

文章编号: 2095-4980(2017)05-0874-06

## 偏置条件对双极晶体管位移辐射损伤的影响

刘 莉<sup>1</sup>, 董 磊<sup>2,3</sup>, 刘超铭<sup>2</sup>, 李兴冀<sup>2</sup>, 杨剑群<sup>2</sup>, 马国亮<sup>2</sup>

(1.中国空间技术研究院 宇航物资保障事业部, 北京 100029; 2.哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江省 哈尔滨 150001)  
3.哈尔滨师范大学 物理与电子工程学院, 黑龙江省 哈尔滨 150025)

**摘 要:** 选用 35 MeV Si 离子, 针对 NPN 及 PNP 型双极晶体管(BJT)进行辐照实验, 探究重离子辐照条件下双极晶体管辐射损伤及缺陷在不同发射结偏置条件下的影响规律。通过原位测试不同偏置条件的双极晶体管电流增益等参数随辐照注量的变化关系, 研究了发射结偏置条件对双极晶体管辐射损伤的影响。此外, 采用深能级瞬态谱(DLTS)针对辐照后的双极晶体管进行了测试, 得到了双极晶体管内的辐射缺陷信息。基于电性能测试和 DLTS 分析结果可以看出, 双极晶体管辐照时所施加的偏置条件能够明显地影响器件的电性能参数和器件内的深能级缺陷浓度, 不同类型的缺陷对于电性能的影响也存在明显差异。

**关键词:** 双极晶体管; 重离子辐照; 位移辐射; 深能级缺陷

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0874

## Effect of displacement radiation damage on bipolar junction transistors under various bias conditions

LIU Li<sup>1</sup>, DONG Lei<sup>2,3</sup>, LIU Chaoming<sup>2</sup>, LI Xingji<sup>2</sup>, YANG Jianqun<sup>2</sup>, MA Guoliang<sup>2</sup>

(1.China Aerospace Components Engineering Center, China Academy of Space Technology, Beijing 100029, China;

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

3.School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang 150025, China)

**Abstract:** 35 MeV Si ion is adopted as the irradiation source to research the displacement radiation damage and defects on NPN and PNP Bipolar Junction Transistors(BJTs) under various bias cases. The changing of electrical parameters of BJTs is in situ measured with increasing irradiation fluence of 35 MeV Si ions. By using Deep Level Transient Spectroscopy(DLTS), deep level defects in the bipolar junction transistors under various bias conditions are measured after irradiation. Based on the in situ electrical measurement and DLTS spectra, it is clearly that the bias conditions could affect the concentration of deep level defects, and the radiation damage induced by heavy ions. Different types of defects give different contributions to the electrical performance degradation. The vacancy related defects( $U_2(-/0)$  and  $U_2(+/0)$ ) can give more obvious contributions to the current gain degradation than other defects.

**Keywords:** bipolar junction transistor; heavy ions; displacement radiation; deep level defects

空间带电粒子会对航天器上的电子元器件造成严重的辐射损伤, 是造成航天器在轨故障和失效的重要因素<sup>[1-5]</sup>。双极晶体管(BJT)是航天器电子设备的重要组成部分, 对位移辐射效应较为敏感<sup>[6-10]</sup>。因此, 采用合理的地面模拟手段, 针对在辐射环境下应用的双极晶体管进行空间位移辐射效应的研究工作具有十分重要的工程实际意义。重离子能够在材料内部产生大量的位移辐射损伤, 同时重离子在材料内部所产生的电离损伤(电子空穴对)由于区域密度较大, 能够以很快的速度复合, 从而降低所产生的电离损伤, 所以重离子源较适于研究少量电离损伤条件下的位移辐射损伤。双极晶体管辐照效应的研究通常针对晶体管的电性能参数(如电流增益等)受辐射损伤的影响<sup>[11-13]</sup>, 而对于辐射在器件内部所产生的缺陷以及缺陷对于器件电性能的影响研究较少。本文将基于 DLTS 缺陷分析手段, 深入研究双极晶体管的重离子辐照后辐射缺陷的特性及演化规律。

收稿日期: 2015-08-10; 修回日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61404038, 11205038); 黑龙江省博士后科学基金资助项目(LBH-Z14073); 中央基本科研业务费专项资金资助项目(HIT.NSRIF.2015001)

处于辐射环境中的双极晶体管，在受到辐射时通常处于工作状态，所施加的工作偏置条件对器件的辐射损伤有着明显的影响，同时也会影响器件内部辐射缺陷的产生。此前国际上关于偏置条件对辐射损伤影响的研究主要针对电离辐射效应进行<sup>[14-15]</sup>，而关于偏置条件对位移辐射损伤的影响研究较少。因此，本文将针对不同偏置条件下双极晶体管的辐射损伤效应及辐射缺陷进行研究。

### 1 试验器件与试验方法

本文选用的实验样品分别为石家庄无线电二厂所生产的 3DG130(NPN)和 3CG130(PNP)2 类双极晶体管，为了避免所选样品的工艺性差异，本次试验均选择同一批次的样品。晶体管结构示意图如图 1 所示。2 类晶体管的结构尺寸参数如表 1 所示。3DG130 晶体管各区域的掺杂浓度分别为  $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (集电区)， $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (基区)及  $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (发射区)；3CG130 晶体管各区域的掺杂浓度分别为  $2.48 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  (集电区)， $1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (基区)及  $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (发射区)。

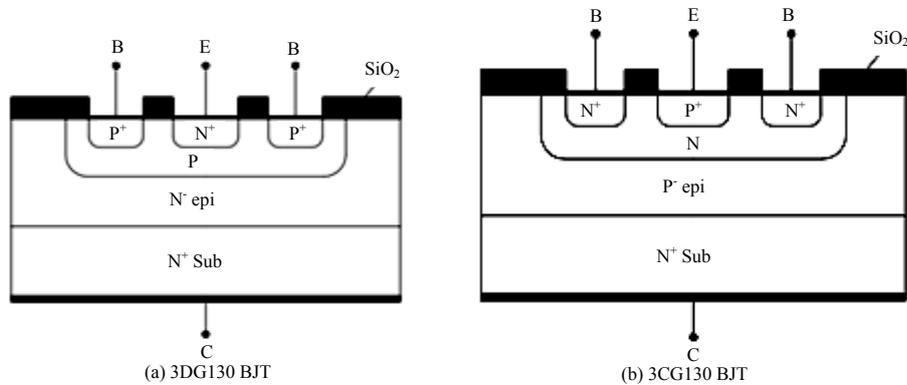


Fig.1 Schematic of bipolar junction transistors  
图 1 双极晶体管结构示意图

表 1 3DG130 (NPN)和 3CG130(PNP)双极晶体管的结构尺寸参数  
Table1 Structure parameters of 3DG130 NPN BJT and 3CG130 PNP BJT

type	oxide layer/ $\mu\text{m}$	emitter region/ $\mu\text{m}$	base region/ $\mu\text{m}$	collector region/ $\mu\text{m}$
3DG130	0.6	1.2	1.3	12
3CG130	0.6	1.0	4.0	12

本文选取 35 MeV Si 离子进行辐照试验，辐照通量为  $1.0 \times 10^7 \text{ ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。重离子辐照试验可在北京大学重离子物理研究所的串列式粒子加速器上进行。由于粒子能量的限制，入射重离子无法穿透器件的封装材料，因此在辐射实验之前需要将所有受测器件进行开封处理，使入射粒子能够直接照射到芯片上。通过 SRIM 软件计算，所选的 35 MeV Si 离子在芯片内部的射程可达 12.5  $\mu\text{m}$ ，可以完全穿透晶体管的敏感区，在入射路径上产生位移辐射缺陷。

为了保证辐照实验的准确性，在辐照试验过程中，采用在线原位的方法针对双极晶体管的电性能参数进行测试。双极晶体管电性能参数测试的仪器为 Keithley 4200-SCS 半导体特性分析仪。辐照后的试验样品将采用 DLTS 进行缺陷分析，DLTS 采用 PhysTech HERA-DLTS 进行测试。

为了深入研究辐照条件下处于不同状态的双极晶体管的电性能变化规律及机理，本文选取 3 种常用的发射结偏置条件(正偏、反偏和零偏)来研究双极晶体管的辐射损伤机制，具体偏置条件如下：

1) 对于 NPN 型晶体管，零偏条件为  $U_{BE} = U_{BC} = 0$ ；正偏条件为  $U_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ， $U_{BC} = 0$ ；反偏条件为  $U_{BE} = -4 \text{ V}$ ， $U_{BC} = 0$ ；

2) 对于 PNP 型晶体管，零偏条件为  $U_{EB} = U_{BC} = 0$ ；正偏条件为  $U_{EB} = 0.7 \text{ V}$ ， $U_{BC} = 0$ ；反偏条件为  $U_{EB} = -4 \text{ V}$ ， $U_{BC} = 0$ 。

### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 双极晶体管电性能变化规律

图 2 为全部管脚接地条件下的 3DG130 型 NPN 晶体管的 Gummel 特性曲线随 35 MeV Si 离子辐照注量的变

化结果( $U_{BC}=0$ )。如图 2 所示, 在 35 MeV Si 离子辐照过程中, 随着辐照注量的增加, 双极晶体管的基极电流  $I_B$  随着辐照注量的增加逐渐升高, 而集电极电流  $I_C$  基本保持不变。根据结果可见, 对于双极晶体管, 在 35 MeV Si 离子辐照条件下, 集电极电流  $I_C$  受辐射损伤的影响较小, 而基极电流  $I_B$  对于辐射损伤较为敏感。由于对于不同发射结偏置条件的晶体管其 Gummel 曲线的变化规律均类似, 其他 2 种偏置条件的 Gummel 曲线结果在此并未放置在文中。图 3 为全部管脚接地条件下的 3CG130 型 PNP 晶体管的 Gummel 特性曲线随 35 MeV Si 离子辐照注量的变化结果( $U_{BC}=0$ ), 变化规律与 NPN 型晶体管类似。

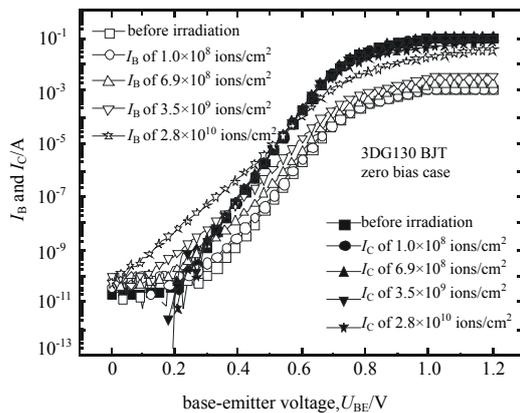


Fig.2 Variations of base current( $I_B$ ) and collector current( $I_C$ ) with base-emitter voltage( $U_{BE}$ ) for NPN 3DG130 transistors irradiated by 35 MeV silicon with various fluences

图 2 3DG130 型 NPN 晶体管的 Gummel 特性曲线随 35 MeV Si 离子辐照注量的变化结果

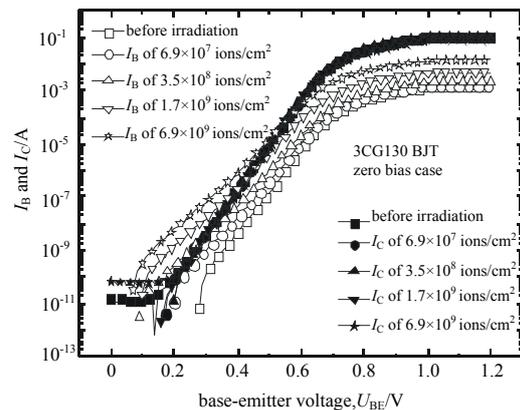


Fig.3 Variations of base current( $I_B$ ) and collector current( $I_C$ ) with base-emitter voltage( $U_{BE}$ ) for PNP 3CG130 transistors irradiated by 35 MeV Si ions with various fluences

图 3 3CG130 型 PNP 晶体管的 Gummel 特性曲线随 35 MeV Si 离子辐照注量的变化结果

基极电流的升高主要是由于 PN 结复合电流的增加, PN 结的复合电流可表示为  $\exp(qU_{BE}/nkT)$ , 此处  $n$  为理想因子, 与氧化物电荷和正向结电压有关;  $q$  为单位电荷;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度;  $U_{BE}$  为发射结电压<sup>[16]</sup>。当 PN 结的复合速率达到峰值时, 其理想因子将等于 2, 此时在结区表面以下的部分为复合过程作用最大的区域。而其他状态下理想因子的数值将处于 1 和 2 之间, 此时在结区表面的复合过程占主导作用。如图 1 和图 2 的结果所示, 在辐照之前, 基极电流曲线的斜率近似于  $n=1$ , 但随着辐照注量的升高斜率逐渐接近于  $n=2$ 。

在实际应用中, 电流增益是双极晶体管最为重要的参数之一, 针对双极晶体管的电流增益变化规律进行研究, 可以直观地反映晶体管电性能的变化。电流增益为集电极电流与基极电流之比( $\beta=I_C/I_B$ ), 可由上文所给出的 Gummel 特性曲线计算得到。为了便于比较, 本文选取发射结电压( $U_{BE}$  或  $U_{EB}$ ) 为 0.65 V 时的电流增益。为了更好地分析双极晶体管电流增益的退化规律, 基于 Messenger-Spratt 方程<sup>[17]</sup>, 将器件的电流增益退化结果处理为电流增益倒数的变化量( $\Delta(1/\beta)$ )。其中,  $\Delta(1/\beta)=1/\beta-1/\beta_0$ , 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。电离辐射损伤主要是在氧化层内产生俘获正电荷和在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面处产生界面态, 从而对双极器件的基极电流产生影响, 导致晶体管的电流增益产生退化。电离辐射损伤在辐照试验初期会随着辐照注量的升高逐渐加深, 但当辐照注量增大到一定程度时, 电离辐射损伤的产物(氧化物俘获电荷和界面态)不再随着辐照注量的增加继续变化, 趋于饱和。对于位移辐射损伤, 主要是在双极晶体管的硅材料内部(尤其是中性基区)产生空位和间隙原子, 这些缺陷会彼此结合或和基区内的杂质产生深能级缺陷, 所产生的深能级缺陷可作为有效的复合中心降低了中性基区内部的少数寿命, 增大了基区内的体复合电流, 从而使得晶体管的电流增益降低。随着辐照注

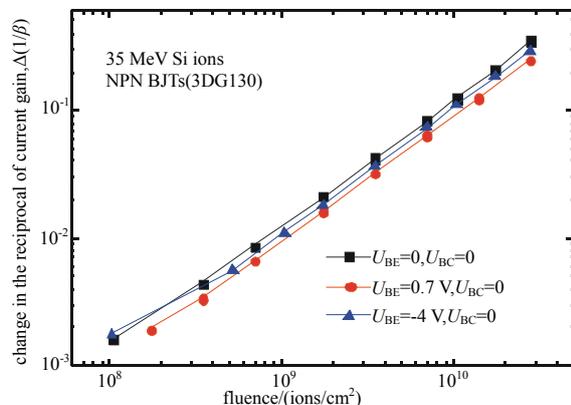


Fig.4 Changes in the reciprocal of current gain as a function of fluence for NPN transistors irradiated by 35 MeV Si ions under various bias conditions

图 4 不同偏置条件下 NPN 晶体管电流增益倒数变化量随辐照注量的变化结果

量的升高，缺陷密度会一直增加，其性能退化并无饱和趋势，且位移损伤条件下，电流增益的倒数变化量与粒子注量呈线性关系。

图 4 和图 5 分别为发射结不同偏置条件时 3DG130 型 NPN 晶体管和 3CG130 型 PNP 晶体管的电流增益倒数变化量随 35 MeV Si 离子辐照注量的变化曲线。如图所示，NPN 和 PNP 型双极晶体管的电流增益倒数变化量随 35 MeV Si 离子注量增加而逐渐升高，在较小注量时处于非线性升高，当注量较高时基本呈线性升高。根据 Messenger-Spratt 方程，可以判定 35 MeV Si 离子在晶体管中所产生的辐射损伤在较小注量时以电离辐射损伤为主，当辐射注量较高时以位移辐射损伤为主。比较不同偏置条件下晶体管的辐射损伤结果可见，偏置条件对于双极晶体管的电流增益退化有明显的影响。对于 NPN 和 PNP 型晶体管，偏置条件影响基本一致，其中发射结零偏偏置器件受到的辐射损伤最大，反偏偏置的器件其次，正偏偏置条件器件受到的辐射损伤最小。

重离子会在双极晶体管内部同时产生电离和位移辐射损伤。当辐照注量较小时，入射粒子在晶体管内部所产生的电离吸收剂量远大于位移吸收剂量，此时辐射损伤以电离辐射损伤为主。根据此前的研究，当晶体管发射结处于反偏偏置时，晶体管内部将产生更大的电离辐射损伤，将在晶体管的氧化层中累积更多的俘获正电荷；而正偏条件下，氧化层中所累积的俘获正电荷最少。此时，反偏条件下的晶体管所受的辐射损伤最大。

随着辐照注量的升高，电离辐射损伤逐渐趋于饱和，此时位移损伤占器件辐射损伤的主要部分，晶体管的电流增益退化也呈现出线性规律。然而，氧化物累积正电荷会对位移辐射损伤产生一定的影响。氧化物正电荷会降低基区表面的多子浓度，从而增加了体复合电流，降低了基区与表面的载流子密度差。这些效应会使位移缺陷部分发生回复。因此，反偏条件下的晶体管所受到的辐射损伤略低于零偏条件的晶体管。而当双极晶体管的发射结处于正偏时，会向基区内注入电荷(少子)。额外少子的注入同样会对重离子产生的位移缺陷产生回复作用，使器件的电流增益损伤程度降低。因此，正偏条件下晶体管所受到的辐射损伤也低于零偏条件下的晶体管。

### 2.2 双极晶体管辐射缺陷分析

半导体器件的性能直接受到半导体材料中缺陷行为的影响。这些缺陷主要包括晶体中的有害杂质原子(如金属杂质)、点缺陷(如空位和各种间隙原子)和一些扩展缺陷(如位错、层错和晶界)等。目前，DLTS 是检测半导体材料中深能级杂质和晶体缺陷的最有效的方法之一，其检测灵敏度可达半导体材料中掺杂浓度的十万分之一甚至更低<sup>[18]</sup>。本文将通过 DLTS 针对双极晶体管的辐射深能级缺陷进行研究。由于 DLTS 的测试精确度与半导体材料的掺杂浓度有关，为了提高测试精确度，本文选用各器件的集电结来进行测试。温度扫描范围从 50 K 至 300 K，并在各个温度点下记录集电结的电容瞬态变化曲线。对于 NPN 型晶体管，测试电容的反向偏压为 -10 V，脉冲电压为 -0.1 V；对于 PNP 型晶体管，测试电容的反向偏压为 10 V，脉冲为 0.1 V。瞬态电容测试的测试周期为 2.048 s，为了确保缺陷能够完全被脉冲填充，脉冲时间设定为 100 ms。

图 6 为不同发射结偏置条件下，35 MeV Si 离子辐照 NPN 型晶体管的深能级瞬态谱。如图所示，重离子辐照过程中施加不同偏置条件时，NPN 型晶体管所产生

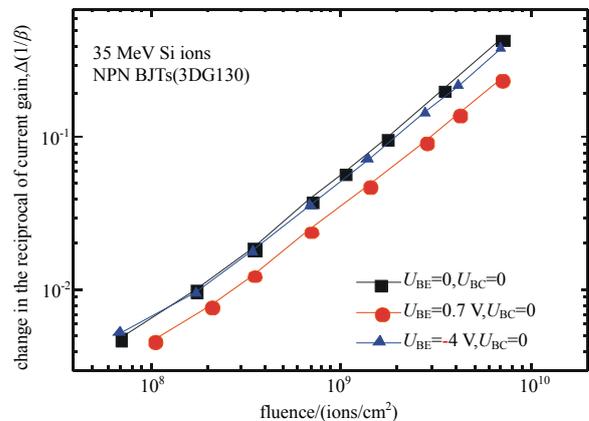


Fig.5 Changes in the reciprocal of current gain as a function of fluence for PNP transistors irradiated by 35 MeV Si ions under various bias conditions

图 5 不同偏置条件下 PNP 晶体管电流增益倒数变化量随辐照注量的变化结果

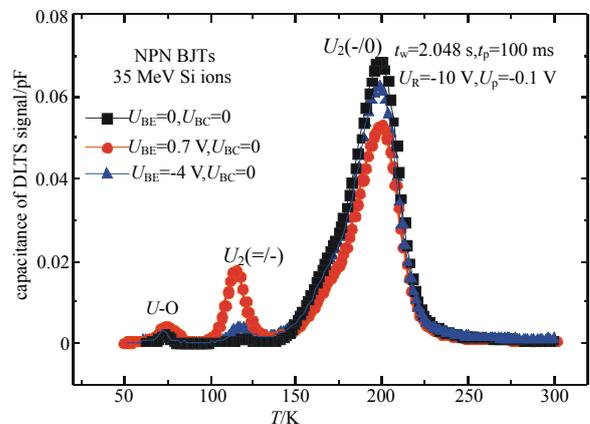


Fig.6 DLTS spectra of NPN transistors irradiated by 35 MeV Si ions under various bias conditions

图 6 不同偏置条件下 35 MeV Si 离子辐照 NPN 型晶体管的深能级瞬态谱结果

的深能级缺陷类型基本相同。NPN 型晶体管位移辐射损伤缺陷的深能级瞬态谱主要存在 3 个信号峰。其中, DLTS 信号峰值位置在 75 K 附近的缺陷为氧空位缺陷 (V-O, 又称 A 心), 能级约为  $E_C-0.12$  eV; DLTS 信号峰值位置在 110 K 附近的缺陷为  $U_2(=/-)$  缺陷, 能级约为  $E_C-0.22$  eV; DLTS 信号峰值位置在 200 K 附近的 DLTS 信号峰为  $U_2(-/0)$  缺陷, 能级约为  $E_C-0.41$  eV<sup>[19]</sup>。

DLTS 信号中, 信号的 X 轴坐标位置与该缺陷的缺陷能级有关, 而缺陷信号峰的高度与缺陷的浓度有关。由图中的结果所示, 不同偏置条件的 NPN 型晶体管辐照后所产生的深能级缺陷的类型相同, 而浓度并不相同。对于  $U_2(-/0)$  缺陷, 零偏条件的器件受到辐射后所产生的  $U_2(-/0)$  缺陷浓度最大, 正偏条件的器件产生的  $U_2(-/0)$  缺陷浓度最小。对于  $U_2(=/-)$  缺陷, 正偏条件的器件受到辐射后所产生的  $U_2(=/-)$  缺陷浓度最大, 零偏条件的器件产生的  $U_2(=/-)$  缺陷浓度最小。对于氧空位缺陷, 正偏条件的器件受到辐射后所产生的缺陷浓度较大, 其他 2 种偏置条件的器件所产生的氧空位缺陷浓度较小。对比图 6 与图 4 的结果可知, 3 种主要深能级缺陷当中  $U_2(-/0)$  缺陷的浓度与电流增益变化趋势一致。这表明不同类型的深能级缺陷对器件电性能的影响是不同的, 且有明显的主次之分, 对于 NPN 型晶体管来说, 空位相关的  $U_2(-/0)$  缺陷对晶体管的电流增益影响更为强烈。

图 7 为不同发射结偏置条件下, 35 MeV Si 离子辐照 PNP 型晶体管的 DLTS 测试结果。如图所示, 对于辐照过程中施加不同偏置条件的 PNP 型晶体管, 受到重离子辐照后, 所产生的深能级缺陷类型基本相同, 但缺陷浓度略有不同。PNP 型晶体管位移辐射损伤缺陷的深能级瞬态谱主要存在 2 个信号峰, 其中, DLTS 信号峰值位置在 125 K 附近的缺陷为  $U_2(+/0)$  缺陷, 能级约为  $E_V+0.20$  eV; DLTS 信号峰值位置在 200 K 附近的缺陷为  $C_iO_i(+/0)$  缺陷, 能级约为  $E_V+0.36$  eV<sup>[20]</sup>。

对不同发射结偏置条件的 PNP 型晶体管, 所产生的 2 种主要深能级缺陷浓度并不相同。对于  $U_2(+/0)$  缺陷, 零偏条件的器件受到辐射后所产生的  $U_2(+/0)$  缺陷浓度最大, 正偏条件的器件产生的  $U_2(+/0)$  缺陷浓度最小。而对于  $C_iO_i(+/0)$  缺陷来说, 零偏条件的器件受到辐射后所产生的  $U_2(=/-)$  缺陷浓度最大, 反偏条件的器件产生的  $U_2(=/-)$  缺陷浓度最小。对比图 7 与图 5 中的结果可知,  $U_2(+/0)$  缺陷在不同偏置条件下的影响规律与 PNP 型晶体管电流增益的变化规律类似。综合 NPN 及 PNP 型晶体管的缺陷分析结果可见, 与空位相关的缺陷(如  $U_2(-/0)$  缺陷和  $U_2(+/0)$  缺陷)对双极晶体管的电流增益退化有明显的影

### 3 结论

本文采用 35 MeV Si 离子在不同偏置条件下对双极晶体管的位移辐射损伤及缺陷变化规律进行研究。基于电性能测试结果, NPN 及 PNP 型晶体管的电流增益倒数变化量随 35 MeV Si 离子注量增加均逐渐升高。在较小注量时处于非线性升高, 当注量较高时基本呈线性升高。根据 Messenger-Spratt 方程, 可以判定 35 MeV Si 离子在晶体管中所产生的辐射损伤在较小注量时以电离辐射损伤为主, 当辐射注量较高时以位移辐射损伤为主。而对于 NPN 和 PNP 型晶体管, 偏置条件影响基本一致, 其中发射结零偏偏置器件受到的辐射损伤最大, 反偏偏置的器件其次, 正偏偏置条件器件受到的辐射损伤最小, 产生这一现象的原因与氧化物电荷沉积和体注入电流有关。通过 DLTS 缺陷分析可以发现, 不同偏置条件不会对辐照所产生的缺陷类型产生影响, 而对缺陷的浓度有较大影响。不同类型的深能级缺陷对器件电性能的影响是不同的, 与空位相关的缺陷(如  $U_2(-/0)$  缺陷和  $U_2(+/0)$  缺陷)对双极晶体管的电流增益退化有明显的影

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] SUMMERSS G P, BURKE E A, DALE C J, et al. Correlation of particle-induced displacement damage in silicon[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1987(34):1133-1139.

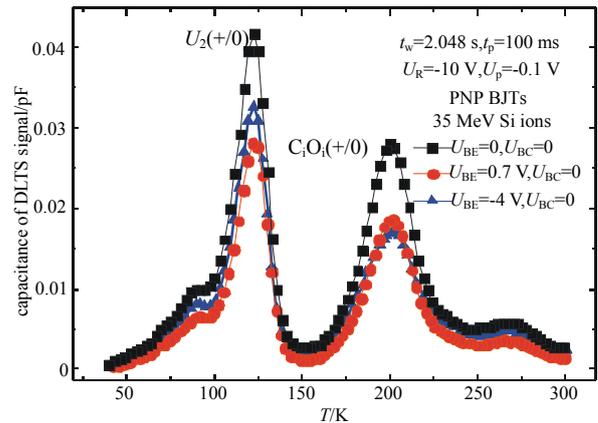


Fig.7 DLTS spectra of PNP transistors irradiated by 35 MeV Si ions under various bias conditions

图 7 不同偏置条件下 35 MeV Si 离子辐照 PNP 型晶体管的深能级瞬态谱结果

- [ 3 ] KOSIER S L,SCHRIMPF R D,Nowlin R N,et al. Charge separation for bipolar transistors[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993(40): 1276–1285.
- [ 4 ] LIU C M,LI X J,GENG H B,et al. Incident particle range dependence of radiation damage in a power bipolar junction transistor[J]. Chinese Physics B, 2012(10):308–312.
- [ 5 ] LI X J,LIU C M,YANG J Q. Synergistic effect of ionization and displacement damage in NPN transistors caused by protons with various energies[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2015(62):1375–1382.
- [ 6 ] MADHU K V,KULKARNI S R,RAVINDRA M,et al. DLTS study of deep level defects in Li-ion irradiated bipolar junction transistor[J]. Nucl. Instr. and Meth. B, 2007(254):98–104.
- [ 7 ] GENG H B,LAN M J,LIU C M,et al. Radiation effects on silicon bipolar transistors caused by 3–10 MeV protons and 20–60 MeV bromine ions[J]. Physica B Condensed Matter, 2010(405):1489–1494.
- [ 8 ] BARNABY H J,SMITH S K,SCHRIMPF R D,et al. Analytical model for proton radiation effects in bipolar devices[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2002(49):2643–2649.
- [ 9 ] KULKARNI S R,RAVINDRA M,JOSHI G R,et al. Simulation of energy and fluence dependence of heavy ion induced displacement damage factor in bipolar junction transistor[J]. Radiation Effects & Defects in Solids, 2004(159):273–280.
- [10] LIU C M,LI X J,GENG H B,et al. The equivalence of displacement damage in silicon bipolar junction transistors[J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2012(677):61–67.
- [11] LIU C M,LI X J,GENG H B,et al. Ionization damage in NPN transistors caused by lower energy electrons[J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2010(621):707–712.
- [12] CELLERE G,PACCAGNELLA A,LARCHER L,et al. Anomalous charge loss from floating-gate memory cells due to heavy ions irradiation[J]. IEEE Trans. on Nucl. Sci, 2002(49):3051–3058.
- [13] PERSHENKOV V S,CHUMAKOV K A,NIKIFOROV A Y,et al. Interface trap model for the low-dose-rate effect in bipolar devices[J]. IEEE 9th Radiation and Its Effects on Components and Systems, 2007.
- [14] LIU C M,LI X J,GENG H B,et al. DLTS studies of bias dependence of defects in silicon NPN bipolar junction transistor irradiated by heavy ions[J]. Nucl. Instr. and Meth. A, 2012(688):7–10.
- [15] CHAVEZ R M,RAX B G,JOHNSTON A H. Total ionizing dose effects and bias dependence in selected bipolar devices[J]. Radiation Effects Data Workshop, IEEE, 2007:50–56.
- [16] SIEDLE A H,ADAMS L. Handbook of Radiation Effects[M]. New York:Oxford University Press, 1993.
- [17] LANG D V. Fast capacitance transient apparatus:application to ZnO and O centers in GaP p-n junctions[J]. Journal of Applied Physics, 1974(45):3014–3022.
- [18] MADHU K V,KULKARNI S R,RAVINDRA M,et al. DLTS study of deep level defects in Li-ion irradiated bipolar junction transistor[J]. Nucl. Instr. and Meth. B, 2007(254):98–104.
- [19] BIELEJEC E,VIZKELETHY G,FLEMING R M,et al. Metrics for comparison between displacement damage due to ion beam and neutron irradiation in silicon BJTs[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007(54):2282–2287.
- [20] TOKUDA Y,USAMI A. Comparison of neutron and 2 MeV electron damage in N-Type silicon by deep-level transient spectroscopy[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2007(28):3564–3568.

#### 作者简介：

刘 莉(1965–)，女，北京市人，高级工程师，主要从事电子元器件专业产品保证和应用工作。email:fox1225@163.com.

李兴冀(1981–)，男，哈尔滨市人，教授，博士生导师，主要从事电子元器件辐射损伤机理、抗辐射加固技术工作。

马国亮(1979–)，男，哈尔滨市人，工程师，主要从事电子元器件辐射损伤机理、抗辐射加固技术工作。

董 磊(1992–)，女，哈尔滨市人，在读硕士研究生，主要从事电子元器件辐射损伤机理、抗辐射加固技术工作。

刘超铭(1986–)，男，哈尔滨市人，副教授，主要从事电子元器件辐射损伤机理、抗辐射加固技术工作。

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

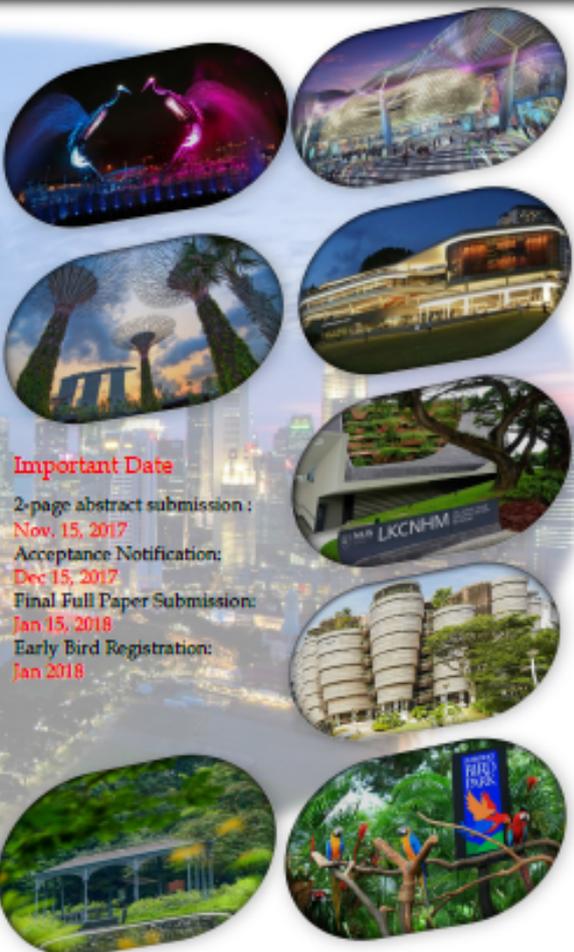
The 13th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems  
 IEEE-NEMS 2018 Hilton Hotel, Singapore, April 22-26, 2018



**General Chair**  
 Prof. Chengkuo Lee  
 National University of Singapore  
 Singapore  
**Technical Program Chair:**  
 Prof. Da-Jeng Yao  
 National TsingHua University  
 Taiwan

**Conference Scope**

- Nano Energy, Micro Energy Harvesting, Energy Materials
- Micro/Nano Electro-Mechanical Systems (M/NEMS)
- Nanoscale Robotics, Assembly, and Automation
- Flexible/Soft materials, Sensors and Actuators
- Micro/Nanotechnology in Neural Prostheses
- Molecular Sensors, Actuators, and Systems
- Micro/Nano Lens and Nanoscale Imaging
- Micro/Nano/Molecular Fabrication
- Nanophotonics and Microoptics
- Plasmonic and Metamaterials
- Nanobiology/Nanomedicine
- Micro/Nano Mechanics
- Micro/Nano Fluidics
- 2D/Nanomaterials



**Important Date**  
 2-page abstract submission :  
 Nov. 15, 2017  
 Acceptance Notification:  
 Dec. 15, 2017  
 Final Full Paper Submission:  
 Jan. 15, 2018  
 Early Bird Registration:  
 Jan. 2018

<http://ieee-nems.org/2018/>

**Steering Committee**

- Prof. Ning Xi, Michigan State University, USA (Chair)
- Prof. Alice H. X. Zhang, Peking University, China
- Prof. Dacheng Sun, Xiamen University, China
- Prof. Gwo-Bin Vincent Lee, National Tsing Hua University, Taiwan
- Prof. Osamu Tabata, Kyoto University, Japan
- Prof. Wen J. Li, City University of Hong Kong, Hong Kong
- Prof. William C. Tang, University of California, Irvine, USA
- Prof. Shuji Tanaka, Tohoku University, Japan

