

## 平衡材料对双极器件电离总剂量效应的影响

王 涛<sup>1,2,3</sup>, 王 倩<sup>1</sup>, 何承发<sup>2,3</sup>, 荀明珠<sup>2,3</sup>,  
买买提热夏提·买买提<sup>1</sup>, 雷琪琪<sup>2,3,4</sup>, 孙 静<sup>2,3</sup>

- (1. 新疆大学物理科学与技术学院, 新疆乌鲁木齐 830046;  
2. 中国科学院新疆理化技术研究所, 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;  
3. 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;  
4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 本文选择贴片式 NPN 双极器件作为研究对象, 采用在器件辐照试验时设置平衡材料的方法, 通过对器件辐照敏感电参数的测量, 研究平衡材料对双极器件电离总剂量效应的影响程度. 结果表明: 在器件辐照试验时设置平衡材料, 器件的敏感电参数电流增益较未设置平衡材料退化更明显, 仅设置前平衡材料比仅设置后平衡材料影响更大. 在器件前后均设置平衡材料、仅设置前平衡材料和仅设置后平衡材料三种不同条件下, 器件电流增益退化差异在 50krad(Si) 剂量点时分别为 22.55%、13.38% 和 12.58%, 当辐照总剂量达到 300krad(Si) 时降低至 11.65%、7.31% 和 4.14%. 因此在评估器件的抗辐照性能过程中, 很有必要在器件进行辐照试验时根据器件的结构尺寸, 设置一定厚度的平衡材料, 使器件敏感区满足次级电子平衡条件, 从而保证器件敏感区实际吸收剂量达到标称辐照剂量.

**关键词:** 电离总剂量效应; 平衡材料; 电流增益; 次级电子平衡

**中图分类号:** TN386.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2020)11-2278-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.11.026

## The Impact of Equilibrium Material on the Total Ionization Dose Effect of Bipolar Devices

WANG Tao<sup>1,2,3</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, HE Cheng-fa<sup>2,3</sup>, XUN ming-zhu<sup>2,3</sup>,  
MAMAT Mamatrishat<sup>1</sup>, LEI Qi-qi<sup>2,3,4</sup>, SUN Jing<sup>2,3</sup>

- (1. School of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;  
2. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;  
3. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi, Xinjiang 830011, China;  
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** NPN bipolar device with surface mount package was selected as the research object in this paper. By setting the equilibrium material and measuring the radiation sensitive electrical parameters of the device during the radiation experiment, the impact of equilibrium material on the total ionization dose effect of bipolar device was studied. The results show that the current gain degradation of bipolar devices with equilibrium material was more obvious than that without equilibrium material, and only setting the front equilibrium material has a greater impact than only setting the back equilibrium material. In the three different equilibrium materials conditions (front and back, front only, and back only), the devices current gain degradation differences were 22.55%, 13.38%, and 12.58% at the 50 krad (Si) dose point and decreased to 11.65%, 7.31%, and 4.14% when the total irradiation dose reached 300 krad (Si) respectively. Therefore, in the process of evaluating the radiation hardness level of electronic device, it is necessary to conduct irradiation tests in the device according to the device's structural size, set a certain thickness of the equilibrium material, so that the device sensitive area to meet the secondary electron equilibrium conditions, so as to ensure that the device sensitive area of the actual absorbed dose to reach the nominal irradiation dose.

**Key words:** total dose effect of ionization; equilibrium material; current gain; secondary electron equilibrium

## 1 引言

在空间辐射环境中,电离总剂量效应(Total Ionizing Dose Effect, TID)会导致航天器电子元器件参数退化、性能下降甚至功能失效,大大降低航天器在轨运行寿命<sup>[1]</sup>. 因此需要通过地面模拟电离总剂量辐照试验评估航天用电子元器件的抗辐照性能、研究辐射损伤机理以及抗辐照加固技术. 确保航天器在轨运行期间,电子元器件能够在辐射环境中正常工作,保证航天器的运行寿命.

目前,国内外主要使用<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照源对电子元器件进行电离总剂量辐照试验<sup>[2]</sup>. 辐照试验前,需按照相关标准方法对辐射场进行剂量率标定<sup>[3-7]</sup>. 根据辐射剂量学原理,对 $\gamma$ 射线等不带电间接电离辐射,测量介质中某一点的吸收剂量,感兴趣点需满足次级电子平衡条件<sup>[8]</sup>. 国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)第 398 号报告规定,测量<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 射线在水中的吸收剂量应在前平衡材料质量厚度为 $5\text{g}/\text{cm}^2$ ,后平衡材料厚度为 $25\text{cm}$ 的水模体中进行<sup>[3]</sup>.

GB/T 139-2008 中规定使用硫酸亚铁剂量计测量 X 射线或 $\gamma$ 射线吸收剂量时剂量计周围应使用水等效材料包裹(如聚苯乙烯或聚乙烯),以达到近似的电子平衡条件,等效材料的厚度为 $3\sim 5\text{mm}$ <sup>[9]</sup>. 对于小尺寸封装器件,若不使用平衡材料包裹,则不能保证器件辐照敏感区达到次级电子平衡,导致器件敏感区的实际吸收剂量小于标称辐照剂量,对器件在不同累积剂量下的辐射效应分析带来误差.

双极器件作为一种重要的半导体器件在空间电子系统中有着广泛的应用,同时随着小卫星技术发展,表面贴装器件(Surface Mounted Devices, SMD)的应用也越来越多<sup>[10]</sup>. 虽然有关双极器件电离损伤效应的研究有很多<sup>[11-14]</sup>,但是次级电子不平衡对双极器件电离效应的影响尚待研究. 另外双极器件对电离效应较为敏感<sup>[15,16]</sup>,在不同试验条件下辐照敏感电参数变化更明显. 因此本文选择塑封贴片式 NPN 双极器件 BC817-16 作为研究对象,采用设置平衡材料的方法,研究了次级电子不平衡对双极器件电离总剂量效应的影响.

## 2 试验方法

辐照试验在中科院新疆理化所高剂量率钴源进行,辐射场 $300\text{keV}$ 以下的低能散射粒子可忽略不计. 剂量场根据 GB/T 139-2008 使用硫酸亚铁剂量计标定,标定时剂量计周围包裹 $5\text{mm}$ 的聚乙烯模体,并在剂量计后方设置了 $18\text{mm}$ 厚的聚乙烯板,作为剂量计后平衡材料. 前平衡材料起次级电子累积的作用,后平衡材料起次级电子背散射的作用. 标定位置剂量率为 $100$

$\text{rad}(\text{Si})\cdot\text{s}^{-1}$ ,该剂量率满足 MIL-STD-883G 1019 中的辐照试验要求<sup>[17]</sup>. 有研究表明, NPN 双极器件在高剂量率辐照下,器件发射结反向偏置时辐照损伤最大,零偏次之,正偏最小<sup>[11]</sup>. 因此为了排除偏置效应给本文研究带来的影响,器件统一零偏置. 辐照时将器件分成四组,第一组不设置平衡材料,第二组前后分别设置 $5\text{mm}$ 和 $18\text{mm}$ 的平衡材料,第三组仅设置 $5\text{mm}$ 前平衡材料,第四组仅设置 $18\text{mm}$ 后平衡材料. 平衡材料厚度与剂量场标定时所用平衡材料厚度一致,平衡材料为聚乙烯,该材料与试验器件的封装材料相同,可避免器件敏感区发生剂量增强效应<sup>[18]</sup>. 试验时辐照板垂直于地面,器件中心对准辐照源中心位置, $\gamma$ 射线垂直入射器件. 使用 Keithley 4200 SCS 半导体器件电性能参数测试仪测量器件的基极电流 $I_B$ 、集电极电流 $I_C$ 和电流增益 $\beta(\beta=I_C/I_B)$ <sup>[12-14]</sup>. 每次测量在器件辐照后 $20\text{min}$ 内完成,避免器件电参数发生退化.

## 3 结果与讨论

为对比不同试验条件下器件参数的退化,器件的辐照敏感参数 $\beta$ 统一选取为发射结电压 $V_{BE}=0.6\text{V}$ 下的测量值,并将测得的器件电流增益进行归一化(即 $\beta/\beta_0$ ). 归一化电流增益随累积辐照剂量的变化关系如图 1 所示.

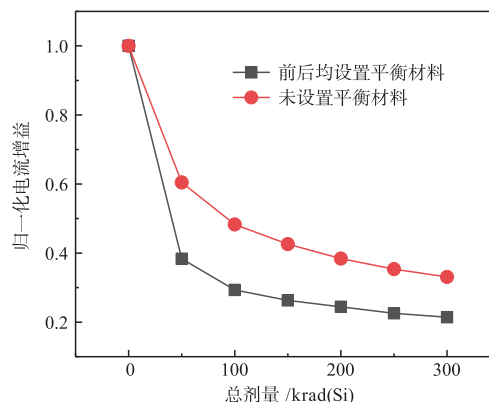


图1 有无设置平衡材料的器件归一化电流增益随总剂量的变化

由图可知,器件归一化电流增益随着辐照总剂量的累积而下降,当总剂量增加至一定程度,器件失去功能,电流增益不再下降,前后均设置平衡材料的器件归一化电流增益下降幅度大于未设置平衡材料的器件,当总剂量累积至 $200\text{krad}(\text{Si})$ ,器件电流增益退化趋于稳定. 这是由于器件在辐照过程中, $\gamma$ 射线与材料相互作用产生次级电子,次级电子的累积使得 $\gamma$ 射线在材料中的深度剂量分布先增大后减小. 对于水等效材料而言,最大吸收剂量对应的材料深度在 $5\text{mm}$ . 将双极器件 BC817-16 进行结构解剖,器件上封装层厚度为 $0.5\text{mm}$ ,

下封装厚度 0.6mm,因此器件的封装厚度不能满足器件敏感区次级电子平衡条件.当器件设置平衡材料进行辐照时, $\gamma$ 射线与平衡材料相互作用产生了大量次级电子,使器件敏感区达到次级电子平衡,保证了器件辐照敏感区实际吸收剂量与该位置标定的剂量一致,反之,未设置平衡材料将导致器件实际累积总剂量偏小.

对图 1 中各剂量点对应的归一化电流增益进行计算,得到表 1.由表 1 可知,在各个标称剂量点,设置平衡材料的器件电流增益退化都大于未设置平衡材料的器件.在 100krad(Si)剂量点,设置平衡材料的器件电流增益在辐照后比辐照前退化了 70.68%,未设置平衡材料的器件退化了 51.71%;当总剂量累积至 300krad(Si)时,器件电流增益分别退化 78.57%和 66.92%.两种试验条件下,低总剂量时器件电流增益退化差异大于高总剂量时的电流增益退化差异,且退化差异随着总剂量的累积而逐渐趋于稳定.已有研究表明:在辐射环境中,射线在双极器件隔离氧化层引入氧化物陷阱电荷,在 Si/SiO<sub>2</sub>界面附近引入界面陷阱,从而引起非平衡载流子(Shockley-Read-Hall, SRH)复合的增加<sup>[19,20]</sup>.SRH 复合导致器件发射结耗尽区复合电流增加以及引入 Si/SiO<sub>2</sub>界面处的界面陷阱使得 SRH 复合作用加强而使得  $I_b$  增加,同时该复合电流对  $I_c$  没有明显贡献,所以  $I_c$  辐照前后基本不变,从而导致  $\beta$  退化<sup>[19-24]</sup>.由此可知  $I_b$  增大速率与 SRH 复合速率成正相关.根据 SRH 复合模型<sup>[25,26]</sup>,耗尽区内电子浓度、空穴浓度以及 SRH 复合速率随位置的定性关系<sup>[27]</sup>,复合速率先增大后减小.因此, $I_b$  增大速率随着总剂量的增加先增大后减小,进而  $\beta$  退化速率亦先增大后减小.另外,平衡材料使得器件隔离氧化层感生缺陷电荷更多,器件 Si/SiO<sub>2</sub>界面处的界面陷阱更早达到饱和,所以设置平衡材料的器件电流增益更早出现退化饱和的趋势.因此两种试验条件下,低总剂量时器件电流增益退化差异大于高总剂量时的电流增益退化差异,且电流增益退化差异随着总剂量的累积而逐渐趋于稳定.

未设置平衡材料器件电流增益退化相对于设置平衡材料器件电流增益退化的变化量见表 1.计算公式为:

$$\beta_{\text{退化相对变量}} = \frac{\beta_{\text{设置平衡材料}} - \beta_{\text{未设置平衡材料}}}{\beta_{\text{未设置平衡材料}}} \times 100\% \quad (1)$$

通过对比两种试验条件下各个剂量点器件电流增益退化相对变化量可知,没有设置平衡材料的器件,其辐照敏感区域因未达到次级电子平衡,吸收剂量小于标称剂量.在 50krad(Si)剂量点,二者电流增益退化的相对变化量达到 57.67%;在 100krad(Si)剂量点,二者电流增益退化的相对变化量达到 36.69%.表明未达到次级电子平衡的器件辐照敏感区吸收剂量与标称剂量

的差异相当大,已经到了无法忽略的程度.因此,对于塑封贴片式封装器件、开盖器件或封装尺寸小而薄的器件,在进行钴源电离总剂量辐照试验时,需要在器件前后设置一定厚度的平衡材料来保证器件敏感区达到次级电子平衡,使器件敏感区实际吸收剂量达到标称辐照剂量,从而准确评估器件的抗总剂量辐射能力.

表 1 有无设置平衡材料器件电流增益退化百分比及相对变化量

总剂量 /krad(Si)	未设置平衡材料	设置平衡材料	有无平衡材料 $\beta$ 退化相对变化量
50krad(Si)	39.10%	61.65%	57.67%
100krad(Si)	51.71%	70.68%	36.69%
150krad(Si)	57.41%	73.68%	28.34%
200krad(Si)	61.60%	75.56%	22.66%
250krad(Si)	64.64%	77.44%	19.80%
300krad(Si)	66.92%	78.57%	17.41%

另外,对双极器件 BC817-16 还进行了仅设置前平衡材料和仅设置后平衡材料的辐照试验,将器件电流增益退化差异与前后均设置平衡材料的器件电流增益退化差异对比作图,如图 2 所示.

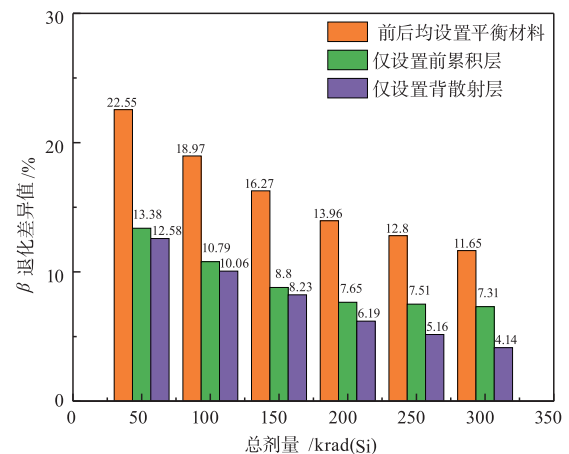


图2 三种试验条件下器件电流增益退化差异百分比

结果表明,三种试验条件下各剂量点电流增益退化趋势一致.当前后均有平衡材料时,器件电流增益退化差异从 50krad(Si)剂量点的 22.55% 逐渐减小至 300krad(Si)剂量点的 11.65%,且退化幅度逐渐减小;当仅设置前平衡材料时,器件电流增益退化差异从 13.38% 逐渐降低至 7.31%,当累积剂量达到 200krad(Si)时,电流增益退化差异基本不变;当仅设置后平衡材料时,器件电流增益退化差异从 12.58% 逐渐降低至 4.14%.从图中可以看出仅设置前平衡材料对器件电流增益退化差异值的影响均大于仅设置后平衡材料,前后均设置平衡材料的器件电流增益退化差异在高剂量时近似等于仅设置前平衡材料与仅设置后平衡材料之和.由  $\gamma$  射线与物质相互作用,光电效应、康普顿效应以

及电子对效应发生概率与光子能量和物质原子序数的关系图可知<sup>[28]</sup>, 能量为 1.25MeV 的<sup>60</sup>Co- $\gamma$  射线与低原子序数材料相互作用以康普顿效应为主. 根据 Klein-Nishina 公式绘制康普顿散射光子微分截面和散射角度、入射光子能量的关系如图 3 所示. 从图中可知, 当  $\gamma$  射线沿 X 轴正方向入射时, 康普顿散射产生的散射光子出射角度以沿着入射光子方向为主, 入射光子能量越高, 散射光子角度越小, 而散射角大于 90° 的散射光子才再次进入器件, 继续产生次级电子作用于器件. 同时, 康普顿效应产生的反冲电子出射角度总小于 90°. 因此, 仅设置前平衡材料对器件电离总剂量效应的影响大于仅设置后平衡材料对器件的影响.

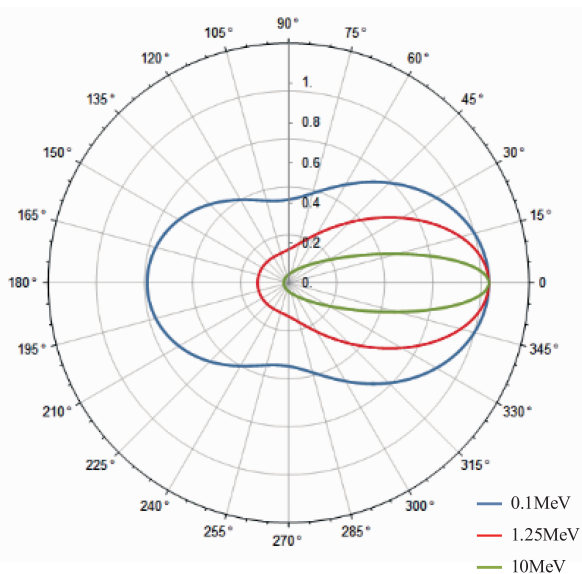


图3 极坐标表示的微分截面与散射角度、入射光子能量的关系

## 4 结论

(1) 辐照试验中, 前后均设置平衡材料的器件比未设置平衡材料的器件电流增益退化更明显. 表明器件在辐照过程中, 未设置平衡材料的器件敏感区次级电子不平衡, 从而该器件的抗辐照水平被高估.

(2) 在辐照总剂量为 100krad(Si) 时, 设置与未设置平衡材料的器件电流增益分别退化了 70.68% 和 51.71%, 两种试验条件下器件电流增益退化相对变化量为 36.69%, 当总剂量累积至 300krad(Si) 时, 器件电流增益分别退化了 78.57% 和 66.92%, 器件电流增益退化相对变化量为 17.41%. 试验结果表明随着总剂量的累积, 器件电流增益退化相对变化量在减小.

(3) 设置平衡材料的三种不同条件下, 器件电流增益退化差异分别从 50 krad(Si) 剂量点的 22.55%、13.38% 和 12.58% 逐渐降低至 300krad(Si) 剂量点的 11.65%、7.31% 和 4.14%. 表明平衡材料能够改善器件

敏感区次级电子平衡条件, 仅设置前平衡材料对器件电离总剂量效应的影响比仅设置后平衡材料对器件的影响更明显.

综上所述, 在进行电子元器件总剂量辐照试验时, 很有必要根据器件的结构尺寸, 考虑是否设置一定厚度的平衡材料保证器件敏感区满足次级电子平衡条件, 使其在辐照中实际吸收剂量达到标称剂量, 从而为评估器件的抗辐照能力提供剂量保障.

## 参考文献

- [1] Ecoffet R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(3): 1791-1815.
- [2] GJB 5422-2005. 军用电子元器件  $\gamma$  射线累积剂量效应测量方法[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2005. GJB 5422-2005. Testing method of military electronics devices for  $\gamma$ -ray total dose radiation[S]. Beijing: General Equipment Department Military Standard Publishing and Distribution Department, 2005. (in Chinese)
- [3] TRS398 report. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy [R]. International Atomic Energy Agency, Vienna: 2000.
- [4] ASTM E 668-13. Standard Practice for Application of Thermoluminescence-Dosimetry (TLD) Systems for Determining Absorbed Dose in Radiation-Hardness Testing of Electronic Devices[S]. 2013.
- [5] ASTM E 1249-10. Standard Practice for Minimizing Dosimetry Errors in Radiation Hardness Testing of Silicon Electronic Devices Using Co-60 Sources[S]. 2010.
- [6] GJB 2165-94. 应用热释光剂量测量系统确定电子器件吸收剂量的方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1994. GJB 2165-94. Methods for the Application of Thermoluminescence Dosimetry Systems for Determining Absorbed Dose of Electronic Devices[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of National Defense Science and Technology Commission, 1994. (in Chinese)
- [7] MIL-STD-883J. Test Method Standard for Microcircuits [S]. US Department of Defense, Washington, DC, 2013.
- [8] 李士骏. 电离辐射剂量学[M]. 第2版. 北京: 原子能出版社, 1986. 57-64. LI Shi-jun. Ionizing Radiation Dosimetry[M]. 2nd Edition Beijing: Atomic Energy Press, 1986. 57-64. (in Chinese)
- [9] GB/T 139-2008. 使用硫酸亚铁剂量计测量水中吸收剂量的标准方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. GB/T 139-2008. Standard Method to Measure Absorbed Dose in Water Using Ferrous Sulfate Dosimeter[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

- [10] Alyson D Topper, Edward P Wilcox, Megan C Casey, et al. NASA goddard space flight center's compendium of recent total ionizing dose and displacement damage dose results [A]. 2018 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW) [C]. Waikoloa Village; HI, 2018. 1 - 7.
- [11] 费武雄, 陆妩, 任迪远, 等. 不同偏置条件下 NPN 双极晶体管的电离辐照效应 [J]. 原子能科学技术, 2011, 45 (2): 217 - 222.  
FEI Wu-xiong, LU Wu, REN Di-yuan, et al. Radiation response of NPN bipolar transistors at various emitter junction biases [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45 (2): 217 - 222. (in Chinese)
- [12] 汪东, 陆妩, 任迪远, 等. 双极晶体管高温辐照的剂量率效应研究 [J]. 微电子学, 2005, 35 (5): 493 - 500.  
WANG Dong, LU Wu, REN Di-yuan, et al. An investigation into dose-rate effect of bipolar junction transistors at elevated temperature irradiation [J]. Microelectronics, 2005, 35 (5): 493 - 500. (in Chinese)
- [13] 张华林, 陆妩, 任迪远, 等. 不同剂量率下偏置对双极晶体管电离辐照效应的影响 [J]. 微电子学, 2004, 34 (6): 606 - 608.  
ZHANG Hua-lin, LU Wu, REN Di-yuan, et al. Effects of bias at different dose rates on ionizing radiation response of bipolar transistors [J]. Microelectronics, 2004, 34 (6): 606 - 608. (in Chinese)
- [14] 陆妩, 余学锋, 任迪远, 等. 双极晶体管不同剂量率的辐射效应和退火特性 [J]. 核技术, 2005, 28 (12): 925 - 928.  
LU Wu, YU Xue-feng, REN Di-yuan, et al. Radiation effects and ageing characteristics of bipolar junction transistors subjected to high and low dose rate total dose irradiations [J]. Nuclear Techniques, 2005, 28 (12): 925 - 928. (in Chinese)
- [15] Li Xing-ji, Geng Hong-bin, et al. Combined radiation effects of protons and electrons on NPN transistors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57 (2): 831 - 836.
- [16] Li Xing-ji, Liu Chao-ming, et al. Simultaneous and sequential radiation effects on NPN transistors induced by protons and electrons [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012, 59 (3): 625 - 633.
- [17] MIL-STD-883-G, Test Method 1019. 7. Ionizing Radiation (Total Dose) Test Procedure [S]. 2004.
- [18] 陈盘训. 双极晶体管 X 射线辐射剂量增强效应 [J]. 核电子学与探测技术, 1997, 17 (1): 7 - 10.  
CHEN Pan-xun. Dose Enhancement effects of X ray radiation in bipolar transistors [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997, 17 (1): 7 - 10. (in Chinese)
- [19] 王义元. 典型双极模拟集成电路电离辐射效应及机理研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2011. 23 - 28.  
WANG Yi-yuan. Ionizing radiation effects and mechanisms of typical bipolar analog integrated circuits [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2011. 23 - 28. (in Chinese)
- [20] 李小龙. 高总剂量水平双极器件剂量率效应及加速评估试验方法的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. 9 - 16.  
LI Xiao-long. Research on physical mechanisms and accelerated hardness-assurance testing of enhanced low dose rate sensitivity on bipolar devices [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. 9 - 16. (in Chinese)
- [21] Schrimpf R D. Gain degradation and enhanced low-dose-rate sensitivity in bipolar junction transistors [J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2004, 14 (2): 503 - 517.
- [22] 刘默寒. 极端辐射环境下双极晶体管的剂量率效应研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019. 20 - 30.  
LIU Mo-han. Dose rate effects of bipolar transistors in extreme radiation environments [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019. 20 - 30. (in Chinese)
- [23] Li Xing-ji, Geng Hong-bin, et al. Degradation mechanisms of current gain in NPN transistors [J]. Chinese Physics B, 2010, 19 (6): 425 - 432.
- [24] 李兴冀, 兰慕杰, 刘超铭, 等. 偏置条件对 NPN 及 PNP 双极晶体管电离辐射损伤的影响研究 [J]. 物理学报, 2013, 62 (9): 485 - 490.  
LI Xing-ji, LAN Mu-jie, LIU Chao-ming, et al. The influence of bias conditions on ionizing radiation damage of NPN and PNP transistors [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (9): 485 - 490. (in Chinese)
- [25] Shockley W. Statistics of the recombination of holes and electrons [J]. Physical Review, 1952, 87 (5): 835 - 842.
- [26] Hall R N. Electron-Hole recombination in germanium [J]. Physical Review, 1952, 87 (2): 387 - 387.
- [27] 郑玉展. 低剂量率损伤增强效应的物理机制及加速评估方法研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010. 31 - 33.  
ZHENG Yu-zhan. Physical mechanisms and accelerated evaluation methods of enhanced low-dose-rate sensitivity [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. 31 - 33. (in Chinese)
- [28] 魏志勇. 辐射剂量学 [M]. 第 1 版. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010. 22 - 30.  
WEI Zhi-yong. Radiation Dosimetry [M]. 1st Ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010. 22 - 30. (in Chinese)

作者简介



王 涛 男,1994 年出生,陕西扶风人,硕士研究生,2016 年于南华大学获得学士学位,主要从事电子元器件辐射效应和辐射剂量学研究.  
E-mail:707293274@qq.com



王 倩(通信作者) 女,1965 年出生,湖北孝感人,教授,1993 年于南开大学获得理学硕士学位,主要从事薄膜发光材料和辐射剂量学的研究.  
E-mail:wq@xju.edu.cn