第 21 卷第 2 期　　半　导　体　学　报　　Vol. 21, No. 2
2000 年 2 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Feb., 2000

偏置对 PMOS 剂量计辐照响应的影响*

范　隆　张国强　严荣良　艾尔肯　任迪远

(中国科学院新疆物理研究所　乌鲁木齐　830011)

摘要　研究了不同偏置条件对 PMOS 探头样品辐照响应的影响. 在- 1~ 1MV/cm 的电场范围内,获得了偏置对 PMOS 剂量计辐照响应灵敏度和线性度的影响规律. 利用"空穴陷阱薄层(Hole Traps Sheet)"模型,结合辐射感生界面电荷的栅偏置电场相关性,分析了实验结果.

关键词: 剂量计, PMOS, 辐照响应
PACC: 7340Q;　　**EEACC**: 2560R
文章编号: 0253-4177(2000)02-0179-05

Influence of Irradiation Bias Field on Response of PMOS Dosimeters*

FAN Long, ZHANG Guo-qiang, YAN Rong-liang, Aerkin and REN Di-yuan

(*Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Science, Urumqi* 830011, *China*)

Received 14 October 1998, revised manuscript received 14 December 1998

Abstract　The influence of irradiation bias field on the response of PMOS dosimeter has been studied at a field ranging from - 1MV/cm to 1MV/cm. The model and law of sensitivity and linearity of response affected by irradiation bias field have been obtained. By means of the "Hole Traps thin sheet" model and the dependence of irradiation induced interface state on applied field, the experimental results are discussed. The obtained results are useful to PMOS dosimeter design.

Key Words: Dosimeter, PMOS, Irradiation
PACC: 7340Q;　　**EEACC**: 2560R
Article ID: 0253-4177(2000)02-0179-05

---

* 中国科学院院长基金特别支持项目[Special Project Supported by the Foundation for Director of Chinese Academy of Sciences].

范　隆　男, 1967 年出生, 助理研究员, 从事 MOS 辐射损伤效应和 PMOS 剂量计的研究.
张国强　男, 1963 年出生, 副研究员, 从事 MOS 新栅场介质抗电离辐射、热电子损伤效应和机理研究.

1998-10-14 收到, 1998-12-14 定稿

1 引言

PMOS 剂量计作为一种新型有源辐射剂量探测技术,由于其使用的方便快捷,非常小的功耗和广泛的应用范围,引起人们倍加关注,国内外对其研究正在不断地深入.作为剂量计探头的 PMOSFET,其辐照响应除受其本身特征参数,如栅氧化层厚度、氧化工艺的控制外,还受到辐照条件,如偏置电场的影响.有研究[1~3]发现,偏置电压是影响其辐射响应的重要因素,正偏置电压能获取更为敏感的响应;零偏和负偏置的响应灵敏度相对较低.但迄今为止,还没有对偏置影响模式和规律更为系统全面的研究报道.为此,本文开展了多种偏置条件(从- 1MV/cm 到 1MV/cm)下的响应研究,获得了辐照偏置的影响作用规律,并利用 MOS 损伤"空穴陷阱薄层"模型[4]和辐照感生界面态电荷的偏置影响规律,分析了实验结果,着重对偏置电场影响响应灵敏度和线性度的模式进行了讨论.研究结果对 PMOS 剂量计应用设计具有重要的指导意义和参考价值.

2 偏置电压影响模型

2.1 对氧化物电荷建立的影响

辐照栅偏置电压主要起着分离和加速迁移辐射感生电子和空穴的作用,与氧化物电荷的形成密切相关,它的大小直接影响着非复合感生电子-空穴对的相对产生额;它的极性影响着空穴收集区的大小.

借助图 1 所示 Freeman 和 Holmes-siedle[4]的"空穴陷阱薄层"模型,可计算出氧化物正电荷引起的阈电压漂移分量(ΔV_{not})与辐射总剂量(D)关系的理想数学形式为:

$$\Delta V_{not} = RAD \tag{1}$$

式中 $R = (-qg/\epsilon_0\epsilon_{ox})X_2X_cf(E)$

其中 $f(E)$是与电场密切相关的非复合空穴产生率;x_c 是"电荷收集区"厚度(对正偏电场为 x_2,对负偏电场为 x_1);A 是空穴在通过俘获层时的俘获几率,它主要是空穴陷阱密度和空穴俘获截面的函数;ϵ_0、ϵ_{ox} 分别是真空电容率和 SiO_2 电容率;g 是单位辐照剂量在单位体积内产生的电子-空穴对数量.

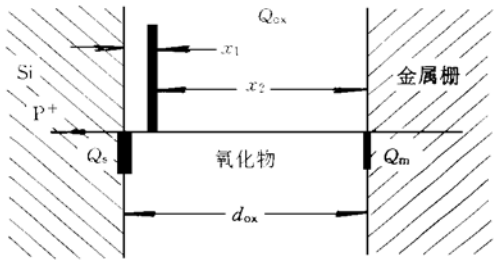

图 1 空穴陷阱电荷薄层模型示意图
在电离辐射下,空穴的俘获形成了 Q_{ox} 栅偏置电场方向决定了俘获空穴来自于 x_1 区或 x_2 区,Q_s 和 Q_m 分别为 Q_{ox} 在半导体和金属栅上所生产的电荷映射.

FIG. 1 Diagram of Hole Traps Thin Sheet Model

逃脱初始复合的电子-空穴对的相对产额 $gf(E)$ 与穿过空穴收集区(正偏置电压对应于 x_2 区,负偏置电压对应于 x_1 区,x_1 通常为 10nm 左右)的电场成正比.当电场高达一定水平后,$f(E)$ 逐渐达到饱和.随着辐射感生氧化物正电荷的建立,电荷收集区的电场也随之减小,$f(E)$ 将减小,同时,空穴俘获几率 A 也随着空穴陷阱的填充而有所降低,因而,会造成 ΔV_{not}-D 响应变得亚线性并逐渐饱和.

2.2 对感生界面态形成的影响

对于 PMOS 而言,由于其辐射感性阈电压漂移 ΔV_T 是氧化物正电荷和界面态正电荷引起漂移之和,$\Delta V_T = \Delta V_{not} + \Delta V_{nit}$,因此,必须考虑偏置电场对界面态形成的影响,才能从总体上理解偏置电场对阈电压漂移的作用规律.

由于界面态的产生机理较为复杂,不同工艺结构样品的结果也相差较大,本文不对偏置作用的机制进行讨论,仅从定性的角度给出偏置的作用规律.研究发现[5],界面态的产生有非常强的偏置依赖性,在正偏

置下,界面态随电场的增加逐渐增加,而继续增加电场时界面态先饱和再有所减少,在负偏置下,界面态随电场的增大而减小.

3　实验简介

实验样品为三种不同栅氧化层厚度的 PMOS 管,采用干氧+ 氯化氢、1000℃氧化工艺. 栅氧层厚度分别为: 100、150、200nm.

辐照源为本所 14 万居里 $Co^{60}\gamma$ 射线源,剂量率为 0.986rad(Si)/s. 通过精确地对辐照时间测量来确定每个试验点的辐照总剂量.

三种样品分别在多种偏置电压下进行了辐照响应测试,其中 V_T 辐照偏置是指 PMOSFET 辐照时保持源漏之间通过 20μA 恒定电流,即阈电压测量状态,此时的栅源偏置电压为 PMOSFET 的阈电压 V_T. 栅氧化层厚为 100、150 和 200nm 的样品分别在- 1~ 1MV/cm 和- 0.5~ + 0.5MV/cm 的偏置范围内进行了实验,通过对阈电压漂移的测量,得到阈电压漂移与辐照剂量的响应关系. 辐照和测量为实时在线方式,其中测试在从辐照偏置状态转换到阈电压测量状态后的 10s 内完成,这样与剂量计用 PMOS 探头具有同样的工作条件,结果具有可比性,同时也避免了由于离线测量引入的较大误差.

4　结果与讨论

4.1　偏置电压对响应灵敏度的影响

图 2 仅示出了栅氧厚 200nm 样品在不同偏置下的响应关系曲线. 其余两种样品的响应曲线具有相类似的特征. 可以看出: 正偏压下的响应灵敏度均高于负偏压,零偏的响应灵敏度明显最低.

对正偏压而言: PMOS 探头的响应灵敏度与偏置电压的大小成正比.

对负偏压而言,实验结果表现出复杂性,即随电场的增加,响应曲线并没有呈现出单调的增加或减小趋势. 但所有负偏下的响应比较接近,并远低于所实验的最小正偏下的响应灵敏度.

同时还看到,PMOS 的 ΔV_T-D 响应受其形成机理影响,都呈现出不同程度的亚线性特征,因此,实验得到响应关系的数学拟合通常采用 $\Delta V_T = kD^n$ 的形式. 响应灵敏度是与总剂量 D 相关的,随着剂量增加而有所减小. 因此我们根据实验结果的拟合关系计算出了 5×10^3、1×10^4、1.5×10^4rad(Si) 三个剂量下的响应灵敏度.

图 3 示出了偏置电场对上述三个剂量点响应灵敏度的影响. 三种栅氧厚度样品灵敏度的电场依赖关系示于图中. 可清楚地看到,随正偏置电场增加时灵敏度明显提高的趋势; 同时,随着正偏置电场的继续增加,灵敏度的增加也逐渐趋于饱和. 其中较薄栅氧的样品较早饱和.

根据本文第二节中偏置电场对氧化物电荷建立和界面态形成的影响作用. 可以得出,随着正偏置电场的增加,响应的灵敏度也将增大,电场进一步增加时,由于 $f(E)$ 和感生界面态将分别趋于饱和,从而导致响应灵敏度增加趋缓以致发生饱和现象. 从图 3 中可以看到实验结果与正偏置电场影响作用模型导出结果是一致的. 薄栅氧化层样品灵敏度较早饱和可能是由于其氧化物空穴陷阱密度较低的原因.

从(1)式看到,正负偏置条件下,ΔV_{not} 响应灵敏度的大小分别正比于 $x_2^2 f(E)$ 和 $x_1 x_2 f(E)$. 而负偏置电场下对应的空穴收集区宽度 x_1 远小于正偏置电场下的空穴收集区宽度 x_2,因此,这是造成同一试验样品正负偏置条件下的响应灵敏度相差很大的主要原因; 同时,也是偏置电场对灵敏度的影响程度差异较大的主要原因.

正偏置条件下,电场对响应灵敏度的影响较明显,并呈现出单调增加的规律性,而负偏置条件下,由于 x_1 很小,并且实际上,每片试验样品的 "空穴陷阱薄层"的准确位置并不是完全一致,它主要是由样品工艺造成的空穴陷阱浓度分布所决定的,即 x_1 有微小差别,譬如 0.01μm 与 0.015μm(对于 d_{ox}= 0.1μm 的样品)的差别,就可能反映在灵敏度上有 30% 的差异. 因此,负偏电场对响应灵敏度的影响会由于 x_1 有微小

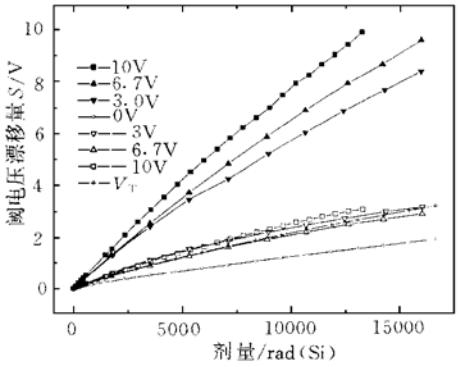

图 2 阈电压漂移的辐照响应对偏置电压的依赖性

FIG. 2 Dependence of Threshold Drift on Irradiation Dose under Different Biases

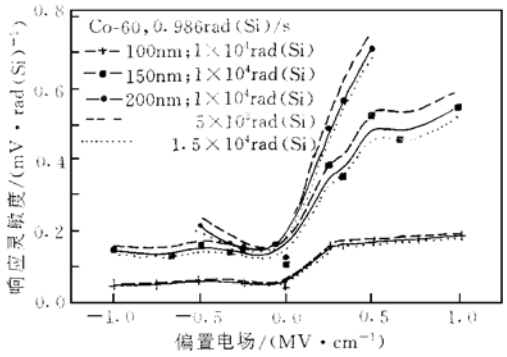

图 3 偏置电场对响应灵敏度的影响

FIG. 3 Dependence of Responce Sensitivity on Bias under Different Irradiation Dose

差异而被 "抵销"或 "淹没",同时,考虑到负偏电场下,辐射感生界面态电荷随电场增加而减小的变化趋势与氧化物电荷的变化趋势相反. 因此,不但从偏置电场影响模型中导不出单调的灵敏度-偏置电场作用关系,再加上由 x_1 微小差别的影响,就更使得负偏电场对响应灵敏度的影响规律体现不出来,这从实验获得的响应曲线上也反映出:灵敏度在负偏置电场下没有呈现出单调作用关系,并且,都很接近.

对于 V_T 偏置,由于其沟道一直处于弱反型条件下,因此,其辐照过程中加的是一个随阈电压变化的负偏置电压,因此,其响应灵敏度应介于固定负偏压下的灵敏度之间,图 2 中的实验结果也正是如此.

对零偏辐照响应灵敏度最低结果的解释为,由于没有外加电场,辐射产生的空穴和电子能很充分复合,阈电压漂移基本是由于辐射感生界面态电荷引起的. 而即使是较小的负偏置辐射,由于感生氧化物电荷参与对阈电压漂移的贡献,并且,这部分贡献补偿并大于因负偏置电场造成的感生界面态电荷形成较少对阈电压漂移的影响,因此,造成了零偏下的响应灵敏度相对最低的结果.

4.2 偏置电压对响应线性度的影响

根据对实验响应关系的数学拟合式: $\Delta V_T = kD^n$. 可得到 PMOS 的 ΔV_T-D 响应的线性度大小是由式中 n 值决定的,当式中 n 越接近 1,这表明响应的线性度越高,反之则越低.

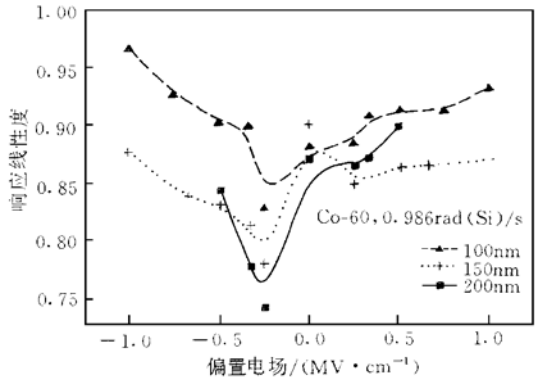

图 4 偏置电场对 PMOS 辐照响应线性度的影响

FIG. 4 Responce Linearity Versus Bias under Different Irradiation Doses

图 4 给出了电场对线性度 n 的影响. 三种栅氧化层厚度的样品所反映出的影响趋势大致相当,在有偏置电场的情况下,响应线性度随着电场的增加而增加;零偏下的线性度不但不是最低,而且还较高;表现出一定的特殊性.

实际上,响应线性度的高低不但与响应的饱和范围大小具有一致性,同时也与计算机拟合的实验数据总剂量范围有关,本文对实验数据的拟合范围均在 1.5×10^4rad(Si) 附近,因此,这一影响因素可忽略.

影响 ΔV_{not} 饱和有两种方式,一是由于所有可填充的空穴陷阱都被填充, ΔV_{not}(sat) 受空穴俘区陷阱密度 N_T 的影响;二是由于空穴电荷收

集区内电场的"消失"引起 $\Delta V_{not}(sat)$ 饱和,此处,$\Delta V_{not}(sat) = -V_1(x_2/x_1)$(对正偏置电场);$\Delta V_{not}(sat) = V_1$(对负偏置电场).因此,辐照偏置电压 V_1 的高低决定着响应饱和范围的大小,进而也影响着响应线性度的高低.对同种栅氧厚度的样品,偏置电场越高,响应的线性度也越高.图 4 所示结果基本符合这一变化趋势.其中数据点与此规律产生"歧离"现象的原因可能是感生界面态引起的漂移分量 ΔV_{nit} 对 D 的响应线性度的影响.

在零偏电场下,响应的线性度是由 ΔV_{not}-D 的线性度所决定的.有文献[3,6]报道:$n = 2/3$ 是界面态引起阈电压漂移的特征,但那是对高剂量范围、高剂量率辐照实验的结果(其辐照剂量率高达 89.7% 和 100rad(Si)/s).本文结果中 n 最小为 0.87,显示出较好的线性度.这与文献[7]报道的低剂量范围、低剂量率辐照、零偏下的响应线性度较好的实验结果一致,虽然文献[7]没有给出解释,但我们分析认为,这主要是由于实验采用的辐照剂量率都很低(本文为 0.986rad(Si)/s,文献[7]为 0.00028~ 0.028rad(Si)/s)的原因.

5　结论

辐照时的正偏置,能使 PMOS 剂量计获得最高的响应灵敏度,偏置电场对灵敏度的调制作用较明显,但随着电场的持续增加,灵敏度的增加亦将趋缓.

辐照时的负偏置,使得 PMOS 剂量计的灵敏度远低于正偏置条件,并稍高于零偏的响应灵敏度,偏置电场对灵敏度的调制作用不明显,并没有灵敏度-偏置电场的单调作用关系.V_T 辐照偏置的灵敏度介于固定负偏置条件下的灵敏度之间.

零偏置辐照的响应灵敏度最小.

较高的辐照偏置电场能使 PMOS 剂量计获得较线性的响应.零偏条件下的响应线性度主要受辐照剂量率的影响.

致谢　对中国科学院新疆物理所胡江生、吕晓龙同志在辐照实验中提供的帮助表示感谢.

参　考　文　献

[1] L. S. August, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1982, **29**(6): 2000.

[2] L. Adams, A. Holmes-siedle, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, **25**(6): 1607.

[3] L. S. August, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(1): 801.

[4] R. Freeman, A. Holmes-siedle, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1978, **25**(6): 1216.

[5] T. P. Ma, P. V. Dressendorfor, Ionizing Radiation Effect in MOS Devices and Circuit, 1989: 222.

[6] L. S. August, R. R. Circle, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, **31**(6): 1113.

[7] A. Holmes-siedle, L. Adams, S. Maroden *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, **32**(6): 4425.