

PMOS 场效应晶体管脉冲 X 射线辐照效应

靳 涛

(中国科学院新疆理化技术研究所 乌鲁木齐 830011)

杨志安 杨祖慎

(新疆大学物理系 乌鲁木齐 830004)

姚育娟 罗伊虹

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 根据 P 沟道金属氧化物场效应晶体管 (PMOSFET) 在低能脉冲 X 射线辐照下的实验结果、结合 PMOSFET 实验样品的结构分析了阈值电压漂移产生的机理。

关键词 脉冲 X 射线, 场效应晶体管, 辐射效应

中图分类号 O472.1

目前, 采用不同栅厚和不同偏置的 P 沟道金属氧化物场效应晶体管 (PMOSFET) 已发展成为一种新型的辐射剂量计, 它在一般的辐射场中能较好地满足剂量测量的需要, 特别适用于空间辐射环境电离总剂量的测试^[1-3]。但在强脉冲辐射场中, PMOSFET 的辐射损伤及其能量响应特性尚未深入研究。该探测器是否可以作为强辐射环境中的辐射剂量计有待进一步实验探索。本工作根据 PMOSFET 阈值电压漂移与吸收剂量具有较好的响应关系的事实, 使用两种不同电路结构的 PMOSFET 在脉冲强 X 光辐射条件下, 进行了剂量测量和电离辐照效应的实验。分析了在强辐射场中 PMOSFET 的剂量响应特性和电离损伤机理。

1 实验方法和剂量计算

1.1 样品制备

本实验 PMOSFET 样品由骊山微电子有限公司制备。采用相同的非辐射加固氧化工艺制作, 栅氧厚度分别为 150 nm, 带栅保护二极管和不带栅保护二极管两种电路结构的 PMOSFET 共同封装在 8 脚双列直插式陶瓷管座内, 顶盖为科伐合金, 每片装有两个 PMOSFET。

1.2 辐照实验方法和条件

辐照实验在西北核技术研究所进行。强 X 光源为低能强流脉冲相对论电子束加速器 (闪光 2 号)^[4]。辐照时样品贴在加速器钨靶的有机玻璃隔离板上, 板厚度为 28.5 mm。PMOSFET 的辐照和阈值电压测量分步进行。阈值电压的测量采用 HEWLETT PACKARD4156A 精密半导体参数分析仪测量。辐照样品同时还用 4 个热释光 $\text{CaF}_2 \cdot \text{Mn}$ 剂量片紧密排布在 PMOSFET 样品四周, 辐照完后离线进行剂量测试。经过量热计刻度过的热释光剂量仪测量不确定度在 10% 之内^[5]。本实验 X 射线辐射场参数和热释光测量数据见表 1。

表 1 实验测量剂量参数

Table 1 Experimental parameters

管电压 Tube voltage	1 MV
辐射能 Radiation energy	16 kJ
脉冲宽度 Pulse width	80 ns
吸收剂量 (Si) Absorbed dose	0.69 Gy
吸收剂量率 (Si) Dose rate	$8.6 \times 10^6 \text{ Gy/s}$

1.3 样品芯片剂量分布的确定

确定脉冲 X 光在 PMOSFET 芯片 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 结构

国家自然科学基金项目 (批准号: 69866001) 资助

第一作者: 靳 涛, 男, 1948 年出生, 1982 年毕业于新疆大学物理系, 研究员, 国际辐射物理学会 (IRPS) 会员, 主要从事材料表面物理化学研究和探测仪器研制

收稿日期: 2003-02-17, 修回日期: 2003-10-28

中的剂量参数是比较困难的。本工作采用理论计算和实验测量相结合的方法确定本样品的吸收剂量分布。首先使用 XCOM 计算程序得到等效 0.5 MeV 的 X 光子在 Si 和 SiO₂ 中的质能吸收分布^[6]。然后从理论上算出 30° 入射光子在样品芯片氧化膜、界面过渡层和体硅中能量沉积的比例关系和有关的一些微剂量数据^[7]。最后根据理论计算出的数据比例和实验测定的 PMOSFET 吸收剂量, 推算出样品芯片的实际吸收剂量分布和微剂量数据 (表 2)。在表 2 中忽略了 PMOSFET 顶盖钎焊合金的吸收剂量与热释光剂量片 0.2 mm 厚铝掩盖层的吸收剂量的差别, 认为芯片的吸收剂量近似等于热释光剂量片的吸收剂量。

表 2 PMOSFET 样品 X 射线剂量数据

Table 2 Dose data of X-ray in PMOSFET

平均吸收剂量 (Si) Average dose	0.69 Gy
表面吸收剂量率 (Si) Surface dose rate	8.6×10^6 Gy/s
SiO ₂ -Si 界面处吸收剂量率 (Si) Interface dose rate of SiO ₂ -Si	8.7×10^6 Gy/s
平均传能线密度 Average LET	$0.345 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
有限平均传能线密度 Restricted average LET	$0.199 \text{ keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
初始电离平均自由程 Mean free path for primary ionization	283 nm
线初始电离 Linear primary ionization	$3.53 \mu\text{m}^{-1}$

2 实验结果与讨论

众所周知, 电离是低能 X 射线与物质相互作用产生的主要结果。0.5 MeV 的 X 射线入射到半导体材料, 先通过光电吸收和康普顿散射产生二次电子, 然后在材料中激发电离出非平衡载流子 (在导带中增加的电子和价带中增加的空穴)。同时也会造成少量的原子位移并在材料中产生辐照点缺陷损伤。其结果在 SiO₂-Si 结构材料中产生辐射感生氧化物电荷和感生界面态, 从而在宏观上改变了 MOS 器件的各种电性能参数。辐射感生的氧化物电荷和界面态电荷的存在, 将在半导体硅表面感生出电荷, 其作用是使 SiO₂-Si 界面电势变化, 引起阈值电压漂移。在 MOS 结构中的阈值电压漂移依赖于氧化层电容 (C_{ox})、辐射感生氧化物电荷 (ΔQ_{ox}) 和感生界面态电荷 [$\Delta Q_{\text{ss}}(E_{\text{fs}})$]。其漂移的大小遵循下列公式:

$$\Delta V_{\text{T}} = (1/C_{\text{ox}}) [\Delta Q_{\text{ox}} + \Delta Q_{\text{ss}}(E_{\text{fs}})] \quad (1)$$

其中 ΔQ_{ox} 引起的阈值电压漂移是固定不变的; 而来源于 $\Delta Q_{\text{ss}}(E_{\text{fs}})$ 的阈值电压漂移与 SiO₂-Si 界面电势

有关^[8]。对于本实验结果, 可以从 PMOSFET 样品产生阈值电压漂移 (ΔV_{T}) 的机理和 PMOSFET 结构的辐射敏感性两方面来解释。

2.1 辐射对器件阈值电压漂移的影响

图 1 为在室温下不带二极管保护电路的 PMOS 场效应管阈值电压漂移随辐照总剂量的变化曲线。从图 1 可见, 在总剂量较低的范围, 阈值电压漂移和剂量基本呈线性关系, 而且阈值电压漂移率较大。在本实验中, 由于辐照时 PMOSFET 没有加栅压, SiO₂ 层中无电场存在, 辐照所产生的电子一空穴对大多数都被复合, 只有少数空穴被本来就存在于氧化层和界面处的空穴陷阱俘获, 引起局部正电荷增加, 造成 PMOSFET 阈值电压绝对数值变化, 使阈值电压向负方向发生漂移, 且与辐射剂量基本成正比例。

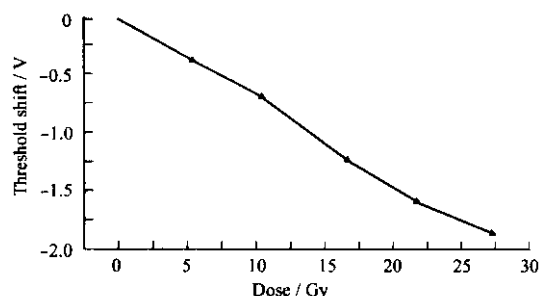


图 1 PMOSFET 被脉冲 X 射线辐照后的阈值电压漂移曲线

Fig.1 Threshold shift curve of the PMOSFET irradiated by pulse X-ray

关于阈值电压漂移率较大的问题, 我们认为这和 PMOSFET 的特性有关。PMOSFET 结构中存在着两处电离效应灵敏区, 即辐射总剂量效应灵敏区——SiO₂ 层和辐射剂量率效应灵敏区——界面附近的光电流收集区。本实验中辐射场的最大特征就是超强剂量率。相对于如此高的单脉冲剂量率, 每个脉冲的总剂量要比剂量率低数个量级, 这就使得对剂量率敏感的界面电势诱发的阈值电压漂移在公式 (1) 中的相对影响大增。再加上强脉冲辐照具有很高的电离密度 (根据表 2 计算为 2.88×10^{15} 电子空穴对/cm³), 其感生的瞬态界面态电荷在界面电势瞬态变化时, 由于界面态来不及响应, 有可能作为某种固定的电荷态存在。这就更增加了界面电荷在阈值电压漂移中的主导地位。从剂量学的角度看也是这样: 样品 SiO₂-Si 界面处吸收剂量率要大于样品 SiO₂-Si 表面处吸收剂量率 (见表 2)。

辐照引起的阈值电压漂移是由在界面附近的氧化物陷阱电荷和 Si/SiO₂ 界面陷阱电荷两部分引起的, 对 PMOSFET 来讲, 这两部分电荷引起的阈值

电压漂移均为负向。而对 NMOSFET 来讲,前者引起负漂,后者引起正漂,相抵消后仍然为负漂。所以 PMOSFET 辐照引起的阈值电压负漂幅度就相对要大一些。人们正是利用 PMOSFET 阈值电压漂移对辐照剂量的灵敏度高这一特性,制作成在低剂量测量中使用的 PMOSFET 辐照剂量计。

2.2 辐照后退火过程对阈值电压漂移的影响

在辐照结束后,对所有器件都进行了 250°C 的高温无栅压退火。有关研究表明,在栅氧化层内,空穴陷阱俘获空穴的能力比电子陷阱俘获电子的能力高一个多数量级。因此,在辐照后高温退火条件下,电子陷阱比空穴陷阱更容易释放电子。在栅偏值为零的条件下,电子陷阱在释放电子的同时,还可能继续俘获电子。因此,在栅氧化层内,辐照感生正电荷和负电荷的退火速率差异表现不明显,氧化物陷阱引起的阈值电压漂移主要由 Si/SiO₂ 界面氧化电荷退火特性决定。

图 2 为带二极管保护电路的 PMOSFET 在不同剂量辐照后退火过程中阈值电压的变化。从图 2 中可以看出,不同剂量的样品的退火曲线有所差异。在退火初期三种剂量辐照样品的阈值电压漂移随时间增加而正向回漂。在退火 2×10^3 s 后,两个较高剂量样品阈值电压继续回漂;而小剂量样品的阈值电压回漂出现暂时的抑制,直到退火 2×10^4 s 以后,才像其他两个样品那样继续正向回漂。

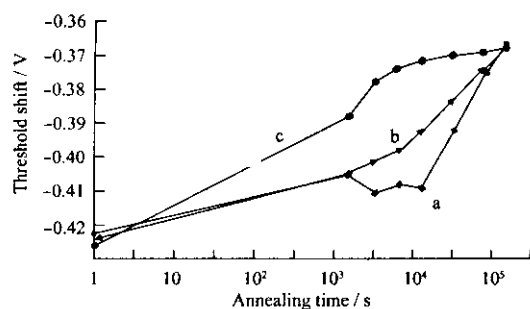


图 2 不同剂量瞬态 X 射线辐照的 PMOSFET 阈值电压恒温 (250°C) 退火效应

Fig.2 Annealing effects of PMOSFET irradiated by pulse X-ray with different absorbed doses under 250°C

初步分析认为,由氧化物陷阱电荷引起的这部分阈值电压漂移,在退火过程中始终不断地回漂,直到辐照前初始值附近。随着退火过程的开始,从氧化层中不断有电子向界面移动,与氧化物陷阱正电荷相复合。随着时间增加,因辐射产生并积累的氧化物陷阱电荷便逐渐减少,这部分阈值电压值不断回漂。而由界面陷阱电荷引起的那部分阈值电压漂移,

在刚开始退火时仍然继续有不同程度的负向漂移。这是由于在常温辐照结束时界面处界面态的建立还未达到饱和,在退火过程中界面态还在继续建立,界面态的退火滞后于氧化物电荷的退火。器件总的阈值电压随退火时间的漂移曲线是由这两部分阈值电压漂移相互作用的结果。小剂量样品退火出现的回漂抑制平台说明氧化物陷阱电荷的减少量与继续建立的界面陷阱电荷增加量相持平。由此可见,在退火初期阈值电压虽然表现正向回漂,但实际上界面态密度仍有相当程度的增加,只是增加的部分被 Si/SiO₂ 界面氧化电荷的退火所抵消并超过。随着退火时间的进一步增加,界面态密度趋于饱和,阈值电压回漂率加快,最终向辐照前的阈值电压值靠近。

带二极管保护和不带二极管保护的 PMOSFET 样品在接受相同剂量辐照后的退火曲线如图 3 所示。两个样品在退火过程中阈值电压的回漂基本一致。说明加有二极管保护的 PMOSFET 在退火过程中不受二极管保护电路的影响。

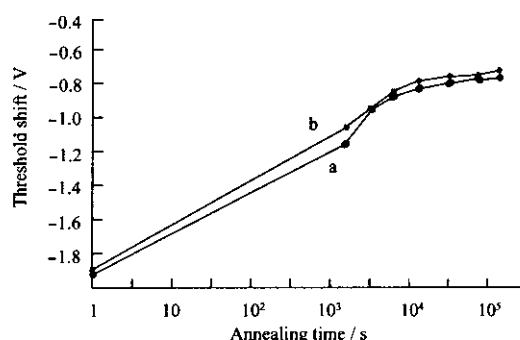


图 3 不同电路结构 PMOSFET 样品被瞬态 X 射线辐照后的恒温 (250°C) 退火曲线 (a: 带二极管保护电路, b: 不带二极管保护电路)

Fig.3 Annealing curves of different PMOSFET irradiated by pulse X-ray under 250°C (a: with a guarded diode circuit; b: without guarded diode circuit)

致谢 作者感谢西北核技术研究所三室加速器组在辐照实验中所给予的帮助。

参考文献

- 1 Dennehy W J, Holmes-Siedle A G, Leopold W F. IEEE Trans Nucl Sci 1969, NS-16: 114—118
- 2 Blamires N G, Hotterdell D H J. IEEE Tran Nucl Sci 1986, NS-33(6): 1310—1315
- 3 范隆, 严荣良, 靳涛, 等. 核技术, 1997, 20(10): 606—610
FAN Long, YAN Rongliang, JIN Tao, et al. Nucl Tech, 1997, 20(10): 606—610

- 4 邱爱慈, 张永长, 沈志康, 等. 低能强流脉冲相对论电子束加速器(闪光二号)鉴定会资料, 西安: 西北核技术研究所, 1993. 36—47 西北核技术研究所, 西安(1993)
- QIU Aici, ZHANG Yongchang, SHEN Zhikang, *et al.* Material of Appraising on Low Energy Pulse Accelerator of Relativistic Electron Beam (No.2 Light Flash), Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Techniques. 1993. 36—47
- 5 何承发, 靳涛, 范隆. 抗核加固, 1999, **16**(1):112—114
- HE Chengfa, JIN Tao, FAN Long, *et al.* Radiation Hardening, 1999, **16**(1):112—114
- 6 Berger M J, Hubbell J H. XCOM, NBSIR 87-359, Gaithersburg, 1987
- 7 Watt D E. University Report: BIOPHYS/10/89. St. Andrews, UK. 1989
- 8 曹建中. 半导体材料的辐射效应, 北京: 科学出版社, 1993. 123—125
- CAO Jianzhong. Radiation Effects of Semiconductor. Beijing: Science Press. 1993. 123—125

Radiation effects of PMOSFET irradiated by pulse X-ray

JIN Tao

(Xinjiang Technical Institute of Physics and Chemistry, the Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

YANG Zhi'an YANG Zushen

(Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046)

YAO Yujuan LUO Yihong

(Northwest Nuclear Technology Research Institute, Xi'an 710024)

Abstract The PMOSFET was irradiated by low energy pulse X-rays and its threshold voltage was continuously measured. Based on the experimental results and the structure of PMOSFET, mechanism of the threshold shift was discussed.

Key words Pulse X-ray, PMOSFET, Radiation effects

CLC O472.1