

空间高能粒子与器件布线层核反应后次级粒子LET分布研究

杨涛¹, 邵志杰², 蔡明辉^{1,3}, 贾鑫禹^{1,4}, 韩建伟^{1,3}

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 北京工业大学, 北京 100022)

摘要: 空间高能质子和重离子是导致元器件发生单粒子效应的根本原因, 为准确评估元器件在轨遭遇的单粒子效应风险, 必须清楚高能质子、重离子与器件材料发生核反应的物理过程及生成的次级重离子LET (Line Energy Transfer) 分布规律。针对典型CMOS工艺器件模拟计算了不同能量质子和氦核粒子在器件灵敏单元内产生的反冲核、平均能量及线性能量转移值, 并分析了半导体器件金属布线层中重金属对次级重离子LET分布的影响规律。计算结果表明: 高能粒子与器件相互作用后产生大量次级重离子, 且高能质子作用后产生的次级粒子的LET值主要分布为0~25 MeV·cm²/mg; 高能氦核粒子作用后产生的次级粒子的LET值主要分布为0~35 MeV·cm²/mg; 有重金属钨(W)存在时能提高次级粒子的LET值, 增加了半导体器件发生单粒子效应的概率, 该研究结果可为元器件单粒子效应风险分析、航天器抗单粒子效应指标确定提供重要依据。

关键词: 高能粒子; CMOS工艺器件; LET值; 单粒子效应; GEANT4

中图分类号: O571

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)02-0173-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.009

引用格式: 杨涛, 邵志杰, 蔡明辉, 等. 空间高能粒子与器件布线层核反应后次级粒子LET分布研究[J]. 深空探测学报, 2019, 6 (2): 173-178.

Reference format: YANG T, SHAO Z J, CAI M H, et al. Simulation of the interaction's effects on single event effects between high-energy particles and interconnect overlayers within semiconductor devices[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 173-178.

引言

随着半导体集成电路制造工艺水平的飞速发展, 应用于空间探测任务上的电子学器件集成度逐渐提高, 器件工艺尺寸在不断缩小, 空间高能粒子诱发单粒子效应的阈值电荷量变小, 同时高Z (原子序数) 重金属在半导体布线层中对半导体器件的单粒子效应影响也越来越突出, 往往单个高能粒子的入射就会导致探测任务中飞行器内集成电子器件的状态位翻转或者烧毁, 并可能导致灾难性后果^[1-7]。因此, 完整评价器件的单粒子效应 (Single Event Effect, SEE) 敏感度需要分别研究高能质子和重离子的影响, 特别是2种粒子在半导体金属布线层中相互作用过程的研究

至关重要。

对空间辐射粒子与器件布线层相互作用的研究可以通过蒙特卡罗计算和试验两种方法得到, 尽管在试验数据上积累了许多, 然而受到地面条件的限制及试验手段的不足, 进展缓慢且不全面。由于太空中高能质子和重离子能量分布范围广, 典型辐射带质子能谱能量分布为0.1~400 MeV, 如图1 (a) 所示, 典型重离子能谱能量分为0~40 GeV如图1 (b) 所示, 但地面模拟条件难以准确模拟。为此利用既经济又有效的蒙特卡罗方法来研究高能粒子与半导体器件金属布线层的相互作用, 跟踪反应后的次级重离子, 计算它们在材料中一定尺寸灵敏体积 (Smart Volume, SV) 中沉积的能量。这种做法不仅能体现不同方向的高能

收稿日期: 2018-11-06 修回日期: 2019-03-26

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项A类资助项目 (XDA17010301); 北京市科技重大专项资助项目 (Z181100002918004); 载人航天领域预先研究课题资助项目 (Y79001AF00)

带电粒子与任意尺寸SV的作用,还完善了发生于SV之外的核反应对SV中能量沉积的贡献,更真实地反映空间中发生的实际情况。

国内外学者针对空间高能粒子在器件布线层核反应过程开展大量的仿真计算,如Neill与David计算了不同单能质子与器件硅层相互作用产生次级粒子种类和LET分布规律;Gellere G等分析计算了不同单能质子或重离子与布线层重金属作用后次级粒子种类和LET分布规律;西安交通大学的贺朝会博士仿真计算了不同能量的质子与硅层作用后次级粒子角分布及反冲核的截面与质子能量关系;国防科技大学的王同权

博士计算分析了单能质子与器件硅层反应的能量关系;西北核技术研究所的赵雯博士利用Geant4分析单能质子在SRAM器件布线层作用导致单粒子效应的机理研究^[1-7]。综合看来,目前相关的仿真计算都没有分析空间辐射粒子与器件硅层及金属布线层相互协同作用后次级重离子的LET分布规律。

本文针对典型CMOS工艺器件模拟计算了不同能量质子和氦核粒子在器件灵敏单元内产生的反冲核、平均能量及LET值,并分析了半导体器件金属布线层中重金属对次级重离子LET分布的影响规律。

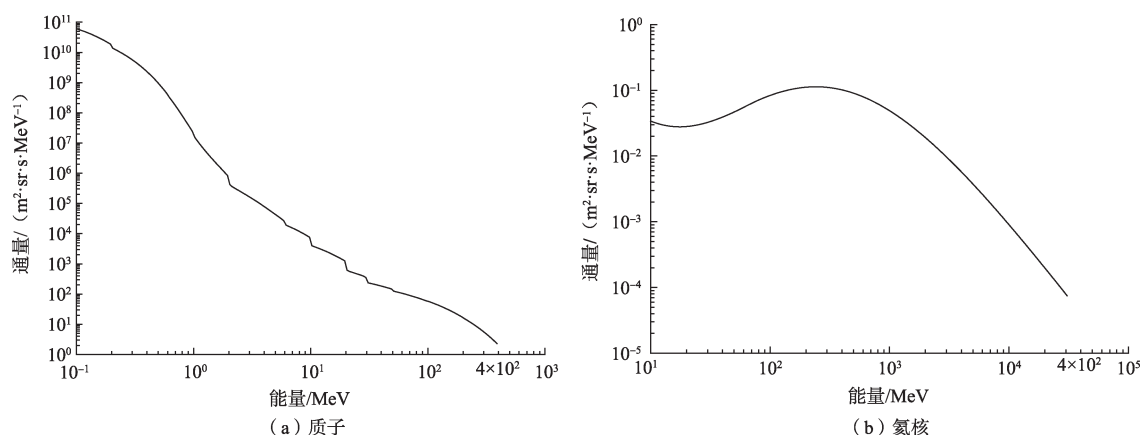


图1 空间辐射带能谱

Fig. 1 The space radiation belt energy spectrum

1 物理机制及模型设计

1.1 物理机制

高能粒子与半导体布线层和灵敏体积区半导体材料相互作用,其物理过程可以分为2个过程(如图2所示):①核内的微观反应过程,包括直接、级联和蒸发等过程,发射出中子、质子、介子等粒子,具有较高的激发能余核通过发射 γ 射线裂变的方式退激;②具有较高能量的出射粒子又和半导体材料中其它核发生反应,直至出射粒子逃逸出半导体材料或者能量低于发生反应的阈能而停留在半导体材料内,这是一个高能粒子在半导体材料中的宏观运输过程^[8]。

利用欧洲核子研究委员会(European Organization for Nuclear Research, CERN)开发的Geant4^[9]模拟高能粒子与器件布线层发生核反应生成的次级产物,该产物沉积在敏感区域的能量沉积及径迹长度来确定于SEE有关的物理量LET,该物理量LET值如下式表述: $LET=dE/\rho \cdot dl$,dE是在灵敏区沉积的能量,dl是粒子在灵敏区的径迹, ρ 是灵敏区的材料密度^[10]。计算每个反冲重核在器件灵敏区内生成的LET值,对

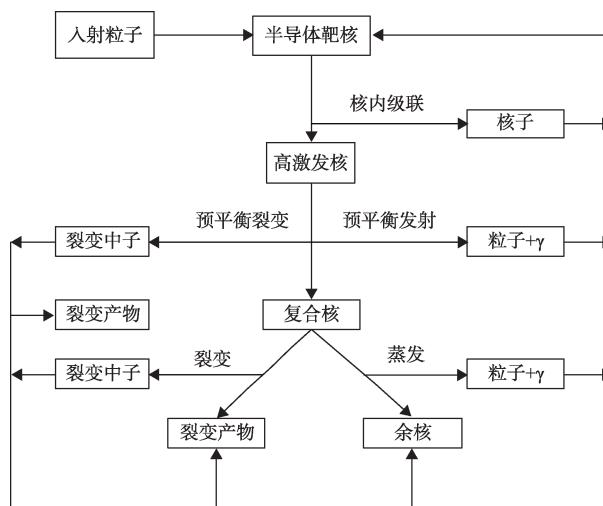


图2 高能粒子在半导体硅材料的核内与核外运输过程

Fig. 2 High energy particles transport in and out of the core of semiconductor silicon

器件LET的SEE的翻转阈值来判断翻转次数。

1.2 几何模型

选取典型CMOS工艺器件建立几何模型^[11]如图3所示。其典型CMOS工艺器件Si(硅)层的厚度均为

4 mm; 三层 TiN (氮化钛) 及 Ti (钛) 层厚度均为 0.1 μm ; 三层 SiO_2 (二氧化硅) 层厚度分别为 1.0、0.6、0.6 μm ; 三层 Al (铝) 层厚度分别为 0.45、0.45、0.84 μm 及一层 Si_3N_4 (四氮化三硅) 层厚度为 0.4 μm 。图 3 中 (a) 与 (b) 之间的模型区别在布线层厚度为 0.6 μm 的钨 (W) 层或者 SiO_2 层。据如图 1

所示的空间辐射质子和氦离子能谱分布, 为了满足其全能谱能量分布范围, 选取了 3 组典型质子能量分别为 70、170、410 MeV 及 3 组典型氦核粒子能量分别为 500 MeV、8.0 GeV、18 GeV 作为原初粒子。由于机时与统计性的因素, 计算使用 4.9.6 Geant4 版本模拟粒子原初粒子数为 1×10^7 个。

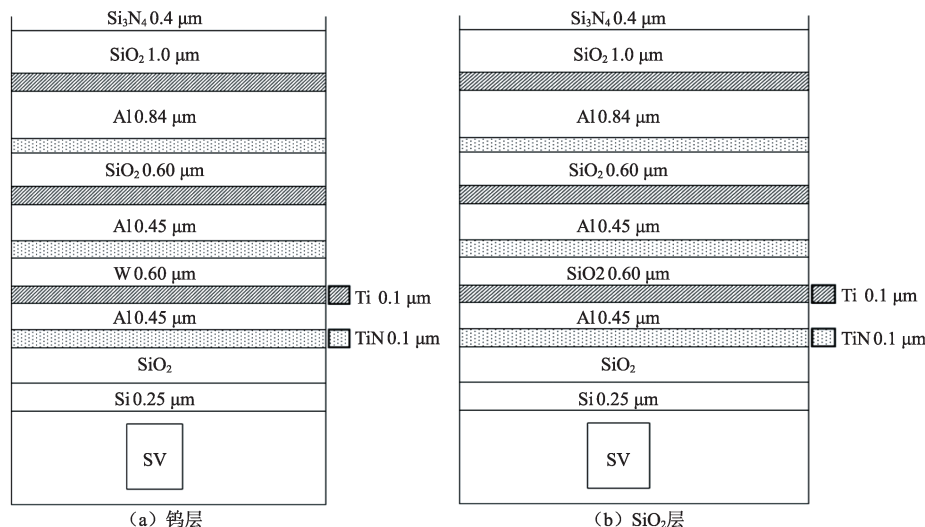


图3 CMOS工艺单元几何模型

Fig. 3 Geant4 geometry model of the candidate CMOS cell

2 模拟结果及分析

根据上述方法, 建立起典型的 CMOS 工艺器件结构单元模型利用 GEANT4 程序计算高能粒子在半导体器件内相互作用的物理参数。由于篇幅的限制, 选取了质子、氦核的能量由低能到高能递增的方式来分析其影响规律。另外, 由于输入能谱的置信度、蒙特卡洛仿真的随机数选取及次级粒子核反应的截面数据等因素是导致表 1~2 结果存在系统误差。因此表 1~2 的结果中原子序数 Z 为 3~9 的次级粒子数据误差范围在 50% 以上, 而其它次级粒子的数据误差范围在 10% 以内。

从表 1~2 可知, 空间高能粒子与器件布线层相互作用后, 产生了大量反冲核, 且高 Z 反冲核如 Si、Al、Mg、Na 和 Ne 等占核反应产物的绝大部分, 是因为器件绝大部分材料是硅, 高能粒子与硅作用几率更高, 导致与硅发生级联反应的次数更多。在统计范围误差内, 空间高能质子或氦离子与 CMOS 工艺器件相互作用后产生的反冲核的平均能量 (单位为 MeV) 随入射粒子的能量增加而增加, 且反冲核的产额随入射粒子能量增加而趋于增多。比较两种粒子在含钨布线层器件与无钨布线层器件的反应结果可知, 相同能量的氦离子或者质子, 含钨布线层器件内

产生的反冲核比无钨布线层器件内产生的反冲核的平均能量要高, 且反冲核的产额也在增加。主要原因是空间高能粒子穿过布线层钨, 使重金属钨核多次分裂发生级联反应, 同时非弹性碰撞未达到热平衡时会有碎裂和拾取。计算分析了顶层金属布线存在对器件体硅中产生次级粒子种类和平均能量的影响, 为了获取对单粒子效应而言的关键参数 LET 与次级重核和布线层结构之间关系。分析不同能量的质子和氦核与两种不同结构体元之间相互作用的 LET 值分布如图 4 所示。

从图 4 (a) 中可知: 入射质子能量越高, LET 值获得的几率越大, 质子对器件产生的 SEE 概率越大。半导体器件覆盖钨层后, 导致器件产生 SEE 的概率变大得更明显, 而半导体器件内产生的次级粒子的 LET 值主要分布为 $0 \sim 25 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 且布线层含钨结构单元产生次级重离子的 LET 值大于 $17 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的次级粒子的产额下降趋势减弱; 由图 4 (b) 可知: 高能氦核与布线层含钨的半导体器件相互作用产生次级重离子 LET 值比布线层不含钨的半导体相互作用产生的次级重离子 LET 值要大, 其器件内产生的次级粒子的 LET 值主要分布为 $0 \sim 35 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$, 且 LET 值大于 $20 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的次级粒子产额下降趋势减

弱。导致高 LET 值次级粒子产生的主要原因是随着入射粒子能量增加导致高 Z 次级粒子的产额及能量都在增加,沉积在器件灵敏区内的沉积能量也增加,而覆盖 W 层后又加大了高 Z 粒子的产额,更导致器件灵

敏区内沉积能量增加明显。说明半导体器件中覆盖高 Z 重金属材料能诱导高能粒子产生高 LET 值的次级重离子,导致器件发生 SEE 的概率增大。该模拟结果与国外Michael^[12-15]的结论符合的很好。

表1 质子与器件布线层作用后产生的粒子种类及平均能量
Table 1 The particle type and average energy generated by proton and metals interconnect overlayers

线层种类		布线层含钨/MeV						布线层不含钨/MeV					
		70		170		410		70		170		410	
	Z	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量
15	P	15	1.399	14	1.582	14	1.667	8	1.034	17	1.106	15	1.744
14	Si	4 121	0.510	4 296	0.654	4 758	0.674	4 005	0.534	4 138	0.659	4 713	0.695
13	Al	1 205	1.310	1 202	1.316	1 855	1.318	1 074	1.160	1 194	1.198	1 918	1.266
12	Mg	1 097	1.234	1 212	1.535	1 652	1.582	1 003	1.292	1 181	1.374	1 670	1.445
11	Na	281	2.340	482	2.341	715	2.516	248	1.724	463	1.811	729	2.126
10	Ne	172	0.710	370	1.300	568	1.499	155	0.654	396	1.360	581	1.359
9	F	16	1.434	109	2.093	212	2.630	24	1.363	115	1.514	210	1.664
8	O	23	1.182	209	1.247	389	1.422	27	0.880	189	1.032	410	1.206
7	N	4	1.675	190	1.789	351	1.825	4	0.916	119	0.993	345	1.230
6	C	3	0.597	61	0.859	221	1.787	3	0.595	59	0.816	210	1.020
5	B	0	0.000	1	0.008	26	0.464	0	0.000	3	0.005	26	0.569
4	Be	0	0.000	5	0.497	22	0.130	0	0.000	3	0.178	19	0.672
3	Li	1	0.010	14	0.247	40	0.278	3	0.006	11	0.034	42	0.124
2	He	690	0.022	1180	0.025	2288	0.030	709	0.019	1174	0.023	2189	0.026

表2 氦核与器件布线层作用后产生的粒子种类及平均能量
Table 2 The particle type and average energy generated by alpha and metals interconnect overlayers

布线层种类		布线层含钨						布线层不含钨					
		500 MeV		8 GeV		18 GeV		500 MeV		8 GeV		18 GeV	
	Z	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量	反冲核数	平均能量
15	P	58	2.069	27	2.357	16	2.626	54	1.887	16	1.924	14	1.950
14	Si	1 612	1.285	3 622	1.885	3 739	1.899	1 467	1.811	3 484	1.822	3 658	1.844
13	Al	2 313	1.611	6 505	1.667	7 411	1.681	2 312	1.619	6 512	1.664	7 152	1.672
12	Mg	2 165	1.450	4 992	1.466	5738	1.788	2 053	1.256	4 045	1.386	5 733	1.774
11	Na	1 190	1.410	2 538	1.538	2 734	2.091	1 177	1.412	2 525	1.500	2 660	2.090
10	Ne	990	1.025	1 997	1.009	2 227	1.508	903	0.018	2 110	0.989	2 247	1.466
9	F	430	0.950	956	0.964	1 029	1.467	379	0.899	876	0.898	1 020	1.433
8	O	889	0.563	2 249	0.563	2 429	0.982	912	0.668	2 296	0.767	2 416	0.948
7	N	898	0.432	2 495	0.407	2 708	0.720	850	0.550	2 446	0.609	2 635	0.669
6	C	730	0.274	2 684	0.243	2 725	0.430	744	0.324	2 574	0.366	2 688	0.475
5	B	97	0.182	592	0.191	675	0.224	102	0.174	593	0.194	666	0.257
4	Be	44	0.067	334	0.071	382	0.134	60	0.119	349	0.193	360	0.214
3	Li	150	0.052	1011	0.061	1 094	0.085	152	0.051	979	0.050	1 080	0.080
2	He	18492	0.017	44 909	0.019	47 359	0.223	17 907	0.016	45228	0.019	46 968	0.023

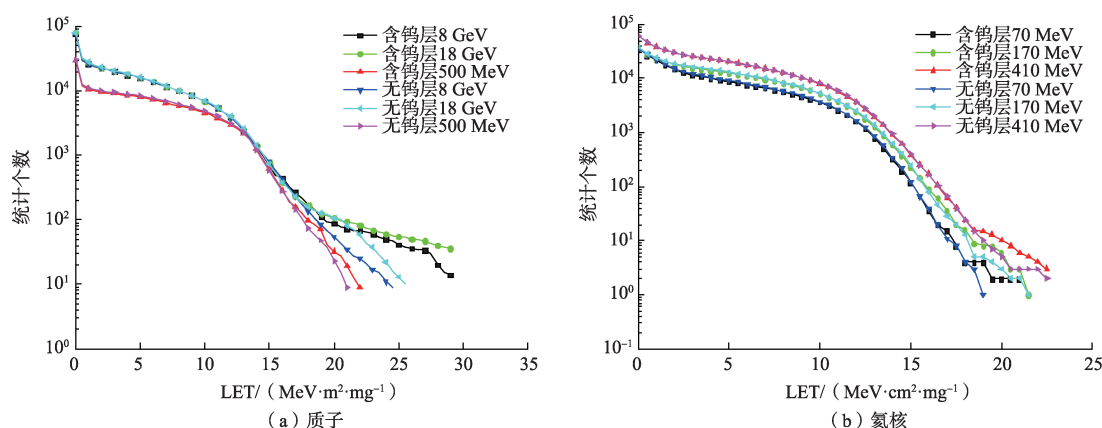


图4 高能粒子与器件模型产生裂变重离子 LET 分布

Fig. 4 High energy particle and device model generate fission heavy ion LET distribution

3 结 论

本文对高能粒子在不同布线层结构器件的相互作用进行了Monte Carlo计算, 模拟计算结果表明:

1) 高能粒子与半导体器件相互作用后产生的次级重离子的种类多, 产生的高Z次级重离子如Si、Al、Mg、Na和Ne等占核反应产物的绝大部分, 次级重离子的平均能量随入射粒子的能量增加而增加, 且反冲核的产额随入射粒子能量增加而趋于增多。

2) 相同能量的氦离子或者质子与含钨布线层半导体器件相互作用后产生的反冲核比与无钨布线层半导体器件相互作用后产生的反冲核的平均能量要高, 且产额也增加得更明显。

3) 质子入射到含钨布线层半导体器件中产生的次级重离子LET值主要分布为0~25 MeV·cm²/mg, 且LET值大于17 MeV·cm²/mg的次级重离子产额下降趋势减弱, 同时低LET值的次级重离子占产额的绝大多数。氦核入射到含钨布线层半导体器件中产生的次级粒子的LET值主要分布为0~35 MeV·cm²/mg, LET值大于20 MeV·cm²/mg的次级重离子产额下降趋势减弱, 同时低LET值的次级粒子占产额绝大多数。

4) 半导体器件中布线层增加了高Z次级粒子的产额, 导致半导体器件发生SEE的概率增加, 因此基于高能粒子与半导体材料相互作用的研究结果可为元器件单粒子效应风险分析提供重要依据, 为器件的合理设计提供参数。

参 考 文 献

[1] NEILL P M, BADHWAR G D, CULPEPPER W X, et al. Inter nuclear cascade - evaporation model for LET spectra of 200 MeV protons used for parts testing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1998, 45(6): 2467-2473.

[2] CELLERE G, PACCAGNELLA A, VISCONTI A, et al. Direct

evidence of secondary recoiled nuclei from high energy protons[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008, 55(6): 2903-2908.

[3] 贺朝会, 陈晓华, 李国政. 高能质子单粒子翻转效应的模拟计算[J]. 计算物理, 2002, 19(4): 367-370.

HE C H, CHEN X H, LI G Z. Simulation calculation of single event upset effects for high energy protons[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2002, 19(4): 367-370.

[4] 王同权, 张若棋, 沈永平, 等. 高能离子在材料中运输的蒙特卡罗模拟[J]. 国防科技大学学报, 2001, 23(1): 105-108.

WANG T Q, ZHANG R Q, SHEN Y P, et al. The Monte Carlo simulation of the high energy ions transport in materials[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001, 23(1): 105-108.

[5] 赵雯, 郭晓强, 陈伟, 等. 质子与金属布线层核反应对微纳级静态随机存储器单粒子效应的影响分析[J]. 物理学报, 2015, 64(17): 178501-1-178501-7.

ZHAO W, GUO X Q, CHEN W, et al. Effects of nuclear reactions between protons and metal interconnect overlayers on single event effects of micro/nano scaled static random access memory[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(17): 178501-1-178501-7.

[6] 王同权, 张文勇. 高能质子核反应截面的Monte Carlo计算[J]. 清华大学学报, 2007, 47(z1): 1072-1075.

WANG T Q, ZHANG W Y. Monte Carlo simulations of nuclear reactions induced by high energy protons[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(z1): 1072-1075.

[7] PAUL E D. Physics-based simulation of single-event effects[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, 5(3): 343-357.

[8] 樊胜, 于洪伟, 申庆彪, 等. 与散裂中子靶物理相关的理论计算程序探讨II厚靶计算[J]. 原子核物理评论, 2002, 19(4): 390-394.

FAN S, YU H W, SHEN Q B, et al. Theoretic programs related to spallation neutron source for ADSII thick target simulations[J]. Nuclear Physics Review, 2002, 19(4): 390-394.

[9] 杨涛, 李家才, 唐兴华, 等. BEPCII-LINAC 试验束次级粒子的模拟分析及质子能谱测量[J]. 核技术, 2011, 34(4): 1024-1030.

YANG T, LI J C, TANG X H, et al. Simulation of secondary particles and measurement of the proton spectrum on BEPCII-LINAC[J]. Nuclear Techniques, 2011, 34(4): 1024-1030.

[10] SCOTT R M, EDWARD A B, MICHAEL A X, et al. The simulation of damage tracks in silicon[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004, 51(5): 2846-2850.

- [11] REED R A, LAUENSTEIN J M, SCHRIMPF R D, et al. Impact of ion energy and splices on single event effects analysis[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007, 54(6): 2312-2321.
- [12] MICHAEL A C, VISHWA R, ROBERT A W, et al. The effect of high-Z materials on proton-induced charge collection[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3212-3218.
- [13] MICHAEL A C, KEVIN M W, ROBERT A W, et al. The effects of neutron energy and high-Z materials on single event upsets and multiple cell upsets[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(6): 2591-2598.
- [14] MICHAEL A C, ROBERT A W, RONALD D S. The effects of nuclear fragmentation models on single event effect prediction[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, 56(6): 3158-3164.
- [15] DODD P E, SHANEYFELT M R, PAILLET P. Tungsten-filled silicone composites for moderating proton radiation effects in electronics[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2007 (7): 1700-1704.

作者简介:

杨涛(1984-),男,助理研究员,主要研究方向:空间环境效应仿真及试验。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号空间中心(100190)

电话:(010)62586410

E-mail: yangtao@nssc.ac.cn

邵志杰(1987-),男,高级工程师,主要研究方向:航天器系统可靠性技术。

通信地址:上海闵行区中春路1555号(201101)

电话:(021)24183294

E-mail: shaozhijie@aliyun.com

蔡明辉(1980-),男,副研究员,主要研究方向:空间环境效应仿真及试验。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号空间中心(100190)

电话:(010)62586410

E-mail: caimh@nssc.ac.cn

贾鑫禹(1996-),男,工程师,主要研究方向:空间环境效应仿真及试验。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号空间中心(100190)

电话:(010)62586410

E-mail: jiaxinyu@nssc.ac.cn

韩建伟(1970-),男,研究员,主要研究方向:空间环境效应仿真及试验。

通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号空间中心(100190)

电话:(010)62586410

E-mail: hanjw@nssc.ac.cn

Simulation of the Interaction's Effects on Single Event Effects between High-Energy Particles and Interconnect Overlayers within Semiconductor Devices

YANG Tao¹, SHAO Zhijie², CAI Minghui^{1,3}, JIA Xinyu^{1,4}, HAN Jianwei^{1,3}

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: By simplifying the sensitive volume of semiconductor devices, a typical Geometric Model of CMOS device is has been built. The recoiled nuclei, average energy and LET induced by Cosmic High Energy Protons and High Energy alpha particles in the sensitive units are simulated. The effects of heavy metals within the devices' metal interconnect overlayers on the LET of Single Event Effect were studied, and the result shows that effects of high energy particles on the tungsten in the metal wiring layers can increase LET of secondary particles, and thus heighten the incidence of single event upset.

Key words: high-energy particles; CMOS technique device; LET; SEE; GEANT4

High lights:

- It provides important basis for determining the anti-single particle effect index of spacecraft in deep space exploration.
- The influence of different metals interconnect overlayers structure on single particle effect is presented.
- The LET distributions of different high-energy particles to different metals interconnect overlayers structural units are given.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱恬]