

栅控横向 PNP 双极晶体管辐照感生电荷的定量分离*

席善斌¹⁾²⁾³⁾ 陆妩^{1)2)†} 任迪远¹⁾²⁾ 周东¹⁾²⁾³⁾ 文林¹⁾²⁾ 孙静¹⁾²⁾ 吴雪¹⁾²⁾³⁾

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)

(2012 年 4 月 19 日收到; 2012 年 6 月 20 日收到修改稿)

设计并制作了一种栅控横向 PNP 双极晶体管测试结构, 在常规横向 PNP 双极晶体管基区表面氧化层上制作了一栅电极, 利用栅扫描法, 通过扫描栅极所加电压, 获得了基极电流随栅极电压的变化特性. 理论推导和数学计算获得了氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的定量变化, 分离出栅控横向 PNP 双极晶体管在辐照及其室温退火过程中感生的缺陷. 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: 栅扫描法, 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

双极器件及电路由于具有良好的线性特性和电流驱动能力, 以及高频、低噪声的性能, 被广泛应用于空间飞船和航天器中. 然而, 自 1991 年由 Enlow 等首次发现双极器件及电路的低剂量率辐照损伤增强效应 (enhanced low dose rate sensitivity, ELDRS) 以来, 双极器件在空间的应用受到极大的挑战. 因为空间环境的典型剂量率分布范围为 10^{-6} — 10^{-4} Gy (Si)/s, 而实验室实际使用的评估辐照剂量率范围一般为 0.50—3 Gy (Si)/s. 低剂量率辐照损伤增强效应的存在, 意味着用实验室测试评判方法得到的器件抗辐照水平与在卫星、空间站等小剂量率辐照环境下使用的电子元器件的实际抗辐射能力严重不符, 从而给卫星、空间站等电子系统的可靠性带来极大的隐患. 为了对导致双极器件和电路产生 ELDRS 效应的损伤机理进行分析, 国内外开展了大量的研究工作^[1,2]. 但由于对感生电荷缺少定量化分离方法, 低剂量率辐照损

伤增强效应缺少有效的物理模型, 使得研究缺少理论支持, 阻碍了科研工作的深入开展. 近年来, 国内外虽然对双极器件及电路的电离辐射效应有了更深一步的研究, 但绝大多数都是基于实验现象的定性分析, 对辐照感生电荷的定量计算和机理揭示一直是困扰国际航天界的一大难题^[3-6]. Kosier 等对双极器件辐照感生电荷分离进行了初步探究, 但是, 该方法只停留在理论层面^[7-12]. Chen 等设计了一种新型双极测试结构用以分离电离辐射过程中双极晶体管中感生的电荷, 但只是提出了具体的分析方法, 并没有定量分离出辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷, 且缺少对高、低剂量率辐照下感生电荷变化的分析, 研究工作有待于进一步深入^[13-18].

本实验通过设计并制作出一种栅控横向 PNP 双极晶体管结构 (gate controlled lateral PNP bipolar transistors, GCLPNP BJTs), 利用栅扫描方法 (gate sweep technique) 定量分离出双极晶体管辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷. 电荷的定量分离不仅为研究高、低剂量率辐照双极晶体管失效

* 国家自然科学基金 (批准号: 10975182) 资助的课题.

† E-mail: luwu@ms.xjb.ac.cn

机理提供了一种有效分析手段, 也为研究双极器件和电路的抗辐射加固技术奠定了实验基础.

2 器件和实验

2.1 器件设计和制备

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少半导体中少数载流子寿命, 从而提高了复合速率, 导致双极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. 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的影响是相互的^[7]. 在电子元器件辐照实验中, 我们通常测试双极晶体管辐照前后基极电流、集电极电流和电流增益的变化. 但是对这三者的分析并不能得到电离辐照在双极晶体管中感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的定量变化. 因而, 当前对双极晶体管辐射效应研究多局限于定性

分析.

为了研究双极晶体管电离辐射效应, 使得对于双极器件辐照感生电荷的定量分离难题获得突破, 在国外研究的基础上, 我们专门设计并制作了一种可用于实验的栅控横向双极晶体管测试结构, 如图 1(a) 所示. 与常规横向 PNP 双极晶体管图 1(b) 相比, 栅控双极晶体管在发射极与集电极之间的基区氧化层上多了一栅电极. 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, 这样可以通过改变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, 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^[15], 使得定量分离出辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷成为可能. 在器件制作过程中, 利用 Silvaco 软件进行了计算机模拟仿真, 获得了相应的工艺参数, 以及器件初步性能预测, 并由模拟集成电路国家重点实验室加工制作了实验样品.

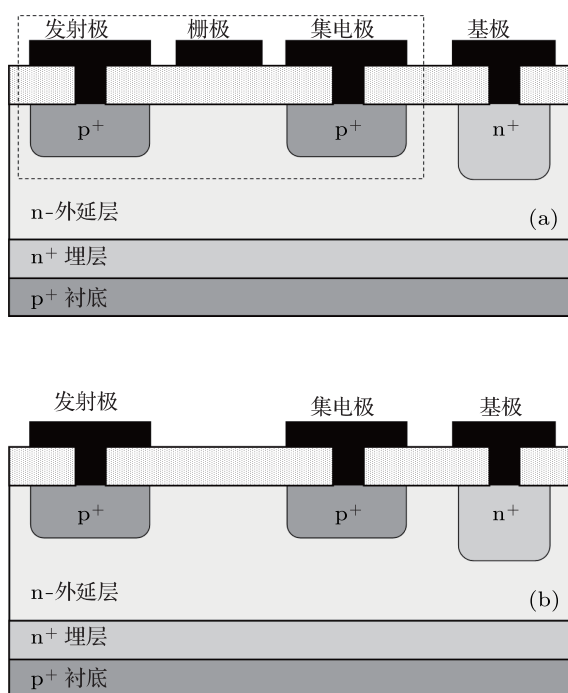


图 1 横向 PNP 双极晶体管横断面示意图 (a) 栅控; (b) 常规

2.2 器件辐照和测试

辐照实验是在中国科学院新疆理化技术研究所的大、小 ^{60}Co - γ 辐照源上进行的. 辐照总剂量为 1000 Gy (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 0.50 Gy (Si)/s 以及与实际空间低剂量率水平相当的 0.10 mGy (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的影响, 防止剂量增强效应的发生. 辐照过程中, 对栅控横向 PNP 双极晶体管加以反向偏置, 即基极接 +2 V, 发射极、集电极接地, 在此对栅电极也采取接地处理.

实验采取移位测试的方法, 栅控晶体管参数利用 HP4142 型半导体参数分析仪进行采集, 测试参数为

- 1) 双极晶体管常规特性: 基-射结电压 (V_{EB})、基极电流 (I_{B})、集电极电流 (I_{C}) 以及电流增益 (β);
- 2) 栅控特性: 栅极电压 (V_{Gate})、基极电流 (I_{B}).

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

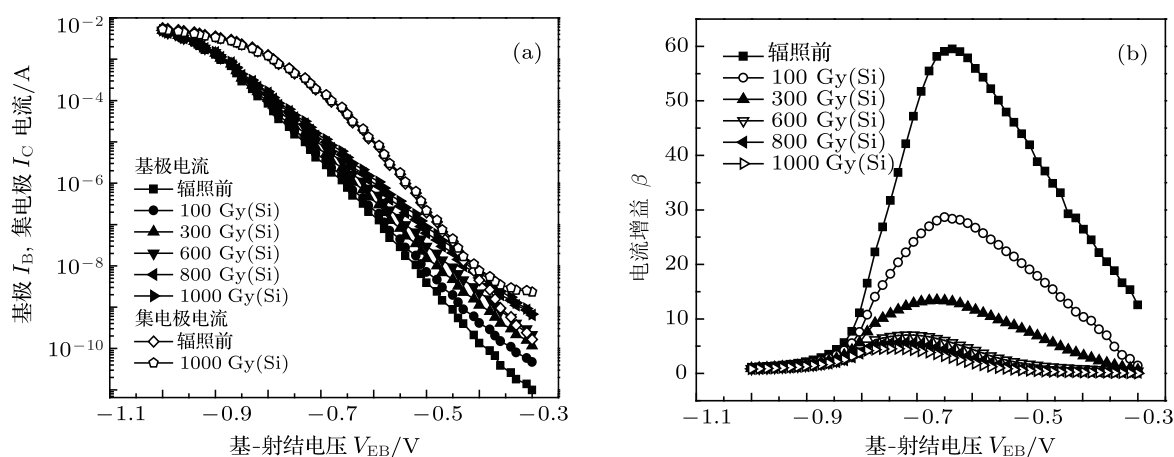


图2 ^{60}Co - γ 辐照引起的栅控双极晶体管特性变化 (a) 基极、集电极电流; (b) 电流增益

为了研究栅控横向 PNP 双极晶体管是否具有低剂量率辐照损伤增强效应, 在此引入过剩基极电流 (ΔI_{B}) 这一参量, 过剩基极电流定义为辐照后基极电流与辐照前基极电流的变化量, 即为 $\Delta I_{\text{B}} = I_{\text{B-Pre}} - I_{\text{B-Irr}}$. 图 3 所示为栅控横向 PNP 双极晶体管在不同剂量率辐照下, 其过剩基极电流随辐照总剂量及室温退火时间的变化关系. 从

完成. 常规晶体管参数测试在此不做介绍, 栅控特性测试方法为: 栅控横向 PNP 双极晶体管工作在正向有源模式下, 保持晶体管偏置状态不变, 在栅极上加一扫描电压, 然后测试基极电流随栅极电压的变化.

3 实验结果

3.1 栅控横向 PNP 双极晶体管常规特性的辐射响应规律

图 2 所示为栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流、集电极电流随辐照累积总剂量的变化 (图 2(a)) 和电流增益随辐照总剂量的变化关系 (图 2(b)). 从图中可以看出, 虽然在常规双极晶体管基区氧化层上多了一栅电极, 但是对双极晶体管输入输出特性以及放大特性都没有影响. 电离辐射会造成晶体管增益衰减, 主要是由于电离辐射导致的基区电流增加引起的, 如图 2(a) 所示, 因为集电极电流在辐照前后基本没有发生变化.

图中可以看出, 0.10 mGy (Si)/s 低剂量率辐照条件下栅控横向 PNP 双极晶体管过剩基极电流的变化, 要明显大于 0.50 Gy (Si)/s 高剂量率辐照的样品. 在高剂量率辐照后长达 110 余天的室温退火过程中, 其 ΔI_{B} 逐步向辐照前的初值恢复, 但是恢复程度有限, 且明显小于低剂量率的辐照值, 表现出明显的低剂量率辐照损伤增强效应.

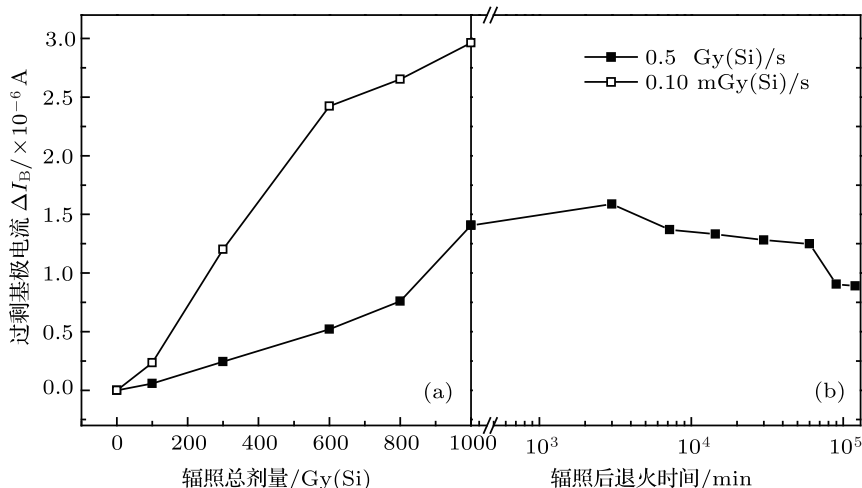


图3 栅控横向 PNP 双极晶体管过剩基极电流随辐照累积总剂量 (a) 和室温退火时间 (b) 变化

3.2 栅扫描方法对栅控横向 PNP 双极晶体管辐射感生缺陷的分离

由上述常规晶体管的电离辐射响应特性可知, 该实验样品具有明显的 ELDRS 效应. 为了分析导致高、低剂率辐照损伤之间差异的原因, 我们利用栅扫描方法同时对这一新型测试结构进行了测试, 得到不同总剂量辐照下栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流随栅极电压的变化关系, 如图 4 所示. 可以发现, 随着栅极负电压的不断增大, 基极电流也不断增加, 但整个过程基极电流并不是单向递增的, 当增加到一定量时, 基极电流开始减小, 在图中表现为基极电流曲线出现一峰值. 随着辐照总剂量的累加, 基极电流峰值表现出以下两种趋势: 1) 峰值位置向栅极负电压更大方向漂移; 2) 基极电流峰值量单向增大. 下面就实验现象进行详细讨论和分析.

双极晶体管中, 位于 Si-SiO₂ 界面附近的基区对电离辐照表现最为敏感 [3,4,6]. 电离辐照会在基区氧化层中产生辐照感生缺陷, 这些缺陷作为复合中心, 会减少少数载流子寿命, 导致基区复合电流增加, 最终导致基极电流增加, 通过 Shockley, Read, Hall 方程 (SRH 方程) 得出 [15]:

$$I_B = \frac{qp_E h_E}{2\tau} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) \cdot \left[\frac{n_i^2 x_B}{N_D} + n_i x_d\right], \quad (1)$$

其中 q 为基本电荷量, p_E 为晶体管发射极周长, h_E 为发射极发射结深度, τ 为少数载流子寿命, V_{EB} 为基-射结电压, n_i 为本征载流子浓度, x_B 为有源基

区宽度, N_D 为基区掺杂浓度, x_d 为基-射结耗尽区宽度. (1) 式中等式右侧除少数载流子寿命 τ 外都为常数, 可见基极电流随少数载流子寿命减少而迅速增加.

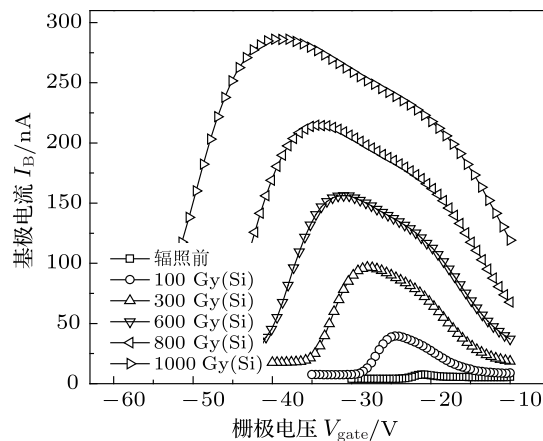


图4 不同总剂量辐照下栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流随栅极电压变化

由于基区表面的敏感性, 当在基区表面氧化层上的栅极加以电压时, 就可能改变基区表面势, 随着栅极电压向负方向增加, 基区表面势就会从积累到耗尽, 然后到反型状态变化. 这个过程中, 表面势会降低表面载流子浓度差异, 使得经过界面陷阱复合的概率增加. 在器件表面势从积累到反型的过程中, 能级弯曲使得本征费米能级经过能带中央即中带电压 (the midgap voltage, V_{mg}) 附近. 栅极电压使得表面势位于载流子准费米能级之间的能带中央, 表面复合速率达到最大值, 此时电子和空穴浓度相

等, 基极电流就会出现一个峰值 [10,16].

根据不同辐照累积总剂量下栅控横向 PNP 双极晶体管栅扫描曲线变化, 计算出辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的变化. 辐射感生过剩基极电流与表面复合速率 (srv) 如下式所示 [10]:

$$\begin{aligned} \Delta I_B &= q \int_S \Delta U dS \\ &= q \Delta \text{srv} \int_S \frac{(n_s p_s - n_i^2)}{(n_s + p_s + 2n_i)} dS, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 q 为电子基本电量, ΔU 为辐射引起的复合变化, Δsrv 为表面复合速率变化, S 为发生复合作用的基区表面积, σ 为载流子俘获界面, ν_{th} 为载流子热速率, n_s 和 p_s 为表面电子和空穴密度.

又

$$\int_S \frac{(n_s p_s - n_i^2)}{(n_s + p_s + 2n_i)} dS \approx \frac{S n_i \exp\left(\frac{V_{\text{EB}}}{V_T}\right)}{2}, \quad (3)$$

式中 V_{EB} 为基-射结电压, $V_T = kT/q$, 且低水平注入情况下, 表面复合速率和界面陷阱电荷密度有如下近似关系:

$$\Delta \text{srv} \cong \Delta N_{\text{it}} \sigma \nu_{\text{th}}, \quad (4)$$

将 (3), (4) 式代入 (2) 式, 就可以得到界面陷阱电荷密度 ΔN_{it} 与基极电流峰值 ΔI_B 两者之间的变化关系, 如 (5) 式所示

$$\Delta N_{\text{it}} = \frac{2\Delta I_B}{q \sigma \nu_{\text{th}} S_{\text{peak}} n_i \exp\left(\frac{qV_{\text{EB}}}{2kT}\right)}, \quad (5)$$

式中 ΔI_B 为基极电流峰值大小变化量, S_{peak} 为表面复合速率最大也即基极电流峰值出现时的基区表面积, 在此近似为有源基区面积, (5) 式中除基极电流 ΔI_B 外其他都为常数. 因而只要测试辐照前后栅控横向 PNP 双极晶体管基极电流峰值变化, 就可以定量计算双极晶体管中辐照感生的界面陷阱电荷变化.

因为辐照感生氧化物陷阱电荷 ΔN_{ot} 导致基极电流峰值漂移, 峰值漂移对应的栅极电压变化量也即为中带电压变化量 ΔV_{mg} , 根据公式

$$\Delta N_{\text{ot}} = \frac{C_{\text{ox}} \Delta V_{\text{mg}}}{q}, \quad (6)$$

其中 C_{ox} 为单位面积氧化层电容, 且有 $C_{\text{ox}} = \epsilon_{\text{ox}}/t_{\text{ox}}$, ϵ_{ox} 为 SiO_2 介电常数, t_{ox} 基区氧化层厚度. 由辐照前后基极电流峰值漂移所对应的栅极电压变化量, 就可获得中带电压变化量, 从而定量计算出辐照前后感生的氧化物陷阱电荷变化 [15,17].

图 4 给出利用栅扫描法获得的不同累积总剂量条件下栅极横向 PNP 双极晶体管基极电流的变化. 根据 (5) 式和 (6) 式, 就可得到辐照前后栅控横向 PNP 双极晶体管辐照感生氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的变化, 如图 5 所示. 图中 H 表示高剂量率 0.50 Gy (Si)/s 辐照, L 表示低剂量率 0.10 mGy (Si)/s 辐照, ΔN_{ot} 和 ΔN_{it} 则指辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷变化.

从图 5 可以看出, 低剂量率辐照条件下, 双极晶体管中感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷的量, 都不同于高剂量率辐照条件下辐照感生的电荷量, 正是因为高、低剂量率下的感生电荷量

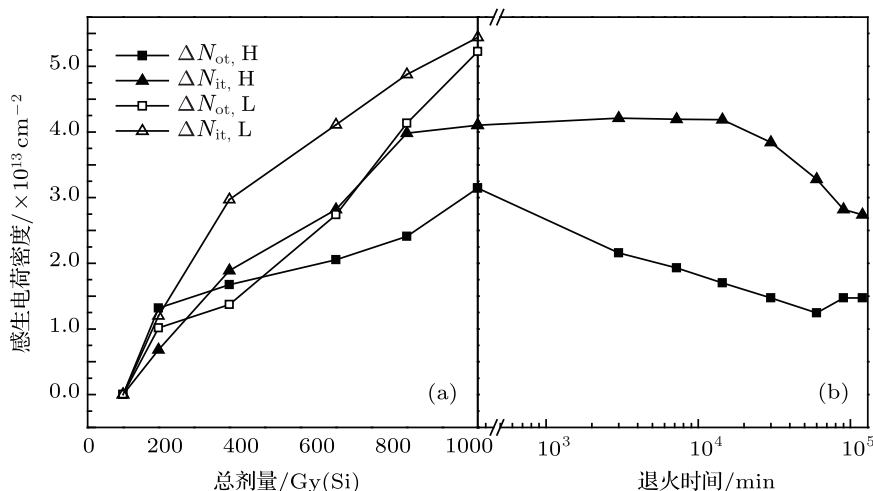


图 5 栅控横向 PNP 双极晶体管辐照感生电荷随 (a) 总剂量和 (b) 退火时间变化

差异,才导致双极晶体管低剂量率辐照损伤增强效应的存在.

4 结论

设计并制作了可用于辐照实验的栅控横向PNP双极晶体管,通过实验获得晶体管辐照前后基极电流随栅极电压的性能变化,利用栅控晶体管辐照感生缺陷测试分离方法——栅扫描法,经过理

论推导和近似计算,定量分离出国产双极器件辐照感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷.实验结果表明,低剂量率辐照条件下的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷感生量均不同于高剂量率辐照条件下的二者感生量.感生电荷的定量分离为研究双极器件及电路低剂量率辐照损伤增强效应和失效机理提供了一种有效探索手段.关于高、低剂量率辐照下,不同工艺以及不同结构栅控双极晶体管的辐射效应还需要进一步研究.

- [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, Cirba C, Schrimpf R D, Kosier S, Fouillat P, Montagner X 1999 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **46** 1652
- [4] 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, 余学锋, 何承发 2009 物理学报 **58** 5572]
- [5] 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, 余学锋, 何承发, 高博 2011 物理学报 **60** 096104]
- [6] 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
- [7] Kosier S L, Schrimpf 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
- [8] Niu G F, Banerjee G, Cressler J D, Roldan J M, Clark S D, Ahlgren D C 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2361
- [9] Cazenave P, Fouillat P, Montagner X, Barnaby H, Schrimpf R D, Bonora L, David J P, Touboul A, Calvet M C, Calvel P 1998 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **45** 2577
- [10] Chen X J, Barnaby H J, Pease R L, Schrimpf R D, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3178
- [11] Pease R L, Platteter D G, Dunham G W, Seiler J M, Barnaby H J, Schrimpf R D, Shaneyfelt M R, Maher M C, Nowlin R N 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3773
- [12] Nowlin R N, Pease R L, Platteter D G, Dunham G W, Seiler J E 2005 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **52** 2609
- [13] 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
- [14] Hughart D R, Schrimpf R D, Fleetwood D M, Chen X J, Barnaby H J, Holbert K E, Pease R L, Platteter D G, Tuttle B R, Pantelides S T 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3361
- [15] Ball D R, Schrimpf R D, Barnaby H J 2002 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **49** 3185
- [16] Minson E, Sanchez I, Barnaby H J, Pease R L, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3723
- [17] 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
- [18] Adell P C, Pease R L, Barnaby H J, Rax B, Chen X J, McClure S S 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3326

Quantitative separation of radiation induced charges for gate controlled later PNP bipolar transistors*

Xi Shan-Bin¹⁾²⁾³⁾ Lu Wu^{1)2)†} Ren Di-Yuan¹⁾²⁾ Zhou Dong¹⁾²⁾³⁾ Wen Lin¹⁾²⁾
Sun Jing¹⁾²⁾ Wu Xue¹⁾²⁾³⁾

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*)

(Received 19 April 2012; revised manuscript received 20 June 2012)

Abstract

A new test structure of gate controlled lateral PNP bipolar transistors designed and fabricated. An independent gate terminal is patterned on the oxide layer above the active base region of normal lateral PNP bipolar transistors. According to the gate sweep technique, by sweeping the voltage applied to the gate terminal, one can obtain the characteristic of base current versus gate voltage. The quantitative variations of oxide trapped charges and interface traps are analytically estimated and numerically calculated, and the radiation induced defects in the gate controlled lateral PNP bipolar transistors during ^{60}Co - γ irradiation and annealing at room temperature are separated independently. The test structures and measurements of the bipolar transistors used in the experiment are introduced in detail in this paper.

Keywords: gate sweep 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