

PMOS 剂量计的退火特性*

范 隆 任迪远 张国强 严荣良 艾尔肯

(中国科学院新疆物理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 研究了 PMOS 剂量计在不同温度和栅偏置下的辐照退火表现。结果表明: 温度和退火偏置条件是影响初始退火速率和退火幅度的重要因素, 较高退火温度下, 退火速率高, 幅度大; 相同退火温度下, 正偏置与负偏置相比有加速退火的作用, 其退火幅度也较大。在 180°C, 零偏条件下获得了最快的 100% 的退火效果; 用模型讨论了实验结果。

关键词: 剂量计; PMOS; 退火特性

PACC: 7340Q; **EEACC:** 2560R

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)04-0383-05

Annealing Characteristics of PMOS Dosimeters^{*}

FAN Long, REN Di-yuan, ZHANG Guo-qiang, YAN Rong-liang and Erkin

(Xinjiang Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Received 28 October 1998, revised manuscript received 4 February 1999

Abstract: The annealing behaviors of PMOS Dosimeters with various gate biases over a wide temperature range have been investigated. The results show that the temperature and gate bias during annealing are two important factors influenced on the anneal rate and fading of threshold voltage shifts. The higher the temperature during annealing, the faster the anneal rate and the deeper the fading of threshold voltage shift. At same anneal temperature, the anneal rate could be raised, and more fading could be achieved by biased positive voltage than by negative voltage between gate and source. The fastest near 100% and fading near 100% could be obtained with zero bias at 180°C. The experimental results are interpreted by using an combined Anneal model.

Key words: dosimeter; PMOS; annealing

PACC: 7340Q; **EEACC:** 2560R

Article ID: 0253-4177(2000)04-0383-05

* 中国科学院院长基金特别支持项目[Project Specially Supported by Director of Chinese Academy of Sciences].

范 隆 男, 1967 年出生, 助理研究员, 从事 MOS 辐射损伤效应、机理和 PMOS 剂量计的研究。

任迪远 男, 1950 年出生, 研究员, 从事半导体器件与电路抗辐射电子学方面的研究。

1998-10-28 收到, 1999-02-04 定稿

1 引言

PMOS 剂量计是利用 P 沟道 MOS 晶体管受电离辐射后感生的氧化物正电荷与施主界面态造成的阈电压漂移来测量辐射总剂量的。已有研究表明^[1-3]: MOS 管在停止辐照后, 辐射感生氧化物正电荷会发生所谓“detraped”退火, 其方式有两种: 一是隧道模式(tunneling model), 二是热发射模式(thermal emission model); 施主界面态也会出现继续生长和热退火。因此, 研究厚栅氧非加固 PMOS 管阈电压漂移在辐照后的退火规律, 对于 PMOS 剂量计的应用十分重要。以往对 MOS 损伤退火的研究多集中在加固器件电路方面, 对厚栅氧层非加固 PMOS 管的退火研究^[4,5]报道不多, 且不全面。虽然二者退火机理是一样的, 但用于 PMOS 剂量计的探头是采用非加固工艺制造的, 由工艺引入的界面缺陷较多, 且空间分布不同于加固工艺的样品, 因而, 其辐射损伤退火受温度和偏置电场的影响会与加固工艺器件的退火规律有所不同。虽然非加固工艺的 MOS 管与加固工艺的相比, 前者辐射感生的缺陷退火作用较小, 但是, 对正在使用的 PMOS 剂量计来讲, 损伤退火无论大小都是不希望发生的。因而, 研究掌握抑制和加速损伤退火的条件, 对控制和利用退火的发生, 提高 PMOS 剂量计的使用精度, 开展 PMOS 管的快速退火后的重复利用研究都具有重要意义。

2 实验方法

实验样品采用 PMOS 剂量计专用的非加固 PMOS 管, 栅氧层厚度为 200nm, 采用 1000℃, 干氧+ HCl 氧化工艺, 器件沟道宽长比为 1500/12。

试验样品的辐照都在新疆物理所 14 万居里 Co-60 γ 射线源下完成。

PMOS 样品在 + / - 5V 偏置下, 用 Co-60 γ 射线源辐照同样的剂量(剂量率 2.16rad(Si)/s, 辐照时间为 2h)。辐照结束后, 将样品的所有管脚短接, 室温放置 48h 以上, 以利于其界面态的充分生长, 测量所有样品发现, 阈值都基本达到相对稳定(阈值随时间的漂移很小)。然后, 分别在干燥箱中进行不同温度和不同偏置下的退火实验。

在室温 25℃、100℃、150℃、180℃的温度对两组不同偏置辐照的样品进行退火, 在 180℃下, 采用不同的偏置电压 V_T : 0V、- 5V、+ 5V、- 10V、+ 10V 进行退火。所谓 V_T 偏置, 是指 PMOS 管的阈电压测量状态下(从 PMOS 管源极到漏极注入 10 μ A 的恒流), 栅极和源极(与衬底短接)之间建立起的偏压即为阈电压 V_T 。因此, V_T 偏置, 是对阈电压连续监测的状态。在固定正负偏置下进行间断的阈电压监测。测量采用在线方式, 以便获得不同环境下退火过程的实时变化。每次阈电压的测量在偏置变换后的 15s 内完成, 由于在从不同偏置转换到测量状态(即 V_T 偏置)时, 都会出现阈值的小幅波动(一般在十几到几十 mV), 实验中都取加测量恒流后 10s 时的数据。

阈电压采用自制测试仪测量, 试验用升温设备为 DGB/20-002 台式干燥箱。

3 实验结果

3.1 温度对退火的影响

图 1(a) 和(b) 给出了 PMOS 剂量计经受 Co-60 γ 辐照后, 在两种偏置电压下不同温度的退火-时间关系。其中 ΔV_{TR} 表示退火后阈电压相对于辐照停止时阈电压值的漂移, ΔV_{T0} 代表辐照结束时阈电压相对于辐照前初值的漂移。其比值 $\Delta V_T / \Delta V_{T0}$ 则表征了阈电压辐照结束后退火幅度的大小。当其为正时, 表明阈电压有正向退火发生, 当其为负时, 表明阈电压出现“反向退火”(增长)。很明显地看到, 温度和偏置是退火速率和程度的决定性因素。高温退火, 初始退火速率就高, 退火幅度也较大; 180℃、+ 5V 偏置下退火 50h, 几

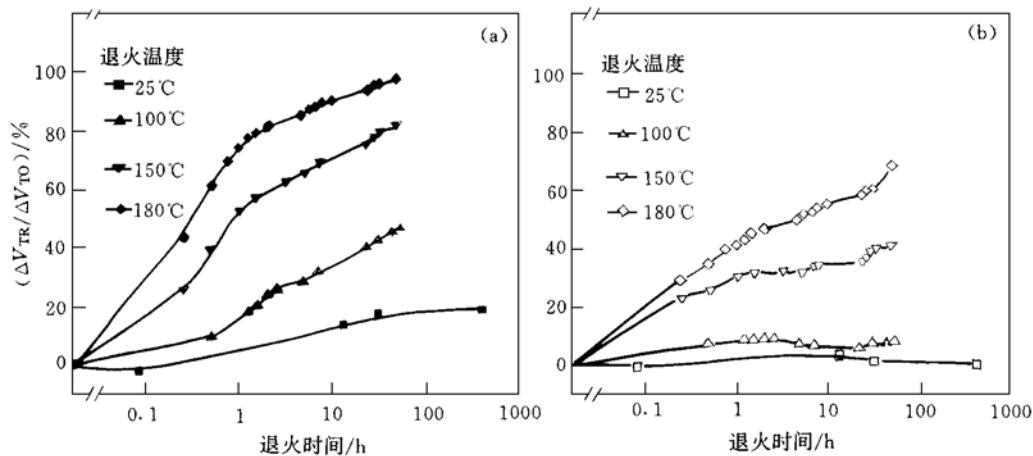


图 1 PMOS 剂量计在不同温度下的退火曲线

(a) 为+ 5V 偏置退火; (b) 为- 5V 偏置退火.

FIG. 1 Relative Shift of Threshold Voltage Versus Annealing Time at Different Temperatures

乎发生完全退火. 低温条件下的退火则较小, 室温 25℃、+ 5V 偏置下退火 50h, 才恢复了近 20%. 同时, 也看到, - 5V 偏置退火下, 图 1(b) 所表现出的温度影响与图(a)有着相似的温度依赖关系, 但有所不同的是: 同样退火温度下, 负偏置条件有较明显抑制退火的表现, 尤其表现在对退火初期 1h 内的退火速率影响上. 负偏置的初始速率明显低于正偏.

3.2 偏置对退火的影响

图 1(a) 和 (b) 以及图 2 所给出的结果表明, 在实验的任一温度上, 偏置对退火的影响都十分明显. 正偏有加速初始退火速率的作用, 负偏则起到抑制作用. 特别从图 2 给出的 180℃、不同偏置条件下的退火-时间关系, 可以看到, 负偏压越高, 抑制作用越明显. 正偏压与负偏压相比能较明显提高初始退火速率, 但正偏压之间, 相对较低的电压却表现出更有利退火, 特别是零偏(所有管脚短接)退火, 其退火程度最大, 50h, 达到了 100%.

从图 1 和图 2 中的退火-时间关系均可发现, 在经过高温(> 150℃)、正偏快速退火后, 都会出现明显的退火速率降低的“饱和”现象. 而负偏在退火 20~30h 后却有加速退火的表现.

4 讨论

PMOS 剂量计退火受温度、偏置的影响可归结为氧化物中俘获空穴的退火和界面态的后生长与热退火多重过程受温度和偏置影响的共同作用. 本文将利用空穴的“隧道退火”和“热发射退火”联合模型及界面态的影响讨论实验结果, 因而有必要首先了解俘获空穴的“隧道退火”和“热发射退火”受温度、偏置的影响模式.

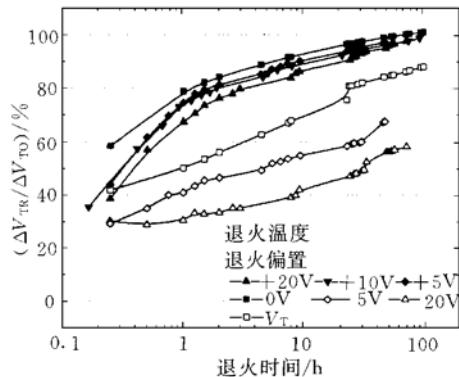


图 2 180℃退火, 不同偏置条件退火对阈电压的影响

FIG. 2 Relative Increase of Threshold Voltage Versus Annealing Time Under Different Bias Voltages at 180℃

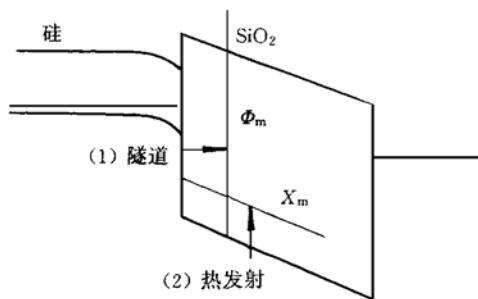


图 3 隧道退火与热发射退火模型能带图

FIG. 3 Band Diagram of "Tunneling Annealing" and "Thermal Annealing" Model for Trapped Holes

(2) 由于正偏置能降低隧道贯穿势垒,因此,使 β 减小,进而增大了“隧道前沿” X_m 向 SiO_2 内移动的速度,负偏则作用相反。

(3) 无论是“热发射前沿” Φ_m 还是“隧道前沿” X_m ,随退火时间的增加都有一个由快速到缓慢的“饱和”过程。

但是,温度对“热发射退火”的影响,还受到空穴密度能量分布的制约。譬如对于非加固厚栅氧化层PMOS而言,氧化物中存在大量深能级陷阱俘获的空穴,那么,在“热发射前沿” Φ_m 未到达深能级区以前,温度的变化对“热发射退火”的影响就小。

同理,偏置对“隧道退火”的影响也受到俘获空穴密度在氧化物空间分布的制约。而俘获空穴密度的空间分布主要受样品制造工艺和辐照偏置所决定。专为PMOS剂量计制造的PMOS管,在靠近 SiO_2/Si 界面10nm附近存有大量的空穴陷阱,正偏置辐照,容易在更靠近界面的区域形成空间电荷层。在 X_m 未达到俘获空穴空间分布上的密集区以前,偏置对隧道退火的影响不明显。

界面态对阈电压退火的影响主要由其后生长效应和热退火共同决定,温度和偏置的影响行为分别如下:

(1) 温度并不影响辐照感生的界面陷阱数量,仅影响辐照后界面态形成达到饱和的时间长短。在室温下,界面态形成达到饱和在千秒量级。而在100°C,仅为秒量级。界面态的“热退火”在常温下不发生,除非样品有非常高的界面陷阱密度。明显的退火仅在温度 $T \geq 100^\circ\text{C}$ 时发生^[2]。

(2) 正偏置有促进界面态形成的作用,这是因为正偏置使 SiO_2 中正电荷向 Si/SiO_2 界面运动,导致界面 $\text{Si}-\text{H}$ 等弱键继续断裂引起界面态的可能性增大^[6,7],从而促使界面态产生。负偏置的作用则相反。

对PMOS剂量计专用的非加固厚栅氧化层PMOS管来说,其辐照感生界面态在总阈电压漂移中的贡献是相对较小的。因此,温度和偏置对阈电压退火的影响主要以对俘获空穴两种退火机制的影响为主。仅当空穴退火被抑制或不再发生时,界面态的后生长和热退火作用才能显现出来,使阈电压退火曲线偏离仅由空穴退火形成的退火曲线。

本文的实验样品,在辐照后都经过一段时间的零偏室温贮存,在室温下测量其阈电压值随时间的漂移很小,表明界面态后生长和俘获空穴的“隧道退火”作用都很弱,已接近饱和。当在室温25°C继续加偏压退火,从图1结果可以看到,+5V偏置下,阈电压表现为正向退火;-5V偏置下,阈电压基本没有退火。这说明正偏置对俘获空穴“隧道退火”的促进作用强于对界面态生长的作用,负偏置退火下,两个作用均受到抑制,以致于阈电压基本没有发生退火。

在100°C、150°C和180°C高温度下,俘获空穴的“热发射退火”作用开始参与影响。从(1)式可知,温度 T 越高, Φ_m 随时间的移动速度越快,能较早达到俘获空穴密度能量分布的较密集区,因而,随着温度的增加,从图1(a)和(b)中0~1h的初始退火曲线可看到,阈电压初始退火速率明显加快。但显然, Φ_m 与退火时间

借助图3所给出两种空穴退火模式的简单能带示意图^[3],可以看到,发生最大几率的“热发射前沿”的能量值 Φ_m (陷阱能级与氧化物价带之差)和“隧道前沿”位置(SiO_2 中从界面起的距离) X_m 分别与时间 t 的关系为:

$$\Phi_m = (kT/q) \ln(A T^2 t) \quad (1)$$

$$X_m = (1/2\beta) \ln(\alpha t) \quad (2)$$

式中 k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; A 为与陷阱俘获截面有关的参数; β 为描述势垒高低的参数; α 为空穴逃逸陷阱的频率,与温度基本无关。从(1)、(2)式可直接推出以下结论:

(1) 退火温度 T 越高,“热发射前沿” Φ_m 向较深陷阱能级移动的速度越大。

的对数关系,决定了“热发射退火”存在由快速变为缓慢的饱和现象,这在图1、图2的高温($> 150^{\circ}\text{C}$)、正偏退火曲线上均可观察到,而负偏退火曲线在20~30h后却有加速退火的表现,可解释为在高温度退火过程中,有明显的界面态的“热退火”作用发生,造成了阈电压退火速率加快的趋势。

对图2所示的+5V、+10V和+20V偏置下的退火曲线,可认为是正偏置对阈电压退火的双重作用结果。正偏置在加速俘获空穴的“隧道退火”作用,导致阈电压正向退火的同时,又能进一步促使新的界面态形成,导致阈电压反向退火。尤其是较高的正偏置下,其界面态的形成作用较明显,才致使阈电压的退火受到抑制。故而,相对较高的正偏置下,退火幅度稍低。较高负偏置退火,从(2)式可见,由于更强地抑制了“隧道退火”作用,表现出如图2所示的负偏压越高,阈电压退火幅度越小的结果。而零偏下退火,既保持了一定的俘获空穴的“隧道退火”作用,又抑制了界面态的进一步产生,这是本文实验取得零偏下,180°C退火幅度100%快于所有正、负偏退火结果的原因。

可以看出,实现PMOS剂量计的完全退火,升高温度是关键,偏置由于具有双重作用,而成为次要条件。

5 结论

仅用俘获空穴的“隧道退火”和“热发射退火”效应可以概括性地解释PMOS剂量计的温度、偏置退火特性,结合界面态在不同温度、偏置下的生长和退火表现能更进一步解释退火曲线的细致变化。

综上分析可得,实现快速退火的条件为:(1) 较高的退火温度,促使俘获空穴的“热激退火”和界面态的热退火发生。(2) 零偏置下,在保持“隧道退火”作用的同时,也抑制了界面态的形成。抑制阈电压退火的条件则为:(1) 低温;(2) 负偏置。

参 考 文 献

- [1] D. A. Neenan, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1984, NS-31(6): 1439.
- [2] T. P. Ma, P. V. Dressendorfer, Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits, New York: John Wiley and Sons, 1989: 159, 222, 225.
- [3] P. J. McWhorter, S. L. Miller, W. M. Miller, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1990, NS-37(6): 1682.
- [4] A. Kelleher, N. McDonnell, B. O'Neill *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1994, NS-41(3): 445.
- [5] N. G. Blamires, D. H. J. Totterdell, A. G. Holmea-siedle *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1986, NS-33(6): 1310.
- [6] D. B. Brown, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1985, NS-32(6): 3900.
- [7] D. L. Griscom, J. Appl. Phys., 1985, 58(7): 2524