

# 中带电压法分离栅控横向 pnp 双极晶体管 辐照感生缺陷\*

席善斌<sup>1)2)3)</sup> 陆妩<sup>1)2)†</sup> 王志宽<sup>4)</sup> 任迪远<sup>1)2)</sup> 周东<sup>1)2)3)</sup> 文林<sup>1)2)</sup> 孙静<sup>1)2)</sup>

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 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) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

4) (模拟集成电路国家重点实验室, 重庆 400060)

(2011年5月31日收到; 2011年7月28日收到修改稿)

设计并制作了一种新型双极测试结构, 即在常规横向 pnp 双极晶体管基区表面氧化层上淀积一栅电极, 通过扫描栅极所加电压, 获得漏极 (集电极) 电流随栅极电压的变化特性, 利用中带电压法分离栅控横向 pnp 双极晶体管在辐照过程中感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷. 本文对设计的晶体管测试结构和采用的测试方法做了具体介绍.

**关键词:** 中带电压法, 栅控, 横向 pnp 双极晶体管, 电荷分离

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

## 1 引言

双极器件和电路的低剂量辐照损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS), 是上世纪 90 年代初新发现的一种电离辐射效应<sup>[1]</sup>. 低剂量率辐照损伤增强效应的存在, 对空间飞行器电子系统的可靠性带来重大隐患, 这引起了国内外航天领域的高度关注, 投入了大量的人力和物力, 进行有关低剂量率辐照损伤增强效应的研究<sup>[2-7]</sup>. 然而研究多是对模拟器件或电路辐照损伤进行的定性分析, 定量揭示损伤机理一直是困扰国际航天界的棘手问题. Chen 等人<sup>[8-14]</sup> 对定量分离双极晶体管辐照感生缺陷进行了一系列的探索, 但只是提供了相应的分离方法, 没有具体分离出辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷.

本文通过设计一种新型双极晶体管测试结构——栅控横向 pnp 双极晶体管 (gate controlled

lateral pnp bipolar junction transistor, GCLPNP BJT), 借鉴金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管 (MOS-FET) 结构的缺陷测试原理, 建立了 GCLPNP 双极晶体管的辐射感生缺陷测试分析方法, 定量地分离出辐照感生缺陷, 从而为揭示高、低剂量率辐射在双极晶体管中产生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷与总剂量的关系, 进一步发展和完善低剂量率辐照损伤增强效应的物理机理奠定了基础.

## 2 器件和实验

### 2.1 器件设计原理与制备

电离辐射过程中双极晶体管基 - 射结耗尽区复合效应是导致双极晶体管电流增益衰减的主要原因<sup>[1,15]</sup>. 电离辐射会在半导体材料中感生缺陷, 这些缺陷作为复合中心会减小半导体中少数载流子寿命, 这进一步提高了复合速率, 从而导致双极

\* 国家自然科学基金 (批准号: 10975182) 资助的课题.

† E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

晶体管过剩基极电流增大和电流增益减小,致使晶体管性能下降甚至失效. 在双极晶体管中,氧化层中的净正电荷和界面的界面陷阱电荷二者的混合效应是非线性的<sup>[16]</sup>. 电离辐照过程中,导致基区表面复合电流增加的主要原因是氧化物陷阱电荷的产生和位于中带附近的界面陷阱电荷增加. 氧化物陷阱电荷由于其电荷性改变基区表面势,界面陷阱电荷则导致表面复合电流的增加,这两种电荷对基极电流影响是相互的. 在双极晶体管中我们关注的物理量不同于 MOS 场效应晶体管,双极晶体管中所测试的界面陷阱电荷主要指的是位于禁带中央附近的复合中心,而不是中带到阈值电压之间的界面陷阱电荷. 因而通过测量辐照前后双极晶体管输入、输出特性变化,很难定量分离氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷.

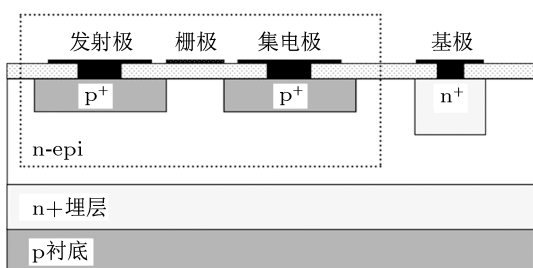


图1 GCLPNP 双极晶体管横断面示意图

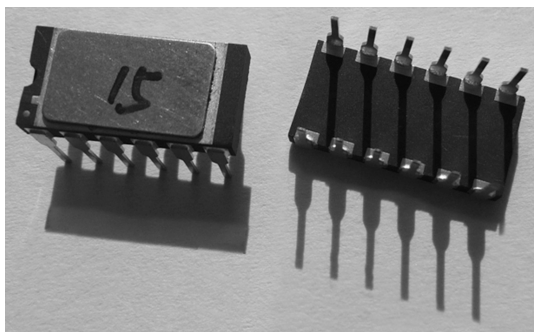


图2 新型双极测试结构实物图

因此,为了简化测试,结合 MOS 场效应晶体管辐照感生缺陷测试分离方法,我们设计了一种新型测试结构双极晶体管,示意图如图1所示,此结构在常规横向 pnp 双极晶体管基区表面氧化层上淀积一栅极,晶体管 p 型发射区类似于 MOS 晶体管源区, p 型集电区类似于 MOS 晶体管漏区,发射极、栅极和集电极构成类似于 PMOS 场效应晶体管的测试结构,如图中虚线部分所示,这样可以通过栅极所加电压控制晶体管基区表面载流子浓度.

由于表面载流子浓度可以控制,那么在保持正向有源偏置的条件下,晶体管就可以在积累、耗尽、反型模式下工作,从而可以让晶体管展现出 MOS 场效应晶体管和双极晶体管的特性. 利用栅电极的方法就可以把辐照损伤缺陷分离开来并进行相应分析. 通过测试漏极(集电极)电流随栅极电压变化情况,利用 MOS 场效应晶体管中辐照感生缺陷电荷分离方法——中带电压法,我们就可以定量分离出双极晶体管中电离辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷<sup>[8-11]</sup>.

试验样品由模拟集成电路国家重点实验室加工制作,流片加工前我们对设计的新型双极测试结构利用 Silvaco 软件进行了计算机模拟仿真,以获得器件性能预测,并根据相应的工艺制作了器件. 器件如图2所示,采用双列直插式陶瓷封装工艺,其中包括二极管、横向 pnp 双极晶体管、GCLPNP 双极晶体管各一只,在此我们仅对 GCLPNP 双极晶体管加以分析.

## 2.2 辐照和测试实验

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的大、小  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  辐照源上进行的. 辐照总剂量为 1000Gy(Si),辐照剂量率用热释光片进行标定,选择美军标规定范围的下限剂量率 0.5Gy(Si)/s 以及与实际空间低剂量率水平相当的 0.13mGy(Si)/s. 实验样品放置于根据美军标制作的铅铝屏蔽盒内以消除低能散射影响,防止剂量增强效应的发生. 辐照过程中,对 GCLPNP 双极晶体管加以反向偏置,即基极接 +2V,发射极、集电极和栅极接地.

实验采取移位测试的方法,栅控晶体管参数利用 Hp4142 半导体参数分析仪进行采集,测试参数为:栅扫描电压,漏极(集电极)电流. 辐照实验及其参数的测量都是在室温下进行的,每次参数的测试都在辐照或退火后 20 min 内完成. 具体测试方法为:源极(发射极)、基极接地,漏极(集电极)接 -0.3 V,栅极加以 -20—90 V 扫描电压,步长 600 mV,测试漏极电流随栅极电压的变化情况.

## 3 实验结果和计算

GCLPNP 双极晶体管作为一种新型测试结构,由于基区氧化层上栅电极的存在,其不仅具有常规

双极晶体管的基本性能, 又有类似于 MOS 场效应晶体管的特性曲线. 图 3 所示为 GCLPNP 双极晶体管作为常规晶体管工作时, 不同辐照剂量下集电极电流随基-射结电压的变化关系. 由图中曲线变化可以看出, 晶体管集电极电流在整个辐照过程中基本没有发生变化, 这对我们下文利用中带电压法分离双极晶体管中辐照感生缺陷产生影响甚小, 可以不做考虑.

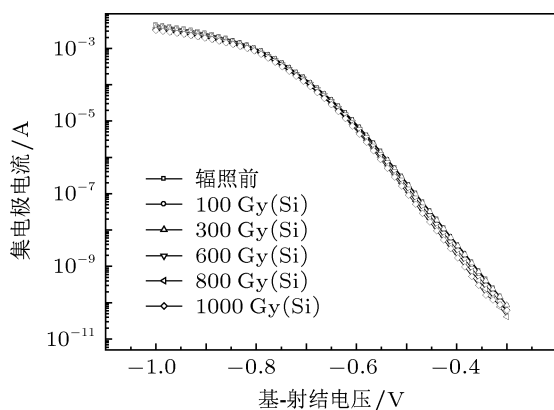


图 3 不同辐照剂量下集电极电流随基-射结电压的变化

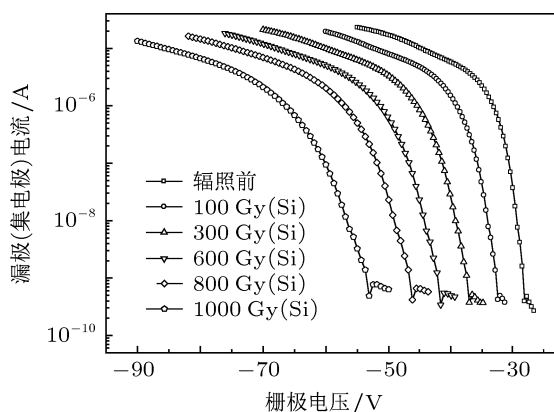


图 4 不同辐照剂量下漏极电流随栅极电压的变化

栅电极的存在, 双极晶体管又可以展示出类似于 MOS 场效应晶体管的特性. 电离辐照引起的 GCLPNP 双极晶体管的漏极(集电极)电流随栅极电压的变化如图 4 所示, 从图中我们可以看出, 随着总剂量的增加, 器件特性曲线向栅压更大方向漂移, 同时线性区斜率也发生变化, 上述现象主要是在电离辐照过程中, 晶体管感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的. 下面我们结合 MOS 场效应晶体管辐照感生缺陷分离方法进行详细论述.

中带电压法 (subthreshold-current technique) 是 McWhorter 和 Winokur 提出的一种分离 MOS

场效应晶体管中辐照感生缺陷的方法<sup>[17]</sup>. 它主要利用了位于禁带中心即中带位置附近的界面陷阱电荷呈电中性, 不会引起阈值电压漂移的原理.

电离辐照会在晶体管中感生氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷, 这两种电荷都会引起阈电压漂移, 首先我们要确定图中曲线阈值和中带位置对应的电流值. 根据 MOS 场效应晶体管  $I$ - $V$  特性曲线, 晶体管的漏极电流可以通过下式计算得出<sup>[18,19]</sup>:

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

式中  $\beta = q/kT$ ;  $W/L$  为 MOSFET 沟道宽长比, 在此近似为栅电极宽长比;  $N_D$  为基区掺杂浓度;  $n_i$  为 Si 本征载流子浓度;  $C_{ox}$  为单位面积氧化层电容;  $\phi_s$  为 Si 表面势;  $I_D$  和  $V_{ds}$  分别为漏极电流和漏源电压.

常数  $\alpha$  由下式求得<sup>[15]</sup>:

$$\alpha = \sqrt{2} \frac{\epsilon_{si} t_{ox}}{\epsilon_{ox} L_d}, \quad (2)$$

式中  $t_{ox}$  为氧化层厚度;  $L_d$  为  $L_d = [\epsilon_s/\beta q N_D]^{1/2}$  为德拜长度,  $\epsilon_s$  为半导体介电常数, 此处为 Si 介电常数;  $\epsilon_{si}$ ,  $\epsilon_{ox}$  为 Si 和  $\text{SiO}_2$  介电常数;  $\mu$  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<sup>[20]</sup>:

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} [(V_{gs} - V_{th})V_{ds} - V_{ds}^2/2]. \quad (3)$$

当  $V_{ds}$  很小时, (3) 式可简化为

$$I_{ds} = \frac{W}{L} \mu C_{ox} (V_{gs} - V_{th})V_{ds}, \quad (4)$$

式中  $V_{gs}$  为栅源电压即栅电压.

将  $I_{ds}$  和  $V_{gs}$  的数值代入 (4) 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  $\mu$  和  $V_{th}$  代入 (1) 式中, 求得禁带中央  $\Phi = \Phi_b = (kT/q) \cdot \ln(N_D/n_i)$  处的中带电流值  $I_{mg}$ . 然而中带电流值非常小 (一般为 0.01—0.1 pA), 这样中带电压值  $V_{mg}$  只能通过  $I$ - $V$  亚阈曲线进行线性拟合外延, 从中找到相应的电压点.

为了分离由于氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的阈电压漂移, 我们需要分析这两种电荷是怎样影响阈电压漂移的. 根据可能的电荷态, 界面陷阱分为施主型和受主型界面陷阱. 施主型界面陷阱主要位于价带  $E_v$  和中带  $E_i$  之间, 当填充电子时呈电中性, 失去电子时呈正电性; 而受主型界面陷

阱主要位于中带  $E_i$  和导带  $E_c$  之间, 当填充电子时呈负电性, 失去电子时呈电中性. 当能带弯曲  $\Phi_b$  使得费米能级位于禁带中央  $E_i$  能带附近时, 施主陷阱位于费米能级以下, 受主陷阱位于费米能级以上, 此时界面陷阱不带电, 不会产生带电荷的陷阱缺陷, 从而对中带电压漂移不会产生贡献. 因而中带电压漂移主要是由于氧化物陷阱电荷的产生引起的, 于是有

$$\Delta V_{ot} = (V_{mg})_{rad} - (V_{mg})_{pre}, \quad (5)$$

$(V_{mg})_{rad}$  和  $(V_{mg})_{pre}$  分别表示辐照后和辐照前的中带电压值. 阈电压的漂移主要是由氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的, 即

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it}. \quad (6)$$

从而有

$$\Delta V_{it} = [(V_{th}) - (V_{mg})]_{rad} - [(V_{th}) - (V_{mg})]_{pre}. \quad (7)$$

由 (5) 式和 (7) 式, 我们就可以计算得出辐照前后, GCLPNP 双极晶体管辐照感生氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的阈电压变化, 变化曲线如图 5 所示, 图中标注 H 表示高剂量率 0.5Gy(Si)/s 辐照, L 表示低剂量率 0.13mGy(Si)/s 辐照,  $\Delta V_{th}$  表示辐照感生缺陷引起的阈电压变化,  $\Delta V_{ot}$  和  $\Delta V_{it}$  分别表示氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷引起的阈电压变化.

又

$$\Delta N_{ot} = (\Delta V_{ot} C_{ox})/q, \quad (8)$$

$$\Delta N_{it} = (\Delta V_{it} C_{ox})/q, \quad (9)$$

其中  $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$ , 通过 (8) 式和 (9) 式计算, 我们就可以定量分离电离辐照过程中, GCLPNP 双极晶体管感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的多少, 如图 6 所示, 其中  $\Delta N$  表示辐照感生总电荷在辐照和退火过程中变化量,  $\Delta N_{ot}$  和  $\Delta N_{it}$  则指辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷变化.

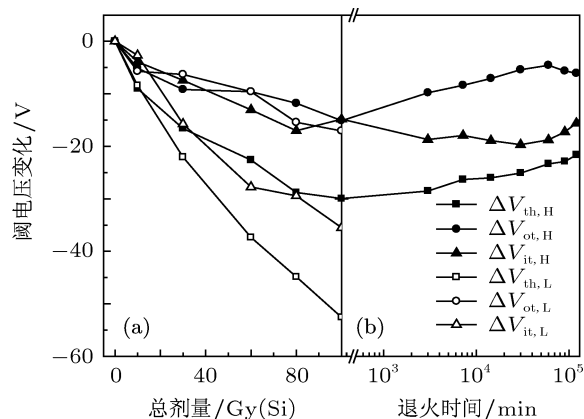


图 5 GCLPNP 双极晶体管辐照感生缺陷引起的阈电压随 (a) 总剂量和 (b) 退火时间的变化

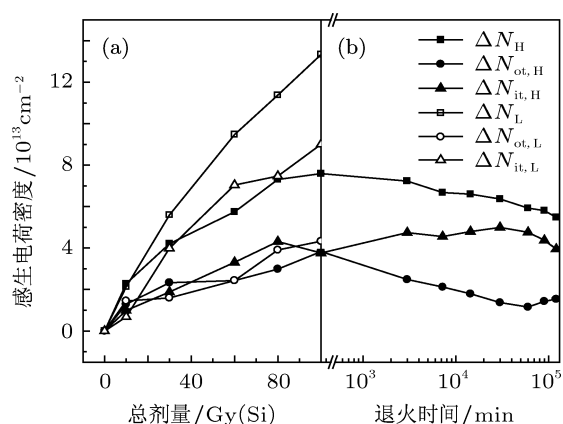


图 6 GCLPNP 双极晶体管辐照感生缺陷随 (a) 总剂量和 (b) 退火时间的变化

## 4 结论

设计并制作出可用于辐照实验的 GCLPNP 双极晶体管, 通过实验获得晶体管辐照前后漏极 (集电极) 电流随栅极电压的性能变化, 结合 MOS 场效应晶体管辐照感生缺陷测试分离方法——中带电压法, 经过理论推导和近似计算, 定量分离出辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷, 从而为分析双极晶体管低剂量率辐照损伤增强效应和失效机理提供了一种有效手段. 由于双极器件不同于 MOS 器件, 因而还需要我们今后采用其他电荷分离方法加以验证.

[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] Hjalmarson 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
- [4] Zhang Y Q, Liu C Y, Liu J L, Wang J P, Huang Z, Xu N J, He B P, Peng H L, Yao Y J 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2434 (in Chinese) [张廷庆, 刘传洋, 刘家璐, 王剑屏, 黄智, 徐娜军, 何宝平, 彭宏论, 姚育娟 2001 物理学报 **50** 2434]
- [5] He B P, Guo H X, Gong J C, Wang G Z, Luo Y H, Li Y H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3125 (in Chinese) [何宝平, 郭红霞, 龚建成, 王桂珍, 罗尹虹, 李永宏 2004 物理学报 **53** 3125]
- [6] Zheng Y Z, Lu W, Ren D Y, Wang Y Y, Guo Q, Yu X G, He C F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5572 (in Chinese) [郑玉展, 陆妩, 任迪远, 王义元, 郭旗, 余学锋, 何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [7] 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]
- [8] Chen X J, Barnaby H J, Pease R L, Schrimpf R D, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3178
- [9] Chen X J, Barnaby H J, Pease R L, Schrimpf R D, Platteter D, Shanefelt M, Vermeire B 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2245
- [10] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3185
- [11] Chen X J, Barnaby H J, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Pease R L, Platteter D G, Dunham G W 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3649
- [12] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, Holbert K, Wright D, Pease R L, Dunham G, Platteter D G, Seiler J, McClure S, Adell P 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 1913
- [13] Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, Holbert K E, Wright D, Pease R L, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Pantelides S T, Shanefelt M R, Adell P 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3032
- [14] Minson E, Sanchez I, Barnaby H J, Pease R L, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3723
- [15] Hart Arthur R, Smyth J B, van Lint, Victor A J, Snowden D P, Leadon Roland E 1978 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **25** 1502
- [16] Kosier S L, Shrimpf R D, Nowlin R N, Fleetwood D M, DeLaus M, Pease R L, Combs W E, Wei A, Chai F 1993 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **40** 1276
- [17] McWhorter P J, Winokur P S 1986 *Appl Phys. Lett.* **48** 133
- [18] Gaitan M, Russell T J 1984 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **31** 1256
- [19] Pease R, Emily D, Boesch H E 1985 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **32** 3946
- [20] He Y J, Shi Q, Li B, Luo H W, Lin L 2006 *Electronic Product Reliability and Environmental Testing* **24** 26 (in Chinese) [何玉娟, 师谦, 李斌, 罗宏伟, 林丽 2006 电子产品可靠性与环境试验 **24** 26]

# Use the subthreshold-current technique to separate radiation induced defects in gate controlled lateral pnp bipolar transistors\*

Xi Shan-Bin<sup>1)2)3)</sup> Lu Wu<sup>1)2)†</sup> Wang Zhi-Kuan<sup>4)</sup> Ren Di-Yuan<sup>1)2)</sup> Zhou Dong<sup>1)2)3)</sup>  
Wen Lin<sup>1)2)</sup> Sun Jing<sup>1)2)</sup>

1) (*Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry CAS, Urumqi 830011, China*)

2) (*Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Urumqi 830011, China*)

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

4) (*State key Laboratory of Analog Integrated Circuit, Chongqing 400060, China*)

(Received 31 May 2011; revised manuscript received 28 July 2011)

## Abstract

In this paper, we design and fabricate a new test structure of bipolar device. A gate is deposited on the oxide layer covering the base region of normal lateral pnp bipolar transistor. The characteristic of drain current (collector current) versus the gate voltage is recorded by sweeping the voltage applied to the gate, then the subthreshold-current technique is used to separate the radiation induced oxide trapped charges and interface traps in the gate controlled lateral pnp bipolar transistor during  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  irradiation. The test structure and the measurement of the bipolar transistor used in the experiment are introduced in detail in this paper.

**Keywords:** subthreshold-current technique, gate control, lateral pnp bipolar transistor, charge separation

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

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10975182).

† E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn