

4T-PPD-APS 光子辐射响应特性分析

徐守龙¹, 邹树梁^{1*}, 黄有骏², 匡雅¹, 郭赞¹

¹南华大学环境与安全工程学院, 湖南 衡阳 421001;

²中国核动力研究设计院设计所, 四川 成都 610213

摘要 分析了含有 4 个晶体管的钳位光电二极管有源像素传感器(4T-PPD-APS)的结构特点以及 γ 射线光子在像元内的能量沉积过程。通过建立传感器像元及像素阵列仿真计算模型,并结合 γ 射线辐射响应实验,对有源像素传感器(APS)在不同光子能量及不同放射性水平条件下的响应特性进行了研究。研究表明: γ 光子在光电二极管空间电荷区内沉积能量并形成扩散光电流是 APS 发生光子响应现象的根本原因;像素值的平均值随剂量率的增大呈先增大后趋于饱和的趋势;当典型事件区域内出现多个峰值时,像素值的统计值不能准确反映辐射场放射性水平。

关键词 探测器; 互补金属氧化物半导体有源像素传感器; 光子辐射响应; 钳位光电二极管

中图分类号 TN946.1; TN65; TL99

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0504002

Analysis of Photon Radiation Response Characteristics of 4T-PPD-APS

Xu Shoulong¹, Zou Shuliang¹, Huang Youjun², Kuang Ya¹, Guo Zan¹

¹School of Environmental and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

²Nuclear Power Institute of China, Sichuan, Chengdu, Sichuan 610213, China

Abstract The structural features and the energy deposition process of γ -ray photons in the pixels for the 4 transistors pinned photodiode active pixel sensors (4T-PPD-APSs) are analyzed. By the establishment of simulation calculation models of sensor pixels and pixel array and by the experiment of γ -ray radiation response, the response characteristics of the active pixel sensors (APS) under different photon energies and different radioactivity level conditions are investigated. The research results show that, the energy deposition of the γ photon at the photodiode spatial charge area and the formation of diffused photocurrent are the root causes for the photon response phenomena occurring in the APS. The mean pixel value first increases and then tends to saturate with the increase of the dose rate. When the multiple peaks appear in the typical event areas, the statistical pixel value cannot accurately reflect the radioactivity level of the radiation fields.

Key words detectors; CMOS active pixel sensor; photon radiation response; pinned photodiode

OCIS codes 040.1490; 040.5160; 230.0040; 230.5160; 230.5170

1 引 言

随着半导体工艺的发展,互补金属氧化物半导体(CMOS)有源像素传感器(APS)已经成为市场的主流器件之一,关于其性能校准^[1],红外成像^[2]以及降噪算法^[3]的研究逐渐增多,近年来,CMOS-APS的空间辐射损伤也受到了广泛关注^[4-6]。徐守龙等^[7-8]针对地面辐射环境特点,对比了多类传感器的辐射

损伤特性,研究了 γ 射线对 CMOS-APS 性能参数的影响^[9],并讨论了 CMOS-APS 在核事故辐射环境中的适用性^[10-12]。关于粒子探测方面,自 19 世纪以来,核辐射探测领域的学者一直在探索利用像素传感器进行粒子探测的方法^[13],并于 2008 年首次通过实验证实了 CMOS-APS 对 X 射线辐射具有很好的线性响应特性^[14],之后相继有学者证实 CMOS 传感器输出像素灰度与 γ 射线的能量相关^[15]。近年来,

收稿日期: 2017-11-08; **收到修改稿日期:** 2017-12-25

基金项目: 湖南省科技重大专项(2012FJ1007)

作者简介: 徐守龙(1988—),男,博士,讲师,主要从事电离辐射效应与探测技术方面的研究。

E-mail: kane880630@hotmail.com

* **通信联系人.** E-mail: zousl2013@126.com

基于 CMOS-APS 的探测技术被广泛应用于医学领域^[16],逐渐开发出了利用智能手机摄像头 CMOS-APS 的辐射探测功能^[17-20]。Pérez 等^[21]利用商用 CMOS 像素传感器实现了对不同粒子的探测与甄别,并成功用于阿根廷 RA6 反应堆不同 γ 注量的监测^[22]。魏清阳等^[23]基于 CMOS-APS 与 X/ γ 射线的直接作用,通过实验证实了在不遮光静态场景条件下利用 CMOS-APS 进行核辐射探测的可能性。

本文通过分析含有 4 个晶体管的钳位光电二极管有源像素传感器(4T-PPD-APS)的结构特点,以及 γ 光子在像元内的能量沉积过程,建立了像元及像素阵列的仿真模型,研究了光子在 APS 像元内的能量沉积特性,并设计辐照实验研究了 4T-PPD-APS 的光子典型响应事件和响应规律。该研究结论为 APS γ 射线辐射探测技术的研究提供了理论和实验参考。

2 4T-PPD 结构与能量沉积

4T-PPD-APS 像元截面图如图 1 所示,其中 Φ_{SEL} 为选通管, V_{FD} 为浮点电压, Φ_{TG} 为传输管, Φ_{RS} 为复位管, V_{DD} 为复位电压, P_{EPI} 为 P 型衬底, P_{CIS} 为 P 型掺杂区, STI 为浅槽隔离结构。 N^+ 区域掩埋在半导体内部,并在表面有一层 P^+ 区域;光电二极管区域与浅槽隔离结构分离,使其耐辐射总剂量效应能力增强;传输门和浮置扩散节点区域能够实现相关双采样功能,降噪效果显著。本实验采用的 4T-PPD-APS 样品像元紧密排列,填充因子为 0.8,单个像元面积为 $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$,晶圆厚度为 $300 \mu\text{m}$,栅氧化层厚度不超过 10 nm,栅厚约为 200 nm,掺杂原子的原子数分数为硅原子的 1/50000。进行模拟计算和理论分析时,可将单个像元简化为本征硅矩形结构,整个像素阵列可视作紧密排列的矩形本征硅,像元可简化为图 2 所示的结构。

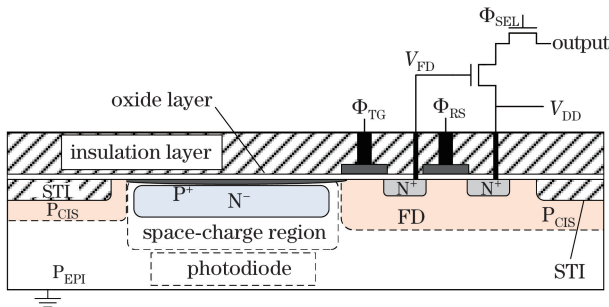


图 1 4T-PPD-APS 像元截面结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of cross sectional pixels of 4T-PPD-APS

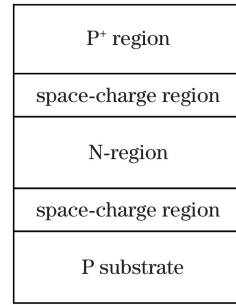


图 2 钳位光电二极管结构的物理模型
Fig. 2 Physical model of pinned photodiode structure

PPD 采用积分工作模式,钳位光电二极管输出电压为

$$V_{PD} = V_0 - V(t) = \frac{J_{total} \cdot T_{int}}{C_{PPD}}, \quad (1)$$

式中 V_{PD} 为光电二极管输出电压; V_0 为复位后光电二极管的初始电压; $V(t)$ 为光电二极管积分后的电压; J_{total} 为 PPD 电荷收集区内形成的总光电流; T_{int} 为积分时间; C_{PPD} 为钳位光电二极管结电容。其中,初始电压和结电容为常数,因此,当积分时间一定时,输出电压与总光电流直接相关。辐照期间,PPD 空间电荷区内所形成的总光电流为

$$J_{total} = J_N + J_P + J_{drift} + J_{dark} + \Delta J'_{dark}, \quad (2)$$

式中 J_N 和 J_P 分别为 N 区和 P 区内载流子漂移产生的光电流; J_{drift} 为空间电荷区内产生的扩散光电流; J_{dark} 和 ΔJ_{dark} 分别为 CMOS-APS 本征暗电流和辐射引起的暗电流增量。

γ 射线在 APS 像元材料中沉积能量并激发产生电子空穴对的能量转移过程如下:1) γ 射线在探测器材料内沉积能量;2) 产生光电子、反冲电子、电子对;3) 电子在物质中沉积能量并激发出电子空穴对。因此,对于探测器辐射响应的研究也正是讨论这一部分沉积能的大小,以及电子空穴对的产生和收集量。 γ 射线在探测器材料中的总沉积能为

$$E_{dep} = E_{\gamma, in} - E_{\gamma, out} - E_{e, out}, \quad (3)$$

式中 E_{dep} 为 γ 射线在探测器材料中沉积的能量; $E_{\gamma, in}$ 为入射 γ 射线的能量; $E_{\gamma, out}$ 为出射 γ 射线的能量; $E_{e, out}$ 为出射电子带出探测器材料的能量。

3 仿真计算

3.1 建立模型

根据实验中所采用的 4T-PPD-APS 尺寸参数,将像元简化为 $2.8 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 的矩形单晶硅结构。分别建立两种计算模型,利用蒙特卡罗法对 γ 射线在单个像元内的能量沉积以及射线在入

射像元周围像素内的能量沉积情况进行研究,模型结构示意图如图 3 所示。模型 I 采用点源垂直入射 15×15 像素阵列中心位置的单个像元,模型 II 采用 γ 射线面源垂直入射单个像元。

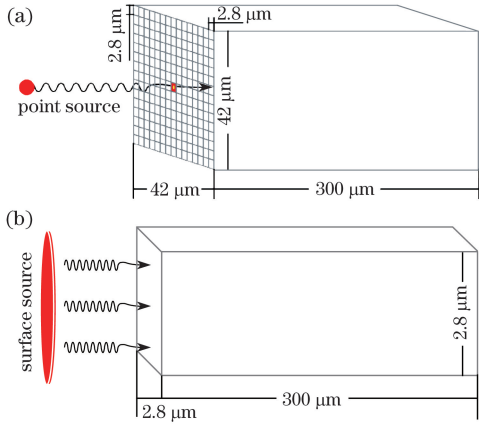


图 3 模拟仿真计算模型。(a)模型 I;(b)模型 II

Fig. 3 Calculation model for simulation.

(a) Model I; (b) model II

3.2 计算结果与讨论

利用模型 I 计算净沉积能与入射 γ 射线能量间的关系曲线如图 4 所示。可以看出, γ 射线在 CMOS-APS 探测器像元内的沉积能与入射光子能量有关:对于低能量的 γ 射线,光电效应占主导,光电子射程较小,光子在材料内的沉积能量较多;随着光子能量的增大,光电作用截面逐渐减小,当能量大于 0.04 MeV 时,康普顿效应逐渐占据主导地位,净沉积能急剧减小,之后随入射 γ 射线能量的增大而逐渐增大。

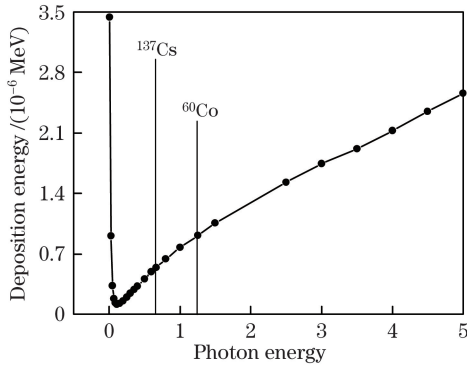


图 4 净沉积能与入射 γ 射线能量间的关系曲线

Fig. 4 Net deposition energy versus incident γ -ray energy

重点分析 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 放射源所放出的 γ 射线在像元内的净沉积能、能量沉积概率以及单个光子产生的吸收剂量,模拟计算所采用放射源信息及计算结果见表 1,其中 ^{60}Co 放射源同时释放出 1 个 1.17 MeV 的光子和 1 个 1.33 MeV 的光子, ^{137}Cs 放

射源释放光子能量为 0.622 MeV。结果表明, ^{60}Co 和 ^{137}Cs 放射源所释放的光子在像元内的能量沉积概率相同,静沉积能与入射光子能量相关,光子能量越大,静沉积能越大,这一计算结果可以解释图 4 中当射线能量大于 0.04 MeV 时,静沉积能随入射光子能量的增大而增大这一现象。

表 1 单个光子在像元内能量沉积的仿真计算结果

Table 1 Simulated results of single photon energy deposition in pixels

Radioactive source	Energy /MeV	Deposition energy /keV	Reaction probability /%
^{60}Co	1.17; 1.33	2.33575	0.039025
^{137}Cs	0.662	1.36526	0.039025

利用 ^{60}Co 放射源对模型 II 进行仿真计算, γ 射线垂直入射以及以 45° 角入射中心像元时,整个像素阵列的入射光子密度分布云图如图 5 所示。可以看出,无论 γ 射线是垂直入射还是带有方向角的入射,都会在射线经过像元的相邻区域内沉积能量。因此, γ 射线在像元内的能量沉积可表示为

$$E_{\text{dep}} = E_{\text{hv,dep}} + E_{\text{\delta,dep}}, \quad (4)$$

式中 E_{dep} 为像元内的总沉积能; $E_{\text{hv,dep}}$ 为 γ 射线在像

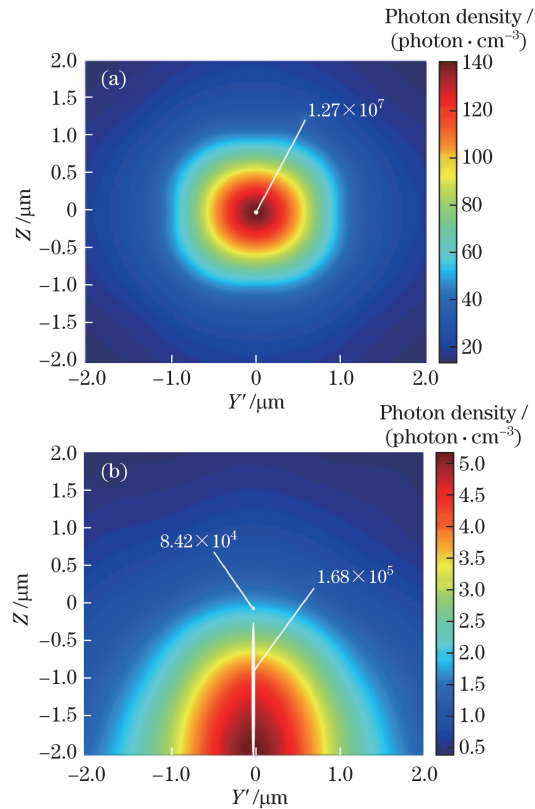


图 5 入射光子密度分布云图。(a)垂直入射;(b) 45° 角入射

Fig. 5 Nephogram of incident photon density distribution.

(a) Vertical incidence; (b) incidence with an angle of 45°

元内的能量沉积; $E_{\delta,dep}$ 为 γ 射线在相邻像元内发生反应后散射光子或电子在像元内的能量沉积。由图 5 可以看出, γ 射线在入射像元内所沉积的能量是周围因散射而沉积能量的 10000 倍以上, 因此在计算时, $E_{\delta,dep}$ 可忽略不计。此时, 像元内的沉积能是各个角度入射 γ 射线在像元内所沉积能量的总和。

仿真计算结果表明, γ 光子入射 APS 像素阵列后, 在区域像素范围内沉积能量, 根据光电二极管结构物理模型可知, 当沉积能在光电二极管空间电荷区内或附近产生的电荷被空间电荷区收集后, 光电二极管输出电压发生变化, 导致该像素输出信号值发生变化。因入射 γ 光子沉积能量而导致的区域像素范围内像素值的增大, 将其称之为典型光子响应事件。下面将设计辐射实验, 对 APS 的光子辐射响应特性与响应规律进行研究, 并对仿真分析结果进行验证。

4 辐射实验

4.1 实验样品

实验中涉及到的实验样品参数如下。1) 模数转换器: 位数为 8, 输出像素值区间为 0~255; 2) APS: 有效像素数量为 1920×1200 ; 3) 传感器: 积分时间为 $1/25$ s。

4.2 辐照源

实验中涉及到的辐射源如下。1) ^{137}Cs 放射源: 经准直后光子注量率约为 $657 \text{ photon} \cdot (\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$, 辐射场不均匀度小于 5%; 2) ^{60}Co 放射源: 放射源平均活度为 $9 \times 10^4 \text{ Bq}$, 辐射场不均匀度小于 10%。

4.3 实验操作

实验时, 将 4T-PPD-APS 芯片正对放射源准直孔。样品分别放置在 12 个具有不同剂量率的实验点。剂量率取值范围为 $9 \sim 680 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。剂量率采用化学剂量计测算获得, 不确定度小于 5%。

4.4 实验结果与讨论

^{137}Cs 源辐照条件下典型光子响应事件如图 6 所示, 其中 X 、 Y 分别为典型光子响应事件区域中横向和纵向的像素数量, 插图为响应事件区域的灰度反相图。可以看出, 在低注量率光子辐照条件下, 探测器阵列中各像元响应情况主要为: 1) 当区域像素阵列内入射光子量较小时, 典型事件表现为弱响应事件, 此时输出像素值仍出现峰值, 但峰值高度较小, 平均灰度值均在 15 以下; 2) 当区域像素阵列内入射光子量较大时, 光子响应事件峰值接近于最大值。

^{60}Co 源辐照条件下典型光子响应事件如图 7 所示。由图可知, 像素阵列区域内发生响应的像元

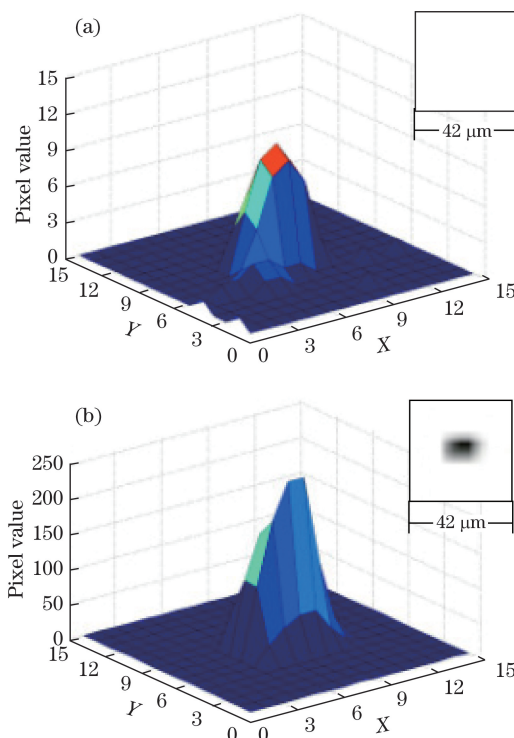


图 6 ^{137}Cs γ 射线典型光子响应事件网格图。

(a) 弱响应; (b) 强响应

Fig. 6 Meshes of typical photon response events with ^{137}Cs γ -rays. (a) Weak response; (b) strong response

数量和输出像素值与剂量率有关。图 7(a) 表明, 剂量率曲线未达到线性响应区时, 积分周期内光子响应事件发生频次较少, 且像元输出像素值峰值未能达到饱和量的 50%, 以弱响应事件为主; 剂量率处于线性响应区时, 发生辐射响应的像元数量及输出像素值随剂量率的增大而增大, 区域内均出现一个峰值, 如图 7(b)~(d) 所示; 当剂量率增长超出线性响应区时, 辐射响应情况变得不规律, 并出现多个峰值, 如图 7(e)~(h) 所示。随着剂量率的进一步增大, 剂量率曲线到达饱和区, 如图 7(i)~(l) 所示, 典型事件区域内的峰值进一步增多, 各像元辐射响应无序性增大, 像素输出像素值的统计值不能准确反映所测量辐射场的放射性水平信息。

辐射响应实验结果表明, 入射 γ 光子在区域像素内沉积能量, 导致像素值增大, 这与仿真计算分析结论相吻合。并且, 当入射光子量很大时, 光子响应区域内各像素的像素值接近饱和, 像素值统计值已无法反映辐射场的放射性水平。

5 结 论

4T-PPD-APS 对 γ 光子的辐射响应现象是由于光子在像元内沉积的那一部分能量产生了电荷, 这

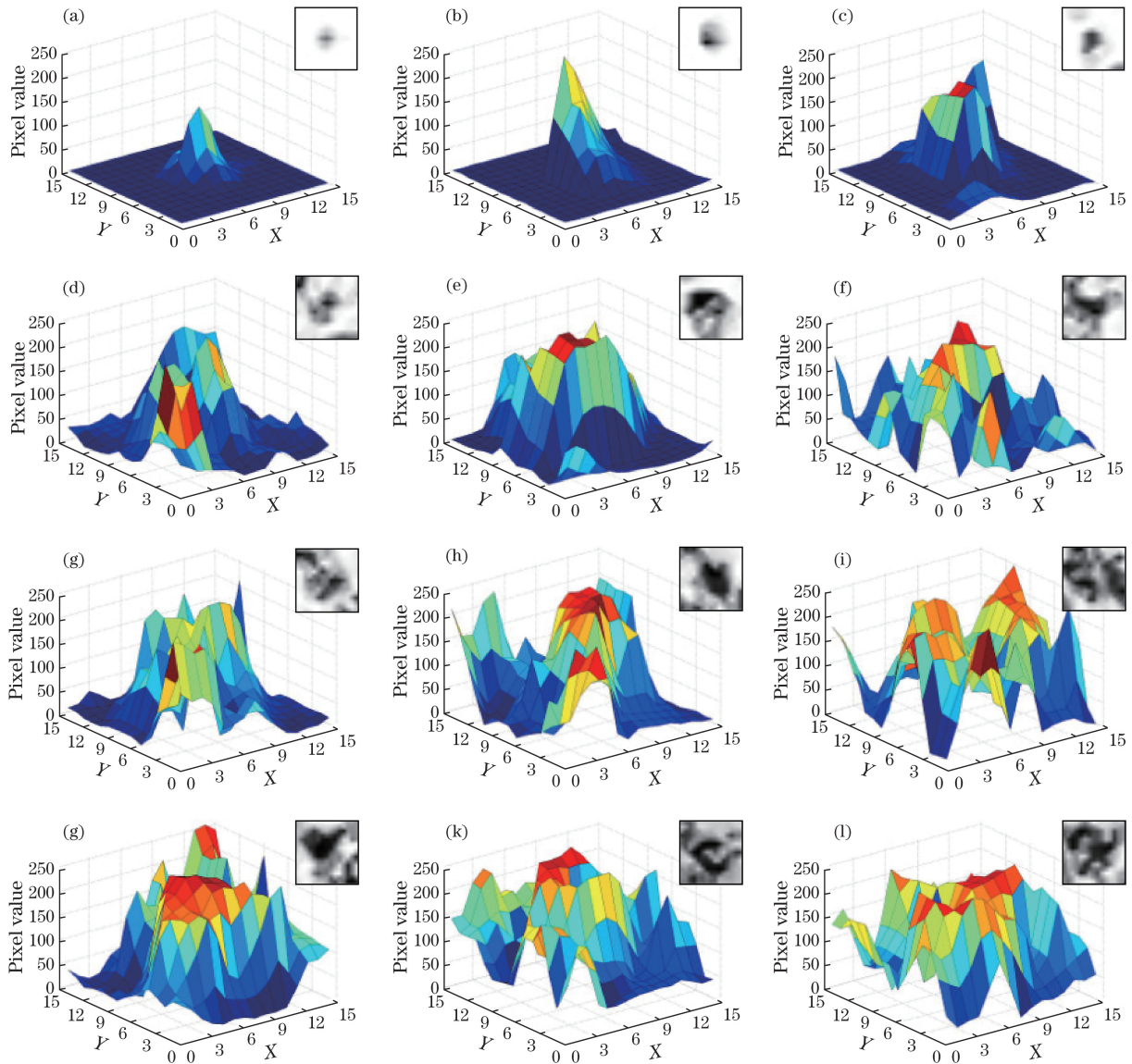


图 7 ^{60}Co γ 射线典型光子响应事件网格图。(a) $5.2 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (b) $21.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (c) $29.3 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (d) $69.2 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (e) $87.8 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (f) $128.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (g) $155.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (h) $173.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (i) $186.9 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (j) $216.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (k) $299.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (l) $276.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

Fig. 7 Meshes of typical photon response events with ^{60}Co γ -rays under different dose rates. (a) $5.2 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (b) $21.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (c) $29.3 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (d) $69.2 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (e) $87.8 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (f) $128.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (g) $155.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (h) $173.4 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (i) $186.9 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (j) $216.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (k) $299.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$; (l) $276.0 \text{ Gy}\cdot\text{h}^{-1}$

些电荷被 PPD 空间电荷区收集形成了光电流并转化为数字信号输出, PPD 总光电流主要为空间电荷区内电离辐射产生的扩散光电流。仿真计算结果表明, 光子在像元内的静沉积能与光子能量相关, 当光子能量大于 0.04 MeV 时, 静沉积能随入射光子能量的增大而增大, 且像元内的沉积能即为各个角度入射 γ 射线在像元内所沉积能量的总和, γ 射线在相邻像元内发生反应后散射光子或电子在像元内的能量沉积很小, 可忽略不计。辐射实验结果表明, γ 射线典型光子响应事件可分为弱响应事件与强响

应事件, 4T-PPD-APS 输出的平均像素值随剂量率的增大呈先增大后趋于饱和的趋势, 当典型事件区域内出现多个峰值时, 各像元辐射响应的无序性增大, 像素输出像素值的统计值不能准确反映所测量辐射场的放射性水平信息。实验结果与仿真计算分析结论相吻合。

参 考 文 献

- [1] Cai J D, Liu Q, Zou Y, *et al.* Design of tunable light source for calibration of CMOS image sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0323001.

- 蔡锦达, 刘倩, 邹亿, 等. CMOS 图像传感器校准用可调光源[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0323001.
- [2] Xia Z Y, Tian Y Z, Liang E J, *et al.* Infrared light field imaging based on camera array[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(9): 0911002.
夏朝阳, 田勇志, 梁二军, 等. 基于相机阵列的红外光场成像[J]. 光学学报, 2017, 37(9): 0911002.
- [3] Tan Z G, Ou J P, Zhang J, *et al.* A laminar denoising algorithm for depth image[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0510002.
谭志国, 欧建平, 张军, 等. 一种层析深度图像去噪算法[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0510002.
- [4] Virmondois C, Goiffon V, Robbins M S, *et al.* Dark current random telegraph signals in solid-state image sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(6): 4323-4331.
- [5] Wang F, Li Y D, Guo Q, *et al.* Total ionizing dose radiation effects in four-transistor complementary metal oxide semiconductor image sensors[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(2): 176-181.
王帆, 李豫东, 郭旗, 等. 基于 4 晶体管像素结构的互补金属氧化物半导体图像传感器总剂量辐射效应研究[J]. 物理学报, 2016, 65(2): 176-181.
- [6] Wang Z J, Ma W Y, Huang S Y, *et al.* Characterization of total ionizing dose damage in COTS pinned photodiode CMOS image sensors[J]. AIP Advances, 2016, 6(3): 035205.
- [7] Xu S L, Zou S L, Wu Z, *et al.* Comparative study on ionizing radiation damage of different types of image sensor modules[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2016, 50(11): 2092-2100.
徐守龙, 邹树梁, 武钊, 等. 多类图像传感器模组电离辐射损伤对比研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11): 2092-2100.
- [8] Xu S L, Zou S L. Total-ionizing-dose effects in pixel performance degradation of CMOS image sensors under low dose rate[C]. 23rd International Conference on Nuclear Engineering: Nuclear Power-Reliable Global Energy, 2015.
- [9] Xu S L, Zou S L, Huang Y J. Effect of γ -ray ionizing radiation on CMOS active pixel sensor[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(3): 308-315.
- [10] Xu S L, Zou S L, Huang Y J, *et al.* Availability evaluation and improvement plan of image sensors in accident of nuclear power plant[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, 36(6): 651-655.
- [11] Xu S L, Zou S L, Wu Z, *et al.* Research on availability of CIS digital module as monitoring and radiation alarm equipment under condition of nuclear accidents[J]. Nuclear Power Engineering, 2017, 38(1): 88-94.
- [12] Xu S L, Zou S L. Video monitoring system availability in radiation accident condition[C]. 24th International Conference on Nuclear Engineering, 2016.
- [13] Turchetta R, Berst J D, Casadei B, *et al.* A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2001, 458(3): 677-689.
- [14] Servoli L, Biagetti D, Passeri D, *et al.* Use of standard CMOS pixel imagers as ionizing radiation detectors[C]. IEEE Nuclear Science Symposium conference, 2008: 4774860.
- [15] Cogliati J J, Derr K W, Wharton J. Using CMOS sensors in a cellphone for gamma detection and classification[EB/OL]. (2014-01-04) [2017-05-06]. <https://arxiv.org/abs/1401.0766>.
- [16] Paolucci M, Battisti D, Biasini M, *et al.* A real time active pixel dosimeter for interventional radiology[J]. Radiation Measurements, 2011, 46(11): 1271-1276.
- [17] Conti E, Placidi P, Biasini M, *et al.* Use of a CMOS image sensor for an active personal dosimeter in interventional radiology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2013, 62(5): 1065-1072.
- [18] Whiteson D, Mulhearn M, Shimmin C, *et al.* Searching for ultra-high energy cosmic rays with smartphones[J]. Astroparticle Physics, 2016, 79: 1-9.
- [19] Kang H G, Song J J, Lee K, *et al.* An investigation of medical radiation detection using CMOS image sensors in smartphones[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016, 823: 126-134.
- [20] Tith S, Chankow N. Measurement of gamma-rays using smartphones[J]. Open Journal of Applied Sciences, 2016, 6(1): 31-37.
- [21] Pérez M, Lipovetzky J, Haro M S, *et al.* Particle detection and classification using commercial off the shelf CMOS image sensors[J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2016, 827: 171-180.
- [22] Pérez M, Haro M S, Sidelnik I, *et al.* Commercial CMOS pixel array for beta and gamma radiation particle counting[C]. Argentine School of Micro-nanoelectronics, Technology and Applications, 2015: 11-16.
- [23] Wei Q Y, Wang Z P, Dai T T, *et al.* Nuclear radiation detection based on un-covered CMOS camera under static scene[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 175-179.
魏清阳, 王振鹏, 戴甜甜, 等. 基于静态场景下不遮光 CMOS 摄像头的核辐射探测[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 175-179.