

MOS 结构中的两类慢界面态

高文钰 严荣良

(中国科学院新疆物理研究所 乌鲁木齐 830011)

大西一功

(日本大学理工学部电子工学科 船桥市 274 日本)

摘要 通过测量高频 C-V 迟滞曲线研究了 MOS 电容中慢界面态的特性. 发现金属化后退火 (PMA) 前电容中的慢界面态分布在禁带中央以下的能级, 但 PMA 后完全消失; 相反, Fowler-Nordheim 高电场应力引起的慢界面态能级高于禁带中央. 并探讨了这些慢态的微观机理.

PACC: 7340Q, 7360H, 7220H; **EEACC:** 2530F

Si/SiO₂ 慢界面态是位于 Si/SiO₂ 界面附近且同 Si 衬底能长时间交换载流子的缺陷(近来也称 border traps)^[1~3]. 早期人们发现这些缺陷存在于较差工艺的 MOS 器件中^[4], 近年来发现当器件受到电离辐射^[5,6]或 Fowler-Nordheim (FN) 电应力损伤后^[7~9]慢界面态产生明显, 引起器件 1/f 噪声增加^[3,10]以及辐射后偏压不稳定性^[11,12]等. 但对于慢界面态(以下简称慢态)的认识仍不很清楚, 一些作者认为慢态呈现施主型^[3,7], 而也有一些认为是受主型^[8]或分布在禁带上半部^[9]. 本文对 MOS 结构中慢态的能级分布进行了定性研究.

实验样品为 MOS 电容. n 型衬底上的电容栅氧化层厚度为 45~60nm; 氧化温度为 1030℃, 气氛为纯干氧; 氧化后在 N₂ 中退火 30 分钟, 温度同前; 金属化后退火 (PMA) 温度为 400℃, 气氛为 N₂. p 型衬底上的电容栅氧化层厚度为 86nm; 氧化温度为 1000℃, 氧化后在 900℃ 下退火 30 分钟, 氧化及退火气氛同上; PMA 温度为 450℃, 气氛也为 N₂. 栅极均用钨舟加热蒸发形成. FN 电应力是通过在栅极加 30 分钟的正电压完成, 电场大约为 8.3MV/cm. p 衬底电容加电应力同时用光照射, 以便在 Si 衬底中产生足够量的电子(少子)FN 贯穿到栅氧化层中. 采用 HP4284A 或 HP4280A 进行高频(1MHz)C-V 正负向测量. 扫描速率为 0.9V/s. 实验表明: 改变扫描速率对 C-V 曲线迟滞量值有一定影响, 但不会改变本文得到的定性结果. 主要对未经 PMA 电容和经过 PMA 并受到 FN 电应力损伤的电容进行了研究. 其中电应力损伤后在室温退火 1 小时, 以使得电应力造成的损伤充分退火, 从而减少退火效

高文钰 男, 1964 年生, 副研究员, 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
1995 年 3 月 18 日收到初稿, 1995 年 10 月 4 日收到修改稿

应对测量结果影响.

图 1 给出了一个典型的 PMA 前后电容的高频 $C-V$ 曲线. 其中曲线 A 是通过在栅极来回扫描电压获得, 而曲线 B 和 C 在正向和负向扫描前加 2 分钟的保持时间. 从图中可以看出, PMA 前电容的 $C-V$ 曲线存在明显的迟滞, 它是由慢态在扫描过程中或二端保持时间内充放电引起. 进一步研究表明 2 分钟保持时间的测量可获得迟滞最明显而且可重复的 $C-V$ 曲线, 说明慢态同载流子交换时间常数可达分钟量级. 曲线 C 无任何迟滞现象, 反映了 PMA 可以完全消除 PMA 前工艺引入的慢态. 我们还对多种 Si 表面清洗工艺制作的不同栅氧厚度 (45~60nm) 电容作了测试, 结果同上面一致.

为了分析 PMA 前电容中慢态的特性, 进行了图 2 所示的不同栅压扫描范围的测量. 其中保持时间为 2 分钟, 这些曲线完全可以重复测得. 从图中可以看出, 当扫描范围大于半带电容 C_{mg} 时 (对应的表面费米势能高于 Si 禁带中央) 无任何迟滞现象出现 (曲线 A); 相反, 当部分扫描范围低于半带电容时 (对应的表面费米势能低于 Si 禁带中央), 出现了明显的迟滞 (曲线 B, C 和 D). 这说明 PMA 前工艺引入的慢态是分布在禁带中央以下的能级.

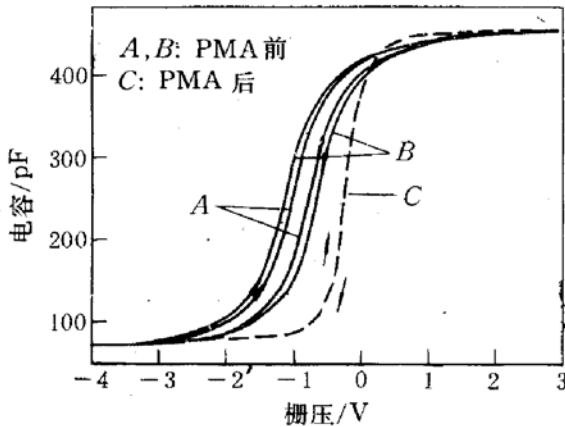


图 1 PMA 前后的高频 $C-V$ 曲线
A 保持时间 0 分钟; B 和 C
保持时间 2 分钟; 栅氧厚度 60nm.

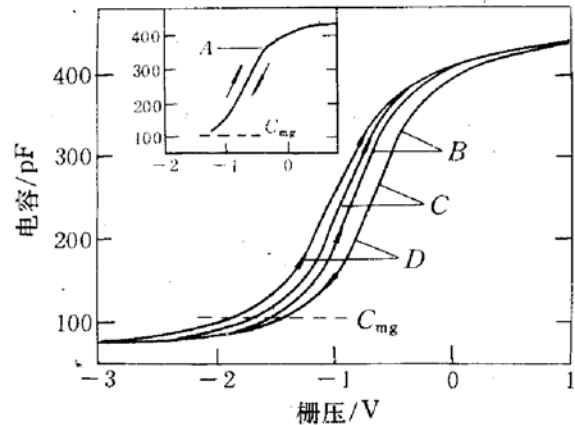


图 2 PMA 前不同扫描范围的 $C-V$ 曲线
A (4V, -1.2V); B (4V, -2V); C (4V, -2.5V);
D (4V, -3V); 保持时间 2 分钟; 栅氧厚度 60nm.

尽管 PMA 消除了慢态, 但受到 FN 电应力损伤后慢态还会出现, 表现为 $C-V$ 曲线出现明显的迟滞现象, 如图 3 所示. 实验表明, 通过 30 秒保持时间的 $C-V$ 测量即可获得可重复的 $C-V$ 迟滞曲线, 说明电应力产生的慢态同载流子交换时间常数也达分钟量级. 但其能级分布同未经 PMA 电容的完全相反, 是分布在禁带中央以上的能级. 如图 4 所示, 图中给出了一个 p 型 Si 衬底上制得的电容在不同扫描范围的 $C-V$ 曲线, 十分明显, 当扫描范围大于半带电容时 (对应的表面费米势能低于 Si 禁带中央) 无迟滞现象 (曲线 A); 而当部分扫描范围低于半带电容时 (对应的表面费米势能大于 Si 禁带中央) 出现迟滞现象 (曲线 B 和 C). 对 n 衬底 Si 上制作的 MOS 电容也有相同的结果^[13]. 还对多种氧化温度及退火温度的 MOS 电容进行了研究, 发现 FN 电应力引起的慢态确实是分布在禁带中央以上的能级.

我们认为未经 PMA 电容中慢态所对应的微观结构很可能是 Si-Si 弱键, 这是因为实验的结果同理论上计算的 Si-Si 弱键的能级在 Si 价带附近相一致^[14]. 经过 PMA 后, 这些弱键由于应力梯度减少^[15] 形成能级较深的氧空位缺陷. 氧空位缺陷已被证明为电离辐射产生氧化物正电荷的主要原因之一^[16]. 因此, 如果我们的解释正确的话, 就可以用检测 PMA

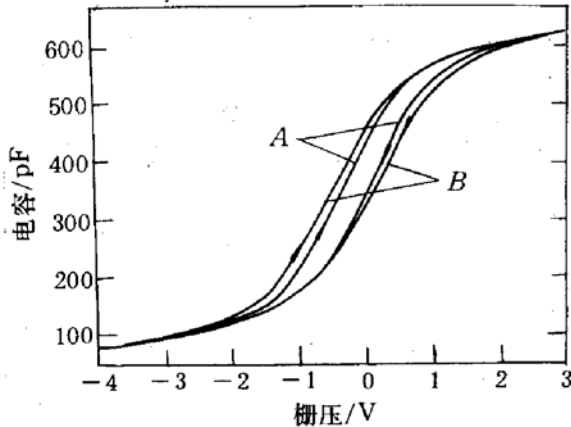


图 3 FN 电应力损伤后的 $C-V$ 曲线
A 保持时间 0 分钟; B 保持时间 2 分钟,
栅氧厚度 45nm.

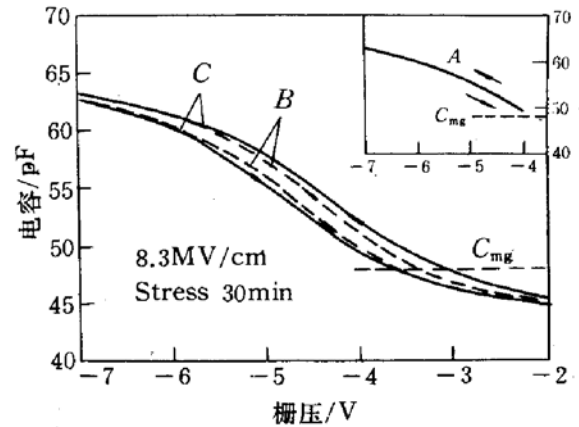


图 4 FN 电应力损伤后不同扫描范围的 $C-V$ 曲线
A (-10V, -4V); B (-13V, 1V); C (-13V, 3V);
保持时间 30 秒, 栅氧厚度 86nm.

前的慢态多少来预测最终器件中氧化物电荷的电离辐射敏感性. 另外, 未经 PMA 电容中慢态分布在禁带中央以下能级这一结果对认识 MOS 结构中缺陷类别有一定作用.

由于本文实验表明 FN 电应力引起的慢态分布在禁带中央以上的能级, 所以它的微观结构不应该是 Si-Si 应力键. 早期对 Si-O 弱键能级的计算结果是高于禁带中央^[17], 这意味着电应力产生的慢态的微观结构可能是 Si-O 弱键, 它们很可能是在电应力下 Si-O 应力键断裂造成的. 慢态给器件带来的很多不利因素, 如阈值电压的偏压不稳定性, $1/f$ 噪声增加等^[3, 10~12]. 如何降低慢态在电离辐射及 FN 电应力下的产生率是提高大规模集成电路可靠性的关键因素之一.

综上所述, 我们通过测量高频 $C-V$ 迟滞曲线发现未经 PMA 的 MOS 电容中的慢态能级低于禁带中央, 而 FN 电应力产生的慢态分布在禁带中央以上的能级. 并认为它们对应的微观缺陷分别是 Si-Si 和 Si-O 弱键. 这些有待于进一步通过微观分析手段来验证.

参 考 文 献

- [1] E. H. Nicollian and J. R. Brews, *MOS Physics and Technology*, New York, Wiley, 1982, 775~789.
- [2] D. M. Fleetwood, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, **NS-39**: 269~271.
- [3] D. M. Fleetwood and P. S. Winokur *et al.*, *J. Appl. Phys.*, 1993, **73**: 5058~5074.
- [4] D. J. Breed, *Appl. Phys. Lett.*, 1975, **26**: 116~118.
- [5] D. M. Fleetwood and M. R. Shaneyfelt *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **NS-40**: 1323~1334.
- [6] W. L. Warren and D. M. Fleetwood *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**: 3452~3454.
- [7] D. D. Xie and D. R. Yang, *J. Electrochem. Soc.*, 1992, **139**: 2974~2979.
- [8] M. J. Uren, in *Insulating Films on Semiconductors*, Adam Hilger, Bristol, W. Eccleston and M. J. Uren, 1991, 287~290.
- [9] M. Kerber, *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**: 2125~2127.
- [10] M. H. Tsai and T. P. Ma, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1992, **NS-39**: 2178~2185.
- [11] D. A. Buchanan and D. J. Dimaria, *J. Appl. Phys.*, 1990, **67**: 7439~7452.

- [12] R. K. Freitag, D. B. Brown and C. M. Dozier, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, **NS-40**, 1316~1322.
[13] 高文钰, 等, 半导体学报, 待发表.
[14] A. X. Chu and W. B. Fowler, Phys. Rev., 1990, **B41**, 5061~5066.
[15] A. K. Sinha and T. T. Sheng, Thin Solid Film, 1978, **48**, 117~122.
[16] P. M. Lenahan and P. V. Dressendorfer, Appl. Phys. Lett., 1982, **41**, 542~544.
[17] T. Sakurai and T. Sugano, J. Appl. Phys., 1981, **52**, 2889~2896.

Two Species of Slow Traps in MOS Structures

Gao Wenyu and Yan Rongliang

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

Kazunori OHNISHI

(Department of Electrical Engineering, Nihon University, Chiba 274, Japan)

Received 18 March 1995, revised manuscript received 4 October 1995

Abstract The natures of slow traps in MOS capacitors have been studied by using high frequency hysteresis $C-V$ measurements. It has been found that the slow traps in non-PMA capacitors lie energetically below midgap, while Fowler-Nordheim high field stress induced slow traps lie above midgap. Possible origins of the slow traps are discussed.

PACC: 7340Q, 7360H, 7220H; **EEACC:** 2530F