

MOS结构的质子辐照效应

顾美渔 邢强华

(上海科技大学, 上海 201800)

王传珊 周树鑫

(上海射线应用所, 上海 201800)

摘要 利用微分电容法和禁带中央电压漂移技术, 研究了铝栅 MOS 结构质子辐照诱发的新生界面陷阱和氧化层陷阱结构。结果表明, 质子辐照所诱发的新生界面陷阱和氧化层陷阱随质子能量和剂量的增加而增加。用 H^+ 二级过程模型和计算机模拟定性解释了实验结果。

关键词 MOS 结构, 质子, 辐射效应

应用于空间科学工作的电子系统中的 MOS 器件和集成电路, 经常会受到宇宙射线的辐照, 导致电路的开启电压漂移、沟道跨导和迁移率下降、漏电流增加^[1], 使电路的电参数逐渐退化, 严重时会造成整个系统失效。因此, 有必要对 MOS 结构辐照效应进行研究, 寻找抗辐照的途径。

一般认为, 影响 MOS 集成电路开启电压漂移, 主要来自于界面陷阱和氧化层陷阱^[2], 本文着重关注质子辐照后影响开启电压漂移的新生界面陷阱和氧化层陷阱物理量, 研究它们与辐照质子的能量、剂量关系, 并讨论其机理。

实 验 部 分

1. 样品

采用 N 型和 P 型硅单晶铝栅 MOS 结构, $\rho = 5-7 \Omega \cdot \text{cm}$, 氧化温度 1000°C , P 型样品氧化层厚 $890 \times 10^{-10} \text{m}$, N 型为 $900 \times 10^{-10} \text{m}$, 电子束蒸铝, 厚 $1.4 \mu\text{m}$, 金属化后在 450°C 的 N_2 气氛中退火 30 min, 电极面积 $3.6 \times 10^{-3} \text{cm}^2$ 。

2. 实验方法

(1) 利用 Terman 微分电容法^[3]求得界面陷阱能级密度 Dit :

$$\text{Dit} = \frac{1}{q^2} \left\{ \text{Cox} \left[\left(-\frac{dV_s}{dV_g} \right)^{-1} - 1 \right] - C_s(V_s) \right\} \quad (\text{态}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV}) \quad (1)$$

式中 Cox 为单位面积氧化层电容, V_s 为半导体表面势, V_g 为 MOS 结构外加偏压, $C_s(V_s)$ 为理论计算电容值。实际数据处理时, 用差商法 $-\frac{\Delta V_s}{\Delta V_g}$ 代替 $-\frac{dV_s}{dV_g}$, 由式 (1) 可得界面陷阱能级密度 Dit 在禁带中的分布, 也可得到辐照后新生的界面陷阱密度 ΔDit (由辐照产生的净界面陷阱能级密度):

$$\Delta \text{Dit} = (\text{Dit})_{\text{post}} - (\text{Dit})_{\text{pre}} \quad (\text{态}/\text{cm}^2 \cdot \text{eV}) \quad (2)$$

(2) 采用禁带中央电压漂移技术^[4], 得到辐照后新生的氧化层陷阱密度 ΔNot :

$$\Delta \text{Not} = \frac{\text{Cox}}{q} \Delta V_{\text{ot}} \quad (\text{态}/\text{cm}^2) \quad (3)$$

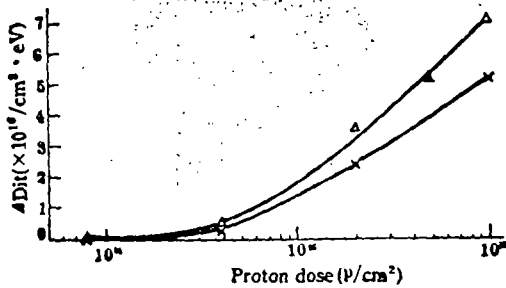


Fig 1. P-type sample post-radiation induced newborn interface trap level density as a function of dose with the proton energy as parameter (x) 200 keV (Δ) 250 keV

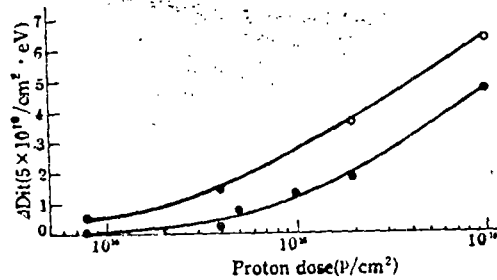


Fig 2. N-type sample post-radiation induced newborn interface trap level density as a function of dose with the proton energy as parameter (●) 250 keV (○) 300 keV

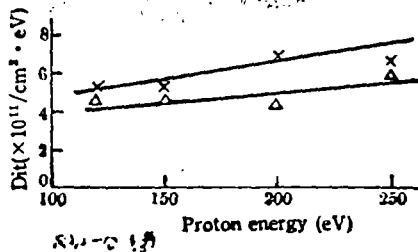


Fig 3. Radiation-induced interface trap level density as a function of the proton energy with the proton dose as parameter for P-type (100)Si sample (x) dose 5×10^{15} p/cm² (Δ) dose 1×10^{15} p/cm²

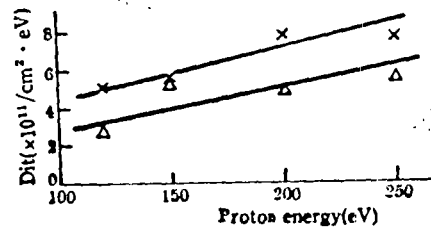


Fig 4. Radiation-induced interface trap level density as a function of the proton energy with the proton dose as parameter for N-type sample (x) dose 5×10^{15} p/cm² (Δ) dose 1×10^{15} p/cm²

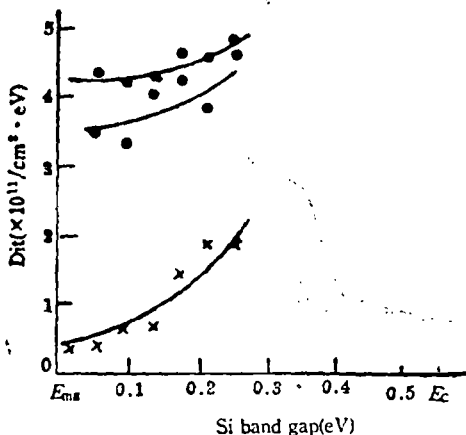


Fig 5. Pre-and post radiation interface trap level density distribution for N-type sample $D = 1 \times 10^{16}$ P/cm² (○) 200 keV (x) pre-radiat. (●) 300 keV post-radiat.

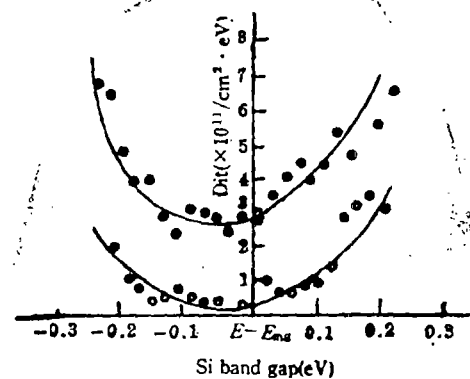


Fig 6. Pre-and post radiation interface trap level density distribution for both N-type and P-type sample $D = 1 \times 10^{16}$ P/cm² (○) pre-radiat. (●) post-radiat. 300 keV

式中 $\Delta V_{ot} = (V_{mg})_{post} - (V_{mg})_{pre}$, V_{mg} —禁带中央电压, 测量, $C-V$ 曲线所采用的高频信号为 1 MHz, 扫描率 1.25 V/s。

3. 实验结果

图 1、2 是样品经质子辐照后 ΔD_{it} 与剂量的关系图, 图 3 和 4 是样品在辐照剂量为 5×10^{15} 和 $1 \times 10^{15} \text{ p/cm}^2$ 时 D_{it} 与质子能量的关系图。图

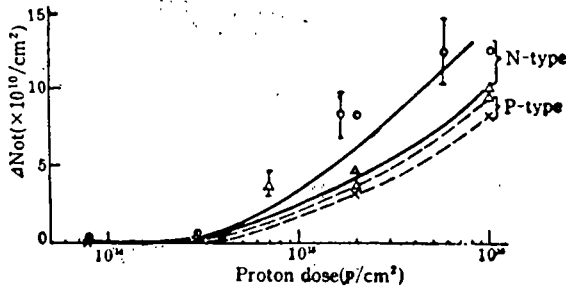


Fig 7. Post-radiation induced newborn oxide trap as a function of dose with the proton energy as parameter for both N-type and P-type sample

(×) 200 keV (Δ) 250 keV (O) 300 keV

5、6 给出了辐照前后 D_{it} 在禁带中的分布, D_{it} 和 D_{it} 随辐照质子能量和剂量的增加而增加。图 7 给出 ΔN_{ot} 亦随质子能量和剂量的增加而增加。

实验中考虑到测量仪器的精度、定标、计算机处理数据的误差, 引入累计误差 $< \pm 18\%$ 。为保证测量误差相同, 采用相同的电压扫描率 1.25 V/s, 测量电容-电压曲线, 重复率在 $\pm 5\%$ 以内, 某些数据偏差主要是受到辐照均匀性及测量、数据处理误差的影响。

讨 论

基于电子自旋共振(ESR)测量^[4], 电离辐照在氧化层中诱发的陷阱, 一般认为是硅-氧四面体中缺氧(称作 E' 中心), 也就是硅原子上与氧空位相关的被陷的正电荷, 而界面陷阱的起源是界面附近有过剩硅, 形成悬挂键所致。也有认为 Si/SiO_2 界面上大多数陷阱电荷是三价硅(谓之 Pb 中心)^[5], Revesz^[6]则发现在热生长氧化层中有相当可观的氢以 $\text{Si}-\text{H}$ 和 $\text{Si}-\text{OH}$ 键形式出现在氧化层中。

根据文献报道和 Saks 等提出 H^+ 二级过程模型^[7]。加之所采用的 Monte Carlo 方法编制的 TRIM-89^[8]模型做质子辐照的计算机模拟, 可定性解释本实验结果。即开始当一定能量、剂量的质子注入后, 在氧化层中产生电子-空穴对, 其中一部分未复合的空穴与体氧化层中的 H 反应产生 H^+ 类。(即 $\text{h}^+ + \text{H}(\text{in oxide}) \rightarrow \text{H}^+$)。第二阶段在外加正向偏压下, 此类 H^+ 缓慢地向

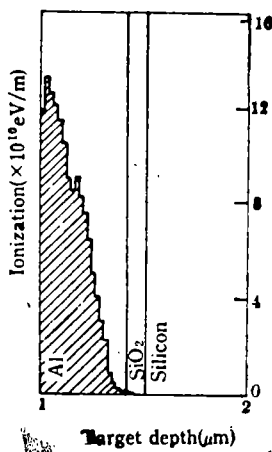


Fig 8. Depth distribution of target ionization. proton energy 150 keV

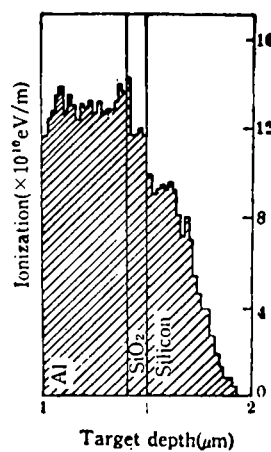


Fig 9. Depth distribution of target ionization. proton energy 200 keV

Si/SiO₂ 界面漂移, 这样在相互作用产生的 H⁺ 漂移过程中, H⁺ 不断与在体内和 Si/SiO₂ 界面的 Si—OH 和 Si—H 互作用, 使得 Si—OH 和 Si—H 键断裂, 从而在体内形成氧空位(E' 中心)即氧化层陷阱, 在界面形成 H₂ 和硅悬挂键(Pb 中心), 即在 Si/SiO₂ 界面形成了界面陷阱。

比较图 8 和图 9 中 150 keV 和 200 keV 能量的质子在氧化层中电离度随深度的分布图, 可看出质子能量为 200 keV 时, 在氧化层中的电离度(亦即产生的电子-空穴对数)比 150 keV 时的多得多, 这说明当辐照能量增加时, 在氧化层中产生的电子-空穴对增加, 从而使未复合的空穴数增加, 致使空穴与体氧化层中 H 的互作用增强, 产生更多的 H⁺ 类。这些 H⁺ 在漂移过程中与 Si—OH 或 Si—H 相互作用增强, 最后使 Si—OH 或 Si—H 键断裂增加, 从而在体内和在界面形成的氧空位和悬挂键亦增加, 导致氧化层陷阱和界面陷阱随辐照能量增加而增加。

结 论

1. 质子辐照 P 型和 N 型(100)硅片的热氧化 MOS 结构, 其诱发的新生界面陷阱和氧化层陷阱随质子的能量、总剂量增加而增加。

2. 当 E = 250 keV, D = 4 × 10¹⁴ p/cm² 以下的质子辐照时, P 型和 N 型样品 ΔD_{it} 和 ΔN_{ot} 都小于 1 × 10¹⁰, 对器件和电路的电参数无影响。

实验样品乃由上海无线电十四厂张国强、吕 浩同志提供, 对他们的大力协作表示感谢。

参 考 文 献

- 1 高光渤, 李文信. 半导体器件可靠性物理. 科学出版社, 1987
- 2 Mcwhorter P J, Winokur P S. Appl. Phys. Lett., 1986, 48(2): 133
- 3 Nicollian E H, Brews Jr. MOS Physics and Technology, John Wiley, New York, 1982: 325
- 4 Lenahan P M, Dressendorfer P V. J. Appl. Phys., 1984, 55: 3495
- 5 Gerardi G J, Poindexter E H. Appl. Phys. Lett., 1986, 49(6): 348
- 6 Revesz A G. J. Electrochem. Soc., 1979, 126: 122
- 7 Saks N S, Brown D B. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1989, 36(6): 1848
- 8 Ziegler J F et al., Private Communication

(稿件收到日期: 1991 年 7 月 28 日)

THE PROTON RADIATION EFFECT OF MOS STRUCTURE

Gu Meiyu Xing Qianghua

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

Wang Chuanshan Zhou Shuxin

(Shanghai Applied Radiation Institute, Shanghai 201800)

ABSTRACT Using the differential capacitance method and the midgap-voltage shift technique to study the proton radiation induced interface traps and oxide traps in the Al-gate MOS structure. The results indicate that the overall density of the radiation-induced interface traps and oxide traps increase with proton energy and doses. These experimental results were explained in terms of the two-stage H⁺ process and TRIAM-89 computer simulation.

KEYWORDS MOS Structure, Proton, Radiation