

BF₂⁺注入硅栅 p 沟 MOS 场效应晶体管 辐射感生界面陷阱测量

张正选¹, 罗晋生², 袁仁峰¹, 张廷庆³, 姜景和¹

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 西安交通大学 微电子所, 陕西 西安 710049;
3. 西安电子科技大学 微电子所, 陕西 西安 710071)

摘要:利用亚阈测量技术对 BF₂⁺注入硅栅 PMOSFET 辐射感生界面陷阱进行了测量。对 BF₂⁺注入 PMOSFET 具有抑制辐射感生界面陷阱的机理进行了分析和讨论。

关键词: 二氟化硼; 硅栅 PMOSFET; 辐射感生界面陷阱

中图分类号: TL99; TN286.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2000)04-0350-05

SiO₂-Si 界面存在的界面陷阱严重影响 MOS 器件的工作特性。当 MOS 器件在电离辐射环境下应用时,辐射会使界面陷阱密度增加。辐射引起的界面陷阱密度的变化改变了 MOS 器件的工作特性,如 MOSFET 的 $I_d \sim V_g$ 特性曲线的改变^[1],进而导致由 MOS 器件构成的集成电路性能的改变,甚至失效。近年来,不少文章报道在栅介质中引入适量的氟可以加固 MOS 器件^[2~4]。目前,在栅介质中引入氟的方法主要有 3 种:栅氧化前用 HF 处理硅片^[5],栅氧化时通入适量的 NF₃ 气体^[6]和栅氧化后注入适量的 F 离子^[7]。采用 BF₂⁺注入栅介质这一新方法也取得了同样的效果,BF₂⁺注入硅栅 PMOSFET 的辐射特性已有报道^[8]。本文主要利用亚阈测量技术对 BF₂⁺注入硅栅 PMOSFET 辐射感生界面陷阱电荷密度进行测量,并对其辐射加固机理进行分析和讨论。

1 亚阈测量技术原理

亚阈测量技术由 Van Overstraeten 等在 1975 年提出。界面陷阱的存在会改变 MOS 晶体管工作在亚阈区 $\lg I_d \sim V_g$ 的斜率,表面势随栅电压的响应与此斜率有关。界面陷阱的存在会降低表面势 ϕ_s 对栅电压变化的敏感程度。长沟道 MOSFET 的表面势在 $1.5 \phi_t$ 附近是线性扩展。界面陷阱密度 D_{it} 表示 Si/SiO₂ 界面表面态在 Si 禁带中单位能量间隔的密度。假设 D_{it} 在禁带中央附近变化不大,在整个弱反型区通过漏电流的对数对栅电压的偏微分便可求出界面陷阱密度的平均值,可由下式表示:

收稿日期:1999-01-25;修回日期:1999-05-07

作者简介:张正选(1966—),男,陕西大荔人,副研究员,半导体器件与微电子学专业

$$\overline{D_{it}} = \frac{1}{q} \left[\left[\frac{-q}{kT} \frac{\partial g I_d}{\partial V_g} \cdot \ln 10 - 1 \right] C_{ox} - C_D \right] \quad (1)$$

式中： $\overline{D_{it}}$ 代表单位能量的界面陷阱密度， D_{it} 在 $\phi_s = 1.5 \phi_f$ 周围的平均值； C_{ox} 为单位面积的栅电容； C_D 为表面势为 $1.5 \phi_f$ 时的耗尽层电容， $C_D = \left(\left[q N_B \right] / \left[2(\phi_s + kT/q) \right] \right)^{1/2}$ ， $\phi_f = (kT/q) \ln(N_B/n_i)$ ， N_B 为MOSFET沟道区的掺杂浓度； n_i 为本征载流子浓度。界面陷阱密度通过式(1)根据器件工作在亚阈区 $\lg I_d \sim V_g$ 特性曲线的斜率求出。辐射感生的界面陷阱电荷将会改变弱反型区的斜率。通过亚阈斜率的改变量可计算出辐射感生的界面陷阱密度的变化量：

$$\overline{D_{it}} = \frac{C_{ox}}{kT \times \ln 10} \left[\frac{1}{\frac{\partial g I_{d,rad}}{\partial V_g}} - \frac{1}{\frac{\partial g I_{d,pre}}{\partial V_g}} \right] \quad (2)$$

对于NMOSFET,衬底为P型硅， $\overline{D_{it}}$ 代表在禁带上半部分中央附近的单位能量的界面陷阱密度。对于PMOSFET,衬底为N型硅， $\overline{D_{it}}$ 代表在禁带下半部分中央附近的单位能量的界面陷阱密度。

2 实验及测量

实验采用N型(100)硅单晶片,电阻率为 $4 \sim 6 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 。PMOSFET用硅栅CMOS加固工艺制作。栅氧化层厚度为40 nm,多晶硅膜厚度为500 nm。BF₂⁺注入能量为80 keV,注量分别为 2.5×10^{14} 、 5×10^{14} 、 1×10^{15} 、 2×10^{15} 和 $3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。对比样品仅注入B⁺,注入能量为20 keV,注量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。所有样品在一定温度下退火,以消除离子注入引入的损伤,并将F推进到栅氧化层中。

样品的辐射采用⁶⁰Co 射线源,吸收剂量率 $\dot{D}(\text{Si}) = 1.26 \times 10^2 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$ 。总吸收剂量为 $5 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4 \text{ Gy}$ 。PMOSFET器件的亚阈特性曲线在以HP4140B为主的半导体器件参数测量系统上测量。

3 测量结果

用亚阈测量技术测量的2种注入条件下的PMOSFET器件的辐射感生界面陷阱密度随吸收剂量的变化关系曲线示于图1。对于注B样品(为了便于对比,以下统一称此类样品为对比样品),辐射前PMOSFET器件的界面陷阱密度为 $1.3 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。而对于注BF₂⁺样品,辐射前PMOSFET器件的界面陷阱密度为 $1.05 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。由图1可以看到:对于注BF₂⁺样品和对比样品,辐射感生的界面陷阱密度都随吸收剂量的增加而增加。对于相同的吸收剂量,注BF₂⁺样品的辐射感生界面陷阱密度较对比样品小。实验结果表明,注BF₂⁺样品具有抑制辐射感生界面陷阱密度的作用。

利用亚阈测量技术测量不同吸收剂量下辐射感生界面陷阱密度随BF₂⁺注量的变化关系示于图2。 $D = 1 \times 10^3 \text{ Gy}$ 时,辐射感生界面陷阱密度随BF₂⁺注量的增加而减少。 $D = 1 \times 10^4 \text{ Gy}$ 、BF₂⁺的注量小于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生界面陷阱密度随BF₂⁺的注量的增加而减少;BF₂⁺的注量大于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生的界面陷阱密度却随BF₂⁺注量的增加而增加;

BF_2^+ 的注量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生界面陷阱密度为最小值。当 $D = 2 \times 10^4 \text{ Gy}$ 、 BF_2^+ 的注量小于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生界面陷阱密度随 BF_2^+ 注量的增加而减小; BF_2^+ 的注量大于 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生界面陷阱密度随 BF_2^+ 注量的增加而增加; BF_2^+ 的注量为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 时,辐射感生界面陷阱密度为最小值。

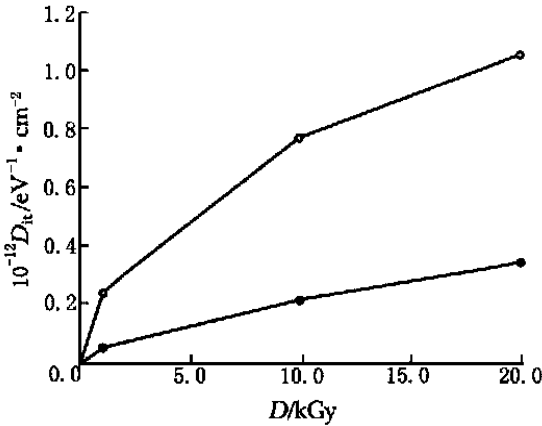


图1 两种注入条件下辐射感生界面陷阱密度随吸收剂量的变化关系

Fig. 1 The change in interface trap density with adsorbed dose under two differential implantation —注入 B^+ ; —注入 BF_2^+

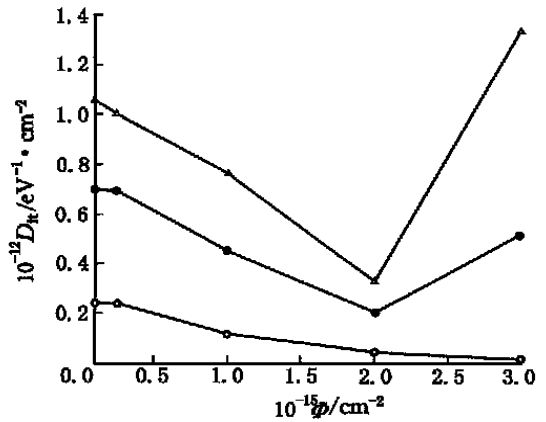


图2 不同吸收剂量下辐射感生界面陷阱密度随 BF_2^+ 注量的变化关系

Fig. 2 The change in interface trap density with dose of BF_2^+ under three differential radiation dose — $2 \times 10^4 \text{ Gy}$; — $1 \times 10^4 \text{ Gy}$; — $1 \times 10^3 \text{ Gy}$

图3是 BF_2^+ 注量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 样品退火后 F、B、O、Si 元素在多晶-Si、 SiO_2 及 Si 中的二次离子质谱 (SIMS) 剖面分布。从图3可以看到: F 在多晶硅中呈双峰分布, 在 SiO_2 中呈“U”形分布。对于高温下的 F 在多晶硅和 SiO_2 中的迁移行为, 文献[9]进行了详细的分析。

4 讨论

BF_2^+ 注入对硅栅 PMOSFET 辐射感生界面陷阱密度有很强的抑制作用, SIMS 分析证实, 这种抑制作用与 F 在 SiO_2 中的存在和它在 SiO_2/Si 界面的分布密切相关。

在 SiO_2/Si 界面存在 1 个几 nm 的过渡层。过渡层中存在大量的结构缺陷和键缺陷, 如硅悬挂键 $\text{Si}_3 \text{ Si}$ 和非桥键氧 $\text{O}_3 \text{ Si}$ 及大量的两性氧化物(如 Si_2O , Si_2O_3 , SiO 等)。因此, 分布在 SiO_2/Si 界面的 F 将首先补偿界面附近存

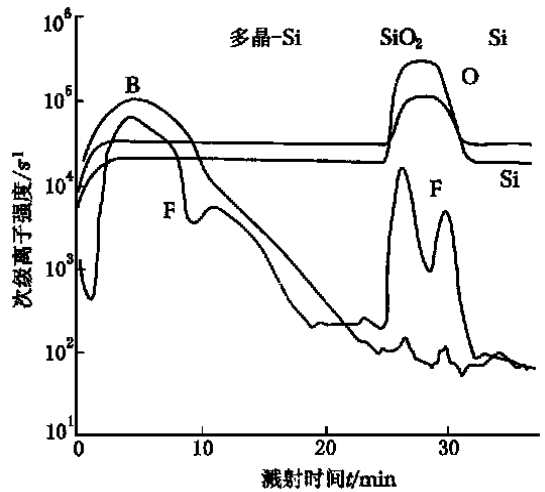


图3 BF_2^+ 注量为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 样品退火后 F 在 SiO_2 中的 SIMS 剖面分布
Fig. 3 SIMS profiles of fluorine distribution in SiO_2

在的硅悬挂键和非桥键氧,形成结合能较高的Si-F键。另外,在SiO₂/Si界面不可避免地存在大量的Si-H弱键。由于Si-F(5.73 eV)比Si-H(3.18 eV)结合能高,分布在界面的F将取代Si-H键中的H而形成键能很高的Si-F键。在引入适量F时,由于在SiO₂/Si界面存在大量的F,它们将不断地补偿在界面所产生的氧化物电荷和界面陷阱电荷。随着吸收剂量的增加,辐射产生的界面陷阱电荷越多,但只要在SiO₂/Si界面存在足够的F,就会对界面处由于辐射产生的悬挂键进行补偿从而抑制辐射感生的界面陷阱电荷,也就使辐射在硅禁带辐射感生界面陷阱密度减小。随BF₂⁺注量的增加在SiO₂/Si界面存在的F也在增加,故对辐射感生界面陷阱密度的抑制作用越大。虽然在SiO₂/Si界面具有很大的容纳杂质(F)的能力,但它有一个限度,BF₂⁺注量有一最佳值。过量的F在SiO₂及SiO₂/Si界面存在,由于F为负电性很强的杂质,F将会取代桥键氧而使非桥键氧增加,使SiO₂和SiO₂/Si界面的抗辐射性能减小,从而在硅禁带中使由于辐射感生的界面陷阱密度增加。

5 结论

1) BF₂⁺注入PMOSFET后具有抑制辐射感生界面陷阱密度的效果。主要原因是由于其在SiO₂和SiO₂/Si界面引入F而造成的。

2) BF₂⁺最佳注量范围为 $5 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 。当BF₂⁺注量超过此范围,辐射感生界面陷阱密度会有所增加。

参考文献:

- [1] Roger J, Overstraeten V, Gilbert J, et al. Multis Theory of the MOS Transistor in Weak Inversion: new Method to Determine the Number of Surface States[J]. IEEE Trans Electron Devices, 1975, ED22:282~288.
- [2] da Silva EF, Nishioka Y, Ma TP. Radiation Response of MOS Capacitors Containing Fluorinated Oxides[J]. IEEE Trans Nuclear Sci, 1977, NS34(6):190~195.
- [3] Wright PJ, Saraswat KC. The Effect of Fluorine in Silicon Dioxide Gate Dielectrics[J]. IEEE Trans Electron Devices, 1989, ED-36(5):879~889.
- [4] Nishioka Y, da Silva EF, Ma TP. Dramatic Improvement of Hot-electron-induced Interface Degradation in MOS Structure Containing F and Cl in SiO₂[J]. IEEE Trans Electron Letters, 1988, 9(1):38~40.
- [5] Weibberger BR, Peterson GG, Eschtich TC, et al. Surface Chemistry of HF Passivated: X-ray Photoelectron and Ion Scattering Spectroscopy Results[J]. J Appl Phys, 1986, 60(9):3232~3234.
- [6] Morita M, Kubo T, Ishihara T, et al. Fluorine-enhanced Thermal Oxidation of Silicon in the Presence of NF₃[J]. Appl Phys Lett, 1984, 45(12):312~314.
- [7] Nishioka Y, Ohya K, Ohji Y, et al. Hot-electron Hardened Si-gate MOSFET Utilizing F Implantation[J]. IEEE Electron Device Letters, 1989, 10(4):141~143.
- [8] 张廷庆,刘家璐,张正选,等.BF₂⁺注入硅栅PMOSFET辐照效应[J].电子学报,1995,123(2):88~91.
- [9] 刘家璐,张廷庆,张正选,等.BF₂⁺注入多晶硅栅的SIMS分析[J].电子科学学刊,1994,16(5):541~544.

Measurement of Radiation-induced Interface Traps on BF_2^+ Implanted Si-gate PMOSFET

ZHANG Zheng-xuan¹, LUO Jir-sheng²,
YUAN Ren-feng¹, ZHANG Ting-qing³, JIANG Jing-ke¹

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. Microelectronic Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. Microelectronic Institute, Xi'an Electron Science and Technology University, Xi'an 710071, China)

Abstract : The radiation-induced interface traps on BF_2^+ implanted Si-gate PMOSFET are measured using the subthreshold method. The mechanism of depression of the radiation-induced interface traps by the BF_2^+ implanted has also been analysed.

Key words : BF_2^+ ; Si-gate PMOSFET; radiation-induced interface traps

全国核结构学术与专题讨论会召开

受中国核物理学会的委托,由中国原子能科学研究院核物理研究所与海南大学共同举办的“第八届全国核结构学术讨论会暨第四次全国核结构专题讨论会”于日前在海口市举行。

参加这次会议的正式代表 140 人,交流报告 100 篇以上,均超过历届会议。在会议开幕式上,中国原子能科学研究院核物理研究所所长赵志祥介绍了中国原子能科学研究院在反应堆和加速器上开展的核物理工作及发展前景。有 3 位院士在会上作了精彩报告:张崇焯院士介绍了“双重子研究”,张焕乔院士介绍了超重核合成的进展情况,丁大钊院士作了“核科学技术对社会发展的影响”的报告。中国原子能科学研究院青年研究员柳卫平作了“北京串列加速器低能次级束流线上的核天体物理反映研究”。众代表对这些报告表现出了极大的兴趣。

摘自中国原子能科学研究院《原子能院报》