

双极电压比较器 LM311 电离总剂量与单粒子瞬态协同效应研究

王利斌^{1,2,3}, 姚 帅^{2,3,4}, 陆 妩^{1,2,3}, 王 信^{2,3}, 于 新^{2,3}, 李小龙^{2,3},
刘默寒^{2,3}, 孙 静^{2,3}, 席善学^{2,3}, 郭 旗^{2,3}

(1. 新疆大学物理科学与技术学院, 新疆乌鲁木齐 830046;

2. 中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;

3. 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 本文研究了高、低电平输出偏置条件下双极电压比较器 LM311 的电离总剂量 (Total Ionizing Dose, TID)-单粒子瞬态 (Single Event Transient, SET) 的协同效应. 实验结果表明, 高电平输出偏置条件下累积总剂量后的 LM311 的 SET 会受到明显抑制, 主要表现为瞬态脉冲宽度减小, SET 幅值变小. 低电平输出偏置条件下累积总剂量后的 LM311 的 SET 有促进作用, 主要表现为瞬态脉冲宽度增大, SET 幅值变大. 与高电平输出偏置条件相比, LM311 在低电平输出偏置条件下对 SET 不敏感. 发现 TID 诱发的界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷是 TID-SET 协同抑制效应出现的根本原因.

关键词: 电离总剂量; 单粒子瞬态; 协同效应; 双极电压比较器

中图分类号: TN301.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2020)08-1635-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.08.024

Synergistic Effect of Ionization Total Dose and Single Particle Transient in Bipolar Voltage Comparator LM311

WANG Li-bin^{1,2,3}, YAO Shuai^{2,3,4}, LU Wu^{1,2,3}, WANG Xin^{2,3}, YU Xin^{2,3},
LI Xiao-long^{2,3}, LIU Mo-han^{2,3}, SUN Jing^{2,3}, XI Shan-xue^{2,3}, GUO Qi^{2,3}

(1. School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key Laboratory of Special Environmental Functional Materials and Devices, Xinjiang Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

3. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper investigates the synergistic effect of Total Ionizing Dose (TID)-Single Event Transient (SET) of the bipolar voltage comparator LM311 under high and low level output bias conditions. The results showed that the SET of LM311 after the cumulative total dose under high level output bias condition was significantly inhibited, mainly due to the decrease of transient pulse width, and the SET amplitude was also slightly reduced. The SET of LM311 after accumulating the total dose under the condition of low-level output bias has a promoting effect, which mainly manifests as the transient pulse width increases and the SET amplitude increases. Compared with the high-level output bias condition, the LM311 is not sensitive to SET under the low-level output bias condition. It was found that the interface trap charges and oxide trap charges induced by TID are the root cause of the TID-SET synergistic inhibitory effect.

Key words: total ionization dose; single-particle transient; synergistic effect; bipolar voltage comparator

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-12-18; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 国家自然科学基金 (No. U1532261, No. U1630141, No. 11605283); 中科院西部之光项目基金 (No. 2018-XBQNXZ-B-003); 青年科学基金 (No. 11805270)

1 引言

空间工作的微电子器件受到重离子、质子等各种高能粒子的轰击,可能导致单粒子效应的发生^[1,2]. 单粒子效应的根本机制来源于离子轰击半导体时产生的电子空穴对的瞬时收集. 对于模拟电路而言,电子空穴对的瞬时收集会使晶体管的导通状态发生变化,从而使电路的输出电压产生瞬时扰动,即发生单粒子瞬态(Single Event Transient, SET)效应^[3,4]. 模拟电路通常与次级数字电路相连接,SET 可能会被数字电路捕获,从而使数字电路发生单粒子翻转,进而造成系统工作失效.

双极模拟电路广泛应用于卫星电子系统中,其 SET 一直是相关领域的研究热点^[5-9]. 而卫星在太空中运行时,电子器件同时会受到电离总剂量效应(Total Ionizing Dose, TID)和单粒子效应的影响,TID 会造成器件电参数,如输入偏置电流,增益,电源电流等的退化^[10,11],这可能会导致器件的 SET 发生变化. 国外已有相关研究,脉冲激光单粒子试验的结果表明 TID 会造成比较器 LM139 高电平输出时 SET 幅值变小; TID 对运放 LM124 的 SET 的影响强烈依赖于其偏置条件,SET 脉冲宽度可能变大也可能变小,部分 SET 还可能会消失;双极结型晶体管(BJT)在累积 TID 后增益会降低,频率响应会轻微改善^[12-18]. 因此,研究 TID 对 SET 的影响是非常必要的. 目前针对双极电压比较器的 TID-SET 效应的可见报道较少,仅针对 LM139 一种型号进行了探索. 深入研究不同类型电压比较器在总剂量辐照后的影响规律及机制,对于建立在空间综合辐射环境中模拟电路的加速评估方法具有重要意义.

本文针对双极比较器 LM311 进行了 TID 与 SET 的协同效应研究,发现高电平输出偏置状态下,LM311 的 SET 脉冲宽度和幅值会随 TID 的累积而变小,低电平输出偏置状态下,LM311 的 SET 脉冲宽度和幅值会随 TID 的累积而变大且 LM311 在低电平输出偏置条件下对 SET 不敏感,文中对此试验结果进行了相关分析.

2 样品及试验条件

试验样品是美国 TI 公司生产的商用双极比较器 LM311. 试验包括总剂量辐照试验和脉冲激光单粒子试验两个部分:总剂量辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所 ⁶⁰Co- γ 辐照源进行,辐照时剂量率为 10 rad(Si)/s,辐照过程中试验样品所有引脚接地,辐照总剂量为 100krad(Si);脉冲激光单粒子试验在中国科学院国家空间科学中心进行,脉冲激光试验参数如表 1 所示,试验过程中试验样品偏置状态为高电平输出状态

和低电平输出状态,输出上拉电阻均为 5k Ω ,具体偏置条件如图 1 所示,(a)为高电平输出状态,(b)为低电平输出状态.

表 1 脉冲激光试验参数

激光能量	激光频率	激光波长	激光光斑直径	扫描步长
1.8nj	1KHz	1064nm	1.5 μ m	3 μ m

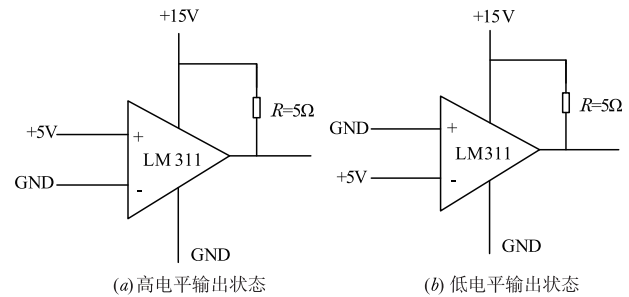


图 1 脉冲激光试验时比较器 LM311 偏置条件

3 试验结果

进行脉冲激光单粒子试验时,数百个 SET 被观测到并且存储在示波器中. 选取其中典型的 SET 进行统计处理便于进行观察和分析. 图 2(a)是高电平输出偏置未辐照时 LM311 的典型 SET,图 2(b)是高电平输出偏置累积 TID 后 LM311 的典型 SET. 由于在捕获 SET 时示波器工作模式为交流模式,所以初始电平不是 +15V 而是 0V. 从图 2 可以看出,TID 对 SET 幅值影响不大,但是却显著地减少了 SET 脉冲宽度. 图 4(a)是低电平输出偏置未辐照时 LM311 的典型 SET,图 4(b)是低电平输出偏置累积 TID 后 LM311 的典型 SET. 从图 4 可以看出,TID 后 SET 幅值增大,SET 脉冲宽度变大. 为了更全面地了解 TID 对 SET 地影响,所有采集到的 SET 都通过 Matlab 进行脉冲宽度及幅值的提取,此处脉冲宽度为半波全宽(Full-Width-Half-Maximum, FWHM),并绘制 SET 脉冲宽度-幅值统计分布图,如图 3,图 5 所示. 图 3(a)为辐照高电平输出偏置时 LM311 的脉冲宽度-幅值统计分布,图 3(b)为累积 TID 后高电平输出偏置时 LM311 的脉冲宽度-幅值统计分布. 图 5(a)为未进行辐照的低电平输出偏置时 LM311 的脉冲宽度-幅值统计分布,图 5(b)为累积 TID 后低电平输出偏置时 LM311 的脉冲宽度-幅值统计分布.

如图 3 所示,高电平输出偏置时 LM311 累积 TID 后的 SET 脉冲宽度明显变小,最大幅值的脉冲宽度由未辐照前的 2.5 μ s 降低至 1 μ s 左右,同时 SET 幅值在累积 TID 后轻微变小. 同时,图 3(a)展示的 SET 数量明显多于图 3(b)展示的 SET 数量,说明 TID 会大幅降低 SET 发生概率.

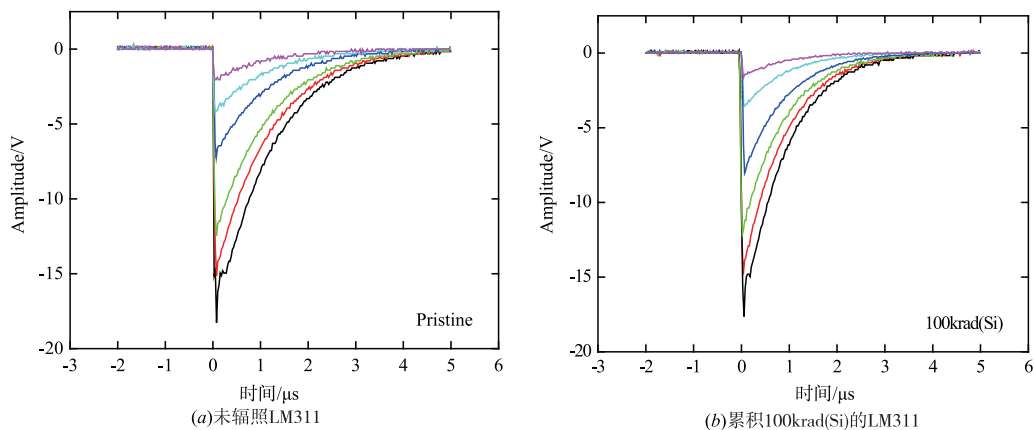


图2 高电平输出偏置时LM311的典型SET

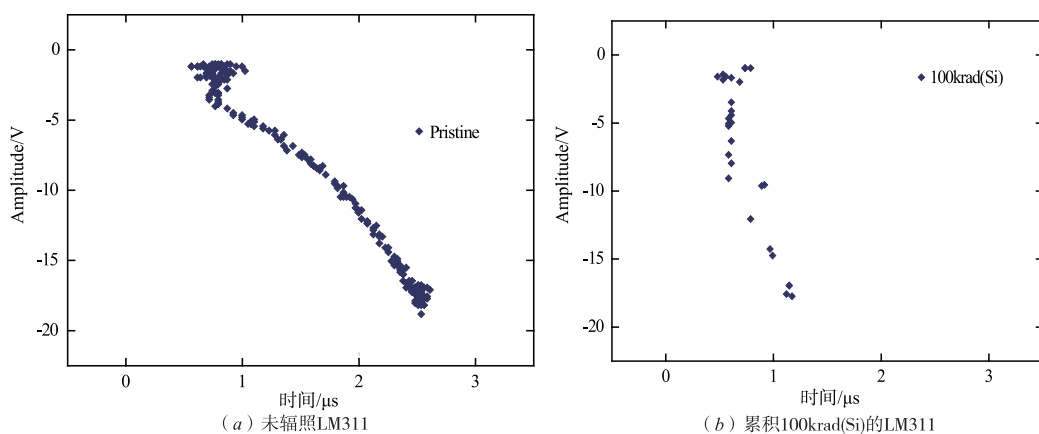


图3 高电平输出偏置时LM311的SET脉冲宽度-幅值统计分布

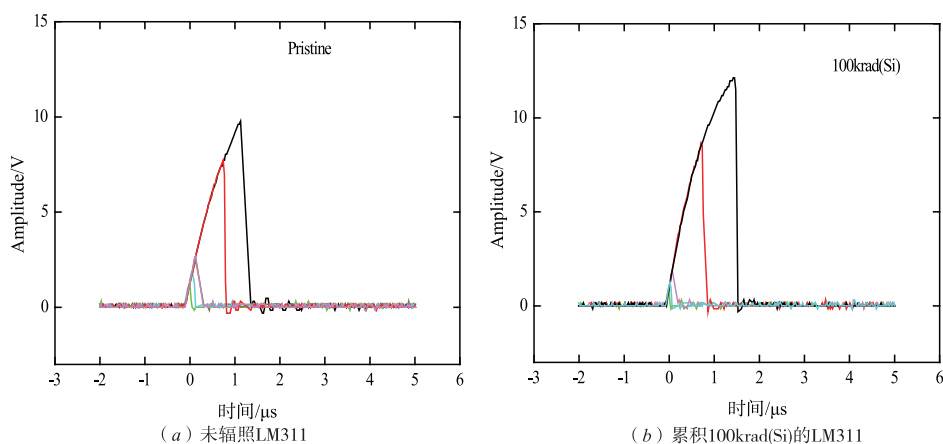


图4 低电平输出偏置时LM311的SET脉冲宽度-幅值统计分布

如图 5 所示,低电平输出偏置时 LM311 累积 TID 后,其脉冲宽度,幅值有了小幅增大. 图 5(a) 展示的典型 SET 数量明显远多于图 5(b) 展示的 SET 数量,说明 TID 会大幅降低 SET 发生概率.

对比图 3、图 5,我们可以明显看出低电平输出偏置时 LM311 的 SET 脉冲数量在未累积 TID 和累积 TID 之后均比高电平输出偏置时要小的多,说明低电平输出

偏置条件下 LM311 的 SET 不敏感,低电平输出偏置条件会大幅降低 SET 发生概率.

4 分析和讨论

双极电压比较器 LM311 由 23 个双极型晶体管,19 个电阻,2 个钳位二极管,1 个 JFET 组成,其电路结构图如图 6 所示. 比较器工作在高电平输出状态时进行

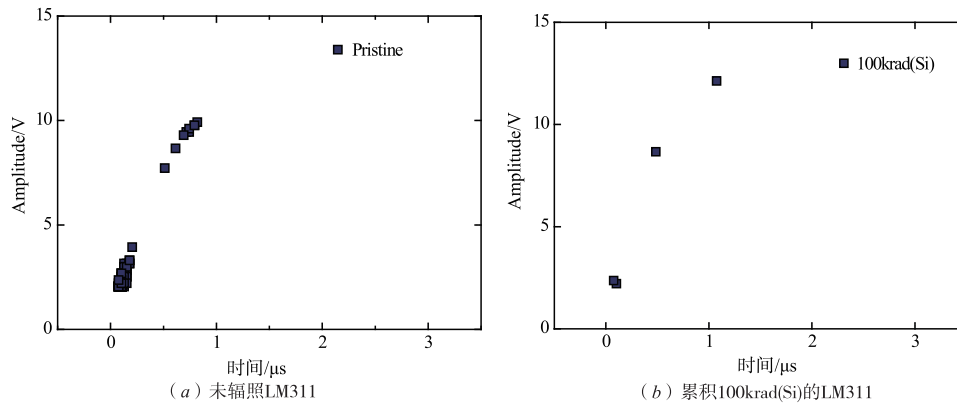


图5 低电平输出偏置时LM311的SET脉冲宽度-幅值统计分布

脉冲激光试验,此时 LM311 内部晶体管导通状态如图 6 所示,被红色标注的晶体管处于关闭状态. 比较器工作在低电平输出状态时进行脉冲激光试验,此时 LM311 内部晶体管导通状态与工作在高电平输出状态时相反,黑色标注的晶体管处于关闭状态. 通常情况下,处于关闭状态的晶体管对 SET 敏感^[11],当脉冲激光照射到关闭晶体管时,可能会改变晶体管的工作状态,使晶

体管从关闭状态转变为导通状态,最终影响比较器的输出. 由于所有关闭状态的晶体管受脉冲激光激发导通的机理一样,差别只是处于前级区域的晶体管导通后需要通过影响次级晶体管的导通来影响最终的输出状态,所以本文通过分析单个晶体管来解释 TID 对电压比较器 SET 的影响机制.

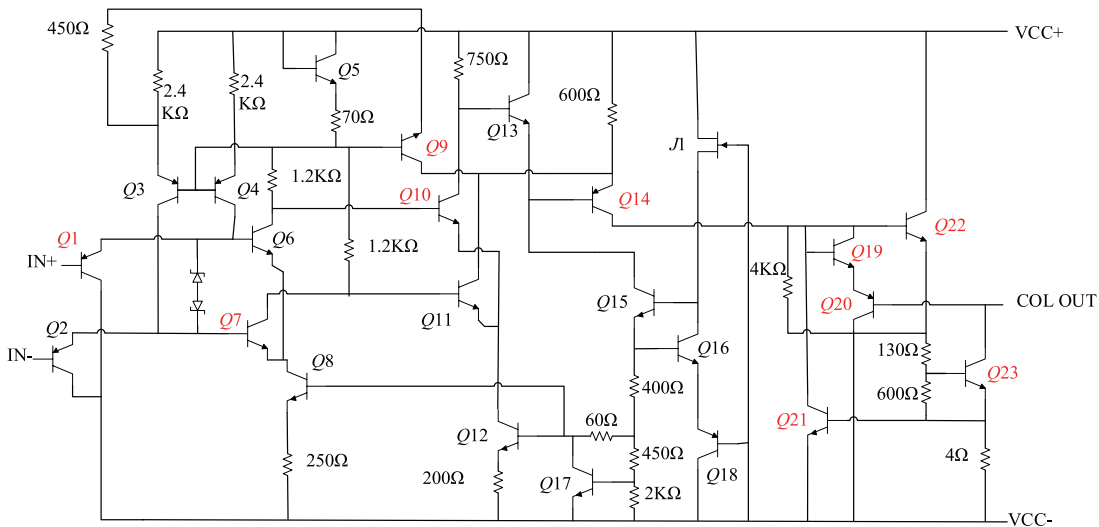


图6 双极比较器LM311电路内部结构简图

首先对未累积 TID 的晶体管进行 SET 分析. 脉冲激光扫描到反偏的 BC 结时,激发产生大量电子空穴对,此时会以原 BC 结耗尽区为基础产生一个漏斗电场,漏斗电场内的载流子以漂移方式被迅速收集,漏斗电场外的载流子以扩散方式被较慢地收集. 如图 7 所示,由于晶体管工作在截止状态,电子被集电极迅速收集,空穴则首先在场区内以漂移方式输送到基区,再以扩散方式通过基区和发射区. 此时晶体管由截止状态转变为导通状态,产生瞬态电流,在双极电压比较器上表现为瞬态压降. 当电路处于高电平偏置状态时,输出电压为高电平,晶体管 Q23 处于关闭状态. 激光照射可

能使 Q23 导通,导致输出电压下降,出现负向 SET,累积 TID 后, Q23 导通状态变弱,负向 SET 被抑制. 当电路处于低电平偏置状态时,输出电压为低电平,晶体管 Q18 处于关闭状态. 激光照射可能使 Q18 导通,导致输出电压上升,出现正向 SET,累积 TID 后, Q18 导通状态变弱,促进正向 SET. 由于晶体管寄生电容的存在,退化电流对电容的充电时间变长,导致 SET 宽度在辐照后明显展宽. 以上分析主要针对于输出级电路,但前级晶体管对电路的影响机制同样适用,输出级结构决定了偏置状态对其 SET 的不同影响.

双极晶体管中发生的复合过程以 Shockley-Read-

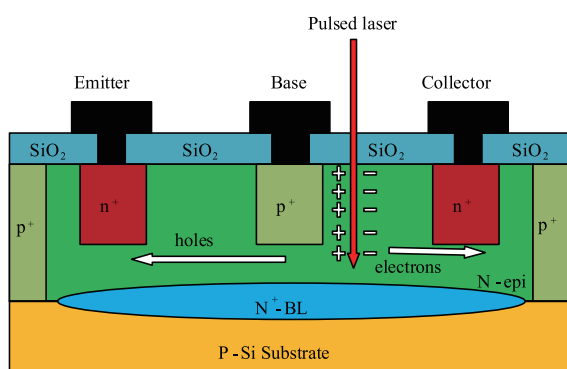


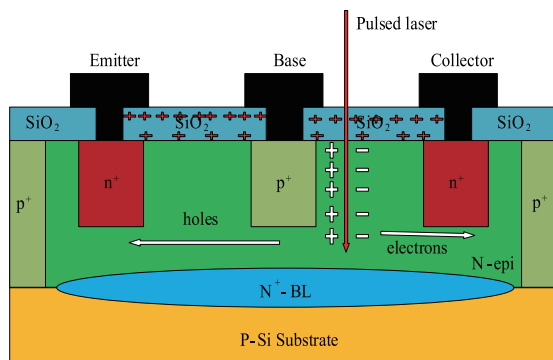
图7 未累积TID双极晶体管SET分析示意图

Hall(SRH)复合为主,根据 SRH 复合模型,复合速度 R 可以表示为:

$$R = \frac{pn - n_i^2}{\tau_{n0}(p + p_1) + \tau_{p0}(n + n_1)} \quad (1)$$

其中,表示 τ_{n0} 电子的寿命, τ_{p0} 表示为空穴的寿命.

非平衡载流子的寿命值受到缺陷电荷密度的影响,可表示为:



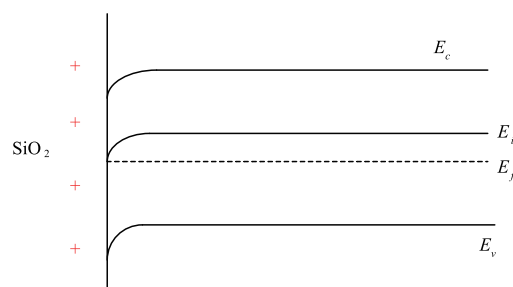
(a) 晶体管界面态累积

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n N_T v_t} \quad (2)$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p N_T v_t} \quad (3)$$

其中 σ_n, σ_p 分别表示电子和空穴的俘获截面, N_T 表示界面陷阱电荷密度, v_t 表示电子(空穴)的运动速率.

如图 8 所示,当晶体管累积 TID 后,会在 Si-SiO₂ 界面处引入界面态陷阱电荷,在 SiO₂ 中引入氧化物陷阱电荷,导致界面处能带弯曲^[19],界面处费米能级靠近禁带中央,此时半导体表面载流子浓度趋于相近, σ_n, σ_p 变大,电子和空穴寿命降低,表面复合速率大大增加.同时,界面态陷阱电荷可以充当电子和空穴的复合中心,累积 TID 后,界面态陷阱电荷密度 N_T 增大,使表面复合速率增大.此时脉冲激光激发的电子空穴对大部分被复合吸收,扩散的电子空穴数目减少,导致瞬态电流减小和扩散时间变短,反映到电压比较器的输出,就是瞬态压降幅值降低,脉宽变小.由于晶体管导通能力降低,达到示波器触发阈值的 SET 会减少,即 SET 发生概率降低.



(b) 界面态导致的能带弯曲

图8 TID后双极晶体管SET分析

5 结论

本文对 LM311 的研究表明,偏置状态对 SET 影响显著,累积电离总剂量对工作在高电平状态的双极电压比较器 LM311 的 SET 具有显著抑制作用,对工作在低电平状态的双极电压比较器 LM311 的 SET 有促进作用. 电离辐照感生的界面态陷阱电荷和氧化物陷阱电荷及其导致的界面处能带弯曲是 TID-SET 协同抑制作用的根本机制,输出级结构决定了偏置状态对其 SET 的不同影响. 本文研究结果对相关器件在复杂空间环境下的应用及地面模拟评估加固方面具有指导意义. 不同剂量率辐照对双极电压比较器 LM311 的 TID-SET 协同效应及仿真正在进行研究,后续将会报道.

参考文献

[1] W J Stapor, P T McDonald, A R Knudson, et al. Charge

collection in silicon for ions of different energy but same linear energy transfer [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1988, 33(6): 1585 - 1588.

[2] W Massengill, O A Amusan, S Dasgupta, et al. Soft-error charge sharing mechanisms at sub-100 nm technology nodes [A]. IEEE Integrated Circuit and Technology Conference [C]. Austin, TX, USA, 2007. 1 - 4.

[3] P Adell, R D Schrimpf, H J Barnaby, et al. Analysis of single-event transients in analog circuits [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2616 - 2623.

[4] Yu Xin, Lu Wu, Yao Shuai, Guo Qi, Sun Jing, Wang Xin, Liu Mo-han, Li Xiao-long. Simulation of synergism effect using temperature switching irradiation on bipolar comparator [J]. Chinese Physics Letters, 2018, 35(08): 108 - 111.

[5] S Buchner, D McMorrow, C Poivey, et al. Comparison of single-event transients induced in an operational amplifier

- (LM124) by pulsed laser light and a broad beam of heavy ions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(5):2776-2781.
- [6] N J H Roche, S P Buchner, L Dusseau, et al. Correlation of dynamic parameter modification and ASET sensitivity in a shunt voltage reference[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6):2756-2763.
- [7] R L Pease. Modeling single event transients in bipolar linear circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4):1879-1890.
- [8] N J H Roche, S P Buchner, F Roig, et al. Investigation of flip-flop effects in a linear analog comparator with hysteresis circuit[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(40):2542-2549.
- [9] F J Franco, C Palomar, J G Izquierdo, et al. SPICE simulations of single event transients in bipolar analog integrated circuits using public information and free open source tools[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(4):1625-1633.
- [10] M F Bernard, L Dusseau, J Boch. Analysis of bias effects on the total-dose response of a bipolar voltage comparator[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(6):3232-3236.
- [11] L Dusseau, M F Bernard, J Boch, et al. Analysis of total-dose response of a bipolar voltage comparator combining radiation experiments and design data[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006, 53(4):1910-1916.
- [12] 姚帅, 陆妩, 于新, 李小龙, 王信, 刘默寒, 孙静, 常耀东, 席善学, 何承发, 郭旗. 变温辐照对双极电压比较器 LM2903 在不同偏置状态下的单粒子瞬态影响[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(6):1122-1126.
Yao Shuai, Lu Wu, Yu Xin, Wang Xin, Liu Mo-han, Sun Jing, Chang Yao-dong, Xi Shan-xue, He Cheng-fa, Guo Qi. Effects of temperature switching irradiation on single event transients in bipolar voltage comparator LM2903 under different bias states[J]. Atomic energy science and technology, 2019, 53(6):1122-1126. (in Chinese)
- [13] S Buchner, D McMorrow, M Bernard, et al. Total dose effects on error rates in linear bipolar systems[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4):2055-2062.
- [14] S Buchner, D McMorrow, N Roche, et al. The effects of low dose-rate ionizing radiation on the shapes of transients in the LM124 operational amplifier[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(6):3314-3320.
- [15] N J H. Roche, Y Gonzalez Velo, L Dusseau, et al. Accelerated irradiation method to study synergy effects in bipolar integrated circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(4):1971-1977.
- [16] F Roig, L Dusseau, A Khachatryan, et al. Modeling and investigations on TID-ASETs synergistic effect in LM124 Operational amplifier from three different manufacturers[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6):4430-4438.
- [17] N J H Roche, S P Buchner, A Khachatryan, et al. Impact of cumulative irradiation degradation and circuit board design on the parameters of ASETs induced in discrete BJT-based circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2015, 62(6):2732-2742.
- [18] 贾金成, 李小龙, 陆妩, 孙静, 王信, 刘默寒, 魏昕宇, 姚帅, 郭旗. 双极电压比较器高低剂量率辐照损伤特性[J]. 核技术, 2018, 41(9):13-19.
Jia Jin-cheng, Li Xiao-long, Lu Wu, Sun Jing, Wang Xin, Liu Mo-han, Wei Xi-yu, Yao Shuai, Guo Qi. Characteristics of high and low-dose-rate radiation damage for bipolar voltage comparator[J]. Nuclear technology, 2018, 41(9):13-19. (in Chinese)
- [19] 刘默寒, 陆妩, 马武英, 王信, 郭旗, 何承发, 姜柯. 偏置条件对 NPN 型锗硅异质结双极晶体管电离辐射效应的影响[J]. 核技术, 2015, 38(6):38-44.
Liu Mo-han, Lu Wu, Ma Wu-ying, Wang Xin, Guo Qi, He Cheng-fa, Jiang Ke. Bias effects on total ionizing dose radiation response of NPN silicon-germanium hetero-junction bipolar transistors[J]. Nuclear technology, 2015, 38(6):38-44. (in Chinese)

作者简介



王利斌 男, 山东烟台人, 新疆大学核技术及应用专业在读硕士研究生, 主要研究方向为空间辐射环境下双极电子元器件的辐射效应。
E-mail: 892939403@qq.com



陆妩(通讯作者) 女, 九三学社社员, 研究员, 博士生导师, 新疆大学兼职教授, 主要研究方向为微电子器件和模拟电路的总剂量辐射效应、损伤机理、评估方法及抗辐射加固技术。