

^{60}Co 辐照引起 MOS 电容可动离子的变化

高文钰 严荣良 范 隆

(中国科学院新疆物理研究所)

本工作采用 TVS 测量技术,系统地研究了铝栅 MOS 电容中可动离子数目随 ^{60}Co γ 辐照剂量和辐照所加偏压的变化关系。结果表明:辐照后可动离子减少,对干氧通 TCE 和纯干氧栅氧化电容实验都有类似的结果;在相同剂量辐照下,正偏辐照引起的可动离子减少最大,负偏次之,零偏最小;在剂量为 $1 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5 \text{ Gy}(\text{Si})$ 范围内,零偏辐照的可动离子减少量随剂量增大而增加,但正偏辐照似乎在 $1 \times 10^5 \text{ Gy}(\text{Si})$ 时,减小量就趋于“饱和”。此外,随着 TVS 测量次数增加,可动离子有少量增加。最后,对实验现象的机制进行了探讨。

关键词: TVS 技术 可动离子面密度 γ 辐照 电子空穴对

一、引 言

随着核技术和空间技术的发展, MOS 场效应器件的电离辐照效应及其加固工艺日益受到重视。大量研究表明, MOS 器件受到电离辐照后,会使器件性能退化和失效^[1,2]。氧化层电荷和界面态以及 MOS 结构栅氧化层中的可动离子(通常主要是钠离子)是影响器件稳定性的重要因素^[1-4]。早期一些报道表明 γ 辐照引起可动离子增加^[5,6],国内有些文献中已把它作为普遍结论^[7]。但后来的一些研究发现^[8] γ 辐照引起可动离子减少。为了进一步研究电离辐照对可动离子的影响,搞清可动离子在 MOS 结构中的输运特性和电离辐照效应,我们进行了以下工作:首先对几种不同工艺的 MOS 电容进行可动离子测量,分析了其污染来源;然后着重对几种受钠离子污染的样品进行不同辐照偏压和剂量辐照后可动离子变化的研究;最后对实验现象进行了机制分析和解释。

二、实验过程

样品的制备是采用 n 型 $\langle 100 \rangle$ 晶向, $2 \sim 5 \Omega \text{ cm}$ 单晶硅片,经清洗后,分别在纯干氧和干氧通三氯乙烯(TCE)两种气氛中生长 SiO_2 , 温度为 1025°C , SiO_2 厚度为 100 nm 左右。然后,在 850°C 的 N_2 气氛中退火 30 min 以减少界面态。铝栅极用钨丝加热蒸发方式制得,厚度约为 $1 \mu\text{m}$,合金温度为 400°C 和 450°C 两种,制得面积为 $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 的电容。样品共分三种: F 样品,干氧栅氧化,合金温度 450°C ; S 样品,干氧通 TCE 栅氧化,合金温度 400°C ; Z 样品,干氧通 TCE 栅氧化,合金温度 450°C 。其它工艺条件一致,所有样品都用 14 脚双列直插式管壳和柯伐合金片封装。为了弄清楚可动离子污染来源,还对电子束蒸铝而其它工艺相同的样品进行了可动离子测量。

MOS 电容的可动离子测量是采用三角波电压扫描法(TVS)测量技术,测量时温度有 240°C 和 260°C 两种,温度偏差小于 2°C ,测量仪器为 HP4140B 型 I—V 仪,样品室自建。由于 Si/SiO_2 界面可动离子陷阱的能级比 Al/SiO_2 界面的要浅,因此,计算可动离子面密度时采用电压从正扫向负的 TVS 曲线,误差小于 10% ,其方法与文献[6]相同。为了使测量时可

动离子达到准静态, 电压扫描速率采用 40mV/S。

MOS 电容的电离辐照在本研究所辐照中心 ^{60}Co γ 源上进行, 辐照剂量率为 110Gy(Si)/min。辐照时电容栅极所加电压有三种: 零和正负 10V。为了使实验结果准确, 对一个片芯上的五个电容分成正偏和负偏、零偏和正偏两组进行对比实验, 以消除工艺因素的影响。实验表明, 同种电容在相同实验条件下结果重复性很好。

三、实验结果与讨论

1. 可动离子的污染来源

采用 TVS 技术对几种工艺的 MOS 电容进行了可动离子测量, 数据如表 1 所示。其中每个值都是 10 到 15 个同种样品的平均值。实验表明, 同种样品中所含的可动离子相差很小, TVS 曲线几乎相重合。从表 1 可以得到以下几点结果:

表 1 不同工艺的 MOS 电容可动离子面密度 ($\times 10^{11}\text{cm}^{-2}$)

Table 1 The mobile ion area density of MOS capacitors fabricated with different technology

蒸发方式 Depositing mode	合金温度 Temp. Sintered	干氧 Dry oxygen	干氧+TCE Dry oxygen+TCE
钨 丝 Tungsten coil	400℃	1.00	5.23
钨 丝 Tungsten coil	450℃	3.52	6.25
电子束 Electron beam	400℃, 450℃	<0.2	<0.2

- (1) 钨丝加热蒸发铝栅极带来的可动离子污染较大, 采用电子束蒸铝引起的污染很小。
- (2) 钨丝蒸发带来的可动钠离子污染与合金温度有关, 较高的合金温度下可动离子较多。
- (3) 干氧加 TCE 栅氧化电容比纯干氧栅氧化电容有较多的可动离子。

分析上述结果和实验样品的制造工艺, 我们认为, 可动离子污染主要是由栅金属化过程引起, 很可能是由钨丝本身和源的纯度或蒸发室污染造成。当合金温度增高时, 钠离子扩散到 Al/SiO₂ 界面或 SiO₂ 层内的输运能力得到加强, 因此引起的可动离子污染就较大。对于干氧通 TCE 栅氧化样品, 普遍的结论是由于掺 Cl 样品中可动离子受到 Cl⁻ 的中性化作用, 它们中可动离子含量要比纯干氧栅氧化样品低, 但我们的结果却相反, 其原因很可能来自样品制备过程。这是因为虽然蒸铝设备、合金温度等一样, 但两种样品金属化不是同一次进行, 所以蒸发源纯度或其它意外污染会造成金属化后样品中可动离子含量不同。

2. 辐照引起 MOS 电容中可动离子的变化

图 1 给出 S 样品在 $2 \times 10^3\text{Gy}(\text{Si})$ γ 辐照前后的 TVS 曲线。从图中看到, 无论是正偏还是负偏下辐照, 都引起可动离子电流峰值和面积减小, 而且正偏下辐照减小得更加明显。图 2 表明, 干氧栅氧化的 F 样品也有类似的实验现象。

图 3 给出了 S 样品在 $2 \times 10^3\text{Gy}(\text{Si})$ γ 辐照后多次进行 TVS 测量的曲线, 这是为了观察多次测量的重复性和高温下测量过程中的退火效应。结果表明, 随着测量次数的增加, 可动离子电流峰值和面积都有少量增加。这种现象可能与高温下退火有关。

图 4 给出 Z 样品在零偏和正偏情况下剂量为 $1 \times 10^3\text{Gy}(\text{Si})$ γ 辐照前后的 TVS 曲线, 其中测量温度为 260℃。从图中可以看出, 正偏和零偏条件下辐照使可动离子电流峰值和面积都减

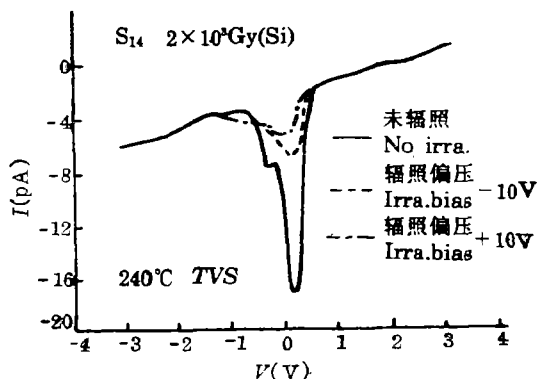


图1 干 O_2 + TCE 栅氧化 MOS 电容在正负偏压辐照前后的 TVS 曲线

Fig. 1 TVS curves of MOS capacitors in dry oxygen + TCE before and after irradiation with different bias

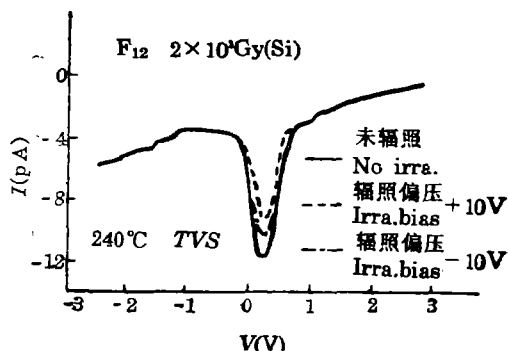


图2 干 O_2 栅氧化 MOS 电容在正负偏压辐照前后的 TVS 曲线

Fig. 2 TVS curves of MOS capacitors in dry oxygen before and after irradiation with different bias

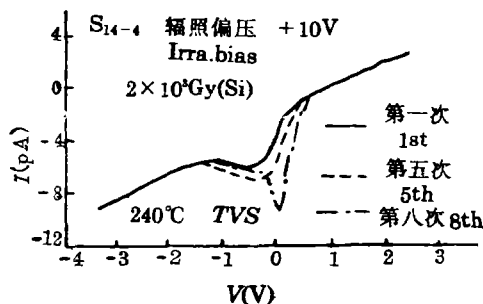


图3 辐照后 MOS 电容的 TVS 曲线随测量次数的变化关系

Fig. 3 TVS curves of MOS capacitors following γ -irradiation for different measurement times

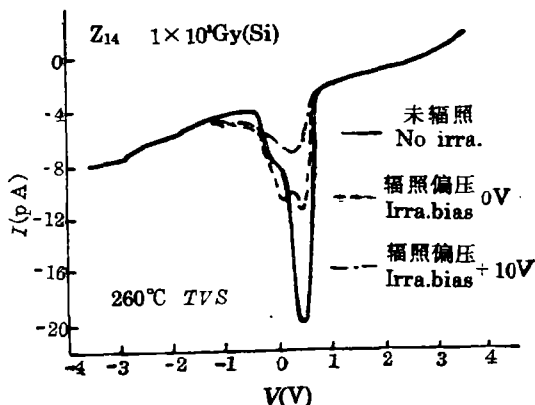


图4 MOS 电容在不同偏压下辐照前后的 TVS 曲线

Fig. 4 TVS curves of MOS capacitors before and after irradiation with different bias

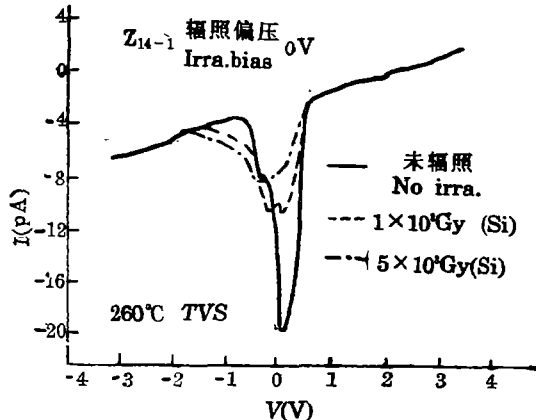


图5 零偏下 MOS 电容随辐照剂量增大的 TVS 曲线

Fig. 5 TVS curves for different irradiation doses with zero bias

小, 但零偏下辐照引起可动离子减少量没有正偏条件下多。

图5给出在样品零偏条件下不同辐照剂量的TVS曲线。十分明显, 随着剂量的增加, MOS电容中可动离子不断减少。然而正偏条件下没有这种渐减现象, 而是减少迅速, 如表2所示, 在 1×10^3 — $5 \times 10^3 \text{ Gy (Si)}$ 剂量范围内, 可动离子的减少似乎已经趋于“饱和”。

从表2和表3给出的辐照前后的实验数据可总结出下列四点结果:

1. 干氧和干氧通 TCE 栅氧化的 MOS

表 2 在正偏和零偏下辐照不同剂量的可动离子面密度 N_m Table 2 Dependence of mobile ion area density N_m on irradiation doses with different bias

剂量 Dose (Gy(Si))	正偏 +1.0MV/cm Positive bias		零 偏 Zero bias	
	$N_m(\times 10^{11}/\text{cm}^2)$	减少百分比(%) Percentage diminished	$N_m(\times 10^{11}/\text{cm}^2)$	减少百分比(%) Percentage diminished
0	6.25		6.25	
1.0×10^3	3.32	46.9	5.85	6.4
3.0×10^3	3.20	48.8	4.88	21.9
5.0×10^3	3.20	48.8	4.49	28.2

表 3 $2 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 剂量辐照前后与多次测量下的 MOS 电容可动离子面密度 $N_m(\times 10^{11}/\text{cm}^2)$ Table 3 The mobile ion area density N_m of MOS capacitors before and after irradiation with dose of $2 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$

样品编号 Sample No.	$E(\text{SiO}_2)(\text{MV}/\text{cm})$	N_m		减少百分比(%) Percentage diminished
		辐 照 前 Before irradiation	辐 照 后 After irradiation	
Z_{8-2}	-1.0	6.25	4.02	35.7
Z_{8-5}	+1.0	6.25	3.52	43.7
S_{14-5}	-1.0	5.23	3.09	40.7
S_{14-4}	+1.0	5.23	2.15	58.9
F_{12-5}	-1.0	3.52	2.54	27.5
F_{12-4}	+1.0	3.52	2.03	42.3
S_{14-4}	+1.0	5.23	2.53	51.6
S_{14-4}	第三次测量: 3rd measurement			23.1
	第五次测量 5th measurement			16.3
	第八次测量 8th measurement			14.1

电容经正偏和负偏条件下辐照后, 可动离子都减少。

2. 可动离子的减少量同辐照所加偏压有关, 在同一剂量辐照下, 正偏时减少量最大, 负偏次之, 零偏最小。

3. 可动离子的减少量同剂量的关系是: 零偏下, 在 $1 \times 10^3 - 5 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 辐照剂量范围内, 随着剂量增大可动离子减少量增加, 正偏下在 $1 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 以后就已“饱和”。

4. 随着在较高测量温度下测量次数的增加, 可动离子有少量增加。

从实验结果可知, 两种栅氧化的 MOS 电容在三种偏置电场下辐照后, 可动离子都减少。其原因很可能是由于可动钠离子与辐照产生的电子-空穴对中电子相复合形成中性钠原子。在零偏辐照时, 由于 Si/SiO_2 附近有氧化物电荷和 SiO_2 层内带正电的可动钠离子存在, 在 SiO_2 层内仍有较小的电场存在, 这就为辐照感生的电子-空穴对提供了一个分离电场, 从而使钠离

子俘获电子成为可能。但由于分离电场不够大,早期电子-空穴配对复合几率较大,钠离子与电子复合几率较小,表现为可动离子减少的量小。当偏置电场增加,分离辐照产生的电子-空穴对增强^[9],从而大大促进了钠离子俘获电子的过程,如表2、3所示,表现为正负偏辐照可动离子比零偏辐照可动离子减少得多。

辐照初始,相同值的正负偏压下辐照产生的电子-空穴对几率相同,钠离子俘获电子的数量也应该相同。但正偏辐照时,由于工艺过程在 SiO_2/Si 界面产生了正电荷俘获陷阱,所以比负偏要有较多的空穴被俘获。抗核辐照研究方面大量实验证实,正偏辐照比负偏辐照空穴俘获要大5—10倍^[10],这样就大大减小了电子与空穴的复合几率,却增强了钠离子俘获电子的几率,如表3所示,表现为正偏辐照比负偏辐照可动离子减少的量要大。

实验结果还给出了正偏和零偏辐照时可动离子减少与辐照剂量的关系(如表2所示)。在正偏辐照下,剂量在 $1 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 以后,可动离子减少了约47%,剂量再增大到 $5 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$,减少百分比几乎不变。而零偏辐照下可动离子减少虽然很慢,但是在渐减。在正偏辐照时随着剂量增加,氧化物正电荷积累增多,由于 SiO_2 层空穴俘获陷阱有限,故逐渐趋于“饱和”^[11]。氧化物正电荷积累一方面使 SiO_2 层内电场减小,另一方面,氧化物正电荷的饱和意味着俘获正电荷量减少,这两个因素使辐照产生的电子与空穴对复合几率增大,导致钠离子俘获电子几率减小,这就是正偏辐照下可动离子减少量随剂量增加而出现“饱和”趋势的原因。零偏时,可动钠离子减小得慢,所以增大剂量仍有很多电子被钠离子俘获。即使如此,到 $5 \times 10^3 \text{Gy}(\text{Si})$ 剂量,可动离子减小百分比约28%,比正偏辐照要小。

当测量次数增加,可动离子有少量增加(如图3所示)。TVS测量温度为 240°C ,由于高温和测量扫描电压作用,中性的钠原子有可能失去电子,成为可动离子,从而增加了可动离子数目。

四、结 语

综上所述,本文对钠污染的 MOS 电容进行了可动离子的电离辐照响应的研究。采用钠离子俘获辐照感生电子-空穴对中电子这一模型,并根据 MOS 电容中氧化物电荷的电离辐照响应特性,对可动离子的剂量和偏置电压依赖关系进行了较圆满的定性解释。

实验证实了钠离子污染是来源于钨丝蒸铝和合金过程,由于样品制备过程的不同性,导致干氧加 TCE 栅氧化样品比纯干氧栅氧化样品中可动钠离子含量高。这两种样品中可动离子的辐照响应特性很相似。

电离辐照引起 MOS 结构中可动离子减少这一现象到目前为止报道较少,早期还报道过相反的现象,因此,确切的电离辐照效应的微观机制还需进一步细致研究。

本实验中样品由北京半导体器件三厂三车间提供,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] P. V. Dressendorfer et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-28(6), (1981), 4281.
- [2] 严荣良,核电子学与探测技术, 5(1985), 5: 274.
- [3] G. Greenw. et al., *Solid-St. Electron.*, 27, (1984), 77.
- [4] 陆德仁等,半导体学报, 4(1983), 298.
- [5] K. F. Galloway, *J. Appl. Phys.*, 45 (1974), 2: 964.

- [6] J. L. Repace, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-24(1977), 6: 2088.
- [7] 谢茂浓, 半导体技术, 35(1982), 1:28.
- [8] 吕世冀等, 南京工学院学报, 2, (1985), 2:96.
- [9] J. N. Churchill, et al., *Adv. in Electronics and Electron Physics*, 58(1982), 1.
- [10] J. R. Schwank, et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-33(1986), 6:1178.
- [11] H. E. Boesch, Jr., et al., *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-33(1986), 6: 1191.

Radiation induced variation of mobile ions in MOS capacitors

Gao Wenyu Yan Rongliang Fan Long

(Xinjiang Institute of Physics, Academia Sinica)

Abstract

The mobile ion area density of MOS capacitors, before and after irradiation with different doses and bias, has been examined using the triangular voltage sweep technique. It is found that after irradiation the mobile ion area density is reduced for MOS capacitors oxidized both with dry oxygen and TCE and with dry oxygen only. The reductions of the density are compared among the samples under irradiation but with positive, negative and zero bias respectively. At zero bias the density steadily decreases with the increasing irradiation dose, but at positive bias it is nearly invariable when dose is increased to over $1 \times 10^3 \text{ Gy(Si)}$. Small increment of the density is found when increasing the times of TVS measurement at high temperature. The experimental results are qualitatively explained.

Keywords: TVS technique Mobile ion area density γ -ray irradiation
Electron-hole pair

(1989年6月19日收到)