

静态随机存储器单粒子效应的角度影响研究^{*}

张庆祥^{1)†} 侯明东¹⁾ 刘 杰¹⁾ 王志光¹⁾ 金运范¹⁾ 朱智勇¹⁾ 孙友梅¹⁾

¹⁾ 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

²⁾ 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

(2003 年 3 月 12 日收到, 2003 年 3 月 27 日收到修改稿)

利用兰州重离子加速器加速的高能离子研究了入射角度对 IDT71256 的单粒子翻转截面和多位翻转比例的影响. 研究表明: 在大角度掠射轰击下单粒子翻转截面的增大包括了多位翻转的贡献, 离子在器件敏感层中沉积的能量及其横向分布是影响多位翻转的两个重要参数, IDT71256 发生三位以上多位翻转的比例随着离子入射角度的增大而增加.

关键词: 静态存储器, 单粒子翻转, 多位翻转, 沉积能量, 横向分布

PACC: 6180, 7350J

1. 引 言

空间辐射环境中的重离子和高能质子引起的单粒子效应对航天器电子学系统构成严重的威胁. 大容量的静态随机存储器(SRAM)对单粒子翻转(single event upset, SEU)非常敏感, 研究表明 SEU 截面可能存在强烈的角度效应^[1,2]. 空间辐射环境中, 重离子和高能质子从各个方向入射, 如果仅用垂直入射测量的截面来计算在轨翻转率, 可能存在很大的误差. 多位翻转(multiple bit upset, MBU)是在高密度器件中, 单个离子产生的电荷为多个相邻的单元分享引起的多位翻转. 多位翻转的发生不但使器件的饱和截面增大, 发生自同一字节内的多位翻转还会给采用简单检错纠错码的系统造成危害. 在目前工艺水平下, 器件内部敏感节点之间的距离为 2—10 μm , 而高能离子产生的电荷径迹半径在亚微米量级, 因此单个离子不能同时影响两个以上相邻的敏感节点^[3]. 除非极高能量的离子以接近 90°的大角度掠射, 先后穿过多个敏感单元. 大多数情况下多位翻转都是单个离子产生的电荷通过扩散和漂移被多个节点收集引起的. 国际上对多位翻转进行了深入的研究^[4-8], 但深入理解多位翻转产生的机理必须考虑离子入射角度的影响^[3]. 研究角度影响, 所用的离

子必须具有足够的射程. 本文采用兰州重离子加速器(HIRFL)加速的 35MeV/u 的 ³⁶Ar 离子和 15.14MeV/u 的 ¹³⁶Xe 离子轰击典型 SRAM IDT71256, 研究离子入射角度对 SEU 和 MBU 比例的影响.

2. 实验条件

研究 MBU 需要了解逻辑位图与物理位图之间的对应关系, 而通常器件的物理位图(bit map)很难获得. 32k × 8 SRAM IDT71256 采用加负载电阻的金属-氧化物-半导体结构(resistive-load static metal-oxide-semiconductor, RMOS)结构, 自上个世纪 90 年代以来广泛应用于空间计算机系统, 国际上对其包括 MBU 在内的单粒子效应(single event effect, SEE)进行了广泛的研究, 其位图资料也被公开^[4]. 因此在本工作中, 选用 IDT71256 作为测试器件(DUT). 实验样品的型号为 IDT71256(S100DBA, 9624). HIRFL 加速的高能离子可以有效地穿透芯片表面覆盖的聚酰亚胺层, 到达器件的敏感区. 实验中采用的离子参数如表 1 所示. 值得一提的是 15.14MeV/u 的 ¹³⁶Xe 离子是迄今为止 HIRFL 加速的最重的离子. ³⁶Ar 离子实验在 HIRFL 辐照终端的靶室内进行, 采用 19.8 μm 的 ΔE 探测器进行注量监测; ¹³⁶Xe 离子实验在 2000 年 3 月正式投入使用的单粒子效应地面模拟实验装

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 19775058, 10075064)和中国科学院“九五”重大课题(批准号: KJ952-SI-423)资助的课题.

[†] E-mail: zhqx@earth.sepc.ac.cn

置内进行,采用闪烁膜加光电倍增管的注量探测器对束流进行非拦截式测量.在实验中,离子的入射角度可以在 0° — 90° 之间调节.采用上海航天局809所提供的动态检测装置进行SEU的检测.离子束流强度控制在 $10^2/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ 的量级.

表1 实验所用重离子参数

离子种类	能量/MeV	LET值($\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$)	Si中射程/ μm
^{36}Ar	1230	4.22	744.75
^{136}Xe	1658	51.50	126.77

3. 实验结果和讨论

翻转截面(cross section,简称 σ)通常有两种定义^[11],一种是U(upset)型SEU,另外一种是G(group)型SEU,二者的差别在于后者将由同一个离子引起的所有翻转都看成是一个事件,不管是一位翻转还是多位翻转.如果假定每个单元的敏感截面相同,则可以从U型SEU截面计算每个单元的敏感截面用于轨道翻转率的预示.选用逻辑相邻的位在物理上分隔开的存储器件,一个离子产生的多位翻转分别属于不同的逻辑单元,用简单的检错纠错码就能够对付多位翻转的危害,考虑这种情况时,就可以选择G型截面.从两种截面的差别可以看出MBU对SEU截面的贡献.图1分别给出了用 ^{36}Ar 离子得到不同测试图形的U-SEU截面和G-SEU截面随离子入射角度的变化关系.从图中可以看出,在 75° 以下U-SEU和G-SEU截面均随着入射角度的增大而增大,在 75° 以上,除了测试图形为FF的U-SEU,继续增大以外,其他截面均回落,表现出反 $1/\cos\theta$ 的规律.这是可以理解的,一方面在 60° 以上有效线性能量传输(linear energy transfer,LET)值的概念并不成立,更重要的是在掠射的情况下,器件封装的屏蔽作用更加明显.为了进一步分析多位翻转对大角度下翻转截面的贡献,在图2中给出MBU比例与角度的关系,其中MBU比例定义所有检测到的翻转事件中翻转位数多于一位的事件所占的比例.从中可以发现从 60° 开始就出现了MBU,而且多位翻转的比例随着角度急剧增加,而且MBU的比例在 85° 继续增大.多位翻转的比例也与测试图形有关,入射角度为 85° ,测试图形为FF时,多位翻转的比例高达70%,远远高出5A的接近50%.这也是在图1中FF的U-SEU截面在 85° 不降反升的原因.相同情况下,FF的MBU

比例和SEU翻转截面均高于5A.后面 ^{136}Xe 的数据也表明,90%以上的翻转是“1→0”,从而说明该器件中“1→0”比“0→1”更容易发生.综合以上的讨论,得出这样的结论:在LET值较小的 ^{36}Ar 离子的轰击下,IDT71256的SEU截面表现出强烈的角度效应.在 60° 以下,主要是因为有效LET值随着角度增大而提高,而在 60° 以上的大角度主要贡献来自多位翻转.在空间环境中,各向同性的更高能量、低LET的重离子从各个方向轰击器件,如果只用垂直轰击 0° 的数据来预示器件在轨翻转率,可能带来很大的误差.

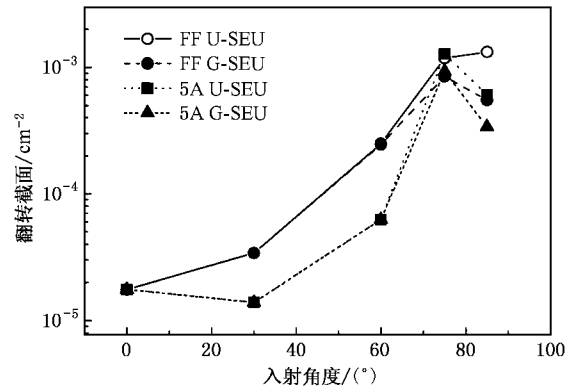
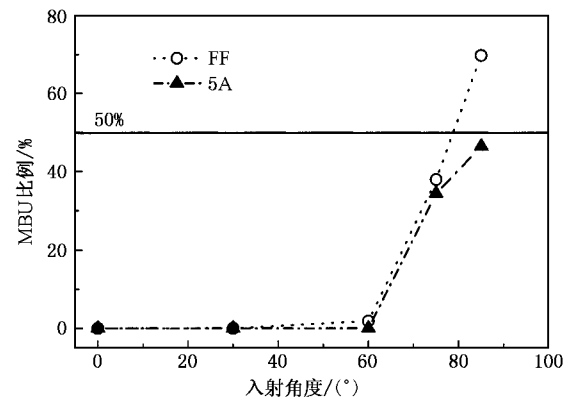
图1 用 ^{36}Ar 离子得到的不同测试图形G-SEU/U-SEU随离子入射角度的变化图2 用 ^{36}Ar 离子得到的不同测试图形MBU比例与离子入射角度的关系

图3给出的是用 ^{136}Xe 得到的测试图形为5A的SEU截面与离子入射角度的关系,其中包括初级束流和降能束流的结果.降能是指初始离子经过 $51\mu\text{m}$ 的Al降能片后轰击芯片. ^{136}Xe 离子的LET值在各种实验条件下均在 $50\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ 以上,达到了IDT71256的饱和区,因此入射角度对SEU截面的影响不大.相同角度初级束流截面均高于降能离子,其

原因一方面是由于初始离子经过 $51\mu\text{m}$ 的降能片后,能谱展宽很大,探测器探测到的离子或者不能引起翻转,或者没有全部到达芯片,因此过高计算了实际到达芯片表面的离子数,导致计算的截面减小,而在文献中,也提到在类似的 RMOS 器件中,存在与角度相关的漏斗效应,射程减小,限制了衬底中收集到的电荷对 SEU 的贡献。

随着入射角度的增大,离子的有效射程继续减小,在 75° 时,降能离子截面降低到很小的程度。根据文献中给出的方法^[9,10],利用该数据估算了器件敏感区深度的信息,芯片敏感区上面覆盖的聚酰亚胺膜、 SiO_2 等“死层”的等效厚度为 $32\mu\text{m}$ (Si),而敏感区的厚度为 $2\mu\text{m}$ 。

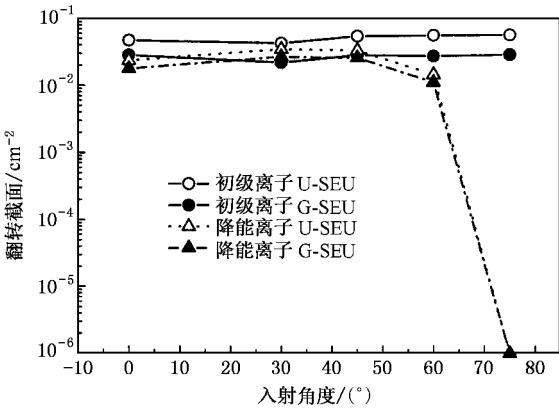


图 3 用 ^{136}Xe 离子得到的 U-SEU/G-SEU 与离子入射角的变化

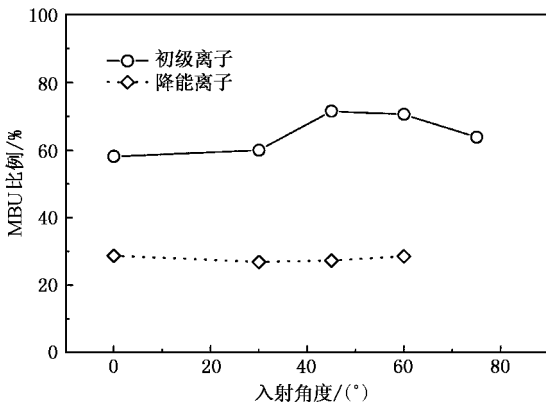


图 4 用 ^{136}Xe 离子得到的 MBU 比例与离子入射角的关系

从图 4 看出,初级离子 MBU 的比例在 60% 以上,而降能离子的 MBU 比例只有 30% 左右,而在相同入射角度下,降能后离子的 LET 值要高于初级离子,其原因在于 RMOS 器件存在与角度有关的漏斗效应^[11],也就是说,衬底中通过漏斗效应产生的电

荷都对 MBU 的产生有很大的贡献,因此不论是 SEU 还是 MBU 的研究,都必须保证离子具有足够的射程,尤其在 IDT71256 这种表面覆盖聚酰亚胺膜,而且漏斗效应非常明显的 RMOS 器件,离子射程的有效射程要超过大约 $70\mu\text{m}$ (Si)。

图 5、图 6 分别给出了假定覆盖层为 $32\mu\text{m}$ (Si),敏感区厚度为 $2\mu\text{m}$ 的情况下,SEU 截面及 MBU 比例与离子在敏感区中沉积能量的关系。从图 5 可以看出 SEU 截面基本与沉积能量成正比关系,只有 ^{36}Ar 离子 85° 这一点的数值例外。根据我们的计算结果, ^{36}Ar 离子 85° 入射以及 ^{136}Xe 垂直入射下,离子在敏感层中沉积的能量分别为 27MeV 和 26.4MeV,基本相当,其原因在于器件的封装材料在接近掠射的大角度入射时将非常明显,如图 7 所示。

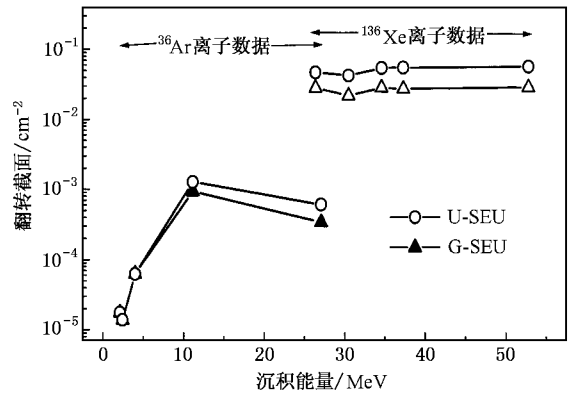


图 5 U-SEU/G-SEU 与沉积能量的关系 ($h = 32\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$)

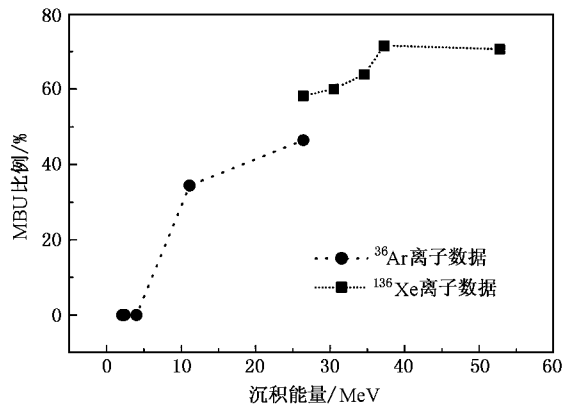


图 6 MBU 比例与沉积能量的关系 ($h = 32\mu\text{m}$, $d = 2\mu\text{m}$)

从图 6 看出,由于 MBU 比例去除了封装阻挡的影响, ^{36}Ar 离子 85° 入射以及 ^{136}Xe 垂直入射的 MBU 的比例仍然有一定的差距,在表 2 中给出了发生 MBU 的具体统计结果。从表中可以发现 ^{136}Xe 垂直入射多位翻转的为 58.2%,大于 ^{36}Ar 离子 85° 入射的比

例 46.4% ,但其中绝大多数是二位翻转 ,达到 50% 以上 ,三位以上翻转的比例不到 8% , ^{36}Ar 离子 85° 入射三位以上翻转比例之和接近 30% .表 3 中 ^{136}Xe 垂直入射与倾角入射的数据也表明 , 75° 与 0° 的三位以上 MBU 的比例分别为 24.2% 和 7.8% ,前者远远大于后者 .以上分析说明倾角入射能够增大 MBU ,尤其是两位以上 MBU 的比例 .如图 8 ,垂直入射离子沉积的能量分布在离子径迹亚微米范围内 ,而以 85° 入射的离子沉积能量在敏感层中的横向分布范围大约为 $23\mu\text{m}$ ($d/\cos\theta$) ,IDT71256 的敏感区尺寸为 $9.7\mu\text{m} \times 11\mu\text{m} \times 3.5\mu\text{m}$ [5] ,前者在敏感层中沉积的能

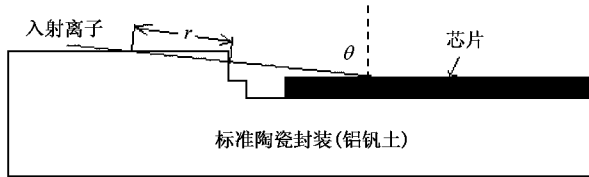


图 7 倾角入射的重离子与芯片封装材料作用示意图

量至少可以被两个单元分享 ,而对于小角入射的离子 ,入射离子在敏感区内沉积的能量基本局限在一个单元内 .由此可见倾角入射增加了发生 MBU 尤其是两位以上 MBU 的概率 .考虑 ^{36}Ar 离子 85° 入射以及 ^{136}Xe 垂直入射 ,每 100 个 SEU 事件 ,根据表 2 中的比例计算其翻转的总位数分别是 186 和 167 ,这与其沉积能量是相当吻合的 .

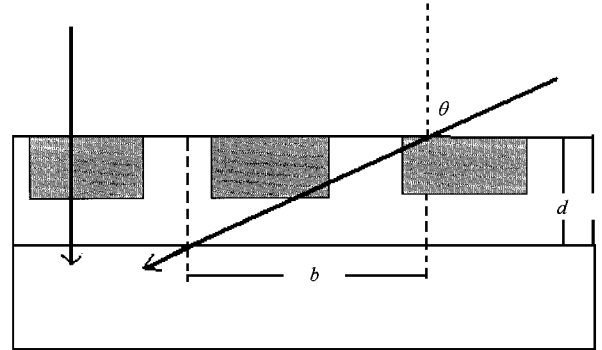


图 8 垂直入射与倾角入射离子能量的横向分布示意图

表 2 典型情况下发生多位翻转的比较

离子和入射角($^\circ$)	一位翻转/%	两位翻转/%	三位翻转/%	四位翻转/%	五位翻转/%
^{36}Ar 85	53.57	17.86	17.86	10.71	0
^{136}Xe 0	41.8	50.8	6.9	0.9	0
^{136}Xe 75	36.1	40.5	15.9	7.5	0.8

4. 结 论

研究表明 IDT71256 的 SEU 截面表现出的强烈的角度依赖性 ,因此在对于空间应用的器件的敏感度测试时 ,需要考虑用不同入射角度 .倾角入射增大 SEU 截面的原因一方面是有有效 LET 值增大的贡献 ,一方面多位翻转的贡献在大角度下是主要的 .倾角

入射与采用大 LET 值离子一样可以增大 MBU 比例 ,但前者增大的主要是两位以上 MBU 发生的比例 .敏感层中沉积的能量以及沉积能量的横向分布是影响多位翻转的两个重要参数 .在 IDT71256 这种 RMOS 器件中 ,漏斗效应对 SEU 截面和 MBU 都有很大的贡献 .以上工作的进行也充分说明只有在地面上深入理解离子与器件相互作用的机理 ,才能精确预示器件在空间辐射环境中的响应 .

[1] Guertim S M et al 2000 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-47** 2386
 [2] Reed R A I et al 1994 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-41** 2049
 [3] Dodd P E et al 1998 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-45** 2483
 [4] Koga R et al 1991 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-38** 1507
 [5] Koga R et al 1993 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-40** 1941
 [6] Reed R A I et al 1997 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-44** 2224

[7] Musseau O et al 1996 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-43** 2879
 [8] Johansson K et al 1999 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-46** 1427
 [9] Barak J et al 1996 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-43** 907
 [10] Ecoffet R et al 1997 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-44** 2378
 [11] Koga R et al 1988 *IEEE Trans. Nuc. Sci.* **NS-35** 1638

The dependence of single event upset cross-section on incident angle^{*}

Zhang Qing-Xiang^{1)†} Hou Ming-Dong¹⁾ Liu Jie¹⁾ Wang Zhi-Guang¹⁾
Jin Yun-Fan¹⁾ Zhu Zhi-Yong¹⁾ Sun You-Mei¹⁾

¹⁾*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

²⁾*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

(Received 13 March 2003 ; revised manuscript received 27 March 2003)

Abstract

Swift heavy ions delivered by Heavy Ion Research Facility at Lanzhou (HIRFL) were used to bombard the 32k SRAM IDT71256 at angles from 0°—85°. The multiple bit upset (MBU) ratio can reach as high as 70% when the device was tested with 15.14 MeV/u ¹³⁶Xe ions or at large angles with ³⁶Ar ions. The angular effect of cross section is mainly due to occurrence of MBU especially at large angles. The MBU ratio is determined by the energy deposited in the whole sensitive layer and that of more than two bit upset is increased with incident angle.

Keywords : SRAM , single event upset , multiple bit upset , incident angle , deposited energy

PACC : 6180 , 7350J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19775058 , 10075064) and Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJ952-SI-423).

[†] E-mail: zhqx@earth.sepc.ac.cn