

MOS 结构的软 X 射线辐射损伤

郑有焯 吴凤美

(南京大学物理系)

1980年11月12日收到。

提 要

本文报道了 MOS 结构受软 X 射线辐照的辐射损伤的研究结果。指出,软 X 射线辐照将引起了 SiO_2 层中正电荷及 SiO_2 -Si 界面界面态密度的增加,而且在 SiO_2 体内形成电子陷阱和中性陷阱。文中还报道了辐射损伤的退火结果。

一、引 言

近些年来,为提高集成电路的集成度和研制微波功率器件,相应发展了半导体精细加工技术,如采用电子束蒸发、电子束曝光、软 X 射线曝光和离子注入、离子刻蚀等新技术。用这些技术研制器件,固然可达到微米或亚微米尺寸大小,但这种加工过程中,器件晶体表面受到能量较高的粒子或光子的轰击,将伴随引入辐射损伤,而直接影响制成器件的性能及其稳定性与可靠性。过去对辐射损伤的研究主要是探讨器件工作过程中因辐射引入的损伤,而对器件制造工艺过程中因高能粒子束辐射引入的损伤却研究得不多。近期随着精细加工技术的发展引起了人们的重视^[1]。

当采用上述高能束制造器件时,器件表面(实际上是 MOS 结构的 SiO_2 -Si 界面)经常直接或间接受到软 X 射线的辐照。例如,X 射线光刻时,器件直接受 X 射线的辐照;电子束蒸发时,电子束轰击蒸发源(如 Al)将伴随发出软 X 射线;离子刻蚀也同时会有软 X 射线辐射等等。因此,研究 MOS 结构的软 X 射线辐射效应引入的损伤及其消除,对发展高能束精细加工新技术具有十分重要的实际意义。

本文研究了 MOS 结构受软 X 射线辐照后引入的辐射损伤。实验中观察到当 MOS 结构受软 X 射线辐照后, SiO_2 中的正电荷及 SiO_2 -Si 界面的界面态密度均明显地增加,并且观察到在 SiO_2 -Si 界面附近引入了激活能约为 0.6 eV 的电子陷阱和在 SiO_2 体内引入了中性陷阱,其俘获截面在 10^{-14}cm^2 左右。文中研究了损伤的特征,并探讨了消除辐射损伤的退火方法。

二、实 验

为模拟器件制造工艺过程因软 X 射线辐照引入的辐射损伤,我们采用浮置(没施加偏压)的 MOS 结构样品直接暴露于软 X 射线源辐照。

实验所用样品为(100)取向,电阻率是 $8-10\Omega\cdot\text{cm}$ 的N型硅单晶基底的铝栅 MOS 电容. 氧化层采用常规热氧化生长,其厚度为 $1100-1800\text{\AA}$. 铝栅是用热蒸发形成的,铝膜厚度约 $5000\text{\AA}$,适于软X射线穿透.

实验用加速电压 20kV ,灯丝电流 20mA ,由铜靶产生的X射线作为研究损伤的X射线辐射源.

本实验中,由高频 $C-V$ 与准静态 $C-V$ 联合测量^[2] 确定辐射损伤引入的氧化层正电荷及 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面界面态;由低温热激电流测量 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面的陷阱能级^[3];用雪崩注入技术^[4,5]测量 SiO_2 中的中性陷阱,求出陷阱的俘获截面和有效陷阱密度.

三、实验结果与讨论

1. 软X射线辐射引起 SiO_2 层中的正电荷及 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面界面态密度增加

图1是浮置的MOS电容经X射线辐照后的典型损伤特征.图中高频及准静态 $C-V$ 曲线的畸变是氧化层正电荷及 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面的界面态密度同时增加的结果.因为被填满

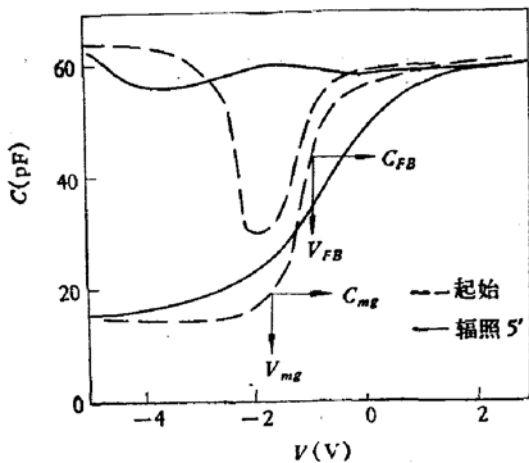


图1 X射线辐照对 $C-V$ 特性的影响

样品 $N_D = 7.5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$, $d = 1500\text{\AA}$

的受主型界面态带负电^[6],将产生负表面电荷.因此损伤后,一方面是氧化层正电荷增加 ΔQ_{ox} ,另一方面,界面态的增加又导致在平带时表面负电荷增加 ΔQ_{FS} ,而且 ΔQ_{FS} 大小又与界面态密度及决定界面态填充状态的表面势有关.所以,损伤后的高频 $C-V$ 曲线的变化,是由正电荷增量 ΔQ_{ox} 与界面态负电荷增量 ΔQ_{FS} 的代数和所决定.在半带点,表面处 E_F 与 E_i 重叠,界面态电荷很小,可忽略不计,这时半带电压的变化 ΔV_{mg} 基本上是由氧化层正电荷变化 ΔQ_{ox} 引起的.若单位面积氧化层电容为 C_{ox} ,则

$$\Delta V_{mg} = \frac{\Delta Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (1)$$

在平带时, E_F 与 E_i 之间的受主型界面态带负电荷 ΔQ_{FS} ,平带电压变化 ΔV_{FB} 要计入界面态负电荷的影响,即

$$\Delta V_{FB} = \frac{\Delta Q_{ox} + \Delta Q_{FS}}{C_{ox}} \quad (2)$$

所以损伤后平带电压的变化 ΔV_{FB} 可以是正值 (V_{FB} 增大) 或为零 (V_{FB} 不变) 或为负值 (V_{FB} 降低). 图1所示的情况为平带电压降低,半带电压增加. 根据损伤后半带电压变化 ΔV_{mg} 和平带电压变化 ΔV_{FB} , 由式(1)、(2)可确定损伤后引入的氧化层正电荷 ΔQ_{ox} 与界面态电荷 ΔQ_{FS} .

我们研究了损伤与X射线辐照时间的关系. 随着X射线辐照时间的增加,损伤越明显,如图2所示. 图3是由图2实验曲线计算得到的 $\Delta Q_{ox}/q$ 和界面态密度增量 ΔN_{FS} 随

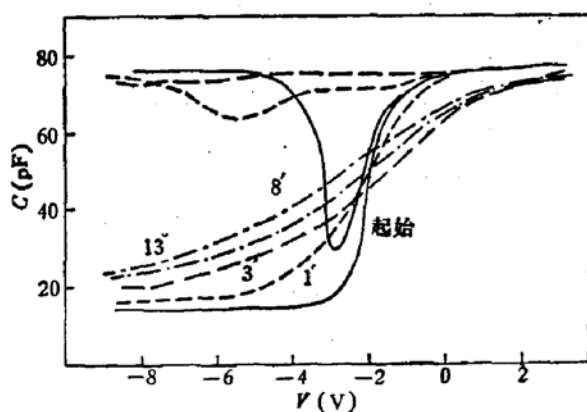
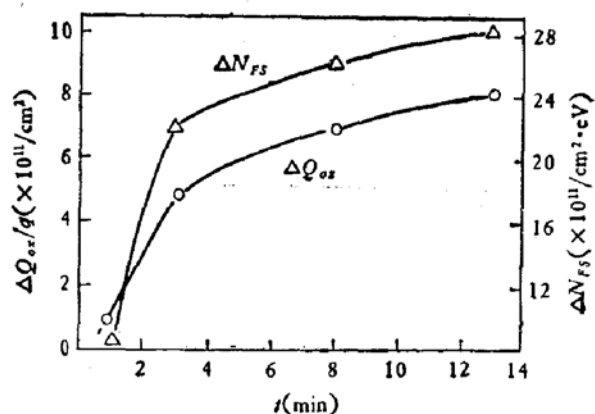


图2 X 射线辐射损伤随辐照时间变化

图3 $\Delta Q_{ox}/q$ 、 ΔN_{fs} 随辐照时间的变化

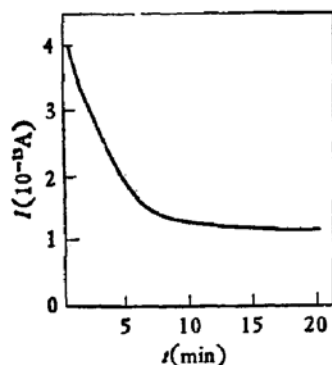
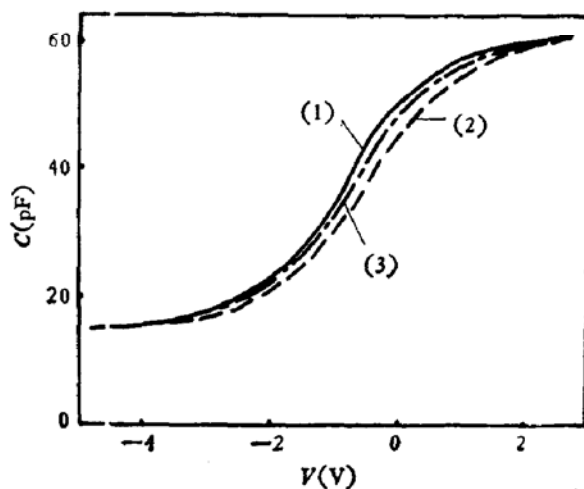
辐照时间变化的情况。可以看到, $\Delta Q_{ox}/q$ 和 ΔN_{fs} 均随辐照时间增加而增加, 但增加速率逐渐趋于缓慢。

对于浮置的 MOS 结构, 由 X 射线辐照产生的氧化层正电荷可以认为是 X 射线这种离化辐射于 SiO_2 中激发出的电子空穴对, 其空穴被陷落在 SiO_2 中的缺陷中心所致。它与 MOS 样品 SiO_2 层中自建电场有关。X 射线产生界面态则可用断键模型来解释。因为通常热氧化生长的 SiO_2 -Si 界面往往存在大量的 Si-H 键^[7], 而 Si-H 的结合是较弱的, 它们可能被 SiO_2 中由 X 射线离化辐射产生的高能量电子或空穴所打断, 释放出的氢通过扩散而离开 SiO_2 -Si 界面^[8], 在界面留下了三价硅 $\equiv\text{Si}\cdot$, 成为产生界面态的中心。

对损伤后的 MOS 样品, 立即进行漏电流测试, 观察到图 4 所示的瞬态变化过程, 这现象可能是与上述辐射损伤释放出的氢离子漂移有关。

2. X 射线辐射损伤在 SiO_2 -Si 界面附近引入电子陷阱

X 射线辐照后的样品, 在高频 C-V 测量时发现慢弛豫现象, 如图 5 所示。当金属

图4 辐照后 MOS 样品漏电流随时间变化
(栅加负压 5 伏)图5 X 射线辐照后的慢弛豫现象
(1) X 射线辐照 5', (2) +10V 停留 3',
(3) -10V 停留 3'

栅施加正 10V 停留 3', C-V 曲线由起始“1”右移到“2”,接着施加负 10V 停留 3',则曲线又由“2”左移到“3”.这表明在靠近 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面附近的 SiO_2 中存在着电子陷阱.正偏置时,硅表面电子积累,借助于隧道效应,电子由硅表面进入 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面附近的电子

陷阱,使 C-V 曲线朝正电压方向移动.负偏置时,硅表面电子耗尽,填入到电子陷阱的电子又重新发射到硅,使 C-V 曲线朝负电压方向移动.实验还发现,电子填入陷阱容易,从陷阱发射出来较困难.如图 5 中, C-V 曲线不是由“2”回到“1”,而是停留在“3”,由“3”恢复到“1”则需要更长的时间.

我们用热激电流法测量了电子陷阱的激活能.先于室温下施加正偏压,使电子注入到陷阱,保持偏压迅速冷却到 77K,然后进行负偏压热激电流测量.图 6 是辐照后的热激电流实验曲线.通过实验判别^[9],图

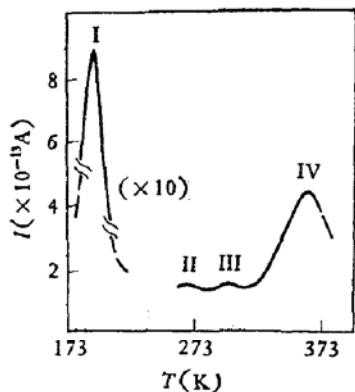


图 6 X 射线辐照后的热激电流谱图

6 中电流峰 I 是界面态发射电子电流峰,电流峰 III 和 IV 分别为 H^+ 峰和 Na^+ 峰,电流峰 II 可以认为是 X 射线损伤引入的电子陷阱释放的电流峰,经计算电子陷阱的激活能约为 0.6eV.

在辐照前,没测量到电子陷阱的热激电流峰.

3. X 射线辐射损伤在 SiO_2 中引入中性陷阱

在我们实验中,还观察到 X 射线损伤在 SiO_2 层内产生中性陷阱中心.这些陷阱起始不带电,呈中性,并在通常的 C-V 测量中反映不出来.我们采用雪崩注入技术来测量这种中性陷阱.

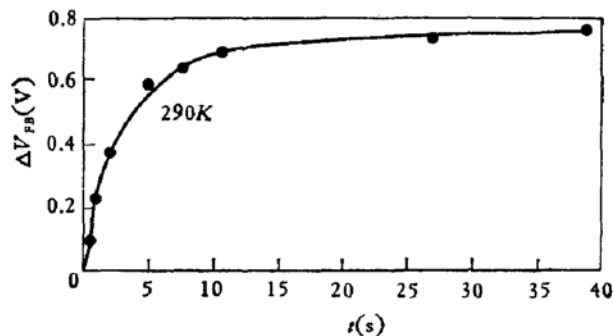


图 7 平带电压漂移与注入时间的关系

$$j = 2.2 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \quad d = 1500 \text{ \AA}$$

雪崩注入实验是在 MOS 电容的栅极加上大的负脉冲电压,驱使硅表面进入深耗尽.当所施加的脉冲电压幅度增大到使硅衬底表面耗尽层发生雪崩击穿时,产生大量的热电子-空穴对,其中有一部份能量比较高的“热空穴”在电场作用下,就可能越过 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ 界面势垒,注入到 SiO_2 层.如果 SiO_2 层内存在中性陷阱,则注入的空穴便有一部份将为中性陷阱所俘获.中性陷阱一旦俘获了空穴便呈现正电性,从而使 C-V 曲线朝负电压方向移动.图 7 表示出雪崩注入期间,平带电压漂移 ΔV_{FB} 随注入时间变化的情况,它满足如下关系^[10]

$$\Delta V_{FB} = \frac{N_{eff}q}{C_{ox}} [1 - \exp(-\sigma jt/q)] \quad (3)$$

式中 q 为电子电量, N_{eff} 为有效陷阱密度, C_{ox} 为单位面积氧化层电容, σ 是陷阱的俘获截面, j 为注入电流密度, t 为注入时间. 当注入时间足够长时, 陷阱被注入空穴填满, 这时

$$\Delta V_{FB} = q \cdot N_{eff} / C_{ox} \quad (4)$$

或

$$N_{eff} = C_{ox} \cdot \Delta V_{FB} / q = \frac{\epsilon}{qd} \Delta V_{FB} \quad (5)$$

其中 ϵ 为 SiO_2 的介电系数, d 为氧化层厚度. 用以上关系式从图 7 实验曲线中可求出陷阱对空穴俘获截面为 $2.9 \times 10^{-14} \text{cm}^2$, 有效陷阱密度为 $1.04 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$.

X 射线辐照引起的这种中性陷阱可以认为是 X 射线辐照使 SiO_2 层产生结构损伤所致. 它可能是 SiO_2 网络中的键被 X 射线打断所造成.

4. X 射线辐射损伤的退火

实验表明, MOS 样品由 X 射线辐射损伤产生的氧化层正电荷及界面态在室温下是稳定的, 可以长期保留. 但通过在 N_2 气氛中 $300-420^\circ\text{C}$ 热退火可以消除, 如图 8 所示.

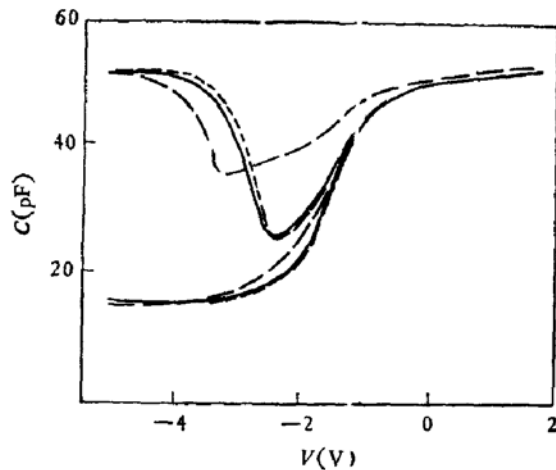


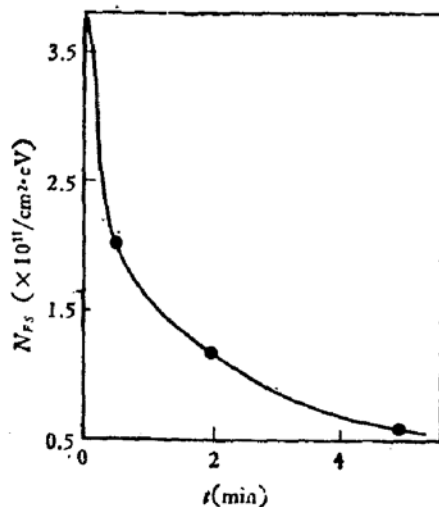
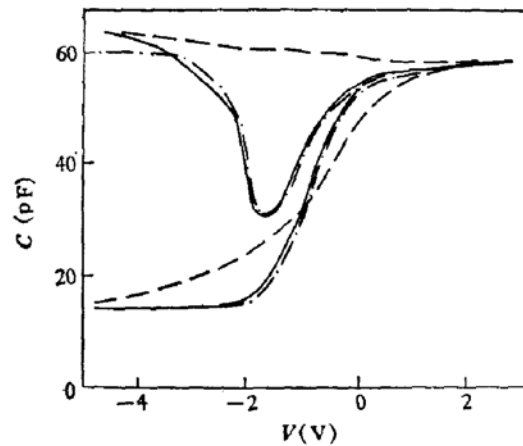
图 8 热退火对 X 射线损伤的影响

——起始 ——辐照 1' ——退火 5'

该样品经 5' 退火后, 辐射损伤基本上消除, $C-V$ 曲线恢复到接近损伤前的起始状态. 图 9 是界面态密度 N_{FS} 随退火时间的变化关系, 可以看到, 退火过程中界面态密度很快降低到接近于起始 $0.5 \times 10^{11} / \text{cm}^2 \cdot \text{eV}$ 的值 (接近带隙中央).

X 射线辐射损伤产生的氧化层正电荷及界面态也可用射频等离子体退火^[11]来消除, 如图 10 所示.

由 X 射线损伤引入的电子陷阱和中性陷阱, 则不象氧化层正电荷及界面态那样由低温热退火可以完全消除, 而需要较高的温度下退火才有明显效果, 这方面工作尚待进一步研究.

图9 N_{FS} 随退火时间变化图10 X射线损伤的等离子体退火
——辐照 10^4 ——RFP 退火后 ——一起始

四、结 语

以上实验结果表明, MOS 结构受软 X 射线辐照将造成 SiO_2 -Si 界面及 SiO_2 层体内的损伤: 产生氧化层正电荷和界面态; 在 SiO_2 -Si 界面附近 SiO_2 中引入电子陷阱; 在 SiO_2 体内引入中性陷阱。损伤引入的这些界面电荷、界面态及陷阱态将导致 MOS 结构的性能退化, 会影响器件的性能及其稳定性与可靠性。特别是中性陷阱对热载流子的俘获效应, 将严重影响短沟道 MOS 集成电路的稳定性以及双极型器件击穿电压的漂移。因此, 研究和消除软 X 射线辐射损伤是一项十分重要的工作。文中进行的退火实验表明, 损伤引入的氧化层正电荷和 SiO_2 -Si 界面的界面态, 在 $300\text{--}420^\circ\text{C}$ 范围内 N_2 气氛中退火可基本消除。但界面电子陷阱及 SiO_2 体内的中性陷阱, 则需更高温度退火, 且不易退火干净。实验中还观察到损伤与 MOS 样品结构及氧化生长条件密切相关, 这方面工作, 尚需进一步深入研究。

吴汝麟教授对本工作关心与指导, 上海无线电十四厂提供了部份 MOS 样品, 南京大学物理系 X 光实验室同志们的支持, 和江若琰、周光能等同志的具体帮助, 作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] John, M. Aitken, *IEEE Trans.*, ED-26, 4, 372(1979).
- [2] M. Kuhn, *Solid-State Electron.*, 13, 873(1970).
- [3] H. A. Mar and J. G. Simmons, *Solid-State Electronics*, 17, 131(1974).
- [4] E. H. Nicollian, A. Goetzbertz, C. N. Berglund, *Appl. Phys. Lett.*, 15, 174(1969).
- [5] J. M. Aitken and D. R. Yonng, *IEEE Trans.*, NS-24, 2128(1977).
- [6] C. T. Sah, *IEEE Trans.*, NS-23, 1563(1976).
- [7] K. H. Beckmann, and N. J. Harrick, *J. Electrochem. Soc.*, 118, 614(1971).
- [8] A. G. Revesz, *J. Electrochem. Soc.*, 126, 122(1979).
- [9] 郑有科, 江若琰, 南京大学学报, 物理学专刊, 1980.
- [10] T. H. Ning and H. N. Yu, *J. Appl. Phys.*, 45, 5373(1974).

[11] 郑有料, 吴凤美, 苏宗禾, 半导体学报, 2, 163(1980).

Radiation Damage in MOS Structures by Soft X-Ray Irradiation

Zheng Youdou and Wu Fengmei

(*Department of Physics, Nanjing University*)

Abstract

This paper presents the results of an investigation of radiation damage in MOS structures exposed to soft X-ray irradiation. It is shown that soft X-ray irradiation causes the formation of electron and neutral traps in the oxide bulk, as well as the build-up of positive charge and interface states at the SiO₂-Si interface. The results of annealing of radiation damage are described.