

文章编号: 1000-6931(2001)05-0470-06

## 利用 HF-13 串列加速器进行空间辐射效应实验研究

李志常, 李淑媛, 姜 华, 刘建成

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 讨论了空间辐射效应实验模拟研究中一些重要物理量的物理含义及实验的选取方法, 详细描述了在 HF-13 串列加速器上逐步发展完善起来的一些研究方法。

**关键词:** 模拟研究; 阻止本领; 注量; HF-13 串列加速器; Q3D 磁谱仪

**中图分类号:** TL99      **文献标识码:** A

卫星在空间轨道上运行期间, 一直处于多种带电粒子构成的辐射环境中。这种空间辐射环境由地球辐射带、太阳宇宙射线和银河宇宙射线构成, 包含电子、质子、 $\alpha$  粒子及多种重离子。辐射与卫星相互作用引起的单粒子效应、总剂量效应和充放电效应等都会对卫星性能产生一定的损伤, 引起卫星在轨运行故障。对这些效应的认真研究及准确分析, 不仅对了解卫星工作状态变化的原因十分重要, 而且是星用电子器件或系统抗辐射加固设计的重要依据<sup>[1]</sup>。

### 1 模拟实验研究的基本要求及 HF-13 串列加速器的性能

在空间辐射效应中, 重离子引起的单粒子效应(SEE)包括单粒子翻转(SEU)、单粒子锁定(SEL)、单粒子烧毁(SEB)以及单粒子击穿(SEGR)等效应。进行这种模拟研究, 对加速器产生的重离子有两点基本要求: 满足研究所要求的线性能量转移(LET)值范围和具有足够的能量。离子打入硅中产生一对电子-空穴对需 3.6 eV 的能量沉积, 器件产生一次翻转在灵敏体积内需收集到一特定的电荷量, 即临界电荷  $Q_C$ , 它与相应最小能量沉积的关系为:

$$E_{\min} = 2.25 \times 10^{13} Q_C / f$$

其中:  $f$  为收集效率。

对于特定离子, 实际的能量沉积  $E$  是它穿过灵敏体积厚度  $x$  时所损失的总能量, 即

$$E = (dE/dx)x$$

式中:  $dE/dx$  为阻止本领( $\text{MeV} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), 即 LET 值。

为了简化实验和方便计算, 常常要求离子通过灵敏体积时的能量沉积近似随厚度线性增

收稿日期: 2000-04-27; 修回日期: 2000-07-10

作者简介: 李志常(1940—), 男, 湖北武汉人, 研究员, 核物理专业

加,合理的 LET 值应选在阻止本领曲线的 Bragg 峰处或其上变化比较平坦的部分,且离子能量大到足以穿过器件的灵敏体积。否则,能量沉积应为在厚度范围内的积分。对一个具体器件的这种效应的实验研究,要求 LET 值的范围在低端应尽可能接近翻转阈值  $LET_{th}$ ,在高端应尽可能接近饱和截面相应的区域。

美国的布鲁克海文国家实验室(BNL)是进行重离子 SEE 模拟实验研究最多的实验室,它将 2 台 MP 型串列加速器串接起来,其上的 EUTF(Single Event Upset Test Facility)是专为这类研究建造的终端设备。从 90 年代初开始,中国原子能科学研究所的串列加速器国家实验室进行了一系列空间辐射效应的模拟实验研究工作。利用该实验室的 HF-13 串列加速器提供的不同种类离子,连同不同能量及不同注量的组合,来模拟空间自然辐射环境。与回旋加速器相比,HF-13 串列加速器的突出优点是:可提供稳定的纳安级直流束;能量可快捷连续调整;易于变换离子种类。表 1 列出了 EUTF 及 HF-13 上常用的离子及主要性能。对于 HF-13,表中列出的是 30 角从金上散射离子的最大能量和相应的 LET 值,及其在硅中的相应射程。

表 1 EUTF 及 HF-13 上常用的典型离子及其主要性能<sup>1)</sup>  
Table 1 Ion species used in EUTF and HF-13 and their principal

离子	相对原子质量	最大能量/MeV		LET/MeV $\cdot$ mg <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>		射程 R/ $\mu$ m	
		EUTF	HF-13	EUTF	HF-13	EUTF	HF-13
C	12	105	89.6	1.4	1.5	203.8	159.2
O	18		114.6		2.9		104.6
F	19	150		3.2		133.7	
Si	28	195		8.0		81.0	
Cl	35	210	148.9	11.5	13.4	62.3	41.1
Fe	56		168.7		27.4		28.7
Ni	58	255		27.5		39.7	
Br	79	285	224.3	38.9	40.3	36.1	29.4
Ag	107	300	240.7	55.7	55.2	32.1	27.4
I	127	230	236.0	60.1	60.2	25.3	25.7
Au	192	345		80.8		27.1	

注:1) 表中的 LET 值及射程 R 均采用 Ziegler 等发展的 TRIM 程序计算得到

## 2 空间辐射效应模拟实验研究方法

为了实现空间辐射效应模拟实验研究,建立一套完整(具有多功能)、科学的重离子辐照研究方法是非常必要的。到目前为止,课题组已建立了一种较为配套的常规辐照研究方法(适用于不同型号和尺寸的器件),以及一套特殊的辐照方法——Q3D 磁谱仪焦面辐照方法。

### 2.1 常规的辐照效应研究

常规辐照实验通常在一散射室内进行(图 1)。根据大多数器件对注量率的要求,利用重离子在金靶上的散射粒子来照射器件较为合适,并用半导体探测器直接测量散射粒子数目来监督注量。为了获得尽可能高能量的粒子,被照器件一般置于较前角区,可通过适当改变角度或调整流强来改变注量率。在器件的另一侧大致对称的角度,利用一个半导体探测器 D1 测量

散射粒子,即跟踪监测辐照的粒子注量  $N_1$ 。在器件的完全相同的角度,即恰好位于器件的背后,放置另一探测器 D2,实际注量 用预先已刻度好的这两个探测器的计数比  $k$  换算得到:

$$= kN_1(R^2/r^2)S^{-1}$$

$$k = N_2/N_1$$

式中:  $N_2$  和  $N_1$  分别为当 D2 暴露于散射粒子(被辐照样品 DUT 移开)时, D1 和 D2 在相同时间内的计数;  $R$  和  $r$  分别为 D2 与被照样品 DUT 至靶子的距离;  $S$  为 D2 暴露的面积。与束流归一相比,这种监督归一方法避免了由于弱束流测量不准所带来的注量测量误差,同时,束斑或靶子移动引起靶厚变化带来的注量率变化将被抵消。在监测注量的同时,用专门的器件测试系统在测量室对被照射器件的状态进行跟踪测量,测量相应于不同 LET 值时及不同注量的 SEU 或 SEL 的计数,然后进行归一处理,得到  $\sim$ LET 关系曲线。图 2、3 分别示出 80C31 微控制器的单粒子辐照实验检测系统功能框图及粒子注量监测框图。根据实验结果,计算得到的微控制器 80C31 的出错截面与 LET 值的关系示于图 4,并采用 CREME(Cosmic Ray Effects on Microelectronics)程序对 80C31 单片机在同步轨道、不同环境条件下的 SEU 进行了估计(表 2)。

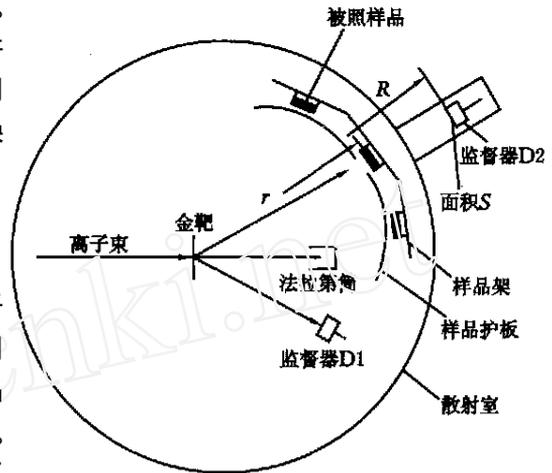


图 1 常规重离子辐射效应实验装置  
Fig.1 Setup of conventional experiments

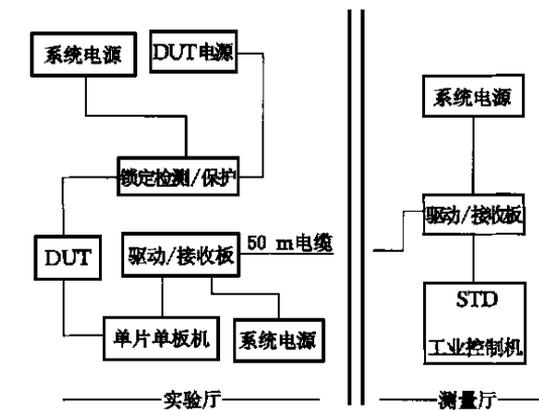


图 2 80C31 微控制器单粒子效应检测系统  
Fig.2 SEU test system for 80C31

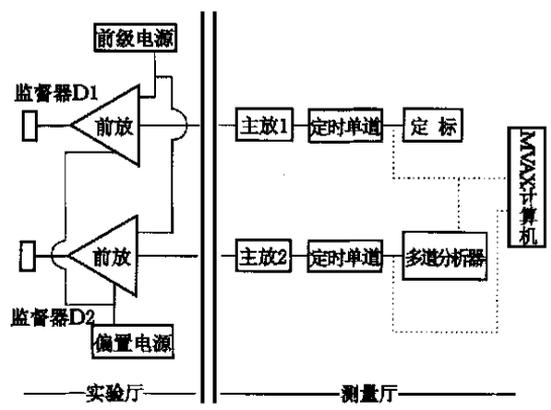


图 3 重离子辐照粒子注量监测系统框图  
Fig.3 Block diagram of electronics for monitoring fluence

表 2 80C31 在 3 条轨道上的单粒子翻转率预估

Table 2 Predicted upset rate	
轨道	翻转率/bit <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>
静止轨道	4.04 × 10 <sup>-5</sup>
极轨 900 km/98°	1.24 × 10 <sup>-5</sup>
低轨 500 km/28°	8.82 × 10 <sup>-7</sup>

2.2 总剂量-重离子辐照协和效应研究

在空间辐射环境中,用于卫星系统的许多电子器件(如 MOS)将随辐照剂量的不断积累而使性能参数不断退化,以至最后失效,影响卫星运行的可靠性和寿命。空间这一辐射剂量积累过程较为缓慢,达到 1 × 10<sup>4</sup> Gy (以 Si 计)的累积剂量约需 145 d,这对常规的辐照实验显得周期太长<sup>[2]</sup>。在实验室中利用高强度 <sup>60</sup>Co 射线源完成这种模拟研究是很适宜的。

在进行这种总剂量效应的模拟实验时,可根据实验要求采用不同的剂量率和总剂量,既可实现静态模拟,必要时也可实现动态模拟,即对器件在辐照过程中的状态实施跟踪监测。作为总剂量-重离子辐照协和效应研究,则在完成总剂量辐照后,先按实验要求对器件进行必要的再处理,然后进行重离子的辐照实验。利用中国原子能科学研究院 4.44 × 10<sup>15</sup> Bq 钴源,多次进行过此类研究<sup>[3]</sup>。

2.3 无场、无重核反冲辐照效应研究

在对样品进行重离子辐照时,不可避免地同时伴随着 场,它们来自束流管道、靶子及束流收集器上的 辐射。此外,对大多数辐照实验,由于用金靶上的重离子弹性散射来照射器件,在小角区(为了获得更大的能量),散射离子除了所用的重离子外,还有反冲的金离子。这些金离子的能量随入射离子变重而增加,这两种离子同时打在器件上。这两种干扰对研究由重离子引起的单粒子效应均产生不同程度的影响,又很难用简单的方法予以克服。

这类研究可在 Q3D 磁谱仪上实现(图 5)。其注量监测及器件状态测试与常规方法相似。不同的是,样品放在谱仪探测器室内的焦面上,散射离子经磁场偏转 115 聚焦到器件上。由于器件距靶约 9 m,可基本避免强 场的干扰(必要时可采用铅屏蔽);同时,利用谱仪的高分辨本领,通过磁场偏转,可有效地将包括重反冲核在内的各种干扰离子剔除。这种方法还有其它方便之处,如通过对聚焦场的调节可灵活有效地改变注量率及改善照射到器件上的离子流均匀性等。

2.4 大体积电子系统或飞行试验样机整机性能的实验室模拟辐照研究

在许多情况下,较大体积的飞行试验样机或用于卫星的大体积电子系统,在发射之前,对它们进行实验室模拟辐照研究是非常有意义的。但是,由于某些特殊的原因,要求必须进行整机实验,这就需要有足够大体积的高真空室。北京 Q3D 磁谱仪的探测器室具有 1.3 m<sup>3</sup> 的容积,该设备不仅可作精确测量,而且具有极好的重复性以及可在测量室远距离全自动控制及灵活方便等优点。

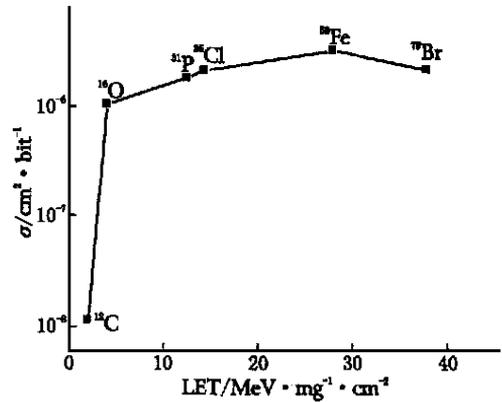


图 4 微控制器 80C31 单粒子出错截面

Fig. 4 Error cross section for 80C31 microcontroller

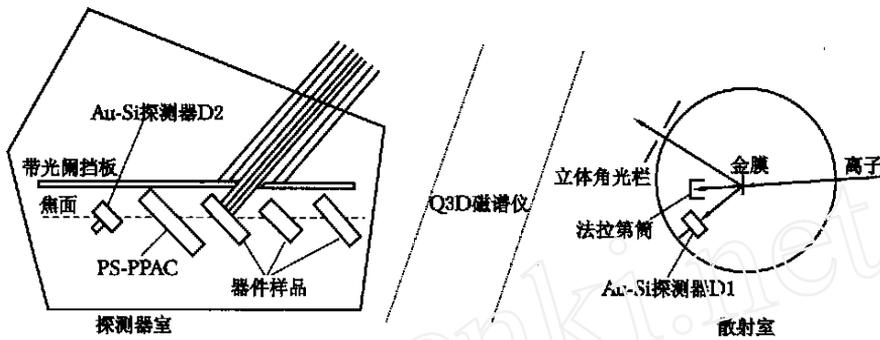


图5 Q3D磁谱仪焦面辐照装置

Fig. 5 The illumination setup of Q3D magnetic spectrometer

第一个应用实例是卫星用 80386EX 星载计算机系统的整机性能重离子辐照效应的验证及单粒子敏感度评估试验。由于系统在较高的时钟驱动下工作,实验中,被照射器件的馈入及引出连线不能用并行线从电路板上引出引入,因而,必须将整机系统置于真空室中(图4)。此次实验对确保如此大规模集成电路组成的计算机系统能够在轨安全工作具有十分重要的意义<sup>[4]</sup>。

另一个应用实例是高注量质子辐照时,强辐射保护器原理样机工作性能的实验研究。太空中,由于各种原因产生的质子强辐射场会对航天器的各种部件产生影响,甚至完全将它们破坏。作为一种抗辐射加固措施,对电子设备遭受的空间辐射强度进行适时监测,并采取适当而有效的控制措施,如及时切断电源,这种自主报警及自主控制不失为一种有效的保护办法。这对提高卫星寿命和可靠性具有十分重要的意义。

实验是在 Q3D 磁谱仪上完成的。保护器设定有两种质子注量率的报警信号,分别为  $300$  和  $1000 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。选定质子能量  $E_p$  分别为  $6$ 、 $10$  和  $21 \text{ MeV}$ 。该实验的主要目的是实验标定报警信号的上下阈值及灵敏度。因此,要求动态记录下注量率随时间的变化以及对报警信号的响应情况。注量率谱是用多道分析器的多路定标方式获得的(图6)。图中展示了注量率随时间在小范围内的变化,以及受报警信号开启和关闭的控制情况,对应于计数开始和停止的注量率即为这个报警信号的上下阈值。

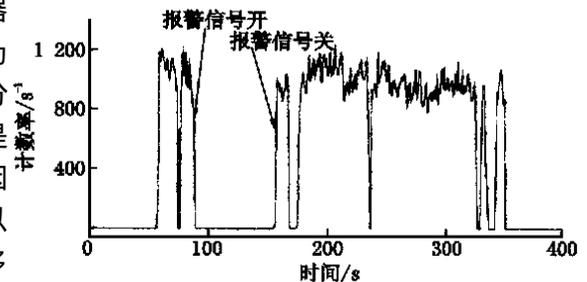


图6 强辐射保护器注量率响应谱

Fig. 6 Responding spectrum of fluence rate

### 3 结论

以上常规辐照研究方法以及 Q3D 磁谱仪焦面辐照方法已被成功地用于大量的各种器件的辐照效应研究,并已用于较为重要的卫星发射前器件或系统的预评估。常规辐照方法的优点是简便易行、快捷可靠。缺点是辐照离子受运动学效应影响,能量有不同程度的降低,辐照

束的均匀性受限制,且只限于单片器件的实验。Q3D 磁谱仪焦面辐照方法基本上可克服以上方法的缺点,它的许多优点使得它有着广阔的应用前景。特别是配合二维位置灵敏探测器对束分布及强度的监测,可用于高剥离电荷态离子的直接照射实验。这种高剥离电荷态离子将大大提高它的能量,因而,LET 值及射程  $R$  将扩大到更大的实用范围。

#### 参考文献:

- [1] 李志常,李淑媛,姜华,等. 卫星器件空间辐射效应实验室模拟研究发展概况[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(3): 279 ~ 282.
- [2] Khosropour P, Fleetwood DM. Evaluation of a Method for Estimating Low Dose-rate Irradiation Response of MOSFET[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(6): 2560 ~ 2572.
- [3] 孟庆茹. 总剂量对 80C31 和 HM65152 的单粒子效应的影响[A]. 卫星抗辐射加固技术学术交流文集[C]. 北京:中国空间技术研究院, 1995. 46 ~ 54.
- [4] 华更新. 386EX 芯片单粒子效应试验[A]. 第四届卫星抗辐射加固技术学术交流文集[C]. 兰州:中国空间技术研究院, 1999. 160 ~ 166.

## Simulation Investigation of Space Radiation Effects by Use of HF-13 Tandem Accelerator

LI Zhi-chang, LI Shu-yuan, JIANG Hua, LIU Jian-cheng

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-10, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Some physical parameters in experimentally simulation study of the space radiation effects are described and the discussions are made for the experimental selection of these parameters. The emphasis is put on the introduction of the investigation methods which are very well developed. Some application examples are given.

**Key words:** simulation investigation; stopping power; fluence; HF-13 tandem accelerator; Q3D magnetic spectrometer