

0.18 μm CMOS 有源像素图像传感器质子辐照效应

蔡毓龙^{1,2,3}, 李豫东^{1,2}, 文林^{1,2}, 冯婕^{1,2}, 郭旗^{1,2*}

- (1. 中国科学院新疆理化技术研究所 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
2. 新疆电子信息材料与器件重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 互补金属氧化物半导体 (CMOS) 图像传感器应用于空间时容易受到空间质子辐照影响。在地面对某国产商用 CMOS 图像传感器开展质子辐照试验, 试验中通过离线和在线采集图像两种方法研究其累积辐射效应和单粒子效应。通过分析辐照后暗信号变化研究质子诱导累积辐射效应, 并从总剂量和位移损伤两方面分析了暗信号分布规律和产生机理。在线采集图像表明: 质子诱导 CMOS 图像传感器像素单元单粒子现象包括瞬态亮点、瞬态亮斑和瞬态亮线。结合质子和 CMOS 图像传感器相互作用物理过程解释上述不同形状单粒子瞬态现象产生机理。试验中没有观察到 CMOS 图像传感器外围电路出现质子诱导的单粒子门锁和单粒子功能中断现象。

关键词: CMOS 图像传感器; 单粒子效应; 累积辐射效应; 质子

中图分类号: TN389 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190433

Radiation effects of 0.18 μm CMOS APS by proton irradiation

Cai Yulong^{1,2,3}, Li Yudong^{1,2}, Wen Lin^{1,2}, Feng Jie^{1,2}, Guo Qi^{1,2*}

- (1. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensors can easily be susceptible to proton irradiation in space applications. A proton irradiation experiment of a domestic commercial CIS was conducted on the ground, and the cumulative radiation effect and single event effect were studied by using offline and online image acquisition methods. The proton-induced cumulative radiation effects were studied by analyzing the dark signal degradation after irradiation, and histogram and generation mechanism of dark signals were analyzed from the aspects of total dose and displacement damage. Online testing results show that proton-induced single event transients in active pixel array include transient bright spot, transient bright cluster, and transient bright line. The interaction mechanism of proton and CIS was analyzed to discuss the different single event transient phenomena. No single event latch-up and single event function interruption in the peripheral circuits of the CIS was observed in the experiments.

Key words: CMOS image sensor; single event effect; cumulative radiation effects; proton

收稿日期: 2019-10-08; 修订日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金 (11675259); 国家自然科学基金青年科学基金 (11805269); 中国科学院西部之光 (2016-QNXZ-B-8); 国家自然科学基金重点项目 (61534008)

作者简介: 蔡毓龙 (1992-), 男, 博士生, 主要从事光电器件辐射效应研究。Email: caiyl16@ms.xjb.ac.cn

导师简介: 郭旗 (1965-), 男, 研究员, 主要从事电子器件辐射效应研究。Email: GuoQi@ms.xjb.ac.c

0 引言

近年来,快速发展的 CMOS 图像传感器已经拥有能和电耦合器件 (CCD) 相媲美的性能。而且 CMOS 图像传感器有着体积小,集成度高,低功耗,质量轻等独特优势。因此,在遥感成像、星敏感器和太阳敏感器等卫星图像采集方面正逐步取代原有的 CCD^[1-2]。随着我国航天事业快速发展,CMOS 图像传感器 (CIS) 已在星敏感器、太阳敏感器、对地遥感和可视化遥测等领域发挥重要作用。例如 2019 年北京微纳星空科技有限公司研制的“星时代-5”卫星搭载小型光学相机,主要用于对地球实施光学遥感。

在空间辐射环境中,电子、质子和重离子入射电子器件会和材料相互作用并改变器件的电性能,严重时会导致器件功能失效。空间辐射环境诱导电子器件损伤类型有三种:总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应。CIS 在空间应用中遭受的空间辐射效应已经被广泛研究。Goiffon 等人^[3-4]报道了不同粒子辐照对 CIS 性能参数影响,结果表明:⁶⁰Co 辐照 CIS 引起暗电流、饱和电压和读出增益改变,质子和中子辐照 CIS 导致暗电流和暗电流非均匀性退化。冯婕等人^[5-7]研究了质子辐照 CMOS 图像传感器光子转移曲线和转换增益退化机理,以及粒子辐照对视觉位姿测量系统的影响。王祖军等人^[8-9]分析了中子和 γ 辐照对 CIS 的影响。和 γ 或中子辐照相比,质子诱导 CIS 退化机理更复杂,因为其同时包含总剂量效应和位移损伤效应。但是,只有很少研究关注质子辐照 CIS 暗信号退化机理,尤其是分离总剂量和位移损伤对参数的影响。

关于 CIS 单粒子效应,研究人员主要关注重离子诱导 CIS 单粒子效应。目前,只有零星文献对质子诱导 CIS 单粒子效应进行深入分析。Aken 等人^[10]研究了质子辐照 0.35 μm 抗辐射型 CIS HAS2 单粒子瞬态亮斑,分析了瞬态亮斑收集电荷和尺寸规律。但质子诱导 CIS 单粒子效应现象还很复杂,而且 CIS 工艺尺寸减小使其对质子单粒子效应更加敏感,因此,有必要对目前已广泛使用的深亚微米 CIS 进行质子诱导单粒子效应试验。

这篇文章主要目的是研究质子辐照 CIS 的单粒子效应和累积损伤效应。首先,介绍了试验建立和样

品。然后通过分析暗信号增加和热像素研究质子诱导总剂量效应和位移损伤效应对 CIS 暗信号退化影响。最后总结分析了质子诱导 CIS 像素阵列所有单粒子瞬态现象和产生机理,比较了单粒子瞬态亮点和热像素的区别。并通过分析质子和 CMOS 图像传感器相互作用过程讨论瞬态亮斑和瞬态亮线产生机理。

1 试验和样品

试验样品是国产 0.18 μm 科学级 CMOS 图像传感器。像素阵列区域由 2048 \times 2048 个像元组成,像元尺寸为 11 $\mu\text{m}\times$ 11 μm 。像元设计采用 4T 像素结构,如图 1 所示。读出方式为电子卷帘快门。每一个像素单元包括一个钳位光电二极管 (pinned photodiode, PPD), 一个浮点扩散区 (floating diffusion, FD) 和 4 个晶体管。光敏区域 PPD 中感生电荷在传输栅 (transfer gate, TG) 开启后传输到 FD 端,并在 FD 端中完成电荷到电压的转换。

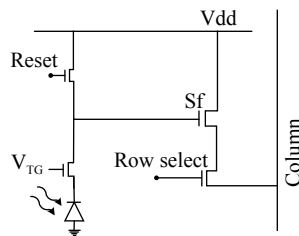


图 1 4T 像素单元原理图

Fig.1 4T pixel unit schematic

质子辐照试验在北京大学重离子物理研究所 2 \times 6 MV EN 串列静电加速器上进行,该加速器能提供能量为 1~10 MeV 范围内的质子束流。此次试验选取能量为 10 MeV 能量质子,通量为 1.8 \times 10¹¹p/(cm²·s),试验时在 CMOS 图像传感器样品旁放置法拉第筒对质子束流进行计数。此外,为了研究质子诱导单粒子效应,在北京原子能院开展高能质子辐照试验,选择质子能量为 50 MeV。试验前去掉样品的玻璃盖板,辐照过程中保持暗场条件。CMOS 图像传感器被安装在 FPGA 测试板上,FPGA 用于产生样品操作时序,时钟等。最终采集图像数据经过 FPGA 传输到 PC 端上位机,同时监测样品电流,并设置限流值。

2 结果和讨论

2.1 质子诱导的累积损伤

当质子穿过半导体材料时,会通过电离和非电离

过程损失能量。电离过程会在半导体内产生电子空穴对,而非电离过程会使原子位移。10 MeV 质子辐照后,暗信号分布呈现高斯分布,尾部跟随大量暗信号尖峰,暗信号分布图 2 所示。Virmontois 等人^[11]研究表明:中子辐照 CMOS 图像传感器产生暗信号分布为高斯分布,暗电流均值几乎没有右移,尾部出现大量暗信号尖峰。考虑到中子辐照总剂量效应可以忽略不计,暗电流分布由位移损伤引起。因此图 2 中高斯分布均值右移,这主要由于质子在像素单元产生的总剂量效应引起。

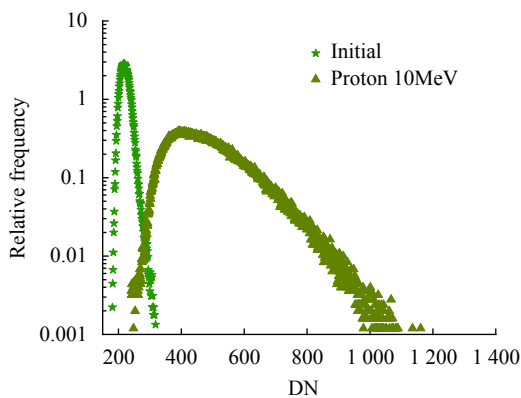


图 2 质子辐照前后暗信号的分布比较

Fig.2 Comparison of the dark signal distribution between devices proton pre-and post-irradiation

质子穿过半导体材料时,通过卢瑟福(库伦)散射使得原子核外电子获得能量而被激发和释放,这被称为直接的质子电离。质子还会和原子核发生碰撞产生初级反冲原子,反冲原子能电离晶格并使原子移位。和直接的质子电离相比,反冲原子电离可以忽略不计。使用 SRIM 软件仿真,10 MeV 质子在硅中的直接电离比反冲原子在硅中产生的电离大两个数量级。因此,高斯分布均值右移主要是由质子直接电离引起。试验样品像素阵列区域由 2048×2048 个像元组成,单个像素单元光电二极管剖面图如图 3 所示,浅沟槽隔离(STI)结构用来隔离相邻像素。质子辐照像素单元时,在 STI 隔离氧化物界面产生氧化物陷阱电荷和界面态,从而导致暗电流的增加。

质子通过弹性和非弹性过程和硅原子相互作用。总的弹性相互作用包括库伦散射和核弹性散射。当质子能量大于几 MeV 时,在质子和硅材料相互作用过程中非弹性核反应也是非常重要的^[12]。晶

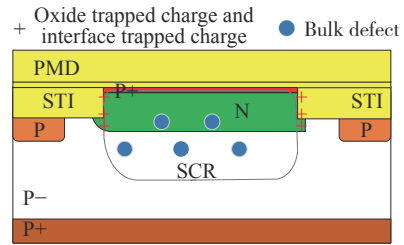
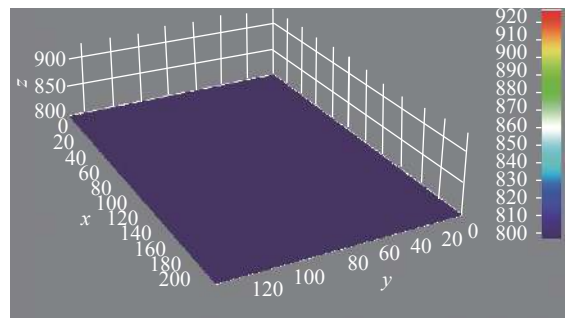


图 3 质子辐照产生暗信号变化缺陷示意图

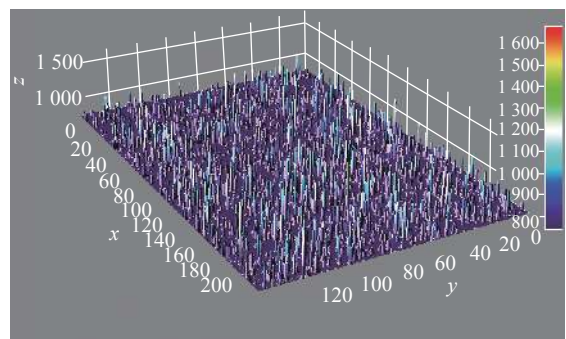
Fig.3 Dark signal defect diagram after being irradiated by proton

格原子一旦获得大于位移损伤阈能后,就会离开原位,产生空位间隙原子对,形成弗伦克尔缺陷。CMOS 图像传感器在质子辐照后会诱发硅禁带中产生体缺陷,这些稳定的体缺陷会形成新的复合-产生中心,使得 CMOS 图像传感器暗信号增大,如图 3 所示。

暗信号尖峰是指在图像传感器的空间电荷区因位移损伤而诱发产生的比平均暗信号大 3 倍以上的信号^[11],在黑屏图像显示时呈白斑或亮点,又称为热像元。质子辐照前试验样品暗场条件下暗信号平均值为 250 左右,因此,暗信号大于 750 定义为热像素,热像素占总像素比例为 5.9%,辐照前后热像素如图 4 所示。质子辐照后暗信号中的尖峰信号是由弹



(a)



(b)

图 4 辐照前 (a) 后 (b) 暗信号尖峰 3D 图

Fig.4 3D figure of dark signal hot pixel before radiation (a) and after radiation (b)

性核碰撞和非弹性碰撞造成的团簇缺陷引起。

2.2 质子诱导单粒子效应

试验中出现质子诱导单粒子瞬态现象。一种现象是连续几个像素灰度值增加,但增加的灰度值较小。这种瞬态亮点只出现在当前图像中,无固定位置,不是永久损伤。而质子辐照 CIS 导致的热像素辐照后依然存在,是一种永久损伤。瞬态亮点是由质子和硅直接电离产生电子空穴对被像素收集引起,辐照后就消失。图 5 表示质子辐照下连续的暗场图像,10×10 像素单元被提取用来研究瞬态亮点。之前的研究分析了重离子辐照 CIS 出现的瞬态亮斑覆盖多达一百多个像素单元^[13],与重离子不同,质子辐照 CIS 引起的瞬态亮点平均占 5 个像素单元。因为质子的线性能量传递 (LET) 值很小,所以单个质子电离电荷很少。试验样品的敏感层为 12 μm 的外延层,根据 SRIM, 50 MeV 质子 LET 在 12 μm 外延层中近似为常数,当质子从样品表明正入射时,敏感层中沉积的能

量为:

$$E = LET \cdot \rho \cdot x \quad (1)$$

式中:ρ 为硅材料密度;x 为质子在材料中入射深度。在硅中沉积一对电子空穴对所需平均能量为 3.6 eV,计算出 50 MeV 质子在试验样品敏感层中沉积的电荷约为 3.3×10³,转换成灰度值为 79。

另一种现象是亮斑和不同形状的亮线,这些现象只出现在当前图像中,被称为瞬态亮斑和亮线,如图 6 所示。瞬态亮斑覆盖 10 个左右像素单元,中间像素灰度值最大,边缘灰度值逐渐减小。当发射的次级粒子射程小于一个像素长度 11 μm,次级粒子最终只经过一个像素,并停留在像素内,这个像素就是亮斑中灰度值最大的像素。同时,次级粒子产生的电子空穴对经过漂移,扩散运动被四周像素单元收集。采集图像中瞬态亮线方向不同,这是因为产生次级粒子发射方向是随机的。瞬态亮线长度从小于 1 个 (11 μm) 像素长度到 30 个左右像素 (330 μm),这由次级粒子射程和发射方向决定。

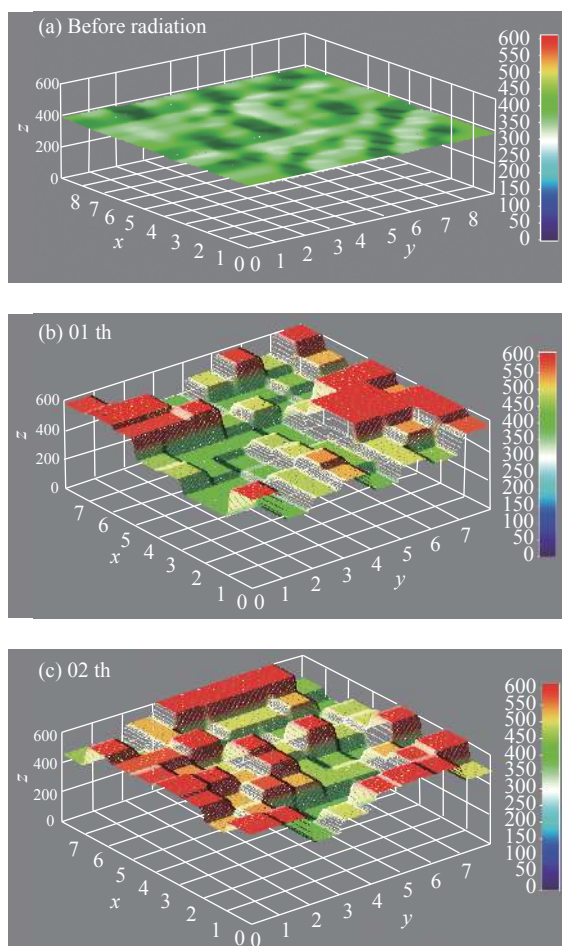


图 5 质子辐照诱导单粒子瞬态亮点

Fig.5 Proton-induced single event transient bright spot

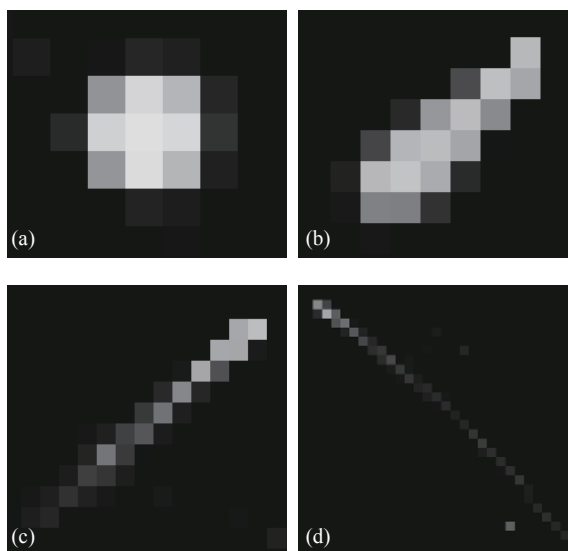


图 6 质子诱导单粒子瞬态亮斑 (a) 和不同形状单粒子瞬态亮线 (b), (c), (d)

Fig.6 Proton-induced single event transient bright cluster (a) and different shape bright lines (b), (c), (d)

这些现象是由于质子在硅中发生核反应引起,高能质子核反应经常导致发射光子、轻粒子和一些重反冲原子。这些发射粒子在硅中的射程不同,入射方向也是随机的。轻带电粒子,如 α 粒子,硅中射程达几

个毫米。除了射程高,相比重反冲原子,轻带电粒子 LET 值较低,沉积电荷不足以影响多个粒子穿过像素的周边像素,表现在图像就是细而长的亮线,由此可以得出图 6(D) 是由射程大的轻带电粒子引起。50 MeV 质子与硅发生核反应产生的高 Z 重核反冲原子包括 Mg、Al、Na 等^[14],核反应产生的这些重离子最大 LET 值不超过 11 MeV/(mg/cm²),根据 SRIM 仿真可得,它们在硅中射程在几十微米范围。这些重离子会在穿过的路径上产生大量电子空穴对,影响多个周边像素,但是这些重离子的射程较短,表现在图像上就是粗而短的亮线。当发射重离子角度几乎垂直像素单元表明,或者发射的重离子射程很小,这种情况表现在图像上就是亮斑。

质子除了和硅发生核反应,随着现代集成电路密度提高,质子也会和金属层发生核反应,产生 LET 值更大的重离子^[15]。试验中没有观察到 CMOS 图像传感器外围电路出现单粒子闩锁和单粒子功能中断现象,说明 50 MeV 质子和硅或金属层核反应产生的次级粒子 LET 不足以触发单粒子闩锁和单粒子功能中断。

3 结 论

文中研究了质子辐照 CMOS 图像传感器诱导单粒子效应和累积损伤效应。质子辐照后暗信号分布右移主要是由于质子在 STI 隔离氧化物界面产生氧化物陷阱电荷和界面态引起,即主要由总剂量效应引起。辐照后产生暗信号尖峰(热像素)是由于质子位移损伤相关的弹性核碰撞和非弹性碰撞造成的团簇缺陷引起。质子诱导 CMOS 图像传感器单粒子效应典型特点是瞬态亮点、瞬态亮斑和瞬态亮线。瞬态亮点不同于质子位移损伤导致的热像素,热像素是永久损伤,辐照后依然存在。瞬态亮点是由质子和硅直接电离产生电子空穴对被像素收集引起,辐照后就消失。瞬态亮斑和瞬态亮线是由高能质子和 CMOS 图像传感器发生核反应发生的次级粒子引起。瞬态亮斑和粗而短的亮线是由重反冲原子引起,而细而长的亮线是由轻粒子引起。试验中没有观察到 CMOS 图像传感器外围电路出现单粒子闩锁和单粒子功能中断现象。

参考文献:

- [1] Turchetta R, Berst J D, Casadei B, et al. A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSL CMOS technology [J]. *Nucl Instrum Methods A*, 2001, 458(3): 677-689.

- [2] Wan Lei, Jia Ping, Zhang Ye, et al. Effect of aircraft attitude imaging of CMOS aerial cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 203-209. (in Chinese)
万磊,贾平,张叶,等.飞行器姿态对CMOS航空相机成像的影响[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(1): 203-209.
- [3] Goiffon V, Estriebeau M, Magnan P. Overview of ionizing radiation effects in image sensors fabricated in a deep-submicrometer CMOS imaging technology [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2594-2601.
- [4] Virmontois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(6): 5658069.
- [5] Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, et al. Degradation mechanism for photon transfer curve of CMOS image sensor after irradiation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2676-2680. (in Chinese)
冯婕,李豫东,文林,等. CMOS 图像传感器光子转移曲线辐照后的退化机理[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2676-2680.
- [6] Feng Jie, Li Yudong, Wen Lin, et al. Influence mechanism of CMOS sensor radiation damage on the performance of visual position and attitude measurement system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S117002. (in Chinese)
冯婕,李豫东,文林,等. CMOS 图像传感器辐射损伤对视觉位姿测量系统性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(S1): S117002.
- [7] Ma Lindong, Li Yudong, Guo Qi, et al. Total ionizing dose radiation effects in 4T-CMOS image sensors at different biased conditions [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1017002. (in Chinese)
马林东,李豫东,郭旗,等.不同偏置状态下4T-CMOS图像传感器的总剂量辐射效应[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1017002.
- [8] Wang Z J, Liu C J, Ma Y, et al. Degradation of CMOS APS image sensors induced by total ionizing dose radiation at different dose rates and biased condition. [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2015, 62(2): 527-533.
- [9] Wang Z J, Ma Y, Liu C J, et al. Degradation and annealing studies on gamma rays irradiated COTS PPD CISs at different dose rates [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2016, 820: 89-94.
- [10] Aken D V, Dominique Hervé, Beaumel M. Total dose,

- displacement damage, and single event effects in the radiation hardened CMOS APS HAS2[C]//Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [11] Virmondois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2010, 57(6): 3101–3108.
- [12] Srour J R, Hartmann R A. Enhanced displacement damage effectiveness in irradiated silicon devices [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2002, 36(6): 1825–1830.
- [13] Cai Y L, Li Y D, Wen L, et al. Heavy ion-induced single event effects in active pixel sensor array [J]. *Solid-State Electronics*, 2019, 152: 93–99.
- [14] Hiemstra D M, Blackmore E W. LET spectra of proton energy levels from 50 to 500 MeV and their effectiveness for single event effects characterization of microelectronics [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2003, 50(6): 2245–2250.
- [15] Schwank J R, Shaneyfelt M R, Baggio J, et al. Effects of particle energy on proton-induced single-event latchup [J]. *Nsrec Seattle Washington*, 2005, 52(6): 2622–2629.