

文章编号: 1007-4627(2019)04-0477-07

双极器件ELDRS效应研究进展

陆妩^{1,2}, 李小龙^{1,2}, 于新^{1,2}, 王信^{1,2}, 刘默寒^{1,2,3}, 姚帅^{1,2,3}, 常耀东^{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)

摘要: 电离总剂量是航天电子系统辐射效应研究的重要问题, 其中双极器件因其特有的低剂量率损伤增强(Enhanced low Dose Rate Sensitivity, ELDRS)效应, 已成为航天用双极器件抗电离总剂量效应发展重点突破的方向及难点问题。本文综述了ELDRS效应及低剂量率加速评估技术的研究进展, 并结合ELDRS效应难点问题, 给出了最新关于ELDRS效应的研究结果。试验结果表明, 采用变温辐照方法不仅可以保守地用于双极器件在0~200 krad(Si)范围的ELDRS效应评估, 将评估时间从7.7个月缩短至11 h, 还可将其应用于双极模拟电路总剂量和单粒子协同效应的评估, 同样可以获得保守且快速的评估效果。

关键词: 双极器件; 剂量率效应; 低剂量率损伤增强效应; 加速评估技术

中图分类号: O571.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.04.477

1 引言

迄今为止, 因双极型晶体管(bipolar junction transistor, BJT)具有高电流驱动能力、低的噪声及良好的线性特性和匹配度等优点, 基于双极晶体管制造的各种模拟、混合电路在航天电子系统中仍占据重要的地位。研究表明^[1-2], 空间辐射会对双极器件产生各种辐射效应, 如电离总剂量辐射效应、位移损伤辐射效应、单粒子效应等, 其中双极器件因其特有的低剂量率损伤增强(Enhanced low Dose Rate Sensitivity, ELDRS)效应^[3], 近年来已成为航天用双极器件抗电离总剂量效应发展重点突破的方向及难点问题, 也是国际抗辐射领域长期攻关的研究方向。

ELDRS效应指的是, 在累积相同总剂量的条件下, 器件的退化程度取决于剂量累积的速度, 低剂量率辐射环境下的损伤大于高剂量率辐射环境下的损伤^[3]。若选择具有ELDRS倾向的器件进行太空任务时, 没有足够的设计余量可能会导致系统过早失效, 严重威胁航天器的可靠性。1998年Titus等^[3]、2003年Turflinger等^[4]报道了(Microelectronics and Photonics Test Bed, MPTB)太空试验为期五年的空间探测及搭载(A4板为双极线性电路)试验结果: (1) 空间辐射环境为低剂量率环境, 平均剂量率为0.1~5 mrad(Si)/s; (2) 将空间搭载的双极器件辐照试验结果与地面⁶⁰Co- γ 射线源辐

照结果对比, 发现空间损伤程度与地面模拟试验中10 mrad(Si)/s剂量率下的损伤程度相当, 而地面模拟试验显示损伤程度随着剂量率降低而增大, 这一结果证实了空间辐射环境中双极器件ELDRS效应的存在。

本文拟对ELDRS的产生机制和理论模型进行简要介绍, 讨论当前该领域重点研究和攻关的难点问题, 并给出最新的研究结果。

2 低剂量率辐射损伤增强效应研究现状

国内外对ELDRS效应损伤机制的研究经历了从仅依靠试验及宏观参量的经验模型到基于物理机制的一个定性 \rightarrow 半定量 \rightarrow 量化的研究过程。同时, 双极器件普遍存在的ELDRS效应给电子元件抗辐射能力测试评估带来巨大挑战, 国内外相关领域的专家也将研究重点放在了该效应的测试评估技术上, 出台了一系列加速评估方法, 以期实现双极器件ELDRS的快速鉴别和评估。

2.1 前期定性及半定量模型的研究现状

从Enlow等^[5]于1991年第一次报道双极晶体管的ELDRS开始, 该领域内的研究重点就倾向于对ELDRS效应产生机制的解释, 这也是所有研究开展的基础。前期对ELDRS效应损伤机理研究主要是对产生低剂量率损伤增强(或高剂量率损伤减弱)机制的研究, 依靠双极晶体管(PNP和NPN)以及特制的测试

收稿日期: 2019-04-17; 修改日期: 2019-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1532261, 11805270)

作者简介: 陆妩(1962-), 女, 浙江淳安人, 研究员, 从事电子元器件辐射效应、损伤机理、评估方法及抗辐射加固技术研究;

E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn.

结构栅控晶体管进行辐照试验(改变试验条件)研究, 提取感生缺陷浓度, 提出了相关模型, 大致归纳为: (1) 空间电荷模型^[6-7], (2) 双分子模型^[8-9], (3) 竞争模型^[10], (4) 二元反应速率模型^[11]。对某些器件和辐照条件而言, 上述模型都与大量的实验数据相符。

(1) 空间电荷模型

Fleetwood 等^[6]认为, 在高剂量率下基极氧化层中形成的空间电场(由浅氧化陷阱电荷形成)减缓了空穴输送到 Si/ SiO₂ 界面的速度, 导致辐照损伤减弱。该模型早期主要论述了不同剂量率条件引起的氧化物陷阱电荷分布的差异, 并未深入讨论质子(H⁺)对界面陷阱电荷的影响。Rashkeev 等^[12]研究认为空穴的输运和质子的释放是决定界面陷阱电荷形成的关键因素, 直接引起半导体器件的剂量率效应。高剂量率因氧化物陷阱捕获空穴产生较强空间电场, 抑制质子向界面处漂移与 Si-H 悬挂键作用形成界面陷阱电荷; 同时在 SiO₂ 中质子的迁移率远小于空穴的迁移率, 在低剂量率条件下有足够的时间使质子释放并形成界面陷阱电荷, 导致 ELDRS 效应, 如图 1 所示。

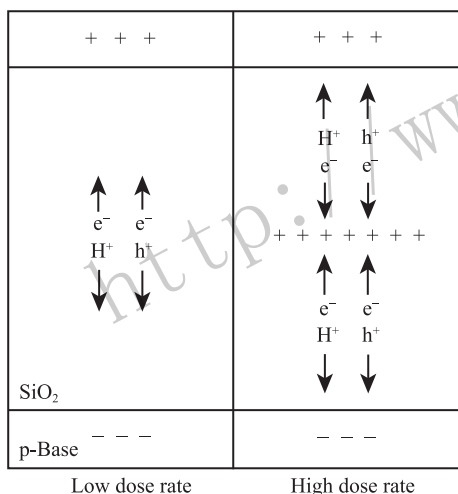


图 1 空间模型示意图^[12]

(2) 双分子模型

Hjalmarson 等^[13]讨论了五个不同的物理过程用于解释 ELDRS 效应: 1) 电子-空穴复合; 2) 自由电子被俘获的空穴复合; 3) 氢分子碎裂和氢释放; 4) 氢二聚化作用; 5) 氢的再次捕获。如式(1)~(5)所示。对比低剂量率, 高剂量率条件下参与释放质子的缺陷反应受到抑制, 减少了质子向界面的输运。此外, Fleetwood 等^[6]认为 SiO₂ 中质子浓度与电子-空穴的复合作用有关。因质子被电子捕获的截面很小, 质子一旦被缺陷释放后, 就很难被电子中性化。低剂量率时, 俘获空穴的缺陷在被电子复合前释放出质子, 且释放的质

子很难被电子中性化, 导致更多的质子输运至界面, 形成界面陷阱。

$$S_B^0 + h \rightarrow S_B^+, \tag{1}$$

$$S_B^0 + e \rightarrow S_B^0, \tag{2}$$

$$S_B^0 + H_2^0 \rightarrow S_B H^0 + H^+, \tag{3}$$

$$H^+ + H^- \rightarrow H_2, \tag{4}$$

$$S_B^0 + H^+ \rightarrow S_B H^+. \tag{5}$$

(3) 竞争模型

Boch 等^[10]依据空穴的俘获和复合的竞争关系, 提出竞争模型。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, 随之增加了质子的释放过程, 引起界面陷阱的增加。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, 从而导致高剂量率下释放的质子减小, 继而产生较少的界面陷阱, 如图 2 所示。

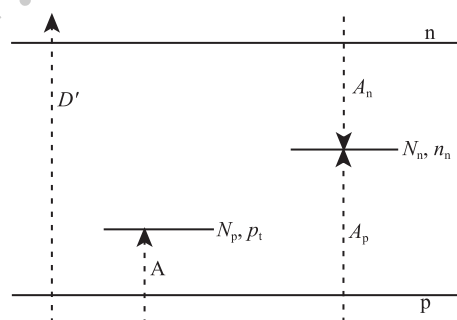


图 2 竞争模型示意图^[10]

(4) 二元反应速率模型

Freitag 等^[11]结合二元反应速率理论, 提出界面陷阱的形成是由两种缺陷的相互作用所致。反应物 A(类似空穴)与反应物 B(类似氢)相互作用形成初始的界面陷阱。界面陷阱的形成速率在短时间内到达峰值, 但随着反应物 B 的数量减小, 界面陷阱的形成速率减弱。而进一步辐照, SiO₂ 中又会释放相当数目的反应物 B, 又会增加界面陷阱的形成速率。对比高剂量率, 低剂量率辐照是一个宽时间尺度的过程, 因而有更多的反应物 B 被释放至界面, 形成界面陷阱, 造成低剂量率条件下的辐射损伤增强。

综上所述, 前期定性的 ELDRS 模型解释了导致高、低剂量率辐射损伤差异的原因, 定性分析了影响缺陷电荷分布的关键因素, 此研究成果为下一步的量化模型奠定了理论基础。

2.2 基于物理的 ELDRS 效应量化模型的研究现状

由于ELDRS效应机制的复杂性, 导致近期研究重点转向了基于第一性原理计算获得的电子 e^- 、空穴 h^+ 及H参与的氧空位缺陷反应的综合模型, 综合考虑所有可能发生与电离损伤相关的缺陷反应, 获得不同剂量率范围内不同时间尺度的缺陷浓度及反应过程。

(1) 依靠 ELDRS 模型进行的对 H_2 与氧化层内缺陷反应的影响

Chen 等^[14]将预辐照的试验样品栅控横向PNP晶体管(GCLPNP)置于不同浓度 H_2 氛围中进行不同时间尺度的预处理, 经辐照试验发现 H_2 氛围可加剧退化。Tuttle 等^[15]通过第一性原理计算确定了 H_2 可以被深能级氧空位型缺陷中心碎裂这一过程, 该过程增加质子来源, 促进界面陷阱的产生。Rowsey^[16]等通过FLOODS TCAD求解器中实现了基于上述的物理模型的模拟结果, 模型中既包括两阶段的质子产生机制, 也包括分子氢裂解机制, 每个机制都基于使用密度泛函理论的第一性原理计算, 其仿真结果与Chen 等^[14]在大范围剂量率和环境氢浓度下的试验结果相一致。

(2) 依靠 ELDRS 模型进行的温度对氧化层内缺陷反应的影响

Rashkeev等^[17]基于氢动力模型通过第一性原理计算获得了界面陷阱电荷的形成和退火机制。研究认为界面陷阱电荷的浓度受氢的钝化作用和去钝化作用的竞争影响, 且该竞争机制与Si/SiO₂界面处的氢种类密切相关。与此同时, 研究还表明温度和施加偏压直接影响氧化层中氢的相互转化和浓度分布。

从上述可知, 目前综合模型的机理基础来源于前期的ELDRS定性或半定量模型, 建模的物理基础为借助缺陷检测手段, 结合第一性原理计算及密度泛函理论计算获得的电离辐射环境中氧空位缺陷类型及H参与的各类氧空位缺陷反应, 再通过对反应动力学方程和粒子输运方程的解析, 从而获得综合ELDRS效应的量化模型。

2.3 低剂量率加速模拟评估技术

(1) 高温辐照加速评估技术

Witczak 等^[18]首次提出高温可以加速双极器件在高剂量率下的电离辐射损伤, 提出了在高剂量率下采用高温辐照方法加速评估ELDRS效应(Elevated Temperature Irradiation, ETI), 如图3所示。Carriere 等^[19]进一步优化高温辐照的试验条件(剂量率 <1 rad(Si)/s), 获得较好的评估结果, 但其普适性并未得到验证。从物理机制层面上Boch 等^[20]研究发现在低电场的氧化层中

高温辐照会减缓电子空穴对的初始复合, 增加空穴逃逸率。同时, 依照二元反应率模型^[11], 高温可以加速物质B(类氢)向界面的输运过程, 增强界面陷阱电荷的累积速率。

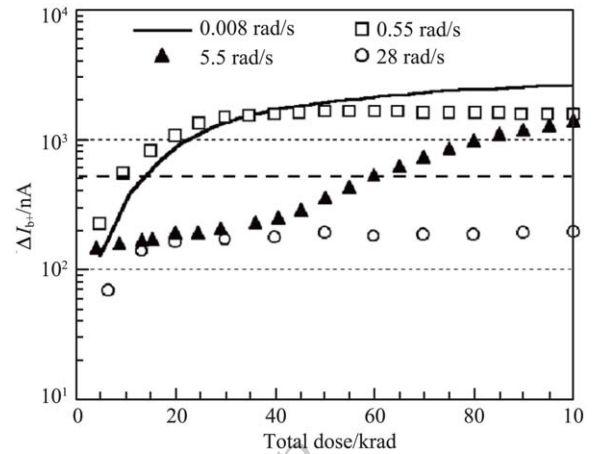


图3 高温加速评估方法的试验结果^[19]

(2) 变剂量率辐照加速评估技术

基于竞争模型, Boch 等^[21-22]提出了变剂量率加速评估方法, 该方法通过高、低剂量率切换实现ELDRS的快速评估。高剂量率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。因此, 变剂量率法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射损伤(曲线变化斜率), 最后利用水平平移拼接模拟ELDRS效应, 如图4所示。

(3) 氢氛围辐照加速评估技术

Pease 等^[23-24]将预辐照的试验样品进行氢氛围处理, 经高剂量率辐照后发现器件的损伤加剧。该方法利用缺陷电荷直接碎裂氢分子提供新的质子来源这一特性, 实现界面陷阱电荷的快速增长。但由于氢注入改变了器件氧化层中氢的初始分布, 无法真实地反映器件的氢含量(氢离子、氢分子及氢化缺陷), 因而在鉴别ELDRS效应上存在一定局限性。Pease 等对ELDRS免疫(ELDRS-free)的双极模拟电路进行氢氛围辐照后, 发现ELDRS-free的样品因氢注入后出现明显的增强效应, 如图5所示, 这一结果也证明了氢氛围辐照加速评估方法无法有效地鉴别器件的ELDRS效应。

(4) 变温辐照加速评估技术

双极工艺的ELDRS效应与质子的释放和界面陷阱电荷的形成有关。质子的释放依赖于剂量率、剂量及温度等因素, 界面陷阱电荷的分布受到温度、界面处粒子

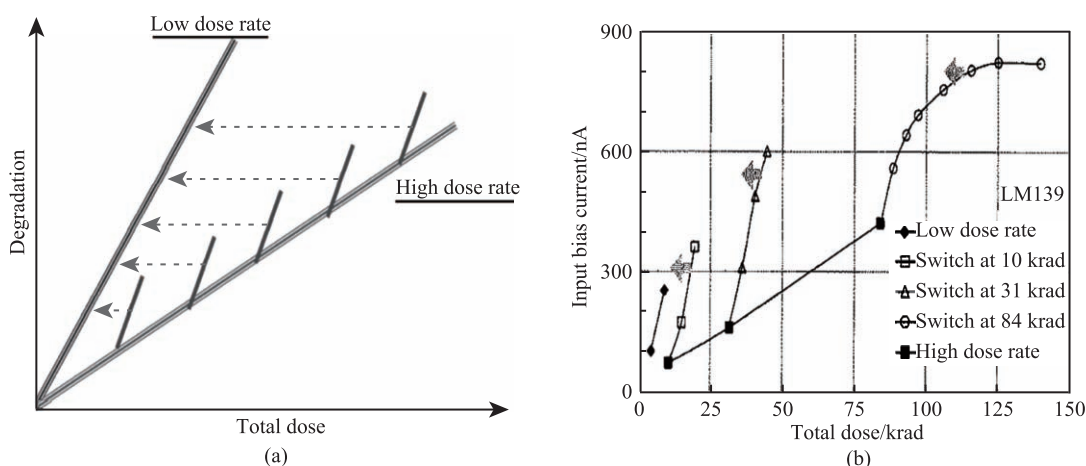


图 4 变剂量率加速评估技术示意图^[21-22]

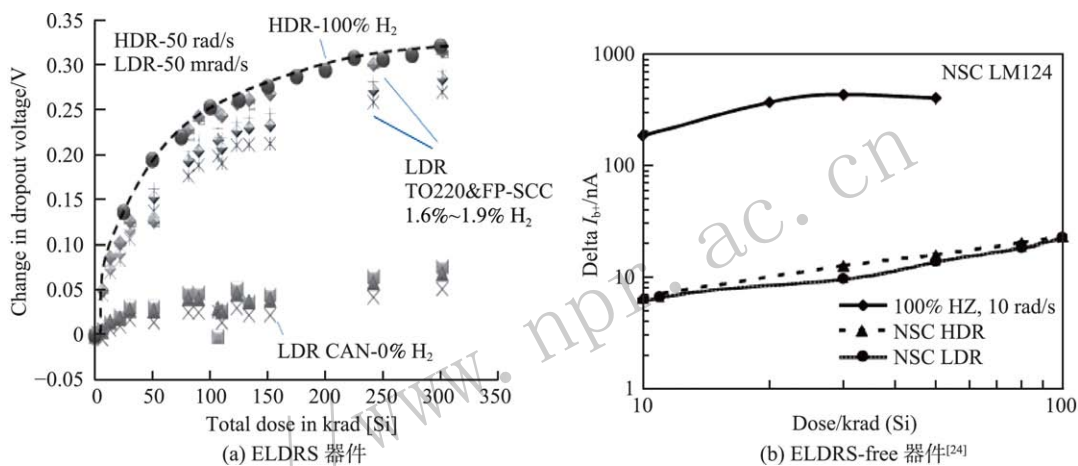


图 5 氢氛围加速试验加速评估技术

的种类、浓度以及 Si 表面处电势影响。中国科学院新疆理化技术研究所陆妮等^[25-27]经过十多年的研究提出了变温辐照加速评估方法，该方法基于剂量率、剂量及温度对双极器件总剂量效应的影响，同时考虑到不同剂量

阶段时氧化层中粒子(如空穴、电子、质子及氢分子等)的产生、输运以及相互转化对缺陷分布的作用机制，采取阶梯式的温度台阶由高到低降低辐照温度，最大限度地激发器件退化潜能(图6)。这种方法已在不同工艺、类

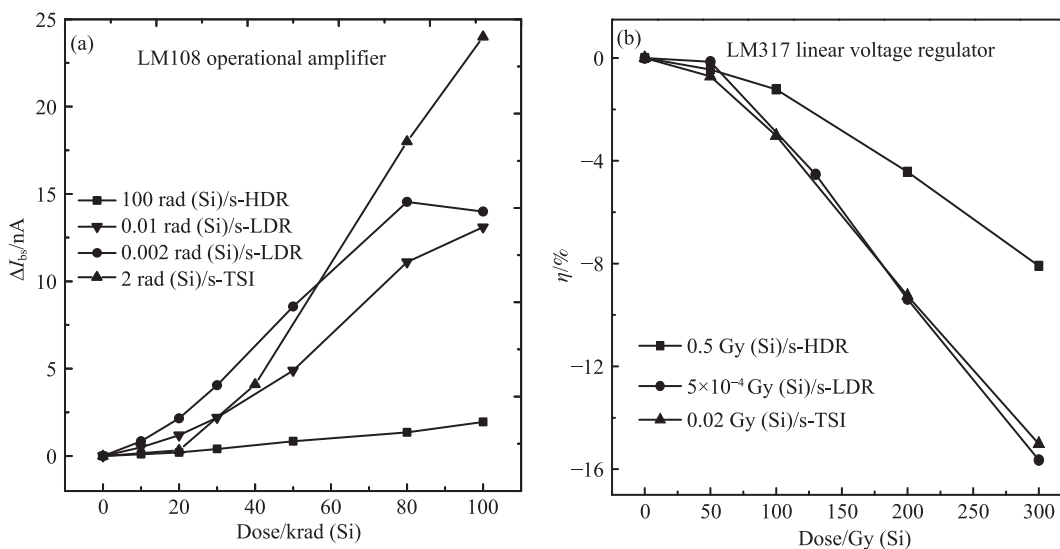


图 6 变温加速评估技术^[25-26]

型的双极性电路(例如运算放大器、比较器、线性稳压器等)上实现了 ELDRS 的快速鉴别和评估。

3 低剂量率研究进展

目前普遍接受的 ELDRS 效应随总剂量的变化趋势为阈值区、线性区和饱和区,且前期的研究认为较高总剂量下和更低剂量率 (<10 mrad(Si)/s) 下 ELDRS 效应会趋于饱和。但最近几年的研究报道显示,在此情况下仍出现增强的趋势,如图 7 所示,通过现有物理模型外推的方法并不能解释增强现象。而现如今国内外为进一步提高深空探测能力,高可靠、长寿命的飞行器已成为当前航天任务的现实需求。与此同时,ELDRS 效应与器件制作工艺极为相关,不同工艺线中的器件 ELDRS 效应差异极大,这也是导致双极器件抗总剂量效应水平难以评估的原因。

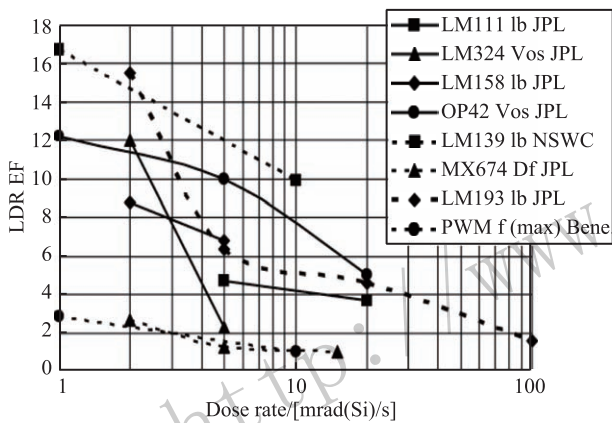


图 7 电离辐照条件下,双极器件退化加强^[28]

研究发现,不同剂量率条件辐照时,双极器件在宽剂量范围内存在明显剂量率效应,未见饱和趋势,如图 8 所示。基于温度、剂量及剂量率对总剂量的影响机制,即高温辐照加速质子的直接释过程,增强界面陷阱电荷的增长速率,中、低温度降低氢二聚化过程,减小质子消耗,抑制界面陷阱电荷的退火速率^[29],中国科学院新疆理化技术研究所进一步发展和延伸了变温加速评估方法,建立了剂量 0~200 krad(Si) 范围的低剂量率变温加速评估试验程序,变温辐照试验过程为:(1)在恒温 120 °C±5 °C 条件下,辐照至 20 krad(Si);(2)在恒温 100 °C±5 °C 条件下,辐照至 80 krad(Si);(3)在恒温 80 °C±5 °C 条件下,辐照至 150 krad(Si);(4)在恒温 60 °C±5 °C 条件下,辐照至 200 krad(Si)。验证结果表明,该方法可以保守评估双极器件在低剂量率条件下的抗辐射能力,并且将评估时间从 7.7 个月缩短至 11 h^[30]。

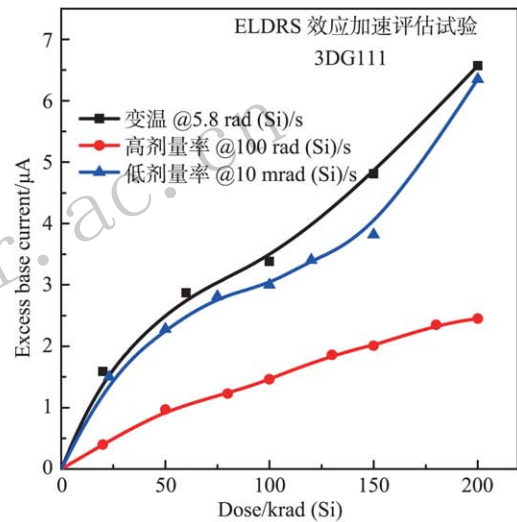
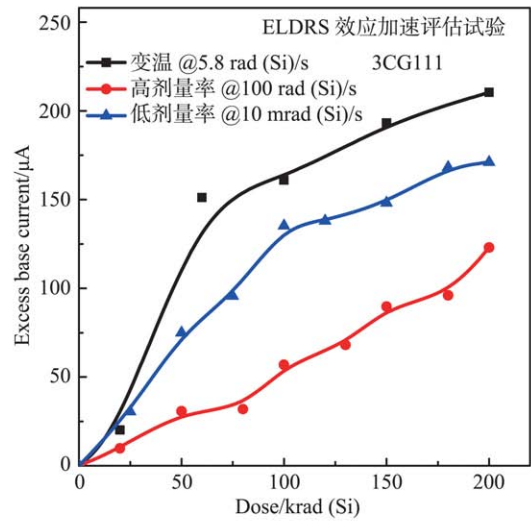


图 8 (在线彩图)变温加速评估方法的高总剂量评估结果

除电离总剂量效应,双极器件在空间中还遭受高能粒子轰击,如质子、重离子等,产生单粒子瞬态(SET)效应,且 SET 效应受器件累积的电离总剂量影响。为了进一步探索双极器件总剂量效应与单粒子效应协同作用的快速评估试验方法,利用变温加速评估方法模拟空间低剂量率环境,中国科学院新疆理化技术研究所对双极器件在总剂量和重离子辐照条件下的协同效应进行了研究,扩展了变温方法的应用范围。图9分别为未经电离总剂量辐照、低剂量率(0.01 rad(Si)/s)辐照至 100 krad(Si)、变温(3 rad(Si)/s)辐照至 100 krad(Si)后电压比较器单粒子瞬态的脉冲幅值统计分布。其中,电离总剂量试验在中国科学院新疆理化技术研究所的⁶⁰Co-γ辐照源上进行;单粒子试验在芬兰 Jyväskylä 大学重离子加速器试验装置上进行,重离子种类为 Kr 离子,LET=31.21 MeV/(mg/cm²)。结果显示,累积总剂量会使器件单粒子瞬态幅值分布发生改变,辐照后单粒子瞬态幅值集中在 2 至 5 V 范围内,

低剂量率辐照和变温辐照对器件单粒子瞬态影响变化趋势一致, 说明变温辐照可以很好地模拟低剂量率辐照对器件单粒子瞬态的影响。这一研究结果的获得, 为双极器件及模拟电路在空间综合辐射环境中协同效应的快速评估提供了重要的技术途径。

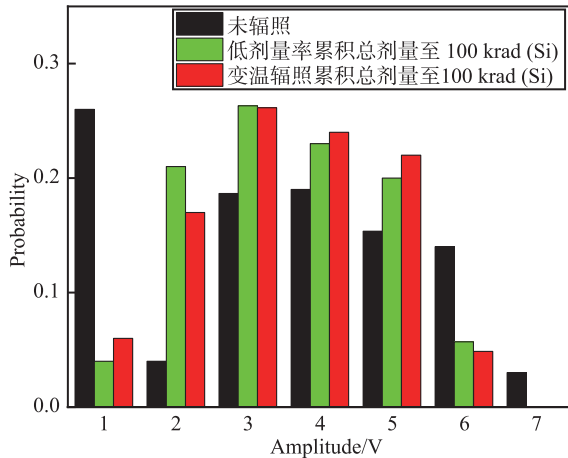


图 9 (在线彩图) 电压比较器 LM139 在高电平输出时单粒子瞬态脉冲幅值统计分布, 重离子种类为 Kr 离子, LET=31.21 MeV/(mg/cm²)

4 结束语

ELDRS 效应的产生与 Si/SiO₂ 界面附近氢的反应密切相关, 且受氢种类、浓度以及空间电荷的电场影响, 器件工艺、器件结构、氧化层缺陷分布以及辐照条件的不同, 可能会导致 ELDRS 效应的主导氢反应机制的差异。鉴于双极器件 ELDRS 效应的复杂性, 借助对缺陷间反应动力学方程和漂移扩散方程的解析, 同时结合辐照试验和缺陷检测技术, 对低剂量率条件下的关键机制进行量化分析具有重要意义。

参考文献:

- [1] SCHRIMPF R D. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, **43**(3): 787.
- [2] KOSIER S L, WEI A, SCHRIMPF R D, *et al.* *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1995, **42**(3): 436.
- [3] TITUS J L, COMBS W E, TURFLINGER T L, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(6): 2673.
- [4] TURFLINGER T L, CAMPBELL A B, SCHMEICHEL W M, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, **50**(6): 2328.
- [5] ENLOW E W, PEASE R L, COMBS W, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1991, **38**(6): 1342.
- [6] FLEETWOOD D M, KOSIER S L, NOWLIN R N, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1994, **41**(6): 1871.
- [7] GRAVES, R J, CIRBA C R, SCHRIMPF R D, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(6): 2352.
- [8] BELYAKOV V V, PERSHENKOV V S, SHALNOV A V, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, **42**(6): 1660.
- [9] HJALMARSON H P, PEASE R L, WITCZAK S C, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, **50**(6): 1901.
- [10] BOCH J, SAIGNE F, TOUBOUL A D, *et al.* *Applied Physics Letters*, 2006, **88**(23): 232113.
- [11] FREITAG R K, BROWN D B. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, **45**(6): 2649.
- [12] RASHKEEV S N, CIRBA C R, FLEETWOOD D M, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, **49**(6): 2650.
- [13] HJALMARSON H P, PEASE R L, DEVINE R A B. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55**(6): 3009.
- [14] CHEN X J, BARNABY H J, VERMIRE B, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, **54**(6): 1913.
- [15] TUTTLE B R, PANTELIDES S T. *Physical Review B*, 2009, **79**(11): 115206.
- [16] ROWSEY N L, LAW M E, SCHRIMPF R D, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, **58**(6): 2937.
- [17] RASHKEEV S N, FLEETWOOD D M, SCHRIMPF R D, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2004, **51**(6): 3158.
- [18] WITCZAK S C, SCHRIMPF R D, GALLOWAY K F, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, **43**(6): 3151.
- [19] CARRIERE T, ECOFFET R, POIROT P. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2000, **47**(6): 2350.
- [20] BOCH J, SAIGNE F, DUSSEAU L, *et al.* *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(4): 042108.
- [21] BOCH J, SAIGNE F, SCHRIMPF R D, *et al.* *IEEE transactions on nuclear science*, 2005, **52**(6): 2616.
- [22] BOCH J, VELO Y G, SAIGNE F, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, **56**(6): 3347.
- [23] ADELL P C, PEASE R L, BARNABY H J, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, **56**(6): 3326.
- [24] PEASE R L, ADELL P C, RAX B, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, **57**(6): 3419.
- [25] LU, W, RENG D Y, ZHENG Y Z, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, **43**(9): 769. (in Chinese) (陆妩, 任迪远, 郑玉展, 等. 原子能科学技术, 2009, **43**(9): 769.)
- [26] DENG, W, LU W, GUO Q, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, **48**(4): 727. (in Chinese) (邓伟, 陆妩, 郭旗, 等. 原子能科学技术, 2014, **48**(4): 727.)
- [27] MA W Y, LU W, GUO Q, *et al.* *Atomic Energy Science and Technology*, 2014, **48**(11): 2170. (in Chinese) (马武英, 陆妩, 郭旗, 等. 原子能科学技术, 2014, **48**(11): 2170.)
- [28] PEASE R L, SCHRIMPF R D, FLEETWOOD D M. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, **56**(4): 1894.
- [29] LI X, LU W, WANG X, *et al.* *Chinese Physics B*, 2018, **27**(3): 036102.
- [30] LI X, LU W, GUO Q, *et al.* *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2019, **66**(1): 199.

Progress in ELDRS Effect of Bipolar Devices

LU Wu^{1,2,1)}, LI Xiaolong^{1,2}, YU Xin^{1,2}, WANG Xin^{1,2}, LIU Mohan^{1,2,3}, YAO Shuai^{1,2,3}, CHANG Yaodong^{1,2,3}

(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)

Abstract: Enhanced low-dose-rate sensitivity (ELDRS), with more degradation occurring at low dose rate for bipolar transistors and integrated circuits (ICs), is considered to be one of the major concerns for total ionizing dose hardness-assurance testing intended for space missions. In this paper, the research progress of ELDRS effect and low dose rate accelerated evaluation technology are reviewed. Combined with the difficult issues of ELDRS effect, the latest research results on ELDRS effect are given. The results from temperature-switching irradiation (TSI) are shown to be conservative with respect to low dose rates irradiation, and the irradiation time can be shortened from 7.7 months to 11 hours. And also the TSI for estimating ELDRS can be applied the SET (Single Event Transients) effect of bipolar circuits with low dose rate irradiation. Similarly, a conservative and rapid evaluation results can be obtained.

Key words: bipolar transistor; dose-rate irradiation; enhanced low dose rate sensitivity (ELDRS); accelerated evaluation technology

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 17 Apr. 2019; **Revised date:** 5 Jul. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U1532261, 11805270)

1) E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn.