

# $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照感生 Si/SiO<sub>2</sub> 慢界面态 及其对高频 C-V 测试的影响\*

高文钰 严荣良 任迪远

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 研究了  $\gamma$  辐照感生 Si/SiO<sub>2</sub> 慢界面态的特性及其对高频 C-V 测试的影响. 结果表明, 辐照产生的慢界面态为界面态的 0.3—0.8, 分布在 Si 禁带中央以上的能级或呈现受主型. 分析认为慢界面态对应的的微观缺陷很可能是 Si—O 断键或弱键. 慢界面态的产生还引起 C-V 曲线同测试速率、方向和扫描前保持时间有关. 文中提出了如何通过高频 C-V 测量比较准确地计算辐照感生氧化物正电荷、界面态和慢界面态密度的方法.

**PACC:** 7340Q, 7320, 6180E; **EEACC:** 2530F

研究 Si/SiO<sub>2</sub> 界面及其附近的缺陷是研制抗辐射加固和高可靠性大规模集成电路的关键. 一般认为, MOS 器件在电离辐照下产生的主要损伤是 SiO<sub>2</sub> 层内氧化物正电荷积累和 Si/SiO<sub>2</sub> 界面态增长. 然而近年来的研究表明, 一些器件性能的退化, 如 MOSFET 的 1/f 噪声增加<sup>[1,2]</sup>、偏压退火不稳定性<sup>[3,4]</sup>等与 Si/SiO<sub>2</sub> 慢界面态(一种分布在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近且同 Si 衬底交换载流子时间常数大的缺陷)有关. 但目前关于慢界面态(以下简称慢态)的认识仍不很清楚. 国外一些研究者认为它应是评价 MOS 结构损伤必不可少的一类缺陷(也称为 Border traps)<sup>[1,5]</sup>. 本文研究了  $\gamma$  辐照感生 Si/SiO<sub>2</sub> 慢态的特性及其对高频 C-V 测试的影响, 提出了慢态的微观缺陷机制和如何通过高频 C-V 测量来较准确地计算辐照感生氧化物正电荷、界面态以及慢态密度的方法.

实验所用样品是北京半导体器件三厂 MOS 工艺生产线上制作的铝栅 MOS 电容, 有关栅氧化和氧化后退火参数见表 1, 除了 M 样品的铝栅是用钨丝加热蒸发形成以外, 其它的均用电子束蒸发形成, 金属化后退火温度约为 450°C, 气氛为 N<sub>2</sub>. 辐照是在本所<sup>60</sup>Co- $\gamma$  源上完成, 辐照剂量率约为 2.4kGy(Si)/h, 偏压为 0V. 采用 HP4280A C-V 仪对辐照前后的 MOS 电容进行了高频(1MHz)C-V 测量, 大部分实验测量速率为 0.6V/s. 为了减少辐照后的退火效应对实验影响, 图 2—4 的数据是在辐照后零偏室温退火一定时间后测得的. 所有图使用的数据均为 N 类样品的.

\* 本工作得到了中国科学院留学回国人员启动基金的资助

高文钰 男, 1964 年生, 副研, 现主要从事 MOS 器件电离辐照和热载流子损伤研究  
严荣良 男, 1935 年生, 研究员, 从事固体辐射物理与微电子器件抗辐射加固技术研究  
任迪远 男, 1950 年生, 副研, 现主要从事线性集成电路辐照效应及其加固技术研究  
1995 年 1 月 3 日收到初稿, 1995 年 6 月 8 日收到修改稿

图 1 给出 N 样品辐照前后的高频 C-V 曲线. 十分明显, 辐照后除了半带电压负向移动 (反映了氧化物正电荷积累) 和 C-V 曲线畸变 (Si/SiO<sub>2</sub> 界面态增长) 外, 正负向 C-V 曲线差异明显 (或形成 C-V 滞后曲线), 这表明在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近形成了慢态.

为了分析慢态的特性, 进行了不同栅压范围的正负向 C-V 测量, 每次正负向测量时在起点电压保持 10 秒钟, 以便使慢态充分放电或充电. 如图 2 所示, 当扫描范围低于半带电容 C<sub>mg</sub> 时, 半带到反型之间的正负向 C-V 曲线差异并不大 (曲线 d) (低于强反型电容 C<sub>inv</sub> 的负向 C-V 曲线较低是由于少子寿命长的缘故). 相反, 当扫描范围大于半带电容时, 形成了较明显的 C-V 滞后曲线 (曲线 a, b, c). 这些说明慢态是分布在禁带中央以上的能级 (或者说呈现受主型). 其中滞后曲线 c 说明有一部分慢态分布在半带到平带之间.

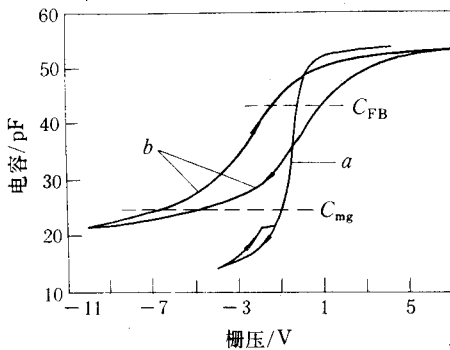


图 1 辐照前后 n-Si-MOS 结构的高频 C-V 曲线  
10kGy(Si), 保持时间=10 秒  
a, 辐照前; b, 辐照后

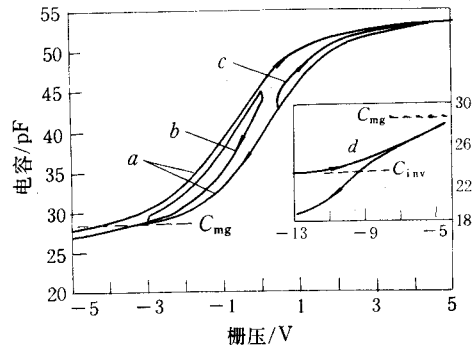


图 2 不同扫描范围 n-Si-MOS 结构的高频 C-V 曲线  
20kGy(Si), 退火 3 天; 保持时间=10 秒 a, (-6V, 5V)  
b, (-3V, 0V); c, (0.5V, 5V); d, (-13V, -4.5V)

现分析图 1 中正负向 C-V 曲线不重合对辐照感生氧化物正电荷和界面态密度计算的影响及其原因. 辐照感生氧化物正电荷密度 ( $\Delta N_{ox}$ ) 和界面态密度 ( $\Delta N_{it}$ ) 常常分别用半带电压漂移量和半带电压与平带电压差的增量来计算 (这时的  $\Delta N_{it}$  是指平带到半带之间界面态密度总和). 计算表明, 从负向与正向 C-V 曲线得到的  $\Delta N_{ox}$  之比为 0.7, 这种较大差异从图中半带电容 C<sub>mg</sub> 对应的半带电压不同也可以看出. 这是由于积累区充电的受主型慢态在电压负向扫描到半带电压时还没有完全放电引起, 而半带电容以下的正向扫描则不受分布在大于半带能级的慢态影响. 从正向与负向曲线计算得到的  $\Delta N_{it}$  之比为 0.9, 这是因为正向扫描时慢态充电速率比负向扫描时慢态放电速率小.

图 3 给出二种扫描速率下的 C-V 曲线, 它反映了 C-V 曲线还同扫描速率有关. 慢速测量时的 C-V 曲线畸变加重 (计算结果表明, 从慢速正向测量的 C-V 曲线得到的  $\Delta N_{it}$  比快速测量得到的大 8%), 同时正负向 C-V 曲线的平带电压差值也减少. 分析认为它是由于慢速测量时充电 (正向扫描时) 和放电 (负向扫描时) 比快速测量时较明显所引起.

图 4 给出辐照后的正负向 C-V 曲线平带电压差值  $\Delta V_b$  与正负向扫描前保持时间的关系. 十分明显,  $\Delta V_b$  随保持时间增长而缓慢增大, 说明有一些电离辐射感生的慢态同 Si 衬底交换载流子时间常数较大. 但最明显的结果是即使保持时间 1 秒,  $\Delta V_b$  仍相当显著. 说明有相当一部分慢态的交换载流子时间常数小于 10 秒量级 (~单向测量时间). 详细研究还表明, C-V 滞后曲线在保持时间大于 10 秒测量时基本上是可重复的.

根据以上分析和结果可以得知, 正向扫描前在负的起始电压保持较长时间 (>10s) 可使

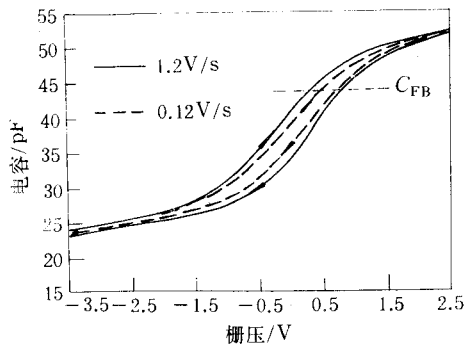


图 3 n-Si-MOS 结构在二种扫描速率下的高频 C-V 曲线  
6kGy(Si), 退火 2 天, 保持时间=10 秒

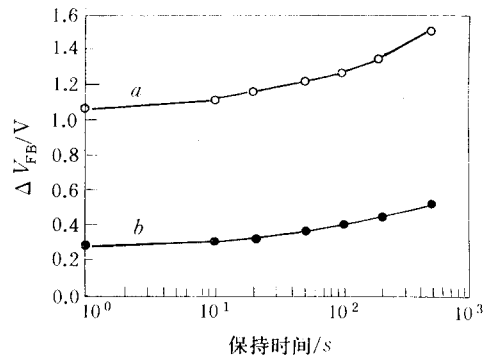


图 4 n-Si-MOS 结构正负向 C-V 曲线的  
平带电压差同保持时间的关系

a, 10kGy(Si), 退火 4 小时; b, 6kGy(Si), 退火 1 天

充电的慢态充分放电, 有利于准确测量氧化物正电荷密度; 正向快速扫描可减少测量过程中慢态充电, 有利于准确测量界面态密度. 虽然慢态密度的准确测量有待于进一步研究, 但由于慢态的产生造成了 C-V 曲线的滞后, 所以用正负向快速扫描测得的 C-V 曲线平带电压差值 ( $\Delta V_{fb}$ ) 来估算慢态密度 ( $\Delta N_{st} = \Delta V_{fb} \times C_{ox} / q$ ) 不失为目前方便可行的方法. 在最近一篇关于慢态研究的报道中采用了正负向 C-V 曲线的半带电压差值 ( $\Delta V_{mg}$ ) 来估算慢态密度<sup>[6]</sup>. 但我们的实验结果表明,  $\Delta V_{mg}$  一般小于  $\Delta V_{fb}$ , 这是由于电压从平带负向扫描到半带过程中受主型慢态放电的缘故. 因此用  $\Delta V_{fb}$  来估算慢态密度比较合理.

表 1 给出几种工艺的 MOS 电容辐照后的  $\Delta N_{it}$ 、 $\Delta N_{ot}$  和  $\Delta N_{st}$ , 比较发现,  $\Delta N_{st}$  与  $\Delta N_{ot}$  和  $\Delta N_{it}$  都不相关, 这说明慢态的微观机理与氧化物正电荷和界面态的都不相同. 此外,  $\Delta N_{st} / \Delta N_{it}$  为 0.3—0.8, 说明慢态是不可忽略的. 所以无论是在进行 MOS 器件的辐照损伤机理研究还是评估器件抗辐射加固性能时都应对慢态给予重视.

表 1 几种工艺的 MOS 电容在 <sup>60</sup>Co-γ 辐照 1Mrad(Si) (零偏) 产生的  $\Delta N_{it}$ 、 $\Delta N_{ot}$  和  $\Delta N_{st} (\times 10^{11} \text{cm}^{-2})$

样品	栅氧化气氛和温度	退火气氛和温度	栅厚	$\Delta N_{it}$	$\Delta N_{ot}$	$\Delta N_{st}$
H(e 束)	干 O <sub>2</sub> +TCE, 1025℃	N <sub>2</sub> , 1000℃	86nm	8.3	10.1	6.1
N(e 束)	干 O <sub>2</sub> +TCE, 1025℃	N <sub>2</sub> , 850℃	106nm	10.2	12.8	5.0
E(e 束)	干 O <sub>2</sub> +TCE, 1025℃	不退火	84nm	5.1	3.9	3.3
Q(e 束)	干 O <sub>2</sub> , 1025℃	N <sub>2</sub> , 1000℃	88nm	5.0	5.2	2.3
K(e 束)	干 O <sub>2</sub> , 1000℃	N <sub>2</sub> , 900℃	86nm	2.9	2.8	1.0
M(W 丝)	干 O <sub>2</sub> , 1000℃	N <sub>2</sub> , 900℃	86nm	0.9	2.9	0.3
M(W 丝)	辐照 4Mrad(Si) (零偏)			1.7	2.6	0.6

\* 干 O<sub>2</sub>+TCE 代表干氧掺三氯乙烯 (TCE) 常规氧化

关于慢态的微观机理, 有的作者认为是同 SiO<sub>2</sub> 中的 E' 中心有关 (氧空位俘获空穴产生了氧化物正电荷后留下的 Si 悬挂键)<sup>[4]</sup>. 但从  $\Delta N_{st}$  与  $\Delta N_{ot}$  之比 (0.1—0.8) 来分析, 慢态似乎与氧化物正电荷无关, 即与 E' 中心无关. 另外理论计算表明<sup>[7]</sup>, E' 中心能级在 Si 价带附近, 同我们实验得到的慢态能级大于 Si 禁带中央的结果不同. 我们认为慢态的微观缺陷很可能是 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近的 Si—O 断裂键或弱键, 它们是由电离辐照引起 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近 Si—O 应力键断裂造成的.

从表 1 还可看出, 辐照后产生的慢态与工艺有密切关系. 干氧化比干氧掺 TCE 氧化明显要好, 可能是因为干氧化样品中的 Si—O 应力键较少的缘故; 采用钨丝加热蒸发形

成铝栅比用电子束蒸铝要好,说明用电子束蒸铝时会引起潜在损伤,导致 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 电离辐照产生较多的慢态和其它缺陷.应用钨丝加热蒸发形成铝栅的样品(M)即使在 4Mrad(Si)辐照后所产生的三种缺陷密度都比用电子束蒸铝的样品(K)在 1Mrad(Si)辐照后产生的要小.

综上所述,研究结果表明:(1)电离辐照感生的慢界面态为受主型(或分布在 Si 禁带中央以上的能级),其值不可忽略,与氧化物正电荷积累和界面态增长两种损伤都不相关;(2)慢态的存在使得  $C-V$  曲线与保持时间、测量方向以及扫描速率有关,较长保持时间和快速正向扫描测得的  $C-V$  曲线有利于准确计算辐照感生氧化物正电荷和界面态密度,用正负向  $C-V$  曲线的平带电压差值可估算慢界面态密度;(3)慢态的微观结构缺陷很可能是电离辐照在 Si/SiO<sub>2</sub> 界面附近产生的 Si—O 断键或弱键;(4)通过优化工艺可以减少电离辐照产生慢态的速率.

**致谢** 感谢北京半导体器件三厂倪秀珍、杨钦英等提供实验样品.

### 参 考 文 献

- [1] D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, R. A. Reber *et al.*, J. Appl. Phys., 1993, **73**(10):5058—5074.
- [2] M. H. Tsai and T. P. Ma, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1992, **NS-39**(6):2178—2185.
- [3] R. K. Freitag, D. B. Brown, and C. M. Dozier, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **NS-40**(6):1316—1322.
- [4] D. M. Fleetwood, M. R. Shaneyfelt, L. C. Riewe *et al.* IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **NS-40**(6):1323—1334.
- [5] D. M. Fleetwood, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1992, **NS-39**(2):269—271.
- [6] W. L. Warren, D. M. Fleetwood, M. R. Shaneyfelt *et al.* Appl. Phys. Lett., 1994, **64**(25):3452—3454.
- [7] A. X. Chu and W. Beall Fowler, Phys. Rev., 1990, **B41**:5061—5066.

## $^{60}\text{Co}-\gamma$ Radiation-Induced Slow Traps in MOS Structures and Their Influence on High Frequency $C-V$ Measurement

Gao Wenyu, Yan Rongliang and Ren Diyuan

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

Received 3 January 1995, revised manuscript received 8 June 1995

**Abstract** Properties of slow traps induced by  $^{60}\text{Co}-\gamma$  radiation in MOS structures and their influence on high frequency  $C-V$  measurement have been studied. It has been found that the generated slow traps lie above midgap, and the ratio of slow trap density to the generated interface trap density ranges from 0.3 to 0.8. We suggest that the corresponding microstructural defects of the slow traps are broken or weak Si—O bonds. Generation of the slow traps results in apparent dependence of  $C-V$  curve on sweep direction, ramp rate and hold time before sweep. Based on the results, we propose how to accurately evaluate density of trapped positive charge, interface traps and slow traps using high frequency  $C-V$  measurement.

**PACC:** 7340Q, 7320, 6180E; **EEACC:** 2530F