

双极电压比较器电离辐射损伤及剂量率效应分析

马武英¹⁾²⁾ 陆妩^{1)†} 郭旗¹⁾ 何承发¹⁾ 吴雪¹⁾²⁾ 王信¹⁾²⁾
丛忠超¹⁾²⁾ 汪波¹⁾²⁾ 玛丽娅¹⁾²⁾

1)(中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2013年8月13日收到; 2013年9月25日收到修改稿)

为了对双极电压比较器在电离辐射环境下的损伤变化特征及其剂量率效应进行研究, 选择一组器件, 在不同偏置条件下进行⁶⁰Co γ 高低剂量率的辐照和退火试验. 结果表明: 电压比较器的电源电流、偏置电流及失调电压等多个关键参数都有不同程度的蜕变; 偏置条件对于电压比较器的辐射响应有很大影响; 此外, 不同公司生产的同种型号电路表现出不同的剂量率效应; 通过对测试结果分析, 系统地讨论了各参数变化的原因, 并结合电离损伤退火特性, 探讨了各剂量率效应形成的机理. 研究结果对工程应用考核提供了参考, 而且为设计抗辐射加固器件提供了依据.

关键词: 双极电压比较器, ⁶⁰Co γ 辐照, 剂量率效应, 辐射损伤

PACS: 61.80.-x, 85.40.e, 61.80.Ed

DOI: 10.7498/aps.63.026101

1 引言

电压比较器被广泛用于模数接口、自动控制、电平监测以及波形变化等领域, 是航天电子器件不可或缺的一员. 然而, 工作在电离辐射环境中的半导体器件, 不可避免地要遭受电离辐照的影响. 电离辐照引起晶体管基极电流增加, 增益减少等, 这些参数对于电压比较器有着至关重要的作用, 它们的蜕变将严重影响电压比较器参数的变化, 甚至导致功能失效^[1, 2]. 国外对电压比较器的电离辐射效应给予了充分的关注, 已有大量关于其在辐射环境中损伤变化的研究报告^[3, 4]. 然而, 这些研究只关注某一参数的变化, 这虽反映出电压比较器在电离辐射环境下的变化, 却不能反映出其具体的损伤蜕变模式. 而国内关于电压比较器损伤机理的报道更为鲜见. 自从1991年Enlow等^[1]发现低剂量率辐射损伤增强效应(enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)以来, 国内外对双极器件和电路进行的大量研究发现, 多数双极模

拟器件在低剂量率下的损伤明显大于高剂量率下的损伤, 表现出低剂量率辐射损伤增强效应, 这也为双极器件的航天应用和评估带来新的挑战^[5-10]. 然而, 关于同一型号、不同公司的电压比较器的辐射效应并未见报道. 另外, 考虑到空间应用中器件处于备用及工作状态, 故有必要对不同偏置条件下的损伤机理及辐射效应进行研究. 因此, 为便于分析电压比较器的损伤规律, 寻找损伤敏感参数, 探讨不同偏置和不同剂量率下的损伤差异, 选择了不同公司生产的同种型号电压比较器, 进行了不同偏置条件下高低剂量率的电离辐照及室温退火试验.

2 典型比较器简介

比较器原理如图1所示. 其中差分输入级由PNP复合晶体管对 Q_1, Q_3 和 Q_2, Q_4 实现. 它们可以实现低输入偏置电流和一直扩展到0 V的输入电压范围, 并能有效的增大输入阻抗. 镜像电流源 Q_5, Q_6 组成这一级的有源负载, 它也能变换成为

† 通讯作者. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

Q₇的单端驱动。Q₇晶体管提供附加增益,并驱动集电极开路输出晶体管Q₈。当比较器应用时需要上拉电阻将输出电流转化成输出电平。当Q₈打开,输出低电平;当Q₈关闭,输出高电平。

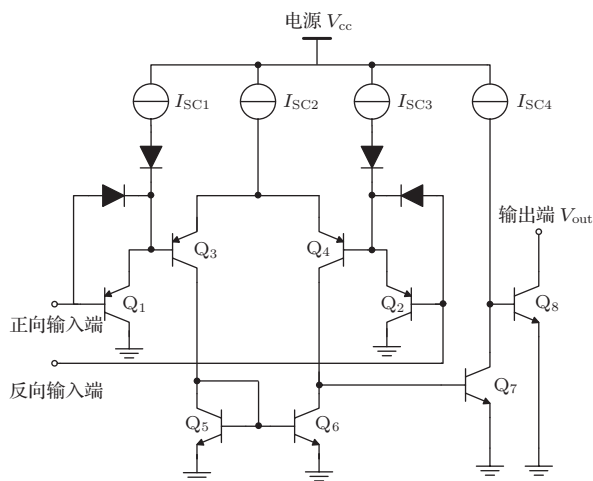


图1 典型比较器内部原理

当比较器处于工作偏置状态(本实验的辐照模式),即正输入端链接+5 V,负输入端接地。晶体管Q₁, Q₃, Q₅, Q₆及Q₈处于关闭状态,但是晶体管Q₂, Q₄和Q₇处于打开状态。

3 实验器件和实验方法

实验器件详细信息如表1所示。辐照实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,剂量率选用实验室高剂量率(0.50 Gy/s, high dose rate, HDR)和低剂量率(0.45 mGy/s, low dose rate LDR)。辐照时器件均放在铅铝屏蔽盒内,以消除低能散射的影响。高剂量率辐照至规定剂量后,进行相同偏置的室温退火实验,退火时间不小于低剂量率累计到相同总剂量所需时间。样品辐照偏置条件为工作偏置($V_{cc} = V_{in+} = 5\text{ V}$, $V_{ee} = V_{in-} = 0\text{ V}$)和零偏置(所有管脚短接接地)。

电压比较器辐照前后电参数采用辅助运放法测试,该方法由国际电气技术委员会(IEC)通过,被列为国际通用的测试方法。测量参数包括偏置电流 I_{ib} ,失调电压 V_{io} ,失调电流 I_{io} ,增益 A_v ,电源电流 I_{cc} 及输入输出曲线等,以上参数测试均在辐照结束后30 min内完成。

4 电压比较器敏感参数锐变与分析

电压比较器在电离辐射下,所有参数均发生蜕变。分析所测试参数发现:电源电流、偏置电流及工作偏置条件的失调电压为辐射敏感参数。所以本文讨论部分将对上述三种参数的蜕变机理进行详细探讨。此外,本次实验中选取不同公司生产的相同电路结构器件进行总剂量试验,虽然其辐射损伤程度存在差异,但是高、低剂量率及偏置的影响趋势大致相同,因此本文只针对Rohm公司电压比较器LM2903进行详细的机理分析。关于不同公司的电压比较器辐射损伤差异在第5进行讨论。

4.1 电源电流

电源电流指在给定电源电压下,流入器件 V_{cc} 端的静态电流,是比较器的重要参数。图2为Rohm公司的比较器在高、低剂量率下不同偏置条件的电源电流减少量随总剂量变化曲线。从图中可以看出,两种偏置条件下电源电流均表现出随辐照剂量的增加而减少。此外,可以看出在低剂量率下,两种偏置条件下的辐射损伤存在明显差异;而在高剂量率辐照时,不同偏置条件下的损伤相差却很小。

表1 实验样品

生产厂商	型号	批次编码
Rohm Semiconductor	LM2903DRTR-ND	5AKTZ
Texas Instruments	LM2903P	09AV9XM
ST Microelectronics	LM2903N	KK6734

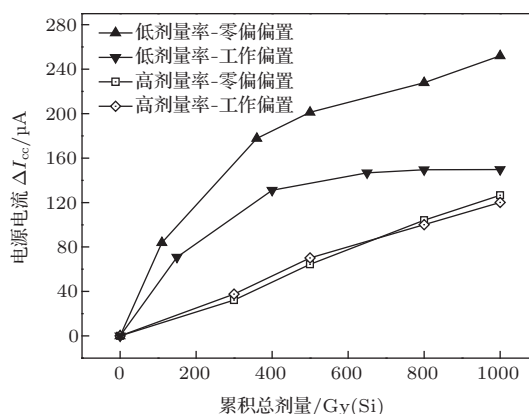


图2 LM2903电压比较器电源电流随总剂量的变化 ($\Delta I_{cc} = I_{cc\text{辐}} - I_{cc\text{辐前}}$)

实验中使用Rohm公司的双比较器LM2903,由原理图1可以看出:电源电流主要由四个恒流源分流。LM2903内部含有两个电压比较器,它们由

一个电源电压提供, 测试的电源电压包含两个器件内部静态工作电流. 分析初始值发现: 平均单个器件的静态电流与器件内部各恒流源之和相当. 因此可以认为电源电流的变化实际反映了器件内部恒流源的变化. 图2所示的电源电流随电离总剂量的积累而不断减小, 即表明器件内部恒流源在不断减少. 典型镜像电流源原理^[11]如图3所示, Q_1 和 Q_2 是理想双极晶体管, 恒流 I_{C2} 和参考电流 I_{REF} 之间的关系为

$$I_{C2} = \frac{I_{REF}}{1 + \frac{1}{\beta}}, \quad (1)$$

式中 β 表示晶体管增益, 若 β 很大时, I_{C2} 和 I_{REF} 近似相等, 然而, 随着辐照总剂量的增加 β 减小, 从而导致 I_{C2} 相对于 I_{REF} 降低. 所以, 电压比较器电源电流的衰减可以归结于恒流源 I_{SC1} , I_{SC2} , I_{SC3} , I_{SC4} 的衰减.

低剂量率辐照时, 工作偏置条件下比较器电源电流的衰减小于零偏条件下的损伤值, 这主要是由于工作偏置条件下, 镜像电流源中双极晶体管处于正偏状态, 而根据边缘电场模型^[12]可知: 双极晶体管在正偏置条件下的损伤小于零偏偏置(双极晶体管在零偏时, β 衰减更显著). 所以工作偏置条件下, 比较器电源电流衰减趋势小于零偏置. 高剂量率下损伤没有明显差异, 可能是由于高剂量率下, 两种偏置下界面态的数目很少, 故而不足以显现偏置对晶体管的损伤的影响.

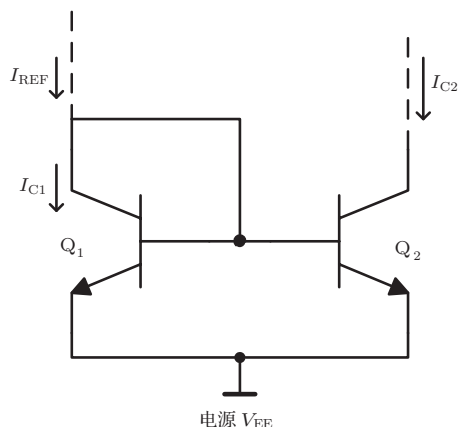


图3 简单镜像电流源原理图

4.2 偏置电流

偏置电流定义为比较器两个输入电流的平均值 ($I_{ib} = \frac{I_{ib+} + I_{ib-}}{2}$), 在电路外接电阻确定之后, 输入偏置电流的大小主要取决于输入级晶体管

Q_1 , Q_2 的性能. 从使用角度来看, 偏置电流越小, 由信号源内阻变化引起的输出电压变化也越小, 故它是重要的技术指标. 在高低剂量率下偏置电流随总剂量的变化如图4所示. 从图中可以明显看出, 两种偏置下的偏置电流都随着辐照总剂量的增加而增大. 此外, 在工作偏置下偏置电流 I_{ib} 的辐照损伤略小于零偏状态.

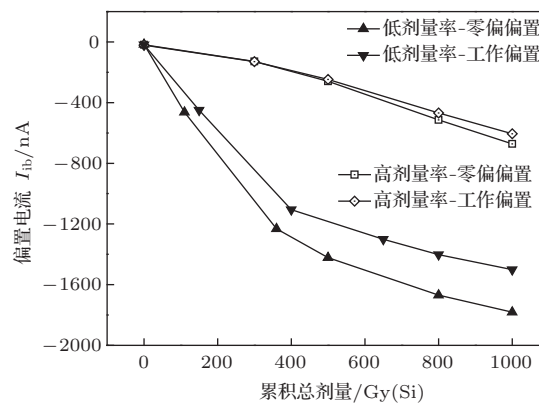


图4 LM2903 电压比较器偏置电流随总剂量的变化

偏置电流是当比较器处于静态时, 为输入级 PNP 晶体管 Q_1 , Q_2 所提供的偏置电流, 即流入晶体管基极的电流. 据文献^{13, 14}报道, 电离辐照会使双极晶体管基区变宽, 基区表面复合率增加, 从而使双极晶体管在电离辐照后发生基极电流增大和增益退化等现象. 这与我们的实验结果相一致, 即比较器偏置电流随着总剂量的增加而增大. 在低剂量率辐照时, 零偏状态下偏置电流的变化略大于工作偏置状态下的变化, 这主要归因于比较器零偏置和工作偏置条件时输入晶体管 Q_1 , Q_2 所处的偏置状态. 比较器工作偏置时: Q_1 反向偏置, Q_2 正向偏置, 而零偏时晶体管 Q_1 , Q_2 显然亦处于零偏偏置. 晶体管氧化层中边缘电场在反向偏置时最大, 零偏次之, 正向偏置时相对较弱, 使得输运到界面的辐射氧化物陷阱电荷存在差异, 从而导致反向偏置时基极电流损伤大于零偏置, 而正向偏置最小. 然而, 偏置电流定义是两输入级晶体管基极的电流平均值, 所以我们可以推测, 输入级晶体管 Q_1 , Q_2 均处于零偏时的损伤大于其一正一反时的综合损伤. 即比较器宏观参数反映零偏条件下辐照时偏置电流的损伤大于工作偏置.

4.3 失调电压

输入失调电压 (V_{io}) 的大小反映了电压比较器制造中电路的对称程度和电位配合情况. 一个理想

的比较器, 当输入电压为零时, 输出电压也应为零 (不加调零装置). 但实际上它的差分输入级很难做到完全对称, 通常在输入电压为零时存在一定的输出电压.

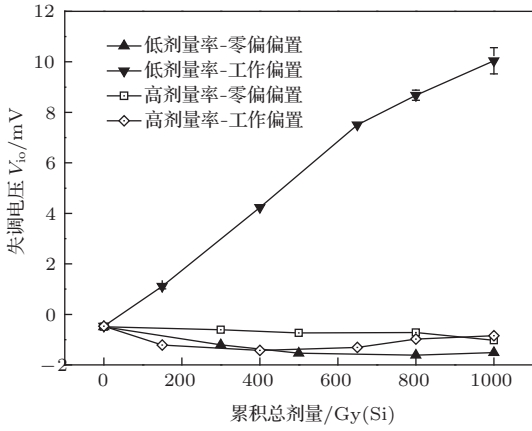


图5 LM2903 电压比较器失调电压随总剂量的变化

图5为Rohm公司LM2903失调电压在高低剂量率-不同偏置条件下随总剂量的变化曲线, 从图5中可以看出, 在低剂量率辐照时, 零偏条件下失调电压随总剂量的变化很小, 而在工作偏置下, 随着辐照剂量的增加失调电压 V_{io} 不断增加.

由原理图1可知, 比较器失调电压主要由差分对 Q_3, Q_4 形成, 而 Q_3, Q_4 发射极由 I_{SC2} 提供电流, 流过 Q_2 和 Q_3 的电流相等, 分别是 $1/2$ 的 I_{SC2} , Q_3, Q_4 差分晶体管的发射极电流可表示为

$$I_E(Q_3) = I_s \exp[V_{BF}(Q_3)/V_T], \quad (2)$$

$$I_E(Q_4) = I_s \exp[V_{BF}(Q_4)/V_T]; \quad (3)$$

输入级晶体管 Q_1, Q_4 发射极电流表示为

$$I_E(Q_1) = I_s \exp[V_{BF}(Q_1)/V_T], \quad (4)$$

$$I_E(Q_2) = I_s \exp[V_{BF}(Q_2)/V_T]; \quad (5)$$

而晶体管 Q_1 和 Q_2 的发射极电流分别是由 I_{SC1} 和 Q_3 的基极电流与 I_{SC3} 和 Q_4 的基极电流组成, 所以 Q_1 和 Q_4 的发射极电流可以表示为

$$\begin{aligned} I_E(Q_3) &= I_{SC1} + I_B(Q_3) \\ &= I_{SC1} + I_C(Q_3)/\beta_3, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_E(Q_2) &= I_{SC4} + I_B(Q_4) \\ &= I_{SC4} + I_C(Q_4)/\beta_4; \end{aligned} \quad (7)$$

从(6)和(7)式可以看到, $I_E(Q_1)$ 和 $I_E(Q_2)$ 由 β_3, β_4 决定, 而

$$V_{io} = V_{BE}(Q_1) - V_{BE}(Q_2); \quad (8)$$

将(3)和(4)式分别代入(5)和(6)式, 然后代入(7)式, 化简可得:

$$\begin{aligned} V_{io} &= V_T \ln(I_{SC1} + I_C(Q_3)/\beta_3)/(I_{SC4} \\ &\quad + I_C(Q_4)/\beta_4); \end{aligned} \quad (9)$$

上述公式中: V_T 代表温度的电压当量, V_{BE} 代表基射极电压, I_s 表示反向饱和电流, I_C 和 I_E 分别表示集电极和发射极电流. 从(9)式可以看出失调电压 V_{io} 与晶体 Q_3, Q_4 的增益 β 及两镜像电流源 I_{SC1}, I_{SC4} 有关. 当零偏置时, 可以认为辐射对于输入级晶体管和镜像电流源的辐射损伤大致相同, 故输入级晶体管 β 和镜像电流源的蜕化相同, 反映在宏观参数表示为失调电压的变化相同, 如图5所示. 当工作偏置时, 由于输入级晶体管处于不同的偏置状态, 研究表明, 辐射对晶体管的影响不同. 晶体管增益 β 损伤规律可概括为: 正向偏置损伤最小, 零偏置次之, 反向偏置最大^[12,13,14]. 当比较器处于正向工作状态时, 晶体管 Q_3 处于反向偏置状态, Q_4 处于正向偏置状态, 所以 β_3 的减小大于 β_4 . 假设镜像电流源 I_{SC1} 和 I_{SC4} 随辐照变化相同, 则由(9)式知 V_{io} 向正增大, 并且这种变化趋势随着辐照总剂量的增加而增加, 这与我们的低剂量率实验结果相一致. 然而在高剂量率工作偏置条件下辐照时, 失调电压并没有发生大的变化, 主要是由输入级晶体管的抗辐射能力所决定, 将在第5节详细讨论.

5 电压比较器的剂量率效应

考虑到近年来研究报道的双极器件的低剂量率辐射损伤增强效应, 本文在相同偏置条件下对不同公司生产的双极电压比较器进行了高低剂量率的辐照实验. 实验结果发现, 不同公司的电压比较器表现出不同的辐射效应. 三款不同公司生产的同种型号电压比较器, 在高低剂量率下累积到 1000 Gy 总剂量及退火 3×10^6 s 时, 失调电压的相对变化趋势如图6所示.

三款器件失调电压在高低剂量率下均存在明显差异, 表现为低剂量率辐射损伤增强效应. 对比高低剂量率下的损伤程度可以看出: ST公司的电压比较器低剂量率下损伤程度最为严重, TI公司的次之, Rohm公司的最小, 且三款器件均表现出ELDRS效应. 此外, 从退火趋势中我们可以看出: Rohm和TI公司的电压比较器高剂量率辐照后并未发生明显退火, 相反损伤有略微增大的趋势. 而ST公司的电压比较器经过 3×10^6 s 退火, 损伤明

显增大, 即该器件失调电压既存在低剂量率辐射损伤增强效应, 又有时间相关效应.

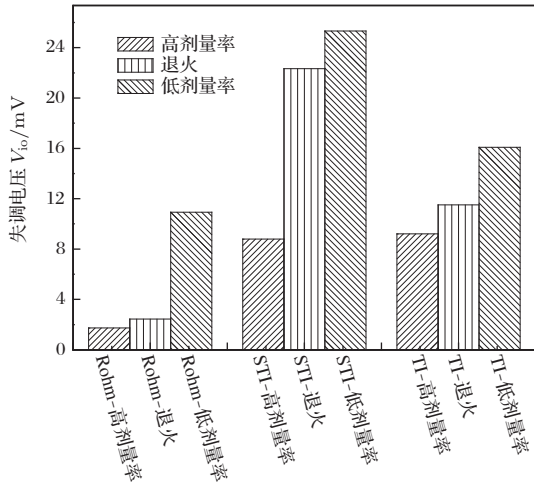
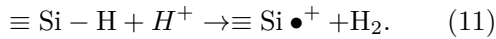
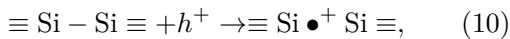
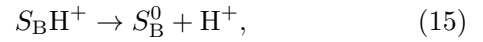
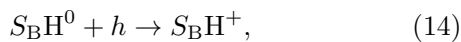
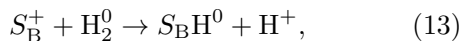


图6 不同公司比较器在工作偏置条件下剂量率效应及退火情况

电离辐射引起双极晶体管的退化, 主要是由于辐射引起隔离氧化层中氧化物电荷 N_{ot} 和界面陷阱电荷 N_{it} 的增加^[14,15]. 当器件受到电离辐射时, 在氧化层会产生大量电子空穴对, 在边缘电场的作用下, 逃脱初始复合后的电子被快速地扫出氧化层, 而剩下的空穴则在氧化层内跳跃输运到界面. 而空穴的输运过程中会产生氧化物电荷 (N_{ot}) 或质子 (H^+), H^+ 在随后输运到界面形成界面态 (N_{it}). 研究表明, 大多数双极晶体管的低剂量率下的损伤由界面态 N_{it} 所决定. 氧化物缺陷 N_{ot} 和界面陷阱 N_{it} 产生方程如下:



低剂量率辐射损伤增强效应的存在可用文献^[16, 17]提出的二元模型来解释, 在高剂量率下损伤减弱是由于有空穴参与缺陷反应间的竞争, 能产生明显的辐射响应的反应, 主要发生在氢键被打裂的空穴陷阱位置 (E' 中心). 在这个过程中分子氢在空穴缺陷处被打裂, 释放质子, 剩下一个被俘获的中性氢. 随后这个中性氢可以和其他的空穴反应释放额外的质子. 上述反应过程可以用以下方程来表示:



其中 h 表示辐射感生空穴, S_B^0 代表中性陷阱缺陷, S_B^+ 代表氧化物陷阱缺陷, H^+ 代表质子, H_2 代表氢分子.

质子迁移到界面处形成界面态, 也就是迁移到界面的质子数量决定了辐射响应. 在低剂量率下, 上述反应过程独立于剂量率. 但在高剂量率时, 净的自由空穴、陷阱空穴和质子的俘获使得电子停留在氧化层中的时间比在低剂量率的时间长. 因此, 这些电子趋向于与正带电粒子复合, 主要是在氢键断裂点处的空穴陷阱, 反应由下式表示:



从而导致了高剂量率时从这些断裂点释放的质子数目减少, 继而产生较少的界面态, 使得损伤小于低剂量率下损伤趋势. 因此, 对于不同公司的器件, 由于工艺过程中在氧化层中引入的氧空位缺陷和三价硅悬挂键数量不同, 从而影响了辐射损伤间的差异. 相对于Rohm和TI公司的器件, ST公司的器件工艺中可能引入了更多的界面陷阱及界面态, 使其在高、低剂量率下的损伤均最为严重. 亦可推测Rohm公司的器件工艺所引入的界面态和氧化物电荷数目最少.

ST公司的电压比较器失调电压在退火后发生损伤增强, 并接近低剂量率损伤, 这主要是由于发生了“后损伤”现象. 研究表明^[15,18-21], 界面态的退火温度不低于 $100^\circ C$, 而氧化物陷阱电荷在室温下就可以退火. 故在高剂量率辐照后, 采用相同条件的室温退火时, 部分氧化物电荷将退火, 空间电场减弱. 所以在长时间、低空间电场室温退火条件下, 有更多的辐射感生的空穴和氢离子运动到 Si/SiO_2 界面上, 形成界面态. 随着界面态的建立, 晶体管的电流增益减小, 从而使 V_{10} 增大. 即界面态的“后生”效应, 形成了退火过程的“后损伤”现象.

电压比较器的多个参数在电离辐射环境下均会发生变化, 且在不同剂量率及偏置条件下的损伤差异十分明显. 因此, 在工程应用中, 既要根据需选择合适剂量率, 而且应选择不同的应用偏置条件进行全面考核, 以正确评估器件参数的变化规律, 提高电子系统在辐射环境下的可靠性. 在设计抗辐射加固器件时, 工艺生长中既要提高氧化物生长质量, 又要减少界面处悬挂键的数量; 电路设计中应设法提高输入级晶体管的抗辐射性能及使用加固型镜像电流源.

6 结论

在电离辐射环境下,电压比较器的电源电流、偏置电流和失调电压等多个关键参数均发生改变.不同公司的器件因其工艺引入缺陷不同而使辐照时产生的氧化物陷阱电荷与界面态的比重不同,使不同剂量率下的损伤因器件而异,表现出不同的剂量率效应.此外,空间应用时,偏置条件对于电压比较的辐射响应颇为重要,偏置电流和电源电流在零偏置时损伤略大于工作偏置;而失调电压仅在工作偏置条件下为辐射敏感参数,并且存在明显的低剂量率辐射损伤增强效应.因此,在抗辐射评估考核时要综合考虑,选择多种应用偏置条件研究剂量率效应,并测试电压比较器的多个参数,以保证器件在空间辐射环境的可靠性和稳定性.

电压比较器由于输入级晶体管 Q_1 , Q_2 基极电流的增大,导致信号源内阻变化引起的输出电压变化也增大;晶体管 Q_3 , Q_4 由于辐照引起的匹配程度的差异,决定了电压比较器失调电压变化;而镜像电流源的退化使得电压比较器增益退化,甚至可能引起功能失效.设计抗辐射加固电路时,要综合考虑各晶体管或单元电路在电路中的作用,以进行加固设计.

参考文献

- [1] Enlow E W, Pease R L, Combs W, Schrimpf R D, Nowlin R N 1991 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **38** 1342
- [2] 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
- [3] Barnaby H J, Schrimpf R D, Pease R L, Cole P, Turflinger T, Krieg J, Titus J, Emily D, Gehlhausen M, Witczak S C, Maher M C, Van N D 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1666
- [4] Xi S B, Lu W, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J, Wu X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆妩, 任迪远, 周东, 文林, 孙静, 吴雪 2013 物理学报 **62** 236103]
- [5] Zhai Y H, Li P, Zhang G J, Luo Y X, Fan X, Hu B, Li J H, Zhang J, Su P 2012 *Acta Phys. Sin.* **60** 088501 (in Chinese) [翟亚红, 李平, 张国俊, 罗玉香, 范雪, 胡滨, 李俊宏, 张健, 束平 2012 物理学报 **60** 088501]
- [6] He B P, Yao Z B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1985 (in Chinese) [何宝平, 姚志斌 2010 物理学报 **59** 1985]
- [7] Nowlin R N, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Peas R L, Combs W E 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1686
- [8] Xi S B, Lu W, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J, Wu X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆妩, 任迪远, 周东, 文林, 孙静, 吴雪 2012 物理学报 **61** 236103]
- [9] Johnston A H, Rax B G, Lee C I 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 1650
- [10] Zhang H L, Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, He C F, Erkin, Cui S 2004 *Chin. J. Semicond.* **25** 1675 (in Chinese) [张华林, 陆妩, 任迪远, 郭旗, 余学峰, 何承发, 艾尔肯, 崔帅 2004 半导体学报 **25** 1675]
- [11] Tong S B, Hua C Y 2003 *Fundamentals of Analog Electronics* (Beijing: Higher Education Press) p175 (in Chinese) [童诗白, 华成英 2003 模拟电子技术基础 (北京: 高等教育出版社) 第175页]
- [12] Pershenkov V S, Maslov V B, Cherepko S V, Shvetsov-Shilovsky I N, Belyakov V V, Sogoyan A V, Rusanovsky V I, Ulimov V N, Emelianov V V, Nasibullin V S 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 1840
- [13] Gao B, Yu X F, Ren D Y, Li Y D, Cui J W, Li M S, Li M, Wang Y Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 036106 (in Chinese) [高博, 余学峰, 任迪远, 李豫东, 崔江维, 李茂顺, 李明, 王义元 2011 物理学报 **60** 036106]
- [14] Wang Y Y, Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, He C F, Gao B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 096104 (in Chinese) [王义元, 陆妩, 任迪远, 郭旗, 余学峰, 何承发, 高博 2011 物理学报 **60** 096104]
- [15] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, Vaille J R, Dusseau L, Lorfèvre E 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3655
- [16] Pease R L, Schrimpf R D, Fleetwood D M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1894
- [17] Rashkeev S N, Cirba C R, Fleetwood D M, Schrimpf R D, Witczak S C, Michez A, Pantelides S T 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 2650
- [18] Li R M, Du L, Zhuang Y Q, Bao J L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3400 (in Chinese) [李瑞珉, 杜磊, 庄奕琪, 包军林 2007 物理学报 **56** 3400]
- [19] Boch J, Saigne F, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Cizmarik R, Zander D 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 2903
- [20] Fleetwood D M 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1706
- [21] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X F, He C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展, 陆妩, 任迪远, 王义元, 郭旗, 余学峰, 何承发 2009 物理学报 **58** 5572]

Analyses of ionization radiation damage and dose rate effect of bipolar voltage comparator

Ma Wu-Ying¹⁾²⁾ Lu Wu^{1)†} Guo Qi¹⁾²⁾ He Cheng-Fa¹⁾ Wu Xue¹⁾²⁾
Wang Xin¹⁾²⁾ Cong Zhong-Chao¹⁾²⁾ Wang Bo¹⁾²⁾ Maria¹⁾²⁾

1) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of CAS, Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry of CAS, Urumqi 830011, China)

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

(Received 13 August 2013; revised manuscript received 25 September 2013)

Abstract

In order to investigate the dose rate effect and the radiation response of the voltage comparator, a group of bipolar voltage comparators are irradiated by ^{60}Co γ at high-and low-dose rates under different bias conditions. The results show that many of the parameters for the voltage comparator subjected to ionization radiation, such as power current, input bias current, input offset voltage, and output voltage, are degraded to a certain extent; the irradiation response of the voltage comparator is severely affected by bias condition. What is more, the same type of circuits manufactured from different companies exhibit different dose rate effects; the reasons for the degradation are discussed by analyzing the experiment results. The mechanism for the formation of dose rate effect is also analyzed from the annealing characteristics. The results obtained in this paper are not only useful for the applications of the radiation hardness device, but also helpful for its design.

Keywords: bipolar voltage comparator, ^{60}Co γ irradiation, dose rate effect, ionization damage

PACS: 61.80.-x, 85.40.e, 61.80.Ed

DOI: [10.7498/aps.63.026101](https://doi.org/10.7498/aps.63.026101)

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