

# 栅控横向PNP双极晶体管基极电流峰值展宽效应及电荷分离研究

马武英<sup>1)2)</sup> 王志宽<sup>3)</sup> 陆妩<sup>1)†</sup> 席善斌<sup>2)</sup> 郭旗<sup>1)</sup> 何承发<sup>1)</sup> 王信<sup>1)2)</sup>  
刘默寒<sup>1)</sup> 姜柯<sup>1)2)</sup>

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)

3)(模拟集成电路国家重点实验室; 中国电子科技集团公司第24研究所, 重庆 400060)

(2013年11月23日收到; 2014年2月8日收到修改稿)

为了对双极器件在电离辐射环境下的损伤机理及加固技术进行深入研究, 对设计制作的不同工艺类型的栅控横向PNP双极晶体管进行了<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 低剂量率辐照试验. 结果表明: 1) 栅控双极晶体管的辐射特性具有很强的工艺相关性, 钝化层的存在对于双极晶体管的辐射响应具有很大影响, 有钝化层的器件在电离辐射环境中会产生更多的界面态, 其抗辐射能力大大减弱; 2) 针对国产栅控横向PNP晶体管在低剂量率辐照时会发生峰值电流展宽效应, 文中对展宽效应潜在机理进行了分析, 并针对展宽效应提出了新的分离方法. 这不但对设计抗辐射加固器件提供了依据, 而且为进一步深入研究双极器件的低剂量率辐射损伤增强效应提供了强有力工具.

**关键词:** 栅控双极PNP晶体管, <sup>60</sup>Co $\gamma$ 辐照, 辐射损伤

**PACS:** 61.80.-x, 61.82.Fk, 61.80.Ed

**DOI:** 10.7498/aps.63.116101

## 1 引言

双极器件由于具有良好的线性特性和电流驱动能力, 以及高频、低噪声等特殊优点, 被广泛应用于航天电子领域. 然而, 在1991年由Enlow等发现双极器件在低剂量率下的辐照损伤要远远高于高剂量率下的辐照损伤, 这一现象被称为低剂量率辐射损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS)<sup>[1]</sup>. ELDRS的存在严重阻碍了双极器件在空间中的应用. 近些年, 国内外对于双极器件的电离辐射效应及评估方法进行了大量研究, 并获得了一定的研究成果. 但由于双极器件电离辐射损伤特性具有很强的工艺相关性, 且其辐射损伤的定量分离缺乏正确而又有效的手段. 因此, 对双极器件的辐射损伤机理及加固技术的研究还一直处于

探索之中<sup>[2-8]</sup>.

栅控双极晶体管是将BJT双极晶体管和金属氧化物半导体场效应管MOSFET组合在一起的器件结构. 在双极器件基区表面的附加电极可以动态控制器件表面的载流子浓度, 使得器件既具有BJT特性, 又具有MOSFET的功能. 利用这种特性, 我们在前期设计并制作了这一结构, 对其进行了不同剂量率的<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照试验, 并定量地对栅控双极晶体管辐射感生的氧化物陷阱电荷及界面态进行了分离.

栅控PNP双极晶体管应用的关键之处在于其分离方法的建立, 前期我们曾提出亚阈法和栅扫描法<sup>[9,10]</sup>. 然而, 在实际应用中这两种方法均存在各自的局限性. 首先, 亚阈法只能分离晶体管中由中带到反型这半个能带之间的界面陷阱电荷密度; 其

† 通讯作者. E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

次, 栅扫描法可以很好地分离有明显峰值电流变化的器件辐射损伤. 但是某些工艺制作的栅控双极器件的基极电流在辐照过程中会出现基极电流峰值增加并展宽成一平台的现象. 基极电流峰值展宽现象的出现, 致使电流峰值不明显, 严重影响了其分离效果.

本文在前期工作的基础上<sup>[9,10]</sup>, 设计和制作了2种不同工艺的栅控横向PNP双极晶体管 (gate controlled lateral PNP bipolar transistors, GCLP-NP BJTs), 并对其进行了低剂量率的辐照试验, 比较了不同工艺条件下器件的辐射损伤差异, 对器件的展宽效应深层物理机理进行了分析, 并在以往分离方法的基础上针对展宽效应提出了新的分离方法. 该方法结合了栅扫描法和亚阈法各自优点, 能定量分离出栅控横向PNP双极晶体管的辐射感生氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷. 该方法的建立为双极器件辐射损伤的定量揭示及抗辐射加固技术研究提供了又一有效手段.

## 2 试验和测量方法

实验样品是由模拟集成电路国家重点实验室提供的2种不同工艺的栅控横向PNP双极晶体管. 辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照源上进行的. 辐照实验低剂量率采用1 mGy(Si)/s, 总剂量为500 Gy(Si), 辐照剂量率用热释光剂量片进行标定. 上述试验过程均采用移位测试的方法, 栅控横向PNP双极晶体管参数利用HP4142半导体参数分析仪进行采集. 测试分两种方法进行: 1) 栅扫描法测试: 集电极和基极加固定电压, 栅极加步进扫描电压, 测试基极电流. 2) 阈值电压法测试: 集电极和发射极加固定电压, 基极接地, 栅极加步进电压, 扫描集电极电流. 辐照实验及其参数的测量均在室温下进行, 并且每次参数测量都在辐照后20 min内完成.

## 3 试验结果及分析

### 3.1 工艺对栅控横向PNP双极晶体管电离辐射的影响

双极晶体管的电学特性与器件的工艺条件息息相关, 如栅氧厚度与质量, 基区掺杂浓度, 基区面积, 晶向及钝化层等. 而这些工艺特性在器件遭受电离辐射时, 会对双极器件的辐射响应产生重要影

响. 因此, 本部分实验利用2种不同工艺的栅控横向PNP双极晶体管进行了辐照试验, 包括无钝化层工艺和有钝化层的常规工艺. 图1给出了不同工艺条件下制造的栅控横向PNP双极晶体管的基极电流随栅压及总剂量的变化趋势.

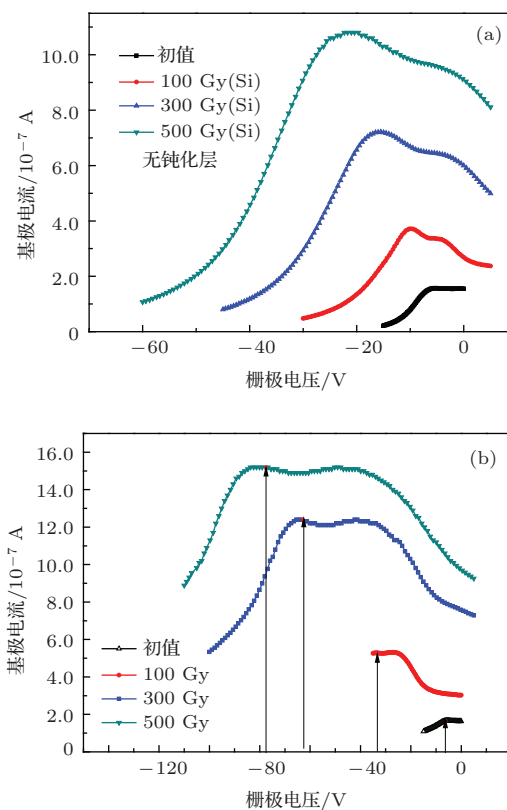


图1 (网刊彩色) 不同工艺的栅控横向PNP双极晶体管基极电流随栅压及总剂量的变化 (a) 无钝化层工艺; (b) 钝化层

图1(a)给出无钝化层时, 利用栅扫描法获得的不同累积总剂量条件下栅控横向PNP双极晶体管基极电流的变化. 从图中可以看出明显的基极电流峰值, 并且基极电流峰值随着总剂量的累积发生左移和上移; 有钝化层工艺条件器件的基极电流随总剂量及栅压的变化趋势如图1(b)所示, 图中可以明显看出随着总剂量的增加, 基极电流发生峰值展宽效应. 通过图1中实验结果的对比, 我们不难发现双极晶体管辐射特性的工艺相关性. 在本文我们将对钝化层的影响、以及峰值电流展宽效应进行详细的探讨.

文献<sup>[11—13]</sup>研究表明: 辐射产生的氧化物陷阱电荷 $N_{ot}$ 造成了峰值电流随着栅扫描电压的水平移动. 而峰值电流随总剂量在垂直方向的上移动, 则主要是由于界面陷阱电荷 $N_{it}$ 的产生所造成. 氧化物陷阱电荷假设为Si/SiO<sub>2</sub>的固定电荷, 界面

陷阱电荷对基极电流的影响我们通过器件表面复合速率的增加来表示. 低水平注入条件下, 表面复合速率SRV和界面陷阱电荷 $N_{it}$ 的关系可以表示为

$$SRV \cong \sigma N_{it} V_{th}, \quad (1)$$

其中,  $\sigma$ 为陷阱捕获截面积,  $V_{th}$ 为硅中载流子的热速率. 辐照感生的界面陷阱电荷 $N_{it}$ 通过增加表面复合速率进而增加基极电流. 辐照感生过剩基极电流 $\Delta I_B$ 、增加的载流子复合和表面复合速率 $\Delta SRV$ 之间的关系近似为

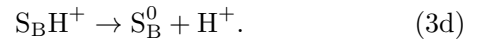
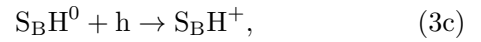
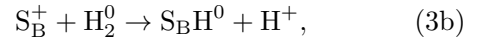
$$\begin{aligned} \Delta I_B &= q \int_s \Delta U ds \\ &= q \Delta SRV \int_s \frac{(np - n_i^2)}{(n + p + 2n_i)} ds, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $q$ 为电子电量,  $\Delta U$ 为辐射导致的表面复合速率变化,  $S$ 为复合发生时的表面积,  $n$ ,  $p$ 及 $n_i$ 分别代表半导体电子和空穴以及本征载流子浓度. 研究表明: 界面陷阱分为施主型界面陷阱和受主型界面陷阱, 施主型界面陷阱无电子填充时显示正电性, 填充电子时显电中性; 受主型界面陷阱填充电子时显负电性, 无电子填充时显电中性. 因此, 辐射感生的界面陷阱电荷不仅会引起表面复合速率的线性增加如(1)式. 而带电的陷阱, 还会影响(2)式积分内的载流子浓度, 对整个基极电流响应产生较强的非线性影响, 从而导致基极电流随栅压变化时发生峰值展宽变形. 此外, 峰值电流的展宽与界面陷阱能级的分布亦有很强的相关性, 若界面陷阱能级分布远离中带, 则会导致有效复合中心的减少[13].

总之, 由于栅极电压的变化使得器件表面电势处于平带和阈值区之间, 若大多数附加到栅极上的电势被带电的界面陷阱电荷所分担, 这样便在一定程度上减弱了表面电势对于栅压的敏感性, 从而表现出基极电流随着栅压的展宽现象, 而界面陷阱电荷能级的分布又对基极电流的栅压响应起着重要作用, 两者的综合效果导致了峰值展宽如图1(b)所示.

文献[15, 16]研究表明, 表面陷阱电荷的形成与质子的浓度有很大关系, 而质子的形成很大程度上由 $H_2$ 所决定. 能产生明显辐射响应的反应, 主要发生在氢键被打裂的空穴陷阱位置( $E'$ 中心). 在这个过程中氢分子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,  $H_2^0$ 代表氢分子.



由上述分析可知, 界面态的形成主要是由于 $H_2$ 的引入, 故而我们可以推测钝化层工艺过程可能引入氢分子,  $H^+$ 导致了界面电荷的增加, 更重要的是使得界面处能级分散, 导致复合电流在更宽的栅压范围内出现峰值, 从而致使其辐射响应发生变化.

### 3.2 基极电流峰值展宽时界面态电荷分离实验结果分析

双极栅控晶体管最大的优势, 即是其能很好的分离出辐射引入的界面态和氧化物电荷, 从而对于辐射损伤机理的研究及加固技术提供指导. 然而, 双极器件低剂量率辐射损伤增强效应的产生, 主要原因是认为在低剂量率下辐照会产生比高剂量率辐照时更多的界面态, 这便导致栅控横向PNP双极晶体管在低剂量率下辐照时更容易发生展宽效应. 基极电流峰值展宽现象的出现致使电流峰值不明显, 严重影响了其分离效果, 如图1(b)所示. 针对上述研究中遇到的问题, 我们对展宽效应建立了新的分离方法.

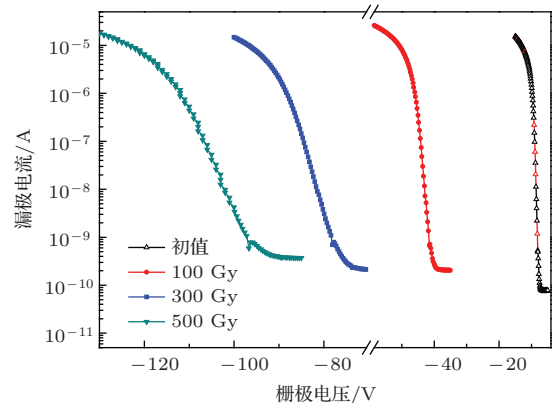


图2 栅控横向PNP双极晶体管漏极电流随栅压及总剂量的变化

从图1(b)中可以看出随着辐照总剂量的增加, 基极电流明显增加, 并且出现峰值展宽现象.

图2给出了栅控横向PNP双极晶体管漏极电流随栅压变化趋势. 从图中可以看出, 随着总剂量的增加器件特性曲线向栅压更负方向漂移, 同时斜率也发生变化.

应用新的分离方法时: 首先, 我们通过MOSFET的*I-V*特性曲线提取出中带电压值 $V_{mg}$ , 晶体管的漏极电流可以通过下式计算得出:

$$I_D = \mu \left( \frac{W}{L} \right) C_{ox} \frac{\alpha}{2\beta^2} \left( \frac{n_i}{N_A} \right)^2 \times (1 - e^{-\beta V_{ds}}) \left( \frac{e^{\beta \Phi_s}}{(\beta \Phi_s - 1)^{1/2}} \right), \quad (4)$$

式中 $\beta = kT/q$ , 其中 $k$ 为波尔兹曼常数,  $T$ 为热力学温度;  $W/L$ 为器件作为MOSFET时宽长之比,  $n_i$ 为本征载流子浓度,  $N_A$ 为基区参杂浓度,  $\Phi_s$ 为硅表面电势,  $I_D$ 和 $V_{ds}$ 分别为漏极电流和漏极电压[9,11,12]; (4)式中常数 $\alpha$ 由式: $\alpha = \sqrt{2} \frac{\epsilon_{Si}}{\epsilon_{Ox}} \times \frac{t_{ox}}{L_d}$ 计算得出, 其中 $L_d$ 代表德拜长度.  $\epsilon_{Si}$ 和 $\epsilon_{Ox}$ 分别代表为Si和SiO<sub>2</sub>的介电常数,  $t_{ox}$ 为栅氧化层厚度;  $\mu$ 为基区沟道载流子迁移率, 它和阈值电压 $V_{th}$ 可由下式求得:

$$I_{ds} = \frac{W}{2L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th})^2. \quad (5)$$

将 $I_{ds}$ 和 $V_{gs}$ 的数值代入(5)式中, 通过求解方程组, 从而求得载流子迁移率 $\mu$ 和阈值电压 $V_{th}$ . 然后将求得的 $\mu$ 代入(4)式中, 求得禁带中央

$$\Phi_s = \Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D}{N_i} \right)$$

处的中带电流值 $I_{mg}$ . 通过对*I-V*亚阈曲线进行线性拟合外延, 从中找到相应的电压点 $V_{mg}$ , 利用中带电压法求得的 $V_{mg}$ 如表1所示.

表1 不同总剂量下中带电压值 $V_{mg}$

辐照前	0 Gy(Si)	100 Gy(Si)	300 Gy(Si)	500 Gy(Si)
$V_{mg}$	-5.7	-33.5	-61.2	-67.2

随后采用栅扫描法来计算界面态的分布, 利用亚阈法找出的中带电压点 $V_{mg}$ , 在栅扫描曲线上确定峰值电流的相应位置, 然后通过下式来计算界面态 $\Delta N_{it}$ 的分布[10,16,17]:

$$\Delta N_{it} = \frac{2\Delta I_B}{q\sigma v_{th} S_{peak} n_i \exp \left( \frac{qV_{EB}}{2kT} \right)}, \quad (6)$$

式中,  $q$ 为电荷量,  $\Delta I_B$ 为基极电流峰值增量、 $\sigma$ 为载流子俘获截面、 $v_{th}$ 为载流子热速率、 $S_{peak}$ 为峰

值电流出现是基区表面积、 $n_i$ 为代表基区载流子浓度、 $V_{EB}$ 为基射极电压,  $k$ 为波尔兹曼常数. 而氧化物陷阱电荷可以通过 $V_{mg}$ 的偏移量, 由下式来计算得出:

$$\Delta N_{ot} = \frac{C_{ox}}{q} \Delta V_{mg}. \quad (7)$$

通过计算后所得氧化物电荷和界面态数目如表2所示.

表2 氧化物电荷和界面态陷阱统计表

剂量	氧化物电荷 $N_{ot}/\text{cm}^2$	界面陷阱 $N_{it}/\text{cm}^2$
10 Gy	$6.4 \times 10^{11}$	$3.8 \times 10^{12}$
30 Gy	$1.3 \times 10^{12}$	$1.1 \times 10^{13}$
50 Gy	$1.6 \times 10^{12}$	$1.4 \times 10^{13}$

由表2分离结果可以看出: 在低剂量率辐照下辐照感生的氧化物电荷数目要明显低于界面陷阱电荷数目, 且可以看出随着辐照总剂量的增加, 氧化物电荷数目增长缓慢, 而界面陷阱电荷数目却发生数量级的增加, 这与我们以往的研究结果相一致.

## 4 结 论

本文利用新型器件结构—栅控横向PNP双极晶体管研究了双极器件在电离辐射下的损伤机理, 通过设计不同工艺结构的栅控横向PNP双极晶体管, 深入研究了工艺对于双极晶体管辐射响应的影响, 这也是栅控晶体管结构用于国产器件工艺的抗辐射加固技术上的初次探索. 实验结果表明: 栅控晶体管的辐射响应具有很强的工艺相关性, 而钝化层的存在对于辐射响应有很大的影响, 在一定程度上会减弱器件的抗辐射性能. 此外, 针对栅控横向PNP双极晶体管在定量分离时出现的峰值展宽效应, 提出了新的分离方法, 该方法结合了栅扫描法和亚阈法各自优势, 能很好的定量揭示具有展宽效应时栅控横向PNP双极晶体管界面态和氧化物电荷数目. 双极栅控晶体管作为一种新型的器件结构, 能定量的揭示电离辐射在双极器件的电离辐射损伤, 对于研究双极器件低剂量率辐射损伤增强效应的损伤机理具有重要意义. 此外, 栅控双极晶体管亦是研究双极器件抗辐射加固及工程评估方法的有力手段. 然而, 由于双极器件的电离辐射响应的工艺相关性, 不同工艺的栅控晶体管辐射特性的研究还需要进行进一步探索.

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] Zhai Y H, Li P, Zhang G J, Luo Y X, Fan X, Hu B, Li J H, Zhang J, Su P 2011 *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 2011 物理学报 **60** 088501]
- [4] 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]
- [5] Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, He C F, Zhen Y Z, Wang Y Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese)[陆妩, 任迪远, 郭旗, 余学峰, 何承发, 郑玉展, 王义元 2009 物理学报 **58** 5572]
- [6] Wang Y Y, Lu W, Ren D Y, Guo Q, Yu X F, Ren D Y, He C F, G 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]
- [7] Fleetwood D M 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 1706
- [8] 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]
- [9] Xi S B, Lu W, Wang Z K, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 076101 (in Chinese) [席善斌, 陆妩, 王志宽, 任迪远, 周东, 文林, 孙静 2012 物理学报 **61** 076101]
- [10] Xi S B, Lu W, Wang Z K, Ren D Y, Zhou D, Wen L, Sun J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆妩, 王志宽, 任迪远, 周东, 文林, 孙静 2012 物理学报 **61** 236103]
- [11] McWhorter P J, Winokur P S 1986 *Appl Phys. Lett.* **48** 133
- [12] Pease R, Emily D, H E Boesch 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 3946
- [13] Chen X J, Barnaby H J, Pease R L, Schrimpf R D, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3178
- [14] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3185
- [15] Pease R L, Schrimpf R D, Fleetwood D M 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 1894
- [16] 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
- [17] Minson E, Sanchez I, Barnaby H J, Pease R L, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3723
- [18] Chen X J, Barnaby H J, Pease R L, Schrimpf R D, Platteter D, Shaneyfelt M, Vermeire B 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2245

# The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors

Ma Wu-Ying<sup>1)2)</sup> Wang Zhi-Kuan<sup>3)</sup> Lu Wu<sup>1)†</sup> Xi Shan-Bin<sup>2)</sup> Guo Qi<sup>1)</sup> He Cheng-Fa<sup>1)</sup>  
Wang Xin<sup>1)2)</sup> Liu Mo-Han<sup>1)</sup> Jiang Ke<sup>1)2)</sup>

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 & Chemistry of CAS, 40-1 South Beijing Road, Urumqi 830011, China*)

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

3) (*National Laboratory of Analog ICs; Sichuan Institute of Solid-State Circuits, CETC, Chongqing 400060, China*)

( Received 23 November 2013; revised manuscript received 8 February 2014 )

## Abstract

In order to study the total dose effect and hardness assurance technology for the bipolar devices, we have designed and fabricated different gate-controlled lateral PNP bipolar transistors by various technologies, and performed <sup>60</sup>Co- $\gamma$  low-dose rate irradiation. The test results show that: 1) Irradiation characteristics of the gate-controlled bipolar transistor are strongly dependent on the fabrication technology, and the passivation layer has a great influence on the irradiation response of the device. The device with a passivation layer will have more interface traps in ionizing radiation environments, and its resistance to ionizing irradiation is greatly weakened. 2) A domestic gated-controlled lateral PNP transistor exhibited a peak current broadening effect at low-dose rate irradiation. In this paper, we analyze the mechanism of the broadening effect, and put forward a new separation method for reducing the base current broadening effect, which not only provides the basis for the design of hardened devices, but also a powerful tool for the study of the enhanced low-dose rate sensitivity of the bipolar device.

**Keywords:** GCLPNP BJTs, <sup>60</sup>Co $\gamma$  irradiation, ionizing damage

**PACS:** 61.80.-x, 61.82.Fk, 61.80.Ed

**DOI:** 10.7498/aps.63.116101

---

† Corresponding author. E-mail: [luwu@ms.xjb.ac.cn](mailto:luwu@ms.xjb.ac.cn)