

欧空局监测器单粒子翻转能量和角度相关性

罗尹虹 郭晓强 陈伟 郭刚 范辉

Energy and angular dependence of single event upsets in ESA SEU Monitor

Luo Yin-Hong Guo Xiao-Qiang Chen Wei Guo Gang Fan Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 206103 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.206103

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.206103>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纳米静态随机存储器质子单粒子多位翻转角度相关性研究

[Angular dependence of proton single event multiple-cell upsets in nanometer SRAM](#)

物理学报.2015, 64(21): 216103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216103>

Cu 对用于高速相变存储器的 Sb_2Te 薄膜的结构及相变的影响研究

[Effect of Cu on the structure and phase-change characteristics of \$\text{Sb}_2\text{Te}\$ film for high-speed phase change random access memory](#)

物理学报.2015, 64(15): 156102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.156102>

应用于相变存储器的 $\text{Cu-Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 薄膜的结构及相变特性研究

[Structure and phase change in \$\text{Cu-Ge}_3\text{Sb}_2\text{Te}_5\$ films for use in phase change random access memory](#)

物理学报.2015, 64(1): 016103 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.016103>

生长条件对脉冲激光沉积制备 ZnO:Al 薄膜光电性能的影响

[Influence of the growth conditions on the transparent conductive properties of \$\text{ZnO:Al}\$ thin films grown by pulsed laser deposition](#)

物理学报.2013, 62(21): 216102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.216102>

低温下二硫化钼电子迁移率研究

[Investigation on mobility of single-layer \$\text{MoS}_2\$ at low temperature](#)

物理学报.2013, 62(20): 206101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.206101>

欧空局监测器单粒子翻转能量和角度相关性

罗尹虹^{1)†} 郭晓强¹⁾ 陈伟¹⁾ 郭刚²⁾ 范辉²⁾

1) (西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

2) (中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(2016年6月20日收到; 2016年7月24日收到修改稿)

结合欧空局推广需求, 以及国内加速器和国际加速器比对的愿望, 将欧空局单粒子翻转监测器 (Europe space agency single event upset monitor, ESA SEU Monitor) 成功应用于国内串行重离子加速器束流标定. 通过和欧洲主要加速器的数据结果进行比对, 分析系统内部单粒子翻转物理位图, 验证了串行加速器在重离子束流监测技术方面的准确性. 结合多方试验数据, 观察到在低 LET (linear energy transfer) 单粒子翻转截面曲线亚阈值, 相同 LET 值不同能量重离子引起 ESA SEU Monitor 翻转截面相差 1—3 个量级. 采用基于试验数据的方法, 确定了器件灵敏体积的几何尺寸、临界电荷以及收集效率, 通过蒙特卡罗仿真揭示了 ESA SEU Monitor 单粒子翻转能量相关性的物理机理. 同时针对试验中低 LET 值倾斜角度时, ESA SEU Monitor 存储阵列中不同模块单粒子翻转所表现的敏感性差异, 基于对器件结构的分析和计算验证, 表明低 LET 重离子倾斜入射时, 离子穿过不同模块灵敏区上方层间介质的差异是引起单粒子翻转角度相关性的根本原因.

关键词: ESA SEU Monitor, 单粒子翻转, 能量相关性, 角度相关性

PACS: 61.82.Fk, 24.10.Lx, 95.75.-z, 14.20.Dh

DOI: 10.7498/aps.65.206103

1 引言

在单粒子效应试验中有时会出现试验数据异常的情况, 为避免用户方和束流方由于责任界定所引发的争执, 2005年欧空局建立了第一代以静态随机存储器 (static random access memory, SRAM) 为载体的单粒子翻转监测器^[1], 希望在加速器束流调试时可提供注量率、LET、能量、束斑均匀性等相关参数的有效验证, 为提高加速器性能和保障实验数据可靠性方面建立一种简便快捷可靠的技术手段. 通过单粒子效应试验对多款不同公司的 SRAM 芯片进行了筛选, 最终确定采用 Atmel 公司研制的抗辐射加固 4 Mbit SRAM 芯片 AT60142F 作为单粒子翻转监测器的主体. 选择该芯片的主要依据为: 一是常温重离子 LET 值 106 MeV·cm²/mg 时, 对该芯片进行动态和静态测试, 没有观察到单粒子锁定, 具有高的抗单粒子锁定能力; 二是芯片在累

积剂量 120 krad(Si) 时, 没有测试到对单粒子翻转截面的影响, 因此在这个剂量范围内, 可以无需考虑总剂量和单粒子的协和效应; 三是在填充不同测试图形时单粒子翻转截面是一致的, 0 到 1 和 1 到 0 的翻转具有相同的单粒子翻转敏感性; 四是其具有低的单粒子翻转阈值, 使得可以从低到高在很宽的重离子 LET 范围和质子能量范围对束流参数进行监测.

但由于该款芯片面积较小, 仅为 11 mm × 5.9 mm, 在检测束流光斑均匀性方面受到限制, 因此 2009 年欧空局研制了新一代单粒子翻转监测器 (ESA SEU Monitor)^[2], 该监测器是由 4 个 AT60142F 构成的多芯片模块 AT68188F, 芯片面积可达 19.5 mm × 19.5 mm, 更好地满足了束流监测的需求. 作为一个友好可靠的面向用户的束流监测系统, 该系统目前已广泛用于欧洲各大加速器, 积累了广泛的试验数据用作束流验证的基准参考^[1-3]. 用户方和束流方只需在束流状态调试完毕

† 通信作者. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn

后, 在进行器件单粒子效应试验前, 对该监测器进行先期的单粒子效应测试, 将测试的单粒子翻转截面数据和基准数据进行比对, 并查看单粒子翻转物理位图, 如果翻转截面数据一致且翻转均匀分布, 则表明该束流参数是可靠的.

该系统已成功开展了PROBA-II卫星的飞行搭载实验, 希望能进行更为广泛的推广, 成为一种国际通用的监测系统. 基于欧空局推广的需求, 以及国内加速器和国际加速器比对的愿望, 本文将该套监测系统首次引入并成功应用于国内重离子加速器束流标定, 验证了串行加速器在重离子束流监测方面技术的可靠性. 结合美国、欧洲、国内多台加速器开展的ESA SEU Monitor单粒子效应试验数据, 观察到在单粒子翻转截面曲线亚阈区时, 与国外高能重离子加速器相比, 相同LET值不同能量重离子引起SEU Monitor翻转截面相差1—3个量级的现象, 采用基于试验数据的方法构建了灵敏体积模型, 通过蒙特卡罗(以下简称蒙卡)仿真揭示了SEU Monitor能量相关性的物理机理. 同时针对试验中低LET值倾斜角度时, SEU Monitor存储阵列

中不同模块单粒子翻转所表现的灵敏性差异, 基于对器件结构的分析和计算验证, 分析了不同模块单粒子翻转角度相关性的根本原因.

2 试 验

2.1 ESA SEU Monitor组成

ESA SEU Monitor的监测单元是4个辐射加固的AT60142F构成的多芯片系统AT68188F, 工作电压3.3 V, 存储容量16 Mbit, 模块总面积 $19.5\text{ mm} \times 19.5\text{ mm}$, 见图1(a). AT60142F是一个低功耗SRAM芯片, 存储容量 $512\text{ k} \times 8\text{ bits}$ 共4 Mbit, 见图1(b). 芯片基于Atmel 0.25 μm 辐射加固CMOS工艺制备, 存储单元为6管结构, 单元面积 $9.76\text{ }\mu\text{m}^2$, 芯片面积 $11\text{ mm} \times 5.9\text{ mm}$. 为阻止MBU (multiple bit upsets) 即一个逻辑字里多位翻转的出现, AT60142F芯片采取了位交错的版图结构设计, 即512 k字的相同数据位布放在一个模块内, 共8块, 控制和电压调制模块位于AT60142F的下方中心位置, 见图1(c).

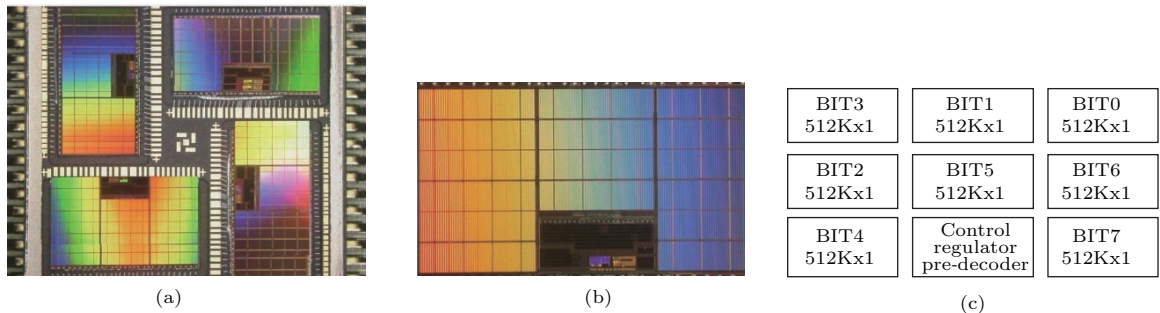


图1 (网刊彩色) ESA SEU Monitor探测单元 (a) AT68166F; (b) AT60142F; (c) AT60142F芯片8块示意图
Fig. 1. (color online) The photo of the detector element for ESA SEU Monitor: (a) AT68166F; (b) AT60142F; (c) schematic of AT60142F-8 block of $512\text{ k} \times 1$.

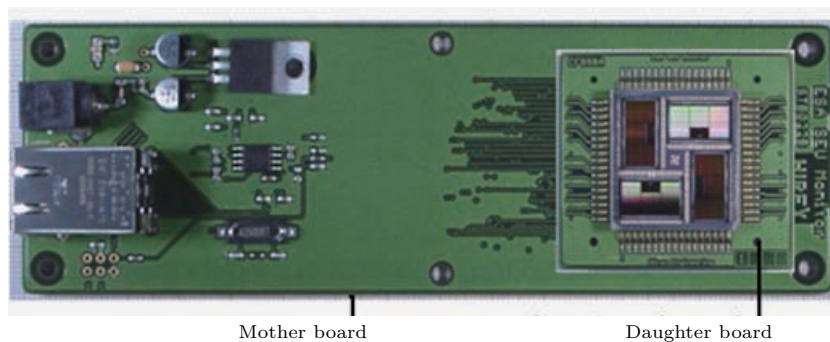


图2 (网刊彩色) ESA SEU Monitor实物图
Fig. 2. (color online) The photo of ESA SEU Monitor.

ESA SEU Monitor 设计简单, 由一块母板、一块子板、电源、以太网 TCP/IP 接口组成, 母版尺寸 15.5 cm × 5.2 cm, 见图 2. 主板上主要包括 1 片微控制器和 1 片 EEPROM, 为避免单粒子效应试验中散射离子对监测系统的影响, 与子板即监测单元之间的距离大于 5 cm; 上位机和监测器之间通过 TCP/IP 协议进行通信, 外部 220 V 电压通过电压转换芯片为监测器提供 3.3 V 的工作电压. 单粒子效应试验时, 监测单元处于静态工作模式, 即向 SRAM 写入指定测试图形, 辐照到指定注量后, 停止辐照, 对芯片进行回读, 统计发生翻转的数量和相应地址. 该监测器具备四种写入模式, 包括: 棋盘模式、反棋盘模式、全 0、全 1.

2.2 试验条件

ESA SEU Monitor 重离子单粒子效应试验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器单粒子效应专用辐照平台上开展, 表 1 给出了基于 ESA SEU Monitor 开展试验所选用的试验离子种类. 在每种离子下均进行了垂直入射和倾角入射试验, 倾角包括 45° 和 60° 两种情况, 以获得更高的有效 LET 值. 辐照时写入棋盘测试图形, 翻转数大于 100 或离子注量达到 $1 \times 10^7/\text{cm}^2$ 时则停止辐照, 记录翻转数并检测翻转位图.

表 1 重离子单粒子效应试验离子种类
Table 1. Ions used in heavy ion accelerator testing.

| Ion | Energy /MeV | LET /MeV·cm ² ·mg ⁻¹ | Range in silicon /μm |
|------------------|-------------|--|----------------------|
| ¹² C | 78.5 | 1.76 | 123.4 |
| ¹⁹ F | 117 | 4 | 90 |
| ³⁵ Cl | 157 | 13.16 | 45.1 |
| ⁶³ Cu | 200 | 32.5 | 31.5 |

3 试验结果与讨论

3.1 串列加速器束流验证

图 3 为基于串列加速器获取的 ESA SEU Monitor 重离子单粒子翻转截面试验结果, 将结果和监测器中作为基准数据的欧洲 RADEF、HIF 重离子加速器的试验数据进行了比对. 从图 3 中可以看出, 国内单粒子翻转截面试验结果与国外加速器试验结果具有很好的一致性, 进一步结合图 4 中 ESA SEU Monitor 在垂直入射条件下的单粒子翻转物理位图观察重离子束流光斑的均匀性. 图 4 中红色

代表单粒子翻转数高于平均翻转数, 蓝色代表单粒子翻转数低于平均翻转数, 可以看出, 红色在整个位图区域呈均匀分布, 而不是偏向区域的某一部分, 这表明重离子束流在该面积区域是均匀的, 试验验证了国内重离子加速器在重离子束流监测技术方面的可靠性.

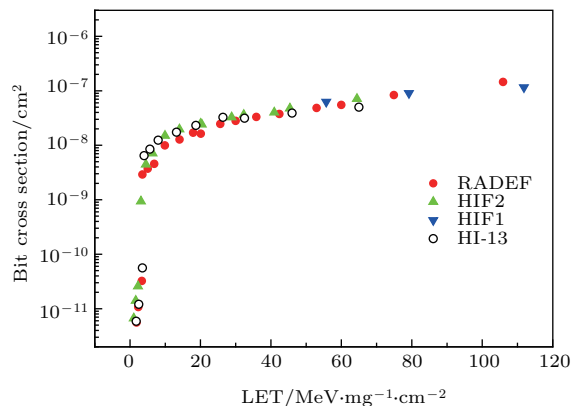


图 3 (网刊彩色) ESA SEU Monitor 国内 HI-13 与欧洲加速器重离子单粒子翻转截面比较

Fig. 3. (color online) Comparison of SEU cross sections from domestic HI-13 and European facilities in ESA SEU Monitor.

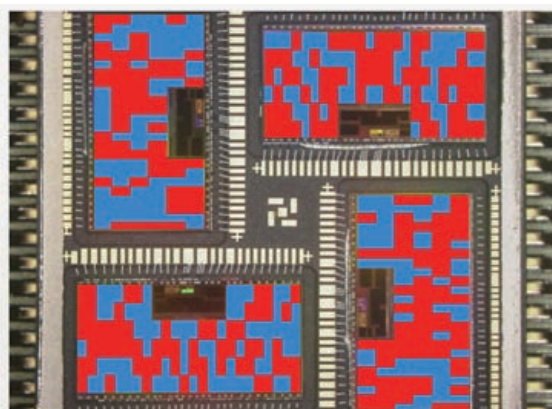


图 4 (网刊彩色) Cu 离子垂直入射 ESA SEU Monitor 单粒子翻转物理位图

Fig. 4. (color online) ESA SEU Monitor physical bitmap for Cu ion irradiation with normal incidence.

3.2 ESA SEU MONITR 单粒子翻转能量相关性

3.2.1 低 LET 值时单粒子翻转与重离子能量的相关性

随着 ESA SEU Monitor 逐渐得到广泛应用, 不断积累了国际上各大加速器的试验数据, 出现了一些新的效应现象引起了相关研究人员的关注, 即 ESA SEU Monitor 单粒子翻转截面曲线在单粒子翻转 LET 阈值以下呈现出能量相关性的特点,

见图5. 图5汇集了德国GSI^[4]、美国TAMU^[2]、芬兰RADEF^[1]以及国内HI-13串行加速器的试验数据,为了更好地观察LET阈值附近单粒子翻转的能量相关性,对X轴采用对数坐标绘制.其中GSI加速器重离子能量最高,每核子能量在50—1500 MeV之间,TAMU回旋加速器能量次之,约为每核子25 MeV,RADEF加速器能量接近每核子10 MeV,而国内HI-13加速器能量小于每核子10 MeV. ESA/SCC NO 25100单粒子效应试验方法和指南中^[5]定义单粒子效应饱和截面的1%所对应的LET值为器件效应阈值,因此ESA SEU Monitor的单粒子翻转阈值约为3—4 MeV·cm²/mg.从图5中可以看出,在LET阈值之上,不同能量重离子加速器单粒子翻转截面数据符合较好,但在阈值之下即单粒子翻转截面的亚阈区,不同能量加速器引起的单粒子翻转截面曲线相差最高可达3个数量级.其中TAMU单粒子翻转截面最大,GSI翻转截面最小,而RADEF和HI-13加速器在亚阈区翻转截面依然符合一致,处于中间.

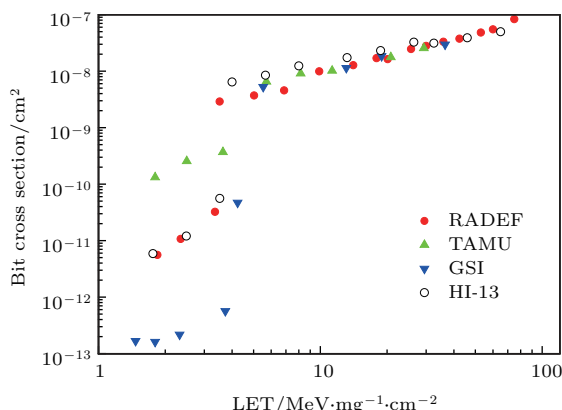


图5 (网刊彩色) ESA SEU Monitor 国际上不同加速器重离子单粒子翻转截面比较

Fig. 5. (color online) Comparison of SEU cross sections from different international facilities in ESA SEU Monitor.

3.2.2 ESA SEU Monitor 存储单元灵敏体积模型构建

为研究造成亚阈区单粒子翻转截面能量相关性的根本原因,我们采用基于蒙特卡罗方法开展仿真计算,对入射粒子在器件中的输运进行模拟,跟踪次级粒子,计算次级粒子在灵敏体积内的能量沉积,判断沉积能量产生的电荷量是否大于临界电荷,统计翻转数,计算过程中考虑多层金属互联对底层灵敏体积电荷收集的影响.器件灵敏体积的建立对于仿真结果的准确性非常重要,涉及几何尺寸

与临界电荷两个概念.针对器件灵敏体积几何尺寸和临界电荷大小无法定量的问题,采用文献^[6]中所报道的方法,基于试验数据来构建单元的灵敏体积模型.由于RADEF和HI-13试验结果是一致的,这里以RADEF重离子试验数据为基础进行威布尔拟合,拟合的LET阈值为3 MeV·cm²/mg.在拟合曲线上提取9个不同LET值点并获取对应的翻转截面,以此截面作为灵敏体积的表面积,灵敏体积的厚度从阱工艺中进行提取,为0.48 μm.依据相应的公式计算不同大小的灵敏体积所对应的收集效率,从而构建一组嵌套结构的灵敏体积模型,见图6.灵敏区上方为多层金属布线共4层,不同金属层之间用氧化层隔离,并用钨通孔进行连接,为研究高Z元素带来的影响,在最靠近灵敏区的位置布放了钨层,互联层总厚度6.7 μm.灵敏体积构建的原则和依据是:1)单粒子翻转截面的曲线形状是由单元内部不同部位电荷收集效率的差异所引起的,灵敏体积的表面积与重离子翻转截面直接相关;2)不同大小的灵敏体积居中排列,中心点一致,成嵌套结构;3)每个灵敏体积深度相同;4)所有灵敏体积对应收集效率总和为1.

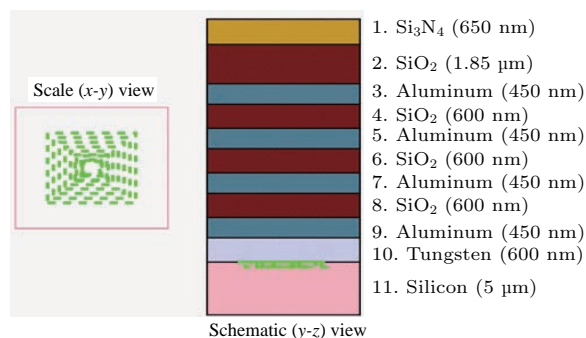


图6 (网刊彩色) ESA SEU Monitor 存储单元灵敏体积几何结构模型示意图

Fig. 6. (color online) Schematic of sensitive volume geometrical model of ESA SEU Monitor.

灵敏体积总的收集电荷表示为

$$Q_{\text{collect}} = \frac{1\text{pC}}{22.5\text{MeV}} \times \sum_{i=1}^9 (\alpha_i \times E_i), \quad (1)$$

其中 Q_{collect} 为灵敏体积总的收集电荷; E_i 为每个子灵敏体积所沉积的能量, α_i 为其相应的收集效率.

临界电荷和LET阈值的关系可以用下式进行表示:

$$Q_{\text{critical}}(\text{pC}) = 0.01035 \times \text{LET}_{\text{th}} \times D_{\text{SV}}(\mu\text{m}), \quad (2)$$

Q_{critical} 为灵敏体积发生单粒子翻转的临界电荷; LET_{th} 为单粒子翻转重离子 LET 阈值, D_{sv} 为灵敏体积的深度.

在灵敏体积几何模型构建的基础上, 首先基于 CREME-MC 计算不同 LET 值重离子直接电离所引起的单粒子翻转, 通过与试验数据进行比较, 验证模型构建的准确性, 并进一步确定灵敏体积的临界电荷值. 计算中用 10^6 个重离子垂直入射器件表面, 图 7 给出了 LET 分别为 3.5, 10, 30 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时所模拟的单粒子翻转截面与沉积能量的关系曲线. 当沉积能量为 0.338 MeV 时, 依据 (1) 式和 (2) 式计算可得对应的临界电荷为 15 fC, LET 阈值为 3 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 此时计算的单粒子翻转与图 8 中基于 RADEF 加速器重离子试验数据拟合的截面曲线符合度最高.

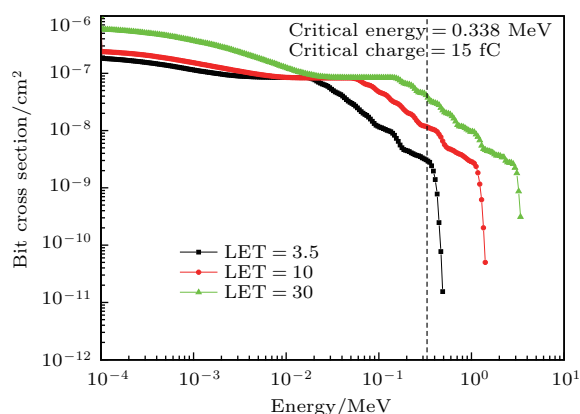


图 7 (网刊彩色) 模拟的不同 LET 值重离子单粒子翻转截面与沉积能量的关系曲线

Fig. 7. (color online) Simulated heavy ion single event upset cross section versus deposited energy.

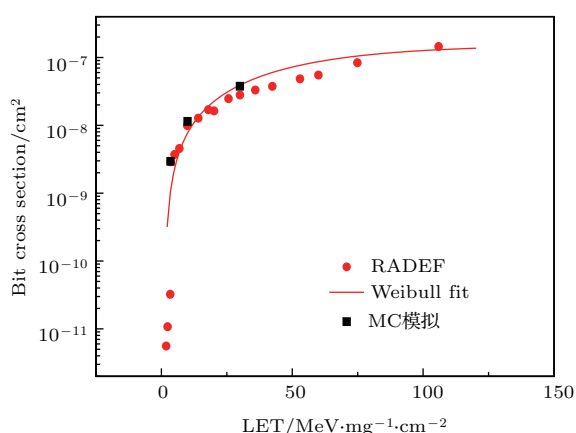


图 8 (网刊彩色) 基于 RADEF 加速器试验数据的威布尔拟合结果以及蒙特卡罗计算结果

Fig. 8. (color online) Weibull-fit result based on RADEF testing data and Monte Carlo calculation result.

3.2.3 单粒子翻转能量相关性的物理机理

当灵敏体积模型验证完毕, 基于 CREME-MC 对低 LET 值不同能量重离子计算重离子直接电离和核反应所引起的单粒子翻转, 揭示低 LET 值时不同能量重离子引起单粒子翻转截面差异的根本原因, 计算过程中考虑电磁散射、弹性碰撞、非弹性碰撞、屏蔽库仑散射等物理模型. 首先以 RADEF 加速器试验数据中 139 MeV N 离子为例, 其 LET 值 1.7 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 给出了在仅考虑直接电离和直接电离加核反应全过程两种物理模型下计算结果的比较, 见图 9, 图中虚线为灵敏体积发生单粒子翻转所对应的临界能量. 可以看出, 仅考虑重离子直接电离模型时, 由于其 LET 值低于 LET 阈值, 与核外电子发生非弹性碰撞, 通过直接电离沉积的能量最大不超过 0.2 MeV, 不足以达到灵敏体积发生单粒子翻转的临界能量 0.338 MeV. 因此图 5 中 139 MeV N 离子造成的单粒子翻转均来自于高能重离子与材料原子发生核反应产生的次级粒子, 这些次级粒子其 LET 值最高可达 14 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 可通过进一步电离沉积足够能量, 从而使本征 LET 值小于直接电离阈值的重离子也能引发单粒子翻转, 但由于核反应事件具有低的反应截面, 因此相应的单粒子翻转也具有低的截面.

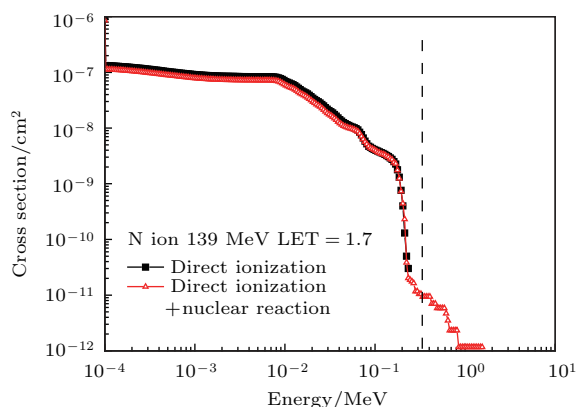


图 9 (网刊彩色) 139 MeV N 离子在两种物理模型下计算的单粒子翻转截面比较

Fig. 9. (color online) Comparison of simulated results with two kinds of physics models for 139 MeV N ion.

在以上计算的基础上, 图 10 给出了在考虑核反应物理模型下 LET 值 1.7 $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时三种能量重离子计算的单粒子翻转截面曲线的比较. 这三种能量分别为 RADEF 加速器 139 MeV N 离子, 与图 9 计算中采用的离子种类和能量一致, 每核子能量 9.3 MeV; TAMU 加速器 490 MeV Ne 离

子, 每核子能量 25 MeV; GSI 加速器 34 GeV Ni 离子, 每核子能量 586 MeV, 由于 HI-13 加速器试验结果和 RADEF 一致, 因此这里只对 RADEF 的离子开展了计算. 从图 10 中可以看出, 在临界能量 0.338 MeV 时, TAMU 的单粒子翻转截面最大, RADEF 次之, GSI 最小. 当每核子能量增大, 入射离子克服与材料原子之间的库仑势垒发生散裂核反应的截面也随之增大, 产生次级粒子的数量和能量也越大, 因此相比于 RADEF 加速器, TAMU 加速器重离子在低 LET 值时能够引起更高的翻转截面. 但随着核子能量增大到百 MeV 以上, 与灵敏体积上方的重金属材料 W 能够发生裂变反应, 虽然裂变反应会产生更高 LET 值的次级粒子, 但由于裂变反应相比于散裂反应, 其反应截面通常要低 1 个数量级以上, 因此相比于 TAMU 和 RADEF 加速器的入射离子, GSI 加速器产生的单粒子翻转截面最小.

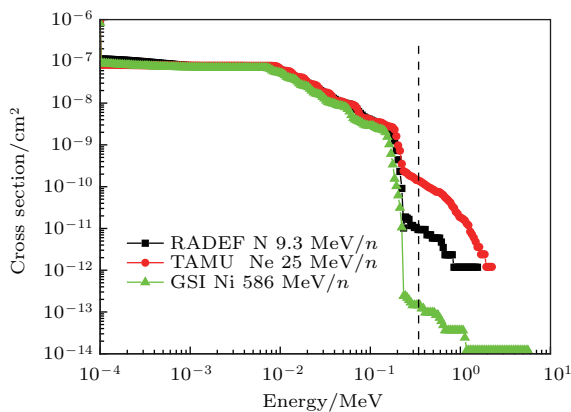


图 10 (网刊彩色) LET 1.7 MeV·cm²/mg 时三种能量重离子计算的单粒子翻转截面比较
Fig. 10. (color online) Comparison of SEU cross sections for three kinds of energy ions at LET 1.7 MeV·cm²/mg.

3.3 ESA SEU MONITR 单粒子翻转角度相关性

3.3.1 低 LET 值倾角入射时不同模块单粒子翻转差异

在数据分析的过程中, 发现了在低 LET 值倾斜角度入射条件下, 不同摆放方向的芯片单粒子翻转截面出现差异, 并随着 LET 的增加这种差异逐渐消失, 见图 11. 从图 11 (a) 和图 11 (b) 中可以看出, 在 C 离子、F 离子倾角入射时, 横向摆放的 Die1 和 Die2 芯片翻转数高于竖向摆放的 Die0 和 Die3 芯片, 当 LET 值增加到 13.16 MeV·cm²/mg, 见图 11 (c), 各芯片翻转数又如图 4 呈现均匀分布.

图 12 给出了 ESA SEU Monitor 非对称因子随有效 LET 的变化关系, 非对称因子定义为 Die1 和 Die2 的翻转数总和除以 Die0 和 Die3 的翻转数总和. 从图 12 中进一步可以看出, C 离子 60° 倾角入射时非对称因子最大, F 离子 60° 倾角入射时非对称因子已明显减小, Cl 离子 60° 倾角入射时非对称因子为 1, 即非对称分布消失. 对图 11 (a) 和图 11 (b) 中 Die1 和 Die2 各数据模块翻转数进行分析, 结合图 1 (c) 中数据模块的位置, 可以发现, 造成这种现象的原因主要来自于横向摆放的芯片中不同数据模块之间单粒子翻转的差异. 以图 11 (a) 中 Die2 为例, 结合图 1 (c) 可知, Die2 中 BIT1, BIT3, BIT5, BIT7 四个模块的单粒子翻转数分别为 195, 200, 205, 192, 远高于 BIT0, BIT2, BIT4, BIT6 四个模块的翻转数 29, 27, 25, 36. 由于 ESA SEU Monitor 试验中填充测试图形为棋盘模式, 即八个数据位的填充数据为 01010101, 因此 BIT1, BIT3, BIT5,

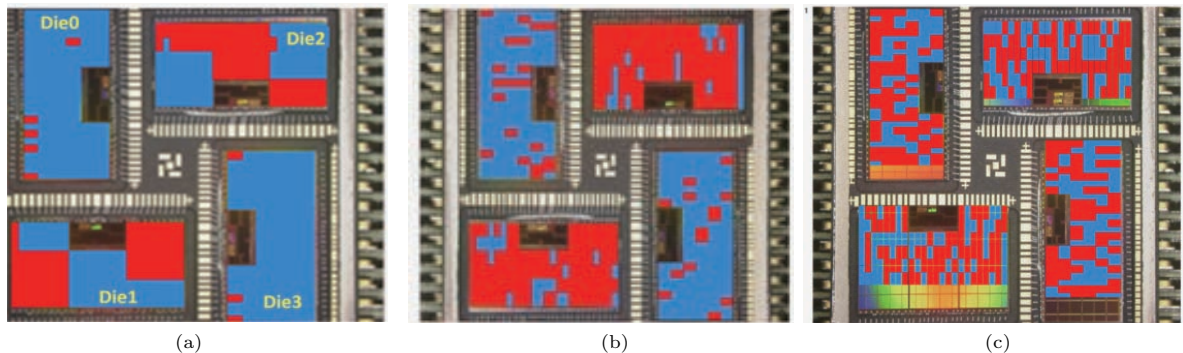


图 11 (网刊彩色) 不同离子在 60° 倾角入射时引起的单粒子翻转位图 (a) C 离子 LET 1.7; (b) F 离子 LET 4; (c) Cl 离子 LET 13.16
Fig. 11. (color online) SEU physical bitmap for different ions irradiation with the incidence angle of 60°: (a) C ion, LET 1.7; (b) F ion, LET 4; (c) Cl ion, LET 13.16.

BIT7四个模块填充数据均为0, 而BIT0, BIT2, BIT4, BIT6四个模块填充数据均为1, 则可知Die2中填充0的数据模块单粒子翻转敏感性高于填充1的数据模块.

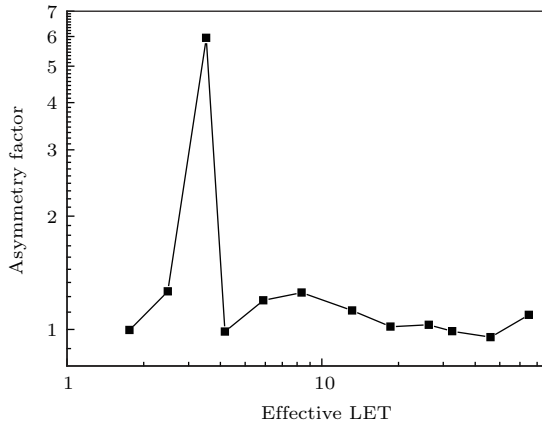


图12 ESA SEU Monitor 单粒子翻转非对称因子与有效LET的变化关系

Fig. 12. Asymmetry factor of single event upsets versus efficient LET in ESA SEU Monitor.

3.3.2 单粒子翻转角度相关性物理机理

下面对造成不同模块单粒子翻转灵敏性的差异进行分析. 已有文献[7]报道不同摆放方向的器件单粒子翻转会出现不同, 即沿着阱的方向倾角入射, 由于更容易引起电荷共享和触发双极放大机制, 造成的单粒子翻转数会多于横跨阱的方向. 但这种差异通常在高LET值时会更加明显并呈均匀分布, 与本文在低LET值更加敏感且芯片内部不同数据模块翻转差异的现象存在不同. 另一方面, 对于Die1和Die2来说两个芯片填充的是完全相同的测试图形, 如果上述机理[7]适用的话, 则Die1和Die2相同数据模块应具有相同的单粒子翻转敏感性, 但从图11(a)中可以看出, Die1和Die2的翻转敏感图形呈互补的状态, 因此可以确认由于阱方向带来电荷收集差异的机理在这里是不适用的. 由于Die1在与Die2填充相同测试图形时, 其BIT0, BIT2, BIT4, BIT6四个模块的单粒子翻转数远高于BIT1, BIT3, BIT5, BIT7四个模块, 与Die2芯片正好相反; 且两个芯片不同模块之间翻转数的差异均在低LET值时表现明显, 因此分析造成现象的机制是由于在低LET时重离子倾斜入射时, 到达不同模块单粒子翻转敏感区时上方层间介质存在差异, 从而引起到达敏感区的有效LET值不同, 导致单粒子翻转敏感性存在差异.

图13给出了ESA SEU Monitor存储单元版图示意图, 结合图6可以看出, 存储单元上方布放了6.7 μm多层金属, 共具有四层金属布线层, 金属层之间采用钨通孔进行互联. 不同存储单元之间通过STI氧化物隔离, 隔离区由于不是有源区, 其上方无钨通孔工艺. 当存储单元存1时, 图13左下方NMOS漏区是单粒子翻转最敏感区域, 当存储单元存0时, 右下方NMOS漏区是单粒子翻转最敏感区域. 图14给出了两个填充不同数据的存储单元单粒子翻转灵敏区示意图, 灵敏区上方黄色矩形为含钨的金属布线层. 从图14中可以看出, 当存储单元存1时, 重离子倾角入射到达单粒子翻转灵敏区时, 将穿过存储单元隔离区上方的金属互联层, 此时互联层中为不含钨的材料; 当存储单元存0时, 重离子倾角入射将穿过存储单元有源区上方的黄色金属层到达灵敏区, 此时互联层中含钨. 可见当填充不同数据时, 离子倾斜入射到达灵敏区所穿过的层间介质材料不同, 这对到达敏感区的重离子有效LET值的影响见图15.

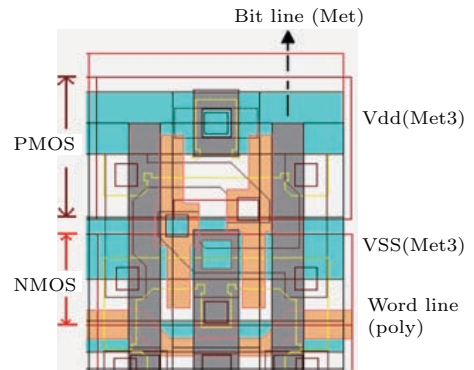


图13 (网刊彩色) ESA SEU Monitor 存储单元版图示意图

Fig. 13. (color online) Layout schematic of bit cell in ESA SEU Monitor.

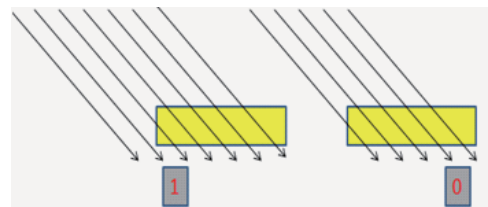


图14 填充不同数据时存储单元单粒子翻转敏感区示意图
Fig. 14. Schematic of bit cell sensitive area with different data.

图15计算了表1中78.5 MeV C离子穿过不同层间介质时LET值随穿透深度的变化, 竖直虚

线处为灵敏区位置。由图 15 可知, C 离子穿过含钨材料的互联层到达灵敏区后, 有效 LET 值为 $3.83 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 而穿过不含钨的互联层到达灵敏区时, 其有效 LET 为 $3.73 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 。虽然两种情况下有效 LET 值仅相差 $0.1 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$, 但从图 5 中 HI-13 单粒子翻转截面曲线与 LET 的关系可以看出, 在 LET 值处于 $3.52\text{--}4 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 之间时, 单粒子翻转截面曲线最为陡峭, 截面变化最为剧烈, 很小的 LET 值变化就能引起翻转截面大的改变, 因此导致 LET 值 $3.83 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时的翻转截面比 LET 值 $3.73 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 时高很多, 即导致 Die2 芯片中存 0 的数据模块翻转数远多于存 1 的数据模块。由于 Die1 芯片相对于 Die2 芯片是颠倒放置, 使得在填充相同数据时, 离子到达灵敏区时穿过的层间介质情况正好相反, 因此 Die1 芯片中存 1 的数据模块翻转更加敏感。随着离子 LET 值的增加, 从图 5 可知, 此时单粒子截面曲线逐渐趋于饱和, 虽然离子倾角入射时穿过不同层间介质时仍能引起 LET 值小的差异, 但是该差异所能引起的翻转截面变化将逐渐减弱, 直至消失。

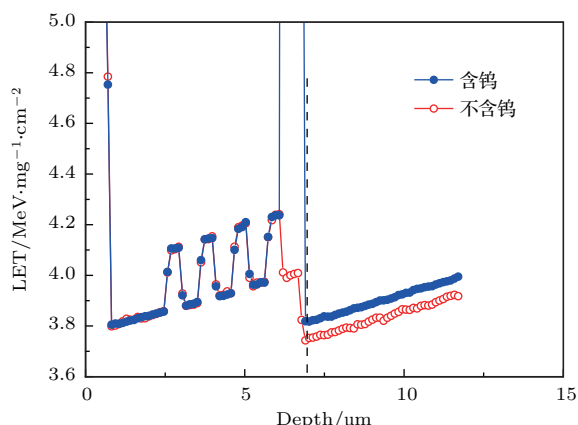


图 15 (网刊彩色) 78.5 MeV C 离子穿过不同层间介质时 LET 值随穿透深度的变化

Fig. 15. (color online) LET as a function of depth with 78.5 MeV C ion passing through different interlayer dielectric.

4 结 论

基于 ESA SEU Monitor 在保障束流可靠性方面的优势, 将 ESA SEU Monitor 应用于国产重离子加速器束流标定, 通过和欧洲主要加速器的单粒子翻转截面数据结果进行对比, 并结合系统内部单粒子翻转物理位图分析, 验证了串行加速器在重离

子束流监测方面技术的准确性, 也为欧空局积累了更为丰富的加速器实验数据。

针对 ESA SEU Monitor 单粒子翻转截面曲线在低 LET 值亚阈区时出现的能量相关性, 采用基于试验数据的方法构建了存储单元灵敏体积模型, 在此基础上, 揭示了在 LET 阈值以下的单粒子翻转均来自于高能重离子与材料原子发生核反应产生的次级粒子所引起的, 而不同能量重离子与材料原子反应类型、反应截面的差异是造成不同能量重离子单粒子翻转截面相差 1—3 个量级的原因。针对试验中低 LET 值倾斜角度时, SEU Monitor 存储阵列中不同模块单粒子翻转所表现的灵敏性差异, 在器件结构分析和计算验证的基础上, 表明在低 LET 时重离子倾斜入射到达不同模块单粒子翻转灵敏区时, 穿过的层间介质材料存在差异, 从而引起到达灵敏区的有效 LET 值不同, 导致不同模块单粒子翻转敏感性存在差异, 出现单粒子翻转的角度相关性。

在今后的工作中, 可进一步拓展 ESA SEU Monitor 在国内加速器探测器标定、束流调试、单粒子效应试验中的应用, 同时发展建立我国自主的单粒子翻转监测器。

参考文献

- [1] Harboe-Sørensen R, Guerre F X, Roseng A 2005 *Proc. RADECS* B3-1-B3-7
- [2] Harboe-Sørensen R, Poivey C, Fleurinck N, Puimege K, Zadeh A, Guerre F X, Lochon F, Kaddour M, Li L, Walter D, Keating A, Jaksic A, Poizat M 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 1001
- [3] Harboe-Sørensen R, Poivey C, Guerre F X, Roseng A, Lochon F, Berger G, Hajdas W, Virtanen A, Kettunen H, Duzellier S 2008 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **55** 3082
- [4] Hoeffgen S K, Durante M, Ferlet-Cavrois V, Harboe-Sørensen R, Lennartz W, Kuendgen T, Kuhnenn J, Latessa C, Mathes M, Menicucci A, Metzger S, Nieminen P, Pleskac R, Poivey C, Scharadt D, Weinand U 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 1161
- [5] Space Component Coordination Group 1995 *ESA/SCC Basic Specification* No. 25100
- [6] Warren K M, Weller R A, Sierawski B D, Reed R A, Mendenhall M H, Schrimph R D, Massengill L W, Porter M E, Wilkinson J D, Label K A, Adams J H 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 898
- [7] Luo Y H, Zhang F Q, Guo H X, Xiao Y, Zhao W, Ding L L, Wang Y M 2015 *J. Semicond.* **36** 114009

Energy and angular dependence of single event upsets in ESA SEU Monitor

Luo Yin-Hong^{1)†} Guo Xiao-Qiang¹⁾ Chen Wei¹⁾ Guo Gang²⁾ Fan Hui²⁾

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

2) (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 20 June 2016; revised manuscript received 24 July 2016)

Abstract

The new generation ESA SEU Monitor is first applied to beam verification of Beijing HI-13 Tandem accelerator according to the popularization need of Europe Space Agency and at the desire of contrast of domestic accelerator with international accelerator. Heavy ion single event cross section of ESA SEU Monitor obtained at HI-13 is compared with those from European facilities. Beam homogeneity is also analyzed based on the SEU physical bitmap. The accuracy of heavy ion beam monitoring technique at HI-13 accelerator is verified. Through combining the heavy ion testing result with the data from the other test sites, it can be observed that the differences between SEU cross sections with different heavy ion energies of the same LET value can reach 1–3 orders of magnitude in the sub-threshold zone of single event upset cross section curve below the direct ionization LET threshold. The geometrical structure, critical charge and collection efficiency of sensitive volume are constructed on the basis of testing data and process information. The physical mechanism of energy effect on single event upsets in ESA SEU Monitor is revealed through using the Monte-Carlo calculation. Nuclear reactions between incident heavy ions and material atoms can account for single event upsets below the direct ionization LET threshold. The differences in nuclear reaction type and cross section between the different energy heavy ions and material atoms are the root cause of the difference among heavy ion SEU cross sections with different energies at the same LET value. On the other hand, SEU bitmap nonuniformity among different blocks in memory array and different orientation dices in ESA SEU Monitor is first reported when the heavy ion is incident at a tilting angle at the low LET value. The analysis of device layout and calculation verification can account for this phenomenon. The material of interlayer dielectric with the tilting ion passing through is different when heavy ion reaches the sensitive volume of memory blocks with different data. This leads to the difference between efficient LET values inside the sensitive volume for different data blocks. Eventually the sensitivity difference in single event upset among blocks with different data occurs. The applications of ESA SEU Monitor in beam calibrating, tuning of domestic accelerator and single event effect test can be broadened further. Prediction method of space single event upset rate including heavy ion energy dependence and special angular dependence based on full-physical simulation should be developed in the future.

Keywords: ESA SEU Monitor, single event upset, energy dependence, angular dependence

PACS: 61.82.Fk, 24.10.Lx, 95.75.-z, 14.20.Dh

DOI: 10.7498/aps.65.206103

† Corresponding author. E-mail: luoyinhong@nint.ac.cn