

## 空间辐射效应

李世清 鄢和平

(武汉大学物理系 武汉 430072)

**摘要** 本文简要介绍近地空间辐射环境及其对飞行器材料、电子器件的影响,还扼要介绍了空间辐照效应的研究动态.

**关键词** 空间辐射环境, 辐照损伤.

向空间发展是现代科学技术的重要方向,对于开发空间为人类服务以及国防建设都有深远的意义.由于空间环境不同于地面环境,特别是特殊辐射环境的存在,使人们在研制和发射空间飞行器时,必须考虑空间环境对飞行器所有材料、电子器件、设备乃至飞行人员的影响.实验证明,空间飞行器在空间工作过程中,将受到各种能量、不同剂量的多种辐射(包括高能粒子)的照射.辐射将导致材料损伤,电子器件性能劣化以至完全失效,甚至使飞行器完全无法工作.本文简述空间辐射环境及其对飞行器材料和器件的影响.

### 1 空间辐射环境

近地空间主要存在电磁辐射和微粒辐射<sup>[1]</sup>.

#### 1) 电磁辐射

电磁太阳能的主要部分在  $0.3 \sim 2 \mu\text{m}$  波长之间,峰值在  $4550 \text{ \AA}$  附近.在  $100 \sim 120$  英里高度上,物体受到整个辐射谱的照射,其热能为  $1400 \text{ W/m}^2$ .低于  $2000 \text{ \AA}$  的紫外辐射,虽只占总太阳能的小部分,但每个量子具有足够能量来激励如电离、分解等反应.另外,电磁辐射还包括低能 X 射线和高能  $\gamma$  射线等.

#### 2) 微粒辐射 它包括:

(1) 范艾伦辐射带,它是位于地磁赤道上空的俘获辐射带,分内外两层.内带位于  $160 \sim 8000 \text{ km}$  的高度间,并向地磁赤道两侧伸展

到约  $40^\circ$  位置.它由高能质子 ( $E < 500 \text{ MeV}$ ) 和低能电子 ( $E < 1 \text{ MeV}$ ) 组成;外带主要位于  $4800 \sim 32000 \text{ km}$  的高度间,向地磁赤道两侧伸展到大约  $60^\circ$  的位置.主要由电子 ( $0.40 \text{ keV} < E < 1.6 \text{ MeV}$ ) 组成.带中粒子不断增加,同时又因与原子碰撞而不断减少,达到动平衡状态.

(2) 太阳风 是由太阳辐射的、能量为 keV 量级的一股恒定带电粒子(质子和电子流).太阳宁静时,太阳风的粒子通量较小;一旦太阳被扰动,能量迅速增大并将可能引起磁暴和极光.

(3) 微流星 指的是直径小于  $1 \text{ mm}$  的流星体.星际空间的“尘埃”就是微流星组成的.它可以对宇宙飞行器的飞行造成危险.

(4) 太阳耀斑辐射,主要由高能质子与电子组成,耀斑的持续时间可自几分钟到几天.

综上所述,空间辐射环境包括电磁和载能质子、电子等微粒子组成.辐射将对飞行器材料、电子器件、能源(太阳电池)设备,甚至对宇宙飞行员造成损伤和威胁,对它的研究具有重要的学术意义和应用价值.

### 2 空间辐射效应研究

空间辐射对飞行器材料和电子器件的损伤是空间辐射效应研究最重要的课题之一,其损伤一次过程是辐射造成的电离效应和位移效应过程.目前,最重要的研究内容包括以

下几个方面:

### 1) 空间辐射对半导体器件的损伤

#### (1) 单个事件翻转(SEUs)

存储单元受一定的电离辐射作用后,它的电荷值发生改变,从而导致存储器里地址上和时间上随机的位翻转以致电路出现逻辑错误. 不过这种位翻转一般是非永久性的,可以校正. 对单个事件翻转的深入研究,是军事电子系统和卫星电子系统的全面抗辐射加固的重要研究课题.

#### (2) MOS 结构的辐射感生界面态问题

MOS 器件对电离辐射比一般双极晶体管更为敏感. 电离辐射的结果表现在氧化物上的电荷积累,使栅阈值电压或平带电压漂移. 另外,辐射在 Si-SiO<sub>2</sub> 界面上感生界面态,对此,虽有 Sah 模型、Gricom 模型、Saks 模型及 Lai 模型进行解释,但对其性质和微观过程还远没有弄清楚. 上述辐射损伤能引起 MOS 器件性能退化甚至失效. 例如,表面电导率减小、沟道迁移率下降、产生 1/f 噪声……等.

#### (3) 太阳能电池性能的退化

太阳能电池是空间飞行器的重要能源. 当太阳能电池随飞行器在空间轨道运行时,会受到空间辐射(如质子、电子、中子等)的作用,其性能将逐渐劣化. 例如,理论计算与实验表明,一个用 1Ω-cm 的 P-Si 制作的 n/p 结构 Si 太阳能电池,在经受能量为 1MeV、通量为 5 × 10<sup>12</sup>/cm<sup>2</sup> 的质子辐照以后,与辐照以前的参数相比,其短路电流下降为原值的 64%,开路电压下降为原值的 85.5%,而输出功率下降为原值的 55%. 若辐照能量与辐照通量进一步加大,则太阳能电池的各个参数将继续劣化. 研究表明,硅太阳能电池经辐照后生成多种缺陷,而辐照诱生的自间隙硅原子与掺杂的硼原子交换位置形成硼间隙原子,这种间隙硼-氧化物是硅太阳能电池经辐照后性能退化的主要原因. 80 年代开发的基于 GaAs 的空间太阳能电池,较之硅太阳能电池有较好的抗辐射能力. 近几年又开发了 InP 太阳能电池,初步实验研究表明,它较之前种电池的抗辐射能力优越得

多<sup>[2]</sup>.

### 2) 空间辐射对飞行器材料的影响

#### (1) 半导体材料

辐射所引起的损伤最主要的是电离损伤和位移损伤. 位移效应导致材料产生许多缺陷. 缺陷能级可起陷阱作用,使多数载流子密度减小,称为载流子去除效应. 以单位缺陷密度去除多子浓度作为载流子去除率的单位时,n 型材料的单受主型缺陷的多子去除率可表示为

$$\frac{\Delta n}{\Delta N_T} = -A[1 - \exp(\frac{E_T - E_F}{KT})]$$

负号表示多子浓度减小. 此式表明载流子去除率与缺陷能级  $E_T$  及费米能级  $E_F$  有关.

辐射形成的缺陷可在材料原子的禁带内引入附加能级,这就增加了导带电子与价带空穴之间的复合几率,即缩短了少子的寿命,按单受主型位移缺陷能级理论,对 P 型材料辐照后的少子寿命的退化率为

$$\frac{\Delta(\frac{1}{\tau})}{\Delta N_T} = V_T \sigma_n$$

例如,对 1Ω-cm 的 P-Si 材料,受能量为 100MeV,通量为 5 × 10<sup>12</sup>/cm<sup>2</sup> 质子辐照后,其扩散长度由 100μ 下降为 7.1μ,而少子寿命相应地由 4.55μs 下降为 2.29μs.

缺陷也可以作为载流子的散射中心,它能有效地降低载流子的迁移率. 按单受主型位移缺陷能级引起迁移率变化的理论,在一级近似下,得到辐照后的迁移率  $\mu$  可表示为

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{in}} + \frac{1}{\mu_L} + BN_T \{1 - \exp[\frac{E_T - E_F}{KT}]\}$$

其中  $\mu_{in}$  为掺杂原子散射的贡献, $\mu_L$  为晶格原子散射的贡献,右边第三项为位移缺陷作为散射中心的贡献.  $E_T$  为缺陷能级, $N_T$  为缺陷密度. 由此式可见,位移缺陷作为散射中心使迁移率下降. 其下降的程度随缺陷密度增大而增加. 因此,辐射引起半导体材料宏观性能发生变化.

#### (2) 辐射导致材料的充电

带电粒子(如质子、电子)的电荷沉积和

电离效应可能使材料(或者器件)充电产生高电位. 飞行部件之间由于充不同电量,形成的电压可能高达 20kV. 充放电效应不仅与材料种类有关,还与材料的表面状态、微观缺陷、杂质含量等因素有关.

(3)此外,微流星对飞行器表面会造成损伤,空间辐射中重离子、低能带电粒子对材料表面的轰击,可能损伤飞行器热控制表面、光学表面、太阳能电池表面等.

空间辐射效应的研究包括空间辐射环境、辐照效应机理、模拟实验技术和空间飞行试验、地面模拟实验、损伤评估以及器件、材料抗辐照加固等内容,涉及太阳物理、固体物理、核物理与核技术、电子工程等专业,是一项复杂的系统工程. 当今世界上几个工业发达国家早已开展此项工程研究,如美国、西欧以及俄罗斯、日本等,十分重视空间辐射环境及其对飞行器影响的研究. 美国早在 1982 年就开始实施“Space Radiation Effect Program”<sup>[3]</sup>,该研究包括:

1)辐射飞行实验,以取得空间辐射环境

的信息和一些辐照效应的信息.

2)地面(模拟)实验,即在地面上模拟空间辐射环境,对各种材料和器件进行辐照损伤的研究.

3)建立空间辐射的静态模型和动态模型以及有关电子器件的损伤模型等.

此项计划实施十多年来已取得重要的成果. 我国也已在几年前开始作了许多实验研究工作,并已进入系统化的研究阶段.

空间辐射效应的研究,将为人类向空间发展、开发空间提供重要的基础和必不可少的设计信息.

### 参 考 文 献

- 1 Ricketts L W. Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment, John Wiley & Sons, Inc 1972, chapt. 2
- 2 Wallers R J, et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1991,38 (6) : 1153
- 3 Gussenhoven M S, Mullon E G. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1993,40(2) : 221

## Space Radiation Effects

Li Shiqing Yan Heping

(Department of Physics, Wuhan University, Wuhan 430072)

**Abstract** This paper briefly dicusses the radiation environment in near-earth space and it's influences on material, and electronic devices using in space airship, also, the research developments in space radiation effects are introduced.

**Key Words** space radiation environment, radiation damage.