

# 90 nm 互补金属氧化物半导体静态随机存储器局部单粒子闩锁传播效应诱发多位翻转的机理\*

陈睿<sup>1)2)†</sup> 余永涛<sup>1)2)</sup> 上官士鹏<sup>1)</sup> 封国强<sup>1)</sup> 韩建伟<sup>1)</sup>

1) (中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

(2014年1月16日收到; 2014年2月17日收到修改稿)

基于单粒子效应脉冲激光实验装置, 开展了 90 nm 互补金属氧化物半导体静态随机存储器的单粒子翻转和闩锁效应实验, 并给出了器件单粒子翻转效应位图. 实验发现, 器件出现了大量的多位翻转和约 20 mA 的电源电流脉冲. 借助器件仿真工具, 揭示了器件发生单粒子多位翻转效应的原因. 结果表明, 器件局部阵列发生单粒子闩锁效应并传播到多个位单元是诱发多位翻转的主要原因. 通过对比分析脉冲激光和器件仿真实验结果, 发现 P/N 阱电势塌陷是导致 90 nm 互补金属氧化物半导体静态随机存储器出现单粒子闩锁传播效应的内在物理机制.

**关键词:** 单粒子闩锁效应, 器件仿真, 多位翻转, 脉冲激光

**PACS:** 85.30.De, 61.80.Jh, 73.40.Qv

**DOI:** 10.7498/aps.63.128501

## 1 引言

在互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 集成电路中, 天然存在的两个寄生双极型晶体管构成的 PNPN 可控硅结构被触发单粒子闩锁 (single event latch-up, SEL) 效应后, 在相邻的 PNPN 结构中很快也能检测到 SEL 效应, 这种现象称为 SEL 传播效应<sup>[1-3]</sup>.

近年来, 随着微电子特征尺寸的逐步缩小, 越来越多的深亚微米 CMOS 器件表现出明显的 SEL 传播效应, 引起了国内外研究者广泛的关注. 有研究报道<sup>[4,5]</sup>, 深亚微米 CMOS 器件中触发的 SEL 传播效应可能是导致其产生多位翻转 (multiple bit upsets, MBU) 的主要原因, 但有关 SEL 效应传播诱发 MBU 的物理机制并未进行深入研究.

本工作针对 90 nm CY62126EV30LL CMOS 静态随机存储器 (static random-access memory, S-

RAM), 利用脉冲激光单粒子效应模拟装置<sup>[6]</sup>进行了单粒子翻转 (single event upset, SEU) 和 SEL 效应实验研究, 基于半导体工艺及器件模拟工具 (technology computer aided design, TCAD), 建立了相应的 SEL 效应器件仿真等效模型, 揭示了 SEL 传播效应诱发 MBU 的物理机制.

## 2 脉冲激光单粒子效应模拟实验

基于中国科学院国家空间中心的脉冲激光单粒子效应实验装置, 开展了 CMOS SRAM 器件的 SEU 和 SEL 效应研究. 脉冲激光的主要技术参数: 激光波长 1.064  $\mu\text{m}$ , 脉宽 25 ns, 光斑直径 2—3  $\mu\text{m}$ , 脉冲重复频率 1—50 kHz, 等效 LET 值 0.1—200  $\text{MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$ .

实验样品分别选用同一批次 Cypress 公司的 90 nm CY62126EV30LL CMOS SRAM 器件 3 片, 工作电压为 3.3 V, 经逆向处理得到实验样品的具体信息, 如表 1 所示.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 41304148) 和中国科学院知识创新工程青年基金 (批准号: O82111A17S) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [ch.ri.520@163.com](mailto:ch.ri.520@163.com)

表1 实验样品的参数

型号	工艺节点	位单元大小	芯片大小	容量	生产厂商
CY62126EV30LL	90 nm	0.84 $\mu\text{m} \times 1.2 \mu\text{m}$	1800 $\mu\text{m} \times 2100 \mu\text{m}$	1 Mbit	Cypress

器件采用塑料封装, 正面有金属层, 激光无法穿透塑料封装和金属层, 所以在进行单粒子效应测试前, 先要对器件进行开背部封装处理, 以露出背部的硅衬底层进行背部辐照.

图1(a)为CY62126EV30LL器件在写入“FFH”时, 单个粒子入射器件位单元诱发存储位信息错误的概率, 即SEU截面随入射激光能量的变化关系. 当入射激光能量为700 pJ时, 器件出现SEU现象. 随着入射激光能量增大, 器件SEU截面在逐步增大, 当入射激光能量为3500 pJ时, 器件SEU截面达到饱和, 为 $3 \times 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{bit}^{-1}$  (其约为器件位单元面积的3倍), 此时监测器件I/O端口电源电流随时间的变化关系如图1(b)所示. 在一个脉冲激光入射下, 器件电源电流出现幅值接近20 mA的电流脉冲, 但很快被抑制并在约1  $\mu\text{s}$ 内恢复到初始范围.

CY62126EV30LL器件SEU效应位图如图2(a)所示, 当入射激光能量为900 pJ时, 在不同的激光入射点及附近位置均出现了SEU现象, 器件表现出明显的MBU效应. 图2(b)是文献[5]中给出的在能量285 MeV, 注量为 $3.4 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ , LET值为 $84 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{mg}$ 的Au粒子辐照下, 同种工艺、同一厂家、同一批次的CY62126EV30LL器件出现SEU效应的位图. 从图中可以看到, 器件不仅发生SEU效应, 也出现类似图2(a)中的MBU现象.

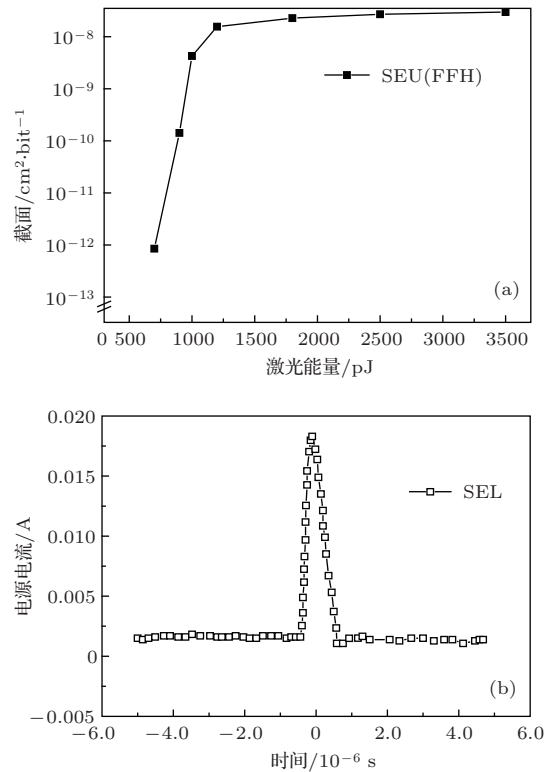


图1 CY62126EV30LL SRAM 器件 SEU 截面随激光能量的变化关系 (a) 和 SEL 电流随时间的变化关系 (b)

### 3 TCAD 模拟实验

为了探索CY62126EV30LL器件产生MBU效应的原因, 本文利用柯晶达公司的TCAD仿真工具, 基于逆向分析提取的器件工艺参数, 建立了器

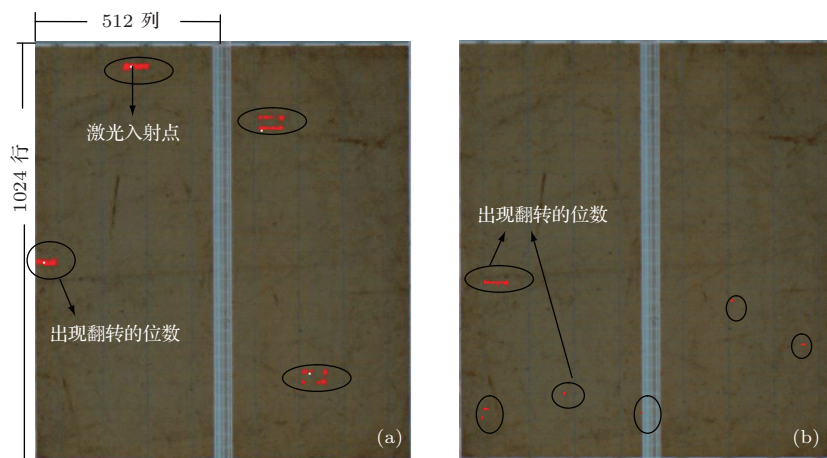


图2 CY62126EV30LL SRAM 器件 SEU 效应位图 (a) 脉冲激光辐照; (b) 重离子辐照

件单粒子效应三维仿真等效模型,如图3所示.基于蒙特卡罗数值仿真方法[7-9],开展了器件单粒子效应模拟实验.

从图3中可以看到,建立的单粒子效应仿真等效模型为 $18 \times 17$ 的SRAM位单元阵列.为了减少仿真时间,仅在粒子入射位置附近构建了真实的SRAM位单元阵列(图中前2行),其他的单元只设置有源区,没有放置真实的晶体管.这种等效模型会低估粒子入射的P-N阱结构进入闩锁的时间.位单元输入电压 $V_{dd} = 1.2\text{ V}$ ,入射粒子选用 $138\text{ MeV}$ ,LET值为 $13.7\text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg Cl}$ 粒子,

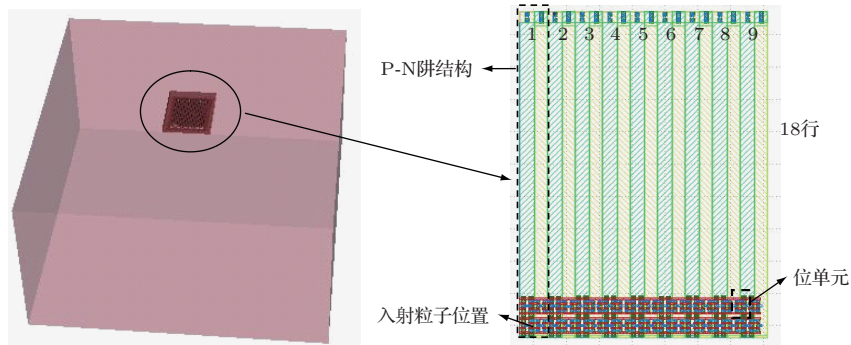


图3 CY62126EV30LL 器件单粒子效应三维仿真等效模型

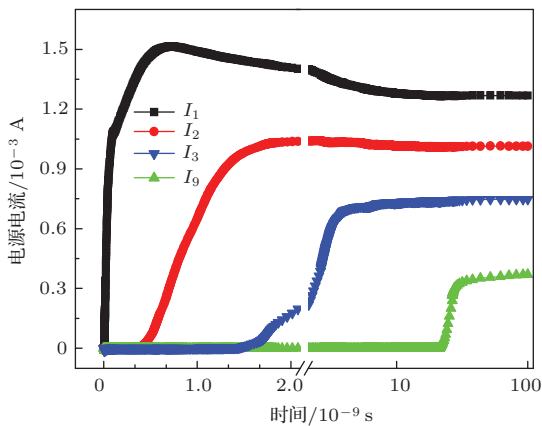


图4 P-N 阱结构输出电源电流随时间的变化

子,粒子入射位置为第1行第1列的位单元处,P-N阱结构的输出电源电流随时间的变化关系如图4所示.

从图4中可以发现,约 $t = 0.5\text{ ns}$ 时,粒子入射处的P-N阱结构进入SEL状态,即第1个P-N阱结构进入闩锁状态,约 $1.2\text{ ns}$ 之后,第2个P-N阱结构同样出现SEL现象,第3个P-N阱结构在接近 $4\text{ ns}$ 时进入闩锁状态.随着时间增加,相邻的P-N阱结构依次进入SEL状态,直到 $40\text{ ns}$ 之后,第9个P-N阱结构同样进入SEL状态,表现出明显的SEL传播效应.

### 4 讨论

从CY62126EV30LL器件SEL效应响应特性和TCAD仿真结果中可以看到,虽然器件I/O端电源电流受到抑制未进入闩锁状态,但其局部的阵列已经发生闩锁并传播到了多个位单元,这可能是导致器件SEU饱和截面远大于位单元面积的主要原因,也是器件出现大量MBU的主要原因.

图5为在粒子入射前,器件电子浓度、电势沿 $x$ - $y$ 方向的剖面分布图.沿 $x$ 轴方向依次分布9个

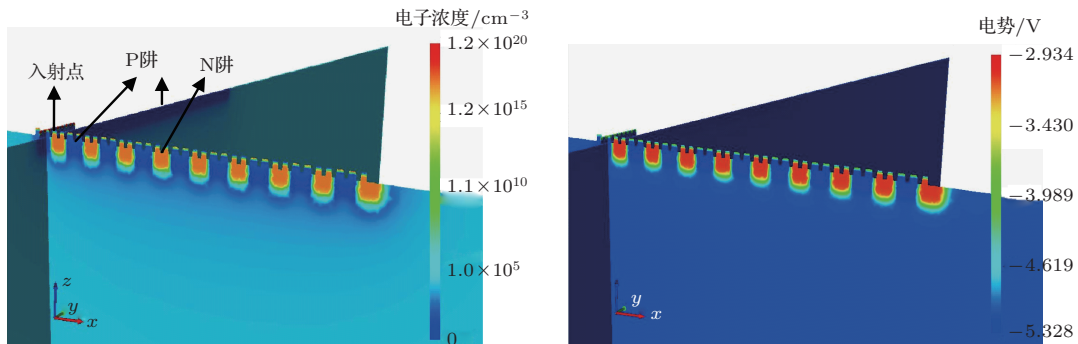


图5 (网刊彩色) 粒子入射前器件电子浓度、电势沿 $x$ - $y$ 方向的剖面分布图



P-N阱结构, 沿  $y$  轴方向晶体管共用一个P阱. 粒子入射的位置为第1个P-N阱结构中的NMOS 晶体管. 粒子入射前, 器件P电势为  $V_P = -5.3\text{ V}$ , N阱电势为  $V_N = -3\text{ V}$ .

粒子入射后, 器件电子浓度和电势随时间的变化关系如图6所示. 当  $t = 0.5\text{ ns}$  时, 在粒子入射径迹上产生大量的电离电荷, 并沿  $x$  和  $y$  方向扩散.

从图6(a)中可以明显看到, 粒子入射的P阱(第1个P-N阱结构) 迅速被辐射诱发的电离电荷填充, 并沿  $x, y$  方向漂移扩散. 由于诱发电荷向P, N阱不断注入, 导致N阱的电势逐步降低, P阱的电势不断上升. 当N阱或P阱电势的改变导致阱-源结正偏导通时, NPN或PNP晶体管处于放大状态, 此时源级电流不断注入到漏级, 空穴不断注入P阱,

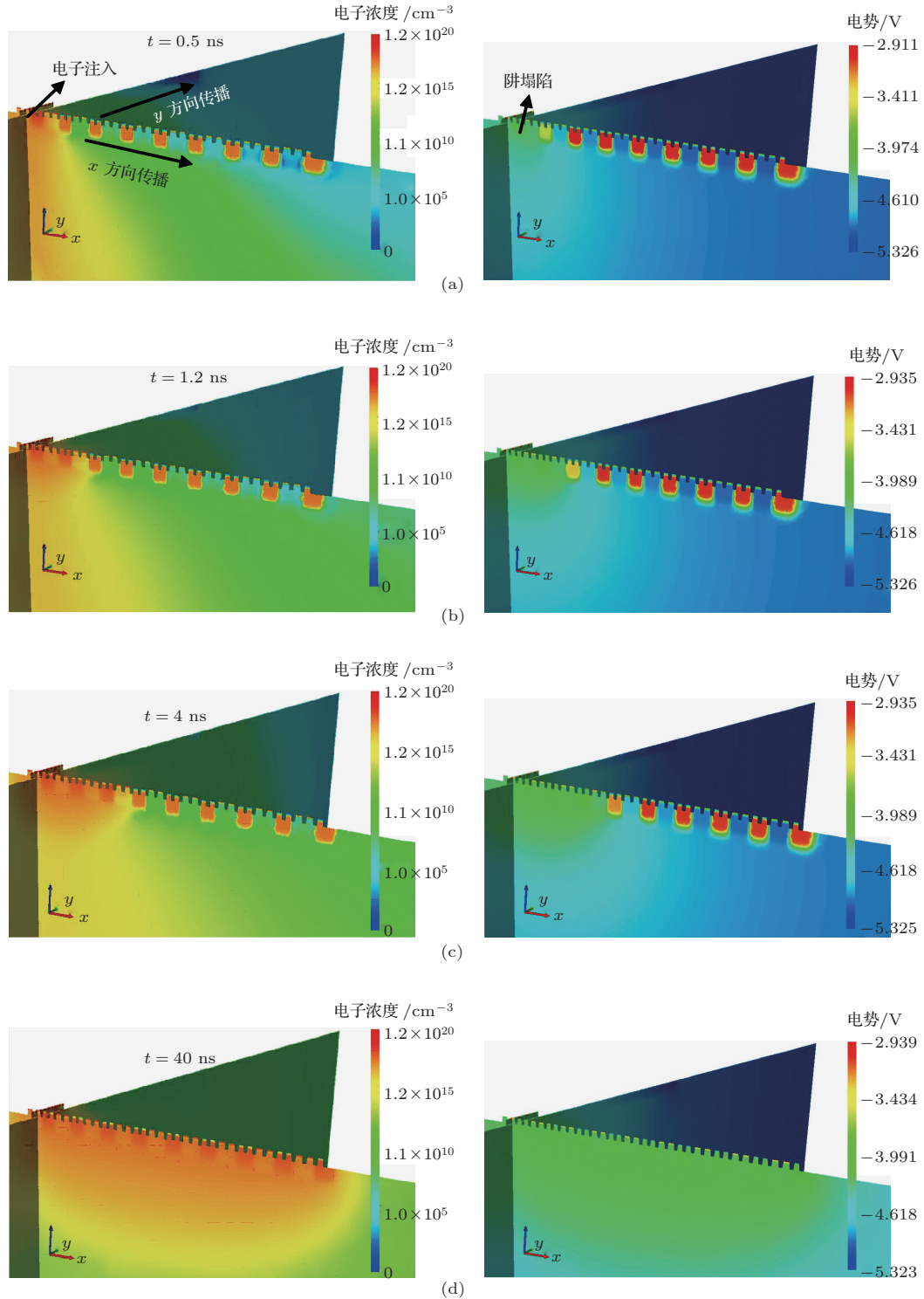


图6 (网刊彩色) 粒子入射后器件电子浓度、电势随时间的变化剖面图



电子持续注入N阱,导致N阱或P阱出现阱电势塌陷,如图6(a)中电势随时间的变化关系中所显示的N阱和P阱电势融合.此时,第1个P-N阱结构进入单粒子门锁状态.第2个P-N阱结构被少量电子注入,N阱电势不断减低,P阱电势逐步增加,但阱电势未发生塌陷,未进入门锁状态.当 $t = 1.2 \text{ ns}$ 时,电离电荷沿 $x$ 方向进一步扩散,此时,第2个P-N阱结构发生阱电势塌陷,如图6(b)所示.当 $t = 4 \text{ ns}$ 时,第3个P-N阱结构逐步被电子注入,此时阱电势塌陷也沿 $x$ 方向传播至第3个P-N阱结构,沿 $y$ 方向P阱电势塌陷随着电离电荷扩散在传播,如图6(c)所示.从图6(d)中可以发现,当 $t = 40 \text{ ns}$ 时, $x$ 方向上的9个P-N阱结构均被电子填充且全部发生阱电势塌陷, $y$ 方向上的P阱同样被电子完全填充.

有大量的研究表明<sup>[10-12]</sup>,阱电势塌陷会大幅度增强SEL效应的传播范围,而增加阱接触密度是抑制SEL效应传播的有效途径.阱电势塌陷是90 nm CMOS SRAM器件TCAD仿真实验出现SEL效应传播的主要原因,也是导致其发生大量MBU效应的潜在物理机制.

## 5 结 论

利用脉冲激光和TCAD模拟实验,开展了90 nm CY62126EV30LL器件MBU效应的物理机制研究.研究发现,器件局部阵列发生SEL传播效应是导致其出现MBU的主要原因,而P-N阱结构中的阱电势塌陷是造成SEL效应传播的潜在物理机制.

## 参考文献

- [1] Dodds N A, Hppten N C, Reed R A 2012 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **59** 2642
- [2] Voldman S H, Gebreselasie E, Zierak M, Hershberger D, Collins D, Feilchenfeld N, Onge St S, Dunn J 2005 *Proceedings of the 43th Annual International Reliability Physics Symposium* San Jose, USA, April 17-21, 2005 p129
- [3] Hargrove M J, Voldman S H, Gauthier R, Brown I, Duncan K, Craig W 1998 *Proceedings of the 36th Annual International Reliability Physics Symposium* Reno NV, USA, March 31-April 2, 1998 p269
- [4] Sukhaseum N, Samaras A, Du D L, Vandeveld B, Chattray N, Bezerra F 2012 *Proceedings of the 13th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems* Biarritz, France, September 24-28, 2012
- [5] Luo Y H, Zhang F Q, Guo H X, Hajdas W, Zhou H 2013 *Proceedings of the 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems* Oxford, UK, September 23-27, 2013
- [6] Han J W, Zhang Z L, Feng G Q, Ma Y Q 2009 *Spacecraft Environment Engineering* **26** 125 (in Chinese) [韩建伟, 张振龙, 封国强, 马英起 2009 航天器环境工程 **26** 125]
- [7] Zhang K Y, Guo H X, Luo Y H, He B P, Yao Z B, Zhang F Q, Wang Y M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8651 (in Chinese) [张科营, 郭红霞, 罗尹红, 何宝平, 姚志斌, 张凤祁, 王园明 2009 物理学报 **58** 8651]
- [8] Chen J J, Chen S M, Liang B, Deng K F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 016103
- [9] Iwata H, Ohzone T 1995 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **42** 148
- [10] Nelson J G, Arthur F W, Nicholas M A, Jonathan R A 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2614
- [11] Dodds N A, Hutson J M, Pellish J A, Reed R A, Kim H S, Berg M D, Friendlich M R, Phan A M, Seidleck C M, Xapsos M A, Deng X, Baumann R C, Schrimpf R D, King M P, Massengil L W, Weller R A 2010 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **57** 3575
- [12] Morris W 2003 *Proceedings of the 41th Annual International Reliability Physics Symposium* Dallas, Texas, March 30-April 4, 2003 p76

# Mechanism of multiple bit upsets induced by localized latch-up effect in 90 nm complementary metal semiconductor static random-access memory\*

Chen Rui<sup>1)2)†</sup> Yu Yong-Tao<sup>1)2)</sup> Shangguan Shi-Peng<sup>1)</sup>  
Feng Guo-Qiang<sup>1)</sup> Han Jian-Wei<sup>1)</sup>

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

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

( Received 16 January 2014; revised manuscript received 17 February 2014 )

## Abstract

By using the pulsed laser single effect facility, the single event upset and latch-up phenomenon are studied, and the bitmap of 90 nm complementary metal oxide semiconductor (CMOS) static random-access memory (SRAM) is mapped. It is shown that many multiple bit upsets occur and pulsed supply current of 20 mA amplitude is monitored. Based on the technology computer aided design (TCAD), it is found that the localized latch-up in CMOS SRAM is the main reason for the single event multiple bit upsets. Finally, by analyzing the results of the pulsed laser experiment and TCAD, it is found that the P/N well potential collapse is the key physical mechanism responsible for the spreading of the single event latch-up effect in 90 nm CMOS SRAM.

**Keywords:** single event latch-up effect, device simulation, multiple bit upsets, pulsed laser

**PACS:** 85.30.De, 61.80.Jh, 73.40.Qv

**DOI:** [10.7498/aps.63.128501](https://doi.org/10.7498/aps.63.128501)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41304148) and the Main Direction Program of Knowledge Innovation of Chinese Academy of Sciences (Grant No. O82111A17S).

† Corresponding author. E-mail: [ch.ri.520@163.com](mailto:ch.ri.520@163.com)