

文章编号: 1007-4627(2002)03-0361-04

MOS 结构剂量探测器研究进展*

程 松, 刘伯学, 毛用泽

(防化研究院, 北京 102205)

摘 要: 介绍了 MOS 结构剂量探测器的基本测量原理, 回顾了国内外利用 MOS 结构作为剂量探测器的发展过程和研究现状, 分析了 MOS 结构剂量探测器的主要性能指标以及其在核辐射剂量监测和空间环境监测等领域的应用前景.

关键词: MOS 结构剂量探测器; MOS 场效应晶体管; 电离辐射; 吸收剂量

中图分类号: TN432; TN405.7 **文献标识码:** A

1 引言

金属氧化物半导体(MOS)结构剂量探测器是指利用 MOS 结构(包括 MOS 电容和 MOS 场效应晶体管两种类型)设计而成的, 主要用来测量 γ 辐射剂量的一种探测器. 该剂量探测器广泛用于核设施剂量测量、空间环境剂量监测等领域. 在较宽剂量量程内, 具有较高的灵敏度、信息读取简单、探测器体积小和使用方式灵活(无源或有源)等特点.

本文介绍了 MOS 结构剂量探测器的测量原理和研究现状, 分析了 MOS 结构剂量探测器的主要性能指标及其应用.

2 基本测量原理

与电学中 MOS 场效应晶体管比较, 该剂量探测器使用的 MOS 结构具有较厚的栅氧化层(μm 量

级), 该氧化层是剂量探测器灵敏区域, 如图 1(a)所示. 任何致电离辐射在这一灵敏体积内产生电子空穴对, 一部分电子空穴对很快地复合, 而另一部分电子空穴对逃脱复合. 根据电子和空穴迁移率的不同, 逃脱复合的电子能够快速移出栅氧化层, 空穴较缓慢地移向电势较低的区域, 即空穴移向 Si-SiO₂ 界面处的氧化层, 被此处的空穴俘获中心(由器件制造工艺引入)所俘获, 形成栅氧化层电荷 Q_{ox} , 见图 1(b), 表示为

$$Q_{\text{ox}} = e G t_{\text{ox}} P(E, E_{\text{ir}}) P_1 D, \quad (1)$$

其中 e 为电子电量, G 为栅氧化层内电子空穴对产生率, 其值为 $7.6 \times 10^4 / (\text{cm}^3 \cdot \text{Gy})$, t_{ox} 为栅氧化层厚度, $P(E, E_{\text{ir}})$ 为空穴逃脱复合的几率, 与致电离辐射种类、辐射能量 E 以及器件内电场 E_{ir} 有关,

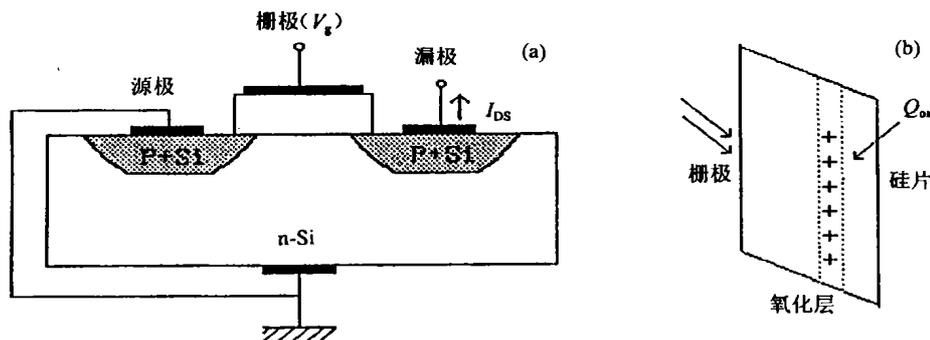


图 1 MOS 剂量探测器原理图
(a) 截面图, (b) 电荷产生过程.

收稿日期: 2001 - 09 - 14; 修改日期: 2001 - 12 - 18

作者简介: 程 松(1972-), 男(汉族), 江苏盐城人, 助理研究员, 博士研究生, 从事核辐射剂量探测技术研究.

P_i 为空穴被俘获中心俘获的几率, D 为栅氧化层内吸收剂量. 栅氧化层电荷 Q_{ox} 引起 MOS 电容平带电压 V_{FB} 的改变, 或者 MOS 管阈值电压 V_{th} 的改变. 通过测量这一改变量确定辐射剂量.

在 MOS 结构栅极上施加正向偏压, 则电场方向从金属指向半导体, Q_{ox} 存贮在 Si-SiO₂ 界面附近, 阈值电压变化量为

$$\Delta V_{th} = Q_{ox} \frac{t_{ox}}{\epsilon_0 \epsilon_{ox}}, \quad (2)$$

其中 ϵ_0 和 ϵ_{ox} 分别为真空介电常数和栅氧化层相对介电常数.

当电场非常小时, 还必须考虑其它几种机制, 诸如空穴扩散和空间电荷效应. 特别是辐照期间没有外加偏压的情况, 空穴逃脱复合的几率非常小^[1], 也无法确定电荷是否存贮在 Si-SiO₂ 界面附近. 剂量计灵敏度有所减小, 不能简单地用上述方程描述栅氧化层电荷 Q_{ox} 和阈值电压改变量 ΔV_{th} .

根据实验测试数据拟合的一些经验公式能够表示出辐照后氧化层俘获电荷形成的阈值电压改变量 ΔV_{th} 与栅氧化层厚度 t_{ox} 、剂量 D 的关系, 例如:

$$\text{零偏栅压 } \Delta V_{th} \cong 0.002 2D^{0.9} t_{ox}^2, \quad (3)$$

$$\text{正偏栅压 } \Delta V_{th} \cong 0.008 D t_{ox}^2. \quad (4)$$

辐照后的剂量探测器, 在低温条件下退火, 阈值电压 V_{th} 或平带电压 V_{FB} 可以恢复到辐照前的值, 可以重新使用探测器.

3 发展动态

20 世纪 70 年代, Holmes-Siedle^[2] 最先提出将 MOS 晶体管用作剂量探测器. 20 世纪 80 年代初, 美国、英国、法国、加拿大、南斯拉夫和澳大利亚等许多国家相继在 MOS 结构剂量探测器领域开展研究工作^[3-5].

MOS 结构剂量探测器的关键性能指标是辐射探测灵敏度. 对 MOS 管剂量探测器而言, 灵敏度是指剂量探测器接受单位吸收剂量的辐射后 MOS 管阈值电压改变量, 即 dV_{th}/dD . 在实验测量中, 阈值电压 V_{th} 定义为漏电流 $I_D = 10 \mu A$ 时栅极 G 和漏极 D 短路时的栅极电压 V_G . 而对 MOS 电容剂量探测器而言, 灵敏度是指单位吸收剂量 MOS 电容平带电压改变量, 即 dV_{FB}/dD .

对 MOS 结构剂量探测器来讲, 栅氧化层厚度是重要工艺参数, 直接影响辐射沉积到灵敏体积内的能量, 进一步影响剂量探测器的辐射探测灵敏度. 截止 20 世纪 80 年代末, 研制的 MOS 电容剂量探测器的栅氧化层最大厚度为 800 nm^[6], MOS 晶体管剂量探测器栅氧化层最大厚度为 900 nm^[7]. 后来, 英国 Ensell 等^[8] 分别研制了从 690 nm 到 2.30 μm 6 种不同的栅氧化层厚度、在零偏和正偏条件下的 pMOS 管剂量探测器, 测试了剂量特性. 20 世纪 90 年代, 乌克兰的 Rosenfeld 等和 Litovchen 等^[9] 分别研制了 $t_{ox} = 1 \mu m$ 的 nMOS 剂量探测器和 pMOS 剂量探测器. 他们和澳大利亚的 A. Rosenfeld 等人合作, 将 pMOS 管和宽基硅二极管做在同一探头上, 分别用来测量 γ -n 混合场中的 γ 辐射和中子辐射. 总体说来, 这种剂量探测器更多采用 pMOS 管.

对于 pMOS 剂量探测器, 衬底材料大多数采用电阻率为 5—10 $\Omega \cdot cm$ 的 n 型硅片, 晶向为 $\langle 100 \rangle$. 为将 pMOS 管与宽基硅二极管做在同一硅片上, Litovchen^[9] 等采用了电阻率为 1 k $\Omega \cdot cm$ 的高阻硅. 栅氧化工艺也有所不同, 主要采用高温 (1 000 $^{\circ}C$ —1 100 $^{\circ}C$) 干氧和湿氧环境下热生长氧化工艺. Ensell 等^[8] 还采用低压化学汽相淀积 (LPCVD), 在热生长氧化层上再淀积一层氧化层, 研究不同氧化工艺条件对器件特性的影响. 这是因为氧化工艺过程直接影响栅氧化层内空穴俘获中心浓度、空穴中心空间分布和能量分布等因素, 这些因素影响俘获的空穴电荷量, 进而影响 MOS 管的阈值电压改变量 ΔV_{th} . 研究还表明, 栅氧化层空穴俘获电荷是阈值电压改变量的主要因素, 而界面态电荷对阈值电压改变量的影响一般不超过 10%.

剂量探测器对工作温度的敏感性严重制约了灵敏度、测量精度和低剂量的测量. Kumurdjian 等^[10] 研究了剂量探测器温度补偿方法. 通过改变探测器的环境温度, 选择合适的电压工作点, 可将温度灵敏系数减小至 0.2 mV/ $^{\circ}C$. 在这一工作条件下, 探测器的测量精度可达 1 mGy 量级.

Kelleher 等^[11] 研究多个组合 pMOSFET 的方法, 可以大幅度提高剂量探测器的灵敏度. 他们将 3 个工艺参数相同 pMOSFET 组合封装在读数电路中, 结果表明整个探测器的灵敏度约 3 倍于相同工艺条件的单个 MOS 结构探测器. O'Connell 更加

系统地研究了这种方法,按类似的连接方式,数量为2—40个的pMOSFET做在同一芯片上,衬底掺杂浓度相同.在双对数坐标中,发现探测器灵敏度和管子个数的关系为直线关系.特别是40个组合MOS剂量探测器,灵敏度高达8 260 mV/Gy,约220倍于单管探测器灵敏度(36 mV/Gy).通过这一技术,使得MOS结构剂量探测器应用于测量低剂量的个人接受剂量.

MOS结构剂量探测器所测量的剂量有一个最大值限制,取决于器件工艺参数、辐照偏压和灵敏度等.一旦达到最大剂量后,通常需要更换探测器.Kelleher等^[12]研究了重复使用问题.探测器在150℃条件下退火100 h,阈值电压返回到辐照前的状态.经过第二次辐照后,探测器的灵敏度下降约20%,但仍可重复使用,延长了探测器的工作寿命.灵敏度的下降归因于正俘获电荷成分的减少.

其它方面的研究内容还包括:(1)研究探测器灵敏度与辐射剂量的相关性,确定线性响应的剂量范围;(2)研究塑料、陶瓷以及柯伐铁镍钴合金等不同封装工艺的剂量探测器能量响应特性,研制组织等效剂量探测器的封装材料和结构尺寸^[13];(3)灵敏度与剂量率的关系;(4)剂量读取的不稳定性.当剂量探测器从保持状态或辐照状态转换到测试状态时,Si-SiO₂界面电势的突然变化造成读取时刻的数据不稳定^[10];(5)研究辐照后的剂量探测器数据的衰减情况及其成因.

20世纪90年代初,中国科学院新疆物理研究所范隆等^[14,15]开始研制pMOS剂量探测器,该探测器栅氧化层厚度为0.1—0.2 μm.他们研究了不同偏压条件下,对PMOS剂量探测器的灵敏度、线性度的影响,并对此作了一定的理论解释.灵敏度的最大值约为80 mV/Gy.除了稳定的⁶⁰Co γ辐射源之外,辐射源还采用瞬态的X射线和电子束,用来模拟核爆炸环境下的探测器响应^[16].对于辐照后的器件,研究了不同温度、不同偏压条件对退火效果的影响.因此,我们国内对于MOS结构剂量探测器的研究是比较全面的.还有待研究其它厚度的栅氧化层pMOS剂量探测器,进一步提高探测器响应灵敏度和稳定性等.

4 主要辐射特性

对于不同结构尺寸、不同栅氧化工艺和封装工

艺,剂量探测器的性能指标也相差较大.要特别指出的是,对特定的剂量探测器,其灵敏度是相对固定值.我们根据不同的文献报道在下面给出每一个性能指标的通常范围.

(1)灵敏度 $\Delta V_{th}/D_T$ (36—300 mV/Gy)

在零偏栅压下,剂量达到10 Gy时,阈值电压变化量随剂量的变化近似线性关系,灵敏度较低;在正偏栅压下,阈值电压变化量随剂量的变化呈线性关系,具有很高的辐射灵敏度;施加栅压越大,栅氧化层内部电场越强,导致剂量探测器的灵敏度增大.

(2)测量剂量范围 (5×10^{-2} —50 Gy)

这是一个大剂量量程范围,高于个人年累积剂量的限值.表明未经特殊的温度补偿或多管组合的MOS结构剂量探测器不能用于个人辐射防护.

(3)剂量率范围 (0.1—500 Gy/h)

MOS结构剂量探测器适用于测量剂量率较高的辐射场中周围环境辐射剂量等.

(4)γ辐射能量响应范围 (21 keV—8 MeV)

该探测器可用于测量能量范围较宽的γ辐射.从低能keV量级的X射线辐射到中能和高能的γ辐射都有很好的能量响应特性.

(5)剂量探测器数据的衰减

经过辐照的剂量探测器,在其放置两个月后,阈值电压改变量为15%.然而,主要的改变发生在辐照后的一个小时内.剂量探测器数据的缓慢衰减主要是因为穿过势垒到达氧化层的电子通过隧道效应不断中和空穴俘获电荷所致.这一现象被称为“长期退火效应”.退火效应的程度与晶体管工艺过程、辐照剂量及氧化层电场等因素有关^[17].

(6)温度灵敏系数 (0.2—16 mV/℃).

5 典型应用

MOS结构剂量探测器具有突出的优点,它可以使用在下列几个场合:(1)测量反应堆中n-γ混合场中的γ辐射.将MOS结构剂量探测器和宽基硅二极管做在同一个高电阻率硅片上,分别测量γ辐射剂量和中子剂量,同时,该MOS结构剂量探测器具有很好的甄别中子的能力.(2)用于空间环境中的辐射剂量监测.MOS结构剂量探测器放置在卫星上,采用有源方式,所接受到的吸收剂量实时地传输到地面工作站,评估仪器仪表的危险程

度,保障运行人员安全。(3)MOS 结构剂量探测器可应用于个人 γ 辐射剂量。以无源方式工作,用作 γ 辐射积分剂量计,经过温度补偿处理,其灵敏度达 260 mV/Gy,探测剂量下限为 4 mGy。(4)应用

于医疗剂量监测。MOS 剂量探测器体积比较小,可以做成一种 MOS 结构矩阵探测器,作为医用治疗癌症患者的剂量监测。(5)核事故应急中测量灾难性的 γ 辐射剂量。

参 考 文 献:

- [1] Shaneyfelt, Fleetwood, Schwank, *et al.* Charge Yield for Cobalt-60 and 10 keV X-ray Irradiations of MOS Devices[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1991, 36(6): 1 187.
- [2] Holmes-Siedle. The Space Charge Dosimeter: General principles of radiation dosimetry[J]. Nucl Instr and Meth, 1974, 121, 169.
- [3] Kelleher, Sullivan, Ryan, *et al.* Development of the Radiation Sensitivity of MOS Dosimeters[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1992, 39(3): 342.
- [4] Sarra Bayrouse. MOS Radiation Dosimeter, Sensitivity and stability[C]. Proc 1st Eur Conf on Radiation and its Effects on Components and Systems (RADECS '91), France, 1991, 57.
- [5] Rosenfeld, Barabash, Khivrich, *et al.* Development of Semiconductor Sensors for Mixed Gamma-neutron Fields[J]. J Radi Prot Aust, 1994, 12, 156.
- [6] Boesch, Taylor. Charge and Interface State Generation in Field Oxides[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1984, 31(6): 1 273.
- [7] Holmes-Siedle, Adams. RADFET: A review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters[J]. Radi Phys Chem, 1986, 28(2): 235.
- [8] Ensell G, Holmes-Siedle, Adams. Thick Oxide pMOSFET Dosimeters for High Energy Radiation[J]. Nucl Instr and Meth, 1988, A269: 655.
- [9] Litovchenko, Barabash, Kuts, *et al.* P-Channel MOS Sensor for Measurement of Emergency Gamma and Neutron Radiation[J]. Radi Prot Dosi, 1996, 66(1-4): 225.
- [10] Kumurdjian, Sarra Bayrouse. Unbiased Metal Oxide Semiconductor Ionising Radiation Dosimeter[J]. Radi Prot Dosi, 1995, 61(1-3): 19.
- [11] Kelleher A, Lane, Adams. A Design Solution to Increasing the Sensitivity of pMOS Dosimeters, The stacked RADFET approach[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1995, 41(1): 48.
- [12] Kelleher A, McDonnell, Neill, *et al.* Investigation into the re-use of pMOS Dosimeters[J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1994, 41(3): 445.
- [13] Savic, Stankovic Kovacevic, *et al.* Energy Dependence of pMOS Dosimeters[J]. Radiat Prot Dosi, 1996, 64(3): 205.
- [14] 范 隆, 郭 旗, 任迪远等. pMOSFET 多管级联结构辐照响应特性研究[J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(6): 420.
- [15] 范 隆, 张国强, 严荣良等. 偏置对 pMOS 剂量计辐照响应的影响[J]. 半导体学报, 2000, 21(2): 179.
- [16] 范 隆, 靳 涛, 何承发等. pMOS 场效应管的 X 射线和低能强电子束的瞬态电离辐照效应[J]. 核技术, 1998, 21(9): 534.
- [17] Sarra Bayrouse, Bellaouar, Rossel. Derive Temporelles Post-irradiation dans les Dosimetres MOS[J]. Rev Phys Appl, 1986, 21: 131.

Progrors of Study on MOS Structure Dose Detector

CHENG Song, LIU Bo-xue, MAO Yong-ze

(Research Institute of Chemical Denfense, Beijing 102205, China)

Abstract: We present the principle of MOS structure dose detector, review the development and status in this area, and summarise the technique parameters of MOS structure detector, which is widely used in the regions of radiation dose measurement and space environment monitoring and so on.

Key words: MOS structure dose detector; MOS field effect transistor; ionisation radiation; absorbed dose