

PMOS剂量计的剂量率效应*

范 · 隆 · 任迪远 · 郭 · 旗 · 张国强 · 严荣良 · 陆 · 妩

摘要 · 在不同剂量率的 ^{60}Co γ 辐照下,研究了PMOS剂量计阈值电压的响应关系。借助快速I-V亚阈分析技术,获得了辐射感生界面态对剂量率效应的贡献。结果表明,辐照响应有较明显的剂量率效应,主要表现为响应的拟合关系式 $\Delta V_T = KD^n$ 中幂 n 的变化,在低剂量率区间内, n 值较大,对应于辐射响应高灵敏度范围;当剂量率增大时, n 值减小,响应灵敏度下降。讨论了克服剂量率效应影响其应用的办法。

关键词 · PMOS, 阈值响应, ^{60}Co γ 辐照, 剂量率

Dose rate effects of PMOS dosimeter

FAN Long · REN Diyuan · GUO Qi · ZHANG Guoqiang · YAN Rongliang · LU Wu
(Xinjiang Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

Abstract

· · Response of PMOS dosimeter to total dose has been studied under ionizing radiation with ^{60}Co γ -rays. The results showed that there was an obvious dependence of ΔV_T on dose rate. By means of I-V subthreshold curve measurement the contribution of irradiation induced interface state positive charge to the dose rate effects was found and the relationship of total threshold voltage shift ΔV_T and dose was KD_n . The power n decreased with increasing dose rate.

Key words · PMOS, Response of threshold, ^{60}Co γ -rays irradiation, Dose rate

· · 在对MOSFET的电离辐射效应研究中,与总剂量相关的阈电压响应的剂量率效应早已为人们所发现和研究^[1-3]。结果表明: MOSFET在不同剂量率下的辐照响应机制存在差别,造成了其阈值漂移程度的不同,因而表现出具有剂量率效应。辐射响应阈电压漂移的机制主要有以下4种: (1)辐射感生的氧化物正电荷形成(在毫秒至秒量级), (2)感生界面态的形成(从秒到年的量级上), (3)感生氧化物正电荷的退火(在秒至年的量级上), (4)界面态的热退火(发生在辐照后的长时期)。对PMOS而言,总的阈电压漂移是由辐射感生氧化物正电荷形成引起的部分漂移 ΔV_{not} 和感生界面态引起的漂移 ΔV_{nit} 之和,由于辐射感生氧化物正电荷和施主界面态均使阈电压产生负向漂移,所以,总的阈电压漂移为负向。对于一定的总辐照剂量,高剂量率辐照下,由于时间短,界面态的形成少,对阈电压漂移的贡献就少;而当剂量率逐渐减小时,辐射感生界面态将逐渐增多,对阈电压漂移的贡献也就越大,同时,还伴随着辐照感生氧化物正电荷和界面态的退火发生,呈现出多种物理过程相互作

用。因而,高低剂量率下表现出具有不同的辐照响应机制。

· · PMOS剂量计将会被使用在各种辐射环境下,其应用范围的广泛性使得它可能采用的标定剂量率与其应用的辐射环境剂量率相差较大。但由于具有剂量率效应,将会给其应用带来不便。了解和研究PMOSFET的剂量率效应,将对如何减少和消除给其应用带来的影响起到重要的指导作用。

· · 本工作在一个较宽的剂量率范围内考察了用于PMOS剂量计的厚栅氧层非加固PMOSFET的响应,取得了剂量率影响的结果,利用I-V亚阈分析技术分析不同剂量率影响阈电压漂移的内在机理。揭示了低剂量率效应PMOS剂量计的内在质量要求。

1 · 实验方法

· · 实验样品为非加固工艺,厚栅氧化层PMOSFET,栅氧化层厚度为200nm,器件宽长比为1500/12,栅氧化工艺为1000°C干氧+HCl。两只PMOSFET(其中一只带保护二极管)封装在8脚双列直插式集成电路管座内,封顶材料为柯伐合金。

· · 辐照源为新疆物理所5.18PBq⁶⁰Co γ源,分别采用6种剂量率3.96、0.31、0.06、0.02、0.01、0.01Gy(Si)/s进行了试验。所有辐照和测试在室温下进行。

· · 采用HP4140 · HP3488和IBM PC-XT组成的系统测试快速I-V亚阈曲线,受试器件辐照期间处于阈电压测试(V_T 偏置)条件下。具体在线测试如图1所示。为了尽量减少I-V测试对阈电压辐照响应的影响,试验中大部分时间保持PMOSFET处在阈电压测试状态下,每间隔一定时间进行一次快速I-V测试,每条I-V曲线测试约需10s,即使在如此短的时间内,也对阈电压的辐照响应有一定的影响,从下文所给出的不同剂量率辐照下阈电压响应关系曲线的短时间“衰退-反弹”即可看出。

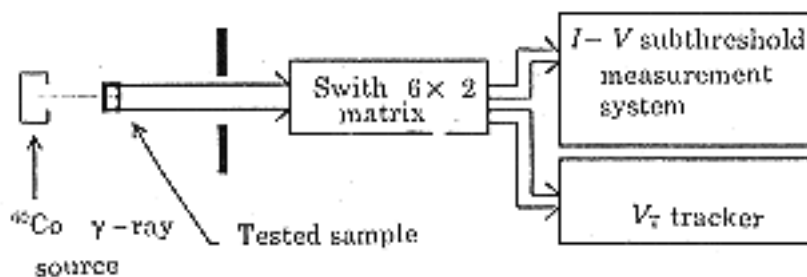


图1 · PMOSFET ⁶⁰Co γ 辐照在线测试系统框图

Fig.1 Scheme of on-line measuring PMOSFET irradiated with ⁶⁰Co γ-ray

· · I-V亚阈曲线的斜率变化能反应出辐射感生界面态的变化情况,从而获得感生界面态在不同剂量率响应中贡献的大小。文献[4]给出的结果有

$$\Delta V_{nit} = C_{ox} \Delta S \psi_B / K T \ln(10)$$

(1)

式中, C_{ox} 为栅氧层电容, ψ_B 为体势能,K为波尔兹曼常数,T为温度, ΔS 为I-V亚阈曲线斜率的

漂移。从式(1)可看出, ΔS 的大小直接反应出界面态对阈电压贡献的大小。

2 · 实验结果及分析

2.1 · $\Delta V_T \sim D$ 响应关系受剂量率的影响

图2示出了6种剂量率辐照下,其阈电压漂移的响应曲线。可以发现,响应明显受剂量率的影响,随剂量率的增大,曲线的响应灵敏度下降,曲线的初始部分的曲度也增大。在双线性坐标下呈现出剂量率增加,响应的线性度下降。文献[5]曾介绍过 V_T 辐照偏置,以0.89Gy/s的剂量率辐照,PMOS剂量计的辐射响应曲线可由幂函数关系 $\Delta V_T = KD_n$ 来拟合,并且 n 近似=2/3。我们对实验结果拟合后发现,拟合曲线与实验数据相当符合,在 ΔV_T 以mV为单位, D 以Gy为单位时,系数 K 均为2.80,但 n 随剂量率变化。辐照剂量率增大时 n 逐渐降低,正好表明幂函数响应曲线的初始曲度在增加。图3给出了 n 值随辐照剂量率的变化关系。

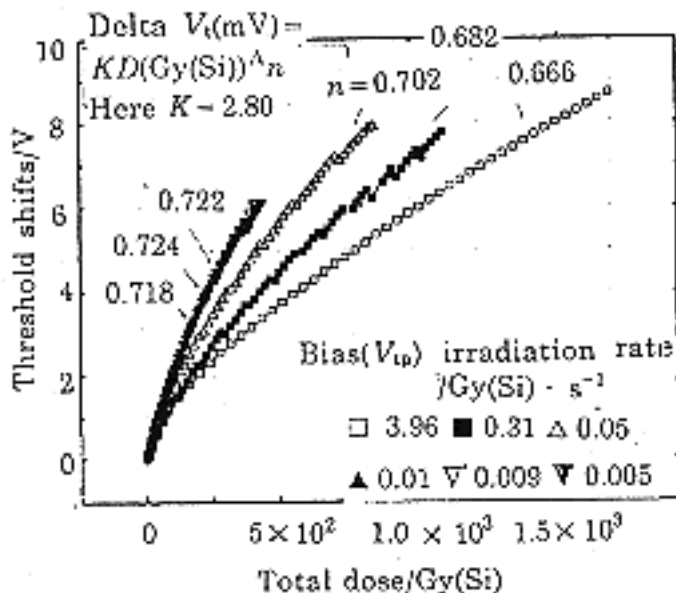


图2 · 不同剂量率下,PMOSFET阈电压漂移与总剂量的关系

Fig.2 Shifts in threshold voltage of PMOSFET vs total dose with ^{60}Co γ irradiation at various dose rate

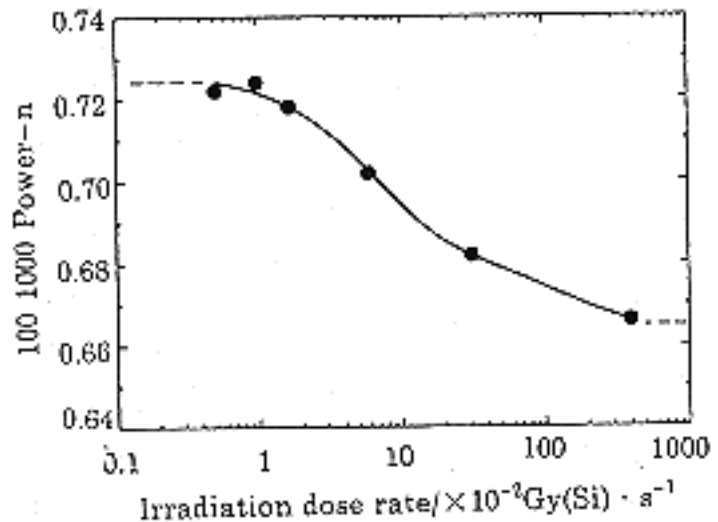


图3 · 剂量率对响应关系式中幂 n 的影响

Fig.3 Influence of dose rate on power n

2.2 · 剂量率对幂指数 n 的影响

图3给出了6种辐照剂量率下,响应曲线拟合表达式中幂指数 n 的变化。可以看到,剂量率增大, n 减小。在试验剂量率范围的高低两端, n 值变化显著趋缓。特别是在低剂量率方向,我们已明显看到 n 值达到最高的“饱和”值。

分析认为:当剂量率减小时,单位辐照剂量发生的时间间隔增大,产生氧化物正电荷-俘获空穴和感生施主界面态的时间随着增加,与此同时,造成辐射响应的4种机制(见引言引述)中后两种辐照损伤的退化过程却在 V_T 辐照偏置下受到抑制(具体抑制机理及实验验证将在下小节讨论),因此,损伤的退火不随时间增加而发生。由于辐射感生氧化物电荷的形成是瞬间过程,感生界态的形成是相对长期过程,所以,单位辐照剂量所产生的总损伤也由

于新增界面态的增加而增大,表现出随剂量率减小,响应灵敏度增大。即n值增大。当剂量率减小到一定程度时,单位辐照剂量感生的氧化物电荷和界面态完全形成,因而表现出响应灵敏度达到最大值,即n值达到“饱和”。当剂量率增大到一定程度时,单位辐照剂量作用的时间间隔太短,辐射感生界面态较少形成,仅辐射感生氧化物电荷对损伤有较大贡献,因而将会表现为辐照响应灵敏度趋于一稳定值。即n值趋于一最低值2/3。这一结果与文献[5]中的n值趋向一样,其结果也是在相对较高的剂量率下得到的,说明在高剂量率辐照下,响应关系式中幂 $n=2/3$ 是具有普遍性的。

2.3 · V_T 偏置对退火的抑制

为验证 V_T 偏置下,能使辐照中断后阈电压漂移的退火受到抑制,观察了4只试验样品结束辐照后,在 V_T 偏置下,经过30d室温退火的阈电压相对漂移表现。从图4看到在经历长期的室温退火过程中,阈电压的变化很小,变化量为结束辐照时刻阈漂移的 $\pm 3\%$ 范围内,这一实验结果还未除去由于实验电源的扰动所引入的 $\pm 1\%$ 误差。这说明试验采用的非加固工艺制作的PMOSFET, V_T 偏置下的确较少发生退火。

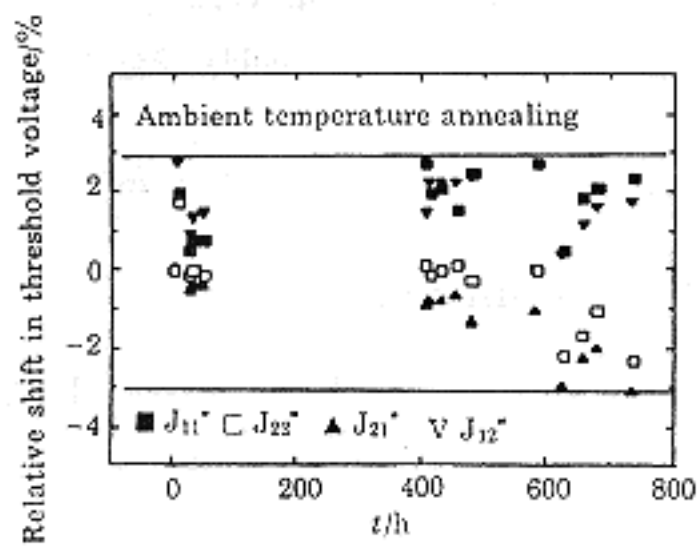


图4 · V_T 偏置下,阈电压在室温的长期退火表现

Fig.4 · f003 Long-time annealing of V_T at ambient temperature and biased V_T

· · 引用“遂道”电子退火模型^[3,6]分析认为,辐照结束后,氧化层中俘获的空穴很少被复合,主要原因在于试验器件一直保持 V_T 负偏置,使得室温下从硅衬底中穿过Si/SiO₂界面进入氧化层中与俘获空穴复合的“遂道”电子非常少。同时,受负偏置电场影响,辐照后界面态的建立受到抑制,界面态的热退火也由于在室温下很少发生,总体表现出很小的辐射损伤退化。阈电压的微小变化认为是由于绝缘层内电荷的“扰动”及慢界面态所造成^[7]。

2.4 · 辐射感生界面态受剂量率的影响

图5给出了在不同剂量率辐照下,I-V亚阈曲线斜率的变化 ΔS 随总剂量的变化关系。由于 ΔV_{nit} 正比于 ΔS ,因此,图5也表示 ΔV_{nit} 与D的关系。从图5可以看出,在低剂量率辐照

下, ΔV_{nit} 随剂量的增加而增加得较快, 从而表明单位辐照剂量所感生的界面态大; 随着辐照剂量率增大, ΔV_{nit} 却随剂量增加得较慢。说明此时单位辐照剂量所感生的界面态在减小。这一结果正好印证了第(1)小节中对辐射感生界面态随剂量率变化关系的推断。

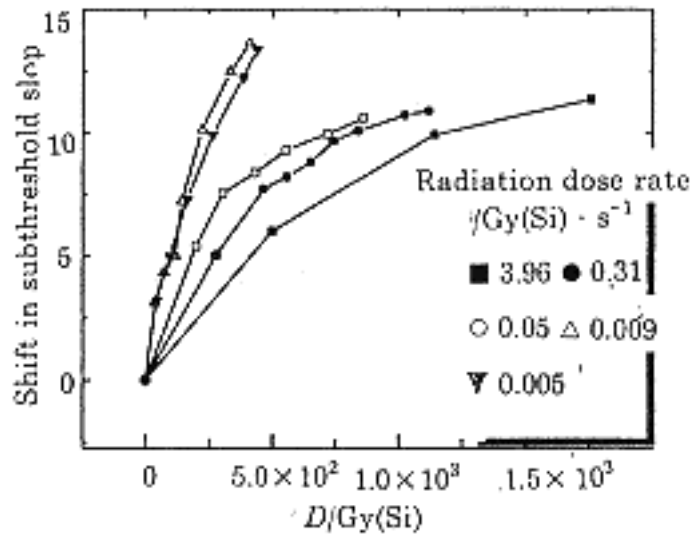


图5 · 不同剂量率辐照下I-V亚阈曲线斜率的漂移与总剂量关系

Fig.5 Shift in subthreshold slop versus total dose at various dose rates

· · 从图5还可发现,无论在高或低剂量率辐照条件下, ΔV_{nit} 随剂量增加的速率都表现出一定程度的下降,这与大量实验研究结果所报道的 ΔV_{nit} 和总剂量间的亚线性幂函数关系相一致,对其解释有多种模型^[3],在此不赘述。

3 · 结论

· · (1)不同剂量率辐照下,产生阈电压漂移的4种物理过程发生的程度差别是造成剂量率效应的根本原因。剂量率效应既与器件工艺条件有关(它决定了器件辐射敏感区中氧化物和界面缺陷的分布和多少),也与辐照时偏置状态有关(它决定了辐照敏感区的电场分布,进而影响产生阈电压漂移的4种物理过程的发生速度和程度)。因此,通过改进工艺条件和技术,选择适当的辐照偏置来抑制后3种与时间相关的慢损伤、退火过程发生,才是降低和消除剂量率效应的有效方法和措施。

· · (2)采用 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 双绝缘层技术制作的PMOSFET^[8],在负偏辐照模式下工作基本抑制了后3种慢损伤、退火过程的发生,达到了消除剂量率效应的目的。

· · (3)在核医学及核工业放射剂量监测领域的应用中,由于辐射场的剂量率相对稳定,可进行预先标定然后使用。对于空间应用的超低剂量率环境,由于无法预先现场标定,从本文中PMOSFET的剂量率效应来看:可在 V_T 辐照偏置下,采用小于或等于相对n值“饱和”的剂量率(约为0.01Gy(Si)/s)进行标定,即可表征空间低剂量率辐照下的响应关系。

* 中国科学院院长基金特别支持项目

作者单位：范·隆·任迪远·郭·旗·张国强·严荣良·陆·妩(中国科学院新疆物理研究所·乌鲁木齐·830011)

参考文献

- 1 Stassinopoulous E G, Brucker G J, Guntan O Van. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, NS-31(6):1444-1447
- 2 Azarewicz J L. IEEE Trans Nucl Sci, 1986, NS-33(6):1420-1424
- 3 Ma T P, Dressendorfer P V. Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits. New York: John wiley and Sons, 1989. 159-163, 218-223, 286-292
- 4 Schwank J R, Winokur P S, Mcwhorter P J, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, NS-31(6):1434-1438
- 5 August L S, Circle R R. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, NS-31(6):1113-1115
- 6 Manzini S, Modelli A. Tunneling discharge of trapped holes in silicon dioxide. In: Verweij J F, Wolters D R, ed. Insulating films on semiconductors, New York: North-Holland publs. 1983. 112
- 7 Holmes-Siedle A G, Adams L. IEEE Trans Nucl Sci, 1983, NS-30(6):4135-4140
- 8 Schwank J R, Roeske S B, Beutler D E, et al. IEEE Trans Nucl Sci, 1996, NS-43(6):2671-2678

收稿日期·1998-03-23,修回日期·1998-09-24