



## 质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应

傅婧 蔡毓龙 李豫东 冯婕 文林 周东 郭旗

## Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation

Fu Jing Cai Yu-Long Li Yu-Dong Feng Jie Wen Lin Zhou Dong Guo Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 054206 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211838

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211838>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 质子辐照对永磁合金微观结构演化的研究

Effect of proton irradiation on microstructure evolution of permanent magnet

物理学报. 2018, 67(1): 016104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172025>

#### 中国散裂中子源在大气中子单粒子效应研究中的应用评估

Application and evaluation of Chinese spallation neutron source in single-event effects testing

物理学报. 2019, 68(5): 052901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181843>

#### 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

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

物理学报. 2019, 68(23): 238502 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191196>

#### 铁电存储器中高能质子引发的单粒子功能中断效应实验研究

Experimental study about single event functional interrupt of ferroelectric random access memory induced by 30–90 MeV proton

物理学报. 2018, 67(23): 237803 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181225>

#### 纳米体硅鳍形场效应晶体管单粒子瞬态中的源漏导通现象

Effect of source–drain conduction in single–event transient on nanoscaled bulk fin field effect transistor

物理学报. 2020, 69(8): 086101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191896>

#### 基于重离子试验数据预测纳米加固静态随机存储器质子单粒子效应敏感性

Prediction of proton single event upset sensitivity based on heavy ion test data in nanometer hardened static random access memory

物理学报. 2020, 69(1): 018501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190878>

# 质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应\*

傅婧<sup>1)2)3)</sup> 蔡毓龙<sup>4)</sup> 李豫东<sup>1)2)</sup> 冯婕<sup>1)2)†</sup>文林<sup>1)2)</sup> 周东<sup>1)2)</sup> 郭旗<sup>1)2)‡</sup>

1) (中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐 830011)

2) (新疆电子信息材料与器件重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

3) (中国科学院大学, 北京 100049)

4) (中国科学院微小卫星创新研究院, 上海 200011)

(2021 年 10 月 4 日收到; 2021 年 11 月 8 日收到修改稿)

CMOS 图像传感器应用于空间任务时容易受到质子单粒子效应影响. 本文采用商用正照式 (FSI) 和背照式 (BSI) CMOS 图像传感器开展了不同能量的质子辐照实验, 实验中通过在线测试方法分析质子单粒子效应. 其中, 质子能量最高为 200 MeV, 总注量为  $10^{10}$  particle/cm<sup>2</sup>, 结果未发现外围电路的单粒子效应, 但观察到像素阵列出现不同形状的单粒子瞬态亮斑. 通过提取瞬态亮斑沉积能量和尺寸大小两个特征参数, 比较了不同能量质子对瞬态亮斑特征的影响, 以及 FSI 和 BSI 中瞬态亮斑特征的差异. 最后, 结合仿真方法, 与实验结果进行比较, 预测了质子在 CMOS 图像传感器像素单元产生瞬态亮斑的能量沉积分布. 仿真结果验证了光电二极管耗尽区厚度减小和外延层减薄是导致 BSI 图像传感器中质子能量沉积分布左移的主要因素.

**关键词:** CMOS 图像传感器, 质子辐照, 单粒子效应, 瞬态亮斑**PACS:** 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J-**DOI:** 10.7498/aps.71.20211838

## 1 引言

近年来, 快速发展的 CMOS 图像传感器 (CMOS image sensor, CIS) 由于体积小, 集成度高, 功耗低, 读出速度快等独特优势, 逐渐代替电荷耦合器件 (charge-coupled device, CCD), 成为遥感成像、星敏感器和太阳敏感器等空间任务应用中的主流成像器件<sup>[1]</sup>. 对于传统的前照式 (Front-side illuminated, FSI) 图像传感器, 光线入射后先经过片

上透镜和滤光片, 然后再通过金属和氧化层, 之后在光电二极管中形成光生载流子. 为了实现更好的成像性能, 光线从背面入射的背照式 (Back-side illuminated, BSI) 图像传感器应运而生, 其具有更高的量子效率、灵敏度, 在空间成像领域具有广泛的应用前景<sup>[2]</sup>.

在空间辐射环境中, 各种粒子会在电子元器件中引发电离总剂量效应、位移损伤效应以及单粒子效应<sup>[3,4]</sup>. 针对标准 CMOS 工艺生产的 CIS, 国内外已对其空间累积辐射效应进行广泛的研究<sup>[5,6]</sup>.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12175307)、中国科学院重点部署项目 (批准号: ZDRW-CN-2020-2) 和新疆维吾尔自治区天山青年计划 (批准号: 2019Q085) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 47144392@qq.com

‡ 通信作者. E-mail: guoqi@ms.xjb.ac.cn

Hopkinson 等<sup>[7]</sup>在重离子辐照后的 CIS 采集图像上发现了许多瞬态白色亮斑. Goffion 团队<sup>[8,9]</sup>于 2013 年对分别对两款商用 3T 和 4T CIS 进行重离子实验,研究了部分典型的 SEU 和 SEL 现象. 中国科学院新疆理化所蔡毓龙等<sup>[10–11]</sup>对商用 CIS 进行了重离子实验,首次全面研究了重离子辐照 CIS 像素阵列产生不同形状单粒子瞬态亮斑形成机理,同时首次报道分析了一些复杂单粒子 SEL 现象. 除了重离子诱导 CIS 单粒子效应, Beaumel 等<sup>[12]</sup>通过选用不同能量的质子辐照图像传感器,也发现了瞬态亮斑. 目前研究虽然发现了质子辐照诱导 CIS 瞬态亮斑现象,但缺少对其特征参数的分析提取. 同时,国内外尚未有公开报道 BSI CIS 质子单粒子效应的研究.

本文主要分析不同能量质子辐照下 FSI 和 BSI CIS 的单粒子效应. 首先描述了 CIS 外围电路质子辐照评估结果. 接着对不同质子能量辐照下, FSI 和 BSI CIS 的瞬态亮斑进行分析比较. 最后通过仿真分析预测质子辐照 FSI 和 BSI CIS 瞬态亮斑沉积能量分布,讨论了不同参数对质子在 CIS 中沉积能量的分布的影响.

## 2 实验样品与条件

实验样品分为 FSI CIS 和 BSI CIS, 两款 CIS 均采用 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS 工艺. 除了像素阵列, CIS 集成了行选逻辑、列选逻辑、时序控制器、模拟信号处理模块、数模转换、输出接口等不同功能的读出电路, CIS 整体电路结构如图 1(a) 所示. 像素单元设计采用 4T 结构, 如图 1(b) 所示. 在像素单元中, 包含钳位光电二极管、传输管、复位管、源跟随

器以及一个行选择管, 4T 像素由于将光生电荷区 PPD 和电荷存储区通过传输管隔离, 从而实现了相关双采样.

实验在瑞士保罗谢勒研究所 (PSI) 质子加速器上进行, 选用质子特性如表 1 所示. 辐照外围电路时, 注量率为  $1 \times 10^6 \text{ particle}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ . 辐照 CIS 像素阵列时, 为避免注量率过大导致瞬态亮斑互相重叠, 选用的注量率为  $1 \times 10^5 \text{ particle}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ . 实验中粒子垂直入射器件表面, 实验中器件已开盖, 辐照在暗场下进行.

表 1 质子辐照信息

Table 1. Proton irradiation information.

能量/MeV	LET/ $[\text{MeV} \cdot (\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}]$	Si 中射程/mm	样品数
60	$8.6 \times 10^{-3}$	16.8	1
100	$5.9 \times 10^{-3}$	41.6	1
150	$4.4 \times 10^{-3}$	84.6	1
200	$3.6 \times 10^{-3}$	138.6	1

## 3 结果分析

### 3.1 外围电路

之前的重离子实验研究表明, 当重离子 LET 约为  $21 \text{ MeV}/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$  时, CMOS 图像传感器出现单粒子闩锁效应 (SEL)<sup>[11]</sup>. 为了研究实验样品的质子单粒子效应敏感性, 质子能量选择最大值 200 MeV, 注量率为  $1 \times 10^6 \text{ particle}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ , 辐照总注量达  $1 \times 10^{10} \text{ particle}/\text{cm}^2$ , 未观察到单粒子闩锁现象, 同时也未监测到外围电路发生单粒子翻转 (SEU) 和功能中断现象. 所以根据实验结果, 对于本文所采用的样品的外围电路, 当质子能量小于 200 MeV 时, 不会发生单粒子闩锁和单粒子翻转现象.

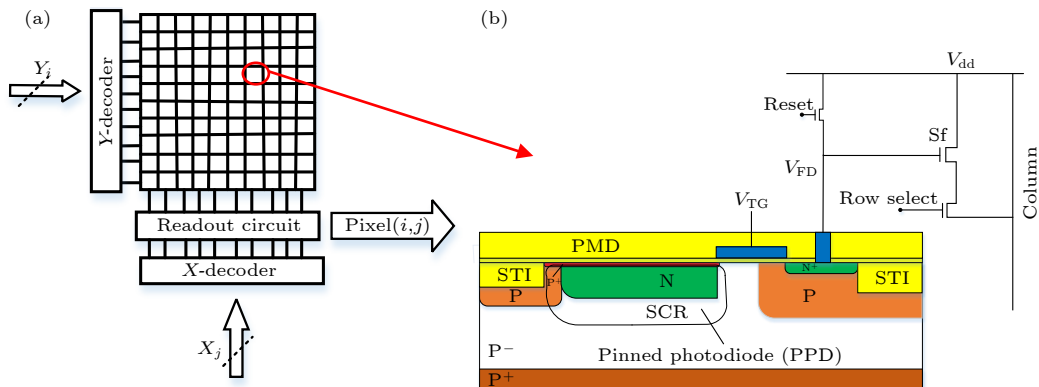


图 1 CIS 的 (a) 整体电路结构和 (b) 像素单元剖面图

Fig. 1. (a) Circuit structure and (b) pixel cross section diagram of CIS.

### 3.2 像素阵列

4T PPD 像素单元由钳位光电二极管和 MOS 管组成, 没有存储电路和 CMOS 电路, 因此不会发生 SEL 和 SEU 现象. 实验中在图像上观察到不同形状的亮斑, 如图 2 所示. 在 CIS 整个工作流程中, 像素阵列光敏单元中光电二极管工作时序可大致分为信号积分、信号读出和重新复位光电二极管电势 3 个阶段. 在信号积分阶段, 质子在样品敏感层中产生的电子空穴对被光电二极管耗尽区收集, 引起 PPD 区域电势变化, 变化的电势通过晶体管读出, 表现在图像上即出现灰度值大于背景值的亮斑. 一次粒子入射会改变当前积分阶段的 PPD 中的电势, 在下一次积分前, PPD 中电势被重新复位到高电平. 因此当前图像中出现的亮斑, 在下一帧会消失, 这种亮斑被称为单粒子瞬态亮斑. 像素阵列相邻像素之间通过浅沟槽 (STI) 进行隔离, 入射在某像素敏感层中粒子径迹上的电子空穴对, 除了被该像素单元 PPD 收集, 可能还会通过漂移/扩散运动到相邻的像素, 因此表现在图像上就是一个亮斑, 而不是亮点.

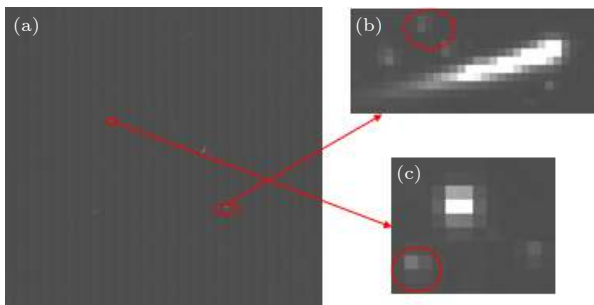


图 2 质子辐照 FSI CIS 诱导单粒子瞬态亮斑

Fig. 2. Single event transient bright spot of FSI CIS irradiated by proton.

质子诱导半导体器件发生单粒子效应主要通过两种方式: 一是通过直接电离, 使核外电子获得能量, 从而被激发释放; 二是通过核反应, 即高能质子直接与原子核发生碰撞, 使原子发生位移, 同时产生光子、轻粒子以及一些反冲原子<sup>[13]</sup>. 依据瞬态亮斑的形状和总的灰度值大小, 可将质子辐照 CIS 像素阵列诱导的单粒子瞬态亮斑分为三类. 第一种如图 2(b), (c) 中红色标注所示, 这种瞬态亮斑灰度值最低, 占据像素单元个数最小, 但是数量最多. 因此可以判断这种瞬态亮斑由质子直接电离导致. 因为几乎所有的质子入射 CIS 进入敏感层, 都会和硅通过库仑相互作用激发释放硅核外电子, 产生电子空穴对. 第二种瞬态亮斑如图 2(c) 中较亮的光斑所示, 和第一种亮斑形状相似, 近似圆形, 但亮度明显比第一种瞬态亮斑大, 且数量很少. 这种亮斑是由高能质子与 CIS 像素单元发生核反应导致. 第三种瞬态现象如图 3(b) 中亮线所示, 和前面两种亮斑最大的不同是, 这种瞬态现象形状上呈一条亮线, 灰度值也比第一种亮斑大很多, 这被称为单粒子瞬态亮线. 和第二种亮斑一样, 瞬态亮线数量很少. 因此可以判断瞬态亮线也是由于高能质子和 CIS 像素单元发生核反应导致. 当核反应产生的次级粒子和像素单元垂直面夹角较小, 这种瞬态现象表现在图像上就是亮斑. 而当产生次级粒子出射角度大, 次级粒子会经过多个像素, 产生的电子空穴对会被粒子径迹周围像素收集, 表现在图像上就是单粒子瞬态亮线.

为了进一步分析瞬态亮斑特征, 提取瞬态亮斑两个重要参数, 亮斑覆盖像素单元数量和亮斑总的沉积能量. 测试时, 采集的图像信号值为灰度值, 单位为 DN(digital number), 表示由 AD 转换后直

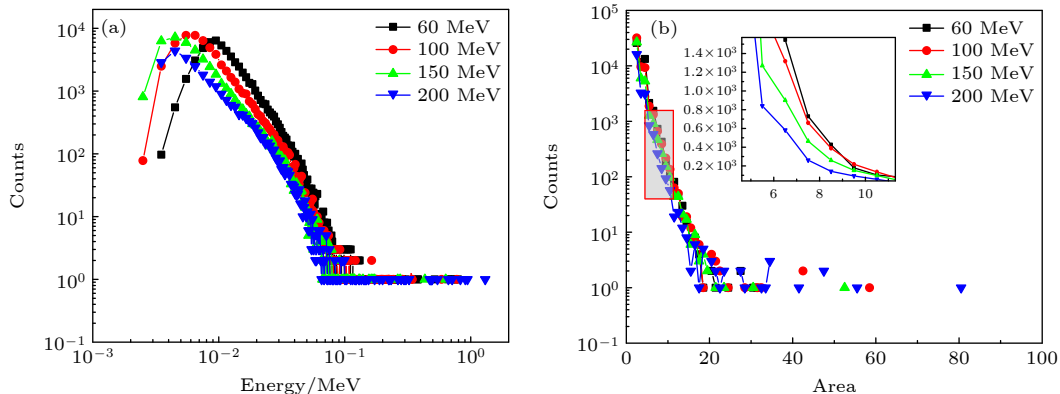


图 3 不同能量质子辐照 FSI CIS 瞬态亮斑 (a) 沉积能量; (b) 尺寸大小

Fig. 3. (a) Deposition energy and (b) size of FSI CIS transient bright spot irradiated by proton at different energies.



接得到的数字信号值. 一个亮斑总的沉积能量  $E_d$  为

$$E_d = \frac{1}{K} \left( \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M y_{\text{cluster}}[n][m] - \mu_{y,\text{dark}} \right) E_{\text{ion}}, \quad (1)$$

其中,  $y_{\text{cluster}}$  是亮斑中一个像素单元灰度值,  $N$  和  $M$  分别为某个亮斑的长和宽,  $\mu_{y,\text{dark}}$  为辐照前暗场条件下图像平均灰度值,  $K$  为转换增益,  $E_{\text{ion}}$  为沉积能量在材料中的平均电离能, 硅中为 3.6 eV. 其中平均灰度值通过取多帧图像求得, 这样可以减小测试数据的随机性和降低噪声的数量级. 随机选取辐照后连续 8 帧图像, 统计其中瞬态亮斑特性, 得出不同能量质子辐照 FSI 和 BSI CIS 瞬态亮斑沉积能量和亮斑覆盖像素单元数量分布图, 分别如图 3 和图 4 所示. 由于实际注量率的波动, 不同能量下统计的亮斑数量在 52000—56000 之间波动. 实验获得的瞬态亮斑沉积能量分布特征符合 Landau 分布, 即分布显示为一个窄峰和长的拖尾. 峰值左侧, 沉积能量快速增大, 峰值右侧, 沉积能

量缓慢下降. 沉积能量峰值表示着质子在 CIS 像素阵列最可能沉积的能量值. 随着质子能量的增大, 沉积能量峰值左移, 这是因为随着质子能量的增大, 质子 LET 减小. 不同的是, 随着能量的增大, 分布的拖尾部分右移, 这是因为能量更高的质子和材料相互作用将产生具有更高 LET 的次级粒子. 从图 3(b) 可见, 瞬态亮斑尺寸分布逐渐减小, 尾部出现小幅度波动. 随着质子能量的增大, 质子直接电离导致的瞬态亮斑尺寸逐渐减小, 尾部核反应产生的亮斑尺寸明显增大, 200 MeV 质子产生的瞬态亮斑最大覆盖 80 多个像素单元, 这说明次级粒子产生的电荷被 80 多个像素单元共享.

BSI CIS 中瞬态亮斑沉积能量和尺寸大小分布趋势和 FSI CIS 相同, 区别是亮斑沉积能量和尺寸大小分布范围发生明显左移. 图 5 比较了 60 MeV 质子辐照 FSI 和 BSI CIS 沉积能量和尺寸大小分布. 实验结果表明 BSI CIS 沉积能量分布整体明显左移, 峰值能量由 0.0095 MeV 减小到 0.0035 MeV,

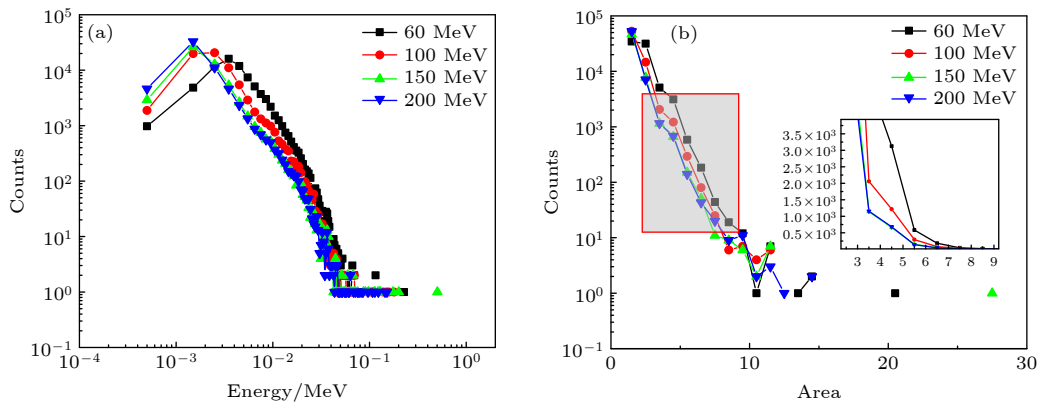


图 4 不同能量质子辐照 BSI CIS 瞬态亮斑 (a) 沉积能量; (b) 尺寸大小

Fig. 4. (a) Deposition energy and (b) size of BSI CIS transient bright spot irradiated by proton at different energies.

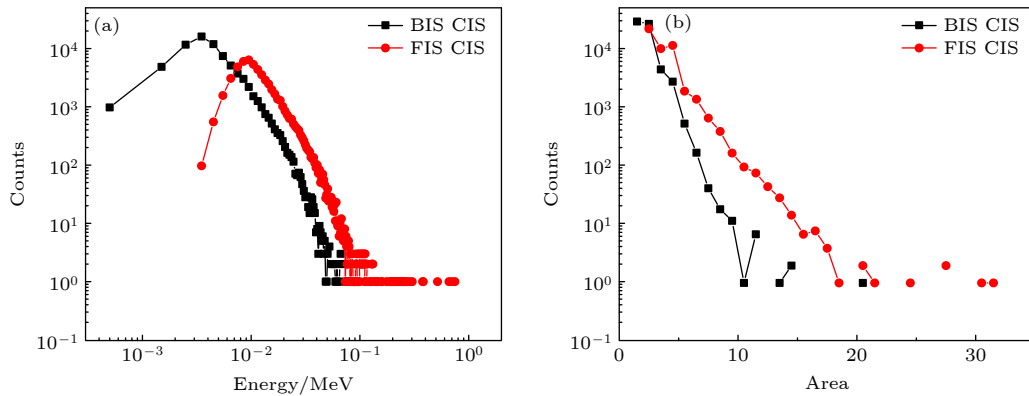


图 5 60 MeV 质子辐照 FSI 和 BSI CIS 瞬态亮斑 (a) 沉积能量; (b) 尺寸大小

Fig. 5. (a) Deposition energy and (b) size of FSI and BSI CIS transient bright spots irradiated by 60 MeV proton.

最大沉积能量减小为 0.23 MeV. 和亮斑沉积能量变化一致, BSI CIS 亮斑尺寸大小分布也整体左移, 即亮斑尺寸明显减小.

## 4 仿真分析

### 4.1 模型结构

利用 Geant 4 模拟了质子辐照像素阵列后 SET 亮斑沉积能量的分布. 在器件模型的基础上, 通过识别不同能量粒子入射后初级粒子以及其在材料中通过核反应产生的次级粒子, 追踪直接电离过程和核反应过程沉积的能量. 图 6 显示了 FSI CIS 像素阵列正视图和俯视图结构, 其中包含钳位光电二极管的外延层, 不同厚度的金属层和氧化层. 实际结构中外延层下还有厚度达几百微米的衬底, 但考虑到衬底掺杂浓度高, 衬底中产生的载流子基本都被复合, 因此近似外延层厚度为电荷收集敏感层厚度. 和 FSI CIS 结构不同的是, BSI CIS 衬底在上, 金属层和氧化层在下层, 且通常 BSI CIS 衬底在工艺中被减薄. 考虑到实际亮斑尺寸最大值, 选择建立  $10 \times 10$  大小的像素阵列, 每个像素大小为  $11 \mu\text{m}$

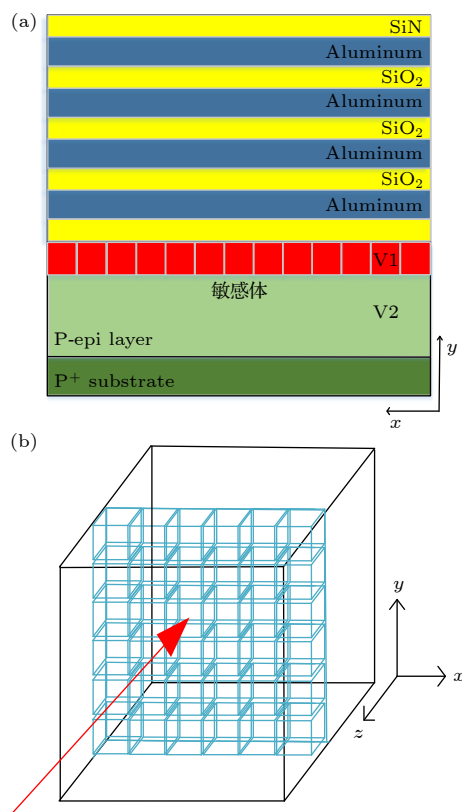


图 6 (a) FSI 和 (b) BSI CIS 像素单元仿真模型结构

Fig. 6. (a) FSI and (b) BSI CIS pixel structure model.

$\times 11 \mu\text{m}$ , 因此建立的 FSI 和 BSI CIS 阵列长宽为  $110 \mu\text{m} \times 110 \mu\text{m}$ .

图 7 所示为 4 T 像素阵列的晶体管结构图. 对于试验样品, 像素单元的 PPD 区域约占像素面积的 80%. 在 Geant 4 建立的像素阵列模型中, 底部 PPD 区域大小为  $8.8 \mu\text{m} \times 8.8 \mu\text{m}$ , 厚度为外延层厚度, FSI 和 BSI CIS 厚度分别为  $12 \mu\text{m}$  和  $4 \mu\text{m}$ .

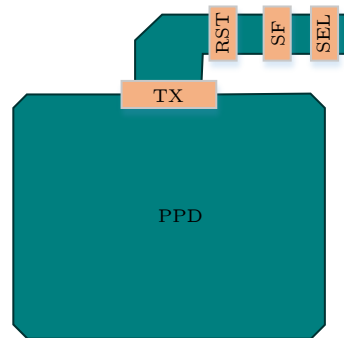


图 7 单个像素单元结构

Fig. 7. Structure of single pixel cell.

### 4.2 结果分析

入射质子导致像素单元发生单粒子瞬态, 这实际上是单个粒子与光电二极管中不同结构反应后沉积的能量总和. 如果简单的采用敏感区域模型, 忽略外延层的作用, 会发现模拟结果与实际结果相差甚远. 所以本文根据 2010 年 Warren 等<sup>[14]</sup>提出的复合模型, 将不同区域与质子的作用体现为不同的电荷收集效率, 以呈现对亮斑沉积能量的不同贡献, 通过调整电荷收集效率, 提高复合模型的准确性, 可精准预测不同能量质子在器件中的亮斑沉积能量分布. 同时本文将模拟区域以内外层的方式交叠排列, 每个区域设定不同的电荷收集效率  $\alpha$ . 对于本文中的实验样品, 模型主要包含两个区域, 分别为 V1 和 V2, 其中 V1 定义为 PPD 区域, 厚度为其耗尽层厚度, 电荷收集效率  $\alpha = 1$ . V2 定义为像素单元 PPD 以外的区域, 厚度为从耗尽区下边界到外延层下边界.

图 8 显示了 V2 收集效率分别设置为 0.6 和 0.2 时 FSI CIS 60 MeV 质子在亮斑中沉积能量的分布. 结果表明 V2 收集效率为 0.6 时, 仿真结果明显高估了实际亮斑沉积能量值. 当 V2 收集效率减小到 0.2 时, 仿真结果和实验结果很好地吻合. 为验证建立的复合模型的准确性, 进一步仿真了 100 MeV 和 200 MeV 质子产生的亮斑沉积能量分

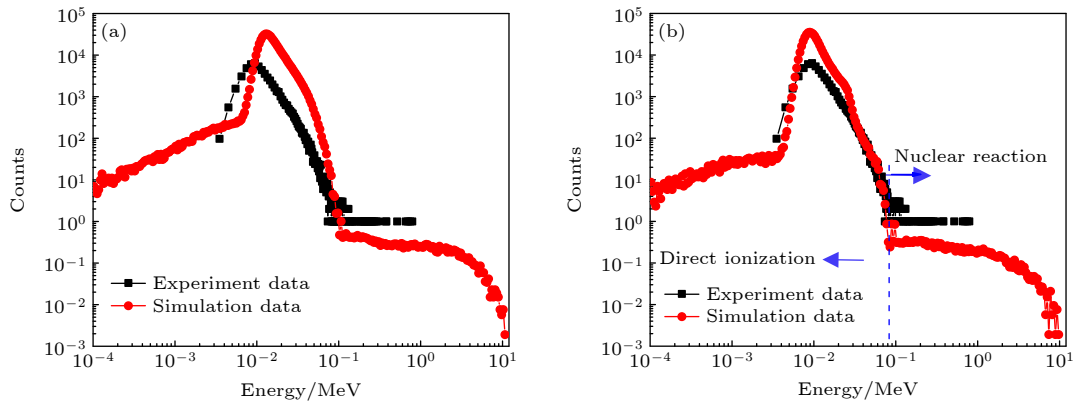


图 8 FSI CIS 敏感体 V2 收集效率分别为 (a) 0.6 和 (b) 0.2 时亮斑沉积能量分布的仿真和实验结果比较图

Fig. 8. Comparison of simulation and experimental results of bright spot deposition energy distribution when the collection efficiency of FSI CIS sensitive V2 being (a) 0.6 and (b) 0.2.

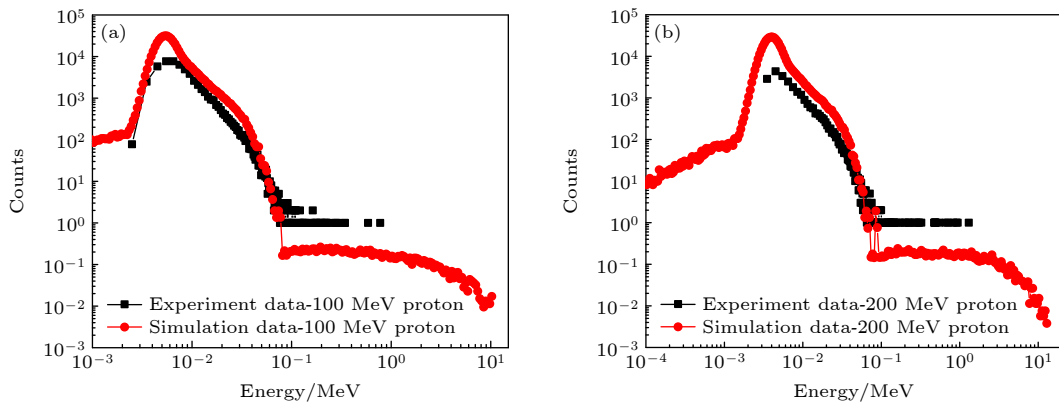


图 9 (a) 100 MeV 和 (b) 200 MeV 质子辐照 FSI CIS 瞬态亮斑沉积能量分布仿真和实验结果比较图

Fig. 9. Comparison of simulation and experimental results of FSI CIS bright spot deposition energy distribution irradiated by proton of (a) 100 MeV and (b) 200 MeV.

布, 如图 9 所示. 结果验证了仿真结果能够较好地预测不同能量质子在实验样品中通过直接电离产生的亮斑沉积能量分布. 同时结果显示仿真结果和实验结果存在一些差异, 首先实验结果没有呈现沉积能量小于 0.002 MeV 左右亮斑, 这是因为我们通过设置灰度值阈值的方法提取亮斑, 为了去除背景灰度和噪声的影响, 设置的灰度值阈值不能过低, 因此忽略一部分灰度值接近背景值的亮斑. 除此之外 FSI CIS 仿真结果直接电离部分统计个数略微大于实验值, 尤其是沉积能量峰值部分, 这是因为为了提高仿真数据准确性, 又便于和实验结果进行比较, 仿真入射粒子总数设为  $10^6$ , 比实验粒子注量高一个数量级. 而对于核反应导致亮斑沉积能量部分, 仿真结果沉积能量为一段连续分布, 其每个沉积能量点统计数小于实验对应能量点统计数. 这是因为核反应的反应截面很低, 仿真的方法是统计每一个能量点截面, 而因为实验粒子注量

约  $10^5$ , 器件尺寸为  $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ , 因此出现核反应事件数量很少, 表现在图像上就是少数离散的亮斑. 仿真获得亮斑沉积能量最大值接近 10 MeV, 大于实验获得亮斑沉积能量最大值, 这是因为产生高沉积能量的次级粒子较少, 所以实验中因粒子注量小而并未观察到沉积能量大于 1.2 MeV 亮斑. 通过仿真和实验结果比较, 60 MeV 质子辐照后, 沉积能量大于 0.077 MeV 左右的部分为核反应过程, 小于 0.077 MeV 的部分为直接电离过程.

不同于 FSI CIS 像素结构, BSI CIS 像素单元外延层厚度约  $4 \mu\text{m}$ , PPD 耗尽区厚度约  $2 \mu\text{m}$ . 因此对于 BSI, 仿真建立的探测器复合敏感体 V1 和 V2 厚度较 FSI CIS 较小. 但 BSI CIS 中复合敏感体收集效率设置和 FSI CIS 相同. 注量率为  $1.5 \times 10^5$  时, 60 MeV 质子亮斑沉积能量的仿真和实验结果比较如图 10 所示. 结果验证了建立的仿真模型不仅能够预测 FSI CIS, 而且能够很好预测质子

在 BSI CIS 中直接电离后导致的亮斑沉积能量分布. 为了进一步分析实验结果中质子在 FSI 和 BSI CIS 中沉积能量不同原因, 基于已有的 BSI CIS 探测器结构, 分别通过在该探测器模型上增大金属和氧化层、改变 PPD 耗尽区厚度、改变外延层厚度三种方法, 构建新的探测器结构, 进行质子沉积能量仿真计算, 结果如图 11 所示. 结果显示, 分别只改变 BSI CIS 外延层厚度和 PPD 耗尽区厚度, 质子沉积能量分布发生明显右移, 而增大金属层和氧化层只使得沉积能量分布左侧部分略微减小, 核反应分布部分未见变化, 能量分布也未发生偏移. 这表明 BSI CIS 实验样品亮斑沉积能量分布相比 FSI CIS 发生左移, 主要是受 PPD 区域耗尽区厚度减小和外延层减薄的影响.

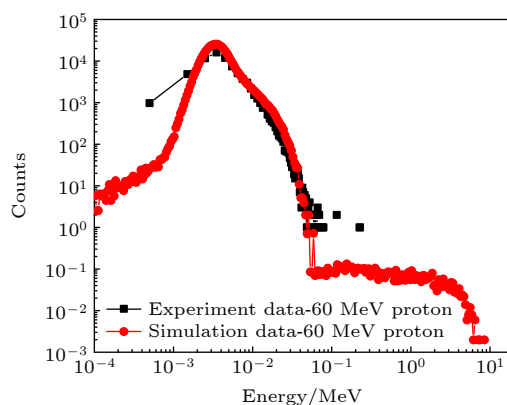


图 10 60 MeV 质子辐照 BSI CIS 瞬态亮斑沉积能量分布仿真和实验结果比较图

Fig. 10. Comparison of simulation and experimental results of BSI CIS bright spot deposition energy distribution irradiated by 60 MeV proton.

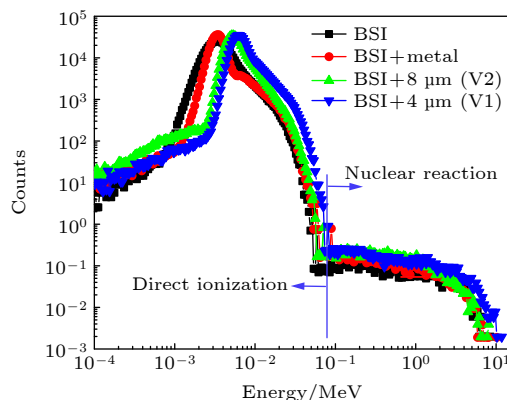


图 11 质子辐照具有不同敏感层结构 BSI CIS 后瞬态亮斑沉积能量分布仿真结果比较图

Fig. 11. Comparison of simulation results of BSI CIS transient bright spot deposition energy distribution irradiated by proton of different sensitive layer structures.

## 5 结 论

本文研究了质子辐照在 FSI 和 BSI CMOS 图像传感器中诱导产生的单粒子效应. 质子最高能量为 200 MeV, 试验中未观察到外围电路的 SEL 和 SEU 现象. 质子辐照 CIS 像素阵列后, 发现不同形状的单粒子瞬态亮斑. 其中亮斑形状和灰度值大小由质子直接电离, 以及质子和材料发生核反应产生的次级粒子电离导致. 质子辐照 CIS 产生的瞬态亮斑沉积能量分布具有一个窄峰和长的拖尾. 峰值左侧, 沉积能量快速增大, 峰值右侧, 沉积能量缓慢下降, 其分布特征符合 Landau 分布. 随着质子能量的增大, 亮斑沉积能量峰值左移, 拖尾部分右移. BSI CIS 中瞬态亮斑沉积能量分布和尺寸大小分布趋势和 FSI CIS 相同, 不同的是亮斑沉积能量和尺寸大小分布范围发生明显左移. 通过仿真建立了像素结构模型, 通过与实验数据对比, 能够预测不同能量质子在实验样品中直接电离产生的亮斑沉积能量分布. 同时, 通过仿真工具改变探测器的结构参数, 验证了 BSI CIS 样品中亮斑沉积能量分布相较 FSI CIS 发生左移, 主要是受 PPD 耗尽区以及外延层厚度的影响.

## 参考文献

- [1] Sellier C, Gambart D, Perrot N, Garcia-Sanchez E, Virmondois C, Mouallem W, Bardoux A 2018 *International Conference on Space Optics*, Chania, Greece, 2018 11180
- [2] BenMoussa A, Giordanengo B, Gissot S, et al. 2013 *IEEE T. Electron. Dev.* **60** 1
- [3] King E E, Nelson G P, Hughes H L 1972 *IEEE T. Nucl. Sci.* **19** 264
- [4] Ferlet C V, Dupont N E, Vildeuil J C 1998 *Radecs 97: Fourth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems* Paris, France, 1998
- [5] Hancock B R, Soli G A 1997 *IEEE T. Nucl. Sci.* **44** 1957
- [6] Goiffon V, Estrubeau M, Magnan P 2009 *IEEE T. Electron. Dev.* **56** 2594
- [7] Hopkinson G R, Mohammadzadeh A, Harboe-Sorensen R. 2004 *IEEE T. Nucl. Sci.* **51** 2753
- [8] Lahuca V, Goiffon V, Magnan P 2013 *IEEE T. Nucl. Sci.* **60** 2494
- [9] Virmondois C, Toulemont A, Rolland G 2014 *IEEE T. Nucl. Sci.* **61** 3331
- [10] Cai Y L, Guo Q, Li Y D 2019 *Solid-State Electronics* **152** 93
- [11] Cai Y L, Wen L, Li Y D 2020 *IEEE T. Nucl. Sci.* **67** 1861
- [12] Beaumel M, Herve D, Van A D 2014 *IEEE T. Nucl. Sci.* **61** 1909
- [13] Hiemstra D M, Blackmore E W 2003 *IEEE T. Nucl. Sci.* **50** 2245
- [14] Warren K M 2010 *Ph. D. Dissertation* (Tennessee: Vanderbilt University)



# Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation\*

Fu Jing<sup>1)2)3)</sup>   Cai Yu-Long<sup>4)</sup>   Li Yu-Dong<sup>1)2)</sup>   Feng Jie<sup>1)2)</sup><sup>†</sup>  
 Wen Lin<sup>1)2)</sup>   Zhou Dong<sup>1)2)</sup>   Guo Qi<sup>1)2)</sup><sup>‡</sup>

1) (*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*)

4) (*Innovation Academy for Micrisatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200011, China*)

( Received 4 October 2021; revised manuscript received 8 November 2021 )

## Abstract

Complementary metal oxide semiconductor (CMOS) image sensor is susceptible to proton single event effect when being applied to space environment. Proton irradiation experiments with different energy values are carried out on a commercial FSI and BSI CMOS image sensors. The proton single event effect is analyzed by on-line testing, the maximum proton energy is 200 MeV, and the total fluence is  $10^{10}$  particle/cm<sup>2</sup>. The single-event transient bright spots of different shapes are observed in the pixel array. By extracting the deposition energy and size, the effects of different energy protons on transient bright spot characteristics are compared, and the transient bright spot characteristics between FSI and BSI are also compared. Finally, the energy deposition distribution of the transient bright spot generated by proton in CMOS image sensor pixel unit is predicted by comparing the simulation method with the experimental results. The simulation results verify that the decrease of PPD depletion region thickness and the thinning of epitaxial layer are the main factors leading the proton energy deposition distribution to shift leftward in BSI image sensor.

**Keywords:** CMOS image sensor, proton irradiation, single event effect, transient bright spot

**PACS:** 42.88.+h, 85.60.Dw, 61.72.J–

**DOI:** 10.7498/aps.71.20211838

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12175307), the Key Deployment Projects of Chinese Academy of Sciences (Grant No. ZDRW-CN-2020-2), and the Tianshan Youth Project of the Autonomous Region, China (Grant No. 2019Q085).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [47144392@qq.com](mailto:47144392@qq.com)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [guoqi@ms.xjb.ac.cn](mailto:guoqi@ms.xjb.ac.cn)