

文章编号:1001-5078(2019)09-1095-05

· 红外材料与器件 ·

红外探测器辐照机理分析及辐照试验验证

李敬国,温建国,陈彦冠

(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:红外探测器处于太空或辐射环境会受到各种辐射粒子作用,其性能会发生衰减。本文主要分析了各种辐射效应对 HgCdTe 红外探测器性能影响机理。针对红外探测器复合钝化加固方法,ROIC 环源环栅加固方法进行试验验证。辐照试验显示,加固后的红外探测器互联抗辐照读出电路,其抗总剂量、抗剂量率及抗中子辐射位移达到了比较好抗辐照效果。

关键词:HgCdTe;红外探测器;抗辐照

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2019.09.011

Analysis of radiation effects on IR detector and experimental verification for its hardness

LI Jing-guo, WEN Jian-guo, CHEN Yan-guan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Infrared detector in space or radiation environment will be affected by various radiation particles, its performance will be attenuated. This paper mainly analyzes the influence mechanism of various radiation effects on the performance of HgCdTe infrared detector. The IR detector composite passivation reinforcement method and the ROIC annular-geometry and ringed-source geometry reinforcement method are tested and verified. The radiation test shows that radiation hardness IR detector bonding with ROIC obtains better radiation hardness results than that of normal infrared detector.

Keywords: HgCdTe; infrared detector; harden radiation; composite passivation

1 引言

工作在太空中或者核工厂的红外探测器会受到各种辐射源的影响,比如: γ 射线、X射线、质子、中子、电子等各种离子源,这些离子源会对 HgCdTe 红外探测器产生各种辐射效应,主要包括电离损伤效应、瞬态效应、位移损伤效应,最终使红外探测器性能衰减甚至失效。因此,研究这三种辐射效应对 HgCdTe 红外探测器性能的影响机理,进而采取相应的抗辐照加固措施,对工作在辐照环境下的红外探测器具有非常重要的意义。

2 HgCdTe 红外探测器混成芯片组成

HgCdTe 红外探测器混成芯片一般通过钢柱互连技术将红外探测器和处理芯片倒装互连在一起,形成完整的混成芯片,如图1所示。这种技术的主要优点是其可以单独对红外探测器材料和信号处理芯片进行单独优化设计,填充因子可以接近 100%,可以提供信号处理电路比较大的面积以实现芯片智能化。本文主要分析混成芯片的 HgCdTe 红外探测器受辐照影响机理及抗辐照加固工艺方法研究。

作者简介:李敬国(1976-),男,硕士,高级工程师,主要从事红外焦平面读出集成电路的研制工作。

E-mail:ljg@live.com

收稿日期:2018-10-29;**修订日期:**2018-12-16

3 HgCdTe 红外探测器受辐射影响机理分析

辐射对 HgCdTe 红外探测器影响的三种基本效应分别为:总剂量效应、瞬态辐射效应、位移损伤效应^[1]。

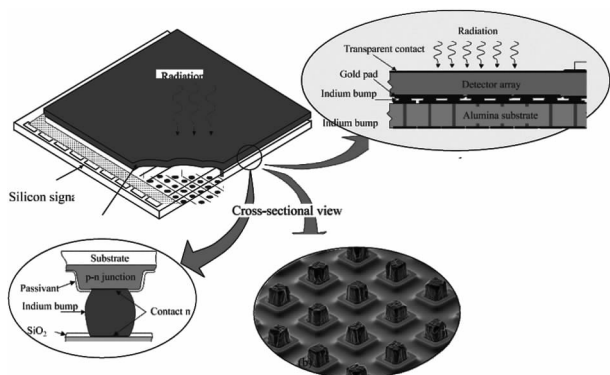


图 1 红外探测器芯片组成

Fig. 1 Schematic of IR detector

3.1 剂量辐射效应

受辐照影响,钝化层中电离产生的载流子受俘获形成固定电荷导致平带电压偏移;同时,钝化层中产生的电子空穴通过复杂的传输、键断裂,产生表面俘获态,进而产生热暗电流(表面漏电)并俘获少数载流子,表面态也会导致平带电压的偏移。探测器衬底中的电子空穴通过扩散、漂移的方式进行传输,这样被当成瞬态信号,其实并非真正的信号。

电离会导致绝缘层永久损伤,探测材料瞬态电荷产生。非本征探测器由于会在光激活位(optically active sites)俘获电离产生的电荷,导致响应率变化(增加或者降低)。

红外探测器中,通常会采用 ZnS 钝化,ZnS 中电离辐射导致的俘获电荷会使光电二极管之间 HgCdTe 表面形成累积区或者耗尽区,甚至反型区,进而在探测器元之间形成导电通路导致串扰,提高表面漏电,降低阵列性能,如图 2 所示^[2]。

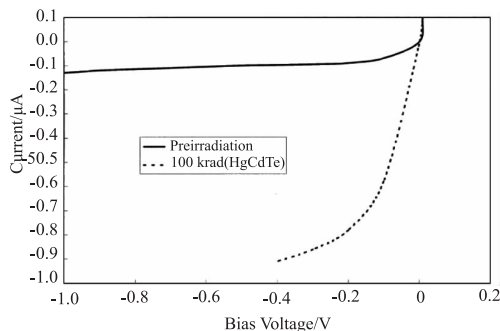


图 2 总剂量导致 ZnS 钝化的 HgCdTe 二极管之间漏电

Fig. 2 Total-dose-induced increase in leakage current in ZnS-passivated HgCdTe diodes

ZnS 实际上比较容易俘获电荷,当总剂量在 3 krad(ZnS) ~ 50 krad(ZnS) 时,HgCdTe 探测器阵列性能就会衰减,总剂量导致永久衰减比位移效应更重要。研究发现,总剂量在 ZnS 层中导致的俘获电荷会引起 HgCdTe 表面势的偏移。

3.2 瞬态辐射效应

高能粒子(主要高能质子)通过 HgCdTe 红外探测器周围材料时(杜瓦等),会与产生的次级电子生反应产生级联效应,偶尔发生核反应产生其他粒子;当通过红外探测器时,单个粒子所经过的路径上,多个像素都会受到撞击发生电离,导致瞬态效应,这种瞬态响应与内在的噪声水平相比要大的多,如图 3 所示^[3]。

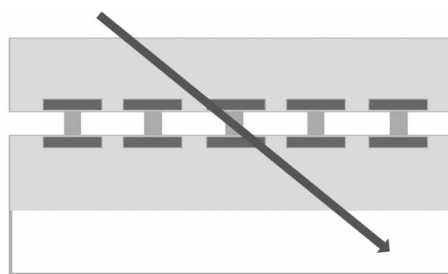


图 3 单个粒子通过红外探测器

Fig. 3 Single Particle through IR detector

红外探测器是探测辐射能量的光电器件,不会区分辐射能量来自红外光子还是高能粒子。辐射环境中,红外探测器 P-N 结耗尽区中高能粒子产生的电荷通过强电场中的漂移方式被收集起来,形成干扰信号;衬底区因辐射产生的电荷一部分扩散到结区被收集起来,另一部分扩散到邻近像元导致信号串扰,形成串扰信号。

3.3 位移损伤效应

探测器衬底中的原子与轰击-粒子碰撞会产生位移损伤,会在价带与导带之间引起缺陷状态,导致各种不同的效应,比如:暗电流、补偿、少子俘获、缺陷隧穿电流等^[4]。

光伏探测器是少子器件,其主要性能表征是 R_0A ,光伏探测器最好工作在扩散电流区,因为在扩散电流区零偏阻抗由扩散到耗尽区少数载流子的扩散主导。

N-on-P 器件的 R_0A 由来自 P 型材料的扩散电流主导:

$$R_0A = \frac{K T p \tau}{e^2 n_i^2 t}$$

其中, K 为 Boltzmann 常数; T 为温度; P 为空穴载流子浓度; τ 为少子寿命; e 为电子电荷; n_i 为本征载流子浓度; t 为探测器的厚度; 红外探测器 P 型区域空穴浓度相对比较高, 辐射导致的位移施主浓度会降低空穴浓度, 因此, 受位移损伤最明显的参数是少数载流子寿命, 由于引入 SRH 空位而降低少子寿命。起始光伏探测器 SRH 缺陷浓度尽可能低, 大约在 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, 引入因位移损伤导致的同样浓度的 SRH 空位, 会使 $R_0 A$ 降为原来的 $1/2$ 。

另一个影响 $R_0 A$ 的是红外探测器 N 型区域寿命的衰减。N 型 HgCdTe 探测器最大少子寿命由俄歇寿命 (Auger lifetime) 来决定, 其与电子浓度的平方成反比。为了更好的性能, 电子浓度通在比较低的水平, 比如 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^3$, 所以 N 型区域的俄歇寿命对位移损伤导致的效应比较敏感, 与 P 型区域的少子寿命一样。

4 抗辐照红外探测器与 ROIC

4.1 红外探测器抗辐照设计

为了验证 ZnS/CdTe 复合钝化层抗辐照的能力, 设计并制造了规格 640×512 规格, 像素间距为 $25 \mu\text{m}$ 的中波红外探测器, 探测器类型为 N-on-P, 波长为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 红外探测器版图如图 4 所示。

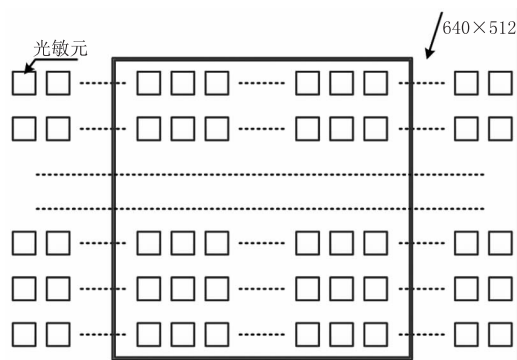


图 4 红外探测器版图

Fig. 4 IR detector layout

研究发现, HgCdTe 与 CdTe 钝化层的兼容性要好, 同时, 其具有非常好的抗总剂量能力, CdTe 钝化的 HgCdTe 其抗总剂量能力大于 1 Mrad (HgCdTe)。中波红外探测器采用 CdTe 钝化后, 随着总剂量的增大, R_0 值并不会随降低, 因此中波红外探测器的性能并不会降低, 如图 5 所示^[5]。

因此, 制造过程中重点优化了 ZnS/CdTe 钝化层的比例, 如图 6 所示, 使红外探测器既能够有效的被隔离, 同时又可以更有效的起到抗总剂量的效果。

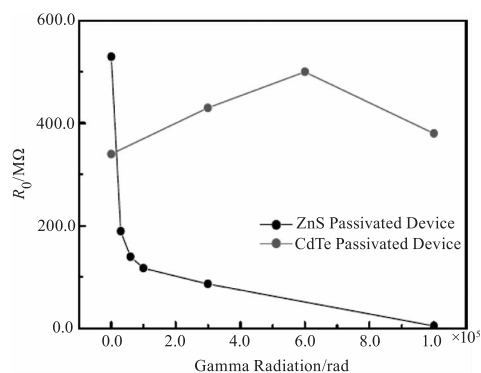


图 5 分别基于 ZnS 和 CdTe 钝化的器件 R_0 随 γ 射线剂量变化

Fig. 5 R_0 of devices with ZnS and CdTe passivation layer to the Gamma-ray dose

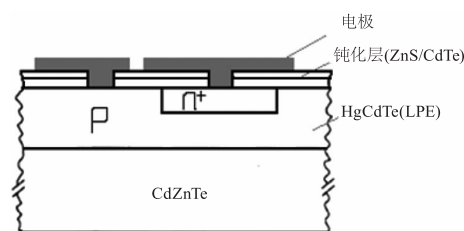


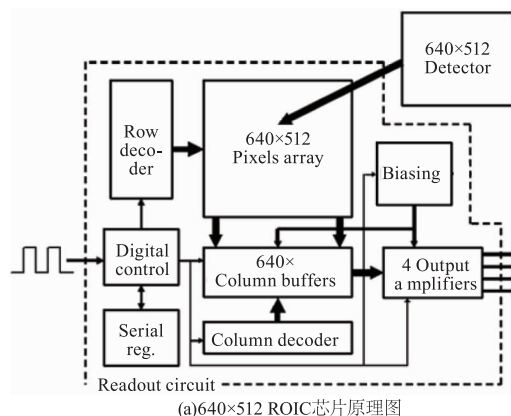
图 6 基于 ZnS 和 CdTe 复合钝化的器件结构

Fig. 6 Device structure based on ZnS and CdTe passivation

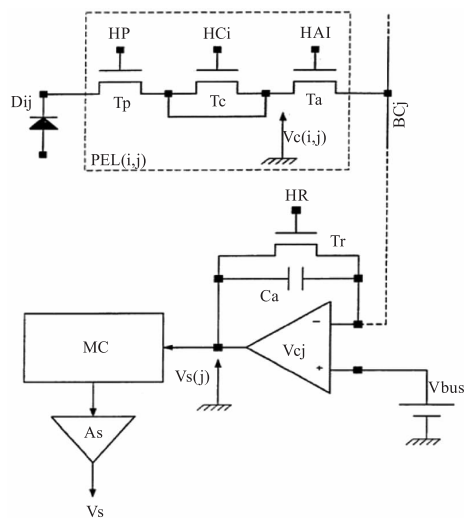
4.2 抗辐照 ROIC 设计

640×512 ROIC 芯片主要由像素阵列、列处理电路、输出缓冲运算放大器、列译码电路、行译码电路、数字控制电路等, 芯片原理图如图 7(a) 所示, 模拟信号通道如图 7(b) 所示。

直接注入像素 PEL(i,j) 结构由直接注入管 T_p 、MOS 积分电容 T_c 、行寻址开关 T_a 组成。直接注入管 T_p 主要是给红外探测器提供比较稳定的偏置, 并将红外探测器与积分电容 T_c 隔离, MOS 积分电容 T_c 收集光电转化的电荷, 行寻址开关 T_a 通过行控制信号 HAI 将收集的电荷转移到列 CTIA 处理电路, 并转化为电压信号, 电压信号经过列寻址依次经过缓冲放大器 A_s 输出。



(a) 640×512 ROIC 芯片原理图



(b) 640×512 ROIC 信号通道原理图

图 7 640×512 ROIC 芯片原理及信号通道原理图

Fig. 7 640×512 ROIC and signal channel schematics

本次 CMOS ROIC 芯片抗辐照加固设计主要依托先进半导体工艺,采用环型结构和 P 型保护环。环型结构包括环栅结构图 8(a)和环源结构图 8(b)。

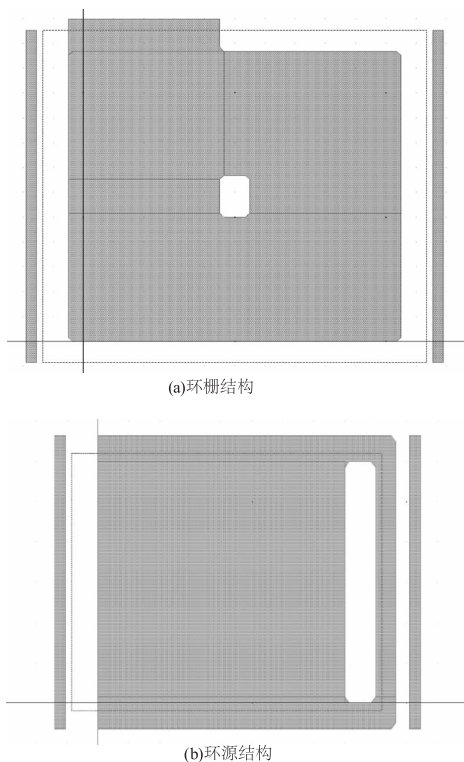


图 8 环栅与环源结构图

Fig. 8 Enclosed gate and ringed source geometries

5 辐照试验验证

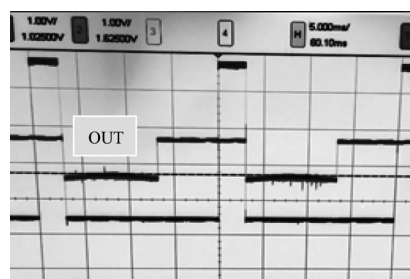
抗辐照中波红外探测器与抗辐照 ROIC 通过钢柱互联后分别进行了总剂量试验、剂量率试验以及

中子试验。

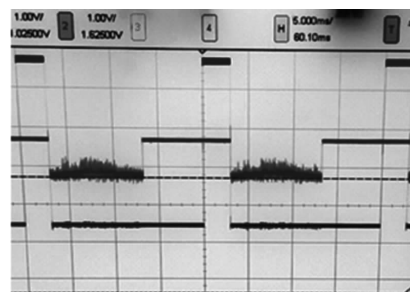
5.1 总剂量试验

辐照试验条件:红外探测器芯片正常工作加电,剂量率 50 rad(Si)/s,总剂量 100 krad(Si),观察读出电路信号输出。

辐照前,芯片输出信号波形如图 9(a)所示,其输出电平值为 2.337 V;100 krad(Si)总剂量时,其输出波形如图 9(b)所示其输出值电平均值为 2.410 V,信号略微增大。



(a) 芯片辐照前输出波形



(b) 芯片辐照后输出波形

图 9 芯片辐照前后输出波形

Fig. 9 Output waveforms before and after total ionizing dose radiation

辐照前后探测器性能对比参见表 2。

表 2 辐照前后探测器性能对比

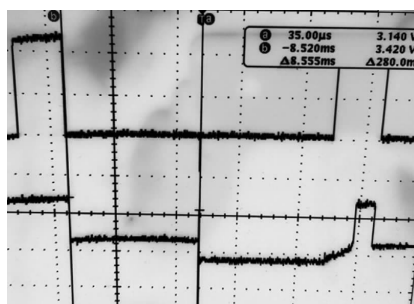
Tab. 2 performance comparison of IR detector in pre-radiation and post-radiation

红外探测器性能参数	辐照前	辐照后
D^* (mean)	8.713×10^9	8.852×10^9
R_v (mean)	2.846×10^8	2.807×10^8
R_v 非均匀性/%	6.68	6.71
V_s (mean)/V	0.967	0.954
V_n (mean)/mV	0.715	0.697
NETD (mean)/mK	11.2	11.0
盲元率/%	0.53	0.79

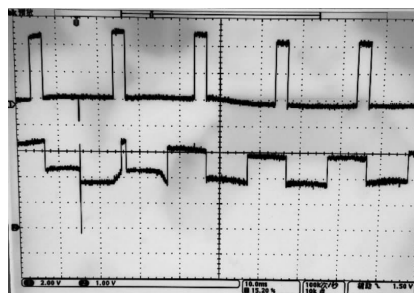
5.2 剂量率试验

剂量率试验在强脉冲辐射环境模拟与效应国家

重点实验室进行,红外探测器芯片正常工作加电,采用强脉冲辐射源,剂量率 $1.0 \times 10^{11} \text{ rad}(\text{Si})/\text{s}$ 。试验中芯片的输出波形如图 10 所示。



(a)剂量率试验中输出波形(局部放大)



(b)剂量率试验中输出波形(整体)

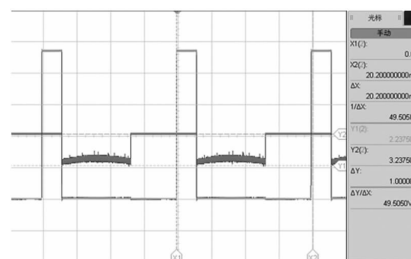
图 10 剂量率试验中输出波形

Fig. 10 Output waveform during dose rate experiment

当强脉冲来临时瞬间,读出信号瞬间受到强脉冲干扰,前后信号相差 280 mV,1 帧后信号得到基本恢复;由于在信号读出期间,探测器已经停止积分,此信号差是强脉冲对 ROIC 信号的干扰。

5.3 中子试验

红外探测器芯片正常工作加电,采用反应堆,注量 $1.0 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$,辐照前后红外探测器信号输出电平一直维持在 2.2375 V,中子辐照前后芯片的输出波形如图 11 所示。由于 ROIC 采用 CMOS 工艺制造,CMOS 器件是多子器件,对中子位移损伤不明显,因此,中波红外探测器信号未发生变化。



(b)中子辐照试验后输出波形

图 11 中子辐照前后输出波形

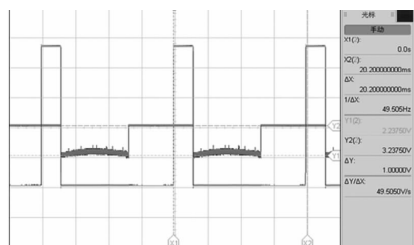
Fig. 11 Output waveform before and after neutron radiation

6 结论

本文论述了辐射对中波红外探测器芯片受辐照影响机理,主要表现为总剂量效应、瞬态辐射效应、位移损伤效应,这三种效应会不同程度地使中波红外探测器像元之间发生串扰、暗电流增大、信号降低。通过对 640×512 红外探测器和读出电路(ROIC)芯片进行抗辐照加固设计以及总剂量、剂量率、中子辐照试验验证,试验表明采用 ZnS/CdTe 复合钝化层结构加固后的中波 HgCdTe 红外探测器,采用环源、环栅结构的 ROIC 在抗总剂量、抗剂量率和抗中子位移损伤方面能够取得比较好的抗辐照效果。

参考文献:

- [1] A H Kalma, R A Cesena. Radiation testing of trimetal infrared detectors [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1979, 26 (6):4833 - 4839.
- [2] A H Kalma, M A Hopkins. Ionizing radiation effects in HgCdTe MIS capacitors [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983, 30(6):4146 - 4150.
- [3] E L Divita, M J Holtzman, R E Mills. Methodology for testing IR detectors in simulated nuclear radiation environments[J]. Proc. SPIE, 1989, 274:1108.
- [4] James C Pickel, Arne H Kalma, Gordon R Hopkinson, et al. Radiation effects on photonic imagers - a historical perspective[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003, 50(3):671 - 688.
- [5] Namho Lee, Seungho Kim, Seungho Jung, et al. Implementation of a radiation hardened infrared detector[C]//Korean Nuclear Society Spring Meeting Chuncheon, Korea, 2006.



(a)中子辐照试验前输出波形