

文章编号: 1001-4322(2002)02-0302-05

强脉冲 X 射线辐照 Si-SiO₂ 界面对 C-V 和 I-V 特性曲线的影响*

杨志安¹, 靳涛², 杨祖慎³, 姚育娟⁴, 罗尹虹⁴, 戴慧莹⁵

(1. 济南大学 理学院, 山东 济南 250022; 2. 中国科学院 新疆物理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 新疆大学 物理系, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 西北核技术所, 陕西 西安 710024;
5. 空军工程大学 电信通信学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 利用强脉冲 X 射线对 Si-SiO₂ 界面进行了辐照, 测量了 C-V 曲线和 I-V 曲线。实验发现, 经过强脉冲 X 射线对 Si-SiO₂ 界面进行的辐照, 使 C-V 曲线产生了正向漂移, 这一点与低剂量率辐照结果不同; 辐射后, 感生 I-V 曲线产生畸变; 特别地, 从 I-V 曲线上还反映出强脉冲 X 射线辐照的总剂量效应造成电特性参数明显退化, 最后甚至失效。讨论了强脉冲 X 射线辐照对 Si-SiO₂ 界面产生损伤的机理, 并对实验结果进行了解释。

关键词: X 射线; Si-SiO₂ 界面; 辐射损伤

中图分类号: O434.1 **文献标识码:** A

半导体材料、器件和微电路, 特别是 MOS 器件电路的电离辐射损伤效应、机理和加固, 是目前国内外抗辐射电子学和微电子技术发展中的重要课题之一。半导体 Si-SiO₂ 界面在一般辐射场中的辐射损伤效应、机理和加固方面的研究, 已有很多进展^[1,2]。在强脉冲辐射场中, Si-SiO₂ 界面的辐射损伤效应及机理方面, 尚未深入研究。本工作利用强脉冲 X 射线对 Si-SiO₂ 界面进行了辐照, 测量了辐照前后的 C-V 曲线和 I-V 曲线。发现强脉冲 X 射线对 C-V 曲线的影响与低剂量率辐照产生的损伤不同之处, 在于可使高频 C-V 曲线产生正向漂移; 强脉冲 X 射线对 I-V 曲线的总剂量效应是使其电特性参数明显退化。文中分析了产生这些损伤的机理, 并对实验结果进行了解释。

1 实验条件和结果

1.1 实验条件

本实验用 Si-SiO₂ 样品由骊山微电子有限公司制备, 采用非核加固氧化工艺制作。PMOSFET 被封装在陶瓷管座内, 顶盖为柯伐合金。

辐照实验在西北核技术所进行。强 X 光源为低能脉冲相对论电子束加速器。辐照时样品贴在加速器钨靶后的厚度为 28.5mm 的有机玻璃隔离板上。对样品共进行了 7 次脉冲辐照。随后进行了 C-V 曲线和 I-V 曲线的测量。本实验辐射场参数和热释光测量数据为: 管电压 $U = 1\text{MV}$, 辐射能 $R = 15\text{kJ}$, 脉冲宽度 $T = 80\text{ns}$, 吸收剂量 $D = 0.69\text{Gy}(\text{Si})$, 吸收剂量率 $D/T = 8.6 \times 10^6\text{Gy}(\text{Si})\text{s}^{-1}$ 。

1.2 实验结果

MOS 器件的基本单元由 MOS 电容和 MOSFET 构成。在辐射作用后, MOS 电容的 C-V 曲线和 I-V 曲线都发生了改变。下面分别进行讨论。

1.2.1 对 C-V 曲线的测量结果

图 1 显示未经辐照的曲线和经过 2 次强脉冲 X 射线辐照后的曲线。未经辐照的曲线处于低位置, 每经过一次辐照, C-V 曲线的低频部分就整体升高一些。经过 2 次辐照后, 低频 C-V 曲线整体有了较大升高, 与原曲线的差别较明显。图 1 还显示, 经过 2 次强脉冲 X 射线辐照后, 高频 C-V 曲线的整体也都有

* 收稿日期: 2001-04-13; 修订日期: 2001-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(19866001)

作者简介: 杨志安(1956-), 男, 河北曲阳人, 教授, 博士, 从事非平衡统计物理、混沌理论及应用的研究。

增加, 在强反型区的增加较为明显。特别地, 图 2 显示出这些高频 C-V 曲线向电压的正向有少量漂移。C-V 曲线的部分参数列于表 1。

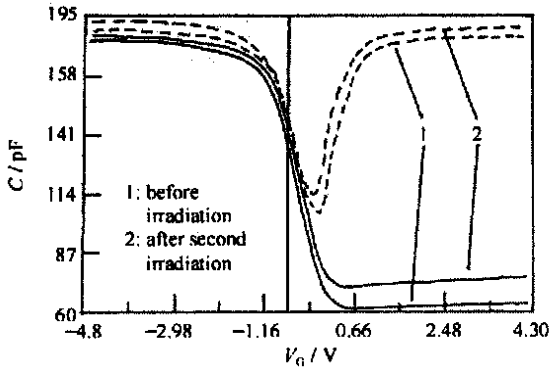


Fig 1 C-V curves before and after second radiation

图 1 辐照前和辐照 2 次后的 C-V 曲线

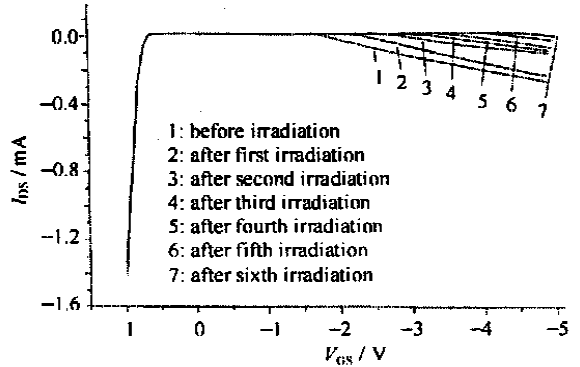


Fig 2 I-V curves

图 2 I-V 曲线

表 1 部分 C-V 曲线参数

Table 1 Some parameters of C-V curves

	C_{ox}/pF	C_{FB}/pF	C_{min}/pF	V_{FB}/V
before irradiation	183.22	132.38	6.4312	-0.65342
first irradiation	182.98	133.91	6.4605	-0.66510
second irradiation	184.80	134.21	6.9380	-0.58645

1.2.2 对 I-V 曲线的测量结果

从图 2 中可以看出, 未辐照的 I-V 曲线从一个初值开始, 随着 V 的减小而快速增加, 达到一个定值后, 开始转向一个近似水平的平台, 随着 V 的进一步减小, 平台延伸一段距离, 然后曲线开始下降。当经过强脉冲 X 射线辐照后, I-V 曲线的开始部分基本不变, 但是平台有了延长, 然后才降低。显示曲线向负向漂移, 并且 I-V 曲线的斜率也逐渐变小。随着辐照次数的增加, 曲线的开始部分仍然基本不变, 而平台部分继续向负向延伸, 然后才降低。表明随辐照次数(剂量)的增加, 使 I-V 曲线继续向负向漂移, 并伴有曲线斜率的改变, 见图 2。

2 辐射效应和讨论

2.1 MOS 结构电离辐射损伤机理

MOS 结构经电离辐射作用后, 将产生各种缺陷和电荷, 其中最重要的二类缺陷电荷是氧化物电荷和界面陷阱电荷(界面态)。其中辐射感生氧化物电荷的主要机制是本征缺陷俘获空穴。电离辐射在 MOS 结构 Si-SiO₂ 绝缘层中产生出电子-空穴对。电子和空穴在电场作用下分别向金属电极和 Si-SiO₂ 界面迁移。在常规辐射剂量下, 由于 Si-SiO₂ 中的电子陷阱也比空穴陷阱少得多, 同时通常电子的迁移率[~ 20cm²/(V·s)]比空穴迁移率[~ 2×10⁻⁵cm²/(V·s)]大得多, 因此, 常规剂量辐照产生的是氧化物正电荷积累。在强辐射场中, 脉冲辐射在瞬间使得大量电子电离, 增加了少子的产生率, 也可能产生负电荷积累。

2.2 对低频 C-V 曲线的影响

低频(10~ 100Hz)下的 MOS 结构总电容 C_L 与 SiO₂ 层电容 C_{ox}, 表面电容 C_s 和界面陷阱电容 C_{it} 的关系为^[3]

$$\frac{1}{C_L} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s + C_{it}} \tag{1}$$

则各电容的增加量为



$$\Delta C_L = \frac{C_L^2}{C_{ox}^2} \Delta C_{ox} + \frac{C_{it}^2}{(C_s + C_{it})^2} (\Delta C_s + \Delta C_{it}) \quad (2)$$

(1) 首先在图 1 的积累区, 总电容 C_L 主要由 SiO_2 层的电容 C_{ox} 支配^[4]; 在反型区, 由于反型层出现, 使 $C_s \gg 1$, 则 C_L 也主要由 SiO_2 层的电容 C_{ox} 支配^[4]。所以, 辐射感生的电子—空穴对使 SiO_2 绝缘层两边的电荷增加, 引起电容 C_{ox} 增加 $\Delta C_{ox} > 0$, 使总电容 C_L 增加 $\Delta C_L > 0$ 。

(2) 其次, 在耗尽区, 辐照感生的电子和空穴在耗尽层两侧重新分布, 使表面电势减少, 耗尽层厚度也减少, 使表面电容 C_s 值增加 $\Delta C_s > 0$, 影响到耗尽区总电容 C_L 增加 $\Delta C_L > 0$ 。

(3) 总体上, 在低频 (10~100Hz) 时, 强脉冲辐照感生的少子, 其产生与复合速率能跟上外加信号的变化, 显示出电容效应; 并且强脉冲辐照还引起界面陷阱电容 C_{it} 增加 $\Delta C_{it} > 0$; 这些影响都使积累区到反型区的电容 C_L 总体增加 $\Delta C_L > 0$ 。

综上所述, 强脉冲 X 射线的辐照产生的损伤效应, 使得总电容 C_L 增加 $\Delta C_L > 0$, 引起低频 C-V 曲线整体升高。

2.3 对高频 C-V 曲线的影响

2.3.1 平带电压向右漂移

MOS 电容的平带电压漂移是电离辐射效应的最明显的宏观响应之一。利用高频 ($10^4 \sim 10^6$ Hz) C-V 曲线, 可从平带电容 C_{FB} 求得对应的平带电压 V_{FB} 。常规剂量的电离辐射引起的是平带电压 V_{FB} 向负向漂移, 它是因辐射感生的氧化物正电荷直接作用的结果^[5-7]。而图 1 的结果显示, 在强 X 射线辐照下, 平带电压 V_{FB} 向正向漂移, 这表明强 X 射线的辐照在 MOS 结构中产生了负电荷积累。这一点与常规剂量电离辐射的结果不同。

2.3.2 耗尽区 C-V 曲线向右漂移

在耗尽区, MOS 电容 C 随电压 V_G 的变化可表示成^[4]

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{2\epsilon_s}{\epsilon_{ox} q N_A d_{ox}^2 V_G}\right)^{1/2}} \quad (3)$$

式中: ϵ_{ox} 是 SiO_2 氧化层的电容率, ϵ_s 是 Si 的电容率, d_{ox} 是栅氧厚度, N_A 是衬底掺杂浓度。在耗尽区, C 的变化很小, 近似为常数。辐照引起 N_A 增加, 导致 V_G 增加。图 1 显示 V_G 向 V 轴的正向漂移, 也说明强 X 射线的辐照产生了负电荷积累。

图 1 中高频 C-V 曲线向正向漂移的现象表明, 在 $Si-SiO_2$ 中经过强脉冲 X 射线辐照在 MOS 结构中感生出负电荷, 这一点与通常的低剂量率辐射结果不同。在通常的低剂量率辐射下, 会使 SiO_2 带正电荷^[5,6]。但是对强脉冲 X 辐射来说, 瞬间注入高剂量的 X 射线, 使大量的电子—空穴对只产生于 M- SiO_2 界面附近的 SiO_2 中, 产生的空穴来不及输运。这时从栅极一侧注入到 SiO_2 中的电子将中和掉陷阱正电荷, 使 SiO_2 带负电荷。此外, 有少量电子可能填入到 SiO_2 中的水关联陷阱而使陷阱带负电, 也可使 SiO_2 带少量的负电荷。

强脉冲 X 射线辐照对高频 C-V 曲线的影响所表现出在 SiO_2 中感生出负电荷, 这一点对抗辐射加固问题的影响, 有待进一步研究。

2.3.3 积累区电容 C_H 增加

测量高频 C-V 曲线时, 界面陷阱电容 C_{it} 不存在, (2) 式变成

$$\Delta C_H = \frac{C_H^2}{C_{ox}^2} \Delta C_{ox} + \frac{C_H^2}{C_s^2} \Delta C_s \quad (4)$$

在积累区, C_H 由 C_{ox} 支配, C_{ox} 增加 ($\Delta C_{ox} > 0$), 使得 C_H 增加 ($\Delta C_H > 0$), 高频 C-V 曲线升高。

2.3.4 反型区高频 C-V 曲线升高

在反型区, 反型层中电子的产生与复合跟不上高频信号的变化, 故显示不出电容效应, 高频 C-V 曲线降到最小, 这种最小电容 C_{min} 可表示成^[8]

$$\frac{C_{\min}}{C_{\text{ox}}} = \frac{1}{1 + \frac{2C_{\text{ox}}}{\epsilon_s q d_{\text{ox}}} \left[\frac{\epsilon_s k T}{N_A} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

辐照引起 N_A 增加, 但因为 $\ln N_A$ 的变化比 N_A 缓慢, 所以 $\Delta C_{\min} < \Delta N_A$ 。辐射引起 N_A 增加 ($\Delta N_A > 0$), 导致电容 C_{\min} 增加 ($\Delta C_{\min} > 0$); 还有, 辐射感生的电子空穴对在耗尽层两侧重新分布, 使表面电势 V_s 减少和耗尽层厚度减少, 也造成电容 C_{\min} 增加 ($\Delta C_{\min} > 0$)。这些效应都使反型区高频 C-V 曲线升高。

2.5 辐射对 I-V 亚阈特性曲线的影响

经辐射后, 感生 I-V 亚阈特性曲线有畸变, 即 I-V 曲线的斜率改变。这种畸变是由辐射感生界面态的产生引起, 可用 I-V 曲线亚阈区摆幅 S 的改变 ΔS 表示出来^[9, 10]。不同辐照剂量 D_1 和 D_2 作用后所引起的平均界面态密度的增加 ΔD_{it} 为

$$\Delta S = S_{D_1} - S_{D_2} = \Delta D_{\text{it}} / [C_{\text{ox}} / kT] \ln(10) \quad (6)$$

因为感生界面态产额 ΔD_{it} 随辐照剂量 D 按 2/3 次方规律增加^[11, 12], 所以 I-V 曲线亚阈区摆幅 S 的改变 ΔS 也按 2/3 次方规律增加; 又当总剂量很大时感生界面态产额将趋于饱和^[11, 12], 所以 I-V 曲线亚阈区摆幅 S 的改变 ΔS 也趋于饱和, 接近水平线。表明 I-V 曲线经多次强脉冲 X 射线辐照, 其电特性参数逐次退化, 最后甚至失效。

致 谢 感谢西北核技术所三室闪光 II 号运行组在辐照实验中所给予的帮助。

参考文献:

- [1] Conley J F, Lenahan P M. Molecular hydrogen, E' center hole traps, and radiation induced interface traps in MOS devices[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1993, **40**(6): 1335.
- [2] Dimaria D J. Hole trapping, substrate currents and breakdown in thin silicon dioxide film s[J]. *IEEE Electron Dev Lett*, 1995, **16**(5): 184.
- [3] Kuhn M. A quasi-static technique for MOS C-V and surface state measurements[J]. *Solid State Electron*, 1970, **13**: 873.
- [4] Snow E H, Grove A S, Fitzgerald D S. Effects of ionizing radiation on oxidized silicon surfaces and planar devices[J]. *Proc IEEE*, 1976, **55**(7): 1168.
- [5] Winokur P S, Schwank J R, McWhorter P J. Correlating the radiation response of MOS capacitors and transistors[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1984, **31**(6): 1453.
- [6] Jr Boesch H E. Interface-state generation in thick SiO₂ layers[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1982, **29**(6): 1446.
- [7] McWhorter P J, Winokur P S. Simple technique for separating effects of interface traps and trapped-oxide charge in metal-oxide-semiconductor transistors[J]. *Appl Phys Lett*, 1986, **48**(2): 133.
- [8] 郭维廉. 硅—二氧化硅界面物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 44. (Guo W L. Si-SiO₂ interface physics. Beijing: National defense industry press, 1989. 44)
- [9] Schwank J R, Winokur P S, McWhorter P J, et al. Physical mechanisms contributing to device "rebound" [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1984, **31**(6): 1434.
- [10] Brown D B, Mad I, Dozier C M, et al. Thermal annealing of radiation induced defects: A diffusion-limited process[J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1983, **30**(6): 4059.
- [11] Winokur P S, Jr Boesch H E, et al. Field and time dependent radiation effects at the Si/SiO₂ interface of hardened MOS capacitors [J]. *IEEE Trans Nucl Sci*, 1977, **24**(6): 2113.
- [12] Pekar M C, Dozier C M, Brown D B, et al. Radiation effects introduced by X-ray lithography in MOS devices[J]. *IEEE Nucl Sci*, 1982, **29**(6): 1697.

Radiation impairment effects on C-V curves and I-V curves of Si-SiO₂ interface induced by intense pulse X-ray

YANG Zhi-an¹, JIN Tao², YANG Zu-shen¹, YAO Yu-juan³, LUO Yin-hong³, DAIHuiying⁴

(1. School of Science, Jinan University, Jinan 250022, China;

2. Xijiang Institute of Physics, the Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

3. Department of Physics, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

4. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

5. Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract Intense pulse X-ray is used to irradiate Si-SiO₂ interface. C-V curves and I-V curves are tested before and after X-ray irradiation. Experiment results show that C-V curves have the following changes under intense pulse X-ray irradiation: (1) Flatband Voltage of high frequency C-V has a little positive drift, so does the gate voltage in depletion region, which is different from a negative drift under low-power pulse X-ray irradiation; (2) Oxide capacitance of low and high frequency C-V lift after intense pulse X-ray irradiation; (3) Minimum capacitance of high frequency C-V lifts after intense pulse X-ray irradiation. Experiment results also show that slopes of I-V subthreshold curves have gradually aberrant under six times intense pulse X-ray irradiation. One reason is that intense pulse X-ray irradiation increases density of interface trap D_{it} , thus changes the I-V curve slopes. I-V curves show that accumulated dose of intense pulse X-ray causes deteriorative electric characters of Si-SiO₂.

Key words: X-ray; Si-SiO₂ interface; radiation impairment