



空间辐射物理及应用研究现状与挑战

陈伟*, 杨海亮*, 郭晓强, 姚志斌, 丁李利, 王祖军, 王晨辉, 王忠明, 丛培天

西北核技术研究所, 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024

* 联系人, E-mail: chenwei6802@163.com; yanghailiang@nint.ac.cn

2016-04-07 收稿, 2016-05-31 修回, 2016-05-31 接受, 2016-07-01 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(11235008)和国家自然科学基金(11345007)资助

摘要 空间辐射物理及应用主要研究航天器的辐射效应及提高其可靠运行能力的理论与关键技术, 是涉及核科学与宇航电子学的交叉学科, 主要包括空间辐射环境模拟、辐射测量、辐射效应与加固等. 空间辐射损伤是影响航天器在轨长期可靠运行的重要因素之一, 随着微电子和航天技术的发展, 空间辐射物理研究面临许多新的挑战. 本文围绕空间辐射环境研究与模拟、辐射测量技术、辐射效应机理、电子元器件与系统抗辐射加固技术等方面, 深入分析国内外研究现状、热点及面临的挑战, 梳理急需解决的关键基础问题, 提出我国空间辐射物理及应用研究发展建议.

关键词 空间辐射物理, 空间辐射环境, 辐射环境模拟, 辐射测量, 辐射效应, 抗辐射加固

单粒子效应、总剂量效应、位移损伤效应、充放电效应等空间辐射损伤效应是引起航天器在轨运行故障的主要原因之一. 空间辐射物理及应用研究是航天器和电子器件抗辐射加固的基础, 属于核科学、宇航电子学等的交叉学科.

国际上, 美俄等航天大国在空间辐射物理及应用研究方面技术领先, 航天器抗辐射加固指标齐全, 效应机理研究深入, 辐射模拟装置配套完善, 试验和评估方法规范, 技术体系完善.

我国空间辐射物理及应用研究涉及器件和系统研制、试验、效应机理研究等产学研用单位, 经过几十年的发展, 取得了大量的研究成果, 为我国航天器在轨可靠运行提供了重要的技术支撑.

未来航天器类型和数量不断增加, 轨道复杂、功能多样, 要求高性能、长寿命、高可靠、小型化、轻量化、低功耗、低成本, 未来器件发展要求高速度、高密度、高可靠、低功耗、低成本, 出现了很多新的辐射效应现象, 需要研发新的加固技术, 这些要求都

给空间辐射物理及应用研究带来了新的挑战.

本文围绕空间辐射环境研究与模拟、辐射测量技术、辐射效应机理、电子元器件与系统抗辐射加固技术等方面, 分析国内外研究现状及面临的挑战, 提出我国空间辐射物理及应用研究发展建议.

1 空间辐射环境研究与模拟

空间辐射环境主要包括地球辐射带、太阳宇宙线、银河宇宙线等(图1), 与太阳活动及地磁活动密切相关, 不同轨道航天器工作的辐射环境差异很大. 从20世纪60年代开始, 国外通过对空间辐射环境的测量分析, 发展了AP1-AP8, AE1-AE8等系列化的地球辐射带环境模型, 2012年美国多家机构联合编制了最新的AP9/AE9模型, 虽然在模型上有所突破, 但还不能准确计算空间辐射带环境, 如计算的某些轨道电子通量和质子通量的偏差还很大. 目前在空间辐射环境方面, 重点需要准确给出空间不同轨道辐射环境分布及随时间的变化规律, 提高太阳质子事件预

引用格式: 陈伟, 杨海亮, 郭晓强, 等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战. 科学通报, 2017, 62: 978-989

Chen W, Yang H L, Guo X Q, et al. The research status and challenge of space radiation physics and application (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 978-989, doi: 10.1360/N972016-00438

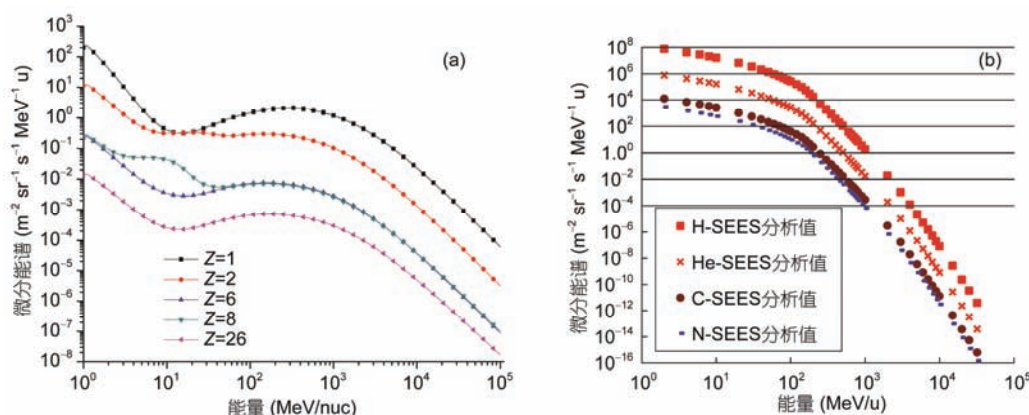


图1 银河宇宙线和GEO轨道粒子能谱。(a) 银河宇宙线粒子能谱; (b) GEO轨道粒子能谱

Figure 1 Particle energy spectrum of galactic cosmic rays and GEO orbit. (a) Particle energy spectrum of galactic cosmic rays; (b) particle energy spectrum of GEO orbit

报的准确性, 加强航天器内部辐射环境测量研究等。

空间辐射环境建模是一个复杂的物理问题, 影响计算结果不确定性的因素很多, 如人类在太阳活动对空间辐射环境的影响规律上认识不足; 环境数据来源于多颗卫星的不同设备, 其数据获取、标定、处理方法等差异较大, 对空间环境模型的计算结果产生影响; 模型算法或建模方法本身存在局限, 对于不同的计算条件, 如太阳周期的不同阶段或辐射带的不同区域, 计算结果的准确性可能不同等。辐射环境模型的不准确, 可能导致辐射防护的过设计或欠设计。因此, 亟待解决空间辐射环境的准确定量描述、建立精确的动态环境模型、分析环境参数的不确定度, 评估最新模型的适用性, 为航天器的抗辐射加固设计提供环境参数。

尽管国内外在太阳质子和高能电子暴事件预报方面取得了一定进展, 但依然存在机理尚未完全清楚、观测手段有限、统计预报方法数据不足等问题, 预报方法还主要停留在统计预报的水平, 基于物理过程的预报技术研究进展不大。需要加强质子事件预警技术和质子事件演化预测技术研究, 对质子事件规模和细节特征预测方面给出正确评估, 指导卫星采取合适的应对策略。高能电子暴预报需要获得高能电子通量和能谱的变化趋势, 建立不同时间卫星所在位置的高能电子能谱模型, 以及整个同步轨道上高能电子的动态模型, 为卫星深层充电防护提供参数。

为研究空间辐射环境对航天器的损伤机理, 准确评估抗辐射加固性能, 需要在地面的实验室模拟

产生类似空间的辐射环境。目前主要的空间辐射环境模拟装置是各种类型的加速器、反应堆、同位素源等。但这些模拟装置很多是通用装置, 需要依据空间辐射环境参数开展专门研究, 以满足辐射效应研究要求。如在重离子辐照装置方面, 需要对慢引出动力学进行深入研究, 以提高不同能量、不同束流强度条件下的重离子引出效率和均匀性。重离子微束是空间单粒子效应研究的一种重要试验手段, 目前国内仅能实现2 μm 的微束, 如果来实现1 μm 以下的微束, 还需技术的整体跨越。而在同步加速器上实现微束, 这将是一个世界范围内的率先突破。在质子加速器研制方面需要解决两方面的问题: 一是宽能量范围束流引出的均匀性问题, 二是各种束斑尺寸的空间均匀性问题。

2 辐射测量技术

辐射测量主要包括空间与地面模拟的辐射场参数测量, 主要研究内容包括空间辐射环境测量、模拟装置辐射场测量、新型辐射探测器研发等方面。经过几十年的发展, 研制了多种类型的辐射探测器, 并通过航天器搭载获得了空间不同轨道上的粒子种类、能谱、随时间的变化规律等大量的实测数据, 并且随着新材料的出现不断发展新的辐射探测理论, 研制新型的探测器。

无论是空间辐射场还是加速器、反应堆等产生的模拟场, 几乎都是混合场, 对混合辐射场的粒子与射线种类的甄别、能谱的测量等一直是辐射测量研究的重点问题, 需要解决不同能区, 不同粒子与射线的分

辨式测量, 时空分辨测量等.

在空间辐射环境监测方面, 需要深化监测活动物理设计相关方法与技术研究, 加强空间辐射环境及效应探测技术研究; 攻克能量跨度从eV量级至GeV量级粒子的能谱测量与质子、重离子、电子等多种粒子种类的甄别以及在轨测量等难题.

在地面装置辐射场测量方面, 当前急需发展的关键技术包括质子束能谱测量及能散度测量、低能散射粒子抑制及甄别技术、不同注量率质子束流测量、束斑尺寸及相应范围内束流分布均匀性探测等.

在反应堆中子辐照实验方面, 必须解决反应堆中子试验孔道中子注量率、能谱、 γ 剂量率等伴随测量的技术难题, 进一步提高测量精度.

在新型探测器研制方面, 需要解决的重点问题有: 适合辐射效应机理分析的微剂量测量用探测技术; 宽禁带半导体材料缺陷密度、极化效应、器件物理研究; 扩宽待探测粒子能量的线性响应范围, 改进探测器结构和器件制造工艺以及对转化层和灵敏层厚度的优化设计; 高效率微结构中子探测器的物理设计.

3 辐射效应机理

深入认识辐射效应的物理机理是有效开展航天系统抗空间辐射加固研究的前提, 在过去几十年中已经取得了大量的成果, 但仍然面临着部分效应现象的理论研究不够深入的问题. 与此同时, 随着微电子产业的迅猛发展, 近年来大量涌现的新材料、新结构、新器件对于辐射效应机理的研究提出了新的挑战.

单粒子效应(SEE)是由于单个粒子穿过器件敏感区域, 电离产生的电子-空穴对被电场收集形成脉冲电流, 导致器件辐射损伤的现象. 随着器件特征工艺尺寸的减小, 单粒子瞬态效应(SET)和多位翻转效应(MBU)是必须特别关注的辐射效应(图2)^[1]. 随着工作频率的提高, 单位时间内时钟沿的数量增加, SET被俘获的概率随之增大; 其次, 小尺寸器件节点电容减小, 电源电压降低, 逻辑状态变化所需电荷量也随之降低, 也就是说, 在相同的粒子注量条件下, 能够产生更多具有足够高度和宽度的SET脉冲, 从而导致敏感窗口增大, 进一步增加了SET敏感度; 再次, 随着门延迟减小, 能够无衰减传播的脉冲宽度和高度也随之减小. 有文献预测, 对于新型小尺寸器件, SET脉冲与时钟宽度相当, SET的加固将变得越来越

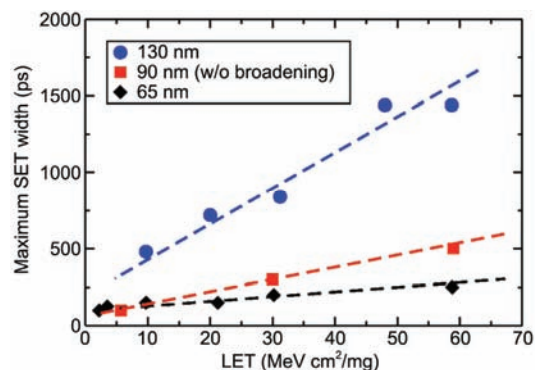


图2 单粒子瞬态效应在不同特征尺寸器件的SET脉冲宽度^[1]

Figure 2 Maximum generated SET pulse widths for the three test structures^[1]

困难, SET引起的软错误率将超过SEU, 成为软错误的主要来源. 需要研究SET产生、传播、捕获及其防护的机制. 小尺寸器件的MBU同样变得日趋严重. 传统的大尺寸半导体器件的入射粒子能量沉积、电荷产生模式可以用系列点状分布来近似, 因为此时产生的电荷的径向分布相比器件尺寸较小, 可以忽略能量沉积的细致结构. 但是, 对于小尺寸器件, 沉积电荷的径向分布已经可以与器件的灵敏区尺寸相比拟, 不能简单地近似为系列点状分布(图3)^[2~4], 需要研究

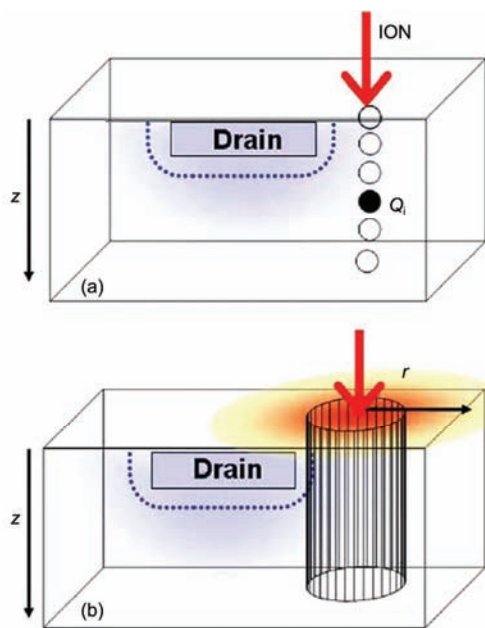


图3 点状的电荷沉积模式(a)与带径向分布(b)的电荷收集模式的对比示意图^[2]

Figure 3 Schematic of the comparison between the punctual approach (a) and the radial approach (b)^[2]

电荷共享机制、粒子径迹分布对多位翻转的影响等。

低剂量率增强效应(ELDRS)是指相同总剂量不同剂量率引发的差异,低剂量率下($10^{-4}\sim 10^{-2}$ rad(Si)/s)的损伤大于高剂量率辐照或辐照后加室温退火的损伤。这使得原有空间电子元器件总剂量效应预估方法或实验方法(如美军标MIL-STD-883J-1019, GJB548B及GJB5422-2005等)可能导致严重高估器件的抗总剂量能力。现有研究表明,ELDRS的形成是一个极为复杂的物理过程,与众多因素相关,包括:辐照剂量率、辐照温度、氧化层电场、氧化层缺陷能级分布与空间分布、氧化层中H的分布与浓度、H的输运、辐射感生空穴与电子的输运、空穴与电子陷阱的俘获、复合与辐射、界面陷阱钝化与去钝化、衬底电子隧穿等。国外已经开展大量研究,建立了十余种低剂量率增强效应的理论模型^[5~9](图4),但普适性差,对ELDRS物理机制的认识仍不统一。国内虽已开展了大量的双极器件ELDRS规律研究,但对试验现象的解释仍处于定性阶段,与国外差距明显,制约了低剂量率辐射损伤增强效应的加速试验方法及加固技术的发展。因此,迫切需要开展以下研究:辐射感生产物平均浓度、能级分布、空间分布的测量技术研究;低电场下辐射感生产物的演化机制研究;H在氧化层中的输运机制;ELDRS的数值仿真技术研究等。

随着微电子技术的快速发展,各种新型器件不断出现,目前新型器件(图5)可以划分为三大类:新型工艺、新型材料(置换了沟道材料Si或置换了栅介质材料SiO₂)和新概念器件^[10],这些新型器件带来了

许多新的辐射效应现象,

半导体产业的发展很长时间内一直遵循摩尔定律,特征尺寸不断缩小,对应的栅氧隧穿漏电流将明显增大,短沟道效应、漏极势垒降低效应和工艺不确定性的限制将变得越来越严重,成为不可忽视的因素。当CMOS器件的尺寸减小到一定程度后,等比例缩小的趋势难以延续下去,取代CMOS传统工艺或传统材料的新型器件类型不断涌现,微电子领域将逐渐进入“后CMOS”时代。美国国防部和NASA推行的MURI计划中,将新器件技术对辐照响应的影响、新工艺超小器件中的单粒子效应、超小器件中的位移损伤和总剂量效应等作为主要研究内容。

对于新型工艺类器件,在接近20 nm的工艺节点中,FinFET和超薄有源区晶体管属于两类非常有希望的候选器件。图6所示为FinFET器件结构示意图^[11],并且已经被Intel公司应用于商用产品中。两类新器件中都包括埋氧层,大大减小了单粒子效应中的灵敏体积,同时有效抑制多节点电荷收集。所以,两类器件被认为具有优越的抗单粒子性能,但仍需研究实际器件对抗单粒子性能的改善程度。

新型材料类器件主要指置换了沟道材料Si或置换了栅介质材料SiO₂的器件。其中高K栅器件中基本上是将SiO₂置换为HfO₂,考虑到Hf的弹性散射截面比Si平均大160倍,而非弹性散射截面比Si平均大2.5倍(图7),应用HfO₂材料有可能引入新的辐射损伤机制,需要特别关注中子辐射损伤效应。

应变硅器件、化合物半导体晶体管(如GaN等)和

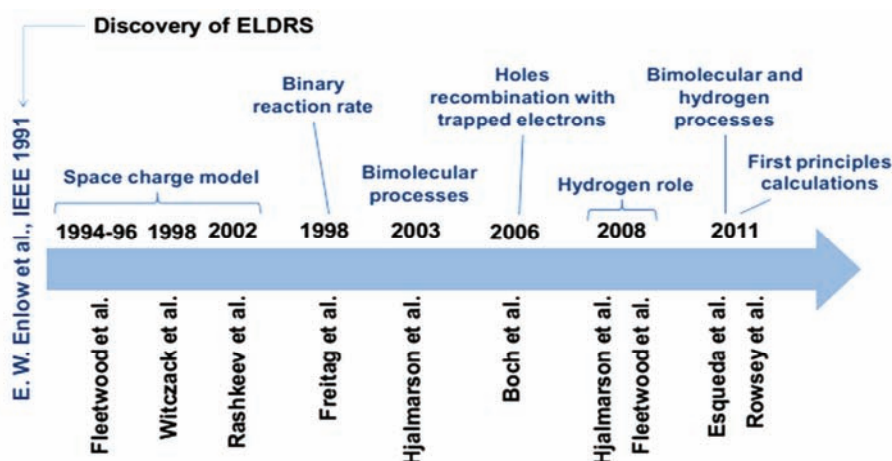
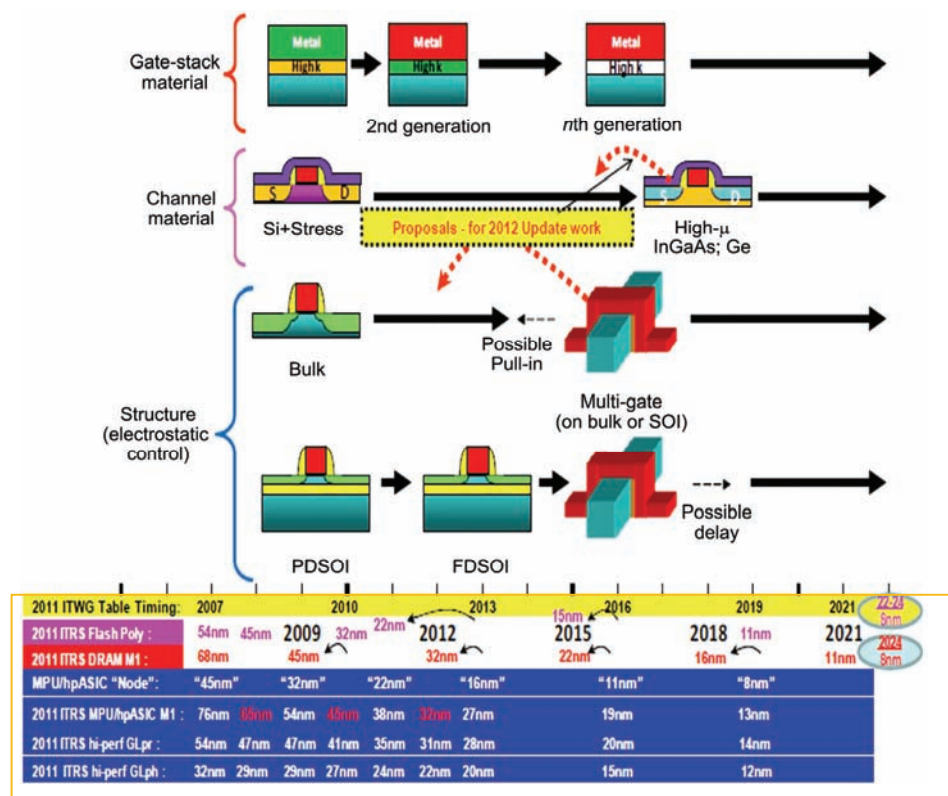
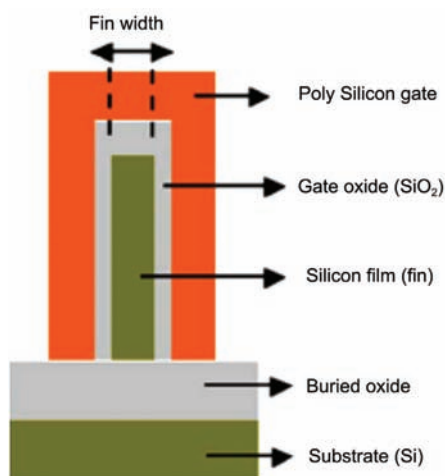


图4 低剂量率增强效应物理模型发展历程^[5]

Figure 4 ELDRS models history^[5]

图5 新型器件发展趋势图^[10]Figure 5 Development trend of electronic devices^[10]图6 FinFET器件结构示意图^[11]Figure 6 Schematic of FinFET device^[11]

SiGe BiCMOS等是将原有的沟道材料Si加以置换。其中SiGe BiCMOS器件采用了窄禁带材料, 电流增益高, 且该器件常用于高频高速电路, 所以对于单粒子效应, 尤其是单粒子瞬态效应非常敏感, 需要深入研究该器件的单粒子瞬态效应机理。碳纳米管和石墨

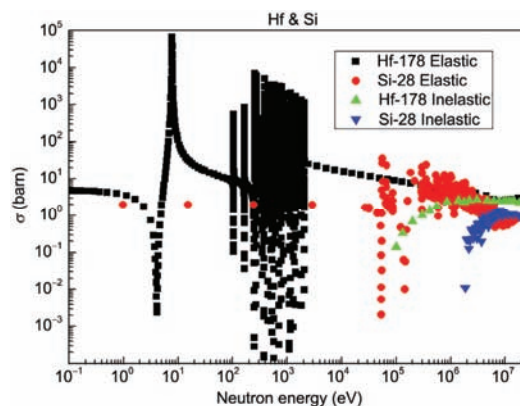


图7 Hf-178与Si-28材料的中子作用截面

Figure 7 Neutron interaction cross sections of Hf-178 and Si-28

烯晶体管等新概念器件(图8)^[11], 具有较小的灵敏区电荷收集体积, 所以普遍认为具有较强的抗单粒子能力。需要对其辐射效应的物理机理进行探索研究。

电子学系统在天然辐射环境中, 同时受到电离辐射总剂量、累积位移损伤与单粒子效应等多方面的影响^[12~14]。航天器在轨初期, 累积剂量较小, 器件所表征出的单粒子效应规律与地面预估的情形一致。

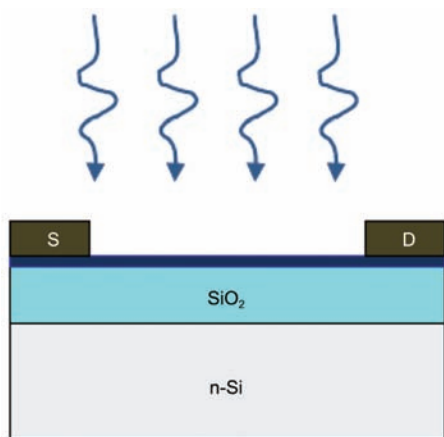


图8 石墨烯晶体管结构示意图^[11]

Figure 8 Schematic of Graphene transistor^[11]

随着卫星在轨时间的延长,累积剂量不断增大,长期累积效应是否对单粒子效应产生影响是人们一直关注的问题.理论推测得出,当单粒子效应测试图形与总剂量效应测试图形一致时,SEU截面最小;测试图形互补时,SEU截面最大.而从实测数据来看,2002年之前的文献中“烙印”现象比较常见,2002年之后的文献中出现了比“烙印”现象更为复杂的实验数据(图9)^[14],这些实验数据无法用已有的理论去解释.国外相关研究针对这个现象做出过一些推断,认为是外围电路的辐射损伤导致的,但却不能解释外围电路的辐射损伤与测试图形之间的关联性.总剂量或位移损伤对单粒子的协和效应,反映出效应相互耦合过程复杂,影响因素多,需要进一步开展协和效应的理论和试验研究,对正确评价航天器抗单粒子

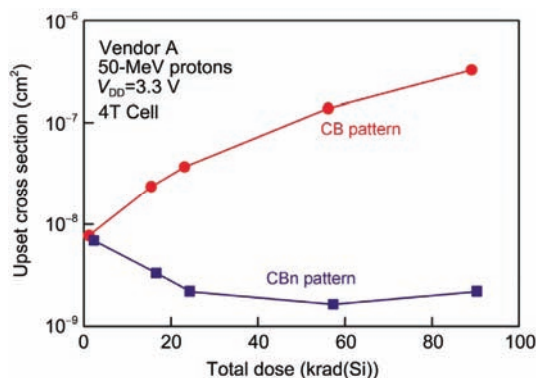


图9 SRAM器件总剂量试验中采用CB图形单粒子试验中分别采用CB和CBn图形的翻转截面^[14]

Figure 9 Upset cross section versus total dose for SRAMs irradiated in a CB pattern and characterized in either a CB or CBn pattern^[14]

效应能力具有重要的指导意义.

辐射效应研究通常都是对宏观电学参数进行测试,深入的机理研究需要在微观层面对辐射与器件材料相互作用产生的缺陷、能级变化进行理论模拟和分析测试.

以位移损伤的缺陷测试为例.深能级瞬态谱测试是半导体领域研究和检测半导体杂质、缺陷深能级、界面态等的重要手段.基于深能级瞬态谱测试系统,可以完成不同能量、注量的粒子辐照后,位移损伤深能级缺陷的能级位置 E_T 、密度 N_T 、电子俘获截面 σ_n 、空穴俘获截面 σ_p 等参数的测量,可以分析得到位移损伤深能级缺陷参数^[15].需要研究器件辐射微观损伤表征参数的测试技术和方法.

当前器件氧化层厚度不断减薄,商用65 nm器件的氧化层厚度只有0.9 nm,这已经达到SiO₂栅介质的物理极限.超薄栅氧带来了一系列的可靠性问题,如经时击穿效应,氧化层软击穿、应力引发的漏电流、热载流子效应.辐射对器件的可靠性及寿命的影响可能会出现严重问题:总剂量效应在器件氧化层内形成的氧化物陷阱电荷及界面态电荷会加剧栅与衬沟道间的电子隧穿,从而造成栅漏电流的增大^[16];中子会在器件的氧化层内形成更多的位移缺陷,从而加剧器件的经时击穿效应;重粒子有可能在栅与衬底间形成一个电离通道,形成短时的软击穿,严重情况下造成栅介质的硬击穿;另外,体现器件可靠性的浴盆曲线发生变化(图10),器件的有效寿命(浴盆底部)有变短的趋势.

微剂量效应是指当晶体管特征尺寸变得与粒子产生的电离径迹直径可相比拟时,单个粒子入射器件,通过直接或间接电离的方式在栅氧中产生的陷阱电荷以及在Si/SiO₂界面处产生界面态缺陷足以引起器件的局部总剂量失效(图11)^[17],从而造成器件的永久性损伤.微剂量效应兼具总剂量效应的失效永久性与单粒子效应的随机性,同时与总剂量的均匀剂量分布不同,微剂量在空间分布上具有局域性的特点,与单粒子效应的辐射感生载流子直接参与输运不同,是通过辐射感生缺陷间接影响载流子输运,是一种新的效应现象,值得关注.

数值模拟与仿真是辐射效应机理研究、抗辐射加固设计和抗辐射性能评估的关键技术.电子器件、电路和系统辐射效应数值模拟主要研究辐射与材料相互作用的粒子输运模拟、器件内部辐射感生载流子漂

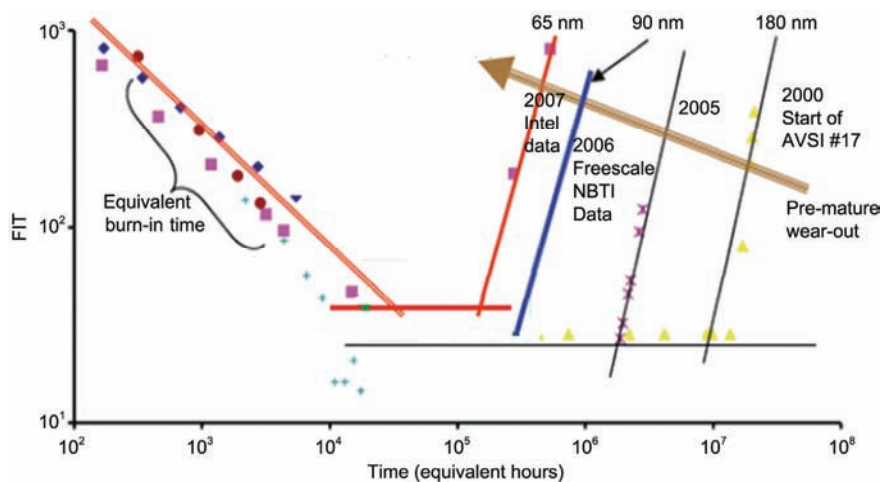


图10 体现器件可靠性的浴盆曲线随着工艺进步的变化情况

Figure 10 Evolution of the tub curves with the device scaling

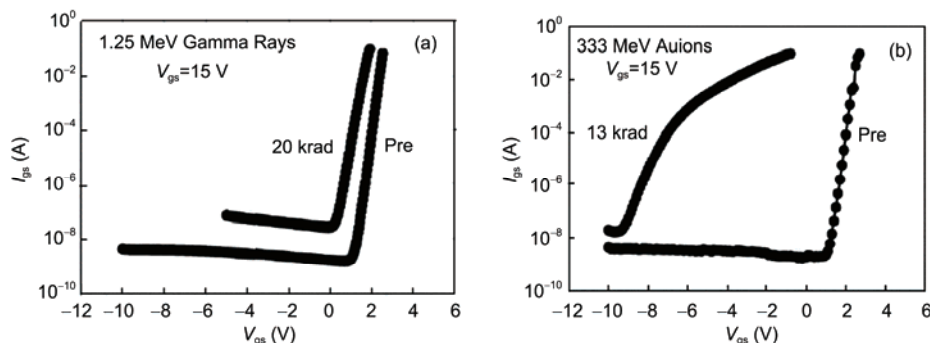


图11 沟槽型功率MOSFET总剂量辐照(a)和Au离子辐照结果(b)对比^[17]

Figure 11 Pre and post-irradiation I - V curves for trench power MOSFET irradiated with γ -rays (a) and gold ions (b)^[17]

移扩散的TCAD器件模拟、器件性能退化对于电路功能影响的电路模拟、辐射损伤在系统中的传播模拟等。经过几十年的发展,我国在辐射效应数值模拟技术研究方面开展了大量工作^[18~20],但是,在辐射效应数值模拟技术中依然存在许多问题亟待解决,一是纳米工艺、新型材料等器件的辐射效应建模和数值模拟技术;二是电子系统的辐射损伤传递规律模拟、协和效应相互耦合模拟、空间与地面损伤等效模拟等;三是需要加强研发辐射效应器件级仿真软件、单粒子翻转率预测软件、辐射效应电路级仿真软件和系统级辐射效应仿真软件等具有自主知识产权的国产化软件;四是需要对数值模拟的不确定度进行评定,对数值模拟结果进行校验和验证。

航天器抗空间辐射加固研究、设计、评价离不开地面模拟。空间辐射损伤地面模拟是通过地面辐照试验和仿真,实现与空间相同或相似损伤的表征,对

辐射损伤在地面进行量化分析,对掌握损伤机理、采取加固措施、评价抗辐射性能、选用合适的材料和器件具有十分重要的意义。地面模拟试验环境与空间辐射环境有较大差异,一是粒子种类不同,空间粒子主要有重离子、质子、电子等,地面辐射模拟装置主要采用钴源、重离子加速器、质子加速器、反应堆等来模拟空间辐射损伤,存在不同种类的粒子引起辐射损伤的异同性问题;二是时间尺度不同,卫星在空间环境长期工作,少则几年,多则十几年,在地面只能采用短时间加速试验方法,需要通过特征时间等效来分析空间辐射效应时间尺度问题,从而提供地面经济高效准确的模拟试验方法;三是能谱不同,空间粒子能谱范围很宽,从eV到GeV,而地面单一辐射模拟装置能量范围窄,有的是单一能量,存在不同能量粒子与器件相互作用造成的损伤等效问题;四是入射方向不同:空间粒子是从各个方向入射的,而

地面模拟试验中多是单方向入射的。因此，只有在深入掌握不同源、不同注量率/剂量率、不同能量粒子辐射损伤等效理论与方法的基础上，才可能制定出准确合理的空间辐射损伤地面模拟试验方法。

空间总剂量效应、单粒子效应、位移损伤效应及充放电效应模拟试验方法研究经过几十年的发展，为航天器在轨长期可靠运行提供了重要支撑。但目前我们对空间辐射损伤与地面模拟等效的关键基础问题还没有完全认识清楚，随着新材料、新工艺和新器件的发展，迫切需要加强空间辐射效应地面模拟试验和评估技术研究。重点需要研究不同源、不同注量率/剂量率、不同能量粒子、不同时间尺度辐射损伤的等效性问题。

4 电子器件与系统抗辐射加固新技术

提高器件与系统的抗辐射性能是空间辐射物理研究的最终目的。只有从材料、工艺、器件、电路、系统、软件等多层次进行加固研究，才能实现加固性能与成本的最优化结合，需要不断发展新的抗辐射加固技术。

抗辐射能力是设计、生产出来的。抗辐射能力量化设计是在系统设计阶段，量化组成系统的每一个器件和设备的辐射损伤引起的技术性能变化及其不确定度，规定设计裕量，并预测在规定的辐射环境中系统实现规定功能的概率及其置信区间。需要充分考虑和量化影响抗辐射能力的各种因素，对环境、性能、功能等参数的阈值、裕量和不确定度进行量化和研究，同时进行反复迭代优化，以最佳性价比获得系统抗辐射能力要求。

纳米器件临界电荷更小，相邻单元的电荷共享更为突出，使得单粒子多位翻转及单粒子瞬态效应更为严重。一些传统的加固方法不再适用或效果变差。图12为不同工艺下DICE结构对单粒子翻转的加固有效性，在45 nm后其有效性已经很差，必须研究新的加固方法^[19~23]。而单粒子瞬态效应的加固在国内还处于探索阶段。因此需要加强纳米器件单粒子效应加固技术研究。

虽然纳米器件具有薄的栅氧化层，具有很好的本征抗总剂量效应能力，但在45 nm工艺后，为提高栅氧可靠性，已经开始使用新的高K栅介质材料，如RNO, HfO₂等。这些新型栅介质材料的总剂量效应机理与原来的SiO₂材料有差异，需要进一步研究其总

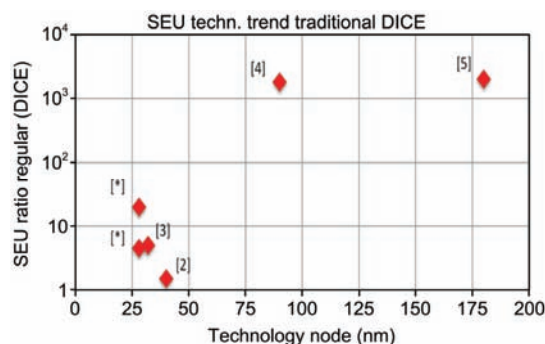


图12 不同工艺节点下传统DICE结构的有效性示意图^[19~23]

Figure 12 Effectiveness of the traditional DICE structures at different technology nodes^[19~23]

剂量效应加固方法。

电路或系统的加固技术可分为冗余技术和故障修复技术两大类。冗余技术主要包括不同冗余度(二模、三模、多模等)、不同冗余粒度(门级、电路级、功能模块级、系统级)的实现技术研究；三模冗余(TMR)^[24~28]是集成电路设计领域应用非常广泛的容错手段，它的核心思想是将原有的电路结构复制三倍，将它们的输出结果用一个多数表决电路进行表决。这种方法看似简单，但它需要三倍的硬件资源消耗，而这些增加的硬件资源同时会增加单粒子效应敏感性。三模冗余电路中，表决器是电路单粒子功能中断的敏感位置，其加固方法还需进一步研究。除了TMR之外，也出现了一些其他的基于冗余思想的容错方法。例如，空间双倍冗余^[29]、时间冗余、部分TMR方法^[30,31]等。目前TMR方法主要用在SRAM型FPGA中，所用的冗余算法及工具多为国外Xilinx公司提供的XTMRTTool软件。基于以上分析，TMR方法还需重点研究以下技术问题：三模冗余所用资源与抗单粒子性能的优化方法、表决器加固方法、高效三模冗余算法研究及软件化等。

故障修复技术包含被动式修复及主动式修复两类。被动式故障修复技术是在检测到单粒子效应时，再进行修复的技术，必须包含SEU的检测电路(例如EDAC技术)，主要目的是实现用尽可能少的资源、在尽量不影响器件或系统运行速率的情况下，实现高效、准确的错误检纠能力。目前大多数EDAC方法^[32~35]，如汉明码只能实现检二纠一的能力，而检三纠二，甚至检纠更多位失效的方法目前国内外都不成熟。面对微纳器件带来的单粒子多位翻转，现有EDAC技术难以满足要求，还需加强针对单粒子多位

翻转的EDAC技术研究.

主动式故障修复技术指不论是否有单粒子效应发生,都对电路或系统状态进行复位或刷新的技术.最具代表性的为SRAM型FPGA的定时刷新.主动式故障修复技术只能用于在空间实时性要求不高的电子系统或电路.在主动式故障修复技术方面,还需开展以下研究工作:定时刷新的时间间隔选取原则与依据,不影响系统实时性的主动修复技术等.

SOI工艺可以解决一些缩小器件尺寸带来的器件和工艺问题,如浅结、软失效和体硅CMOS的闭锁效应等.由于SOI技术能够实现器件的全介质隔离,消除了体硅CMOS电路的寄生NPNP通道,具有良好的抗闭锁能力和抗瞬时辐射能力.然而,SOI工艺中埋氧层的存在却使SOI技术在总剂量电离辐射中并不比体Si结构占优势,必须加强SOI工艺的总剂量效应加固技术研究.

目前国内基本解决了大尺寸SOI器件的总剂量效应加固问题^[36~39],但小尺寸SOI器件(如0.13 μm 以下工艺)的加固技术仍处于起步阶段,全耗尽SOI器件的加固技术还未见报道.因此还需重点研究以下问题:埋氧的抗辐射加固问题、SOI器件的体接触方法、全耗尽SOI器件的总剂量效应加固方法、超薄埋氧化物及超薄体硅膜全耗尽SOI器件辐射加固设计与制造技术、基于SOI工艺的大规模集成电路设计与制造等.

双极器件的载流子主要在硅材料内输运,受氧化层及表面的影响比MOS器件弱,对总剂量效应相对不敏感.通过减小有效基区的宽度、减小发射极的周长、增加基区表面掺杂等手段可有效提高其抗总剂量性能.但近年来发现,低剂量率增强效应成为影响

双极器件抗总剂量性能的主要因素^[40~43].因此需研究如下问题:H在钝化层、氧化层中的输运机制,器件在氧化、钝化、封装等过程中引入H的含量的抑制方法等.

材料是器件制造的基础,也是抗辐射加固的基础.目前国内外对新型抗辐射材料的研究越来越广泛,研究较多的主要有SiC、GaAs^[44,45]、铁电材料^[46,47]、磁性材料等^[48,49].据报道,铁电材料的抗中子辐射能力大于 10^{15} n/cm²,抗总剂量能力达到10 Mrad(Si),抗剂量率能力大于 10^{11} rad(Si)/s,远超过同等条件下的Si和SiO₂材料.基于GaAs材料研制微波和毫米波器件已在航天器上大量应用,需要研究新型抗辐射材料器件的加固技术.

5 结束语

空间技术和微电子技术的发展对空间辐射物理及应用研究需求迫切,2014年在国家自然科学基金委员会支持下召开了“全国辐射物理战略研讨会”,2015年召开了以“空间辐射物理及应用”为主题的第547次香山科学会议,国内产学研用单位相关领域的专家学者一致认为,为了解决航空航天技术发展对辐射物理学提出的迫切需求,推进微电子技术的发展,为电子元器件可靠性提供关键技术支撑,急需围绕航天器高性能、长寿命、高可靠要求,重点开展新材料、新工艺、新器件空间辐射效应机理研究,通过地面模拟试验、数值仿真、在轨飞行试验,建立空间与地面辐射损伤等效关系,建立基础数据库,研制自主知识产权软件和试验标准规范,研发新的抗辐射加固技术,解决我国航天器抗辐射加固的关键基础科学问题.

致谢 感谢抗辐射加固技术专业组专家、国家自然科学基金委员会资助的全国辐射物理战略研讨会专家,感谢第547次香山科学会议提供报告的各位专家,感谢邱爱慈、郝跃、夏佳文、范如玉、欧阳晓平、王立、柳卫平、唐传祥、龚建村、蔡震波、唐民、薛炳森等专家提供的宝贵建议和相关材料.

参考文献

- Gadlage M J. Impact of Temperature on Single-Event Transients in Deep Submicrometer Bulk and Silicon-On-Insulator Digital CMOS. Technologies Dissertation for Doctoral Degree. Nashville, Tennessee: Vanderbilt University, 2010
- Artola L, Hubert G, Duzellier S, et al. Collected charge analysis for a new transient model by TCAD simulation in 90 nm technology. IEEE Trans Nucl Sci, 2010, 57: 1869–1875
- Raine M, Hubert G, Gaillardin, et al. Impact of the radial ionization profile on SEE prediction for SOI transistors and SRAMs beyond the

- 32-nm technological node. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2011, 58: 840–847
- 4 Castellani-coulie K, Munteanu D, Autran J L, et al. Investigation of 30 nm gate-all-around MOSFET sensitivity to heavy ions: A 3-D simulation study. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2006, 53: 1950–1958
- 5 Adell P. Dose and dose rate effects in microelectronics: Pushing the limits to extreme conditions. *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, 2014, Paris, France
- 6 Fleetwood D M, Kosier S L, Nowlin R N, et al. Physical mechanisms contributing to enhanced bipolar gain degradation at low dose rates. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1994, 41: 1871–1883
- 7 Belyakov V V, Pershenkov V S, Shalnov A V, et al. Use of MOS structures for the investigation of low-dose-rate effects in bipolar transistors. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1995, 42: 1660–1667
- 8 Fleetwood D M, Riewe L C, Schwank J R, et al. Radiation effects at low electric fields in thermal, SIMOX, and bipolar-base oxides. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1996, 43: 2537–2546
- 9 Witczak S C, Laco R C, Mayer D C, et al. Space charge limited degradation of bipolar oxides at low electric fields. *IEEE Trans Nucl Sci* 1998, 45: 2339–2352
- 10 2011 International Technology Roadmap for Semiconductors. Available online: <http://www.itrs.net/>
- 11 Koester S J. Radiation effects in emerging technologies. *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, 2012, Miami, America
- 12 Ding L L, Guo H X, Chen W, et al. Simulation study of the influence of ionizing irradiation on the single event upset vulnerability of static random access memory (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 188502 [丁李利, 郭红霞, 陈伟, 等. 累积辐照影响静态随机存储器单粒子翻转敏感性的仿真研究. *物理学报*, 2013, 62: 188502]
- 13 Xiao Y, Guo H X, Zhang F Q, et al. Synergistic effects of total ionizing dose on the single event effect sensitivity of static random access memory (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 018501 [肖尧, 郭红霞, 张凤祁, 等. 累积剂量影响静态随机存储器单粒子效应敏感性研究. *物理学报*, 2014, 63: 018501]
- 14 Schwank J R, Shaneyfelt M R, Felix J A, et al. Effects of total dose irradiation on single-event upset hardness. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2006, 53: 1772–1778
- 15 Klanner R. Radiation damage in silicon-defect analysis and detector properties. Dissertation for Doctoral Degree. Hamburg: Hamburg University, 2008
- 16 Ding L, Gerardin S, Bagatin M, et al. Drain current collapse in 65 nm pMOS transistors after exposure to grad dose. *IEEE Tran Nucl Sci*, 2015, 62: 2899–2905
- 17 Felix J A, Shaneyfelt M R, Schwank J R. Enhanced degradation in power MOSFET devices due to heavy ion irradiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2007, 54: 2181–2190
- 18 Ding L, Guo H, Chen W, et al. Analysis of TID failure modes in SRAM-based FPGA under gamma-ray and focused synchrotron X-ray irradiation. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2014, 61: 1777–1784
- 19 Ding L, Chen W, Guo H, et al. Scaling effects of single-event gate rupture in thin oxides. *Chin Phys B*, 2013, 22: 118501
- 20 He B P, Ding L L, Yao Z B, et al. Three-dimensional simulation of total dose effects on ultra-deep submicron devices (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 056105 [何宝平, 丁李利, 姚志斌, 等. 超深亚微米器件总剂量辐射效应三维数值模拟. *物理学报*, 2011, 60: 056105]
- 21 Loveless T D, Jagannathan S, Reece T, et al. Neutron and proton-induced single event upsets for D- and DICE-flip/flop designs at a 40 nm technology node. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2011, 58: 1008–1014
- 22 Seifert N, Ambrose V, Gill B, et al. On the radiation-induced soft error performance of hardened sequential elements in advanced bulk CMOS technologies. In: *IEEE Proc Intl Rel Phys Symp*, 2010. 188–197
- 23 Baze M P, Hughlock B, Wert J, et al. Angular dependence of single event sensitivity in hardened flip/flop designs. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2008, 55: 3295–3301
- 24 Lee K, Lilja K, Bounasser M, et al. LEAP: Layout design through error-aware transistor positioning for soft-error resilient sequential cell design. In: *Proc IEEE Intl Rel Phys Symp*, 2010. 203–412
- 25 Lilja K, Bounasser M, Gaspard N, et al. Single event performance and layout dependence for hardened flip-flops in a 28 nm bulk technology. In: *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, 2012, Miami, America
- 26 Xu R R, Meng H B, Gui X Y, et al. Triple modular redundancy for VLSI gate level netlist (in Chinese). *Computer Eng Sci*, 2014, 36: 2355–2360 [徐冉冉, 孟海波, 桂小琰, 等. 面向门级网表的 VLSI 三模冗余加固设计. *计算机工程与科学*, 2014, 36: 2355–2360]
- 27 Gui J H, Xu R, Zhuo L. The research of radiation harden for ASIC (in Chinese). *J CAEIT*, 2013, 8: 643–646 [桂江华, 徐睿, 卓琳. 基于三模冗余架构的集成电路加固设计. *中国电子科学研究院学报*, 2013, 36: 643–646]
- 28 Ning X Q, Liu B M, Nie Y F. Implementation of triple modular redundancy in ASIC design (in Chinese). *Mod Electron Tech*, 2012, 35: 128–130 [宁新权, 刘布民, 聂永峰. 三模冗余在 ASIC 设计中的实现方法. *现代电子技术*, 2012, 35: 128–130]

- 29 Ding P C. Research on fault-tolerance techniques against single event effects for SRAM-based FPGAs (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013 [丁朋程. 基于 SRAM 型 FPGA 的抗单粒子效应容错技术的研究. 博士学位论文. 兰州: 西北师范大学, 2013]
- 30 Liu T, He Q M, Huang W. Design and implementation of SpaceWire node based on TMR (in Chinese). Spacecr Recov Rem Sens, 2012, 33: 64–69 [刘涛, 贺强民, 黄伟. TMR 加固的 SpaceWire 节点的设计与实现. 航天返回与遥感, 2012, 33: 64–69]
- 31 Lima K F. SEE mitigation strategies for digital circuit design applicable to ASIC and FPGAs. In: IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, 2007
- 32 Pratt B, Caffrey M, Carroll J, et al. Fine grain SEU mitigation for FPGAs using partial TMR. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, 55: 2274–2280
- 33 Morgan K, Caffrey M, Graham P, et al. SEU-induced persistent error propagation in FPGAs. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52: 2438–2445
- 34 Gao S, Wang D M. Low overhead space borne ZF detection design based on EDAC (in Chinese). Comput Eng Design, 2015, 36: 133–137 [高山, 王大鸣. 基于 EDAC 的低开销星载迫零检测算法. 计算机工程与设计, 2015, 36: 133–137]
- 35 Sun J L, Zhang P. A self-checking EDAC design based on FPGA for spacecraft computer (in Chinese). Microcomp Inf, 2009, 28: 131–133 [孙吉利, 张平. 基于 FPGA 的星载计算机自检 EDAC 电路设计. 微计算机信息, 2009, 28: 131–133]
- 36 Xiang C Q, Tan P Y. System design of the EDAC modular for satellite memory (in Chinese). J Huaiyin Instit Technol, 2007, 16: 40–43 [向春清, 谭培勇. 一种卫星存储器纠错检错系统设计. 淮阴工学院学报, 2007, 16: 40–43]
- 37 Xu H B. FPGA design and implementation of spacecraft EDAC system based on TMS320VC33 development platform (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Changsha: National University of Defense Technology, 2014 [徐海波. 基于 TMS320VC33 平台的星载 EDAC 系统的 FPGA 设计与实现. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2014]
- 38 Gao X D, Wu J W, Liu G Z, et al. Study of radiation hardened SOI gate oxide reliability (in Chinese). Electron Packaging, 2012, 12: 44–48 [高向东, 吴建伟, 刘国柱, 等. SOI 抗总剂量辐射加固工艺栅氧可靠性研究. 电子与封装, 2012, 12: 44–48]
- 39 He Y J, Liu J, En Y F, et al. Common techniques and novel SOI MOSFET device structures for minimizing total dose radiation damage (in Chinese). Manuf Appl Device, 2008, 3: 223–226 [何玉娟, 刘洁, 恩云飞, 等. SOI MOSFET 抗辐射加固的常用方法与新结构. 半导体技术, 2008, 3: 223–226]
- 40 Zhang Y W. Research on total ionizing dose radiation effects and hardening techniques of back-gate for SOI devices (in Chinese). Thesis for Master's Degree. Changsha: Xiangtan University, 2014 [张彦伟. SOI 器件总剂量辐射效应及其背栅加固技术研究. 长沙: 湘潭大学, 2014]
- 41 Tang H M. Total dose hardening of SIMOX SOI materials (in Chinese). Thesis for Master's Degree. Jinan: University of Jinan, 2010 [唐海马. 注氧隔离 SOI 材料的抗总剂量辐照加固. 硕士学位论文. 济南: 济南大学, 2010]
- 42 Chen X J, Barnaby H J, Vermeire B, et al. Mechanisms of enhanced radiation-induced degradation due to excess molecular hydrogen in bipolar oxides. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54: 1913–1919
- 43 Pease R L, Platteter D G, Dunham G W, et al. The effects of hydrogen in hermetically sealed packages on the total dose and dose rate response of bipolar linear circuits. IEEE Trans Nucl Sci, 2007, 54: 2168–2173
- 44 Seiler J E, Platteter D G, Dunham G W, et al. Effect of passivation on the enhanced low dose rate sensitivity of national LM124 operational. IEEE Trans Nucl Sci, 2004, 51: 42–46
- 45 Shaneyfelt M R, Pease R L, Schwank J R, et al. Impact of passivation layers on enhanced low-dose-rate sensitivity and pre-irradiation elevated-temperature stress effects in bipolar linear ICs. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49: 3171–3180
- 46 Tian G P, Wu H J, Zhu S C. Research on the anti-radiation design and test of GaAs 10 bit DAC (in Chinese). Design Manuf Appl IC, 2012, 37: 249–253 [田国平, 吴洪江, 朱思成. GaAs 10 bit DAC 的抗辐射设计和实验. 集成电路设计、制造与应用, 2012, 37: 249–253]
- 47 Gao J X, Lin C L, Yan R L. GaAs MESFETs for use in radiation hardening (in Chinese). Microelectronics, 1997, 27: 107–114 [高剑侠, 林成鲁, 严荣良. GaAs MESFET 在抗辐射领域的应用. 微电子学, 1997, 27: 107–114]
- 48 Tang C L, Chai C C, Lou L F, et al. Nuclear radiation effects of ferroelectric material (in Chinese). Mater Rev, 21: 33–36 [唐重林, 柴常春, 娄利飞, 等. 铁电材料的核辐射效应. 材料导报, 2007, 21: 33–36]
- 49 Zhai Y H, Li W, Li P, et al. Research progress of radiation hardened ferroelectric random access memory (in Chinese). Mater Rev, 2012, 26: 34–38 [翟亚红, 李威, 李平, 等. 抗辐射铁电存储器的研究进展. 材料导报, 2012, 26: 34–38]
- 50 Kamp D A, DeVilbiss A D, Haag G R, et al. High density radiation hardened FeRAMs on a 130 nm CMOS/FRAM process. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52: 48–51
- 51 Wu Q, Luo Z L. Current research and future of magnetic recording (in Chinese). J Chongqing Univ Posts Telecommun, 2005, 17: 88–92 [吴强, 罗自林. 磁存储的研究现状及发展方向. 重庆邮电学院学报(自然科学版), 2005, 17: 88–92]

Summary for “空间辐射物理及应用研究现状与挑战”

The research status and challenge of space radiation physics and application

CHEN Wei*, YANG HaiLiang*, GUO XiaoQiang, YAO ZhiBin, DING LiLi, WANG ZuJun, WANG ChenHui, WANG ZhongMing & CONG PeiTian

State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

* Corresponding authors, E-mail: chenwei6802@163.com; yanghailiang@nint.ac.cn

Space radiation physics and application include the theory and the key technologies of studying radiation effects in spacecraft electronics systems and improving the on-orbit survival probability of spacecrafts. It is an interdisciplinary science involving nuclear science and astronautics electronics. The research work mainly covers simulation of radiation environment, interaction between radiation and materials, radiation hardening, as well as radiation measurement and diagnosis. In recent years, new challenges and problems to the research of space radiation physics have arisen along with the rapid development in microelectronics and space technology. Radiation effects, including single event effects, total ionizing dose effects, displacement damage, charging and discharging effects, are one kind of main threats for space applications. The study of space radiation physics and application plays a fundamental role in maintaining the robustness against radiation of the spacecraft electronics systems. Countries like America and Russia have devoted a lot in this field, now they have a whole set of facilities, guidelines and principles to guarantee the fabrication, evaluation, and utilization of the radiation-hardened electronic devices and systems. However, there are still some problems left unsolved. Furthermore, as the fast development of the electronics, new problems emerge quickly. Space radiation environments mainly include the Van Allen trapped belt, Solar cosmic rays, galactic particles. The fluence of the related protons, electrons, and heavy ions are strongly dependent on solar activity and geomagnetic activity. The distribution of particle fluence is highly non uniform. Spacecraft working in different orbits may face diverse radiation environments. To describe the radiation environments, series of models have been developed for describing the distribution of trapped protons and electrons. Although continued being modified, the errors between predicted values and measured ones are still quite large. It is essential to keep working on this area and increase the accuracy. To measure the parameters like categories, fluence, energy and flux of the radiation environments, many types of detectors have been developed. Along with the emergence of new types of material, it is always meaningful to keep improving the performance and efficiency of detectors. Exploring the underlying mechanisms of radiation effects is extremely important for carrying out the research on radiation hardening by design. In the past 50 years, more and more work has been devoted to studying the physical mechanisms and gained valuable results. However, we still do not get the clear whole physical pictures of some well-known effects. Meanwhile, more and more electronic devices with new material and new structures bring new challenge to the mechanism study. To make sure that an electronic system is robust enough to radiation environments, it is necessary to quantify the radiation vulnerability of every electronic device in the system. Through circuit or system simulation, the radiation vulnerability of the whole system can be estimated. At present, it is still difficult to perform this kind of simulation accurately. This paper discusses the present status and developments tendency in simulating the space radiation environment, developing laboratory simulation equipments, measuring radiation field, researching radiation effects and mechanism, estimating and testing radiation effects, hardening electronics devices, etc. Furthermore, the key and basic problems in this field were discussed. The corresponding advices of space radiation physics and application were proposed.

space radiation physics, space radiation environment, radiation simulation, radiation measurement, radiation effects, radiation hardening

doi: 10.1360/N972016-00438