

文章编号: 1007- 4627(2000)03-0165-06

# 重离子在半导体器件中引起的单粒子效应\*

侯明东, 甄红楼, 张庆祥, 刘 杰, 马 峰

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 重离子引起的单粒子效应是威胁航天器安全的重要因素之一, 利用加速器进行地面模拟是研究单粒子效应的重要手段. 概述了单粒子效应研究的历史和现状, 讨论了单粒子效应研究的基本方法, 最后简要介绍了在兰州重离子加速器上已开展的单粒子效应研究工作.

关键词: 单粒子效应; 辐射损伤; 软错误; 加速器模拟

中图分类号: P354.2 文献标识码: A

天然的空间辐射环境可以使半导体器件和集成电路的电性能发生瞬时的或永久的改变, 这些改变导致空间电子学系统的功能失效. 因此, 人们对于辐射引起的性能退化极为关注, 并寻求各种加固措施以避免不利的影响. 随着微电子学不断向复杂化和小型化发展, 天然辐射环境所引起的空间电子学系统的失效机制也变得更为复杂和严重. 继早期发现的总剂量效应<sup>[1]</sup>和位移损伤效应<sup>[2]</sup>之后, 于 1975 年又发现了单个重离子或高能质子所引起的半导体器件逻辑状态改变的单粒子效应<sup>[3]</sup>. 航天实践表明: 单粒子效应是航天器工作异常和故障的重要诱因之一, 包括中国在内的各国卫星都曾经遭受过单粒子效应所带来的危害, 并造成了巨大的经济损失. 本文概述了单粒子效应研究的历史和现状, 作为背景材料给出了空间的辐射环境, 讨论了单粒子效应研究的基本方法, 特别是重离子加速器的地面模拟, 最后简要介绍了在兰州重离子加速器(HIRFL)上已开展的单粒子效应研究工作.

## 1 空间天然的辐射环境

目前发射的大多数航天器局限于包容着地球同步轨道的地球轨道之内, 因此最关心的是近地的天然环境. 近地空间辐射环境有 3 个主要部分组成: (1) 含有电子和质子的俘获辐射带; (2) 来自太阳耀斑活动的瞬时辐射; (3) 来自遥远空间的银河宇宙射线. 前者称之为俘获辐射环境, 后者称之为贯

穿辐射环境.

俘获的电荷辐射带, 称之为 Van Allen belts, 它主要是由地球周围的磁力线所俘获的电子、质子和少量低能重离子所组成. 由于太阳活动周期和磁暴所引起的地球磁场的变化, 辐射带的强度和形状不断在改变.

俘获的电子分成内辐射带和外辐射带, 其分界线在赤道附近约为  $L = 2.8$  处, 其中  $L$  是一个以地球半径为单位的无量纲比值. 外辐射带中的电子通量要比内辐射带大一个数量级, 电子的能量也更高, 约为 7 MeV, 而内辐射带电子能量小于 5 MeV.

与电子相反, 俘获质子的能量随高度单调的成反比变化, 在 3 个地球半径处, 质子能量大约是 40 MeV, 而在 4 个地球半径处, 大约是 8 MeV.

对于空间辐射环境具有特别重要意义的是地磁场的南大西洋异常(SAA)区. 作为磁力线下凹的结果, 在巴西海岸辐射带下沉到距地面仅 200 km 的最低高度, 导致该区呈现出低地轨道中最浓密的辐射环境<sup>[4]</sup>. 由于质子能量与高度成反比, 在 SAA 区质子有高的通量和能量. SAA 区是低地轨道卫星所受到的最主要的俘获辐射来源, 卫星穿越 SAA 区的短暂瞬间就接受到几乎全部的累计剂量<sup>[5]</sup>.

太阳宇宙射线起源于太阳表面所发生的短时间释放大量能量的突然爆发, 大部分能量以紫外线和 X 射线的形式辐射出来, 另一部分能量通过磁流体

\* 收稿日期: 2000-04-19

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19775058); 中国科学院“九五”重点项目(KJ952-S1-423)

作者简介: 侯明东(1940-), 男(汉族), 黑龙江哈尔滨人, 研究员, 博士生导师, 从事高能重离子在固体材料中引起的辐照效应研究.

力学过程使带电离子加速到很高的能量,即为太阳宇宙射线或称太阳耀斑粒子,其主要成分为质子,另有少量重核.太阳耀斑事件发生的规律尚不清楚,但明显有 11 年的周期变化<sup>[6]</sup>,在太阳活动峰年前后发生的频次较高,每年可达十几次,在太阳活动谷年时约每年几次.太阳质子的能量略低于银河宇宙射线,但通量却大得多.大的太阳质子事件可持续三、四十小时,累计通量可达  $10^9$  p/cm<sup>2</sup>.在某些主要的太阳质子事件期间,重离子通量可以是银河宇宙射线本底通量的 3, 4 个数量级.

银河宇宙射线是起源于银河系以内太阳以外的高能粒子,由原子核或高度剥离的离子组成,质子占 85%,  $\alpha$  粒子占 14%, 重离子占 1%. 但正是这些重离子对于微电子学有极为重要的影响,因为重离子具有较大的线性能量转移(LET)值.银河宇宙射线中几乎包含所有的元素,但原子序数大于 26 的重离子丰度骤然降低<sup>[7]</sup>.银河宇宙射线能谱峰值在数百 MeV 到 GeV 之间,高能部分以幂指数下降.银河宇宙射线的强度受太阳风和行星际磁场的调制而出现 11 年的周期性变化.太阳活动峰年,银河宇宙射线强度减弱,太阳活动谷年,强度相对增强.

地球磁场对银河宇宙射线和太阳耀斑粒子有很强的屏蔽作用.粒子的通量在低纬度区比高纬度区要小.对于一个低的地球轨道,宇宙射线的通量要比地球同步轨道明显地减少.

航天器在空间所遭受的外部辐射环境是由辐射粒子种类、能量和通量所决定的.而航天器内部的辐射环境,则是入射粒子与航天器材料相互作用及产生二次粒子的结果,它不仅仅取决于外部辐射环境,而且还取决于航天器材料的种类和结构.

## 2 单粒子效应的基本概念

宇宙射线中的高能重离子与物质相互作用,沿着它的路径将产生高密度的电离原子和电子的等离子体,通常它们通过再复合而消失.而在半导体器件中,在 P-N 结局部电场的作用下,可以将电子和空穴在复合之前把它们分开,于是形成一个电流脉冲.如果被收集的电荷大于电路状态翻转所需要的临界电荷,电路状态将发生翻转,从而改变在记忆单元中所存储的逻辑信息,称之为软错误.对目前先进的电路,在灵敏体积内仅需沉积 1.1 MeV 的

能量就能使电路翻转.

这是一个全新的现象,它是由单个荷能粒子沉积的电离所引起的,因而称为单粒子效应,英文缩写为 SEE(Single Event Effect).由于航天器逐渐更多地采用大规模和超大规模集成电路,近年发现单粒子效应变得更加显著,其损伤的模式也日趋复杂.单粒子效应包含的类型除最初的单粒子翻转(SEU)之外,后来又陆续发现单粒子栓锁(SEL)<sup>[8, 9]</sup>、功率 MOSFET 烧毁(SEB)<sup>[10, 11]</sup>、MNOS 栅极击穿(SEGR)<sup>[12]</sup>、双极电路中的高电流异常(HCA)<sup>[13]</sup>、多位翻转(MSEU)和瞬时脉冲信号(TPS)等现象不同、机制各异的效应.

在硅中产生一个载流子对需要 3.6 eV 的能量,因此在灵敏区收集到临界电荷  $Q_c$  所需要的最小沉积能量为<sup>[14]</sup>

$$E_{\min} = 22.5 Q_c / f (\text{MeV}),$$

其中,  $Q_c = 10^{-12}$  C,  $f$  为收集效率,在灵敏区内近似  $f = 1$ . 这个能量需要由入射离子的能量损失来提供:

$$E_{\min} = (dE/dX) \cdot t,$$

其中,  $t$  为灵敏体积的线度.对于给定的器件,灵敏区线度  $t$  和临界电荷  $Q_c$  是确定的,必须  $dE/dX$  大于某一数值才能引发单粒子效应.也就是说,任一器件都有一个 LET 阈值,只有 LET 大于这一阈值的重离子才能产生单粒子效应.所以先前单粒子效应的研究主要是采用 LET 较高的重离子.

质子的 LET 很小,一般不能通过直接电离的形式产生单粒子效应.但是质子与器件材料发生核反应产生的反应产物可以在灵敏区内沉积足够的能量,进而产生单粒子效应.质子与半导体材料 Si 发生的主要核反应有:  $^{28}\text{Si}(p, p)^{28}\text{Si}$ ,  $^{28}\text{Si}(p, \alpha)^{25}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}(p, p\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{28}\text{Si}(p, p)^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$ ,  $^{28}\text{Si}(p, p) 2^{14}\text{N}$  等.各反应道的截面以及随质子能量的变化都不同.总的反应截面峰值在 20 MeV 附近,然后到 100 MeV 大约降低到 400 mb.但质子引起的器件翻转截面则随质子能量不断上升而不遵循总反应截面曲线的趋势<sup>[15]</sup>.虽然质子引起的单粒子效应是通过次级过程,每  $10^5$  个质子中才有一个质子与 Si 发生核反应,但由于空间环境中质子的通量远高于重离子的通量,因此质子引起的单粒子效应不容忽

视. 大量的数据表明<sup>[16]</sup>: 南大西洋磁异常区是单粒子事件出现频度最高的区域之一, 太阳耀斑期间单粒子事件的频度增加. 因此, 近年来质子引起的单粒子效应受到前所未有的关注.

### 3 单粒子效应研究的历史与现状

对单粒子效应的认识可以追溯到航天技术发展的初期. 1962 年, J. Wallmark 等<sup>[17]</sup>已做了预言: 当卫星的记忆单元包装密度增加时, 宇宙射线重离子能引起暂时的位翻转错误. 由于当时微电子技术和航天技术均处在较低的水平, 这一见解并未引起足够的重视. 1975 年, D. Binder 等<sup>[31]</sup>首次提供了认定这一预言的证据, 报道了在通讯卫星中双极触发器电路的异常触发可能起因于单粒子效应, 从而开辟了空间辐射效应及宇航半导体器件抗辐射加固新领域. 当时他们是针对 TTLJ-K 触发器提出的, 而 J-K 触发器属于小规模集成电路, 所涉及的也仅是单粒子翻转. 4 年之后, 利用加速器所产生的重离子模拟<sup>[8]</sup>宇宙射线离子验证了这一理论. 这一首次的地面模拟是在劳伦茨伯克利国家实验室 88 英寸回旋加速器上完成的. 此后, 美国宇航公司和喷气推进实验室(JPL)在 88 英寸回旋加速器上建立了专用的地面模拟装置<sup>[18]</sup>, 并进行了大量实验. 截止 1990 年, 已发表了 3 组数据<sup>[19, 20]</sup>, 所研究的各种类型器件 480 多种, 包括 NMOS, PMOS, CMOS/bulk, CMOS/sos 和 MNOS. 近 10 年来, 美国除了航天系统外, 战略导弹研究系统、宇航器件研究及生产厂家也都在开展单粒子效应的研究.

80 年代中期, 日本及西欧的法、德、英都相继开展了单粒子效应的研究工作, 他们在研究初期采用过不同的方法, 但最终都选择了利用本国加速器开展研究的道路. 法国由于 80 年代早期就拥有大型重离子加速器, 因此法国的单粒子效应研究工作, 在欧洲较早进入实用阶段. 目前法国马特拉公司生产的芯片, 可应用户的要求提供单粒子效应的数据, GANIL 的重离子加速器提供了所用的重离子<sup>[21]</sup>. 英国没有能量适中的重离子加速器, 早期采用卫星搭载方法和<sup>252</sup>Cf 裂变碎片源方法开展研究, 由于其本身所固有的局限性, 做出的数据只具有相对参考意义, 无法对抗辐射加固提供完整的数据. 因此英国也在伯克利加速器装置上开展工作.

国际上单粒子效应研究的发展方向是:

(1) 充分利用重离子加速器的能力, 离子种类从<sup>40</sup>Ar 延伸到<sup>238</sup>U, 能量从中能区延伸到相对论能区, 以求获得大的 LET 变化范围. 美国伯克利实验室借助倾角使 360 MeV Kr 离子的 LET 值达到 120 MeV/(mg/cm<sup>2</sup>). J. Dreute 等<sup>[22]</sup>使用 SIS 的能量高达 1 000 MeV/u 的 Xe, Pb 和 U 离子, 在 Si 中射程超过几个 cm, 可以以各种方向照射不开帽的器件. 图 1 是 1 000 MeV/u 的 Xe, Pb 和 U 离子测量的 MHS65664 8K×8 SRAM 翻转截面.

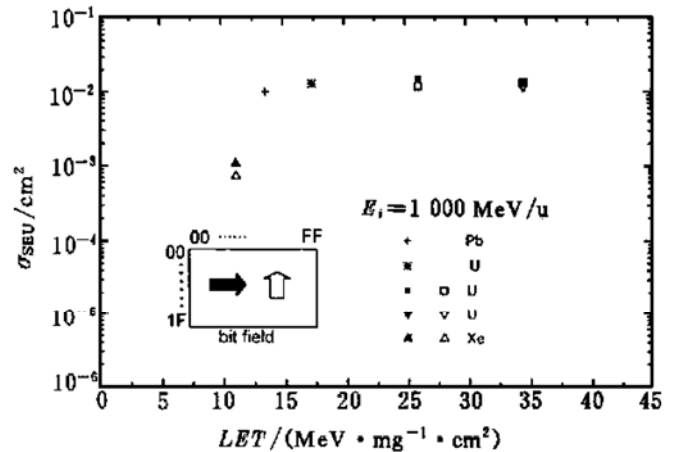


图 1 MHS65664 8K×8 SRAM 的翻转截面

(2) 所测器件的范围越来越广, 从早期测量分立的 CMOS 器件和简单的触发电路发展到中、大规模集成电路芯片, 从存储器 RAM 和 ROM 发展到 CPU, 从静态测量发展到动态测量. 某些商业器件(见图 2)<sup>[23]</sup>和可用于 3.3 V 的 CMOS 低功率产品<sup>[24]</sup>也在研究之列.

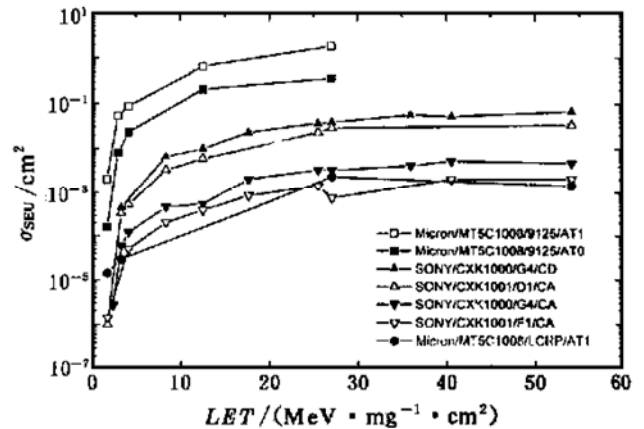


图 2 某些商业 SRAM 1 Mbits 的 SEU 截面

(3) 机理研究受到高度重视. 无论是地面数据向空间事件率的推演, 还是加固措施的改进都需要对单粒子效应机理和微观物理过程有深入的了解.

(4) 质子引起的单粒子效应, 已成为当前研究

的热点. 因为质子是通过核反应引起单粒子效应, 而反应截面是能量的函数, 所以必须使用能量与空间辐射大致相当的质子才能模拟这一现象. 图 3 给出在某些器件上质子引起的单粒子翻转截面.

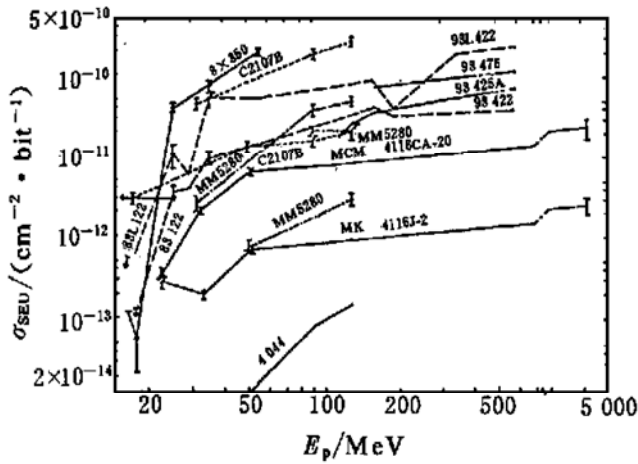


图 3 某些器件的质子单粒子翻转截面

### 4 单粒子效应研究的内容和方法

单粒子效应的研究主要包括以下 4 个方面的内容: 第一, 空间辐射环境的研究, 这是预测空间发生单粒子事件的基础, 主要研究太阳表面物质的抛射过程及其在行星际空间的传播, 积累各轨道上各种带电粒子能谱和空间分布的数据; 第二, 相互作用过程研究, 探讨带电粒子在不同元器件中引起的各种单粒子现象及其物理机制; 第三, 实验测量各种器件的翻转阈值和截面-LET 谱. 对器件的单粒子效应易感性做出评估; 第四, 预防措施和加固途径的研究, 包括软件的和硬件的措施.

研究单粒子效应需使用高能带电粒子, 依据带电粒子的来源不同, 可以分为两种研究方法.

(1) 利用天然宇宙射线资源, 采用卫星搭载方法. 1982 年英国最早采用这种方法, 利用太阳活动期的太阳宇宙射线, 研究器件的翻转截面, 用此方法应同时测量高能带电粒子的强度, 以便对比. 此后许多国家都利用卫星研究各种空间轨道的单粒子效应. 在地球同步轨道的有美国 TDRS 系列卫星和 LEASAT 系列卫星、日本 ETS-V 卫星; 在太阳同步轨道的有日本 MOS-I 卫星、英国 UoSAT 系列卫星、美国 SAMPEX 卫星和中国 SJ-5 卫星; 椭圆轨道的有美国 CRRES 卫星、日本 EXOS-D 卫星和中国 SJ-4 卫星. 在地球同步轨道上, 主要可以测得宇宙射线中的重离子导致的单粒子效应和外辐射带高能电子辐射剂量效应. 在太阳同步轨道上, 主要测

量内辐射带高能质子的辐射剂量效应和高纬度区宇宙射线重离子的单粒子效应. 这些卫星空间飞行实验获得了大量的宝贵数据, 具有极为重要的意义. 卫星搭载方法的优点是环境真实结果可信, 缺点是周期长, 费用高, 实验参数也不易控制. 由于器件的集成度增加, 高空飞行的飞机上也出现单粒子效应<sup>[25, 26]</sup>, 英国人在穿越大西洋的伦敦-纽约航班上安装仪器检测单粒子效应, 也是利用天然宇宙射线.

(2) 利用人工的重离子源进行地面模拟研究. 利用<sup>252</sup>Cf 始于英国哈威尔实验室. <sup>252</sup>Cf 为自发裂变碎片源. 自发裂变半衰期为 85 年, 分支比 3.09%, 轻、重碎片的平均质量分别为 106.2 和 142.2 amu, 轻、重碎片平均能量为 102.5 和 78.7 MeV, 它们在 Si 中相应的射程为 17.5 和 13.6  $\mu\text{m}$ . 根据分布可以计算两组裂变碎片在 Si 中的 LET 值分别为 46 和 45 MeV/(mg/cm<sup>2</sup>). 在裂变碎片中, 90% 具有 42-45 MeV/(mg/cm<sup>2</sup>) 的 LET 值, 它高于加速器中 Kr 离子的 LET 值. 利用<sup>252</sup>Cf 源进行单粒子效应研究方便易行, 它的缺点是射程有限, 且在芯片顶层损失能量较多, 无法在较深的灵敏区内沉积足够的能量. CMOS 器件由于采用双金属工艺, 顶层厚度大于 5  $\mu\text{m}$ , 这一局限则更加明显. 此外 LET 值也不可能大范围的变化.

利用重离子加速器所产生的高能重离子可以直接对器件进行单粒子效应的地面模拟, 即利用人为环境下测到的效应来推测空间天然环境下的效应. 这种方法的优点是, 环境条件可以人为控制, 可以选择离子的种类、能量和强度, 有利于对效应作全面细致的研究, 可以进行多次的重复实验, 也可进行单一因素的研究, 有利于探讨机理. 实验周期短, 所需费用少也是突出的优点. 需要解决的是时间等效性和能量等效性的问题. 与空间实际条件相比, 加速器离子的通量高, 在空间需要很长时间里积累的通量在加速器上很短时间即可达到. 加速器离子的能量也远较宇宙射线能量低, 虽然它们可以具有相同的 LET 值, 但能量毕竟不同.

常用的重离子加速器有 3 种. (1) 串列加速器的优点是能快速地改变离子种类, 运行费用低, 它主要用于 LET 阈值较低的器件的测试. 串列加速器所提供的典型能量是 10 MeV/u, 由于这一能量的局限, 它不能提供具有合适射程的高 Z 离子.

(2) 回旋加速器可以提供 10–100 MeV/u 范围内某些分立能量的多种不同离子, 离子的种类和在器件中的射程都有较大的选择范围. 可以进行单粒子效应阈值及饱和截面的测量. 主要缺点是加速器造价昂贵、运行费用高以及改变离子能量和种类需耗费较长的时间. (3) 同步加速器其原理与回旋加速器相同, 仅磁场是调制的, 以使离子能量增加后仍维持在恒定的回旋半径上. 同步加速器可以提供 100–1 000 MeV/u 很高能量的离子, 有能力以等价于空间离子的能量来检测器件, 能很好地模拟空间环境, 但造价昂贵和运行复杂, 限制了广泛的使用.

不管造价、耗时和获得性方面的限制, 重离子加速器仍是最可取的单粒子效应研究的有力工具<sup>[27]</sup>, 目前大部分工作是在重离子加速器上完成的.

## 5 兰州重离子加速器上已开展的工作

HIRFL 是我国唯一的一台高能重离子加速器, 它能提供能量从几百 MeV 至几个 GeV 的从 C 到 Ta 的多种离子, 有宽广的 LET 范围, 特别适合于单粒子效应的研究. 几年来, 近代物理所与其他单位合作在 HIRFL 上开展了大量的研究工作, 并获得了一系列重要的结果<sup>[28]</sup>.

(1) 利用 92 MeV 的 Ar 离子对“风云一号”卫星计算机主板进行单粒子效应地面复演实验, 观测到 Harris 80C86 CPU, Intel 8086 CPU, IDT 8K×87164 SRAM 等芯片的单粒子翻转和锁定现象, 并给出截面值.

(2) “实践四号”卫星在上天搭载之前利用

HIRFL 提供的 1 GeV 的 Ar 对单粒子事件静态和动态测试系统进行了地面考核, 获得星用 IDT 7164 SRAM 发生翻转的次数和部分物理地址.

(3) 利用 132 MeV 的 <sup>18</sup>O 离子束在大气中辐照 8086 CPU, 7164 RAM, 28C64 E<sup>2</sup>PROM 和 2 764 EPROM 等芯片, 研究了低翻转阈值器件的翻转, 观测到了芯片的翻转与旋转轴和旋转角的依赖关系.

(4) 利用 1.6 GeV 的 <sup>20</sup>Ne 离子束在空气中以及利用 130 MeV <sup>40</sup>Ar 离子束在真空中等多次实验对“实践五号”卫星的 5 台单粒子效应监测和对策措施系统进行了地面考核验证, 测试了 CPU, SRAM, Flash EPROM 和 E<sup>2</sup>PROM 等器件的单粒子效应, 获得了大量的实验数据. 实验验证了屏蔽防护措施、双 CPU 冗余措施、RS 编码纠错、软件自动纠正和自动解锁等防护对策的有效性, 并观测到了单粒子效应与存储图形的关系.

现已在兰州重离子加速器上建造了国内第一台与加速器相连的用于单粒子效应研究的大型专用装置, 它综合和借鉴了国际上同类装置的优点, 采用了多项先进技术, 使该装置适应性强, 具备多种功能: 既可在真空中也可在大气中进行辐照实验; 既能用直射方式, 也能用散射方式; 既适用于器件研究也适用于整机测试. 该装置实现了 GeV 量级高能离子的能量测量; 实现了弱束流的非拦截式实时监测; 实现了对弱束流剖面均匀度的监测; 实现了注量参数的计算机获取. 总之, 它以先进的技术指标为单粒子效应研究提供了良好的实验条件, 它对于促进我国单粒子效应研究必将发挥重要的作用.

## 参 考 文 献:

- [1] Peck D S. Surface Effects of Radiation on Transistors [J]. Bell Syst Tech J, 1963, 42: 95–99.
- [2] Brown R, Horne W. Space Radiation Equivalence for Displacement Effects on Transistors [Z]. Final Report for NAS5-9578, Boeing Document D2-884088-2, Nov. 1966.
- [3] Binder D, Smith E, Holman A. Satellite Anomalies from Galactic Cosmic Rays [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1975, NS22: 2 675–2 680.
- [4] Daly E, Lemaire J, Heynderickx D *et al.* Problems with Models of the Radiation Belts [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, NS43: 403–415.
- [5] Maurer R, Suter J. Total Dose Hardness Assurance for Low Earth Orbit [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1987, NS34: 1 757–1 762.
- [6] Adams J, Gelman A. The Effects of Solar Flares on Single Event Upset Rates [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, NS31: 1 212–1 216.
- [7] Mewaldt R. Elemental Composition and Energy Spectra of Galactic Cosmic Rays [M]. In: Interplanetary particle environment. Feynman J, Gabriel S, Eds, JPLPub, 1988, 88–28: 21–31.
- [8] Kolasinski W, Blake J, Anthony J *et al.* Simulation of Cosmic

- Ray Induced Soft Errors and Latch-up in Integrated Circuit Computer Memories [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1979, NS26: 5 087– 5 091.
- [ 9 ] Soliman K, Nichols D. Latchup in CMOS Devices from Heavy Ions [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, NS30: 4 514– 4 519.
- [ 10 ] Waskiewicz A. Burnout of Power MOS Transistors with Heavy Ions of  $^{252}\text{Cf}$  [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1986, NS33: 1 710– 1 715.
- [ 11 ] Fisch T. Heavy Ion Induced Gate Rupture in Power MOSFETs [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1987, NS34: 1 786 – 1 791.
- [ 12 ] Pickel J, Waskiewicz A. Heavy Ion Induced Permanent Damage in MNOS Gate Insulators [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1985, NS32: 4 176– 4 179.
- [ 13 ] Koga R, Ferro R, Mabry D *et al.* Ion-induced Sustained High Current Condition in a Bipolar Device [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, NS41: 2 172– 2 178.
- [ 14 ] Pickel J, Blandford J. Cosmic Ray Induced Errors in MOS Memory Cells [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1978, NS25: 1 166 – 1 171.
- [ 15 ] Petersen E. Approaches to Proton Single-event Rate Calculations [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, NS43: 496– 504.
- [ 16 ] Adams L, Harboe-Sorensen R, Daly E *et al.* Proton Induced Upsets in the Low Altitude Polar Orbit [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1989, NS36: 2 339– 2 343.
- [ 17 ] Wallmark J, Marcus S. Minimum Size and Maximum Packing Density of Nonredundant Semiconductor Device [C]. Proceedings of the IRE, March 1962, 286– 298.
- [ 18 ] Woods J, Nichols D, Price W. Investigation for Single-event Upset in MSI Devices [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, NS28: 4 022– 4 025.
- [ 19 ] Nichols D, Price W, Kolasinski W *et al.* Trends in Parts Susceptibility to Single Event Upset from Heavy Ion [J]. IEEE Trans Nucl Sci. 1985, NS32: 4 189– 4 194.
- [ 20 ] Nichols D, Smith L, Price W *et al.* Recent Trends in Parts SEU Susceptibility from Heavy Ion [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1987, NS34: 1 332– 1 337.
- [ 21 ] Delagrangé H. Industrial Applications at GANIL [R]. GANIL SAIF 9 301: 1– 17.
- [ 22 ] Dreute J, Röcher H, Heinrich W *et al.* Study of SEUs Generated by High Energy Ions [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, NS41: 601– 606.
- [ 23 ] Duzellier S, Falguere D, Ecoffet R. Heavy Ion/Proton Test Results on High Integrated Memories [C]. In IEEE Radiation Effects Data Workshop Record, 1993, 36– 45.
- [ 24 ] Kolasinski W, Koga R, Blake J. Soft Error Susceptibility of CMOS RAMs: Dependence upon power supply voltage [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1981, NS28: 4 013– 4 016.
- [ 25 ] Taber A, Normand E. Single Event Upset in Avionics [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1993, NS40: 120– 126.
- [ 26 ] Normand E. Single Event Effects in Avionics [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, NS43: 461– 474.
- [ 27 ] Duzellier S, Ecoffet R. Recent Trends in Single Event Effect Ground Testing [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, NS43: 671 – 677.
- [ 28 ] 刘杰. 宇航半导体器件的单粒子效应地面模拟研究 [D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1999, 1– 101.

## Single Event Effects Induced by Heavy Ion in Semiconductor Device<sup>\*</sup>

HOU Ming-dong, ZHEN Hong-lou, ZHANG Qing-xiang, LIU Jie, MA Feng

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

**Abstract:** Single event effects (SEE's) have been observed in semiconductor device in space since 1975. It has been verified from many spaceflight tests that single event effect induced by cosmic ray is one of the important sources of anomalies and malfunctions of spacecraft. Initially, a brief outline of space radiation environment is given. The history and recent trends were described, and basic methods and necessary facilities for SEE testing were also discussed. Finally, the research activities on SEE at HIRFL (Heavy Ion Research Facility in Lanzhou) were presented.

**Key words:** single event effect; radiation damage; soft error; accelerator simulation

\* **Foundation item:** NSFC(19775058); Foundation of the Chinese Academy of Sciences(KJ952-S1-423)