

含 F 栅介质的 Fowler-Nordheim 效应

张国强 严荣良 余学锋 高剑侠 任迪远

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

摘要 本文建立了一套用于 MOS 电容热载流子损伤研究的自动测试分析系统, 用高频和准静态 $C-V$ 技术, 分析研究了栅介质中 F 离子的引入所具有的抑制 Fowler-Nordheim 高场应力损伤的特性, 对 F 离子和高场应力作用机制进行了讨论

PACC: 7340Q; EEACC: 2550E, 2560R

1 引言

随着大规模集成电路的空间应用和发展, 电离辐射、热载流子损伤和栅击穿已成为影响 MOS 器件电路可靠性工作的三个主要因素。因此, 研究抗电离辐射和热载流子损伤的 MOS 新介质, 已成为当前国内外微电子学领域最主要的课题之一。

在 MOS 结构栅介质中引入适量的 F 离子, 将表现出较强的抗 α 质子、X 射线损伤的能力^[1-3], 但关于含 F 栅介质的抗 Fowler-Nordheim 注入损伤研究却少见报道。

沟道热电子损伤和 Fowler-Nordheim (简称 F-N) 注入损伤是两类主要的热载流子损伤, 前者发生在 MOSFET, 而后者可发生于 MOSFET 或 MOS 电容。F-N 注入可采用高场应力 (High Field Stress) 也可采用高电流注入 (High Current Injection), 它们既有区别又有联系, 其结果都是对栅氧介质产生均匀损伤, 损伤主要包括氧化物电荷建立和 Si/SiO_2 界面态的增长, 以及慢界面态产生和栅介质电容下降等次要损伤。

本文用高频和准静态 $C-V$ 技术, 研究了含 F 栅介质在 F-N 高场应力作用后的热载流子损伤特性, 发现 MOS 结构栅介质中引入一定量的 F 后, 具有明显的抗热载流子损伤特性。F 所具有的释放 Si/SiO_2 界面应力和替换部分 $\text{Si}-\text{H}$ 、 $\text{Si}-\text{OH}$ 等弱键的作用, 是导致含 F 栅介质抑制 F-N 注入损伤的根本原因。

2 高频和准静态 $C-V$ 测试以及 F-N 注入系统

实验所用的高频和准静态 $C-V$ 测试系统, 由 HP4140B、HP4280A、探针台、PC 机等组

张国强 男, 1962 年出生, 副研究员, 从事 MOS 新栅介质、辐射效应和机理的研究

严荣良 男, 1935 年出生, 研究员, 主要从事抗辐射 LSI 机理和加固应用研究

任迪远 男, 1950 年出生, 研究员, 主要从事线性电路、运放和 A/D 转换器的辐射损伤机理研究

1997-05-07 收到, 1997-09-25 定稿

成,通过HP4140B获得准静态C-V曲线,HP4280A得到高频C-V特性.高频C-V测试频率1MHz,高低频C-V电压扫描速率0.02V/秒,扫描方向为从积累区到反型区.由高频C-V特性,可以得到当表面势为0和 Φ 所对应的平带电压(V_{FB})和中带电压(V_{mg}),由高频和准静态C-V联合,可获得Si/SiO₂界面态密度 D_{it} 随表面势 V_s 的分布如下^[4]:

$$V_s(V_g) = \frac{V_g}{V_A} \left(1 - \frac{C(V_g)}{C_{OX}} \right) dV_g + \Delta \quad (1)$$

$$D_{it} = \frac{1}{q} \left[\frac{C_{LF}C_{OX}}{C_{OX} - C_{LF}} - \frac{C_{HF}C_{OX}}{C_{OX} - C_{HF}} \right] \quad (2)$$

(1)式中 V_g 为栅极上所加偏压; $V_s(V_g)$ 为当栅压为 V_g 时所对应的表面势; V_A 为积分上限; C_{OX} 为栅氧化层电容; $C(V_g)$ 为当栅压为 V_g 时的总电容; Δ 为积分常数.(2)式中 D_{it} 为当表面势为 V_s 时的界面态密度; q 为电子电量; C_{LF} 为准静态电容; C_{HF} 为高频电容.

积分常数 Δ 是将(1)式从积累区到平带($V_g = V_{FB}$)积分,利用 $V_s(V_{FB}) = 0$ 的条件得到的:

$$\Delta = - \frac{V_{FB}}{V_A} \left[1 - \frac{C_{LF}(V_g)}{C_{OX}} \right] dV_g \quad (3)$$

Fowler-Nordheim 高场应力是通过在栅极与衬底间加偏置电场实现的.偏置电场大小的选择是很重要的,太小将很长时间才能观测到明显的热载流子损伤,太大可能在极短时间内就使栅介质击穿,从而得不到C-V特性.因此,很有必要建立一个自动监测系统来实现高场应力大小的选择.我们利用HP4140B,通过自动监测 I_g-V_g 的变化关系,根据电场 \times 时间=常数的原则,较好地选择了

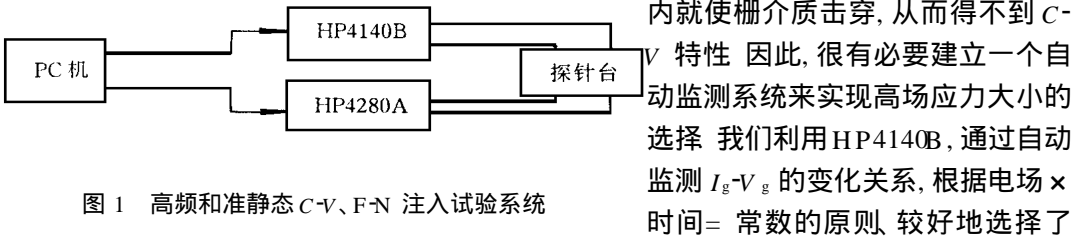


图1 高频和准静态C-V、F-N注入试验系统

高场应力的大小\F-N注入损伤的试验及测量

所建立的高频和准静态C-V测试系统\F-N注入试验系统如图1所示

3 实验样品及测试

实验所用样品为A1栅N型MOS电容,制作在 $1.7 \sim 2.3 (\Omega \cdot \text{cm})$,N(100)的Si衬底上,900 $^{\circ}\text{C}$ 干O₂栅氧化,栅氧化层厚度为10nm,电容面积 $8.302 \times 10^{-4} \text{cm}^2$,含F栅介质是通过900 $^{\circ}\text{C}$ 干O₂加NF₃氧化制备的,最终栅氧厚度为10nm,氧化后在900 $^{\circ}\text{C}$ N₂中退火20分钟.

F-N高场应力是通过在栅极与衬底间加 $V_g = -10\text{V}$ 电压完成,电场为 $E_{ox} = -10\text{MV/cm}$,在这种情况下,热电子由栅贯穿进栅氧化物中.

F-N高场应力作用一段时间后,立即进行高频和准静态C-V测试,由高频C-V获得平带电压 V_{FB} 、氧化物电荷密度(由 V_{mg} 的变化显示)随应力时间的变化关系,并由高频和准静态联合C-V技术得到Si/SiO₂界面态密度的F-N时间响应规律.

4 实验结果及讨论

图 2 给出加 F-N 高电场应力前后, 含 F 与未含 F 比较样品的高频和准静态 C-V 曲线 应力时间分别为 80 秒和 140 秒. 十分明显, 加应力后, (1) 高频 C-V 曲线负向移动, 表明氧化物正电荷的积累; (2) C-V 曲线(高频和准静态)发生畸变, 表明 Si/SiO₂ 界面态的增长; (3) 栅介质中 F 的引入将减小氧化物电荷和界面态的增长

图 3 和表 1 定量给出了 F-N 高场作用下, 界面态分布、平带电压和氧化物电荷(由中带电压漂移表示)的变化

由此看出, 高场应力作用后, 不同能级的界面态密度都明显增加, 平带和中带电压负向漂移, 栅介质中 F 的引入对 F-N 热载流子的损伤有抑制作用, 尤其对界面态的增长抑制更明显

另外, 我们亦从图 4 和图 2 中发现, F-N 高场应力作用后, V_s - V_g 曲线和低频 C-V 曲线在反型区(负栅压区)发生改变, 即 V_s 降低和最小电容增加 这是由于高场作用后在半导体表面空间电荷区产生了电子空穴对, 电子和空穴在耗尽层两侧重新分布, 从而使表面电势 V_s 减小, 耗尽层厚度也减小 耗尽层厚度的减小将导致耗尽层电容增加, 从而引起高频 C-V 曲线在反型区最小电容(总等效电容)的增加, 使 C-V 特性向低频特性偏移^[4].

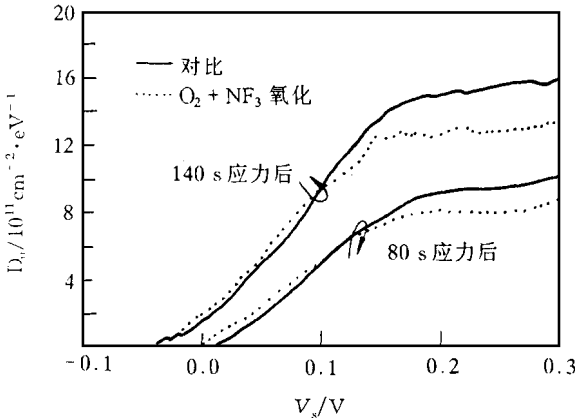


图 3 含 F 与比较样品高场应力前后的界面态分布

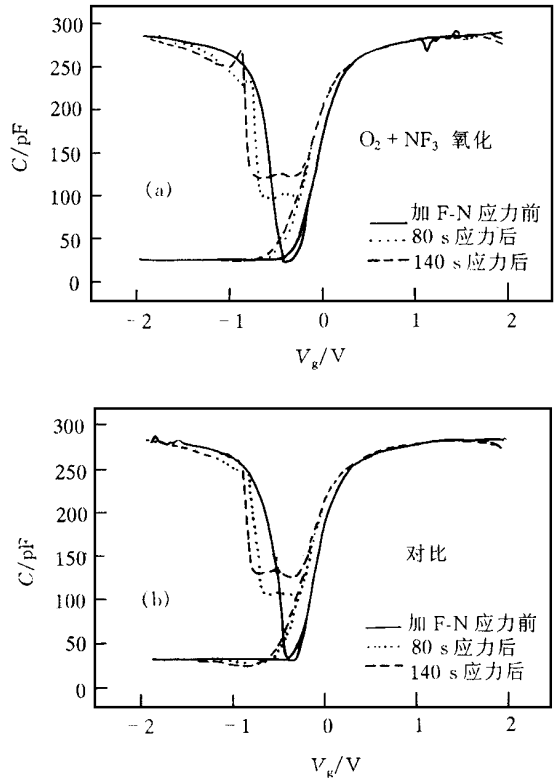


图 2 含 F(a) 与比较样品(b)高场应力前后的高频和准静态 C-V 曲线

由于热载流子损伤与电离辐射损伤具有等效性^[5], 因此 F-N 高场应力作用下氧化物正电荷的形成可解释为, 当 $V_g < 0$ 时, 热电子从栅极贯穿进 SiO₂ 中并被推到 Si/SiO₂ 界面区(阳极区), 与晶格发生电离碰撞而形成电子-空穴对, 电子-空穴对在电场的作用下发生分离, 较低能量的电子进入到 Si 衬底, 而较高能量的电子继续发生碰撞电离, 在界面附近的空穴被工艺过程所引入的本征中性缺陷(如三价硅、氧空位、间隙氧等)俘获, 形成氧化物正电荷, 氧化

物电荷产生的多少取决于本征中性陷阱的俘获截面或它对热电子的俘获几率,一般与热电子在 SiO_2 栅介质中的扩散速率有关并与时间成 0.2 次方的关系^[6],因此氧化物电荷的增加与时间有关.高场应力作用下界面态的产生可用 H° 模型解释为^[7]:当 $V_g < 0$ 时,热电子从栅极越过势垒贯穿进 Si/SiO_2 界面区附近,由电离碰撞所产生的空穴与 SiO_2 层体内 $\text{Si}-\text{H}$ 、 $\text{Si}-\text{OH}$ 形式存在的氢化物作用,形成氢原子,氢原子结合成分子 H_2 在 SiO_2 中扩散,当与 SiO_2 体内和 Si/SiO_2 界面的缺陷(包括杂质)发生相互作用时, H_2 先分解为短寿命的中间物 H° ,在界面的重要反应是:



然后, H_2 扩散离开界面, $\text{Si}\cdot$ 作为界面态留在界面

表 1 含 F 与比较样品由高场应力所引起的平带电压和中带电压漂移比较

应力时间/s	$\Delta V_{FB}/V$		$\Delta V_{mg}/V$	
	比较样品	$\text{O}_2 + \text{NF}_3$ 氧化	比较样品	$\text{O}_2 + \text{NF}_3$ 氧化
40	- 0.03	- 0.03	- 0.055	- 0.055
80	- 0.08	- 0.07	- 0.145	- 0.135
140	- 0.12	- 0.11	- 0.24	- 0.23

栅介质 F 离子的引入,将引起 Si/SiO_2 界面应力的释放并且能够用较高键能的 $\text{Si}-\text{F}$ 弱键替换部分 $\text{Si}-\text{H}$ 、 $\text{Si}-\text{OH}$ 弱键,从而具有较强的抑制热载流子对栅介质的损伤^[1~3].

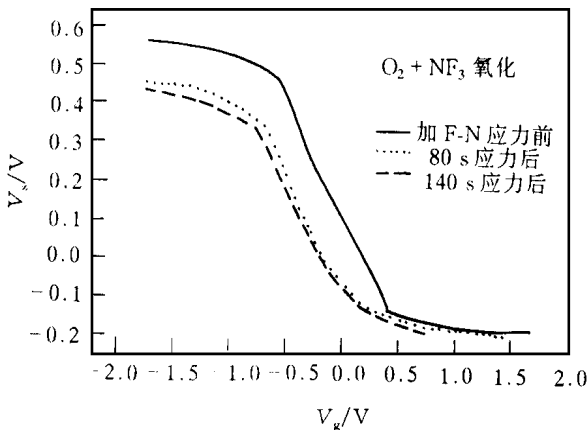


图 4 表面势与栅极电压的关系

长.氧化物电荷可用空穴俘获模型,界面态可用 H° 模型来描述. F-N 热电子亦将导致反型区最小电容增加和表面势下降,这是由应力作用后产生的电子空穴,在半导体表面空间电荷区重新分布并引起耗尽层厚度减小所致.

栅介质中 F 的引入能抑制热载流子所引起的氧化物电荷和 Si/SiO_2 界面态的增长.积累 F 离子所具有的释放 Si/SiO_2 界面应力,替换部分 $\text{Si}-\text{H}$ 、 $\text{Si}-\text{OH}$ 弱键成为较高键能的 $\text{Si}-\text{F}$ 键,是含 F 栅介质具有较强抑制 F-N 高场应力损伤的主要原因.

5 结语

建立了一套用于自动进行 Fowler-Nordheim 高场应力损伤的测试分析系统.其中包括高频和准静态 C-V 测试技术和 F-N 注入测试技术.

热电子注入对 MOS 栅介质的损伤主要包括氧化物正电荷和界面态的增长.

参 考 文 献

- [1] 张国强, 严荣良, 罗来会, 等, 半导体学报, 1996, 17(1): 35
- [2] 严荣良, 张国强, 余学锋, 等, 核技术, 1995, 18(10): 610
- [3] E. F. Silva, Jr., Y. Nishioka *et al* , IEEE Trans Nucl Sci , 1987, 34(6): 1990
- [4] 郭维廉, 硅-二氧化硅界面物理, 国防工业出版社, 1982 年 7 月第一版
- [5] Y. Nishioka, E. F. Silva Jr., T. P. Ma, Appl Phys Lett , 1988, 52(9): 720
- [6] P. Heremans, R. Bellens, G. Groeseneken *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1988, ED-35(12): 2194
- [7] D. L. Griscom, J. Appl Phys , 1985, 58: 2524

Fowler-Nordheim High Field Stress in Fluorinated Gate Dielectrics

Zhang Guoqiang, Yan Rongliang, Yu Xuefeng, Gao Jianxia, Ren Diyuan

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

Received 7 May 1997, revised manuscript received 25 September 1997

Abstract We have set an automatic measurement and analysis system used for the study of hot carrier damage in MOS capacitors. The characteristics of Fowler-Nordheim high field stress in fluorinated gate oxides have been investigated by means of high frequency and quasi-static $C-V$ techniques. The hot electron damage can be restrained by introducing F ions into gate oxides.

PACC: 7340Q; **EEACC:** 2550E, 2560R