

纳米器件空间辐射效应机理和模拟试验技术研究进展

陈伟^{1*}, 刘杰², 马晓华³, 郭刚⁴, 赵元富⁵, 郭晓强¹, 罗尹虹¹, 姚志斌¹, 丁李利¹,
王晨辉¹, 陈荣梅^{1,6}, 何宝平¹, 赵雯¹, 张凤祁¹, 马武英¹, 翟鹏飞², 王祖军¹,
刘天奇², 郭红霞¹, 刘建德², 杨海亮¹, 胡培培², 丛培天¹, 李宗臻²

1. 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;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710126;

4. 中国原子能研究院抗辐射应用技术创新中心, 北京 102413;

5. 北京微电子技术研究所, 北京 100076;

6. 清华大学工程物理系, 北京 100084

* 联系人, E-mail: chenwei@nint.ac.cn

2017-07-14 收稿, 2018-01-15 修回, 2018-01-17 接受, 2018-05-04 网络版发表

国家自然科学基金(11690040, 11690043)资助

摘要 电子器件空间辐射效应是影响航天器在轨长期可靠运行的重要因素之一, 一直是国际上抗辐射加固技术领域研究的热点和难点. 高可靠、高集成度、高性能、低功耗、低成本是未来新一代先进电子系统发展的必然要求, 采用更高性能的抗辐射加固纳米器件是必然的趋势. 本文在深入调研国内外研究现状的基础上, 分析了纳米器件辐射效应面临的新问题. 纳米工艺存在着很多不同于大尺寸工艺的特点, 沟道长度缩小到十几个纳米, 栅氧化层等效厚度小于1 nm. 在工艺上引入了纵向逆掺杂阱或横向晕环掺杂技术, 以降低栅极诱导漏极漏电效应; 在材料上引入了多元半导体材料、应变硅、锗硅、高 k 栅介质、金属栅极等, 以降低器件功耗; 在结构上引入了三维FinFET结构, 以增强栅的控制能力. 这种趋于物理极限的工艺特点、新材料和新结构的采用产生了许多新的辐射效应现象和机制, 模拟试验技术更加复杂, 给抗辐射加固技术研究带来了新的挑战. 本文综述了纳米器件辐射效应的研究现状和趋势, 重点针对28 nm及以下特征工艺纳米器件辐射效应研究及模拟试验的需求, 提出了需要研究的科学问题和关键技术, 希望能为纳米器件抗辐射加固与空间应用提供参考.

关键词 纳米器件, 空间辐射效应, 抗辐射加固, 模拟试验

电子器件空间辐射效应是影响航天器在轨长期可靠运行的重要因素之一. 航天器工作在空间辐射环境中, 不可避免会受到来自银河宇宙射线、太阳宇宙射线和地球辐射带的质子、重离子、电子等粒子的作用, 产生单粒子效应、总剂量效应等空间辐射效应, 从而引起器件性能退化, 甚至功能失效, 严重影响航天器寿命及在轨长期稳定运行. 据统计, 因各类辐射

效应引起的航天器故障占总故障的45%左右^[1,2], 居航天器各类故障之首. 长期以来, 辐射效应机理和抗辐射加固技术研究一直是航天大国和核大国研究的热点和难点问题.

未来航天器功能和性能要求越来越高, 对高可靠、高集成度、高性能、低功耗电子器件提出了强烈的需求. 2014年6月, 《国家集成电路产业发展推进纲

引用格式: 陈伟, 刘杰, 马晓华, 等. 纳米器件空间辐射效应机理和模拟试验技术研究进展. 科学通报, 2018, 63: 1211–1222

Chen W, Liu J, Ma X H, et al. Research progress of radiation effects mechanisms and experimental techniques in nano-devices (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1211–1222, doi: 10.1360/N972017-00771

要》中明确提出,到2015年32/28 nm制造工艺实现规模量产;到2020年16/14 nm制造工艺实现规模量产.综合考虑我国集成电路产业发展目标、制造能力现状以及抗辐射加固工艺滞后于商用工艺2~3代的发展趋势,认为28 nm及以下工艺是我国未来宇航用电子器件发展的重要技术节点.未来航天器采用更高性能的先进纳米器件是必然趋势.

电子器件特征尺寸进入28 nm及以下后,在材料、工艺和结构等方面表现出许多不同于亚微米、超深亚微米器件的特点.沟道长度缩小至几十个纳米,栅氧化层等效厚度小于1 nm.在工艺上引入了纵向逆掺杂阱或横向晕环掺杂技术,以降低栅极诱导漏极漏电效应;在材料上引入了多元半导体材料、高 k 栅介质、金属栅极等^[3-5],以降低器件漏电及功耗;引入了FinFET、U型沟道等新型三维器件结构,以增强栅的控制能力^[6].这些变化对器件的辐射效应及抗辐射加固技术研究带来了新的挑战^[7],主要表现在以下3方面.

(1) 出现了新的辐射效应规律和损伤机理.器件特征尺寸减小后,单粒子瞬态SET (single-event transient, SET)脉冲与器件时钟宽度相当,SET脉冲俘获概率增加,SET引起的软错误率将超过单粒子翻转效应(single-event upset, SEU),成为单粒子软错误的主要来源;先进纳米电路集成度急剧提高,辐射导致的相邻器件单元间电荷共享显著增强,多位翻转效应(multiple bit upsets, MBU)危害突显;HfO₂等高 k 栅介质材料、新型沟道材料的使用,可靠性退化机制更为复杂,且在辐射、电、热等多应力的耦合作用下,器件可靠性有恶化的趋势^[8-10].单粒子效应和辐射引起的可靠性退化已逐步成为先进纳米电路辐射效应研究的主要问题.

(2) 辐射效应试验技术更加复杂.纳米电路工作频率可达4 GHz甚至更高,核心工作电压低至0.8 V左右,管脚数量可达2000个以上,芯片内单元数量更是达到亿量级,复杂电路的拓扑结构、时序关系、逻辑屏蔽、时钟屏蔽、反馈恢复等因素^[6-9]综合作用,导致纳米电路辐射效应表征与可测性难度增大,辐射效应试验测量精度、定时精度与定位精度要求更高.当前的辐射效应试验技术难以满足先进纳米器件机理及加固技术研究对试验数据的需求.

(3) 原有加固技术的适用性面临严峻挑战.纳米器件及电路辐射效应损伤机理的变化导致原有抗辐

射加固方法有效性降低,效费比下降.例如,纳米电路MBU严重,给现有的数字编码技术(error detection and correction, EDAC)等带来了严峻挑战,原有高效的纠一检二技术已不能满足纳米电路单粒子效应加固要求;因电荷共享效应,双互锁存储单元(dual interlocked storage cell, DICE)加固技术效费比急剧下降,已不适用于先进纳米电路的加固设计;因多SET效应存在,传统的三模冗余(triple module redundancy, TMR)加固技术有效性也有待进一步评估.这些挑战要求必须加快纳米电路抗辐射加固新技术研究.

本文在深入调研国内外研究内容的基础上,分析了纳米器件辐射效应研究现状和趋势,重点针对28 nm及以下特征工艺纳米器件辐射效应研究及模拟试验的需求,提出了需要研究的科学问题和关键技术,希望能为纳米器件抗空间辐射加固提供参考.

1 国内外研究现状与发展动态分析

当今主流电子器件的特征尺寸已经达到28 nm及以下(图1),业界领跑者Intel公司更是将微处理器的竞争点推向10 nm甚至更低(<http://www.itrs.net/>),相关的纳米器件辐射效应研究工作已经展开^[11],预计到2020年,纳米器件的抗辐射性能将成为制约先进高端器件在航天领域应用的最主要因素.为此,美国国防威胁降低局(Defense Threat Reduction Agency, DTRA)先后资助了“超深亚微米CMOS器件的辐射效应和抗辐射加固”(<http://radhome.gsfc.nasa.gov/>)和“纳米级器件的辐射效应和抗辐射加固”(<http://www.acq.osd.mil/>)研究计划,以BAE systems和Honeywell的纳米工艺开展辐射效应机理和加固技术研究.美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)电子器件和封装项目(NASA electronic parts and packaging, NEPP)“极端条件下的抗辐射电子学”(<https://nepp.nasa.gov/>)、美国空军科学研究办公室资助的“大学多学科前沿计划”(multi-disciplinary university initiative, MURI)^[12],都将纳米器件工艺和新结构变化带来的辐射效应问题作为其重要研究内容.欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也针对纳米器件辐射效应开展了相关研究.近几年业内著名的电子器件辐射效应国际学术研讨会NSREC(nuclear and space radiation effects conference)和RADECS(radiation and its effects on components and systems)会议,近1/3的论文都与纳米

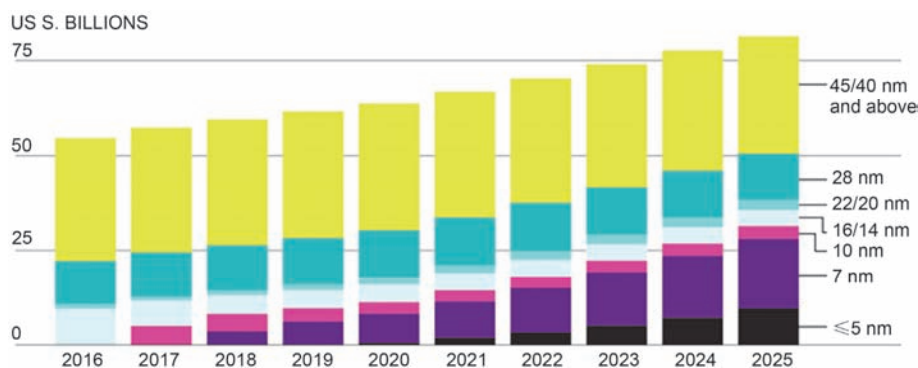


图1 半导体市场发展趋势(<https://spectrum.ieee.org/>)

Figure 1 The evolving semiconductor market (<https://spectrum.ieee.org/>)

器件辐射效应机理、试验和加固技术(<http://ieeennps.org/wp-content/uploads/2014/03/2016-NSREC.pdf>)相关。总体来看,国外关于纳米器件辐射效应研究工作主要集中在65/45 nm工艺节点上,28 nm及以下特征工艺先进纳米器件辐射效应研究工作正在进行。

我国非常重视电子器件辐射效应研究。以中国科学院、航天集团、电科集团、中国工程物理研究院、多所高校为代表的科研院所在电子器件辐射效应方面取得了丰富的研究成果。整体上讲,纳米器件辐射效应机理及设计加固技术研究工作同样集中在65 nm节点上,对于28 nm及以下工艺器件辐射效应机理及试验技术研究刚刚起步。

为此,抗辐射加固技术专业组组织了多次专题研讨会,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,国内相关领域的专家学者一致认为:先进纳米器件在航天领域应用需求迫切,急需开展纳米器件辐射效应机理及模拟试验关键技术研究,解决抗辐射加固面临的关键基础科学问题^[7]。

下面从纳米器件材料、纳米器件及纳米电路3个层面,对辐射效应研究现状及发展动态进行综述。

1.1 纳米器件材料辐射损伤研究现状与发展动态

材料是纳米器件和电路的基础,其辐射损伤直接影响器件和电路的抗辐射性能。粒子与器件材料相互作用产生电荷及缺陷,电荷输运及缺陷演化是辐射效应研究的基础,主要研究内容涉及电离径迹的时空分布、缺陷的演化过程以及微观损伤与宏观电学表征的关联。

荷能粒子与材料的电离能量损失过程是粒子电离径迹时空分布研究的重点。最具代表性的是Raine等人^[13,14]研究认为,单粒子效应的决定因素是电离电荷的空间分布,不是沉积电荷的总量。随着半导体Si薄膜厚度减小,离子在其中沉积能量的相对歧离增加,当Si的厚度减小到5 nm时,歧离可达47%^[15]。也就是说,当前采用的基于线性能量转移(linear energy transfer, LET)值单粒子效应试验方法和基于柱形电离径迹模型^[16]的单粒子效应仿真方法,得到的电荷空间分布结果过于粗糙,给后续单粒子效应研究引入较大误差。

中高能重离子通过强电子激发效应在纳米器件材料中引入结构损伤(也称缺陷)。对于缺陷的演化,当前国际上主流的“非弹性热峰模型”认为^[17-20],离子通过电子-声子耦合作用将沉积的能量转移给靶原子,使沿入射离子路径局部区域材料熔化并快速冷却导致永久性结构损伤,形成潜径迹。材料的热导率、熔点等热力学参数及电子-声子耦合系数是影响重离子在材料中结构损伤程度的重要因素。例如,因为热力学参数及电子-声子耦合系数的不同,使得重离子在晶态和非晶态SiO₂材料中产生结构损伤的电子能损阈值完全不同^[21]。从“非弹性热峰模型”的角度预测^[21],对于新型纳米器件中只有几个纳米厚度的SiO₂、HfO₂等材料来说,小尺寸效应将导致这些栅氧化层热力学参数、电子-声子耦合参数等发生显著变化。但对于新型材料的强电子激发效应和“非弹性热峰模型”研究报道很少。对于低能重离子在纳米器件材料中引起的结构损伤,则是经过最初的靶原子核级联碰撞、热峰阶段、缺陷复合和迁移阶段后稳定的缺陷团。这种低能重离子在器件材料中引起的辐

射效应被称为“位移损伤效应”^[22]。

重离子辐照对纳米器件材料的电学特性有较大影响^[23~28]。Conley等人^[28]研究认为纳米级SiO₂薄膜软击穿特性依赖于辐照时的栅极电压。Massengill等人^[29]研究认为高 k 介电材料的重离子硬击穿电压高于超薄SiO₂。Quinteros等人^[30]和Singh等人^[31,32]的实验证明了重离子辐照可导致Al/HfO₂/Si电容 C - V 特性曲线变化,漏电流增大了两个数量级。以上研究从实验现象的角度表明,粒子辐照导致材料损伤将引起器件电学特性变化,但未阐明粒子辐照微观结构变化对纳米器件材料宏观电学特性的影响机制。

近年来,国内多家单位开展了大量深亚微米和纳米器件辐照效应的计算机模拟和实验研究工作^[33~36],取得了许多成果。但主要集中在器件对辐射的响应方面,涉及的器件特征尺寸大多为65 nm及以上。

综上所述,小尺寸效应造成传统块体材料中电离能损的计算模型不适用于纳米器件材料,纳米器件材料的物理参数,包括电导率、热导率、电子-声子耦合系数等,不再是材料的本征特性,而是随材料的尺寸发生变化。如何实现纳米尺度局域化的电离产额精准计算,准确分析材料微观损伤的演化过程及其对宏观电学表征的影响是先进纳米器件辐射效应必须解决的基础问题。

1.2 新结构、新工艺纳米器件辐射效应研究现状与发展动态

器件是在材料基础上组成电路的最基本元件。当特征尺寸进入28 nm及以下工艺后,基于新型纳米器件材料,形成了多种新型纳米器件结构,包括超薄体SOI^[37]、三维FinFET器件^[38]、U形沟道器件^[39]、新型高 k 栅介质器件^[40]、非硅沟道器件^[6]等。这些新结构器件的辐射损伤机制与材料辐射损伤表征、辐射感生电荷及缺陷的收集与演化过程密切关联,由于影响因素多、研究手段有限,一直是国内外辐射效应研究的热点和难点。下面从辐射引起的纳米器件可靠性退化机制与单粒子效应两个方面,分析研究现状与发展趋势。

(i) 辐射引起的新型纳米器件可靠性退化机制研究。现有研究表明,累积辐射效应会在器件内部栅介质、栅介质/沟道界面等关键部位引入缺陷,进而影响器件的可靠性。在这个过程中,器件内部电

场扮演着重要角色^[41]。器件结构是器件内部电场的最主要决定因素之一。因此,器件累积辐射效应对可靠性的影响研究主要着眼于器件栅介质、沟道材料和几何结构3个方面。对此,国内外多个研究机构均开展了相关研究,如Sandia National Laboratories、Vanderbilt University、西北核技术研究所、西安电子科技大学、北京微电子技术研究所、中国科学院新疆理化研究所等。

高 k 栅介质是器件特征尺寸缩小至45 nm后用于替换SiO₂层的新型栅介质层。从20世纪90年代开始高 k 栅介质的研究,直到2005年之后才有高 k 栅介质纳米器件累积辐射效应见诸报道。其中有代表性的是Kulkarni等人^[42]发现随电离总剂量的累积,因泄电流增加导致TiN/TaN/HfO₂为栅介质的pMOSFETs开关电流比(I_{on}/I_{off})不断下降。该结论是针对实验现象的总结,未给出此过程中栅氧介质缺陷的损伤类型、能级、演化过程等微观机理。

寻找新型高迁移率沟道材料以提升CMOS性能是一个重要发展方向^[43,44]。GeSn具有很高的空穴迁移率,是新型纳米器件最有潜力的沟道材料之一^[45]。西安电子科技大学在GeSn高迁移率沟道MOSFET研究中提出国际领先水平的无掺杂量子阱沟道结构^[45,46],但对其辐射效应研究国内外尚属空白。此外,北京微电子技术研究所对Ge沟pMOSFET在不同偏压下的总剂量效应进行了研究^[47],发现只有在负偏压条件下才能观察到明显的阈值电压和跨导漂移,原因归结于负偏置条件造成的不稳定性,但对这种不稳定性与新沟道材料辐射损伤之间的联系未作深入分析。

FinFET为代表的新型器件结构已被认为是28 nm及以下尺寸纳米器件的主流技术之一^[22,48]。FinFET器件是立体结构器件,相对于平面器件其电场分布更为复杂,辐射引起的可靠性退化问题受到国内外研究人员的重点关注^[49,50],不同结构FinFET总剂量辐射响应如图2所示^[51]。Chatterjee等人^[52]研究认为Fin的宽度决定器件累积辐射效应与单栅和多栅器件的等效,Fin的间距决定所导致的累积辐射退化程度,Fin的长度越短辐射损伤越严重。从该结论推测,可能存在优化的FinFET结构参数,但文中并未给出分析建议。

综上所述,针对新型纳米器件累积辐射导致的可靠性研究,器件栅介质、沟道材料累积辐射损伤的

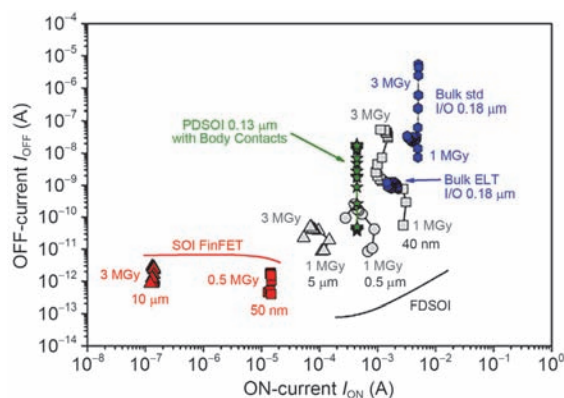


图2 不同CMOS工艺的总剂量辐射响应^[52]

Figure 2 The TID characteristics of different CMOS technologies^[52]

微观机理尚不明确, 尤其对于多应力耦合条件下纳米器件辐射相关的长期可靠性退化研究尚属空白。

(ii) 纳米器件单粒子效应电荷收集机制. 电荷收集机制是解释单粒子效应的基础理论. 国内外在单粒子效应电荷收集机制方面提出了多种模型, 如漏斗效应、雪崩倍增模型、电荷横向迁移模型、粒子分流模型、电荷共享、双极放大、源漏穿通等. 当器件特征尺寸进入28 nm及以下工艺后, 部分电荷收集模型因成立条件发生变化而不再适用, 新的电荷收集机制与器件结构的耦合性增强. FinFET是28 nm以下工艺的典型三维器件结构, 其电荷收集机制研究是国内外研究的热点。

El-Mamouni等人^[53]利用单光子吸收激光微束研究了SOI工艺和体硅工艺FinFET器件的瞬态电流, 认为漏结尺寸、衬底厚度、鳍的宽度等结构参数会对瞬态电流形状及幅度产生影响, 表明单粒子电荷收集机制及敏感性与器件结构相关。

由于纳米器件沟道长度变短, 重离子极易导致源漏穿通现象, El-Mamouni等人^[54]的体硅FinFET激光微束实验表明不同源漏结构下, 因源漏穿通效应导致的收集电荷量也存在明显的差异, 即不同器件结构相同电荷收集机制的贡献程度并不一致。

Nsengiyumva等人^[55]研究显示, 相对于平面体硅工艺, 体硅FinFET单元电路在低LET值时抗单粒子翻转能力有了明显改善, 而在高LET值时没有太大差异, 认为不同LET时FinFET单粒子效应电荷收集机制和影响范围有所不同, 表明不同结构纳米器件在不同LET下其单粒子敏感性将发生变化^[56]。

Kaupila^[57]利用TCAD仿真手段计算了重离子入

射16 nm FinFET产生过剩载流子被收集后形成的瞬态电流脉冲, FinFET特有的立体结构导致产生的单粒子瞬态脉冲与重离子倾斜入射时的方位角之间表现出很强的相关性, 表明对于立体结构器件仅考虑单一实验条件时不足以准确评价器件抗单粒子性能。

2012年以来, 国防科技大学^[58]、空军工程大学^[59]、西安电子科技大学^[60]、西安交通大学^[61]等单位针对体硅FinFET、SOI FinFET开展了初步的单粒子效应仿真研究, 在电荷收集机理研究方面尚处于起步阶段。

综上所述, 当前针对新型纳米器件单粒子效应电荷收集机制研究, 主要集中在寻找敏感结构参数, 探索与器件响应之间的关联性, 尚不能支撑新型纳米器件加固设计需求. 如何利用有效的试验手段及可信的数值仿真技术, 建立敏感结构参数与电荷收集机制的映射关系, 以此为基础推进新型纳米器件结构优化设计是未来发展的方向。

1.3 纳米电路单粒子敏感性分析和加固技术研究现状与发展动态

统计表明, 航天器在轨由辐射环境引起的异常主要由集成电路的单粒子效应导致^[1], 单粒子效应成为影响纳米电路应用的最重要的问题之一. 近年来, 美国Vanderbilt大学、Boeing公司、Robust Chip公司、Intel公司、欧洲的ONERA公司、ST公司, 我国的北京微电子技术研究所、复旦大学、国防科技大学等单位针对纳米电路开展了单粒子敏感性分析和加固技术的研究工作。

在纳米电路单粒子效应失效模式方面, 法国ONERA公司的Inguibert等人^[62]研究表明, 引发纳米电路软错误所需的电荷降低, 32 nm工艺纳米电路的临界电荷已经低到0.4fC, 折合约2500个电子; ST公司通过试验研究发现, 当入射粒子LET值大于10 MeV·cm²/mg时, 单个粒子造成45 nm SRAM多位翻转超过了单位翻转, 成为SEU的主要表现形式^[63]; 纳米电路的SET错误脉冲宽度接近正常信号, SET在逻辑路径上更容易无衰减传播, 也更容易被时序单元或存储单元所捕获, 并由此产生数据或控制错误^[64-66], Boeing公司和北京微电子技术研究所人员均发现^[64,65], SET已经超过SEU成为纳米电路软错误的主要来源. 针对单粒子多节点翻转(multiple node upset, MNU)、多单元翻转(multiple cell upset, MCU)

和多位翻转(multiple bit upset, MBU)的加固以及SET的加固成为国内外研究的重点。

在纳米电路单粒子加固方面, Lilja等人^[67]发现传统的空间冗余结构受到电荷共享影响开始逐渐失效, 他们提出利用异相节点之间的电荷共享对28 nm D触发器进行SEU加固, 有效减小了单粒子对多敏感节点的影响, 同时取得了较好的加固效果。2013年, 北京微电子技术研究所提出了一种基于冗余延迟滤波的SET加固结构, 结合双互锁存储结构, 使65 nm触发器电路实现了对SEU和SET的双重加固, 具有很高的抗软错误能力^[63, 65]。然而, 对于28 nm及以下集成电路, SET宽度与电路时钟周期的比值变得更大, 采用这种滤波的方法将导致电路难以接受的性能开销。近年来, 通过版图设计来减小SET脉冲宽度的方法逐渐得到重视, Ahlbin等人^[68]发现, 采用不同版图结构的单元受同样条件的粒子轰击后, 产生的SET脉宽发生了很大不同, Lilja等人^[67]和北京微电子技术研究所Yue等人^[69]的研究均发现, 有效增加异相节点的电荷共享, 减小同相节点的电荷共享将有利于SET脉冲宽度的减小, 使通过电路设计途径进行单粒子加固变得容易。因此, 版图和电路技术相结合解决纳米电路SET问题将成为必然趋势。

在纳米电路单粒子效应加固方法有效性方面, 纳米电路的单粒子软错误机制复杂, 来源众多, 全面进行加固将使电路开销过大, 需要以薄弱环节和关键路径分析为基础, 针对贡献最大的错误源进行优先加固^[69]。北京微电子技术研究所基于65 nm触发器链, 研究了数据、时钟、置复位引起单粒子软错误的相对贡献^[64], 该研究可为敏感路径的分析和选择性加固提供指导。

从总体上看, 国内外尚缺乏新型纳米电路单粒子效应加固解决方案。如何综合考虑抗辐射、性能、功耗和面积等因素, 形成高效低代价的纳米电路单粒子效应加固方法是国内外纳米器件加固技术研究的必然选择。

2 需要解决的科学问题

通过调研总结国内外纳米器件辐射效应机理和模拟试验技术研究现状, 综合考虑未来航天器发展需求, 下面重点针对28 nm及以下工艺纳米器件, 从材料、器件、电路3个层面, 提出纳米器件辐射效应机理研究面临的关键科学问题。

2.1 粒子与新型纳米器件材料作用的微观机制

粒子与新型纳米器件材料相互作用, 从时间关系上分, 存在累积辐射效应与瞬时辐射效应。累积辐射效应与辐射产生的缺陷密切相关, 包含位移损伤缺陷、陷阱电荷、界面态等类型, 对器件及电路的功能及性能退化产生影响。瞬时辐射效应与辐射产生的载流子密切相关, 这些载流子的时间及空间分布对器件及电路的电荷收集过程产生影响。

(i) 离子与纳米器件材料相互作用机制以及电荷产物的时空分布特性。28 nm及以下工艺器件中, 离子在器件材料中的电离径迹结构横向尺寸远大于晶体管的尺寸, 相近的处于电离径迹不同位置的晶体管中沉积的能量将受到单个离子电离径迹结构的影响。在敏感体积中传统的能量沉积为LET与路径的乘积, 这种概念已不再适用, 需要从能损的角度考虑能量沉积的路径微分量, 发展新的能量沉积模型。现有的单粒子效应仿真所用的空间电荷模拟采用的也是以LET值为参数的指数分布模型, 该模型没有考虑离子种类、能量对电离径迹的影响, 在28 nm以下工艺器件中不再适用, 需要结合纳米器件材料中电离径迹的研究成果, 改善和发展适用于纳米器件单粒子效应仿真研究的物理模型。

(ii) 粒子引起的微观损伤演化过程以及与材料电学特性表征之间的内在关联性。器件特征尺寸减小到28 nm以后, 小尺度效应将导致器件材料比表面积显著增大, 器件内多层膜结构的存在也将形成更加复杂的界面, 以往块体材料的缺陷产生及时空演化规律将不再适用。如辐射引起SiO₂/Si界面Si量子点的产生(图3), 进而形成量子点接触, 在纳米介电薄膜材料中形成稳定的漏电通道; 中高能离子辐照引起介电材料与半导体的界面发生原子杂化混合, 导致栅极整体的等效氧化物厚度大幅减小, 以往对器件电学特性影响不大的“界面混合效应”将变得不可忽视。通过对粒子辐照在纳米器件材料中引入缺陷、微观损伤、结构变化的演化过程以及与材料电学特性之间的相关性进行系统的研究, 可以帮助我们深入地理解28 nm及以下工艺器件辐照效应的物理机制。

2.2 辐射导致的纳米器件电荷收集和可靠性退化机制

先进纳米器件主要面临两个方面的辐射效应威胁, 一是因器件工艺变化引入的新材料新结构对累

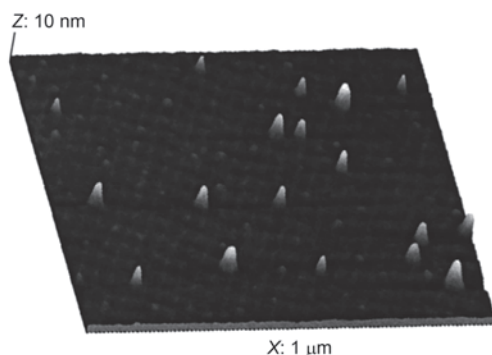


图3 210 MeV Au离子辐照引起SiO₂/Si界面处Si纳米晶粒的形成^[70]

Figure 3 The formation of Si nano grains at the SiO₂/Si interface with 210 MeV Au ion irradiation^[70]

积辐射损伤更为敏感,导致器件在辐射条件下可靠性下降;二是因器件结构变化引起的电荷收集机制变化,导致器件对单粒子效应更加敏感。

(i) 累积辐射应力下的纳米器件可靠性退化机制。在累积辐射条件下,新型纳米器件超薄栅介质、栅介质/沟道界面等关键部位引入缺陷,进而导致器件阈值电压漂移、表面漏电流增加、沟道迁移率退化等一系列问题,该过程与器件内部电场密切相关。器件结构是内部电场分布的最主要决定因素之一,如Fin的宽度决定器件累积辐射效应与单栅和多栅器件的等效,Fin的间距决定所导致的累积辐射退化程度等;累积辐射应力耦合电应力、温度应力等,在器件中引入缺陷的位置、类型、能级等都会发生明显变化,不同缺陷与电应力、温度应力造成的热电子、热空穴间相互耦合,可靠性退化机制极为复杂,未见相关研究成果报道。

(ii) 几何结构、应力分布、寄生效应等综合作用下的单粒子效应电荷收集机制。器件特征尺寸减小到28 nm以后,三维FinFET和U型沟道器件在工艺、结构上的改变带来了沟道区域电场分布和载流子迁移率的变化,进而对辐射产生的电荷收集、器件响应等过程产生影响。同时,由器件几何形状、应力分布变化所带来的寄生效应也将影响器件的单粒子效应敏感性。而纳米尺度下器件单粒子效应电荷收集涉及电荷共享、源漏穿通等多种物理机制,多种因素和多种机制综合作用,将对不同结构器件单粒子效应电荷收集产生复杂的作用模式,见图4。纳米尺度下,器件特征尺寸已经可以与载流子的平均自由程相比拟,且反型层电荷分布表现出二维电子气的特性,基于TCAD仿真揭示器件电荷收集机制时,需考

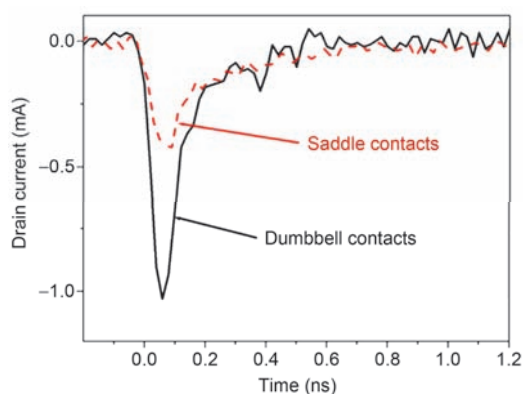


图4 不同几何结构FinFET单粒子瞬态响应波形^[54]

Figure 4 Single event transient response of different geometries FinFET^[54]

虑量子力学限制效应,对原有经典模型进行量子修正,对载流子浓度引入额外的电势表征量,并基于密度梯度理论对电势表征量进行定义。

2.3 单粒子瞬态在纳米电路中传播规律和防护机制

纳米电路的单粒子效应是制约其空间应用的主要因素,针对先进纳米电路的高速高集成度的特点,单粒子瞬态是28 nm及以下工艺纳米电路软错误的主要来源。

(i) 纳米电路中单粒子效应时空动态特性与电路自身时空特性的耦合。对于纳米电路,单粒子效应的时间和空间特性和电路本身的时间和空间特性都发生了变化。单粒子电荷及其产生的电势波动会对电路中的多个器件产生影响,表现在宏观上,就是对电路的多个功能节点造成干扰;电路的响应速度与电荷的产生和消散速度可比拟,甚至更快,单个SET可对多级逻辑的多个过程(如保持、上升、下降)产生影响。典型单粒子脉宽检测电路如图5(a)所示,获取纳米电路中单粒子电荷的空间分布及其随时间的动态变化规律,不仅要考虑单粒子效应空间特性的复杂微观变化过程(图5(b)),而且要考虑在变化的复杂灵敏体和变化的电场条件下,在单粒子特性与电特性互相耦合作用下,单粒子电荷如何产生、漂移、扩散、复合,能否触发及如何触发其他寄生效应,并解释在宏观上电路各节点受单粒子攻击后电压、电流的变化规律。

(ii) 单粒子瞬态在纳米电路中传播的规律和电路多目标加固策略。纳米电路软错误来源众多且机

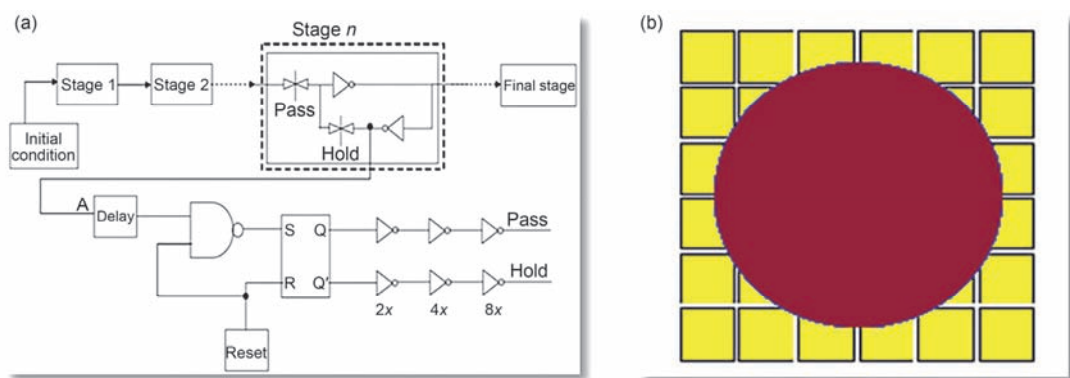


图5 高分辨率片上脉宽检测电路检测单粒子空间和时间特性: (a) 高分辨率片上脉宽检测电路; (b) 离子径迹空间影响范围

Figure 5 Single event spatial and temporal characteristics detected with pulse width detection circuits. (a) High resolution on-chip pulse width detection circuit; (b) spatial influence range of ion track

制复杂, 对所有软错误来源进行全面加固几乎不可实现, 必须分析敏感路径并进行选择性加固, 而掌握SET在电路中的传播规律是进行敏感路径识别的关键. 28 nm及以下工艺纳米器件响应速度更快、密度更高, SET在传播过程中可能同时受到展宽、猝熄和掩蔽等效应影响, 还可能出现不同逻辑路径上多SET重聚等新的效应形式, 这些效应互相纠缠, 将使纳米电路SET的传播机理及基于此的敏感路径分析非常复杂, 见图6. 当前, 基于单粒子敏感路径分析, 仅能做单一因素变化的定性分析, 为实现纳米电路速度、面积功耗和抗单粒子能力的综合优化, 必须综合考虑多种因素, 提出多目标设计模型和优化品质因子, 定量地指导电路抗单粒子加固设计.

3 结论

空间技术的飞速发展对28 nm及以下特征尺寸器件抗辐射加固技术提出了迫切的需求, 先进纳米器件给辐射效应机理和试验技术带来许多新的挑战. 需要深入研究纳米器件材料、结构和电路辐射效应机制, 重点开展纳米器件的质子、重离子辐射效应机理与试验技术研究, 揭示纳米器件材料及器件辐射损伤微观机制和损伤机理, 建立纳米器件及电路敏感区域分布和薄弱环节分析的重离子微束模拟试验方法, 提出纳米器件和电路抗辐射加固设计新方法, 解决纳米器件空间辐射效应和抗辐射加固面临的关键科学问题, 为航天器长期在轨可靠运行提供技术支撑.

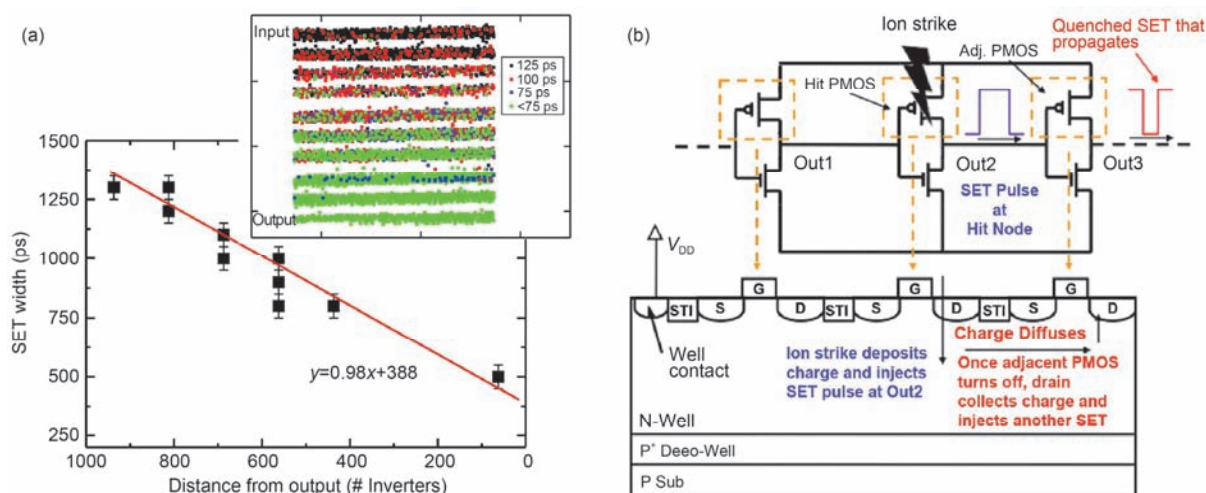


图6 SET在传播中导致脉宽变化的两种效应^[69,71]. (a) 脉冲展宽效应; (b) 脉冲猝熄效应

Figure 6 Two effects of pulse width change induced by propagation of SET^[69,71]. (a) Pulse broadening; (b) pulse quenching

参考文献

- 1 Ecoffet R. On-Orbit Anomalies: Investigations and Root Cause Determination. In: IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. Las Vegas, 2011
- 2 GassV, Belloni F. Use of COTS components in academic space projects. In: Proceedings of Swiss Electromagnetics Research and Engineering Centre. Dubendorf, 2013
- 3 Barraud S, Lavieville R, Tabone C, et al. Strained silicon directly on insulator N- and P-FET nanowire transistors. In: Proceedings of 15th International Conference on Ultimate Integration on Silicon (ULIS). Stockholm: IEEE, 2014
- 4 Lee W D, Wang M C, Wang S J, et al. Gate leakage characteristics for 28 nm HfZrO_x pMOSFETs after DPN process treatment with different nitrogen concentration. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 42: 3703–3705
- 5 Hsu C Y, Chang H G, Chen M J. A method of extracting metal gate high-*k* material parameters featuring electron gate tunneling current transition. IEEE Trans Electron Devices, 2011, 58: 953–959
- 6 Duriez B, Vellianitis G, Van Dal M J H, et al. Scaled p-channel Ge FinFET with optimized gate stack and record performance integrated on 300 nm Si wafers. In: Proceedings of IEEE International on Electron Devices Meeting. Washington: IEEE, 2013
- 7 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 [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]
- 8 Choi B K, Fleetwood D M, Schrimpf R D, et al. Long-term reliability degradation of ultra thin dielectric films due to heavy-ion irradiation. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 49: 3045–3050
- 9 Cester A, Gerardin S, Paccagnella A, et al. Electrical stresses on ultra-thin gate oxide SOI MOSFETs after irradiation. IEEE Trans Nucl Sci, 2005, 52: 2252–2258
- 10 Haeffner T D, Loveless T D, Zhang E X, et al. Irradiation and temperature effects for a 32 nm RF silicon-on-insulator CMOS process. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61: 3037–3042
- 11 Narasimham B, Hatami S, Anvar A, et al. Bias dependence of single-event upsets in 16 nm FinFET D-flip-flops, IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62: 2578–2584
- 12 Witt G L. Semiconductor Radiation Physics: From Defects to Devices. April. 2005.
- 13 Raine M, Hubert G, Gaillardin M, et al. Monte Carlo prediction of heavy ion induced MBU sensitivity for SOI SRAMs using radial ionization profile. IEEE Trans Nucl Sci, 2011, 58: 2607–2613
- 14 Raine M, Hubert G, Gaillardin M, 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
- 15 Zhang Z, Liu J, Hou M, et al. Large energy-loss straggling of swift heavy ions in ultra-thin active silicon layers. Chin Phys B, 2013, 22: 096103
- 16 Hubert G, Duzellier S, Inguibert C, et al. Operational SER calculations on the SCA-C orbit using the multi-scales single event phenomena predictive platform (MUSCA SEP3). IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 3032–3042
- 17 Ridgway M C, Bierschenk T, Giulian R, et al. Tracks and voids in amorphous Ge induced by swift heavy-ion irradiation. Phys Rev Lett, 2013, 110: 245502
- 18 Lan C, Xue J, Wang Y, et al. Molecular dynamics simulation of latent track formation in α -quartz. Chin Phys C, 2013, 37: 038201
- 19 Kluth P, Schnohr C S, Pakarinen O H, et al. Fine structure in swift heavy ion tracks in amorphous SiO₂. Phys Rev Lett, 2008, 101: 175503
- 20 Pakarinen O H, Djurabekova F, Nordlund K, et al. Molecular dynamics simulations of the structure of latent tracks in quartz and amorphous SiO₂. Nucl Instr Meth Phys Res B, 2009, 267: 1456–1459
- 21 Toulemonde M, Trautmann C, Balanzat E, et al. Track formation and fabrication of nanostructures with MeV-ion beams. Nucl Instr Meth Phys Res Sect B, 2004, 216: 1–8
- 22 Simoen E, Gaillardin M, Paillet P, et al. Radiation effects in advanced multiple gate and silicon-on-insulator transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 2013, 60: 1970–1991
- 23 Liu J, Neumann R, Trautmann C, et al. Tracks of swift heavy ions in graphite studied by scanning tunneling microscopy. Phys Rev B, 2001, 64: 184115
- 24 Zhai P, Liu J, Zeng J, et al. Evidence for re-crystallization process in the irradiated graphite with heavy ions obtained by Raman spectroscopy. Carbon, 2016, 101: 22–27
- 25 Zeng J, Liu J, Yao H J, et al. Comparative study of irradiation effects in graphite and graphene induced by swift heavy ions and highly charged ions. Carbon, 2016, 100: 16–26

- 26 Guo H, Sun Y, Zhai P, et al. Resonant Raman spectroscopy study of swift heavy ion irradiated MoS₂. Nucl Instr Meth Phys Res Sect B, 2016, 381: 1–5
- 27 Hu P, Liu J, Zhang S, et al. Raman investigation of lattice defects and stress induced in InP and GaN films by swift heavy ion irradiation. Nucl Instr Meth Phys Res Sect B, 2016, 372: 29–37
- 28 Conley J F, Suehle J S, Johnston A H, et al. Heavy-ion-induced soft breakdown of thin gate oxides. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48: 1913–1916
- 29 Massengill L W, Choi B K, Fleetwood D M, et al. Heavy-ion-induced breakdown in ultra-thin gate oxides and high-k dielectrics. IEEE Trans Nucl Sci, 2001, 48: 1904–1912
- 30 Quinteros C P, Salomone L S, Redin E, et al. Comparative analysis of MIS capacitive structures with high-k dielectrics under gamma, ¹⁶O and p radiation. IEEE Trans Nucl Sci, 2002, 59: 767–772
- 31 Singh V, Shashank N, Kumar D, et al. Effects of heavy-ion irradiation on the electrical properties of rf-sputtered HfO₂ thin films for advanced CMOS devices. Radiat Eff Defect S, 2012, 167: 204
- 32 Singh V, Shashank N, Kumar D, et al. Investigation of the interface trap density and series resistance of a high-k HfO₂-based MOS capacitor: Before and after 50 MeV Li³⁺ ion irradiation. Radiat Eff Defect S, 2011, 166: 80
- 33 Zhang Z G, Liu J, Hou M, et al. Investigation of threshold ion range for accurate single event upset measurements in both SOI and bulk technologies. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61: 1459–1467
- 34 Liu B, Liu F. TCAD simulation study of the single-event effects in silicon nano-wire transistors. IEEE Trans Device Mater Reliab, 2015, 15: 410–416
- 35 Yu Q Z, Hu Z L, Ying W, et al. Simulation of single event upset in semiconductor device induced by high energy neutrons (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 479–485 [于全芝, 胡志良, 殷雯, 等. 高能中子诱发半导体器件产生单粒子翻转的模拟计算. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 479–485]
- 36 Li P, Guo H, Guo Q, et al. Single-event response of the SiGe HBT in TCAD simulations and laser microbeam experiment. Chin Phys B, 2015, 24: 088502
- 37 Schwank J R, Ferlet-Cavrois V, Shaneyfelt M R, et al. Radiation effects in SOI technologies. IEEE Trans Nucl Sci, 2003, 50: 522–538
- 38 Lindert N, Chang L, Choi Y K, et al. Sub-60-nm quasi-planar FinFETs fabricated using a simplified process. IEEE Electron Device Lett, 2001, 22: 487–489
- 39 Wang W, Wang P F, Zhang C M, et al. Design of U-shape channel tunnel FETs with SiGe source region. IEEE Trans Electron Devices, 2014, 61: 193–197
- 40 Ohmi S, Kudoh S, Atthi N. Variability improvement by Si surface flattening of electrical characteristics in MOSFETs with high-k HfON gate insulator. IEEE Trans Semicond Manuf, 2015, 28: 266–271
- 41 Schwank J R, Shaneyfelt M R, Fleetwood D M. Radiation effects in MOS oxides. IEEE Trans Nucl Sci, 2008, 55: 1833–1853
- 42 Kulkarni S R, Schrimpf R D, Galloway K F, et al. Total ionizing dose effects on GepMOSFETs with high-k gate stack: On/off current ratio. IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 1926–1930
- 43 Cardoso A S, Chakraborty P S, Karaulac N. Single-event transient and total dose response of precision voltage reference circuits designed in a 90-nm SiGeBiCMOS technology. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61: 3210–3217
- 44 Francis S A, Zhang C X, Zhang E X, et al. Comparison of charge pumping and 1/f noise in irradiated Ge pMOSFETs. IEEE Trans Nucl Sci, 2012, 59: 735–741
- 45 Yang Y, Han G, Gao P, et al. Germanium-tin p-channel tunneling field-effect transistor: Device design and technology demonstration. IEEE Trans Electron Devices, 2013, 60: 4048–4056
- 46 Liu M, Han G, Liu Y, et al. Undoped Ge_{0.92}Sn_{0.08} quantum well PMOSFETs on (001), (011) and (111) substrates with in situ Si₂H₆ passivation: High hole mobility and dependence of performance on orientation. In: Proceedings of Symposium on IEEE VLSI Technology. Honolulu: IEEE, 2014
- 47 Wang L, Zhang E X, Schrimpf R D. Total ionizing dose effects on Ge channel pFETs with raised Si_{0.55}Ge_{0.45} source/drain. IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62: 2421–2416
- 48 Seifert N, Jahinuzzaman S, Velamala J, et al. Soft error rate improvements in 14-nm technology featuring second-generation 3D tri-gate transistors. IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62: 2570–2577
- 49 El-Mamouni F, Zhang E X, Ronald D, et al. Fin-width dependence of ionizing radiation-induced subthreshold-swing degradation in 100-nm-gate-length FinFETs. IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 3250–3255
- 50 Put S, Simoen E, Jurczak M, et al. Influence of fin width on the total dose behavior of p-channel bulk MugFETs. IEEE Electron Device Lett, 2010, 31: 243–245
- 51 Gaillardin M, Girard S, Paillet P, et al. Investigations on the vulnerability of advanced CMOS technologies to MGy dose environments.

- IEEE Trans Nucl Sci, 2013, 60: 2590–2597
- 52 Chatterjee I, Zhang E X, Bhuva B L. Geometry dependence of total-dose effects in bulk FinFETs. IEEE Trans Nucl Sci, 2014, 61: 2951–2958
 - 53 El-Mamouni F, Zhang E X, Schrimpf R D, et al. Pulsed laser-induced transient currents in bulk and silicon-on-insulator FinFETs. In: Proceedings of IEEE International on Reliability Physics Symposium. Monterey: IEEE, 2011
 - 54 El-Mamouni F, Zhang E X, Ball DR, et al. Heavy-ion-induced current transients in bulk and SOI-FinFETs. IEEE Trans Nucl Sci, 2012, 59: 2674–2681
 - 55 Nsengiyumva P, Ball D R, Kauppila J S, et al. A comparison of the SEU response of planar and FinFET D flip-flops at advanced technology nodes. IEEE Trans Nucl Sci, 2016, 63: 266–272
 - 56 Seifert N, Gill B, Jahinuzzaman S, et al. Soft error susceptibilities of 22 nm Tri-gate devices. IEEE Trans Nucl Sci, 2012, 59: 2666–2673
 - 57 Kauppila J S. Single-event modeling for rad-hard-by-design flows. In: IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference. Oregon, 2016
 - 58 Li D W, Qin J R, Chen S M. The dependence of process parameters on single event transient in 25 nm FinFET (in Chinese). J Natl Univ Def Tech, 2012, 34: 127–131 [李达维, 秦军瑞, 陈书明. 25 nm 鱼鳍型场效应晶体管中单粒子瞬态的工艺参数相关性. 国防科技大学学报, 2012, 34: 127–131]
 - 59 Liu B J, Cai L, Dong Z G. Single event effect in nano FinFET. Nuclear Phys Rev, 2014, 31: 516–521
 - 60 Liu Y J. Study of single event effects on SOI FinFET device and combinational circuit (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Xi'an: Xidian University, 2015 [刘永杰. SOI FinFET 器件与组合逻辑电路单粒子效应研究. 硕士学位论文. 西安: 西安电子科技大学, 2015]
 - 61 Tang D, Li Y H, Zhang G H, et al. Single event upset sensitivity of 45 nm FDSOI and SOI FinFET SRAM. Sci Sin Tech, 2013, 56: 780–785
 - 62 Inguibert C, Ecoffet R, Falguère D. Electron induced SEUs: Microdosimetry in nano-metric volumes. IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62: 2846–2852
 - 63 Philippe R. SEE and TID radiation test results of digital circuits designed and manufactured in ST 40 nm/45 nm/65 nm/90 nm/130 nm CMOS technologies. ESA Technical Report, 2011
 - 64 Zhao Y F, Wang L, Yue S G, et al. SEU and SET of 65 nm bulk CMOS flip-flops and their implications for RHBD. IEEE Trans Nucl Sci, 2015, 62: 2666–2672
 - 65 Hansen D L, Miller E J, Kleinosowski J, et al. Clock, flip-flop, and combinatorial logic contributions to the SEU cross section in 90 nm ASIC technology. IEEE Trans Nucl Sci, 2009, 56: 3542–3550
 - 66 Zhao X Y, Wang L, Yue S G. Single event transients of scan flip-flop and an SET-immune redundant delay filter (RDF). In: Proceedings of 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. Oxford: IEEE, 2013
 - 67 Lilja K, Bounasser M, Wen S J, et al. Single-event performance and layout optimization of flip-flops in a 28-nm bulk technology. IEEE Trans Nucl Sci, 2013, 60: 2782–2788
 - 68 Ahlbin J R, Atkinson N M, Gadlage M J, et al. Influence of N-well contact area on the pulse width of single-event transients. IEEE Trans Nucl Sci, 2011, 58: 2585–2590
 - 69 Yue S G, Zhang X L, Zhao X Y, et al. Single event transient pulse width measurement of 65-nm bulk CMOS circuits. J Semicond, 2015, 36: 115006
 - 70 Carlotti J F, Touboul A D, Ramonda M, et al. Growth of silicon bump induced by swift heavy ion at the silicon oxide-silicon interface. Appl Phys Lett, 2006, 88: 041906
 - 71 Matthew J G, Jonathan R A, Balaji N, et al. Scaling trends in SET pulse widths in Sub-100 nm bulk CMOS processes. IEEE Trans Nucl Sci, 2010, 57: 3336–3341

Summary for “纳米器件空间辐射效应机理和模拟试验技术研究进展”

Research progress of radiation effects mechanisms and experimental techniques in nano-devices

Wei Chen^{1*}, Jie Liu², Xiaohua Ma², Gang Guo⁴, Yuanfu Zhao⁵, Xiaoqiang Guo¹, Yinhong Luo¹, Zhibin Yao¹, Lili Ding¹, Chenhui Wang¹, Rongmei Chen^{1,6}, Baoping He¹, Wen Zhao¹, Fengqi Zhang¹, Wuying Ma¹, Pengfei Zhai², Zujun Wang¹, Tianqi Liu², Hongxia Guo¹, Jiande Liu², Hailiang Yang¹, Peipei Hu², Peitian Cong¹ & Zongzhen Li²

¹ State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

² Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

³ Xidian University, school of microelectronics Xi'an 710126, China;

⁴ China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

⁵ Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China;

⁶ Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: chenwei@nint.ac.cn

Radiation damage in electronic devices is one of the key factors determining the survival probability of on-orbit spacecraft. Thus, it has remained an important topic in the field of radiation-hardening technology. High reliability, high integration, high performance, low power consumption, and low cost are the important requirements for the development of next-generation electronic systems. For space electronic systems, the use of radiation-hardened high-performance nano-devices will continue to be an important trend. Based on thorough reviewing of the research status at home and abroad, this paper analyzes new problems faced by nano-devices due to radiation. Nano-device technology is different from that for macroscopic devices. For example, the channel length in nano-devices is reduced to ten nanometers, and the equivalent thickness of their gate oxide is less than one nanometer. In order to reduce the gate-induced drain leakage effect, either vertical inverse doping or transverse halo ring doping is applied to the process. To reduce power consumption, multiple semiconductor materials, such as strained silicon, GeSi, high k gate dielectric, metal gate, etc., have been introduced. To enhance control over the gate, the structure incorporates 3D FinFETs. This process approaches the physical limit, and the adoption of new materials and structures have created new radiation effects and mechanisms. Thus, the experimental techniques become more complex, which brings new challenges to research on radiation-hardening technology. This paper analyzes the present status of domestic and foreign research into radiation effects in nano-devices. Key scientific issues and technologies will be presented, which are needed to study radiation effects and simulation experiments of nano-devices with a feature size of less than 28 nm. Research on photon and heavy ion radiation mechanisms, as well as experimental techniques in nano-devices, should continue receiving focus. In addition, radiation damage mechanisms in nanometer devices should be studied. Heavy-ion micro-beam simulations for the distribution of nano-devices and circuit sensitive areas should be established in order to analyze weak links. A new nano-device and circuit radiation-resistant design method should be proposed. The current survey provides a reference for anti-radiation reinforcement and applications of nano-devices in space.

nano-devices, radiation effects, radiation hardened, experimental techniques

doi: 10.1360/N972017-00771