

韩云昊, 罗尹虹, 陈伟, 等. 基于 12 nm FinFET 器件的可变 LET 值重离子单粒子效应实验方法研究[J]. 现代应用物理, 2025, 16(5): 050601. (HAN Yunhao, LUO Yinhong, CHEN Wei, et al. Research on experimental method of variable LET of heavy-ion single event effect in 12 nm finfet SRAM[J]. Modern Applied Physics, 2025, 16(5): 050601.)

基于 12 nm FinFET 器件的可变 LET 值重离子单粒子效应实验方法研究

韩云昊¹, 罗尹虹², 陈伟², 张凤祁², 汤晓斌^{1†}, 郝培培², 陈飞达¹

(1. 南京航空航天大学 核科学与技术系, 南京 211106;
2. 强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 西安 710024)

摘要: 倒封装技术的发展对器件重离子单粒子效应实验技术提出了新的要求。本文提出了一种基于重离子在 Si 中的布拉格曲线与等效因子计算的可变线性能量转移(LET)实验方法, 建立了降能片厚度与 Si 衬底内布拉格峰位移之间的等效关系, 实现了在单一离子种类和能量条件下, 器件灵敏区多个有效 LET 值的快速改变和精确获取。利用哈尔滨工业大学空间地面模拟装置提供的 Ar 离子, 基于 12 nm FinFET 型 SRAM 开展可变 LET 值重离子单粒子效应实验方法的验证, 并结合 Kr 离子实验数据拟合获得器件单粒子翻转截面曲线, 为准确评价倒装器件抗单粒子性能提供了一种有效的实验手段。

关键词: 重离子; 单粒子翻转; FinFET; 可变 LET 值; 布拉格曲线

中图分类号: TL81; TN386 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12061/j.issn.2095-6223.202501014

Research on Experimental Method of Variable LET of Heavy-Ion Single Event Effect in 12 nm FinFET SRAM

HAN Yunhao¹, LUO Yinhong², CHEN Wei², ZHANG Fengqi²,
TANG Xiaobin¹, HAO Peipei², CHEN Feida¹

(1. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronaut, Nanjing 211106, China;
2. National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Xi'an 710024, China)

Abstract: The evolution of flip-chip packaging technology has raised new requirements for heavy-ion single event effect (SEE) experimental techniques in devices. This paper presents a variable LET method that established an equivalence between the Bragg peak displacement within the silicon substrate and variation of degrader thickness, based on Bragg curve and equivalent factor calculations. This method facilitates rapid adjustment and precise acquisition of multiple effective LET values in the sensitive volume of devices under the condition of single ion species and energy. Variable LET method of heavy-ion single event effect on 12 nm FinFET SRAM is validated using Ar ions supplied by the Space Environment Simulation and Research Infrastructure (SESRI) in Harbin Institute of Technology. The Weibull fitting

收稿日期: 2025-01-21; 修回日期: 2025-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12375275,12405319)

作者简介: 韩云昊(1998—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事辐照效应领域研究。

E-mail: 1085654139@qq.com

† 通信作者: 汤晓斌(1978—), 男, 江苏常州人, 教授, 博士, 主要从事核技术应用与防护领域研究。

E-mail: tangxiaobin@nuaa.edu.cn

curve of heavy ion single event upset (SEU) cross-section is derived by combing with Kr ion experimental data at higher LET. An effective experimental approach is offered for accurately assessing the device's resistance to SEE, further enhancing the experimental efficiency of radiation performance evaluation.

Keywords: heavy-ion; single event upset; FinFET; variable LET; Bragg curve

空间辐射环境下,重离子和质子是造成器件单粒子效应的主要原因^[1-3]。重离子主要通过直接电离的方式在器件中沉积能量,引发器件发生单粒子翻转、锁定、栅穿、烧毁等效应,严重影响航天器在轨可靠性和寿命^[4-5]。随着半导体技术的发展,鳍式场效应晶体管(fin field-effect transistor, FinFET)成为特征尺寸缩短至 28 nm 以下时,克服短沟道效应的有效解决方案,然而特征尺寸的减小使得单粒子效应对 FinFET 器件影响愈发显著^[6-7]。基于 FinFET 的现代集成电路(integrated circuit, IC)为追求更高的集成度多采用倒封装技术^[8],采用倒装封装方式的芯片,衬底在最上方,金属布线层在衬底之下,电路层通过焊锡凸点的形式与 PCB 板进行连接,在相同芯片面积下可以布置更多的 I/O 端口^[9]。

新型倒封装器件对重离子单粒子效应实验提出了更高的要求^[10]。理想状态下,单粒子效应实验是基于足够穿透倒装芯片硅衬底的高能重离子进行测试^[11],然而,目前国内大部分重离子加速器能量较低,射程低于芯片衬底厚度,难以在器件敏感区沉积有效能量^[12-14]。解决重离子射程不足的方法之一是对待测器件(device under test, DUT)进行衬底减薄处理,但对于重离子实验而言,一方面,通过物理研磨、化学蚀刻等方式对芯片进行减薄风险较大,极易损伤芯片导致功能异常;另一方面,衬底减薄精度易受加工工艺、操作人员技术影响,此外不同批次之间的芯片衬底厚度也会存在差异,准确获取器件的衬底信息需要破坏芯片进行纵切^[15]。另一种方法是利用射程充足的超高能重离子进行实验^[16-17],但超高能重离子实验周期往往较长,在一个周期内仅提供单一类型、单一能量的重离子。准确的单粒子翻转(single event upset, SEU)截面曲线获取一般要求至少 5 个线性能量转移(linear energy transfer, LET)数据点进行威布尔拟合,完整评估芯片抗辐照性能需要依赖地面加速器多次模拟实验。

为充分利用超高能重离子,发挥其能量高、射程长的优势,本文提出了一种重离子可变 LET 值实验方法,旨在实现单个实验周期内尽可能获取多个 LET 值下的测试数据。本文详细介绍了该方法的原理及设计,并将其应用于 12 nm FinFET 型 SRAM 器件的重离

子单粒子翻转实验中,实验数据处理分析过程中考虑了相关因素的影响,实验结果验证了可变 LET 值方法的有效性。

1 可变 LET 实验方法

SRAM 器件对 SEU 的敏感性可用 SEU 截面表示,重离子 SEU 截面 σ 表示为

$$\sigma = \frac{N_{\text{event}}}{\Phi \times N_{\text{bit}}} \quad (1)$$

其中: N_{event} 为发生 SEU 的存储单元总数; Φ 为总注量; N_{bit} 为 SRAM 容量。

SEU 的发生与重离子在敏感区的能量沉积密切相关,LET 是描述能量沉积的标准度量,随着入射重离子与器件材料相互作用损失能量,器件不同深度对应的 LET 不同。布拉格曲线可用来描述重离子在材料中的有效 LET 值随入射深度的变化,随着重离子在材料中入射深度逐渐增加,LET 逐渐增大,在接近射程末端达到最大值,LET 值在布拉格曲线最大的位置处称为布拉格峰。蒙特卡罗计算方法可以用来模拟离子与器件材料相互作用过程,TRIM 是蒙特卡罗计算程序之一,广泛用于分析离子在材料中能量损失的过程。TRIM 能够计算离子与材料随机碰撞产生的能量变化,并给出平均 LET 随离子入射深度分布的函数^[18-20]。通过 TRIM 模拟可得到重离子穿过不同厚度降能片后对应的布拉格曲线。

Ar 离子穿过不同厚度 Al 降能片后在硅衬底中的布拉格曲线如图 1 所示。由图 1 可见:在重离子穿透能力足够强的情况下,在器件前插入一定厚度的降能片可以改变重离子的射程;改变降能片的厚度不会改变布拉格曲线的形状,仅会影响布拉格峰对应的入射深度。改变降能片的厚度也会改变器件敏感区处对应的 LET^[21]。通过比较重离子在 Si 中的有效 LET 值随穿透深度的布拉格曲线与加入一定厚度降能片后重离子在 Si 中的有效 LET 值随穿透深度的布拉格曲线,计算相同能损时每单位厚度降能片在 Si 中的等效深度,能够建立降能片厚度与 DUT 敏感区 LET 之间的关系。以布拉格峰为参考,仿真计算降能片厚度为 d_m 时,重离子穿过降能片后在 Si 中的布拉格曲线,记

下此时布拉格峰对应的入射深度 p_m , 改变降能片厚度至 d_n , 记录此时布拉格峰的入射深度 p_n 。定义等效因子 β 为

$$\beta = \frac{p_m - p_n}{d_m - d_n} \quad (2)$$

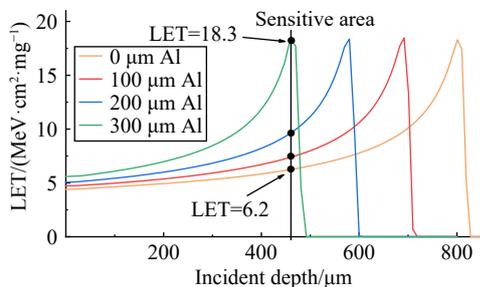


图 1 Ar 离子穿过不同厚度 Al 降能片后在硅衬底中的布拉格曲线

Fig.1 Bragg curve of Ar in Si after passing through Al degraders with different thicknesses

等效因子 β 的物理意义为单位降能片厚度改变引起的布拉格峰位移^[22]。实验前可通过 β 建立降能片厚度与器件敏感区 LET 的关系, 从而选择合适的降能片厚度进行测试, 实现实验过程中 LET 的快速切换与精确计算。可变 LET 方法通过切换降能片厚度使器件敏感区遍历整条布拉格曲线, 充分利用单一能量、单一类型重离子, 在单次实验中尽可能多的获得器件在不同 LET 下的单粒子效应截面。

2 重离子实验

2.1 重离子实验条件

重离子实验在哈尔滨工业大学空间地面模拟装置(Space environment simulation and research infrastructure, SESRI)的 300 MeV 质子重离子同步加速器单粒子效应实验终端进行。可变 LET 实验方法所使用的

重离子种类为 Ar 离子, 束流能量为 1 400 MeV, Ar 离子束在到达倒装器件衬底表面之前, 经过厚度为 10 μm 用于隔绝真空与空气的 Ti 膜及厚度为 6 cm 的空气, 在 Si 衬底中的有效射程约为 821 μm , 重离子束斑为直径 4 cm 的圆形。测试过程中, 离子束脉冲以 12 s 为周期垂直入射器件, 每个脉冲周期的前 3 s 引出重离子。为避免注量较高影响 SEU 的测量, 控制 SEU 发生的速率约为每脉冲 200~500 次事件。

2.2 待测器件

本次重离子实验待测器件(device under test, DUT)为 12 nm FinFET 型 SRAM, 可变 LET 实验方法要求重离子在穿过器件衬底后仍有较长的射程, 从而在可利用的布拉格曲线上有较宽的 LET 选择范围, 因此需对 DUT 进行开封及减薄处理。为保证减薄后器件工作的稳定性, 仅减薄 Si 衬底厚度至 100 μm 。Ar 离子束在穿过衬底后仍有较长的射程, 可变 LET 方法可在 4.65~18.3 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 范围内进行选择, 参考同类器件测试结果, 该 LET 范围处于 SEU 截面曲线上未到饱和区的快速变化部分, 有利于后续实验结果分析以及 SEU 截面曲线拟合。衬底减薄后芯片功能正常, 能够通过注错测试。DUT 存储容量为 8 Mb, 核心电路供电电压为 0.8 V, 频率设置为 469 MHz, 测试图形为标准棋盘形状 55/AA, 保证所有存储单元所存数据为“0”, “1”交替状态, 从而确保试验过程中不会出现误判, SRAM 芯片固定在系统板上, 通过与上位机交换数据实现存储信息变化的实时读取。

2.3 单粒子效应实验系统

可变 LET 实验方法单粒子效应实验系统由两台上位控制计算机、SRAM 系统板、步进机控制台、程控电源、可变 LET 实验装置及两台远程控制计算机组成, 测试系统结构如图 2 所示。每部分用途为: (1)上位控制计算机 C 控制程控电源以及向 SRAM 系统

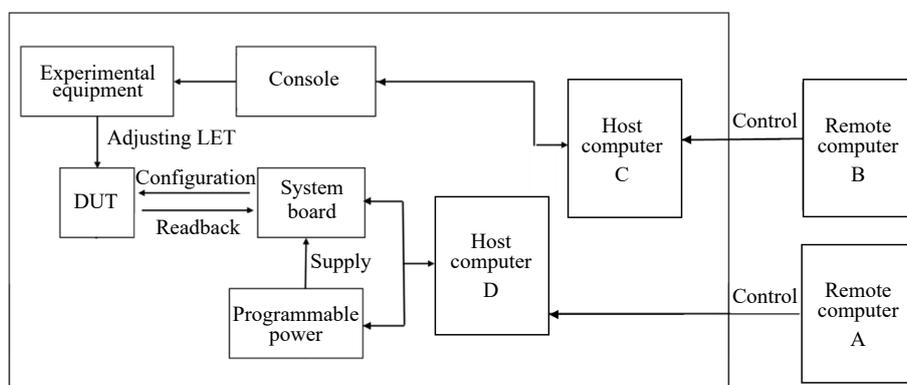
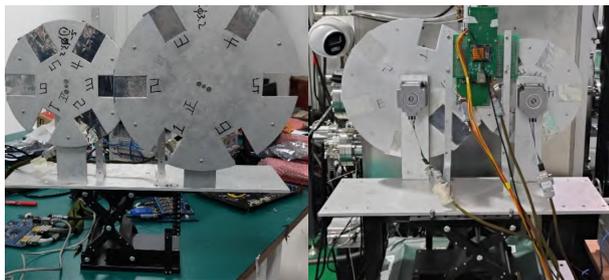


图 2 可变 LET 单粒子效应测试系统结构示意图

Fig.2 Variable LET experimental system for single event effects testing

板发送指令,上位控制计算机 D 控制步进电机控制台。(2)SRAM 系统板接收上位计算机 A 的指令执行数据读写、注错测试等工作,并将芯片存储信息实时反馈给上位计算机 A。(3)步进机控制台接收上位计算机 B 的指令对实验装置中的 Al 降能片组合进行切换。(4)程控电源用于 SRAM 系统板供电以及监视 DUT 工作状态。(5)可变 LET 实验装置放置于重离子实验终端,实现对 DUT 以及降能片的固定。(6)远程计算机 A 与 B 置于辐照室外,分别对上位控制计算机 C 与 D 进行远程控制。

重离子终端处的可变 LET 实验装置由底座、器件支架、转机支架、前后交错的大小轮盘及控制轮盘旋转的步进电机组成,如图 3 所示。底座可升降调整高度,器件支架上有不同高度的插孔,孔位密集的面包板通过这些插孔调整高度并固定在器件支架上,调整 DUT 位置使其位于轮盘交界处的中心,大小轮盘各有编号 1~6 的插槽可插入不同厚度的 Al 降能片,通过步进电机控制轮盘旋转可切换不同 Al 降能片组合,实现在实验过程中方便快速地调整降能片厚度。



(a) Front view

(b) Back view

图 3 可变 LET 值方法实验装置

Fig.3 Experimental setup for the variable LET method

依据式(2),本次实验中 $\beta=1.132$,通过 β 确定 Ar 离子实验中 Al 降能片厚度的变化步长 Δt , Δt 的改变应尽可能使 LET 测试点细致且均匀地分布在整条布拉格曲线。综合考虑芯片性能、实验环境后,实验中采用前轮粗调、后轮细调的方式切换降能片:前轮插槽安装厚度为 $102 \mu\text{m}$ 的 Al 箔,后轮插槽安装厚度为 $20 \mu\text{m}$ 的 Al 箔,单个插槽内可多张 Al 箔叠加以增加厚度。通过 TRIM 仿真计算衬底厚度为 $100 \mu\text{m}$ 时 DUT 敏感区对应的 LET,实验过程中采用的 Al 降能片组合及对应的 LET 如表 1 所列。

实验过程中 Al 降能片组合从最厚厚度 $652 \mu\text{m}$ 开始逐渐向 0 厚度改变,重离子在硅中的布拉格峰逐渐从 DUT 表面向灵敏区移动,检测每一个组合 Al 降能片厚度对应的 SEU 截面,SEU 截面与 LET 正相关,SEU

截面最大时视为器件敏感区位于布拉格峰值处。以布拉格峰值对应入射深度为参考,通过计算重离子布拉格峰在器件硅中移动的等效深度 $\beta \cdot \Delta t$,即布拉格峰距离器件灵敏区的相对距离,确定下一 Al 降能片厚度在布拉格曲线上对应的 LET 值。重复此过程,重离子布拉格峰不断向器件深处移动,器件灵敏区处的 LET 值不断减小,SEU 逐渐降低,直到 DUT 不出现单粒子效应或所有组合均测试完毕。

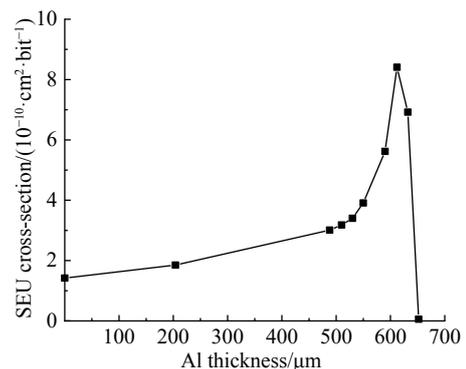
表 1 不同 Al 降能片组合及厚度下对应的 LET 值

Tab.1 Simulated LET for different Al degrader combinations and thicknesses

Degrader combination	Thickness/ μm	Simulated LET/ ($\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$)
1&1	0	4.6
2&1	204	5.5
3&4	488	8.8
4&0	510	9.4
4&1	530	10.1
4&2	550	11.0
4&4	590	14.0
5&0	612	17.1
5&1	632	10.5
5&2	652	3.2×10^{-5}

3 可变 LET 值方法重离子实验结果

不同厚度 Al 降能片对应的 12 nm FinFET SRAM 器件 SEU 截面如图 4 所示。

图 4 不同厚度降能片对应的 12 nm FinFET SRAM 器件 SEU 截面Fig.4 SEU cross-section corresponding with Al degrader of different thicknesses in 12 nm FinFET SRAM

由图 4 可见:SEU 截面在降能片厚度为 $612 \mu\text{m}$ 时达到最大,符合表 1 中计算得到的 LET 值;但在 $632 \mu\text{m}$ 处,SEU 截面不符合计算的 LET 值变化规律。根据降

能片厚度 632 μm 处的 SEU 截面实验数据,推断对应的 LET 值应介于 590~612 μm 对应的 LET 之间,而计算得到的 632 μm 对应 LET 值低于 590 μm 对应的 LET 值,因此,需对偏差来源进行分析。

3.1 倒装芯片衬底厚度修正

采用物理研磨方式对倒转芯片衬底进行减薄是参考加工商提供的技术手册中该类器件平均衬底厚度,计算向下研磨到目标衬底厚度时所需的减薄深度。然而即使是同一批次生产的芯片在制造过程中也会存在 0~10 μm 的固有偏差,此外对衬底加工的过程极易受到加工工艺与操作人员熟练度的影响,本次实验加工商提供的 100 μm 衬底厚度可能存在偏差,因此有必要对倒装芯片的衬底厚度进行修正。

依据厚度为 100 μm 的 Si 衬底仿真结果,在降能片厚度为 632 μm 对应的 LET 处在布拉格曲线尾端迅速下降的阶段, Si 衬底厚度应比 100 μm 略小,以使 632 μm 处的 LET 值向布拉格峰处靠拢。符合 SEU 截面变化规律的 Si 衬底厚度在 95.436~97.516 μm 之间,此厚度范围在布拉格峰之前对应的 LET 最大相对偏差仅为 1.75%。考虑到降能片厚度为 632 μm 对应的 SEU 截面位于 590 μm 与 612 μm 对应的 SEU 截面中值位置附近,因此 Si 衬底厚度取为 96.476 μm,为最大衬底厚度与最小衬底厚度的中值, Si 衬底厚度修正后,重离子的 LET 在布拉格曲线上的分布如图 5 所示。

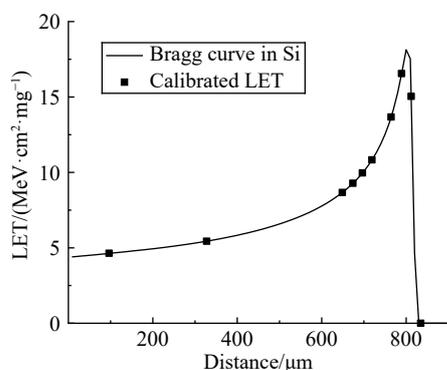


图 5 校准后 LET 值在 Bragg 曲线上的分布

Fig.5 Distribution of calibrated LET (Si) on Bragg curve

3.2 粒子注量校准

重离子束在穿过 Al 降能片后会有一定程度的散射,使得到达 DUT 表面的实际注量产生损失,为校准重离子出束口注量与到达器件表面实际注量之间的差异,利用 TRIM 对实验现场环境进行仿真。通过调整 TRIM 输入文件在重离子束出束位置生成数量为 629 300 的 Ar 离子,初始 Ar 离子被限制在直径为 4 cm 的圆内,符合实际束斑大小。数量众多且随机生成的

出射粒子可以认为在圆内均匀分布,此时放射源出束口注量为 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 。DUT 实现存储数据部分的功能电路范围仅为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$ 的正方形。TRIM 通过设置输出文件统计每个粒子的径迹并统计粒子落点,统计输出文件中落到 DUT 功能电路范围内的粒子数量。比例因子 R 定义为器件实际注量与束流注量比值,表示为

$$R = \frac{N_{\text{DUT}}}{S_{\text{DUT}}} \bigg/ \frac{N_{\text{beam}}}{S_{\text{beam}}} \quad (3)$$

其中: N_{DUT} 与 N_{beam} 分别为到达器件表面的 Ar 离子总数及束流出口总出射 Ar 离子总数; S_{DUT} 与 S_{beam} 分别为 DUT 功能电路面积及束斑面积。

由式(3)可得到不同厚度 Al 降能片下的 R 值,并据此对图 4 中 SEU 截面进行了修正,结果如表 2 所列。由于本实验中 DUT 功能电路面积较小且位于出束口射束方向的中心线上,既存在粒子散射出器件范围的情况,也存在原本在器件范围外的粒子散射进器件范围内的情况,比例因子 R 基本不变,因此实际注量和 SEU 截面变化不大。

表 2 使用注量因子对 SEU 截面修正的结果

Tab. 2 Result of calibrating the SEU cross-section using R

Thickness/μm	R	SEU cross-section / ($10^{-10} \text{ cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$)
0	1.022 4	1.39
204	1.028 9	1.80
488	1.000 2	3.01
510	1.016 5	3.13
530	1.018 6	3.34
550	1.023 3	3.82
590	1.019 5	5.51
612	1.024 8	8.21

除基于 FinFET 器件的小尺寸 SRAM 芯片外,目前如芯片面积较大的 SOC、ASIC 等芯片同样是单粒子效应测试的重点。假设存在一块尺寸为 $3.5 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ 的 DUT,在本次实验环境中,经仿真计算得到厚度为 612 μm 的 Al 降能片对应的 R 值为 0.919。因此当待测器件面积较大时, DUT 表面实际注量因散射造成的损失不可忽略。

3.3 SEU 截面实验结果分析

在 Ar 离子实验中,对图 5 中布拉格峰左侧的 8 组 SEU 截面数据进行分析,得到的 SEU 截面总体仍呈现增加的趋势。基于可变 LET 值实验方法测得的 12 nm FinFET SRAM 重离子 SEU 截面曲线如图 6 所示。其中,左侧为 Ar 离子单粒子效应实验数据,当 LET 为 $4 \sim 18 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$ 时, SEU 截面未达饱和状

态。为准确拟合 SEU 截面数据得到截面曲线,追加较高 LET 的 Kr 离子实验,补充该 DUT 临近 SEU 饱和截面处的实验数据, Kr 离子单粒子效应实验仍在 SESRI 上进行,束流能量为 1 300 MeV,通过 SRIM 仿真得到 Kr 离子测试点的 LET 值为 39.0, 40.3 MeV·cm²·mg⁻¹。

根据 Ar, Kr 离子单粒子效应实验数据,基于威布尔函数拟合的 SEU 截面曲线如图 6 中红色曲线所示。拟合参数表明, 12 nm FinFET 型 SRAM 的 SEU 阈值约为 0.1 MeV·cm²·mg⁻¹, SEU 饱和截面约为 2×10⁻⁸ cm²·bit⁻¹。

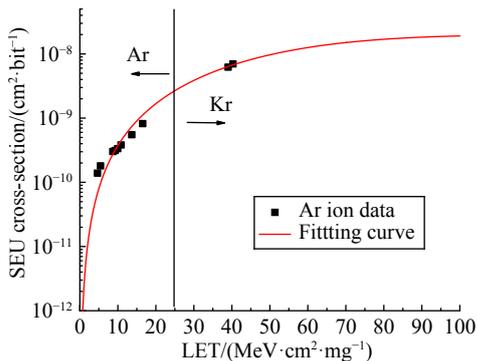


图 6 基于可变 LET 值实验方法测得的 12 nm FinFET SRAM 重离子 SEU 截面曲线

Fig.6 SEU cross-section curve of 12 nm FinFET SRAM determined by variable LET method

通过可变 LET 方法实现了 SEU 截面曲线拐点处数据的大量获取,有效增强了重离子威布尔函数拟合器件单粒子翻转截面曲线的精度,为准确评价倒装器件抗单粒子性能,准确预估在轨错误率提供了基础数据。

倒装器件的衬底减薄极易影响器件本身的稳定性,对于超高能重离子,利用可变 LET 方法可以有效避免对倒装器件的损伤加工。国内兰州近代物理研究所在建的强流重离子加速器装置(high intensity heavy-ion accelerator facility, HIAF),计划建成后可提供能量为 500 MeV/u 的超高能 Bi 离子,其在 Si 中射程约为 20 mm,针对不开封倒装器件或 3D 堆叠器件,其布拉格曲线可选 LET 值约为 16~99 MeV·cm²·mg⁻¹。一方面,对于拥有复杂结构的器件,通过可变 LET 实验方法可以确定灵敏区在等效 Si 衬底中的深度而无需进行开封或破坏性纵切。另一方面,利用可变 LET 方法在快速切换、精确获取器件灵敏区 LET 值的优势,仅需选用 Ar 离子和 Bi 离子两种超高能重离子,即可完成 1~99 MeV·cm²·mg⁻¹ 范围内器件单粒子效应截面数据的测试,从而满足大部分器件重离子单粒子效应实验需求。

4 总结

本文利用哈尔滨工业大学的 SESRI 完成了重离子可变 LET 值方法单粒子效应实验。通过 Ar 离子实验,验证了应用可变 LET 值方法可在实验中快速调整和精确获取倒装器件敏感区处 LET 值,实现了在单一离子种类和能量条件下,器件多个有效 LET 值单粒子翻转截面的测量。同时明确了实验中器件衬底厚度及束流注量校准方法,结合较高 LET 值时的 Kr 离子实验数据,拟合得到 LET 为 0.1~80 MeV·cm²·mg⁻¹ 范围内器件的 SEU 截面曲线,为实现该类器件抗单粒子性能准确评估提供了有效的实验手段。目前,仅针对 FinFET 器件 SEU 开展了实验技术研究,未来可将该方法应用在超高能重离子实验,对各结构类型器件单粒子功能中断和单粒子锁定等效应进行测试。

参考文献

- [1] NASA. Fermi's decade of gamma-ray discoveries[Z/OL]. [2024-12-20]. <https://fermi.gsfc.nasa.gov>.
- [2] NASA/GSFC. Radiation effects & analysis[Z/OL]. [2024-12-20]. <https://radhome.gsfc.nasa.gov>.
- [3] NASA.STEREO [Z/OL]. [2024-12-20]. <https://stereo.gsfc.nasa.gov>.
- [4] LI Z Z, LIU J, ZHAI P F, et al. Latent reliability degradation of ultrathin amorphous HfO₂ dielectric after heavy ion irradiation: The impact of nano-crystallization[J]. IEEE Electr Dev Lett, 2019, 40(10): 1 634 - 1 637.
- [5] CONLEY J F, SUEHLE J S, JOHNSTON A H, et al. Heavy-ion-induced soft breakdown of thin gate oxides[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48(6): 1 913 - 1 916.
- [6] MASSENGILL L W, BHUVA B L, HOLMAN W T, et al. Technology scaling and soft error reliability[C]//IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Anaheim, CA, USA: 2012.
- [7] PASCARIU G, CRONIN P, CROWLEY D. Next generation electronics packaging utilizing flip chip technology[C]//IEEE/CPMT/SEMI 28th International Electronics Manufacturing Technology Symposium, San Jose, CA, USA: 2003.
- [8] DODD P E, SHANEYFELT M R, SCHWANK J R, et al. Current and future challenges in radiation effects on CMOS electronics[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2010, 57(4): 1 747 - 1 763.
- [9] 高翔. 倒装芯片封装和三维封装硅通孔可靠性研究[D]. 华中科技大学, 2014. (GAO Xiang. Research on reliability for flip-chip package and through silicon via (TSV) in 3D package[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014.)
- [10] 陈伟, 唐民, 郭晓强, 等. 宇航器件空间辐射效应地面模拟试验与评估标准规范体系[J]. 现代应用物理, 2020, 11(2): 020101. (CHEN Wei, TANG Min, GUO Xiaoqiang, et al. System of standard specification in space radiation effects test and evaluation for aerospace electronics[J]. Modern Applied Physics, 2020, 11(2): 020101.)
- [11] Advancing Standards Transforming Market. Standard guide for the

- measurement of single event phenomena (SEP) induced by heavy ion irradiation of semiconductor devices: ASTM F1192[R/OL]. [2024-06-06]. <https://store.astm.org/f1192-11r18.html>.
- [12] 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, 2015, 61(4/5): 467 – 477. (XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, et al. Heavy ions research facility in Lanzhou (HIRFL)[J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 61(4/5): 467 – 477.)
- [13] 沈东军, 范辉, 郭刚, 等. 欧空局单粒子监督器在北京 HI-13 串列加速器上的单粒子效应校核实验[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(3): 555 – 560. (SHEN Dongjun, FAN Hui, GUO Gang, et al. Single event effect calibration experiment with ESA single event upset monitor on Beijing HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(3): 555 – 560.)
- [14] 朱升云, 郭刚, 何明, 等. HI-13 串列加速器核物理应用研究发展现状和展望[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(S1): 1 – 16. (ZHU Shengyun, GUO Gang, HE Ming, et al. Present status and future prospect of applied nuclear physics research at HI-13 tandem accelerator[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(S1): 1 – 16.)
- [15] REDDELL B D, BAILEY C R, O'NEILL P M, et al. Compendium of single event effects test results for commercial-off-the-shelf and standard electronics for low earth orbit and deep space applications[C]//IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), New Orleans, LA, USA: 2017.
- [16] GSI. GSI helmholtzzentrum für cchwerionenforschung[Z/OL]. [2018-05-08]. https://www.gsi.de/en/start/gsi_helmholtzzentrum_fuer_schwerionenforschung.
- [17] NASA Space Radiation Laboratory. NSRL user guide: Biology experiments[Z/OL]. [2018-05-10]. <https://www.bnl.gov/nsrl/userguide/beam-ion-species-andenergies.php>.
- [18] ZIEGLER J F. SRIM-The stopping and range of ions in matter[Z/OL]. [2024-12-20]. <http://www.srim.org>.
- [19] ZIEGLER J F, BIERSACK J P. The stopping and range of ions in solids[C]//Fourth International Conference on Ion Implantation: Equipment and Techniques, Berchtesgaden, Germany: 1982.
- [20] BROMLEY D A. Treatise on Heavy-Ion Science[M]. Boston, MA: Springer, 1985.
- [21] FOSTER C C, O'NEILL P M, REDDEL B D, et al. Certification of parts for space with the variable depth Bragg peak method[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2012, 59(6): 2 909 – 2 913.
- [22] BUCHNER S, KANYOGORO N, MCMORROW D, et al. Variable depth Bragg peak method for single event effects testing[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 2011, 58(6): 2 976 – 2 982.