 只是将 CCD 器件的工作温度提高到 $T=30^{\circ}\text{C}$ 。很明显, 温度升高导致出现了更大的平均暗电流密度。由此可见, 在轨运行过程中对 CCD 器件的温控是决定 CCD 器件定位性能的关键环节, 也决定着整个光信标子系统的定位精度。

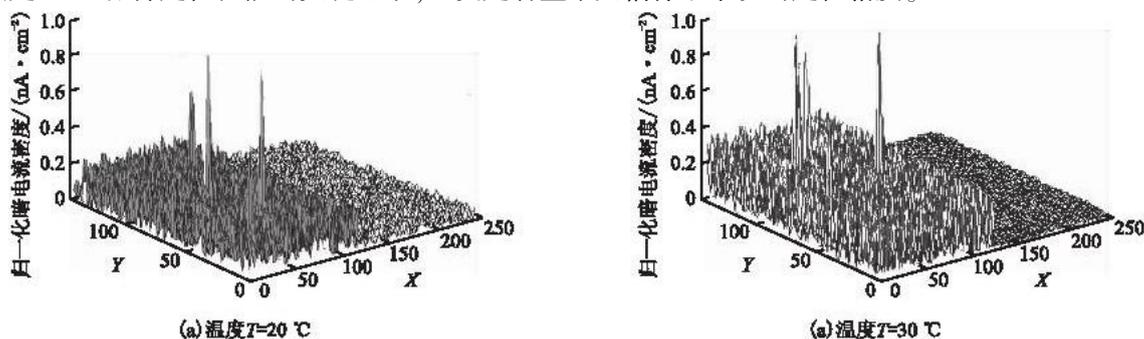


图6 平均暗电流密度及暗电流尖峰随温度的变化关系

Fig. 6 Relation between mean dark current, hot spike and temperature

4 结束语

CCD 是卫星光通信系统中光信标子系统的关键部件, 它的工作性能决定了 ATP 子系统的跟瞄精度, 也直接影响着光通信链路的建立。本文从位移损伤所导致的填充缺陷密度入手, 对 CCD 器件的暗电流密度进行了深入的理论分析, 对粒子辐照条件下 CCD 器件的平均暗电流密度以及暗电流尖峰进行了数值模拟计算。计算结果表明, 温度较粒子辐照注量更能有效影响平均暗电流密度以及暗电流尖峰的产生, 因而在轨工作的 CCD 器件选择合适的温控器件以及温控技术将是决定 CCD 定位精度的重要环节。该理论计算数据同时也可作为开展空间辐射对卫星光通信系统性能影响研究的理论依据, 这将是下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 赵尚弘. 卫星光通信导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2005.
ZHAO Shanghong. Introduction to laser satellite communications[M]. Xi'an: Xidian university press, 2005. (in Chinese)
- [2] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境实验技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
HUANG Bencheng, MA Youli. Space environment test technology of spacecraft[M]. Beijing: Academic press, 2002. (in Chinese)
- [3] 侯睿, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间环境对卫星光通信系统的影响因素分析[J]. 光通信技术, 2008, 38(3): 35-39.
HOU Rui, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, et al. Analysis of space environment effects on satellite optical communication system[J]. Optical communication technology, 2008, 38(3): 35-39. (in Chinese)
- [4] 王祖军, 黄绍艳, 刘敏波, 等. CCD 位移辐射效应损伤机理分析[J]. 半导体光电, 2010, 31(4): 175-179.
WANG Zujun, HUANG Shaoyan, LIU Minbo, et al. Analysis of the displacement damage mechanism of radiation effects in CCD [J]. Semiconductor optoelectronics, 2010, 31(4): 175-179. (in Chinese)
- [5] Spratt James P, Chris Conger, Richard Bredthauer, et al. Proton damage effects in high performance P-channel CCDs[J].

- IEEE trans nucl sci, 2006,53(2):423-430.
- [6] Brau James E, Olga Igonkina, Potter Chris T. Investigation of radiation damage effects in neutron irradiated CCD[J]. Nuclear instruments & methods in physics research, 2005,549(6):117-121.
- [7] SAKS N S. A Technique for suppressing dark current generated by interface states in buried channel CCD imagers[J]. IEEE trans nucl sci, 1980,27(7):131-133.
- [8] Andre Sopezaka, Khaled Bekhouchea, Chris Bowdery, et al. Radiation hardness of CCD vertex detectors for the ILC[C]//2006 IEEE nuclear science symposium conference. San Diego, CA:IEEE press,2006:576-582.
- [9] WANG Zujun, LIU Yinong, CHEN Wei, et al. Degradation of a COTS linear CCD induced by proton irradiation[J]. Nuclear instruments and methods in physics research B, 2010,268(6):285-290.
- [10] Burke Barry E, Gajar Stephanie A. Dynamic suppression of interface-state dark current in buried-channel CCDs[J]. IEEE trans nucl sci, 1991, 38(2):2018-2023.
- [11] Norbert Meidinger, Bernhard Schmalhofer, Lothar Struder. Alpha particle, proton and s-ray damage in fully depleted PN-junction CCD detectors for x-ray imaging and spectroscopy[J]. IEEE trans nucl sci, 1998, 45(6):2849-2856.
- [12] Germanicus R, Barde S, Dusseau L, et al. Evaluation and prediction of the degradation of a cots CCD induced by displacement damage[J]. IEEE trans nucl sci, 2002,49(6):2830-2835.

(编辑:徐楠楠)

Influence of Space Radiation on the Dark Current Density of CCD Equipment

HOU Rui¹, ZHAO Shang-hong¹, YAO Zhou-shi², JIANG Xiao-feng¹, SHI Lei¹, LI Yong-jun¹, ZHAN Sheng-bao¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710077, China)

Abstract: The charge-coupled device (CCD) is the key component of the beacon subsystem in optical satellite communication system, whose efficiency determines the integral performance of the optical communication system. According to the theory of Shockley-Read-Hall, the theoretical analysis of CCD equipment under particle radiation is made, and the numerical calculations are developed based on the theoretical analysis. The calculation results show that the mean dark current of P-CCD increases with the increase of operation temperature, the stronger particle radiation leads to the higher mean dark current and the hot spikes are strongly random; the temperature more effectively induces CCD mean dark current density and its hot spikes than particle radiation fluency. Therefore, the temperature-controlling chips and technique will play a key role in determining the CCD position accuracy.

Key words: CCD; space radiation; dark current density; temperature-controlling technique