第 46 卷 第 8 期 1997 年 8 月
1000-3290/97/46(8)/1580-05

物 理 学 报
ACTA PHYSICA SINICA

Vol. 46, No. 8, August, 1997
©1997 Chin. Phys. Soc.

BF_2^+ 注入多晶硅栅常规热退火氟迁移特性的二次离子质谱分析*

刘家璐 张廷庆 李建军
(西安电子科技大学微电子研究所,西安 710071)
赵元富
(骊山微电子研究所,临潼 710600)

(1996 年 11 月 4 日收到)

借助二次离子质谱(SIMS)技术,深入地、系统地分析了 80 keV, $2\times10^{15}cm^{-2}$ BF_2^+ 注入多晶硅栅在常规热退火条件下,F 在多晶硅栅中的分布及迁移特性.F 在多晶硅栅中的迁移,不但存在着扩散机制,而且还存在着发射和吸收机制,据此成功地解释了实验结果.

PACC: 6170T; 6170A; 6170W

1 引 言

文献[1]的研究表明,BF_2^+ 注入多晶硅栅经热退火,分布在 SiO_2 中和 SiO_2/Si 界面的 F,抑制了 γ 辐射感生的氧化物陷阱电荷和界面陷阱电荷,从而抑制了阈值电压的漂移,这是 BF_2^+ 注入硅栅 PMOSFET 抗 γ 辐射的主要原因.但是,在将该技术应用到抗 γ 辐射金属氧化物半导体(MOS)电路时发现,尽管在最佳注入剂量下,有时并不能得到最佳的加固效果.究其原因,主要是对 F 在多晶硅栅中的分布与迁移特性及其与工艺因素的关系还没有研究清楚,因而不能从工艺上加以控制,因此对其进行深入的研究就显得特别重要.本文借助二次离子质谱(SIMS)技术,深入地、系统地分析了 BF_2^+ 注入多晶硅栅在常规热退火条件下,F 在多晶硅栅中的分布及迁移特性,并对实验结果进行了深入的讨论.

2 实 验

实验样品采用硅栅 p 阱互补金属氧化物半导体(CMOS)加固工艺制作.衬底是电阻率为 4—6Ω·cm 的 n 型(100)硅单晶片.首先在 1000 ℃ 干氧气氛中生长 40 nm 厚的栅氧化层,然后在 900 ℃ 氮气中退火 30 min,接着在栅氧化层上采用低压化学汽相淀积(LPCVD)法在 650 ℃ 下淀积 500 nm 多晶硅薄膜,最后向多晶硅中注入 BF_2^+,注入能量和剂量分别为 80 keV 和 2×10^{15} cm^{-2}.注入完成后,将大片分割成小片,在常规退火条件下

* 国家自然科学基金资助的课题.

进行等时变温和等温变时退火,如表 1 和表 2 所示.退火保护气体为氮气.制备好的样片待 SIMS 分析.

表 1　等时变温热退火样品

编号	注入离子	注入能量/keV	注入剂量/$10^{15}cm^{-2}$	退火温度/℃	退火时间/min
221	BF_2^+	80	2	450	30
222	BF_2^+	80	2	600	30
223	BF_2^+	80	2	800	30
224	BF_2^+	80	2	900	30
225	BF_2^+	80	2	1000	30

表 2　等温变时热退火样品

编号	注入离子	注入能量/keV	注入剂量/$10^{15}cm^{-2}$	退火温度/℃	退火时间/min
321	BF_2^+	80	2	900	15
322	BF_2^+	80	2	900	30
323	BF_2^+	80	2	900	45

采用型号为 CAMECA IMS 4F 的 SIMS 仪分析 F 在多晶硅和 SiO_2 中退火前后的剖面分布.

3　实验结果

图 1 示出了 80 keV,$2\times10^{15}cm^{-2}$的 BF_2^+ 注入多晶硅栅等时变温退火前后 F 的 SIMS 分布剖面.可以看到,退火前 F 在多晶硅中呈高斯分布,平均投影射程 R_p 大约为 65 nm.450 ℃,30 min 退火后,F 的浓度分布与退火前的分布基本相似.这表明,在此温度下 F 在多晶硅中尚未开始迁移.但是,经 600 ℃,30 min 退火后,F 的分布发生了变化.F 的峰值浓度降低,分布宽度变窄.位于注入峰外侧的 F 向表面迁移,而位于注入峰内侧的 F 向多晶硅内部迁移,并在距表面大约为 $2R_p$ 处形成了另一个 F 峰.随着退火温度的升高,F 的注入峰不断下降,分布宽度不断变窄,F 向表面和多晶硅内部迁移加快,不但在距表面大约为 $2R_p$ 处形成了另一个 F 峰,而且 F 已迁移到 SiO_2 中,在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 界面分别形成了一个 F 峰.在多晶-Si/SiO_2 界面的 F 峰高于在 SiO_2/Si 界面的 F 峰.随着退火温度的升

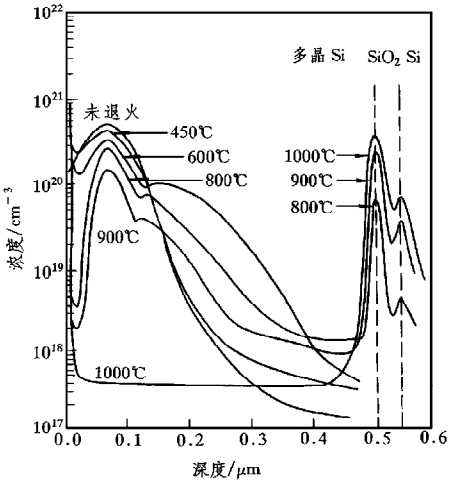

图 1　80 keV,$2\times10^{15}cm^{-2}$的 BF_2^+ 注入多晶硅栅等时变温退火 F 的 SIMS 分布剖面　退火时间为 30min

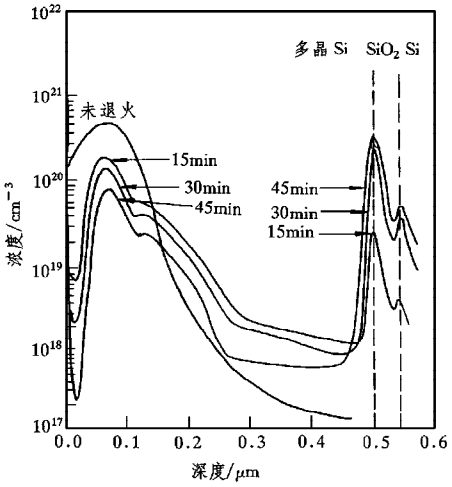

图2 80 keV, $2\times10^{15}cm^{-2}$的 BF_2^+ 注入多晶硅栅等温变时退火 F 的 SIMS 分布剖面 退火温度为 900℃

高,在 SiO_2 界面上的这两个 F 峰也随之升高.退火温度升高到 1000 ℃,位于注入峰左侧的 F 几乎已全部迁移出硅表面,而位于注入峰右侧的 F 几乎已全部迁移到 SiO_2 中,F 的注入峰消失,这时在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 界面的 F 峰具有最高值.

图2示出了 80 keV, $2\times10^{15}cm^{-2}$的 BF_2^+ 注入多晶硅栅等温变时退火前后 F 的 SIMS 分析结果.可以看到,F 的分布与图1基本相似.在 900 ℃ 退火条件下,随着退火时间的增加,F 的注入峰值浓度不断降低,分布宽度不断变窄;在距表面大约为 $2R_p$ 处均形成了另一个 F 峰,其峰高随退火时间的增加而不断地降低,分布宽度不断地变窄.迁移到 SiO_2 中的 F,在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 界面均各形成一个 F 峰.在多晶-Si/SiO_2 界面的 F 峰高于在 SiO_2/Si 界面的 F 峰.F 峰随退火时间的增加而增加.

4 分析与讨论

上述 SIMS 分析表明,BF_2^+ 注入多晶硅栅经常规热退火后,F 在多晶硅栅中的分布及迁移具有如下两个明显的特征:1)F 在多晶硅内呈现双峰分布,这两个 F 峰随退火温度的增加(或随退火时间的增加)而降低,分布宽度随退火温度的增加(或随退火时间的增加)而变窄;2)F 在 SiO_2 内也呈双峰分布,即在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 界面各形成一个 F 峰,前一个 F 峰高于后一个 F 峰,这两个 F 峰随退火温度的增加(或随退火时间的增加)而增加.

Tseng 等[2]在研究 F^+ 注入多晶硅退火特性时(F^+ 注入能量为 60 keV,注入剂量为 $1\times10^{16}cm^{-2}$),只观察到一个 F 的注入峰,而本研究中观察到两个 F 峰,一个为 F 的注入峰,而另一个 F 峰显然与 BF_2^+ 注入多晶硅的特性密切相关.BF_2^+ 是分子离子,质量数为 49,比质量数为 19 的 F 重得多,因此 BF_2^+ 注入多晶硅形成非晶层所需的临界注入剂量比 F^+ 低得多.BF_2^+ 注入单晶硅形成非晶层所需的临界注入剂量大约为 $1\times10^{15}cm^{-2}$[3],因此$2\times10^{15}cm^{-2}$注入剂量的 BF_2^+ 足以使多晶硅形成非晶层.在高温退火期间,非晶层经再结晶转变为多晶,并在注入层与多晶硅界面处(大约距表面为 $2R_p$ 距离)残留下损伤缺陷.这些残留的损伤缺陷具有俘获和富集 F 原子的作用[4],或称之为损伤缺陷对 F 的吸收作用,因而形成了峰值浓度较小的 F 峰.随着退火温度的增加或退火时间的加长,残留损伤逐渐消除,损伤缺陷俘获的 F 逐渐被释放出来,这个过程也可称之为损伤缺陷对 F 的发射作用,因而这个 F 峰也就随之降低,分布宽度逐渐变窄.

众所周知,多晶硅薄膜在结构上是由不同晶向的许多小晶粒和晶粒间界所组成的,杂质在晶粒间界的扩散要比在晶粒内的扩散快几个数量级.近来的研究表明[2],F 在晶粒间界的扩散要比在晶粒内的扩散快 3 至 4 个数量级.我们用扩散机理即使考虑了 F 在晶粒间界的快扩散,也无法解释 F 分布随退火温度增加而变窄这一实验事实.显然,F 在多晶硅中还存在着另一种目前尚未被完全认识清楚的迁移机制.Tseng 等[2]认为,F 从晶粒内到晶粒间界存在着强烈的发射,与此同时也存在着 F 从晶粒间界到晶粒内的吸收,但 F 的发射率比吸收率大得多.因此,如果我们认为 BF_2^+ 注入多晶硅 F 在多晶硅内的迁移不但存在着扩散机制,而且存在着 F 的发射和吸收机制,就能较好地解释上述实验事实.从扩散机制考虑,由于 F 在晶粒间界的扩散比在晶粒内快 3 至 4 个数量级,因此可认为 F 在晶粒内的扩散是可以忽略的,仅在晶粒间界以很快的速度迁移;从发射和吸收机制考虑,由于 F 的发射比吸收大得多,因此,只考虑 F 从晶粒内向晶粒间界的发射.F 从晶粒内向晶粒间界发射,发射到晶粒间界的 F 则通过晶粒间界很快地迁移出多晶硅表面和迁移到多晶-Si/SiO_2 界面,结果造成 F 的峰值浓度降低,分布宽度变窄.退火温度升高(或退火时间加长),F 的发射增加,F 在晶粒间界的扩散也加快,从而晶粒内有更多的 F 发射到晶粒间界,再通过晶粒间界迁移到多晶硅表面和多晶-Si/SiO_2 界面,因而 F 峰浓度不断降低,分布宽度不断变窄.退火温度增加到 1000 ℃,晶粒内的 F 几乎已全部发射完,因而 F 峰消失,迁移到多晶-Si/SiO_2 界面的 F 峰有最高值.

在多晶-Si/SiO_2 界面,由于淀积的多晶硅与 SiO_2 的结构不匹配,在界面存在着大量的缺陷.在热退火期间,从多晶硅晶粒间界迁移到多晶-Si/SiO_2 界面的 F 被界面缺陷所俘获(或吸收),因而形成了多晶-Si/SiO_2 界面的 F 峰.在多晶-Si/SiO_2 界面不但存在着 F 的吸收,而且也存在着对 F 的发射,但发射小于吸收.从该界面发射的 F 则通过 SiO_2 网络扩散到 SiO_2/Si 界面.在 SiO_2/Si 界面存在着过渡层,过渡层中包含有大量的结构缺陷和悬挂键.同样它也具有吸收和发射 F 的本领.通过 SiO_2 网络扩散到 SiO_2/Si 界面的 F 被过渡层中的结构缺陷和悬挂键所俘获(或吸收),因而形成了 SiO_2/Si 界面的 F 峰.显然,这两个界面的吸收和发射也随温度的上升(或时间的增加)而增加,但发射小于吸收,因而 SiO_2 界面上的两个 F 峰随退火温度的增加(或退火时间的增加)而增加.由于多晶-Si/SiO_2 界面是由多晶硅淀积在 SiO_2 上形成的,它比硅热氧化生长 SiO_2 形成的 SiO_2/Si 界面有更多的缺陷,因而多晶-Si/SiO_2 界面的 F 峰要比 SiO_2/Si 界面的 F 峰要高.

5 结　论

(1)80 keV,2×10^{15} cm^{-2}的 BF_2^+ 注入多晶硅栅经常规热退火后,F 在多晶硅内呈现双峰分布.一个为 F 的注入峰,一个为 F 的损伤缺陷吸收峰.这两个 F 峰的高度随退火温度的增加(或随退火时间的增加)而降低,分布宽度则随退火温度的增加(或随退火时间的增加)而变窄.F 在 SiO_2 中也呈现双峰分布,即在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 界面各形成一个 F 峰,F 峰的高度则随退火温度的增加(或退火时间的增加)而增加.

(2)BF_2^+ 注入多晶硅栅 F 在多晶硅栅中的迁移,不但存在着扩散机制,而且还存在着发射和吸收机制.在多晶硅内,F 在晶粒间界的扩散远大于 F 在晶粒内的扩散.F 在晶粒

内的发射远大于 F 的吸收.在 SiO_2 内,F 在多晶-Si/SiO_2 和 SiO_2/Si 两个界面的吸收则大于 F 的发射.

(3)根据 Tseng 等[2]提出的 F^+ 注入多晶硅栅 F 在多晶硅内的扩散、发射和吸收机制的基础上,我们认为 F 在 SiO_2 两个界面也存在着发射和吸收,且吸收大于发射,并结合 BF_2^+ 注入多晶硅的损伤特性,成功地解释了 BF_2^+ 注入多晶硅栅经常规热退火后 F 在多晶硅栅中的分布和迁移特性.

[1] 张廷庆、刘家璐、张正选、赵元富,电子学报,**23**(1995),88.

[2] H. H. Tseng, M. Orlowski, P. J. Tobin and R. L. Hance, *IEEE Electron Device Lett.*, **13**(1992), 14.

[3] B. A. MacIver and E. Greenstein, *J. Electrochem. Soc.*, **124**(1977), 273.

[4] M. Y. Tsai, D. S. Day and B. G. Streetman, *J. Appl. Phys.*, **50**(1979), 188.

SIMS ANALYSIS OF MIGRATION CHARACTERISTICS OF FLUORINE IN BF_2^+ IMPLANTED POLY-Si GATE UNDER CONVENTIONAL THERMAL ANNEALING

LIU JIA-LU ZHANG TING-QING LI JIAN-JUN

(*Microelectronics Research Institute, Xidian University, Xi'an* 710071)

ZHAO YUAN-FU

(*Lishan Microelectronics Institute, Lintong* 710600)

(Received 4 November 1996)

ABSTRACT

Distribution and migration characteristics of fluorine in poly-Si gate on BF_2^+ implanted poly-Si gate with an energy of 80 keV and doses of 2×10^{15} cm^{-2} under conventional thermal annealing has been analyzed systematically and deeply by SIMS. Migration of fluorine in poly-Si gate exists not only diffusion mechanism, but also absorption and emission mechanism, and experiment results are explained successfully.

PACC: 6170T; 6170A; 6170W