

利用等时退火法预估等温退火效应实验研究

何宝平 王桂珍 龚建成 罗尹虹 李永宏

(西北核技术研究所, 西安市 69 信箱六室 710613)

(2002 年 11 月 22 日收到 2003 年 1 月 8 日收到修改稿)

对电离辐照损伤后的 MOS 器件的等温和等时退火特性进行了研究, 研究发现, 首先, 100°C 等温退火是有效的, 等时退火所需的全过程时间最短, 其次, +5V 栅偏压退火相对于 0V 和浮空偏置条件, 阈值电压恢复速度快、恢复程度大, 最后, 利用等时退火数据对等温效应进行了理论预估, 实验等温曲线和预估结果吻合得较好.

关键词: 等温退火, 等时退火, MOS 器件

PACC: 6180E, 6170A

1. 引言

许多研究表明^[1-3], MOS 器件和电路的辐照效应受到辐照剂量、剂量率、偏置、温度以及工艺条件的影响. 当人们研究 MOS 器件辐射后效应时, 一般会考虑到目前的美军标 MIL-STD 883 方法 1019.4 和欧控局 ESA22900 测试方法, 这两种方法都包含 168h100°C 以探测可能的“反弹”效应的等温退火. 在 100°C 的温度下, 一方面氧化物陷阱电荷发生退火, 另一方面界面态发生积累, 界面态的积累导致迁移率的降低和 N 沟阈值电压发生正向漂移. 早期的研究表明^[4], 在 100°C 的温度下, 氧化物陷阱电荷的退火被加速, 界面态电荷发生积累, “反弹”实验温度的选择要求低于界面态发生退火的温度^[5,6]. 另外, 从以前的文献中发现: 1) 界面态电荷的退火特性依赖于器件的工艺过程^[5]; 2) 在 100°C 的温度下观察到界面态的退火现象^[7]; 3) 界面态退火温度随辐射剂量的增加而降低^[6]. 本文主要研究被实验器件辐照后的退火效应(包括 25—250°C 等时和 100°C 的等温), 并研究利用等时退火法预估等温退火效应的可能性. 这种方法只适用于氧化物陷阱电荷起主导作用的 MOS 器件, 对某些辐射效应主要由界面态引起的电路来说, 这种方法并不适用.

2. 数学模型

2.1. 等温退火基本方程

等温退火是在恒定温度下, 测量与氧化物陷阱电

荷相关的电参数与时间的关系. 我们将模型简单化: 复合概率设为常量, 并忽略电荷逃离陷阱后再次被俘获的概率. 陷阱电荷与时间的关系可由下式表示:

$$\frac{dn(t)}{dt} = -\sigma n(t), \quad (1)$$

式中 t 为退火时间; $n(t)$ 为一密度函数, 这里 $n(t)$ 与正陷阱电荷密度成正比. 对 (1) 式进行积分, 得到

$$n(t) = n(0)e^{-\sigma t}, \quad (2)$$

式中 σ 定义为单位时间内, 一个被俘获的陷阱电荷逃离陷阱的概率, 它遵循 Arrhenius 等式

$$\sigma = \nu \exp(-E/kT), \quad (3)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数; T 为退火温度, 单位为开尔文; ν 为频率因子; E 为陷阱电荷的激发能, eV.

在恒定温度下, 密度随时间指数下降, 可以用归一化等温函数表示

$$F(t) = \frac{n(t)}{n(0)} = \exp(-\sigma t), \quad (4)$$

式中 $n(0)$ 为 $t=0$ 时的初始密度.

单从等温退火试验的角度, 在上述假设成立的基础上, 通过上述的几个等式, 能够得出两种不同温度的释放时间常数, 进而得到陷阱电荷的物理参数. 这种方法已被 McWhorter^[8]等用来预估 MOS 晶体管几种温度下的长期行为.

2.2. 等时退火的基本方程

在等时退火试验中, 样品的温度近似线性增长, 在不同的温度下, 测试相关参数. 此时, T 不是一个常量, 而是时间的函数. 将 (3) 式代入 (2) 式, 得到

$$n(T) = n(0) \exp\left[-\nu \int_0^t \exp\left(-\frac{E}{kT(t')}\right) dt'\right] \quad (5)$$

式中 $n(0)$ 是 $t=0$ 时的初始密度. 当升温曲线可以用如下等式表示时

$$T = ct + T_0, \quad (6)$$

温度是时间的线性函数, 并且 $dT/dt = c$, 这里的 c 定义为加热率, T_0 为 T 的初始值. 因此, 以温度为函数时, 密度的变化可由下式表述:

$$n(T) = n(0) \exp\left[-\frac{\nu}{c} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT'\right]. \quad (7)$$

曲线的拐点 ($dn(T)/dT$ 的最大值) 所对应的温度, 定义为特性温度 T^* .

由于 $dn(T)/dT$ 在 $T = T^*$ 时达最大值, 可以得出

$$\left(\frac{d^2 n(T)}{dT^2}\right)_{T=T^*} = 0. \quad (8)$$

从 (8) 式, 可以得出特性温度 T^* , 频率因子, 加热率和激发能的关系

$$\frac{E}{kT^*} = \ln\left(\frac{\nu k T^{*2}}{cE}\right). \quad (9)$$

加热率由试验决定, 在频率因子已知的条件下, 我们可以通过上式计算出对应任何试验得出的特性温度 T^* 的激发能. Fleetwood 等人通过测试热激电流来确定特性温度, 热激电流所表征的是逃离陷阱的电荷值, 这种方法是许多确定陷阱特性参数方法的一种.

在考虑外加电场时 (7) 式变为

$$n(T) = n_0 \exp\left[-\frac{\nu}{c} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E - R(t)}{kT'}\right) dT'\right], \quad (10)$$

其中 $R(t) = \beta \sqrt{E(t)}$, $E(t)$ 为栅上加外电场. $\beta =$

$0.5 \sqrt{\frac{q}{\pi \epsilon_{\text{ox}}}} \epsilon_{\text{ox}}$ 为 SiO_2 介电常数.

3. 实 验

3.1. 样品

实验中所用的样品为骊山微电子公司生产的加固型 CC4007-双互补对 CMOS 倒相器. 硅衬底材料为 $\langle 100 \rangle$ 晶向, 电阻率为 $1-2 \Omega \cdot \text{cm}$. 制备工艺采用 $3 \mu\text{m}$ 硅栅工艺, 栅氧化制备工艺为干氧化, 氧化温度为 1000°C , 栅氧化层厚度为 $t_{\text{ox}} = 70\text{nm}$.

3.2. 辐照与测量

辐照在西北核技术研究所的 ^{60}Co γ 射线源上进

行, 辐照温度为室温, 辐照剂量率为 $44\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$, 一部分器件辐照总剂量为 $1 \times 10^5 \text{rad}(\text{Si})$. 辐射期间, $V_{\text{CS}} = V_{\text{DD}} = +5\text{V}$, $V_{\text{SS}} = 0\text{V}$, 此时 NMOS 管导通, PMOS 管截止, 处于最劣偏置状态.

由于本实验主要关心辐射后的退火效应, 因此, 辐射中间未采点测量. 辐照前后及退火过程中的 $I-V$ 曲线测量和参数提取是通过“半导体参数自动化测量系统”完成的. 辐射后一部分器件进行 100°C 等温退火, 另一部分器件进行 $25^\circ\text{C}-275^\circ\text{C}$ 的等时退火.

3.3. 等时退火

等时退火温度是一阶梯函数, 步长为 25°C , 范围为 $25^\circ\text{C}-275^\circ\text{C}$, 每次退火时间为 10min , 退火速度 (即加热率) 为 $4.16 \times 10^{-2} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$. 在每一步长温度点取出器件测量, 考察其温度依赖效应. 等时退火偏置同温退火. 参数测量同样在器件冷却至室温后再进行.

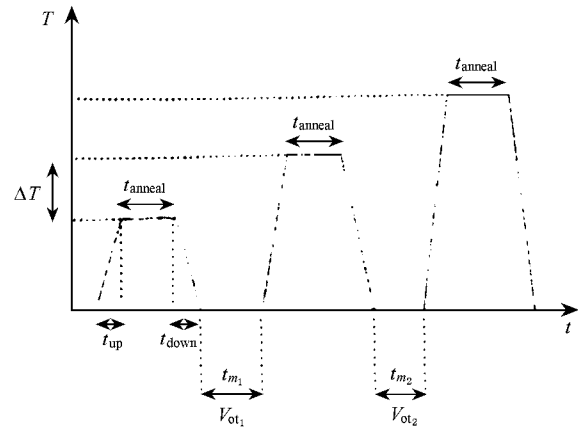


图 1 等时退火温度变化示意图

等时退火试验中, 需满足几个基本条件: 1) 器件达到退火温度的时间 t_{up} 和器件冷却到室温的时间 t_{down} 相对于退火时间 t_{anneal} 较小, 对于 $n(t)$ 的下降, 退火时间 t_{anneal} 起主要作用. 2) 室温下的测量时间 t_{measure} 对参数影响不大. 3) 经过一系列相等时间周期的退火, 在室温下测量的参量 ΔV_{th} 或 ΔV_{ot} 的变化与 TSP 法是等价的. 本试验中, t_{up} 近似为 1min , 能够保证器件快速达到热平衡. 等时退火的加热率为

$$c = \frac{\Delta T}{t_{\text{anneal}}}. \quad (11)$$

在上述条件均成立的前提下, 等时退火可以近似为一个线性温升的过程, 从而满足上述表征温升的基本等式. 等时退火温度变化如图 1 所示.

3.4. 等温退火

等温退火的温度设置为 100°C 恒定不变,在不同的时间点取出器件测量,考察其时间依赖效应.退火分三种偏置:1) $V_1 = 5\text{V}, V_{\text{dd}} = 5\text{V}, V_{\text{ss}} = 0\text{V}$; 2) $V_1 = 0\text{V}, V_{\text{dd}} = 5\text{V}, V_{\text{ss}} = 0\text{V}$; 3) 浮空. 进行参数测量时,将器件从退火炉中取出,并使其迅速冷却至室温,以减少此时的逃脱过程.

4. 实验结果

4.1. 等温退火结果

经过总剂量 $1 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 辐照的器件,在 100°C 下经过 175h 的退火,其阈值电压的变化情况示于图 2. 图中第一个点为辐照前值,第二个点为辐照后即退火初始值. 我们定义由界面态电荷引起的阈值电压漂移为 ΔV_{it} , 由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移为 ΔV_{ot} (前面已经定义), 由两种电荷共同作用引起的阈值电压的漂移为 ΔV_{th} . 从图中可以明显地看出,辐照后,氧化物陷阱电荷产生量明显大于界面态,氧化物陷阱电荷在退火初期快速减少,致使其引起的阈值电压分量 ΔV_{ot} 快速回漂. 而界面态在辐照产生一定数量的基础上,高温下继续增加. 高温下氧化物陷阱电荷退火与界面态的快速产生同时发生,它们综合作用的结果,使阈值电压迅速回漂, 10^5s 后已超过辐照前值,出现“反弹”现象. 阈值电压反弹后,回漂速度变缓,因为此时界面态接近饱和,氧化物陷阱电荷大部分已退火. 退火过程中阈值电压和氧化物陷阱电荷分量均近似线性回漂,符合线性响应理论^[9].

图 3 为 100°C 等温退火实验结果曲线. 图中采用了一个归一化的分量“未退火部分”来测量等温退火过程. 其中“未退火部分”定义为

$$N = \frac{V_{\text{th}} - V_{\text{th}}(\text{辐照前})}{V_{\text{th}}(\text{辐照后}) - V_{\text{th}}(\text{辐照前})}$$

图中第一个参考点即为刚刚辐照后的阈值电压比值 ($= 1$). 图中的三条曲线分别是 MOS 管加 $+5\text{V}$ 栅偏压、 0V 栅偏压和浮空三种退火偏置下的归一化阈值电压变化曲线. 从图中可以明显看出, $+5\text{V}$ 栅偏压下的退火速度明显大于 0V 栅偏压和浮空退火偏置下的退火速度. 三种偏置条件下的退火曲线均近似线性. 加电场条件下,线性趋势没有变化,而 0V 栅

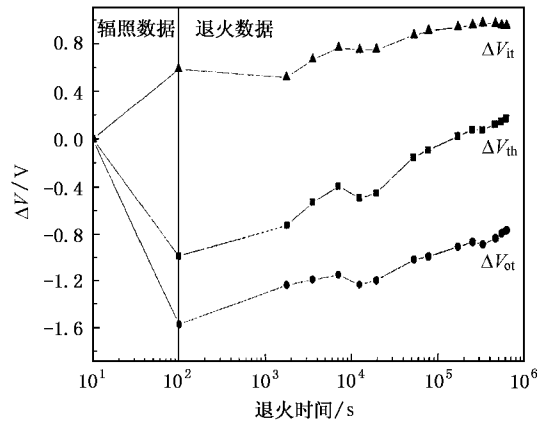


图 2 100°C 等温退火过程中阈值电压及其分量的变化

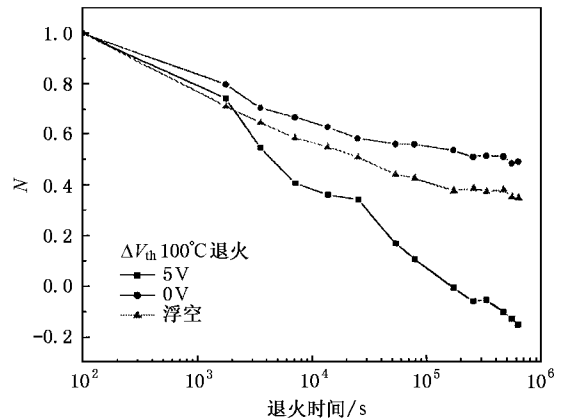


图 3 100°C 等温退火归一化结果曲线

偏压和浮空两种条件下,在退火后期速度变缓.这是由于在单纯的热激发作用下,退火在长时间下会出现饱和;而在加栅压条件下,热激发的过程中,同时有外加电场引起的隧道效应^[8],从而在实验时间范围内,退火曲线仍呈线性趋势.

4.2. 等时退火结果

图 4 给出了 25°C — 250°C 等时退火过程中阈值电压及其分量的变化. 进行等时退火的器件经过了 $1 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 的总剂量辐照. 在等时退火过程中,界面态随着温度的升高而增加,氧化物陷阱电荷随着温度的升高而减少,两者的综合作用使阈值电压迅速回漂. 阈值电压虽然大幅度回漂,但并未达到辐照前值. 实验中还发现, $+5\text{V}$ 栅偏压退火时,界面态引起的阈值电压漂移 ΔV_{it} 均在 225°C 回落,界面态出现退火;而在其他偏置退火情况,回落的温度为 175°C .

图 5 给出了不同退火偏置情况下的退火过程. 从图中可以看出, +5V 栅偏压退火速度最快, 0V 栅偏压退火与浮空状态接近, 退火速度远远低于 +5V 栅偏压情况. 在 250℃ 退火后, +5V 栅偏压退火的阈值电压已恢复了 84%, 而 0V 栅偏压与浮空状态退火的阈值电压仅恢复了 40%. 对这种器件而言, 单纯靠热激发效应无法使阈值电压恢复到初始值, 退火时加上电场后, 温度效应与隧道效应的综合结果, 使阈值电压恢复至接近初始值.

电荷分量进行预估, 但有一定的误差.

对实验测量的等时退火曲线, 对其进行拟合, 然后进行微分, 找出其特性温度. 图 6 给出了 NMOS 管阈值电压退火曲线微分后的结果, 此图中曲线的极值点所对应的温度为特性温度 T^* .

从图 6 中可以看出, 150℃ 为此样品的特性温度. 利用牛顿迭代法, 通过(9)式计算出特性温度下相应的激发能. 特性温度 150℃ 的激发能为 0.815eV.

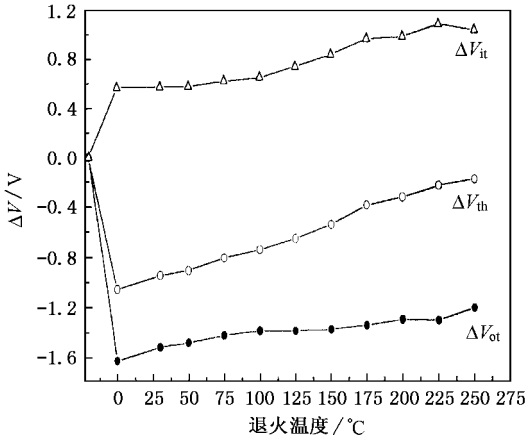


图 4 +5V 栅压等时退火阈值电压的变化

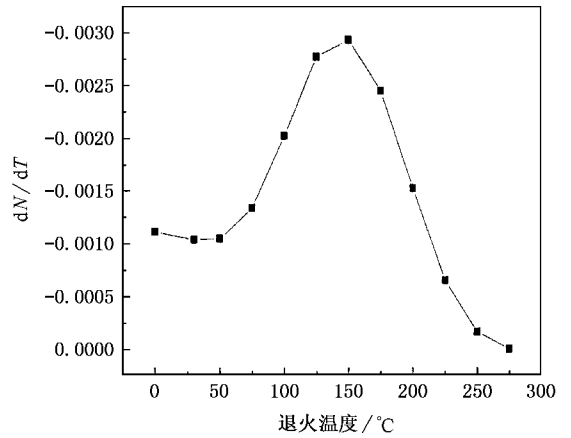


图 6 等时退火曲线的微分确定特性温度

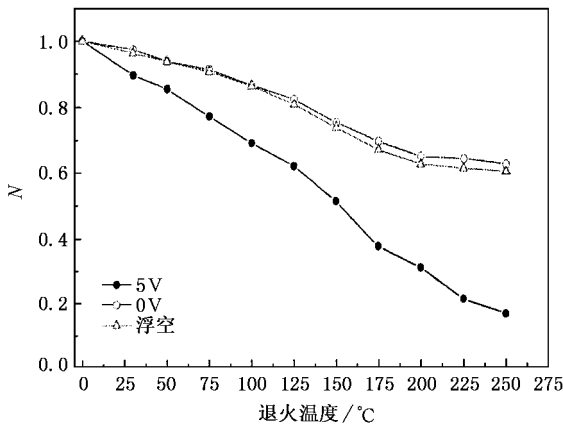


图 5 不同偏置下等时退火速度的比较

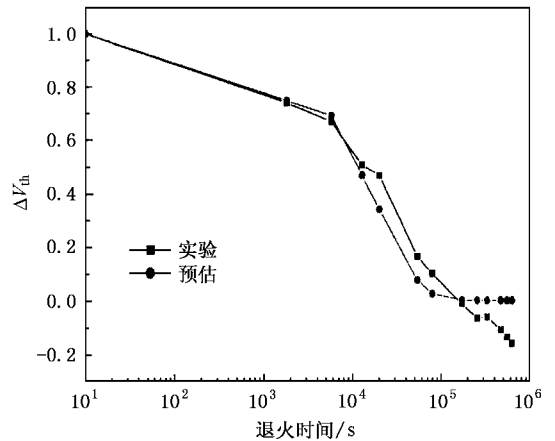


图 7 实验和预估的等温退火曲线

4.3. 等温退火效应预估

由于分离氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移分量 ΔV_{ot} 有一定的误差, 这里采用阈值电压的归一化量进行等时退火预估等温退火. 本实验所用的器件, 氧化层较厚, 阈值电压的漂移主要由正氧化物陷阱电荷引起, 因此可以用阈值电压代替氧化物陷阱

计算时, 逃脱频率 ν 取值为 $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ [10]. 在得到了特性温度和激发能后, 将其代入(3)式和(4)式中, 可以预估在恒定温度 100℃ 下的退火曲线, 结果示于图 7. 用来预估的参量是阈值电压的归一化量: 未退火部分随退火时间的变化, 其定义已在前文中给出. 图中第一个点定义为参考点, 是辐照后马上测得的阈值电压的未退火部分, $t \approx 0 \text{ s}$.

图 7 中曲线是在 +5V 偏置条件下的实验和预估结果, MOS 管栅极加 +5V 偏压后, 引起势垒变化量, 运用 Fleetwood 的方法^[11], 经计算为 $R(t) = 0.16eV$. 从图中可以看出, 预估曲线与实验曲线吻合得较好, 尤其在 $t < 2 \times 10^5 s$ 时. 当 $t > 2 \times 10^5 s$, 预估的结果不再变化, 而实验的结果却出现了反弹, 即阈值电压超过辐照前值.

5. 结 论

根据我们对损伤后 MOS 器件的等温和等时

退火特性进行研究, 可以得出以下实验结论.

1. 在 100°C 等温退火和 25°C—250°C 的等时退火中, 100°C 等温退火是有效的, 等时退火所需的全过程时间最短.
2. 相对于 0V 和浮空偏置条件, +5V 栅偏压退火阈值电压恢复速度快、恢复程度大.
3. 利用等时退火可以进行等温退火效应预估, 预估结果与实验曲线吻合得较好. 这种方法只适用于氧化物陷阱电荷起主导作用的 MOS 器件, 对某些辐射效应主要由界面态引起的电路来说, 这种方法并不适用.

- [1] Zhan T Q , Liu J L , Li J J *et al* 1999 *Acta Phys . Sin .* **48** 2299 (in Chinese) [张廷庆、刘家璐、李建军等 1999 物理学报 **48** 2299]
- [2] Wang J P , Xu N J , Zhang T Q *et al* 2000 *Acta Phys . Sin .* **49** 1334 (in Chinese) [王剑屏、徐娜军、张廷庆等 2000 物理学报 **49** 1334]
- [3] Fan L , Ren D Y , Zhang G Q *et al* 2000 *Chin . J . Semicond* **21** 383 (in Chinese) [范 隆、任迪远、张国强等 2000 半导体学报 **21** 383]
- [4] Schwank J R and Winokur P S 1984 *IEEE Trans . Nucl . Scil .* **31** 1434
- [5] Lelis A J , Oldham T R and Delancey W M 1991 *IEEE Trans . Nucl . Scil .* **38** 1590

- [6] Fleetwood D M , Thome F V , Tsao S S *et al* 1988 *IEEE Trans . Nucl . Scil .* **35** 1099
- [7] Fleetwood D M , Dressendorfer P V , Turpin D C 1987 *IEEE Trans . Nucl . Scil .* **34** 1178
- [8] McWhorter S L *et al* 1990 *IEEE Tran . Nucl . Sci .* **37** 1682
- [9] Winokur P S , Kerris K G and Harper 1983 *IEEE Tran . Nucl . Sci .* **30** 4326
- [10] Saigne F , Dusseau L , Fesquet J 1997 *IEEE Tran . Nucl . Scil .* **44** 2001
- [11] Fleetwood D M , Miller S L and Reber R A 1992 *IEEE Tran . Nucl . Sci .* **39** 2192

Prediction on the characteristics of isothermal annealing by using isochronal annealing data

He Bao-Ping Wang Gui-Zhen Gong Jian-Cheng Luo Yin-Hong Li Yong-Hong

(Northwest Institute of Nuclear Technology , Xi 'an 710613 , China)

(Received 22 November 2002 ; revised manuscript received 8 January 2003)

Abstract

In this paper the characteristics of isothermal and isochronal annealing for post-radiated MOS transistor were studied. The results show that 100°C isothermal annealing is the most effective treatment , while the time of isochronal annealing is the shortest. Secondly , the recovery of threshold voltage under the +5V bias is the fastest and biggest , compared to that under 0V and float bias. These predicted results by using isochronal annealing data were compared with the experiment curve obtained from isothermal annealing , and the agreement is good.

Keywords : isothermal annealing , isochronal annealing , MOS device

PACC : 6180E , 6170A