

基于SOI结构的辐照传感器的辐照响应特性研究

孙 静¹ 郭 旗¹ 郑齐文¹ 崔江维¹ 何承发¹ 刘海涛¹
刘许强² 刘梦新³

1(中国科学院新疆理化技术研究所 中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室 新疆电子信息材料与器件重点实验室 乌鲁木齐 830011)

2(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621999)

3(中国科学院微电子研究所 北京 100049)

摘要 绝缘体上硅埋氧层(Silicon-On-Insulator Buried Oxide, SOI BOX) P型金属氧化物半导体场效应晶体管(Positive channel Metal Oxide Semiconductor, PMOS)是用于新型高灵敏度辐射探测器的一种关键器件。通过试验研究了SOI BOX PMOS的辐照响应特性,包括辐照偏置对SOI BOX PMOS的辐射响应灵敏度的影响、不同辐射剂量率环境下的SOI BOX PMOS的灵敏度响应差异、辐照后的SOI BOX PMOS的退火特性及其对辐射响应敏感度影响,以及SOI BOX PMOS沟道宽长比与其灵敏度的关系等,并对试验结果进行了必要的理论分析。实验结果表明:正偏置辐照的器件对电荷的收集响应灵敏度明显高于零偏置辐照的器件;阈值电压的辐照变化几乎不受退火效应影响;相比于宽沟道器件,窄沟道器件的阈值电压漂移更为明显。实验研究为新型辐射剂量探测器的研制打下了基础。

关键词 辐照传感器,基于绝缘体上硅P型金属氧化物半导体场效应晶体管,剂量计

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.120501

Radiation response characteristics of an embeddable SOI radiation sensor

SUN Jing¹ GUO Qi¹ ZHENG Qiwen¹ CUI Jiangwei¹ HE Chengfa¹ LIU Haitao¹
LIU Xuqiang² LIU Mengxin³

1(Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments, Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Material and Device, Urumqi 830011, China)

2(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

3(Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract [Background] With the rapid development of the aerospace industry, deep space environments, space stations, and long-life satellites have set higher requirements for space environment radiation dose detection technology. Positive channel metal oxide semiconductor (PMOS) tubes based on silicon-on-insulator buried oxide (SOI BOX) is one of key candidate device for next-generation radiation detectors of high-sensitivity and wide-range

国家自然科学基金(No.11605283、No.U1630141、No.11975305)和中国科学院西部之光项目(No.2017-XBQNXZ-B-008)资助

第一作者: 孙静, 女, 1981年出生, 2008年于新疆大学获硕士学位, 专业领域为辐射探测技术

收稿日期: 2019-11-19, 修回日期: 2019-11-28

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11605283, No.U1630141, No.11975305), the West Light Foundation of Chinese Academy of Sciences (No.2017-XBQNXZ-B-008)

First author: SUN Jing, female, born in 1981, graduated from Xinjiang University with a master's degree in 2008, focusing on radiation detection technology

Received date: 2019-11-19, revised date: 2019-11-28

irradiation sensors. **[Purpose]** This study aims to investigate radiation response characteristics of an embeddable SOI radiation sensor. **[Methods]** Comprehensive radiation experiments were performed to study the influence of irradiation bias on the sensitivity of SOI BOX PMOS, the sensitivity response difference in various radiation dose rate, the annealing characteristics of SOI BOX PMOS after irradiation and its influence on the sensitivity of radiation response, and the relationship between the width to length ratio of SOI box PMOS and its sensitivity. **[Results]** The results show that the sensitivity of SOI BOX PMOS to radiation dose is better than that of traditional bulk silicon sensor under the same cumulative dose, and the threshold voltage drift of SOI BOX PMOS under irradiation bias. The irradiation change of threshold voltage is almost unaffected by annealing effect. Compared with wide-channel devices, threshold voltage drift of narrow-channel device is more obvious. **[Conclusions]** Through the design of the SOI BOX PMOSFET (Positive channel Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor) structure, important research results such as adjusting the sensitivity of the detector and balancing the relationship with the range have important application value for the development of the next generation of new radiation dose detector.

Key words RADFET sensors, SOI PMOSFET, Dosimeter

P型金属氧化物半导体场效应晶体管(Positive channel Metal Oxide Semiconductor, PMOS)剂量计是在20世纪70年代由英国的Holmes-Siedle^[1-2]最先提出的,利用辐射敏感的PMOS的阈值电压随电离辐射剂量变化的响应关系,从而测量空间电离辐照总剂量的一项测量技术。PMOS剂量计因其体积小、功耗低、可实现在线监测等优点,被广泛的应用于空间环境探测^[3-4]。

辐照传感器是辐射剂量计最核心部件,决定了探测器灵敏度、量程等主要性能。国内目前应用于空间辐射剂量探测的PMOS剂量计,其辐照传感器主要采用的是国外采购的厚栅PMOSFET(Positive channel Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor),而厚栅工艺的PMOSFET存在对辐照响应灵敏度和量程的相互牵制问题,无法做到高灵敏度与宽量程的兼顾,此外PMOSFET需要专门设计及流片,厚栅氧化层的生长需要一定的工艺技术,不仅成本高,也不利于自主可控。因此,研究适用于空间辐射剂量在轨监测的新型的高性能的辐照传感器,对于解决辐射剂量计的国产化及满足我国空间技术的快速发展需求都具有重要现实意义。

绝缘体上硅(Silicon-On-Insulator, SOI),是在传统Si器件顶层硅和背衬底之间引入了一层埋氧化层(Buried Oxide Layer, BOX)的技术,由于其具有抗闩锁、抗辐射等优良特性,其技术得到了飞速发展,已经是一种非常成熟的工艺技术。而对于辐射效应探测器来说,由于SOI器件的BOX很厚,理论上对电离辐照具有非常强的敏感性,再加上BOX厚度可控,且与SOI器件的工艺完全兼容,生产成本低,因此以BOX层做为栅氧化层的PMOSFET替代

目前传统体Si厚栅PMOSFET,是发展新型高灵敏度辐射效应探测器的非常理想途径。

国内外虽然对SOI器件的辐射效应和损伤机理进行了大量的研究工作,但专门对SOI BOX层,特别是将SOI BOX PMOS作为PMOS剂量计的辐照传感器的适宜性研究并不多见。目前国外见报道的工作有:美国Sandia实验室^[5]对于SOI工艺的PMOS辐照传感器的辐射响应特性进行了初步研究,研究表明零偏置辐照下BOX PMOS辐照传感器表现出了较好的灵敏度,并且显著的减小了剂量率效应的影响;美国Watson Research Center的Yau等^[6]利用完全耗尽的绝缘硅(Fully-depleted SOI, FDSOI)衬底制造辐射剂量计的方法,发现其与现有体硅探测器的比较显示出较好的灵敏度,并具有长达90 d的BOX电荷保留时间的优势。国内目前仅有江南大学模拟分析了SOI PMOS辐照传感器在不同偏置条件下、埋氧层厚度条件下的辐照响应特性的影响^[7],但工作仅限于模拟仿真,缺少试验数据支持。

本文基于我国对发展新型高灵敏度辐射探测仪的需求,立足于国内外现有研究成果^[8-10],从SOI BOX PMOS沟道宽长比与剂量计灵敏度的关系、辐照偏置对SOI BOX PMOS的辐射响应灵敏度的影响、不同辐射剂量率环境下的SOI BOX PMOS的灵敏度响应特性差异,以及辐照后的SOI BOX PMOS的退火特性及其对辐射响应敏感度影响等角度,对直接影响SOI BOX PMOS在辐射剂量探测仪应用的一些主要关键技术问题进行了试验研究,并对试验结果进行了必要的理论分析。研究结果为我国下一代新型辐射剂量探测仪的研制打下了基础。

1 实验样品及辐照实验

1.1 试验样品

为本项研究需要,特制了以 SOI PMOS 管中的埋氧层为栅极,源、漏极仍采用原 PMOS 管的源、漏的 SOI BOX PMOS 管。SOI BOX PMOS 选用了 SIMOX 材料,并用 $2\text{ }\mu\text{m}$ SOI 标准工艺制作。做为栅氧化层的埋氧层厚度为 $18\text{ }\mu\text{m}$ 。为研究需要制作了沟道宽长比分别为 $W/L=40\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$, $W/L=10\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$ 的两种结构器件。器件采用印制电路板 (Printed Circuit Board, PCB) 封装。

1.2 辐照试验

辐照试验在中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Co - γ 射源上进行。考虑到实际空间环境的低剂量率以及剂量探测仪地面标定的相对高剂量率,设计了高低两种剂量率的辐照条件: $1.89\times 10^{-2}\text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}(\text{Si})$ 与 $0.5\text{ Gy}\cdot\text{s}^{-1}(\text{Si})$, 总剂量为 $300\text{ Gy}(\text{Si})$ 。辐照偏置条件选用了器件栅极正偏和零偏两种形式: 1) 正偏, 背栅极电压 (V_G) 为 $+9\text{ V}$, 前栅极、源极 (V_S)、漏极 (V_D) 全部接地; 2) 零偏, 器件的全部管脚接地。辐照过程中, 选取 $0\text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $50\text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $100\text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $200\text{ Gy}(\text{Si})$ 、 $300\text{ Gy}(\text{Si})$ 等辐射累积剂量点进行了阈值电压、静态功耗电流、输入输出特性曲线等器件敏感参数和曲线的移位测试, 测试主要采用的 Keithley4200SCS 半导体综合参数分析仪, 每一次测试过程不超过 20 min 。需要说明的是由于辐射效应探测仪的探测灵敏度、量程等只与做为辐照传感器的 PMOS 管的阈值电压变化相关, 因此下文主要围绕样品的阈值电压在辐照环境中的变化展开研究与讨论。

1.3 退火试验

鉴于实际空间辐照剂量率非常低, 且电子器件在空间会出现边损伤边退火现象, 我们对辐照后的所有样品都进行了室温环境下的 168 h 退火试验, 退火过程中, 样品的偏置条件与辐照时的偏置状态保持一致。与辐照过程一样, 选择不同的退火时间点进行样品辐照敏感参数和特性的测量。

2 实验结果

从图 1、图 2 的试验结果我们看到, 无论是何种宽长比结构、何种辐照剂量率, 正偏置的 BOX MOSFET 的阈值电压漂移量都远大于 0 偏置状态。例如, 即便从总体变化幅度比较小的图 2 试验结果看, $50\text{ Gy}(\text{Si})$ 时, 正偏状态下的样品阈值电压漂移

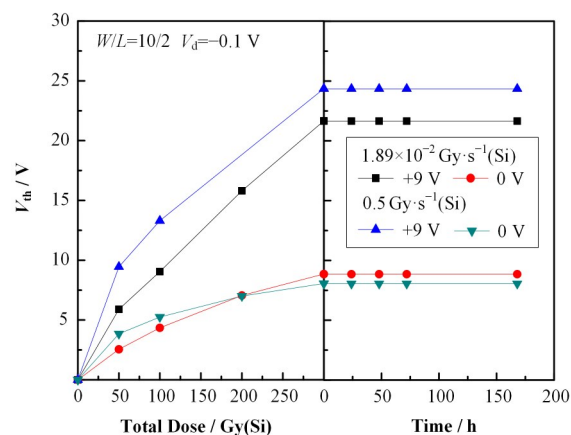


图1 不同偏置条件下宽长比为 $10\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$ 的 SOI BOX 的阈值电压漂移量 ΔV_{th} 随总剂量变化曲线

Fig.1 ΔV_{th} versus irradiation and anneal time for $W/L=10\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$ BOX RadFETs irradiated

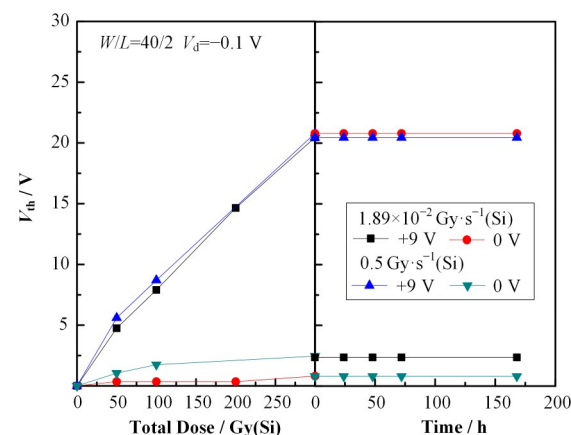


图2 不同偏置条件下宽长比为 $40\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$ 的 SOI BOX 的阈值电压漂移量 ΔV_{th} 随总剂量变化曲线

Fig.2 ΔV_{th} versus irradiation and anneal time for $W/L=40\text{ }\mu\text{m}/2\text{ }\mu\text{m}$ BOX RadFETs irradiated

已有 20 V , 而相应 0 偏状态的还不到 1 V 。这一试验结果说明 SOI BOX PMOSFET 阈值电压的辐照响应灵敏度依赖于辐照偏置状态, 做为辐照传感器的 SOI BOX PMOS, 其探测时可考虑采用正偏置工作方式。同时, SOI BOX PMOS 在正偏状态下, 无论是宽沟还是短沟器件, 其阈值电压随辐照累积剂量的漂移都有非常好的灵敏度。例如在正偏状态下, 两种样品在 $50\text{ Gy}(\text{Si})$ 辐照累积剂量下的阈值电压漂移幅度都达到了 5 V 以上, 按此推算, 其辐照灵敏度可以达到 $5\text{ Gy}(\text{Si})/\text{V}$, 换句话说, 每 $0.5\text{ Gy}(\text{Si})$ 的环境剂量变化, 就可以引起 SOI BOX PMOS 100 mV 的阈值电压漂移反应, 表明了 SOI BOX PMOS 做为新型高灵敏辐射剂量仪的传感器的巨大潜力。

从图1、图2退火试验数据的可以看到, SOI BOX PMOSFET 阈值电压的辐照变化几乎不受退火效应影响。无论是宽沟样品还是窄沟样品, 无论是何种辐照条件下, SOI BOX PMOS在总剂量辐照后, 其阈值电压漂移量都不会随退火时间的变化而变化。这一现象可能对 SOI 器件的正常抗辐射性能并不利, 但对辐射剂量探测仪来说, 却是非常大的优势, 不但能够提高剂量探测精度, 也大大降低了探测器地面标定的难度和工作量。

图3 为高、低两种辐照剂量率下, 不同沟道宽度的 SOI BOX MOSFET 器件在不同辐照偏置条件下

的阈值电压漂移随总剂量的辐照响应变化曲线。从图3可以看到, 在两种辐照剂量率下, 无论是正偏还是零偏, 窄沟道器件阈值电压漂移量都大于相应的宽沟道器件, 做为辐照传感器, 显然窄沟 SOI BOX PMOS 的测量灵敏度要好于宽沟器件。这一试验结果也为我们提供了调节辐照传感器灵敏度的新方法, 即: SOI BOX PMOS 不仅可以通过改变埋氧层的厚度, 也可通过沟道的宽长比来调节其测量灵敏度, 从而更好的平衡灵敏度与量程的关系。实际上后一种方式在 SOI BOX PMOS 的版图设计上就可以实现, 制作过程更简单快捷。

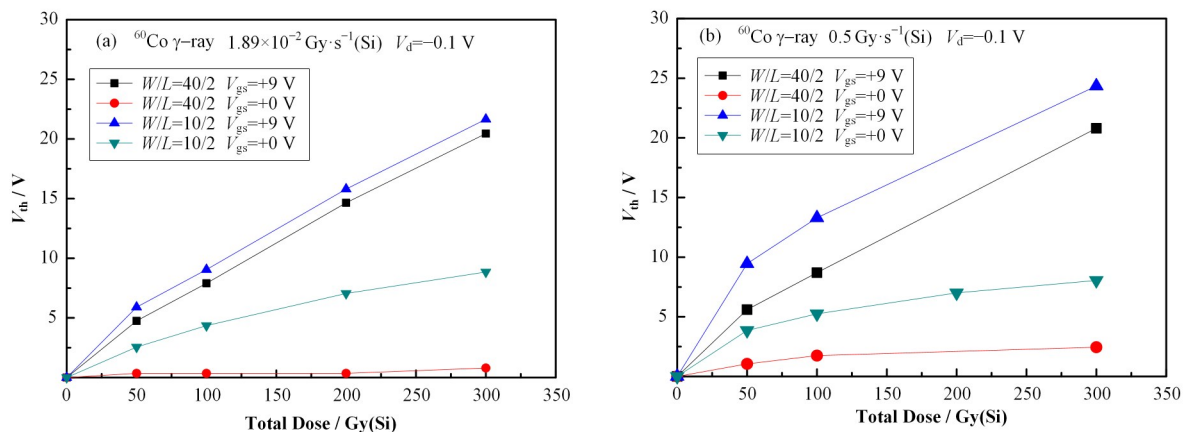


图3 SOI BOX MOSFET 器件在不同辐照偏置条件下背栅阈值电压漂移随总剂量的辐照响应变化曲线
(a) 辐照剂量率 $1.89 \times 10^{-2} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ (Si), (b) 辐照剂量率 $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ (Si)

Fig.3 SOI BOX MOSFET device under different irradiation bias conditions, the back gate threshold voltage shift with the total dose of radiation response curve

(a) Dose rate $1.89 \times 10^{-2} \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ (Si), (b) Dose rate $0.5 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ (Si)

3 讨论与分析

MOS 型器件的阈值漂移可表示为氧化物陷阱和界面态电荷引起阈值漂移之和:

$$\Delta V_{th} = \Delta V_{ot} + \Delta V_{it} \quad (1)$$

其中: ΔV_{ot} 和 ΔV_{it} 可由式(2)确定。

$$\Delta V_{ot, it} = \frac{-1}{C_{ox} t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} \rho_{ot, it}(x) \cdot x dx \quad (2)$$

式中: t_{ox} 为栅氧化物层厚度; C_{ox} 为栅氧化层的单位面积电容; $\rho_{ot, it}(x)$ 为由氧化物俘获空穴及界面态导致的栅氧内电荷分布。由式(2)可知正电荷可导致负的阈值电压漂移, 而负电荷则导致正的阈值电压漂移。

对于 SOI 器件, 栅氧化层和体硅器件的场氧化层的制造工艺是类似的, 主要区别在于 SOI 器件的 BOX 层。部分耗尽的 SOI 器件的背栅辐照产生的电子-空穴对将被埋氧层中的陷阱所捕获, 由于埋氧层较厚, 受辐照后将导致 SOI 器件背栅阈值电压极

大的负向漂移。埋氧层感生陷阱电荷的多少又与其制造工艺有关。就 SIMOX 工艺制造的埋氧层而言, 其制造过程中往往需要进行高温退火, 大量的氧原子被扩散出埋氧层, 遗留下一定数量的氧化层陷阱。此外 SIMOX 工艺在制造过程中需要进行氧注入, 离子注入将造成氧化层受到辐射后陷阱捕获电荷的增加。正是上述这些原因, 导致了 SOI BOX PMOS 晶体管的总剂量辐射的响应相对普通 PMOS 晶体管更为敏感, 这也是我们在试验结果中得出 SOI BOX PMOS 做为下一代高灵敏辐射剂量仪的传感器的巨大潜力结论背后的最根本物理原因。

通过对比图1和图2发现, 偏置电场对辐照响应的灵敏度有明显的调制作用。正偏置条件下, 器件的辐照响应灵敏度明显较高, 主要是由于正偏置电场作用下, 辐射产生的空穴被扫向硅-埋氧层界面, 界面附近被俘获的空穴增多, 导致背栅阈值电压负向漂移越大。而对于零偏置辐照条件下器件的辐照响应灵敏度明显降低, 主要是在没有加外场的作

用下,辐射产生的电子-空穴对能充分复合,此时阈值电压的漂移主要贡献是辐射感生的界面态电荷引起的。

图3试验结果表明:在零偏辐照条件下,辐照导致的窄沟 SOI BOX PMOS 阈值电压漂移大于宽沟器件,而正偏辐照条件下,辐照导致的窄沟器件阈值电压漂移与宽沟器件相当。产生这一现象的原因是:正偏辐照条件下,氧化物中的电场主要由外加偏压决定,而零偏辐照条件下,氧化物中电场主要受辐照引入氧化物陷阱电荷影响。在外加正向偏压的作用下,氧化物中存在强的指向 Si-SiO₂ 界面的电场,且该电场的强度与晶体管的宽长比无关,所以正向偏压条件下,辐照导致的窄沟晶体管阈值电压漂移与宽沟器件相当。在零偏置辐照下,辐照引入氧化物陷阱电荷产生一个指向栅界面的电场,该电场阻止空穴向 Si-SiO₂ 界面输运,受氧化物陷阱电荷内建电场影响,空穴被俘获的位置远离 Si-SiO₂ 界面,进而对阈值电压漂移的作用减小。氧化物陷阱电荷内建电场除了指向栅界面,还有与栅界面平行的分量(如图4所示),在该分量的作用下,BOX 中间区域的指向栅界面电场强度强于两侧,而沟道宽度越大,BOX 中间区域的范围越大,进而阻止空穴向 Si-SiO₂ 界面输运能力越强,所以宽沟器件阈值电压漂移小于窄沟道器件。当然,对于零偏下不同宽度 SOI BOX 内部电场分布及对辐射诱发感生电荷的漂移作用的解释相对有局限性,若要证实还需要做进一步试验提供更多数据支持。

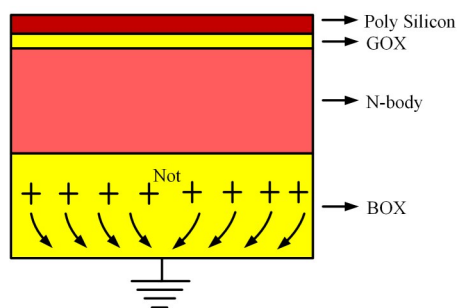


图4 零偏辐照条件下 SOI 器件 BOX 层中产生的陷阱电荷

Fig.4 Trapped charge in the BOX layer of a SOI device under zero bias irradiation

4 结语

本文对 SOI BOX PMOS 晶体管用于下一代辐射探测器必须首先解决的一些主要关键技术问题开展了研究。结果表明:正偏置辐照的器件对电荷的收集响应灵敏度明显高于零偏置辐照的器件;辐照剂量率对 SOI BOX PMOSFET 阈值电压的辐照响应灵敏度有影响,但影响程度有限;SOI BOX

PMOSFET 阈值电压的辐照变化几乎不受退火效应影响,有效的保持了收集电荷的精度;相比于宽沟道器件,窄沟道器件的阈值电压漂移更为明显,为我们调节辐照传感器灵敏度提供了新的方法。

上述结果,特别是通过 SOI BOX PMOSFET 结构设计来调节探测器灵敏度并平衡与量程关系等重要研究成果,对新型辐射剂量探测仪的研制具有重要的应用价值。

参考文献

- Holmes-Siedle A. The space charge dosimeter-general principles of a new method of radiation dosimetry[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1974, **121**: 169-179.
- Adams L, Holmes-Siedle A. The development of an MOS dosimetry unit for use in space[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1978, **25**(6): 1607-1612.
- Holmes-Siedle A, Adams L. RADFET: a review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1986, **28** (2): 235-244.
- Haran A, Jaksic A. The role of fixed and switching traps in long-term fading of implanted and unimplanted gate oxide RADFETs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2005, **52**(6): 2570-2577.
- Shaneyfelt M R, Hill T A, Gurrieri T M, et al. An embeddable SOI radiation sensor[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2009, **56**(6): 3372 - 3380. DOI: 10.1109/TNS.2009.2033474.
- Yau J B, Gordon M S, Rodbell K P, et al. FDSOI radiation dosimeters[C]. Proceedings of 2011 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications, 2011. DOI: 10.1109/VTSA. 2011. 5872260.
- 陈春林. 关于 PMOS 辐照传感器的模拟研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
CHEN Chunlin. Simulation and studying of PMOS radiation sensors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.
- 卓青青, 刘红侠, 杨兆年. 偏置条件对 SOI NMOS 器件总剂量辐照效应的影响[J]. 物理学报, 2012, **61**(22): 220702. DOI: 10.7498/aps.61.220702.
ZHUO Qingqing, LIU Hongxia, YANG Zhaonian, et al. The total dose irradiation effects of SOI NMOS devices under different bias conditions[J]. Acta Physica Sinica, 2012, **61**(22): 220702. DOI: 10.7498/aps.61.220702.
- 刘红侠, 王志, 卓青青, 等. 总剂量辐照下沟道长度对部分耗尽绝缘体上硅 p 型场效应晶体管电特性的影响[J].

物 理 学 报 , 2014, **63**(1): 016102. DOI: CNKI: SUN: WLXB.0.2014-01-036.
LIU Hongxia, WANG Zhi, ZHOU Qingqing, *et al.*
Influence of channel length on PD SOI PMOS devices
under total dose irradiation[J]. Acta Physica Sinica, 2014,

63(1): 016102. DOI: CNKI:SUN:WLXB.0.2014-01-036.

- 10 Schwank J R, Ferlet-Cavrois V, Shaneyfelt M R, *et al.*
Radiation effects in SOI technologies[J]. IEEE
Transactions on Nuclear Science, 2003, **50**(3): 522–538.
DOI: 10.1109/tns.2003.812930.