

不同顺序中子/ γ 辐照对双极器件 电流增益的影响*

王 凯, 吕学阳, 吴锬霖, 冯加明, 范晓强, 李俊杰,
杨桂霞, 鲁 艺, 邱 东, 邹德慧

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 利用 CFBR-II 快中子反应堆(中国第二座快中子脉冲堆)和 ^{60}Co 装置开展不同顺序的中子/ γ 辐照双极晶体管的实验。在集电极-发射极电压恒定条件下,测量了双极晶体管电流增益随集电极电流的变化曲线,研究不同顺序中子/ γ 辐照对双极晶体管电流增益的影响。分析实验结果发现,集电极-发射极电压一定时,集电极电流极低情况下电流增益退化比较大,随集电极电流增加电流增益逐渐减小;就实验选中的两类晶体管而言,先中子后 γ 辐照造成双极晶体管电流增益的退化程度大于先 γ 后中子辐照,而且 PNP 型晶体管比 NPN 型晶体管差异更明显。本文进行了双极晶体管电离/位移协同辐照效应相关机理的初步探讨。

关键词: 双极晶体管; 中子; γ 射线; 电流增益; 集电极电流

中图分类号: TL814

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190333

Effects of different sequential neutron/gamma irradiation on current gain of bipolar devices

Wang Kai, Lü Xueyang, Wu Kunlin, Feng Jiaming, Fan Xiaoqiang, Li Junjie,
Yang Guixia, Lu Yi, Qiu Dong, Zou Dehui

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: In this paper, CFBR-II fast neutron reactor (China's second fast neutron pulse reactor) and Co-60 device are used to carry out experiments on different sequential neutrons/gamma irradiated bipolar transistors. Under the condition that the collector-emitter voltage is constant, the variation curve of the bipolar transistor current gain with the collector current is measured, and the influence of different irradiation order of neutron/ gamma on the current gain of the bipolar transistor is studied. The experimental results show that when the collector-emitter voltage is constant and the collector current is extremely low, the current gain degradation of the bipolar transistor is relatively large, and the current gain increases with the collector current. The degradation of the current gain of the bipolar transistor caused by the gamma irradiation after the neutron pre-irradiation would be greater than that of the neutron irradiation after the gamma pre-irradiation, and the difference is more obvious in PNP transistor than in NPN transistor. This paper presents a preliminary discussion on the related mechanism.

Key words: bipolar junction transistors; neutrons; gamma; current gain; collector current

在中子和 γ 射线同时存在的混合辐射下的双极器件同时表现出位移损伤和电离损伤。一般假设这两种效应在辐射损伤评估中是相互独立的,它们对器件的综合影响是单个中子位移效应和总剂量电离效应引起的退化的简单总和。然而,近年来的研究^[1-6]指出,这两种效应相互之间具有非线性影响,并且它们的组合效果不等于它们的简单相加。

Gorelick 等人^[2]研究了 12 种先暴露于中子然后暴露于 γ 射线的线性集成电路的辐射损伤。实验结果表明,半导体器件在中子照射后表现出对电离效应有一定程度的增强或抑制,总剂量电离效应和位移损伤无法解耦。Barnaby 等人^[5-6]研究了在质子与 γ 射线以及质子与中子同时存在辐射环境下双极运算放大器的辐射损伤效应,他

* 收稿日期:2019-09-04; 修订日期:2020-01-09

基金项目:国家自然科学基金项目(11605169)

作者简介:王 凯(1993—),男,硕士研究生,主要从事半导体器件参数测量分析;1342117283@qq.com。

通信作者:邹德慧(1979—),女,硕士,副研究员,主要研究方向为半导体器件物理;32859603@qq.com。

们的实验数据显示,这些运算放大器及其输入晶体管对位移效应和电离效应引入的缺陷的综合影响的电响应是非线性的。李兴冀等人^[7-8]对由质子和电子辐照导致的PNP和NPN双极晶体管的协同辐照效应进行了实验研究,其实验数据表明,电子导致的电离损伤效应可能会对质子诱导产生的位移损伤产生退火作用或增强效果。王晨辉等人^[9]利用半导体器件仿真软件TCAD,通过改变少数载流子寿命、在氧化层中添加陷阱电荷以及增大表面复合速率等措施,对中子和 γ 射线混合辐射引起的6种横向PNP双极晶体管的电离/位移协同效应进行了数值模拟,结果表明,横向PNP双极晶体管的电离/位移协同效应不是总剂量电离效应和位移效应的简单总和,并且总剂量电离效应可以增强中子位移损伤,导致更大的增益退化。他们认为,氧化物层中的正电荷和 γ 辐照诱导的Si/SiO₂界面陷阱可以增强中子辐照诱导的体缺陷中载流子的复合过程,是导致横向PNP双极晶体管产生电离/位移协同效应的主要原因。Song Yu等人^[10]发现,在样品被中子预辐照后,辐射损伤表现出对 γ 射线剂量的“ $\sqrt{\quad}$ ”样关系,即损伤对于小的伽马射线剂量异常降低,然后对于大的伽马射线剂量几乎线性地增加。对实验数据分析的总损伤小于中子和 γ 损伤简单相加之和,即,表现为负协同效应。基于实验数据推导出两种负协同效应与 γ 射线剂量之间的关系:第一种负协同效应与 γ 射线剂量呈线性关系,其斜率与初始位移损伤呈二次关系,可归因于硅中中子辐射引起的缺陷的愈合;第二种负协同效应随 γ 射线剂量指数衰减,其振幅表现出较强的低剂量率增强(ELDRS)效应,可归因于硅中 γ 射线产生的正电荷对Si/SiO₂界面附近中子诱导缺陷的钝化作用。以上研究均表明,电离/位移协同效应并不是电离损伤和位移效应的简单相加之和,电离损伤对已存在的位移损伤具有一定的增强或抑制作用。在以往的研究中,对于双极晶体管电离/位移协同效应的研究主要通过质子或重离子辐照同时产生电离效应和位移效应,无法对单独的电离效应或位移效应进行分析。王晨辉和Song Yu等人的研究中虽然使用中子和 γ 射线作为辐照源,但是研究对象主要为PNP型晶体管,且前者以模拟为主要研究手段,缺少对NPN型双极晶体管的实验研究,后者主要研究了先中子后 γ 辐照实验,未研究先 γ 后中子辐照实验。

本文采用中子源和 γ 源对NPN及PNP晶体管进行不同顺序的辐照实验,分析了中子/ γ 的不同顺序辐照对不同类型双极晶体管造成的电流增益变化与电学特征参数之间的关系,包括先中子后 γ 辐照条件下和先 γ 后中子辐照条件下双极晶体管共射极电流增益随集电极电流的变化关系等。

1 实验设计

本文选用的实验样品为A组(NPN型)和B组(PNP型)两种类型的双极晶体管,为尽可能减小器件个体差异的影响,每种类型实验样品都选自同一批次。实验分别从两种类型晶体管中选取六只,其中A组NPN型双极晶体管编号为2#,4#,5#,6#,8#,10#,B组PNP型双极晶体管编号为3#,4#,5#,6#,8#,9#。三只作为先中子后 γ 辐照实验样品,另外三只作为先 γ 后中子辐照实验样品,即A组2#,4#,5#样品和B组3#,4#,5#样品进行先中子后 γ 辐照实验,A组6#,8#,10#样品和B组6#,8#,9#样品进行先 γ 后中子辐照实验。实验流程如图1所示。

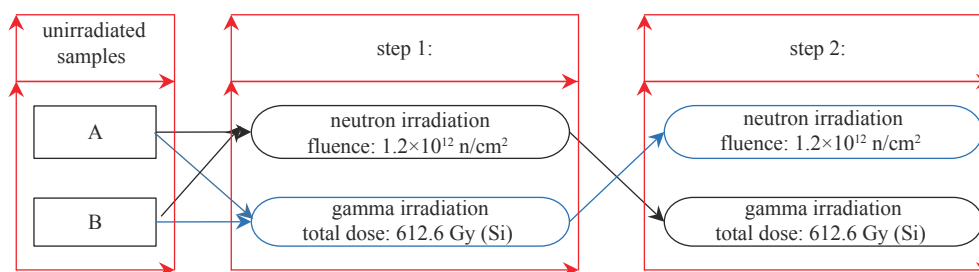


Fig. 1 Experimental flow chart

图1 实验流程图

辐照实验依托中国工程物理研究院核物理与化学研究所CFBR-II快中子脉冲堆和钴源装置开展,设定中子辐照累积注量为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, γ 辐照累积注量为612.6 Gy(Si)。两轮实验中中子注量率和 γ 剂量率相同。辐照前后所有器件效应参数均在BC3193半导体分立器件测试系统上测试,测试环境温度保持在 $(25 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$,环境湿度保持在55%~65%范围内。

2 实验结果与分析

2.1 器件辐照前后电流增益 h_{FE} 随集电极电流 I_C 的变化

对A组-NPN型双极晶体管而言,当集电极-发射极电压 V_{CE} 偏置一定时,先中子后 γ 辐照或者先 γ 后中子辐照

导致的双极晶体管电流增益 h_{FE} 的退化很接近。随集电极电流 I_C 增大, 电流增益 h_{FE} 逐渐增大。如图 2 所示, 在集电极电流 I_C 比较小时电流增益退化最大可达到约 59.9%, 在所测电流范围内, h_{FE} 退化最小约 22.8%。可以看出, 当集电极-发射极电压 V_{CE} 一定时, 晶体管的增益退化程度与注入电流相关, 电流越小, 增益退化程度越大。

对 B 组 -PNP 型双极晶体管而言, 当集电极-发射极电压 V_{CE} 偏置一定时, 先中子后 γ 辐照相较先 γ 后中子辐照引起的双极晶体管电流增益 h_{FE} 退化程度不同。如图 3 所示, 可以明显看出, 先中子后 γ 辐照造成的电流增益退化程度比先 γ 后中子辐照造成的电流增益退化程度大。先中子后 γ 的增益退化程度在 24.4%~47.0% 范围内变化, 而先 γ 后中子的电流增益退化程度在 10.7%~31.4% 范围内变化, 两者相差近 1 倍。随集电极电流 I_C 增大, 电流增益 h_{FE} 的退化程度逐渐减小。先中子后 γ 辐照情况, 在集电极电流 I_C 比较小时电流增益退化最大约 47.0%, 随 I_C 逐渐增大, 退化程度逐渐减小, 在所测电流范围内, 电流增益退化最小约 24.4%; 先 γ 后中子辐照情况, 电流增益退化最大约 31.4%, 最小约 10.7%。

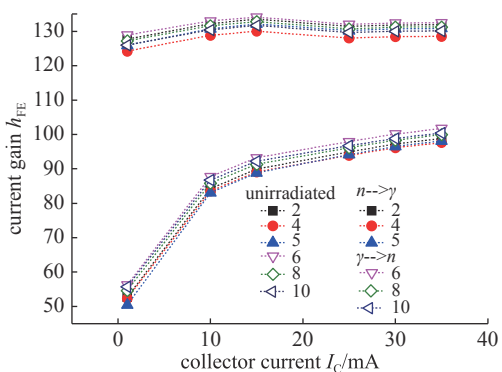


Fig. 2 Curves of current gain h_{FE} vs collector current I_C of A-NPN BJTs

图 2 A 组 -NPN 型双极晶体管电流增益 h_{FE} 随集电极电流 I_C 的曲线

根据实验结果可知, 当集电极-发射极电压偏置一定时, 不论是 A 组 -NPN 型双极晶体管还是 B 组 -PNP 型双极晶体管, 辐照后的电流增益变化趋势与辐照前相同, 在集电极电流极低的情况下, 电流增益下降比较严重, 随集电极电流增加, 电流增益逐渐增大。

图 4 为 NPN 型晶体管工作与正向有源区时电子流和空穴流示意图, 在集电极电流较小情况下, 发射区注入到基区的少数载流子很少, 而发射极-基区的体内存在着工艺条件引起的复合中心, 导致进入基区的少数载流子大部分被复合, 进一步降低了基区内少数载流子数量, 发射极注入到基区的电子电流减小, 通过基区的少数载流子扩散电流减小, 发射效率 γ 降低, 最终导致电流增益下降严重^[11]。此外, 基区表面复合电流增加和发射结空间电荷区复合电流增加也是引起电流增益下降的原因^[12]。随着集电极电流进一步增大, 发射极注入到基区的少数载流子浓度和空穴浓度增大, 基区电子输运速度增大, 基极电流线性增加(如图 5 所示), 发射效率增大, 因此, 电流增益 h_{FE} 随集电极电流 I_C 增大而逐步增大。

2.2 不同中子/γ 辐照顺序对双极晶体管电流增益 h_{FE} 的影响

根据图 2, 3 可知, 对于双极晶体管, 先 γ 后中子辐照引起的电流增益退化低于先中子后 γ 辐照引起的增益退化, 该现象在 A 组 NPN 型双极晶体管中表现的不太明显, 但在 B 组 PNP 型双极晶体管中十分明显, 接近二倍关系。

基于以上实验数据, 我们进行了如下定性分析。如图 6 所示, 先 γ 辐照时, γ 射线在硅体中产生电子-空穴对和少量的空位和间隙原子, 在氧化层产生净的正电荷。产生的电子一部分会输运到 Si-SiO₂ 界面与氧化层正电荷复合, 一部分会与空穴复合。产生的空位与杂质原子、空位相结合形成稳定的缺陷中心, 如 V-P、V-O、V-V 等^[13-14]。后续中子辐照产生大量的空位和间隙原子以及点缺陷甚至缺陷簇。中子辐照产生的空位会与 γ 辐照产生的空位结合形成双空位(V-V)中心, 与杂质原子、间隙原子以及 γ 辐照产生的缺陷中心(V-P、V-O、V-V 等)相结合, 降低

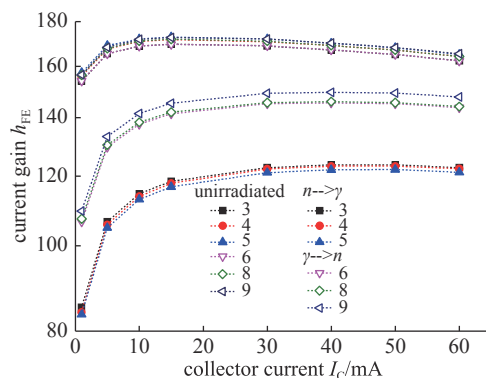


Fig. 3 Curves of current gain h_{FE} vs collector current I_C of B-PNP BJTs

图 3 B 组 -PNP 型双极晶体管电流增益 h_{FE} 随集电极电流 I_C 的变化曲线

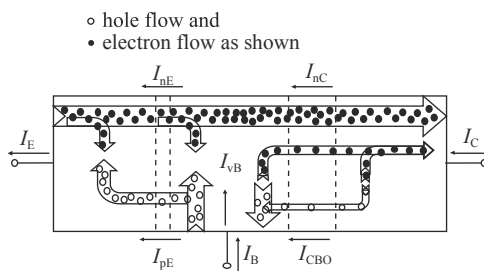


Fig. 4 Diagram of electron flow and hole flow when NPN transistor is working in positive active region

图 4 NPN 型晶体管工作于正向有源区时电子流和空穴流示意图

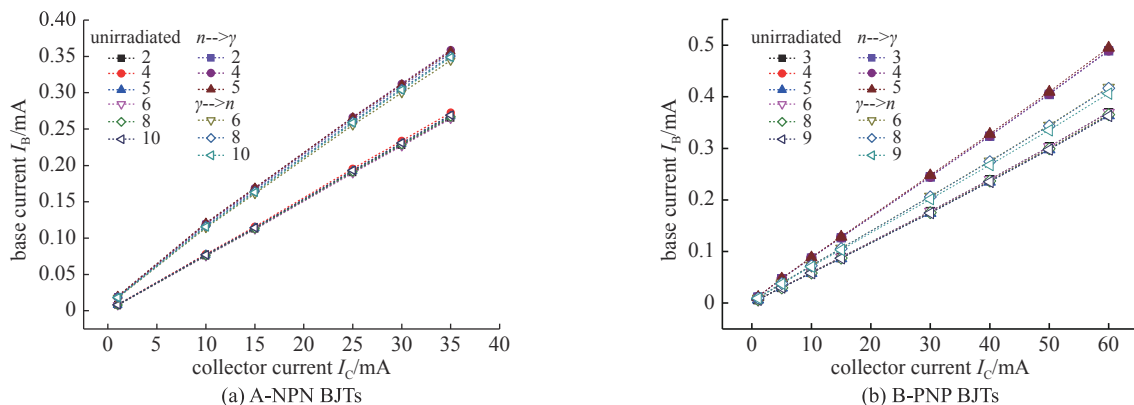


Fig. 5 Curves of base current I_B vs. collector current I_C of A-NPN BJTs and B-PNP BJTs

图 5 A 组-NPN 型和 B 组-PNP 双极晶体管基极电流 I_B 随集电极电流 I_C 的曲线

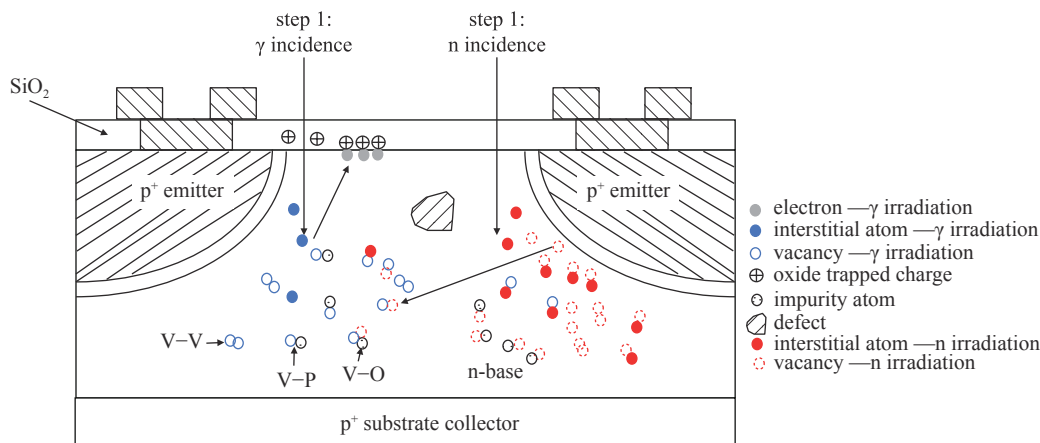


Fig. 6 Schematic diagram of irradiation effect of neutron first followed by γ incidence (taking PNP bipolar transistor as an example)

图 6 先 γ 后中子入射辐照效应示意图 (以 PNP 型双极晶体管为例)

γ 辐照产生的缺陷浓度, 从而表现为对 γ 辐照的“退火”作用。如图 7 所示, 先中子辐照时, 中子辐照在硅体中产生的空位会形成双空位以及与杂质原子结合后的稳定的缺陷中心, γ 辐照产生的空位会与这些缺陷中心相结合增大缺陷密度, 同时还会与中子辐照产生的点缺陷或缺陷簇相结合, 扩大缺陷的损伤能力, 从而表现为后 γ 辐照对先中子辐照产生的损伤的“诱导”作用。

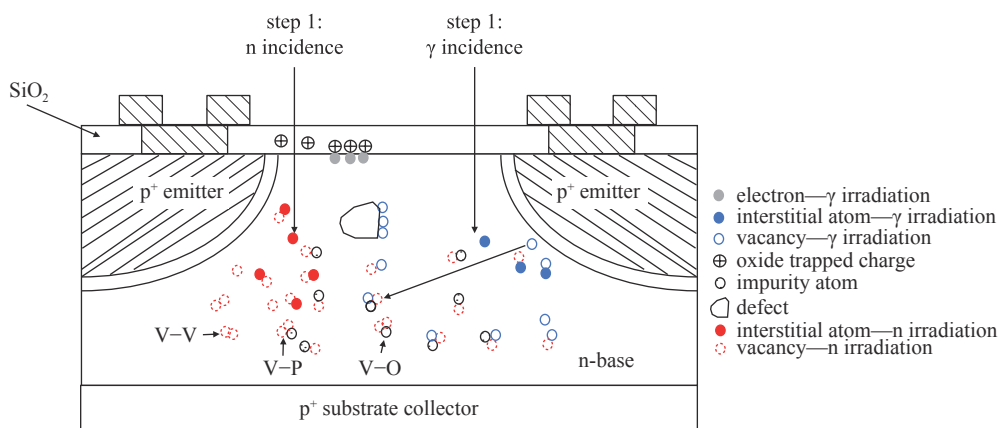


Fig. 7 Schematic diagram of irradiation effect of γ first followed by neutron incidence (taking PNP bipolar transistor as an example)

图 7 先中子后 γ 入射辐照效应示意图 (以 PNP 型双极晶体管为例)

针对两种类型的晶体管损伤差异的不同, 可归结为两点原因: (1) A 组样品为 NPN 型双极晶体管, B 组样品为 PNP 型双极晶体管, 两种类型的样品结构不同; (2) A 组为高频小功率 NPN 管, B 组为小功率 PNP 管, 两种类型的样品截止频率不同。双极晶体管的截止频率 f_T 是指共射极电流增益为 1 时的频率, 通常可表示为^[15]

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} \quad (1)$$

式中： τ_{ec} 为发射极到集电极的时间，由四部分组成

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c \quad (2)$$

式中： τ_e 为发射结电容充电时间； τ_b 为基区渡越时间； τ_d 为集电结耗尽区渡越时间； τ_c 为集电结电容充电时间。其中 τ_b 和 τ_d 为主要影响因素，可表示为

$$\tau_b = \frac{x_B^2}{2D_n} \quad (3)$$

$$\tau_d = \frac{x_{dc}}{v_s} \quad (4)$$

式中： x_B 为基区宽度； D_n 为电子扩散系数； x_{dc} 为基极-集电极的耗尽区宽度； v_s 为电子饱和速度。由此可知，要使截止频率较高，需要有较小的基区宽度和基极-集电极耗尽区宽度。因此A组晶体管的基区宽度小于B组的基区宽度，而 γ 辐照会造成PN结耗尽层向P侧扩散，A组晶体管的基区宽度将会进一步降低，导致产生的空位浓度降低，对不同顺序辐照损伤差异的影响减小。因此不同顺序中子/ γ 辐照后，A组增益退化的差异小于B组的差异。

3 结 论

本文以CFBR-II快中子反应堆和钴源装置为辐照装置，以A型NPN双极晶体管和B型PNP双极晶体管为实验对象，通过研究不同顺序的中子和 γ 射线辐照引起的双极晶体管增益退化，达到对双极晶体管电离/位移协同效应的研究目的，对双极晶体管在强核辐射场或空间航天器应用中的抗辐射加固以及硬度评估等方面提供了参考。通过分析实验结果可以得出以下结论：

(1)当集电极电流很小的情况下，电流增益退化比较严重，随集电极电流增大，电流增益逐渐增大。主要原因在于：集电极电流很小时，发射极注入到基区的少数载流子浓度低，基区体复合电流较大，基区表面复合电流和发射结耗尽区复合电流相对增大，引起发射效率 γ 降低，最终导致集电极电流较小的情况下电流增益退化严重；随集电极电流逐渐增大，基区内少数载流子浓度增加，基区电子输运速度增大，基极电流线性增加，发射效率增大，最终导致电流增益 h_{FE} 随集电极电流 I_C 增大而逐步增大。

(2)先中子后 γ 辐照引起的电流增益退化程度比先 γ 后中子辐照引起的电流增益退化程度更深，此现象在A组型NPN双极晶体管中表现得不太明显，但是在B组型PNP双极晶体管中，先中子后 γ 辐照引起的电流增益退化程度与先 γ 后中子辐照引起的电流增益退化程度约为二倍关系。初步分析原因：针对实验选用的两类双极晶体管， γ 射线辐照引起的点缺陷对中子预辐照产生的点缺陷和缺陷簇具有“诱导加剧”作用，中子辐照引起的点缺陷和缺陷簇对 γ 预辐照引起的点缺陷和缺陷簇具有“退火淹没”作用。

(3)两种类型晶体管辐照结果的差异主要由A组NPN型双极晶体管截止频率较高导致，截止频率高，要求在制造时基区宽度要小于非高频晶体管，而 γ 辐照会造成PN结耗尽层向P侧扩散，A组晶体管的基区宽度将会进一步降低，导致产生的空位浓度降低，对不同顺序辐照损伤差异的响应减小。

参考文献：

- [1] 王晨辉, 陈伟, 刘岩, 等. 基区表面势对栅控横向PNP晶体管中子位移损伤的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 114002. (Wang Chenhui, Chen Wei, Liu Yan, et al. Influence of base surface potential on neutron displacement damage of gate-controlled lateral PNP bipolar transistors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 114002)
- [2] Gorelick J L, Ladbury R, Kanchawa L, et al. The effects of neutron irradiation on gamma sensitivity of linear integrated circuits[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2004, 51(6): 3679-3685.
- [3] 李兴冀. 星用双极型器件带电粒子辐照效应及损伤机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 37-66. (Li Xingji. Radiation effects and damage mechanisms caused by charged particles on bipolar devices used for space craft. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 37-66)
- [4] 刘超铭. 双极晶体管辐射损伤效应及深能级缺陷研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 98-135. (Liu Chaoming. Radiation damage effects and deep level defects in bipolar junction transistor. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 98-135)
- [5] 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*, 2003, 49(6): 2643-2649.
- [6] Barnaby H J, Schrimpf R D, Sternberg A L, et al. Proton radiation response mechanisms in bipolar analog circuits[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2001, 48(6): 2074-2080.

- [7] Li Xingji, Liu Chaoming, Rui Erming, et al. Simultaneous and sequential radiation effects on NPN transistors induced by protons and electrons[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2012, 59(3): 625-633.
- [8] Li Xingji, Geng Hongbin, Liu Chaoming, et al. Combined radiation effects of protons and electrons on NPN transistors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2010, 57(2): 831-836.
- [9] Wang Chenhui, Bai Xiaoyan, Chen Wei, et al. Simulation of synergistic effects on lateral PNP bipolar transistors induced by neutron and gamma irradiation[J]. *Nucl Instrum Meth A*, 2015.
- [10] Song Yu, Zhang Ying, Liu Yang, et al. Mechanism of synergistic effects of neutron-and gamma-ray-radiated PNP bipolar transistors[J]. *ACS Appl Electron Mater*, 2019.
- [11] Sze S M, Kwok K N. *Physics of semiconductor devices* [M]. 3rd ed. New York: Wiley-Interscience, 2006.
- [12] 叶迟凡. 晶体管电流放大系数 β 与集电极电流 I_C 的关系[J]. 怀化师专学报(自然科学版), 1987(5): 64-67. (Ye Chifan. The relationship between transistor current amplification factor beta and collector current I_C [J]. *Journal of Huaihua Teachers College (Natural Science Edition)*, 1987(5): 64-67)
- [13] Claeys C, Simoen E. *Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices* [M]. Springer-Berlin Heidelberg GmbH, 2002.
- [14] Kosier S L, Shrimp R D, Nowlin R N, et al. Charge separation for bipolar transistors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, 40(6): 1276-1285.
- [15] Neamen D A. *半导体物理与器件* [M]. 4版. 北京: 电子工业出版社, 2013. (Neamen D A. *Semiconductor physics and devices: basic principles* [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013)