



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

SRAM 和 FRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究

作者姓名: 姬庆刚

指导教师: 刘杰 研究员

中国科学院近代物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 凝聚态物理

培养单位: 中国科学院近代物理研究所

2019 年 6 月

**Investigation of Synergistic Effects of Single Event Effect
and Total Ionizing Dose on SRAMs and FRAMs**

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Condensed Matter Physics**

**By
Qinggang Ji
Supervisor Professor Jie Liu**

Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences

June 2019

中国科学院大学 研究生学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

超大规模集成电路如静态随机存储器（SRAM）和铁电存储器（FRAM）在航天器中应用广泛。SRAM 器件具有速度快、功耗低等诸多优势，而 FRAM 器件由于铁电材料独特的性质，具有天然良好的抗辐射性能与非易失性。随着 CMOS 工艺的进步，SRAM 和 FRAM 器件集成度愈来愈高，其工作电压降低、引发单粒子效应所需的临界电荷减小。相较微米级器件，空间辐射环境中的带电粒子引起的纳米 SRAM 和 FRAM 器件的单粒子效应与总剂量效应出现了一些新现象，严重威胁航天器的安全性与可靠性。

本文利用兰州重离子加速器提供的不同种类重离子以及新疆理化技术研究所提供的 ^{60}Co γ 射线，对 90 nm 和 65 nm 工艺的两款商用 SRAM 器件以及一款 130 nm 商用 FRAM 器件开展了辐照实验，结合 TCAD 模拟，系统地研究了 γ 射线累积剂量引起器件性能参数的退化，重离子辐照参数对单粒子效应的影响，以及总剂量效应与单粒子效应在纳米 SRAM 和 FRAM 器件中的协同效应。主要研究成果如下：

首先研究了不同剂量的射线辐照对商用 SRAM 和 FRAM 器件性能参数的影响，测量了器件的静态功耗电流在辐照过程中的变化，并分析了引起静态功耗电流变化的原因。实验发现，经过 γ 射线辐照后，三款器件的静态功耗电流均有显著增长。 γ 射线辐照在器件的浅沟槽隔离区域产生陷阱电荷，导致 NMOS 管关态漏电流增大。研究认为辐照感生陷阱电荷是引起器件静态功耗电流增大的原因。对于 SRAM 器件，存储单元内处于开态的 PMOS 管与处于关态的 NMOS 管组成漏电通道。而对于 FRAM 器件，静态功耗电流的增长主要是由外围 CMOS 电路的性能退化所致。

对比研究了 γ 射线辐照前后，不同种类、不同 LET 值的重离子引起的器件的单粒子效应。实验结果表明， γ 射线辐照后 SRAM 器件的单粒子翻转截面增大，而 FRAM 器件的单粒子事件截面减小，且截面的变化与存储数据图形无关。对于 90 nm SRAM 器件， γ 射线辐照并没有引起单粒子翻转阈值的明显变化，

LET 阈值约为 $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。经过 γ 射线辐照后，存储单元内 MOS 管阈值电压的漂移与关态漏电流的增大共同导致了器件重离子单粒子敏感性的改变，其饱和截面由 $9.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 增长到 $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，增长了约 44%。此外，在相同的 LET 值下， γ 射线辐照过后 SRAM 器件更容易发生多位翻转。对于 FRAM 器件，错误发生在外围 CMOS 电路中。经过 γ 射线辐照后，外围电路中的 MOS 管阈值电压漂移，反相器开关阈值减小，导致动态测试模式下的单粒子事件截面减小了约 40%到 70%。

最后利用 TCAD 软件模拟了重离子对 FRAM 器件 1T/1C 存储单元的影响。模拟结果显示，重离子入射到 1T/1C 存储单元中的 NMOS 管，会导致与 NMOS 管相连的铁电电容下表面的电势降低，在铁电电容表面产生 0.7 V 左右的电势差，约为器件工作电压的 25%。随着工艺的进步，FRAM 器件工作电压的降低，重离子对 FRAM 器件存储单元可靠性的威胁也需要得到重视。

关键词：单粒子效应，总剂量效应，静态随机存储器，铁电存储器

Abstract

The very large scale integration circuits (VLSI) such as static random access memory (SRAM) and ferroelectric random access memory (FRAM) are widely used in spacecrafts. SRAM has the advantages of high operating speed and low power consumption. FRAM is a type of nonvolatile memory that has a high single event upset resistance owing to the unique properties of ferroelectric materials. With the progress of CMOS technology, the operation voltage, as well as the critical charge of single event effects of SRAMs and FRAMs decreases. Compared with micron-scale devices, there are some new phenomena observed in studies of single event effects and total dose effects of nano-scale SRAMs and FRAMs, which are serious threats to the safety and reliability of spacecrafts.

In this paper, 90 nm and 65 nm commercial SRAMs and 130 nm commercial FRAMs were irradiated using different types of heavy ions provided by the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou (HIRFL) and ^{60}Co γ rays provided by the Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry (XTIPC). With the combination of experiments and TCAD simulations, the degradation of electrical parameters induced by γ rays as well as the single event effects induced by different kind of heavy ions on nano-scale SRAMs and FRAMs were investigated. The synergistic effect of total ionizing dose and single event effect on SRAMs and FRAMs were investigated. The main results are as follows:

Firstly, the influence of total ionizing dose on electrical parameters of commercial SRAMs and FRAMs was investigated. The standby power supply currents of devices under test were monitored during irradiation, and the mechanism of the increase of standby power supply currents was analyzed. After irradiation, the standby power supply current of all devices increased obviously. Trapped charges induced by γ rays in shallow trench isolation led to the increase of off-state current of NMOS transistors, which resulted in the increase of standby power supply current. For SRAMs, the on-

state PMOS transistors and the off-state NMOS transistors in memory cells formed the leakage paths. While for FRAMs, the degradation of peripheral CMOS circuits was the main reason of the increase of standby power supply current.

Secondly, the single event effects were studied using different kinds of heavy ions with different linear energy transfer (LET) before and after γ ray irradiation. Results showed that the single event upset (SEU) cross section of SRAMs increased, but the event cross section of FRAMs decreased after irradiation. No memory pattern dependency was observed. For 90 nm SRAMs, the threshold LET is about $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, and was not influenced by γ ray irradiation. The threshold voltage shifts and the increase of off-state leakage current of transistors induced by γ ray irradiation led to the alter of single event effect hardness of SRAMs. The saturation cross section increased from $9.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ to $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$, which was an increase of about 44%. Besides, there were more multiple-bit upsets (MBUs) after γ ray irradiation at the same value of LET. For FRAMs, errors were located in the peripheral CMOS circuits. After γ ray irradiation, the threshold voltage shifts of MOS transistors and the decrease of switching voltage of inverters led to about 40% to 70% decrease of the event cross section detected in dynamic mode tests.

Finally, TCAD simulations were performed to investigate the influence of heavy ions on 1T/1C cells of FRAMs. Results showed that when a heavy ion struck the NMOS transistor of the 1T/1C cell, the electric potential of the bottom surface of the ferroelectric capacitor decreased. The incident ion generated a difference of electric potential of about 0.7 V, which was about 25% of the operation voltage of this FRAM. With the progress of technology, the operation voltage of FRAMs decreases. The threat of heavy ions on the reliability of FRAM cells should be taken into account.

Key Words: Single Event Effect, Total Ionizing Dose, Static Random Access Memory, Ferroelectric Random Access Memory

目 录

第 1 章 引言.....	1
1.1 空间辐射环境.....	1
1.1.1 地球辐射带.....	2
1.1.2 太阳高能粒子事件.....	4
1.1.3 银河宇宙射线.....	5
1.2 空间辐射效应.....	6
1.2.1 总剂量效应.....	6
1.2.2 单粒子效应.....	7
1.3 SRAM 与 FRAM 器件简介.....	12
1.3.1 SRAM 器件简介.....	12
1.3.2 FRAM 器件简介.....	15
1.4 SRAM 与 FRAM 器件的辐射效应研究现状.....	17
1.4.1 SRAM 器件的辐射效应研究现状.....	19
1.4.2 FRAM 器件的辐射效应研究现状.....	20
1.5 本文的研究内容.....	21
第 2 章 实验介绍.....	24
2.1 兰州重离子加速器.....	24
2.2 ^{60}Co γ 射线源.....	26
2.3 待测器件.....	28
2.4 测试系统.....	31
第 3 章 SRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究.....	35
3.1 γ 射线辐照对 SRAM 器件性能参数的影响.....	35
3.1.1 实验条件.....	35

3.1.2	实验结果.....	36
3.1.3	分析讨论.....	38
3.2	SEE 测试模式对 SRAM 器件 SEU 截面的影响.....	40
3.2.1	实验条件.....	40
3.2.2	实验结果.....	41
3.2.3	分析讨论.....	41
3.3	γ 射线辐照对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响.....	43
3.3.1	实验条件.....	43
3.3.2	实验结果.....	43
3.3.3	分析讨论.....	45
3.4	LET 值对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响	48
3.4.1	实验条件.....	48
3.4.2	实验结果.....	49
3.4.3	分析讨论.....	50
3.5	γ 射线辐照对 SRAM 器件多位翻转的影响	51
3.5.1	实验条件.....	51
3.5.2	实验结果.....	51
3.5.3	分析讨论.....	53
3.6	小结.....	53
第 4 章	FRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究	55
4.1	γ 射线辐照对 FRAM 器件性能参数的影响	55
4.1.1	实验设计.....	55
4.1.2	实验结果.....	55
4.1.3	分析讨论.....	57
4.2	重离子引起的 FRAM 器件中的错误类型	58
4.2.1	实验条件.....	58
4.2.2	实验结果.....	60
4.2.3	分析讨论.....	63

4.3 γ 射线辐照对 FRAM 器件动态单粒子事件敏感性的影响	64
4.3.1 实验条件.....	64
4.3.2 实验结果.....	65
4.3.3 分析讨论.....	66
4.4 γ 射线辐照对 FRAM 器件静态单粒子事件敏感性的影响	68
4.4.1 实验条件.....	68
4.4.2 实验结果.....	69
4.4.3 分析讨论.....	69
4.5 小结.....	70
第 5 章 TCAD 模拟重离子对 FRAM 器件存储单元的影响研究	71
5.1 TCAD 软件简介.....	71
5.2 1T/1C 模型的参数设置	72
5.3 模拟结果.....	73
5.4 分析讨论.....	74
5.5 小结.....	75
第 6 章 结论与展望.....	76
6.1 主要结论.....	76
6.2 下一步工作计划.....	78
参考文献.....	79
致 谢.....	90
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果.....	92

第 1 章 引言

自 20 世纪 50 年代以来，带电粒子与材料的相互作用成为辐射效应研究的主要内容^[1]。随着半导体技术迅速发展，半导体集成电路以其高集成度、高性能和低功耗等特点被广泛应用于航天器之中，空间辐射环境中的带电粒子对半导体集成电路的威胁也随之开始被关注。在 1964 年，Hughes 等人首次报道了商用三极管和 MOS 晶体管中的总剂量效应（Total Ionizing Dose, TID）^[2]。在 1975 年，Binder 等人首次报道了宇宙射线入射通信卫星半导体集成电路引发的单粒子效应（Single Event Effect, SEE）^[3]。随着 CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）工艺的进步，半导体集成电路的集成度更高，设计更复杂，电子元器件在辐射环境中的可靠性对宇航器件的设计制造更为重要。目前，总剂量效应与单粒子效应已经成为了影响航天器在轨运行可靠性的最主要威胁之一^[4,5]。近几十年来，国内外广泛开展了总剂量效应与单粒子效应对半导体器件可靠性影响的研究。

本章将主要对空间辐射环境的构成、总剂量效应和单粒子效应的基本机理以及研究现状进行介绍。

1.1 空间辐射环境

辐射环境分为人工辐射环境和空间辐射环境，人工辐射环境包括核爆炸、人工辐射源、加速器等。空间辐射环境指的是航天器运行轨道所处的天然辐射环境。

表 1.1 空间辐射环境中高能粒子的构成^[57]

辐射环境	粒子种类	粒子含量
地球辐射带	质子	
	电子	
银河宇宙射线	质子	87%
	重离子	1%
	α 粒子	12%
太阳粒子事件	质子	96.4%
	重离子	0.1%
	α 粒子	3.5%

根据带电粒子性质、来源的不同,可以将空间辐射环境大致分为以下三种:地球辐射带 (Earth Trapped Radiation)、银河宇宙射线 (Galactic Cosmic Rays),以及太阳高能粒子事件 (Solar Energetic Particle Events)。三种辐射环境中高能粒子的构成如表 1.1 所示,辐射环境中的不同带电粒子可对半导体器件造成的辐射效应如图 1.1 所示。

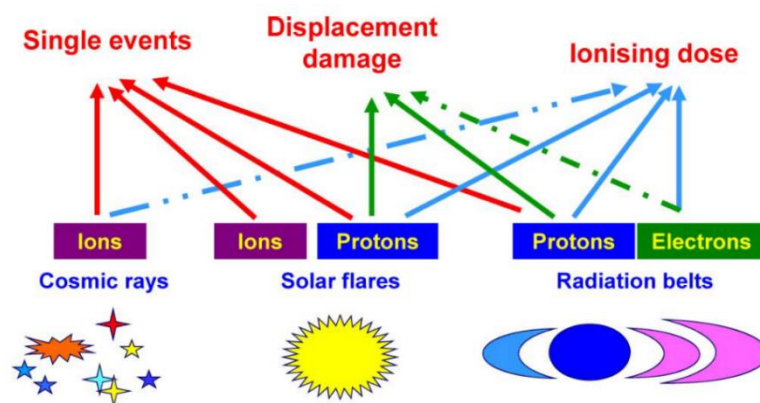


图 1.1 空间辐射环境中带电粒子引起的辐射效应^[8]

1.1.1 地球辐射带

地球辐射带是由地磁场俘获地外高能粒子而形成的辐射环境。在 1958 年,美国科学家 Van Allen 等人首次提出地球辐射带的概念^[9],因此,也被称作范艾伦带 (Van Allen Belt),如图 1.2 所示。

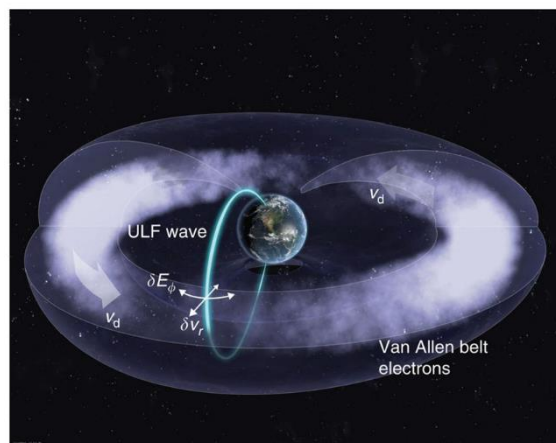


图 1.2 范艾伦辐射带^[10]

地球辐射带可以分为低空区域 (Low Altitude Zone) 和高空区域 (High Altitude Zone) 两部分,也可称之为内辐射带 (Inner Belt) 和外辐射带 (Outer Belt)。内辐射带位于距地表约 500 km - 6000 km 的区域,外辐射带的范围可达距离地表 60000

km 的高空^[11]。地球辐射带主要由高能质子与电子构成。质子的能量最高可达几百 MeV，能量大于 10 MeV 的质子主要分布在距离地表 20000 km 以内的区域。在距离地表约 5000 km 处，质子通量最大，约为 $10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7]。地球辐射带内电子的能量约为 1 - 10 MeV。在内辐射带中，电子的能量最高可达 10 MeV，电子的通量最大约为 $10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而在外辐射带中，电子的能量最高约 7 MeV，最大通量约为 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7]。

地球辐射带内带电粒子的通量会受到太阳活动周期等事件的影响。内辐射带在主地磁场的作用下，可以保持相对稳定。受地磁场磁尾变化的影响，太阳活动周期等事件引发的地球辐射带的波动主要发生在外辐射带，外辐射带中电子通量的变化可达 1000 倍。

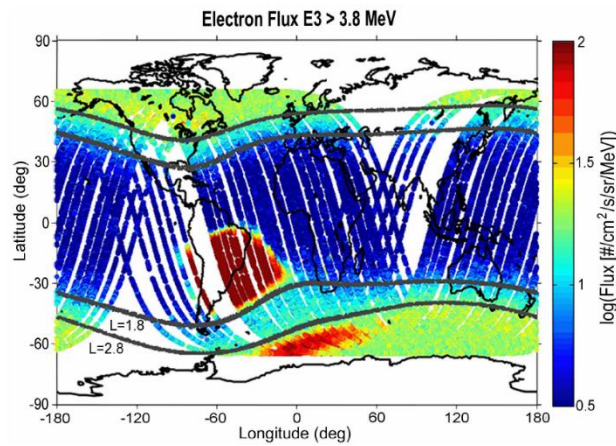


图 1.3 南大西洋异常区^[12]

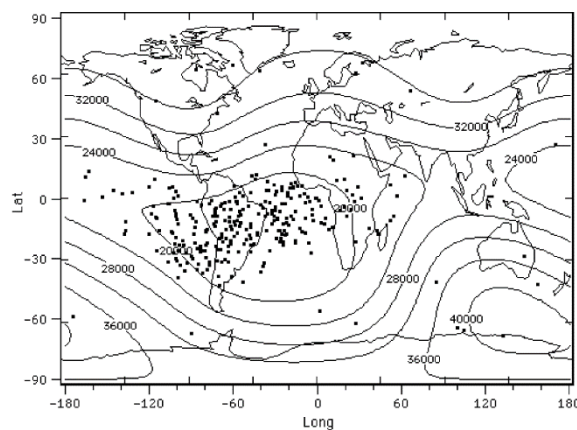


图 1.4 Topex/Poseidon 卫星在 1992 到 1998 年间发生 SEU 的位置分布，卫星运行轨道高度为 1340 km^[13]。

此外，地磁场在南美洲东部的低空区存在一个弱磁场区域，被称为南大西洋

异常区 (South Atlantic Anomaly, SAA), 如图 1.3 所示。由于地磁场在南大西洋异常区强度较弱, 且呈下凹状, 在此被俘获的高密度带电粒子对航天器的威胁更为严重。根据 Topex/Poseidon 卫星的统计数据, 在 1992 年到 1998 年间, 至少有 282 次单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU) 事件发生在南大西洋异常区内及南大西洋异常区周边, SEU 的发生频率远高于其它区域, 如图 1.4 所示。

1.1.2 太阳高能粒子事件

太阳高能粒子事件包括太阳耀斑 (Solar Flare) 和日冕物质抛射 (Coronal Mass Ejections)。太阳耀斑是太阳光球层的磁场强度达到临界值时爆发的具有破坏性的高能事件, 在短时间之内, 可抛射出高达 10^{32} 尔格的能量^[11]。一次典型的太阳耀斑事件可持续几分钟到几个小时时间, 将周围的日冕加热到 2×10^7 K。随着日冕温度的升高, 大量的质子与重离子被加速从太阳喷射出去, 随着太阳风磁场通过黄道平面进入星际空间^[11]。其中, 质子约占高能带电粒子的 96.4%, α 粒子约占 3.5%, 重离子约占高能带电粒子的 0.1%^[7]。由于太阳风磁场结构复杂, 在地球上不同位置测得的带电粒子强度会有所区别, 在地球轨道的不同位置上探测到的带电粒子通量相差可能达到 100 倍^[11]。

太阳黑子活动具有明显的周期性, 约 11 年一个周期。其中, 约 7 年时间为太阳活动峰年, 4 年时间为太阳活动谷年。在太阳活动峰年, 太阳高能粒子事件数要大于太阳活动谷年, 如图 1.5 所示。大量的带电粒子通过总剂量效应与单粒子效应对半导体器件造成损伤, 对于地球轨道上的航天器来说是巨大的威胁。

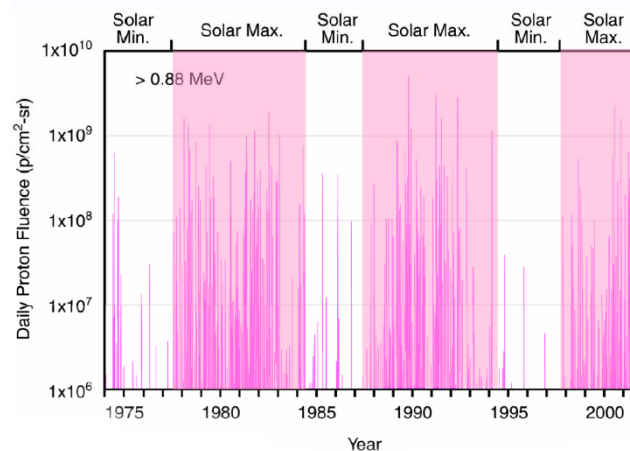


图 1.5 太阳活动周期^[7]

1.1.3 银河宇宙射线

银河宇宙射线主要包括星际质子和重离子,是地球空间辐射环境中带电粒子的又一种来源。银河宇宙射线中质子约占 87%, α 粒子约占 12%, 剩余 1%为重离子。银河宇宙射线中包括自然界中几乎所有的元素,不同带电粒子的丰度如图 1.6 所示。银河宇宙射线在穿过上层大气时,与大气分子碰撞会产生二次粒子簇射,主要包括中子、电子与 γ 射线等^[1]。重离子在银河宇宙射线中所占的比例虽然不大,但却具有极高的穿透能力,能够穿透大气层,导致半导体器件中发生单粒子效应,对航天器的可靠性是极大的挑战。

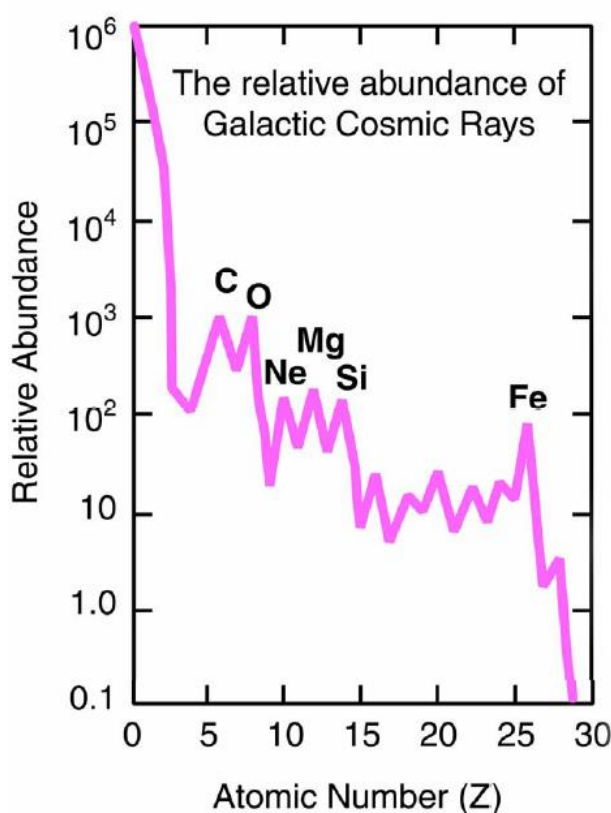


图 1.6 银河宇宙射线中不同粒子丰度^[7]

银河宇宙射线中各种带电粒子的通量会受到太阳活动周期的影响。在太阳活动峰年,银河宇宙射线的通量减小,而在太阳活动的谷年,银河宇宙射线通量增大,如图 1.7 所示^[7]。在太阳活动峰年和谷年,银河宇宙射线中不同 LET 值带电粒子的通量如图 1.8 所示^[7]。

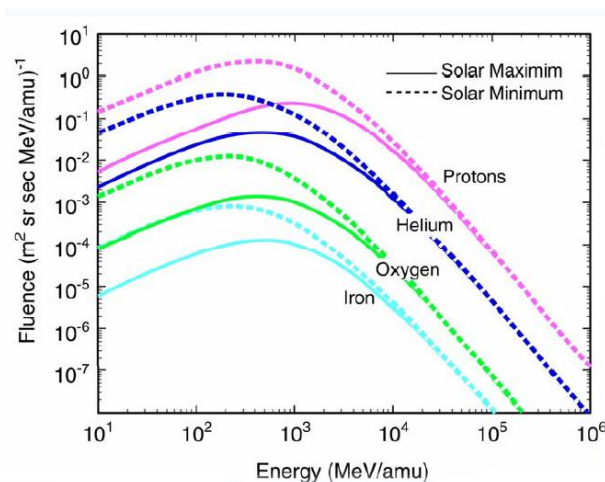


图 1.7 太阳活动峰年/谷年时银河宇宙射线中不同能量粒子的积分通量^[7]

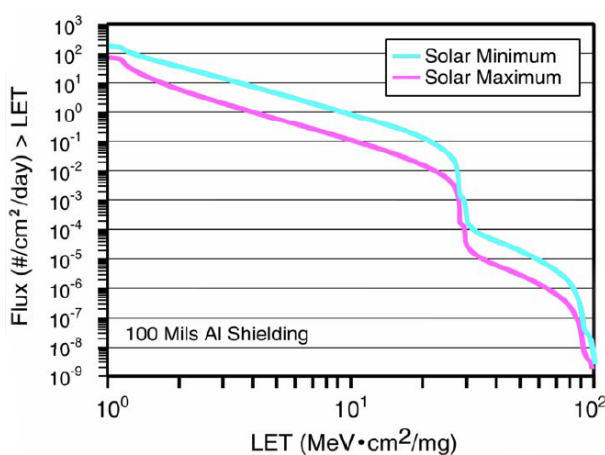


图 1.8 太阳活动峰年/谷年时不同 LET 值的银河宇宙射线的通量^[7]

1.2 空间辐射效应

空间辐射环境中的带电粒子对半导体器件的辐射损伤大致可以分为位移损伤效应和电离辐射效应两类，电离辐射效应又可以进一步细分为总剂量效应和单粒子效应等。这些由带电粒子引起的辐射效应严重影响 MOS 器件的性能，甚至会导致器件完全失效。本节将主要对带电粒子在半导体器件内引起的总剂量效应与单粒子效应进行介绍。

1.2.1 总剂量效应

MOS 器件的栅极与衬底之间存在一层隔离氧化物，空间辐射环境中带电粒子与 MOS 器件中的氧化物相互作用，在氧化层中产生辐射感生电荷，导致器件

的电学性能退化甚至完全失效，被称为总剂量效应。

以 NMOS 管为例，如图 1.9 所示。电离辐射使 SiO_2 内部电子获得能量由价带跃迁至导带，形成电子-空穴对。若在辐照期间给 NMOS 管施加正栅压，辐照产生的电子和空穴将在电场的作用下进行相反方向的移动。电子的迁移率比较大，除部分与空穴复合外，大部分电子在电场的作用下逃逸出 SiO_2 。未与电子复合的空穴则在电场作用下向 SiO_2/Si 界面处移动，被靠近界面处的缺陷俘获形成氧化层陷阱电荷。辐射产生的氧化层陷阱正电荷的累积改变了栅氧层与沟道界面处的电位，从而导致 MOS 器件阈值电压以及关态漏电流等参数的变化^[15,16]。

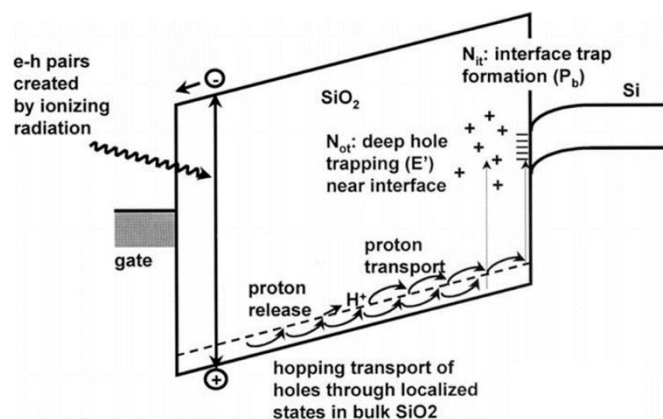


图 1.9 NMOS 管中陷阱电荷的产生机理^[14]

辐照产生的空穴还会与 SiO_2 中的某些物质相互作用产生氢离子 (H^+)，与 SiO_2/Si 界面处的硅反应生成三价硅原子，形成界面态^[17,18]。界面态的电性与 SiO_2/Si 界面处的电位有关，对于氧化层陷阱电荷的影响可能是增强，也有可能是减弱。与氧化物陷阱电荷相比，界面态的形成需要相对较长的时间与较高的辐照剂量。

1.2.2 单粒子效应

总剂量效应对半导体器件的辐射损伤需要大量射线持续地对器件进行辐照，是一种与剂量相关的累积效应。与总剂量效应不同，具有足够 LET 值的单个重离子或质子入射到半导体器件中即有可能导致器件的功能异常或失效，称之为单粒子效应。单粒子效应导致的可恢复的器件的功能异常被称为软错误，例如单粒子翻转 (Single Event Upset, SEU)、单粒子功能中断 (Single Event Functional Interrupt, SEFI) 与单粒子瞬态脉冲 (Single Event Transient, SET)。单粒子效应

导致的不可逆的永久性的器件失效被称为硬错误，包括单粒子栅穿（Single Event Gate Rupture, SEGR）、单粒子闩锁（Single Event Latchup, SEL）与单粒子烧毁（Single Event Burnout, SEB）等。单粒子效应的分类如图 1.10 所示。

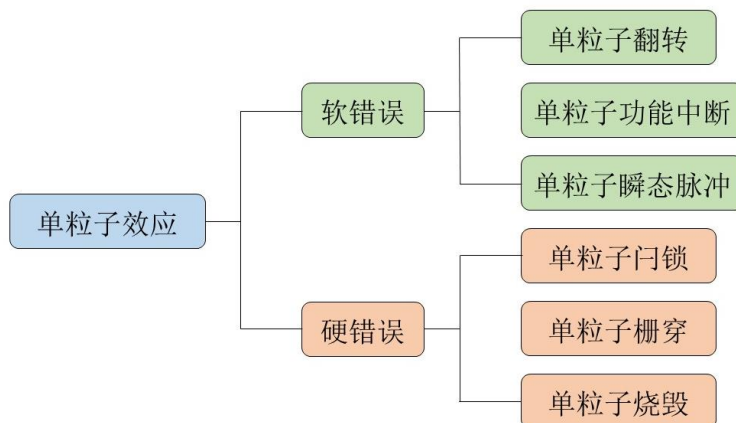
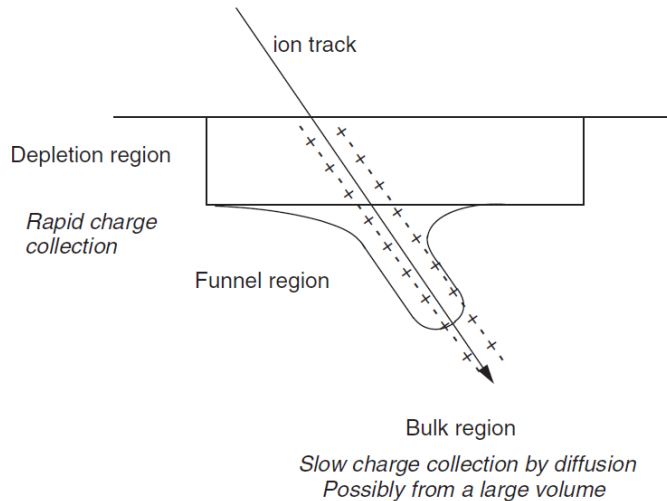


图 1.10 单粒子效应分类

带电粒子入射到半导体器件之中，通过电离沿离子入射径迹产生大量电子-空穴对，如图 1.11 所示。在外加电场的作用下，电子被敏感节点收集产生脉冲电流^[20,21]，导致单粒子效应的发生。



根据半导体器件类型的不同，带电粒子引起的单粒子效应类型也往往有所差别。下面将分别对各种类型的单粒子效应进行简要介绍。

(1) 单粒子瞬态脉冲。单粒子瞬态脉冲主要发生在运算放大器、比较器或者组合门逻辑电路中。入射带电粒子在以上器件中产生的电荷可在电路中进行传输，若瞬态脉冲电压或电流足够大，通过电路传输到达锁存器或触发器后，即会导致

电路发生错误。Dodd 等人利用 3D 混合仿真技术对单粒子瞬态脉冲的传输路径和脉冲波形进行了研究，仿真结果如图 1.12 和图 1.13 所示。

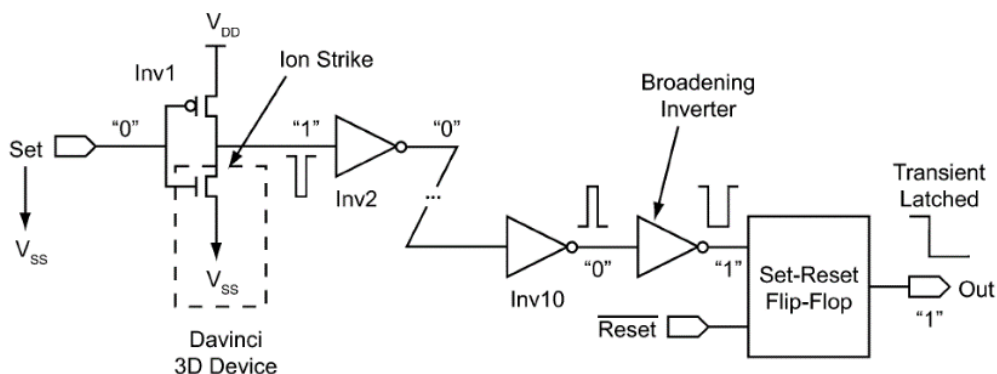


图 1.12 混合模拟仿真带电粒子击中 n 沟道晶体管之后，瞬态脉冲在反相器链中的传输路径 [22]。

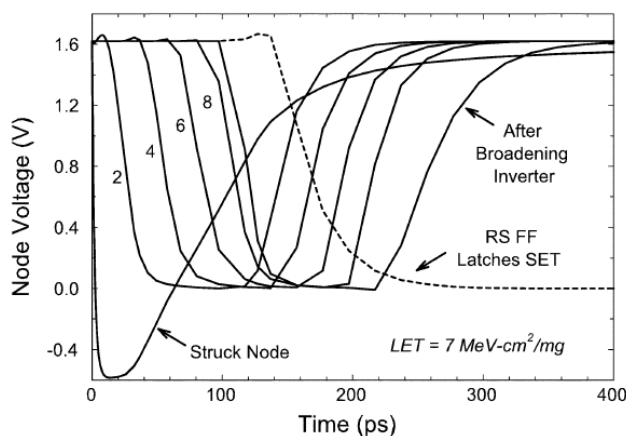


图 1.13 混合模拟仿真带电粒子击中 n 沟道晶体管之后，瞬态脉冲在反相器链中的传输波形 [22]。

(2) 单粒子翻转。单粒子翻转常发生在存储器或触发器等器件中。以 SRAM 器件为例，存储单元核心为两个交叉耦合的反相器。当带电粒子产生的电荷被灵敏节点收集后，若存储单元中反相器的状态发生改变，两个存储节点的电势发生翻转，则认为是发生了单粒子翻转。Bajura 与 Munteanu 等人利用混合仿真研究了粒子入射关态 NMOS 管漏极引起的脉冲电流与单粒子翻转之间的关系，粒子入射以及脉冲电流的产生如图 1.14 所示，发生或不发生单粒子翻转时 NMOS 管漏端电压波形如图 1.15 所示。

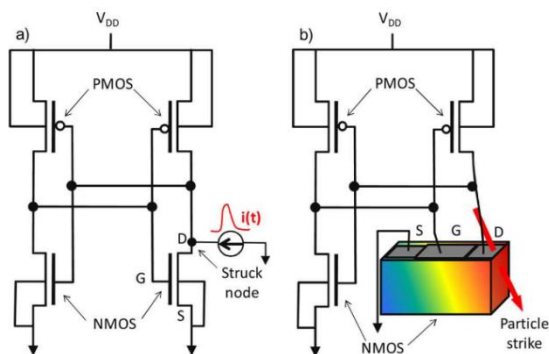


图 1.14 混合模拟仿真带电粒子入射关态 NMOS 管漏极区域^[23]

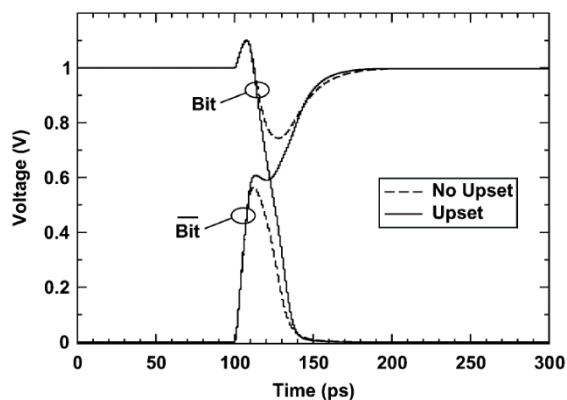


图 1.15 混合模拟仿真带电粒子入射关态 NMOS 管漏极区域后，漏端电压波形^[24]。

(3) 单粒子闩锁。在 N 阱体硅 CMOS 器件中，存在一个寄生 PNP 结构，如图 1.16 所示。P+、N 阱与 P 基底形成一个纵向的 PNP 管，N+、P 衬底与 N 阱形成一个横向的 NPN 管，两个寄生晶体管耦合在一起，形成一个正反馈电路。当两个寄生晶体管均处于开态或关态时，寄生 PNP 结构处于稳定状态。若带电粒子入射后产生的电势扰动使该正反馈电路中两个晶体管的电流增益的乘积大于 1，则该寄生 PNP 结构进入大电流状态，发生单粒子闩锁。

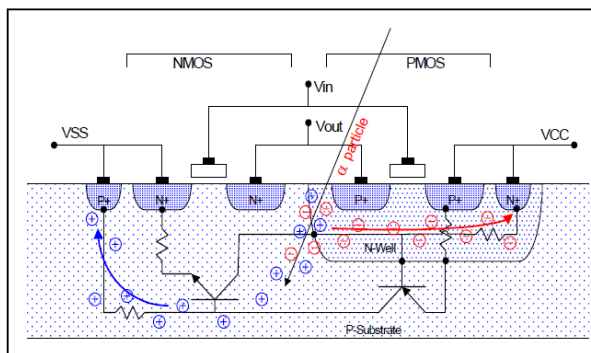


图 1.16 体硅工艺 CMOS 反相器中的寄生 PNP 结构^[25]

(4) 单粒子功能中断。单粒子功能中断通常发生在 FPGA 或存储器的外围电路等复杂电路中。Koga 等人第一次在 SDRAM 等器件中定义了单粒子功能中断现象^[26]。一般认为,在复杂电路中,入射带电粒子在用于工作模式配置的寄存器或锁存器中引起的翻转,有可能导致器件发生单粒子功能中断。以存储器为例,处于读过程中的存储器中发生单粒子功能中断时,很可能会出现连续的读出数据错误,器件通过断电和重启可恢复功能正常。

(5) 单粒子烧毁。单粒子烧毁通常发生在功率器件中。以功率 MOSFET 晶体管为例,N沟道功率 MOSFET 晶体管中存在一个寄生双极晶体管(Bipolar Junction Transistor, BJT),如图 1.17 所示。正常情况下,寄生双极晶体管的基极与发射极之间是短路的,双极晶体管处于关断状态。入射带电粒子产生大量的电子-空穴对,由于源漏之间存在一个强电场,电子向漏极移动,而部分空穴进入 P⁺区(双极晶体管的基区),导致寄生双极晶体管导通。双极晶体管的导通后的强电流引起结的二次击穿,导致器件源漏之间短路,使功率 MOSFET 烧毁、完全失效。

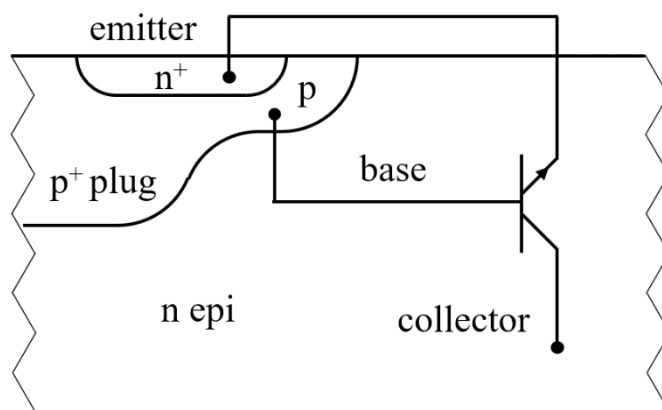


图 1.17 功率 MOSFET 晶体管中的寄生双极晶体管^[27]

(6) 单粒子栅穿。单粒子栅穿通常也是发生在功率器件之中。仍以功率 MOSFET 晶体管为例,如图 1.18 所示。若给器件施加负的栅极电压以及正的漏极电压,此时在栅氧化物上下表面存在一个电势差,但该电势差不足以导致栅氧化层击穿。若有带电粒子沿如图所示路径入射到器件中,产生的电子在源漏电场作用下从漏极逃逸出去,而空穴移动到 SiO₂/Si 界面处被收集,相当于增强了栅氧化层上下表面的电势差。若栅氧化层上的电势差超过了击穿阈值,则器件的栅极与漏极之间短路,称之为单粒子栅穿。

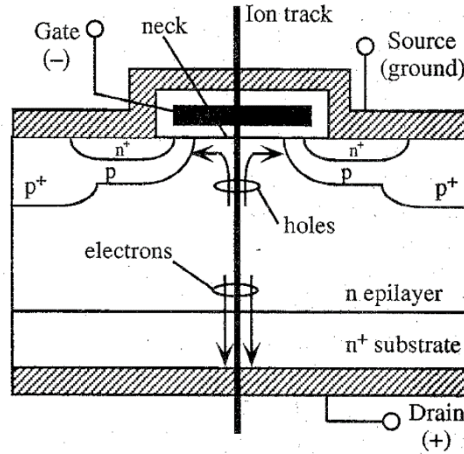


图 1.18 带电粒子入射功率 MOSFET 晶体管示意图^[28]

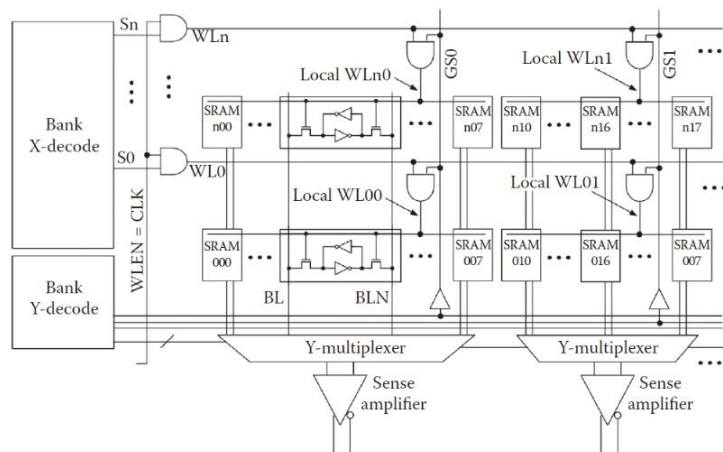
1.3 SRAM 与 FRAM 器件简介

存储器在现代大规模集成电路中被广泛使用。按照存储原理不同，可以将存储器分为易失性存储器与非易失性存储器两种类型。静态随机存取存储器（Static Random Access Memory, SRAM）是一种典型的易失性存储器，具有速度快、功耗低等诸多优点，一般用作高速缓存^[29]。非易失性存储器包括 Flash 存储器、铁电存储器（Ferroelectric Random Access Memory, FRAM）与磁阻存储器（Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM）等多种类型。其中，FRAM 存储器除非易失性外，还具有存储密度高、速度快、功耗低等优点，发展前景比较乐观^[30]。本节将对 SRAM 和 FRAM 器件的基本结构与工作原理进行简要介绍。

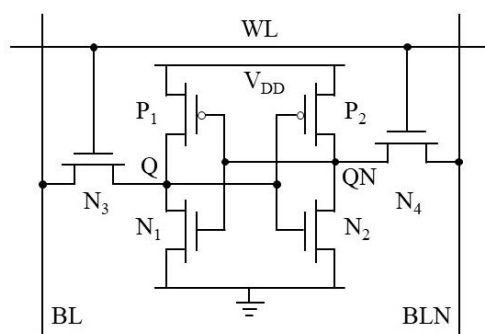
1.3.1 SRAM 器件简介

在所有类型的半导体存储器中，SRAM 器件是最有代表性的超大规模集成电路（Very Large Scale Integration, VLSI）技术。与其它类型的存储器相比，SRAM 器件的设计与优化和半导体技术的发展息息相关^[31]。

SRAM 器件通常包含存储阵列、敏感放大器、行/列译码器以及控制电路等几个部分^[32]，如图 1.19 所示。在水平方向，存储单元通过字线（Word line, WL）与行译码器相连。在垂直方向，存储单元通过位线（Bit line, BL）与列译码器相连。通过行、列译码器选中某个特定的字，即可对其中的 8 位或 16 位数据进行读写操作。

图 1.19 SRAM 器件示意图^[31]

商用 SRAM 器件的存储单元通常采用 6 个晶体管 (6-T) 的结构, 如图 1.20 所示。每一个 6-T 存储单元中包括两个传输 NMOS 管, 两个上拉 PMOS 管, 以及两个下拉 NMOS 管。两个上拉 PMOS 管与两个下拉 NMOS 管组成两个交叉耦合的反相器, 两个反相器的输出电压互为另一个反相器的输入电压, 用存储节点电位的高低定义存储数据为 “0” 或 “1”。存储任意数据时, 两个存储节点均为一个处于高电位, 另一个处于低电位。通过字线与两个传输 NMOS 管来控制位线与存储节点之间是否导通。

图 1.20 6-T SRAM 单元^[33]

SRAM 器件存储单元有三种工作状态, 分别为静态、数据读出和数据写入状态。

在静态下, 字线被置为低电势, 两个传输 NMOS 管处于关断状态, 两个存储节点与位线断开, 保持原电势不变。

在读过程中, 首先位线 BL 与 BLN 被预充电至高电势。然后字线被置为高电势, 两个传输 NMOS 管导通。原本处于高电势的存储节点电势不变。原本处

于低电势的存储节点电势会被位线拉高,与该存储节点相连的位线通过对应下拉 NMOS 管与传输 NMOS 管进行放电。最后,敏感放大器通过比较两条位线上的电势,判断该存储单元中存储数据为“0”或“1”。由于晶体管存在寄生电阻,在 SRAM 单元设计过程中,需要使传输 NMOS 管的电阻大于下拉 NMOS 管,以保证位线的放电过程不会导致对应存储节点电势的大幅升高。否则,存储单元内存储数据可能会发生翻转,出现“读错误”。为避免“读错误”,在保证可以正常读出数据的前提下,还可以尽量减小位线上的预充的电势值。在读过程中,SRAM 存储单元可以简化为图 1.21。

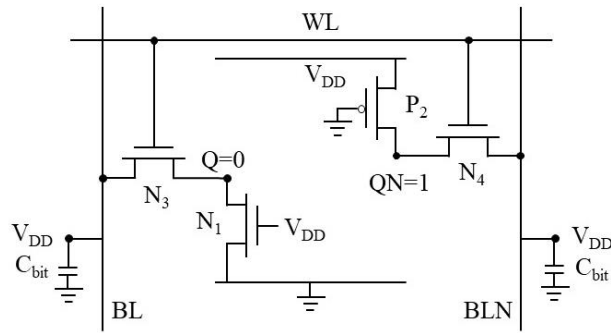


图 1.21 读过程中 6-T SRAM 单元的简化模型^[33]

在写过程中,首先位线 BL 与 BLN 其中一个被预充电至高电势,另一个被置为低电势。然后字线被置为高电势,两个传输 NMOS 管导通。位线 BL 与 BLN 上的电压分别作为两个反相器的输入电压,使两条反相器处于预期的状态,数据被成功写入存储单元之中。假设存储单元中原存储数据为“0”,写过程中,通过将位线 BL 预充电至高电势,并将位线 BLN 置为低电势,可以将数据“1”写入该存储单元中。在写过程中,SRAM 存储单元可以简化为图 1.22。

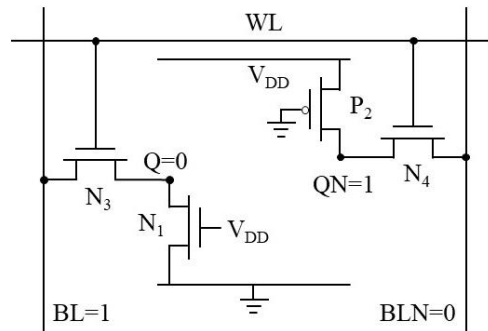


图 1.22 写过程中 6-T SRAM 单元的简化模型^[33]

在 SRAM 存储单元的设计过程中，除了要考虑各个晶体管的尺寸、电阻等参数，以确存储单元不会出现读写错误外，还要考虑存储单元尺寸、静态功耗以及读写速度等诸多因素。

1.3.2 FRAM 器件简介

铁电存储器（FRAM）集合了 SRAM 与 Flash 存储器的优点，在具有高存储容量、高性能、低功耗的同时，又具有非易失性^[30,34]。与 Flash 存储器不同，FRAM 器件的非易失性不是基于浮栅晶体管结构，而是来自于铁电材料的极化特性。

典型的铁电材料包括 $\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$ (PZT)、 $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT) 以及 $(\text{Bi}, \text{La})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BLT) 等。以 PZT 材料为例，PZT 材料具有钙钛矿晶体结构，如图 1.23 所示。PZT 材料晶格中心的 Ti 原子或 Zr 原子可以在电场的作用下被极化，该原子具有两个稳定的极化位置，并且在撤掉外部电场以后，PZT 材料的极化状态不会发生改变。FRAM 器件的存储原理正是基于铁电材料的这种独特的性质，利用铁电材料的两种极化状态来分别存储数据“0”和数据“1”。FRAM 器件的非易失性也是来自于此。

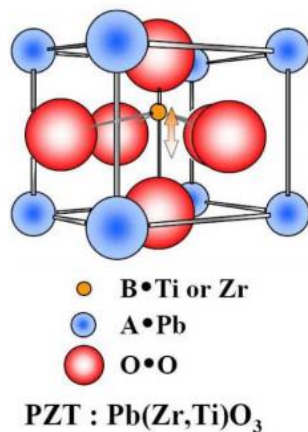


图 1.23 PZT 材料晶体结构^[35]

与 SRAM 器件类似，FRAM 器件也是由存储单元、地址译码器、敏感放大器以及控制电路等部分组成。外围电路部分的构成与功能大同小异，下面着重对 FRAM 器件的存储单元进行介绍。铁电材料在存储单元中以铁电电容的形式存在，常见的 FRAM 器件存储单元结构有由一个 NMOS 管与一个铁电电容构成的 1T/1C 结构，以及由两个 NMOS 管与两个铁电电容构成的 2T/2C 结构，如图 1.24 所示。1T/1C 单元与 2T/2C 单元的工作原理是基本相同的，最主要的差异在于存

储状态的判别方式。在 2T/2C 单元中，敏感放大器通过比较位线 BL 与 BLN 上的电压大小，判断存储数据是“0”还是“1”。而在 1T/1C 单元中，敏感放大器将位线 BL 上的电压值与一个额外的参考电压的大小作为判断依据。2T/2C 单元在写入数据后，两个铁电电容处于相反的极化状态。通常来说，2T/2C 单元具有更好的抗干扰能力。

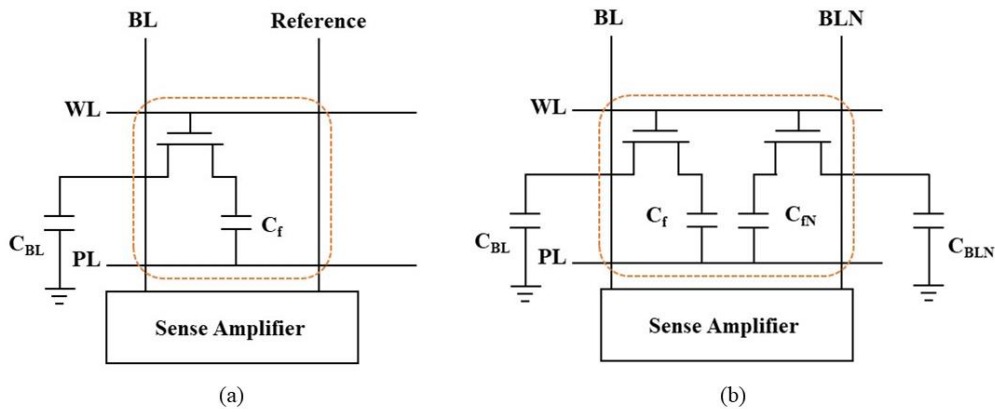


图 1.24 FRAM 器件存储单元，(a) 1T/1C 单元，(b) 2T/2C 单元^[36]。

与 SRAM 器件类似，FRAM 器件也有三种工作状态，分别为静态，数据读出以及数据写入状态。

在静态下，字线与板线（Plate line，PL）被置为低电势，NMOS 管关断，铁电电容两侧均不施加电压，存储单元保持原有的存储状态不变。

FRAM 存储单元的写过程，就是通过位线、字线与板线相互配合，对铁电电容进行极化的过程。以 1T/1C 单元为例，假设位线 BL 被预充电至高电势。然后字线 WL 被选中，NMOS 管导通，铁电电容被由位线指向板线的强电场极化到负向饱和极化状态 C。然后，将板线 PL 拉高至高电势，铁电电容上下表面电势相同，内部没有电场，此时铁电电容极化状态回落到 D。最后，依次将板线、位线与字线置于零电位，写过程结束。写过程中，铁电电容的极化曲线如图 1.25 所示。若要写入相反的数据，也是同理。2T/2C 单元的写过程与 1T/1C 单元类似，只是写过程结束后，两个铁电电容处于相反的极化状态。

在读过程中，首先选中字线，NMOS 管导通。然后将板线置为高电势，铁电电容被由板线指向位线的强电场极化到正向极化状态 B。若存储单元中铁电电容的原极化状态为 A，则位线上的电势不会发生明显改变。若铁电电容的原极化状态为 D，则铁电电容的极化状态在读过程中发生反转，电容 C_{BL} 与 C_f 之间电荷

进行再分配，导致位线电势的改变。敏感放大器通过比较位线上的电势与参考电势的大小，对存储单元中的数据进行判断。最后，依次将板线与字线置于零电位，读过程结束。以读出数据“1”为例，读过程中，铁电电容的极化曲线如图 1.26 所示。

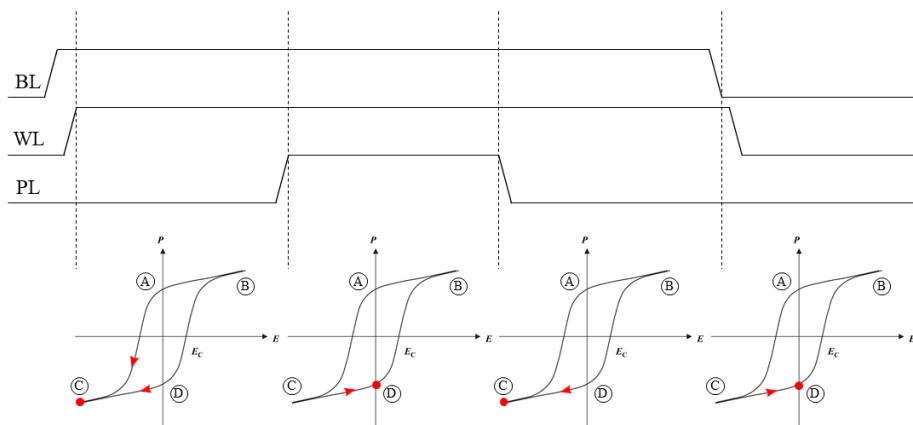


图 1.25 写过程中，铁电电容极化状态的变化，其中 E 为通过位线与板线给铁电电容上下表面施加的电势差的强度，A-D 为极化过程中的四个状态^[37]。

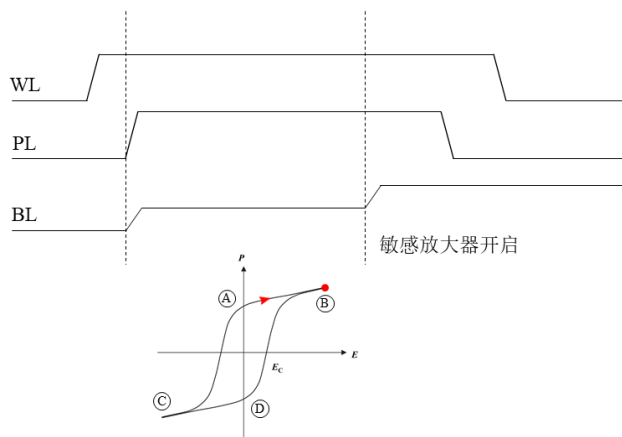


图 1.26 读过程中，铁电电容极化状态和位线电势的变化^[37]

FRAM 器件采取的是一种破坏性读出技术，存储单元中的数据在读出之后，铁电电容的极化状态会遭到破坏。因此，在读过程结束之后，FRAM 器件会自动执行一次回写操作，将读出之前的数据重新写入到存储单元之中。

1.4 SRAM 与 FRAM 器件的辐射效应研究现状

20 世纪 60 年代以来，半导体技术飞速发展。随着半导体技术的迭代，半导体集成电路的集成度呈指数增长。Moore 在 1965 年提出，在芯片性能更好、功

耗更低的前提下，每 18 到 24 个月半导体集成电路的集成度将提高一倍。在过去几十年中，Moore 提出的这一观点一直在指导着半导体行业的技术进步，被称为摩尔定律（Moore's Law）^[38]。从 20 世纪 60 年代末到 21 世纪初，半导体技术的发展趋势基本符合摩尔定律的预测，如图 1.27 所示。然而随着半导体晶体管特征尺寸的进一步减小，微处理器芯片的时钟频率却不再提高。随着 CMOS 工艺节点到达 28 nm，甚至更小的 14 nm 或 7 nm，半导体行业可能会迎来摩尔定律的终结。

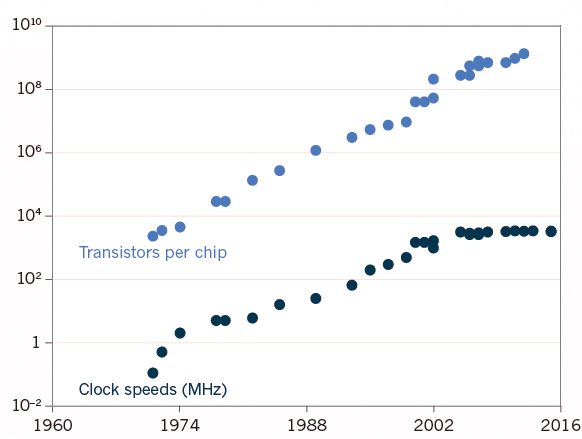


图 1.27 20 世纪 60 年代末到 21 世纪初，每颗微处理器芯片的时钟频率与晶体管数量^[39]。

半导体器件特征尺寸的持续减小不仅关乎半导体器件的性能、功耗与成本，也与半导体器件的抗辐射能力密切相关。随着半导体器件特征尺寸的减小，器件在航天应用中面临的辐射可靠性问题越来越突出。对半导体器件辐射效应机理的研究也随着器件特征尺寸的减小而不断深入。

20 世纪 50 年开始，国外就已经开展了材料的辐射效应研究。20 世纪 60 年代，美国成立了辐射效应委员会，并开始举办全国性的核和空间辐射效应会议。欧洲的法国、英国、德国与俄罗斯等国家的辐射效应研究工作开展的也比较早。20 世纪 90 年代初开始，欧洲开始举办器件和系统辐射效应会议，在器件和材料的辐射效应以及加固技术等方面进行了深入的研究。20 世纪 60 年代，国内也开始针对材料与器件的辐射效应开展工作。国内的多家公司在材料与器件的辐射效应实验研究、抗辐射加固设计以及计算机模拟仿真等方面取得了丰富的研究成果。本节将对 SRAM 器件和 FRAM 器件的辐射效应研究现状进行简要介绍。

1.4.1 SRAM 器件的辐射效应研究现状

自 1964 年 Hughes 等人首次报道商用三极管和 MOS 晶体管中的总剂量效应后^[2], 半导体器件在辐射环境中的可靠性成为了辐射效应研究领域的热门问题。SRAM 器件因其具有高性能和低成本等诸多优点, 在航天器中应用广泛, SRAM 器件的辐射效应也被国内外研究人员进行了深入研究。

对于晶体管特征尺寸在微米级别的 SRAM 器件, 对总剂量效应最敏感的区域为晶体管栅极下的氧化物, 辐照在 SiO_2/Si 界面附近产生的陷阱电荷导致晶体管阈值电压的漂移以及源漏之间泄漏电流的增大^[40-45]。并且, 总剂量辐照期间晶体管的偏置状态会显著地影响晶体管辐照损伤的程度^[46-48]。以 NMOS 管为例, 总剂量辐照期间的最恶劣偏置条件通常为正栅压^[49-52]。晶体管电学性能参数的退化进而影响整个 SRAM 器件的可靠性, 导致 SRAM 器件发生存储数据错误甚至完全失效^[53-57]。通常可以用静态噪声容限 (Static Noise Margin, SNM) 来定义 SRAM 存储单元的稳定性^[58-60]。总剂量效应通常会导致 SRAM 存储单元的静态噪声容限下降, SRAM 器件的抗干扰能力下降^[61,62]。此外, 研究人员还发现在 MOS 管中存在低剂量率增强 (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity, ELDRS) 效应, 即在辐照相同总剂量条件下, 射线剂量率越低, 器件的辐照损伤越严重^[63-65]。

随着 CMOS 工艺节点到达深亚微米以及纳米尺度, 晶体管中栅氧化物的厚度已经不足 5 nm, 总剂量效应对栅氧层的影响已经可以忽略不计, 浅沟槽隔离 (Shallow trench isolation, STI) 成为对总剂量效应最敏感的区域^[66,67]。辐照在 STI 中产生的正极性的陷阱电荷导致栅极下方沟道两侧的寄生漏电通道打开, 晶体管源漏之间的漏电增大。辐射感生窄沟道效应 (Radiation-Induced Narrow Channel Effect, RINCE) 也会导致 NMOS 管的阈值电压减小、PMOS 管的阈值电压增大^[68]。

国内外对于 SRAM 器件的单粒子效应也已进行了大量研究。重离子、质子、中子与激光等均可以在 SRAM 器件中引发单粒子效应。SRAM 器件中最常见的单粒子效应类型为单粒子翻转 (SEU) 与单粒子门锁 (SEL)^[69-73]。Dodd 等人发现, 在低 LET 值下, SRAM 存储单元中的 SEU 敏感区域通常为关态 NMOS 管的漏极区域。随着入射离子 LET 值的增大, SRAM 存储单元内 SEU 的敏感区域也有所变化^[74]。并且, 随着入射离子 LET 值的增大, SRAM 器件的 SEU 截面与

多位翻转 (Multiple Bit Upset, MBU) 的比例也随之增大^[75-78]。除了辐照实验以外, 研究人员也利用 Geant 4 与 TCAD 等软件进行了大量模拟仿真工作。罗尹虹等人利用 TCAD 模拟仿真, 研究了 SRAM 器件存储单元中的电荷收集机制, 发现可通过减小阱接触与存储单元之间的距离来减小 MBU 的发生几率^[79]。习凯等人利用 Geant 4 软件进行模拟仿真, 发现了不同入射重离子产生的次级电子的分布对 SRAM 器件单粒子翻转敏感性有一定的影响^[80]。此外, 根据实验测定的器件的单粒子翻转截面以及 LET 阈值等参数, 还可利用 CRÈME 96 等软件预测器件的在轨错误率^[81,82]。近代物理研究所从上世纪 90 年代开始半导体器件的单粒子效应研究, 在兰州重离子加速器 (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou, HIRFL) 上建立了专用的单粒子效应实验终端 (TR5)。利用 HIRFL 提供给 T5 终端的重离子束流, 近物所材料研究中心的科研人员取得了一系列研究成果^[83-91]。目前, HIRFL 与 TR5 终端已经成为国内各个科研单位进行半导体器件单粒子效应测试的不可替代的重要装置。

SRAM 器件工作在实际的空间辐射环境中时, 往往同时面对总剂量效应与单粒子效应的双重威胁。在 SRAM 器件中, 总剂量效应与单粒子效应之间并不是孤立的, 累积的总剂量会导致器件的 SEU 敏感性发生变化。已有研究发现, SRAM 器件的 SEU 敏感性与总剂量和单粒子辐照期间写入的数据图形有关, 这种现象被称为“印记效应”^[92-94]。总剂量辐照期间, 晶体管施加不同栅压导致的晶体管辐照损伤程度的不同, 被认为是“印记效应”产生的原因^[95-100]。随着器件的特征尺寸到了深亚微米以及纳米尺度, SRAM 器件中的“印记效应”似乎消失了。已有研究显示, 不论总剂量辐照期间 SRAM 器件中写入何种数据图形, 器件的 SEU 截面均增大^[101]。而 Schwank 等人的研究显示, 总剂量辐照后, 某些型号的 SRAM 器件 SEU 截面增大, 剩余器件的 SEU 截面没有明显变化^[102]。

目前, 在深亚微米以及纳米 SRAM 器件总剂量与单粒子的协同效应研究中, 还未发现总剂量效应对器件单粒子效应敏感性影响的普遍规律, 其物理机理也还需要进一步深入研究。

1.4.2 FRAM 器件的辐射效应研究现状

除存储单元外, FRAM 器件与 SRAM 器件其余部分的结构与功能比较类似。如敏感放大器、译码器以及控制电路等, 均是基于 CMOS 工艺, 由 NMOS 管、

PMOS 管与反相器等基本单元组成。带电粒子辐照对晶体管性能参数的影响及其物理机理的研究已在文章 1.4.1 节进行了介绍, 本节不再进行赘述。本节将主要对铁电材料的辐照效应、辐射引起的 FRAM 器件的错误类型与位置、以及总剂量与单粒子在 FRAM 器件中的协同效应的研究现状进行介绍。

经过大量的研究, 铁电材料已经被证明了拥有非常良好的抗辐照性能^[103,104]。Schwank 等人研究发现, 在经过 16 Mrad(Si)的辐照后, PZT 电容的极化状态改变不超过 30%^[105]。FRAM 器件中, 对总剂量效应最敏感的是外围 CMOS 电路, 而不是存储单元^[36,106]。已有的研究表明, FRAM 器件中至少可以发生单位翻转 (Single Bit Upset, SBU)、多位翻转 (MBU)、单粒子门锁 (SEL) 以及单粒子功能中断 (SEFI) 等四种类型的错误^[107-108]。有研究指出重离子辐照在 FRAM 器件中引起的 SEU 发生在外围电路而不是存储单元中^[36]。并且, FRAM 器件中的 SEU 是一种“临时性”的现象, 在同样的测试条件下, 有时会发生, 有时不会发生^[110]。在动态模式下, 重离子辐照引起的 FRAM 器件中的错误数要远大于静态测试模式^[111]。

目前, 在 FRAM 器件中, 关于总剂量与单粒子的协同效应的研究还比较少。有研究发现, 在经过 2 Mrad(Si)到 4 Mrad(Si)的辐照后, FRAM 器件的重离子单粒子翻转敏感性降低了^[112]。该研究认为, 总剂量辐照后器件 SEU 截面的减小是由于总剂量辐照在铁电电容中产生了陷阱电荷, 导致铁电材料的剩余极化强度随电压的波动变小。也有研究表明, 在经过中子辐照后, FRAM 器件的错误事件截面显著减小^[113]。中子辐照产生的位移损伤导致寄生晶体管中少数载流子寿命减少, 进而导致电流增益减小、重离子辐照引起的错误事件敏感性降低。

目前, 关于 FRAM 器件总剂量与单粒子协同效应的研究还非常少, 对于总剂量效应对 FRAM 器件单粒子事件敏感性影响的物理机理的认识还不够深入。并且, 虽然从实验上证明了 FRAM 器件中单粒子事件基本都发生在外围电路, FRAM 器件的存储单元具有良好的抗单粒子事件的能力, 但缺乏重离子对 FRAM 器件存储单元可靠性影响的直接的、定量的机理研究。

1.5 本文的研究内容

基于目前 SRAM 和 FRAM 器件总剂量效应与单粒子效应的研究现状, 本文

利用近代物理研究所提供的多种种类的重离子以及新疆理化所提供的 ^{60}Co γ 射线, 对纳米 SRAM 和 FRAM 器件开展了系统性的辐照实验, 深入研究了总剂量对 90 nm 和 65 nm 两款 SRAM 器件单粒子效应敏感性的影响, 以及总剂量对 130 nm FRAM 器件单粒子事件敏感性的影响。具体研究内容如下:

(1) γ 射线辐照对 SRAM 器件和 FRAM 器件电学性能参数的影响。 γ 射线辐照期间, 实时监测被辐照器件的静态功耗电流, 辐照结束后, 每隔一段时间检测器件的退火情况。分析被辐照器件漏电通道的位置以及总剂量对纳米晶体管影响的物理机理。

(2) γ 射线辐照对 SRAM 器件单粒子翻转敏感性的影响。 γ 射线辐照后, 测试 SRAM 器件的 SEU 截面, 并与未辐照总剂量的器件对比。总结总剂量对纳米 SRAM 器件 SEU 截面的影响规律, 并分析其物理机理。

(3) LET 值、数据图形、测试模式等实验参数对纳米 SRAM 中总剂量与单粒子协同效应的影响。实验过程中, 改变入射重离子的 LET 值以及写入数据图形等实验条件, 观察 SRAM 器件 SEU 截面的变化规律, 并分析其机理。

(4) 重离子引起的 FRAM 器件中的错误类型与发生位置。重离子辐照后, 分析 FRAM 器件的错误报告, 总结其中发生错误的类型。根据不同错误类型的特征, 分析引发各种错误的可能的原因。

(5) γ 射线辐照对 FRAM 器件单粒子事件敏感性的影响。 γ 射线辐照后, 测试 FRAM 器件的单粒子事件截面, 并与未辐照总剂量的器件对比。总结总剂量对纳米 FRAM 器件单粒子事件敏感性的影响规律, 并分析其物理机理。

(6) TCAD 模拟研究入射重离子对 FRAM 器件存储单元的影响。建立一个 3D 1T/1C 模型, 研究重离子入射 1T/1C 模型中 NMOS 管的不同位置后, 铁电电容表面的电势变化, 分析入射重离子对 FRAM 器件存储单元的影响。

本文的具体安排如下:

第一章, 引言。介绍了空间辐射环境中带电粒子的来源与分类、带电粒子引起半导体器件辐射效应的基本机理、以及 SRAM 和 FRAM 器件的基本结构与工作原理, 总结了 SRAM 和 FRAM 器件中总剂量效应、单粒子效应、以及二者协同效应的研究现状, 提出了本文的主要研究内容。

第二章, 实验介绍。介绍了本文实验中用到的 γ 射线源和兰州重离子加速器

的基本情况与工作原理、辐照实验中所用的测试系统的基本结构与使用方法，并对本文所选用的三种型号的被测器件的基本信息与开封方法进行了介绍。

第三章，SRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究。详细阐述了 SRAM 器件 γ 射线辐照和重离子单粒子辐照的实验方法与实验结果，分析了总剂量对 SRAM 器件单粒子翻转敏感性的影响机理以及入射重离子参数对协同效应的影响。

第四章，FRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究。详细阐述了 FRAM 器件 γ 射线辐照和重离子单粒子辐照的实验方法与实验结果，分析了总剂量辐照 FRAM 器件中漏电通道的位置和重离子辐照引起的错误类型，并讨论了总剂量对 FRAM 器件单粒子事件敏感性影响的物理机理。

第五章，TCAD 模拟重离子对 FRAM 器件存储单元的影响研究。介绍了利用 Sentaurus TCAD 工具建立的 1T/1C 存储单元模型，讨论了重离子入射 1T/1C 单元中 NMOS 管对铁电电容极化状态的影响及其物理机理。

第六章，结论与展望。对本文的主要研究成果进行总结，并介绍了下一步研究计划。

第 2 章 实验介绍

本文中单粒子效应实验依托于中国科学院近代物理研究所的大科学装置兰州重离子加速器，总剂量辐照实验则在中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Co γ 平台上进行。并且，针对本文实验所采用的三款不同器件，分别设计制造了三套测试系统。本章将对近代物理研究所的重离子加速器、新疆理化所的 ^{60}Co γ 射线源以及实验中采用的测试系统与待测器件分别进行介绍。

2.1 兰州重离子加速器

重离子辐照实验全部在近代物理研究所兰州重离子加速器（HIRFL）的单粒子效应实验终端（TR5）上完成。兰州重离子加速器是我国可以加速重离子种类最多、能量最高的具有国际先进水平的重离子加速器，主要由离子源（Electron Cyclotron Resonance, ECR）、扇聚焦回旋加速器（Sector Focused Cyclotron, SFC）、分离扇回旋加速器（Separated Sector Cyclotron, SSC）、冷却存储环主环（CSRm）和实验环（CSRe）、放射性束流线（RIBLL）等部分组成，如图 2.1 所示。

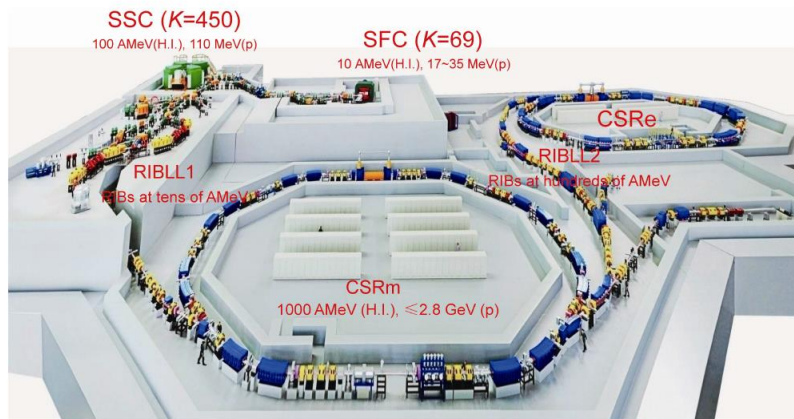


图 2.1 兰州重离子加速器整体布局^[114]

离子源用于产生高电荷态重离子，提供给 SFC 和 SSC 进行加速。SFC 直径为 1.5 m，能量常数为 $K = 69$ ，可以对从氢到铀之间的所有离子进行加速，将其能量加速到 $10.0 \text{ MeV/u (H}^+)$ 到 $1.28 \text{ MeV/u (}^{238}\text{U}^{72+})$ 。SSC 是兰州重离子研究装置的主加速器，能量常数为 $K = 450$ ，可与 SFC 联合运行，将碳到铋之间的重离子

能量加速到 100 MeV/u ($^{12}\text{C}^{6+}$) 到 9.5 MeV/u ($^{209}\text{Bi}^{31+}$)。离子束经 SSC 加速后，引出到单粒子效应实验终端 (TR5)，用以开展单粒子实验。CSR 的构造如图 2.2 所示。



图 2.2 冷却存储环：(a)主环，(b)实验环^[114]。

TR5 终端主要由扫描磁铁、法拉第筒、粒子探测器、束流管道、真空靶室、真空系统以及大气四维移动平台等部分组成^[115]。束流引入 TR5 终端以后，可通过束流阀门与法拉第筒控制重离子束流的打开与关断。通过扫面磁铁施加水平方向与垂直方向的磁场，将重离子束流扫描成长和宽各约 5 cm 的正方形束斑。重离子束流的强度可通过铝箔二次电子探测器、闪烁体探测器以及法拉第筒进行测量。重离子束穿过闪烁体探测器后，束斑大小约为 $2.3 \text{ cm} \times 2.3 \text{ cm}$ 。最后，重离子束流经由钛窗从真空靶室进入大气环境中。HIRFL 可以将重离子加速到比较高的能量，重离子束穿过钛窗进入大气之后，仍能保证具有足够的能量，在硅中具有足够的射程。因此，器件的单粒子实验可以在大气环境中进行。待测器件与测试系统通常固定在四维大气平台上进行重离子辐照实验。通过计算机控制软件，可以在 X 方向、Y 方向与 Z 方向调节样品架的位置，还可以通过旋转样品架，调节待测器件与重离子束流之间的夹角。半导体器件在 TR5 终端进行重离子辐照的示意图如图 2.3 所示。

重离子的线性能量转移 (LET) 对于半导体器件的单粒子效应敏感性测试是一个非常重要的参数。半导体器件重离子辐照实验的主要目标就是通过实验获取待测器件在不同 LET 值下的单粒子事件截面，通过拟合曲线得到器件的 LET 阈值和饱和截面，从而进一步对该款器件的在轨错误率进行预测和评估。HIRFL 提供的几种常见重离子的 LET 与能量的关系如图 2.4 所示。在 LET 峰值的右侧，

LET 随能量的变化趋势较为平缓, 通常选取 LET 峰值右侧的 LET 值点进行重离子辐照实验。在保证入射重离子在硅中射程大于 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的前提下, 通过调整待测器件与钛窗之间的距离, 并在钛窗与待测器件之间添加一定厚度的铝降能片, 可以在一定范围内调整入射重离子的能量与 LET 值。以 ^{86}Kr 离子为例, 从加速器中引出的 ^{86}Kr 离子能量为 2150 MeV 。在经过闪烁体与钛窗后, 能量降为 2008.7 MeV 。此时, ^{86}Kr 离子在空气中射程为 592.3 mm , 硅中射程为 $311.4\text{ }\mu\text{m}$, LET 值为 $19.58\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。通过增加空气层与铝降能片厚度, 在重离子能量与硅中射程减小的同时, 可以提高重离子的 LET 值。比如将待测器件与钛窗之间的距离设置为 50 mm , 并添加 $200\text{ }\mu\text{m}$ 厚的降能片后, ^{86}Kr 离子的能量减小为 482.7 MeV , 在硅中的剩余射程减小为 $58.8\text{ }\mu\text{m}$, 而 LET 值增大到 $37.54\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。

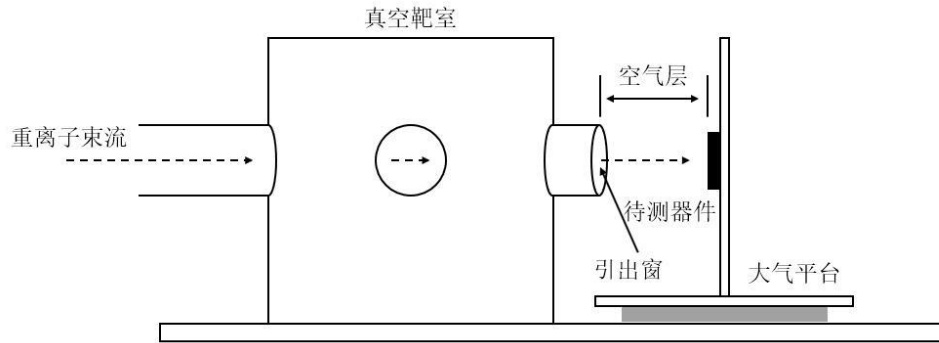


图 2.3 半导体器件重离子辐照示意图

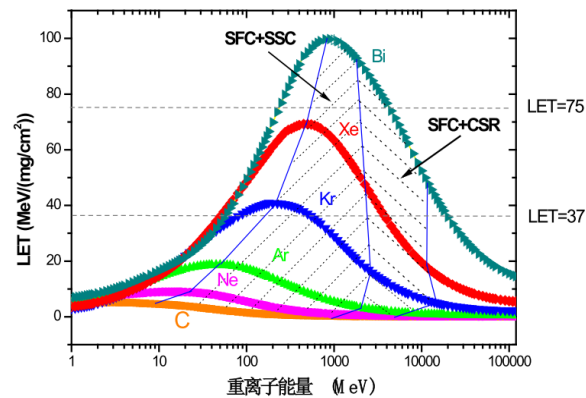


图 2.4 不同种类重离子 LET 与能量的关系^[116]

2.2 ^{60}Co γ 射线源

本文中所用 γ 射线源为新疆理化技术研究所辐照中心的 15 万居里钴源辐照

装置， γ 射线来源于钴源的衰变。 ^{60}Co 原子在一次衰变中可以产生两个 γ 光子，能量分别为1.17 MeV和1.33 MeV。 γ 射线具有极强的穿透能力，非常适合做半导体器件与集成电路总剂量效应测试的辐照源。此外，由于其还具有清洁无污染等特点，还可以用于食品、药品以及器具的消毒等。钴源辐照平台如图2.5所示



图 2.5 ^{60}Co γ 射线辐照平台与待辐照器件

受辐照材料吸收 γ 射线的能量可以用拉德(rad)来表示，这是一个与材料种类有关的物理量。以硅材料为例，每一克硅吸收100尔格(erg)能量时，吸收剂量定义为1 rad(Si)^[117]。半导体器件的总剂量辐照实验中，通常用单位rad(Si)来表示器件吸收 γ 射线的总剂量。单位时间内吸收 γ 射线的剂量称为剂量率，单位为rad(Si)/s。

辐照实验前，新疆理化技术研究所辐照中心的技术人员通过标定，将剂量率转换为与钴源距离有关的参数。通过控制待辐照半导体器件与钴源距离的远近，可以实现精确调节待辐照器件接收 γ 射线的剂量率。实验过程中，为保证器件各部分均匀的接受 γ 射线辐照，器件要通过测试板或底座固定在与 γ 射线垂直的方向。

2.3 待测器件

本文中共选用 SRAM 与 FRAM 两种类型存储器进行总剂量效应与单粒子效应实验研究，其中包括两款工艺尺寸分别为 90 nm 与 65 nm 的 SRAM 器件，一款 130 nm 工艺的 FRAM 器件。

实验选用的两款 SRAM 器件均为赛普拉斯(Cypress)公司生产的商用器件，型号分别为 CY7C1019D 和 CY7C1318KV18，存储单元均采用 6 管结构，具体器件信息如表 2.1 所示。

表 2.1 待测 SRAM 器件信息

器件型号	特征尺寸	存储容量	工作电压	单元结构	封装形式
CY7C1019D	90 nm	128 k × 8	3.3 V	6-T	TSOP II
CY7C1318KV18	65 nm	1 M × 18	1.8 V	6-T	FBGA

其中，CY7C1019D 器件基于 90 nm 工艺制程，采用 32 管脚的 TSOP II（Thin Small Outline Package II）封装形式。存储阵列中总共有 131072 个字（word），每个字中可以存储 8 位（bit）数据，总容量为 1 Mbit。CY7C1019D 器件的逻辑框图如图 2.6 所示。

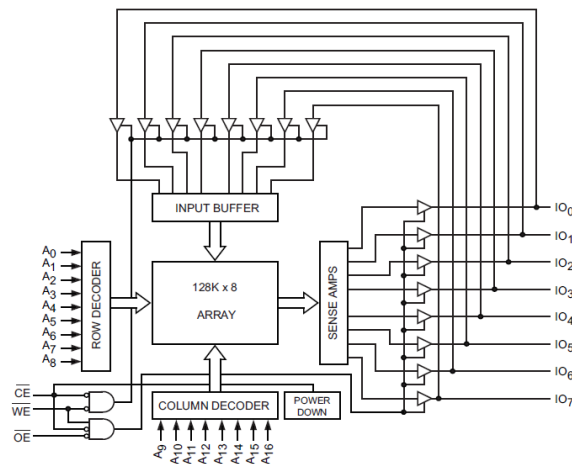


图 2.6 CY7C1019D 器件逻辑框图，图片来自 Cypress 公司芯片手册。

CY7C1318KV18 器件基于 65 nm 工艺制程，采用 FBGA（Fine-Pitch Ball Grid Array）封装形式。与 TSOP 封装相比，采用 FBGA 封装可以在芯片体积不变的情况下，将存储容量提高 2 到 3 倍。CY7C1318KV18 器件的存储阵列被分为 2 个块（block），每个块含有 524288 个字，每个字可以存储 18 位数据，总容

量为 18 Mbit。CY7C1318KV18 器件的逻辑框图如图 2.7 所示。

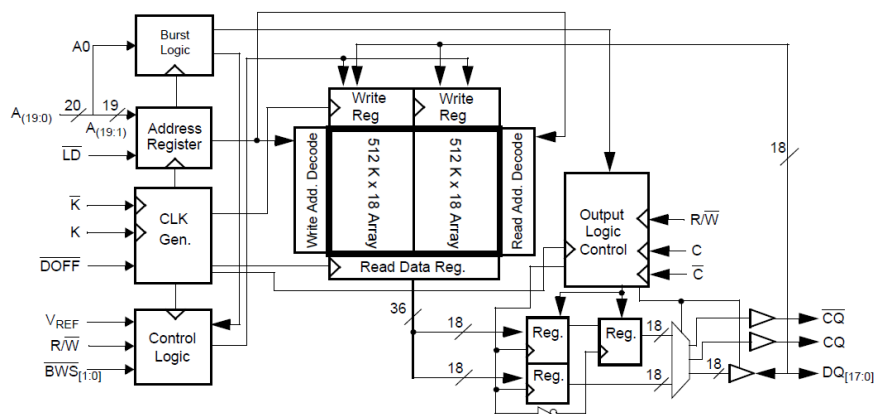


图 2.7 CY7C1318KV18 器件逻辑框图，图片来自 Cypress 公司芯片手册。

为保证实验数据的可靠性，实验中所有相同型号的器件均采用同一生产批次器件。为保证重离子入射到芯片内部时具有足够的射程，所有待测器件在辐照实验前均进行开封处理。CY7C1019D 器件为塑料封装，可利用发烟硝酸对芯片表层的塑料封装进行定位腐蚀处理。开封设备为美国 Nisene 科技集团生产的 JetEtch 自动开封机，如图 2.8 所示。通过设定发烟硝酸流量、蚀刻温度、蚀刻时间以及清洗时间等参数，可以实现比较好的开封效果。CY7C1019D 器件的实际开封效果如图 2.9 所示。



图 2.8 JetEtch 自动开封机

CY7C1318KV18 芯片采用 FBGA 封装，封装表面有一层耐腐蚀材料，需要先利用激光除去表层耐腐蚀材料，然后再进一步对其进行腐蚀处理。CY7C1318KV18 芯片的开封是委托深圳美信检测技术股份有限公司来完成的，开封效果如图 2.10 所示。

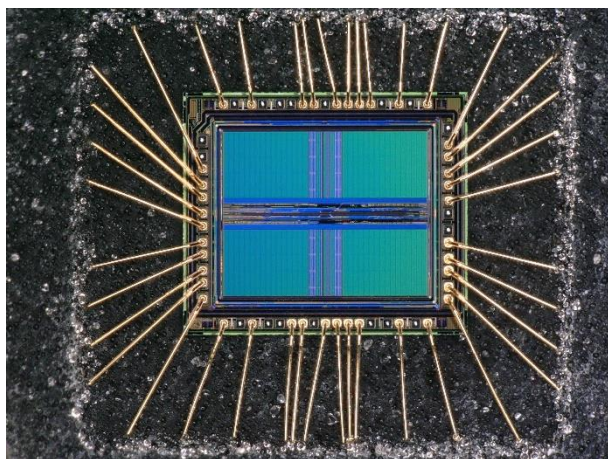


图 2.9 CY7C1019D 芯片开封效果图

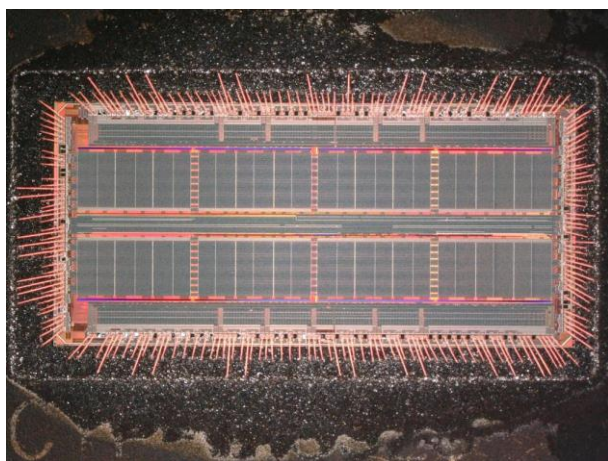


图 2.10 CY7C1318KV18 芯片开封效果图

实验选用 FRAM 器件为 Ramtron 公司生产的商用 FRAM 器件，型号为 FM22L16。FM22L16 器件基于 130 nm 工艺制程，采用 44 管脚的 TSOP II 封装形式，存储单元采用 2T/2C 结构。存储阵列被分为 8 个块，每个块包含 32768 个字，每个字可以存储 16 位数据，总的存储容量为 4 Mbit。器件的正常工作电压为 2.7 到 3.6 V，典型工作电压为 3.3 V。该器件可以在 -40℃到 85℃温度范围内保持工作正常。FM22L16 具体器件信息如表 2.2 所示，器件的逻辑框图如图 2.11 所示。

表 2.2 待测 FRAM 器件信息

器件型号	特征尺寸	存储容量	工作电压	单元结构	封装形式
FM22L16	130 nm	256 k × 16	3.3 V	2T/2C	TSOP II

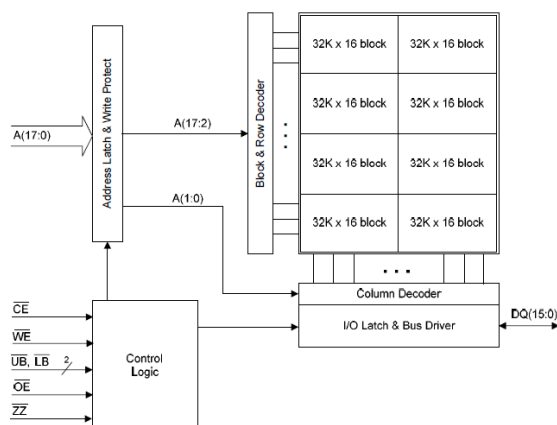


图 2.11 FM22L16 器件逻辑框图，图片来自 Ramtron 公司芯片手册。

在总剂量与单粒子效应测试中，所有待测 FM22L16 器件均采用 Ramtron 公司生产的同一批次产品。为保证重离子入射到芯片内部时具有足够的射程，所有待测器件在辐照实验前均进行开封处理。与 CY7C1019D 器件一样，FM22L16 器件也采用塑料封装。可以利用 JetEtch 自动开封机，通过发烟硝酸进行定位腐蚀开封，开封效果如图 2.12 所示。

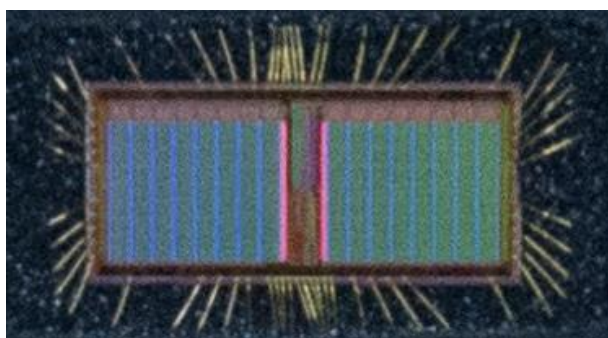


图 2.12 FM22L16 芯片开封效果图

2.4 测试系统

针对本文中研究的三款器件，分别设计制造了三套测试系统。以 FM22L16 型 FRAM 器件的测试系统为例，测试系统由主板、总剂量辐照子板、芯片座以及 FPGA 组成，如图 2.13 所示。整个系统采用模块化设计，各个部分均可与主板通过插针与插座连接在一起。

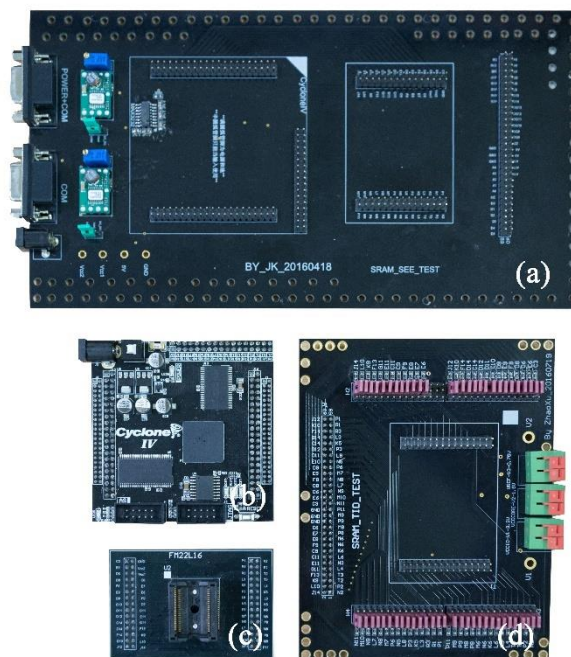


图 2.13 FM22L16 芯片的测试系统，其中(a)为主板，(b)为 FPGA，(c)为芯片座，(d)为总剂量辐照子板。

主板作为 FPGA、芯片座与总剂量子板的载体，可通过电源线与程控电源相连，为整个系统提供电源。主板通过串口线与计算机连接，计算机通过软件可以实现对 FPGA 的控制。FPGA 是整个测试系统的核心，其中已经被预先烧录了一套控制程序，用以控制芯片的读写操作。根据芯片的封装形式，选用相对应的芯片座的规格，可以快速便捷地更换芯片。总剂量辐照子板为总剂量实验专用，可以不依赖主板，单独为芯片供电。

通过预先烧录在 FPGA 中的控制程序，计算机可以利用软件实现对待测芯片的读写操作。利用这套测试系统，可以实现在待测器件内写入 16 进制数据，例如 55H、AAH、00H 和 FFH。在对器件中数据进行读出时，可以选择单次读出，即读出所有地址中的数据后，自动停止对器件的读操作。也可以对器件进行循环读，直至发送“停止”命令后停止。该软件可以自动比对器件中的读出数据与初始数据，实时显示发生错误的地址、错误的的数据以及总的错误数。该软件还可以生成实验报告，测试过程中执行的对器件的所有操作以及错误信息的记录将被保存到一个 txt 文件中，以便进一步分析。记录文件的形式和内容如图 2.14 所示。

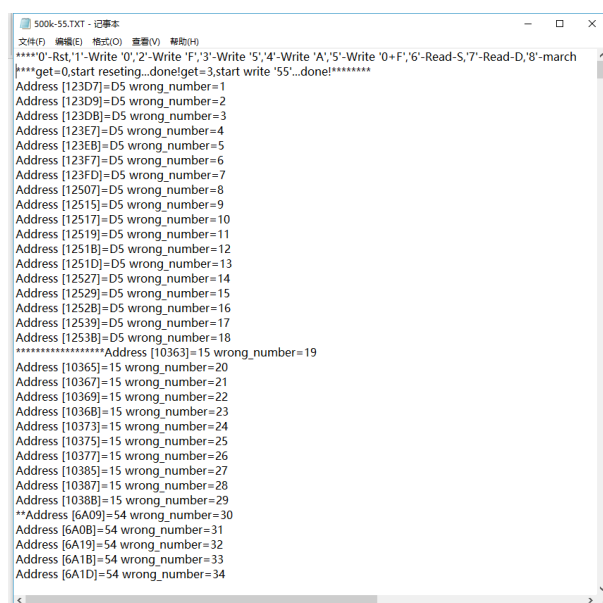


图 2.14 控制软件生成 txt 格式记录文件

在 TR5 终端进行重离子辐照实验时，无需用到总剂量辐照子板。将 FPGA 与芯片座通过插针与插座连接到主板上，然后将主板固定在四维大气平台上。放入待测器件，然后调整四维大气平台位置，使待测器件正对重离子束斑中心。在 TR5 实验大厅内需要使用一台程控电源为测试系统供电，一台计算机用以控制测试系统的工作。此外，在控制室还需一台计算机，与 TR5 实验大厅内的计算机通过网络进行远程连接。无需进入实验大厅，在控制室内即可实现对程控电源和测试系统的实时控制以及错误信息的实时显示。重离子辐照实验的示意图如图 2.15 所示。

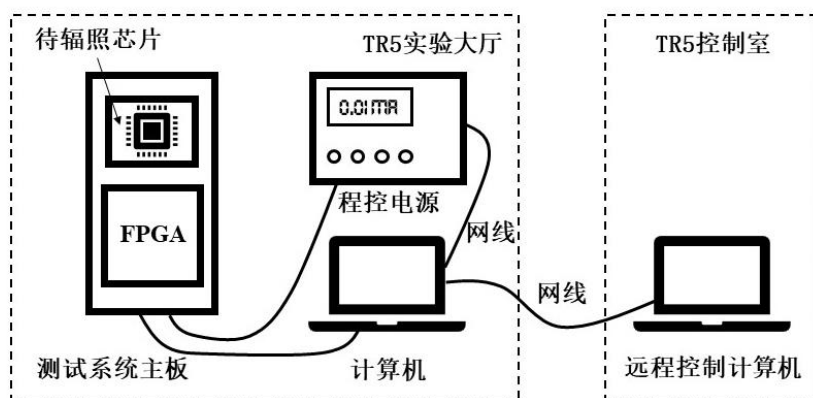


图 2.15 重离子辐照实验示意图

在利用钴源进行 γ 射线辐照实验时，由于 γ 射线具有非常强的穿透性，即使进行屏蔽也不能保证测试系统上除待测器件以外其它半导体器件不受 γ 射线的

影响。因此，在 γ 射线辐照期间，需要使用单独为总剂量辐照制作的总剂量辐照子板。将芯片与芯片座插到总剂量辐照子板上，再将总剂量辐照子板和 FPGA 通过插针与插座固定到主板上。电源放置在辐照大厅外，通过长线缆为辐照大厅内的测试系统供电。与单粒子实验不同，测试系统中 FPGA 依然由主板提供电源，但待测器件则由总剂量辐照子板单独提供电源。在待测器件内写入预期数据图形之后，将总剂量辐照子板与主板之间的连接断开。可以将总剂量辐照子板单独留在钴源大厅内进行辐照，测试系统主板不必留在辐照大厅中。用这种方法可以避免测试系统中其它器件的功能被 γ 射线辐照所影响， γ 射线辐照实验示意图如图 2.16 所示。

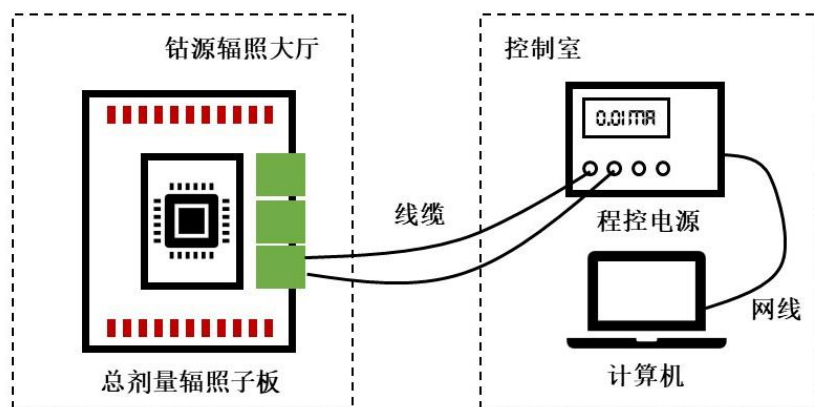


图 2.16 γ 射线辐照实验示意图

CY7C1019D 与 CY7C1318KV18 器件测试系统的结构与功能与 FM22L16 器件类似，使用方法也大致相同。唯一的区别是 CY7C1318KV18 器件的测试系统中，待测器件与芯片座是焊接在一起的，不可随意拆卸。若要更换器件，需将器件与芯片座作为整体一起更换。CY7C1318KV18 器件与测试座如图 2.17 所示。

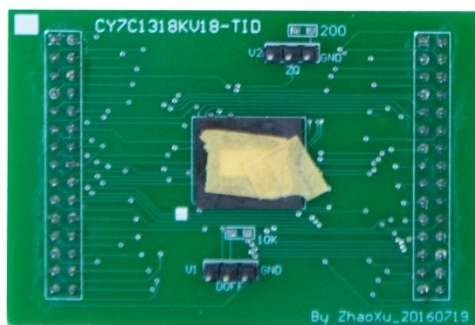


图 2.17 CY7C1318KV18 器件与芯片座

第 3 章 SRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究

3.1 γ 射线辐照对 SRAM 器件性能参数的影响

3.1.1 实验条件

本实验选用型号为 CY7C1019D 与 CY7C1318KV18 的商用 SRAM 器件，待测器件的具体信息已在文章 2.3 节做了详细介绍。本文利用 γ 射线源来对 SRAM 器件进行辐照实验，实验在室温、大气环境下进行。SRAM 器件的总剂量实验中，所有剂量点均采用未辐照过的全新器件进行辐照。辐照前，测试所有提前开封好的器件，从中选取功能正常、动态与静态功耗电流等参数相近的器件，尽量排除个别器件性能参数的偏差对实验结果可靠性的影响。

共有 5 组 CY7C1019D 器件接受 γ 射线辐照，累积剂量点分别为 200、300、400、500 和 600 krad(Si)，辐照剂量率为 300 rad(Si)/s。辐照开始前，所有器件写入 16 进制数据 55H，并将所有器件的工作模式设置为静态模式，即保持器件上电，但不对器件进行读写操作。

共有 1 组 CY7C1318KV18 器件接受 γ 射线辐照，累积剂量点为 600 krad(Si)，辐照剂量率同样为 300 rad(Si)/s。 γ 射线辐照前，器件中写入 16 进制数据 00H，而后将器件的工作模式设置为静态模式。CY7C1019D 与 CY7C1318KV18 器件的具体辐照参数如表 3.1 所示。

表 3.1 SRAM 器件 γ 射线辐照参数

器件型号	剂量率 /rad(Si)/s	总剂量 /rad(Si)	数据图形	偏置模式
CY7C1019D	300	200	55H	静态模式
	300	300	55H	静态模式
	300	400	55H	静态模式
	300	500	55H	静态模式
	300	600	55H	静态模式
CY7C1318KV18	300	600	00H	静态模式

待所有实验人员走出辐照大厅后，关闭实验大厅的门，然后升起钴源，开始辐照实验。辐照过程中，总剂量辐照子板被放置在钴源辐照大厅内，通过线缆与

辐照大厅外的程控电源（或电源加万用表）和计算机连接，实时监测器件的静态功耗电流变化。辐照结束后，对器件进行功能测试，检验器件读写功能是否正常以及器件中是否发生数据错误。同时，继续监测器件功耗电流的退火情况。

3.1.2 实验结果

辐照过程中，对 90 nm 器件 CY7C1019D 的静态功耗电流进行了实时监测，CY7C1019D 器件的静态功耗电流随着累积剂量的变化如图 3.1 所示。从静态功耗电流的变化曲线图可以看出，未辐照时，器件的静态功耗电流约为 0.6 mA。在累积剂量达到 100 krad(Si)之前，静态功耗电流没有明显增长。当累积剂量达到 100 krad(Si)后，静态功耗电流开始迅速增长。当累积剂量达到 300 krad(Si)后，静态功耗电流的增长趋势逐渐变缓。在累积剂量达到 600 krad(Si)后，该款器件的静态功耗电流达到最大值 20.2 mA，约为初始值的 33.7 倍。

辐照结束后，对器件进行数据读出和功能测试。结果显示，在经过 600 krad(Si) 的 γ 射线辐照后，CY7C1019D 器件中并未出现数据错误，所有器件仍保持读写功能正常。

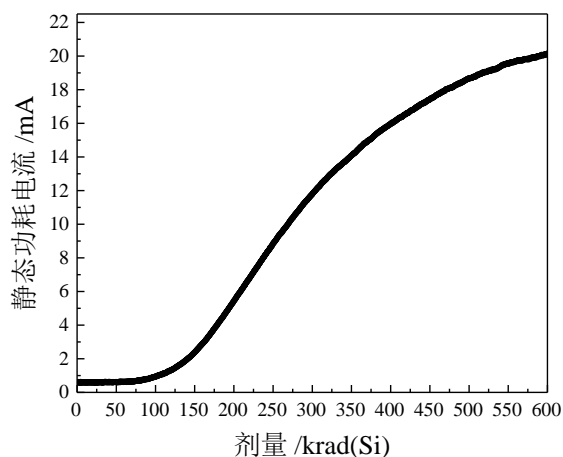


图 3.1 CY7C1019D (90 nm) 芯片的功耗电流随总剂量的变化曲线，辐照过程中，器件处于静态模式，写入数据为 55H。

未辐照时，65 nm 器件 CY7C1318KV18 的初始静态功耗电流为 75.0 mA。由于 65 nm 器件的测试系统稳定性的原因，测试系统容易受到长线缆上电压降的影响。辐照过程中，未能实现实时监测该款器件的静态功耗电流。CY7C1318KV18 器件也以 300 rad(Si)/s 的剂量率进行辐照，累积剂量为 600 krad(Si)。辐照结束

后，等待钴源降到井中，然后取出器件，此过程约花费 11 分钟。然后对 CY7C1318KV18 器件的静态功耗电流进行了测试，测试结果如图 3.2 所示。辐照结束 11 分钟后，器件的静态功耗电流为 180.0 mA，约为初始值的 2.4 倍。并且，在经过 600 krad(Si)的 γ 射线辐照后，该型号器件同样未出现数据错误，所有器件也仍保持读写功能正常。

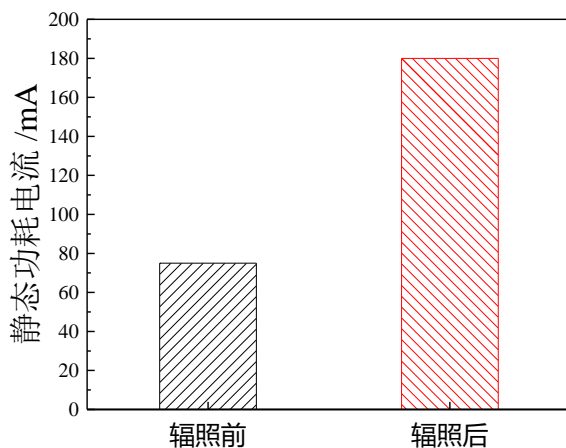


图 3.2 总剂量辐照前与辐照结束 11 分钟后，CY7C1318KV18 (65 nm)芯片的静态功耗电流，辐照过程中，器件处于静态模式，写入数据为 00H。

辐照结束后，每隔一段时间对所有器件的静态功耗电流进行测量，通过多次测量得到静态功耗电流随时间的变化情况，器件功耗电流的变化可以一定程度上代表该款器件中总剂量效应的退火情况。由于总剂量实验与单粒子实验分别在新疆理化技术研究所与近代物理研究所进行，总剂量辐照结束后，需要将器件与测试系统由乌鲁木齐运输到兰州。在约 24 小时的运输期间，器件被保存在常温条件下。到达兰州后，器件被放置到 -80℃ 环境中保存，直至单粒子实验前取出。

CY7C1019D 器件在辐照后的退火情况如图 3.3 所示。由图可以看出，辐照不同剂量的 γ 射线后，器件静态功耗电流的退火趋势是一致的。在辐照结束后的前 24 小时，器件的静态功耗电流在室温条件下退火非常迅速，随后退火速度减慢。辐照结束 50 小时后，器件的静态功耗电流变化不再明显。在经过 100 小时的退火后，辐照总剂量为 200、300、400 krad(Si)的 CY7C1019D 器件的静态功耗电流约为 0.69 mA 到 0.72 mA 之间，已经十分接近辐照前的初始值 0.6 mA。辐照总剂量为 500、600 krad(Si)的器件的静态功耗电流约为 1.1 mA，约为辐照前的 1.8 倍。

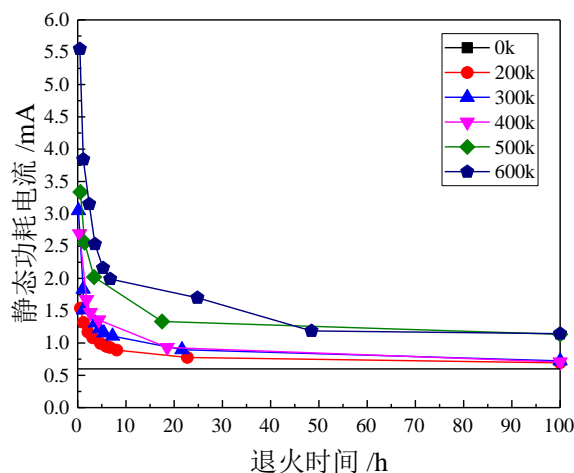


图 3.3 辐照结束后, CY7C1019D (90 nm)芯片的静态功耗电流随时间的变化曲线, 前 24 小时在室温下退火, 随后放置在-80℃环境下。

CY7C1318KV18 器件的退火情况如图 3.4 所示。由图可以看出, CY7C1318KV18 器件的退火趋势与 CY7C1019D 器件类似。经过 600 krad(Si) γ 射线辐照的器件在辐照结束后的前几个小时退火十分迅速。而在辐照结束 70 小时后, 退火速度变得比较缓慢。在经过 100 小时退火以后, 器件的静态功耗电流为 95 mA, 约为辐照前的 1.3 倍。

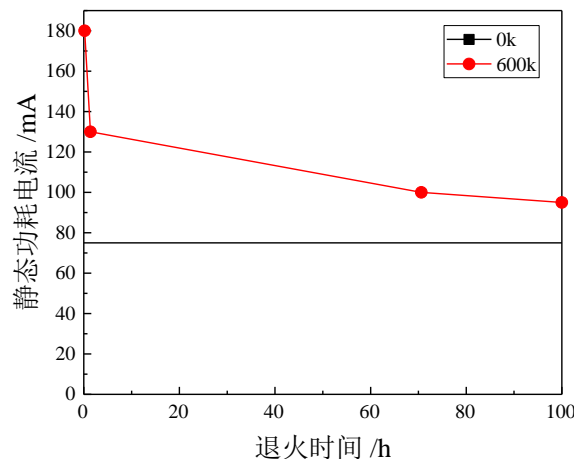


图 3.4 辐照结束后, CY7C1318KV18 (65 nm)芯片的静态功耗电流随时间的变化曲线, 前 24 小时在室温下退火, 随后放置在-80℃环境下。

3.1.3 分析讨论

在文章第 1.4 节已经介绍过, 总剂量效应对纳米 CMOS 器件的影响主要在浅沟槽隔离(STI)区域。以 NMOS 管为例, γ 射线辐照在沟道两侧的 STI 中产生

正电性的陷阱电荷,当陷阱正电荷产生的附加电场足够大时,会导致沟道边缘形成由源到漏之间的寄生漏电通道,横向的寄生晶体管导通,如图 3.5 所示。寄生晶体管的电流比较小,主要会导致 NMOS 管的亚阈值漏电流增大。而当 NMOS 管导通之后,寄生漏电流不会对 NMOS 管的源漏电流有明显影响。在 SRAM 器件中,存储单元阵列的面积占芯片总面积的比例高达 70%以上。 γ 射线辐照过后,存储单元中处于开态的 PMOS 管与处于关态的 NMOS 管组成由电源到地的漏电通道,是导致 SRAM 器件静态功耗电流增长的主要原因。在 CY7C1019D 器件的辐照过程中,累积剂量小于 100 krad(Si)时,STI 中产生的氧化物陷阱电荷量不足以形成寄生漏电通道,器件的静态功耗电流变化不明显。累积剂量达到 100 krad(Si)后,随着氧化物陷阱电荷的进一步增加,器件的功耗电流迅速增大。

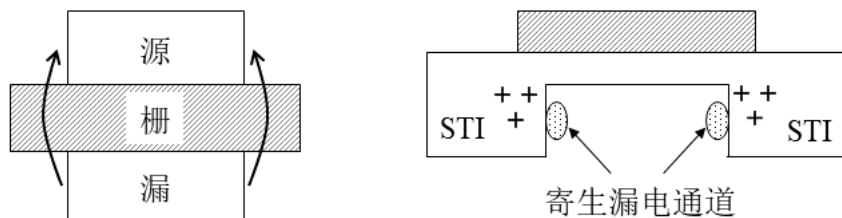


图 3.5 γ 射线辐照后, NMOS 管中的寄生漏电通道,其中左图为 NMOS 管的俯视图,右图为主视图(由源极看向漏极方向)^[68]。

γ 射线辐照在沟道两侧的 STI 中产生的陷阱电荷和界面态还会影响晶体管的阈值电压。对于 NMOS 管,呈正电性的氧化物陷阱电荷与呈负电性的界面态是竞争关系。通常来说,在纳米器件中,氧化物陷阱电荷对 NMOS 管阈值电压的影响更大。总剂量辐照过后, NMOS 管阈值电压负向漂移。对于 PMOS 管, γ 射线辐照产生的氧化物陷阱电荷与界面态均呈正电性, PMOS 管的阈值电压正向漂移。

此外,与氧化物陷阱电荷相比,界面态的形成通常需要相对更长的时间与更高的累积剂量。在 NMOS 管中,辐照在 Si/SiO₂ 界面产生的界面态呈负极性。随着时间的推移,界面态逐渐增多,会部分抵消氧化物陷阱电荷对器件性能参数的影响。在 Faccio 等人的研究中,以 20 rad(Si)/s 的剂量率对 130 nm 器件进行辐照, NMOS 管的阈值电压首先随着累积剂量的增加逐渐减小,当累积剂量达到 1 到 6 Mrad(Si)左右时,由于界面态的影响, NMOS 管的阈值电压开始回升^[68]。

γ 射线辐照结束后,随着 STI 中陷阱电荷与电子的复合,器件的静态电流

逐渐回落。并且，器件的退火速度受环境温度的影响十分显著，温度越高，退火速度越快。

3.2 SEE 测试模式对 SRAM 器件 SEU 截面的影响

3.2.1 实验条件

SRAM 器件的重离子单粒子效应测试在兰州重离子加速器(HIRFL)的 TR5 终端进行。实验的研究对象为预辐照 600 krad(Si) γ 射线的 CY7C1019D 器件，以及未进行总剂量辐照的全新 CY7C1019D 器件。单粒子效应实验在室温、大气环境下进行。TR5 终端闪烁体探测器厚度为 12.5 μm ，Ti 引出窗厚度为 14.7 μm 。实验选用 HIRFL 提供的 ^{181}Ta 离子，具体的实验参数如表 3.2 所示。

表 3.2 ^{209}Bi 离子辐照参数

离子种类	初始能量 (MeV/u)	铝箔厚度 / μm	空气层厚度 /mm	Si 中射程 / μm	LET 值 /MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$
^{181}Ta	12.5	0	30	83.3	81.4

实验前，器件与重离子束流方向垂直放置，器件中写入 55H 数据图形。重离子辐照过程中，分别采用动态与静态两种测试模式对 SRAM 器件进行 SEU 敏感性测试。实时监测器件的功耗电流，以确保器件处于正常工作状态。同时，功耗电流的异常变化也可作为是否发生单粒子锁定的判定参考。

在动态测试模式下，单粒子效应测试系统对器件中的存储数据进行循环读操作，并与初始的写入数据进行比较。如有数据错误发生，测试系统向计算机发送错误数据、错误地址、错误个数等信息，计算机实时显示并记录错误信息，并在辐照结束后生成错误报告。为减小错误截面的统计误差，每次测试，都尽可能在计算机累积报告超过 1000 个错误后再停止。重离子辐照过程中，实时调节入射重离子的注量率，以使错误发生频率适中，测试系统每秒钟报告约 1-5 个错误。

在静态测试模式下，重离子辐照过程中测试系统不对器件进行读写操作。重离子辐照累积注量达到 $7 \times 10^5 \text{ ions}/\text{cm}^2$ 后，切断束流，读出器件中的数据，并与初始数据进行比较，记录错误信息。

重离子单粒子效应测试结束后，由公式 3.1 计算得到器件的单粒子翻转截面 σ_{SEU} 。

$$\sigma_{SEU} = \frac{N}{\Phi \cdot M \cdot \cos \theta} \quad (3.1)$$

其中， N 为单粒子翻转错误数， Φ 为辐照过程中单位面积上累积的重离子注量， M 为被测芯片的存储容量， θ 为重离子束流方向与被测芯片法线的夹角。

3.2.2 实验结果

利用 LET 值为 $81.4 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ ，注量率约为 $500 \text{ ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的 ^{181}Ta 离子对 CY7C1019D 器件进行辐照，分别测试静态与动态模式下器件的 SEU 截面，比较二者是否有差异。测试期间，所有器件的写入数据图形均为 55H，测试结果如图 3.6 所示。未辐照过 γ 射线的 CY7C1019D 器件的静态 SEU 截面为 $5.5 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，动态 SEU 截面为 $5.7 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。预辐照 600 krad(Si) γ 射线的器件的静态 SEU 截面为 $9.8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，动态 SEU 截面为 $1.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。无论器件是否经过 γ 射线辐照，在注量率为 $500 \text{ ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的 ^{181}Ta 离子辐照下，单粒子效应测试模式对该型号 SRAM 器件的 SEU 截面没有明显影响。

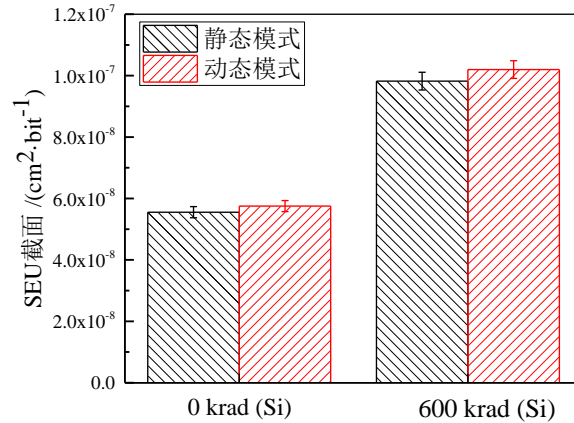


图 3.6 不同测试模式下，CY7C1019D 器件的 SEU 截面。

3.2.3 分析讨论

SRAM 器件的 6-T 单元结构如图 3.7 所示。假设 6-T 单元中存储数据“1”，即 Q 节点为高电势，右侧的反相器输入端为高电压， P_2 关断， N_2 导通。而 QN 节点电势为零，左侧的反相器输入端为零电压， P_1 导通， N_1 关断。在静态 SEE 测试模式下，不对器件进行读或写操作，Q/QN 节点保持原有电势， P_1/N_1 和 P_2/N_2 维持原有的开关状态。在动态 SEE 测试模式下，对器件进行循环读操作。在读操作开始时，首先将位线 BL/BLN 预充电至高电势。然后将字线 WL 置于高电

势，传输管 N_3/N_4 导通。由于 6-T 单元中存储数据为“1”，Q 节点本就处于高电势，Q 节点的电势在读过程中不发生改变。QN 节点原本处于零电势，而 N_2 处于导通状态，BLN 通过 N_2 和传输管 N_4 进行放电。在此过程中，QN 节点的电势会有所上升，上升的程度与 N_2/N_4 的电阻大小有关。若在读过程中，恰好有重离子入射该存储单元的 SEU 灵敏区，QN 节点电势的增大可能会导致存储单元抗单粒子翻转能力的减弱。

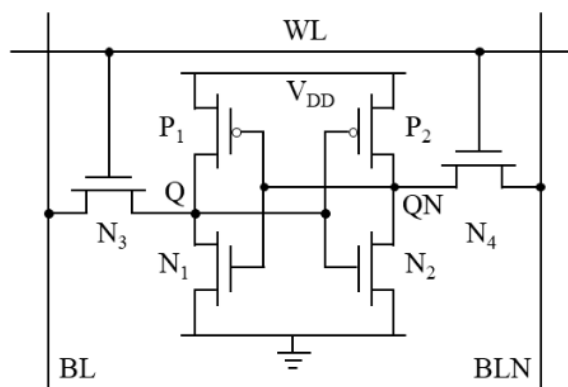


图 3.7 6-T SRAM 单元结构。

然而在本实验中，并未发现在静态和动态测试模式下 CY7C1019D 器件的 SEU 截面有明显不同。实验后，对 CY7C1019D 器件存储阵列的面积进行了测量，测量结果约为 $1.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 。辐照过程中， ^{181}Ta 离子的注量率约为 $500 \text{ ions}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。利用以上数据进行计算可知，能够入射到待测器件存储阵列的 ^{181}Ta 离子仅有约 9 ions/s 。而该器件的存储容量为 1 Mbit，当对其中的某个单元中的数据进行读出时，恰好有重离子入射到该单元的概率非常低。在实验设计合理、重离子注量率合适的前提下，单粒子效应测试模式的选择不会对 SEU 截面的测试结果产生影响，可以认为存储单元中的翻转错误均发生在数据保持状态。因此，在分析 TID 对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响时，可以不考虑传输管 N_3/N_4 的影响。

3.3 γ 射线辐照对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响

3.3.1 实验条件

本实验选用 HIRFL 提供的 ^{209}Bi 离子, 初始能量为 9.5 MeV/u, LET 值为 99.8 MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。实验在室温、大气环境下进行。实验的研究对象为预辐照 200、300、400 和 500 krad(Si) γ 射线的 CY7C1019D 器件, 预辐照 600 krad(Si) γ 射线的 CY7C1318KV18 器件, 以及未进行总剂量辐照的全新 CY7C1019D 与 CY7C1318KV18 器件。具体的实验参数如表 3.3 所示。

表 3.3 ^{209}Bi 离子辐照参数

离子种类	初始能量 /(MeV/u)	铝箔厚度 / μm	空气层厚度 /mm	Si 中射程 / μm	LET 值 /MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$
^{209}Bi	9.5	0	30	53.7	99.8

实验前, CY7C1019D 器件中写入 55H 或 AAH 两种数据图形, CY7C1318KV18 器件中写入 00H 或 AAH 两种数据图形, 重新测试并记录器件的静态功耗电流。重离子辐照过程中, 重离子垂直入射到器件中。采用动态测试模式, 在计算机累积报告超过 1000 个错误后停止测试。实验过程中, 实时监测器件的功耗电流, 以确保器件处于正常工作状态, 并依据器件功耗电流的变化辅助判断是否有单粒子锁定发生。

3.3.2 实验结果

在 TR5 终端调束完成, 单粒子效应测试前, 器件经过了约 24 小时的常温退火以及约 80 小时的 -80 $^{\circ}\text{C}$ 低温退火。此时, 预辐照不同剂量 γ 射线的 CY7C1019D 器件与 CY7C1318KV18 器件的静态功耗电流分别如图 3.8 和图 3.9 所示。预辐照 200 - 400 krad(Si) 总剂量的 CY7C1019D 器件的静态功耗电流已经回落到初始值附近, 总剂量效应对器件的影响已经几乎完全退火。而预辐照 500 krad(Si) 总剂量的该型号器件的静态功耗电流为 1.0 mA, 仍要比辐照前的初始值高 40%。对于 CY7C1318KV18 器件, 只进行了 600 krad(Si) 一个剂量点的 γ 射线辐照。在单粒子效应测试前, 辐照过总剂量的芯片静态电流为 95 mA, 比辐照前的初始值高约 27%。

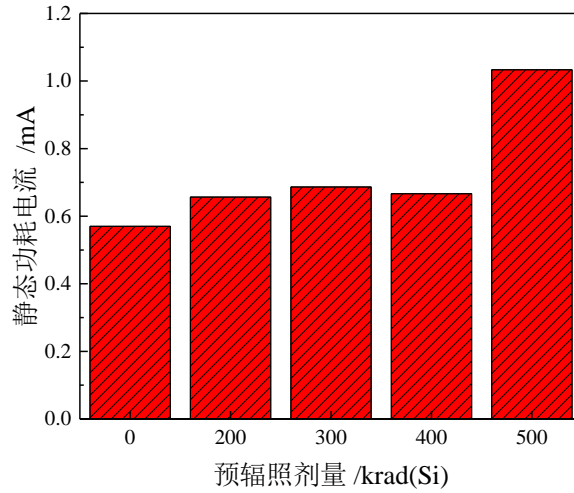


图 3.8 预辐照不同剂量的 CY7C1019D 器件在重离子辐照前的静态功耗电流值

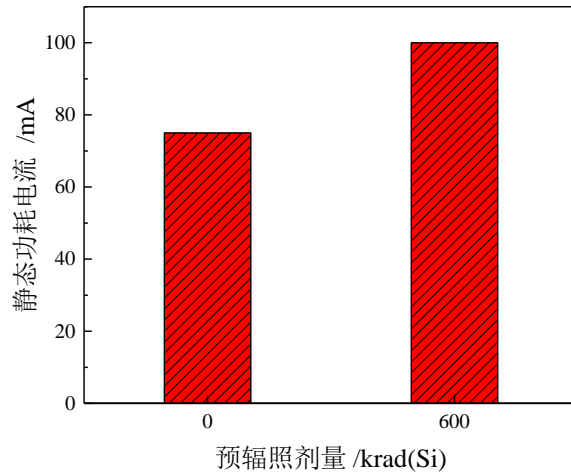


图 3.9 预辐照不同剂量的 CY7C1318KV18 器件在重离子辐照前的静态功耗电流值

在 LET 值为 $99.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ ，注量率为 $100 \text{ ion}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 到 $1000 \text{ ion}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 的 ^{209}Bi 离子辐照下，所有 CY7C1019D 器件和 CY7C1318KV18 器件中的错误均为单粒子翻转，未发生单粒子锁定与单粒子功能中断等现象。CY7C1019D 器件的 SEU 截面如图 3.10 所示。辐照前，CY7C1019D 器件的 SEU 截面约为 $7.8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。预辐照剂量为 200、300 和 400 krad(Si) 的 CY7C1019D 器件的 SEU 截面与未辐照器件接近，无明显差异。预辐照剂量为 500 krad(Si) 的器件的 SEU 截面约为 $1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，比未辐照器件高 90% 左右。

CY7C1318KV18 器件的 SEU 截面如图 3.11 所示，辐照前，SEU 截面约为 $3.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。辐照 600 krad(Si) γ 射线后，SEU 截面增长到 $6.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，增长了约 60%。

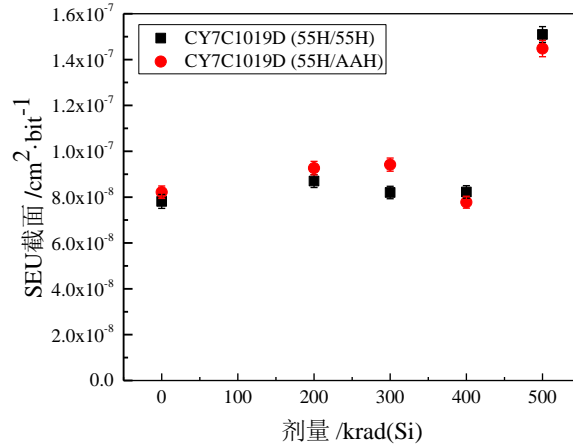


图 3.10 预辐照不同剂量的 CY7C1019D 器件写入不同数据图形时的 SEU 截面，测试采用 LET 值为 $99.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的 ^{209}Bi 离子完成。

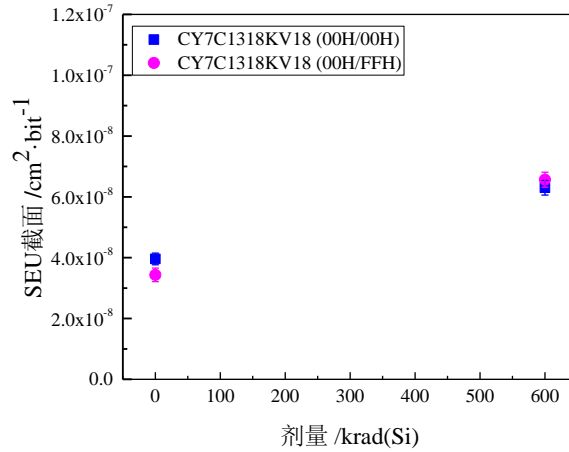


图 3.11 预辐照不同剂量的 CY7C1318KV18 器件写入不同数据图形时的 SEU 截面，测试采用 LET 值为 $99.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的 ^{209}Bi 离子完成。

此外，在测试过程中，所有待测器件中均未发现 SEU 截面对写入数据图形的依赖关系。总剂量与单粒子效应实验过程中，无论写入何种数据图形，测得 SRAM 器件的 SEU 截面值都是大致相同的。

3.3.3 分析讨论

基于 3.2 节的分析，存储单元中传输管 N_3/N_4 对 SEE 与 TID 的协同效应的影响可以忽略，下面主要讨论 γ 射线辐照后，存储单元中 N_1/P_1 和 N_2/P_2 的性能变化对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响。本文 3.2 节已经讨论过， γ 射线辐照期间，若 N_1 与 P_1 处于零栅压状态，则与 N_2 与 P_2 处于正栅压状态。MOS 管的偏置电

压不同,会导致晶体管在 γ 射线辐照后产生的损伤程度不同。以 NMOS 管为例,若辐照期间给 NMOS 管施加正栅压,STI 中会存在一个由栅极指向衬底的电场。在该电场的作用下,辐照产生的电子-空穴对中的电子加速逃逸出 STI,空穴则更多的被 STI 中的缺陷俘获,形成陷阱正电荷,导致晶体管的损伤更为严重。由于存储单元中 MOS 管在 γ 射线辐照后损伤程度的不对称,理论上来说,在后续的 SEU 测试中,SEU 截面在写入不同的数据图形时应表现出一定的差异。然而在本实验中,SEU 截面并未表现出与数据图形的相关性。如本文 3.2 节所讨论的, γ 射线辐照对 MOS 管最主要的影响是导致晶体管阈值电压和关态漏电流的变化,下面将从阈值电压与关态漏电流两方面对 SEE 与 TID 的协同效应进行讨论。

首先,考虑 γ 射线辐照产生的晶体管阈值电压的变化对存储单元的影响。一般来说, γ 射线辐照过程中,晶体管栅极偏置电压的不同会导致晶体管辐照损伤程度的不同。然而随着 CMOS 工艺到了纳米尺度,MOS 管在总剂量辐照期间的最恶劣偏置条件也发生了改变。当待测器件中的累积剂量足够大时, γ 射线辐照在零栅压 NMOS 管中产生的阈值电压漂移可能并不弱于正栅压 NMOS 管^[118]。存储单元中 N_1/P_1 和 N_2/P_2 组成两个反相器,反相器的开关阈值 V_M 可以表示为^[33]:

$$V_M = \frac{\left(V_{Tn} + \frac{V_{DSATn}}{2} \right) + r \left(V_{DD} + V_{Tp} + \frac{V_{DSATp}}{2} \right)}{1 + r},$$

$$r = \frac{v_{satp} W_p}{v_{satn} W_n} \quad (3.2)$$

其中, V_{Tn} 和 V_{Tp} 分别为 NMOS 和 PMOS 管的阈值电压, V_{DSATn} 和 V_{DSATp} 分别为 NMOS 和 PMOS 管在载流子速度饱和时的漏电压, v_{satn} 和 v_{satp} 分别为电子和空穴的饱和速度, W_n 和 W_p 分别为 NMOS 和 PMOS 管的宽度。已知,电子和空穴的饱和速度大致相同,即 $v_{satn} \approx v_{satp}$ 。并且,在对存储单元进行设计时,要保证单元在读过程中存储节点电势的改变不会导致存储状态的翻转,并尽量减小晶体管尺寸。一般来说,传输管 N_3/N_4 的电阻要大于下拉管 N_1/N_2 ,而晶体管 N_1/N_2 的宽度大于上拉管 P_1/P_2 。由以上分析可知, r 值小于 1。相较于 PMOS 管, NMOS 管的阈值电压 V_{Tn} 的改变对反相器的开关阈值 V_M 的影响更大。由公式 3.2 可知,由于 NMOS 管阈值电压的减小,存储单元中的两个反相器在辐照后的开关阈值

均降低。

其次，还要考虑 γ 射线辐照产生的晶体管关态漏电流的变化对存储单元的影响。 γ 射线辐照过程中，SRAM 器件 6-T 单元内左右两个反相器处于相反的偏置状态。两个 NMOS 管中，一个施加零栅压，另一个施加正栅压。两个 PMOS 管的偏置状态也是如此。本节也已讨论过， γ 射线辐照剂量较大时，处于不同偏置状态的 NMOS 管中产生的辐照损伤程度有可能相差不大。本实验的结果也验证了这一猜想。在 γ 射线辐照结束后，立即对 SRAM 器件的静态功耗电流进行了测试。在待测器件中写入 55H 和 AAH 数据图形时，器件的静态功耗电流值没有明显差异。相较于辐照前，静态功耗电流的增长幅度是相同的。因此，可以认为 γ 射线辐照导致了施加零栅压与正栅压的 NMOS 管中产生了同等程度的关态漏电流的增长。

下面综合考虑 γ 射线辐照导致的晶体管阈值电压与漏电流的变化，讨论 γ 射线辐照对存储单元 SEU 敏感性的影响。若重离子辐照期间 6-T 单元中存储数据“1”，即 Q 节点为高电势，P₂ 关断，N₂ 导通，QN 节点电势为零，P₁ 导通，N₁ 关断。由于预辐照 γ 射线的影响，处于关断状态的 N₁ 中存在漏电流，在该漏电流与 N₁ 寄生电阻的作用下，Q 节点的电势减小了 ΔV_Q 。假设 Q 节点原本的电势为 V_Q ，辐照后左右两个反相器的开关阈值减小了 ΔV_M ，重离子入射 N₁ 的漏极产生的对 Q 节点的电势扰动为 ΔV_N ，重离子入射 P₂ 的漏极产生的对 QN 节点的电势扰动为 ΔV_P ，则当入射重离子产生的扰动满足以下条件时，存储单元发生单粒子翻转：

$$\begin{aligned} V_Q - (\Delta V_N + \Delta V_Q) &< (V_M - \Delta V_M), \\ \text{或 } \Delta V_P &> (V_M - \Delta V_M) \end{aligned} \quad (3.3)$$

当重离子入射 P₂ 的灵敏区时，由于左侧反相器的开关阈值降低了 ΔV_M ，离子入射产生的正的脉冲更容易使左侧反相器的状态发生翻转。而当重离子入射 N₁ 的灵敏区时，情况比较复杂。一方面，由于漏电流的影响，相较于未辐照器件，Q 节点的电势已经降低了 ΔV_Q 。此时若有重离子入射 N₁ 的灵敏区，Q 节点的电势下降将更为严重。另一方面， γ 射线辐照过后，右侧反向器的开关阈值降低了 ΔV_M ，更难以由输入端为高电压、输出端为零电压的状态转换为输入端为零电压、输出端为高电压的状态。重离子入射 N₁ 的灵敏区时，存储状态究竟是更容易翻

转还是更难翻转, 取决于 ΔV_Q 与 ΔV_M 的大小。从实验结果来看, 综合考虑重离子入射 N_1 灵敏区与 P_2 灵敏区两种情况, 存储单元的 SEU 敏感性增大了。6-T 单元中存储数据为“0”时, 也是同理。

在对器件进行重离子辐照测试时, 预辐照剂量为 200 至 400 krad(Si)的 CY7C1019D 器件的静态功耗电流值已经与辐照前没有明显差别。这说明在这些器件中, 总剂量效应在 STI 中产生陷阱正电荷已经充分退火, 存储单元中晶体管电学参数的改变也已恢复到正常值。因此, 器件的 SEU 截面与未经过 γ 射线辐照的器件并无区别。而预辐照剂量为 500 krad(Si)的 CY7C1019D 器件与预辐照剂量为 600 krad(Si)的 CY7C1318KV18 器件并未完全退火, 因此, 这些器件的 SEU 截面要明显大于未进行 γ 射线辐照的器件。由于重离子束流时间紧张的原因, CY7C1318KV18 器件只进行了一组对照实验。从有限的实验数据中可以看出, 尽管工艺尺寸不同, 但 TID 对 Cypress 公司生产的这两款商用 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响规律是一致的。

3.4 LET 值对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响

3.4.1 实验条件

实验采用 HIRFL 提供的 ^{28}Si 、 ^{40}Ar 、 ^{86}Kr 、 ^{129}Xe 、 ^{181}Ta 和 ^{209}Bi 六种重离子, 在 $1.44 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 到 $99.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的宽 LET 值范围内, 对器件进行了 SEU 敏感性测试。实验在室温、大气环境下进行。实验研究对象为预辐照 600 krad(Si) γ 射线的 CY7C1019D 器件, 以及未进行总剂量辐照的全新 CY7C1019D 器件。实验选用的重离子具体参数如表 3.4 所示。

实验前, CY7C1019D 器件中写入 55H 数据图形。重离子辐照过程中, 采用动态测试模式, 重离子束流垂直入射到器件中。每一轮测试中, 在计算机累积报告超过 1000 个错误后停止测试。实验过程中, 入射重离子注量率约为 $100 \text{ ions}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 到 $1000 \text{ ions}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 。实时监测器件的功耗电流, 以确保器件处于正常工作状态。

表 3.4 SRAM 实验选用重离子参数

离子种类	初始能量 /(MeV/u)	铝箔厚度 / μm	空气层厚度 /mm	Si 中射程 / μm	LET 值 /MeV $\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$
^{28}Si	76	200	40	3425.8	1.44
		2000	40	1399.7	2.16
		2500	40	825.3	2.76
		3000	40	259.1	4.58
^{40}Ar	6.75	0	20	34.07	16.05
^{86}Kr	25	0	40	268.7	20.65
		120	50	92.4	29.05
		180	50	58.5	37.62
^{129}Xe	19.5	0	50	54.1	67.1
^{181}Ta	12.5	0	30	83.3	81.4
^{209}Bi	9.5	0	30	53.7	99.8

实验结束后,利用 Weibull 方程对不同 LET 值下 CY7C1019D 器件的 SEU 截面进行拟合可以得到器件发生 SEU 的 LET 阈值和 SEU 饱和截面, Weibull 方程如下所示^[119]:

$$\sigma_{\text{SEU}} = \begin{cases} \sigma_{\text{sat}} \left[1 - \exp \left\{ - \left(\frac{\text{LET} - \text{LET}_{\text{th}}}{W} \right)^s \right\} \right], & \text{LET} > \text{LET}_{\text{th}} \\ 0, & \text{LET} \leq \text{LET}_{\text{th}} \end{cases} \quad (3.4)$$

其中, σ_{SEU} 为单粒子翻转截面, σ_{sat} 为单粒子翻转饱和截面, LET 为入射重离子的线性能量转移值, LET_{th} 为器件发生单粒子翻转的 LET 阈值, W 为宽度参数, s 为形状参数。

3.4.2 实验结果

在不同 LET 值的重离子入射条件下, CY7C1019D 器件的 SEU 截面如图 3.12 所示。由图可知, 在低 LET 值时, CY7C1019D 器件的 SEU 截面随入射重离子 LET 值的增加迅速增大。而当入射重离子 LET 值大于 $20 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, SEU 截面随 LET 值的增长趋势变缓。 γ 射线辐照前, 该型号 SRAM 器件发生 SEU 的 LET 阈值约为 $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, SEU 饱和截面约为 $9.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。 γ 射线辐照过后, 器件的 LET 阈值仍为 $0.5 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 没有明显改变。而器件的 SEU

饱和截面增长到 $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ ，增长了约 44%。

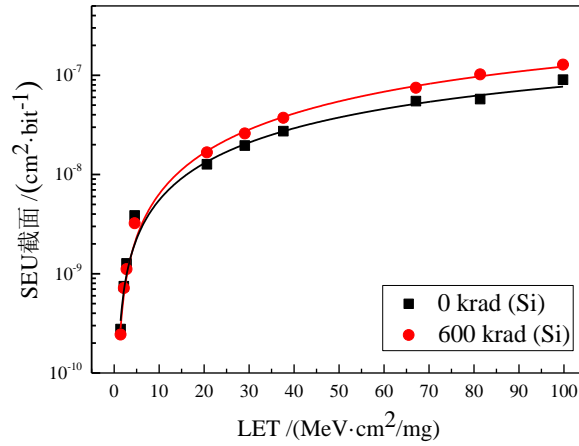


图 3.12 γ 射线辐照前后，CY7C1019D 器件的 SBU 截面随 LET 值的变化。

3.4.3 分析讨论

SRAM 器件的 SEU 饱和截面和 LET 阈值是评估器件抗单粒子翻转能力的重要参数。入射重离子的 LET 值指的是重离子在单位长度的被辐照材料内沉积能量的大小。入射重离子的 LET 值越大，在单位长度内沉积的能量越多，电离产生的电荷也就越多，器件灵敏节点收集的电荷数就更容易达到发生 SEU 所需的临界电荷，器件也就更容易发生 SEU。因此，随着入射重离子 LET 值的增大，器件的 SEU 截面也随之增大。由图 3.12 可以看出，在 LET 值增大到 $99.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 后，器件的 SEU 截面仍有继续增大的趋势，这可能是由高 LET 值重离子引起的多位翻转的比例增加所导致的，我们将在下一节对重离子引起的多位翻转进行详细介绍。

文章第 3.3 节已经讨论过， γ 射线辐照过后，CY7C1019D 器件的抗单粒子翻转能力减弱，发生 SEU 所需的临界电荷减小。因此，在 γ 射线辐照过后，CY7C1019D 器件的 SEU 饱和截面有了明显增大。与 SEU 饱和截面相比， γ 射线辐照对 SRAM 器件 LET 阈值的影响似乎并不明显。有研究表明，在 $0.25 \mu\text{m}$ 器件中，总剂量辐照过后，SEU 截面增长了 1 到 2 个量级，然而 LET 阈值的变化非常小^[96]。在本实验中，总剂量对纳米 SRAM 器件 SEU 饱和截面的影响不到 50%，对 LET 阈值的影响更是可以忽略不计。

3.5 γ 射线辐照对 SRAM 器件多位翻转的影响

3.5.1 实验条件

实验采用 HIRFL 提供的 ^{28}Si 、 ^{86}Kr 、 ^{129}Xe 、 ^{181}Ta 和 ^{209}Bi 五种重离子, 在 $1.44 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 到 $99.8 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 的宽 LET 值范围内, 对待测器件进行了单粒子翻转测试, 统计翻转错误中单位翻转 (SBU) 和多位翻转 (MBU) 的比例。实验在室温、大气环境下进行。实验研究对象为预辐照 $600 \text{ krad}(\text{Si})$ γ 射线的 CY7C1019D 器件, 以及未进行总剂量辐照的全新 CY7C1019D 器件。实验选用的重离子具体参数如表 3.4 所示。

实验前, CY7C1019D 器件中写入 55H 数据图形。重离子辐照过程中, 采用动态测模式, 重离子束流垂直入射到器件中, 计算机累积报告超过 1000 个错误后停止测试。实验过程中, 实时监测器件的功耗电流。

一个入射离子引起的多个位错误可能发生在一个字中, 也可能发生在多个字中, 本文中将这两种情况统一定义为 MBU。MBU 截面有两种计算方法, 一种计算方法将同一个重离子引起的 n 个位错误看作 n 个错误事件, 计算得出的错误截面称为 U 型 MBU 截面。另一种计算方法将同一个重离子引起的 n 个位错误看作 1 个错误事件, 计算得出的错误截面称为 E 型 MBU 截面。具体计算方法如下所示^[79]:

$$\sigma_U = \sum_{i=1}^n \frac{i \times N_i}{\Phi \cdot M} \quad (3.5)$$

$$\sigma_E = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\Phi \cdot M} \quad (3.6)$$

其中, i 为每个重离子引起的翻转位数, N_i 为引起 i 位翻转的重离子入射事件数, Φ 为入射重离子总注量, M 为待测芯片的容量, 由于重离子垂直入射到待测器件中, 公式(3.5)和(3.6)中省略掉了和 $\cos \theta$ 有关的项。

3.5.2 实验结果

在不同的 LET 值下, 重离子在待测 CY7C1019D 器件中引起的翻转错误中 SBU 与 U 型 MBU 的比例如图 3.13 所示。对于未辐照过总剂量的 CY7C1019D 器件, 在 LET 值为 $1.44 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 单粒子翻转错误中超过 99% 的错误是

SBU, U 型 MBU 的比例不足 1%。随着 LET 值的增大, U 型 MBU 所占错误的比例显著增大。在利用 LET 值最高的 ^{209}Bi 测试时, 几乎所有的错误都是 U 型 MBU, 仅有不足 1% 的错误为 SBU。辐照过 γ 射线的 CY7C1019D 器件中, U 型 MBU 比例随入射重离子 LET 值的变化趋势与未辐照器件是一致的。并且, 在相同 LET 值的条件下, 相较于未辐照器件, 预辐照 600 krad(Si) 总剂量的器件中 U 型 MBU 所占错误的比例增大了 0.5% 到 22%。

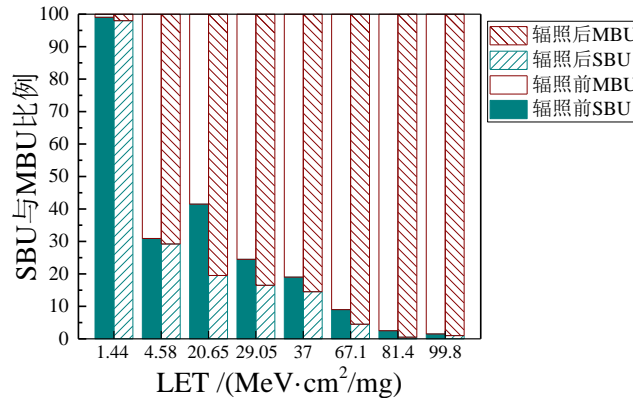


图 3.13 γ 射线辐照前后, 不同 LET 之下, CY7C1019D 器件中 SBU 与 U 型 MBU 所占错误的比例。

在不同 LET 值下, CY7C1019D 器件中 E 型 MBU 与 SBU 的比例如图 3.14 所示。重离子引起的 E 型 MBU 的比例随 LET 值的变化关系与 U 型 MBU 相似, 在 LET 值为 $1.44 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时, 几乎没有 E 型 MBU 发生。随着 LET 值的增大, E 型 MBU 的比例迅速增大。当 LET 值增大到 $81.4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 及以上时, E 型 MBU 占全部错误的比例超过 90%。在经过 600 krad(Si) 的 γ 射线辐照后, 在不同的 LET 值下, CY7C1019D 器件中 E 型 MBU 的比例增长了约 0.1% 到 23.9%。

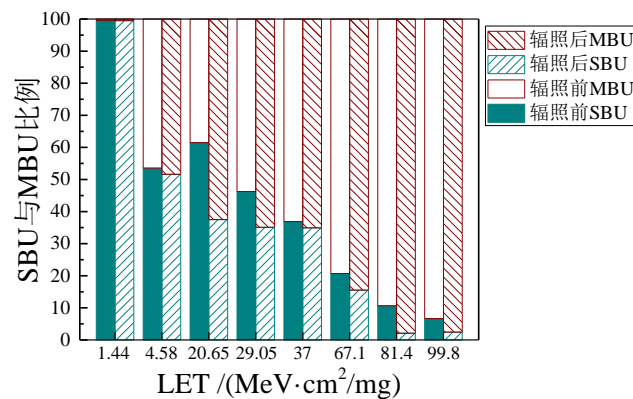


图 3.14 γ 射线辐照前后, 不同 LET 之下, CY7C1019D 器件中 SBU 与 E 型 MBU 所占错误的比例。

3.5.3 分析讨论

随着 CMOS 工艺发展,晶体管特征尺寸减小到纳米尺度。在 90 nm 工艺下,SRAM 器件的集成度比较高,存储单元与存储单元之间的距离非常近。入射重离子电离产生的电荷沿离子径迹的分布范围可以覆盖多个存储单元,引发多位翻转。随着入射重离子 LET 值的增大,电离产生的电荷密度更大,电荷的分布范围也有所变化。临近重离子入射径迹的存储单元更容易收集到足够的电荷,发生多位翻转。因此,无论使用何种计算方法,错误中 MBU 的比例都是随着入射重离子 LET 值的增大而增大的。假设在 CY7C1019D 器件中,存储阵列的面积为芯片总面积的 70%,芯片的总容量为 1 Mbit,则每个存储单元所占的面积约为 $1.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。根据本文 3.4 节的数据,在 LET 值为 $99.8 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的 ^{209}Bi 离子入射条件下,未经 γ 射线辐照的器件的 SEU 饱和截面为 $9.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$,远大于 1 个存储单元的面积。在 γ 射线辐照后,器件的 SEU 饱和截面增长到 $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 。在高 LET 值重离子入射时,器件中多位翻转比例的迅速增大是导致 SEU 饱和截面大于 1 个存储单元面积的原因。

对于预辐照过总剂量的 CY7C1019D 器件,由于总剂量效应产生的辐照损伤,存储单元发生翻转所需的临界电荷值减小。理论上来说,在相同 LET 值重离子入射条件下,预辐照过 γ 射线的器件更容易发生多位翻转。本文的实验结果也支持这一观点,在 γ 射线辐照后,在不同的 LET 值重离子入射条件下,器件的 U 型 MBU 比例增长了 0.5%到 22%,E 型 MBU 比例增长了 0.1%到 23.9%。

3.6 小结

利用 γ 射线以及多种重离子对 90 nm 与 65 nm 两款商用 SRAM 器件进行了辐照测试,研究了 γ 射线累积剂量、重离子辐照参数以及测试模式对 SRAM 器件 SEU 敏感性的影响。实验结果表明: γ 射线辐照导致 SRAM 器件静态功耗电流的增大,但未导致存储数据错误; γ 射线辐照后,两款器件的 SEU 截面明显增大,MBU 的比例有所增加,累积剂量越高,SEU 截面的变化越显著; γ 射线辐照对 SRAM 器件的 LET 阈值没有明显影响,但辐照后器件的饱和截面明显变大;数据图形对 TID 与 SEU 的协同效应没有明显影响,未发现“印记效应”。分析认为,在纳米 SRAM 器件中,在预辐照总剂量达到 600 krad(Si)的前提下,不

同偏置状态的晶体管中产生的辐照损伤程度是相近的；在总剂量辐照引起的存储单元中 NMOS 管关态漏电流增大与反相器开关阈值减小的共同作用下，写入不同数据图形的 SRAM 器件的 SEU 敏感性均增大。

第 4 章 FRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究

4.1 γ 射线辐照对 FRAM 器件性能参数的影响

4.1.1 实验设计

利用 γ 射线在室温、大气环境下对 FM22L16 器件进行辐照实验。总剂量实验中，所有剂量点均采用未辐照过的全新器件进行辐照。辐照前，FM22L16 器件中写入 16 进制数据 55H。辐照过程中，器件被设置为静态模式与不加电模式两种偏置模式。静态模式，即保持器件上电，但不对器件进行读写操作。不加电模式，即器件中写入 55H 数据图形后，断开电源，然后进行辐照。共有 7 组 FRAM 器件进行不同偏置模式，不同剂量的 γ 射线辐照，辐照剂量率为 200 rad(Si)/s。具体辐照参数如表 4.1 所示。

表 4.1 FRAM 器件 γ 射线辐照参数

器件编号	累积剂量 /krad(Si)	偏置模式	数据图形
#1	60	静态	55H
#2	120	静态	55H
#3	180	静态	55H
#4	60	不加电	55H
#5	120	不加电	55H
#6	180	不加电	55H
#7	3000	不加电	55H

对于采用静态模式的 FRAM 器件，总剂量辐照子版放置在钴源辐照大厅内，通过线缆与辐照大厅外的程控电源以及计算机连接。辐照过程中，实时监测被辐照器件的静态功耗电流变化。对于采用不加电模式的器件，辐照过程中，不与电源连接。辐照结束后，对所有器件进行功能测试，检测器件中是否有数据错误发生以及器件读写功能是否正常，每隔一段时间测试器件的静态功耗电流变化。

4.1.2 实验结果

γ 射线辐照过程中，对累积剂量分别为 60、120、180 krad(Si)，偏置模式为静态模式的 FM22L16 器件的静态功耗电流进行了实时监测，被测器件的静态功耗电流随累积剂量的变化如图 4.1 所示。未辐照时，器件的静态功耗电流约为 0.05

mA。在累积剂量达到 50 krad(Si)后, 静态功耗电流开始迅速增长。在辐照完成时, 累积剂量为 60 krad(Si)的器件的静态功耗电流为 0.21 mA, 约为初始值的 4.2 倍。累积剂量为 120 krad(Si)的器件的静态功耗电流为 3.53 mA, 约为初始值的 70 倍。累积剂量为 180 krad(Si)的器件的静态功耗电流为 9.00 mA, 约为初始值的 180 倍。总剂量辐照期间, 偏置模式为不加电模式的器件, 在辐照结束后, 静电功耗电流与辐照前并无明显差异。

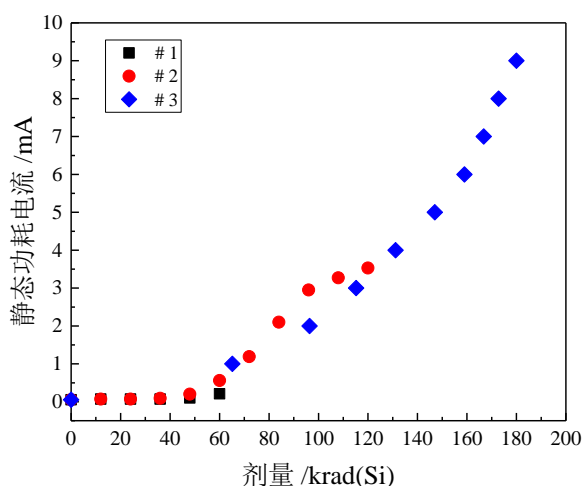


图 4.1 FM22L16 器件静态功耗电流随累积剂量的变化曲线, 辐照过程中, 器件处于静态模式, 写入数据为 55H。

辐照结束后, 对所有器件进行数据读出和功能测试。结果显示, 所有被辐照 FM22L16 器件中均未出现数据错误, 仍保持读写功能正常。

与 SRAM 器件一样, 在总剂量辐照结束后的前 24 小时, 器件在室温条件下保存, 而后保存在 -80°C 低温环境中。FM22L16 器件的退火情况如图 4.2 所示。由图可以看出, FRAM 器件的退火趋势与 SRAM 器件类似, 在辐照结束后的前 24 小时, 器件的退火非常迅速, 随后退火速度减慢。辐照结束 50 小时后, 器件的静态功耗电流变化不再明显。在经过约 50 小时的退火后, 辐照总剂量为 60 krad(Si)的器件的静态功耗电流约为 0.06 mA, 已经十分接近辐照前的初始值 0.05 mA。辐照总剂量为 120 krad(Si)的器件的静态功耗电流约为 0.17 mA, 约为辐照前的 3.4 倍。辐照总剂量为 180 krad(Si)的器件的静态功耗电流约为 0.23 mA, 约为辐照前的 4.6 倍。

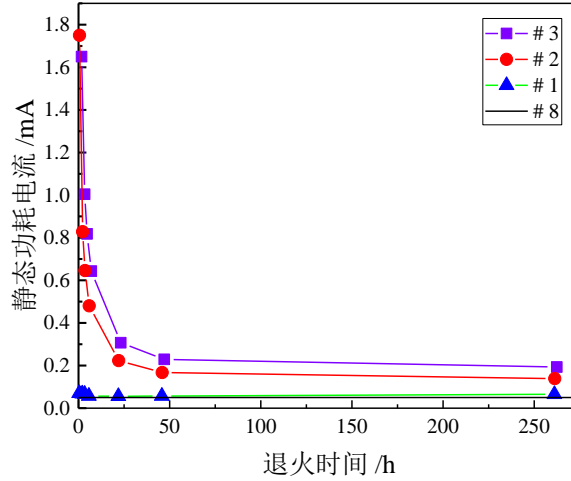


图 4.2 辐照结束后, FM22L16 器件的静态功耗电流随时间的变化曲线, 前 24 小时在室温下退火, 随后放置在 -80℃ 环境下, 其中 #8 器件为未辐照过 γ 射线的全新器件。

4.1.3 分析讨论

FRAM 器件可以大致分为存储阵列和外围电路两部分。每一个存储单元由两个 NMOS 管和两个铁电电容组成。在 130 nm CMOS 工艺下, 晶体管的栅氧层非常薄, 总剂量效应对栅氧层的影响可以忽略^[120]。文章第 3.1 节已讨论过, 对于 NMOS 管来说, 总剂量辐照在晶体管 STI 区域产生陷阱正电荷, 导致晶体管阈值电压减小和关态漏电流增大。在 γ 射线辐照下, SiO_2 中电子-空穴对的产生率可以用如下公式表示^[121]:

$$G_R = G - R = Dg_0Y(E) \quad (4.1)$$

其中, G_R 为电子-空穴对的净产生率, G 是电子-空穴对的产生率, R 为电子-空穴对的复合率, D 为 γ 射线的剂量率, g_0 为电子-空穴对的初始产生率, $Y(E)$ 为与电场相关的项, SiO_2 中的电场越强, $Y(E)$ 的值越趋近于 1。

在 FRAM 器件的存储单元中, 一个 NMOS 管与一个铁电电容组成由位线 (BL) 到板线 (PL) 的漏电通道, 如图 4.3 所示。在 γ 射线辐照期间, FRAM 器件被设置为静态模式。在静态模式下, 存储单元中的字线 (WL) 与板线未被选中, 电势为零。NMOS 管内没有额外的附加电场, 总剂量辐照在 STI 中产生的电子-空穴对的复合率比较高。除非 γ 射线累积剂量足够高, 否则 NMOS 管内的漏电流增长不会太过明显。而对于铁电电容来说, 在低电场下, 产生漏电的主要方式是肖特基光发射, 总剂量辐照导致的漏电流的变化微乎其微^[122]。 γ 射线辐照后, 存

储单元漏电流的变化对 FRAM 器件静态功耗电流的增长几乎没有贡献。

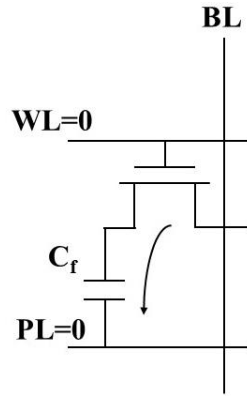


图 4.3 存储单元内的漏电通道

对于外围 CMOS 电路来说，CMOS 反相器是最基本的组成单元，反相器结构如图 4.4 所示。 γ 射线辐照后，STI 中累积的陷阱正电荷导致 NMOS 管的关态漏电流增大。若反相器处于如图 4.4 所示的偏置状态，即输入电压为零，输出电压为 V_{DD} ，则处于闭态的 NMOS 管与处于开态的 PMOS 管组成由电源到地的漏电通道。 γ 射线辐照在外围 CMOS 电路中产生的漏电流的增长被认为是 FRAM 器件静态功耗电流增大的主要原因。

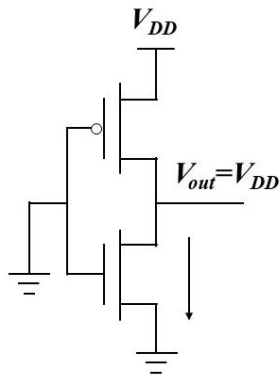


图 4.4 CMOS 反相器内的漏电通道

4.2 重离子引起的 FRAM 器件中的错误类型

4.2.1 实验条件

实验采用 HIRFL 提供的 ^{40}Ar 离子和 ^{209}Bi 离子，在室温、大气环境下进行辐照实验。实验前，待测 FRAM 器件中写入 55H 数据图形。具体的重离子辐照设

置如表 4.2 所示，其中，未辐照过 γ 射线的全新器件被编号为#8。重离子辐照过程中，共采用三种测试模式：动态模式、静态模式以及不加电模式，重离子束流垂直入射到器件之中，三种测试模式的详细测试流程如图 4.5 所示。

表 4.2 FRAM 器件重离子辐照参数。

器件编号	测试模式	数据图形	离子种类
#1	动态模式	55H	^{209}Bi
	静态模式	55H	^{209}Bi
	不加电模式	55H	^{209}Bi
#8	动态模式	55H	^{209}Bi
	静态模式	55H	^{209}Bi
	不加电模式	55H	^{40}Ar

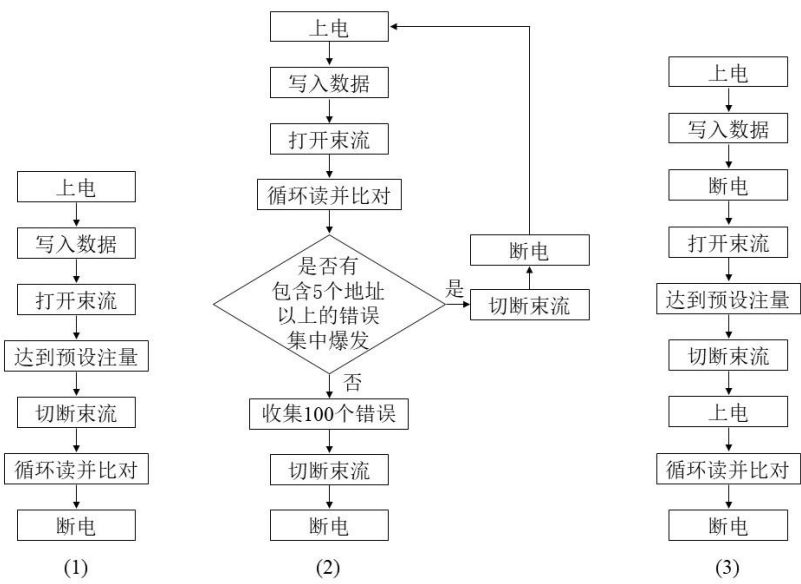


图 4.5 FM22L16 单粒子效应测试流程，(1)静态模式，(2)动态测试，(3)不加电模式。

在动态模式下，重离子辐照过程中测试系统对 FRAM 器件进行循环读操作。计算机实时显示并记录测试系统报告的错误地址、错误数据、错误数等信息。实时调节入射重离子注量率，尽可能减少大规模错误集中爆发事件的发生。在测试过程中，若有包含超过 5 个地址的错误集中爆发，则切断束流，断开测试系统电源，然后重新开始测试。每一轮测试收集至少 100 个错误，然后停止辐照。动态测试过程中，实时监测器件的功耗电流，以确保器件处于正常工作状态。

在静态模式下，重离子辐照过程中 FRAM 器件保持上电，但不对其进行读写操作。当累积重离子注量达到预设总注量时，停止辐照，读出器件中的数据，并与预存在测试系统中的初始数据进行比较，记录错误信息。

在不加电模式下, FRAM 器件中写入预设数据图形, 然后切断电源, 开始重离子辐照。当累积重离子注量达到预设总注量时, 停止辐照, 测试系统重新上电, 读出器件中的数据, 并与预存在测试系统中的初始数据进行比较, 记录错误信息。

4.2.2 实验结果

FM22L16 器件存储容量为 4 Mbit, 存储阵列被分成 8 个块, 每个块的逻辑地址范围如表 4.3 所示。

表 4.3 FM22L16 器件的逻辑地址

Block 编号	地址范围
Block 0	00000h – 07FFFh
Block 1	08000h – 0FFFFh
Block 2	10000h – 17FFFh
Block 3	18000h – 1FFFFh
Block 4	20000h – 27FFFh
Block 5	28000h – 2FFFFh
Block 6	30000h – 37FFFh
Block 7	38000h – 3FFFFh

由图 2.11 可知, FM22L16 器件共有 16 个行译码器(A2-A17), 2 个列译码器(A0-A1), 每个地址存储 16 位数据。为了更直观的分析待测器件中的错误类型与规律, 根据数据的逻辑地址, 将 4 Mbit 存储容量整理成逻辑位图(Logical bitmap)。逻辑位图的每一层由 4 个字组成, 共 64 位数据, 即逻辑位图有 64 列。例如, 最顶层数据的地址为 00000h – 00003h, 第二层为 00004h – 00007h, 以此类推。逻辑位图最左侧一列分别为 00000h、00004h, ……, 3FFFCh, 共有 65536 列。逻辑位图中的每个数据点代表器件中相对应的一个存储单元, 若该存储单元发生错误, 则在逻辑位图中用彩色数据点显示, 若没有发生错误, 则该数据点不上色。通过逻辑位图, 可以对错误与错误之间的关联进行分析, 有助于分析 FRAM 器件中单粒子事件的规律与物理机理。

在重离子辐照测试结束后, 对辐照过程中不加电的器件进行数据读出, 并与初始数据比较, 没有观察到数据错误。而在静态模式与动态模式测试的器件中, 观察到多种类型的错误。根据错误的特征不同, 将观察到的错误分为以下五种类型:

- (1) 单位翻转错误。测试系统报告的独立的错误, 只有某一个字中的一位数

据发生错误，如图 4.6 所示。

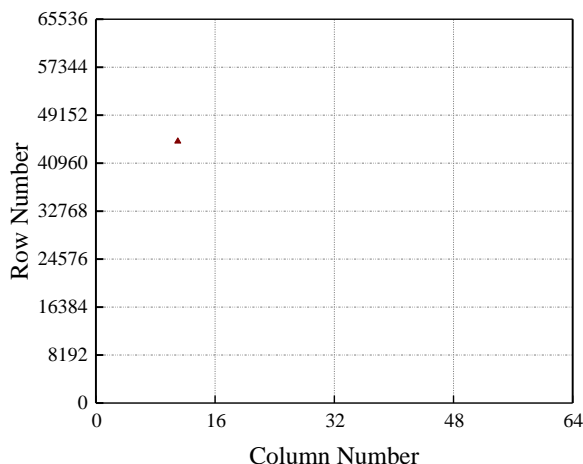


图 4.6 重离子辐照后，第一种错误类型的逻辑位图。

(2) 多位翻转错误。一个字中的多位数据发生了错误。每个错误涉及的数据位数是随机的，每一位的错误数据也不尽相同。一个字中的 16 位数据有可能全部发生翻转，也有可能是部分发生翻转，如图 4.7 所示。

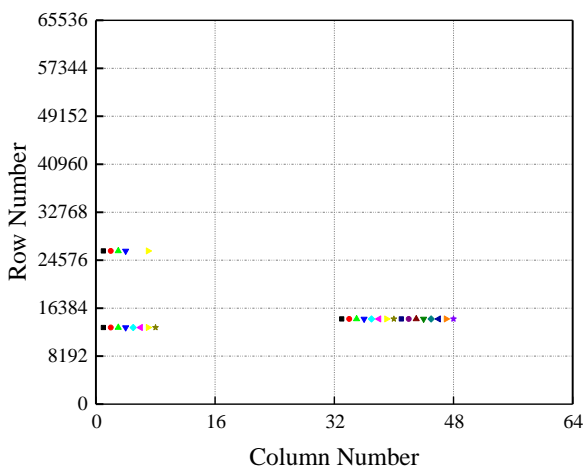


图 4.7 重离子辐照后，第二种错误类型的逻辑位图。

(3) 位于逻辑位图上相同行或相同列的错误，如图 4.8 所示。在逻辑位图的某一行，有连续的两个或三个字都发生错误，每个字中的错误位数以及错误数据都是随机的，该类型错误称为 3a 型错误；在逻辑位图的某一列，有两个或三个字都发生错误，每个字中的错误位数以及错误数据都是随机的，该类型错误称为 3b 型错误。3a 型错误的地址是连续的，而 3b 型错误的地址中间某一位相差“1”，如错误地址 3A6E0h、3B6E0h。

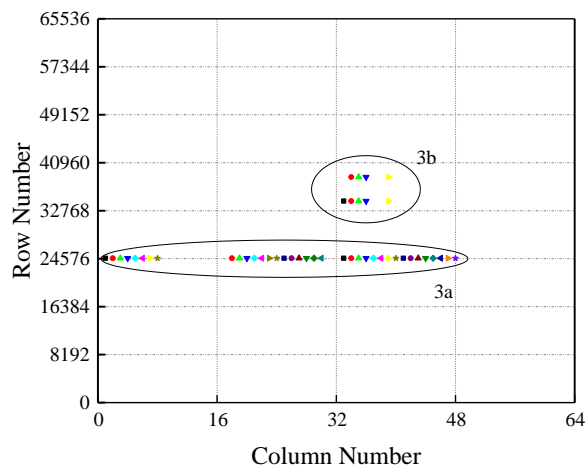


图 4.8 重离子辐照后，第三种错误类型的逻辑位图。

(4) 逻辑位图上特定的几列数据连续发生错误，如图 4.9 所示。该类型错误的开始地址是随机的，并且错误地址是连续的。该类型错误有时连续爆发几百个或者上千个错误后，FRAM 器件会自动恢复正常工作，有时需断电重启才能恢复正常。

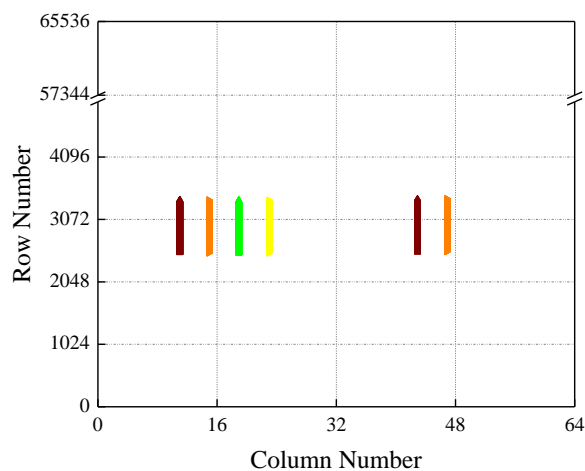


图 4.9 重离子辐照后，第四种错误类型的逻辑位图。

(5) 逻辑位图上特定的几列数据间隔发生错误，如图 4.10 所示。该类型错误的开始地址是随机的，但错误地址并不是连续的。该类型错误发生时，FRAM 器件需断电重启才能恢复正常。

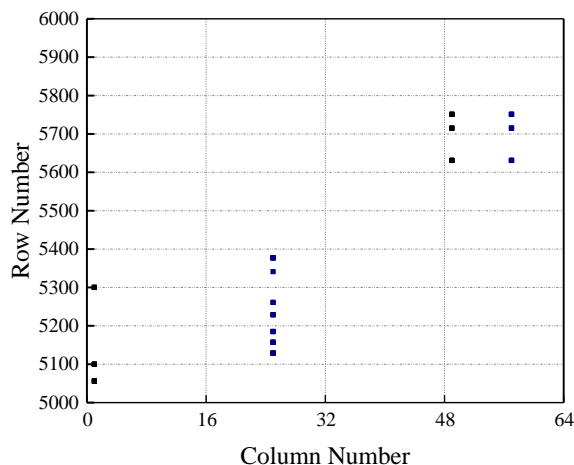


图 4.10 重离子辐照后，发生第五种错误类型的逻辑位图。

其中，第 1 类和第 2 类错误，在静态与动态模式重离子辐照实验中，均有发生，而第 3 类、第 4 类和第 5 类错误只在动态单粒子效应测试过程中有观察到。在静态模式测试中，若重离子辐照完成后立即对器件进行数据读取并与初始数据进行比较，可以在第一个读周期内观测到如上所述的第 1 类和第 2 类错误，之后的读过程中不会再有错误发生。若在重离子辐照完成后，先对器件进行断电，而后再重新上电读取器件中的数据并与初始数据比较，没有观察到错误发生。

4.2.3 分析讨论

在不加电模式的重离子单粒子效应测试中，外围 CMOS 电路中不会发生错误。在这种模式下，实验中并未观察到错误发生。因此，可以认为重离子入射不会导致铁电电容的极化状态发生改变，在静态和动态模式中观察到的错误发生在外围 CMOS 电路中。

第 1 种和第 2 种类型的错误在静态与动态重离子辐照测试过程中均有发生。在静态模式测试中，所有的错误事件均为第 1 种和第 2 中类型的错误。在静态模式重离子辐照结束后，对器件进行循环读并与初始数据进行比较。所有错误事件都是在第一个读周期中被测试系统报告的，当第一个读周期结束以后，所有的错误都消失了。并且，若在重离子辐照结束以后，对器件进行断电，然后再重新上电比对数据，没有观察到错误发生。以上实验现象说明，第 1 种和第 2 种类型的错误可以被器件的断电重启或读过程之后的自动回写操作消除。这两种类型的错误事件可能是由外围电路中基于 SRAM 的冗余寄存器中发生的错误引起的^[123]。

入射重离子引起冗余寄存器中的数据发生翻转,器件没有能够从预期的地址中读取正确的数据。在断电重启或者一个读周期结束之后,冗余寄存器中的数据会被重置,重新加载正确的数据。因此,在此之后对器件进行数据读出时,并不会检测到错误。

第 3 种、第 4 种和第 5 种类型的错误只发生在动态模式重离子单粒子效应测试过程中。3a 类型的错误位于逻辑位图上同一行的连续两个到三个地址中,但该行中并非所有地址位均有错误发生。3b 类型的错误位于逻辑位图上的同一列,错误数据的位置在该列上并不是连续的。3a 与 3b 类型的错误在逻辑位图上有一定的规律,但又并非整行或整列连续出现错误,有可能是由于地址译码器的部分失效引起的。第 4 种类型错误发生时,某一列的数据连续发生错误。该类型错误可能是由重离子入射导致的列地址寄存器失效引起的,在读过程中,某一列的数据被列译码器错误的指向另一列,导致逻辑位图上某一列的数据连续出错^[123124]。第 5 种类型的错误与第 4 种类似,错误发生在逻辑位图的特定列上,错误之间并不是连续的,且该种类型的错误只有在器件断电重置后才会停止报错。这种类型的错误的产生原因有可能与第 4 种类型的错误类似,也有可能是由重离子入射导致的锁存器错误,进而引起器件发生了单粒子功能中断(SEFI)^[123125]。

4.3 γ 射线辐照对 FRAM 器件动态单粒子事件敏感性的影响

4.3.1 实验条件

实验使用 HIRFL 提供的 ^{209}Bi 离子,在室温、大气环境下进行辐照实验。实验的研究对象为在静态偏置和不加偏置条件下辐照不同剂量 γ 射线的#1、#2、#3、#4、#5、#6、#7 芯片,以及未进行 γ 射线辐照的#8 芯片。具体的实验参数如表 4.4 所示。

实验前,待测器件中写入 55H 或 AAH 两种数据图形。重离子辐照过程中,采用动态单粒子效应测试模式,重离子束流垂直入射到器件中,测试系统对器件进行循环读操作。实时调节入射重离子注量率,尽量使器件保持每几秒钟报错一次的报错频率,并尽可能减少大规模的错误集中爆发事件的发生。在测试过程中,若有包含超过 5 个地址的错误集中爆发,则切断束流,断开测试系统电源,然后重新开始测试。计算机实时显示并记录测试系统报告的错误地址、错误数据、错

误数等信息。每一轮测试在收集至少 100 个错误后停止。

表 4.4 动态测试中, FRAM 器件重离子辐照参数。

器件编号	测试模式	数据图形	离子种类	注量率/(ions/cm ² ·s)
#1	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	500
#2	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	1000
#3	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	1500
#4	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	800
		AAH	²⁰⁹ Bi	800
#5	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	1000
		AAH	²⁰⁹ Bi	1000
#6	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	600
		AAH	²⁰⁹ Bi	500
#8	动态模式	55H	²⁰⁹ Bi	500
		AAH	²⁰⁹ Bi	500

4.3.2 实验结果

在动态重离子单粒子效应测试过程中, 如有第 4 种或第 5 种类型的错误发生, 则切断束流和电源, 重新开启测试。因此, 本节中进行单粒子事件截面的计算时, 只包含第 1 种、第 2 种以及第 3 种类型的错误数据。并且, 将每一种类型的错误作为 1 个事件, 计算单粒子事件截面。比如器件中发生了一次 3a 型错误, 该错误包含 3 个连续的地址, 在测试系统生成的报告中自动将此次事件作为 3 个错误事件进行记录。在随后的动态单粒子事件截面的计算过程中, 该 3a 型错误中所包含的 3 个错误将作为一个错误事件进行计算。

未辐照 γ 射线的器件和以不同偏置模式预辐照不同剂量的 FM22L16 器件的动态单粒子事件截面如图 4.11 所示。未进行 γ 射线辐照的器件的单粒子事件截面约为 $1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{device}$, γ 射线辐照过后, 器件的单粒子事件截面明显减小。并且, γ 射线辐照剂量越高, 单粒子事件截面下降越明显。经过 120 krad(Si) γ 射线辐照后, 辐照期间处于静态偏置的器件的单粒子事件截面减小为 $4.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$, 减小了 74.5%。辐照期间不加偏置的器件的单粒子事件截面减小为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$ 到 $9.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$ 左右, 减小了约 42.2%到 53.4%。此外, 总剂量辐照期间施加静态偏置的器件比不加偏置的器件的单粒子事件截面下降得更为明显, γ 射线辐照与单粒子效应测试期间写入不同的数据图形对单粒子事件截面没有明显影响。

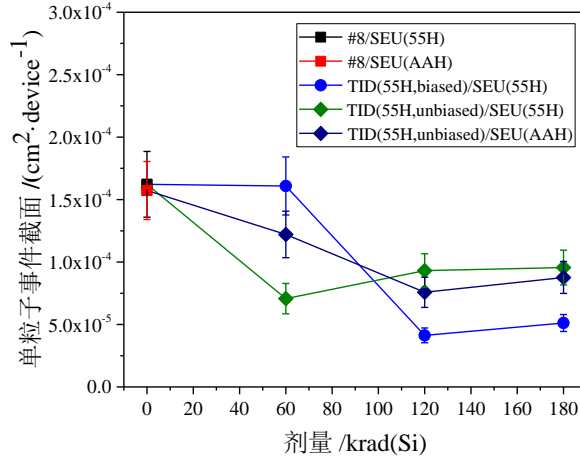


图 4.11 不同累积剂量下，器件的动态单粒子事件截面

对图 4.11 中所包含的错误事件的类型进行统计，结果如图 4.12 所示。可以看出，最常见的错误事件类型为第 3 类错误，发生频率最低的错误事件类型为第 1 类错误。在每一轮动态重离子辐照测试中，第 1 类错误的比例小于 17%，第 2 类错误的比例在 10%到 39%之间，第 3 类错误的比例超过 59%。

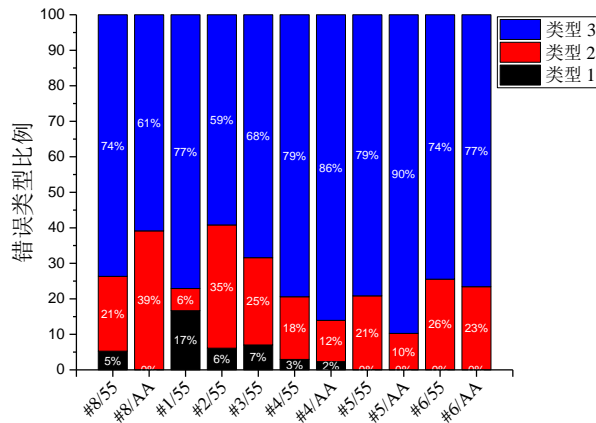


图 4.12 动态模式下，不同类型错误事件的比例。

4.3.3 分析讨论

本实验中，在不加电模式下对 FRAM 器件进行重离子辐照测试时，FRAM 器件中并未有错误发生。因此，可以推断错误发生在外围 CMOS 电路。如前文所说，总剂量效应对纳米 CMOS 器件的主要影响是导致晶体管阈值电压和关态漏电流的变化。在总剂量辐照实验中，静态偏置的器件的静态功耗电流有大幅升高，不加偏置的器件的静态功耗电流无明显变化。然而在随后的重离子单粒子效

应测试中，二者的动态单粒子事件截面都有明显的下降。据此，我们推断总剂量辐照产生的晶体管阈值电压的漂移是导致 FRAM 器件动态单粒子事件敏感性下降的主要原因。在深亚微米以及纳米器件中已被证明，若累积剂量足够高，总剂量辐照期间不加偏置的 NMOS 管也可以产生一定程度的阈值电压漂移^[118]。对于处于开态的晶体管来说，正栅压会在 STI 中引入一个附加电场。由公式 3.2 可知，总剂量辐照期间处于开态的晶体管中电子-空穴的净产生率更高，辐照损伤更为严重。因此，相较于不加偏置的器件，总剂量辐照期间施加静态偏置的 FRAM 器件的单粒子事件截面的下降趋势更加明显。由于重离子辐照产生的错误发生在外围 CMOS 电路而不是存储单元之中，写入数据图形的不同对单粒子与总剂量之间的协同效应没有产生影响。

FRAM 器件的外围 CMOS 电路是非常复杂的。在没有外围电路的详细结构信息的前提下，要分析重离子辐照在其中产生错误的物理机理，很难得出确切的结论。众所周知，CMOS 反相器是数字设计的核心^[33]。基于以下对于 CMOS 反相器在 γ 射线辐照过程中产生的性能变化分析，我们尝试提出一种关于 γ 射线辐照导致 FRAM 器件单粒子事件截面下降的猜想。CMOS 反相器的结构如图 4.13 所示。 γ 射线辐照过后，CMOS 反相器中 NMOS 管的阈值电压减小，PMOS 管的阈值电压增大，NMOS 管更难以由导通状态转换为关断状态，PMOS 管更难以从关断状态转换为导通状态，反向的开关阈值 V_M 减小了 ΔV_M 。若在随后的重离子辐照过程中，反相器的输入端为高电压，则 PMOS 关断，NMOS 管导通， $V_{out} = 0$ 。此时，若有重离子入射该反相器前端的其它单元，产生一个负的电势扰动 ΔV ，那么反相器发生错误的条件为：

$$V_{in} - \Delta V < V_M - \Delta V_M, \quad (4.2)$$

由于预先进行的 γ 射线辐照，反相器的开关阈值减小，更难以由输入端为高电压、输出端为低电压的状态翻转为输入端为低电压、输出端为高电压的状态。若在重离子辐照过程中，反相器的输入端为低电压，即 PMOS 管导通，NMOS 管关断， $V_{out} = V_{DD}$ ，负的电势扰动叠加到 V_{in} ，不会对反相器的状态产生影响。

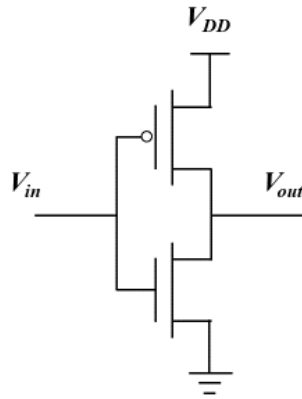


图 4.13 CMOS 反相器

NMOS 管、PMOS 管以及反相器是外围 CMOS 电路的基本单元，正是由于总剂量辐照过程中这些基本单元性能参数的改变，导致了整个 FRAM 器件单粒子事件敏感性的下降。我们需要有关外围 CMOS 电路的更详细结构信息来更深入地分析 FRAM 器件中单粒子与总剂量协同效应的物理机理。

4.4 γ 射线辐照对 FRAM 器件静态单粒子事件敏感性的影响

4.4.1 实验条件

FRAM 器件的静态重离子辐照测试采用 HIRFL 提供的 ^{181}Ta 和 ^{209}Bi 两种重离子，在室温、大气环境下进行。实验的研究对象为在静态偏置与不加偏置条件下辐照不同剂量 γ 射线的#2、#5、#7 器件，以及未进行 γ 射线辐照的#8 芯片。具体的实验参数如表 4.5 所示。

表 4.5 静态测试中，FRAM 器件的重离子辐照参数。

器件编号	测试模式	数据图形	离子种类	注量率 /(ions/cm ² ·s)	总注量 /(ions/cm ²)
#2	静态模式	55H	^{209}Bi	1500	1.2×10^6
#5	静态模式	55H	^{209}Bi	5000-7000	1.9×10^5 - 1.0×10^7
#7	静态模式	55H	^{181}Ta	200-10000	1.0×10^5 - 5.2×10^6
#8	静态模式	55H	^{209}Bi	3000-9000	2.0×10^5 - 1.0×10^7
	静态模式	55H	^{181}Ta	10000	5.0×10^6

实验前，待测 FRAM 器件中写入 55H 数据图形。重离子辐照过程中，采用静态单粒子效应测试模式，FRAM 器件上电，但不进行读写操作，重离子

束流垂直入射到器件中。当累积重离子注量达到预设总注量时,停止重离子辐照,读出器件中的数据,并与预存在测试系统中的初始数据进行比较,记录错误信息。

4.4.2 实验结果

静态重离子辐照测试结果如图 4.14 所示。静态模式下, FM22L16 器件中发生的翻转错误比较少,一般每轮测试中不超过 5 个,预辐照 γ 射线对该器件的静态重离子单粒子事件截面没有明显影响。在经过不同种类、不同注量的重离子辐照后,在未进行 γ 射线辐照的#8 器件中总共观察到 14 个错误。其中,6 个错误为第 1 类错误,8 个错误为第 2 类错误。在预辐照不同剂量的#2、#5 和#7 器件中总共观察到 9 个错误,其中 4 个第 1 类错误,5 个第 2 类错误。并且,由图 4.14 可以看出,静态测试模式下,重离子辐照在 FRAM 器件中引起的翻转错误是一种“临时效应(Temporary effect)^[126127]”。例如#2 器件,在第一轮 ^{209}Bi 离子辐照测试中发生了 2 个错误,然而在后续的测试中,尽管辐照总注量更大,但并没有再次观察到错误发生。

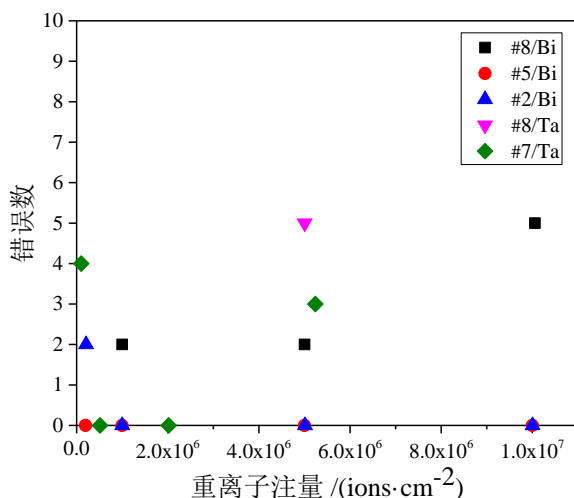


图 4.14 静态重离子辐照测试中 FM22L16 器件的翻转错误数

4.4.3 分析讨论

在静态重离子辐照测试中, γ 射线辐照前后 FRAM 器件的单粒子事件敏感性没有明显差别,可能有以下两方面原因:一是动态重离子测试中, γ 射线辐照对 FRAM 器件的单粒子事件截面的影响没有超过一个量级,而每一轮静态测试中 FRAM 器件中的错误数又比较少,只有不超过 5 个;二是在静态测试过程中,

器件中发生的错误是一种“临时现象”，不是每一轮测试都出现，与重离子辐照注量也不呈线性关系。因此，在静态重离子辐照测试过程中没有观察到总剂量与单粒子之间的协同效应。此外，与静态重离子辐照测试相比，在相同总注量的重离子辐照下，第 1 种和第 2 种类型的错误在动态重离子测试过程中发生更为频繁。这是由于在动态测试过程中，测试系统对 FRAM 器件进行实时地读和自动回写操作。此时，FRAM 器件外围 CMOS 电路的稳定性更容易受到重离子入射产生的瞬态扰动的影响。

4.5 小结

利用 γ 射线以及多种重离子对 130 nm 商用 FRAM 器件进行了辐照测试，研究了 γ 射线累积剂量、总剂量辐照偏置模式以及单粒子效应测试模式对 FRAM 器件单粒子事件敏感性的影响。实验结果表明： γ 射线辐照导致静态偏置下 FRAM 器件的静态功耗电流增大，不加偏置的 FRAM 器件的静态功耗电流无明显变化； γ 射线辐照未导致 FRAM 器件存储数据错误；重离子辐照导致 FRAM 器件中发生了至少 5 种类型的错误，错误发生在外围 CMOS 电路中； γ 射线辐照后，器件的动态单粒子事件截面明显增大，累积剂量越高，单粒子事件截面的变化越显著， γ 射线辐照后外围电路中反相器开关阈值的减小可能是导致这一现象的原因；数据图形对 FRAM 器件 SEE 与 TID 的协同效应没有明显影响。

5.1 TCAD 软件简介

本文中使用的 TCAD 软件是 Synopsys 公司发布的 Sentaurus TCAD。Sentaurus TCAD 提供了 Sentaurus Workbench (SWB)、Ligament、Sentaurus Process、Sentaurus Structure Editor (SDE)、Mesh and Noffset 3D、Sentaurus Device、Tecplot SV、Inspect、Calibration Kit 等多种仿真组件。其中，SWB 是一种可视化集成环境，如图 5.1 所示，可在其中对各种仿真组件进行调用。Sentaurus Process 是一个工艺仿真工具，支持一维、二维以及三维纳米级半导体工艺的模拟仿真。SDE 是一个器件仿真工具，利用 SDE 可对二维或三维器件进行编辑。Sentaurus Device 是一种器件物理特性仿真工具，可以预测一维、二维或三维器件模型的电学、热学与光学特性。除此以外，Sentaurus TCAD 还集成了可视化工具 Tecplot SV 与绘图和分析工具 Inspect 等仿真组件。



5.2 1T/1C 模型的参数设置

在 FRAM 器件存储单元中,铁电电容有很好重离子辐照抗性。因此,研究重点应集中在重离子入射 FRAM 器件存储单元中 NMOS 管对存储单元数据可靠性的影响。

本文建立了一个 130 nm 工艺节点的 NMOS 管的 3D TCAD 模型,沟道长度为 87 nm,栅宽为 1 μm ,有源区长度为 730 nm \times 600 nm。其中,衬底的掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$,源和漏区的掺杂浓度为 $1.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,沟道区域的掺杂浓度为 $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

同时,还建立了一个 3D 铁电电容模型。铁电电容为“三明治”结构,最上层与最下层为金属电极,中间层为 PZT 材料。整个铁电电容的厚度为 250 nm,其中上、下电极的厚度各为 90 nm, PZT 层厚度为 70 nm。铁电电容面积为 0.44 μm^2 。铁电电容模型参数如表 5.1 所示^[129,130]。

表 5.1 铁电电容模型参数

铁电电容	金属/PZT/金属
铁电电容厚度	250 nm
PZT 材料厚度	70 nm
铁电电容尺寸	0.44 μm^2

铁电电容通过钨通孔与 NMOS 管漏极连接在一起,如图 5.2 所示。1T/1C 单元内的内建电势分布如图 5.3 所示。

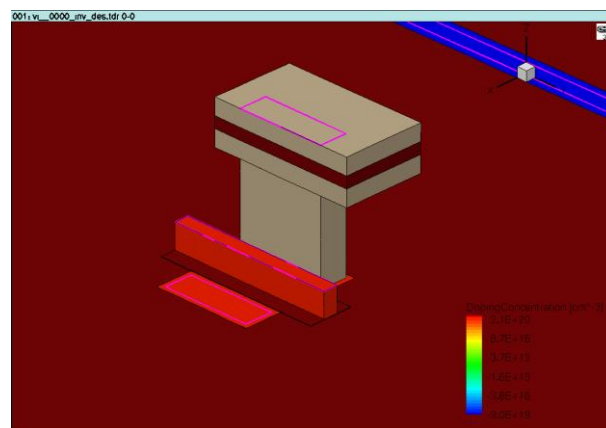


图 5.2 1T/1C 单元 TCAD 模型

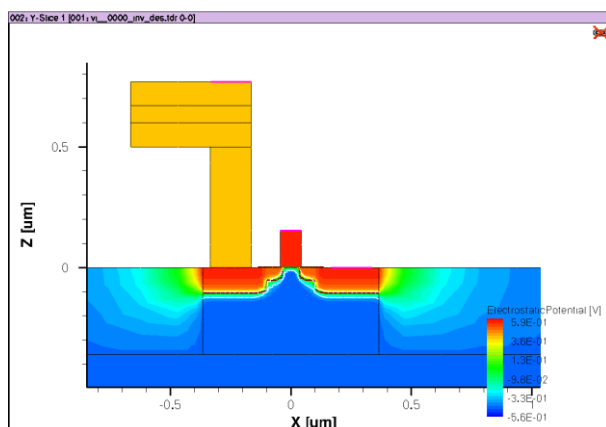


图 5.3 未辐照时，1T/1C 单元内的电势分布。

在利用 Sentaurus TCAD 软件对该模型进行器件模拟时，采用的物理模型包括流体力学模型，迁移率模型(考虑高场饱和与标准迁移率参数)，费米-狄拉克统计模型，复合模型(包括 SRH 复合和 Auger 复合)等。

5.3 模拟结果

利用本文 5.2 节建立的 1T/1C 单元的 TCAD 模型，模拟了 ^{209}Bi 离子辐照对 1T/1C 单元电学参数的影响。总共进行了三轮模拟， ^{209}Bi 离子分别垂直入射 1T/1C 单元中 NMOS 管的源极、栅极和漏极。模拟结束后，提取铁电电容上下表面的电势，分析重离子入射 NMOS 管对铁电电容极化状态的影响。

入射重离子电离产生的电荷被晶体管内的内建电场收集，会改变 NMOS 管与铁电电容的电势分布。以 ^{209}Bi 垂直入射 NMOS 管漏极为例，离子入射 0.2 ns 后，1T/1C 单元内的电势分布已与重离子入射前有很大区别，如图 5.4 所示。

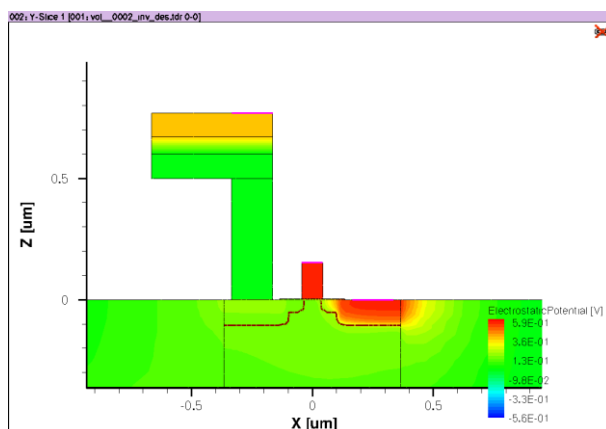


图 5.4 重离子入射 NMOS 管漏极 0.2 ns 后，1T/1C 单元内的电势分布。

^{209}Bi 入射前后, 铁电电容上下表面的电势随时间的变化如图 5.5 所示。重离子辐照前, 铁电电容上下表面电势均为 0.381V 。 ^{209}Bi 入射 NMOS 管不同位置后, 铁电电容上表面电势没有明显变化, 下表面电势迅速下降。在经过约 0.2ns 到 0.4ns 后, 铁电电容下表面电势下降到最小值, 约为 -0.326V 。随后, 铁电电容下表面电势开始逐渐回升。 ^{209}Bi 入射 1T/1C 单元内 NMOS 管的漏极、栅极、源极后, 铁电电容下表面的电势变化趋势与程度是相近的, 没有明显区别。 ^{209}Bi 入射 NMOS 管导致铁电电容上下表面产生最大约 0.707V 的电势差。

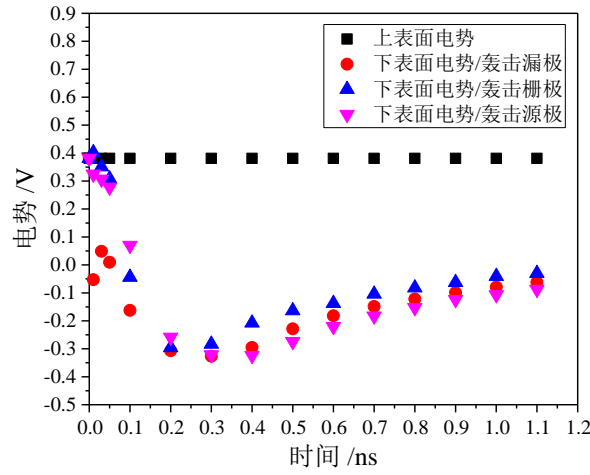


图 5.5 铁电电容上下表面电势随时间的变化曲线

5.4 分析讨论

铁电材料具有良好的抗辐照性能, 带电粒子直接辐照铁电材料不会造成铁电材料极化状态的改变^[131,132]。带电粒子入射导致的与铁电电容相连的 NMOS 管的性能参数的改变成为影响 FRAM 器件存储单元状态的最主要威胁。如图 5.3 所示, 在 NMOS 管不加偏置电压时, NMOS 管内部也存在内建电场。 ^{209}Bi 入射 NMOS 管后, 产生的电子被漏极区域的内建电场所收集, 导致与漏极通过钨通孔相连的铁电电容下表面电势降低。铁电电容的两个极化状态可以分别定义为:

(1) “向上”极化状态, 即通过给铁电电容下表面施加高电压, 上表面不施加电压来进行极化。

(2) “向下”极化状态, 即通过给铁电电容上表面施加高电压, 下表面不施加电压来进行极化。

^{209}Bi 离子入射 NMOS 管导致铁电电容表面形成由上表面指向下表面的约

0.707 V 电势差。若重离子辐照前,铁电电容处于“向下”的极化状态, ^{209}Bi 离子入射导致的铁电电容上下表面电势差的方向与铁电电容在极化时施加的电场方向相同,不会对铁电材料的极化状态产生影响。

若重离子辐照前,铁电电容处于“向上”的极化状态,则 ^{209}Bi 离子入射导致的铁电电容上下表面电势差的方向与铁电电容在极化时施加的电场方向相反,铁电材料的极化状态有可能受到该电势差的影响而发生改变。理论上来说,FRAM 器件在读过程中,若正好有带电粒子入射到存储单元中的 NMOS 管,有可能会使铁电材料的极化状态全部或部分发生翻转,灵敏放大器不能准确判断存储单元中位线上的电压与参考电压的大小,导致该存储单元中的数据读出错误。

FM22L16 器件的正常工作电压约为 2.7 V 到 3.6 V,铁电电容上下表面 0.707 V 的电势差已经超过了该器件最低正常工作电压的四分之一,对器件中存储数据的可靠性已经具备了一定的威胁性。虽然从实验结果来看,在不同 LET 值的重离子辐照下,未能证实存储单元中有错误发生。但随着半导体工艺的进步,FRAM 器件的特征尺寸进一步减小,工作电压进一步降低,入射重离子产生的存储单元中铁电电容上下表面的电势差极有可能导致存储单元数据发生翻转,FRAM 器件存储单元在辐射环境中的表现可能并不如人们想象的那么可靠。

5.5 小结

利用 Sentaurus TCAD 软件建立了一个 3D 1T/1C 模型,模拟研究了 ^{209}Bi 离子垂直入射 1T/1C 单元中 NMOS 管的源极、栅极和漏极后铁电电容表面电势的变化。研究表明:入射 ^{209}Bi 离子会导致铁电电容上下表面产生 0.707 V 的电势差; ^{209}Bi 离子入射到 NMOS 管源极、栅极和漏极时,铁电电容下表面电势随时间的变化趋势是相近的。分析认为,若重离子入射前铁电电容处于“向下”极化状态,则入射离子产生的电势差对铁电电容极化状态没有影响;若重离子入射前铁电电容处于“向上”极化状态,则入射离子产生的电势差可能会导致铁电电容的极化状态发生改变;随着 CMOS 工艺的进步,FRAM 器件存储单元在辐射环境中的可靠性需要得到重视。

第 6 章 结论与展望

6.1 主要结论

随着 CMOS 工艺的进步, SRAM 和 FRAM 器件的特征尺寸达到纳米量级, 存储器的存储密度更高, 速度更快, 工作电压更低。同时, 特征尺寸的减小也对 SRAM 和 FRAM 器件在辐射环境中的可靠性产生了影响。本文利用新疆理化所提供的 ^{60}Co γ 射线与近代物理研究所提供的 ^{28}Si 、 ^{40}Ar 、 ^{86}Kr 、 ^{129}Xe 、 ^{181}Ta 和 ^{205}Bi 六种重离子对 90 nm 与 65nm 两款商用 SRAM 器件以及一款 130 nm 商用 FRAM 器件进行了辐照测试, 研究了总剂量辐照对纳米 SRAM 和 FRAM 器件性能参数的影响、重离子辐照下 SRAM 与 FRAM 器件的单粒子翻转特性以及单粒子效应与总剂量效应在纳米 SRAM 和 FRAM 器件中的协同效应, 并利用 TCAD 模拟研究了重离子辐照对 FRAM 器件存储单元中铁电电容的影响, 主要得到以下结论:

(1) γ 射线辐照导致辐照期间处于静态偏置的 SRAM 和 FRAM 器件的静态功耗电流增大。在经过 600 krad(Si)辐照后, 90 nm SRAM 器件的静态电流由 0.6 mA 增长到 20.2 mA, 增长了 33.7 倍。65 nm 器件在辐照结束 11 分钟后的静态电流为 180.0 mA, 约为初始值 75.0 mA 的 2.4 倍。在经过 180 krad(Si)辐照后, 130 nm FRAM 器件的静态电流由 0.05 mA 增长到 9 mA, 增长了 180 倍。辐照结束后, 三款器件中均未出现数据错误, 仍保持读写功能正常。与微米级器件不同, 总剂量效应对纳米级器件的影响主要在 STI 区域。总剂量辐照在 STI 中产生的陷阱正电荷导致了 NMOS 管关态漏电流的增长。分析认为, 存储单元中 NMOS 管漏电流的增长导致了 SRAM 器件静态功耗电流的增大, 外围 CMOS 电路中 NMOS 管漏电流的增长导致了 FRAM 器件静态功耗电流的增大。

(2) γ 射线辐照导致 SRAM 器件 SEU 截面增大。总剂量辐照后, NMOS 管的关态漏电流增大, 阈值电压减小, PMOS 管的阈值电压增大。存储单元内存储节点的电势发生改变, 反相器的开关阈值减小, 二者的共同作用导致了 SRAM 器件 SEU 敏感性的增强。在经过 600 krad(Si)辐照后, 90 nm SRAM 器件的 SEU 截面由 $7.8 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 增长到 $1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 增长了 90%。65 nm SRAM 器件

的 SEU 截面由 $3.9 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$ 增长到 $6.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{bit}$, 增长了 60%。总剂量与单粒子测试期间写入不同的数据图形对器件的 SEU 截面没有明显影响。单粒子测试期间测试模式的不同对器件的 SEU 截面没有明显影响。

(3) 重离子辐照 FRAM 器件时共发现五种错误类型, 即单位翻转错误、多位翻转错误、位于逻辑位图上同一行或同一列的 2 到 3 个地址中一起爆发错误、逻辑位图上特定几列连续发生错误、逻辑位图上特定几列间隔发生错误。分析认为, 入射重离子引起的 FRAM 器件外围电路中冗余寄存器错误、地址译码器错误与 SEFI 导致了以上几种类型错误的发生。

(4) γ 射线辐照导致 FRAM 器件动态单粒子事件截面减小。 γ 射线辐照后, FRAM 器件外围电路中 CMOS 反相器的开关阈值减小, 导致了输入端为高电压、输出端为零电压的反相器抵抗负的脉冲扰动的能力增强, FRAM 器件的单粒子事件截面减小。在经过 120 krad(Si) 辐照后, γ 射线辐照期间处于静态偏置的 FRAM 器件的单粒子事件截面由 $1.6 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{device}$ 减小为 $4.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$, 减小了 74.5%。 γ 射线辐照期间处于不加电偏置的 FRAM 器件的单粒子事件截面减小为 $7.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$ 到 $9.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{device}$ 左右, 减小了约 42.2% 到 53.4%。由于错误发生在外围 CMOS 电路中, 总剂量与单粒子测试期间写入数据图形的不同对器件的单粒子事件截面没有明显影响。 γ 射线辐照对 FRAM 器件的静态单粒子事件数没有明显影响。

(5) 重离子入射 1T/1C 单元内 NMOS 管导致铁电电容下表面电势降低。重离子入射 1T/1C 单元内 NMOS 管产生的电子被漏极区域的内建电场收集, 导致与漏极相连的铁电电容下表面电势降低。在 ^{209}Bi 入射约 0.2 秒到 0.4 秒后, 1T/1C 单元内铁电电容的下表面电势由 0.381V 下降到 -0.326 V, 铁电电容表面生成由上表面指向下表面的 0.707 V 的电势差。随着 CMOS 工艺的进步, FRAM 器件的工作电压进一步减小, 入射重离子在铁电电容表面产生的电势差极有可能会改变存储单元内铁电材料的极化状态, 威胁存储单元数据的可靠性。

随着 SRAM 器件的工艺到了纳米量级, MOS 管的最恶劣偏置条件有了一些变化。在累积 γ 射线剂量达到 500 krad(Si) 的情况下, 零栅压的 MOS 管的辐射损伤程度甚至不弱于施加正栅压的 MOS 管。因此, 在纳米 SRAM 器件单粒子与总剂量的协同效应研究中并没有观察到“印记效应”。并且, 和微米级 SRAM 器件

在 γ 射线辐照后一到两个量级的 SEU 截面变化相比, 纳米 SRAM 器件中协同效应对 SEU 截面的影响要小的多, SEU 截面通常只有不到一倍的改变。

在 FRAM 器件的辐照实验中, 同样观察到了单粒子与总剂量的协同效应。与 SRAM 器件不同的是, 总剂量效应对 FRAM 器件的影响主要在外围 CMOS 电路, 外围电路中反相器和 MOS 管的性能变化导致了器件单粒子事件敏感性的改变。本文利用 CREME 96 软件计算了 FM22L16 器件 GEO 轨道太阳活动谷年的在轨错误率, 约为 1.2×10^{-2} errors/(device · day)。与其它类型的存储器相比, FRAM 器件的在轨错误率并不算特别低。

6.2 下一步工作计划

通过对 SRAM 和 FRAM 器件的 γ 射线辐照与重离子辐照研究, 发现了纳米 SRAM 和 FRAM 器件中总剂量效应与单粒子敏感性之间的一些规律, 并对其物理机理进行了分析。基于以上研究成果, 下一步的工作计划主要为以下几个方面:

(1) 利用 TCAD 软件模拟研究 γ 射线辐照对晶体管阈值电压与关态漏电流等参数的影响, 并利用 HSPICE 等软件对 6-T SRAM 单元在辐照后的节点电势等参数进行模拟, 深入分析总剂量效应影响纳米 SRAM 器件 SEU 敏感性的物理机理。

(2) 选用更多型号的纳米 SRAM 器件进行总剂量与单粒子效应测试, 探索在不同偏置模式和不同重离子测试模式等实验条件下, 总剂量辐照对纳米 SRAM 器件 SEU 敏感性影响的普遍规律。

(3) 利用重离子微束或激光, 并结合 FRAM 器件的物理版图, 对 FRAM 器件进行精确定位辐照实验, 深入研究 FRAM 器件中不同类型错误发生的位置以及原因。

参考文献

- [1] 陈盘训.半导体器件和集成电路的辐射效应[M].北京: 国防工业出版社, 2005.
- [2] HUGHES H L, GIROUX R R. Space radiation affects MOSFET's[J]. Electronics. 1964, 37: 58-60.
- [3] BINDER D, SMITH E C, HOLMAN A B. Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1975, 22(6): 2675-2680.
- [4] LEACH R D, ALEXANDER M B. Spacecraft System Failures and Anomalies Attributed to the Natural Space Environment[J]. National Aeronautics & Space Administration Nasa Reference Publication. 1996.
- [5] ECOFFET R. Overview of In-Orbit Radiation Induced Spacecraft Anomalies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2013, 60(3): 1791-1815.
- [6] SIMPSON J A. Elemental and Isotopic Composition of the Galactic Cosmic Rays[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science. 1983, 33(1): 323-382.
- [7] BOURDARIE S, XAPSOS M. The Near-Earth Space Radiation Environment[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008, 55(4): 1810-1832.
- [8] ECOFFET R. On-orbit anomalies: investigations and root cause determination[C]//IEEE NSREC Short Course Notes. 2011.
- [9] VAN ALLEN J A. The geomagnetically trapped corpuscular radiation[J]. Journal of Geophysical Research. 1959, 64(11):1683-1689.
- [10] MANN I R, Lee E A, CLAUDEPIERRE S G, et al. Discovery of the action of a geophysical synchrotron in the Earth's Van Allen radiation belts[J]. Nature communications. 2013, 4: 2795.
- [11] GARRETT H B, Jun I. Spacecraft environment interactions[J]. 2011.
- [12] BAKER D N, JAYNES A N, HOXIE V C, et al. An impenetrable barrier to ultrarelativistic electrons in the Van Allen radiation belts[J]. Nature. 2014, 515(7528): 531-534.
- [13] HEIRTZLER J R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002, 64(16): 1701-1708.

- [14] BARNABY H J. Total-ionizing-dose effects in modern CMOS technologies[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006, 53(6): 3103-3121.
- [15] OLDHAM T R, MCLEAN F B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices[J]. IEEE transactions on nuclear science. 2003, 50(3): 483-499.
- [16] BARNABY H J, MCLAIN M, ESQUEDA I S. Total-ionizing-dose effects on isolation oxides in modern CMOS technologies[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2007, 261(1-2): 1142-1145.
- [17] RASHKEEV S N, CIRBA C R, FLEETWOOD D M, et al. Physical model for enhanced interface-trap formation at low dose rates[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003, 49(6): 2650-2655.
- [18] PANTELIDES S T, TSETSERIS L, RASHKEEV S N, et al. Hydrogen in MOSFETs—A primary agent of reliability issues[J]. Microelectronics Reliability. 2007, 47(6): 903-911.
- [19] PETERSEN E. Single event effects in aerospace[M]. John Wiley & Sons. 2011.
- [20] HSIEH C M, MURLEY P C, O'BRIEN R R. A Field-Funneling Effect on the Collection of Alpha-Particle Generated Carriers in Silicon Devices[J]. IEEE Electron Device Letters. 1981, 2(4): 103-105.
- [21] MURLEY P C, SRINIVASAN G R. Soft Error Monte Carlo Modeling Program, SEMM[J]. IBM Journal of Research and Development. 1996, 40(1): 109-118.
- [22] DODD P E, SHANEYFELT M R, FELIX J A, et al. Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2004, 51(6): 3278-3284.
- [23] MUNTEANU D, AUTRAN J L. Modeling and simulation of single-event effects in digital devices and ICs[J]. IEEE Transactions on Nuclear science. 2008, 55(4): 1854-1878.
- [24] BAJURA M A, BOULGHASSOUL Y, NASEER R, et al. Models and algorithmic limits for an ECC-based approach to hardening sub-100-nm SRAMs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2007, 54(4): 935-945.
- [25] PUCHNER H, KAPRE R, SHARIFZADEH S, et al. Elimination of single event latchup in 90nm SRAM technologies[C]//IEEE International Reliability Physics Symposium Proceedings. IEEE, 2006: 721-722.
- [26] KOGA R, PENZIN S H, CRAWFORD K B, et al. Single event functional interrupt (SEFI)

- sensitivity in microcircuits[C]//Fourth European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems. IEEE, 1997: 311-318.
- [27] JOHNSON G H, PALAU J M, DACHS C, et al. A review of the techniques used for modeling single-event effects in power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996, 43(2): 546-560.
- [28] JOHNSON G H, GALLOWAY K F, SCHRIMPF R D, et al. A physical interpretation for the single-event-gate-rupture cross-section of n-channel power MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996, 43(6): 2932-2937.
- [29] 窦振中. 存储器技术的发展及趋势[J]. 电子计算机与外部设备. 1997, (3): 56-59.
- [30] ISHIWARA H. Ferroelectric random access memories[J]. Journal of nanoscience and nanotechnology. 2012, 12(10): 7619-7627.
- [31] KURINEC S K, INIEWSKI K. Nanoscale semiconductor memories: Technology and applications[M]. CRC Press, 2013.
- [32] 张波. SRAM 存储器总剂量效应研究[D]. 西安电子科技大学, 2014.
- [33] RABAEY J M, CHANDRAKASAN A, NIKOLIC B, Digital Integrated Circuits: A Design Perspective[M]. Second Edition. Beijing, Publishing House of Electronics Industry, 2017. (in Chinese)
周润德等译. 数字集成电路: 电路、系统与amp;设计[M]. 第二版. 北京, 电子工业出版社, 2017.
- [34] MOISE T S , SUMMERFELT S R , MCADAMS H , et al. Demonstration of a 4 Mb, high density ferroelectric memory embedded within a 130 nm, 5 LM Cu/FSG logic process[C]//International Electron Devices Meeting. IEEE, 2002: 535-538.
- [35] NUNS T, DUZELLIER S, BERTRAND J, et al. Evaluation of recent technologies of non-volatile RAM[C]//9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. IEEE, 2007: 1-8.
- [36] SHEN J, LI W, ZHANG Y. Assessment of TID Effect of FRAM Memory Cell under Electron, X-ray and Co-60 γ Ray Radiation Sources[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017, 64(3): 969-975.
- [37] 辜科, 铁电存储器的辐射效应及其抗辐射加固技术研究[D]. 电子科技大学, 2015.
- [38] SCHALLER R R. Moore's law: past, present and future[J]. IEEE spectrum. 1997, 34(6): 52-

59.

- [39] WALDROP M M. The chips are down for Moore's law[J]. Nature News. 2016, 530(7589): 144.
- [40] WINOKUR P S, SEXTON F W, SCHWANK J R, et al. Total-dose radiation and annealing studies: Implications for hardness assurance testing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1986, 33(6): 1343-1351.
- [41] BOESCH H E, MCLEAN F B, BENEDETTO J M, et al. Saturation of threshold voltage shift in MOSFET's at high total dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1986, 33(6): 1191-1197.
- [42] 刘张李, 胡志远, 张正选, 等. 0.18 μm MOSFET 器件的总剂量辐照效应[J].物理学报. 2011, 60(11): 489-493.
- [43] 李冬梅, 王志华, 皇甫丽英, 等. NMOS 晶体管高剂量率下总剂量辐照特性研究[J]. 电子器件. 2007, 30(3).
- [44] 李豫东, 任建岳, 金龙旭, 等. SRAM、ROM 的总剂量辐射效应及损伤分析[J]. 光学精密工程. 2009, 17(4).
- [45] 李明, 余学峰, 许发月, 等. 静态随机存储器总剂量辐射及退火效应研究[J]. 原子能科学技术. 1900, 46(4): 507-512.
- [46] LIU S T, BALSTER S, SINHA S, et al. Worst case total dose radiation response of 0.35/ μm SOI CMOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999, 46(6): 1817-1823.
- [47] FERLET-CAVROIS V, COLLADANT T, PAILLET P, et al. Worst-case bias during total dose irradiation of SOI transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2000, 47(6): 2183-2188.
- [48] 李茂顺, 余学峰, 任迪远, 等. 不同偏置条件下 CMOS SRAM 的总剂量辐射效应[J]. 微电子学. 2011, 41(1): 128-132.
- [49] 卓青青, 刘红侠, 杨兆年, 等. 偏置条件对 SOINMOS 器件总剂量辐照效应的影响[J]. 物理学报. 2012, 61(22).
- [50] 刘远, 李斌, 何玉娟. 电场偏置对 MOS 器件电离辐射效应的影响[J]. 微电子学. 2010, (3):440-443.
- [51] 何玉娟, 恩云飞, 师谦, 等. 偏置条件对 NMOS 器件 X 射线总剂量效应的影响[J]. 微电子学. 2008, 38(2).

- [52] 孟志琴. 深亚微米 nMOSFET 器件的总剂量电离辐射效应研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.
- [53] WANG J J, KATZ R B, SUN J S, et al. SRAM based re-programmable FPGA for space applications[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1999, 46(6): 1728-1735.
- [54] 于跃, 郭旗, 任迪远, 等. 静态随机存储器抗总剂量辐射性能筛选在线测试系统[J]. 核电子学与探测技术. 2010, 30(3): 328-331.
- [55] 刘新宇, 刘运龙, 孙海锋, 等. CMOS/SOI 4Kb SRAM 总剂量辐照实验[J]. 半导体学报. 2002, 23(2): 213-216.
- [56] LIU S T, JENKINS W C, HUGHES H L. Total dose radiation hard 0.35/ μm SOI CMOS technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1998, 45(6): 2442-2449.
- [57] 丛忠超. 微纳大规模集成电路 SRAM 的总剂量辐射损伤机理及评估方法研究[J]. 2014.
- [58] LOHSTROH J, SEEVINCK E, DE GROOT J. Worst-case static noise margin criteria for logic circuits and their mathematical equivalence[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1983, 18(6): 803-807.
- [59] SEEVINCK E, LIST F J, LOHSTROH J. Static-noise margin analysis of MOS SRAM cells[J]. IEEE Journal of solid-state circuits. 1987, 22(5): 748-754.
- [60] CALHOUN B H, CHANDRAKASAN A P. Static noise margin variation for sub-threshold SRAM in 65-nm CMOS[J]. IEEE Journal of solid-state circuits. 2006, 41(7): 1673-1679.
- [61] YAO X, HINDMAN N, CLARK L T, et al. The impact of total ionizing dose on unhardened SRAM cell margins[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008, 55(6): 3280-3287.
- [62] LILI D, ZHIBIN Y, HONGXIA G, et al. Worst-case total dose radiation effect in deep-submicron SRAM circuits[J]. Journal of Semiconductors. 2012, 33(7): 075010.
- [63] ZEBREV G I, GORBUNOV M S. Modeling of radiation-induced leakage and low dose-rate effects in thick edge isolation of modern MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2009, 56(4): 2230-2236.
- [64] WITCZAK S C, LACOE R C, OSBORN J V, et al. Dose-rate sensitivity of modern nMOSFETs[J]. IEEE transactions on nuclear science. 2005, 52(6): 2602-2608.
- [65] BORGHELLO G, FACCIO F, LERARIO E, et al. Dose-rate sensitivity of 65-nm MOSFETs exposed to ultrahigh doses[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2018, 65(8): 1482-1487.
- [66] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FLEETWOOD D M, et al. Radiation effects in MOS

- oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2008, 55(4): 1833–1853.
- [67] SAKS N S, ANCONA M G, MODULO J A. Radiation effects in MOS capacitors with very thin oxides at 80 K[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1984, 31(6): 1249–1255.
- [68] FACCIO F, CERVELLI G. Radiation-induced edge effects in deep submicron CMOS transistors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2005, 52(6): 2413–2420.
- [69] 罗尹虹, 郭红霞, 陈伟, 等. SRAM 激光微束单粒子效应实验研究[J]. 微电子学. 2010, (3): 464–468.
- [70] 曹晖, 郑渊, 刘伟鑫, 等. 宇航用 SRAM 存储器单粒子效应试验研究[J]. 上海航天. 2013, 30(3): 60–64.
- [71] 古松, 刘杰, 刘天奇, 等. 深亚微米 SRAM 质子单粒子翻转实验研究[J]. 原子核物理评论. 2015, (3): 353–357.
- [72] 何安林, 郭刚, 沈东军, 等. 65 nm 工艺 SRAM 低能质子单粒子翻转错误率预估[J]. 原子能科学技术, 53(2).
- [73] 郭晓强, 郭红霞, 王桂珍, 等. SRAM 单元中子单粒子翻转效应的 Geant4 模拟[J]. 原子能科学技术, 2010(3): 362–367.
- [74] DODD P E, MASSENGILL L W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3): 583–602.
- [75] MUSSEAU O, GARDIC F, ROCHE P, et al. Analysis of multiple bit upsets (MBU) in CMOS SRAM[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(6): 2879–2888.
- [76] WEAVER H T, AXNESS C L, MCBRAYER J D, et al. An SEU tolerant memory cell derived from fundamental studies of SEU mechanisms in SRAM[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1987, 34(6): 1281–1286.
- [77] HITE L R, LU H, HOUSTON T W, et al. An SEU resistant 256 k SOI SRAM[J]. IEEE Transactions on Nuclear science, 1992, 39(6): 2121–2125.
- [78] SCHEICK L Z, SWIFT G M, GUERTIN S M. SEU evaluation of SRAM memories for space applications[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop. 2000, 61–63.
- [79] 罗尹虹, 张凤祁, 郭红霞, 等. 体硅 90 nm SRAM 重离子单粒子多位翻转实验和数值模拟[J]. 现代应用物理, 2017, (1).
- [80] 习凯, 刘杰, 张战刚, 等. 重离子产生 δ 电子对 SRAM 单粒子翻转的影响[J]. 原子核物理评论, 2014, 31(1): 81–85.

- [81] LIU T, LIU J, XI K, et al. Heavy Ion Radiation Effects on a 130-nm COTS NVSRAM Under Different Measurement Conditions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(5): 1119-1126.
- [82] TYLKAA J, ADAMS J H, BOBERG P R, et al. CREME96: A revision of the cosmic ray effects on micro-electronics code[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6): 2150–2160.
- [83] LIU J, MA F, HOU M, et al. Heavy ion induced single event effects in semiconductor device[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 1998, 135: 239-243.
- [84] 刘杰. 宇航半导体器件单粒子效应地面模拟研究[D].中国科学院近代物理研究所, 1999.
- [85] LIU J, HOU M, LI B, et al. Experimental studies of single-event effects induced by heavy ions[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2000, 164/165 : 973-978.
- [86] 刘杰, 侯明东, 张庆祥, 等. 高能质子引起器件单粒子效应的研究方法[J]. 原子核物理评论, 2002, 19: 411-415.
- [87] YIN Y, LIU J, SUN Y, et al. Anomalous annealing of floating gate errors due to heavy ion irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2018, 418: 80-86.
- [88] YIN Y, LIU J, JI Q, et al. Impact of Total Ionizing Dose on Single Event Effect Sensitivity in Floating Gate Cells[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(08): 404-409.
- [89] WANG B, ZENG C, GENG C, et al. A comparison of heavy ion induced single event upset susceptibility in unhardened 6T/SRAM and hardened ADE/SRAM[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 406: 437-442.
- [90] YE B, LIU J, WANG T, et al. Low energy proton induced single event upset in 65 nm DDR and QDR commercial SRAMs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2017, 406: 443-448.
- [91] YE B, LIU J, WANG T, et al. Impact of energy straggle on proton-induced single event upset test in a 65-nm SRAM cell[J]. Chinese Physics B, 2017, 08: 540-545.
- [92] KOGA R, YU P, CRAWFORD K, et al. Synergistic effects of total ionizing dose on SEU sensitive SRAMs[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop. IEEE, 2009, 127-132.
- [93] 肖尧, 郭红霞, 张凤祁, 等. 累积剂量影响静态随机存储器单粒子效应敏感性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(1) :387-392.

- [94] BENFICA J, GREEN B, PORCHER B C, et al. Analysis of SRAM-based FPGA SEU sensitivity to combined EMI and TID-imprinted effects[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(2): 1294-1300.
- [95] SHANEYFELT M R, SCHWANK J R, DODD P E, et al. Total ionizing dose and single event effects hardness assurance qualification issues for microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(4): 1926-1946.
- [96] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FELIX J A, et al. Effects of total dose irradiation on single-event upset hardness[J]. IEEE transactions on nuclear science, 2006, 53(4): 1772-1778.
- [97] GUO H, DING L, XIAO Y, et al. Pattern dependence in synergistic effects of total dose on single-event upset hardness[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(9): 096109.
- [98] BERNARD M F, DUSSEAU L, BUCHNER S, et al. Impact of total ionizing dose on the analog single event transient sensitivity of a linear bipolar integrated circuit[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2534-2540.
- [99] ANASHIN V S, CHUBUNOV P A, IAKOVLEV S A. SEE Test Results of 256k RAM with Preliminary TID Irradiation[C]//15th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). IEEE, 2015, 1-4.
- [100] NOVIKOV A A, PECHENKIN A A, CHUMAKOV A I. The behavior of SEE sensitivity at various TID levels[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). IEEE, 2014, 1-4.
- [101] ZHENG Q, CUI J, LU W, et al. The increased single-event upset sensitivity of 65-nm DICE SRAM induced by total ionizing dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1920-1927.
- [102] SCHWANK J R, DODD P E, SHANEYFELT M R, et al. Issues for single-event proton testing of SRAMs[J]. IEEE transactions on nuclear science, 2004, 51(6): 3692-3700.
- [103] MOORE R A, BENEDETTO J M, MCGARRITY J M, et al. Neutron irradiation effects on PZT thin films for nonvolatile-memory applications[J]. IEEE transactions on nuclear science, 1991, 38(6): 1078-1082.
- [104] COIC Y M, MUSSEAU O, LERAY J L. A study of radiation vulnerability of ferroelectric material and devices[J]. IEEE transactions on nuclear science, 1994, 41(3): 495-502.
- [105] SCHWANK J R, NASBY R D, MILLER S L, et al. Total-dose radiation-induced degradation of thin film ferroelectric capacitors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,

- 1990, 37(6): 1703-1712.
- [106] GU K, LIOU J J, LI W, et al. Total ionizing dose sensitivity of function blocks in FRAM[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6): 873-878.
- [107] ZHANG Z, LEI Z, YANG Z, et al. Single event effects in COTS ferroelectric RAM technologies[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW). IEEE, 2015, 1-5.
- [108] MACLEOD T C, SIMS W H, VARNAVAS K A, et al. Results from on-Orbit Testing of the Fram Memory Test Experiment on the Fastsat Micro-Satellite[J]. Integrated Ferroelectrics, 2012, 132(1): 88-98.
- [109] MACLEOD T C, SIMS W H, VARNAVAS K A, et al. Satellite test of radiation impact on Ramtron 512K FRAM[C]//10th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium (NVMTS). IEEE, 2009, 24-27.
- [110] GUPTA V, BOSSER A, TSILIGIANNIS G, et al. Heavy-Ion radiation impact on a 4 Mb FRAM under different test modes and conditions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(4): 2010-2015.
- [111] BORUZDINA A B, ULANOVA A V, ORLOV A A, et al. Influence of FRAM operational mode on its SEE susceptibility[C]//16th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). IEEE, 2016, 1-4.
- [112] WEI J N, GUO H X, ZHANG F Q, et al. Ionizing radiation effect on single event upset sensitivity of ferroelectric random access memory[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(9): 096102.
- [113] WEI J, GUO H, ZHANG F, et al. Single event effects in commercial FRAM and mitigation technique using neutron-induced displacement damage[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92: 149-154.
- [114] 夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 兰州重离子加速器研究装置 HIRFL[J]. 科学通报, 2016, 61(Z1): 467.
- [115] 刘天奇. 重离子辐照参数对 SRAM 器件单粒子效应的影响研究[D]. 中国科学院大学(近代物理研究所), 2014.
- [116] 刘杰, 孙友梅, 侯明东, 等. 兰州重离子加速器在元器件单粒子效应地面实验中的应用[J]. 抗核加固, 2013, 30(9).
- [117] 李佳. 存储器辐照总剂量试验方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2011.
- [118] ZHENG Qiwen, CUI Jiangwei, LU Wu et al. Read Static Noise Margin Decrease of 65-

- nm 6-T SRAM Cell Induced by Total Ionizing Dose[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(2): 691.
- [119] PETERSEN E L, PICKEL J C, ADAMS J H, et al. Rate prediction for single event effects-a critique[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 39(6): 1577-1599.
- [120] SHARE S, KUMAR V, DAHLKE W E et al. Effects of ionizing radiation on thin - oxide (20 - 1500 Å) MOS capacitors [J]. Journal of Applied Physics.1974, 45(11): 4894-4898.
- [121] LERAY J L. Total dose effects: modeling for present and future [C]. IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference Short Course, 1999.
- [122] SCOTT J F, MELNICK B M, ARAUJO C A, et al. DC Leakage currents in ferroelectric memories[J]. Integrated ferroelectrics, 1992, 1(2-4): 79-84.
- [123] BOSSER A L, GUPTA V, JAVANAINEN A et al. Single-Event Effects in the Peripheral Circuitry of a Commercial Ferroelectric Random Access Memory [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(8): 1708-1714.
- [124] 张元彬. 铁电存储器的辐射效应测试方法研究[D]. 电子科技大学, 2018.
- [125] JI Q, LIU J, LI D et al. Effects of total ionizing dose on single event effect sensitivity of FRAMs [J]. Microelectronics Reliability. 2019, 95C: 1-7.
- [126] NGUYEN D N, SCHEICK L Z. TID testing of ferroelectric nonvolatile RAM [J]. IEEE Radiation Effects Data Workshop, 2001.
- [127] GUPTA V, BOSSER A, TSILIGIANNIS G et al. Heavy-Ion Radiation Impact on a 4 Mb FRAM Under Different Test Modes and Conditions [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(4): 2010-2015.
- [128] 唐龙谷. 半导体工艺和器件仿真软件 Silvaco TCAD 实用教程[M]. 2014.
- [129] SUMMERFELT S R, MOISE T S, UDAYAKUMAR K R, et al., High-Density 8Mb 1T-1C Ferroelectric Random Access Memory Embedded Within a Low-Power 130 nm Logic Process[C]//16th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, 2007, 9-10.
- [130] VOROTILOV K A, SIGOV A S, Ferroelectric memory[J]. Physics of the Solid State, 2012, 54 (5): 894-899.
- [131] SCHWANK J R, NASBY R D, MILLER S L, et al. Total-dose radiation-induced degradation of thin film ferroelectric capacitors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science,

1990, 37(6): 1703–1712.

- [132] SHVETSOV-SHILOVSKIY I I, BORUZDINA A B, ULANOVA A V, et al. FRAM test memory cells radiation hardness research[C]//30th IEEE International Conference on Microelectronics, 2017, 255–257.

致 谢

春风习习，窗外日渐嫩绿的柳树枝芽似乎每天都在提醒我，是要到了分别的时候了。仍记得 2013 年秋天，学院推荐我来近物所面试，是王斌师兄在楼下等我，带我来到刘杰老师的办公室。那是我第一次见到刘老师，刘老师的平易近人与美丽给我留下了深刻的印象。面试过程中，我的英语口语不是很好，也是刘老师耐心地引导我、鼓励我，耐心地等待着我的回答。面试结束的当晚，刘老师带着我和师兄师姐去黄河边散步，那是我第一次见到黄河，见到中山桥，心里颇有些激动。也是在同一天，我认识了留着胡子的叶兵师兄，爱笑的曾健师姐和脸圆乎乎的郭航师姐。2015 年夏天，结束了国科大的课程，我坐着火车再次来到了兰州。从此爱上了兰州的牛肉面，爱上了黄河，爱上了材料中心的老师和同学们……

时光荏苒，五年的直博生涯即将结束。借此机会，向所有帮助过我的师长、同学和亲友表达最真挚的感谢。

特别感谢我的导师刘杰研究员，在读博的 5 年时间，刘老师在学业和生活上都给予了我莫大的关怀和帮助。正是在刘老师的悉心指导下，我的博士论文才能如期完成。刘老师勤奋、严谨的科研态度也深深地影响了我。在刚来到所里的时候，我的思想有些松懈，学习并没有如何认真，是与刘老师的谈心让我意识到自己有些太过懈怠了，科研是一项非常严肃的事业。自此，我端正了自己的科研态度，我将刘老师视为自己科研道路上的榜样。也是在那段时间，我由于水土不服而经常流鼻血、闹肚子，也是刘老师在关心我的饮食和生活。能成为刘老师的学生，是我的幸运和骄傲。

感谢我的父母，给了我一个充满爱和欢乐的家庭，是他们教会了我什么是爱和责任。他们并不富有，但却给了我最美好的童年。在那个并不如今天这般重视教育的年代，我的父母将我送到了县里最好的中学学习，随后又送我到县里最好的高中。在 2010 年夏天的那一天夜里，高考成绩公布的那一刹那，父亲和母亲脸上的笑容让我至今难忘。父亲和母亲的的笑容和期望，就是对我学习和工作最大的鼓励。

感谢侯明东老师，侯老师严谨、一丝不苟的科研精神值得每一位年轻人认真

学习。侯老师总是耐心、细致地为我们释疑解惑。都知道侯老师爱好摄影，也常常对我们分享他的摄影经验。在听过侯老师的摄影讲座后，我也购买了人生第一台单反相机，从此爱上了摄影。

感谢孙友梅老师，每次单粒子实验，孙老师都是没日没夜，忙前忙后，为我们提供良好的实验条件。每次遇到值班人员解决不了的问题，也都是孙老师第一时间来到实验室排除故障。感谢孙老师对我们实验的付出和帮助。

感谢段敬来老师、姚会军老师、莫丹老师，杜广华老师和张崇宏老师对我学业的帮助和指导。

感谢翟鹏飞、罗捷、陈永辉、曹殿亮、刘建德、刘天奇、刘文强、习凯、王斌、叶兵、吕双宝、曾健、张胜霞、张永杰、郭航、殷亚楠、胡培培、谢璐、徐丽君、赵培雄、李东青、李宗臻、莫莉华、刘丽、蔡畅、艾文思、贺泽、陈麒宇、张林、赵丛、董钰华、程宏伟、黄科京等师兄师姐、师弟师妹对我的关心和帮助。

感谢我的同窗程亚雄、吴杨、颜廷星、魏俊哲、王洋，非常珍惜和你们在一起的快乐时光和难忘的记忆。

感谢秘书何爱云为我们报销经费提供的帮助。

感谢教育处的袁小华老师、李明治老师、华明漪老师、梁敏乐老师在研究生期间给予的帮助。

感谢国际合作处的田书凯老师为我们出国参加学术会议提供的帮助。

感谢新疆理化技术研究所的陆妩老师、郑齐文老师、苏丹丹同学、魏昕宇同学和周航同学为我们的总剂量实验提供的帮助。

感谢我的未婚妻林素兰，在 2017 年毕业之后留在兰州照顾我、关心我。仅仅是和你在一起，生活就已经很快乐了。

感谢所有关心、帮助过我的人，谢谢你们。

姬庆刚 2019 年 4 月 2 日

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2010 年 9 月—2014 年 6 月, 在大连理工大学物理与光电工程学院获得学士学位。

2014 年 9 月—2019 年 6 月, 在中国科学院近代物理研究所攻读博士学位(直博)。

已发表(或正式接收)的学术论文:

- [1] **JI Q**, LIU J, LI D et al. Effects of total ionizing dose on single event effect sensitivity of FRAMs[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 95C: 1-7.
- [2] **姬庆刚**, 刘杰, 李东青等. 电离总剂量对纳米 SRAM 器件单粒子翻转敏感性影响的研究[J]. 原子核物理评论. (已接收)
- [3] Y. YIN, J. LIU, Y. SUN, M. HOU, T. LIU, B. YE, **Q. JI**, J. LUO AND P. ZHAO. Anomalous annealing of floating gate errors due to heavy ion irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms: 2018, 418: 80-86.
- [4] Y. YIN, J. LIU, **Q. JI**, P. ZHAO, T. LIU, B. YE, J. LUO , Y. SUN AND M. HOU. Impact of Total Ionizing Dose on Single Event Effect Sensitivity in Floating Gate Cells[J]. Chinese Physics B.
- [5] LIU, T., J. LIU, K. XI, Z. ZHANG, D. HE, B. YE, Y. YIN, **Q. JI**, B. WANG, J. LUO, Y. SUN AND P. ZHAI. Heavy Ion Radiation Effects on a 130 nm COTS NVSRAM under Different Measurement Conditions[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018.
- [6] B. WANG, C. ZENG, C. GENG, T. LIU, M. KHAN, W. YAN, M. HOU, B. YE, Y. SUN, Y. YIN, J. LUO, **Q. JI**, F. ZHAO AND J. LIU. A comparison of heavy ion induced single event upset susceptibility in unhardened 6T/SRAM and hardened ADE/SRAM[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms: 2017, 406: 437-442.
- [7] B. YE, J. LIU, T. WANG, T. LIU, K. MAAZ, J. LUO, B. WANG, Y. YIN, **Q. JI**, Y. SUN AND M. HOU. Low energy proton induced single event upset in 65 nm DDR and QDR commercial

- SRAMs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms: 2017, 406: 443-448.
- [8] B. YE, J. LIU, T. WANG, T. LIU, J. LUO, B. WANG, Y. YIN, **Q. JI**, P. HU AND Y. SUN. Impact of energy straggle on proton-induced single event upset test in a 65-nm SRAM cell[J]. Chinese Physics B.