

文章编号: 2095-4980(2022)06-0557-08

PMOS 剂量计对 ^{60}Co 和 10 keV 光子的剂量响应差异

马 函^{1,2}, 何承发¹, 孙 静¹, 荀明珠^{1,2}

(1. 中国科学院 新疆理化技术研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

摘 要: 针对 P 型金属氧化物半导体(PMOS)剂量计对 ^{60}Co 和 10 keV 光子的剂量响应差异问题, 本文对 400 nm-PMOS 剂量计进行了不同栅压条件下 ^{60}Co γ 射线和 10 keV X 射线的对比辐照试验, 并通过中带电压法和电荷泵法分离氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷的影响, 发现 PMOS 对 10 keV 光子的响应明显低于 ^{60}Co γ 射线, 其中主要的差异来自氧化物陷阱电荷, 退火的差异表示不同射线辐照下的陷阱电荷竞争机制不同, 不同的分析方法也带来一定差异。通过使用剂量因子和电荷产额修正, 减小了剂量响应的差异, 同时对响应的微观物理机制进行了解释。通过有效剂量修正和电荷产额修正可以很大程度上减小不同能量的剂量响应差异, 为 PMOS 的低能光子辐照环境应用提供了参考。

关键词: P 型金属氧化物半导体(PMOS); 剂量响应; 陷阱电荷分离; 有效剂量

中图分类号: TN386.1; TL818

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021442

Difference of dose response of PMOS dosimeter to photons of ^{60}Co and 10 keV photons

MA Han^{1,2}, HE Chengfa¹, SUN Jing¹, XUN Mingzhu^{1,2}

(1.The Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Urumqi Xinjiang 830011, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to explore the problem of the difference of dose response of P-channel Metal Oxide Semiconductor(PMOS) dosimeter to photons of ^{60}Co and 10 keV photons, comparative irradiation tests of ^{60}Co Gamma ray and 10 keV X-ray on 400 nm-PMOS dosimeter with different gate voltages are carried out. The effect of oxide trap charge and interface state trap charge are separated by the mid gap technique and charge pumping method. It is found that the response of PMOS to 10 keV X-ray is significantly lower than that to ^{60}Co gamma rays. The main difference is from oxides-trap charge. The difference of annealing indicates that the trap charge competition mechanism is different between gamma and X-rays, and different analysis methods also bring some discrepancy. By using dose factor and charge yield correction, the difference of dose response is reduced, and the microphysical mechanism of the response is explained. The dose response difference between gamma and 10 keV X-rays can be greatly reduced by effective dose correction and charge yield correction, which provides reference for the application of PMOS in low energy photon radiation environment.

Keywords: P-channel Metal Oxide Semiconductor; dose response; trap charge separation; effective dose

P 型金属氧化物半导体(PMOS)剂量计是基于辐射导致 PMOS 场效应晶体管(Field Effect Transistor, FET)氧化层中累积陷阱电荷变化的一种剂量计, 最早由 Holmes-Siedle 提出^[1]。后续的研究针对其不同结构和工艺下的剂量响应^[2]、空间实测数据与地面对比^[3]、不同温度以及长时间下的稳定性^[4-5]、不同粒子的剂量响应^[6]等方面都有一定的探索。经过多年的发展, 由于其较好的线性度、体积小、使用便利等特点, PMOS 剂量计已广泛用于

收稿日期: 2021-12-30; 修回日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11975305)

*通信作者: 何承发 email:hecf@ms.xjb.ac.cn

空间科学、放射医学、核工业等各种场景^[2-8]。

PMOS 剂量计在使用前需要进行剂量刻度标定, 通常都采用 ^{60}Co γ 射线源来进行。但实际辐射环境中存在不同能量和种类的射线, 如空间中主要存在的电子和质子, 电子和质子的能谱分布也会对其电离过程产生影响。而对于晶圆级器件的辐照试验, 10 keV X 射线辐照也大量用于抗总剂量试验评估中^[9-10]。在低能光子辐射环境下, ^{60}Co γ 单一能量源的标定可能会使得剂量刻度存在误差。10 keV 光子与 ^{60}Co γ 标定的剂量响应差异这部分研究较少, 本文对 PMOS 剂量计进行了不同栅压条件下 ^{60}Co γ 射线和 X 射线的对比辐照试验, 并通过中带电压法和电荷泵法分离氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷的影响, 对响应的微观物理机制进行了分析, 讨论了 10 keV 光子剂量响应的修正方法, 为 PMOS 剂量计在复杂射线环境下的应用提供了参考。

1 试验过程及器件说明

试验器件为 Tyndall 公司 400 nm 栅氧厚度的 PMOS 剂量计, 栅宽长比为 $300\ \mu\text{m}/50\ \mu\text{m}$, 辐照灵敏区为栅氧介质。与普通 MOSFETs 结构相比, 此器件具有更厚的氧化层以及更大的有源区面积, 因此剂量响应表现出更高的灵敏线性。辐照器件根据栅压条件分为栅端接 0 V, 4 V, 12 V, 20 V, 32 V, 其余管脚接地。辐照总剂量为 20 krad (Si), 辐照分别在中国科学院新疆理化技术研究所的 ^{60}Co γ 辐照装置和 X 射线辐照装置上进行, 剂量场在辐照前通过 PTW-UNIDOSE 剂量计进行标定, 换算为等效 Si 吸收剂量, 剂量率为 $40.97\ \text{rad}(\text{Si})/\text{s}$ 。X 光的能谱范围由 SPEC 软件统计靶厚、窗厚、管电压等条件给出, X 射线辐照装置及其能谱数据如图 1 所示, ^{60}Co γ 射线的能量为 1.17 MeV 和 1.33 MeV。辐照结束后进行 168 h 高温退火, 以探究两种射线效应在退火上的差异。

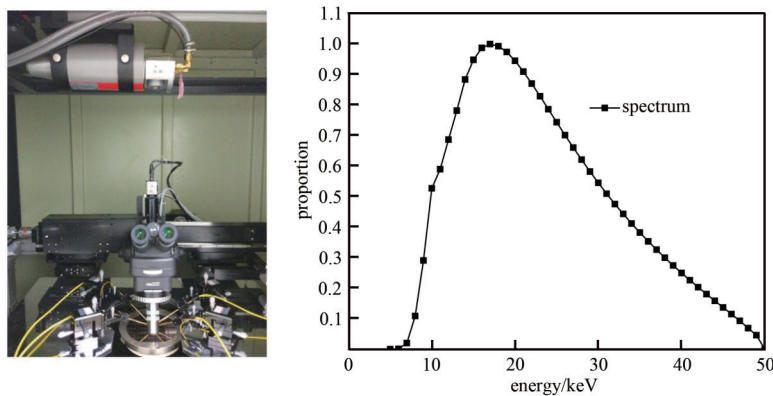


Fig.1 The X-ray irradiation facility and the spectrum of photon

图 1 X 射线辐照装置及能谱输出图

2 结果分析与讨论

2.1 阈值电压漂移量

试验在每个剂量点测试器件的转移特性曲线(I_d-U_g)和电荷泵曲线($I_{cp}-U_{base}$), 获得转移特性曲线后, 采用最大跨导法获取器件的阈值电压, 从而得到器件阈值电压漂移量(ΔU_{th})随累积辐照剂量变化的关系。 γ 和 X 射线的结果如图 2 所示。同时在表 1 中列出了达到 20 krad (Si) 时 X 射线与 γ 射线导致的 ΔU_{th} 比值。

表 1 20 krad (Si) 时 X 射线与 γ 射线导致的 ΔU_{th} 比值

Table1 The ΔU_{th} ratio at the dose of 20 krad (Si)

gate voltage/V	0	4	12	20	32
ΔU_{th} ratio	0.277 3	0.312 1	0.383 7	0.392 2	0.430 1

可以看出, 在此剂量范围内, ΔU_{th} 随累积剂量的变化保持了较好的线性关系, 这也是该器件可用作剂量计的原因。 γ 射线导致了更严重的阈值电压漂移, 在 0 V 时 X 射线的结果仅为 γ 射线的 27.7%。随着栅氧介质电场的增加, 阈值电压的漂移变得更为严重, γ 射线在 0.5 MV/cm 的电场下已经接近饱和, 其结果与 0.8 MV/cm 的结果差异不大, 而 X 射线还没有明显饱和的现象, 同时随着电场的升高, 可以看到二者之间的差异变小。辐射导致的阈值电压漂移通常被认为是辐射诱发的氧化物陷阱电荷和界面态陷阱电荷引起, 为了分析不同射线效应中的微观机制, 使用了中带电压法 (Mid Gap Technique, MGT) 和电荷泵法 (Charge Pumping, CP) 对两种电荷的影响进行了分离。

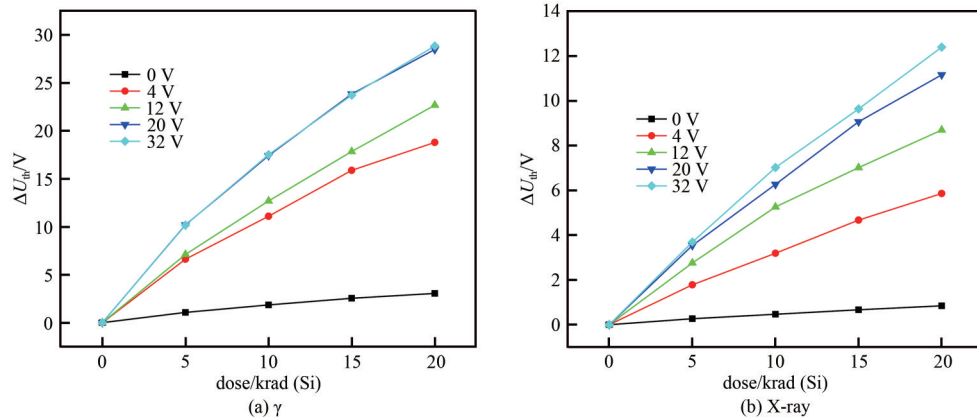


Fig.2 The ΔU_{th} of 400 nm-PMOS under different gates
图2 不同栅压下 400 nm-PMOS 的 ΔU_{th}

2.2 陷阱电荷分离

中带电压法是利用界面态陷阱电荷在价带中心呈电中性的原理^[11]，以中带电压的变化量为氧化物陷阱电荷导致的阈值电压变化量，由式(1)，(2)决定氧化物陷阱电荷密度变化(ΔN_{ot})和界面态陷阱电荷密度变化(ΔN_{it})。根据中带电压法，测得器件转移特性曲线后，在亚阈值区做线性拟合切线，在中带电流处获得中带电压 U_{mg} 。

$$\Delta U_{ot} = \Delta U_{mg}, \Delta N_{ot} = C_{ox} \Delta U_{ot} / q \tag{1}$$

$$\Delta N_{it} = (C_{ox} / q) \left| \Delta U_{it} \right| = (C_{ox} / q) \left| \Delta U_{th} - \Delta U_{mg} \right| \tag{2}$$

式中： ΔU_{mg} 表示中带电压的变化量； C_{ox} 表示栅氧介质的电容； q 表示单位电荷。MGT 分离的不同射线下的 ΔN_{ot} 和 ΔN_{it} 随累积剂量的变化分别如图 3 和图 4 所示。

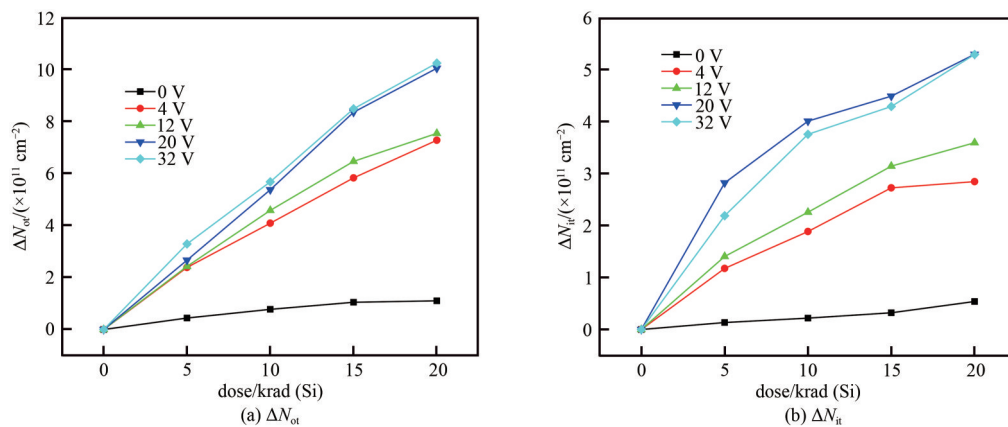


Fig.3 The character change under γ radiation by MGT ΔN_{ot} and ΔN_{it}
图3 中带电压法分离 γ 射线辐照下的 ΔN_{ot} 和 ΔN_{it}

中带电流的计算公式：

$$I_{ds} = \mu \left(\frac{W}{L} \right) \frac{\alpha C_{ox}}{2\beta^2} \left(\frac{N_i}{N_D} \right)^2 (1 - e^{-\beta U_{ds}}) e^{\beta \phi} (\beta \phi)^{-0.5} \tag{3}$$

式中： μ 为载流子迁移率； W/L 为器件宽长比； N_i 为本征载流子浓度； N_D 为沟道掺杂浓度； α, β 为常数； U_{ds} 为源漏电压； $\phi = \phi_B = \left(\frac{kT}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{N_D}{N_i} \right)$ 时的电流值即为中带电流值 I_{mg} 。

从中带电压法的分离结果可以看出，相对界面态陷阱电荷的变化，不同射线之间氧化物陷阱电荷的差异更大，且随着电压升高， ΔN_{ot} 都趋于饱和。在前人的研究中，E' 陷阱中心和极化子模型通常被用于解释氧化物陷阱电荷的形成^[12-13]。高能入射粒子在材料中产生电子空穴对 (electron hole pairs, e-h)，部分 e-h 会发生复合，逃出初始复合的电子在电场的作用下很快被扫除 SiO_2 ，而空穴的迁移率很低，在输运过程中可能被 E' 陷阱中心捕获形成氧化物陷阱电荷。

对于不同射线的差异,一般认为射线产生的e-h初始复合比例不同,高阻止本领(Stopping Power)射线产生的e-h更加密集,因此复合比例更高,最终被捕获得到的 N_{ot} 更少^[14]。而在施加电场后,e-h复合的势垒边界会受电场作用发生畸变,使得e-h更容易逃出初始复合,最终的 N_{ot} 更多^[15]。对于 N_{it} 的情况更加复杂,同时采用了电荷泵法来进行说明。

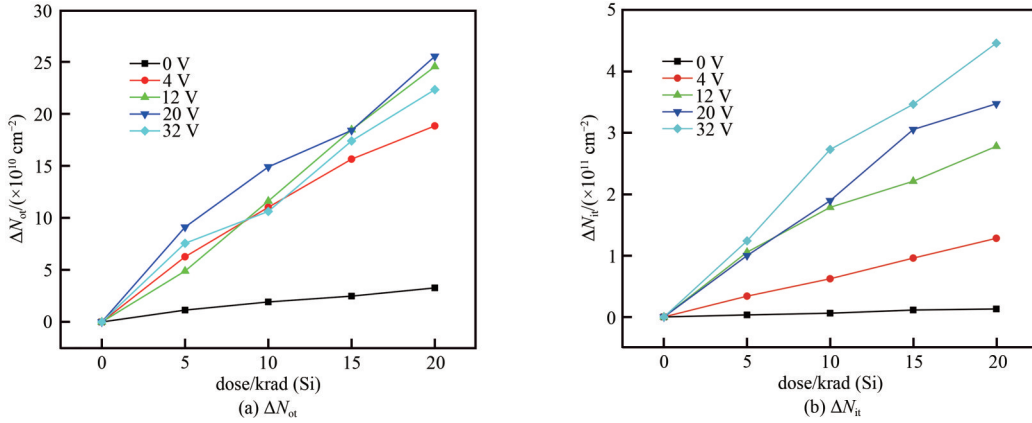


Fig.4 The character change under X-ray radiation by MGT ΔN_{ot} and ΔN_{it}

图4 中带电压法分离X射线辐照下的 ΔN_{ot} 和 ΔN_{it}

电荷泵法是通过在栅极施加一个电压脉冲扫描^[16],使沟道在积累和反型状态间不断转换,从而使漏源区的少数载流子在 SiO_2/Si 界面陷阱上与衬底的多数载流子反复复合,由此产生净的衬底电流,即电荷泵电流 I_{cp} 。通过分析扫描脉冲与电荷泵电流的关系,可以得到界面陷阱电荷的信息,本文采用的扫描方式为保持脉冲幅度恒定,改变脉冲基准使表面从积累区到反型区,脉冲幅度为5 V,扫描步长为-0.2 V,SD端电压为-0.1 V,扫描频率为1 MHz。 N_{it} 由式(4)决定:

$$N_{it} = \frac{I_{cp}}{fA_Gq} (\text{cm}^{-2}) \quad (4)$$

式中: I_{cp} 表示电荷泵电流; f 为扫描频率; A_G 为有效沟道面积; q 为单位电荷。分离结果如图5和图6所示。

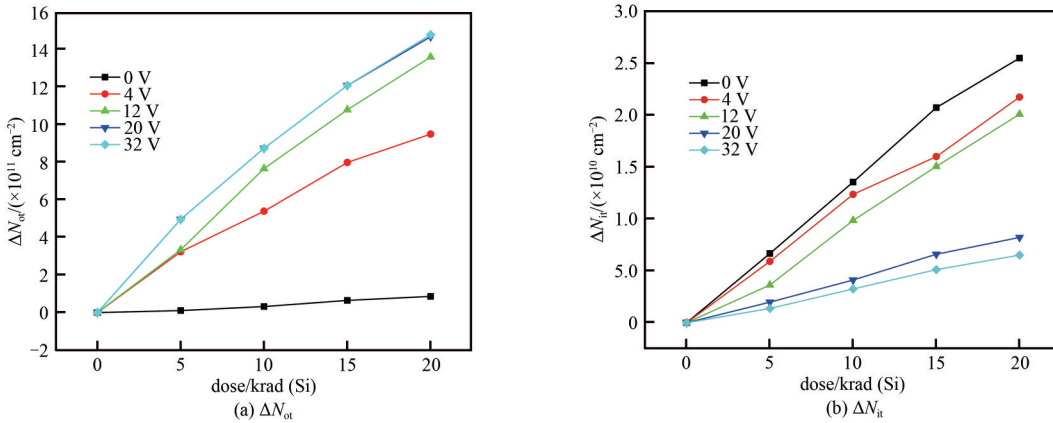


Fig.5 The character change under γ radiation by CP ΔN_{ot} and ΔN_{it}

图5 电荷泵法分离 γ 射线辐照下的 ΔN_{ot} 和 ΔN_{it}

在电荷泵分离的结果中, ΔN_{ot} 的变化基本与 ΔU_{th} 的曲线一致, ΔN_{it} 的影响很小。但 ΔN_{it} 仍然能反映出其中物理过程的变化, ΔN_{it} 的差异也随着栅压的增加而减小。氢运输模型通常被用于解释界面态陷阱电荷的产生^[17-18]。逃出初始复合的空穴会在势阱间跳跃实现运输,在这个过程中, SiO_2 中存在的氢会以 H^+ 的形式释放出来,同时在电场和温度的作用下发生漂移和扩散,在到达 SiO_2/Si 界面后,由于界面势垒的存在, H^+ 在界面处积累,发生横向运动,同时多种氢聚反应发生,不同反应之间相互竞争,被悬挂键捕获的 H^+ 将会形成界面态陷阱电荷。

在X射线的界面态分离结果中,观察到一种变化量反转的现象,这是由于界面态形成中氢反应的相互竞争导致的^[19]。在较低剂量时,偏压会增加到达界面处的 H^+ 使得 N_{it} 更多;随着剂量增加,施加偏压会加速界面处氢分子(H_2)的堆积,从而抑制 N_{it} 的生成。在 γ 射线的结果中应有同样的现象,不过 γ 射线的反转点更早,所以在剂量点设置中并没有观察到。

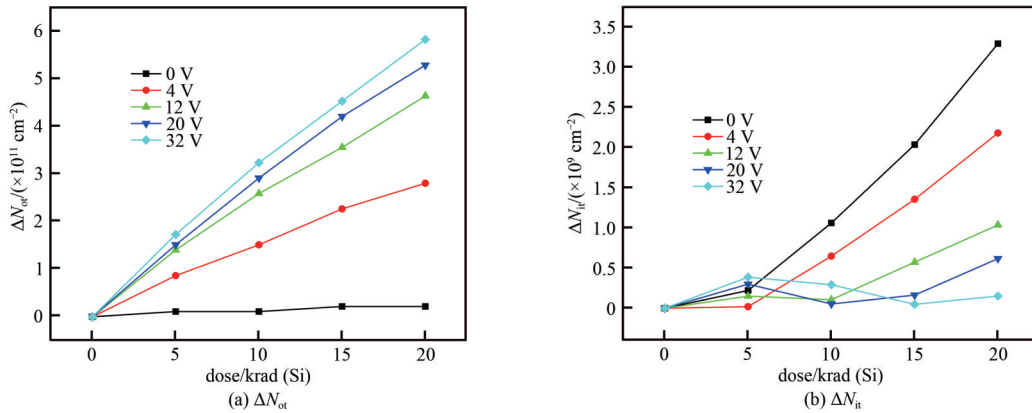


Fig.6 The character change under X-ray radiation by CP ΔN_{ot} and ΔN_{it}
图 6 电荷泵法分离 X 射线辐照下的 ΔN_{ot} 和 ΔN_{it}

CP 陷阱电荷分离结果与 MGT 的结果存在一定差异，G S Ristic 等研究者使用快转换态陷阱(fast switch trap, fst)和慢转换态陷阱(slow switch trap, sst)进行了解释^[20]。CP 分离的界面态只包含 fst，即真界面态陷阱电荷，而 MGT 分离的界面态包含了 fst 和 sst 两种陷阱。MGT 将一部分临近界面处的陷阱电荷(sst)也分离作为界面陷阱电荷，这是 CP 分离的 ΔN_{it} 明显小于 MGT 分离结果的原因。而两种方法差异的来源在于 sst 的影响，MGT 结果中未观察到 ΔN_{it} 变化量反转的现象，可以认为是 sst 的量大于 fst，从而覆盖了这一变化过程。

2.3 退火效应的差异

之前的研究主要针对辐照过程中陷阱电荷的产生^[9]，而辐照后氧化物陷阱电荷的退火和界面态的生长过程中的差异研究较少，这部分对于空间环境中长时间的辐射效应至关重要。界面陷阱电荷的形成过程比氧化物陷阱电荷相对缓慢，在辐照结束后会在相当长一段时间内不断产生，而高温会加速这个过程。在辐照后进行了 100 °C 的高温退火，并对比了射线差异退火前后的变化，图 7 为两种射线源效应的比值，比值越接近 1，则表示两者差异越小。

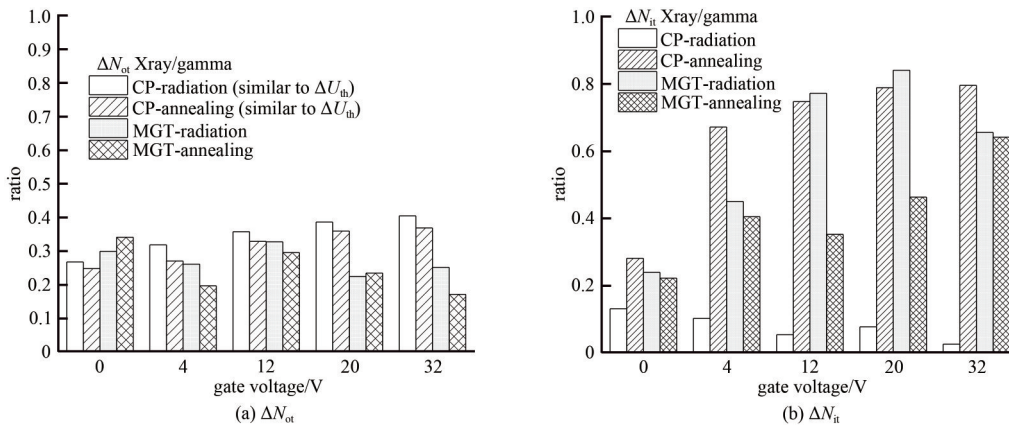


Fig.7 The change of character ratio X-ray/ γ before and after annealing
图 7 射线效应比值退火前后的变化

可以看到，在退火的过程中，二者氧化物陷阱电荷的差异变大，而界面态的差异变小，MGT 分离得到的界面态差异增大，这是由于 MGT 将一部分临近界面处的陷阱电荷分离为界面态陷阱电荷。由于器件受氧化态陷阱电荷的影响更多，因此，阈值电压的差异在退火后也变大了。之前的研究认为，X 射线和 γ 射线只是电离数量上的差异，而在陷阱电荷的过程并无差异。退火试验结果显示，二者在陷阱电荷产生与退火相互竞争的机制上存在差异。

在 Reber 等的研究中^[21]，使用热激发电流(Thermally Stimulated Current, TSC)方法测量了 SiO_2 材料层中陷阱电荷捕获空穴的能谱分布，这些捕获空穴将在不同的温度下释放。在高场的情况下，X 射线和 γ 射线的 TSC 分布基本一致，而同一射线不同偏压下 TSC 分布不同。即在同样条件下，X 射线与 γ 射线产生的辐射诱发电荷的能谱分布不同，因此在 100 °C 下释放的空穴比例不同，退火比例不同。在 D L Griscom 等的研究中^[22]，使用电子顺磁共振发现，X 射线导致的缺陷类型与高能 γ 光子存在差异。特别是氢相关的反应，高能光子辐照过程中，产生的辐

射分解氢更容易相互“连接”(ties up),因此原子氢相关的界面态产生会被阻碍,因此氧化态陷阱电荷和界面态陷阱电荷在退火后表现出差异。

3 有效剂量修正

两种射线的剂量响应差异主要集中在敏感区剂量沉积和电荷产额差异上,可以通过对剂量因子(Dose Factor, DF)和电荷产额比例(Fraction of Charge Yield, FY)进行修正^[23],即

$$\text{Correction}\left(\frac{X}{\gamma}\right) = \text{Measured}\left(\frac{X}{\gamma}\right) \times DF \times FY \quad (5)$$

3.1 敏感区剂量的修正

在辐照试验前,被测器件位置处的剂量率应该被确定。通常采用电离室或PIN剂量计等进行吸收剂量的测量,然后换算为器件敏感材料中的吸收剂量(Si/SiO₂)。在之前的研究中,通常采用质能吸收系数换算的方式^[9],如式(6)所示:

$$D_a = D_b \frac{(\mu_{en}/\rho)_a}{(\mu_{en}/\rho)_b} \quad (6)$$

式中: D_a 表示器件材料的平衡吸收剂量; D_b 表示剂量计测得的吸收剂量; μ_{en}/ρ 表示质能吸收系数。但这种换算方式对于位于一定材料深度的灵敏区来说可能会有一定误差,同时对于X射线的能谱分布换算也不太方便,采用Geant4(Geometry and Tracking 4)仿真工具包进行了X射线的水吸收剂量到Si/SiO₂吸收剂量的换算^[24]。仿真结构示意图如图8所示,X射线能谱输入通过General Particle Source实现,物理过程选择为包含低能电磁相互作用过程的G4EmStandardPhysics_option4,仿真粒子数目大于 1×10^8 以降低随机误差。仿真得到的剂量换算系数如表2所示。

3.2 电荷产额的修正

在对电荷产额的处理中,Dozier等最先对产额和氧化层电场的关系进行量化描述^[9],通过对大量试验数据的拟合,将极限产额定义为100%。给出的拟合如式(7)所示:

$$f(E) = \left(\frac{E_c + E}{E} \right)^{-m} \quad (7)$$

式中: E_c 为临界电场; E 为实际电场; m 为拟合值。

基于大量研究试验的拟合参数中,对 γ 射线, $E_c=0.65$ MV/cm, $m=0.9$; 对10 keV X射线, $E_c=1.35$ MV/cm, $m=0.9$ 。得到的电荷产额比值及阈值电压修正比值如表3所示:

表3 X/ γ 射线参数修正表
Table3 Correction of parameters of X/ γ rays

$E/(MV \cdot cm^{-1})$	0	0.1	0.3	0.5	0.8
FY (X-ray)	0.001 5	0.090 1	0.215 6	0.308 0	0.410 8
FY (γ)	0.002 9	0.163 1	0.354 4	0.472 5	0.585 5
rate	0.517 2	0.552 4	0.608 4	0.651 9	0.701 6
ΔU_{th} correction rate	1.045 4	0.973 9	1.087 0	1.036 9	1.056 5

通过使用剂量的修正和电荷产额的修正,可以看到辐照结束时的 ΔU_{th} 之间的差异减小了很多,修正后X/ γ 比值略大于1,这可能是由于使用的X射线源能谱峰值为16 keV,大于10 keV的拟合值。可以看到在微观机理上仍然存在一定差异,不同陷阱电荷的差异以及退火后的差异仍然比较明显,不同的陷阱电荷的分离方法上也表现出差异,这可能会导致在不同温度,不同剂量率等条件下对陷阱电荷之间的竞争反应存在一些差异,使得最终的剂量响应不一致。

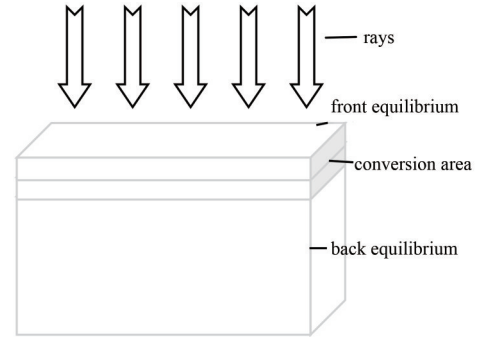


Fig.8 The simulation structure
图8 仿真结构示意图

表2 剂量换算系数表

Table2 The change factors of dose

materials	X-ray	1.25 MeV gamma
water	1	1
Si	6.917 22	0.902 5
SiO ₂	4.013 88	0.909 3

4 结论

本文进行了⁶⁰Co γ 射线和10 keV X射线在不同偏压下的PMOS剂量计辐照试验,发现 γ 射线导致的 ΔU_{th} 大于X射线,栅压介质存在电场时, ΔU_{th} 变大,两种射线的响应差异变小。采用中带电压法和电荷泵法对射线导致的陷阱电荷进行分析,可以看到主要的差异来自氧化物陷阱电荷,界面态的变化受温度、电场的影响很大,退火的差异表示不同射线辐照下的陷阱电荷竞争机制不同,不同的分析方法也带来一定差异。通过Geant4得到剂量换算因子,同时使用剂量因子和电荷产额的修正,将阈值电压漂移量之间的差异减小了很多,但陷阱电荷之间仍然存在一定差异。而对于实际的辐射环境应用PMOS剂量计时,可以结合粒子能谱或通量数据,对剂量数据进行修正。

参考文献:

- [1] HOLMES-SIEDLE A. The space-charge dosimeter: general principles of a new method of radiation detection[J]. Nuclear Instruments Methods, 1974,121(1):169-179. doi:10.1016/0029-554X(74)90153-0.
- [2] KRAMBERGER G, AMBROI K, GÜRER U, et al. Development of MOS-FET dosimeters for use in high radiation fields[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2020,978(6):164283. doi:10.1016/j.nima.2020.164283.
- [3] RAY K P, MULLEN E G, STAPOR W J, et al. CRRES dosimetry results and comparisons using the space radiation dosimeter and P-channel MOS dosimeters[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992,39(6):1846-1850. doi:10.1109/23.211376.
- [4] PEJOVIC M M, JAKSIC A B. Contribution of fixed oxide traps to sensitivity of pMOS dosimeters during gamma ray irradiation and annealing at room and elevated temperature[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2012(174):85-90. doi:10.1016/j.sna.2011.12.011.
- [5] ZIMIN P A, MROZOVSKAYA E V, CHUBUNOV P A, et al. Calibration and electric characterization of p-MNOS RADFETs at different dose rates and temperatures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019(940):307-312. doi:10.1016/j.nima.2019.05.099.
- [6] YILMAZ E, KAHRAMAN A, MCGARRIGLE A M, et al. Investigation of RadFET response to X-ray and electron beams[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2017(127):156-160. doi:10.1016/j.apradiso.2017.06.004.
- [7] ANDREW H S, ADAMS L. RADFET: a review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters[J]. International Journal of Radiation Applications & Instrumentation(part C) Radiation Physics & Chemistry, 1986,28(2):235-244. doi:10.1016/1359-0197(86)90134-7.
- [8] BENITO-PAREJO M, IBARMIA S, PORTILLO P. Review and comparison of irradiation response and annealing models for high-sensitivity RADFETs[C]// 2017 17th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems(RADECS). Geneva, Switzerland:[s.n.], 2017:1-8.
- [9] ASTM F1467-2011. Standard guide for use of an X-ray tester('10 keV photons) in ionizing radiation effects testing of semiconductor devices and microcircuits[S]. 2011.
- [10] REN Z, AN X, LI G, et al. TID response of bulk Si PMOS FinFETs: bias, fin width and orientation dependence[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2020,67(7):1320-1325. doi:10.1109/TNS.2020.2979905.
- [11] MCWHORTER P J, WINOKUR P S. Simple technique for separating the effects of interface traps and trapped oxide charge in metal oxide semiconductor transistors[J]. Applied Physics Letters, 1986,48(2):133-135. doi:10.1063/1.96974.
- [12] OLDHAM T R, MCLEAN F B. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2003,50(3):483. doi:10.1109/TNS.2003.812927.
- [13] SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, FLEETWOOD D M, et al. Radiation effects in MOS oxides[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2008,55(4):1833-1853. doi:10.1109/TNS.2008.2001040.
- [14] PAILLET P, SCHWANK J R, SHANEYFELT M R, et al. Comparison of charge yield in MOS devices for different radiation sources[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002,49(6):2656-2661. doi:10.1109/TNS.2002.805438.
- [15] JOHNSTON A H, SWIMM R T, THORBOURN D O, et al. Field dependence of charge yield in silicon dioxide[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014,61(6):2818-2825. doi:10.1109/tns.2014.2367512.
- [16] GROESENEKEN G, MAES H E, BELTRAN N, et al. A reliable approach to charge pumping measurement in MOS transistors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984(31):42-53. doi:10.1109/TED.1984.21472.
- [17] RASHKEEV S N, FLEETWOOD D M, SCHRIMPF R D, et al. Effects of hydrogen motion on interface trap formation and annealing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2004,51(6):3158-3165. doi:10.1109/TNS.2004.839202.
- [18] HUGHART D R, SCHRIMPF R D, FLEETWOOD D M, et al. The effects of proton-defect interactions on radiation-induced interface-

- trap formation and annealing[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2012,59(6):3087–3092. doi:10.1109/TNS.2012.2220982.
- [19] LI X, LU W, GUO Q, et al. Temperature-switching during irradiation as a test for ELDRS in linear bipolar devices[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018,66(1):199–206. doi:10.1109/TNS.2018.2879383.
- [20] RISTIC G S. Thermal and UV annealing of irradiated pMOS dosimetric transistors[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2009,42(13):135101. doi:10.1088/0022-3727/42/13/135101.
- [21] REBER R A, FLEETWOOD D M. Thermally stimulated current measurements of SiO₂ defect density and energy in irradiated metal oxide semiconductor capacitors[J]. Review of Scientific Instruments, 1992,63(12):5714–5725. doi:10.1063/1.1143354.
- [22] GRISCOM D L. ESR studies of damage processes in X-irradiated high purity a-SiO₂:OH and characterization of the formyl radical defect[J]. The Journal of Chemical Physics, 1983,78(4):1638. doi:10.1063/1.444962.
- [23] LAMBERT D, GAILLARDIN M, RAINE M, et al. TID effects induced by ARACOR, ⁶⁰Co and ORIATRON photon sources in MOS devices: impact of geometry and materials[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021,68(5):991–1001. doi:10.1109/TNS.2021.3074711.
- [24] ASAI M. Geant4-a simulation toolkit[J]. Transactions of the American Nuclear Society, 2006,95(12/16):757. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

作者简介:

马 函(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电子元器件辐射效应 .email:mahan195@mails.ucas.ac.cn.

何承发(1965-), 男, 研究员, 主要研究方向为辐射剂量学及其应用.

孙 静(1981-), 女, 研究员, 主要研究方向为辐射探测技术.

荀明珠(1990-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为光电材料与器件的辐射效应.

(上接第542页)

作者简介:

吕航航(1997-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性 .email:ymslh@stu.xidian.edu.cn.

曹艳荣(1980-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为VLSI器件可靠性研究、新材料器件及其可靠性研究、电子封装及其可靠性研究.

马毛旦(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

张龙涛(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

任 晨(1996-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

王志恒(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件可靠性.

吕 玲(1984-), 女, 副教授, 主要研究方向为宽禁带半导体器件工艺、宽禁带半导体材料表征及宽禁带半导体材料与器件辐照效应研究.

郑雪峰(1979-), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为宽禁带半导体材料与器件、半导体器件可靠性研究、半导体光电器件与探测器、新型半导体存储器件及芯片设计.

马晓华(1973-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为半导体器件及其可靠性、宽禁带半导体材料、器件及固态微波集成电路设计.