

应用中国散裂中子源 9 号束线端研究 65 nm 微控制器大气中子单粒子效应*

胡志良¹⁾²⁾³⁾ 杨卫涛¹⁾ 李永宏^{1)†} 李洋¹⁾ 贺朝会¹⁾ 王松林²⁾³⁾
周斌²⁾³⁾ 于全芝²⁾⁴⁾ 何欢¹⁾ 谢飞¹⁾ 白雨蓉¹⁾ 梁天骄^{2)3)‡}

1) (西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049)

2) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

(2019 年 8 月 5 日收到; 2019 年 9 月 9 日收到修改稿)

采用设置和不设置镉中子吸收体两种方式, 利用中国散裂中子源 9 号束线 (CSNS-BL09) 对 65 nm 微控制器进行了大气中子单粒子效应辐照测试. 测试中探测到的效应主要为单位翻转. 测试结果表明, 对于该款微控制器, 热中子引起的中子单粒子翻转占比约 65%; 进一步分析表明, 热中子与 ^{10}B 反应产生的 0.84 MeV ^7Li 可能是诱发微控制器单粒子翻转的主要因素.

关键词: 65 nm, 热中子, 中国散裂中子源, 中子单粒子效应

PACS: 85.30.De, 21.60.Ka

DOI: 10.7498/aps.68.20191196

1 引言

近年来, 随着制造工艺的提升, 大气中子辐照导致的先进电子系统可靠性问题正在引发关注^[1-5], 而先进微控制器 (MCU) 广泛应用于工业自动化控制、消防和安全系统、医疗仪器、物联网应用等领域, 其在大气中子环境下的可靠性问题亟待研究^[6].

中子虽不带电, 但其与物质作用可引发一些效应^[7], 如中子入射电子系统会导致位移损伤效应、总剂量效应和单粒子效应 (SEE)^[8] 等. 对于纳米级 MCU, 需重点关注 SEE^[9]. 中子之所以能够导致电子系统发生 SEE, 是因为其会与半导体中硅原

子等发生反应产生次级带电粒子, 如质子、 α 粒子、反冲重核等, 这些带电粒子可通过电离等方式沉积能量 (α 粒子、反冲重核等), 一旦敏感体积内沉积的能量超过其阈值, 就会导致效应发生.

对于硅基电子系统, 中子诱发单粒子效应的次级粒子主要分为两类: 一类为热中子与 ^{10}B 发生核反应产生的次级粒子, 另一类为高能中子 (中子能量 $E_n \geq 1$ MeV) 与硅原子核发生核反应或散裂反应产生的次级粒子. 图 1 为 B, Si 等核素的中子反应截面. 其中图 1(a) 为硼、硅同位素的中子截面, 中子能量范围为 10^{-11} —1 MeV. 图 1(b) 为 ^{28}Si , ^{27}Al , ^{184}W 等的中子截面 (本文所研究的 MCU 衬底为 Si, 钝化层, 互联层中亦存在 N, O, Al, W),

* 国家自然科学基金 (批准号: 11575138, 11835006, 11690040, 11690043, 11705216) 和广东省科技计划项目 (批准号: 2017B090901068, 20170921) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yonghongli@mail.xjtu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: tjliang@ihep.ac.cn

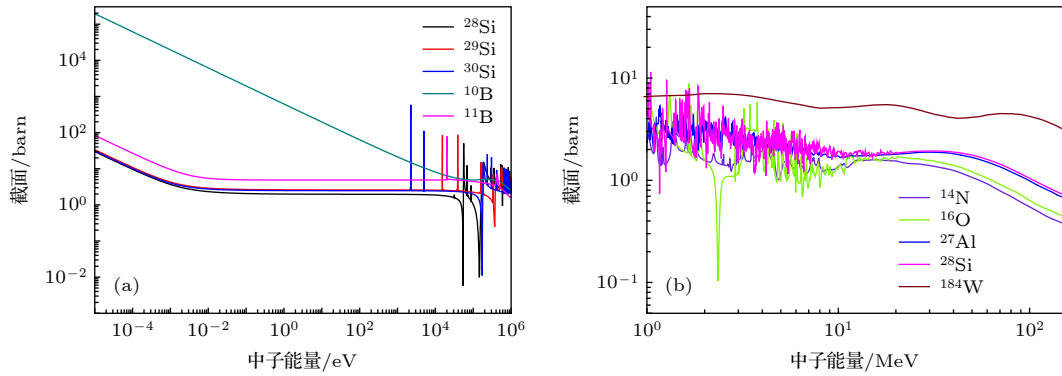


图 1 半导体中各核素的中子反应截面 (a) 与 B, Si 的同位素的反应截面, 对应中子能量范围 10^{-11} —1 MeV; (b) 与 ¹⁴N, ¹⁶O, ²⁷Al, ²⁸Si, ¹⁸⁴W 的反应截面, 对应中子能量范围 1—150 MeV

Fig. 1. Cross sections of different energy neutrons interacting with various nuclear atoms in semiconductor: (a) Cross sections of B and Si isotopes, the neutron energy interval is 10^{-11} –1 MeV; (b) cross sections of ¹⁴N, ¹⁶O, ²⁷Al, ²⁸Si and ¹⁸⁴W, the neutron energy interval is 1–150 MeV.

对应中子能量范围为 1—150 MeV^[10]. 由图 1 可知, 热中子与 ¹⁰B 的反应截面远高于其他核素, 同时也比高能中子与 ²⁸Si, ²⁷Al, ¹⁸⁴W 等的反应截面要高三个数量级以上^[11], 这意味着对于纳米级工艺电子系统, 即使其中含有微量 ¹⁰B, 热中子对其可靠性影响也应引起重视.

对于 180 nm 以上工艺电子系统, 一般认为与热中子发生反应的 ¹⁰B 主要来自于电子系统封装中的硼磷硅玻璃 (BPSG)^[12]. 对于更小工艺的纳米级电子系统, 其已不再使用含 BPSG 封装. 但是, 近年来有研究表明半导体阱中、互联层以及半导体制造和刻蚀过程中引入的 ¹⁰B 造成纳米级电子系统 SEE 效应有可能超过高能重离子^[13,14].

当前, 纳米级工艺 MCU 主要应用于对可靠性要求较高的各类地面工况中 (如医疗设备、工艺控制设备等), 影响其可靠性的一个重要因素就是大气中子. 大气中子能谱很宽, 从 meV 到 GeV, 既包含热中子亦包含高能中子, 因此, 其诱发 SEE 的测试和分析较为复杂^[15]. 对于大气环境下高能中子诱发的 SEE, 一种认为是由 10 MeV 以上高能中子导致^[16], 另一种则认为 1—10 MeV 中子贡献不可忽略, 特别是对于纳米级电子系统, 更应考虑 1 MeV 以上中子的贡献^[17]. 对于中子源, IEC62396-2 规定可用于辐照试验的中子源有: 散裂中子源、准单能中子源、单能 14 MeV D-T 中子源^[18]. 其中, 散裂中子源因其中子能谱最接近大气中子能谱, 是研究大气中子 SEE 的最佳选择. 中国散裂中子源 (CSNS) 的建成与运行使得在我国利用散裂中子源开展大气中子 SEE 研究成为现实.

本文利用中国散裂中子源 9 号束线 (CSNS-BL09) 对 65 nm 工艺商用 MCU 进行了大气中子 SEE 测试研究. 与此同时, 比较并分析了不同能段中子导致的 65 nm MCU 单粒子效应差异.

2 MCU 辐照实验

2.1 测试硬件

测试对象为德州仪器公司 (TI) 的 Tiva C 系列微控制, 型号为 TM4 C1294 NCPDT, 其具有以下特征^[6]:

- 1) 65 nm 互补金属氧化物半导体制造工艺;
- 2) 芯片内集成 ARM Cortex-M4 内核, 1 MB 闪存、6 kB 电可擦可编程只读存储器和 256 kB 片上静态随机存取存储器 (SRAM);
- 3) 芯片外集成丰富的外设及网络通讯接口.

本次测试的辐照区域为测试板主芯片部分 (DUT), 测试负载为 256 kB 片上 SRAM 中的 64 kB. 为了排除芯片封装中元素对研究结果的影响, 实验前对芯片进行了开盖处理. 为了进一步明确该 MCU 纵向结构信息, 实验前对同批次芯片进行了聚焦离子束分析, 结果表明该款 65 nm MCU 为 5 层铜质结构, 从钝化层到硅衬底表面厚度约为 7 μ m.

2.2 辐照源

CSNS 是利用加速器加速质子轰击钨靶产生并利用中子的大科学装置, 其设计功率为 100 kW, 入射质子最高能量为 1.6 GeV^[19–21]. 本次实验在

9号束线 (BL-09) 上进行, 束流从质子入射方向 46° 角处经退耦合窄化液氢慢化器引出, 可垂直作用于待测芯片, 所引出中子近似均匀分布. 图 2 为两组实验条件下的中子能谱, 为蒙特卡罗粒子输运程序计算所得. 其中未放置镉吸收体 (对照组) 的中子能谱, 采用中子飞行时间法测量了 5 MeV 以下能区中子能谱, 理论结果与实验数据基本一致.

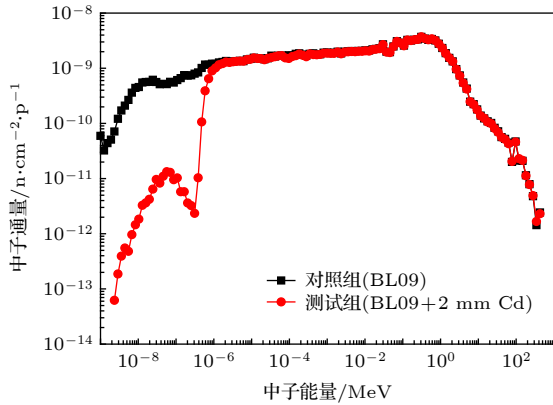


图 2 实验束线中子能谱

Fig. 2. Neutron spectrum of the experiments.

2.3 测试实验

通过位置调节, 使主芯片中心与孔中心处于同一水平, 如图 3(a) 所示. 中子从距离慢化器表面

8.95 m、孔径为 2 cm 的孔洞中引出轰击待测芯片.

大气中子中热中子部分易于屏蔽, 通过设置 2 mm 厚镉中子吸收体即可改变中子能谱, 对比不同辐照条件下诱发的 SEE 差异即可分析热中子对 65 nm MCU SEE 的影响. 具体实施如下:

1) 测试组, 不包含热中子, 即在出射孔处设置 2 mm 厚镉吸收体以吸收热中子, 其可有效阻挡 0.5 eV 以下中子;

2) 对照组, 包含热中子, 即引出中子直接轰击 DUT.

图 3(b) 和图 3(c) 分别为两组实验现场, 其中图 3(b) 中设置了镉中子吸收体 (蓝色虚线区域), 图 3(c) 中未设置. 测试采用动态形式, 即对 64 kB 的存储单元连续地执行写、读以及对比操作, 写入数据为 0 xA5 A5 A5 A5^[22]. 两组实验针对同一个测试板, 利用同一个测试系统在室温和正常供压 (5 V) 下进行, 每组辐照时间约 3 h, 测试时间间隔为 10 h.

3 结果与讨论

两组实验均只探测到了单位翻转 (SBU), 未探测到其他效应. 其中, 测试组共探测到 SBU 16 次, 对照组共探测到 SBU 63 次. 根据图 2 给出的测试组和对照组中子能谱, 从谱型上看 0.5 eV 以上能

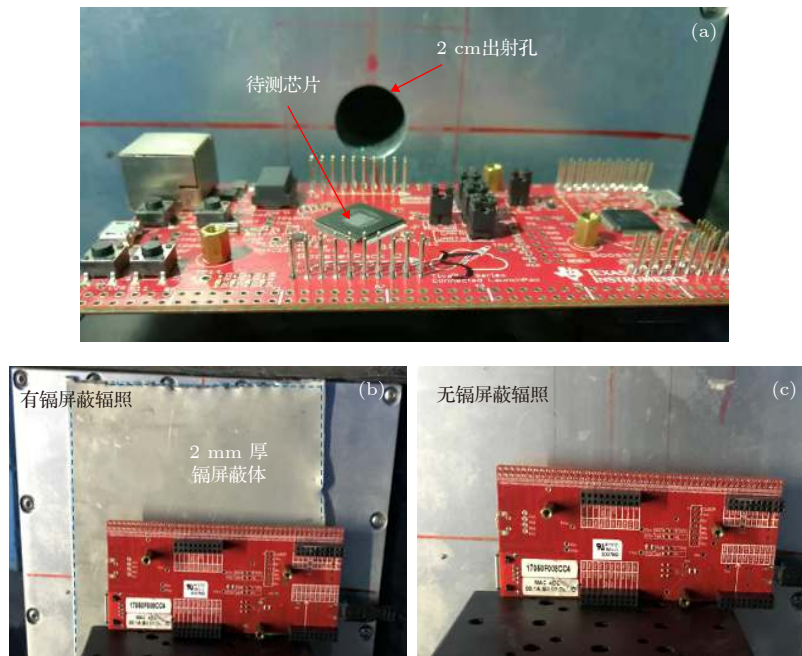


图 3 65 nm MCU 散裂中子辐照测试现场图 (a) DUT 与出射孔相对位置图; (b) 含 2 mm 厚镉屏蔽体测试现场图; (c) 无镉屏蔽测试现场图

Fig. 3. 65 nm MCU neutron test site: (a) The device under test and the 2 cm ejection hole; (b) with 2 mm cadmium shielding; (c) without cadmium shielding.

区, 中子通量基本一致, 0.5 eV 以下能区, 通量相差至少一个量级, 表明 2 mm 厚镉中子吸收体可有效吸收中子. 后续讨论中, 将 0.5 eV 以下能区中子视为热中子, 0.5 eV 以上中子称为镉上中子.

3.1 测试结果

表 1 给出了两组实验条件下中子单粒子翻转位数及中子注量数据, 其中中子单粒子翻转位数为实验值, 中子注量数据则是归一到单个入射质子的蒙特卡罗计算值与总质子数的乘积, 总质子数是 CSNS 运行时, 相应时间段内的打靶质子数. 为对比方便, 对照组中引入了一组质子数归一值, 该值为总质子数从 7.21×10^{17} 降至 5.33×10^{17} 时所得.

由表 1 可得, 同一总质子束流条件下, 测试组发生了 16 次 SBU, 对照组为 46 次. 两组实验中, 镉上中子能谱完全一致. 表 1 中归一化处理, 测

试组与对照组推导值中镉上中子注量相差仅为 2.73%, 因此同一器件同等中子注量条件下测试组与对照组中镉上中子引起的 SBU 次数相等, 即对照组推导值中 46 次 SBU, 最多有 16 次是镉上中子引起, 至少有 30 次是由热中子引起. 由此可知, 对于此款 65 nm MCU, 热中子导致的单粒子翻转占比达 65%, 高能中子与大量元素的反应产物引起的单粒子效应占 35%. 如只考虑镉上中子的贡献, 其 SEU 敏感性至少被低估了约 65%.

文献 [23] 指出中, 半导体阱中, 互联层中以及半导体刻蚀过程中引入的 ^{10}B 能够显著影响纳米级电子系统可靠性. 文献 [24] 通过对纳米级半导体进行二次离子质谱分析指出, 相对于半导体中的 Cu, O, N 等核素, ^{10}B 正好处于纳米级工艺半导体晶体管正上方, 其与晶体管敏感区域的紧密性是热中子影响较大的一个关键因素.

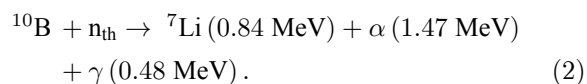
表 1 两组辐照下的实验数据
Table 1. The experiment data in two irradiations.

物理量	测试组		对照组	
	实验值	实验值	实验值	推导值
SBU次数	16	63	63	46
总质子数/p	5.3363×10^{17}	7.2131×10^{17}	7.2131×10^{17}	5.3363×10^{17}
中子注量/n·cm ⁻²	镉上中子	7.6997×10^{10}	1.0703×10^{11}	7.9182×10^{10}
	热中子	1.2585×10^8	1.0062×10^{10}	7.4440×10^9

3.2 结果分析

中子能否诱发纳米级电子系统 SEE 主要取决于所产生的次级粒子, 而中子能量决定了次级粒子种类和能量. 从表 1 两组结果可得差异主要来自热中子.

热中子 (n_{th}) 与 ^{10}B 主要发生如 (1), (2) 式所述的反应, 其中前者发生概率为 6.3%, 后者发生概率为 93.7%^[25]. 随着电子系统工艺尺寸的减小, 临界电荷的降低, 上述反应产生的次级粒子如果在敏感体积中沉积少许能量, 就有可能导致 65 nm MCU 发生 SBU.



由 (1) 和 (2) 式可知, 热中子与 ^{10}B 反应的次级粒子主要是 ^7Li 和 ^4He . 图 4 所示为不同能量 ^7Li 和 α 粒子的线性能量转移 (LET) 值和硅中射程^[26].

由图 4 可知 0.84 MeV 的 ^7Li 硅中射程约为 2.5 μm , 1.47 MeV 的 α 粒子硅中射程约为 5 μm . 因为对于该 MCU, 从钝化层到硅衬底表面厚度约为 7 μm , 由此可知这两种次级粒子的硅中射程小于芯片厚度, 从而验证与热中子发生反应的 ^{10}B 的确并非来

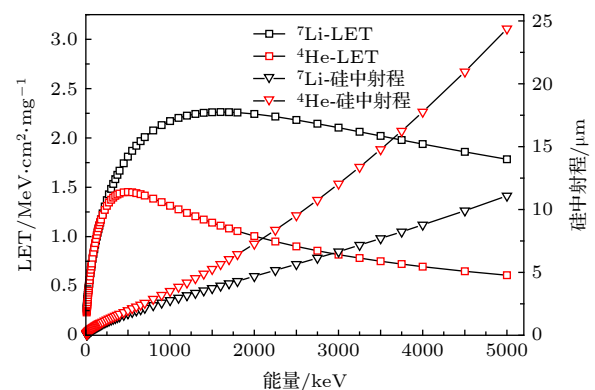


图 4 热中子与 ^{10}B 反应产生次级粒子在不同能量下的 LET 与硅中射程

Fig. 4. The LET values and ranges of secondary particles from thermal neutrons interacting with ^{10}B .

自于封装结构,而是来自于半导体内部阱掺杂或者互联层等.

当 ${}^7\text{Li}$ 和 α 粒子产生于芯片内部时,其完全有可能穿敏感体积(SV),通过直接电离沉积能量并导致SBU.图5所示,为65 nm MCU内部热中子与钨互联层中 ${}^{10}\text{B}$ 发生反应产生次级粒子沉积能量示意图.图中,绿色与紫色椭圆区域为两种次级粒子可能沉积能量的区域示意图,如果敏感体积位于这一区域内,就有可能导致单粒子翻转(SEU).

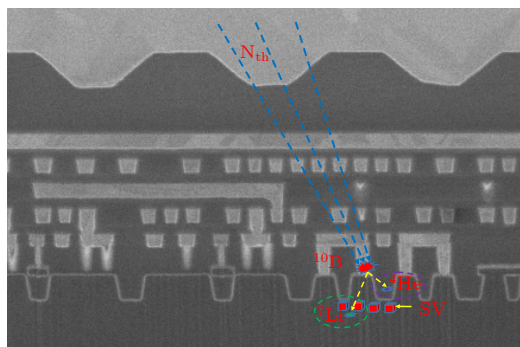


图5 65 nm MCU内部热中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应次级粒子沉积能量示意图

Fig. 5. The sketch of thermal neutron interacting with ${}^{10}\text{B}$ in 65 nm MCU.

文献[27]通过模拟给出了同类工艺下65 nm SRAM单粒子翻转截面与LET的威布尔拟合结果,该拟合中对应LET阈值(LET_{th})约为 $1.15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,饱和截面(σ_{∞})约为 $4.70 \times 10^{-9} \text{ cm}^2\cdot\text{bit}^{-1}$.热中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应生成的 $0.84 \text{ MeV } {}^7\text{Li}$,其LET为 $2.10 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$ 大于阈值 $1.15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,且其在硅中射程为 $2.46 \mu\text{m}$,在末端布拉格峰附近,沉积能量可以达到最大,易导致SEU.而 $1.47 \text{ MeV } \alpha$ 粒子,其LET为 $1.15 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1}$,接近65 nm SRAM单粒子效应截面 LET_{th} .由于阈值附近相比于较高LET处诱发SEU的概率低,因此推断热中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应生成的 $0.84 \text{ MeV } {}^7\text{Li}$ 可能是导致65 nm MCU发生SEE的主要原因.

由于大气中子能谱从meV到GeV,在利用散裂中子源BL09束线评估65 nm MCU大气中子环境下的SEE敏感性时,采用不设置镉吸收体的辐照更合理.同时,对于大气环境下可靠性要求较高的65 nm MCU应用环境,如设计2 mm厚镉屏蔽层,可将器件可靠性提高.对于更小工艺电子系

统大气中子SEE,在研究其大气中单粒子效应时,热中子影响应引起重视.

4 结 论

针对65 nm MCU中的片上存储器,利用中国散裂中子源9号束线进行了大气中子单粒子效应敏感性初步测试.测试结果表明,对于65 nm MCU的大气中子单粒子效应,第一:测试束线应含热中子,否则其单粒子效应敏感性可能被低估约65%.第二:热中子与 ${}^{10}\text{B}$ 反应生成的 $0.84 \text{ MeV } {}^7\text{Li}$ 可能是热中子诱发65 nm MCU单粒子效应的主要原因.

参考文献

- [1] Cai M H, Han J W, Li X Y, Li H W, Zhang Z L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6659 (in Chinese) [蔡明辉, 韩建伟, 李小银, 李宏伟, 张振力 2009 物理学报 **58** 6659]
- [2] Leray J L 2007 *Microelectron. Reliab.* **47** 1827
- [3] Austin L, Saar D, Joseph J F, Carl C, Peter A 2005 *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* **5** 317
- [4] Baggio J, Lambert D, Ferlet-Cavrois V, Paillet P, Marcandella C, Duhamel O 2007 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **54** 2149
- [5] Lei Z F, Zhang Z G, En Y F, Huang Y 2018 *Chin. Phys. B* **27** 066105
- [6] TivaTM TM4 C1294 NCPDT. Microcontroller DATA SHEET
- [7] Chen D, Jia W B 2015 *Applied Neutron Physics* (Beijing: Science Press) p44 (in Chinese) [陈达, 贾文宝 2015 应用中子物理学 (北京: 科学出版社) 第44页]
- [8] Zhang Z X, Wei Z Y, Fang M H, Yang Y C, Cheng G Y 2009 *Eq. Environ. Eng.* **6** 5 (in Chinese) [张紫霞, 魏志勇, 方美华, 杨永常, 陈国云 2009 装备环境工程 **6** 5]
- [9] Yang S C, Qi C, Liu Y, Guo X Q, Jin X M, Chen W, Bai X Y, Lin D S, Wang G Z 2015 *High Pow. Las. Part. Beam* **27** 4 (in Chinese) [杨善潮, 齐超, 刘岩, 郭晓强, 金晓明, 陈伟, 白小燕, 林东生, 王桂珍 2015 强激光与粒子束 **27** 4]
- [10] Brookhaven National Laboratory, National Nuclear Data Center (NNDC), Evaluated Nuclear Data File (ENDF): <https://www.nndc.bnl.gov/exfor/endlf00.jsp>[2019-5-16]
- [11] Dai C J, Liu X Q, Liu Z L, Liu B L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 152801 (in Chinese) [戴春娟, 刘希琴, 刘子利, 刘伯路 2013 物理学报 **62** 152801]
- [12] Kobayashi H, Kawamoto N, Kase J, Shiraishi K 2009 *IEEE International Reliability Physics Symposium* Montreal, QC, Canada, April 26–30, 2009 p206
- [13] Antran J L, Serre S, Semikh S, Munteanu D, Gasiot G, Roche P 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 2658
- [14] Clive D, Alex H, Karen F, Adam F, Peter T 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 3596
- [15] Chen D M, Sun X P, Zhong Z Y, Feng G Q, Bai H, Yang H, Di T 2018 *Aeronau. Sci. Tech.* **29** 67 (in Chinese) [陈冬梅, 孙旭朋, 钟征宇, 封国强, 白桦, 阳辉, 底桐 2018 航空科学技术 **29** 67]
- [16] JEDEC 2006 Measurement and Reporting of Alpha Particles

- and Terrestrial Cosmic RayInduced Soft Errors in Semiconductor Devices: JESD89 A, JEDEC STANDARD, JEDEC Solid State Technology Association
- [17] Yang W T, Li Y, Li Y H, Hu Z L, Xie F, He C H, Wang S L, Zhou B, He H, Waseem K, Liang T J 2019 *Microelectron. Reliab.* **99** 119
- [18] IEC 62396-2 Process Management for Avionics—Atmospheric Radiation Effects Part 2: Guidelines for Single Event Effects Testing for Avionics Systems. IEC 2012
- [19] Yu Q Z, Yin W, Liang T J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 052501 (in Chinese) [于全芝, 殷雯, 梁天骄 2011 物理学报 **60** 052501]
- [20] Shen F, Liang T R, Yin W, Yu Q Z, Zuo T S, Yao Z E, Zhu T, Liang T J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 152801 (in Chinese) [沈飞, 梁泰然, 殷雯, 于全芝, 左太森, 姚泽恩, 朱涛, 梁天骄 2014 物理学报 **63** 152801]
- [21] Wang X, Zhang F Q, Chen W, Guo X Q, Ding L L, Luo Y H 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 052901 (in Chinese) [王勋, 张凤祁, 陈伟, 郭晓强, 丁李利, 罗尹虹 2019 物理学报 **68** 052901]
- [22] Yang W T, Du X C, He C H, Shi S T, Cai L, Hui N, Guo G 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 545
- [23] Cecile W, Sabrina H, Nicolas G, Jaime S, Jerome B, Florent M, Maria M 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1851
- [24] Wen S J, Pai S Y, Wong R, Romain M, Tam N 2010 *IEEE International Integrated Reliability Workshop Final Report* Fallen Leaf, CA, USA, Oct. 17–21, 2010 p31
- [25] Tian Y S, Hu Z L, Tong J F, Chen J Y, Peng X Y, Liang T J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 142801 (in Chinese) [田永顺, 胡志良, 童剑飞, 陈俊阳, 彭向阳, 梁天骄 2018 物理学报 **67** 142801]
- [26] SRIM 2013 Particle Interactions with Matter [Online]. Available: <http://www.srim.org/>[2019-5-4]
- [27] Muhammad S, Chechenin N. G, Frank S, Usman A, Muhammad U, Zhu M, Khan 2017 *Microelectron. Reliab.* **78** 11

Atmospheric neutron single event effect in 65 nm microcontroller units by using CSNS-BL09*

Hu Zhi-Liang¹⁾²⁾³⁾ Yang Wei-Tao¹⁾ Li Yong-Hong^{1)†} Li Yang¹⁾
 He Chao-Hui¹⁾ Wang Song-Lin²⁾³⁾ Zhou Bin²⁾³⁾ Yu Quan-Zhi²⁾⁴⁾
 He Huan¹⁾ Xie Fei¹⁾ Bai Yu-Rong¹⁾ Liang Tian-Jiao^{2)3)‡}

1) (*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 5 August 2019; revised manuscript received 9 September 2019)

Abstract

The 65 nm-microcontroller units (MCUs) are being widely used in critical terrestrial tests, and the risk from atmospheric neutron becomes more and more serious. The spallation neutron source contains broad energy spectrum, which is different from the mono-energetic neutron sources, and is the most ideal irradiation source for atmospheric neutron single event effect (SEE). Benefiting from China Spallation Neutron Source (CSNS), the atmospheric neutron SEE in 65 nm-MCUs is tested for the first time at the CSNS 9th beam line in China. The beam line is located in the 46° direction along the proton hitting the target, and the neutron spectrum is achieved to range from meV to 1.6 GeV. The test is conducted in two conditions in order to investigate the influence of thermal neutron. One is that the thermal neutrons are shielded with a 2-mm-thick cadmium slat at the beam ejection hole, and the other is not. The detected effects are single bit upset (SBU) events. 16 SBU events are detected when 5.3363×10^{17} protons hit the tungsten target without the thermal neutron, and 63 SBU events are recorded in the condition of 7.2131×10^{17} protons striking the target and thermal neutrons included. Comparing with the high energy neutron (>1 MeV), the SBU events caused by thermal neutron contribute about 65% of the number of total upset events. The test results preliminarily illustrate that the thermal neutrons dominate the 65 nm MCU reliability.

Keywords: 65 nm, thermal neutron, China Spallation Neutron Source, single event effect

PACS: 85.30.De, 21.60.Ka

DOI: 10.7498/aps.68.20191196

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11575138, 11835006, 11690040, 11690043, 11705216) and the Science and Technology Project of Guangdong Province, China (Grant Nos. 2017B090901068, 20170921).

† Corresponding author. E-mail: yonghongli@mail.xjtu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: tjliang@ihep.ac.cn