

红外焦平面读出电路辐射特性研究

林加木^{1,2}, 丁瑞军¹, 陈洪雷¹, 沈晓^{1,2}, 刘非^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 红外焦平面阵列在宇宙空间中使用, 受到各种辐射导致性能退化甚至功能失效。作为红外焦平面阵列的重要组成部分, CMOS 读出电路受到各种辐射主要体现为电离辐射效应。通过对红外焦平面 CMOS 读出电路进行空间模拟辐射实验后, 测试读出电路的功能以及性能参数, 研究了辐射对读出电路的影响。实验结果为红外焦平面 CMOS 读出电路的抗辐射设计提供了参考依据。

关键词: 红外焦平面; 读出电路; 辐射效应

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Radiation effects study of readout IC for the infrared focal plane arrays

LIN Jia-mu^{1,2}, DING Rui-jun¹, CHEN Hong-lei¹, SHEN Xiao^{1,2}, LIU Fei^{1,2}

(1. Research Center for Advanced Material and Device, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: When the infrared focal plane arrays (IRFPAs) is using in the space, its performance can be reduced or it will be disabled. As the important part of the IRFPAs, the CMOS readout integrated circuit (ROIC), which is under a variety of radiations, is mainly reflected by ionizing radiation effect. After the experiment of giving space radiations to the IRFPAs CMOS ROIC chips, the function and the performance parameters of ROIC chips are tested. The affections of the radiations to the ROIC chips are also studied. The results of the radiation experiment give the referenced gist for the radiation resistant design of the IRFPAs CMOS ROIC.

Key words: infrared focal plane arrays; readout integrated circuit; radiation effect

1 引言

红外焦平面阵列, 被广泛应用于航天航空领域中的对地遥感、遥测以及空间科学探测。主要由红外焦平面探测器以及 CMOS 读出集成电路构成。由于在外空间的辐射环境中存在着各种各样的宇宙射线和高能带电粒子, 这些射线和带电粒子在与读出集成电路相互作用时, 会引起电路动态范围等特性参数的严重退化乃至失效, 严重地威胁红外焦平面阵列的可靠运转, 造成意想不到的损失。因此, 有必要找出引起红外焦平面读出电路特性退化主要表现特征和主要原因, 从而从电路设计等方面入手, 为提

高读出集成电路的抗辐射能力提供参考依据。

2 辐射效应机理^[1-2]

对于 CMOS 集成电路来说, 各种辐射产生的辐射效应基本上可分为位移辐射效应以及电离辐射效应。其中位移辐射效应对 CMOS 集成电路影响不大。由于 CMOS 集成电路是表面器件, 电离辐射效应会使电路性能受到较大的影响。

当辐射粒子穿进物质, 并和物质中电子相互作用

作者简介: 林加木(1982 -), 男, 博士研究生, 研究方向为红外焦平面器件和读出电路耦合关系研究。E-mail: linjiamu@hotmail.com

收稿日期: 2009-03-02

用时,辐射粒子把能量传给电子。如果电子获得的能量大于它的结合能时,电子就离开原来的运动轨迹,成为自由电子。而原子变成带电离子,这一过程称为电离辐射效应。质子、电子和其他带电粒子都能引起电离效应,而 X 射线,特别是 γ 射线,更易引起物质的电离效应。

在总剂量的辐射下,引起 CMOS 集成电路主要损伤的是晶体管的阈值电压向负方向漂移。N 沟道晶体管的阈值电压的这种漂移,可以是过零电压,使 CMOS 电路一直处于导通,引起 CMOS 电路的漏电流增加。P 沟道晶体管的阈值电压向负电压方向漂移,到一定程度引起 CMOS 电路的截止。另外,总剂量辐射还能引起 CMOS 电路输出高电平下降,输出低电平增加,漏电流增加,延迟时间增加,沟道迁移率下降,即电阻率增加。

电离辐射产生正空间电荷和界面态,是 CMOS 电路电离辐射效应的主要机理。

3 红外焦平面读出电路辐射实验及参数测量^[3]

实验所用测试的红外焦平面读出电路采用的是上华 0.6 μm 标准的 CMOS 工艺。样品包括以下三种读出集成电路芯片:①320 \times 240 规模的采用直接注入(DI)型读出结构的电路芯片;②128 \times 2 规模的采用电容反馈互导放大器(CTIA)型读出结构的电路芯片;③128 \times 128 规模的采用电容反馈互导放大器(CTIA)型读出结构的电路芯片。

3.1 辐射实验方法

辐射实验是在中国科学院上海原子核研究所辐照中心的⁶⁰Co- γ 射线辐射装置上进行的。实验环境温度常温。辐射剂量率为 40 rad/s。辐射剂量实验采用静态方式,通过热释光剂量计确定辐射剂量率。

将红外焦平面读出电路芯片样品分成 3 组依次进行剂量为 1×10^4 rad(Si), 1×10^4 rad(Si) 和 2×10^4 rad(Si) 的辐射。在达到辐射剂量后,将电路芯片移走,对电路芯片立即进行参数测量。

3.2 读出集成电路参数测量

读出电路芯片的参数测量是在由通用测试板、电源、逻辑分析仪、示波器构成的红外焦平面读出电路中测系统上完成的。对封装好的读出电路芯片进行功能测试,同时测量读出电路的动态范围和功耗等参数。再调整读出电路的工作条件后,对读出电路芯片的开启电压进行测量。所有的数据采集都是

在辐射实验完成后一小时内进行的。

4 实验结果与讨论

红外焦平面读出电路主要由 MOS 晶体管和 MOS 电容组成。其中 MOS 晶体管受辐射影响后主要体现在其阈值电压负向漂移^[4]。对于直接注入(DI)读出结构和电容反馈互导放大(CTIA)读出结构,其受辐射影响所体现的参数变化主要体现在输出信号的大小以及动态范围。

对于 DI 型电路,由于受辐射时产生电离效应,使得电路中 MOS 管的阈值电压负向漂移。因此,对 DI 型电路中注入管、复位管,开关管分别进行分析,可以得出在相同工作条件下,输出电压以及动态范围随着辐射总剂量的增加而减少。并且如果改变工作条件主要是改变开启电压的情况下,读出电路输出仍能够保证辐射前正常工作的状态。

对于 CTIA 型电路,辐射产生电离效应使得电路中放大器的性能变差,从而影响了电路输出的动态范围。

4.1 辐射对红外焦平面读出电路功能的影响

在辐射实验后,对实验电路芯片样品进行了功能测试。测试结果如表 1 所示。

表 1 辐射实验后红外焦平面 CMOS 读出电路功能的变化

| 样品型号 | 第一次辐射 (总剂量 1×10^4 rad) | 第二次辐射 (总剂量 1×10^4 rad) | 第三次辐射(总剂量 2×10^4 rad) |
|--------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 320 \times 240 规模 DI 型 | 4 个实验样品功能全部完好 | 第一组样品损坏 1 个,其余样品功能都完好 | 第一组实验样品损坏 2 个,第二组实验样品损坏 2 个,其余样品功能都完好 |
| 128 \times 128 规模 DI 型 | 4 个实验样品功能全部完好 | 第一组样品损坏 2 个,其余样品功能都完好 | 第一组实验样品损坏 2 个,第二组实验样品损坏 1 个,其余样品功能都完好 |
| 128 \times 2 规模 CTIA 型 | 2 个实验样品功能全部完好 | 所有 4 个实验样品功能都完好 | 第一组实验样品损坏 1 个,第二组实验样品损坏 1 个,其余样品功能都完好 |

1) 第一次辐射实验,总剂量为 1×10^4 rad(Si)。实验样品为第一组,数量为 320 \times 240 规模 DI 型电路芯片 4 片、128 \times 128 规模 DI 型电路芯片 4 片、128 \times 2 规模 CTIA 型电路芯片 2 片。功能测试显示所有芯片在辐射实验后功能完好,没有损坏。

2)第二次辐射实验,总剂量为 1×10^4 rad(Si)。实验样品为第一组和第二组,样品数量为 320×240 规模 DI 型电路芯片 8 片、 128×128 规模 DI 型电路芯片 8 片、 128×2 规模 CTIA 型电路芯片 4 片。其中第一组电路芯片是经历过第一次辐射实验的。功能测试结果显示经历过第一次辐射的第一组电路芯片有三块功能损坏,主要表现在移位寄存器发生错误。这几块芯片在经历 24 h 常温退火后重新进行功能测试,依然功能损坏,无法复原。第二组的电路芯片样品进行测试后显示,其功能全部完好。

3)第三次辐射实验,总剂量为 2×10^4 rad(Si)。实验样品为第三组样品、第二组样品以及第一组中功能完好的剩余样品。数量为 320×240 规模 DI 型电路芯片 10 片、 128×128 规模 DI 型电路芯片 11 片、 128×2 规模 CTIA 型电路芯片 6 片。功能测试结果显示第一组电路芯片样品大部分功能损坏;只经历第二次辐射的芯片样品有部分损坏;没有经历前两次辐射的电路芯片功能全部完好。经历 24 h 常温退火后,功能测试显示结果与退火前

相同。

实验结果表明,对红外焦平面读出电路单次进行剂量为 1×10^4 rad 甚至 2×10^4 rad 的辐射后,其功能基本上无变化,没有发生损坏。而在连续经历 3 次辐射,总剂量达到 4×10^4 rad 时,大部分读出电路芯片出现功能损坏的现象,损坏主要表现在读出电路的移位寄存器发生错误。

4.2 辐射对红外焦平面读出电路性能的影响

在辐射实验后,利用红外焦平面读出电路中测试系统,对经受辐射的电路芯片样品进行了性能测试,主要测试了动态范围、开启电压以及功耗这三个参数。

图 1、图 2 和图 3 分别显示了 320×240 规模 DI 型、 128×128 规模 DI 型以及 128×2 规模 CTIA 型三种电路芯片样品在经历三次辐射实验后动态范围随总剂量的变化而变化的趋势。对于 DI 型电路,在经历辐射实验后,其动态范围随着辐射总剂量的增加而降低。而对于 CTIA 型电路,在经历辐射实验后,其动态范围随着辐射总剂量的增加而增加。

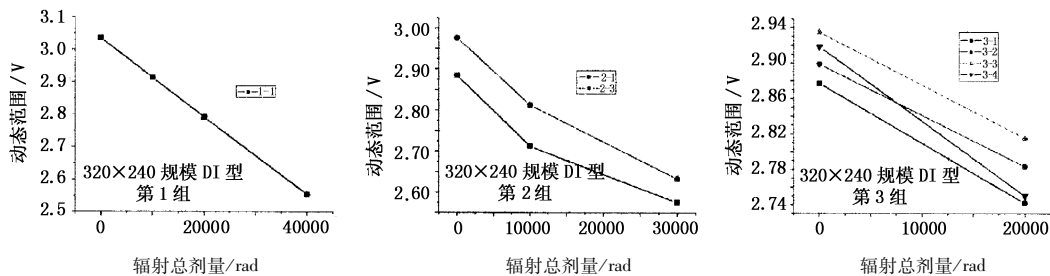


图 1 320×240 规模 DI 型读出电路芯片动态范围变化特性

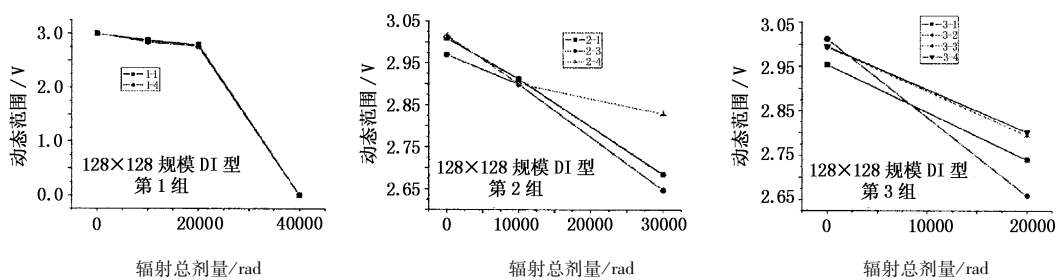


图 2 128×128 规模 DI 型读出电路芯片动态范围变化特性

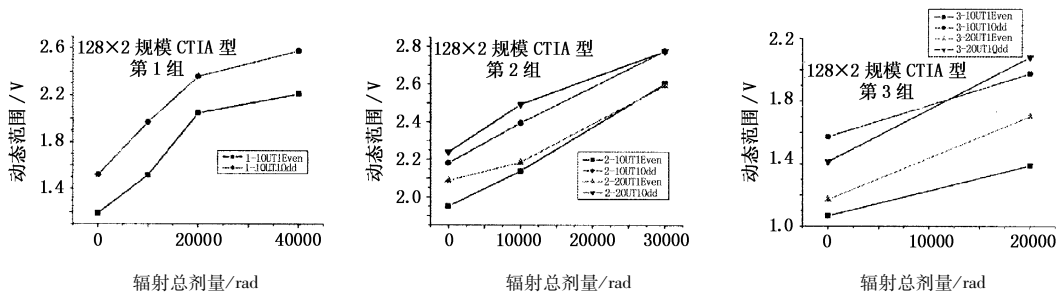


图 3 128×2 规模 CTIA 型读出电路芯片动态范围变化特性

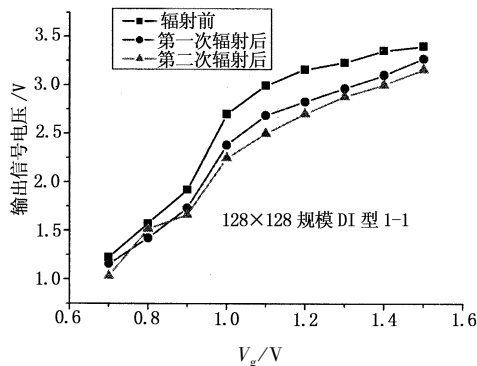
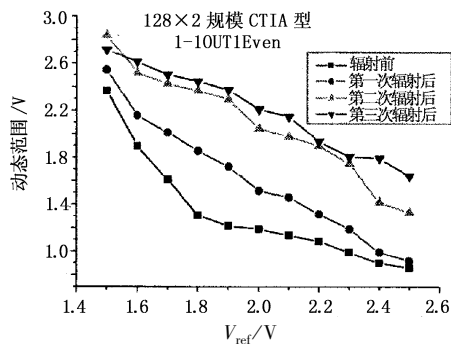
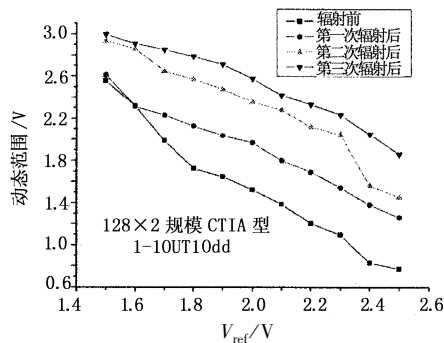


图4 128×128 规模 DI 型读出电路芯片输出电压随开启电压 V_g 的变化特性



(a) 偶数



(b) 奇数

图5 128×2 规模 CTIA 型读出电路芯片动态范围随参考电压 V_{ref} 的变化特性

图4显示了128×128规模DI型读出电路芯片输出信号电压随开启电压 V_g 的变化特性。从实验结果可以得出,128×128规模DI型读出电路芯片的输出信号电压随开启电压 V_g 的增加而相应变大,但经历辐射后其输出信号电压减小了。这表明,对于DI型电路芯片,在经历辐射后,若要恢复成辐射前正常

工作的状态,其开启电压必须增大,而且随着辐射总剂量的增加,相应的开启电压 V_g 也必须增大。

图5显示了128×2规模CTIA型读出电路芯片奇偶两路输出的动态范围随参考电压 V_{ref} 的变化特性。从实验结果可以得出,128×2规模CTIA型读出电路芯片奇偶两路输出的动态范围随着参考电压 V_{ref} 的增加而逐渐减少,但经历辐射后其动态范围变大。这表明,在经历辐射后,电路如需恢复成辐射前正常工作的状态,其参考电压 V_{ref} 值必须增加,而且随着辐射总剂量的增加,相应的参考电压值 V_{ref} 也需增大。

5 结论

通过对三种红外焦平面读出电路的辐射实验结果的对比与分析,验证了以下结论:在误差范围内,在经历辐射后,红外焦平面读出电路的功能和性能受到极大的影响。在辐射总剂量达到 4×10^4 rad 时,电路芯片基本上功能损坏。而随着辐射总剂量的增加,DI型电路的输出动态范围降低,CTIA型电路的输出动态范围反而增加。同时,对于经历过辐射的电路芯片,改变工作条件,则能够改善电路的性能。对于DI型电路,增大开启电压 V_g 能够使电路恢复到辐射前正常工作的状态;对于CTIA型电路,增大参考电压 V_{ref} 也能够改善电路性能。

红外焦平面读出电路辐射实验的结果,给出了引起红外焦平面读出电路特性退化主要表现特征和主要原因,同时在电路设计等方面为提高读出集成电路的抗辐射能力提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 姚立真. 可靠性物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004:615-633.
- [2] 杜迎, 蔡荭, 朱卫良. 电离辐射对集成电路的影响[J]. 电子与封装, 2005, 5(7): 23-27.
- [3] 贺朝会, 耿斌, 何宝平, 等. 大规模集成电路总剂量效应测试方法初探[J]. 物理学报, 2004, 53(1): 194-199.
- [4] 万新恒, 张兴, 高文钰, 等. 低剂量辐照条件下的 MOS-FET 因辐照导致的阈值电压漂移的模拟[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(1): 63-68.