

文章编号: 2095-4980(2017)01-0153-06

后端互联工艺对集成电路单粒子翻转效应的影响

毕津顺, 贾少旭, 韩郑生, 罗家俊

(中国科学院 微电子研究所, 北京 100029)

摘 要: 基于 Geant4 工具, 进行高能粒子入射的蒙特卡洛仿真。介绍了仿真实论, 以总反应截面和淀积电荷为参量, 研究了后端金属互联工艺对于半导体集成电路单粒子翻转效应(SEE)的影响。实验结果表明, 钨层的存在会对半导体器件的单粒子翻转效应有一定的增强作用。金属铝/铜与入射粒子的核反应作用效果相近, 相交点对应的电荷淀积量在 0.66 pC。大于此电荷量, 铝的总反应截面大于铜; 而小于此电荷量, 则是铜的总反应截面大于铝。欧姆接触的阻挡层钛和氮化钛对单粒子翻转效应略有减缓作用。

关键词: 蒙特卡洛; 后端互联; 单粒子效应; 集成电路

中图分类号: TN43

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0153

Impact of backend interconnection process on the Single-Event-Effects in integrated circuits

BI Jinshun, JIA Shaoxu, HAN Zhengsheng, LUO Jiajun

(Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The Monte Carlo simulations of high energy particles injection are conducted based on Geant4 tools. Simulation theory is introduced. The impacts of backend interconnection process on Single-Event-Effects(SEE) in integrated circuits are analyzed in terms of total reaction cross-section and deposited charge. It demonstrates that tungsten enhances the SEE in semiconductor devices. When high energy particles strike, the nuclear reaction effects are similar between Al and Cu. The deposited charge corresponding to the cross point is 0.66 pC. Beyond the cross point, the total reaction cross-section of Al is larger than that of Cu. Below the cross point, the trend is reversed. The block layer of ohmic contact such as Ti and TiN mitigates the SEE slightly.

Keywords: Monte Carlo; backend interconnection; Single-Event-Effects; integrated circuits

单粒子效应是指空间环境中单个高能粒子, 在器件中通过直接电离作用或者核反应生成次级粒子的间接电离作用, 产生并累积有效电离电荷, 被器件敏感节点收集后, 导致器件工作状态、逻辑状态、输出电平、功能等发生变化或损伤的现象^[1-4]。在众多单粒子效应的种类中, 单粒子翻转效应是最具代表性和最易发生的现象, 所以受到科研工作者的广泛关注。本文的工作重点也是针对半导体器件的单粒子翻转效应。单粒子翻转主要发生在存储器和时序电路中, 是入射粒子径迹周围产生的电荷被敏感电极收集, 形成瞬态电流, 导致逻辑状态翻转。Geant4 是由欧洲核子研究中心(European Organization for Nuclear Research, CERN)开发的蒙特卡洛应用软件包, 主要用于模拟高能粒子在探测器中输运的物理过程。它采用面向对象的 C++语言编写, 可以构造复杂的探测器几何结构, 定制感兴趣的粒子与物理过程模型, 并且能够跟踪粒子的过程, 显示粒子径迹, 处理在输运过程中产生的大量数据。Geant4 拥有比较完善的粒子及物理模型, 可以构造三维立体的几何结构, 填充必要的半导体材料, 在三维结构模拟和计算效率上都占有优势, 工具开发灵活, 因此, 适合进行单粒子效应的数值仿真^[5-7]。

本文基于 Geant4 工具, 进行粒子蒙特卡洛仿真, 重点研究了钨、铝、铜、钛和氮化钛等后端互联金属对于集成电路单粒子翻转效应的影响。

1 仿真实论

1.1 电荷产生机制

辐射在半导体中淀积电荷的物理机制有 2 种：a) 初始入射粒子自身的直接电离作用，它是一定能量的带电粒子在穿过半导体材料时，由于自身能量的损耗而在其轨迹周围产生了电子-空穴对；b) 入射粒子与半导体材料发生核反应而产生的次级粒子的间接电离过程，这些核反应产物(包括反冲核、裂变核和 α, γ 粒子等)往往会产生比初级粒子更高的 LET 值，淀积更多的电荷量。因此，核反应产物对单粒子翻转效应的贡献不容忽视。基于 Geant4 仿真的输出信息，可以得到粒子入射器件后敏感单元的能量淀积分布，再通过式(1)转化成敏感单元中淀积电荷量，即：

$$Q = \frac{e}{3.6} E = \frac{1.602 \times 10^{-7}}{3.6 \times 10^{-6}} E = \frac{E}{22.5} \quad (1)$$

式中： Q 和 E 分别表示半导体器件敏感单元中淀积电荷量和能量值； e 表示电子电量，在硅材料中，产生一个电子空穴对需要 3.6 eV 的能量^[8]。本文重点研究核反应对半导体器件敏感单元中淀积电荷的影响及其对单粒子翻转的贡献。

1.2 几何模型和敏感单元

本文在 Geant4 模拟中应用半导体器件的简化几何结构，重点关注入射粒子、材料以及敏感单元区域对于淀积电荷的影响。器件中计算淀积能量的敏感单元运用矩形并行管道(Rectangular Parallelepiped, RPP)模型，在能够引起单粒子翻转的器件敏感区域中进行沉积能量的积分或求和，这一区域设计成为一个长方体结构，简化分析模型，如图 1 所示，这样研究具有多层互联结构的半导体器件时可以更方便迅速地评估其单粒子翻转效应^[9]。敏感单元包括器件有源区的反偏 PN 结和临近的掺杂区以及衬底或阱的部分区域，因为该区域对电荷的收集效率最大，对电路的影响也最大，可由实验测量和计算机辅助设计技术(Technology Computer Aided Design, TCAD)等仿真工具来计算其具体的位置和尺寸大小^[10-11]，而敏感单元中所能淀积电荷量的大小，是决定半导体器件是否发生单粒子翻转的重要先决条件。

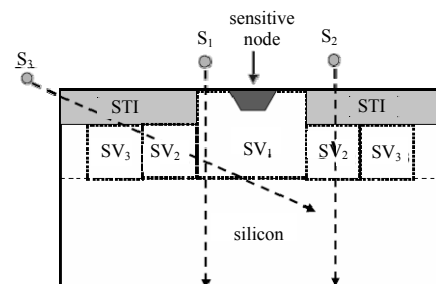


Fig.1 Composite Sensitive Volume(SV) model of semiconductor devices
图 1 器件复合敏感区域模型

1.3 总反应截面与临界电荷

在 Geant4 仿真设计中，需要按对数坐标从小到大将能量值平均分割成不同的间隔区域。而在仿真过程中，基于 Geant4 的输出结果可以得到敏感单元中淀积的能量值。要将每次粒子入射事件发生时，半导体器件在敏感单元中的能量淀积采样并计入到划分好的对应能量区间上。再通过统计计算，得到仿真中所有入射粒子事件数在不同能量区间中的分布情况。接着将对应的淀积能量值转化成淀积电荷量，就可以得到入射粒子事件数在不同的淀积电荷量下的分布情况，最后通过公式(2)计算得到总的反应截面^[9]：

$$\sigma(Q, Z, E_Z) = \frac{\sum_{i=i_Q}^{i_{\max}} N_i}{\Phi} \quad (2)$$

式中： N_i 是每一段电荷量区间上统计得到的入射粒子事件数； i_Q 是淀积电荷量所在的区间； $i_{\max}$ 对应仿真得到的最大电荷量所在的区间； $\Phi = N_p/A$ 为粒子的入射通量； N_p 为总的入射粒子数； A 为入射粒子所覆盖的面积。总的反应截面是由入射粒子的原子序数 Z 、带电量 Q 、能量 E_Z 、器件材料和结构等决定的，它表示入射粒子在敏感单元中淀积电荷量在各电荷区间上分布的概率，或者说是敏感单元中产生电荷量的能力大小，是衡量单粒子翻转的一个重要参数。

另外一个重要的参数是临界电荷，它定义为可以导致电路和器件逻辑状态翻转所需的最小电荷量。临界电荷需要通过辐照实验或半导体器件及电路的仿真工具精确计算^[12]，通常比较典型的算法是对引起电路单粒子翻转的漏电流脉冲在时间上的积分得到的。当计算得到临界电荷时，将 $Q = Q_{\text{crit}}$ 代入式(2)，所求的总反应截面即为单粒子翻转截面：

$$\sigma(Q_{\text{crit}}, Z, E_Z) = \frac{\sum_{i=Q_{\text{crit}}}^{i_{\text{max}}} N_i}{\Phi} \quad (3)$$

式中 Q_{crit} 为临界电荷量，将它之后的粒子事件数求和积分再除以入射通量，计算得到的结果就是翻转截面，可以用来评估集成电路和器件的单粒子翻转效应。

2 实验结构

为了模拟实际器件，分析敏感单元上方材料和结构对单粒子翻转的影响，本文采用一种抗辐照设计的 10 管静态随机存储器(Static Random Access Memory, SRAM)单元作为研究对象，它的工艺参数为 3 层金属互联层，栅长为 $0.4 \mu\text{m}$ ，双阱工艺和 P 型外延层。如图 2 所示，左边为 SRAM 的电路原理图，右边为电路的版图结构，文献[12]中已经通过实验和电路仿真确定产生单粒子翻转的敏感区间的位置(右边版图中的虚线圆形区域)、尺寸大小以及产生翻转所需的临界电荷量等。

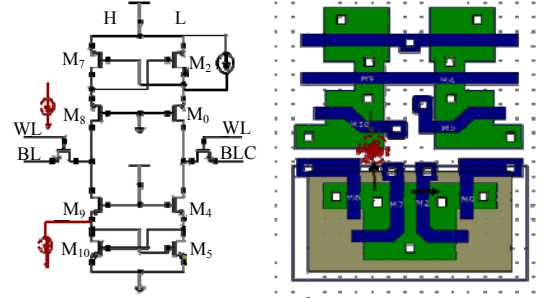


Fig.2 Anti-radiation 10-tube SRAM cell
图 2 抗辐照设计 10 管单元 SRAM

为了在实际仿真中考虑到所有可能对敏感单元产生影响的入射粒子，要求有足够大的粒子入射面积，因此将器件模块设计为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m} \times 9.99 \mu\text{m}$ 大小的简化结构。因为入射粒子是垂直从上表面入射，所以建立的器件模型只需考虑器件的垂直方向。图 3(a)仿真结构关注金属钨的影响，即含钨层通孔的器件和以二氧化硅层代替钨层通孔的器件这 2 种情况。图 3(b)仿真结构关注金属 Cu 和 Al 的影响，即金属互联层分别填充 Al 和 Cu 进行比较。图 4 仿真结构关注 Ti/TiN 阻挡层的影响，其中图 4(a)和图 4(b)是有无阻挡层的 2 种情况。

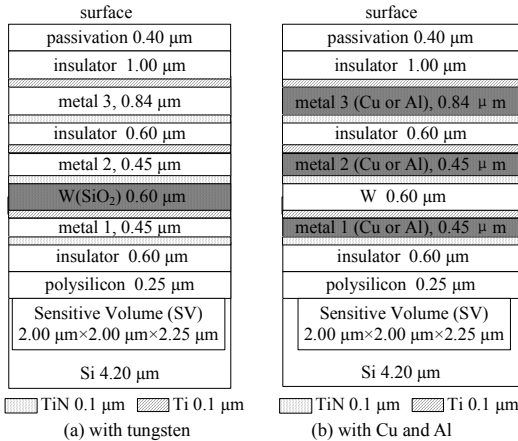
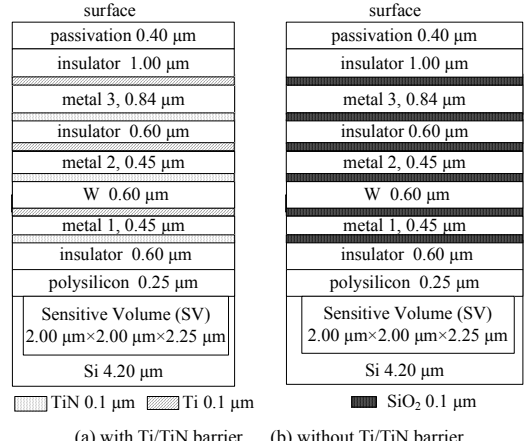


Fig.3 Simulation structure
图 3 仿真结构



(a) with Ti/TiN barrier (b) without Ti/TiN barrier
Fig.4 Cross-section illustration
图 4 器件阻挡层剖面示意图

3 后端互联的影响

3.1 金属钨的影响

芯片中，连接 2 层互联金属的材料大多使用钨，其余不需要连接的区域则是应用如二氧化硅的绝缘层填充，实现上层金属和下层金属有效的功能连接。图 3(a)的器件结构中灰色区的一层就是代表钨层通孔位置，此处是用于连接 Metal1 和 Metal2，而其他 Metal2 和 Metal3 以及 Metal 和多晶硅层之间则没有钨层，而用绝缘层二氧化硅填充。应用 Geant4 仿真设计时，图 3(a)的灰色层的淀积材料需要分别应用钨材料和二氧化硅材料这 2 种情况作对比仿真，再加上只有硅材料的器件结构。它们的器件上表面均为 $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$ 大小，作为粒子入射面，其他的模拟仿真条件和处理分析与只有硅材料的仿真基本相同，物理模型包括 EM 模型和核反应模型两大块。经过 Geant4 编码设计实现对上述 3 种不同结构的仿真，可以得到粒子的总反应截面与敏感单元中的淀积电荷量的关系曲线，如图 5 所示。

从图 5 中可以看出，3 条曲线都存在核反应为主要作用的区域，所不同的是，有钨层填充的器件仿真核反应区间更大，能在敏感单元中淀积更多的电荷，而其他 2 种材料的核反应区间都相对较小，甚至是在只有硅材料存在的器件仿真中由于核反应使得敏感单元淀积电荷量更多一些。

敏感单元之上加入覆盖材料后,有钨层材料的器件结构可以在敏感单元中淀积出更高的电荷量,明显大于其他 2 种结构。这是由于入射粒子与钨材料这种重核材料碰撞后,发生核反应,产生了比入射粒子的 LET(Linear Energy Transfer)值更高的其他粒子,这些粒子经过二次电离能够在敏感单元中产生比入射粒子直接电离所产生的更高的电荷量。而二氧化硅和硅这种轻核材料与入射粒子的核反应则不能产生很高的 LET 值的次级粒子,所以,它们能够淀积的最大电荷量要小很多。

根据实验数据可知,此器件结构中造成单粒子翻转的临界电荷值在 0.7 pC 至 1.2 pC 之间,将 0.7 pC 的电荷量代入到图 5 可以看到,存在钨层的仿真对应的单粒子翻转截面为 10^{-14} cm^2 左右,而另外 2 种仿真中的翻转截面均为 0,这进一步说明了钨层对于单粒子翻转效应影响的重要性。而对应的此 LET 值 ($1.7 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$) 的入射粒子 ^{20}Ne 的实验结果也在 10^{-14} cm^2 左右,说明了 Geant4 工具进行单粒子翻转效应仿真工作的可行性与有效性。由仿真结果可以看到,钨层的存在会对半导体器件的单粒子翻转效应有一定的增强作用。此结论可以帮助和指导集成电路抗辐照设计的分析以及改进应用,比如可以将有钨层的通孔放置在远离易发生单粒子翻转的敏感节点区域的上方或者周围等等,这样就有可能减小半导体器件单粒子翻转的概率。同时,也可以在分析器件或电路的单粒子翻转效应中考虑加入核反应以及钨层覆盖层的影响,完善仿真分析模型。

3.2 金属铜的影响

铜具有较低的电阻率、优越的抗电迁移特性和高可靠性,越来越多地被半导体生产厂家应用。如今的超深亚微米/纳米级的集成电路,已经广泛采用铜互联的技术。本部分工作就研究铜金属互联的器件结构对于单粒子翻转效应可能造成的影响。

此次仿真中,半导体器件大致结构仍然沿用上文的器件模型,只是将其中的 3 层有铝金属填充的金属互联层均改为铜金属的互联层,如图 3(b)所示的器件结构,灰色区域的 3 层表示为金属互联层,分别填充铝和铜进行 2 次仿真比较,钨层在 Metal1 和 Metal2 之间作为通孔连接层,仿真初始环境仍然是 523 MeV 的 ^{20}Ne 粒子垂直入射器件上表面,观察铜金属与铝金属作为互联金属层时,各自对于单粒子翻转的影响。

经过仿真和计算处理,得到了图 6 所示的曲线,图 6(a)是 Cu 和 Al 分别作为器件金属互联层时单粒子翻转效应的总反应截面,图 6(b)是图 6(a)中曲线后段有差别的那部分区域的一个放大图形,该部分曲线主要是核反应作用的效果。图 6(b)中可以看到 2 条曲线的变化趋势,2 种金属与入射粒子的核反应作用效果相差不是太多;2 条曲线的相交点对应的电荷淀积量在 0.66 pC 左右,大于此电荷量的区域,Al 的总反应截面要大于 Cu 一些,而小于此电荷量的区域,则是 Cu 的总反应截面要大于 Al 一些。

图中的结果说明,如果造成半导体器件的单粒子翻转的临界电荷大于 0.66 pC 时,作为金属互联材料,Al 会比 Cu 更容易发生单粒子翻转效应;而若临界电荷小于 0.66 pC 时,则是 Cu 可以比 Al 更容易发生单粒子翻转效应。上文中,能够导致单粒子翻转的临界电荷都在 0.7 pC 以上,所以,在这种结构的仿真中,Cu 的抗单粒子翻转效应要比 Al 更好一些。但是随着集成电路尺寸的不断缩小,半导体器件的有源区减小,电源电压以及阈值电压都会相应减小,从而造成单粒子翻转的临界电荷量也在相应减小;在深亚微米和纳米级集成电路中,Cu 的应用会逐渐变成主流的金属互联材料,而这可能将会在一定程度上增加半导体器件的单粒子翻转效应发生的概率,是在今后的仿真研究和产品生产中需要注意的地方。

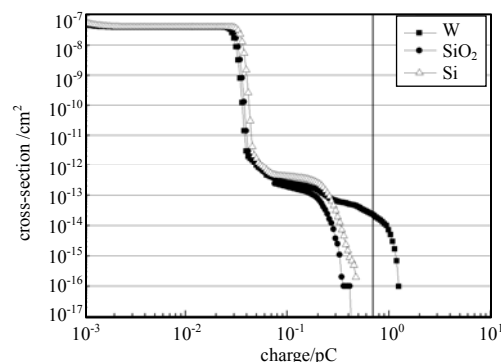


Fig.5 Total cross-section in case of different material layers and 523 MeV ^{20}Ne injection
图 5 523 MeV ^{20}Ne 粒子入射不同材料层的总反应截面

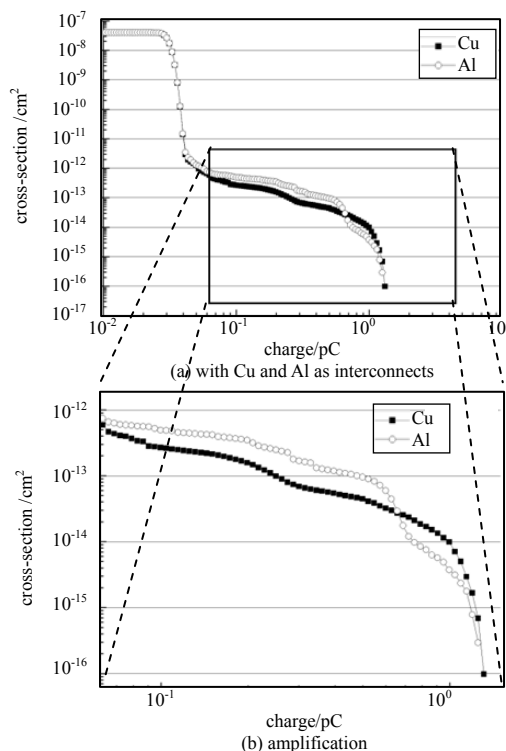


Fig.6 Comparison of cross-section with Cu and Al as interconnects

图 6 Cu 和 Al 作为金属互联层的反应截面比较

3.3 Ti/TiN 阻挡层的影响

钛(Ti)与氮化钛(TiN)是 2 种极为常见的用作半导体器件欧姆接触阻挡层的材料。通常厚度都非常薄,既可以阻止其上下层材料的互相混合,同时又保证欧姆接触电阻足够小,工艺的可实现性也相对较成熟一些。本部分讨论 Ti 和 TiN 作为半导体器件欧姆接触的阻挡层时,对于单粒子翻转效应的影响。

图 4 给出了器件剖面结构的示意图。图 4(a)图形是存在欧姆接触阻挡层 Ti 和 TiN 的结构图形,阻挡层厚度只有 $0.1\ \mu\text{m}$;图 4(b)则是不存在阻挡层的结构,仿真中用二氧化硅代替阻挡层材料。初始的入射粒子仍然是用 523 MeV 的 ^{20}Ne 粒子垂直入射器件的上表面,然后分别对它们 2 种结构进行 Geant4 的对比仿真,观察欧姆接触阻挡层对于单粒子翻转效应的影响。

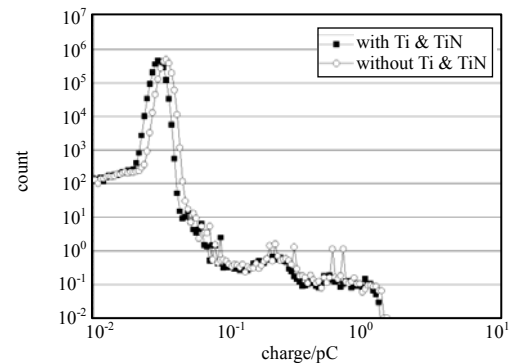
经过 Geant4 的仿真,得到了如图 7 所示的曲线。图 7(a)是总的粒子计数在敏感单元中淀积电荷量上的分布,可以看到,没有阻挡层的曲线峰值向右偏移了一些,则它实际的布拉格峰位置也随之右移了一些,这说明了阻挡层材料的存在,可以使实际的入射粒子的 LET 值有略微的减小,使曲线左移。图 7(b)是在图 7(a)基础上经计算处理后得到总反应截面与淀积电荷量的关系曲线。在以核反应为主得到的曲线区域,没有阻挡层的曲线整体都在有阻挡层曲线的上方,这说明了 Ti 和 TiN 与粒子的核反应可以减小敏感单元中的淀积电荷量的产生,从而使得造成单粒子翻转的翻转截面有所减小,也就是说它们可以让单粒子翻转效应有一定的减弱。由此可以得出结论,欧姆接触的阻挡层 Ti 和 TiN 会对半导体器件的单粒子翻转效应有减缓的作用,这可能会成为利用 Ti 和 TiN 作为半导体器件欧姆接触阻挡层的一个优势。

4 结论

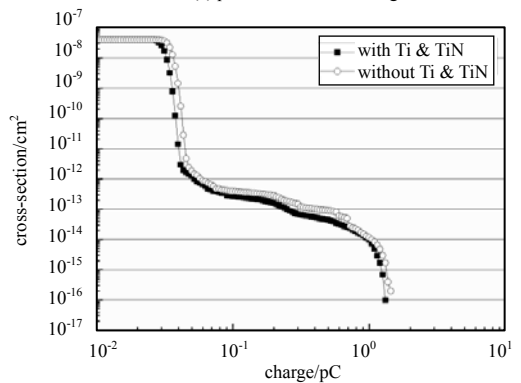
采用 Geant4 工具,523 MeV 的 ^{20}Ne 粒子垂直入射器件,进行了蒙特卡洛仿真,研究了钨、铝、铜、钛和氮化钛等后端互联金属对于集成电路单粒子翻转效应的影响。仿真表明,钨层加强了半导体器件的单粒子翻转效应,金属铝/铜与入射粒子的核反应作用效果相近,阻挡层钛和氮化钛对单粒子翻转效应略有减缓的作用。本文的相关结果为抗辐射集成电路研制提供了参考和依据。

参考文献:

- [1] 贺朝会. 单粒子效应研究的现状和动态[R/OL]. [2015-08-14]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/scholar/downpaper/hechaohui-8>. (HE Chaohui. Review of Single Event Effects[R/OL]. [2015-08-14]. <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/scholar/downpaper/hechaohui-8>.)
- [2] PETERSEN E L. Predictions and observations of SEU rates in space[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1997, 44(6):2174-2187.
- [3] DODD P E, MASSENGILL L W. Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3):583-602.
- [4] 赵凯,高见头,杨波,等. 用 SOI 技术提高 CMOS SRAM 的抗单粒子翻转能力[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(1):91-95. (ZHAO Kai, GAO Jiantou, YANG Bo, et al. Improve SRAM SEU resistance with SOI CMOS technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010, 8(1):91-95.)
- [5] TRUSCOTT P, LEI Fan, DYER C, et al. Geant4—a new Monte Carlo toolkit for simulating space radiation shielding and effects[C]// 2000 IEEE Radiation Effects Data Workshop. Denver, California: IEEE, 2000:147-152.
- [6] SANTIN G, NARTALLO R, NIEMINEN P, et al. Geant4 in the space environment: tools and applications[C]// Nuclear Science Symposium Conference Record. Portland, Oregon: IEEE, 2003:1522-1526.
- [7] ESPIRITO-SANTO M C, GONCALVES P, PIMENTA M, et al. Geant4 applications for astroparticle experiments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(4):1373-1377.



(a) particle counts vs. charge



(b) cross-section vs. charge

Fig.7 Simulation curves with and without Ti and TiN barrier layer

图 7 有无 Ti 和 TiN 阻挡层的仿真图形

- [8] MUSSEAU O. Charge collection and SEU mechanisms[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1994,43(1/2):151–163.
- [9] WARREN K M,WELLER R A,MENDENHALL M H,et al. The contribution of nuclear reactions to heavy ion single event upset cross-section measurements in a high-density SEU hardened SRAM[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(6):2125–2131.
- [10] BALL D R,WARREN K M,WELLER R A,et al. Simulating nuclear events in a TCAD model of a high-density SEU hardened SRAM technology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2006,53(4):1794–1798.
- [11] DODD P E,SHANEYFELT A R,HORN K M,et al. SEU-sensitive volumes in bulk and SOI SRAMs from first-principles calculations and experiments[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2001,48(6):1893–1903.
- [12] KOBAYASHI A S,BALL D R,WARREN K M,et al. The effect of metallization layers on single event susceptibility[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005,52(6):2189–2193.

作者简介:



毕津顺(1979–), 男, 天津市人, 博士, 副研究员, 主要研究半导体器件和集成电路辐照效应与抗辐射加固技术及产品开发 .email: bijinshun@ime.ac.cn.

贾少旭(1987–), 男, 西安市人, 硕士, 主要研究方向为单粒子效应仿真.

韩郑生(1962–), 男, 郑州市人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为半导体器件和集成电路辐照效应与抗辐射加固技术及开发.

罗家俊(1973–), 男, 江西省赣州市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为半导体器件和集成电路辐照效应与抗辐射加固技术及开发.

(上接第 147 页)

- [8] HUBERT Guillaume,ECOFFET Robert. Operational impact of statistical properties of single event phenomena for on-orbit measurement and predictions improvement[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009,60(5):3915–3923.

作者简介:



于庆奎(1964–), 男, 山东省牟平县人, 硕士, 研究员, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证 .email: yuqingkui@263.net.

罗 磊(1980–), 男, 武汉市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证.

唐 民(1963–), 男, 天津市人, 学士, 研究员, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证.

李 铮(1990–), 男, 黑龙江省大庆市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证.

孙 毅(1988–), 男, 山东省青岛市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证.

魏志超(1989–), 男, 天津市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为宇航元器件抗辐射保证.