

典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估

李小龙 陆妩 王信 郭旗 何承发 孙静 于新 刘默寒 贾金成 姚帅 魏昕宇

Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods

Li Xiao-Long Lu Wu Wang Xin Guo Qi He Cheng-Fa Sun Jing Yu Xin Liu Mo-Han Jia Jin-Cheng Yao Shuai Wei Xin-Yu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 096101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180027

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180027>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[质子辐照对永磁合金微观结构演化的研究](#)

Effect of proton irradiation on microstructure evolution of permanent magnet

物理学报.2018, 67(1): 016104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.016104>

[Sm₂Co₁₇型永磁合金的辐照效应研究](#)

Irradiation effect of Sm₂Co₁₇ type permanent magnets

物理学报.2017, 66(22): 226101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.226101>

[质子束辐照单层石墨烯的损伤效应](#)

Damage effects of proton beam irradiation on single layer graphene

物理学报.2017, 66(2): 026103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.026103>

[高功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究](#)

Laser-induced damage growth of fused silica at 351 nm on a large-aperture high-power laser facility

物理学报.2016, 65(24): 246102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.246102>

[基于1/f噪声的NPN晶体管辐照感生电荷的定量分离](#)

Quantitative separation of radiation induced charges for NPN bipolar junction transistors based on 1/f noise model

物理学报.2015, 64(13): 136104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.136104>

典型模拟电路低剂量率辐照损伤增强效应的研究与评估*

李小龙¹⁾²⁾³⁾ 陆妩^{1)2)†} 王信¹⁾²⁾³⁾ 郭旗¹⁾²⁾ 何承发¹⁾²⁾ 孙静¹⁾²⁾
于新¹⁾²⁾ 刘默寒¹⁾²⁾³⁾ 贾金成¹⁾²⁾³⁾ 姚帅¹⁾²⁾³⁾ 魏昕宇¹⁾²⁾³⁾

1)(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, 乌鲁木齐 830011)

2)(新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2018年1月4日收到; 2018年2月9日收到修改稿)

采用变剂量率和变温两种辐照方法, 对4款典型模拟电路的低剂量率辐照损伤特性及变化规律进行了研究与评估, 分析了两种辐照方法下其辐照敏感参数的变化, 比较了不同辐照方式下器件的退化程度, 讨论了这两种实验室加速评估低剂量率辐照损伤方法的机理. 结果显示, 变剂量率辐照可以较快地预测实际低剂量率下的辐照损伤趋势, 且在较低的总剂量下能够给出不太保守的估计, 但其预测的总剂量受到器件退化速度的影响; 变温辐照加速评估方法能够保守地估计其低剂量率下的辐照损伤, 其评估范围不仅可达1000 Gy(Si), 且可将评估时间缩短为12 h左右. 研究结果表明, 双极电路的低剂量率辐照损伤增强效应与感生的界面态密度和氢化的氧空位缺陷有关, 辐照时剂量率和温度的改变会促进界面态的生长, 抑制界面态的钝化作用, 从而激发器件的辐照损伤潜能.

关键词: 双极模拟电路, 低剂量率辐照损伤增强效应, 加速评估方法

PACS: 61.80.-x, 61.80.Ed, 85.30.Pq

DOI: 10.7498/aps.67.20180027

1 引言

双极器件普遍存在的低剂量率辐照损伤增强(enhanced low-dose-rate sensitivity, ELDRS)效应^[1-3]给电子元器件的抗辐照能力测试评估方法带来巨大挑战. 由于ELDRS效应的存在, 采用实验室高剂量率(0.5—3 Gy(Si)/s)辐照结果来评估器件的抗辐照能力, 与电子器件在实际的空间低剂量率环境下的抗辐照能力严重不符, 从而给卫星等航天系统的可靠性带来严重隐患, 因此找到一种能在实验室应用且高效可靠的双极器件ELDRS效应的加速评估方法具有重要意义.

目前, 国外对双极器件ELDRS效应及其机理开展了较为深入的研究^[4-8], 提出了几种相关的理

论模型, 但由于ELDRS效应与器件的工艺及结构等均有较大关系, 因此尚不能给出统一的结论; 美军标MIL-STD-883G虽包括了变剂量率加速评估方法^[9-12], 但给出的标准过于笼统, 对于采用多大剂量率、在何时变剂量率等均未给出明确规定, 并且该方法的机理并不明晰. 在国内, 新疆电子信息材料与器件重点实验室对电子元器件的加速评估进行了大量研究^[13-15], 提出的变温辐照加速评估方法可以很好地模拟评估不同类型的双极电路的ELDRS效应, 但其物理过程仍需进一步研究.

针对目前国内外的研究现状, 本文根据ELDRS效应的物理机理, 对变剂量率辐照、变温辐照两种加速评估方法进行了研究和探索. 本文以4款商用模拟电路为对象, 研究了其在变剂量率辐照和变温辐照下的响应规律, 比较了两种方法的适应性

* 国家自然科学基金(批准号: U1532261, U1630141)和中国科学院西部之光项目(批准号: 2016-QNXZ-B-7)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

和优劣性,并探讨了这两种方法的辐照损伤机理.

2 实验样品和实验方法

2.1 实验样品

样品为具有明显 ELDRS 效应的典型商用纯双极运算放大器和电压比较器,实验样品信息见表 1,辐照源分别为中国科学院新疆理化技术研究所的

大钴源和小钴源,辐照实验采用了 3 种剂量率,即室温辐照的高剂量率 (1.1 Gy(Si)/s)、室温辐照的低剂量率 (1×10^{-4} Gy(Si)/s)、变温辐照的剂量率 (0.023 Gy(Si)/s). 在所有的实验中,运算放大器和电压比较器施加相应的工作偏置,即辐照时运算放大器的正输入端接地,负输入端与输出端相连;电压比较器正输入端接电源电压 5 V,输入端接地,输出端接 10 k Ω 的上拉电阻.

表 1 实验样品信息

Table 1. Information of experiment sample.

器件	名称	类型	生产厂商
LM833	Operational Amplifier	Input stage: PNP	Texas Instrument
LM158	Operational Amplifier	Input stage: PNP	Texas Instrument
LM2903	Dual Voltage Comparator	Input stage: PNP	Texas Instrument
LM339	Quad Voltage Comparator	Input stage: PNP	Texas Instrument

2.2 实验方法

1) 变剂量率方法 (见图 1). 变剂量率加速评估方法是目前国际上研究较多的评估手段 [9-12], 它将电离辐射损伤分为三个区域 [9,10], 即阈值区、线性区、饱和区. 在高剂量率辐照下, 器件快速进入不同程度的线性区, 然后在随后的低剂量率的环境下累积相同的剂量, 最后利用反推平移的方式模拟低剂量率损伤趋势. 针对美军标 MIL-STD-883G 的高剂量率 (0.5-3 Gy(Si)/s)、室温低剂量率 (1×10^{-4} Gy(Si)/s) 的辐照条件, 本文采用的方法为: ① 采用室温高剂量率 (1.1 Gy(Si)/s) 将编号为 1#-5# 的 5 组样品分别辐照至总剂量为 200, 400, 600, 1000 和 1500 Gy; ② 将 1 组未辐照的样品与已经辐照的编号为 1#-5# 的样品共 6 组样品同时放置在室温低剂量率 (1×10^{-4} Gy(Si)/s) 的条件下, 分别累积 50 Gy; ③ 利用反推平移方式拼接实际低剂量率辐照损伤趋势 [9,10].

2) 变温方法 (见图 2). 变温加速评估方法 [13-15] 是指在辐照过程中, 改变双极器件或线性集成电路周围环境的温度. 本文选择了从高温到低温的变温顺序, 在相对较高的剂量率 (0.023 Gy(Si)/s) 下评估低剂量率辐照损伤. 高温辐照在特制的恒高温箱内进行, 箱内置有抗辐射的高灵敏度热敏电阻, 可以保证高温辐照期间烘箱内的温度变化不超过 ± 2 $^{\circ}\text{C}$. 实验方法为: 先在 125 $^{\circ}\text{C}$ 将器件辐照到 200 Gy 的总剂量, 然后在 100 $^{\circ}\text{C}$ 下辐照到 400 Gy, 再在 65 $^{\circ}\text{C}$ 下辐照到

800 Gy, 最后在 50 $^{\circ}\text{C}$ 下辐照到 1000 Gy 的累积总剂量. 同时, 将一组对比样品放置在室温低剂量率 (1×10^{-4} Gy(Si)/s) 条件下累积至 1000 Gy.

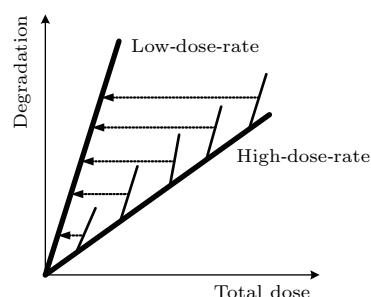


图 1 变剂量率方法示意图

Fig. 1. Schematic diagram of dose switching approach.

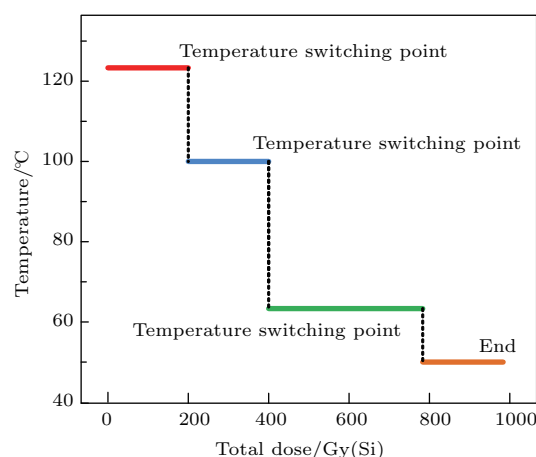


图 2 温度的变化和累积剂量之间的关系

Fig. 2. Schematic diagram of high to low temperature approach.

3 实验结果

3.1 变剂量率方法对双极电路的评估

图3和图4分别给出了运算放大器LM833和LM158的辐照敏感参数偏置电流 ΔI_b 在变剂量率方法下的响应规律. 利用逆推所得到的图3(b)中LM833的评估结果表明, 在较低的总剂量下, 变剂量率辐照损伤略高于低剂量率辐照损伤. 但由于LM833低剂量率下的损伤增强因子较大, 器件退化速度很快, 导致逆推曲线重叠部分较多, 因此在相同条件下LM833的预测总剂量只能达到200 Gy(Si)左右, 而LM158的退化则趋于饱和.

图5和图6给出的电压比较器LM2903和LM339变剂量率辐照结果表明, 变剂量率辐照损伤与低剂量率辐照大致相同, 并且由于该器件退化

速度较慢, 逆推曲线重叠部分较少, 使得其预测的总剂量可以分别达到600和700 Gy(Si). 从4款器件的变剂量率辐照实验结果可以看出, 两种电路的变剂量率辐照损伤与低剂量率辐照损伤趋势相当, 并且将辐照时间从4个月缩减至1周, 但其预测的总剂量受到器件退化速度的影响.

3.2 变温辐照方法对双极电路的评估

图7给出了LM833与LM158运放电路变温辐照加速评估的实验结果. 评估结果显示, 采用变温辐照法得到的LM833的辐照损伤大于低剂量率辐照损伤, 且几乎与低剂量率辐照损伤趋势一致, 即在总剂量小于600 Gy(Si)左右呈线性增长, 超过600 Gy(Si)呈饱和状态. LM158评估结果显示, 在总剂量超过200 Gy(Si)时出现饱和趋势, 与低剂量率下的退化趋势一致.

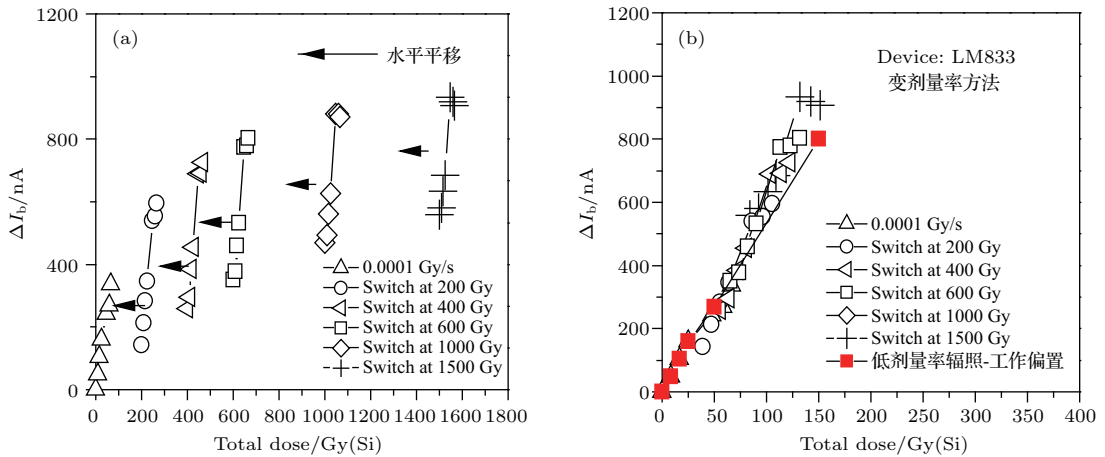


图3 变剂量率方法对运算放大器LM833的评估 (a) 实际响应规律; (b) 逆推曲线
Fig. 3. Dose rate switching evaluation results of LM833: (a) Actual response rule; (b) inverse curve.

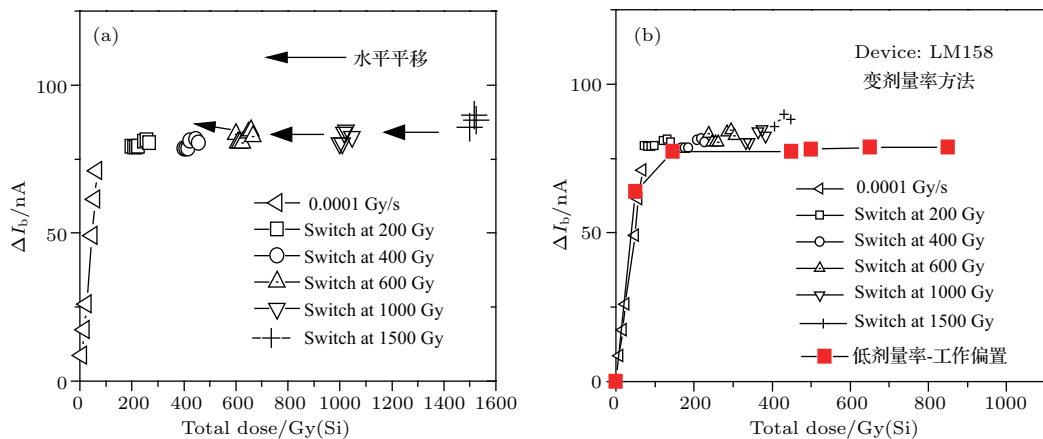


图4 变剂量率方法对运算放大器LM158的评估 (a) 实际响应规律; (b) 逆推曲线
Fig. 4. Dose rate switching evaluation results of LM158: (a) Actual response rule; (b) inverse curve.

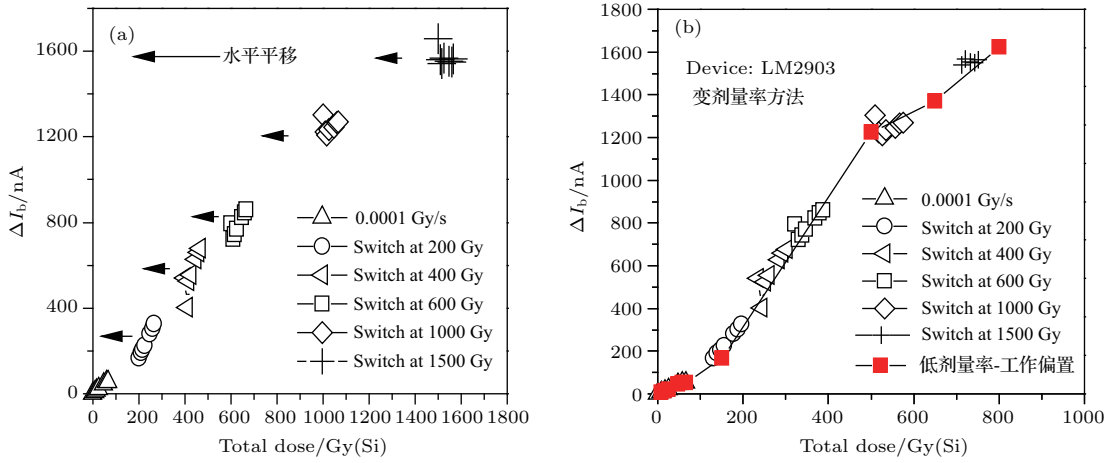


图5 变剂量率方法对运算放大器 LM2903 的评估 (a) 实际响应规律; (b) 逆推曲线
Fig. 5. Dose rate switching evaluation results of LM2903: (a) Actual response rule; (b) inverse curve.

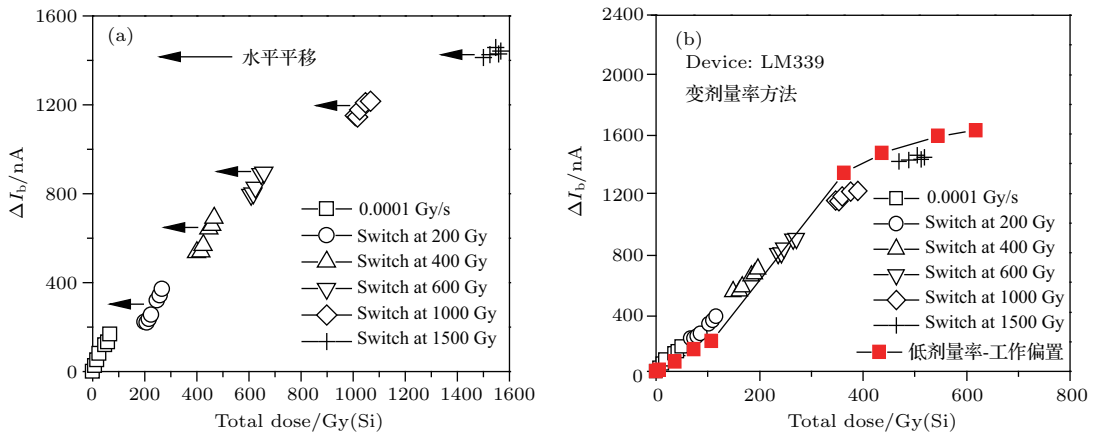


图6 变剂量率方法对运算放大器 LM339 的评估 (a) 实际响应规律; (b) 逆推曲线
Fig. 6. Dose rate switching evaluation results of LM339: (a) Actual response rule; (b) inverse curve.

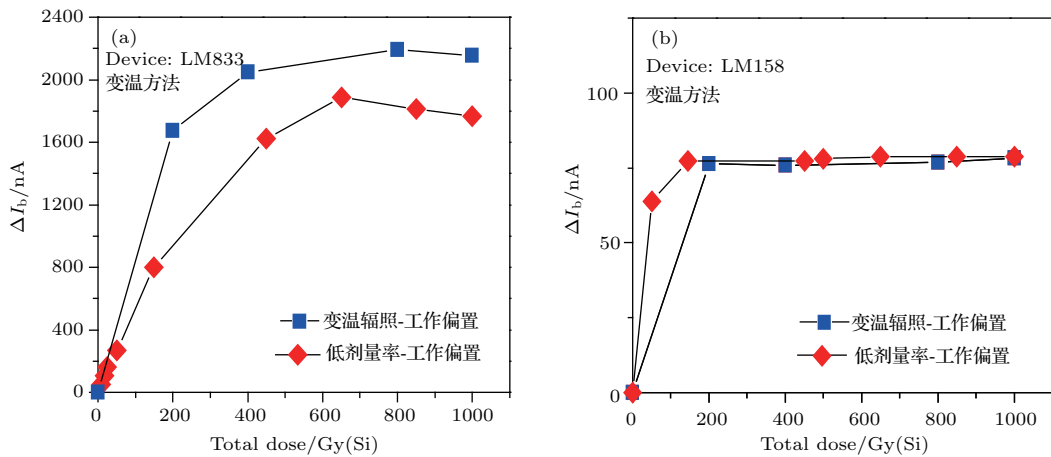


图7 变温辐照法对两款运放电路的评估结果 (a) LM833; (b) LM158
Fig. 7. Switched temperature evaluation results: (a) LM833; (b) LM158.

图8给出的LM2903与LM339电压比较器的实验结果表明, 变温辐照法可以很好地模拟该器件的低剂量率辐照损伤趋势, 即总剂量为0—1000 Gy(Si)时, 电路的偏置电流呈线性变化, 且当累积剂量值为1000 Gy(Si)时, 变温辐照损伤

均高于低剂量率辐照损伤. 从两款器件的变温辐照的实验结果可以看出, 变温辐照加速评估方法可以保守地估计该两款器件的ELDRS效应, 评估的总剂量范围均达到1000 Gy(Si), 且将评估时间缩短为12 h.

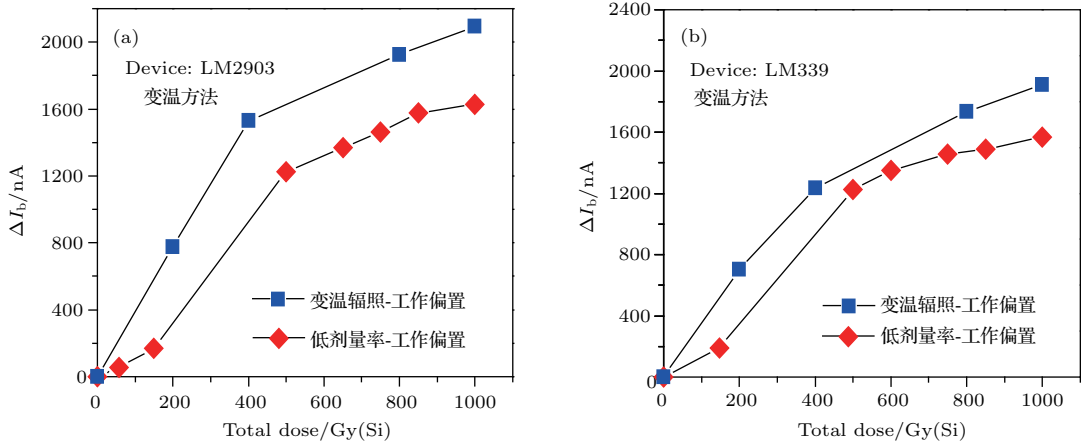


图8 变温辐照法对两款电压比较器的评估结果 (a) LM2903; (b) LM339

Fig. 8. Switched temperature evaluation results: (a) LM2903; (b) LM339.

3.3 两种加速评估方法的比较

为探索不同加速评估方法的适应性和优劣性, 本文就两种方法从评估结果、评估范围、评估时间三个方面加以比较.

1) 表2列出了不同加速评估方法下的评估因子, 即加速评估结果与低剂量率辐照结果之比, 其中加速评估结果表示在变温或变剂量率条件下偏置电流的变化; 低剂量率辐照结果表示在剂量率 1×10^{-4} Gy(Si)/s 条件下偏置电流的变化. 结果显示, 较变剂量率辐照方法, 变温辐照法可给出更保守的评估结果.

2) 在评估范围上, 变剂量率法因受到器件退化速度的影响, 预测结果均未到达1000 Gy(Si), 而变温辐照法在0—1000 Gy的总剂量范围内均有很好的评估效果, 均能给出一个相对保守的评估结果.

3) 在评估时间上, 变温辐照方法仍具有明显优势, 变剂量率方法的评估周期大约为1周, 而变温辐照法将评估时间缩短成12 h.

表2 不同总剂量下的评估因子

Table 2. Evaluation factors of accelerated method at different total dose levels.

器件类型	200 Gy(Si)		500 Gy(Si)		1000 Gy(Si)	
	变剂量率	变温	变剂量率	变温	变剂量率	变温
LM833	1.124	1.294	—	1.134	—	1.232
LM158	1.068	0.986	1.054	0.980	—	0.979
LM2903	1.092	2.263	1.033	1.207	—	1.177
LM339	1.393	1.961	0.989	1.107	—	1.199

注: 评估因子 = ΔI_b (加速评估结果)/ ΔI_b (低剂量率辐照结果); —表示无法评估.

4 讨论

4.1 变剂量率方法机理分析

根据竞争模型^[16], 剂量率效应主要是由空穴的俘获和复合的竞争所致, 如图9能带示意图所示. 在低剂量率时, 由于在导带和价带上的载流子浓度较低, 空穴更倾向于被缺陷俘获, 增加了随后的质子释放, 从而导致界面陷阱电荷的增加. 在高剂量率时, 载流子在导带和价带上的浓度很高, 因而复合作用更占优势, 大量的空穴因复合作用而流失, 从而导致高剂量率释放的质子(H⁺)减小, 继而产生较少的界面态. 因此, 对于恒定的总剂量, 辐照损伤随着剂量率的减小而增强, 变剂量率方法正是利用辐照损伤随剂量率的变化而增强这一特性, 且高剂量率下的辐照对随后的低剂量率辐照没有影响, 同时器件在同一剂量率条件下的辐射损伤(退化速率)几乎一致^[9]. 因此, 变剂量率先通过高剂量率辐照使器件快速进入不同程度的线性区, 然后再在低剂量率下辐照获得器件的实际低剂量率的辐照损伤(曲线变化斜率), 最后利用水平平移拼接模拟ELDRS效应.

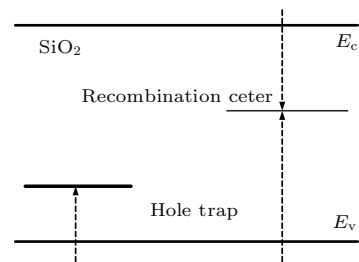


图9 竞争模型图

Fig. 9. Energy-level scheme of the recombination center and hole trap.

4.2 变温辐照方法机理分析

基于 SiO₂ 层中缺陷陷阱电荷的产生、输运及退化过程的研究, 同时考虑到空穴逃逸额、释放的质子浓度、缺陷反应势垒等因素对缺陷分布的影响, 变温辐照较变剂量率辐照更能激发电路的退化潜能.

1) 空穴逃逸率对界面态的影响. 空穴逃逸率与温度有密切关系. 研究 [17] 发现: 对于低电场的 SiO₂ 层, 温度对电子-空穴对的初始复合具有明显的影响. 200, 300, 400 K 三种不同温度下的空穴逃逸概率与电场的关系如表 3 所列. 在低电场下, 初始复合概率对温度有极强的依赖性, 随着温度的增加, 空穴的逃逸率逐渐增加. 这意味着逃离初始复合的空穴增加, 有更多的空穴参与质子的释放, 继而有更多的 H⁺ 在 Si-SiO₂ 界面处生成界面态.

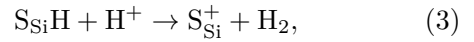
表 3 不同温度下空穴逃逸率与电场的关系 [17]

Table 3. Relation between normalized escape probability and electric field at different temperature [17].

温度/K	电场		
	10 ³ V/cm	10 ⁴ V/cm	10 ⁵ V/cm
200	0.1521	0.2306	0.7045
300	0.2813	0.3454	0.7168
400	0.3843	0.4340	0.7303

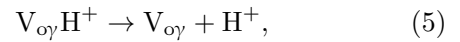
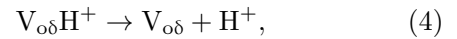
2) 质子的释放. 在 SiO₂ 氧化层中存在多种类型的氧空位缺陷 (V) [18], 这些氧空位型缺陷直接导致了器件辐照之后产生诸多效应, 空穴陷阱 (E' 中心) 正是由这些氧空位演化而来, 器件电离辐射时,

逃逸的空穴会与氢化的氧空位缺陷 (VH) 作用释放出质子 H⁺ (如过程 (1), (2) 所示). 这些释放的 H 或 H⁺ 会进一步运输到界面, 与界面附近 Si—H 悬挂键结合形成界面态 S_{Si}⁺ (如过程 (3) 所示).



其中, p 表示辐射感生的空穴, VH 表示中性氢化的氧空位缺陷, V 表示氧空位型缺陷, H⁺ 表示质子, S_{Si}H 表示 Si—H 悬挂键, S_{Si}⁺ 表示界面态.

对于氢化的氧空位缺陷 (VH) [19], 其包括 V_{oy}H 缺陷 (E_γ 中心) 和 V_{oδ}H 缺陷 (E_δ 中心), V_{oδ}H 缺陷因具有较低的势垒, 在常温下就可以俘获空穴释放出质子 H⁺, 如过程 (4) 所示; 与此相反, V_{oy}H 缺陷的势垒较高, 在常温下不容易发生过程 (5), 但随着温度的增加, 过程 (5) 会逐渐加强, 从而释放的质子 H⁺ 的数量会不断增加, 器件的退化程度也相应增强.



其中, V_{oy}H 表示深能级缺陷, V_{oδ}H 表示浅能级缺陷.

3) 界面态的生长与退火之间的竞争 (见图 10). 高温可以加速质子的释放和输运过程, 继而加剧器件的辐射损伤. 同时, 由于持续高温, 界面陷阱电荷密度不断增加, Si 的表面势也相应增加, 这导致衬底中的电子隧穿过来, 将界面态 S_{Si}⁺ 转化为 S_{Si}^{0/-}, 它与 H₂ (氢二聚化作用) 发生钝化反应即退火现象,

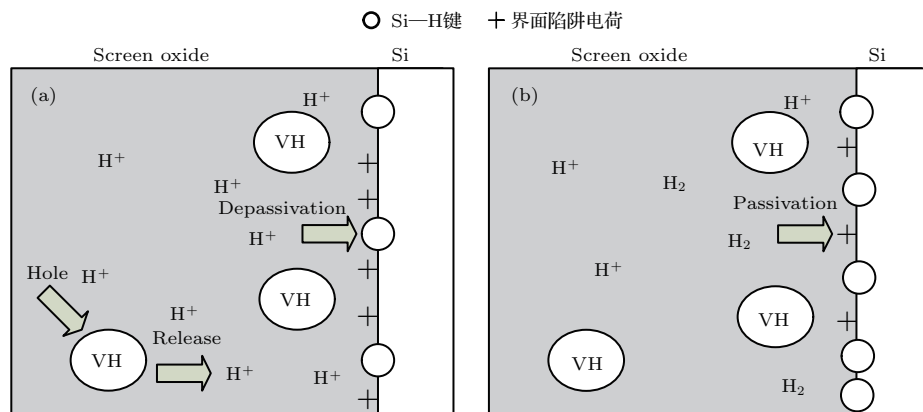
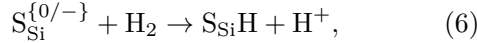


图 10 界面态的去钝化 (生长) 与钝化 (退火) 过程示意图 (a) 质子与界面处的 Si—H 键的去钝化过程; (b) 氢分子与界面陷阱的钝化作用

Fig. 10. View of the oxide showing the process of depassivation and passivation: (a) Depassivation of proton reaction with Si—H bonds; (b) passivation of Hydrogen molecules and interface trap.

如过程(6)所示. 因而, 当累积至一定总剂量时, 界面态的退火大于生成时, 器件的退化程度会减小^[20,21]. 变温辐照, 适当的降低温度, 减弱氢的二聚化和电子的隧穿, 使得在与界面态退火的竞争中, 界面态的生长一直处于主导地位.



其中, $S_{\text{Si}}^{\{0/-\}}$ 表示中性或带负电的界面陷阱电荷, H_2 表示氢分子, $S_{\text{Si}}\text{H}$ 表示 Si—H 悬挂键, H^+ 表示质子.

综上所述, 变温辐照方法优于变剂量率方法在物理机理上体现在以下三方面: ①与常温的变剂量率辐照相比, 变温辐照可以明显增加反应媒介的浓度(空穴、质子), 从而促进陷阱电荷的积累; ②高温辐照可以加快质子的漂移速度, 从而缩短了评估时间; ③利用钝化与去钝化的竞争关系, 变温辐照有效地抑制了界面态的退火作用, 从而使得器件的退化过程不断加剧.

5 结 论

1) 变剂量率加速评估实验结果表明: 变剂量率加速评估方法在较小的总剂量下能较为真实地推测出实际低剂量率的辐照损伤, 并能给出一个不太保守的估计, 同时其预测总剂量范围受到退化速度的影响, 退化速度较慢的 LM2903 其评估的总剂量可达到 600 Gy(Si), 退化速度较快的 LM833 其评估的总剂量只能达到 200 Gy(Si).

2) 变温辐照加速评估实验结果表明: 变温辐照加速评估方法能够快速模拟出实际低剂量率下的辐照损伤, 给出一个较为保守的估计, 并将评估的总剂量范围扩展至 1000 Gy(Si), 且使辐照评估时间缩短为 12 h.

3) 对于变温辐照方法而言, 高温辐照可以加速空穴的漂移速率, 使得更多的空穴参与 H^+ 的释放; 同时, 氢在高温环境下的二聚化将会导致界面态的退火, 适当地降低温度减小氢在界面处的堆积, 使得氢的二聚化反应速率下降, 从而减小界面态的退火, 并且温度下降也会大大降低电子的隧穿, 从而减小氧化物陷阱电荷的退火.

参考文献

- [1] Enlow E W, Pease R L, Combs S, Schrimpf R D, Nowlin R N 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1342
- [2] Barnaby H J, Tausch H J, Turfer R, Cole P, Baker P, Pease R L 1996 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **43** 3040
- [3] Pease R L, Adell P C, Rax B G 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3169
- [4] Hjalmarsen H P, Pease R L, Witczak S C, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Edwards A H, Hembree C E, Mattsson T R 2003 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **50** 1901
- [5] Chavez R M, Rax B G, Scheickrad L Z, Jonston A H 2005 *IEEE Radiation Effects Data Workshop Record* Washington, USA, July 11–15, 2005 p144
- [6] Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, Schrimpf R D, Reber R A, DeLaus M, Winokur P S, Wei A, Combs W E, Pease R L 1994 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **41** 1871
- [7] McLean F B 1980 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **27** 1651
- [8] Ma W Y, Wang Z K, Lu W, Xi S B, Guo Q, He C F, Wang X, Liu M H, Jiang K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 116101 (in Chinese) [马武英, 王志宽, 陆妩, 席善斌, 郭旗, 何承发, 王信, 刘默寒, 姜柯 2014 物理学报 **63** 116101]
- [9] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Ducret S, Dusseau L, David J P, Fesquet J, Gasiot J, Ecoffet R 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2896
- [10] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, Vaille J R, Dusseau L, Ducret S, Bernard M, Lorfevre E, Chatry C 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2616
- [11] Boch J, Velo Y G, Saigne F, Roche N J H, Schrimpf R D, Vaille J R, Dusseau L, Chatry C, Lorfevre E, Ecoffet R, Touboul A D 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3347
- [12] Velo Y G, Boch J, Saigne F, Roche N H, Perez S, Vaille J R, Deneau C, Dusseau L, Lorfevre E, Schrimpf R D 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2953
- [13] Lu W, Ren D Y, Zheng Y Z, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F 2009 *Atomic Energy Science and Technology* **43** 769 (in Chinese) [陆妩, 任迪远, 郑玉展, 王义元, 郭旗, 余学峰 2009 原子能科学技术 **43** 769]
- [14] Deng W, Lu W, Guo Q, He C F, Wu X, Wang X, Zhang J X, Zhang X F, Zheng Q W, Ma W Y 2014 *Atomic Energy Science and Technology* **48** 727 (in Chinese) [邓伟, 陆妩, 郭旗, 何承发, 吴雪, 王信, 张晋新, 张孝富, 郑齐文, 马武英 2014 原子能科学技术 **48** 727]
- [15] Ma W Y, Lu W, Guo Q, Wu X, Sun J, Deng W, Wang X, Wu Z X 2014 *Atomic Energy Science and Technology* **48** 2170 (in Chinese) [马武英, 陆妩, 郭旗, 吴雪, 孙静, 邓伟, 王信, 吴正新 2014 原子能科学技术 **48** 2170]
- [16] Boch J, Saigne F, Carlotti J F 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 232113
- [17] Boch J, Saigne F, Touboul A D, Schrimpf R D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 042108
- [18] Tuttle B R, Pantelides S T 2009 *Phys. Rev. B* **77** 115206
- [19] Rowsey N L, Law M E, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Tuttle B R, Pantelides S T 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2937
- [20] Hughart D R, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Tuttle B R, Pantelides S T 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2930
- [21] Hughart D R, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Rowsey N L, Law M E, Tuttle B R, Pantelides S T 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 3087

Estimation of low-dose-rate degradation on bipolar linear circuits using different accelerated evaluation methods*

Li Xiao-Long¹⁾²⁾³⁾ Lu Wu^{1)2)†} Wang Xin¹⁾²⁾³⁾ Guo Qi¹⁾²⁾ He Cheng-Fa¹⁾²⁾ Sun Jing¹⁾²⁾
 Yu Xin¹⁾²⁾ Liu Mo-Han¹⁾²⁾³⁾ Jia Jin-Cheng¹⁾²⁾³⁾ Yao Shuai¹⁾²⁾³⁾ Wei Xin-Yu¹⁾²⁾³⁾

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

2) (Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 4 January 2018; revised manuscript received 9 February 2018)

Abstract

The linear bipolar devices and integrated circuits (ICs) which are subjected to ionizing radiation exhibit parametric degradations due to current-gain decrease, and the amount of degradation on various types of bipolar devices is much more significant at low-dose-rate than at high-dose-rate. Such an enhanced low-dose-rate sensitivity (ELDRS) is considered to be one of the major challenges for radiation-tolerance testing intended for space systems. Therefore, it is of great significance to explore an efficient and practical test for the ELDRS in the linear bipolar devices and ICs. The different experiments have been implemented on four types of bipolar ICs for evaluating their responses to low-dose-rate irradiation. The experiments involve the dose rate switching approach performed under high to low-dose-rate irradiation and temperature switching approach performed under high to low temperature irradiation. Good agreement is observed between predictive curves obtained at dose rate switching irradiation and the low-dose-rate results, and the irradiation time for the dose rate switching approach is reduced from 4 months to a week. Further, the results also suggest that the device degradation rate can affect the prediction of the total dose. This is because the curves examined at different doses have a lot of overlap when the devices with fast degradation rates are performed. In addition to temperature switching irradiation, the radiation response of the same type of device is much more significant than that obtained in low-dose rate irradiation, and this method will shorten the irradiation time to 12 h. Based on the analysis of mechanisms behind the switched dose rate and temperature irradiation, switching temperature irradiation can accelerate the release of protons and buildup of interface traps, which is the key physical mechanism for ELDRS. Firstly, a higher irradiation temperature can enhance the transport of holes and release of protons to form interface traps, resulting in the enhanced degradation occurring at first dose examined. Further, the reducing temperature sequence suppresses the hydrogen dimerization process during the irradiation that follows, which is strongly temperature dependent and contributes to interface trap annealing. Moreover, further decrease in temperature can restrict the interface trap annealing because the barrier for this process is higher and it has less opportunity to take place at lower temperature. Additionally, the hydrogen molecules converted from hydrogen dimerization may extend the liberation of protons, by the hydrogen molecules cracking mechanisms, leading to the additional degradation. Therefore, the temperature switching irradiation is shown to be a conservative and efficient method for ELDRS in bipolar devices, and this provides an insight into hardness assurance testing.

Keywords: bipolar circuit, enhanced low-dose-rate sensitivity, accelerated evaluation method

PACS: 61.80.-x, 61.80.Ed, 85.30.Pq

DOI: 10.7498/aps.67.20180027

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1532261, U1630141) and the West Light Foundation of the Chinese Academy of Sciences China (Grant No. 2016-QNXZ-B-7).

† Corresponding author. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn