

基于 6 英寸工艺制备的 1 krad RADFETs

潘建华 张秋丽 吴建伟 张明 荆思诚

无锡中微晶园电子有限公司 江苏无锡 214035

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21594

[摘要] 辐射敏感场效应晶体管 (Radiation Sensitive Field-Effect Transistor, RADFETs) 是通过辐照引起总剂量效应的辐射探测器。本研究在无锡中微晶园电子有限公司的 6 英寸工艺线上通过 7 层光刻工艺制备 RADFETs 芯片, 单个 P 型金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOS) 的宽长比为 $300\ \mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$, 栅氧化层厚度为 1000 nm。晶圆级测试的阈值电压均值为 3.01 V, 合格芯片的片内离散度为 5%。试封装样品的初始阈值电压为 3.07 V, 通过 1 krad(Si) 的钴源照射后, 阈值电压增大 1.04 V, 表明该器件具有良好的辐射探测功能。

[关键词] 辐照探测器; PMOS; 总剂量效应

The 1 krad RADFETs fabricated base on 6-inch process

Pan Jianhua Zhang Qiuli Wu Jianwei Zhang Min Jing Sicheng,

Wuxi Zhongwei Microchips Co., Ltd., Wuxi 214035

[Abstract] Radiation Sensitive Field-Effect Transistor (RADFETs) are radiation detectors based on total dose effect induced by irradiation. In this paper, RADFETs chips were fabricated with a 7-layer lithography process in the 6-inch process line of Wuxi Microchips Co., Ltd. Each PMOS has the width-to-length ratio of $300\ \mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$ and the gate oxide thickness of 1000 nm. Wafer-level tests show that the average threshold voltage is 3.01 V, with the dispersion of 5% for qualified chips. For the trial-packaged samples, the initial threshold voltage is 3.07 V, and the threshold voltage increases by 1.04 V after irradiation with a cobalt source at a total dose of 1 krad(Si), demonstrating that the device exhibits excellent radiation detection functionality.

[Key words] radiation detector; PMOS; total dose effect

引言

随着人们对半导体应用场景的扩宽, 逐渐认知到了辐射效应对半导体器件性能的影响, 辐射效应主要包括总剂量效应、单粒子效应、瞬时剂量率效应、位移损伤等^[1-2]。辐射敏感晶体管 (Radiation Sensitive Field-Effect Transistor, RADFETs) 由 P 沟道的金属氧化物半导体场效应晶体管 (PMOSFET) 构成, 也被统称为 PMOS 剂量计^[3]。和收集荧光、径迹剂量器相比, PMOSFETs 这种通过收集电离电荷的剂量计具有易集成、体积小、重量轻、功耗低等优势, 可以广泛应用于航空航天、医疗科学及个人剂量检测等方面^[4-6]。常规 PMOSFETs 的栅氧化层厚度在 10-1000nm, 较厚的栅氧化层对电离辐射更为敏感, 辐照能引起阈值电压漂移与辐射累积剂量并形成线性对应关系^[7]。近几年, PMOSFETs 正逐步实现国产化生产, 重庆联合微电使用 8 英寸工艺制备了 100 krad 的 RADFETs^[8], 无锡中微晶园电子有限公司现量产的硅基 RADFETs 产品, 可满足 10krad 至 1000krad 的总剂量测量量程。

截止目前, 国内还尚未出现量产 RADFETs 的总剂量测量量程达到 1krad。因此, 本文基于自主成熟 6 英寸 COMS 工艺平台, 聚焦于 RADFETs 的关键工艺研究, 以实现 1krad RADFETs 产品的量产, 拓宽国产化全系列产品的应用场景。

1 工作原理和器件仿真

图 1 (a) 所示, RADFETs 的结构和常规的 PMOS 型晶体管

类似, 包含四个电极: 漏极 (Drain)、栅极 (Gate)、源极 (Source) 和衬底电极 (Substrate)。基于 MOS 结构辐射损伤的机理, 采用对电离辐射更为敏感的厚栅氧化层。栅氧化层越厚, RADFETs 总剂量测量量程的范围越小, 灵敏度越高, 对于 1krad RADFET, 栅氧厚度通常需要达到 900nm 以上。当 PMOSFETs 受到辐照时, 会在栅氧化层中产生电子-空穴对。如图 1 (b) 所示, 当栅极施加正电压时, 电子会在电场的作用下以皮秒量级的时间被扫向金属栅极, 空穴则在 SiO_2 中通过“跳跃”机制运输至 SiO_2/Si 界面处。这些被氧化层内的陷阱和 SiO_2/Si 界面陷阱捕获, 分别形成氧化层陷阱电荷和界面态陷阱电荷, 在 PMOS 中表现为阈值电压向负向漂移。

通过参考总剂量测量量程为 30 krad 至 1000 krad RADFETs 的设计经验 (栅氧厚度 100 至 400nm), 本研究选择 1000 nm 的栅氧化层厚度与 $300\ \mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$ 的宽长比, 来设计 1 krad 的 RADFETs。材料片选择高掺杂的 N 型衬底和低掺杂的 N 型外延来降低电阻和提高击穿电压, 主要工艺制程如下:

(1) PMOS 中源/漏区和体区的制备; (2) 栅区工艺前的多次牺牲氧化, 用于提高栅氧质量, 改善沟道区域 SiO_2/Si 的界面态; (3) PMOS 的沟道注入和栅氧化层的生长, 栅氧化层采用“干+湿+干”的混合氧化工艺, 用于提高器件灵敏度, 实现阈值电压的精准调控; (4) Al 电极的制备, 提高栅极的导电性, 避免多晶硅底部的耗尽效应。整体工艺采用 7 层光刻, 包括有源区、源区、漏区、栅区、接触孔、金属和钝

化层。

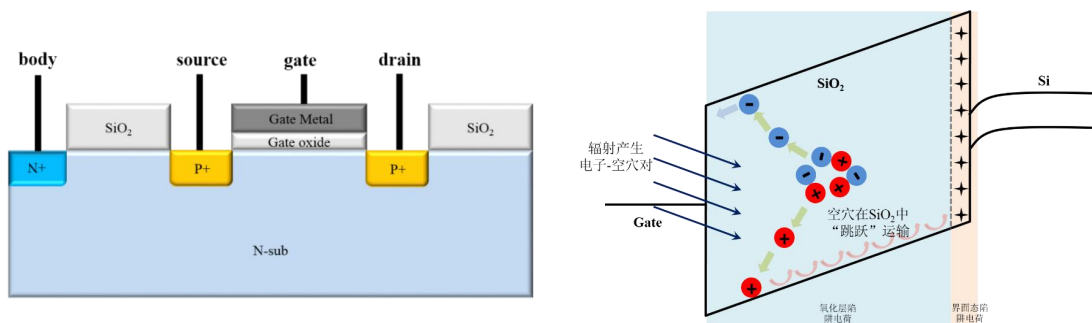
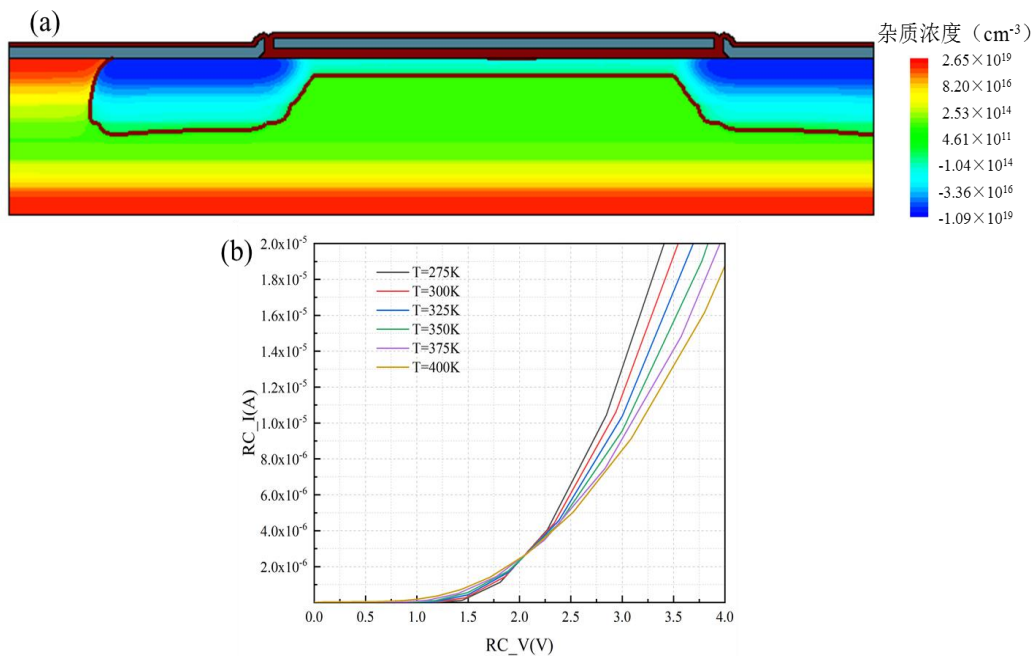


图1 (a) PMOSFETs 器件的结构图; (b) 栅极区域辐照后陷阱电荷产生示意图



(a) 结构仿真模型; (b) 不同温度下阈值电压仿真结果;

图2 仿真结果

通过 TCAD 工艺仿真软件对 RADFETs 进行工艺仿真, 结合 conmob 迁移率、能带变窄模型、高场速度饱和、俄歇复合等经典模型, 参考 PMOS 工艺对平面结构的源漏极扩散结深和阈值电压进行仿真, 理论验证结构的稳定性。器件仿真的二维结构如图 2 (a) 所示, 栅区的长度为 50um, 仿真中通过增加 300 μm 的面积因子来模拟栅区的宽度。仿真参考 RADFETs 在实际应用中采用 RC 构型连接, 漏极和栅极短接并接地, 源极和衬底电极短接并于恒流源相连, 恒定电流从源极被注入器件, 测得的 RC_V 被定义为 RC 阈值电压。如图 2 (b) 所示, 电流为 10 μA 下的阈值电压仿真结果为 2.93V。此外, 在读出电流 (RC_I) 为 2.7 μA 时存在零温度系数点 (ZTC)。

参考仿真条件在 6 英寸晶圆上进行流片验证, 晶圆测试的阈值电压分布如图 3 所示。当电流为 10 μA 时, 阈值电压均值为 3.01 V, 接近理论仿真结果。测试芯片数量超过 900 颗, 合格芯片的阈值电压的离散度小于 5%, 阈值电压的片内

均匀性良好。但在晶圆的边缘区域部分芯片的阈值电压小于 2.5V, 后续可以通过优化退火工艺进行改善。

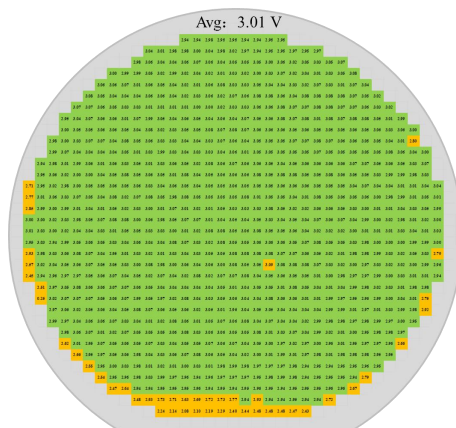


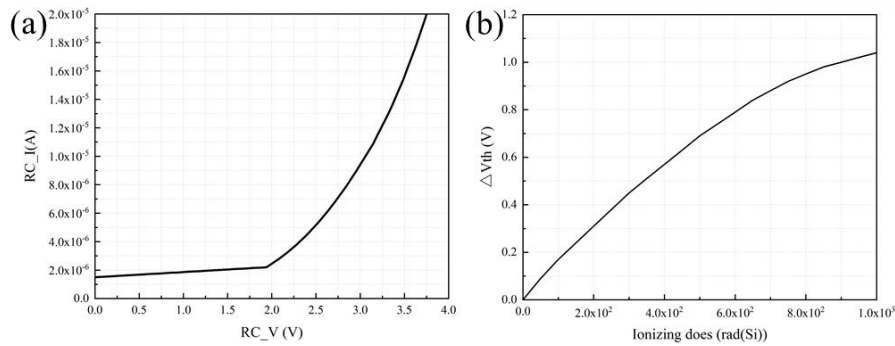
图3 6 寸圆片中阈值电压分布

通过测量 1 krad RADFETs 封装成品的阈值电压和阈值电压随辐照总剂量的变化, 验证其应用的可行性, 封装形式采用 DIP-14, 共计 14 个管脚。辐照实验采用的辐射源为钴源,

封装成品采用 RC 构型连接，辐照时连接 10 μA 的恒流源电路。试封装样品的测试结果如图 4 (a) 显示，RC_I 在 10 μA 下的初始阈值电压为 3.07 V，与仿真结果基本一致。图 4 (b) 展示了阈值电压偏移随总剂量的变化曲线，在总剂量达到 1 krad(Si) 时阈值电压增大 1.04 V。

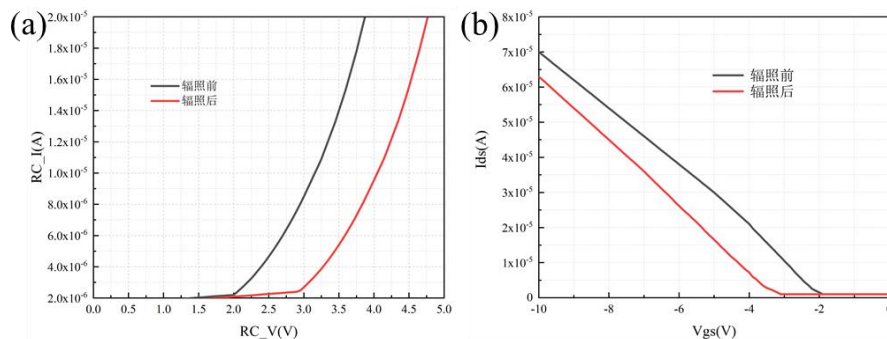
辐照前后 1 krad RADFETs 封装成品的阈值电压和转移特

性曲线对比如图 5 所示，辐照剂量为 1 krad(Si)，结果显示辐照后阈值电压和转移特性曲线都出现明显的负漂，表明在 1 krad(Si) 量程范围内，辐照会使器件的阈值电压升高，该器件有着良好的响应特性。相比与常规的 RADFETs 探测器，本文所制样品的阈值电压略高，后续工作还需进一步优化。例如，优化沟道注入工艺，将阈值电压降低至 1.5 V，更符合实际应用。



(a) 初始阈值电压曲线；(b) 阈值电压随总剂量变化，辐照剂量率为 1 rad(Si)/s

图4 1 krad RADFETs 的封装成品测试结果



(a) 辐照前后阈值电压曲线；(b) 辐照前后传输特性曲线

图5 辐照前后的 RADFETs 的封装成品测试结果，辐照剂量为 1 krad(Si)。

2 结论

综上所述，本文将工艺和参数仿真与实际流片测试相结合，展示了 1 krad RADFET 探测器的制备工艺流程，并在 6 英寸晶圆上成功进行量产，所制样品对辐照具有良好的响应特性。本文所制样品的栅氧化层为 1000 nm，辐照剂量测量范围为 1 krad(Si)，晶圆级测试表明整片圆片的均匀性良好。试封装样品辐照前的阈值电压为 3.07 V。辐照后阈值电压提升 1.04 V，实现了优异的辐射探测功能。

【参考文献】

- [1]沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京：中国宇航出版社. 2013.
- [2]刘文平，刘佑宝. 硅半导体器件辐射效应及加固技术[M]. 北京：科学出版社. 2013.
- [3]HOLMES-SIEDLE A. The space-charge dosimeter: general principles of a new method of radiation detection[J]Nuclear Instruments and Methods, 1974, 121 (1): 169-179.
- [4]KARMAKAR A, WANG J L, PRINZIE J, et al. A rev

iew of semiconductor based ionising radiation sensor s used in harsh radiation environments and their applications[J]. Radiation, 2021, 1(3), 194.

[5]MOROZZI A, MOSCATELLI F, CROCI T, et al. TCAD modeling of surface radiation damage effects: A state-of-the-art review[J]. Front Phys, 2021, 9, 617322.

[6]ANDJELKOVIC M, SIMEVSKI A, CHEN J C, et al. A design concept for radiation hardened RADFET readout system for space applications[J], Microprocess Microsyst, 2022, 90, 104486.

[7]陈德英，张旭，姜岩峰，等. PMOS辐照检测传感器[J]. 传感器技术，2002，1.

[8]HUANG J, PAN B J, BAO H, et, al. A semiconductor radiation dosimeter fabricated in 8-inch process [J], J. Semicond., 2025, 46(8), 082302.

作者简介：潘建华（1978—），男，江苏无锡人，学士，工程师，西安理工大学微电子技术专业毕业，主要研究方向为半导体工艺研究和电子电路的开发。