

中等剂量率 γ 辐射下双极结型晶体管实时电流响应的 在线辐照与仿真

孙家诚^{1,2} 李小龙² 杨济聪^{1,2} 王利斌² 王 信² 孙 静² 郭 旗² 文 林² 李豫东²

¹ (中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

² (中国科学院新疆理化技术研究所特殊环境条件功能材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011)

摘要 为研究双极结型晶体管 (BJT) 在核工业典型中等剂量率 γ 辐射环境下的实时响应特性, 本文采用在线辐照实验与仿真相结合的方法, 系统分析了剂量率对 NPN 型 BJT 电流响应的调制规律。实验采用 ^{60}Co - γ 源, 在 10~300 rad(Si)/s 剂量率范围内对 BJT 进行实时电学测试。结果表明, 在截止偏置条件下, 集电结反向截止电流增量 (ΔI_{CBO}) 随剂量率升高而线性增大, 且在辐照停止后迅速恢复。通过 Geant4 模拟揭示了剂量率通过调控 Si 中电子-空穴对生成速率来影响截止电流幅值的物理机制; TCAD (Technology computer aided design) 仿真进一步复现了实验观测到的剂量率依赖响应, 并验证了 ΔI_{CBO} 与剂量率之间的线性关系与 Wirth-Rogers 模型预测一致。研究结果表明, 剂量率是影响 BJT 实时辐射响应强度的关键因素, 可为辐射环境下器件实时性能评估与仿真建模提供实验依据和理论支持。

关键词 核工业, γ 辐射, 剂量率, 实时响应, 双极结型晶体管

中图分类号 TL13, TL11

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0021

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0021

引用该文:

孙家诚, 李小龙, 杨济聪, 等. 中等剂量率 γ 辐射下双极结型晶体管实时电流响应的在线辐照与仿真[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0021.

SUN Jiacheng, LI Xialong, YANG Jicong, *et al.* In-situ irradiation and simulation of real-time current response in bipolar junction transistors under medium dose-rate γ radiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(X): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0021.



基金资助: 新疆维吾尔自治区天山英才计划 (2024TSYCCX0085)、新疆维吾尔自治区自然科学基金 (2023D01A03)、天山英才培养计划 (2023TSYCCX0106, 2023TSYCTD0010) 和新疆维吾尔自治区重点研发任务专项 (2023B01008)

第一作者: 孙家诚, 男, 2001 年 12 月出生, 2022 年于武汉大学获学士学位, 目前为中国科学院大学硕士研究生

通信作者: 郭旗, 研究员, E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

收稿日期: 初稿 2026-04-20; 修回 2026-05-18

Supported by Tianshan Talents Program of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2024TSYCCX0085), Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2023D01A03), Tianshan Talent Training Program Grant (2023TSYCCX0106, 2023TSYCTD0010), and Key Research and Development Program of Xinjiang Grant (2023B01008)

First author: SUN Jiacheng (male) was born in December 2001, and obtained a bachelor's degree from Wuhan University in 2022, and is currently a master's candidate at the University of Chinese Academy of Sciences (UCAS)

Corresponding author: GUO Qi, professor, E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

Received 20 April 2026; accepted 18 May 2026

***In-situ* irradiation and simulation of real-time current response in bipolar junction transistors under medium dose-rate γ radiation**

SUN Jiacheng^{1,2} LI Xialong² YANG Jicong^{1,2} WANG Libin² WANG Xin² SUN Jing²
GUO Qi² WEN Lin² LI Yudong²

¹(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

ABSTRACT To investigate the real-time response characteristics of bipolar junction transistors (BJTs) under medium dose-rate gamma irradiation in nuclear industrial environments, *in-situ* irradiation experiments combined with numerical simulations were performed. NPN BJTs were irradiated using a ⁶⁰Co gamma source, with real-time electrical measurements performed over a dose-rate range of 10–300 rad(Si)/s. The results show that under cutoff bias conditions, the increment of the collector-base reverse leakage current (ΔI_{CBO}) increases linearly with the dose-rate, and the current rapidly recovers after irradiation is terminated. Geant4 simulations indicate that this dose-rate dependence originates from the modulation of electron-hole pair generation rates in silicon. TCAD simulations further reproduce the experimental observations and confirm that the linear relationship between ΔI_{CBO} and dose-rate agrees well with the Wirth-Rogers model. These results demonstrate that dose-rate is a critical factor governing the real-time radiation response of BJTs, providing experimental and theoretical support for radiation-effect modeling and real-time performance evaluation of semiconductor devices.

KEYWORDS Nuclear industry, Gamma radiation, Dose rate, Real-time response, Bipolar junction transistor
CLC TL13, TL11

双极结型晶体管（BJT）作为电子电路中的关键器件，在信号放大^[1]、驱动、高速逻辑^[2]、传感器以及开关电路^[3]等领域具有广泛应用。在空间辐射^[4]、核爆环境^[5]及核工业环境^[6]等典型辐射场景中，含有BJT的集成电路（IC）常暴露于不同剂量率的电离辐射之下，其辐射损伤行为直接影响器件的可靠性与整体性能。

研究表明，BJT的辐射损伤行为与剂量率密切相关。在空间低剂量率辐射条件（约1 mrad（Si）/s）下，BJT表现出显著的低剂量率损伤增强效应^[7]。围绕该现象，国内外先后提出空间电荷模型^[8]、双分子模型^[9]、竞争模型^[10]及二元反应速率模型^[11]等理论，普遍认为低剂量率下界面陷阱电荷的生成过程被强化，从而导致辐射损伤随剂量率降低而加剧。另一方面，针对高空核爆等瞬态高剂量率辐射环境（约10⁹ rad（Si）/s），BJT呈现瞬态剂量率效应

（TIRE）。相关研究已从物理机制出发，发展了瞬态光电流解析模型、器件与电路响应模拟方法，并对绝缘衬底技术的抗瞬态辐射特性进行了系统探讨^[12]。

现有研究中，BJT剂量率效应的关注重点主要集中在两端：一是空间低剂量率条件下的低剂量率损伤增强效应（Enhanced low-dose-rate sensitivity, ELDRS）效应，侧重于缺陷演化导致的长期性能退化；另二是核爆等极高剂量率条件下的瞬态剂量率效应，侧重于瞬态冲击下的器件和电路响应。相比之下，核工业典型中等剂量率环境处于两者之间，相关研究目前仍多以离线辐照后的总剂量退化表征为主^[13]，而针对辐照过程中器件电流的实时响应特征及其与剂量率之间的定量关系，仍缺乏系统的实验数据支撑与机理解释。

针对上述问题，本文开展了 γ 射线辐照下BJT的在线实时电学参数测试，并结合仿真系统研究

中等剂量率对其响应特性的影响。本研究主要目的：(1) 表征不同偏置状态下BJT关键电流参数随辐照时间的演化规律，揭示剂量率对实时响应幅值的定量调制关系；(2) 基于载流子生成与收集的物理模型，阐明剂量率与瞬态电流增量之间线性依赖关系的内在机制。

1 方法

本研究选用同一批次通用型NPN双极结型晶体管2N2222A作为实验对象，器件由济南半导体厂生产，封装形式为TO-18。器件手册给出该型号器件的部分参数如下：峰值基极电流 $I_{BM}=200\text{ mA}$ ；在 $I_C=10\text{ mA}$ ， $V_{CE}=10\text{ V}$ 条件下，直流电流增益 $h_{FE}>75$ ；在 $I_E=0$ ， $V_{CB}=60\text{ V}$ 条件下，集电极截止电流 $I_{CBO}<10\text{ nA}$ 。

辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Co - γ 辐射源上进行。为研究BJT在中等剂量率 γ 辐射下的实时电学响应特性，本文开展了在线辐

照测试。设定辐照剂量率分别为 300 rad (Si) /s 、 200 rad (Si) /s 、 100 rad (Si) /s 、 50 rad (Si) /s 和 10 rad (Si) /s ，每次辐照持续时间为 60 s 。实验过程中，样品在设定偏置条件下保持通电，并在辐照前开始记录电流数据；辐照期间连续采样记录电流变化；辐照结束后继续记录其恢复过程。每个剂量率条件下测试3只器件。剂量率由PTW电离室测量，且测量设备经中国计量院校准，其测试误差可忽略不计。

在线辐照测试中，实验样品工作于两种偏置状态：(1) 截止状态， $V_{CB}=10\text{ V}$ ，发射极开路，测试集电结反向截止电流 I_{CBO} ；(2) 放大状态， $V_{BE}=0.5\text{ V}$ ， $V_{CE}=20\text{ V}$ ，测试基极电流 I_B 、集电极电流 I_C 及电流增益 h_{FE} 。表1汇总了本文的辐照与测试条件。测试系统示意图如图1所示。该系统的测量准确性在辐照测试前已完成验证，在 10 nA 量程下电流测量准确度约为 $\pm(0.15\%\text{ 读数}+3\text{ pA})$ ，能够满足本文测试精度要求。

表1 γ 辐照实验条件汇总
Table 1 Summary of γ -irradiation experiment conditions

偏置条件 Bias conditions	剂量率 Dose rate / ($\text{rad(Si)}\cdot\text{s}^{-1}$)	测试参数 Test parameters
$V_{CB}=10\text{ V}$, emitter open	300, 200, 100, 50, 10	I_{CBO}
$V_{BE}=0.5\text{ V}$, $V_{CE}=20\text{ V}$	300	I_B , I_C , h_{FE}

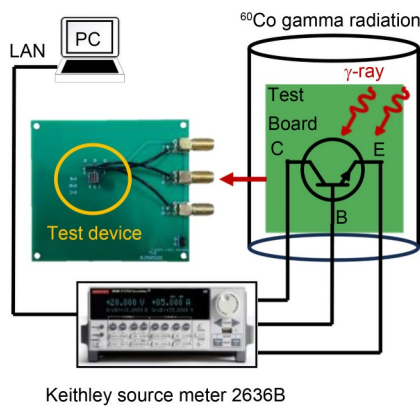


图1 NPN晶体管的在线测试装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of the *in-situ* testing setup for NPN transistors

2 结果

2.1 不同偏置状态下BJT的实时响应特征

BJT在不同偏置状态下，其关键电流参数随辐照时间的变化关系，如图2所示。在相同辐照条件（ 60 s ， 300 rad(Si)/s ）下，两种偏置状态下器件表现出明显不同的响应特征。在截止状态下（如图2（a）），辐照前的 I_{CBO} 约为 0.25 nA 。辐照开始后， I_{CBO} 迅速增加，增幅约为 25.6 nA ；而在辐照停止后，该电流又迅速恢复到接近辐照前的初始水平。该结果表明， γ 辐照在截止状态引发的是一种可逆的瞬时电流增强过程，辐照期间累积的总剂量对该电流并未表现出显著影响。

相比之下，在放大状态下， I_B 随辐照时间（即累积剂量）的增加而逐渐上升，并伴随 h_{FE} 下降，如图2（b）所示。该现象与电离总剂量效应典型特征一致，主要归因于辐射在Si/SiO₂界面及氧化

层内部产生并累积的缺陷^[14-15]。此外，在辐照开始瞬间， I_b 出现了一个短暂的下降尖峰。由于此时累积剂量可忽略，该尖峰可能源于 γ 辐射引发的瞬态电流，其方向与偏置电流相反，从而产生了短暂的抵消效应。

综上， γ 辐射对截止状态下BJT截止电流 I_{CBO} 的影响主要表现为瞬时可逆的电流增加；而在放大状态下，器件响应主要表现为缺陷累积引起的不可逆退化，并叠加了辐照初始阶段的瞬态响应。

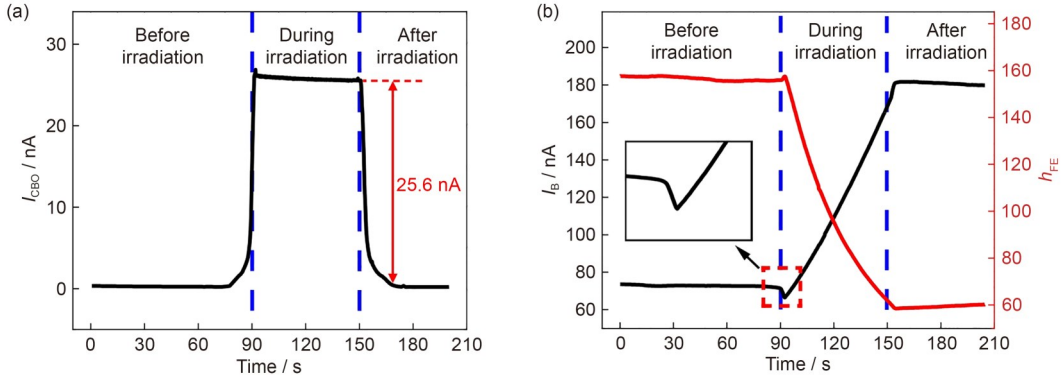


图2 在300 rad(Si)/s的辐照剂量率下,不同偏置条件下器件关键电流参数随辐照时间的变化关系:
(a)截止状态;(b)放大状态(彩色见网络版)

Fig.2 Variation of the key current parameters of the device as a function of irradiation time under a dose-rate of 300 rad(Si)/s and different bias conditions: (a) cut-off state; (b) active state (color online)

2.2 不同剂量率下BJT的实时响应特征

处于截止状态的BJT样品在不同剂量率 γ 辐射下 I_{CBO} 随辐照时间的关系,如图3所示。结果表明,在所有剂量率下, I_{CBO} 均表现出与图2(a)一致的变化规律,即辐照期间电流迅速上升,辐照停止后迅速恢复。关键区别在于,实时瞬态电流的增幅对剂量率具有显著的依赖性,剂量率越高, I_{CBO} 的增幅越大。在300 rad(Si)/s条件下, I_{CBO} 增幅约为25.6 nA;随着剂量率逐步降低,增幅呈系统性减小;当剂量率降至10 rad(Si)/s时,增幅仅约为2 nA。该结果表明,辐射诱导实时电流响应的强度与剂量率直接相关。这一现象可归因于 γ 辐射在Si中诱导产生额外的电子-空穴对,这些电子-空穴对随后在反向偏置电场作用下被迅速收集,从而产生瞬态电流。剂量率影响了非平衡载流子的生成速率,因此对所观测到的电流响应幅值具有直接调制作用。

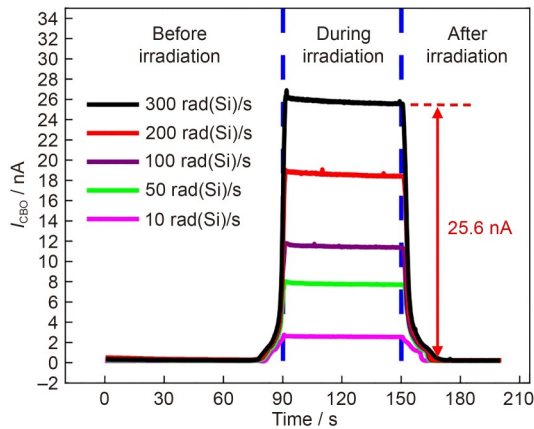


图3 不同剂量率下 I_{CBO} 随辐照时间的变化关系
(彩色见网络版)

Fig.3 Relationship between I_{CBO} and irradiation time under different dose-rates (color online)

3 仿真对比分析和讨论

实验结果表明,在截止状态下,BJT的实时电流响应对剂量率具有显著依赖性,其本质与 γ 辐射在Si中诱导的电子-空穴对产生密切相关。为深入分析其物理机制,本文采用Geant4和TCAD(Technology computer aided design)两种方法开展仿真研究。首先,利用Geant4模拟 γ 射线在器件敏感体积内的能量沉积过程,获得不同剂量率下电子-空穴对的生成速率。随后,将相应载流子产生率引入TCAD模型,模拟并分析剂量率对BJT截止电流 I_{CBO} 实时响应的影响。

3.1 不同剂量率 γ 辐射导致电子-空穴对产生的Geant4仿真

为阐明 γ 辐射与半导体材料之间的相互作用机理,本研究基于Geant4蒙特卡洛方法,模拟了能量为1.25 MeV的 γ 光子在器件多层结构($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$)中的能量沉积过程,所采用的物理模型如图4(a)所示。模拟中,共 1×10^6 个光子从 Si_3N_4 层垂直入射。已有研究表明, γ 射线主要通过康普顿散射在材料中沉积能量,并激发电子-空穴对^[16]。图4(b)给出了沿入射方向(Z轴) γ 辐射诱导电子-空穴对面密度的分布情况。结果显示,能量沉积始于 Si_3N_4 层,其面密度在 SiO_2 层中达到峰值,进入Si层后随深度增加而逐渐衰减。

对于辐射诱导产生的载流子,只有在空间电荷区内及其附近一个扩散程度范围内产生的部分,才能在内建电场的作用下被有效分离和收集,从而形成瞬态电流。本文进一步重点分析了PN结界面附近的载流子生成情况,如图5所示。结果表明,在结区附近约0.1 μm 范围内,载流子密度分

布较为平坦,说明 γ 射线在该关键区域内可近似视为均匀产生载流子。对比不同剂量率(10 rad (Si) /s和300 rad (Si) /s)下的模拟结果可以看出,剂量率越高,单位时间和单位体积内的能量沉积率越高,因而产生的电子-空穴对数量也越多。这为实验中观测到的瞬态电流幅值随剂量率升高而增大的现象提供了直接的物理依据。

载流子产生率(g_0)与辐射诱导电流之间的定量关系可由 Wirth-Rogers 提出的公式描述^[17]— $I_{ss} = qAg_0D(W_i + L_p + L_n)$ 。其中 q 是元电荷。该式

表明,实时瞬态电流 I_{ss} 与生成率 g_0 、剂量率 D 和有效收集体积($A(W_i + L_p + L_n)$)成正比。基于此模型,不同偏置状态下的响应差异可以得到统一解释:在截止偏置下,反向电压使耗尽区宽度 W_i 增大,从而扩大有效收集体积,因此 I_{CBO} 表现出明显的剂量率依赖性(如图3所示)。在放大偏置下,耗尽区宽度 W_i 减小,辐射诱导瞬态载流子收集效应减弱,同时总剂量效应引起的 I_B 不可逆上升占主导地位(如图2(b)所示),从而在整体上掩盖了电流对剂量率的实时响应。

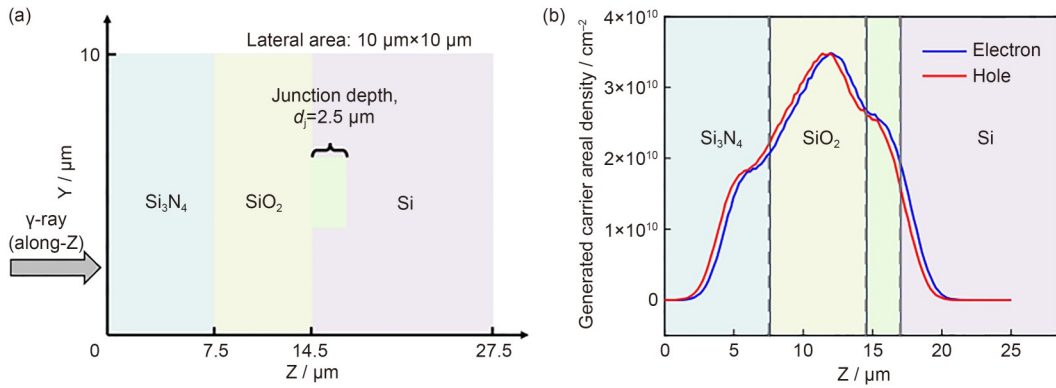


图4 (a)Geant4 仿真采用的层状结构示意图($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$);(b)沿入射方向(Z轴) γ 辐射诱发产生的电子-空穴对的面密度分布(彩色见网络版)

Fig.4 (a) Schematic diagram of the layered structure ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$) used in Geant4 simulation; (b) depth distribution of γ -ray-induced electron-hole pair areal density along the incident direction (Z-axis) (color online)

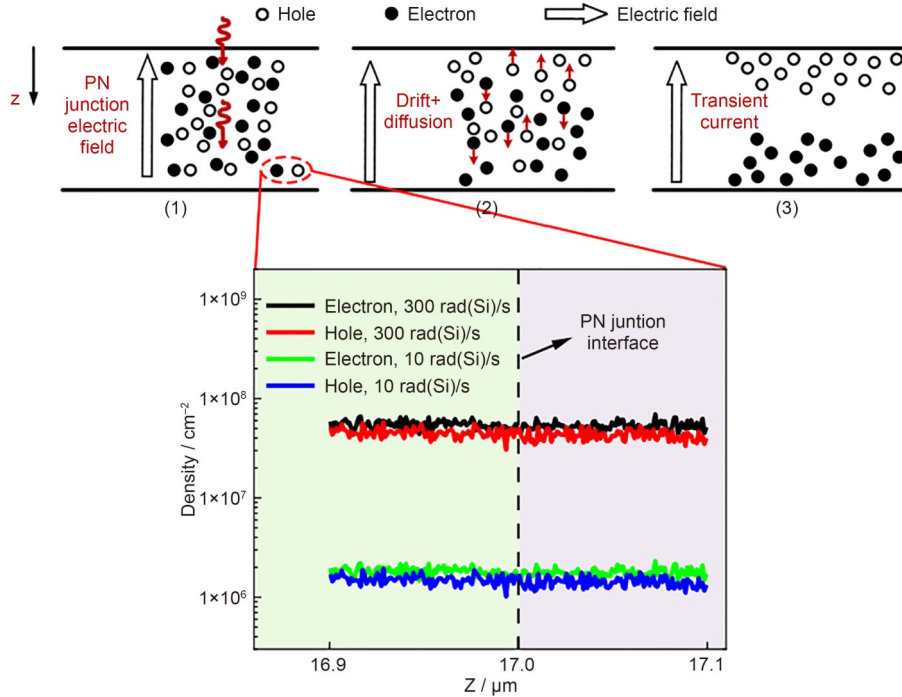


图5 不同剂量率 γ 辐照下PN结界面附近的电子-空穴对产生(彩色见网络版):(1) γ 辐射导致耗尽区内电子-空穴对的产生;(2)产生的电子-空穴对的漂移和扩散,引起电荷分离;(3)辐射诱导产生的电子-空穴对的收集

Fig.5 Generation of electron-hole pairs near the PN junction interface under γ -ray irradiation at different dose-rates (color online): (1) generation of electron-hole pairs in the depletion region induced by gamma irradiation; (2) drift and diffusion of the generated electron-hole pairs, leading to charge separation; (3) collection of the radiation-induced electron-hole pairs

3.2 TCAD 仿真研究

基于 Geant4 仿真获得的能量沉积结果，本文在 TCAD 辐射模型中调整了硅材料中的载流子产生率，并以剂量率 D 为输入变量，模拟了 10~300 rad (Si) /s 范围内不同剂量率条件下 BJT 截止状态的辐照过程及电流响应，结果如图 6 所示。仿真结果较好地复现了实验观测到的关键特征：辐照前， I_{CBO} 保持较小且稳定反向电流；辐照期间，电流出现瞬时升高，且剂量率越高，瞬态增幅越大；辐照结束后电流迅速恢复至初始水平。

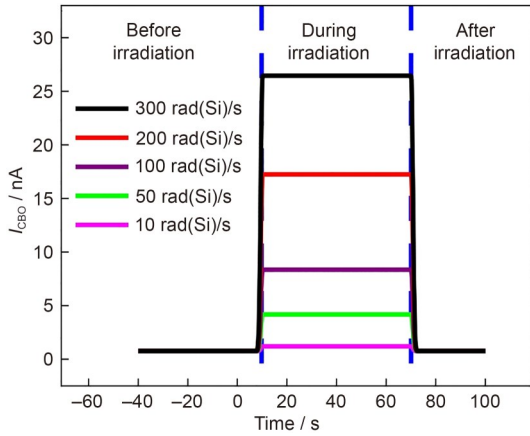


图6 TCAD 仿真中不同剂量率下 I_{CBO} 随辐照时间的变化关系(彩色见网络版)

Fig.6 TCAD-simulated variation of I_{CBO} as a function of irradiation time at different dose-rates (color online)

为进一步分析不同剂量率下电流响应差异的形成机制，图 7 给出了 10 rad (Si) /s 和 300 rad (Si) /s 两种条件下内部电流密度分布及辐射诱导载流子产生率分布。结果表明，随着剂量率升高，器件耗尽区附近的电子-空穴对产生率明显提高，同时对应区域的电流密度也增强。这表明在较高剂量率条件下，单位时间内在空间电荷区及其临近区域产生的非平衡载流子数量更多，从而在反偏电场作用下被分离和收集，最终表现为更大的截止电流增量。图 7 从器件内部载流子产生与输运的角度，为实验中观测到的剂量率增强效应提供了直观的物理图像。

为了进一步明确剂量率与电流增量之间的定量关系，图 8 给出了实验结果、TCAD 仿真结果以及 Wirth-Rogers 理论模型对 ΔI_{CBO} 随剂量率变化关系的对比。实验和仿真结果均表明， ΔI_{CBO} 与剂量率之间呈良好的线性关系，该趋势与 Wirth-Rogers 模型的预测一致。这表明，在截止偏置条件下，BJT 的辐射诱导电流增量主要受剂量率线性调制。结

合图 6 和图 7 可以发现，所观测到的线性关系本质来源于剂量率升高所导致的结区附近电子-空穴对产生速率增加，以及反偏电场对这些非平衡载流子的快速收集。

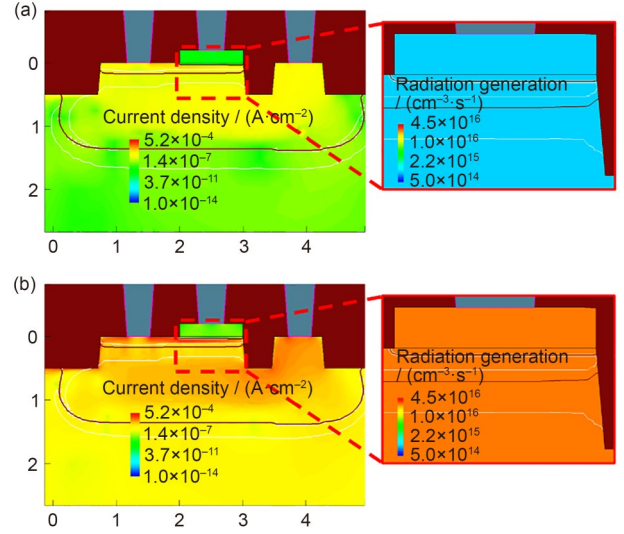


图7 TCAD 仿真得到的不同剂量率 γ 辐照下 BJT 截止偏置条件下的电流密度分布及辐射诱导载流子产生率对比：(a) 10 rad(Si)/s；(b) 300 rad(Si)/s。左图为器件截面电流密度图 (A/cm^2)，右侧插图为对应区域的辐射产生率 ($cm^{-3}\cdot s^{-1}$)

Fig.7 TCAD-simulated distributions of current density and radiation-induced carrier generation rate in the BJT under cutoff bias at different γ -ray dose-rates: (a) 10 rad(Si)/s; (b) 300 rad(Si)/s. The left panels show the current density (A/cm^2), and the insets on the right present the corresponding radiation generation rate ($cm^{-3}\cdot s^{-1}$) in the highlighted region

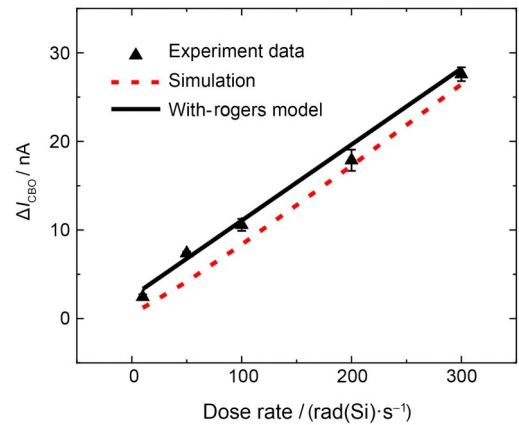


图8 ΔI_{CBO} 随辐照剂量率变化的实验、TCAD 仿真与 Wirth-Rogers 理论模型对比

Fig.8 Comparison of experimental data, TCAD simulation and Wirth-Rogers theoretical prediction of ΔI_{CBO} as a function of irradiation dose-rate

4 结论

本研究通过在线辐照实验与仿真相结合的方法，系统研究了中等剂量率 γ 辐射下 BJT 的实时电

流响应特性。实验结果表明,在截止状态下, γ 辐射会引起BJT的 I_{CBO} 瞬时增加,并且在辐照停止后 I_{CBO} 迅速恢复;在10~300 rad (Si) /s 范围内, I_{CBO} 的实时响应增量(ΔI_{CBO})随剂量率升高呈线性增大趋势。仿真分析表明,随着剂量率升高,结区附近电子-空穴对的产生速率增加,进而导致电流实时响应增量变大;TCAD仿真进一步复现了电流的瞬态变化过程,并验证了截止电流增量对剂量率的线性依赖关系。实验和仿真结果均与Wirth-Rogers模型表现出较好的一致性。上述研究结果为核工业辐射环境下BJT的在线状态评估提供了实验依据和仿真支撑,并为后续开展基于半导体器件的剂量率在线测试研究提供参考。后续可进一步面向不同工艺结构器件,在更宽的剂量率范围内开展其实时响应特性的研究分析。

作者贡献声明 孙家诚负责实验实施与数据获取、数据处理与结果分析、TCAD仿真、图表绘制、初稿撰写与论文修改;李小龙负责研究思路设计、实验结果分析、TCAD仿真、初稿撰写与论文修改;杨济聪参与实验实施与数据获取、数据处理与结果分析;王利斌负责Geant4仿真;王信参与实验方案的讨论;孙静负责辐照实验的安排和项目支持;郭旗负责课题概念的提出、研究思路设计、论文修改与审阅、经费获取;文林和李豫东负责项目管理与监督。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 Fiza S. Bipolar junction transistor: theory, operation and applications[J]. International Journal of Engineering Research in Electronics and Communication Engineering, 2022, **9**(5S): 1-6.
- 2 Tang D D, Solomon P M. Bipolar transistor design for optimized power-delay logic circuits[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1979, **14**(4): 679-684. DOI: 10.1109/JSSC.1979.1051244.
- 3 Ali H, Aseeri M. Bipolar junction transistor as a switch [J]. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2018, **13**(1): 52-57. DOI: 10.9790/1676-1301015257.
- 4 Li X J, Geng H B, Liu C M, *et al.* Radiation effects on bipolar junction transistors and integrated circuits produced by different energy Br ions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2009, **612**(1): 171-175. DOI: 10.1016/j.nima.2009.10.165.
- 5 Lee M, Lee N, Gwon H, *et al.* Design of radiation-tolerant high-speed signal processing circuit for detecting prompt gamma rays by nuclear explosion[J]. Electronics, 2022, **11**(18): 2970. DOI: 10.3390/electronics11182970.
- 6 Tsitsimpelis I, Taylor C J, Lennox B, *et al.* A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments[J]. Progress in Nuclear Energy, 2019, **111**: 109-124. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.023.
- 7 阳辉, 刘燕芳, 陈宇, 等. 双极型运算放大器 ELDRS 效应试验研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2011, **29**(3): 183-188.
YANG Hui, LIU Yanfang, CHEN Yu, *et al.* Study on the ELDRS of bipolar linear operational amplifier[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2011, **29**(3): 183-188.
- 8 Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, *et al.* Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1994, **41**(6): 1871-1883. DOI: 10.1109/23.340519.
- 9 Hjalmanson H P, Pease R L, Hembree C E, *et al.* Dose-rate dependence of radiation-induced interface trap density in silicon bipolar transistors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, **250**(1/2): 269-273. DOI: 10.1016/j.nimb.2006.04.122.
- 10 Boch J, Saigne F, Touboul A D, *et al.* Dose rate effects in bipolar oxides: Competition between trap filling and recombination[J]. Applied Physics Letters, 2006, **88**(23): 232113. DOI: 10.1063/1.2210293.
- 11 Freitag R K, Brown D B. Study of low-dose-rate radiation effects on commercial linear bipolar ICs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, **45**(6): 2649-2658. DOI: 10.1109/23.736510.
- 12 Alexander D R. Transient ionizing radiation effects in devices and circuits[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, **50**(3): 565-582. DOI: 10.1109/TNS.2003.813136.
- 13 Sharp R E. Radiation effects on power semiconductors (nuclear power industry)[C]//IEE Colloquium on Power Semiconductor Devices. London: IET, 2002.