

文章编号: 2095-4980(2017)04-0690-06

氢气气氛下横向 PNP 晶体管电离损伤行为

李兴冀¹, 陈朝基², 杨剑群¹, 刘超铭¹, 马国亮¹

(1.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2.中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094)

摘要: 无论氢在电子器件内部以何种形式(H_2 分子、H原子或 H^+ 离子)存在, 均会对电子器件电离损伤产生作用, 进而影响器件的抗辐照能力。本文深入研究了氢气和空气气氛条件下1 MeV电子辐照栅控横向PNP(GLPNP)型双极晶体管的辐射损伤缺陷演化行为。利用Keithley 4200SCS半导体参数测试仪对不同气氛下辐照过程中晶体管进行在线原位电性能参数测试, 研究晶体管电性能退化与电子辐照注量和氢气深度之间的关系; 基于栅扫技术(GS)和深能级瞬态谱技术(DLTS), 研究双极晶体管中氢诱导电离损伤缺陷演化的基本特征。研究表明, 与空气气氛相比, 氢气气氛下电子辐照导致GLPNP的基极电流增加显著, 而集电极电流明显降低, 产生更多的氧化物电荷和界面态, 这些现象均说明氢气加剧双极晶体管的电离辐射损伤。

关键词: 双极晶体管; 电离辐射; 界面态; 深能级瞬态谱仪; 栅扫技术

中图分类号: TN823⁺.27

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0690

Ionization damage behavior of gate controlled lateral PNP(GLPNP) transistors in H_2 environment

LI Xingji¹, CHEN Zhaoji², YANG Jianqun¹, LIU Chaoming¹, MA Guoliang¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;

2.Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Hydrogen, in its various forms (molecular hydrogen, atomic hydrogen or hydrogen anions), has an important and sometimes critical impact on the ionization damage behavior of electron device. This affects the radiation resistance of the device. In the paper, defect evolution of the irradiated Gated Lateral PNP(GLPNP) transistors by 1 MeV electrons in air and H_2 environment is researched. Electric performance parameters including the base current versus gate voltage Gate Sweep(GS) and Gummel curves are measured immediately in-situ using KEITHLEY 4200-SCS semiconductor parameter measurement system. The relationship between performance degradation and electron irradiation fluence, and hydrogen concentration is studied. Defect evolution of the irradiated GLPNP transistors by 1 MeV electrons in H_2 environment is researched by GS and Deep Level Transient Spectroscopy(DLTS) techniques. Results show that compared with that in air, the base current of the GLPNP soaked in H_2 is significantly increased by the 1 MeV electrons, while collector current is obviously decreased. In the case, more oxide charges and interface states are produced. These phenomena indicate that molecular hydrogen aggravates ionization damage of the GLPNP bipolar transistor.

Keywords: bipolar junction transistor; ionization radiation; interface traps; deep level transient spectroscopy; Gate Sweep technique

双极晶体管具有良好的电流驱动能力、线性度、低噪声以及优良的匹配特性, 是构成双极集成电路的基本单元。它们在模拟或混合集成电路及 BiCMOS 电路中有着重要的作用。这些双极晶体管及电路均广泛应用于航天器。在空间带电粒子(质子和电子)作用下, 双极晶体管易于受到电离辐射损伤。电离辐射损伤会在晶体管中氧化

收稿日期: 2015-07-23; 修回日期: 2016-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61404038, 11205038)

层内产生俘获正电荷,并在 SiO_2/Si 界面处生成界面态^[1-2]。这 2 种效应都会使载流子表面复合速率增加,导致少数载流子寿命降低,使双极晶体管的电流增益降低^[3]。

近几年,通过研究发现无论氢在电子器件内部以何种形式(H_2 分子、H 原子或 H^+ 离子)存在,均会对电子器件电离效应(尤其是 ELDRS 效应)起到关键性的影响作用,进而影响器件的抗辐照能力^[4-6]。该现象说明氢的存在会使器件内部电离损伤缺陷的状态发生改变,也为深入研究 ELDRS 效应的微观物理机制提供了依据。在清洗、刻蚀、高温处理及封装等电子器件生产过程中,会不可避免地引入杂质元素氢。并且,生产工艺的差异(不同生产厂家、相同厂家不同生产批次等),会导致器件内部氢的存在形式不同,造成相同型号的器件抗辐照能力不同,这大大增加晶体管辐射诱导缺陷问题的复杂性。

从国内外文献来看,氧化物俘获正电荷和界面态的演化状态,均与 SiO_2 层内的 H^+ 释放过程相关^[7-8]。而 H^+ 的释放又受到电场强度、温度、氢气含量等诸多因素的影响。并且,由于辐照条件及双极晶体管结构参数等方面的差异,会增加研究的复杂性。迄今为止,国际上主要基于栅控横向 PNP 晶体管(GLPNP),利用栅扫技术(GS)研究了氢诱导双极晶体管电离效应演化的基本特征,并建立了初步的物理模型^[9-11]。然而,由于辐照剂量的增加或由于氢的存在,双极晶体管基极电流峰值出现展宽效应^[12],这时 GS 研究手段受到限制,致使已有研究存在许多不足之处。例如,缺少氢诱导氧化物俘获正电荷和界面态演化的相关测试信息(能级及俘获截面等),未考虑不同能级缺陷对电子/空穴俘获能力的差异等。最终导致氢诱导氧化物俘获正电荷和界面态演化的物理机制尚不清楚。因此,有必要通过深入研究氢气气氛下双极晶体管电离损伤缺陷行为的基本特征。深能级瞬态谱仪(DLTS)是分析辐照诱导缺陷的有效手段之一,可有效表征辐照引起的界面态和氧化物电荷^[13]。本文利用栅扫技术(GS)和深能级瞬态谱技术(DLTS)2 种分析手段研究氢气气氛下横向 PNP 晶体管电离损伤缺陷行为。这可为优化双极晶体管和电路抗辐照性能提供必要依据,具有重要的学术价值和工程实际意义。

1 试验样品及测试方法

1.1 试验样品

本文以 GLPNP 双极晶体管为研究对象,其结构示意图如图 1 所示。与常规横向 PNP 晶体管相比,GLPNP 晶体管在集电极和发射极之间的基区氧化层上多了一个栅极,形成类 MOS 场效应管结构。GLPNP 晶体管的集电极类似于 MOS 晶体管的漏极,发射极类似于 MOS 晶体管的源极。通过调整栅极电压,控制有源基区表面载流子的运动,使晶体管在积累、反型、耗尽模式下工作,从而使晶体管兼具 MOS 场效应管和双极晶体管特性,进而更好地研究双极器件辐照电离损伤行为。GLPNP 晶体管封装在 16 管脚双列直插式陶瓷管壳内,各晶体管之间管脚独立,性能互不影响。在浸泡氢气及辐照试验前,对 GLPNP 晶体管进行开帽处理。一部分试样需要浸泡在浓度为 100% 的氢气中,为了确保试样中氢气达到饱和,需要将试样浸泡在氢气氛围中至少 48 h 后进行辐照试验。

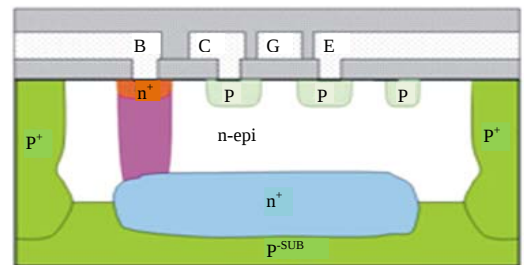


Fig.1 Representative cross-sections of the GLPNP transistor
图 1 GLPNP 型双极晶体管结构示意图

1.2 辐照试验

本文选用黑龙江省科学院技术物理研究所 1 MeV 电子加速器进行辐照试验,辐照束流为 $1.1 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,辐照注量为 $2.8 \times 10^{13} \text{ e}/\text{cm}^2$ 。

1.3 测试方法

辐照过程中试样的电性能参数采取原位测试方法,原位测试的时间不超过 2 min,测试后立即进行辐照,每个剂量点均测试 GLPNP 型双极晶体管的电性能参数,包括:Gummel 曲线、电流增益、栅扫描。均通过 KEITHLEY 4200-SCS 半导体器件电性能参数测试仪完成。Gummel 曲线的测量条件为:发射极接扫描电压,以 0.01 V 的扫描步长,从 0.3 V 扫描至 1.2 V,即 $U_E = 0.3 \sim 1.2 \text{ V}$;基极和集电极接 0 V 电压,即 $U_B = U_C = U_{BC} = 0 \text{ V}$,测试 I_B 和 I_C 随 U_{BE} 的变化。GS 测试就是栅极接扫描电压,从积累区扫描至反型区时,基极电流 I_B 随栅压 U_G 的变化关系。栅控 PNP 晶体管以正向有源模式测试,扫描栅压以 1 V 的步长从积累区到反型区(30~150 V),而基极、集电极接地,发射极电压固定为 0.5 V。

深能级瞬态谱仪(DLTS)是目前检测半导体材料和器件中深能级缺陷最有效的方法。本文基于 PhysTech FT1030 深能级瞬态谱测试系统,对不同辐照注量的栅控 PNP 型晶体管电离损伤缺陷进行分析测试,选取栅控器件中掺杂浓度较低的基区进行 DLTS 测试。反向偏压 $U_R=5\text{ V}$, 脉冲电压 $U_p=0.1\text{ V}$, 测试周期 $T_W=2\text{ s}$, 脉冲宽度 $T_p=0.01\text{ s}$, 温度从 50 K 扫描到 320 K 。

2 结果与讨论

2.1 氢气氛下 GLPNP 晶体管 Gummel 特性曲线变化规律

图 2 为在空气气氛下 1 MeV 电子辐照时 GLPNP 双极晶体管基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 随发射极电压 V_{BE} 的变化关系曲线。由图可见,电子辐照过程中, GLPNP 型双极晶体管的基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 随发射结电压增加而升高;在给定发射结电压时,随辐照注量的增加,基极电流呈明显上升趋势,而集电极电流几乎未发生变化。这一现象说明了晶体管电离辐射损伤主要是由于辐照导致的基极电流增加所造成的。

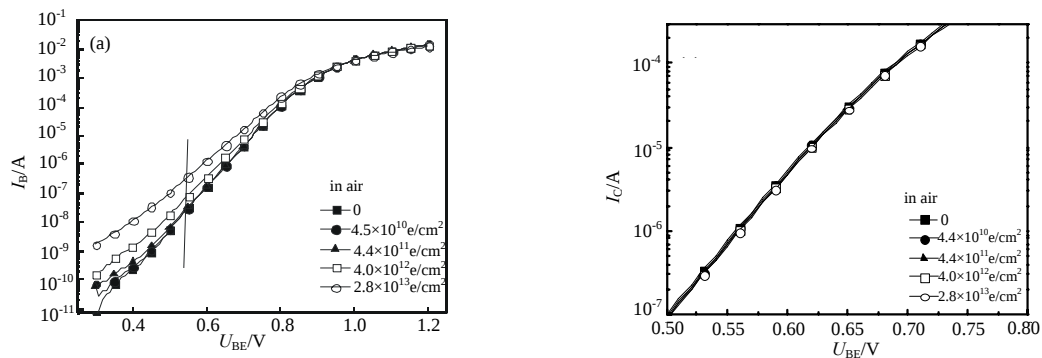


Fig.2 Variations of base current(I_B) and collector current(I_C) with base-emitter voltage(U_{BE}) for GLPNP transistors in air irradiated by 1 MeV electrons with various fluences($U_{BC}=0\text{ V}$)

图 2 1 MeV 电子辐照过程中空气气氛下 GLPNP 晶体管 I_B, I_C 随 U_{BE} 的变化关系

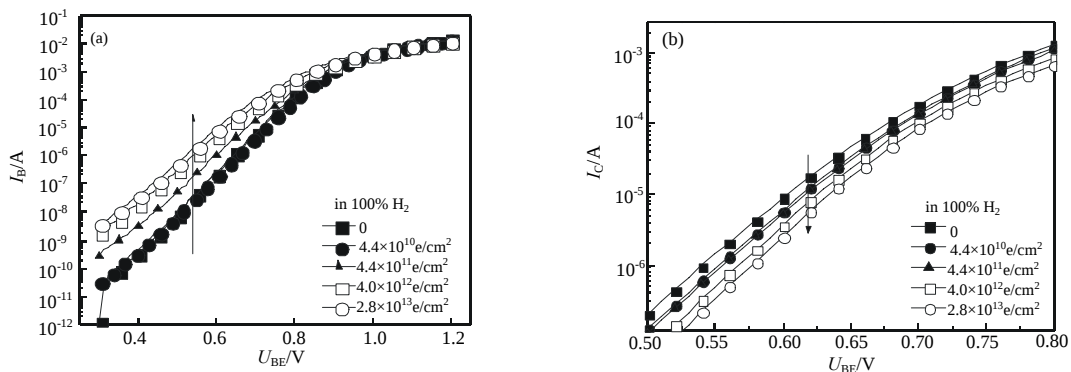


Fig.3 Variations of base current(I_B) and collector current(I_C) with base-emitter voltage(U_{BE}) for GLPNP transistors in 100% H_2 irradiated by 1 MeV electrons with various fluences($U_{BC}=0\text{ V}$)

图 3 氢气气氛下 1 MeV 电子辐照过程中 GLPNP 晶体管 I_B, I_C 随 V_{BE} 的变化关系

图 3 为在氢气气氛下 1 MeV 电子辐照时 GLPNP 双极晶体管基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 随发射极电压 V_{BE} 的变化关系曲线。通过对比图 3 和图 2 可知,在氢气和空气气氛下电子辐照过程中, GLPNP 型双极晶体管的基极电流 I_B 和集电极电流 I_C 随发射结电压变化趋势相似。不同的是,在氢气气氛下 1 MeV 电子辐照时,随着注量的增加,基极电流呈逐渐上升趋势,而集电极电流却逐渐降低。这说明在氢气气氛下晶体管电离辐射损伤,不仅导致基极电流增加,也会导致集电极电流降低。另外,当发射极电压相等时,与空气气氛下相比,氢气气氛下基极电流增加的幅度大,如图 4 所示。这说明,氢气气氛下 1 MeV 电子对晶体管所造成的电离辐射损伤严重。

电流增益是集电极电流和基极电流的比值,也就是 $\beta = I_C/I_B$ 。从 Gummel 特性曲线中可以获得晶体管的电流增益 β 。本文的电流增益为发射结正偏电压 $U_{BE}=0.65\text{ V}$ 时,集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值。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 5 为 1 MeV 电子辐照时不同气氛条件下 GLPNP 型晶体管的电流增益倒数的变化量随辐照注量的变化曲线。从图中可以看到,无论在空气气氛下还是在氢气气氛下,随着辐照注量的增加,电流增益倒数逐渐增加,即电流增益逐渐变小。重要的是,当辐照注量相同时,在氢气气氛下晶

晶体管电流增益倒数的变化量要明显大于在空气气氛下的值。这充分说明氢气加速了 GLPNP 型双极晶体管电子辐照引起的电流增益退化程度。另外,由图 5 还可以看出,在本文所选的辐照剂量范围内,在空气气氛下, GLPNP 型晶体管的电流增益倒数的变化量随辐照剂量呈线性增加;而在氢气气氛下,随辐照剂量电流增益倒数的变化量曲线先呈线性增加,然后趋于饱和,这也说明氢气加速了 GLPNP 型双极晶体管的电离辐射损伤。

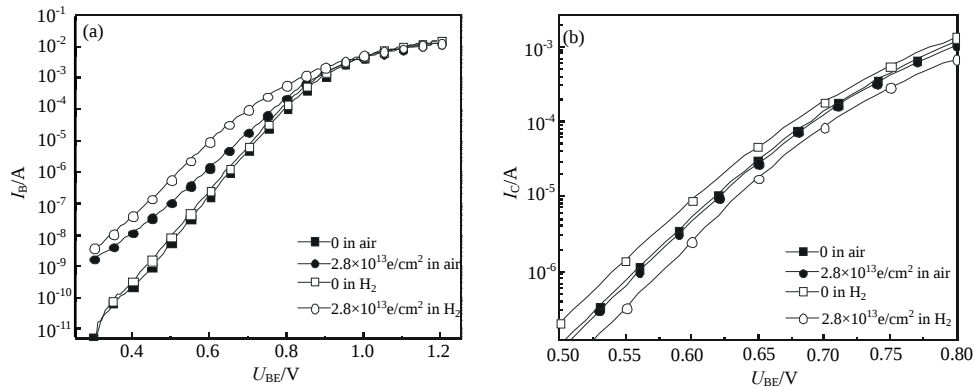


Fig.4 Variations of base current(I_B) and collector current(I_C) with base-emitter voltage(U_{BE}) for GLPNP transistors in different environments irradiated by 1 MeV electrons with various fluencies

图 4 不同气氛下 1 MeV 电子辐照时 GLPNP 晶体管 I_B, I_C 随 U_{BE} 的变化关系对比

图 6 示出不同气氛下 1 MeV 电子辐照过程中 GLPNP 晶体管基极电流 I_B 随栅极电压 U_G 变化曲线。已有文献研究表明^[14-15], 辐射产生的氧化物陷阱电荷(Not)会造成电流峰值水平移动;而电流峰值随辐照剂量在垂直方向移动,则主要是由于界面陷阱电荷(Nit)的产生所造成。由图 6(a)可知,随着辐照剂量的增加,基极电流 I_B 的峰单调向左下方移动,即峰值对应的基极电流单调增加;栅极电压单调向负值方向移动,说明辐照过程中氧化物电荷和界面态陷阱均在逐渐积累。由图 6(b)可知,对于氢气气氛条件下,随着辐照剂量的增加,基极电流 I_B 的峰不仅仅向左下方移动,而且基极电流峰值还出现明显的展宽现象,且辐照剂量越高,展宽现象越显著。文献[15]认为基极电流峰值展宽是由于在双极晶体管 Si/SiO₂ 界面处累积大量的界面态陷阱所致。在氢气气氛下基极电流峰值出现展宽现象,说明氢气处理后,辐照导致 GLPNP 晶体管内部产生了更多的界面态陷阱。通过对比可知,相同辐照剂量时,与空气气氛相比,在氢气气氛下 GLPNP 晶体管的基极电流峰值向左下方移动,如图 7 所示。这说明在氢气气氛下 1 MeV 电子辐照 GLPNP 晶体管时产生更多的氧化物电荷和界面态陷阱。

由于 GLPNP 型双极晶体管的基极电流峰值出现明显展宽现象,难于准确定位出中电电压位置,故不再适合提取计算氧化物电荷和界面态。DLTS 能够有效表征晶体管辐照诱导的氧化物电荷和界面态陷阱。图 8 示出了不同气氛下 1 MeV 电子辐照 GLPNP 晶体管时不同辐照剂量的 DLTS 谱。由图可知, GLPNP 型晶体管的 DLTS 信号为正值,这就说明 1 MeV 电子辐照后在 GLPNP 晶体管基区产生的缺陷信号是多子陷阱中心。2 种气氛条件下, DLTS 图谱均只出现一个与界面态相关的峰^[13],而未出现与氧化物电荷相关的峰,这说明电离损伤主要是由于辐照使晶体管内部产生大量界面态所致。从图中可以看出,随着辐照剂量的增加, GLPNP 晶体管的缺陷峰向左移,更重要的是,相同辐照剂量时,氢气气氛条件下晶体管的缺陷峰也向左移。这说明氢气气氛和辐照剂量均会改变器件辐照电离损伤缺陷的能级。

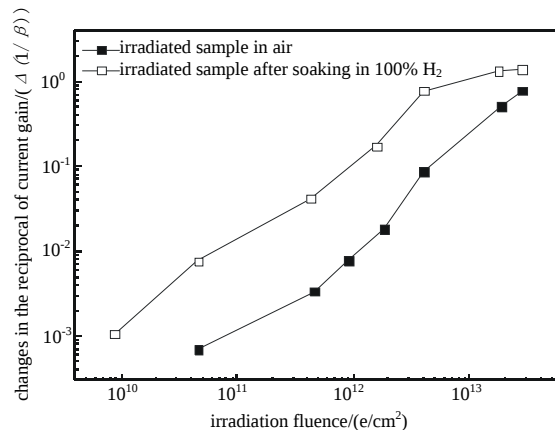


Fig.5 Change in the reciprocal of current gain vs. fluence for GLPNP transistors in different environments irradiated by 1 MeV electrons and 70 keV electrons($U_{BE}=0.65$ V)

图 5 不同气氛下 1 MeV 电子辐照过程中 GLPNP 晶体管电流增益倒数的变化量变化曲线

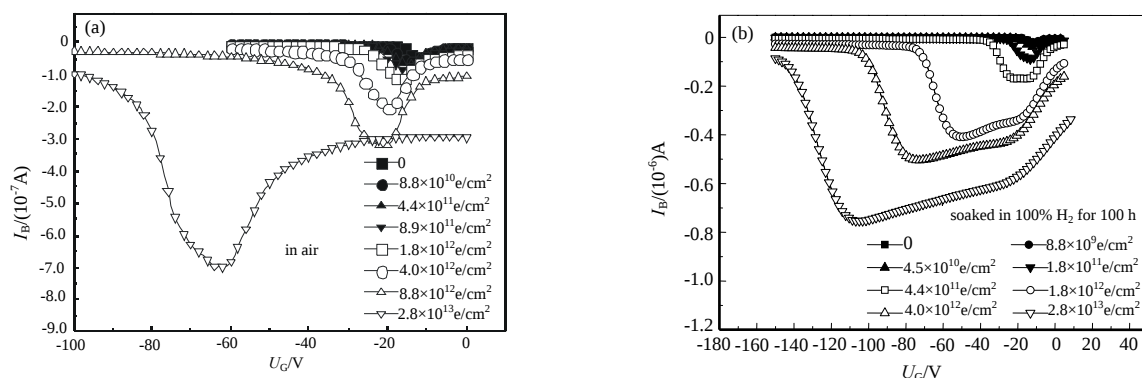


Fig.6 Base current versus gate bias measured prior to and after 1 MeV electron exposure for GLPNP transistors (a) in air and (b) in 100% H₂
图 6 不同气氛下 1 MeV 电子辐照过程中 GLPNP 晶体管基极电流 I_B 随栅极电压 U_G 变化曲线

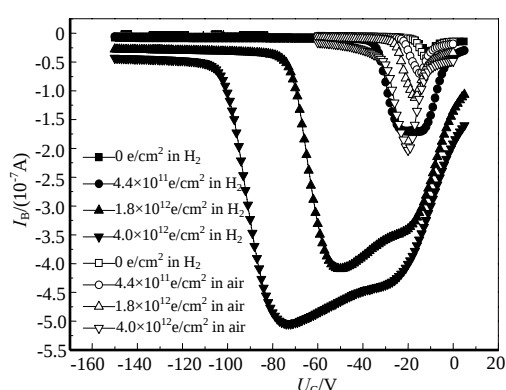


Fig.7 Base current versus gate bias measured prior to and after 1 MeV electron exposure for GLPNP transistors in different environments
图 7 不同气氛下 1 MeV 电子辐照时 GLPNP 晶体管 I_B 随 U_G 的变化关系对比

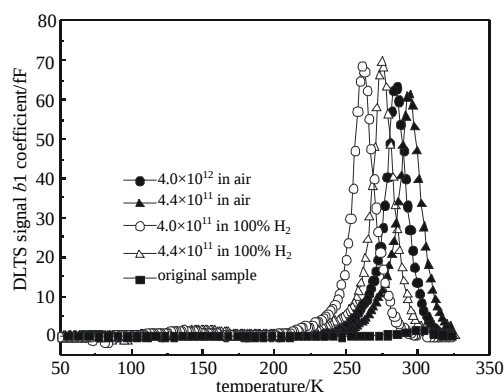


Fig.8 DLTS spectra of the base-collector junction of the irradiated GLPNP transistors by 1 MeV electrons in different environments
图 8 不同气氛下 1 MeV 电子辐照 GLPNP 晶体管时不同辐照剂量的 DLTS 谱

3 结论

通过研究氢气和空气气氛条件下 1 MeV 电子辐照 GLPNP 型双极晶体管的辐射损伤缺陷行为,得出如下主要结论:

1) 当发射极电压相等时,与空气气氛下相比,氢气气氛下基极电流增加的幅度大;在本文所选的辐照剂量范围内,在空气气氛下, GLPNP 型晶体管的电流增益倒数的变化量随辐照剂量呈线性增加;而在氢气气氛下,随辐照剂量电流增益倒数的变化量曲线先呈线性增加,然后趋于饱和。上述现象均说明氢气加速了 GLPNP 型双极晶体管的电离辐射损伤。

2) 与空气气氛下相比,在氢气气氛下 1 MeV 电子辐照 GLPNP 晶体管时产生更多的氧化物电荷和界面态陷阱,导致基极电流峰值存在着明显的展宽现象。

3) 通过 DLTS 分析表明,2 种气氛条件下,DLTS 图谱均只出现 1 个与界面态相关的特征峰,这说明晶体管电离损伤主要是由于辐照使其内部产生大量的界面态所致。并且,氢气气氛和辐照剂量均会改变器件辐照电离损伤缺陷的能级。

参考文献:

- [1] LI X J, LIU C M, RUI E M, et al. Simultaneous and sequential radiation effects on NPN transistors induced by protons and Electrons[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2012(59):625-633.
- [2] BARNABY H J, SCHRIMPF R D, GALLOWAY K F, et al. Test structures for analyzing proton radiation effects in bipolar technologies[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2003(16):253-258.
- [3] LI X J, LIU C M, YANG J Q, et al. Evolution of deep level centers in NPN transistors following 35 MeV Si ion irradiations with high fluence[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2014, 61(1):630-635.
- [4] ROWSEY N L, LAW M E, SCHRIMPF R D, et al. Radiation-induced oxide charge in low- and high-H₂ environments[J].

- Microelectronics Reliability, 2012(59):755–759.
- [5] SCHWANK J R,FLEETWOOD D W,WINOKUR P S,et al. The role of hydrogen in radiation-induced defect formation in polysilicon-gate CMOS devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1987(34):1152–1158.
- [6] MRSTIK B J,RENDELL R W. Si-SiO₂ interface state generation during X-Ray irradiation and during post-irradiation exposure to a hydrogen ambient[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991(38):1101–1110.
- [7] PANTELIDES S T,RASHKEEV S N,BUCZKO R,et al. Reactions of hydrogen with Si-SiO₂ interfaces[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000(47):2262–2268.
- [8] TUTTLE B R,HUGHART D R,SCHRIMPF R D,et al. Defect interactions of H in SiO₂:implications for ELDRS and latent interface trap buildup[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010(57):3046–3053.
- [9] MINSON E,SANCHEZ I,BARNABY H J,et al. Assessment of gated sweep technique for total dose and dose rate analysis in bipolar oxides[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004(51):3723–3729.
- [10] KOSIER S L,SCHRIMPF R D,WEI A,et al. Effects of oxide charge and surface recombination velocity on the excess base current of BJTs[J]. IEEE Bipolar Circuits and Technology Meeting, 1993:211–214.
- [11] BALL D R,SCHRIMPF R D,BARNABY H J. Separation of ionization and displacement damage using gate-controlled lateral PNP Bipolar Transistors[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2002(49):3185–3190.
- [12] CHEN X J,BARNABY H J,RONALD L,et al. Radiation-induced base current broadening mechanisms in gated bipolar devices[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2004(51):3178–3185.
- [13] LI X J,LIU C M,YANG J Q,et al. Separation of ionization traps in NPN transistors irradiated by lower energy electrons[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2013(60):3924–3931.
- [14] 马武英,王志宽,陆妩,等. 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[J]. 物理学报, 2014, 63(11):218–223. (MA W Y,WANG Z K,LU W,et al. The base current broadening effect and charge separation method of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors[J]. Acta Phys, 2014,63(11):218–223.)
- [15] 席善斌,陆妩,任迪远,等. 栅控横向 PNP 双极晶体管电离辐射效应[J]. 核技术, 2012,35(11):827–832. (XI S B, LU W, REN D Y,et al. Radiation effect of gate controlled lateral PNP BJTs[J]. Nuclear Techniques, 2012,35(11):827–832.)

作者简介:

李兴冀(1981–), 哈尔滨市人, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电子元器件辐射损伤机理及抗加固技术工作.
email:lxj0218@hit.edu.cn.

陈朝基(1982–), 石家庄市人, 男, 工程师, 主要从事航天器总体及元器件相关设计工作.

杨剑群(1976–), 哈尔滨市人, 女, 高级工程师, 主要从事电子元器件辐射损伤机理及辐射防护技术方面研究工作.

刘超铭(1986–), 哈尔滨市人, 男, 副教授, 主要从事电子元器件辐射损伤机理及抗辐射加固技术方面研究工作.

马国亮(1979–), 哈尔滨市人, 男, 工程师, 主要从事电子元器件辐射损伤机理及抗辐射加固技术方面研究工作.