

QJ

中华人民共和国航天行业标准

FL 6100

QJ 10005—2008

宇航用半导体器件重离子单粒子效应 试验指南

**Test guidelines of single event effects induced by heavy ions of
semiconductor devices for space applications**

2008—02—16 发布

2008—06—01 实施

国防科学技术工业委员会 发布

目 次

前 言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 一般要求.....	2
4.1 试验单位.....	2
4.2 试验人员要求.....	2
4.3 仪器与设备.....	2
4.4 试验环境.....	2
4.5 总剂量效应影响的考虑.....	2
4.6 辐射安全和辐射防护.....	2
4.7 不确定度分析.....	3
4.8 文件.....	3
5 试验方法.....	3
5.1 试验目的.....	3
5.2 试验原理.....	3
5.3 试验设备.....	4
5.4 试验程序.....	7
5.5 试验报告.....	8
附录 A (资料性附录) 宇航用半导体器件重离子单粒子试验方案格式.....	9
附录 B (资料性附录) 宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验报告格式.....	11
附录 C (资料性附录) HI-13 串列静电加速器和回旋加速器 HIRFL.....	13
附录 D (资料性附录) 在轨单粒子事件率预示.....	15

前 言

本指导性技术文件的附录A、附录B、附录C和附录D为资料性附录。

本指导性技术文件由中国航天科技集团公司提出。

本指导性技术文件由中国航天标准化研究所归口。

本指导性技术文件起草单位：中国航天科技集团公司第五研究院物资部、中国航天标准化研究所。

本指导性技术文件主要起草人：于庆奎、唐民、朱恒静、孟猛、管长才、蔡娜、周侗、王敬贤。

宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南

1 范围

本指导性技术文件给出了宇航用半导体器件（以下简称器件）重离子辐照引起的单粒子效应的试验指南，包括试验要求、试验方法和试验程序。

本指导性技术文件适用的单粒子效应包括单粒子翻转、单粒子锁定、单粒子扰动等。不包括功率MOS器件的单粒子烧毁。本指导性技术文件中的半导体器件包括半导体集成电路和半导体分立器件。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本指导性技术文件的引用而成为本指导性技术文件的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包含勘误的内容）或修订版均不适用于本指导性技术文件，然而，鼓励根据本指导性技术文件达成协议的各方研究是否使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本指导性技术文件。

GB 4792—1984 放射卫生防护基本标准

GJB 1649—1993 电子产品防静电放电控制大纲

GJB 2712—1996 测量设备的质量保证要求 计量确认体系

GJB 3756—1999 测量不确定度的表示及评定

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本指导性技术文件。

3.1

单粒子效应（SEE） single event effects

早先用来描述现被称为单粒子事件中的许多效应的术语。

3.2

单粒子事件（SEP） single event phenomena

由高能粒子单个撞击引发的半导体器件一系列响应的统称。包括中子、质子引起的效应。

3.3

单粒子翻转（SEU） single event upset

单个高能粒子作用于器件，引发器件的逻辑状态改变的一种辐射效应。

3.4

单粒子锁定（SEL） single event latch-up

单个高能粒子将器件内寄生的可控硅触发开启，形成低电阻、大电流状态。

3.5

线性能量传输（LET） linear energy transfer

离子沿入射方向单位长度沉积的能量。

3.6

LET 阈值 threshold LET

QJ 10005—2008

对于给定的器件，LET 阈值定义为垂直入射的离子在给定的注量下能产生 SEU 的最小 LET 值。在一些场合，LET 阈值又定义为一定比例饱和截面对应的 LET 值。本规范用后一个定义。

注：本指导性技术文件规定翻转截面为 1% 饱和翻转截面所对应的 LET。

3.7

有效 LET effective LET

离子倾角入射时等效于沿表面法线方向单位长度上沉积的能量

注： $LET_{\text{eff}} = LET_{\theta} / \cos\theta$ ，其中 LET_{θ} 为以 θ 角入射的离子的 LET。

3.8

注量率 flux

单位时间内单位面积垂直入射粒子数，单位为粒子数每平方厘米秒（粒子数/cm²·s）。

3.9

注量 fluence

垂直入射方向单位面积粒子总数。单位为粒子数每平方厘米（粒子数/cm²）。

3.10

单粒子事件截面 SEP cross section

单位注量下的单粒子事件数。

注： $\sigma = \text{单粒子事件数} / (\text{注量} \times \cos\theta)$ ，其中， σ 为单粒子事件截面，单位：cm²/器件，或 cm²/位； θ 为离子入射角。

3.11

饱和截面 saturation cross section

增加入射离子的 LET 值而单粒子事件数不再增加时的单粒子事件截面。

4 一般要求

4.1 试验单位

承担辐照试验的单位应有上级主管部门或本行业相关部门或用户认可的资质。

4.2 试验人员要求

试验人员应掌握半导体器件的基础知识，了解辐射效应原理，具有辐照试验经验，并持证上岗。

4.3 仪器与设备

所使用的仪器和设备应按照 GJB 2712—1996 中第 4 章的要求进行校准。

4.4 试验环境

试验环境要求如下：

- a) 环境温度：15℃～35℃；
- b) 相对湿度：20%～80%；
- c) 静电防护满足 GJB 1649—1993 的规定。

4.5 总剂量效应影响的考虑

如果被试器件进行过总剂量试验，应评估总剂量效应对单粒子效应的影响。

当入射离子数量达到 10⁷ 个离子/cm²，应考虑总剂量效应的影响。

如测试环境中同时存在 γ 辐射场时，应考虑总剂量效应的影响。

4.6 辐射安全和辐射防护

试验人员在辐射源区的操作应符合 GB 4792—1984 的要求。

4.7 不确定度分析

应按 GJB 3756—1999 中第 5 章的规定进行试验结果的不确定度分析。

4.8 文件

文件要求如下：

- a) 试验前应制定试验方案，格式参见附录 A；
- b) 试验后应编写试验报告，格式参见附录 B。

5 试验方法

5.1 试验目的

通过试验，获得器件单粒子事件截面与入射离子 LET 的关系，为评价器件的单粒子效应敏感性提供数据。

5.2 试验原理

用 i (通常要求 $i \geq 5$) 种不同 LET 的离子，以倾角 $\theta(i)$ 入射到芯片表面，入射到芯片表面的离子总数为 $\Phi(i)$ ，检测器件发生的单粒子事件数 $N(i)$ 。利用公式 (1) 和 (2) 计算 LET (i) 的离子照射下器件的单粒子事件截面 $\sigma(i)$ 和 $\text{LET}(i)_{\text{eff}}$ ：

$$\sigma(i) = N(i) / (\Phi(i) \times \cos\theta(i)) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

i ——不同 LET 离子的种类数；

$\sigma(i)$ ——第 i 种 LET 离子的单粒子事件截面，单位为平方厘米每器件或平方厘米每位 ($\text{cm}^2/\text{器件}$ 或 $\text{cm}^2/\text{位}$)；

$N(i)$ ——第 i 种 LET 离子测得的单粒子事件数；

$\Phi(i)$ ——第 i 种 LET 离子的总注量；

$\theta(i)$ ——第 i 种 LET 离子的入射角，单位为度 ($^\circ$)。

$$\text{LET}(i)_{\text{eff}} = \text{LET}(i) / \cos\theta(i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

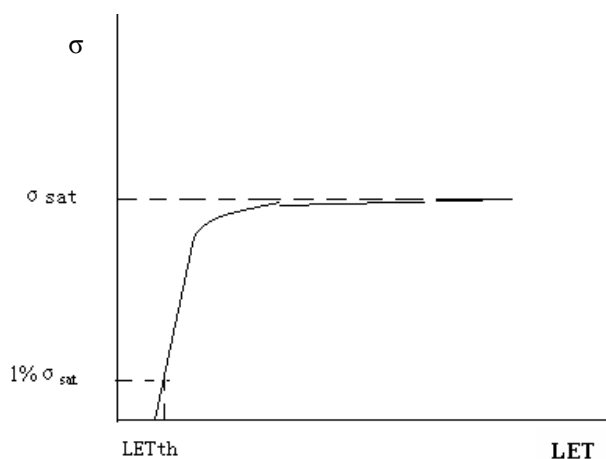
式中：

$\text{LET}(i)_{\text{eff}}$ ——以 θ 角入射的第 i 种 LET 离子的有效 LET 值；

$\text{LET}(i)$ ——第 i 种 LET 离子的 LET 值。

画出单粒子事件截面 $\sigma(i)$ 和入射离子 $\text{LET}(i)_{\text{eff}}$ 的关系曲线，如图 1 所示。由 $\sigma \sim \text{LET}$ 曲线得出反映器件单粒子事件敏感性的两个关键参数：单粒子事件饱和截面 σ_{sat} 和 LET 阈值 LET_{th} 。

由单粒子事件饱和截面 σ_{sat} 和 LET 阈值 LET_{th} ，结合空间辐射环境模型，可预示器件在各种空间环境中的单粒子事件率。

图1 $\sigma \sim \text{LET}$ 关系曲线

5.3 试验设备

5.3.1 辐射源

5.3.1.1 概述

辐射源应能输出重离子，重离子的 LET、注量率应满足试验要求。重离子在硅中的射程一般要求大于 $30 \mu\text{m}$ 。照射到被试器件敏感区表面的束流非均匀性小于 10%。

重离子单粒子效应模拟试验常用的辐射源有回旋加速器、串列静电（Van de Graaff）加速器、铀源。根据被试器件的单粒子敏感性、试验目的、试验时间和费用等选择合适的辐射源。

5.3.1.2 回旋加速器

回旋加速器可加速能量可变的多种离子，注量率在 $100 \text{ 粒子}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \sim 10^8 \text{ 粒子}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 连续可调，在硅中的射程不少于 $30 \mu\text{m}$ 。加速器配有放置试验板的真空室，真空室有密封插座，电缆可通过密封插座与外部试验系统连接。

回旋加速器的特点是可将离子加速到很高的能量，加速离子的最大能量可超过 1GeV，加速离子的射程长。对某些离子可以在大气环境进行试验。

和串列静电加速器比，回旋加速器改变离子种类的时间较长。

5.3.1.3 串列静电加速器

串列静电加速器可加速能量连续可变的离子，注量率在 $100 \text{ 粒子}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \sim 10^8 \text{ 粒子}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 连续可调。加速器具有放置试验板的真空室，真空室有密封插座，电缆可通过密封插座与外部试验系统连接。

串列静电加速器的特点是可以相对快速改变离子的种类和能量，较快测量出敏感器件的单粒子事件阈值和回旋加速器比，串列静电加速器提供的离子的能量相对较低，离子的射程一般较短，特别是它难以提供射程满足要求的高原子序数的离子。

HI-13 串列静电加速器和回旋加速器 HIRFL 提供的离子参数参见附录 C。

5.3.1.4 铀源

放射性核素铀-252 (^{252}Cf) 为自发裂变碎片源，裂变产物的平均 LET 为 $43 \text{ MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$ ，在硅中的射程约 $15 \mu\text{m}$ 。

利用铀源的主要优点是试验时间短、费用低。缺点是离子的射程短。

利用铀源无法获得 $\sigma \sim \text{LET}$ 曲线。铀源适用于定性预估器件的单粒子事件敏感性。

5.3.2 束流测量系统

束流测量系统包括束流强度测量系统、束流均匀性测量系统和束流能量测量系统。

束流强度测量系统可以是闪烁探测器、位置灵敏探测器、电离室或次级粒子探测器等，应具有优于 $\pm 10\%$ 的测量精度，能连续、实时监测的离子注量。

束流均匀性测量系统由可移动闪烁体探测器或位置灵敏探测器等组成，应具有优于 $\pm 10\%$ 的测量精度。

束流能量测量系统由锂漂移探测器等组成，测量精度应满足要求。

5.3.3 单粒子效应测试系统

5.3.3.1 总则

单粒子效应试验过程中，被试验器件的测试是一项复杂的技术。对同一器件，不同测试方法或不同的测试程序，其测试结果不相同，甚至相差很大。

单粒子效应测试系统的结构由被试器件的类型和功能决定，基本要求如下：

- a) 至少能够对器件实际使用的功能进行测试；
- b) 能够对被试验器件进行初始化设置；
- c) 单粒子效应事件的诊断和记录功能；
- d) 数据的实时处理、存贮和检索；
- e) 具有自动复位或手动复位的功能；
- f) 具有良好的抗电磁干扰能力。

5.3.3.2 存储器类电路的测试

存储器和锁存器类电路的测试系统应具有静态检测功能或动态检测功能。

在静态模式中，器件先装入特定的图形后，进行一定注量的辐照，然后检测器件的出错数据。

在动态模式下，器件在辐照过程中周期性地对图形的写入、等待、读出比较的操作过程，错误在读过程中被发现，在写过程中被更正。调节等待时间可以发现线路中最敏感的存储单元。

测试系统应能够产生不同算法的测试向量，如全“0”、全“1”、乒乓、下雨、棋盘格、走步或其他方式等。

测试系统应具有测试多位翻转的能力。

5.3.3.3 微处理器类复杂数字电路的测试

微处理器类复杂数字电路的测试系统应能完成下面的测试：

- a) 单机自测试法：被试器件是系统的一部分，工作过程中同时进行自测试，将错误记录下来；
- b) 单机辅助控制法：外部控制器检测被试验器件的输出并将结果保存到外部存贮器中；
- c) 辅助控制金片法：两个相同的微处理器相继工作，一个被辐照，另一个被屏蔽。用外部的控制器比较并记录两个微处理器的输出；
- d) 单机控制法：控制器用于给器件提供输入，连续检测其输出，并与预期值相比；
- e) 单机控制金片法：控制器给两个相同的器件提供相同的输入信号，一个被辐照，另一个被屏蔽。控制器检测并比较两者的输出。

微处理器具有不同的功能模块，应分别进行测试。例如，微处理器一个很重要的功能就是“Cache”功能，当打开“Cache”功能时，微处理器的执行速度会比“Cache”功能不打开时要快。对微处理器进行单粒子试验时，要分别执行Cache功能关、开程序，并分别计算单粒子效应的数量。

5.3.3.4 模拟电路的测试

对于模拟电路，如电压比较器和运算放大器，单粒子效应可能会表现为输出电平的波动，检测时要对输出电压连续检测，与未辐照时相比，出现的偏离视为发生了单粒子效应。输出电平的波动可以用采样—保持电路检测，也可以用存储示波器将波形存储之后分析。

5.3.3.5 数—模混合电路的测试

模/数转换器可检测数字输出。对于静态检测，检测输出的信号、幅度；对于动态检测，可以采用“金片”比较的方法。还可以给输入加一个特定的波形，将数字输出存贮下来，在辐照过程中或辐照之后，给器件施加同一组输入信号，比较其输出信号的变化，有偏离时认为发生了单粒子效应。

5.3.4 单粒子锁定的测试

用监测电源电流突然增加的方法测试集成电路的“锁定”现象。用计算机控制的可编程电源，实现 SEL 的测试或者采用图 2 的线路，通过测量采样电阻的压降来监视流过的电流，当电流超过规定值时，电压比较器通过与参考电压比较，发出信号，切断电源开关，保护被试器件。

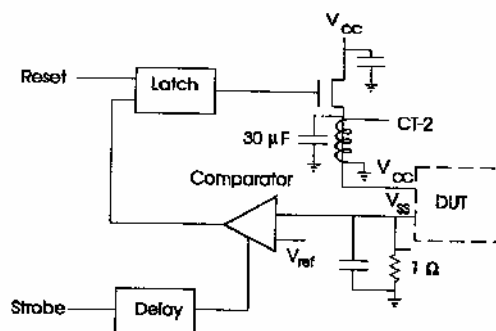


图 2 “锁定”测试及被试器件保护线路图

当温度和电源电压升高时，发生“锁定”的阈值下降，“锁定”敏感度增加。因此，LET 测试通常在最大电压和最高温度的最劣条件下进行。

单粒子锁定测试系统应能够检测和记录锁定状态，并根据需要采取保护措施，锁定保护的响应时间要短，确保被试器件不出现损伤。

试验系统应具有实时温度监测和控制的能力。

5.3.5 试验板和电缆

被试器件放在试验板上，放置在试验环境中。如在真空室内测试，需通过电缆和真空密封插头，与外部的测试系统连接。试验板和电缆必须具备以下几个要求：

- a) 试验板和电缆的尺寸、重量满足真空室设备的要求；
- b) 试验板连接电缆满足真空室硬件接口的要求；
- c) 试验板和电缆不含吸附气体严重的材料；
- d) 如被试器件为开帽状态，应确保芯片在线路板上的安全性；
- e) 试验板上的安装孔位符合真空室设备要求；
- f) 如果辐照试验板上采用了除被试器件外的其它元器件，应保证其它元器件的性能不受试验环境的影响；
- g) 试验板应具有良好的机械稳定性、可移动性和抗振动；
- h) 试验板和电缆应具有良好的抗电磁干扰能力。

5.3.6 温度测量系统

温度测量系统应能对被试器件在辐照期间的壳温进行实时测量、记录，温度测量系统通常由满足测量要求的热电偶等测量仪器组成。

5.4 试验程序

5.4.1 制定试验方案

试验前应制定试验方案，格式参见附录 A，试验方案至少应包括以下内容：

- a) 试验方案的编号；
- b) 试验方案的名称；
- c) 器件类别、名称、封装形式、生产单位和样品数量；
- d) 单粒子试验的类别：SEU、SEL、SET；
- e) 工程型号；
- f) 试验单位；
- g) 辐射设备的名称和辐射源的种类；
- h) 器件的结构（工艺）：体硅 CMOS、外延 CMOS、CMOS SOI、特征尺寸；
- i) 试验用的离子：离子的种类、能量、LET 值、射程；
- j) 测试系统描述：测试周期、频率、静态条件、测试图形、试验期间被试器件所施加的电压；
- k) 辐照试验顺序，描述试验的每一步和这些步骤的相关要求；
- l) 特殊说明。

5.4.2 样品准备

5.4.2.1 除非另有规定，一批产品的试验样品数量应不少于 3 只。器件可以是不经筛选的，但应经测试合格。每一个器件应编号，并按编号记录数据。

5.4.2.2 需要时，试验前样品应开帽。需要时，应去除芯片表面的保护层。测量并记录芯片的尺寸，照相记录芯片的特征。

5.4.2.3 开帽后应对试验样品进行测试，只有测试合格的样品方可进行后续试验。

5.4.3 粒子选择

粒子选择的要求如下：

- a) 参照与被试器件结构、工艺最接近的器件的单粒子试验数据，判断被试器件的单粒子事件 LET 阈值范围；
- b) 根据预估的器件单粒子事件 LET 阈值确定离子种类和能量。如果要试验获得 $\sigma \sim \text{LET}$ 曲线，以便进行单粒子事件率预估，则选用的离子种类和能量点数应至少具备 5 种以上不同的有效 LET 值。离子的有效 LET 应能覆盖被试器件从刚开始出现单粒子事件到单粒子事件达到饱和截面所相应的 LET 范围；
- c) 选择的离子在硅中有足够的射程，通常要求大于 $30 \mu\text{m}$ ；
- d) 可以采用倾斜入射以获得有效 LET 的增加。但离子的射程必须满足要求，且离子在通过敏感区体积内的 LET 变化不大。有效 LET_{eff} 计算见公式 (2)，且倾角不应大于 60° 。增加入射角度对单粒子锁定不一定有效；
- e) 单粒子翻转试验时的注量率的选择以每秒钟内产生不大于 1 次~4 次错误为宜；
- f) 若总注量达到 10^7 离子数/ cm^2 未出现错误，则认为在该 LET 值下器件单粒子效应不敏感，可以增加入射离子有效 LET 值；
- g) 若翻转总数达到 100 个（或规定值），或总注量达到 10^7 离子数/ cm^2 （以先到者为准），或辐照到规范规定的时间，则停止辐照，根据规范变换有效 LET。

5.4.4 试验装置安装调试

根据靶室的条件,将试验板、探测器固定在辐照支架上,应保证试验装置与试验支架移动的一致性。确保入射离子辐照到被试器件的敏感区表面。调整样品与束流夹角,满足试验方案的要求。

检测试验板和单粒子效应的检测系统通信正常,功能正常。

5.4.5 束流调整和测量

按试验方案要求,调整满足要求的束流,包括能量、注量率、辐照面积和均匀度等。

5.4.6 试验数据记录

实时监测并记录器件发生的单粒子事件数和入射离子注量、注量率、时间和器件的亮温。

5.4.7 数据分析处理

按 5.2 的规定,计算垂直入射到器件表面每种 LET 离子的总注量 $\Phi(i)_{\text{eff}}$, 见公式 (4):

$$\Phi(i)_{\text{eff}} = \Phi(i) \times \cos\theta \dots\dots\dots (4)$$

式中:

$\Phi(i)_{\text{eff}}$ ——垂直入射到器件表面第 i 种 LET 离子的总注量。

根据测量的器件的单粒子事件数 $N(i)$, 计算每种 LET 下的单粒子事件截面 $\sigma(i)$, 见公式 (5):

$$\sigma(i) = N(i) / \Phi(i)_{\text{eff}} \dots\dots\dots (5)$$

绘制出单粒子事件截面 $\sigma(i)$ 与入射离子有效 LET 值的关系曲线。

根据曲线获得单粒子事件饱和截面和单粒子事件阈值 LET_{th} , 即单粒子事件截面为 1%饱和截面对应的 LET 值。

5.4.8 试验结果不确定度分析

需要时,进行试验结果不确定度分析。

5.5 试验报告

试验后应写试验报告,格式参见附录 B。试验报告内容至少包含:

- a) 试验报告编号;
- b) 试验方案编号;
- c) 器件描述;
- d) 器件类别、名称、型号规格、批次、封装形式、数量、生产单位、质量等级、器件工艺;
- e) 样品处置: 样品是否开帽, 芯片尺寸, 芯片钝化, 芯片表面是否涂胶, 是否去除内涂胶及去除方法;
- f) 辐射源的地点;
- g) 有源区深度, 是测量值还是从生产厂获得的数据;
- h) 试验类别: SEU、SEL、SET 等;
- i) 辐射源的种类, 离子种类、能量 (MeV)、粒子入射角度、LET 值、有效 LET 值和射程;
- j) 被试器件的温度;
- k) $\sigma \sim \text{LET}$ 曲线;
- l) 需要时, 给出在轨单粒子翻转率预示结果, 参见附录 D。给出预示所用的单粒子敏感特征参数值、预示软件名称和版本号、轨道参数、辐射环境、屏蔽厚度等;
- m) 其它。

附录 A

(资料性附录)

宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验方案格式

宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验方案格式见图 A.1。

报告编号:	第 页 共 页	
1 试验目的		
本规范详细说明了使用 XXX 源对 XXX 器件进行单粒子效应辐照试验 (SEU、SEL、SET 等) 的要求。		
2 适用范围		
本规范适用于 XXX 器件单粒子效应试验。		
3 引用标准及文件		
4 试验要求		
4.1 一般要求		
辐照试验应符合 QJ 10005—2008 《宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南》的规定。		
4.2 辐射源		
辐射源地点	加速器名称	
离子种类		
能量 (MeV)		
LET (MeV/mg/cm ²)		
Si 中射程 (μm)		
4.3 试验样品		
样品类别	工程型号	
样品名称	样品型号	
生产批次	样品工艺	
质量等级	生产单位	
样品数量	封装形式	
样品编号		
电测情况	电参数测试系统	
4.4 试验线路板		
试验线路板应符合 QJ 10005—2008 《宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南》的规定。		
4.5 单粒子效应测试系统		
单粒子效应测试系统应符合 QJ 10005—2008 《宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南》的规定。		
5 试验流程		
按 QJ 10005—2008 《宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验指南》的规定, 制定试验流程。		
6 辐照试验工序单		
辐照试验工序单格式见图 A.2。		

图 A.1 宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验方案格式

附录 B

(资料性附录)

宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验报告格式

宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验报告格式见图 B.1。

报告编号：_____ 第 页 共 页

一、试验样品

样品类别		工程型号	
样品名称		样品型号	
生产批次		样品工艺	
质量等级		生产单位	
样品数量		封装形式	
样品编号			

二、辐射源

辐射源地点		加速器名称			
离子种类					
能量 (MeV)					
LET (MeV/mg/cm ²)					
Si 中射程 (μm)					

三、试验结果

- 1、试验类别：SEU, SEL, SET?
- 2、器件单离子翻转的 LET 阈值为 XXX
- 3、器件单粒子翻转的饱和截面为 XXX
- 4、根据地面试验数据，预估器件在轨单粒子翻转率为 XXX

正文：

一、试验目的

给出试验的目的。

二、试验依据

给出试验的依据。

三、试验样品

样品的外部标识为：

给出器件典型外观图。

给出器件芯片形貌图。

四、试验系统

描述试验硬件系统、软件系统。

五、试验项目及主要数据

试验项目及数据记录的说明。

试验结果数据统计详见下表。

序号	试验系统	总注量/cm ²	试验次数	翻转次数	锁定次数	烧毁次数	备注

试验结果分析：

1) 试验数据

离子种类	试验系统	总注量/cm ²	LET MeV·mg/cm ²	翻转次数	翻转截面 (cm ⁻²)	锁定次数

2) 试验曲线

绘制翻转截面~LET 曲线。

3) 不确定度分析

需要时，进行试验结果的不确定度分析。

六、试验结论

1、试验类别：SEU、SEL、SET?

2、器件单粒子翻转的 LET 阈值为 XXX。

3、器件单粒子翻转的饱和截面为 XXX。

4、根据地面试验数据，预估计器件在轨单粒子翻转率为 XXX。

图 B.1 宇航用半导体器件重离子单粒子效应试验报告格式

附录 C

(资料性附录)

HI-13 串列静电加速器和回旋加速器 HIRFL

C.1 HI-13 串列静电加速器

HI-13 串列静电加速器标称端电压为 13MV，电压稳定度 1kV，离子能量连续可调。该加速器进行单粒子试验常用的离子种类、能量和在硅中的 LET 值及射程见表 C.1。

表 C.1 HI-13 串列静电加速器单粒子效应试验常用的离子

离子种类	能量 MeV	Si 中 LET 值 MeV/ (mg/cm ²)	Si 中射程 μm
¹² C ⁶⁺	80	1.73	127.1
¹⁶ O ⁸⁺	104	3.03	100.8
¹⁹ F ⁸⁺	104	4.33	76.6
²⁸ Si ¹⁰⁺	126	9.6	46.6
³⁵ Cl ¹¹⁺	138	13.9	38.9
⁴⁸ Ti ¹²⁺	149	22.6	30.8
⁶³ Cu ¹³⁺	161	33.4	26.4
⁷⁹ Br ¹⁴⁺	172	42.0	25.5
⁷⁹ Br ¹⁹⁺	210	42.0	29.4
¹²⁷ I ¹⁶⁺	195	59.0	24.0
¹²⁷ I ²²⁺	238	62.8	27.0

真空室尺寸为 2m×1m×1m，试验板可移动范围为 100mm×70mm，典型辐照面积为 20mm×20mm。

C.2 回旋加速器 HIRFL

HIRFL 典型的可用于器件单粒子效应试验的离子种类、能量及在硅中射程和 LET 见表 C.2。

表 C.2 回旋加速器 HIRFL 典型的离子

离子种类	总能量 MeV	Si 中射程 μm	Si 中 LET MeV/ (mg/cm ²)	Si 中 LET _{max} MeV/ (mg/cm ²)	LET _{max} 值对应的能 量 MeV
¹² C	960	9560	0.2437	5.128	3
¹⁴ N	1120	8050	0.3374	6.036	4
¹⁶ O	1200	6300	0.4620	7.165	5
²⁰ Ne	1600	5700	0.6838	8.949	14
²⁴ Mg	156.96	81.24	6.097	11.49	16
²⁶ Mg	170.04	88.02	6.095	11.49	18
³² S	171.2	54.15	11.12	16.57	32.5
³⁵ Cl	210	63.63	11.52	17.35	40
³⁶ Ar	2952	3260	2.267	18.65	40
⁴⁰ Ar	2320	2010	2.945	18.65	45
⁴⁰ Ca	244	58.28	15.08	21.54	65
⁵⁶ Fe	1232	317.54	11.21	29.31	110
⁵⁸ Ni	2900	1040	7.360	31.39	120
⁸⁴ Kr	2100	335.33	18.77	40.92	180
¹²⁹ Xe	1032	75.81	62.58	69.23	450
¹³⁶ Xe	2053.6	154.41	50.24	69.26	500

QJ 10005—2008

HIRFL 加速器的主要特性如下：

- a) 进行单粒子试验的真空室为圆柱形，直径为 500mm，高为 410mm；
- b) 靶室真空度： 10^{-5} Pa；
- c) 靶室内具有转盘和升降支架，可对试验样品进行转动和升降；
- d) 靶室有束流引出窗，对某些离子可以引出到真空外照射；
- e) 辐照面积最大为：50 mm×50mm；
- f) 注量率从 10^2 粒子/cm².s~ 10^8 粒子/cm².s 连续可调。

HIRFL 单粒子试验装置示意图见图 C.1。

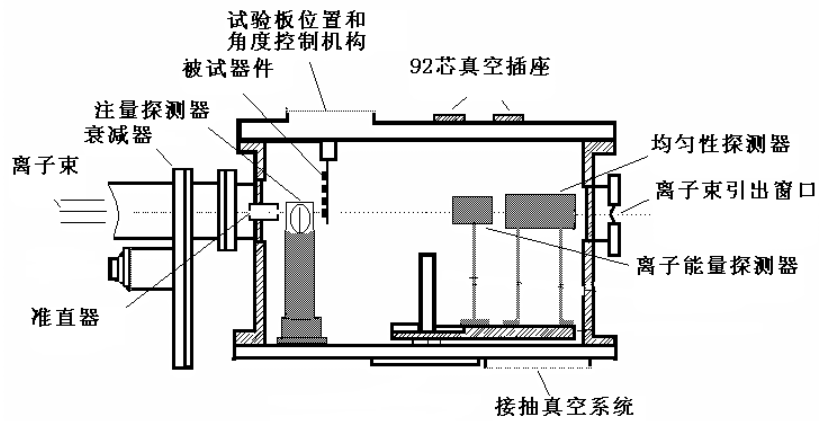


图 C.1 HIRFL 单粒子试验装置示意图

附录 D
(资料性附录)
在轨单粒子事件率预示

根据需要可以利用 Space Radiation 或 CRÈME 软件进行在轨单粒子事件率预示。

根据要求选择卫星轨道，通常选择地球同步轨道（35786km/0°）、极轨道、低地球轨道，以及 3 mm 铝屏蔽、10%最坏情况和 JPL92 年特大太阳耀斑情况下的单粒子事件率。

中华人民共和国航天行业标准
宇航用半导体器件重离子
单粒子效应试验指南
QJ 10005—2008

*

中国航天标准化研究所出版
北京西城区月坛北小街2号
邮政编码：100830

中国航天标准化研究所
印务发行部印刷、发行
版权专有 不得翻印

*

2008年6月出版
定价：21.00元