

CMOS 器件辐照后热退火过程中 激发能分布的确定

何宝平, 陈伟, 张凤祁, 姚志斌

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要:对 CMOS 晶体管辐照后的等温、等时退火特性进行研究, 给出辐照敏感参数在等温、等时退火过程中随退火时间、退火温度的变化关系。根据退火模型计算了 CMOS 器件辐照后 25、100 °C 等温和 25~250 °C 等时退火过程中激发能的分布。结果表明: 25、100 °C 等温退火激发能范围为 0.65~0.76 eV 和 0.75~0.95 eV; 25~250 °C 等时退火的激发能范围在 0.5~1.1 eV 之间, 峰值位于 0.81 eV。
关键词:辐照后 CMOS 器件; 等时退火; 等温退火; 激发能

中图分类号: TN386.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)02-0232-05

Determination of Activation Energy Distribution During Thermal Annealing in Post-Irradiation CMOS Devices

HE Bao-ping, CHEN Wei, ZHANG Feng-qi, YAO Zhi-bin

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The annealing characteristics of isothermal and isochronal for post-irradiation CMOS transistor were studied. The relations about radiation sensitive parameters with isothermal annealing time and isochronal annealing temperature were given. The activation energy distribution during 25, 100 °C isothermal annealing and 25-250 °C isochronal annealing for post-irradiation CMOS devices were calculated by annealing model. According to the results, the ranges of activation energy for isothermal annealing at 25 °C, 100 °C are from 0.65 eV to 0.76 eV and from 0.75 eV to 0.95 eV, respectively. The range of activation energy for isochronal annealing during 25-250 °C is from 0.5 eV to 1.1 eV, and the peak of activation energy locates 0.81 eV.

Key words: post-irradiation CMOS transistor; isochronal annealing; isothermal annealing; activation energy

辐照在 MOS 结构的栅氧化层和场氧化层中产生陷阱电荷, 从而引起器件失效。辐照产生的陷阱电荷, 在一定条件下会逃离陷阱的俘

获, 即发生退火效应, 这会引起 MOS 晶体管衰退参数一定程度的恢复。早在 20 世纪 70 年代, 人们业已发现, MOS 晶体管辐照后损伤的

退火是一热激发过程^[1,2]。对氧化层较厚的 MOS 器件,在辐照后阈值电压的漂移过程中,氧化物陷阱电荷起主要作用。这里只讨论氧化层陷阱正电荷的热激发过程。在热激发过程中,俘获在 SiO₂ 禁带中不同能级位置上的正的陷阱电荷被释放到价带从而逃离氧化层。在物理机理探讨方面,几年来的一个难点是陷阱特性的确定。对于 MOS 器件,目前有两种通用方法,一是基于等温退火数据,二是对热激发(TSC)过程进行测量。等温退火方法确定陷阱特性主要基于在恒定温度下确定一时间常数,这种方法非常费时,对于激发能为 2 eV 的陷阱,100 °C 下退火时间要大于 1 a^[3]。热激发过程可通过在加热样品的同时对物理参数测量来确定陷阱的激发能级分布。本工作通过等时退火数据,研究 1 种确定激发能初始分布的方法。

1 辐射及退火实验

实验样品为加固型 CC4007RH-NMOS 倒相器,栅氧化层厚度为 $t_{\text{ox}} = 70 \text{ nm}$ 。辐照实验在西北核技术研究所的⁶⁰Co γ 射线源上进行,辐照温度为室温,辐照剂量率为 0.44 Gy/s(以 Si 计,下同),辐照总剂量为 $1 \times 10^3 \text{ Gy}$ 。辐照期间, $V_{\text{GS}} = V_{\text{DD}} = +5 \text{ V}$, $V_{\text{SS}} = 0 \text{ V}$,其中, V_{GS} 、 V_{DD} 和 V_{SS} 分别代表栅极、电源和地所施加的电压。此时,NMOS 管导通,PMOS 管截止,处于最劣偏置状态。辐射后第 1 部分器件进行 100 °C 等温退火,第 2 部分器件进行 25 °C 等温退火,第 3 部分器件进行 25~250 °C 等时退火。在退火过程中,所有器件处于浮空偏置状态。

在等时退火试验中,需满足以下几个基本条件(图 1):1) 器件达到退火温度的时间 t_u 和器件冷却到室温的时间 t_d 相对于退火时间 t_a 较短,对于密度函数 $n(t)$ 的下降,退火时间 t_a 起主要作用;2) 室温下的测量时间 t_m 对参数影响不大;3) 经过一系列相等时间周期的退火,在室温下测得参量 ΔV_{ot} 的变化。在上述条件均成立的前提下,等时退火可近似为温度线性上升过程。等时退火的加热率 $c_1 = \Delta T/t_a$ 。

在本工作中, t_u 近似为 1 min,能保证器件快速达到热平衡,以减少此时的逃脱过程。等时退火温度是一阶梯函数,温度范围为 25~

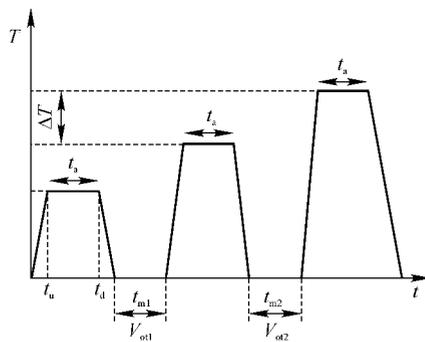


图 1 等时退火温度变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of temperature variation for isochronal anneal

250 °C,步长 25 °C,每次退火时间为 10 min,在每一步长温度点,将器件从退火炉中取出,迅速冷却至室温后进行参数测量。

在等温退火时,将退火炉温度设置为 100 和 25 °C 恒定不变,在不同时间点取出器件,迅速冷却到室温进行测量,考察其时间依赖效应。由于本实验主要关心辐射后的退火效应,因此,辐射过程中未采点测量。

2 热激发退火模型

加速实验研究的原则是寻求能等值真实任务的快速方法。对辐射诱导产生的电子-空穴对而言,电子迁移率较大,大部分在短时间内快速移至栅电极,逃离氧化层,空穴则大部分被氧化层陷阱俘获成为正的空间电荷。研究表明^[4],辐射诱导空穴的退火有两种模型,一种是隧道模型,另一种是热激发模型。这两种空穴退火模型各有自己的特点。隧道模型能用来解释空穴退火的电场效应,但不能很好解释温度效应;热激发模型能用来解释空穴退火的温度效应,但不能很好解释电场效应。本工作研究的器件在 25~250 °C 等时退火和 100 °C、25 °C 等温退火实验在浮空偏置状态下进行,因此,利用热激发模型来讨论氧化层俘获的空间正电荷逃逸。

将模型简单化,即将复合概率设为常量,并忽略电荷逃离陷阱后再次被俘获的概率。陷阱电荷密度与时间的关系由下式表示:

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

式中: t 为退火时间; $n(t)$ 为密度函数,这里, $n(t)$ 与正陷阱电荷密度成正比; σ 为单位时间内

1 个被俘获的陷阱电荷逃离陷阱的概率, σ 遵循 Arrhenius 等式, 有:

$$\sigma = A \exp(-\epsilon/kT) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得:

$$n(t) = n_0 \exp \left[-A \int_0^t \exp \left(-\frac{\epsilon}{kT(t)} \right) dt \right] \quad (3)$$

式中: n_0 和 $n(t)$ 分别是时间 $t=0$ 和 $t>0$ 时的电荷密度; k 为玻尔兹曼常数; T 为退火温度; A 为频率因子; ϵ 为陷阱电荷的激发能。

如果在一各种激发能均存在的系统中, $n(t)$ 变成了 $n(\epsilon, t)$, 它是能量和时间的函数, 总的电荷密度 $N(t)$ 则可通过下式计算:

$$N(t) = \int_0^\infty n(\epsilon, t) d\epsilon \quad (4)$$

$$N(t) = \int_0^\infty n_0(\epsilon) \exp \left[-A \int_0^t \exp \left(-\frac{\epsilon}{kT(t)} \right) dt \right] d\epsilon \quad (5)$$

2.1 等温退火分析

在等温退火试验中, T 不是时间 t 的函数, 这样, 式(5)变为:

$$N(t) = \int_0^\infty n_0(\epsilon) \exp(-A t \exp(-\epsilon/kT)) d\epsilon \quad (6)$$

令 $\theta(\epsilon, t) = \exp(-A t \exp(-\epsilon/kT))$, 式(6)可写为:

$$N(t) = \int_0^\infty n_0(\epsilon) \theta(\epsilon, t) d\epsilon \quad (7)$$

定义热激发前沿 ϵ_0 是处在发生最大数量的热激发退火过程的能量位置, 求 $\partial^2 \theta / \partial^2 \epsilon$, 然后令其等于零, 解得:

$$\epsilon_0 = kT \ln(At) \quad (8)$$

当 $\epsilon=0$ 时, 函数 $\theta(\epsilon, t) \approx 0$ 。本工作中, $A \approx 10^7 \text{ s}^{-1}$, $t > 10^2 \text{ s}$, 因此, $\epsilon = \infty$, $\theta = 1$ 。如果函数 $\theta(\epsilon, t)$ 被近似为:

$$\begin{cases} \theta(\epsilon, t) = 0 & (\epsilon \leq \epsilon_0) \\ \theta(\epsilon, t) = 1 & (\epsilon > \epsilon_0) \end{cases}$$

那么, 式(7)为:

$$N(t) \approx \int_{\epsilon_0}^\infty n_0(\epsilon) d\epsilon \quad (9)$$

从式(9)可得到:

$$dN(t)/dt \approx -n_0(\epsilon_0) d\epsilon_0/dt \quad (10)$$

再由式(8)、(10)可得:

$$n_0(\epsilon_0) \approx -\frac{t}{kT} dN(t)/dt \quad (11)$$

通过式(8)和式(11)可确定等温退火的初

始激发能谱。

2.2 等时退火分析

在等时退火试验中, 样品的温度近似线性增长, 在不同温度下, 测试相关参数。此时, T 不是常量, 而是时间的函数, 满足 $t = ckT$, c 为常数。在等时退火实验中, 步长为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 每一步退火 10 min , 这样, 可得 $c = 2.78 \times 10^5 \text{ s/eV}$ 。在等时退火中, 按 Vitaly Danchenko^[1] 提出的近似方法, 式(5)可写为:

$$N(t) = \int_0^\infty n_0(\epsilon) \exp[-AckTE_m(\epsilon/kT)] d\epsilon \quad (12)$$

$$\text{式中: } E_m(x) = x^{m-1} \int_0^\infty u^{-m} e^{-u} du。$$

利用性质 $dE_m(x)/dx = -E_{m-1}(x)$ 可近似得出:

$$E_m \approx (x-m)^{-1} e^{-x} \quad (13)$$

等时退火过程中热激发前沿 ϵ_0 和电荷密度 $n_0(\epsilon_0)$ 可通过下式^[1]给出:

$$\frac{\epsilon_0}{kT} + \ln \left(\frac{\epsilon_0}{kT} + 2 \right) = \ln(AckT) \quad (14)$$

$$n_0(\epsilon_0) = - \left(\frac{1}{\epsilon_0/kT + 1} \right) dN(t)/d(kT) \quad (15)$$

通过式(14)、(15)可确定等时退火的初始激发能谱。

3 实验结果

图2所示为采用归一化分量“未退火部分”来表征辐照后器件参数(由氧化物陷阱电荷引起的阈值电压漂移 ΔV_{ot}) 在等时、等温退火过程中的变化。

归一化分量“未退火部分”定义为:

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

图2中的第1个参考点即为辐照结束的阈值电压比值, 此值为1。

从图2可见, 随着退火温度升高或退火时间增长, 阈值电压迅速回漂。回漂的主要原因是氧化物陷阱电荷在高温下快速退火。另一原因则是高温下界面态的产生。因实验条件所限, 等时退火温度只进行到 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在 $25 \sim 250 \text{ }^\circ\text{C}$ 等时退火过程中, 氧化物陷阱电荷退掉了 40% , 在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的等温退火过程中, 氧化物陷阱电荷退掉了 30% 。

4 激发能分布的确定

利用式(13)计算出等时退火过程中各温度下的激发能。计算时, 逃逸频率 A 取值为 $1 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 在 50、75、100、125、150、175、200、225、250 $^{\circ}\text{C}$ 下的激发能分别为 0.613、0.660、0.714、0.760、0.812、0.863、0.910、0.962、1.008 eV。

根据激发能和各温度下的退火速率, 由式(14)得到等时退火过程中各激发能下的初始分布, 结果示于图3。

5 分析与讨论

这里所讨论的陷阱正电荷的逃逸只假设与其自身的能级位置及温度和时间相关, 忽略陷

阱正电荷与从 Si 中注入的隧道电子的复合。实际上, 从硅衬底中隧道注入到 SiO_2 层的电子以及辐射在 SiO_2 层中产生的电子均能与陷阱正电荷中和。辐射产生的电子的迁移率很大, 大部分在短时间内快速移至栅电极, 逃离氧化层。在不施加栅电压退火条件下, 隧道注入电子很少, 本文所列数据曲线是浮空状态下退火的数据, 未施加任何偏置, 故忽略了由于电场引起势垒降低而引发的隧道注入。

等时退火可看作是一系列温度阶梯上升的短时等温退火, 但等时退火所测量的是不同温度短时间内所引起的参数的变化, 而等温退火则注重时间常量。用等时退火方法确定激发能, 容易掌握且节省时间。在掌握了陷阱电荷的

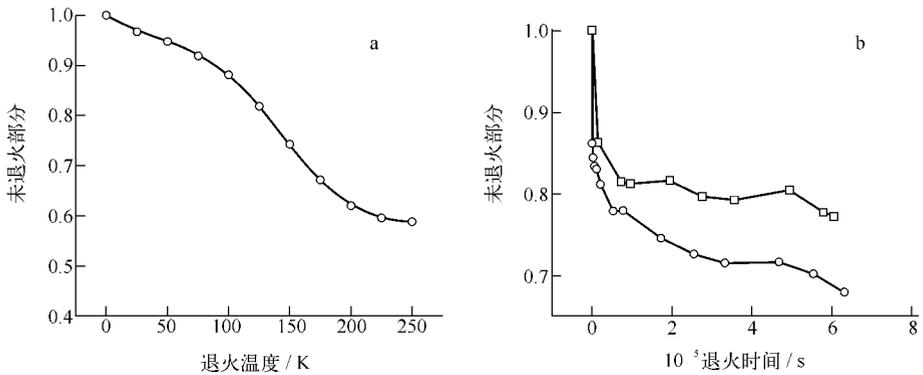


图2 CC4007RH-NMOS 器件在 25~250 $^{\circ}\text{C}$ 等时退火(a)和 25、100 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火(b)的退火特性

Fig.2 Characteristics of isochronal annealing at 25-250 $^{\circ}\text{C}$ (a), isothermal annealing at 25 $^{\circ}\text{C}$ and 100 $^{\circ}\text{C}$ (b) for CC4007RH-NMOS device

a: \bigcirc —25~250 $^{\circ}\text{C}$ 等时退火; b: \square —25 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火, \bigcirc —100 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火

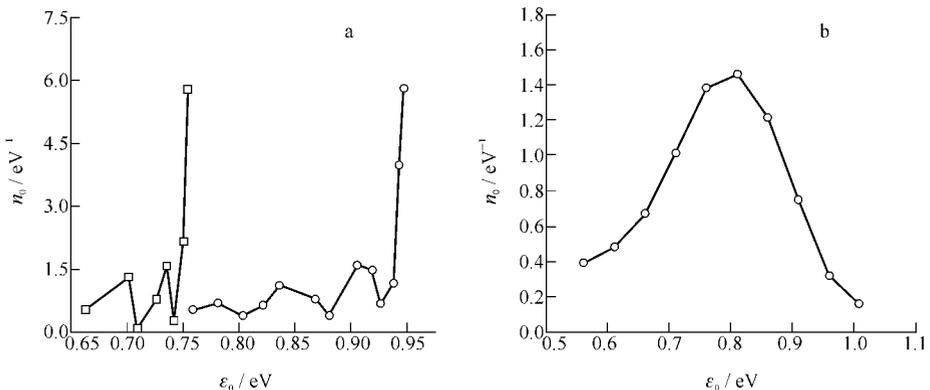


图3 25 和 100 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火过程(a)和 25~250 $^{\circ}\text{C}$ 等时退火过程(b)的激发能

Fig.3 Activation energy distribution during 25 $^{\circ}\text{C}$ and 100 $^{\circ}\text{C}$ isothermal annealing(a) and 25-250 $^{\circ}\text{C}$ isochronal annealing(b)

a: \square —25 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火, \bigcirc —100 $^{\circ}\text{C}$ 等温退火;

b: 退火温度从左至右分别为 25、50、75、100、125、150、175、200、225、250 $^{\circ}\text{C}$

激发能的基础上,进一步分析陷阱电荷在 SiO_2 中的能量分布和密度分布,这对更深层次地进行辐射损伤机理分析及辐射加固工艺的探讨具有深远意义。

无论是等温退火还是等时退火,它们的热激发原理均是氧化层中的陷阱空穴被激发到氧化层价带,陷阱电荷一旦进入价带,便可能随机跳跃进入界面和硅衬底^[4]。由于辐照加等时退火在一天内即可完成全部实验,而标准程序 MIL-STD 883 1019.5 和 ESA22900 中规定的 100 °C、168 h 的退火实验所需时间长,耗资大。等时退火除了具有周期短、耗资少等特点外,它还能提供实验器件的更多物理信息。因此,等时退火不仅效果可与等温退火相媲美,而且具有实验时间大幅缩短的优势。通过进一步的理论计算,可以找出等时退火代替等温退火来预估空间低剂量率行为的方法。

参考文献:

- [1] DANCHENKO V, UPENDAR D D. Characteristics of thermal annealing of radiation damage in MOSFETs [J]. Journal of Applied Physics, 1968,39(5):2 417-2 427.
- [2] SIMONS M, HUGHES H L. Determining the energy distribution of pulse-radiation-induced charge in MOS structures from rapid annealing measurements[J]. IEEE Tran Nucl Sci,1972,19 (6):282-290.
- [3] DUSSEAU L, SAIGNE F R. Prediction of low dose-rate effects in power metal oxide semiconductor field effect transistors based on isochronal annealing measurement[J]. J Appl Phys, 1997, 81(5): 2 437-2 441.
- [4] MCWHORTER P J, MILLER S L, MILLER W M. Modeling the anneal of radiation-trapped holes in a varying thermal environment[J]. IEEE Tran Nucl Sci, 1990,37(6):1 682-1 688.

氢捕集化合物及其制备方法和用途

【公开日】2006.03.15

【分类号】H01J7/18

【公开号】CN1748281

【申请号】CN200480003834.2

【申请日】2004.08.25

【申请人】法国原子能委员会

【文摘】本发明涉及一种氢捕集化合物,以及用于制备该化合物的方法和该化合物的用途。本发明可以应用于放出氢气及为了安全的原因氢气必须被捕集的所有场合中。本发明的氢捕集化合物的特征在于它包含至少一种化学式为 $\text{MX}(\text{OH})$ 的金属盐,其中, M 代表二价的过渡元素,例如 Co 或 Ni; O 代表氧原子; X 代表元素周期表中第 16 族中除 O 之外的原子,例如硫原子; H 代表氢原子。本发明的氢捕集化合物对于捕集氢、材料内部的氢和游离氢是有效的。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》