

文章编号: 2095-4980(2016)05-0800-05

商用 CMOS 工艺 SRAM 脉冲中子辐射效应实验

齐超, 杨善潮, 刘岩, 陈伟, 林东生, 金晓明, 王晨辉

(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, 陕西 西安 710024)

摘要: 为研究互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺静态随机处理内存(SRAM)脉冲中子辐射效应机理, 对 SRAM 翻转效应进行了蒙特卡罗模拟。该模拟基于脉冲中子辐照下 SRAM 翻转是单粒子翻转的叠加的假设, 计算了单位翻转和伪多位翻转在总翻转数中的百分比。在西安脉冲反应堆上对 3 种特征尺寸商用 SRAM 开展了脉冲工况实验研究, 得到了单位翻转和伪 2 位翻转数据, 结合模拟结果分析了 SRAM 在脉冲中子作用下的翻转机制。

关键词: 脉冲中子; 单粒子翻转; 伪多位翻转; 静态随机存储器

中图分类号: TN43

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0800

Experimental investigations on pulsed neutron radiation effect on commercial CMOS SRAMs

QI Chao, YANG Shanchao, LIU Yan, CHEN Wei, LIN Dongsheng, JIN Xiaoming, WANG Chenhui

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

Abstract: For the purpose of investigating pulsed neutron radiation effect on Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS) Static Random Access Memory(SRAMs), a Monte Carlo simulation method based on the hypothesis that the upsets are caused by the super positioning of Single Event Upset(SEUs) is presented. In the simulation, the percentages of Single Bit Upset(SBU) and pseudo Multiple Bit Upset(MBU) bits in total induced upset bits are calculated. Experiments on commercial SRAMs of three feature sizes are performed on Xi'an Pulsed Reactor under pulsed irradiation condition. Upset bits of SBU and Pseudo DBU obtained from the experiments, are shown to agree quite well with the simulation results. The mechanism of pulsed neutron inducing upsets is analyzed.

Key words: pulsed neutron; Single Event Upset; Pseudo Multiple Bit Upset; Static Random Access Memory

中子作用于 SRAM 器件, 经过与器件材料相互作用产生电荷沉积、耗尽区收集电荷产生瞬态电流等过程, 会导致 SRAM 存储单元发生单粒子翻转^[1]。国内外对 neutron 造成的单粒子翻转开展了广泛的研究^[2-3], 特别是针对临近空间大气中子辐射环境、地面中子辐射环境中的中子单粒子效应开展了大量研究, 在实验研究、仿真建模、错误率预估、加固设计等方面取得了大量成果, 并制定了相关技术标准。

随着大规模集成电路制造工艺的进步, 特别是随着特征尺寸的减小, SRAM 单元临界电荷降低, 产生中子单粒子翻转的中子能量阈值在逐渐降低^[4-5]。近年来, 国内开展了反应堆裂变谱中子($0.1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 20 \text{ MeV}$)导致的中子单粒子效应研究^[6], 分析了低能中子单粒子翻转截面随特征尺寸减小的变化趋势。已有的研究采用反应堆稳态运行工况, 对于脉冲运行工况下的中子辐射效应尚未开展研究。

本文主要介绍了反应堆脉冲运行工况下 SRAM 中子辐射效应实验研究。

1 SRAM 存储器中子单粒子翻转特点分析

相比反应堆稳态运行工况, 脉冲运行工况下中子注量率和伴生 γ 射线剂量率均高出数个量级; 脉冲中子和伴

生 γ 射线在 ms 量级的时间内作用于 SRAM, 有可能存在类似于瞬时电离辐射效应的全局性、同时性损伤机制。以西安脉冲反应堆 3#辐照装置为例, 脉冲运行工况下 1 MeV 等效中子注量率可达 $10^{15} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 伴生的 γ 射线剂量率可达 $10^3 \text{ Gy}(\text{Si})\cdot\text{s}^{-1}$, 均较反应堆稳态运行工况下高出 4 个量级以上^[7]。因此需要研究在反应堆脉冲运行工况下, 引起 SRAM 单元翻转的原因是否仍然是单粒子效应。本文假设在反应堆脉冲运行工况下发生的仍然是单粒子翻转, 基于此假设, SRAM 单元翻转的规律应该满足单粒子翻转的特点。

1.1 翻转位的空间分布均匀性

反应堆实验条件下, 在 SRAM 器件受辐照的空间范围内, 中子辐射场可认为是均匀的; 单粒子翻转是一种随机效应, SRAM 器件的每一个存储单元翻转的概率都相同。因此在整个辐照过程中发生单粒子翻转的 SRAM 存储单元空间分布应该是均匀的, 换言之: 在任意时刻发生一次单粒子翻转, 该翻转发生在 SRAM 存储器逻辑地址空间任一字节内的概率相同, 且同一字节内每一位翻转概率亦相同。

1.2 存储位的二次翻转概率

考虑 2 次翻转的情况, 即已发生翻转的存储位再次发生翻转, 会导致测试观察到的翻转数减少。令实际翻转位数为 n_u 位, 测试翻转数为 n_t 位, SRAM 存储器总容量为 N 位, 容易推知当实际翻转位数 n_u 增加 1 位时, 该翻转为 2 次翻转的概率为 $f=n_t/N$ 。如图 1 所示, 根据单粒子翻转的随机性特点, n_u 随中子注量 Φ 线性递增。当 n_t 相比 N 很小时, 发生 2 次翻转的概率约等于 0, n_t 亦随中子注量 Φ 线性增加; 随着中子注量的增加, 2 次翻转概率逐渐增大, 2 次翻转的发生导致 n_t 随中子注量 Φ 的增长开始呈亚线性, 且斜率呈递减趋势; 当 n_t 接近存储器总容量的一半时, $f=n_t/N\approx 0.5$, 即 2 次翻转的概率接近 50%, n_t 会稳定在 $N/2$ 附近随机涨落。

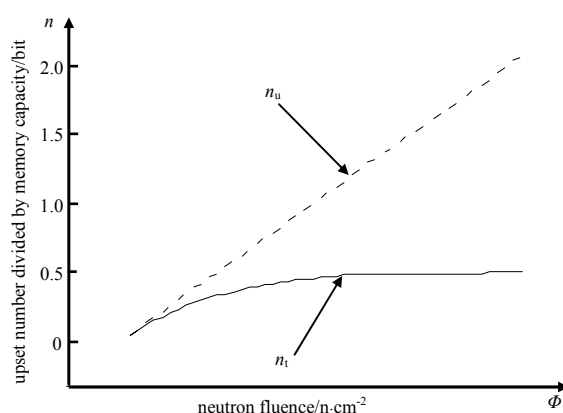


Fig.1 Sketch of secondary upset analysis
图 1 二次翻转分析示意图

2 单位翻转和伪多位翻转的蒙特卡罗仿真

随着实际翻转位数的累积, 会在 SRAM 存储器中产生不同翻转位数的翻转字节, 如图 2 所示。其中伪多位翻转是指截止到该时刻, 同一字节上累积了多位翻转, 只具有统计概念上的意义, 而不具有实际物理意义^[8-10]。根据单粒子翻转空间随机分布特点和 2 次翻转规律, 随着实际翻转位数的累积, 不同类型的字节数应服从某种特定分布密度函数。根据分布密度函数采用蒙特卡罗方法进行仿真, 可以得到随着实际翻转位数累积, 不同类型字节数变化的估计值。

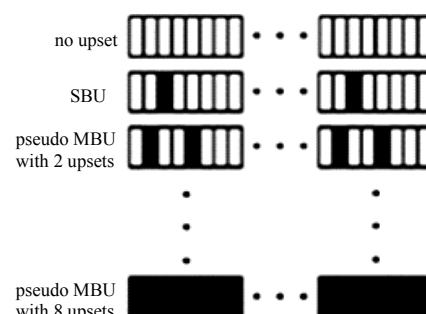


Fig.2 Upsets in bytes in SRAMs
图 2 SRAM 存储器翻转字节示意图

2.1 仿真原理

以 8 位宽 SRAM 存储器为例, 假设存储总容量为 N 的 SRAM 存储器累积 n_u 位实际翻转时, 整个 SRAM 存储器内零翻转字节数、单位翻转字节数、伪多位翻转字节数(2~8 位)分别为 $N_0(n_u), N_1(n_u), \dots, N_8(n_u)$, 容易列出:

$$\text{测试翻转数 } n_t(n_u) = 1 \times N_1(n_u) + 2 \times N_2(n_u) + 3 \times N_3(n_u) + 4 \times N_4(n_u) + 5 \times N_5(n_u) + 6 \times N_6(n_u) + 7 \times N_7(n_u) + 8 \times N_8(n_u)。$$

当实际翻转数增加 1 位时:

1) 若该翻转发生在伪 x 位翻转字节($x=1, 2, 3, \dots, 7$, $x=1$ 时为单字节翻转)上(概率为 $N_x(n_u) \times 8/N$), 会导致: a) 该翻转为 2 次翻转(概率为 $x/8$), 总翻转位数减少 1 位, 有 $N_x(n_u+1)=N_x(n_u)-1$, $N_{x-1}(n_u+1)=N_{x-1}(n_u)+1$; b) 该翻转为新增翻转(概率为 $1-x/8$), 总翻转位数增加 1 位, 有 $N_x(n_u+1)=N_x(n_u)-1$, $N_{x+1}(n_u+1)=N_{x+1}(n_u)+1$ 。

2) 若该翻转发生在零翻转字节上(概率为 $N_0(n_u) \times 8/N$), 该翻转必为新增翻转(概率为 1), 有 $N_0(n_u+1)=N_0(n_u)-1$, $N_1(n_u+1)=N_1(n_u)+1$ 。

3) 若该翻转发生在伪 8 位翻转字节上(概率为 $N_8(n_u) \times 8/N$), 该翻转必为 2 次翻转(概率为 1), 有 $N_8(n_u+1)=N_8(n_u)-1$, $N_7(n_u+1)=N_7(n_u)+1$ 。

2.2 仿真结果

根据上述概率分析,采用 Matlab 程序进行蒙特卡罗仿真,计算得到随着实际翻转数的累积,不同翻转类型的字节数。图 3 为仿真结果,给出了测试翻转位数、单位翻转字节数(SBU)和伪 2 位翻转字节数(DBU)随实际翻转位数增长的变化趋势;图中给出的数据均为除以存储总容量后的归一化值。图 3(a)、图 3(b)分别为实际翻转位数累积到 0.5 倍、2 倍存储总容量的情况。

由图 3(a)可知, a) 累积实际翻转位数较少时,测试翻转位数与实际翻转位数曲线基本重合,因为此时翻转类型以单位翻转字节为主导,2 次翻转的比例极低;随着实际翻转位数的增加,2 次翻转的概率增大,测试翻转位数增长开始呈现亚线性,且增长斜率逐渐减小,与 2 次翻转特性分析十分吻合。b) 当实际翻转位数达到存储总容量的 13%左右时,单位翻转字节数达到峰值,随后开始呈下降趋势。容易理解,若实际翻转位数全部落入零翻转字节,在实际翻转位数达到存储总容量的 12.5%时,所有存储字节将被单位翻转字节所占满,达到单位翻转字节数的峰值;由于实际累积时会有少部分翻转位落入单位翻转字节,因此单位翻转字节数峰值时刻会较 12.5%略大。

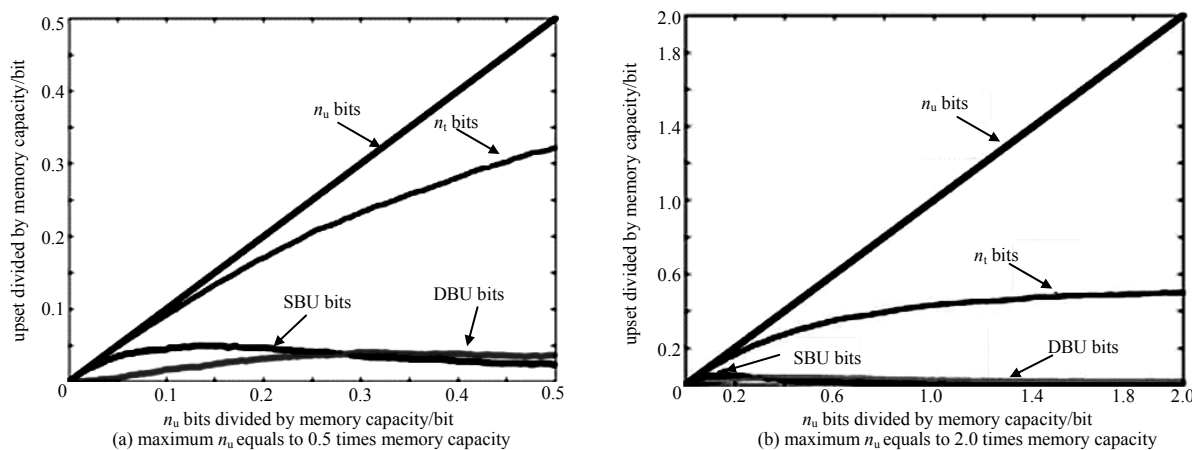


Fig.3 Monte Carlo simulation results of n_b , SBU and DBU
图 3 测试翻转位数、单位翻转字节数和 2 位翻转字节数的蒙特卡罗仿真结果

由图 3(b)可知,随着实际翻转位数超过存储总容量的 50%后,单位翻转字节数和 2 位翻转字节数都呈下降趋势,翻转类型以 3 位及以上为主。当测试翻转位数接近存储总容量 50%时,增长趋势开始消失,基本保持在存储总容量的 50%,与前面的分析一致。

3 SRAM 存储器反应堆中子辐射效应实验

在西安脉冲反应堆(Xi'an Pulse Reactor, XAPR)上对 3 种特征尺寸商用 SRAM 开展了脉冲工况实验研究,得到了单位翻转和伪 2 位翻转数据,结合仿真结果分析了 SRAM 在脉冲中子作用下的翻转机制。

表 1 西安脉冲反应堆 4 种脉冲运行状态实验条件
Table1 Experimental conditions of 4 pulsed modes of XAPR

pulsed mode/ pulse	1 MeV equivalent neutron flux/(n.cm ⁻² .s ⁻¹)	n/γ ratio n/(cm ² .rad(Si))	pulse width/ ms	1 MeV equivalent neutron fluence/ (n.cm ⁻²)	total ionizing dose/ rad(Si)
1.17	8.76×10 ¹³	7.7×10 ⁹	29.0	3.77×10 ¹²	4.9×10 ²
2.40	4.24×10 ¹⁴	7.7×10 ⁹	12.7	7.97×10 ¹²	1.0×10 ³
2.96	8.10×10 ¹⁴	7.7×10 ⁹	9.35	1.12×10 ¹³	1.5×10 ³
3.39	1.27×10 ¹⁵	7.7×10 ⁹	7.90	1.49×10 ¹³	1.9×10 ³

3.1 辐射模拟源

效应实验在西安脉冲反应堆 3#辐照装置上开展,中子注量不确定度为 20%,中子束流不均匀性为 10%。实验采用了 4 种脉冲状态,反应堆运行条件根据中子注量率和脉冲宽度的不同分为 1.17 元、2.40 元、2.96 元和 3.39 元,表 1 给出了不同脉冲状态下的环境参数。其中,表 1 给出的 1 MeV 等效中子注量数据不仅包含脉冲中子份额,还包含脉冲过后 1 min 内的缓发中子份额,其份额比例如表 2 所示。

表 2 1 MeV 等效中子注量的份额比例
Table2 Percentage of 1 MeV equivalent neutron fluence during experiments

	pulsed percentage	1 min after neutron pulse	1 min–3 min after neutron pulse	3 min–7 min after neutron pulse
normalized neutron fluence	1	0.48	0.15	0.04

3.2 实验器件

对 3 种不同特征尺寸、每种各 3 只 SRAM 存储器开展了效应实验，如表 3 所示。3 种器件均为小尺寸器件，特征尺寸为 65 nm~180 nm。由于小尺寸器件相比于大尺寸器件对 γ 总剂量效应较不敏感，实验过程中的伴生 γ 总剂量为 k rad(Si)量级，根据以往实验数据认为总剂量效应引入的影响忽略不计。

表 3 3 种特征尺寸 SRAM 存储器器件信息
Table3 Device information of three kinds of SRAMs with different feature sizes

device model	feature size/nm	capacity/Mbit	nominal voltage/V	serial number
HM62V8100I	180	8	3.3	180 nm-A,180 nm-B,180 nm-C
IS62WV1288DBLL	130	1	3.3	130 nm-A,130 nm-B,130 nm-C
IS64WV25616DBLL	65	2(4)	3.3	65 nm-A,65 nm-B,65 nm-C

3.3 实验结果

1) 翻转位数随中子注量线性增长

图 4 给出了 3 种型号共 9 只 SRAM 存储器在 4 种脉冲运行状态下的中子辐照后存储器翻转数据曲线，其中的存储器翻转数据为每只器件在脉冲过后 1 min 时刻的翻转总位数数据(包括 1 到 0 和 0 到 1 的翻转)。从图中可以看出：随着脉冲中子注量的增加，各器件翻转位数基本呈线性增加趋势，与中子单粒子效应的线性特征一致。

2) 翻转位在存储器逻辑地址空间均匀分布

根据 1.1 节的分析，整个辐照过程中发生单粒子翻转的 SRAM 存储单元空间分布应该是均匀的。实验不仅测量了各器件中子辐照后的翻转总位数，而且给出了翻转位所在的逻辑地址及在字节中的所在位，从而可以确定每只器件中子辐照后的翻转位图。图 5 给出了翻转位在逻辑地址空间的典型分布，图中的红点表示翻转位所在位置。从图中可以看出，翻转位在整个逻辑地址空间呈均匀分布，符合中子单粒子翻转均匀分布的特点。

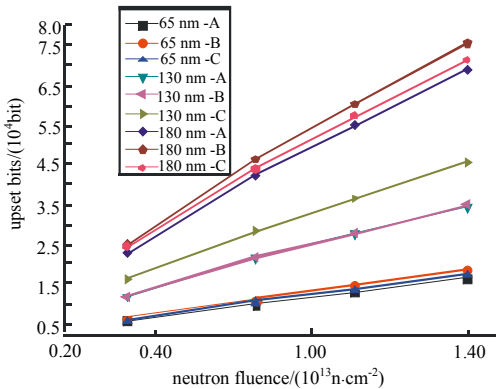


Fig.4 Upset data of SRAMs under pulsed neutron irradiation of four pulsed modes

图 4 4 种脉冲运行状态下中子辐照后存储器翻转数据

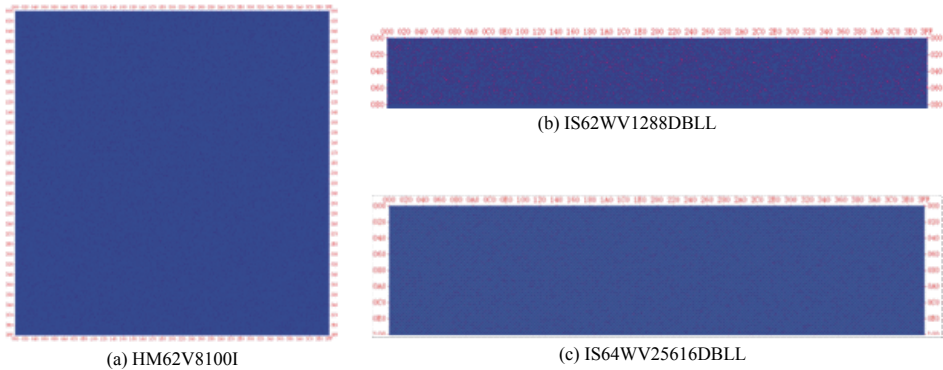


Fig.5 Typical upset bitmap in logic address space
图 5 翻转位在逻辑地址空间的典型分布位图

实验中，在中子辐照后对所有存储字节进行了回读，通过与辐照前的写入数据比较，可以得到每个字节的翻转位数，从而统计不同翻转类型的翻转位数。由于实验过程中最高总翻转位数与器件容量之比不超过 4%，根据

前文分析,占主导的是单位翻转字节及少量的2位翻转字节,因此实验仅统计了单位翻转字节翻转位数和2位翻转字节翻转位数。在各翻转位数数据对存储器总容量进行了归一化后,与蒙特卡罗仿真结果进行了对比,如图6所示,可以看出,实验数据与仿真结果十分吻合。

4 结论

基于反应堆脉冲工况下中子辐照造成的SRAM存储器翻转仍然是单粒子效应的假设,对SRAM存储器单位翻转和伪多位翻转进行了蒙特卡罗仿真,并对180 nm、130 nm和65 nm等3种特征尺寸SRAM存储器开展效应实验,进行对比研究。实验结果表明:在4种脉冲状态下,所有SRAM存储器在中子辐照后的单位翻转字节翻转位数和2位翻转字节翻转位数,均与蒙特卡罗仿真结果一致;在本文描述的脉冲中子实验条件下,SRAM存储器的翻转结果是由单独的中子单粒子事件叠加造成的,导致SRAM存储单元翻转的机制仍然是中子单粒子效应。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] TAKASHI Nakamura, MAMORU Baba, EISHI Ibe, et al. Terrestrial Neutron-induced Soft Errors in Advanced Memory Devices[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2008.
- [3] 贺朝会, 李永宏, 杨海亮. 单粒子效应辐射模拟实验研究进展[J]. 核技术, 2007, 30(4): 347-351. (HE Chaohui, LI Yonghong, YANG Hailiang. Progress in simulation experiments of single event effects[J]. Nuclear Techniques, 2007, 30(4): 347-351.)
- [4] 郭晓强, 郭红霞, 王桂珍, 等. 随机静态存储器低能中子单粒子翻转效应[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(10): 1547-1550. (GUO Xiaoqiang, GUO Hongxia, WANG Guizhen, et al. Low-energy neutron-induced single-event upsets in static random access memory[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(10): 1547-1550)
- [5] AUTRAN J L, SERRE S, SEMIKH S, et al. Soft-error rate induced by thermal and low energy neutrons in 40 nm SRAMs[J]. Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(6): 2658-2665.
- [6] 郭晓强. 静态随机存储器中子单粒子翻转效应模拟实验及理论研究[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2009. (GUO Xiaoqiang. Experimental and theoretical research on neutron-induced single-event upsets in static random access memory[D]. Xi'an, China: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2009.)
- [7] 西北核技术研究所第九研究室. 西安脉冲反应堆中子辐射用户手册[Z]. 西安: 西北核技术研究所, 2006. (The Ninth Department of Northwest Institute of Nuclear Technology. User's handbook for neutron experiment on Xi'an pulsed reactor[Z]. Xi'an, China: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2006.)
- [8] JOHANSSON K, OHLSSON M, OLSSON N, et al. Neutron induced single-word multiple-bit upset in SRAM[J]. Transactions on Nuclear Science, 1999, 46(6): 1427-1433.
- [9] HIROSHI F, MASANORI H, YUKIO M, et al. Neutron-induced soft errors and multiple cell upsets in 65-nm 10 T subthreshold SRAM[J]. Transactions on Nuclear Science, 2011, 58(4): 2097-2102.
- [10] RECH P, GALLIERE J M, Girard P, et al. Neutron-induced multiple bit upsets on two commercial SRAMs under dynamic-stress[J]. Transactions on Nuclear Science, 2012, 59(4): 893-899.

作者简介:



齐超(1987-),男,湖北省荆州市人,工程师,主要从事集成电路辐射效应研究。
email: qichao@nint.ac.cn.

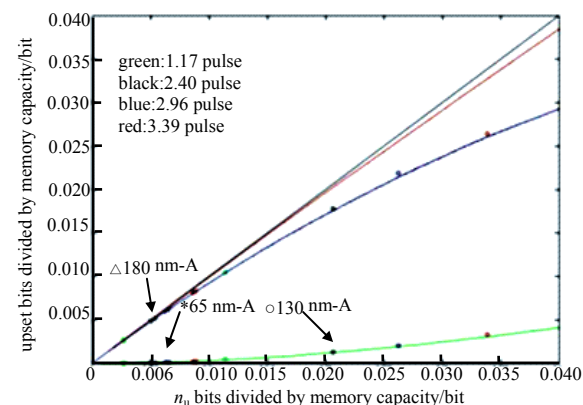


Fig.6 Experimental results under pulsed neutron irradiation vs. Monte Carlo simulation results

图6 脉冲工况下翻转实验数据与蒙特卡罗仿真结果对比

杨善潮(1977-),男,乌鲁木齐市人,高级工程师,研究方向为电子元器件中子辐射效应。

刘岩(1984-),男,沈阳市人,工程师,研究方向为电子元器件中子辐射效应。