

6H-SiC MOS 结构电特性及其辐照效应的研究¹

尚也淳 张义门* 张玉明* 刘忠立

(中国科学院半导体研究所微电子研发中心 北京 100083)

*(西安电子科技大学微电子研究所 西安 710071)

摘要 对 SiC MOS 结构辐照引起的电参数退化及其电特性进行了研究。结果说明: 在氧化层电场较高时 Fowler-Nordheim 隧穿电流决定着 SiC MOS 结构的漏电流, 当辐照栅偏压为高的正电压时, 电离辐照对 SiC MOS 电容的影响会更明显, SiC MOS 器件比 Si 器件具有好的抗 γ 辐照的能力, 在 58kGy (Si) 的辐照剂量下, 其平带电压漂移不超过 2V。

关键词 SiC MOS 结构, 辐照, 平带电压, 退火

中图分类号 TN386.1

1 引言

为了使 SiC MOS 器件能够在高辐照环境下正常工作, 栅氧化层必须具有高的击穿电场, 低的漏电流, 低的氧化物电荷和界面态电荷。对 SiC MOS 结构的电特性研究目前已有报道^[1]。在早期的研究中, 由于所使用 SiC 样品中缺陷密度较大, SiC MOS 电容不能表现出很好的 C-V 特性, 研究只能集中在 SiC/SiO₂ 的界面态密度及反型层迁移率的测量上, 当前随着 SiC MOS 技术和工艺的提高, SiC MOS C-V 曲线显示了令人满意的积累区, 耗尽区和深耗尽区, 这就为研究 SiC MOS 结构的辐照特性提供了条件。为了研制出能够在高辐照环境下工作的 SiC MOS 器件, 首先必须对 SiC MOS 结构的电学性质及辐照退化效应有一个具体数量上的认识。已有文献分析了 Co⁶⁰ γ 辐照对 SiC MOS 结构的影响^[2,3], 结果表明, 3C-SiC MOSFET 应能承受 10kGy(SiO₂) 的辐照剂量。但到目前为止, 辐照对 6H-SiC MOS 电容电参数影响及其退火特性的研究还没有见报道过。

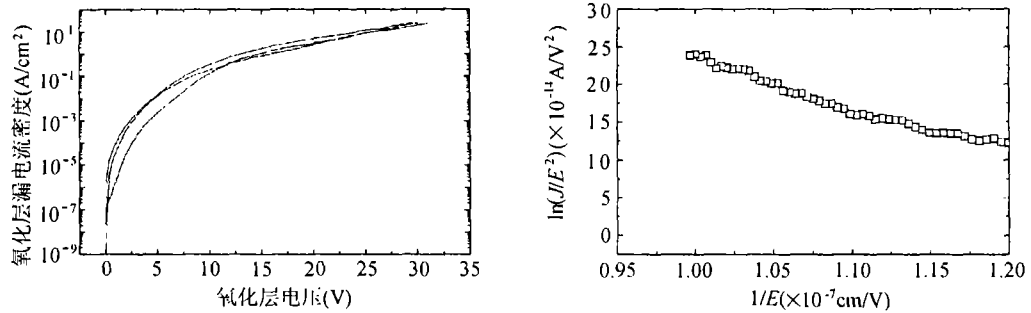
本文对 6H-SiC MOS 电容的 C-V 特性和漏电流进行了电学分析。测量了在不同辐照偏压下, 6H-SiC MOS 电容 C-V 特性随辐照剂量的变化; 分析了栅偏压对 SiC MOS 电容平带电压漂移的影响; 并研究了 SiC MOS 电容的辐照退火特性。

2 SiC MOS 结构的 I-V 特性

实验所采用的样品是在 n 型 6H-SiC 衬底上制作的 MOS 电容, SiC 衬底来自 Cree Research, 掺杂浓度为 $1.1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$, 将衬底在 1100 °C 的温度下热氧化 2h, 可生长氧化层厚度为 30nm, 然后在氧化层上蒸 Al, 并刻出图形。单个 MOS 电容的图形为圆形, 直径为 515 μm 。为了便于测试, 最后对样品进行了封装。

通过 I-V 特性的测量可对 SiC MOS 电容氧化层的漏电流进行分析, 在 Al 栅电极和衬底 n 型 SiC 之间加上正电压, 那么, 电子就会由 n 型 SiC 中向氧化层中发射。测量是在 HP4156B 半导体参数测试仪上进行的。在测量中, 氧化层电压由 0V 变化到 30V, 即氧化层电场由 0 变化到 10MV/cm, 没有发现氧化层击穿, 由于这时漏电流较大再加上测量仪器的限制, SiC MOS 氧化层的击穿特性没有得到。图 1(a) 为 6H-SiC MOS 电容在室温下测量的 I-V 特性曲线。

¹ 2001-09-03 收到, 2002-03-08 改回



(a) SiC MOS 电容 I-V 特性

(b) SiC MOS 电容 $1/E$ 和 $\ln(J/E^2)$ 的关系

图 1 6H-SiC MOS 电容漏电流随电压的关系

室温下,一般在电场较低时,是其它漏电机理决定着氧化层电流的大小,而在电场较高时,电流会呈指数增加, Fowler-Nordheim 隧穿电流起主要作用。在 SiO_2 层的漏电机理中, Fowler-Nordheim 隧穿机制可用下式来表示^[4,5]:

$$J = CE^2 \exp\left(\frac{-8\pi\sqrt{2m_{ox}}\Phi^{3/2}}{2hqE}\right) \quad (1)$$

其中 $C = e^2 m_t / (8\pi h m_{ox} \Phi)$, J 为氧化层漏电流密度, E 是电场, h 是普朗克常数, Φ 为氧化层和 n 型 6H-SiC 之间的势垒高度, m_{ox} 是氧化层内电子有效质量,对于 6H-SiC 来说, $m_t = 0.42m_0$, m_0 为电子静止质量。从 (1) 式可以看出,当 Fowler-Nordheim 机理占主导地位时, $\ln(J/E^2)$ 和 $1/E$ 应成线性关系,经分析,当 $8.5\text{MV/cm} < E < 10\text{MV/cm}$ 时, $\ln(J/E^2)$ 和 $1/E$ 有图 1(b) 所示关系。可见,当栅氧化层电场大于 8.5MV/cm 时, Fowler-Nordheim 隧道电流在 SiC 栅氧化层的漏电流中起主导作用。P.Friedrichs^[1] 在他的研究中也曾发现,当栅氧化层电场大于 7MV/cm 时, SiC MOS 结构的主要电流产生机制主要就为 Fowler-Nordheim 隧道电流。

隧道发射与外电压有着强烈的关系。如果电场再进一步升高到一定程度,就会引起氧化层击穿。根据文献 [1, 5], 在氧化层厚度为 60nm 时, 6H-SiC MOS 结构氧化层的击穿电场为 $2\text{--}11\text{MV/cm}$ 不等。对于 Si MOS 电容来说,氧化层的本征击穿电场为 $10\text{--}30\text{MV/cm}$ 。SiC 氧化层的击穿电场普遍低于 Si 的氧化层,这是由于 SiC 生长 SiO_2 时,同时形成的 CO 要穿过 SiO_2 向外扩散,会影响界面质量。另外,对于 SiC MOS 氧化层的研究现在一般采用 Al 栅,温度升高, Al 容易穿透 SiO_2 层,引起电容过早击穿。若采用多晶硅栅,将会改善 SiC/ SiO_2 界面的质量,因为相对 Al 栅而言,多晶硅栅的离子沾污少,所以能够稳定。

3 SiC MOS 电容的 C-V 分析

图 2 是 SiC MOS 电容的高频 C-V 曲线。在测量中,偏压扫描速率为 0.1V/s ,信号频率为 1MHz 。电压从积累区扫描到深耗尽区,再扫回积累区。正扫曲线和反扫曲线在耗尽区表现微小迟滞,这是由于在 SiC/ SiO_2 界面附近存在着时间常数较大的陷阱,这些陷阱与半导体交换电荷所致。当电压从负偏压向正电压方向扫描时,陷阱中的正电荷还很多,所以 C-V 关系表现为沿图 2 中的左边曲线上升。随着栅偏压增高,栅极上的正偏压形成的电场有利于 SiC/ SiO_2 界面处的电子从 SiC 一侧向 SiO_2 中注入,注入的电子填充陷阱后使其带负电, C-V 特性向正电压方向平移,故 C-V 关系表现为沿图 2 中的右边曲线下降。

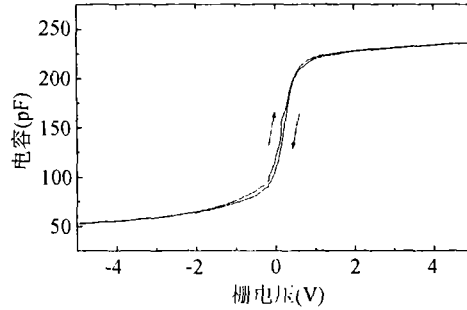


图2 6H-SiC MOS 电容室温高频 C-V 特性

根据 (2) 式可以得到有效固定电荷密度 (包括不随温度和偏压改变的界面附近的氧化层正电荷、界面态电荷和可动离子等)。

$$N_f = \frac{Q_f}{e} = -\frac{C_{ox}}{e}(V_{FB} - \Phi_{ms}) = -\frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{e} \frac{(V_{FB} - \Phi_{ms})}{d_{ox}} \quad (2)$$

其中 d_{ox} 为氧化层厚度, ϵ_{ox} 为氧化层的相对介电常数, Q_f 为 SiC/SiO₂ 界面有效固定电荷密度, V_{FB} 为平带电压, Φ_{ms} 为金属和 SiC 的功函数差。

$$\Phi_{ms} = W_m - W_{SiC} = W_m - (\chi + E_C - E_F) \quad (3)$$

金属 Al 的功函数 W_m 为 4.2eV, 6H-SiC 的亲能 χ 为 3.8eV, 对于掺杂 $1.1 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 的 n 型 6H-SiC 来说, $E_C - E_F$ 为 0.185eV。根据所测量的 C-V 特性, 样品的平带电压为 0.25eV。利用 (2) 式求得 SiC/SiO₂ 界面有效固定电荷密度为 $7.185 \times 10^{11}/\text{cm}^2$, 电荷为负。这是因为对于 n 型 SiC MOS 电容, 费米能级在导带附近, 大多数界面态被电子占据, 因此界面态表现为负, 从而导致总的有效固定电荷为负。

4 γ 射线辐照对 SiC MOS 电容的影响

对以上 SiC MOS 电容进行 γ 辐照实验, 在辐照过程中, 实验样品分别加上偏压 10V, 5V, -5V 和 -10V, 辐照剂量率为 0.625Gy(Si)/s。本实验是在西北核技术研究所的 Co 源上进行的。在不同的 γ 辐照剂量下对不同辐照栅压的 SiC MOS 电容 C-V 特性分别进行测量, 其结果如图 3 所示。由图 3 可以看出, 电离辐照引起了 SiC MOS 电容 C-V 曲线向负电压方向漂移, 这是由于辐照在 SiC MOS 结构中引入了界面态电荷和氧化物电荷, 界面态电荷的产生归因于界面大量弱键在辐照作用下断裂成了悬挂键, 而氧化物电荷是由于在电场作用下, 辐照产生的空穴在界面陷阱区被陷阱俘获造成的。

在图 3(b) 和图 3(c) 中, 可以观察到在 C-V 曲线上出现一段平台的异常现象, 这是由于在 SiC MOS 电容样品制作过程中引入的界面陷阱所致^[6], 这种界面陷阱发射或俘获电子的速率和栅电压变化的速率相等, 界面陷阱中的电荷会屏蔽从栅极到 SiC 衬底之间的电场, 使得耗尽层中的电场保持不变, 这样, 耗尽层厚度不随栅压而变, 电容也不随栅压而变化。在图 3(a) 中, 曲线在辐照剂量较小时负偏压下出现向下漂移, 这与 SiC MOS 界面深能级陷阱有关, 其具体关系还需要进一步研究。

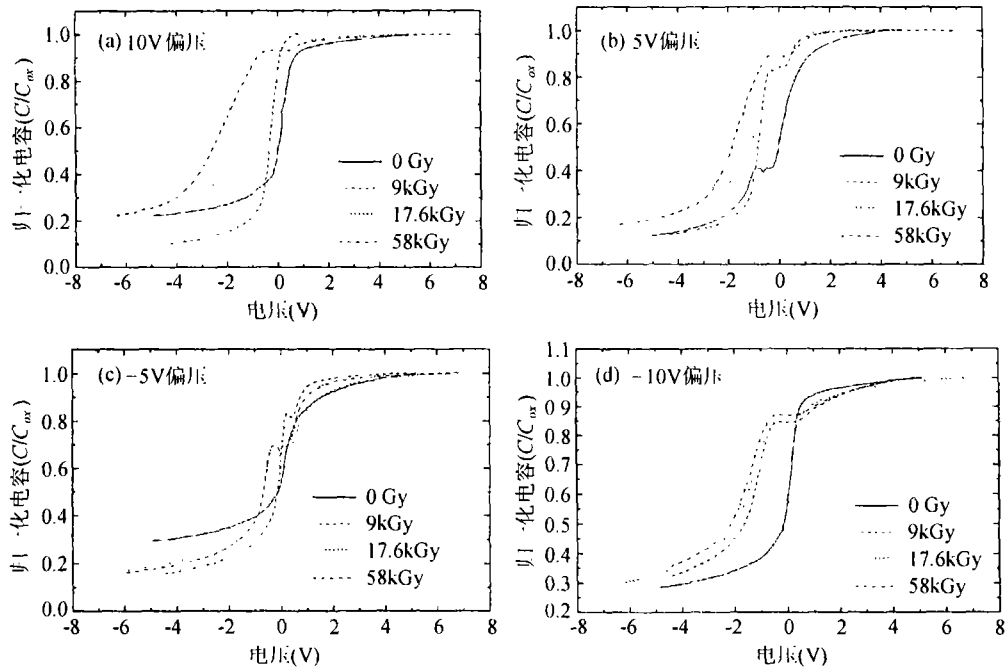


图 3 不同偏压下, 辐照对 6H-SiC MOS 电容的影响

图 4 为在不同辐照剂量下, 栅偏压对 SiC MOS 电容平带电压的影响。从图中可以看出, 辐照偏压对 SiC MOS 电容的辐照特性影响很大。当栅压为正时, 辐照过程中产生的空穴在电场作用下缓慢地朝 SiO₂/SiC 界面漂移, 在通过陷阱区时, 大量地被陷阱俘获, 建立其正氧化物电荷。在栅压较低时, 电子和空穴的早期配对复合较严重, 建立的氧化物电荷密度较小, 随着正栅压的增高, 氧化物电荷逐渐增高。辐照栅压为负时, 空穴向栅极输运, 通过陷阱区的空穴很少, 因而氧化物电荷很少。当栅偏压加负电压正好和金属 / 半导体功函数差相等时, SiO₂ 层中的电场为 0, 辐照产生的电子空穴对会大量复合, 只有界面附近的电子才能离开 SiO₂ 层, 少量的空穴被俘获于 SiC/SiO₂ 界面附近, 从而使得辐照对 SiC 表面的影响大大减小。在我们的实验

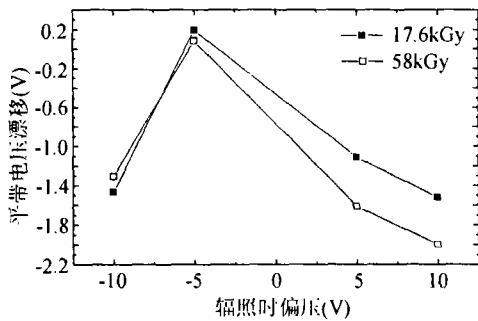


图 4 不同栅偏压下辐照的 SiC MOS 电容平带电压漂移

中, 偏压 -5V 最接近于这一点, 所以在这个偏压下, 电离辐照对 SiC MOS 电容的影响较小。当负栅偏压继续加大时, 尽管在 Al/SiO₂ 界面附近会俘获正电荷, 但离 SiC 表面相对较远, 因此负栅偏压的作用会有所降低。但当负栅压进一步增大且辐照剂量较大时, 在 Al/SiO₂ 界面附近会俘获大量的正电荷, 这还是可以引起较大的 MOS C-V 特性变化。平带电压漂移可以很直观地反映 MOS 电容的电离辐照特性。

图 5 示出了在 10V 偏压下辐照, SiC MOS 电容和 Si MOS 电容平带电压漂移与辐照累积剂量的关系, 其中 CE, CK, CI, CG, CH, CL, CF, CJ 分别为用不同的工艺制作的 Si MOS 电容

[7]。由图中可以看出, SiC MOS 电容的抗辐照特性比抗辐照特性最好的 Si MOS 电容 CJ 还要好。在 10kGy(Si) 的辐照剂量下, SiC MOS 的平带电压漂移仅为 -1.5V , 这说明了 SiC 材料不仅自身具有好的抗辐照特性, SiC MOS 结构同样具有优于 Si MOS 结构的抗辐照性能。

5 SiC MOS 电容的辐照退火特性

MOS 器件的电离辐照效应存在着和时间相关的退火过程。图 6 是在 58kGy(Si) γ 辐照后的 SiC MOS 电容样品在 0 栅偏压, 室温下的退火曲线, 由图中可以看出, 不管辐照后 MOS 电容平带电压的漂移有多大, 在中止辐照后 MOS 电容的特性都呈恢复趋势, 平带电压漂移的恢复最大可达 1.5V。对于 SiC MOS 电容, 在 0 栅压和室温下, 一般需要 24h 才可使 MOS 电容的特性稳定下来, 但是退火并没有使 MOS 电容还原到辐照前的状态, 说明退火只能使部分辐照损伤得到恢复, 这是因为室温下退火只能使俘获的正电荷暂时得到补偿 [8], 剩下的辐照缺陷需要更高的退火温度才能消除。

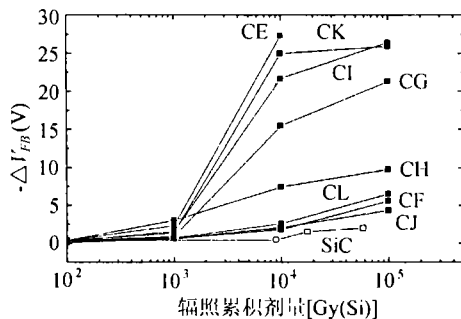


图 5 10V 偏压辐照下, Si 和 SiC 平带电压漂移与辐照剂量的关系

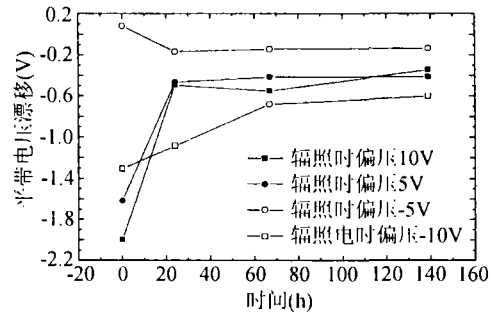


图 6 室温下 SiC MOS 电容辐照后的退火特性

6 小 结

本文对在 n 型 6H-SiC 上制备的 SiC MOS 结构进行了电学分析。分析结果表明, 在氧化层电场较高时是 Fowler-Nordheim 隧穿电流决定着 SiC MOS 结构的漏电流, 实验样品的有效固定电荷密度的计算值为 $7.185 \times 10^{11}/\text{cm}^2$, 电荷表现为负。在此基础上, 对不同的栅偏压和不同的 γ 电离辐照剂量下 SiC MOS 电容样品的 C-V 特性变化进行了研究, 研究结果显示了当氧化层中存在较强电场时, 电离辐照对 SiC MOS 电容的影响会更明显, 尤其是当栅偏压为高的正电压时, 这种辐照影响最显著。然而在 SiO_2 层中电场趋于 0 时, 电离辐照对 MOS 电容的作用较小。与 Si MOS 电容在相同辐照条件下辐照效应的对比说明了, SiC MOS 器件比 Si 器件具有更好的抗 γ 辐照的能力。对 SiC MOS 电容电离辐照退火特性的研究表明在 0 栅压, 室温下, 经过 24h 可使 SiC MOS 电容的特性趋于稳定。

参 考 文 献

- [1] P. Friedrichs, E. P. Burte, Dielectric strength of thermal oxides on 6H-SiC and 4H-SiC, Appl. Phys. Lett., 1994, 65(13), 1665-1667.
- [2] M. Yoshikawa, Y. Morita, Gamma-ray irradiation effects on cubic silicon carbide metal-oxide-semiconductor structure, Springer Proceedings in Physics, Vol.71, Amorphous and Crystalline Silicon Carbide IV, 1992, 393-398.

- [3] M. Yoshikawa, K. Saitoh, T. Ohshima, Generation mechanisms of trapped charges in oxide layers of 6H-SiC MOS structures irradiated with gamma-rays, Int. Conf. on Silicon Carbide, III-Nitrides and Related Materials, Switzerland, 1998, 1017-1020.
- [4] J. B. Casady, J. D. Cressler, Direct current characterization of depletion-mode 6H-SiC MOSFETs form 294 to 723K, Solid State Electronics, 1996, 39(6), 777-784.
- [5] D. Alok, P. K. Mclarty, Electrical properties of thermal oxide grown on n-type 6H-silicon carbide, Appl. Phys. Lett., 1994, 64(21), 2845-2848.
- [6] 郭维廉, 硅-二氧化硅界面物理, 北京, 国防工业出版社, 1989, 第3章.
- [7] 宋钦岐, MOS 电容的电离辐照效应及其加固技术研究, 抗核加固, 1986, 3(1), 33-42.
- [8] 赖祖武, 抗辐射电子学——辐射效应及加固原理, 北京, 国防工业出版社, 1998, 46-83.

STUDY ON THE ELECTRIC CHARACTERISTICS AND RADIATION RESPONSE OF 6H-SiC MOS STRUCTURE

Shang Yechun Zhang Yinen* Zhang Yuning* Liu Zhongli

(*Microelectronics R & D Center, Institute of Semiconductor, CAS, Beijing 100083, China*)

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

Abstract The radiation response and electric characteristics of 6H-SiC MOS structure are studied with experiment. It is found that the main electronic conduction mechanism in the high field regions of the I-V characteristics is identified to be Fowler-Nordheim tunneling. The fact that ionization radiation effect becomes more notable at high oxide electric field indicates that the generation of radiation induced charge-centers near SiC/SiO₂ interface and in gate oxide under high electric field is higher than that under low electric field. SiC MOS structure has a more significant tolerance to γ rays than Si MOS structure. Flatband voltage shift of SiC MOS capacitor is less than 2V under radiation of 58kGy(Si).

Key words SiC MOS structure, Radiation, Flat-band voltage, Annealing

尚也淳: 男, 1970年生, 博士后, 研究方向为 MRAM 及 SiC 器件的研制.

张义门: 男, 1941年生, 教授, 从事器件模型, VLSI 计算机辅助设计的教学和研究工作.

张玉明: 男, 1965年生, 教授, 从事电路 CAD 及 SiC 材料和器件的研究.

刘忠立: 男, 1940年生, 研究员, 从事半导体器件及其物理的研究.