

# 偏置条件对 NPN 及 PNP 双极晶体管电离辐射损伤的影响研究\*

李兴冀<sup>1)†</sup> 兰慕杰<sup>2)</sup> 刘超铭<sup>1)</sup> 杨剑群<sup>1)</sup> 孙中亮<sup>1)</sup> 肖立伊<sup>2)</sup> 何世禹<sup>1)</sup>

1) (哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

2) (哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

(2012 年 11 月 12 日收到; 2012 年 12 月 17 日收到修改稿)

本文采用低能电子辐照源对 NPN 及 PNP 晶体管进行辐照试验. 在辐照试验过程中, 针对 NPN 及 PNP 晶体管发射结施加不同的偏置条件, 研究偏置条件对 NPN 及 PNP 晶体管辐射损伤的影响. 使用 Keithley 4200-SCS 半导体特性测试仪在原位条件下测试了双极晶体管电性能参数随低能电子辐照注量的变化关系. 测试结果表明, 在相同的辐照注量条件下, 发射结反向偏置时双极晶体管的辐照损伤程度最大; 发射结正向偏置时双极晶体管的辐照损伤程度最小; 发射结零偏时双极晶体管的辐照损伤程度居于上述情况之间.

**关键词:** 双极晶体管, 低能电子, 电离辐射

**PACS:** 85.30.Pq, 14.60.Cd, 87.50.Gi

**DOI:** 10.7498/aps.62.098503

## 1 引言

航天器在轨飞行过程中, 电子控制及信息系统承担着控制着航天器件的飞行和与地面保持信息与数据的传送的重要任务, 在这些系统中双极晶体管及电路被广泛的使用. 空间高能带电粒子会对航天器中电子器件产生电离、位移及单粒子效应<sup>[1-3]</sup>. 不同类型的电子器件对辐射效应的敏感性不同, 双极晶体管对电离效应和位移效应均较为敏感<sup>[4-6]</sup>. 本文主要研究不同偏置条件下, 双极晶体管的电离损伤效应. 到目前为止, 国内外已有的研究工作主要集中于<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线辐照条件下双极晶体管的电离损伤效应研究<sup>[7-10]</sup>, 而对于低能电子辐照时, 不同偏置条件对双极晶体管电离损伤影响的研究较少.

<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线作为辐照实验源时, 在电子器件中产生的二次电子能量足够高, 也会导致一定的位移损伤. 与<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线相比, 低能电子源具有更好的优越性: 一是当电子能量低于 200 keV 时, 不会在

硅材料中产生位移损伤<sup>[6,11]</sup>, 便于选用低能电子研究双极晶体管的纯电离损伤效应; 二是空间环境中存在着大量的电子, 地面宜直接采用电子辐照模拟空间辐射环境. 因此, 本文选用 110keV 低能电子作为辐照源, 在不同偏置条件下研究双极晶体管电离效应.

## 2 试验器件与试验方法

本实验选用的双极晶体管为 3DG112 (NPN) 和 3CG130 (PNP). 3DG112 及 3CG130 均为硅外延高频小功率三极管, 其外形分别为 A3-01BF 及 A3-02B. 进行电离效应损伤机理分析时, 关键的结构参数为氧化物层厚度. 3DG112 及 3CG130 的氧化物层厚度相近, 约为 600 nm.

本文选取低能电子进行辐照试验, 辐照条件为: 能量为 110 keV、辐照通量为  $1.2 \times 10^9$  e/(cm<sup>2</sup>·s). 110 keV 电子辐照试验在哈尔滨工业大学空间环境材料行为及评价技术重点实验室进行. 辐照束流有专门装置进行监测, 保证束流的准确性和稳定性.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11205038) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2012M510951) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn

为了准确地分析双极晶体管的电离辐射损伤机理, 辐射实验之前, 将所有受试器件进行开帽处理.

双极晶体管电性能参数测试主要采用 Keithley 4200SCS 及 Agilent E4980A 半导体器件电性能参数测试仪, 以及 NI 开关矩阵控制机. 在进行辐照试验过程中, 针对双极晶体管进行在线原位电性能参数测试. 为了研究辐照过程中双极晶体管基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$  随辐照注量的变化关系, 需进行 Gummel 特性曲线的测试. Gummel 特性曲线是在不同的辐照注量下, 测量基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$  随基极—发射极电压  $V_{BE}$  的变化关系.

在 Gummel 曲线的基础上, 可给出双极晶体管电流增益随辐照注量的变化关系. 辐照过程中, 针对双极晶体管的发射结分别进行反偏、接地及正偏处理, 以研究不同偏置条件对双极晶体管电离辐射损伤的影响.

### 3 实验结果

3DG112 晶体管 Gummel 曲线的测量条件为: 发射极接扫描电压, 即  $V_E = -1.2 \sim 0$  V, 扫描步长为 0.01 V; 基极和集电极接 0 V 电压, 即  $V_B = V_C = V_{BC} = 0$  V. 图 1 为 110 keV 电子辐照条件下, 3DG112 晶体管基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$  随基极—发射极电压  $V_{BE}$  的变化关系. 其中, 在辐照过程中, 3DG112 晶体管的发射极、基极及集电极均接地 ( $V_E = V_B = V_C = 0$  V). 由图 1 可知, 随着辐照注量的增加, 集电极电流  $I_C$  保持不变, 基极电流  $I_B$  逐渐增加. 且当  $V_{BE}$  较小时, 基极电流  $I_B$  的相对变化较大; 当  $V_{BE}$  较大时,  $I_B$  的相对变化较小. 图 1 可以说明, 在低能电子辐照条件下, 集电极电流  $I_C$  基本不受影响, 而基极电流  $I_B$  受到的影响程度较大.

在 110 keV 电子辐照过程中, 3CG130 晶体管的集电极电流  $I_C$  和基极电流  $I_B$  随发射结电压  $V_{EB}$  的变化关系 (即 Gummel 曲线) 的测量条件为: 发射极接扫描电压, 即  $V_E = 0 \sim 1.2$  V, 扫描步长为 0.01 V; 基极和集电极接 0 V 电压, 即  $V_B = V_C = V_{BC} = 0$  V. 图 2 为 110 keV 电子辐照条件下, 3CG130 晶体管的基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$  随基极—发射极电压  $V_{BE}$  的变化关系. 其中, 在辐照过程中, 3CG130 晶体管的发射极、基极及集电极均接地 ( $V_E = V_B = V_C = 0$  V). 由图 2 可知, 随着辐照注量的增加, 集电极电流  $I_C$  保持不变, 基极电流  $I_B$  逐渐增

加. 且当  $V_{EB}$  较小时, 基极电流  $I_B$  的相对变化较大; 当  $V_{EB}$  较大时,  $I_B$  的相对变化较小. 图 2 可以说明, 在低能电子辐照条件下, 集电极电流  $I_C$  基本不受影响, 而基极电流  $I_B$  受到的影响程度较大.

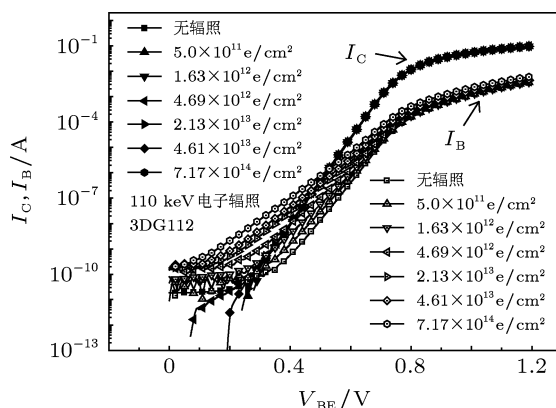


图 1 不同注量的 110keV 电子辐照时 3DG112 晶体管  $I_B$  和  $I_C$  随  $V_{BE}$  的变化 ( $V_{BC} = 0$  V)

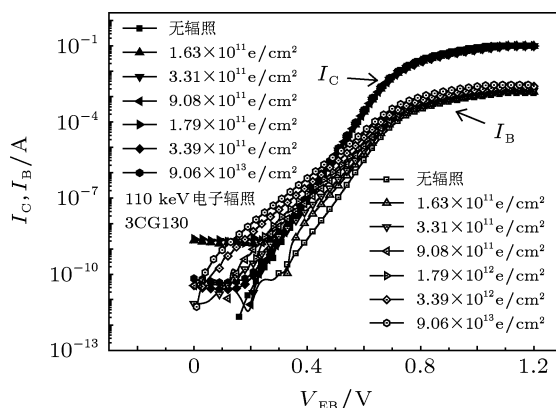


图 2 不同注量 110 keV 电子辐照时 3CG130 晶体管  $I_B$  和  $I_C$  随  $V_{EB}$  变化 ( $V_{BC} = 0$  V)

晶体管的电流增益  $\beta$  可从 Gummel 特征曲线获得. 本文中的电流增益为当发射结正偏电压  $V_{BE}$  (或  $V_{EB}$ ) = 0.65 V 时, 集电极电流  $I_C$  与基极电流  $I_B$  的比值. 其中, 电流增益倒数的变化  $\Delta(1/\beta) = 1/\beta - 1/\beta_0$ , 式中  $\beta_0$  和  $\beta$  分别为晶体管辐照前和辐照后的电流增益值. 电流增益倒数的变化可为深入分析晶体管辐照效应机理提供基础. 图 3 为 110 keV 电子辐照时, 3DG112 晶体管电流增益倒数的变化  $\Delta(1/\beta)$  随辐照注量的变化关系. 其中, 110 keV 电子的辐照通量分别为  $1.16 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ,  $5.64 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  及  $0.96 \times 10^{11} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 且辐照过程中晶体管的所有管脚接地. 由图可知, 在 110 keV 电子辐照条件下, 电流增益倒数随辐照注量的增加而增加. 并

且, 110 keV 电子辐照条件下,  $\Delta(1/\beta)$  与辐照注量的关系为非线性的, 且在较高的辐照注量下,  $\Delta(1/\beta)$  逐渐趋于平缓. 此外, 图 3 说明了当选定辐照源时, 辐照通量的变化对电流增益的影响较小. 图 4 给出了 110 keV 电子辐照时, 3CG130 晶体管电流增益倒数的变化  $\Delta(1/\beta)$  随辐照注量的变化关系. 其中, 110 keV 电子的辐照通量分别为  $2.96 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  及  $5.60 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 且辐照过程中晶体管的所有管脚接地. 由图 4 可知, 3CG130 晶体管的电流增益退化规律与 3DG112 晶体管的一致, 即 110 keV 电子辐照时,  $\Delta(1/\beta)$  随辐照注量的增加逐渐趋于饱和, 且辐照通量的影响较小.

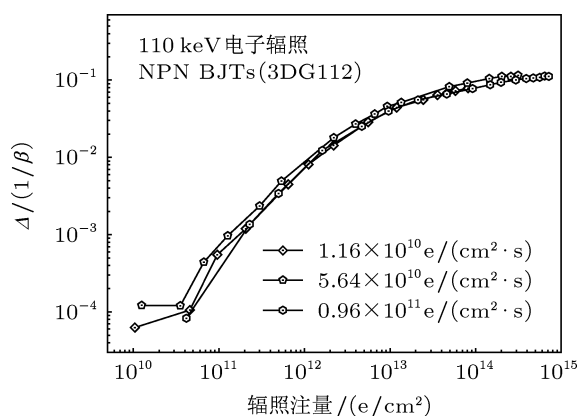


图 3 110 keV 电子辐照时 3DG112 晶体管电流增益倒数的变化量随辐照注量的变化

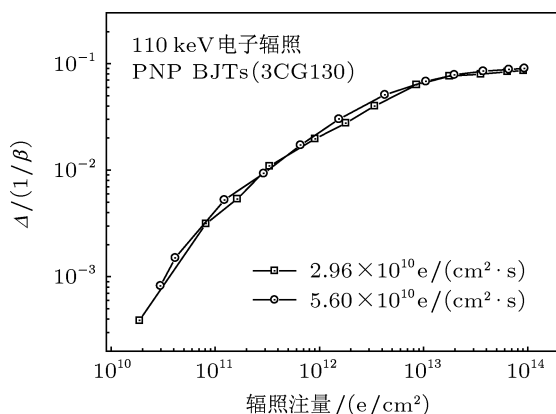


图 4 110 keV 电子辐照时 3CG130 晶体管电流增益倒数的变化量随辐照注量的变化

为了研究不同偏置条件对晶体管辐照效应损伤程度的影响, 在辐照试验过程中, 分别针对 NPN 和 PNP 晶体管发射结施加不同的偏置条件. 图 5 和图 6 分别为在辐照过程中, 3DG112 和 3CG130 晶体管发射结施加不同的偏置条件时, 电流增益的倒

数随辐照注量的变化关系. 可见, 在相同的辐照注量下, 当发射结正偏时 (0.7 V), 晶体管的损伤程度减弱; 当发射结反偏时 (-4 V), 其损伤程度加大. 且 NPN 及 PNP 晶体管在发射结正偏和反偏时, 受到的影响一致. 为进一步说明偏置条件的影响, 图 5 和图 6 中, 分别针对  $V_{BE} = -4 \text{ V}$  和  $V_{EB} = 0.7, -4 \text{ V}$  的最后一个数据点, 在辐照过程中移去其偏置条件 (所有管脚接地), 此时  $V_{BE}$  (或  $V_{EB}$ ) = 0 V. 可见, 此时电流增益的变化与正常发射极—基极电压为 0 V ( $V_{BE} = 0 \text{ V}$ ) 时的接近, 从而更清晰地说明了偏置条件对电离效应起明显的作用.

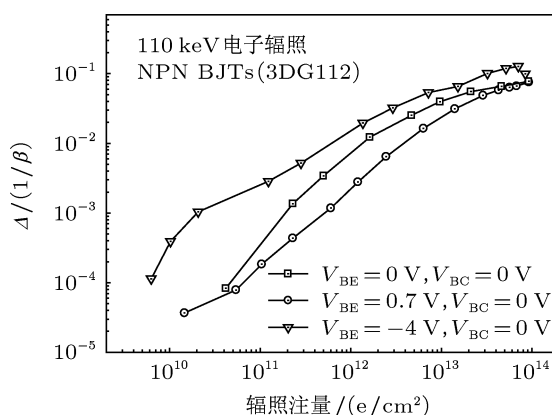


图 5 发射结偏置条件不同时, NPN 晶体管电流随 110 keV 电子辐照注量的变化

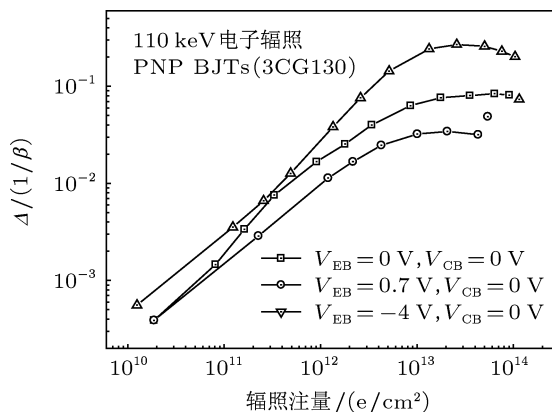


图 6 发射结偏置条件不同时, PNP 晶体管电流随 110 keV 电子辐照注量的变化

## 4 讨论

电离效应主要会对双极晶体管的  $\text{SiO}_2$  钝化层造成损伤及在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面生成界面态, 从而影响双极晶体管的电性能参数. 电离效应在  $\text{SiO}_2$  层中产生空穴-电子对. 产生的电子迁移率较大, 大部分移出钝化层. 在其移出之前, 有一部分电子与空

穴复合. 空穴的迁移率较慢, 除与电子复合的空穴外, 剩余的被  $\text{SiO}_2$  层的缺陷俘获, 形成俘获正电荷. 电离效应还可在  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面处产生随机分布的 3 价硅原子, 这就破坏了硅晶格势场的周期性, 将硅导带、价带中的部分能态扰动至禁带中, 在界面处引入  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面态.  $\text{SiO}_2$  层中的俘获正电荷和  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  界面处界面态主要会导致发射结的复合率增加, 造成过剩基极电流  $I_B$  的增加, 从而致使晶体管电流增益的退化.

电离辐射效应产生的氧化物层中的俘获正电荷会在表面产生正电场, 影响表面特性, 导致 PN 结耗尽层向 P 区扩散 [12,13]. 对于 NPN 器件来说, 发射极—基极耗尽层就会向掺杂浓度较小的 P 型基区扩散, 使得耗尽层面积加大, 导致基极表面复合电流的增加, 从而引起电流增益的衰退. 而对于 PNP 型晶体管来说, 发射结耗尽层同样会向 P 型掺杂的

区域扩散, 即掺杂浓度较高的 P 型发射区, 使得耗尽层面积加大, 导致基极电流的增加, 使得晶体管的电流增益降低. 因此, 对于 NPN 型和 PNP 型晶体管, 在辐照过程中由于产生的俘获正电荷数量逐渐增多, 致使向 P 型区域不断扩展, 导致晶体管耗尽层的面积不断加大, 使得晶体管的电流增益降低, 具体过程如图 7 所示. 而  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面处的界面态作为复合中心, 同样会增加双极晶体管的表面复合电流, 引起电流增益的衰退.

电离辐射效应在氧化层内产生的俘获正电荷及  $\text{Si}/\text{SiO}_2$  界面处的界面态均会导致晶体管电流增益的下降, 并且随着俘获正电荷及界面态数量的增加, 电流增益逐渐趋于饱和状态. 基于双极型晶体管辐照效应性能退化规律, 110 keV 电子辐照时, 电流增益随辐照注量的增加而逐渐趋于饱和, 由此进一步说明了试验与理论分析具有很好的符合度.

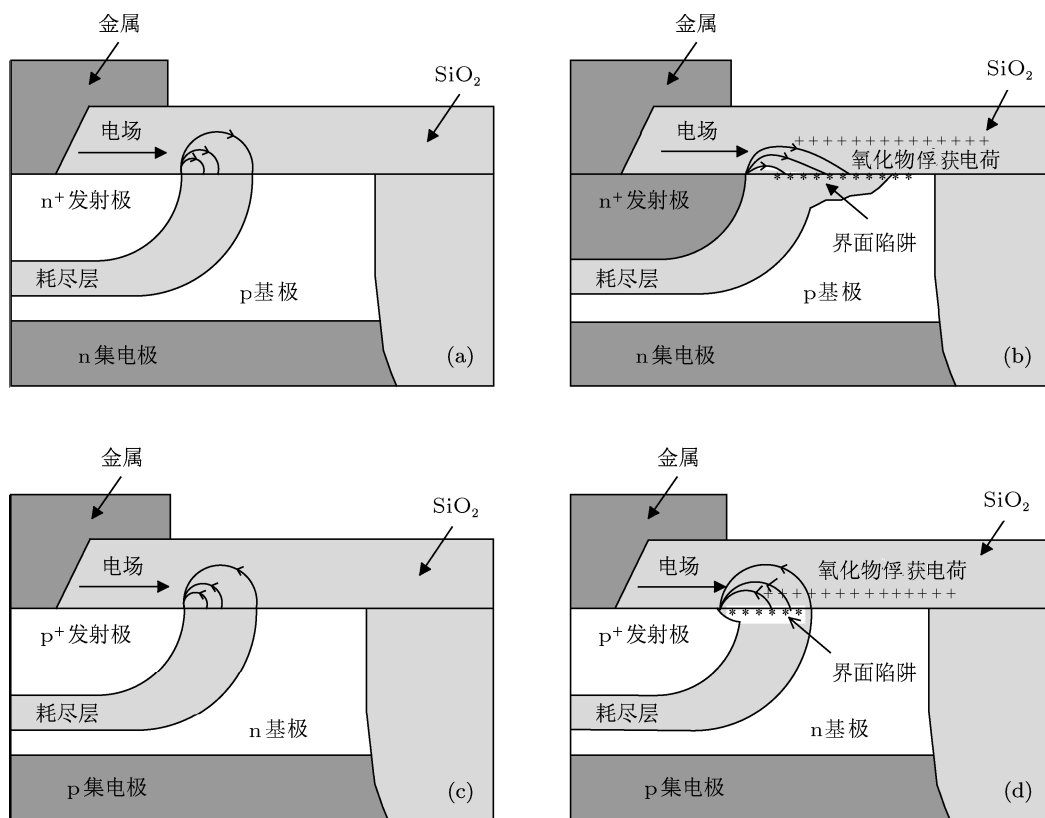


图 7 电离辐射效应对 NPN 和 PNP 晶体管发射结的影响 (a) NPN 晶体管, 未辐照; (b) NPN 晶体管, 辐照; (c) PNP 晶体管, 未辐照; (d) PNP 晶体管, 辐照

发射结偏置条件对电离效应的影响, 主要是由于辐照过程中, 发射结的偏置会影响氧化层的内电场情况, 而导致晶体管受到的损伤程度不同. NPN 晶体管在不同偏置条件下, 发射结 (基极—发射极

耗尽层) 区域的变化如图 8 所示. 若以发射结零偏 ( $V_{BE} = 0 \text{ V}$ ) 时的内电场为参考点, 当发射结正偏时, 耗尽层区域变窄, 内电场强度变弱; 当发射结反偏时, 耗尽层区域变宽, 内电场强度变强. PNP 晶体管

的耗尽层区域与偏置条件变化的情况与 NPN 晶体管相同, 只是其电场方向相反. 发生电离效应时, 内电场的存在能够分离电子和空穴, 减少其复合率. 因此, 内电场的强弱, 直接影响电子-空穴对的复合率及氧化层内正电荷的俘获数量. 当发射结正偏时, 内电场减弱, 电子-空穴对复合率增加, 氧化物内俘获的正电荷数量减少, 导致相同辐照剂量时电流增益损伤程度减缓; 当发射结反偏时, 情况正好相反, 致使电流增益损伤程度更加严重.

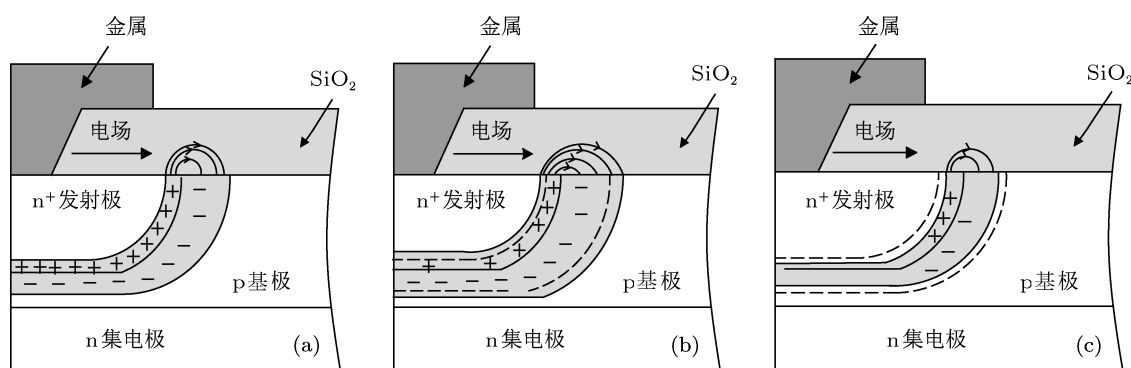


图8 在不同的偏置条件下, NPN 晶体管内部电场的变化 (a) 接地偏置条件; (b) 反偏偏置条件; (c) 正偏偏置条件

## 5 结论

通过对本次试验的测试结果及分析, 得到以下结论:

1. 电离损伤时, 晶体管电流增益随辐照剂量的增加而逐渐趋于饱和的特征, 主要与界面态和氧化

层内的正电荷有关. 当界面态和正电荷数量达到一定程度时, 电流增益不再随其变化.

2. 晶体管发射结偏置对电离损伤的影响较大. 发射结的偏置会改变其耗尽层的宽度, 导致电离效应在氧化层内产生的正电荷和界面态对其影响不同.

- [1] Minson E, Sanchez I, Barnaby H J, Pease R L, Platteter D G, Dunham G 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3723
- [2] Li X J, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y, Liu C M 2010 *Chin. Phys. B* **19** 066103
- [3] Liu C M, Li X J, Geng H B, Zhao Z M, Yang D Z, He S Y 2010 *Nucl. Instr. and Meth. A* **624** 671
- [4] Li X J, Liu C M, Geng H B, Rui E M, Yang D Z, He S U 2012 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **59** 439
- [5] Li X J, Liu C M, Rui E M, Geng H B, Yang J Q 2012 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **59** 625
- [6] Li X J, Geng H B, Liu C M, Zhao Z M, Yang D Z, He S Y 2010 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **57** 831
- [7] Zhang H L, Lu W, Ren D Y, Cui S 2004 *Microelectronics* **34** 606 (in Chinese) [张华林, 陆婉, 任迪远, 崔帅 2004 *微电子学* **34** 606]
- [8] Fei W X, Lu W, Ren D Y, Zheng Y Z, Wang Y Y 2011 *Atomic Energy Science and Technology* **45** 217 (in Chinese) [费武雄, 陆婉, 任迪远,

郑玉展, 王义元 2011 *原子能科学技术* **45** 217]

- [9] Zhai Y H, Li P, Zhang G J, Luo Y X, Fan X, Hu B, Li J H, Zhang J, Shu P 2011 *Acta Phys. Sin.* **20** 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* **20** 088501]
- [10] Xi S B, Lu W, Ren D Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 236103 (in Chinese) [席善斌, 陆婉, 任迪远 2012 *物理学报* **61** 236103]
- [11] Li X J, Xiao J D, Liu C M, Zhao Z M, Geng H B, Lan M J, Yang D Z, He S Y 2010 *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **621** 707
- [12] 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. on Nucl. Sci.* **40** 1276
- [13] Nowlin R N, Enlow E W, Schrimpf R D, Combs W E 1992 *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* **39** 2026

# The influence of bias conditions on ionizing radiation damage of NPN and PNP transistors\*

Li Xing-Ji<sup>1)†</sup> Lan Mu-Jie<sup>2)</sup> Liu Chao-Ming<sup>1)</sup> Yang Jian-Qun<sup>1)</sup>  
Sun Zhong-Liang<sup>1)</sup> Xiao Li-Yi<sup>2)</sup> He Shi-Yu<sup>1)</sup>

1) (School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

2) (School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 12 November 2012; revised manuscript received 17 December 2012)

## Abstract

Bipolar junction transistors (BJTs), as important electronic components in analog or mixed-signal integrated circuits (ICs) and BiCMOS (Bipolar Complementary Metal Oxide Semiconductor) circuits, are employed in the space environment. Therefore, the research on characteristics and mechanisms of ionization damage in the BJTs is very important. Lower energy electrons are used as irradiation source to study the ionization damage in NPN and PNP transistors. Various bias conditions are imposed on the emitter-base junction to reveal the different bias conditions that contribute to the radiation effect on NPN and PNP transistors during irradiation processing. The semiconductor parameter analyzer, Keithley 4200-SCS, is used to measure the change of electrical parameters of transistors with increasing electron irradiation fluence in situ. Based on the measurement results, we find the degradation of transistors is severe under reverse emitter-base bias, and is lowest under forward emitter-base bias, while it is medium under zero emitter-base bias at a given irradiation fluence.

**Keywords:** bipolar junction transistor, low-energy electron, ionizing radiation

**PACS:** 85.30.Pq, 14.60.Cd, 87.50.Gi

**DOI:** 10.7498/aps.62.098503

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11205038), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012M510951).

† Corresponding author. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn