

28 nm 器件电子单粒子翻转效应物理机理及特性*

徐静妍[†] 胡杨 王迪 江新帅 陈伟 丁李利 薛院院

(西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024)

(2024 年 11 月 20 日收到; 2025 年 12 月 27 日收到修改稿)

空间轨道环境中电子通常具有比质子更高的通量、更强的屏蔽穿透能力, 并且纳米尺度下电子被证实足以引发器件单粒子翻转, 从而成为影响航天器电子系统可靠性的新问题. 基于 28 nm 体硅器件开展蒙特卡罗模拟仿真研究及电子辐照实验, 揭示电子单粒子效应物理机理及特性. 结果表明: 器件临界电荷小于 0.3 fC 或者电子能量小于 100 MeV 时, 直接电离是电子引发单粒子翻转的主要物理机理, 直接电离产生的二次电子能量和截面受到初始电子能量的影响很小, 进而使得直接电离主导下的单粒子翻转截面几乎不受入射电子能量影响. 只有当器件临界电荷大于 0.4 fC 且电子能量大于 1000 MeV 时, 电子与原子核的弹性碰撞产生的反冲核以及电子引发核反应产生的次级粒子间接电离才成为引发单粒子翻转的重要原因. 而器件临界电荷小于 0.2 fC 时, 电子在典型地球轨道引发器件单粒子翻转的贡献将超过质子, 因此直接电离是最值得关注的电子单粒子效应机理.

关键词: 电子, 单粒子翻转, 临界电荷, 直接电离**DOI:** 10.7498/aps.75.20241613**CSTR:** 32037.14.aps.75.20241613

1 引言

空间辐射环境中的各种高能粒子会导致航天器电子系统发生故障甚至失效, 其中单粒子效应一直是航天器电子系统可靠性的最主要威胁^[1,2]. 一直以来, 重离子和高能质子被认为是引起航天器电子系统单粒子翻转的主要原因^[3-8]. 随着工艺尺度缩减到 45 nm 以下, 器件临界电荷量显著降低, 电子被证实足以在小尺寸器件中引发单粒子翻转^[9-21]. 在很多典型地球轨道上电子均有明显高于质子的通量^[22,23], 在美国国家航空航天局针对木星探测时更是发现木星辐射环境中具有大通量、能量达到 1 GeV 以上的电子, 并且电子穿透屏蔽能力比质子更强^[14-16].

电子单粒子效应作为在工艺尺寸缩减后出现的新现象, 成为影响航天器可靠性的新问题. 而相

关研究尚在起步阶段, 对于电子引发单粒子效应的主要物理机理还在阐释完善阶段未形成共识体系. 电子入射与物质的相互作用主要分为以下几种方式^[24]: 1) 电离能量损失, 即电子与核外电子的非弹性碰撞使原子发生激发或电离, 产生电子空穴对, 损失自己的能量; 2) 辐射能量损失, 即电子经过原子核近旁时, 发生韧致辐射, 释放高能光子, 损失能量; 3) 核碰撞能量损失, 即电子与原子核的弹性碰撞, 原子核获得动能发生反冲, 产生晶格原子位移形成缺陷, 电子本身发生卢瑟福散射; 4) 电子核反应, 即电子引发原子核反应, 产生出射粒子和剩余核, 与光核反应类似. 第 1 种方式属于直接电离, 后面 3 种方式通过产生的次级粒子电离沉积能量属于间接电离. 有学者认为电子直接电离不足以引发单粒子效应^[17,18], 核反应是电子引发单粒子效应的主要原因^[19-21], 也有学者认为直接电离是 10 MeV 以下电子引发单粒子效应的最重要过程^[25]. 国内

* 国家自然科学基金 (批准号: 12105229) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jingyanxu@126.com

现有电子加速器也主要用于模拟充放电效应、总剂量效应、位移损伤效应等其他辐射效应实验, 能量范围较小, 束流强度过小或者过大, 普遍不太适合进行电子单粒子效应实验, 实验数据较少, 28 nm 以下器件的相关数据更罕见, 现象规律尚存在争议. 总体上目前国内外研究对电子单粒子效应机理揭示还不够清晰, 影响电子单粒子效应截面的因素分析还不够全面, 没有充分讨论不同能量范围的电子在不同临界电荷的器件中引发单粒子效应可能存在不同的效应机理.

本文针对电子单粒子效应机理不够清晰的问题, 选择 28 nm 体硅器件开展蒙特卡罗模拟仿真工作以及地面电子单粒子效应辐照实验, 揭示了 28 nm 体硅工艺下器件的电子单粒子效应的物理机理和规律, 全面地分析了器件临界电荷、电子能量、入射角度等多种因素对电子单粒子翻转截面的影响, 对比了典型空间轨道上电子与质子引发器件单粒子翻转的贡献情况, 为空间环境中评估电子诱发电子系统错误率贡献和加固技术研究提供清晰的理论基础.

2 电子单粒子效应机理分析

电子器件受到各种能量粒子入射沉积能量造成器件逻辑状态改变的现象被称为单粒子翻转效应. 重离子和低能质子入射器件沉积能量的主要方式是电离能量损失即直接电离, 高能质子入射器件沉积能量的主要方式是核碰撞能量损失以及核反应即间接电离. 电子入射器件也会发生直接电离能量损失, 但电离能力远弱于重离子和质子, 电子也可能与器件材料原子核发生弹性碰撞产生反冲核或者通过核反应产生次级粒子间接电离, 但电子核反应的截面远低于重离子和质子, 同时韧致辐射释放高能光子损失的能量对电子来说也无法忽略. 能

够造成器件翻转的能量沉积阈值即临界电荷不同和入射电子的能量不同都很可能存在不同的效应机理.

Geant4 软件是进行单粒子效应仿真的常用工具, 能够很好地描述粒子与材料相互作用沉积能量的过程. 为了充分讨论电子引发器件单粒子翻转的主要机理, 通过 Geant4 软件进行蒙特卡罗模拟仿真电子引发 28 nm 静态随机读取存储器 (static random access memory, SRAM) 器件的单粒子翻转, 并对造成单粒子翻转的能量沉积和产生次级粒子的情况都进行追踪记录.

2.1 28 nm SRAM 器件 Geant4 仿真模型

Geant4 仿真模型是根据某 28 nm SRAM 器件样品信息建立. 仿真使用的 Geant4 版本为 10.5. 对 28 nm SRAM 器件进行纵剖分析, 如图 1 所示, 获取器件灵敏区上方金属布线层的材料和厚度, 上方材料从上往下分别为顶层的 Si_3N_4 和 Al, M10—M1 的 10 层金属 Cu 互连线, 金属层之间的绝缘材料 SiO_2 . 通过器件版图信息获得器件灵敏区大小, NMOS(N-channel metal-oxide-semiconductor transistor) 为 $100\text{ nm}\times 300\text{ nm}\times 95\text{ nm}$, PMOS(P-channel metal-oxide-semiconductor transistor) 为 $100\text{ nm}\times 300\text{ nm}\times 45\text{ nm}$. 据此建立 28 nm SRAM 器件 Geant4 几何模型, 如图 2 所示, 建立 16×16 SRAM 单元阵列模型.

在物理模型方面, 选择了 Geant4 中预定义的物理模型封装包 QGSP_BIC. 在进行电子入射仿真模拟时将电磁相互作用模型替换为 Penelope 模型, 在 Penelope 模型中考虑光子、电子和正电子等一系列物理过程, 如光电效应、康普顿效应、瑞利散射、韧致辐射等, 能够更好地描述电子造成能量沉积的物理过程.

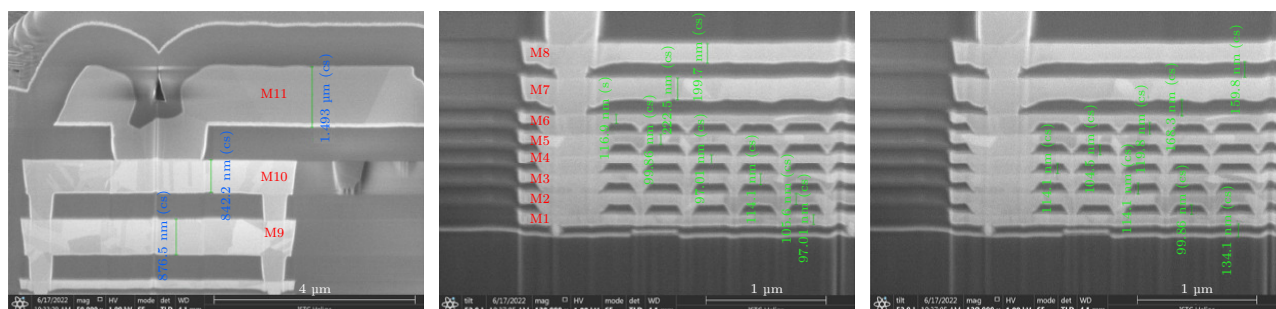


图 1 28 nm SRAM 器件灵敏区上方各金属布线层厚度

Fig. 1. Thickness of each metal wiring layer above the sensitive area of a 28-nm SRAM device.

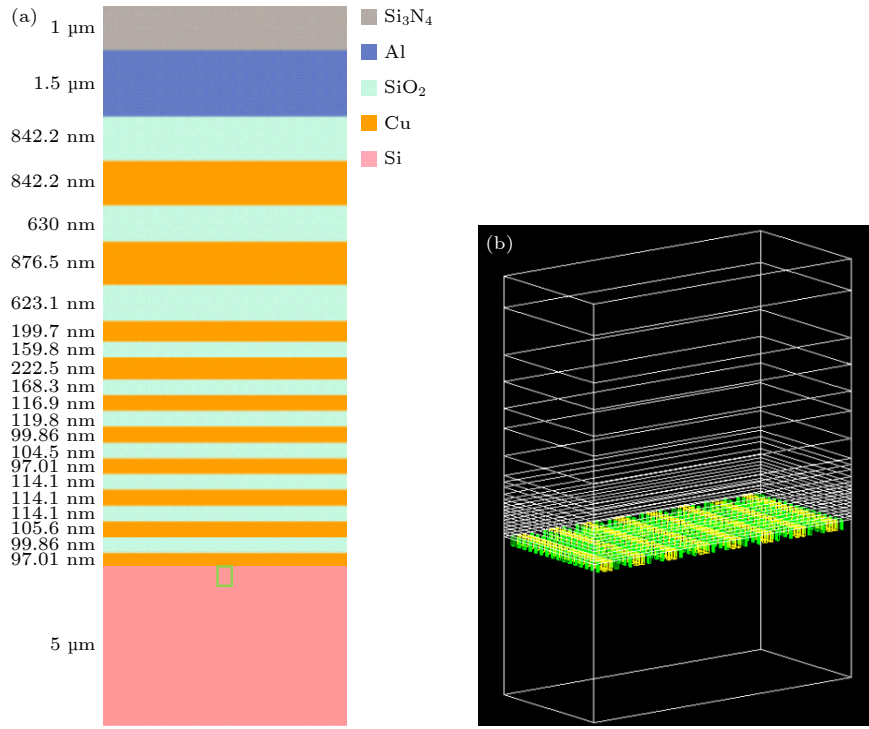


图 2 28 nm SRAM 器件 Geant4 几何模型 (a) 模型各层结构示意图; (b) 16×16 SRAM 单元阵列模型

Fig. 2. Geant4 geometric model of a 28-nm SRAM device: (a) Each layer in the model; (b) 16×16 SRAM cell array model.

利用该 28 nm SRAM 器件在标准电压下进行的重离子辐照实验 SEU 截面评估器件的临界电荷约 0.46 fC, Inguibert 等 [19] 给出在标准电压下 32 nm 工艺器件的临界电荷约 0.4 fC, 22 nm 工艺器件临界电荷约 0.25 fC, 低电压下 22 nm 工艺器件临界电荷可低至 0.08 fC. 综合考虑器件在不同工作电压下的临界电荷范围, 探究不同临界电荷和不同能量下电子引发单粒子翻转的机理, 将器件的临界电荷分别设置为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 fC 进行仿真. 单能电子束从 SRAM 单元阵列模型顶部垂直入射, 入射电子的能量分别设置为 0.1, 1, 5, 10,

100, 1000, 10000 MeV.

2.2 仿真结果与机理分析

如图 3 和图 4 所示, 当器件临界电荷为 0.1 和 0.2 fC 时, 能量为 0.1, 1, 5, 10, 100, 1000, 10000 MeV 的电子造成的单粒子翻转几乎全部由次级电子沉积能量产生, 极个别存在次级光子参与沉积了不可忽略的能量. 说明此时电子与核外电子的非弹性碰撞造成直接电离能量损失是引发单粒子翻转的最主要原因, 韧致辐射产生的光子只存在极少数的贡献.

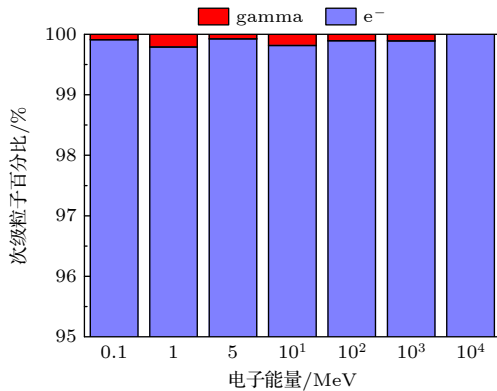


图 3 临界电荷为 0.1 fC 时造成单粒子翻转的次级粒子占比
Fig. 3. Proportion of secondary particles causing single-event upset when the critical charge is 0.1 fC.

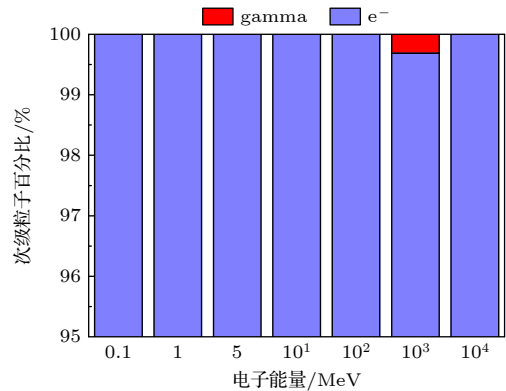


图 4 临界电荷为 0.2 fC 时造成单粒子翻转的次级粒子占比
Fig. 4. Proportion of secondary particles causing single-event upset when the critical charge is 0.2 fC.

如图 5 所示, 当器件临界电荷为 0.3 fC 时, 能量为 0.1, 1, 5, 10, 100 MeV 的电子造成的单粒子翻转全部由次级电子沉积能量产生, 但 1000, 10000 MeV 的电子造成的单粒子翻转中出现少量由反冲 Si 原子核沉积能量产生的. 说明此时电子与核外电子的非弹性碰撞造成直接电离能量损失仍然是引发单粒子翻转的最主要原因, 但 1000 MeV 以上高能电子与材料原子核发生弹性碰撞产生反冲核也贡献了少量单粒子翻转.

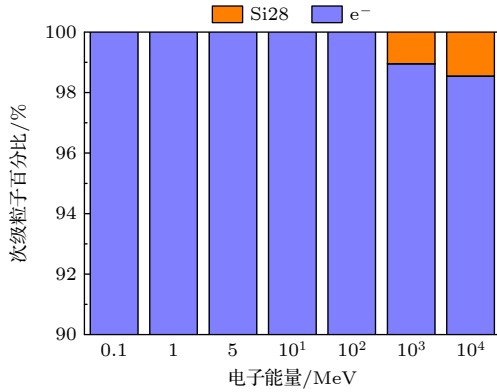


图 5 临界电荷为 0.3 fC 时造成单粒子翻转的次级粒子占比
Fig. 5. Proportion of secondary particles causing single-event upset when the critical charge is 0.3 fC.

如图 6 和图 7 所示, 当器件临界电荷为 0.4 fC 时, 能量为 0.1, 1, 5, 10, 100 MeV 的电子造成的单粒子翻转也全部由次级电子沉积能量产生, 但 1000, 10000 MeV 的电子造成的单粒子翻转中由反冲原子核产生的比例明显提升, 并且核反应产生的次级粒子沉积能量也成为单粒子翻转的重要原因. 当器件临界电荷为 0.5 fC 时, 能量为 1, 5, 10 MeV 的电子造成的单粒子翻转仍然全部由次级电子沉积能量产生, 但 100 MeV 的电子造成的单粒子翻转中出现由核反应次级粒子引发的, 1000, 10000 MeV 的电子造成的单粒子翻转主要通过反冲原子核以及核反应产生的次级粒子沉积能量产生.

从仿真结果来看, 电子引发 28 nm SRAM 器件单粒子翻转的主要机理与临界电荷、电子能量明显相关. 当器件临界电荷不超过 0.5 fC 时, 能量低于 100 MeV 的电子引发单粒子翻转的最主要机理都是直接电离, 电离产生的次级电子继续与其他电子相互作用沉积能量. 在器件临界电荷在 0.3 fC 以下时, 能量高于 1000 MeV 的电子引发单粒子翻转的主要原因仍然是直接电离. 但在器件临界电荷在 0.4 fC 以上时, 电子与原子核的弹性碰撞产生

的反冲核以及电子引发核反应产生的次级粒子逐步成为 1000 MeV 以上高能电子引发单粒子翻转的重要原因甚至是主要原因.

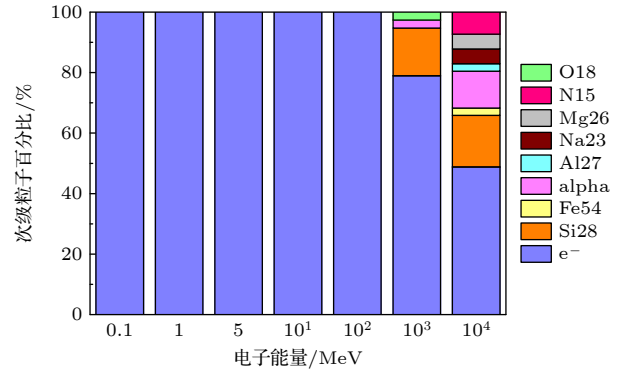


图 6 临界电荷为 0.4 fC 时造成单粒子翻转的次级粒子占比
Fig. 6. Proportion of secondary particles causing single-event upset when the critical charge is 0.4 fC.

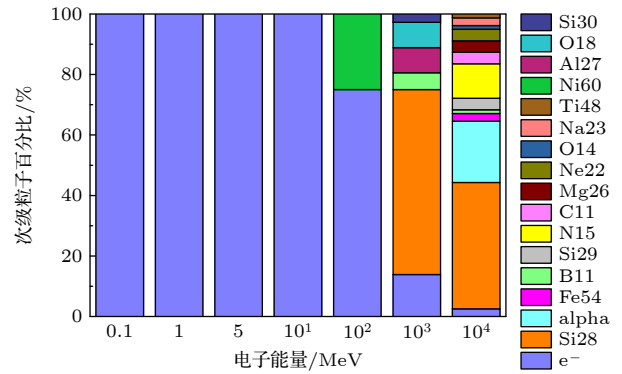


图 7 临界电荷为 0.5 fC 时造成单粒子翻转的次级粒子占比
Fig. 7. Proportion of secondary particles causing single-event upset when the critical charge is 0.5 fC.

和沿路径产生持续高水平电离的重离子不同, 初始电子自身的电离能力很弱, 因此次级电子继续与其他电子相互作用才是电子电离沉积能量的主要过程. (1) 式给出了电子/电子非弹性碰撞莫勒散射的二次电子截面, 其中 Z 是入射材料原子序数, E 是初始电子能量, T_{cut} 是二次电子截断能量, r_e 是电子半径, m 是电子质量, c 是光速 [26],

$$\sigma(Z, E, T_{\text{cut}}) = \frac{2\pi r_e^2 Z}{\beta^2(\gamma - 1)} \left[\frac{(\gamma - 1)^2}{\gamma^2} \left(\frac{1}{2} - x \right) + \frac{1}{x} - \frac{1}{1 - x} - \frac{2\gamma - 1}{\gamma^2} \ln \frac{1 - x}{x} \right],$$

$$\gamma = E/mc^2,$$

$$\beta^2 = 1 - (1/\gamma^2),$$

$$x = T_{\text{cut}}/(E - mc^2). \quad (1)$$

根据 (1) 式计算, 图 8 给出了四种截断能量的莫勒积分截面, 表示了不同初始能量电子在硅材料中获得比 T_{cut} 更大能量的二次电子的可能性, 可以看出当入射电子能量大于 1 MeV 时二次电子的能量和产生概率几乎不受初始电子的能量影响. 因此当直接电离是电子单粒子翻转的主要机理时, 不同能量的初始电子造成的单粒子翻转截面很可能差别很小.

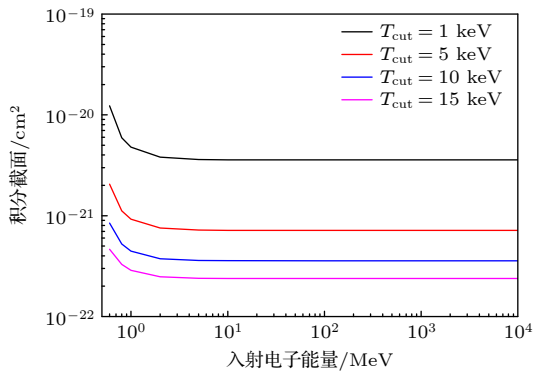


图 8 四种截断能量的莫勒积分截面
Fig. 8. Integrated Moller cross sections for four energy cuts.

这与一些学者认为电子线性能量传递 (linear energy transfer, LET) 值太低直接电离沉积的能量不足以造成器件单粒子翻转, 电子核反应才是造成电子单粒子效应的主要原因的观点不同. 电子入射经常存在非常曲折的径迹, 自身电离能力弱, 主要依靠电离产生的次级电子继续与其他电子相互作用沉积能量, 这就造成能损歧离很大, 并不适合用初始电子的 LET 值来直接评估电子在灵敏体中沉积的最大能量. 而能量较低电子是很难产生核反应的, 与材料原子核弹性碰撞也较难产生反冲核, 因此只有 1000 MeV 以上高能电子产生的反冲核和核反应才对较高临界电荷器件单粒子翻转存在主要贡献.

3 28 nm SRAM 器件中电子单粒子翻转截面的影响因素

从第 2 节机理分析中可以看出, 临界电荷和入射电子能量与电子引发器件单粒子翻转效应的机理具有明显的相关性. 为了评估实际空间轨道环境中电子对器件单粒子翻转截面的贡献, 并探讨最需关注的电子单粒子效应机理, 继续通过 Geant4 模拟进一步分析器件临界电荷、入射电子的能量、

入射角度多种因素对 28 nm SRAM 器件中电子单粒子翻转截面的影响, 以及空间轨道环境中电子和质子对器件单粒子翻转截面的贡献对比.

3.1 临界电荷和电子能量对单粒子翻转的影响

临界电荷在一定程度上体现 SRAM 器件对单粒子效应造成能量沉积的敏感性, 器件的工艺尺寸和工作电压都是决定器件临界电荷的关键因素, 更小的工艺尺寸和更低的工作电压都会使器件临界电荷更小. 不同的空间轨道环境中电子能谱也有所不同, 典型地球轨道环境中主要是低于 5 MeV 的较低能量电子, 而木星辐射环境中存在大量超过 1 GeV 的高能量电子. 为了分析临界电荷和电子能量对 28 nm SRAM 器件电子单粒子翻转截面的影响, 将器件的临界电荷分别设置为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 fC 进行仿真. 单能电子束从 SRAM 单元阵列模型顶部垂直入射, 入射电子的能量分别设置为 0.1, 1, 5, 10, 100, 1000, 10000 MeV. 通过模拟可以获得不同临界电荷值下对应的电子单粒子翻转截面, 如图 9 所示.

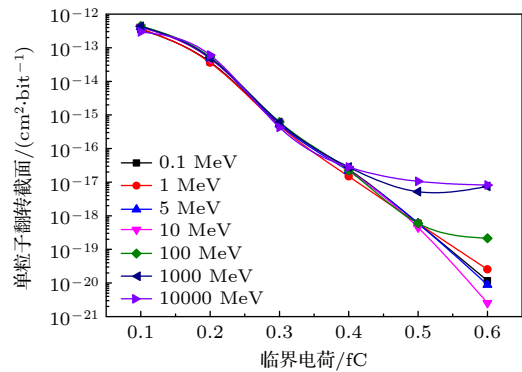


图 9 不同临界电荷值下电子单粒子翻转截面
Fig. 9. Electron-induced single-event upset cross section at different critical charge values.

从图 9 中可以看出, 随着临界电荷的增大, 多种能量电子引发的单粒子翻转截面均呈现指数级减小, 这与电子仅能在纳米器件中引发单粒子翻转的实验现象相符合. 当器件临界电荷为 0.4 fC 以下时, 不同能量电子入射引发的单粒子翻转截面几乎是一样的. 只有当器件临界电荷为 0.4 fC 以上时, 1000 MeV 以上的高能电子引发的单粒子翻转截面会明显高于较低能电子引发的单粒子翻转截面. 第 2 节机理分析表明, 当器件临界电荷为 0.4 fC

以下时,不同能量电子单粒子效应主要机理都是直接电离,并且直接电离产生的二次电子的能量和产生概率几乎不受初始电子的能量影响,将会得到非常相似的单粒子翻转截面.而当器件临界电荷为0.4 fC 以上时,1000 MeV 以上的高能电子与原子核的弹性碰撞产生的反冲核以及电子引发核反应产生的次级粒子逐步成为引发单粒子翻转的重要原因甚至是主要原因,也会带来比较低能量电子更高的翻转截面.效应机理可以很好地解释电子单粒子翻转截面现象.

为了对比当器件临界电荷不同时电子与质子造成的单粒子翻转截面差别,同时也对质子单粒子效应截面进行了仿真.质子仿真时使用的物理模型为 Geant4 中预定义的物理模型封装包 QGSP_BIC_HP,包括弹性和非弹性碰撞、中子俘获以及粒子电磁相互作用在内的许多物理过程.同样将器件的临界电荷分别设置为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 fC 进行仿真.单能质子束从 SRAM 单元阵列模型顶部垂直入射,入射质子的能量分别设置为 1, 2, 5, 10, 20, 40, 50, 90, 100, 1000 MeV. 通过模拟可以获得不同临界电荷值下对应的质子单粒子翻转截面,如图 10 所示.

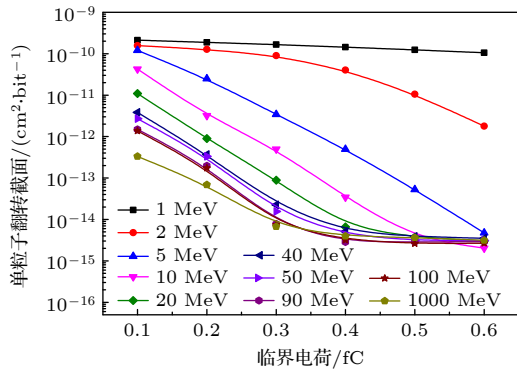


图 10 不同临界电荷值下质子单粒子翻转截面
Fig. 10. Proton-induced single-event upset cross section at different critical charge values.

从图 10 中可以看出,临界电荷对质子单粒子翻转截面的影响要远小于电子,尤其当临界电荷达到 0.4 fC 以上时,20 MeV 以上的中高能质子引发的单粒子翻转截面趋于稳定.

使用 OMERE 软件计算了几个典型地球轨道在 3 mm 铝屏蔽后的电子和质子能谱,模型采用 APS 和 AES,结果如图 11 所示,轨道信息见表 1.从图 11 中几个典型地球轨道在 3 mm 铝屏蔽后的

电子和质子通量来看,GEO 轨道的质子无法穿透 3 mm 铝屏蔽,其余轨道上电子通量也比质子通量要高出 3—5 个数量级.而器件临界电荷为 0.2 fC 以下时,电子引发的单粒子翻转截面仅与中高能质子引发的单粒子翻转截面相差 1 个数量级,甚至不足 1 个数量级,与低能质子引发的单粒子翻转截面相差 3—4 个数量级.因此,当器件临界电荷为 0.2 fC 以下时,电子在典型地球轨道引发器件单粒子翻转的贡献将超过质子.然而当器件临界电荷在 0.4 fC 以上时,电子引发的单粒子翻转截面与质子引发的单粒子翻转截面差距被迅速拉开,与中高能质子引发的单粒子翻转截面相差 3—4 个数量级,与低能质子引发的单粒子翻转截面相差 8—9 个数量级,此时质子在典型地球轨道引发器件单粒

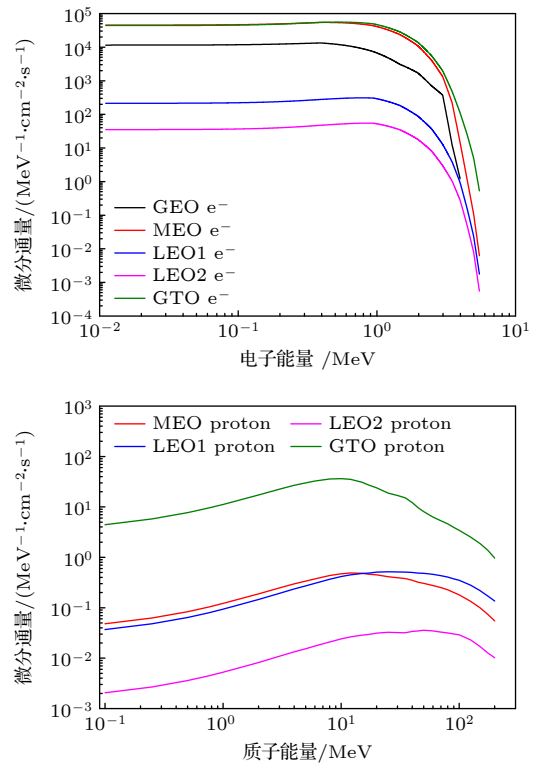


图 11 各轨道 3 mm 铝屏蔽后平均电子和质子通量
Fig. 11. Average electron and proton flux after 3 mm aluminum shielding for various orbits.

表 1 典型地球轨道
Table 1. Typical earth orbits.

轨道	远地点高度/km	近地点高度/km	倾斜角/(°)
GEO	35784	35784	0
MEO	26768	1000	63.4
LEO1	800	800	98
LEO2	400	400	51.5
GTO	35784	180	6

子翻转的贡献将远高于电子. 因此当器件临界电荷越低时, 空间轨道环境中的电子引发单粒子效应对航天器电子系统可靠性威胁越大, 越需要重点关注, 此时电子单粒子效应的主要机理是直接电离.

3.2 电子入射角度对单粒子翻转的影响

在实际环境中电子会从各种不同的角度入射器件. 为了分析电子入射角度对 28 nm SRAM 器件单粒子翻转截面的影响, 将电子入射角度分别设置为 90°, 60°, 45°, 30°进行仿真. 单能电子束从 SRAM 单元阵列模型顶部入射, 入射电子的能量分别设置为 0.1, 1, 5, 10, 100, 1000, 10000 MeV, 分别考虑器件临界电荷为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 fC. 通过模拟可以获得电子不同入射角度下对应的单粒子翻转截面, 如图 12 所示.

由图 12 中的仿真结果表明, 与垂直入射相比, 电子以更小角度入射总体会造成更大的单粒子翻转截面. 这个现象在器件临界电荷较低时比较明显, 而在器件临界电荷较高时入射角度对单粒子翻转截面的影响明显减弱. 因为入射角度最主要影响初始电子直接电离的作用距离, 对二次电子产生的

方向也有一定的影响, 而当反冲核和核反应的次级粒子成为引发单粒子翻转的重要原因时初始电子的入射角度的影响就变得很小了.

4 电子在 28 nm FPGA 器件中引发的单粒子翻转

为了更好地研究电子在 28 nm 器件中引发的单粒子翻转效应, 对蒙特卡罗仿真结果进行一定的补充验证, 进行了地面电子单粒子效应辐照实验并与质子单粒子效应辐照实验的截面进行对比. 蒙特卡罗模拟中建模的器件是某 28 nm SRAM 器件, 此款芯片的存储单元容量较小, 考虑到电子单粒子翻转截面低, 很难在芯片能承受的注量范围内捕获单粒子翻转, 因此电子辐照实验选择了一款更大容量的 28 nm 现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA) 器件.

4.1 实验设置

电子单粒子效应实验在中陕核杨凌核盛辐照技术有限公司的 10 MeV 高能电子直线加速器

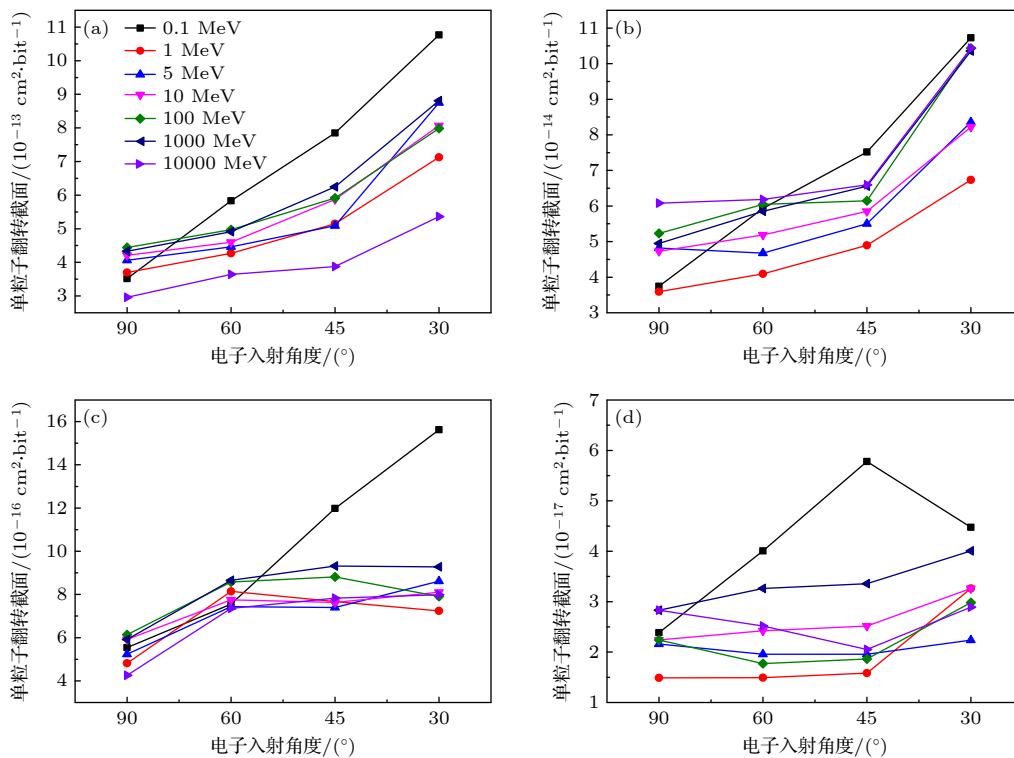


图 12 电子不同入射角度下的单粒子翻转截面 (a) 临界电荷为 0.1 fC; (b) 临界电荷为 0.2 fC; (c) 临界电荷为 0.3 fC; (d) 临界电荷为 0.4 fC

Fig. 12. Single-event upset cross section for electrons at different incident angles: (a) Critical charge of 0.1 fC; (b) critical charge of 0.2 fC; (c) critical charge of 0.3 fC; (d) critical charge of 0.4 fC.

(图 13) 上进行, 实验现场和样品辐照摆放位置如图 14 所示. 设备的性能指标为: 束流能量 10 MeV, 束流流强 0.2—2.0 mA, 脉冲重复频率 50—500 Hz 可调, 脉冲宽度 16 μ s, 峰值流强 300 mA, 束斑面积不小于 600 mm \times 20 mm, 束流稳定性 \pm 5%.

实验样品为 28 nm 体硅工艺的 Xilinx K7 型 FPGA, 将其安装在样品台上, 连接测试系统. 图 15 是 SRAM 型 FPGA 单粒子效应在线测试系统的主体框架, 包括电源板、控制板和辐照板 (图 16). 电源板分成 6 路供电, 分别为两颗芯片提供内核电压、辅助电压和 I/O 电压. 控制板主要包括主控 FPGA 芯片、Flash 存储器以及网口驱动芯片等. 辐照板与控制板以 60 芯扁平电缆进行相连, 可以



图 13 10 MeV 高能电子直线加速器

Fig. 13. 10 MeV high-energy electron linear accelerator.

使控制板远离辐照环境, 从而保证测试系统的稳定性. 辐照板上放置两颗被测 FPGA 芯片. 测试系统的控制软件可以设置芯片所加电压、测试向量、回读方式等参数, 并实时显示各种测试结果. 测试系统将辐照中回读的数据与原始配置文件进行对比, 对 FPGA 配置存储器的位翻转进行判别.

4.2 实验过程

考虑到电子加速器束流强度过大, 注量率范围约 1.25×10^{13} — 1.25×10^{14} e/(cm 2 ·s), 在单粒子效应实验过程中可能引发器件的总剂量效应, 因此本

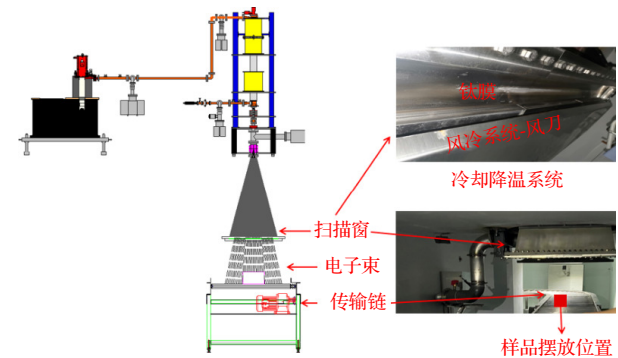


图 14 实验现场和样品辐照摆放位置示意图

Fig. 14. Schematic diagram of the experiment site and sample irradiation arrangement.

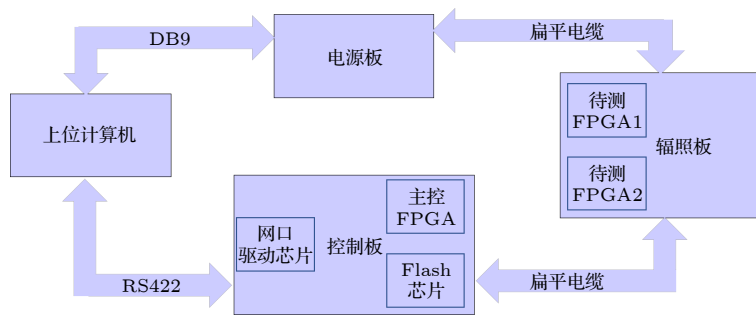


图 15 FPGA 单粒子效应在线测试系统框架图

Fig. 15. Block diagram of the FPGA single-event effect online test system.

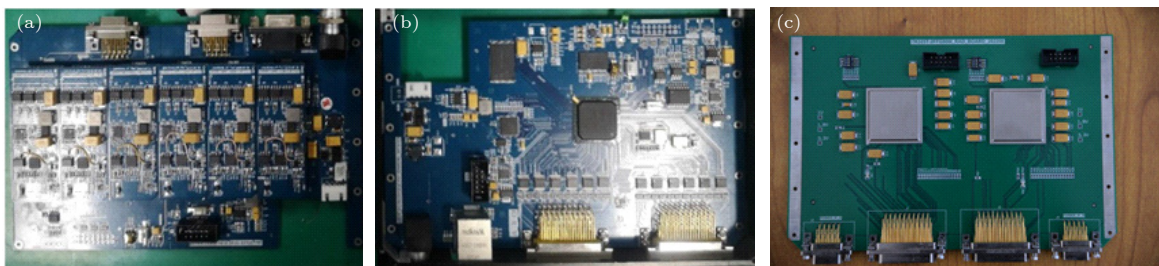


图 16 FPGA 单粒子效应在线测试系统 (a) 电源板; (b) 控制板; (c) 辐照板

Fig. 16. FPGA single-event effect online test system: (a) Power supply board; (b) control board; (c) irradiation board.

实验自制了一块降束板置于扫描窗下方,如图 17 所示,设置电子加速器脉冲重复频率 50 Hz,利用法拉第筒对降束后的束流注量率进行测量,测得注量率约为 $3.22 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,能够满足单粒子效应实验要求.

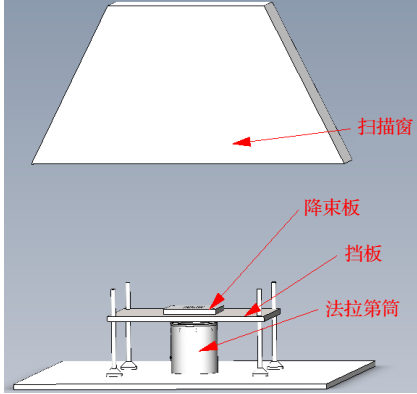


图 17 降束装置示意图

Fig. 17. Schematic diagram of the beam reduction device.

首先在束流出口降束板下方位置放置自制法拉第筒,用于确定电子的注量率,使用法拉第筒测量电子注量率时,部分电子会发生散射影响被测器件,因此当电子加速器注量率稳定后,移走法拉第筒,将被测 FPGA 样品放置在降束板下方同样位置,开始测试.将被测 FPGA 样品配置为 SRAM 模式并填充数据, FPGA 样品内核电压为 1.0 V, I/O 电压为 1.8 V,配置存储器有效数据位共 $8.6 \times 10^7 \text{ bit}$.

辐照过程中,测试系统实时监测被测 FPGA 发生翻转的次数,同时监测器件的工作电流,当工作电流突然大幅增大,且出现功能异常,断电重启才能恢复,则判定发生了单粒子门锁,测试系统在发生单粒子门锁时能够自动断电保护.辐照时间为 100 s.

4.3 实验结果与分析

开展电子单粒子效应实验的注量率为 $3.09 \times 10^{10} \text{ e}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,电子的能量为 10 MeV,总注量为 $3.09 \times 10^{12} \text{ e}/\text{cm}^2$,器件累积总剂量约 83.9 krad(Si),项目组前期通过钴源辐照总剂量实验保证该总剂量累积对器件的影响可控.电子辐照的实验结果为: FPGA 配置存储器发生单粒子翻转 2 次,翻转截面为 $7.5 \times 10^{-21} \text{ cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$,实验过程中未发生单粒子门锁.

实验中捕获的单粒子翻转数量仅有 2 次,主要是由于目前标准电压下 28 nm FPGA 器件的临界电荷值比较高,翻转截面较低,没有存储器容量足够大的测试芯片.考虑器件的总剂量累积过大会影响器件工作状态,无法继续提高辐照注量获取更多的翻转次数.

课题组针对样品同系列的 Xilinx K7 型 FPGA 在 5 MeV 低能质子和 50 MeV 及 90 MeV 高能质子辐照实验获取的单粒子翻转截面如图 18 所示 [27].

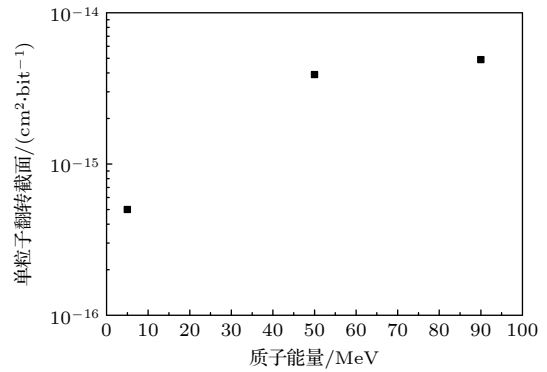


图 18 质子辐照实验单粒子翻转截面

Fig. 18. Single-event upset cross section for proton irradiation experiment.

电子辐照实验比高能质子实验的翻转截面低 6 个数量级.对比电子辐照及质子辐照实验翻转截面和第 3 节中的仿真结果可以看出,在器件临界电荷为 0.6 fC 时,仿真结果显示 10 MeV 电子入射引发的翻转截面在 $10^{-21}/(\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1})$ 量级,5 MeV 以上能量质子入射引发的翻转截面在 $10^{-15}/(\text{cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1})$ 量级,与实验结果量级相符,也相差 6 个数量级,说明此款 FPGA 的临界电荷约 0.6 fC,实验现象能够验证仿真规律.

5 结论

本文针对 28 nm 体硅器件电子单粒子翻转效应开展了蒙特卡罗模拟仿真工作以及地面电子单粒子效应辐照实验,分析揭示物理机理,发现电子引发 28 nm SRAM 器件单粒子翻转的主要机理与临界电荷、电子能量明显相关.当器件临界电荷不超过 0.5 fC 时,能量低于 100 MeV 的电子引发单粒子翻转的最主要机理都是直接电离.器件临界电荷在 0.3 fC 以下时,0.1—10000 MeV 的电子引发

单粒子翻转的主要原因也都是直接电离. 但器件临界电荷在 0.4 fC 以上时, 电子与原子核的弹性碰撞产生的反冲核以及电子引发核反应产生的次级粒子逐步成为 1000 MeV 以上高能电子引发单粒子翻转的重要原因甚至是主要原因.

分析研究了电子引发单粒子翻转的截面规律和多种因素对电子单粒子效应的影响. 1) 器件临界电荷是对电子单粒子翻转截面影响最大的因素. 随着临界电荷的减小, 多种能量电子引发的单粒子翻转截面均呈现指数级增大. 当器件临界电荷为 0.2 fC 以下时, 电子在典型地球轨道引发器件单粒子翻转的贡献将超过质子. 而当器件临界电荷在 0.4 fC 以上时, 质子在典型地球轨道引发器件单粒子翻转的贡献将远高于电子. 2) 当器件临界电荷为 0.4 fC 以下时, 入射电子能量对单粒子翻转截面的影响并不明显. 3) 与垂直入射相比, 电子以更小角度入射总体会造成更大的单粒子翻转截面. 这个现象在器件临界电荷较低时更加明显, 而在器件临界电荷较高时入射角度对单粒子翻转截面的影响明显减弱. 这些现象规律都可以通过本文揭示的物理机理得到很好的解释. 考虑到主要轨道的电子能量范围和器件临界电荷较低时电子对器件单粒子翻转的贡献较大, 本文认为直接电离是最值得关注的电子单粒子效应机理, 为空间环境中评估电子诱发电子系统错误率贡献和加固技术研究提供清晰的理论基础.

本文由于实验装置条件和样品容量限制, 实验验证还不够全面充分, 后续还将提高实验技术和样品条件, 进一步补充更大能量范围更多能量点的电子辐照实验数据, 对蒙特卡罗模拟仿真和机理分析进行更加全面充分的验证.

参考文献

- [1] Dodd P E, Shaneyfelt M R, Schwank J R, Felix J A 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 1747
- [2] Maurer R H, Fretz K, Angert M P, Bort D L, Goldsten J O, Ottman G, Dolan J S, Needell G, Bodet D 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2782
- [3] Luo Y H, Zhang F Q, Guo H X, Wojtek H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 018501 (in Chinese) [罗尹虹, 张凤祁, 郭红霞, Wojtek Hajdas 2020 *物理学报* **69** 018501]
- [4] Zhang Z G, Lei Z F, Yue L, Liu Y, He Y J, Peng C, Shi Q, Huang Y, En Y F 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 246102 (in Chinese) [张战刚, 雷志锋, 岳龙, 刘远, 何玉娟, 彭超, 师谦, 黄云, 恩云飞 2017 *物理学报* **66** 246102]
- [5] Luo Y H, Zhang F Q, Wang Y P, Wang Y M, Guo X Q, Guo

- H X 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 068501 (in Chinese) [罗尹虹, 张凤祁, 王燕萍, 王圆明, 郭晓强, 郭红霞 2016 *物理学报* **65** 068501]
- [6] Maillard P, Hart M, Barton J, Jain P, Karp J 2015 *Proceedings of the 2015 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW)* Boston, MA, USA, July 13–17, 2015 pp1–5
- [7] Lee D S, Wirthlin M, Swift G, Le A. C 2014 *Proceedings of the 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW)* Paris, France, July 14–18, 2014 pp1–5
- [8] Zhang L T, Cao Y R, Ren C, Ma M D, Lyu H H, Lyu L, Zheng X F, Ma X H 2022 *Mod. Appl. Phys.* **13** 010606 (in Chinese) [张龙涛, 曹艳荣, 任晨, 马毛旦, 吕航航, 吕玲, 郑雪峰, 马晓华 2022 *现代应用物理* **13** 010606]
- [9] King M P, Reed R A, Weller R A, Mendenhall M H, Schrimpf R D, Sierawski B D, Sternberg A L, Narasimham B, Wang J K, Pitta E, Bartz B, Reed D, Monzel C, Baumann R C, Deng X, Pellish J A, Berg M D, Seidleck C M, Auden E C, Weeden-Wright S L, Gaspard N J, Zhang C X, Fleetwood D M 2013 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60** 4122
- [10] Samaras A, Pourrouquet P, Sukhaseum N, Gouyet L, Vandeveld B, Chatry N, Ecoffet R, Bezerra F, Lorfèvre E 2014 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **61** 3055
- [11] Gadlage M J, Roach A H, Duncan A R, Williams A M, Bossev D P, Kay M J 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 211
- [12] Tian J Y, Cao R X, Liu Y, Cai Y L, Mei B, Zhao L, Cui S, Lv H, Xue Y X 2024 *Electronics* **13** 2233
- [13] Gadlage M J, Roach A H, Duncan A R, Williams A M, Bossev D P, Kay M J 2017 *IEEE Trans. Device Mater. Rehab.* **17** 157
- [14] Tali M, Alía R G, Brugger M, Ferlet-Cavrois V, Corsini R, Farabolini W, Mohammadzadeh A, Santin G, Virtanen A 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 2016
- [15] Söderström D, Luza L M, Kettunen H, Member, Javanainen A, Farabolini W, Gilardi A, Coronetti A, Poivey C, Dilillo L 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 716
- [16] Caron P, Inguibert C, Artola L, Bezerra F, Ecoffet R 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 1607
- [17] Xu B Y, Guo G, Zeng Z Q, Yang J H, Han J H 2019 *At. Energy Sci. Technol.* **53** 209 (in Chinese) [许北燕, 郭刚, 曾自强, 杨京鹤, 韩金华 2019 *原子能科学技术* **53** 209]
- [18] Lü H, Zhang H W, Mei B, Li P W, Mo R G, Sun Y 2021 *Spacecraft Environ. Eng.* **38** 358 (in Chinese) [吕贺, 张洪伟, 梅博, 李鹏伟, 莫日根, 孙毅 2021 *航天器环境工程* **38** 358]
- [19] Inguibert C, Ecoffet R, Falguere D 2015 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62** 2846
- [20] Tali M, Alia R G, Brugger M, Ferlet-Cavrois V, Corsini R, Farabolini W, Santin G, Virtanen A 2016 *Proceedings of the 16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Bremen, Germany, September 19–23, 2016 pp1–5
- [21] Tali M, Alia R G, Brugger M, Ferlet-Cavrois V, Corsini R, Farabolini W, Javanainen A, Santin G, Polo C B, Virtanen A 2019 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **66** 437
- [22] AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum, Sawyer D M, Vette J I 1976 NASA Technical Reports Server. <http://ntrs.nasa.gov/citations/> [2024-7-03]
- [23] The AE-8 trapped electron model environment, Vette J I 1991 NASA Technical Reports Server. <http://ntrs.nasa.gov/citations/> [2024-7-03]
- [24] Lu X T, Jiang D X, Ye Y L 2000 *Nuclear Physics* (Beijing: Atomic Energy Press) pp62, 228 (in Chinese) [卢希庭, 江栋兴, 叶沿林 2000 *原子核物理* (北京: 原子能出版社) 第 62 页、第

228 页]

- [25] Caron P, Inguibert C, Artola L, Chatry N, Sukhaseum N, Ecoffet R, Bezerra F 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1759
- [26] Geant4 Physics Reference Manual Version 10.5, Geant4

Collaboration. <http://www.geant4.org/> [2024-7-03]

- [27] Wang Z B, Chen W, Yao Z B, Zhang F Q, Luo Y H, Tang X B, Guo X Q, Ding L L, Peng C 2020 *Microelectron. Reliab.* **107** 113594

Physical mechanisms and characteristics of electron-induced single-event upsets in 28-nm bulk devices^{*}

XU Jingyan[†] HU Yang WANG Di JIANG Xinshuai
CHEN Wei DING Lili XUE Yuanyuan

(National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect,
Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 20 November 2024; revised manuscript received 27 December 2025)

Abstract

Single-event effects (SEEs) induced by heavy ions and high-energy protons have been recognized as the primary causes of electronic system failures in spacecraft. However, in the space orbital environment, electrons typically exhibit higher flux and stronger shielding penetration capabilities than protons. Furthermore, at the nanoscale, electrons have been shown to be capable of inducing single-event upsets (SEUs) in devices. Electron-induced SEEs have emerged as a new issue affecting the reliability of spacecraft electronic systems. Research in this area is still in its infancy, and there is not yet consensus on the primary physical mechanisms of electron-induced SEEs. In this paper, using 28-nm bulk silicon devices, we reveal the physical mechanisms and characteristics of electron-induced SEEs through Monte Carlo simulations and electron irradiation experiments. The results indicate that the direct ionization is the main physical mechanism for electron-induced SEUs when the device's critical charge is less than 0.3 fC or the electron energy is less than 100 MeV. The energy and cross-section of secondary electrons generated by the direct ionization of electrons in materials are minimally influenced by the initial electron energy. Therefore, when the direct ionization is the primary mechanism, the SEU cross-section remains almost unaffected by the incident electron energy. Only when the device's critical charge is greater than 0.4 fC and the electron energy exceeds 1000 MeV do the recoil nuclei generated by elastic collisions between electrons and atomic nuclei, as well as the secondary particles produced by electron-induced nuclear reactions, become significant factors in inducing SEUs. In such cases, the indirect ionization becomes a significant mechanism for electron-induced SEUs, and the SEU cross-section increases with higher incident electron energy. Compared to perpendicular incidence, electrons striking at smaller angles result in a larger SEU cross-section when the device's critical charge is low. However, the influence of the electron incidence angle on the SEU cross-section diminishes as the device's critical charge increases. As the device's critical charge decreases, the SEU cross-sections induced by electrons of various energies increase exponentially. When the device's critical charge is less than 0.2 fC, the contribution of electrons to SEUs in typical Earth orbits exceeds that of protons. Therefore, the direct ionization is the most critical physical mechanism for electron-induced SEUs.

Keywords: electron, single-event upset, critical charge, direct ionization

DOI: [10.7498/aps.75.20241613](https://doi.org/10.7498/aps.75.20241613)

CSTR: [32037.14.aps.75.20241613](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20241613)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12105229).

[†] Corresponding author. E-mail: jingyanxu@126.com

28 nm器件电子单粒子翻转效应物理机理及特性

徐静妍 胡杨 王迪 江新帅 陈伟 丁李利 薛院院

Physical mechanisms and characteristics of electron-induced single-event upsets in 28-nm bulk devices

XU Jingyan HU Yang WANG Di JIANG Xinshuai CHEN Wei DING Lili XUE Yuanyuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 110710 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20241613

CSTR: 32037.14.aps.75.20241613

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20241613>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大气中子在电荷俘获型3D NAND闪存中引起的单粒子翻转特性及机理研究

Characteristics and mechanisms of single event upset induced by atmospheric neutrons in charge trap 3D NAND flash memory

物理学报. 2026, 75(3): 110710 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251123>

基于青藏高原的14 nm FinFET和28 nm平面CMOS工艺SRAM单粒子效应实时测量试验

Experimental study on real-time measurement of single-event effects of 14 nm FinFET and 28 nm planar CMOS SRAMs based on Qinghai-Tibet Plateau

物理学报. 2023, 72(14): 146101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230161>

阱接触对28 nm SRAM单粒子多位翻转的影响

Influences of well contact on multiple-cell upsets in 28 nm SRAM

物理学报. 2023, 72(3): 036101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221742>

双互锁存储单元触发器的置位冗余加固设计及单粒子翻转效应

Redundancy hardening design for single event upset tolerance in a dual interlocked storage cell flip-flop

物理学报. 2026, 75(8): 036101 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251574>

基于55 nm DICE结构的单粒子翻转效应模拟研究

Three-dimensional numerical simulation of single event upset effect based on 55 nm DICE latch unit

物理学报. 2024, 73(6): 066103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231564>

低能电子穿越玻璃直管时倾角依赖的输运动力学

Dynamics of low energy electrons transmitting through straight glass capillary: Tilt angle dependence

物理学报. 2022, 71(8): 084104 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212335>