

碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器空间质子位移损伤及电离总剂量效应 Geant4 仿真*

杨卫涛^{1)†} 武艺琛¹⁾ 许睿明²⁾ 时光³⁾ 宁提⁴⁾ 王斌¹⁾
刘欢³⁾ 郭仲杰²⁾ 喻松林⁴⁾ 吴龙胜^{1)‡}

1) (西安电子科技大学集成电路学部, 西安 710071)

2) (西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安 710048)

3) (西安电子科技大学空间科学与技术学院, 西安 710071)

4) (中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

(2024 年 9 月 5 日收到; 2024 年 10 月 10 日收到修改稿)

大面阵、高分辨率碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器可用于航天遥感、高精度卫星成像等领域, 我国下一代气象卫星将全部应用此类图像传感器. 然而, 空间高能质子会对碲镉汞红外焦平面阵列探测器造成位移损伤效应, 同时亦会在其像素单元金属氧化物半导体 (MOS) 管引入电离总剂量效应. 本文以近年来广泛应用于图像传感器的 55 nm 制造工艺碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器为对象, 基于超大面阵设计时所用的 2 pixel×2 pixel 基本像素单元, 构建了 Geant4 仿真模型, 并且进行了不同质子入射注量下的仿真研究, 获得了不同注量下的位移损伤情况, 包括非电离能量损失、离位原子数等. 结果表明, 空间高能质子累积注量为 10^{13} cm^{-2} 时, 除了考虑碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器位移损伤效应外, 亦需关注其像素单元 MOS 管电离总剂量效应. 与此同时, 结合仿真结果对其空间应用环境中的损伤情况进行了初步评估. 该研究可为未来超大面阵碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器空间应用提供关键数据支撑.

关键词: 碲镉汞, 红外焦平面, 质子, Geant4, 位移损伤, 电离总剂量

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 61.80.Jh

DOI: 10.7498/aps.73.20241246

CSTR: 32037.14.aps.73.20241246

1 引言

碲镉汞 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 是一种三元系半导体材料, 因其禁带宽度可调、量子效率和电子迁移率高等特点常用于制备高性能、多用途和新型结构的光子探测器^[1,2]. 自 20 世纪 70 年代美国首次将碲镉汞光子型红外探测器成功应用于军事气象卫星以

来, 碲镉汞红外探测器就在各国空间卫星应用中持续演化、推进^[3]. 以我国气象卫星为例, 我国预研中的下一代气象卫星将全部采用碲镉汞焦平面阵列器件^[4].

大面阵、小像元、高分辨率 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器作为第三代红外探测器的典型代表, 近年来备受青睐^[5-7]. 如中国电子科技集团公司第十一研究所研制的 $8\text{K} \times 8\text{K}$ (K 代表 1024) 超大面阵红外焦平面阵列探测器为宇航高分辨率图像采集提供

* 陕西省自然科学基金研究计划 (批准号: 2023-JC-QN-0015) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: XJSJ23049) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangweitao01@xidian.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: lswu@xidian.edu.cn

了巨大潜力^[7]. 然而, 空间高能粒子所构成的严酷辐照环境, 可能给大面阵 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器性能造成影响. 如空间环境中充斥的高能质子既会对 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器感光单元造成位移损伤效应, 亦会对其像素单元氧化物半导体 (MOS) 管等造成电离总剂量效应. 在探测器中引入额外的缺陷, 进而影响其暗电流、信噪比等关键信息, 严重时可能导致光电系统瘫痪^[8]. 这也是科研人员一直致力于其辐射效应研究的一个关键原因^[9-12].

为了评估空间高能质子对各类图像传感器造成的位移损伤效应等影响, 常用的手段有两种, 即加速器辐照测试和蒙特卡罗仿真模拟研究^[13,14]. 虽然加速器辐照测试最为理想, 但受限于辐照时机、辐照过程中的不确定性、测试成本等因素, 无法实现对所有 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器的辐照测试. 尤其是对大面阵碲镉汞探测器而言, 当其面积达到数百平方厘米以后, 其辐照测试会面临更大挑战. 相比较而言, 针对大面阵 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 红外探测器位移损伤效应评估, 蒙特卡罗仿真模拟则能够获得与其效应相关的更多参数和细节, 如初级撞出原子 (PKA) 的位置、能量、分布, 以及造成的损伤能 (E_{dam}), 非电离能量损失 (NIEL) 和离位原子数 (N_d) 等信息. 在不同对象的位移损伤效应仿真中, 基于 Geant4 的仿真模拟是一种常用手段. 近年来, 关于不同材料 (如磷化铟、氮化镓、碲锌镉) 的 Geant4 位移损伤效应模拟, 涵盖了质子、中子、重离子等^[15-19].

相比于 Xie 等^[15]、Bai 等^[16]、Wei 等^[17]、Li 等^[18] 与 He 等^[19] 的仿真模拟主要以自定义尺寸的不同材料探测器结构为主, 本文以近年来广泛应用于图像传感器的 55 nm 制造工艺, 以 Zhe 等^[7] 提到的 $8\text{K} \times 8\text{K}$ 碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器为研究对象, 同时以大面阵设计中通常采用的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 基本像素单元为基础, 构建 Geant4 仿真模型. 最终评估空间高能质子对碲镉汞红外焦平面阵列探测器的位移损伤影响. 此外, 相比于已有文献大部分主要讨论不同能量点的单能粒子诱发的位移损伤效应, 本文以实际空间能谱作为入射粒子能量信息, 模拟碲镉汞红外焦平面阵列探测器的位移损伤效应. 与此同时, 本研究还讨论了碲镉汞红外焦平面阵列探测器在不同注量质子入射时的电离总剂量情况. 与已有文献相比, 本文实现了对非电离和电离两种累积效应的仿真模拟, 并弥补了国内外对如 Zhe 等^[7] 所描述的 $8\text{K} \times 8\text{K}$ 大面阵图像传

感器辐射效应仿真模拟研究的缺失. 本研究可为未来采用此类设计的超大面阵碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器宇航应用提供关键参考.

2 碲镉汞红外焦平面探测器模型构建

2.1 碲镉汞红外焦平面探测器结构

图 1 所示为碲镉汞红外焦平面探测器结构示意图^[20]. 由图 1 可知, 整个结构主要包含由碲镉汞像元所组成的焦平面阵列部分以及互补金属氧化物半导体 (CMOS) 所组成的读出电路部分. 两者通过钢柱以倒扣焊形式相连接. 其中, 像元阵列的大小决定了整个红外焦平面探测器的分辨率. 如 Zhe 等^[7] 报道中, 像元阵列达到了 $8\text{K} \times 8\text{K}$, 其可实现超高分辨率的红外焦平面图像传感器设计.

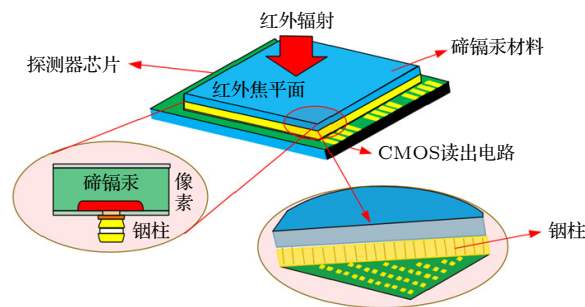


图 1 碲镉汞红外焦平面 CMOS 图像传感器结构示意图^[20]
Fig. 1. Schematic diagram of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane CMOS image sensor structure^[20].

在 Zhou 等^[6] 报道中, 中国电子科技集团公司第十一研究所实现了 $10 \mu\text{m}$ 小像元碲镉汞红外焦平面探测器的研制. 据此推断, 对 Zhe 等^[7] 报道中的 $8\text{K} \times 8\text{K}$ 碲镉汞红外焦平面阵列探测器, 若单个像元为 $10 \mu\text{m}$, 则整个像元部分尺寸达 $81.92 \text{ mm} \times 81.92 \text{ mm}$. 在与读出电路组成完整组件的情况下, 整个焦平面的在水平和垂直方向的尺寸或可达百毫米.

2.2 Geant4 仿真建模

2.2.1 碲镉汞探测器累积效应仿真实现

Geant4 是一款可用于蒙特卡罗模拟仿真的软件, 可模拟半导体中包括位移损伤效应和电离总剂量效应在内的累积辐射效应. 如前所述, 在位移损伤效应仿真中, 其可根据粒子径迹和碰撞过程中的能量传递信息, 模拟 PKA 的能量、位置以及对应

的非电离能量损失等. 而在电离总剂量效应仿真过程中, 其可根据粒子与靶原子相互作用过程中的能量沉积等信息, 模拟氧化物半导体中累积的电离总剂量情况.

对于本文中的碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器, 主要通过 Geant4 仿真模拟以获得空间高能质子入射时导致的像素阵列 PKA 及其 NIEL 等信息. 与此同时, 针对单个像素单元中的 MOS 管, 同步模拟其二氧化硅层中的总剂量累积情况, 进而掌握在位移损伤效应探究过程中, 何种剂量下, 亦需考虑 MOS 管总剂量效应影响.

2.2.2 碲镉汞像素单元建模

对于 Zhe 等^[7]报道中的 $8K \times 8K$ 碲镉汞红外焦平面阵列, 其通常是以 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$, $4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$ 等像素阵列为重复单元的进行重复结构设计. 因此 Geant4 仿真建模过程中, 本文亦以 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 像素单元为靶探测器, 构建碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器仿真模型. 如果按照 Zhou 等^[6]报道中的 $10 \mu\text{m}$ 小像元进行设计, 则仿真模型中, X 和 Y 方向尺寸分别为 $20 \mu\text{m}$. 纵向厚

度包括碲镉汞探测器厚度、钢柱厚度和 55 nm 工艺集成电路的纵向厚度. 其中, 碲镉汞红外焦平面像素阵列部分厚度为 $6 \mu\text{m}$. 仿真模型中, 为了避免模型过于复杂, 并未考虑钢柱倒焊之后充胶所引入的有机物等. 图 2 展示了单像素 55 nm 工艺下的传统 5T 晶体管电路结构和 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 像素版图示意图^[21]. 单像素包括 M_{RST1} , M_{RST} , M_{SF} , M_{FS} 和 M_{RS} 五个晶体管. 碲镉汞二极管将红外信号转换为电流信号 I_{ph} , 并对积分电容 C_{S1} 进行积分. 此外, 5T 电路结构采用 M_{FS} 管隔离积分电容 C_{S1} 和 C_{S2} , 以便实现全局曝光操作, M_{RST} 管和 M_{RST1} 管分别执行帧复位和行复位操作. 最终, 存储到积分电容 C_{S2} 的图像信号经由源级跟随器 M_{SF} , 在行选管 M_{RS} 的控制下逐行接入列总线输出.

图 3 为碲镉汞红外焦平面阵列仿真模型简图, 其中单像素用于仿真电离总剂量效应的 MOS 管, 主要包括 M_{RST1} , M_{RST} , M_{SF} , M_{FS} 和 M_{RS} , 各晶体管在电路版图中的相对布局如图 3 所示^[21]. 仿真模型中亦按照此设置目标探测器.

仿真中选用的物理模型为 QGSP_BIC 模型, 该模型涵盖了弹性、非弹性散射和原子嬗变, 以及

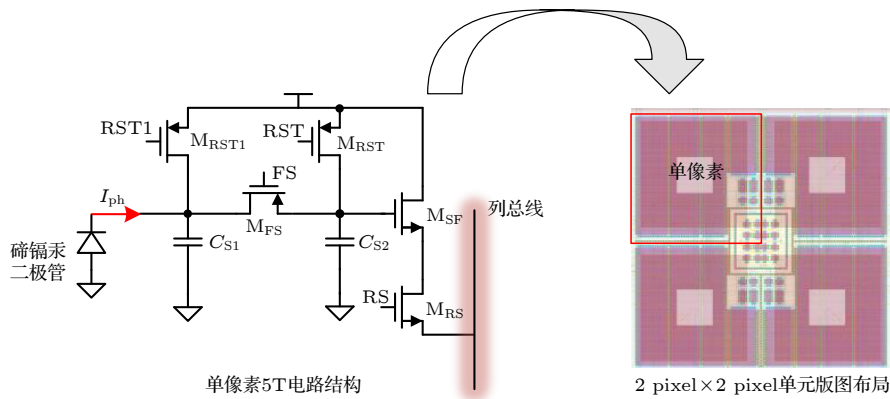


图 2 单像素 5T 电路结构和 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 像素单元版图布局^[21]

Fig. 2. Structure of a single pixel 5T circuit and a $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ layout^[21].

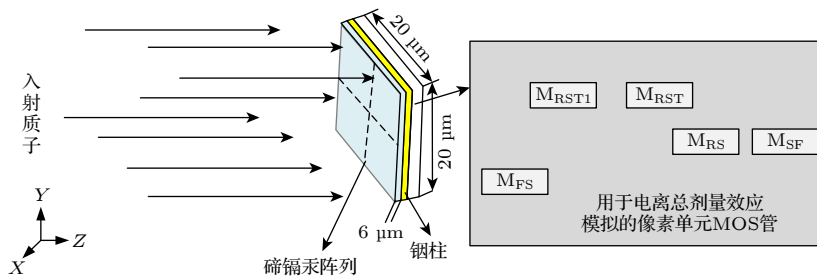


图 3 碲镉汞红外焦平面阵列质子入射仿真模型简图

Fig. 3. Simulation schematic of proton striking $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane.

多次散射、电离和韧致辐射等物理过程^[16]. 质子在入射碲镉汞探测器阵列过程中, 可能与靶原子发生弹性或者非弹性碰撞过程, 从而使得靶原子获得一定能量. 当靶原子所获得的能量超过一定阈值 (即离位阈值) 时, 就会使得原子离开晶格位置, 成为初级撞出原子^[18]. 同时, 质子亦有可能与核外电子发生非弹性碰撞而造成电子激发从而产生电离, 而电离剂量随着粒子入射注量的积累, 就会导致电离总剂量效应^[22].

仿真中粒子源为面源入射形式, 尺寸亦为 $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$. 所用质子能量为空间环境中的能谱形质子, 而非单能质子, 该能谱形质子生成于 CRÈME-96 软件, 其描述的是近地轨道空间环境中的质子通量情况^[23]. 图 4 为太阳活动极大年时的近地轨道质子通量情况, 仿真过程中所用粒子源能量即为该能谱.

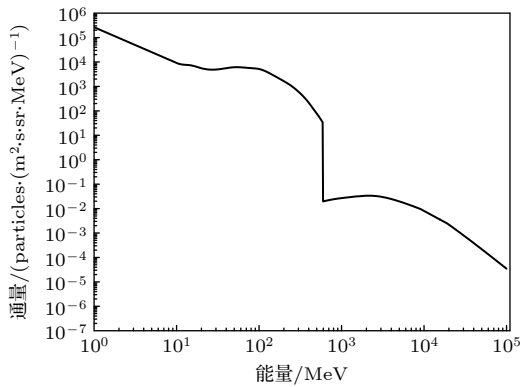


图 4 仿真中所用质子能谱^[23]

Fig. 4. The proton spectrum used in the simulation^[23].

分别进行了 4×10^4 , 4×10^5 , 4×10^6 和 4×10^7 个质子的入射仿真模拟, 对应质子注量分别为 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} 和 10^{13} cm^{-2} . 在碲镉汞焦平面阵列探测器中主要关注的是与位移损伤相关的 PKA、损伤能及位置分布等信息. 而在像素单元 MOS 管结构中, 则主要关注的是电离总剂量情况.

3 位移损伤效应模拟

3.1 NIEL 计算

累积的质子辐照会在碲镉汞晶体结构中造成原子离位, 导致位移损伤效应的出现, 在焦平面阵列中引入缺陷, 影响对红外信号的探测效率和性能. 因为位移损伤效应与非电离能量损失线性

相关, 因此, 对位移损伤的分析计算可以转化为对 NIEL 的分析计算. 而在 NIEL 的分析计算中, 利用 Lindhard 分离函数求解计算 NIEL 是一种常用方式^[24]. 本文亦采用此方式计算 NIEL. 与之相关的公式如 (1) 式—(7) 式:

$$E_{\text{dam}}(T) = \frac{T}{[1 + k_d g(\varepsilon_d)]}, \quad (1)$$

$$k_d = \frac{0.0793 Z_1^{2/3} Z_2^{1/2} (A_1 + A_2)^{3/2}}{[(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{3/4} A_1^{3/2} A_2^{1/2}]}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_d = \frac{T}{[30.724 Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} (1 + A_1/A_2)]}, \quad (3)$$

$$g(\varepsilon_d) = \begin{cases} \varepsilon_d + 0.40244 \varepsilon_d^{3/4} + 3.4008 \varepsilon_d^{1/6} & (T > 200\text{ keV}), \\ 0.742 \varepsilon_d + 1.6812 \varepsilon_d^{3/4} + 0.90565 \varepsilon_d^{1/6} & (T < 200\text{ keV}), \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_{2,\text{average}} = \sum_i n_i Z_i / \sum_i n_i, \quad (5)$$

$$A_{2,\text{average}} = \sum_i n_i A_i / \sum_i n_i, \quad (6)$$

$$\text{NIEL} = \frac{E_{\text{dam}}(T)}{\rho h n}, \quad (7)$$

式中, $E_{\text{dam}}(T)$ 是能量为 T 的初级反冲原子所产生的损伤能; Z_1 , A_1 和 Z_2 , A_2 分别为初级撞出原子的原子序数和质量数以及靶原子对应的原子序数和质量数; 对化合物靶探测器而言, 原子序数与质量数则为加权平均值, 如 (5) 式和 (6) 式所示; ρ 为靶材料密度, 单位为 g/cm^3 ; h 为厚度, 单位为 cm ; n 为入射粒子数.

在 X 为 0.44 情况下, $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 所对应的 Z_2 和 A_2 数值分别为 62 和 153.41, 密度为 $7.1\text{ g}/\text{cm}^3$. 最终, 通过 (7) 式构建起损伤能与 NIEL 之间的关系, 从而为进一步分析位移损伤效应提供支撑.

3.2 位移损伤仿真结果及分析

通过 Geant4 仿真, 可以获得不同模拟注量下的 PKA 种类、损伤能、位置以及 NIEL 信息. 表 1 为不同模拟注量下的 PKA 种类数目信息. 从表 1 可以看出, 随着模拟质子注量的增加, PKA 种类数目逐渐增多. 如在 10^{10} cm^{-2} 的质子注量下, PKA 种类数目为 27, 而在 10^{13} cm^{-2} 的质子注量下, PKA

种类数目则达到了 159, PKA 种类数目增加了 4.8 倍.

表 1 不同模拟注量下的 PKA 种类数目
Table 1. The PKA of different fluences in simulation.

仿真情况	入射质子注量/cm ⁻²	PKA 种类数目
A	10 ¹⁰	27
B	10 ¹¹	36
C	10 ¹²	61
D	10 ¹³	159

图 5 为不同模拟注量下的 PKA 总数, 对于 A, B, C, D 四种仿真情况, PKA 总数分别为 8654, 85972, 860104 和 8615918. 从图 5 可以看出, 对于位移损伤效应而言, 同一种能量状况的质子入射时, PKA 总数变化与注量变化之间呈线性关系. 同时, 结合表 1 可以看出, 虽然 PKA 总数变化与注量变化之间呈线性关系, 但是 PKA 种类数目变化并不遵循这一关系. 主要表现为注量越大, PKA 种类越多. 本文中所模拟的入射质子为能谱状, 而非单能形式, 不同能量的质子在与 Hg_{0.56}Cd_{0.44}Te 材料发生弹性或者非弹性碰撞时, 存在一定的截面. 而模拟注量越高, 则意味着碰撞的次数越多, 随着碰撞次数的增多, 撞出原子的种类也就会越丰富. 这也表明, 在进行位移损伤效应评估时, 应在条件允许情况下, 尽可能高的实现辐照注量的累积.

表 2 进一步统计了模拟注量为 10¹³ cm⁻² 情况下的 PKA 信息. 从表 2 可以看出, PKA 为 Te 的概率最高, 达到了 49.71%, 而其中又以 Te130 和 Te128 最为突出, 占总 PKA 数目的比重分别达到了 16.44% 和 15.70%. 其次为 Hg, 其在总 PKA 中占比为 26.69%. 而对于 Hg 原子, Hg202 和 Hg200 在 Hg 类 PKA 中最为突出. 最后为 Cd, 类似地,

Cd114 和 Cd112 为 Cd 类 PKA 中占比最高的. 另外还有约 0.01% 的其他类型 PKA, 如 He4, I126, I124 等. Te, Hg 和 Cd 作为组成红外焦平面阵列的晶格原子, 其对应的 PKA 主要是通过弹性碰撞产生, 而对于 He4, I126, I124 等其他 PKA, 则主要是通过非弹性碰撞产生.

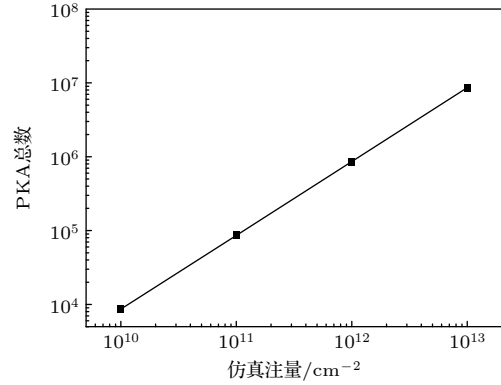


图 5 不同模拟注量下的 PKA 总数

Fig. 5. Total PKA number under different fluences in simulation.

根据仿真过程中获得的 PKA 位置信息, 可以进一步获得不同模拟注量下的 PKA 分布信息. 图 6 中, 图 6(a), (b), (c), (d) 分别对应模拟注量为 10¹⁰, 10¹¹, 10¹² 和 10¹³ cm⁻² 情况下, 总的 PKA 数目中占比在 1% 以上的 PKA 位置信息. 对比图 6(c) 和图 6(d) 可以看出, 当模拟注量为 10¹³ cm⁻² 时, 整个碲镉汞焦平面阵列都会被产生的 PKA 填充 (从图 6(c) 中可以看出, 靠近棱的边缘侧依然有空白, 而图 6(d) 中并无此情况). 这进一步表明对于质子位移损伤辐照测试需要达到高注量的必要性.

在 Geant4 仿真过程中, 可以获得能量为 T 的 PKA 的损伤能 $E_{\text{dam}}(T)$, 如前所述, 通过 (7) 式可以获得对应的 NIEL. 将总厚度为 6 μm 的碲镉汞

表 2 模拟注量为 10¹³ cm⁻² 的质子入射碲镉汞焦平面阵列产生的 PKA
Table 2. The PKA detail under the proton fluences of 10¹³ cm⁻² in simulation.

元素	反冲核及占比		比重
Te	占比>1%	Te130(16.44%), Te128(15.70%), Te126(9.56%), Te125(3.63%), Te124(2.47%), Te122(1.36%)	49.71%
	占比<1%	Te123, Te120, Te127, Te121, Te129, Te119, Te118	
Hg	占比>1%	Hg202(7.87%), Hg200(6.20%), Hg199(4.55%), Hg201(3.50%), Hg198(2.72%), Hg204(1.28%)	26.69%
	占比<1%	Hg196, Hg197, Hg194, Hg192, Hg193, Hg191, Hg195, Hg190, Hg189	
Cd	占比>1%	Cd114(6.42%), Cd112(5.73%), Cd111(3.08%), Cd110(3.04%), Cd113(2.86%), Cd116(1.67%)	23.59%
	占比<1%	Cd106, Cd108, Cd109, Cd104, Cd107, Cd105, Cd115, Cd124	
其他	He4, I126, I124, I123, I125, I128, In112, I127, I129, In111, Sb121, I122, I130, In113, Sb117, Sb119, Sb123, In108, Sb120, Sb122, Ag109, Au193, etc		0.01%

材料沿纵向划分为 100 等份, 即每 $0.06 \mu\text{m}$ 为一等份, 可进一步分析不同深度位置处的 NIEL 情况. 图 7(a)—(d) 分别为不同模拟注量下总的 NIEL 分布情况. 从图 7 可以看出, 模拟注量越大, NIEL 分布越均匀. 这主要是因为相比于非弹性碰撞传递

给 PKA 的能量所造成的损伤能通常在数百 keV 甚至 MeV, 而弹性碰撞传递给 PKA 的能量所造成的损伤能则主要集中在数十或数百 eV 之间. 此时, 由于低模拟注量下总的 PKA 数量少, 在一个区间内, 弹性碰撞造成的 $E_{\text{dam}}(T)$ 积分值显著小于非弹

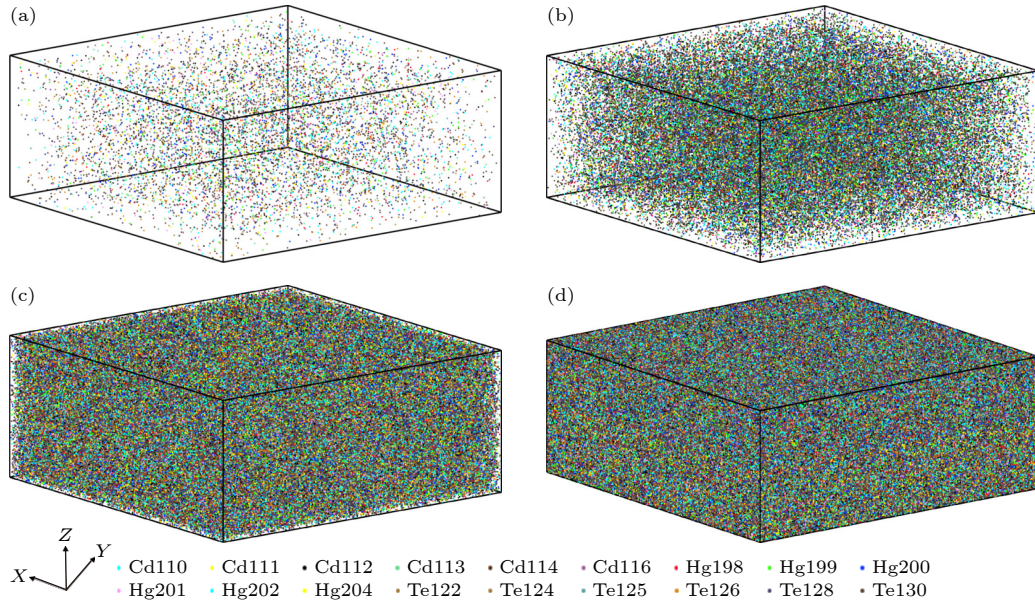


图 6 不同模拟注量下的 PKA 分布信息 (a) 10^{10} cm^{-2} ; (b) 10^{11} cm^{-2} ; (c) 10^{12} cm^{-2} ; (d) 10^{13} cm^{-2}

Fig. 6. PKA distribution at different simulation fluences: (a) 10^{10} cm^{-2} ; (b) 10^{11} cm^{-2} ; (c) 10^{12} cm^{-2} ; (d) 10^{13} cm^{-2} .

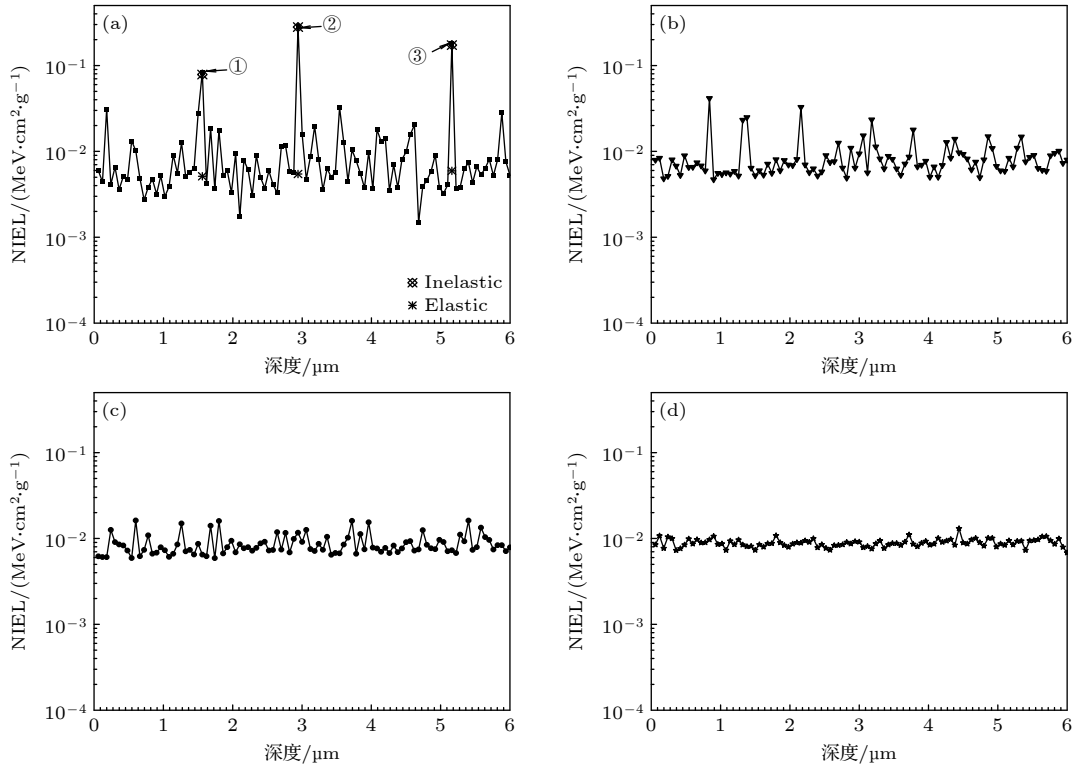


图 7 不同注量质子仿真获得的 NIEL 信息 (a) 10^{10} cm^{-2} ; (b) 10^{11} cm^{-2} ; (c) 10^{12} cm^{-2} ; (d) 10^{13} cm^{-2}

Fig. 7. NIEL under different proton fluences: (a) 10^{10} cm^{-2} ; (b) 10^{11} cm^{-2} ; (c) 10^{12} cm^{-2} ; (d) 10^{13} cm^{-2} .

性碰撞导致, 因此非弹性碰撞发生位置处的 NIEL 影响更加显著. 如在图 7(a) 中所标注出的①, ②, ③三个峰值位置中, 均包含弹性碰撞和非弹性碰撞所造成的损伤能导致的 NIEL. 而其他位置则只包含弹性碰撞传递的能量造成的损伤能导致的 NIEL. 图 7(a) 中, 在区间 2.88—2.94 μm (②位置处) 及区间 5.10—5.16 μm (③位置处) 之间, 非弹性碰撞造成的 $E_{\text{dam}}(T)$ 分别为 477.67 keV 和 294.68 keV, 而弹性碰撞造成的 $E_{\text{dam}}(T)$ 积分值则分别只有 9.29 keV 和 10.11 keV, 差异分别达到了 54.1 倍和 29.1 倍. 图 8 进一步描述了模拟注量为 10^{13} cm^{-2} 下的 NIEL 组成情况, 可以看到在整个 6 μm 厚的碲镉汞焦平面阵列内, 弹性碰撞造成的 NIEL 是均匀分布的, 且其在每一个区间内均大于非弹性碰撞所造成的 NIEL. 因此, 其总的 NIEL 亦在整个厚度区间内呈均匀分布.

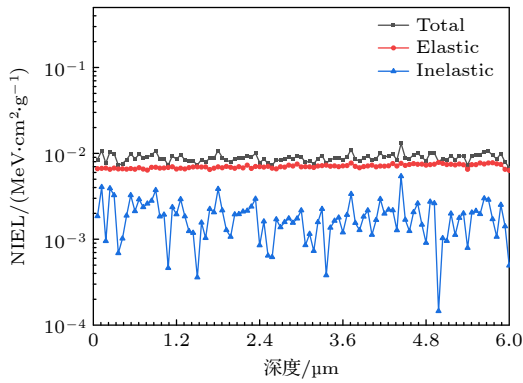


图 8 注量为 10^{13} cm^{-2} 的质子入射碲镉汞阵列产生的不同 NIEL

Fig. 8. NIEL from different interactions at 10^{13} cm^{-2} .

在获得 $E_{\text{dam}}(T)$ 和 NIEL 的基础之上, 亦可以通过计算每个原子平均离位次数 (displacement per atom, DPA) 以及离位原子数 (N_d) 来评价其位移损伤程度以及原子离位情况. (8) 式和 (9) 式分别用来计算 N_d 和 DPA. 其中 (8) 式采用的是位移损伤研究中普遍采用的 NRT 模型, 该模型恰好可以给出能量为 T 的 PKA 所造成的离位原子数情况 [25]:

$$N_d(T) = \begin{cases} 0, & T < E_d, \\ 1, & E_d < T < 2.5E_d, \\ 0.8E_{\text{dam}}(T)/2E_d, & T > 2.5E_d, \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{DPA} = \frac{N_d}{Nn}, \quad (9)$$

式中, E_d 为靶原子离位阈能; N_d 为离位原子数目; N 为靶材料中总的原子数; n 为入射粒子数.

对于 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 材料, 当前并未有统一的离位阈能 E_d . Konobeyev 等 [26] 对不同原子的离位阈能进行了多种形式的验证与讨论, 受到广泛的认可. 因此本文中 Te, Cd 和 Hg 的离位阈能 E_d 参考于此文献. 具体而言, Te, Cd 和 Hg 的离位阈能 E_d 取值分别为 18, 23 和 19 eV.

图 9 中描述了模拟注量为 10^{13} cm^{-2} 情况下不同分段区间内的各原子离位数目及总的原子离位数目情况. 从图 9 可以看出, Te 原子离位数目最多, Hg 原子离位数目次之, Cd 原子离位数目最少. 但同时需要注意的是在每个分段区间内, 平均到每个质子而言, Te, Hg, Cd 三原子离位数目均处于 10^{-3} 量级, 总的原子离位数目处于 10^{-3} — 10^{-2} 量级. 图 10 进一步描述了 Te, Hg, Cd 三原子在整个碲镉汞焦平面中的离位数目及总的离位数目. 据此, 可以推断对整个碲镉汞红外焦平面阵列, 当空间质子入射注量累积达到 10^{13} cm^{-2} 时, $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列探测器中 Te, Hg, Cd 以及总的原子离位数目分别为 0.11, 0.32, 0.24 和 0.83705.

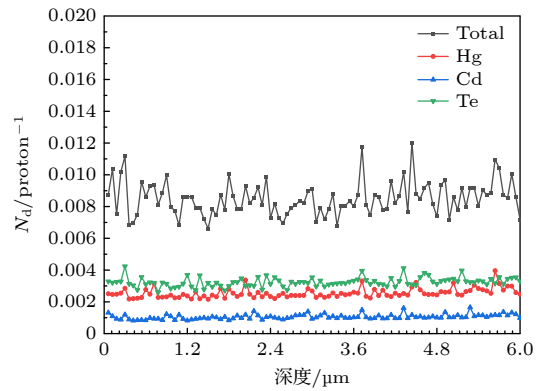


图 9 模拟质子注量为 10^{13} cm^{-2} 时 N_d 在每个分段区间的分布信息

Fig. 9. Distribution of N_d in each interval at 10^{13} cm^{-2} proton fluence.

在得到 N_d 的情况下, 通过 (9) 式可以计算每个原子的平均离位次数, 即 DPA. 在 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 6 \mu\text{m}$ 的 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列探测器体系中共有原子数 N 为 3.53×10^{13} . 模拟质子注量为 10^{13} cm^{-2} 下的入射粒子数 n 为 4×10^7 . 结合以上信息, 可以分别获得在每个分段内以及总的厚度范围内的 DPA. 分别如图 11 和图 12 所示. 图 11 中, Te 和 Hg 的 DPA 处于 10^{-24} 量级, 而 Cd 的 DPA

则主要处于 10^{-25} 量级. 而图 12 表明, 当空间质子入射注量累积达到 10^{13} cm^{-2} 时, $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列探测器中, 平均到单个入射质子时, Te, Hg, Cd 每个原子平局离位次数以及总的每个

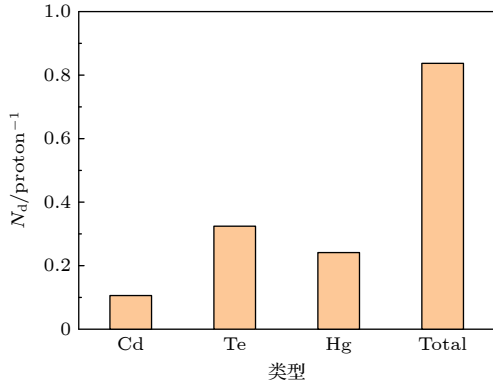


图 10 模拟质子注量为 10^{13} cm^{-2} 时整个碲镉汞阵列探测器中的 N_d 情况

Fig. 10. N_d in the entire $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ array detector at 10^{13} cm^{-2} simulated proton fluences.

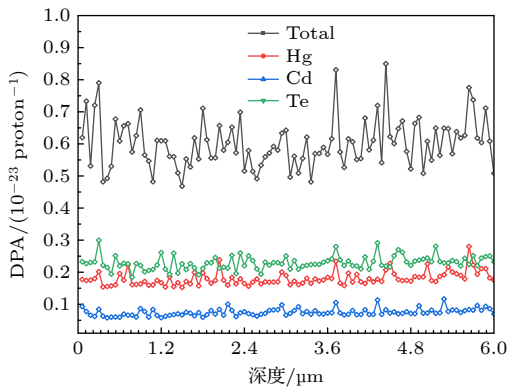


图 11 模拟质子注量为 10^{13} cm^{-2} 的 DPA 分布信息

Fig. 11. DPA in the $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ array detector at 10^{13} cm^{-2} simulated proton fluences.

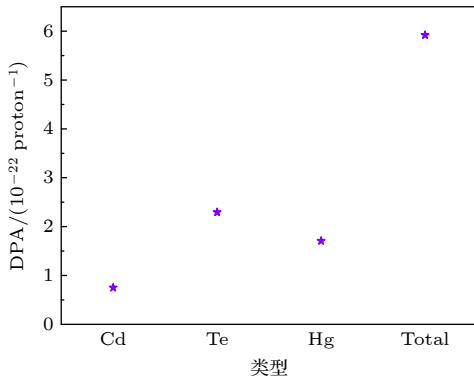


图 12 模拟质子注量为 10^{13} cm^{-2} 时整个碲镉汞阵列探测器中的 DPA

Fig. 12. The entire DPA in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ array under 10^{13} cm^{-2} proton fluences.

原子平均离位次数分别为 0.75×10^{-22} , 2.29×10^{-22} , 1.71×10^{-22} 和 5.92×10^{-22} .

通过 Geant4 仿真模拟了空间高能质子对碲镉汞红外焦平面阵列探测器的位移损伤效应, 并获得了 PKA, E_{dam} , NIEL, N_d , DPA 等关键参数信息. 而这些与位移损伤相关的参数则进一步可能会对碲镉汞红外图像传感器的电学或者感光性能等造成影响. 可能的影响包括并不局限于以下方面. 第一, PKA 产生的位置和所具有的能量会导致晶格中原子的移位以及重新排列, 这有可能引起缺陷的形成, 进而影响探测器的材料特性, 如带隙和载流子浓度. 当所产生的缺陷成为载流子复合中心时, 就会增加非理想行为, 进一步会影响均方根 (RMS) 噪声, 同时也会使得噪声等效温差升高. 第二, E_{dam} 和 NIEL 所表征的损伤程度可能使得碲镉汞材料的量子效率下降, 进而影响碲镉汞探测器的响应能力.

4 电离总剂量效应模拟仿真

在所模拟的碲镉汞红外焦平面阵列中, 除了 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 组成的红外探测器像素阵列外, 还需要通过 MOS 管对 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 像素单元转化的电荷进行转移处理. 如图 2 所示, 像素单元主要涉及的 MOS 管有 M_{RST1} , M_{RST} , M_{SF} , M_{FS} 和 M_{RS} 管. 如前所述, 当质子入射该红外焦平面阵列时, 既会在 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列探测器中诱发位移损伤效应, 亦会在 MOS 管中累积电离总剂量效应.

在 Geant4 仿真中, 通过统计像素单元 MOS 管中氧化层内的沉积能量, 可进一步计算单位质量的能量沉积情况, 即电离总剂量情况. 表 3 为不同仿真注量下的像素单元 MOS 管累积电离总剂量情况.

表 3 不同仿真情况下的像素单元 MOS 管累积电离总剂量情况

Table 3. Total ionizing dose in the MOS of pixel under different simulation fluences.

仿真情况	模拟注量/ cm^{-2}	像素单元MOS管 电离总剂量/rad
A	10^{10}	0
B	10^{11}	0
C	10^{12}	0
D	10^{13}	5301.95

表 3 表明, 对于 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列图像传感器, 当其在空间运行任务周期中, 如果累积质子注量达到甚至超过 10^{13} cm^{-2} 时, 则在关注红外焦平面阵列图像传感器位移损伤效应的同时, 亦需考虑像素单元 MOS 管的电离总剂量效应。

图 4 中描述的是 1 MeV 以上近地轨道空间质子在太阳活动极大年时的通量情况. 如果按照此通量进行估计, 可以获得 1 MeV 以上质子年通量约为 $3.11 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, 那么根据该年质子通量进行保守估计. 则可推断, 对采用文中 55 nm 制造工艺的传统 5T 像素 $\text{Hg}_{0.56}\text{Cd}_{0.44}\text{Te}$ 红外焦平面阵列图像传感器而言, 在空间任务周期为小于 38.5 个月时, 可主要考虑红外焦平面位移损伤效应, 而当超过 38.5 个月时, 既要考虑红外焦平面位移损伤效应, 亦需要关注像素单元 MOS 管的电离总剂量效应。

5 结 论

针对可应用于宇航任务的 55 nm 工艺超大面阵碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器, 基于 5T 晶体管组成的像素单元, 从超大面阵设计通常采用的 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 像素阵列基本单元出发, 构建了 Geant4 仿真模型. 模拟了碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器在空间不同注量质子入射下的位移损伤效应及 5T 晶体管中的累积电离总剂量效应情况. 所模拟注量分别为 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} 和 10^{13} cm^{-2} , 获得了非电离能量损失、损伤能、离位原子数等信息. 并指出了在位移损伤评价时亦应考虑像素单元 MOS 管电离总剂量效应的阈值信息. 此外, 还结合仿真结果与实际空间质子通量情况, 对未来采用 55 nm 工艺, 阵列可达 $8\text{K} \times 8\text{K}$ 甚至以上的超大面阵碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器的空间位移损伤效应和电离总剂量效应进行了估计。

参考文献

- [1] Qiao H, Wang N L, Yang X Y, Guo Q, Kuai W L, Xu G Q, Zhang D D, Lli X Y 2023 *Aerospace Shanghai (Chinese & English)* **40** 99 (in Chinese) [乔辉, 王妮丽, 杨晓阳, 郭强, 蒯文林, 徐国庆, 张冬冬, 李向阳 2023 上海航天 (中英文) **40** 99]
- [2] Cai Y 2022 *Infrared Laser Eng.* **51** 20210988 (in Chinese) [蔡毅 2022 红外与激光工程 **51** 20210988]
- [3] Marion B R 2009 *Proc. of SPIE* **7298** 72982S
- [4] Qiao H, Wang N L, Jia J, Lan T Y, Xu J T, Yang X Y, Zhang Y, Li X Y 2023 *Laser & Infrared* **53** 1534 (in Chinese) [乔辉, 王妮丽, 贾嘉, 兰添翼, 许金通, 杨晓阳, 张燕, 李向阳 2023 激光与红外 **53** 1534]

- [5] Hu W D, Li Q, Chen X S, Lu W 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 120701 (in Chinese) [胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫 2019 物理学报 **68** 120701]
- [6] Zhou L Q, Ning T, Zhang M, Chen Y G, Xie H, Fu Z K 2019 *Laser & Infrared* **49** 915 (in Chinese) [周立庆, 宁提, 张敏, 陈彦冠, 谢珩, 付志凯 2019 激光与红外 **49** 915]
- [7] Zhe W L, Xing X S, Xing W R, Liu J G, Hao F, Yang H Y, Wang D, Hou X M, Li Z X, Wang C G 2024 *Laser & Infrared* **54** 483 (in Chinese) [折伟林, 邢晓帅, 邢伟荣, 刘江高, 郝斐, 杨海燕, 王丹, 侯晓敏, 李振兴, 王成刚 2024 激光与红外 **54** 483]
- [8] Wang Y F, Tian Y 2011 *Infrared* **32** 1 (in Chinese) [王忆锋, 田萦 2011 红外 **32** 1]
- [9] Jiang T, Cheng X A, Zheng X, Xu Z J, Jiang H M, Lu Q S 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137302 (in Chinese) [江天, 程湘爱, 郑鑫, 许中杰, 江厚满, 陆启生 2012 物理学报 **61** 137302]
- [10] Qiao H, Liao Y, Hu W D, Deng Y, Yuan Y G, Zhang Q Y, Li X Y, Gong H M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7088 (in Chinese) [乔辉, 廖毅, 胡伟达, 邓屹, 袁永刚, 张勤耀, 李向阳, 龚海梅 2008 物理学报 **57** 7088]
- [11] Sun X, Abshire J B, Lauenstein J M, et al. 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 27
- [12] Dinand S, Goiffon V, Lambert D, Rizzolo S, Baier N, Borniol E D, Saint-Pé O, Durnez C, Gravrand O 2023 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **70** 1234
- [13] Tang N, Wang Z J, Yan S X, Li C Z, Jiang R Y 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0928003 (in Chinese) [唐宁, 王祖军, 晏石兴, 李传洲, 蒋镭羽 2024 光学学报 **44** 0928003]
- [14] Wang Z J, Lai S K, Yang X, Jia T X, Huang G, Nie X 2022 *Semicond. Optoelectron.* **43** 839 (in Chinese) [王祖军, 赖善坤, 杨颢, 贾同轩, 黄港, 聂栩 2022 半导体光电 **43** 839]
- [15] Xie F, Zang H, Liu F, He H, Liao W L, Huang Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 192401 (in Chinese) [谢飞, 臧航, 刘方, 何欢, 廖文龙, 黄煜 2020 物理学报 **69** 192401]
- [16] Bai Y R, Li Y H, Liu F, Liao W L, He H, Yang W T, He C H 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 172401 (in Chinese) [白雨蓉, 李永宏, 刘方, 廖文龙, 何欢, 杨卫涛, 贺朝会 2021 物理学报 **70** 172401]
- [17] Wei W J, Gao X D, Lü L L, Xu N N, Li G P 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 226102 (in Chinese) [魏雯静, 高旭东, 吕亮亮, 许楠楠, 李公平 2022 物理学报 **71** 226102]
- [18] Li W, Bai Y R, Guo H X, He C H, Li Y H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 082401 (in Chinese) [李薇, 白雨蓉, 郭昊轩, 贺朝会, 李永宏 2022 物理学报 **71** 082401]
- [19] He H, Bai Y R, Tian S, Liu F, Zang H, Liu W B, Li P, He C H 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 052402 (in Chinese) [何欢, 白雨蓉, 田赏, 刘方, 臧航, 柳文波, 李培, 贺朝会 2024 物理学报 **73** 052402]
- [20] Zhao J, Wang X X, Li X J, Zhang Y X, Qin Q, Song L W, Yuan S Z, Kong J C, Ji R B 2023 *Sci. Sin. -Technol.* **53** 1419 (in Chinese) [赵俊, 王晓璇, 李雄军, 张应旭, 秦强, 宋林伟, 袁绶章, 孔金丞, 姬荣斌 2023 中国科学: 技术科学 **53** 1419]
- [21] Xu R M, Guo Z J, Liu S Y, Yu N M 2024 *Chin. J. Electron.* **33** 415
- [22] Zhang L, Ma L D, Du L, Li Y B, Xu X F, Huang X R 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 138501 (in Chinese) [张林, 马林东, 杜林, 李艳波, 徐先峰, 黄鑫蓉 2023 物理学报 **72** 138501]
- [23] Tylka A J, Adams J H, Boberg P R, et al. 1997 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **44** 2150
- [24] Akkerman A, Barak J 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B* **260** 529
- [25] Robinson M, Torrens I 1974 *Phys. Rev. B* **9** 5008
- [26] Konobeyev A Y, Fischer U, Korovin Y A, Simakov S P 2017 *Nucl. Energy Technol.* **3** 169

Geant4 simulation of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane array image sensor space proton displacement damage and total ionizing dose effects^{*}

Yang Wei-Tao^{1)†} Wu Yi-Chen¹⁾ Xu Rui-Ming²⁾ Shi Guang³⁾

Ning Ti⁴⁾ Wang Bin¹⁾ Liu Huan³⁾ Guo Zhong-Jie²⁾

Yu Song-Lin⁴⁾ Wu Long-Sheng^{1)‡}

1) (*Faulty of Integrated Circuit, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

3) (*School of Aerospace Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

4) (*The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China*)

(Received 5 September 2024; revised manuscript received 10 October 2024)

Abstract

A large-format, high-resolution $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane array (IRFPA) image sensor can be used in aerospace remote sensing and high-precision satellite imaging. The next generation of meteorological satellites in China will all adopt this type of image sensor. However, space high-energy protons can cause displacement damage effects in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ IRFPA detectors and induce total ionizing dose (TID) effects in the pixel unit metal-oxide-semiconductor (MOS) transistors. This study focuses on a 55nm manufacturing process $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ IRFPA sensor widely used in image sensors by using a 2 pixel $\times$ 2 pixel basic pixel unit model for large-format arrays and constructing a Geant4 simulation model. Simulations are conducted for different proton irradiation fluences, including 10^{10} , 10^{11} , 10^{12} and 10^{13} cm⁻². The results show the displacement damage under various fluences, including non-ionizing energy loss and displacement atom distribution. It is found that at a proton cumulative fluence of 10^{13} cm⁻², in addition to considering the displacement damage effect in the $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ IRFPA sensor, attention must also be paid to the TID effects on the MOS transistors in the pixel units. Additionally, this study provides a preliminary assessment of the damage conditions in the space environment based on simulation results. This study provides crucial data for supporting the space applications of future large-format $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ IRFPA image sensors.

Keywords: $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, infrared focal plane, proton, Geant4, displacement damage, total ionizing dose

PACS: 24.10.Lx, 71.55.Eq, 61.80.Jh

DOI: 10.7498/aps.73.20241246

CSTR: 32037.14.aps.73.20241246

* Project supported by the Natural Science Basic Research Plan in the Shaanxi Province of China (Grant No. 2023-JC-QN-0015) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant No. XJSJ23049).

† Corresponding author. E-mail: yangweitao01@xidian.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: lswu@xidian.edu.cn



碲镉汞红外焦平面阵列图像传感器空间质子位移损伤及电离总剂量效应Geant4仿真

杨卫涛 武艺琛 许睿明 时光 宁提 王斌 刘欢 郭仲杰 喻松林 吴龙胜

Geant4 simulation of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane array image sensor space proton displacement damage and total ionizing dose effects

Yang Wei-Tao Wu Yi-Chen Xu Rui-Ming Shi Guang Ning Ti Wang Bin Liu Huan Guo Zhong-Jie
Yu Song-Lin Wu Long-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 232402 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241246

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241246>

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

InP中子位移损伤效应的Geant4模拟

Geant4 simulation of neutron displacement damage effect in InP

物理学报. 2022, 71(8): 082401 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211722>

质子入射 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 材料的位移损伤模拟

Simulation of displacement damage induced by protons incident on $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ materials

物理学报. 2024, 73(5): 052402 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231671>

近地轨道质子和 α 粒子入射InP产生的位移损伤模拟

Simulation of displacement damage of InP induced by protons and α -particles in low Earth orbit

物理学报. 2024, 73(5): 052401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231499>

空间重离子入射磷化铟的位移损伤模拟

Simulation of displacement damage in indium phosphide induced by space heavy ions

物理学报. 2021, 70(17): 172401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210303>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管器件中子位移损伤效应及机理

Neutron-induced displacement damage effect and mechanism of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor

物理学报. 2020, 69(20): 207301 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200714>

不同栅压下Si-n型金属氧化物半导体场效应管总剂量效应的瞬态特性仿真

Transient characteristics simulation of total ionizing dose effect on Si n-metal-oxide-semiconductor field effect transistor under different gate voltage

物理学报. 2023, 72(13): 138501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230207>