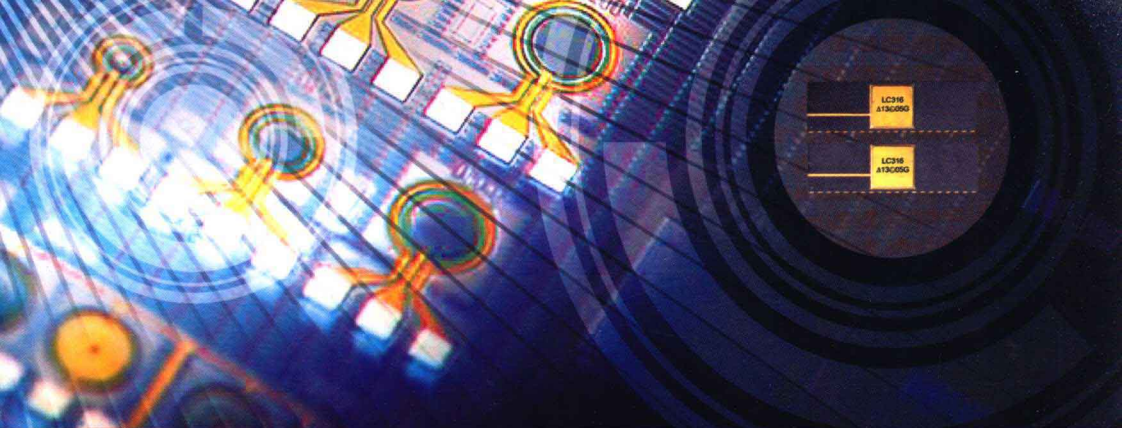




硅半导体器件 辐射效应及加固技术

刘文平 著



科学出版社

硅半导体器件辐射效应及加固技术

刘文平 著

刘佑宝 审



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了硅半导体器件的电离辐射损伤效应及其抗辐射加固的基本原理和方法。全书共分六章,主要内容包括空间电离辐射环境、半导体电离辐射损伤、器件单粒子翻转率的基本概念和基本机理的介绍与分析,硅双极半导体器件、MOS 器件、SOI 器件和硅 DMOS 器件电离总剂量辐射效应、瞬时剂量率辐射效应、单粒子辐射效应的基本机理及其与关键设计参数、工艺参数的关系以及辐射加固的基本原理和基本方法的分析,纳米级器件结构的辐射效应以及相关辐射加固的基本原理的概述和展望。

本书可供微电子专业的研究生和从事微电子专业的科技人员进行抗辐射半导体器件研究开发、设计制造参考。

图书在版编目(CIP)数据

硅半导体器件辐射效应及加固技术/刘文平著. —北京:科学出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-03-038702-8

I. ①硅… II. ①刘… III. ①硅-半导体器件-辐射效应②硅-半导体器件-抗辐射性-加固 IV. ①TN304.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 230796 号

责任编辑:张临临 甄文全 / 责任校对:宣 慧

责任印制:肖 兴 / 封面设计:科地亚盟

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 9 月第一次印刷 印张:14 1/2

字数:260 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前言

随着核能技术和空间技术的发展,越来越多的电子设备要在各种辐射环境中应用。这些辐射环境概括起来可分为空间辐射环境和人为辐射环境两大类。空间辐射环境主要来自宇宙射线、太阳耀斑辐射、围绕地球的内外范艾伦辐射带,此外还有太阳风、极光、太阳 X 射线以及频谱范围较宽的电磁辐射,主要由高能质子、高能电子、X 射线等组成。人为辐射环境主要来自核电站、核反应堆、加速器、核武器爆炸等产生的辐射,主要由 α 射线、 β 射线、中子、 γ 射线、X 射线、核电磁脉冲等组成。目前微电子器件是组成电子设备的基本单元,乃至是核心组成部分,而半导体和微电子器件对这些辐射非常敏感,其主要辐射效应如图 1 所示。辐射作用于电子设备,对其性能和功能产生不同程度的影响,甚至使其失效。

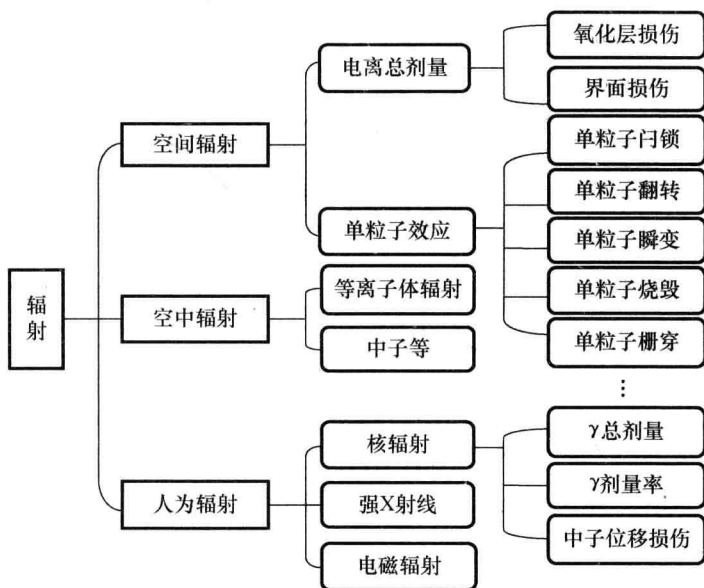


图 1 半导体和微电子器件的主要辐射效应

发展空间系统有很多特殊的方面,特别是长寿命的深空探测器、空间科学使命,其电子系统的设计与制造强烈依赖于与轨道、时间相关的空间辐射环境以及航天器寿命等。

一般来说,空间辐射环境影响电子元器件功能和性能表现为三种基本辐射

效应。

(1) 总剂量效应(total ionizing dose, TID)是由于辐射离子与器件材料发生作用,产生电荷和电荷中心,影响器件性能,这些效应取决于器件材料所吸收的辐射总能量。空间中重要的 TID 来源有俘获的电子、质子以及太阳质子。

(2) 单粒子效应(single event effect, SEE)是单个粒子穿过器件时,在其轨迹上所产生的高密度电荷对器件的影响,而不是指由粒子造成的位移损伤。单粒子效应与粒子类型及其能量有关,不但会引起器件状态的变化,而且会造成状态锁定或永久性损坏。

(3) 位移损伤效应(displacement damage, DD)是由于粒子的作用,使材料结构或晶体点阵中的原子产生位移,脱离其正常位置,形成缺陷中心,以及与材料作用产生的声子所激发的二次电子,从而影响器件性能。这些效应取决于入射粒子的通量、种类和能量。位移损伤的主要来源有俘获的质子、太阳质子、放射性同位素热电子产生器的中子。

对于不同类型的器件,这三种辐射效应引起的损伤不同。虽然空间粒子辐射在半导体材料中能够产生位移损伤等非电离效应,但空间粒子辐射产生的电离效应更为明显和重要,因此本书重点对空间粒子的电离效应进行分析与讨论,即 TID 效应和 SEE 效应,这两种效应的机理不同,所采取的缓解技术也不同。

随着空间应用对器件性能要求的提高和器件特征尺寸的减小及电源电压的降低,半导体器件对辐射的敏感度增加,特别是线性模拟器件,抵抗由辐射引起的总剂量、单粒子等辐射效应造成的硬错误和软错误,已经成为空间半导体工业需要研究的重要问题,以保证在空间辐射环境下能够提供可靠的半导体器件。

目前,研究空间抗辐射半导体器件的重要辐射试验手段是采用室内辐射源对所研究的半导体器件进行辐照试验,研究其辐照响应或其抗辐照性能,因此在本书论述中会出现“辐射”和“辐照”两个名词,本质上都是器件在辐射环境中响应的表述,其主要差别在于地面模拟辐照环境与空间辐射环境之间存在一定的等效关系,这种等效关系在本书中没有介绍。

本书重点介绍了硅半导体器件的电离辐射损伤效应及其抗辐射加固的基本原理和方法。全书共分六章,第 1 章的主要内容包括空间电离辐射环境、半导体电离辐射损伤、器件单粒子翻转率的基本概念和基本机理,第 2~5 章分别对硅双极半导体器件、MOS 器件、SOI 器件和硅 DMOS 器件电离总剂量辐射效应、瞬时剂量率辐射效应、单粒子辐射效应的基本机理及其与关键设计参数、工艺参数的关系以及辐射加固的基本原理和基本方法进行分析,第 6 章重点对纳米级器件结构的辐射效应以及相关辐射加固的基本原理进行了概述和展望。

在本书写作过程中,刘佑宝同志对全书技术内容进行了审核,梁希同志为本书查阅了大量资料并绘制了大量电路图,在此表示衷心感谢;同时非常感谢沈绪榜院士,张俊超、张力、毛志刚等同志提供的帮助,以及薛智民、吴龙胜、唐雪寒、刘智、宋智军等同志提出的修改意见。特别感谢西安微电子技术研究所对本书的写作与出版给予的支持。

本书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

刘文平

2013年元月于西安

目 录

前言

第 1 章 辐射环境与损伤机理基本概念	1
1.1 空间带电粒子环境	1
1.1.1 地球俘获带	1
1.1.2 太阳宇宙射线	3
1.1.3 银河系宇宙射线	3
1.1.4 典型卫星轨道的粒子辐射环境	4
1.1.5 核爆对空间辐射环境影响	5
1.1.6 地面模拟辐射源类型	6
1.2 基本损伤机理	6
1.2.1 辐射表征	9
1.2.2 电离辐射效应	10
1.2.3 反型层迁移率	17
1.2.4 表面复合	18
1.2.5 单粒子辐射效应	19
1.2.6 剂量增强效应	35
1.2.7 瞬时辐射光电流	35
1.2.8 单粒子瞬变脉冲光电流	41
第 2 章 硅双极器件的空间辐射效应及加固原则	43
2.1 硅双极器件的辐射损伤基本现象	43
2.2 硅双极器件的辐射损伤基本机理	46
2.2.1 基本机理概述	46
2.2.2 双极器件的低剂量率效应	48
2.2.3 氧化层工艺对双极器件的影响	54
2.2.4 双极晶体管剂量率效应	57
2.3 硅双极器件加固基本措施	59
2.3.1 器件结构加固	59
2.3.2 电路结构加固	61
2.3.3 模拟集成电路抗辐射加固的考虑	65
2.3.4 关键参数的初步设计	65
2.4 双极放大器模块加固设计	68

2.4.1 差分输入级加固	68
2.4.2 放大级加固	69
2.4.3 电流基准源加固	70
第3章 MOS 器件的辐射效应及其加固方法	72
3.1 MOS 器件参数和材料的辐射效应	73
3.1.1 CMOS 器件的闩锁效应	73
3.1.2 MOSFET 晶体管的辐射效应	77
3.1.3 氧化层电容的量子效应	86
3.1.4 材料特性和介质结构	86
3.1.5 电场	89
3.1.6 辐射光电流对 MOS 电路的主要影响	89
3.2 抗辐射加固 CMOS 电路设计要点	94
3.2.1 设计基本要求	94
3.2.2 单元电路的器件版图结构	96
3.2.3 单元电路 TID 加固设计	96
3.2.4 带隙基准电路 TID 设计	98
3.2.5 单元电路 SEU 设计	105
3.2.6 电路 SEU 设计分析	108
3.2.7 电路单元尺寸设计分析	111
第4章 SOI 器件的辐射效应及加固方法	113
4.1 MOSFET/SOI 基本结构	113
4.1.1 SOI 晶体管类型	113
4.1.2 SOI 晶体管常用的拓扑结构	115
4.2 CMOS/SOI 器件的瞬时辐射效应	118
4.2.1 寄生双极晶体管效应	118
4.2.2 寄生双极晶体管增益	122
4.2.3 体接触间距模型	123
4.2.4 剂量率翻转	132
4.3 SOI 器件的单粒子效应	136
4.3.1 MOS/SOI 晶体管电荷收集	136
4.3.2 双极晶体管效应	139
4.3.3 体接触的影响	142
4.3.4 体接触模型	143
4.3.5 SEU 脉冲对电路节点分析	148
4.4 总剂量对 SOI 器件的影响	170

4.4.1	SOI 结构的陷阱电荷与界面电荷	170
4.4.2	STI 侧墙及鸟嘴寄生 MOS 管阈值	171
4.4.3	总剂量辐射对晶体管前栅和背栅的影响	172
第 5 章	硅 DMOS 器件的空间辐射效应及加固方法	177
5.1	VDMOS 的主要参数	177
5.1.1	击穿电压 V_{BR}	177
5.1.2	阈值电压	179
5.1.3	栅电荷	180
5.1.4	导通电阻	180
5.2	VDMOS 辐射感应及加固基本措施	182
5.2.1	DMOS 的 SEB 效应及加固方法	182
5.2.2	VDMOS 的单粒子栅穿及加固措施	187
5.2.3	DMOS 阈值电压漂移及加固方法	189
5.2.4	高压 DMOS 瞬态辐射响应	190
第 6 章	纳米器件辐射响应及加固技术展望	193
6.1	纳米级器件辐射响应	193
6.1.1	纳米级器件的重离子辐射响应	193
6.1.2	纳米级器件的低能质子辐射响应	195
6.1.3	纳米级 FD-SOI 器件的总剂量辐射响应	198
6.2	纳米级新型结构器件辐射响应	200
6.2.1	纳米级 GeSi/SOI 器件辐射响应	200
6.2.2	Fin-FET 器件结构的重离子辐射响应	201
6.2.3	纳米晶体存储器的辐射响应	204
6.2.4	器件辐射响应模型发展	211
参考文献		213

第 1 章 辐射环境与损伤机理基本概念

由硅半导体材料制造的微电子器件是电子设备的核心组成部分,它们对辐射非常敏感,会使硅半导体材料和器件产生总剂量(TID)、单粒子翻转(single event upset, SEU)、单粒子闩锁(single event latchup, SEL)和剂量率等诸多电离辐射效应以及位移损伤等非电离辐射效应。这些效应会导致电子设备偏离正常功能和性能,甚至是失效。

辐射环境包括空间辐射环境和人为辐射环境。空间辐射环境有重离子、质子、电子、X 射线等产生的辐射。人为辐射环境有 α 射线、 β 射线、中子、 γ 射线、X 射线、核电磁脉冲等产生的辐射。由于辐射的来源不同,硅半导体材料和器件对其产生的效应也不同,故所采用的缓解技术也不同。本章主要介绍空间辐射环境中的带电粒子对硅半导体材料和器件产生的辐射效应的基本机理和基本表述方法。

1.1 空间带电粒子环境

空间飞行器所面临的辐射环境与轨道高度、倾角等密切相关,是航天设计者必须考虑的参数。空间辐射环境主要由三部分组成:地球俘获带(范艾伦辐射带)、太阳宇宙射线和银河宇宙射线。

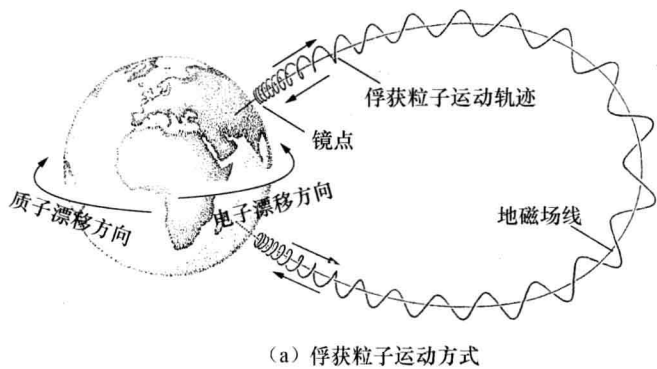
1.1.1 地球俘获带

地球俘获带是指存在于地球周围的高能带电粒子集中的区域,是由美国学者 James van Allen 根据美国第一颗卫星(Explorer I)的空间粒子探测结果进行分析得出的,后被证明是由于空间带电粒子被地磁俘获而形成的。

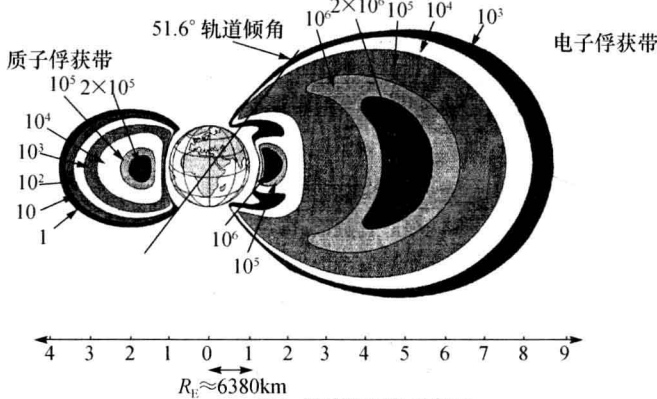
在电场力和磁力作用下,带电粒子的运动分为绕磁力线的螺旋运动、在两半球镜点之间的往返运动及漂移运动,如图 1-1 所示。粒子绕磁力线的回旋运动半径与地磁场曲率半径相比很小,满足一定条件的带电粒子将被地磁场俘获,其运动轨迹将保持在由南北两个镜点和磁壳参数 L (McIlwain 参数 $L=r_0/R_E$,其中, R_E 为地球半径; r_0 为地心距)所定义的环面上。

地球俘获带分为电子俘获带和质子俘获带,其空间分布的基本特点如图 1-1 所示。根据空间和时间分布,地球俘获带也可分为内俘获带和外俘获带,主要是指在近地空间被地磁场俘获的带电粒子区域,主要由电子、质子和重离子组成。对于电子,内带受磁暴的影响小,而外带受磁暴的影响很大,槽区电子密度很小。对于质子,内带稳定,受磁活动影响小,其强度受大气密度的影响(太阳活动极大时期,大气密度增高,质子密度减小),外带与内带的区分不明显,不像电子受地磁活动的影响严重。内外俘获带质子和电子的通量与轨道高度和倾角有关,如

图 1-1(b)所示。



引自: Stassinopoulos and Raymond, 1988



单位: 个/(cm²·s)

图 1-1 地球俘获粒子运动方式及俘获带结构示意图

综合相关数据,内外俘获带粒子能量和最大通量如表 1-1 所示。

表 1-1 内外俘获带粒子情况

地球俘获带	粒子种类	能量范围/MeV	最大通量/[个/(cm ² ·s)]	赤道高度
内俘获带 1.0<L<2.8	质子	≤600	—	—
		>30	~10 ⁵	<3.5R _E
	电子	≤7	10 ⁷ ~10 ⁸	—
外俘获带 2.8<L<12	质子	30~10 ³	<10	—
		<30	10 ⁴ ~10 ⁵	—
	电子	≤5	—	5.3~7.8R _E /7.9°

引自: Dyer, 1998; Schwank, 1994

在地球俘获带外层,重离子通量约为 $100 \text{ 个}/(\text{cm}^2 \cdot \text{天})$,对敏感器件造成的翻转率大约为 $10^{-6} \text{ 次}/(\text{位} \cdot \text{天})$ 。在质子俘获带,对于较大尺寸的器件(65nm 以上),较大能量的质子产生的电离难以直接导致器件翻转;但有相当数量的高能质子与硅作用,产生核反冲效应,引起的电离量远大于质子本身直接产生的电离量,可造成电路翻转。在质子俘获带中心,能量超过 30MeV 的质子有 $10^7 \sim 10^9 \text{ 个}/(\text{cm}^2 \cdot \text{天})$,质子引起的翻转成为单粒子翻转(SEU)的主要因素。例如,翻转截面为 $10^{-11} \text{ cm}^2/\text{位}$ 的 1K 存储器每天将会发生 10 次翻转。

处于 1000km 及其以下高度的空间飞行器,其地磁俘获的辐射环境主要由两个区域组成,高纬度区域俘获带向低高度的延伸区域(喇叭区)和低纬度的南大西洋异常(SAA)区。在巴西附近的 SAA 区又称地磁异常区,它是由地磁偶极子的偏心导致地磁异常(磁场低谷)引起的。通常在异常区外,地磁俘获现象在较高的位置才会出现,然而在 SAA 区,地磁俘获现象出现的高度要低得多。因此,空间辐射环境中的质子效应(特别是单粒子效应)是低轨卫星要分析考虑的重要因素。

图 1-1(b)所示的俘获粒子模型属于静态模式,没有描述短时的变化,如强太阳耀斑爆发、地磁亚爆等所导致的短期内俘获离子成分及强度的急剧变化。外俘获带电子和重离子受太阳-地磁活动的影响比质子严重。偶发磁爆在 10min 内可使 GEO 轨道的电子通量提高 1 个数量级,其影响持续数天。

1.1.2 太阳宇宙射线

太阳宇宙射线(SCR)中主要是质子和粒子,能量一般为 $10 \sim 1000\text{MeV}$ 。太阳风的粒子密度大约为 $30 \text{ 个}/\text{cm}^3$,主要包括 95% 的质子、大约 4% 的氦离子(He^{2+})、不到 1% 的带多电荷的重离子和维持太阳风电中性的电子。

空间辐射环境强烈地依赖于太阳的活动。太阳活动周期分为太阳最小和太阳最大两个主要阶段。活动周期为 $9 \sim 13$ 年,平均周期为 11 年,其中太阳最小为 4 年,最大为 7 年。在太阳最小周期发生时,太阳耀斑产生的质子和重离子能量高于 100MeV ,持续时间从几小时到几天。太阳质子事件随机性很大,分布不均匀,具有突发性,并受地磁的影响而衰减。图 1-2 为 $1947 \sim 1997$ 年发生的太阳耀斑数。

1.1.3 银河系宇宙射线

银河系宇宙射线(GCR)是起源于太阳系以外空间的高能带电粒子流。由于受星际磁场的调制,其强度有一定的梯度,从日冕边缘向内逐渐减弱。银河系宇宙射线包含大量的各种元素,其原子序数为 $1 \sim 92$ 。虽然通量低,但包含能量从几十 MeV 到几十万 MeV 的重元素高能粒子,可直接穿过屏蔽层,在半导体材料中产生电离效应,主要是单粒子效应(SEE)。

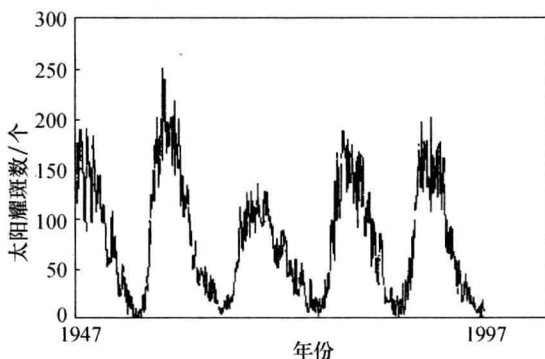


图 1-2 1947~1997 年太阳耀斑数

引自:Barth,1997

银河系宇宙射线与太阳活动周期有关。在地球磁层外,太阳最小时质子通量最大,强度约为 $4 \text{ 个粒子}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,粒子的成分大约为 85% 的质子、14% 的 α 粒子和 1% 的重离子(重离子包括整个元素表中的元素,能量范围在 $1 \sim 20 \text{ GeV}$)。这些粒子不但对地球俘获带产生影响,而且当宇宙射线粒子进入 330km 以下的临近空间时,与大气层顶层中的氧氮原子作用,形成二次辐射(包括质子、电子、中子、重离子以及 μ 介子、 π 介子)。其中的中子对进入大气层的空间飞行器、航空器具有不利影响。Dyer 和 Barth 分析认为航天飞机的大量单粒子翻转事件是由中子引起的。

1.1.4 典型卫星轨道的粒子辐射环境

综合分析,卫星轨道环境中存在大量能量在 500MeV 以下的粒子,轨道高度越高,太阳质子、 α 粒子等高能质子的通量越大。对于低轨空间环境,粒子能量大于 100MeV 后,其通量急剧下降。例如,高度为 300km 和 500km、倾角为 28.5° 、 60° 、 90° 的低地轨道(LEO)卫星,其环境粒子能量大于 500MeV 的高能质子通量很小。当采取一定的屏蔽措施后,轨道质子环境有很大改善,其质子通量及其能谱如图 1-3 所示。

对于俘获的电子,无论是 GEO 轨道,还是 LEO 轨道,所俘获电子的能量都小于 7MeV。GEO 轨道所俘获电子的日累积通量大于 LEO 轨道所俘获电子的日累积通量。与大倾角轨道相比,倾角为 28.5° 轨道上的俘获电子通量随其能量的增加下降很快。

近年来研究表明,随着集成电路技术的进步,不但高能质子对元器件会造成损伤,而且低能质子的直接电离效应比高能质子更容易对纳米量级先进技术的器件产生单粒子效应,即特征尺寸为几十纳米的器件对低能质子更敏感。

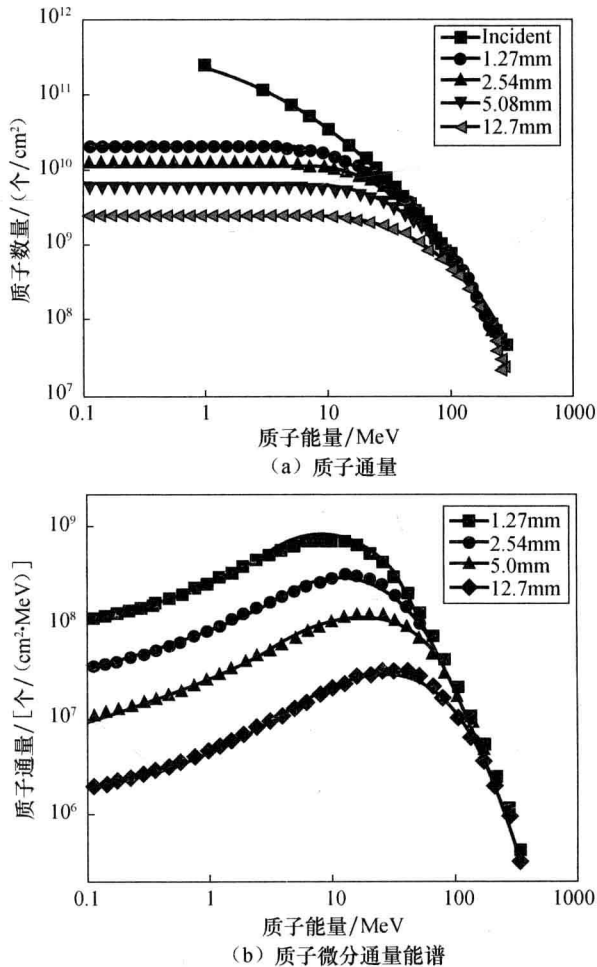


图 1-3 质子通量及其微分通量

引自:Heidel, et al., 2009

1.1.5 核爆对空间辐射环境影响

高度大于 100km 的高空核爆炸生成的辐射环境可分为瞬时辐射环境和持续辐射环境。瞬时辐射的作用时间一般不会超过 10~15s,主要有 X 射线、 γ 射线的电离总剂量辐射和剂量率辐射以及中子辐射,在电子系统所引起的辐射效应包括瞬态效应(TREE)、中子位移效应等。瞬态辐射的次级效应,即在大气层中产生的高能核电磁脉冲(HEMP),与系统相互作用产生的内电磁脉冲(IEMP)和系统电磁脉冲(SGEMP),对于临近空间飞行器、运载工具和卫星的电子系统都是必须重视的瞬时毁伤因素。持续辐射主要是由裂变本身及其碎片放射性所产生的电荷,

被地磁场俘获,形成带电粒子流(主要是电子)。放射性污染释放的 β 射线和 γ 射线都会长时间作用于临近空间飞行器和卫星的电子系统,对它们构成潜在威胁。

高空核爆释放的总能量(当量) Q 中, X 射线所占的能量 Q_x 为70%~85%。在 X 射线谱中,高能光子偏多,低能光子偏少。对于核爆产生的 γ 射线,其剂量率和裂变与聚变之比有关。大气层核爆时, γ 总剂量是指核爆后 10~15s 累积剂量,不仅包括 $0\sim 10^{-5}$ s 瞬时 γ (伴随裂变过程产生的 γ)和中子在弹体材料中非弹性散射和俘获所产生的 γ ,还包括中子在空气中非弹性散射产生的 γ 。

核爆对空间辐射环境会产生影响,当高空核爆瞬时毁伤消失后,含有裂变碎片的爆炸产物以碎片云的形态迅速膨胀和上升,其中剩余核辐射就是持续辐射环境的辐射源。核爆后形成的人造辐射(俘获)带对空间自然俘获带的增强效应主要是由核爆放射性碎片发生 β 衰变时产生的高能电子被地磁场俘获所引起的。人造俘获带的扩展范围和强度强烈依赖于爆炸的高度、纬度和武器的当量及类型。

1.1.6 地面模拟辐射源类型

现行地面模拟辐射源主要采用 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 X 射线、加速器作为模拟辐射源。 ^{60}Co 源是一种普遍采用的辐射源,并作为总剂量辐照试验的标准辐射源;标准方法所规定的中等剂量率为 $50\sim 300\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$,可用于对 CMOS 等器件的低剂量率效应加速评价。 X 射线源作为一种替代源,可用于生产线中晶圆工艺监控、硅晶圆的辐照试验或验收评估测试。实际上,利用 X 射线源(10keV)作为最终认可测试的方法或工艺监控方法,是生产线资格认证的有效方法。但需要注意的是,器件封装对 X 射线穿透性的限制及其剂量增强效应和电子表面吸附效应对测试结果的影响。电子/质子回旋加速器也可作为一种替代模拟辐射源,主要用于高剂量率或高总剂量辐照。放射性同位素,如 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs ,也是实验室常用的辐射源,这些辐射源的能量很低、能谱很窄,穿过航天器屏蔽层后衰减很大。各模拟辐射源与空间环境的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 典型的模拟辐射源特征及其空间环境的典型能谱

模拟辐射源	类型	能量	剂量率/ $[\text{rad}(\text{Si})/\text{s}]$
^{60}Co	声子	1.25MeV	$10^{-4}\sim 10^3$
^{137}Cs	声子	0.67MeV	$10^{-3}\sim 10^2$
X 射线	声子	$10\sim 300\text{keV}$	$10^3\sim 10^4$
电子回旋加速器	电子	$1\sim 50\text{MeV}$	$10^3\sim 10^{11}$
空间环境	电子/声子/质子	$1\sim 100\text{MeV}$	$10^{-4}\sim 10^{-2}$

1.2 基本损伤机理

半导体器件的辐射损伤分为电离辐射损伤和位移损伤。电离辐射损伤是破坏

能带平衡,产生电子-空穴对。位移损伤是原子离开正常晶格位置产生位移,使原位位置形成空位及在晶格的其他位置产生间隙原子,这种畸变在晶格中形成两种不同的点缺陷,其点缺陷的电荷状态不同。造成电离辐射损伤所需的能量比位移损伤所需的能量小得多。

影响半导体器件功能和性能的三种空间辐射的基本效应是总剂量(TID)效应、位移损伤(DD)效应和单粒子(SEE)效应。

① 总剂量效应

总剂量效应是影响器件整体功能和性能的效应。在辐射作用下,所产生的辐射损伤对器件性能的影响程度取决于器件材料受辐射而积累的总能量。因此,TID效应就是由于器件长期累积的辐射能量,使器件整体功能和性能参数逐步降级退化的效应,如漏电流和阈值电压等。TID辐射主要来源于空间带电粒子,如俘获带中的电子、质子等。

如果材料吸收的能量超过禁带宽度,就会使电子从价带跃迁至导带。在辐射照射半导体材料时,所沉积的能量一部分产生电子空穴对,一部分被晶格吸收。因此,在硅中产生一个电子空穴对所需光子的平均能量为 3.6eV ,其电子空穴对产生率(即单位辐射剂量产生的电子空穴对)大约为 $4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}/\text{rad}(\text{Si})$ 。而在 SiO_2 中,产生一个电子空穴对所需要的平均能量为 $17 \sim 18\text{eV}$,其电子空穴对的产生率大约为 $8.1 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}/\text{rad}(\text{SiO}_2)$ 。

② 位移损伤效应

位移损伤效应是由于粒子的作用使材料结构或晶体点阵中的原子产生位移,脱离其正常位置,形成“间隙原子”和“点阵空位”这样的缺陷中心,同时粒子与材料作用所产生的声子激发出二次电子。此效应取决于入射粒子的通量、粒子种类和粒子能量。辐射产生的位移损伤所造成的器件退化也是长期累积的结果,与TID具有的长期退化特性相似,但机理不同,因此采取的抗辐射措施不同。位移损伤主要来源于中子和高能质子。对于中子辐照,其能量损失机制并不是以产生电子空穴对为主。

使硅材料产生位移损伤的能量阈值 T_d 为 $11 \sim 21\text{eV}$ (即使硅原子脱离正常晶格,形成间隙原子和点阵空位所需要的最小能量)。由于位移损伤能量阈值与辐射、测量温度以及退火过程有关,再根据 Bourgoin 和 Lannoo 对各种测量结果的分析判断,所以硅材料的位移损伤能量阈值约为 14eV 。然而,在很多情况下,取其位移损伤阈值为 21eV 。

根据 Sigmund 的分析,一个粒子或中子的核反冲中,产生原子位移最大数量的计算公式为 $N_d = (6\ln 2/\pi^2)(T_{rd}/T_d)$ 。其中, T_{rd} 表示使硅原子产生位移的总能量。对于1个能量为 14MeV 的中子入射硅时,在硅材料内产生的核反冲能量中,造成硅原子产生位移的能量(T_{rd})为 115keV 。若取 T_d 为 21eV ,那么通过计算得

出,一个入射中子在硅中最多产生的位移缺陷数量约为 2300 个。尽管这些初始缺陷不稳定,并在随后的几分钟内衰减 $1/10 \sim 1/5$,但仍有相当数量的缺陷存在,且由于中子通量的作用,中子辐射的位移损伤效应更为严重。

③ 单粒子效应

单粒子效应与总剂量效应和剂量率效应(对器件内部的每一个 PN 结产生影响)不同,是对器件内的局部某个或几个 PN 结产生影响,是发生在器件内部局部节点的扰动效应,这种扰动经传输、放大或诱发其他寄生效应,可能造成错误或损伤。单粒子效应是指当单个粒子穿过器件时,在其轨迹上所产生的高密度电荷,对器件性能和状态的影响,而不是指由粒子造成的位移损伤。一个粒子所产生的电荷取决于粒子类型及其能量。因此,这种效应不但会引起器件状态的变化,还会造成状态锁定或永久性损坏。所以,高能带电粒子在撞击材料后,其能量损失的重要机理是产生电子空穴对,对器件性能的影响很大,仅有不足 1% 的能量造成位移损伤。

粒子辐射所产生的电子空穴对密度由辐射离子的线性能量转移(linear energy transfer, LET)值决定,如能量为几 MeV 的 α 粒子,其 LET 值约为 $1(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2)/\text{mg}$,而 1MeV 的电子,其 LET 值约为 $1.6 \times 10^{-3}(\text{MeV} \cdot \text{cm}^2)/\text{mg}$ 。当粒子撞击器件时,在器件上积淀了足够的能量,产生大量电子空穴对,会引起两大类 SEE 错误,即软错误和硬错误。

一般来说,器件的固有特性是造成软错误的主要原因。单粒子翻转(SEU)通常是一个尖脉冲或者位翻转。在组合逻辑电路或者数模转换器中,受单粒子辐射的影响,在器件输出端产生的尖脉冲可能会导致一个 SEU 现象;在现代存储器和锁存器技术中,一个单粒子效应可能对应着一个或多个位翻转现象。在器件控制电路中,SEU 效应会导致电路出现错误,这种错误可以通过器件复位来恢复正常工作,如在电路内部设置错误检测、自校正或者数据重写功能,可使电路恢复正常。在单粒子功能中断(SEFI)期间,器件停止正常工作,通常需进行电源复位来恢复。例如,微锁定是一种典型的单粒子门锁(SEL)或静态锁定,锁定后电流会被恒定抬高,但仍低于器件允许的最大值,其不足以使器件损伤,只有电源复位才能使器件恢复正常工作。

硬错误或永久性错误是器件的物理损伤,会导致器件永久性功能失效,如存储器的位恒定等。SEL 是一种潜在的破坏性硬错误,其抗锁定能力依赖器件本身。在发生 SEL 期间,器件的电流超过允许的最大值,这时只有关断电源,才能使器件不被烧毁。单粒子烧毁(single event burnout, SEB)是一种常发生在功率 MOSFET 源漏间的功率击穿烧毁。单粒子栅击穿(single event gate rupture, SEGR)是一种常发生在功率 MOSFET 栅氧化层的击穿烧毁。