

宇航器件中的单粒子效应及其加速器地面模拟

侯明东 马峰 刘杰

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘 要 描述了宇航半导体器件的单粒子效应的危害和研究方法,并介绍了用重离子加速器进行地面模拟研究的概况.

关键词 单粒子效应 半导体器件 重离子加速器应用

1 引言

第一颗人造地球卫星开辟了人类历史的新纪元,使人类活动的范围扩展到没有大气保护的宇宙空间.空间环境究竟潜在着哪些不安全的因素,应该采取哪些措施,是人类关心并且应首先解决的问题.

三十余年已发射了数以千计的航天器.实践证明,几乎所有的空间环境参数对航天器都有不容忽视的影响.所考虑的空间环境参数包括:地球重力场、地球高层大气、原子氧、地磁场、银河宇宙线、太阳宇宙线、地球辐射带、地球电离层、磁层等离子体、微流星、空间碎片、太阳电磁辐射等,诸多因素中对航天器的安全威胁最大的是微流星和高能带电粒子.航天历史表明微流星的碰撞几率比原先人们预计的要小,而对于空间高能带电粒子的数量和危害的估计是远远不足的,并且为此已经付出了惊人的代价.

2 单粒子效应严重威胁航天器的安全

宇宙射线中的高能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他们完全复合之前把他们分开,于是产生一个电流脉冲.如果被收集的电荷大于电路状态翻转所需要

的临界电荷,电路将会发生翻转,从而改变在记忆单元中所存贮的逻辑信息,称之为软错误^[1].目前先进的电路只需沉积 1.1MeV 的能量就能使电路翻转.

因为一个粒子就能引起一个软错误,所以这个现象被称为单粒子翻转或单个事件扰乱,英文缩写为 SEU (Single Event Upset),亦有称为 SEE (Single Event Effect) 或 SEP (Single Event Phenomena).这个现象包括软错误或位翻转、闭锁、功率 MOSFET 烧毁、MNOS 穿通、多重位翻转、瞬时脉冲信号等.单粒子效应用于航天器的安全有极大的危害,轻者干扰航天器的正常工作,重者可导致灾难性的后果.

随着航天技术的发展单粒子效应研究日趋重要和迫切,这是由于下列一些因素所致.首先是单粒子事件难以预报,环境参数的变化具有随机性,因此“事故”是个“概率事件”.航天器在空间的运行时间越来越长,体积也越来越大,集成电路的集成度也越来越高,这些都导致单粒子效应发生的几率增加,先前被认为是低几率的事件已不容忽视.其次,由于航天器采用大量最新的技术,自动化程度高,系统复杂,因此抵御环境干扰的能力差,一处失灵会使整个系统瘫痪.再者,航天器有时载人飞行,对可靠性要求提高,航天器造价昂贵,小的故障可导致重大的损失.因此为了航天器安全,预先开展研究工作是非常

必要的。

3 外层空间的辐射环境

外层空间的辐射环境如表1所列, 能够引

起单粒子效应的辐射主要是银河宇宙线和太阳宇宙线, 辐射带中的内辐射带含有质子和少量重核, 它们也可能引起单粒子效应, 但几率较小。

表1 外层空间的辐射环境

名称	核成分	能量范围(MeV)	通量范围(1/cm ² s)
银河宇宙线	质子和重核	每核子10 ² ~10 ⁶	10 ⁻⁴ ~10 ⁰
太阳宇宙线	质子和重核	每核子50~5000	10 ¹ ~10 ⁶
辐射带	电子、质子、 α 粒子和少量重核	电子10 ⁻² ~10 ⁻¹ 质子10 ⁰ ~10 ²	7×10 ³ ~5×10 ⁸ 8×10 ⁴ ~5×10 ⁷
沉降粒子	电子和质子	10 ⁻³ ~10 ⁰	

银河宇宙线是起源于银河系以内太阳以外的高能粒子, 由原子核或高度电离的离子组成, 几乎包括化学元素周期表上所有的元素成分, 但以氢核和氦核为最多, 其他较多的成分还有 C、O、Ne、Mg、Si、S、Ca 和 Fe 等, 铁峰之后剧烈衰减, α 粒子的积分强度约为 Fe 的 300 倍。能谱的峰大约出现在数百 MeV 到 BeV 之间, 高能部分以幂指数形式下降。现在认为银河宇宙线在进入太阳系以前强度是不变的, 进入太阳系后在行星际空间运动时, 受到太阳风和行星际磁场的调制而出现 11 年的周期性变化。太阳活动峰年时, 太阳风和行星际磁场对银河宇宙线的排斥增强, 银河宇宙线的强度减弱, 在太阳活动谷年, 银河宇宙线的强度相对增强。因地球磁场的排斥作用, 在低纬度区比高纬度区的强度要小。银河宇宙线通量在赤道附近约 $5 \times 10^3 \text{ n/m}^2 \text{ s}$, 高纬度区约 $2 \times 10^4 \text{ n/m}^2 \text{ s}$ 。

太阳宇宙线起源于太阳表面所发生的短时间释放巨大能量的突然暴发, 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力学过程使带电粒子加速到很高的能量, 即为太阳宇宙线或称太阳耀斑粒子, 其主要成分为质子。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, 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线约为 $10 \sim 10^2 \text{ MeV}$, 通量比银河宇宙线大得多, 可达 $10^4 \text{ p/cm}^2 \text{ s}$ 。一次太阳质子事件持续三、四十小时, 累积通量可达 10^9 p/cm^2 。

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三方面的内容: (1) 空间辐射环境研究, 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。(2) 相互作用过程研究, 探索带电粒子在不同元件器件中所引起的各种单粒子现象及其物理机制。实验测量各种器件的翻转阈值和 LET 截面谱。(3) 预防措施研究, 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。在地球同步轨道上主要可以测得宇宙线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线重离子的单粒子效应. 卫星搭载方法的优点是环境真实结果可信, 缺点是周期长, 实验费用高, 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, 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 ^{252}Cf 始于英国哈威尔实验室. ^{252}Cf 为自发裂变碎片源. 自发裂变半衰期为85a, 分支比3.09%. 轻重碎片的平均质量分别为106.2amu和142.2amu, 轻重碎片平均能量为102.5MeV和78.7MeV, 它们在硅中相应的射程为17.5 μm 和13.6 μm . 根据分布可以计算两组裂变碎片在硅中的LET值分别为46MeV/(mg/cm²)和45MeV/(mg/cm²). 裂变碎片中, 90%有42~45MeV/(mg/cm²)的LET值, 它高于加速器中Kr的LET值. 利用 ^{252}Cf 进行单粒子效应研究方便易行, 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>5 μm , 这一局限则更加明显. 此外, LET值也不可能大范围的变化.

5 加速器进行单粒子效应的地面模拟

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, 可以选择粒子的种类、能量和强度, 有利于对效应做全面细致的研究, 可以进行多次重复实验, 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问题. 与空间实际条件相比, 加速器粒子的通量高, 空间很长时间里累积的通量在加速器上很短时间即可

达到. 加速器粒子的能量也远较宇宙线能量为低, 虽然它们可以具有相同的LET值, 但能量毕竟不同.

1978年, 美国劳伦斯伯克利实验室88英寸回旋加速器首次成功的进行了单粒子效应模拟实验, 此后世界上几乎所有的大中型重离子加速器都先后开展了这方面的研究工作^[2]. 美国宇航公司和喷气推进实验室在加速器上建立了专用的地面模拟装置, 并进行了大量的实验, 至1990年已发表了三批数据, 复盖器件达480多种. 法国的加速器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. 英国、日本、德国和前苏联在加速器单粒子效应研究方面也取得了许多成果.

加速器单粒子效应研究的发展趋势是: (1)充分利用重离子加速器的能力, 离子种类从 ^{40}Ar 向上延伸到 ^{238}U , 能量从中能区延伸到相对论能区, 以求在较大射程上获得较宽的LET变化范围. 美国伯克利借助调整入射角等手段, 使360MeVKr离子的LET值达120MeV/(mg/cm²); (2)所测器件的范围越来越广, 从早期测量分立的CMOS元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、ROM发展到CPU, 从静态测量发展到动态测量; (3)机理性研究越来越受到重视.

用于单粒子效应研究的重离子加速主要有串列静电加速器和回旋加速器两类. 对加速器的基本要求, 首先是要有足够的能量, 以使被加速的粒子能穿透表层并在灵敏区中沉积足够能量. 不同的单粒子现象涉及灵敏区的深度不同, 浅表效应的射程为10~25 μm , 深表效应的射程为25~60 μm . 其次要有大的LET变化范围, 下限为0.3MeV/(mg/cm²), 上限为120MeV/(mg/cm²). 这是测量翻转阈值及LET谱所必需的. 此外, 能量的单色性要好, 以便给出精确的LET值. 束流要足够的弱, 可在 $10^3\sim 10^6\text{n/cm}^2\text{s}$ 可调, 还要有良

好的均匀度。

单粒子效应辐照靶室有别于核物理的实验装置, 一个突出的特点是它要求有精确的、实时的、非拦截式的弱束流监测系统。非拦截和束流微弱带来一定的难度, 常见的有采用塑料闪烁体薄膜连于光电倍增管或采用金箔散射等方法。第二个特点是要求有降能装置并有实时的能量测量和束流空间均匀度的测量, 采用半导体位置灵敏探测器是有效可行的方法。第三要求有可遥控的隔断束流的快门装置。第四要求有样品的定位系统和足够的单粒子效应测量接口, 在特殊的实验中, 还要求有温度测控装置。

国内单粒子效应研究是为了我国航天事业的需要而开展的, 目前仍处于起步阶段。以前由于条件的限制, 航天部等单位利用 ^{252}Cf

源做了许多有价值的工作。现在我国已拥有中能区的重离子加速器, 具备了在加速器上开展单粒子效应研究的物质基础。1993年, 利用兰州重离子加速器已进行了两次单粒子效应实验, 取得了很好的实验数据, 这些结果对我国航天事业的发展有一定的使用价值。但由于经费的限制, 实验设备还有待于进一步的完善。

参 考 文 献

- 1 Koga R, Kolasinski W A, Imamote S. IEEE Trans. on nucl. Sci. 1985, NS-32 (1):159
- 2 Pickel J C, Blandford J T. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1978, NS-25(6):1166

Heavy Ion Induced Single Event Upset and Its Accelerator Simulation Investigation

Hou Mingdong Ma Feng Liu Jie

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

Abstract The harm and investigation means of single event upset in spacecraft electronics are described and a survey of simulation test by using heavy ion accelerator is also given in this paper.

Key Words single event upset semiconductor device heavy ion application

第五届全国中子计会议在上饶召开

由全国中子计联络组、中国核学会同位素学会、核物理学会和江苏省核学会共同主办的第五届全国中子计技术学术会议, 于1995年8月15~19日在江西省上饶召开。全国中子计联络组负责人、南京大学刘圣康教授主持了会议。

在本届会议上进行口头交流或书面交流的有南京大学、兰州大学、中国原子能研究院、江苏省农科院、湖南省交通科研所、南京水利科学院等25个单位, 交流论文19篇。出席会议的正式代表和列席代表共32人。会议就中子计技术及其在工农业生产中的应用进行了广泛的讨论和交流。交流的主要成果有: 热中子透射计的应用、智能化中子水分

计、表面分层核子计、在线测量中子水分计、沥青含量测定仪及 ^{252}Cf 中子源及环状Am-Be中子源的制造等。它表明, 我国中子计技术研究在近三年来有了很大的发展, 对工农业生产的发展也有深远的影响。

我国中子物理方向的老前辈何泽慧先生亲临会议并作了重要讲话。她充分肯定了开展中子计研究是利国利民的好事, 符合国情, 有利于国民经济的发展, 方向是正确的。

会议决定, 下届会议将于1998年召开。

(全国中子计联络组 供稿)