

典型石英钟振的电离辐射效应

刘伟鑫 李 珍 肖寅枫 吾勤之 王昆黍 宣 明

(上海航天技术研究院第八〇八研究所 上海 201109)

摘要 利用 ^{60}Co γ -射线源研究宇航用典型石英钟振及其内部 SM5009 型振荡电路的电离辐射效应, 测试辐照条件下钟振输出信号幅度、电源和电流等参数变化情况, 分析这些参数变化与振荡电路失效之间的关系。结果表明, 辐照条件下 SM5009 的场氧漏电较为严重, 受照剂量达 1500 Gy(Si) 时, 其漏电流增大至 10^{-4} A 量级, 这是导致辐照条件下钟振功耗电流增大的主要原因。同时 SM5009 的输出高电平对受照剂量较为敏感, 当受照剂量达 1500 Gy(Si) 时, 输出高电平下降约 0.5 V, 导致钟振输出信号峰峰值随受照剂量的增加而下降。

关键词 钟振, 电离辐射效应, 振荡电路

中图分类号 TN45, TL81

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2015.rrj.33.030801

石英晶体振荡器是将具有压电效应的石英晶体谐振器和振荡电路、温控电路集成在一起, 加电即有频率信号输出的频率源器件, 被广泛应用于卫星电子系统上为 CPU、DSP 等处理器以及 A/D、D/A 转换器提供时钟频率信号, 是卫星电子系统的核心部件, 其种类包括钟振、温补型、压控型和恒温型等^[1-4]。石英晶振内部的振荡电路、温控电路主要由半导体集成电路和分立器件组成^[5], 而空间辐射环境中的带电粒子会对这些集成电路造成电离辐射损伤^[6-8], 引起其参数特性发生变化, 导致振荡电路的振荡、分频和滤波功能失效, 造成石英晶振的输出频率信号幅度下降或无信号输出, 最终导致卫星电子系统出现工作时序紊乱、数据处理出错等现象, 因此, 开展石英晶振的辐射效应研究, 对于确保其在空间辐射环境中的可靠工作具有重要意义。而国内外目前对于石英晶振辐射效应研究的报道较为少见。本研究利用 ^{60}Co γ -射线源对典型钟振以及钟振内部的振荡电路进行了电离辐射试验, 分析电离辐射环境下钟振输出信号幅度等参数变化情况与其内部 MOS 型振荡电路失效之间的关系, 探讨了钟振的电离辐射效应规律。

1 材料与方 法

1.1 试验样品

试验样品为国内某单位生产的不同输出频率的

典型钟振, 包括 ZA-30 MHz 和 ZA-33 MHz。钟振是没有采用恒温控制电路或温度补偿电路的晶振, 为二次封装器件。图 1 和图 2 分别给出了典型钟振的结构示意图和开盖后的照片。

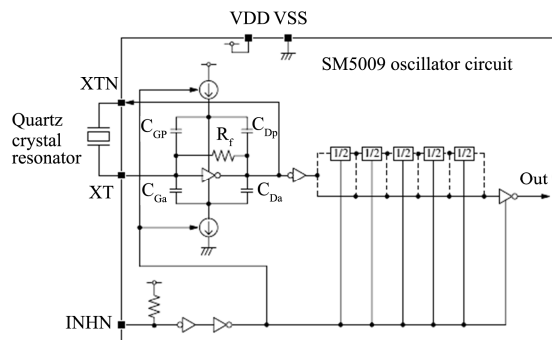


图 1 典型钟振的结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of typical clock oscillator

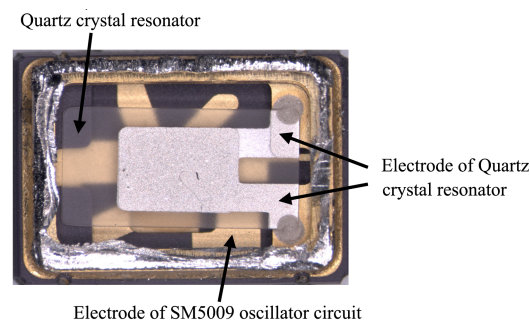


图2 典型钟振开盖后的照片
Fig.2 Photo of clock oscillator after removing lid

第一作者: 刘伟鑫, 男, 1984 年 9 月出生, 2010 年于上海航天技术研究院获硕士学位, 工程师, 从事卫星用电子器件辐照可靠性评估技术研究工作, E-mail: ivan025@163.com

收稿日期: 初稿 2015-03-13; 修回 2015-05-06

钟振主要由石英晶体谐振器和 MOS 型振荡电路 SM5009 组成。SM5009 对石英晶体谐振器通过压电效应产生的正弦波进行整形、分频和滤波, 输出稳定的频率信号。

1.2 辐照试验条件

钟振属于二次封装器件, 因此首先将单独封装进行辐照试验, 测量 SM5009 典型参数随受照剂量的变化情况; 再对整个钟振进行辐照试验, 测量输出信号幅度等参数随受照剂量的变化情况, 探讨电离辐射环境下钟振的参数变化与 SM5009 失效之间的关系, 研究电离辐射效应规律。

辐照试验条件为: 辐射源为中科院新疆理化所的 ^{60}Co γ -射线源。辐射试验的剂量率包括 0.1 Gy(Si)/s 和 0.5 Gy(Si)/s 两种。SM5009 的辐照偏置条件为高偏置, 即电源端施加 3 V 直流电压, 地端接地, 所有输入端均施加高电平, 即接至 3 V 直流电压。钟振的辐照偏置条件为典型工作状态。辐照试验所测量的参数为: SM5009 主要测量器件内部 NMOS 晶体管的 I - V 特性曲线和整个器件的输出特性曲线随受照剂量变化情况; 钟振主要是测量器件的输出信号幅度 V_{P-P} 以及电源电流 I_{DD} 随受照剂量变化情况。参数测量方式采用移位测量方式进行, 每次测量在 20 min 内完成。

2 试验结果

2.1 SM5009 的辐照试验结果

2.1.1 NMOS 晶体管 I - V 特性曲线与受照剂量的关系
图 3 为 MOS 型振荡电路 SM5009 内部 NMOS 晶体管的 I - V 特性曲线随受照剂量的变化情况。

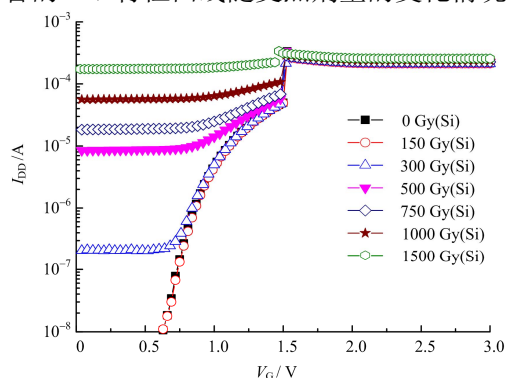


图 3 SM5009 内部 NMOS 晶体管 I - V 特性曲线随受照剂量变化情况

Fig.3 NMOS transistor I - V characteristics of SM5009 irradiated with different doses

NMOS 晶体管的 I - V 特性曲线对受照剂量比较敏感, 随着受照剂量增加, I - V 特性曲线逐渐向上抬升, 表明辐照引起 NMOS 晶体管的漏电流不断增大, 当受照剂量达到 1500 Gy(Si) 时, 漏电流已达 10^{-4} A 量级左右。

2.1.2 输出特性曲线与受照剂量的关系

图 4 给出了 SM5009 的输出特性曲线随受照剂量的变化情况。输出特性曲线可以分为两部分: INHN 端 (器件的输出使能端) 的输入电压小于 1.5 V 时, 器件处于高阻状态, 输出电压基本为 0 V; INHN 端的输入电压大于 1.5 V 时, 器件由高阻状态转为工作状态, 输出电压由 0 V 跳变为高电平电压。

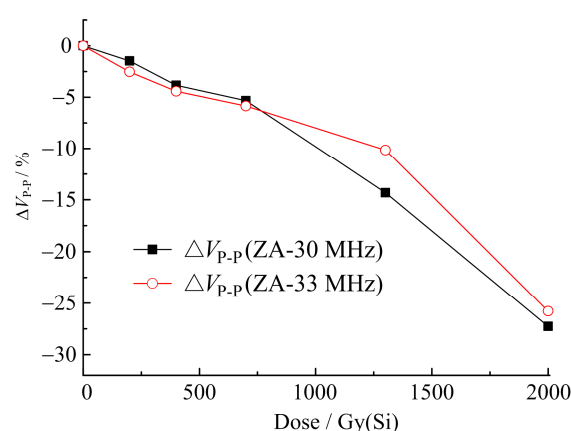


图 4 SM5009 输出特性曲线随受照剂量变化情况
Fig.4 Output characteristic of SM5009 irradiated with different doses

如图 4 所示, 辐照前 SM5009 的输出高电平电压在 3 V 左右, 即与电源电压相等; 当受照累积剂量达到 500 Gy(Si) 时, 输出高电平电压降低至 2.8 V 左右; 最终在受照剂量达到 1500 Gy(Si) 时降低至 2.5 V 左右, 表明 SM5009 的输出高电平电压对受照剂量较为敏感。

2.2 典型钟振的辐照试验结果

2.2.1 输出信号幅度与受照剂量的关系

图 5 给出了 ZA-30 MHz 和 ZA-33 MHz 两种型号钟振输出信号幅度的变化量 ΔV_{P-P} 与受照剂量的关系。当受照剂量达到 1000 Gy(Si) 时, 输出信号幅度下降约 10%, 最终在累积剂量达到 1500 Gy(Si) 以上时输出信号幅度下降约 25%, 表明钟振的输出信号幅度对受照剂量比较敏感。

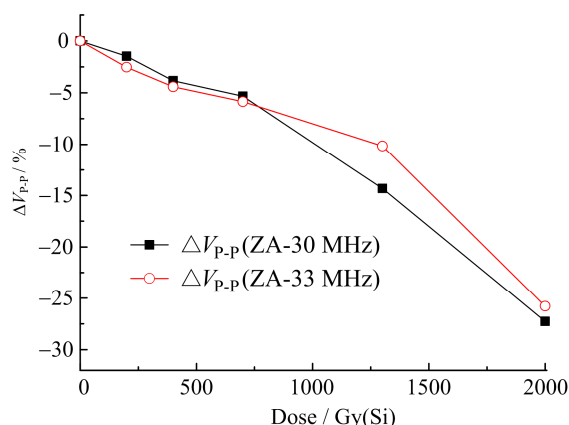


图5 钟振输出信号幅度的变化量 ΔV_{p-p} 与受照剂量的关系
Fig.5 ΔV_{p-p} of typical clock oscillator irradiated with different doses

2.2.2 输出信号频率与受照剂量的关系

图6绘出了ZA-30MHz和ZA-33MHz两种型号钟振输出信号频率随受照剂量的变化情况。随着受照剂量增加,钟振的输出信号频率基本没有变化。

2.2.3 电源电流与受照剂量的关系

图7绘出了ZA-30MHz和ZA-33MHz两种型号钟振的电源电流 I_{DD} 随受照剂量变化情况。随着受照剂量增加,两种型号钟振的电源电流均出现了增大现象。

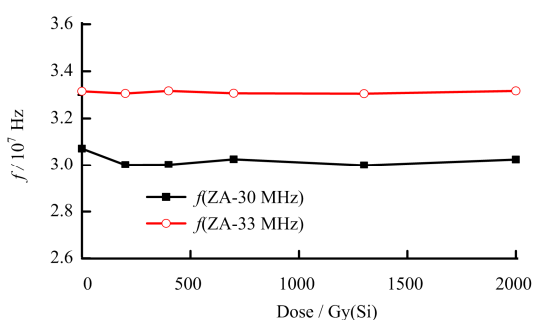


图6 钟振输出信号幅度变化与受照剂量的关系
Fig.6 Frequency of typical clock oscillator irradiated with different doses

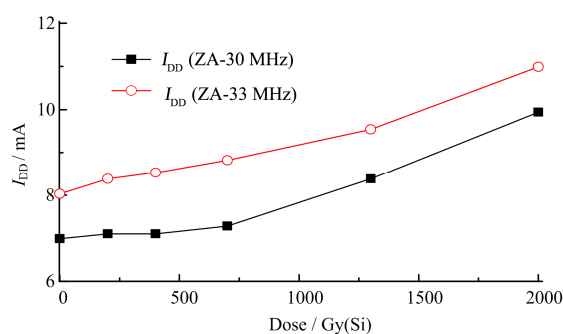


图7 钟振的电源电流 I_{DD} 随受照剂量变化情况
Fig.7 I_{DD} of typical clock oscillator irradiated with different doses

3 讨论与分析

SM5009 的电离辐射效应规律表现为随着受照剂量增加,器件内部NMOS晶体管的漏电流逐渐增大、输出高电平电压逐渐下降。钟振的电离辐射效应规律表现为随着受照剂量增加,输出信号幅度逐渐下降、电源电流增大。钟振内部的石英晶体谐振器为无源器件,对辐照不敏感,而SM5009对辐照敏感。下面结合SM5009典型参数随受照剂量的变化来分析钟振的电离辐射效应规律。

根据空间电荷模型^[9-11],在 ^{60}Co γ -射线辐照下,MOS型器件表面的栅氧化层和场氧化层中会产生大量电子-空穴对。室温条件下,电子迁移率约为 $2 \times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,在较短时间内通过电场的作用即被扫出 SiO_2 层;而空穴由于其迁移率较低,在电场的作用下缓慢地向Si-SiO₂界面输运。在这种情况下,一些空穴被 SiO_2 层生长过程中形成的陷阱和缺陷俘获形成正电性的氧化物陷阱电荷。这些氧化物陷阱电荷积累会引起MOS晶体管的漏电流增大、阈值电压负向漂移、噪声容限下降等^[6-7]。

图3中SM5009内部NMOS晶体管的 I - V 特性曲线只是向上抬升而没有发生负向漂移,表明漏电流增大主要是辐照在场氧中感生的氧化物陷阱电荷积累造成的。SM5009采用铝栅CMOS工艺制造,特征尺寸为 $1.0 \mu\text{m}$,其隔离结构采用LOCOS工艺实现。由LOCOS工艺制备的NMOS晶体管沟道边缘剖面图由图8给出。

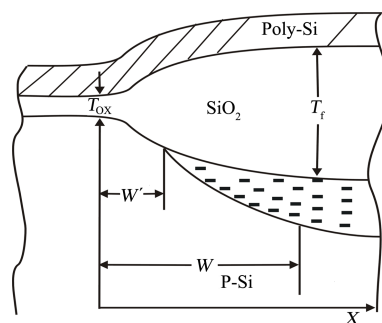


图8 采用LOCOS制备的NMOS晶体管沟道边缘剖面图
Fig.8 Cross-section of NMOS transistor edge by LOCOS

从图8中可以看出,在沟道边缘的栅氧和场氧之间存在一个“鸟嘴区”,该“鸟嘴区”的厚度迅速增加。为计算方便,我们将栅氧和场氧之间的“鸟嘴区”看成是一个寄生晶体管,这个寄生晶体管以场氧为“栅氧”,以本征晶体管的多晶硅栅为“栅极”,以本征晶体管的源漏为“源漏”。这种情况下NMOS晶体管的漏源电流应为本征晶体管漏源电流和寄生

晶体管漏源电流之和, 如式(1)示。

$$I_{DS(\text{实际})} = I_{DS(\text{本征})} + I_{DS(\text{寄生})} \quad (1)$$

根据沟道边缘寄生晶体管的特性, 计算沟道边缘寄生晶体管内部由 ^{60}Co γ -射线辐照引入的氧化物陷阱电荷总量 ΔQ_t , 方法是将单位面积氧化物陷阱电荷 $\Delta Q_{SS}(x)$ 沿 X 轴方向的积分, 如式(2)示。

$$\Delta Q_t = \int_0^W \Delta Q_{SS}(x) dx \quad (2)$$

场氧的制作工艺一般采用热氧化方法进行, 在热生长过程中, “鸟嘴区”中会被扩散一部分的高掺杂的 n 型硅材料, 图9中的黑点区域即代表这些 n 型硅材料。

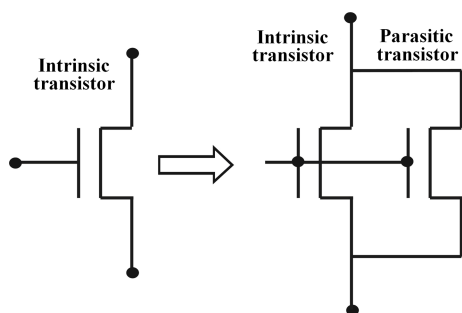


图9 寄生的NMOS晶体管示意图
Fig.9 Schematic of parasitic NMOS transistor

由于寄生晶体管主要存在于 $x < W'$ 的区域, 因此, 式(2)中的积分上限变为 W' 。

$$\Delta Q_t = \int_0^{W'} \Delta Q_{SS}(x) dx \quad (3)$$

假设整个场氧区域内部电场是平行的, 并且“鸟嘴区”中的场氧是线性增厚的, 则“鸟嘴区”中氧化层厚度可以用式(3)表示。

$$T(x) = T_{OX} + \frac{T_f - T_{OX}}{W} x \quad (4)$$

^{60}Co γ -射线辐照在 SiO_2 层中产生的电子-空穴对数量与 SiO_2 层厚度之间的关系如式(5)示。

$$\Delta Q_{SS} \approx AT^n(x) \quad (5)$$

式中, A 为系数, n 一般为2或3。

将式(5)带入式(2), 进行积分可以得出:

$$\Delta Q_t = \frac{AW}{(T_f - T_{OX})} (T_{OX} + \frac{T_f - T_{OX}}{W} W')^{n+1} \quad (6)$$

则场氧中单位面积上由 ^{60}Co γ -射线辐照引入的氧化物陷阱电荷数量可以表示为式(7)。

$$\Delta \bar{Q}_{SS} \approx \frac{\Delta Q_t}{W'} \quad (7)$$

一般总有 $T_f \gg T_{OX}$, 则根据式(6)和式(7), 可以得出:

$$\Delta \bar{Q}_{SS} \approx A(n+1)^{-n} \frac{W'}{W} T_f^n \quad (8)$$

与式(5)相比, 可以得出寄生晶体管的“等效栅氧化层”为 W' , “等效厚度”为 $\bar{T}_{OX} \approx (n-1)^{-n} \frac{W'}{W} T_f$, 由于电离辐射效应引起的寄生晶体管阈值电压漂移可以表示为式(9)。

$$\Delta \bar{V}_T = \frac{\Delta \bar{Q}_{SS} \bar{T}_{OX}}{\epsilon \epsilon_0} = \frac{\Delta \bar{Q}_{SS}}{\bar{C}_{OX}} \quad (9)$$

其漏源电流 $I_{DS}(\text{寄生})$ 可以用式(10)表示。

$$I_{DS}(\text{寄生}) = \frac{\left\{ m\mu_n W' + \frac{\bar{C}_{OX}}{2L} [V_G - (\bar{V}_T + \Delta \bar{V}_T)]^2 \right\}}{\left\{ m\mu_n W' + \frac{\bar{C}_{OX} V_D}{L} [V_G - (\bar{V}_T + \Delta \bar{V}_T)] - \frac{V_D^2}{2} \right\}} \quad (10)$$

式中, m 为沟道边缘数, V_T 为“鸟嘴区”寄生晶体管的等效开启电压。

图10为实际情况下NMOS晶体管 I - V 特性曲线示意图。

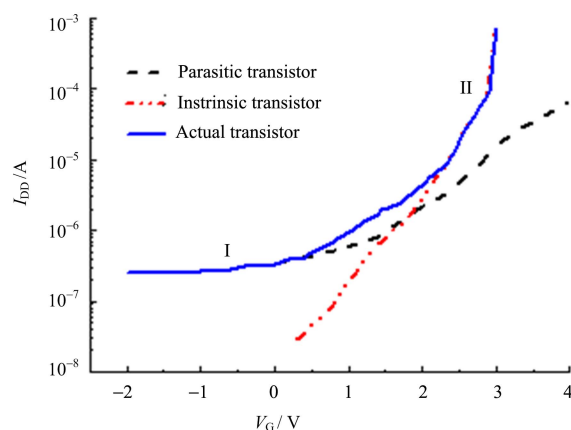


图10 辐照条件下实际NMOS晶体管的 I - V 特性曲线
Fig.10 The I - V characteristics of NMOS transistor

该图主要由两部分组成: 辐照达到一定剂量时, 当栅极电压较小, 本征晶体管还未导通, 而场氧由于氧化物陷阱电荷的形成导致寄生晶体管开启, 使得第1段NMOS晶体管的漏源电流主要由寄生晶体管决定, 第2段当栅极电压达到一定值时, NMOS

晶体管的漏源电流将主要从本征晶体管沟道区流过。

由于场氧比栅氧厚很多，生长工艺控制也不如栅氧严格。因此在较小的受照剂量下，场氧内就积累大量氧化物陷阱电荷，使得寄生晶体管的阈值电压漂移比本征晶体管大得多，导致该区域的硅表面比栅中部区域提前反型，为漏源之间提供了一条通路，造成漏源之间的寄生漏电，即出现图 3 中随着受照剂量增加，NMOS 晶体管的 $I-V$ 特性曲线不断向上抬升、寄生漏电不断增大的现象。而钟振内部的 SM5009 含有数百个 NMOS 晶体管，这些 NMOS 晶体管寄生漏电的叠加导致了图 6 中钟振的电源电流随受照剂量增加不断增大。

辐照条件下 SM5009 输出高电平电压下降也是场氧寄生漏电引起的。SM5009 内部的基本单元为 CMOS 反相器，可以用 CMOS 反相器输出高电平电压与场氧寄生漏电的关系来分析该现象。图 11 为 CMOS 反相器的结构示意图，其输出电压 V_{OUT} 与 NMOS 晶体管的压降相同。辐照前， V_{IN} 为低电平时，PMOS 晶体管导通（导通电阻很小），NMOS 晶体管截止（截止电阻很大），反相器中没有电流流过， V_{OUT} 与电源电压 V_{DD} 相等。辐照条件下，场氧寄生漏电引起 NMOS 晶体管漏源之间有电流流过，导致等效电阻逐渐减小，造成 NMOS 晶体管的压降不断下降，即 V_{OUT} 随着受照剂量的增加不断减小。

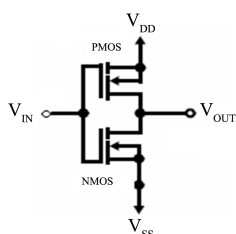


图 11 CMOS 反相器的结构示意图
Fig.11 Schematic of CMOS inverter

由于钟振的输出信号是通过 SM5009 中多个反相器对石英晶体谐振器产生的正弦波进行整形和滤波后得到的，因此，电离辐射环境条件下，SM5009 中多个反相器输出高电平电压衰减的级联表现为测量到的钟振输出信号幅度随受照剂量的增加不断下降。

钟振输出信号的频率主要是由其内部石英晶体的特性决定，由于石英晶体属于无源器件，对辐照不敏感，因此辐照条件下钟振输出信号的频率对受照剂量也不敏感。

4 结论

本文通过测量 ^{60}Co γ -射线辐照下钟振以及钟振内部振荡电路的典型参数变化情况，对典型钟振的电离辐射效应规律进行了研究。研究结果表明，辐照条件下钟振输出信号幅度降低、电源电流增大主要是其内部 MOS 型振荡电路的场氧寄生漏电造成的；下一步工作中，我们将以更新型的温补型石英晶振、恒温型石英晶振为对象开展电离辐射效应研究，并开展石英晶振的中子位移效应研究，为最终建立起石英晶振的辐射效应模拟试验方法及抗辐射性能评价技术提供基础数据。

参考文献

- 荆震. 高稳定度晶体振荡器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1975: 65-72.
JING Zhen. High-stability crystal oscillator [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1975: 65-72.
- 何丹, 黄敬昌, 马沛, 等. 高压压控恒温晶体振荡器的研究[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(5): 17-18.
HE Dan, HUANG Qichang, MA Pei, et al. The research of high stability voltage control oven crystal oscillator [J]. Electronic Instrumentation Customers, 2008, 15(5): 17-18.
- 王军. 石英晶体振荡器[J]. 科技信息, 2007, 24(1): 402-403.
WANG Jun. Crystal oscillator [J]. Science & Technology Information, 2007, 24(1): 402-403.
- 王闯. 低噪声集成石英晶体振荡器设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
WANG Liang. The design of low phase noise integrated quartz crystal oscillator [D]. Changsha. Hunan University. 2009.
- 田永盛, 杜良顿. 晶振器件电路部分的失效分析研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(1): 27-31.
TIAN Yongsheng, DU Liangzhen. Failure analysis of circuit part in crystal oscillator [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2010, 28(1): 27-31.
- 陈盘训. 半导体器件和集成电路的辐射效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
CHEN Panxun. Radiation effects on semiconductor devices and integrated circuits [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- Oldham T R, Mclean F B. Total ionizing dose effects in

- mos oxides and devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, **50**(3): 483-499.
- 8 Shaneyfelt M R, Schwank J R, Fleetwood D M, *et al.* Effects of irradiation temperature on MOS radiation response [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, **45**(3): 1372-1736.
- 9 Nowlin R N, Enlow E W, Schrimpf R D, *et al.* Trends in total-dose response of modern bipolar transistors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, **39**(6): 2026-2035.
- 10 Enlow E W, Pease R L, Combs W, *et al.* Response of Advanced Bipolar Processes to Ionizing Radiation [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1991, **38**(6): 1342-1351.

Ionizing radiation effects on typical clock oscillator

LIU Weixin LI Zhen XIAO Yinfeng WU Qinzhi WANG Kunshu XUAN Ming

(No.808th Institute of Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT Ionizing radiation effects of typical clock oscillator and its internal oscillator circuit SM5009 for satellite was studied by ^{60}Co γ -rays in this thesis. Output signal amplitude and supply current of clock oscillator were measured under irradiation conditions. Relationship between the change of these parameters and the failure of SM5009 oscillator circuit was also analyzed. The results showed that the field oxygen parasitic leakage of SM5009 was very severe under irradiation, and the leakage current could increase to 10^{-4} A when the absorbed dose accumulated to 1500 Gy(Si). It was a significant reason that caused the supply current of clock oscillator increase. Meanwhile the high level of output voltage was sensitive to absorbed dose for SM5009. The high level of output voltage decreased for 0.5 V when the absorbed dose accumulated to 1500 Gy(Si). This was an important reason that caused the output signal amplitude of clock oscillator decrease.

KEYWORDS Clock oscillator, Ionizing radiation effects, Oscillator circuit

CLC TN45, TL81