

不同工作压强下 ICP 刻蚀对 SiC 表面损伤的研究

吕英, 庞爱锁, 杨伟锋, 陈厦平, 朱会丽, 吴正云

(厦门大学物理系, 福建 厦门 361005)

摘要: 采用 CF_4/O_2 作为刻蚀气体, 对不同工作压强下 ICP 刻蚀 SiC 材料的刻蚀速率以及随之引入的刻蚀损伤进行了研究. 结果表明, 随着工作压强的增加, ICP 刻蚀 SiC 材料的速率先缓慢增加, 然后急剧降低. 通过 XPS 光电子能谱分析发现刻蚀后样品表面的 F、O 含量均有所增加, 表面污染加剧, 刻蚀引入的损伤随着工作压强的增加而增加.

关键词: SiC; ICP 刻蚀; 工作压强; 表面损伤

中图分类号: O48

文献标识码: A

Surface damage of inductively coupled plasma etched SiC on different work pressure

LÜ Ying PANG Ai-suo YANG Wei-feng CHEN Xia-ping ZHU Hui-li WU Zheng-yun
(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract 4H silicon carbide (SiC) was dry etched in an inductively coupled plasma (ICP) system, using CF_4/O_2 gas mixtures. Etch rate and surface damage induced by ICP etching have been investigated as a function of the work pressure. We found that the etch rate of SiC initially increased slightly and then decreased rapidly with the increase of work pressure. It was also observed that the F and O radical concentration on the etched surface, which was obtained by X-ray photoelectron spectroscopy measurements, increased. The surface damage induced by ICP etching increased with the work pressure.

Keywords SiC; ICP etch; work pressure; surface damage

SiC 材料是继第一代元素半导体材料 Si 和第二代化合物半导体材料 GaAs、GaP、InP 等之后发展起来的第三代宽禁带半导体材料^[1]. 由于其具有禁带宽度大 ($2.3 \sim 3.3$ eV)、临界击穿电场高 (2.5×10^6 V/cm)、饱和电子漂移速度大 (2×10^7 cm/s)、热导率高 (4.9 W/(cm·K)) 等优点, 在制备高温、高频、大功率、抗辐射的半导体器件及紫外光电探测器等方面具有极其广泛的应用. 在 SiC 器件制备过程中, 快速低损伤的刻蚀技术是必不可少的. 然而 SiC 材料由于硬度高、化学性质稳定, 需要在高温条件下进行湿法化学腐蚀, 此方法获得的刻蚀精度低且刻蚀选择比差. 目前常采用的 SiC 刻蚀方法多为干法刻蚀, 主要包括: 反应离子刻蚀 (RIE)^[2]、电子回旋共振 (ECR) 等离子体刻蚀^[3] 及感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀^[4] 等. 其中, ICP 刻蚀系统可以同时提供较高的等离子体密度 ($\sim 5 \times 10^{11}$ cm⁻³) 以及独立的衬底偏压源控制, 使得在较低的衬底偏压下获得较高的刻蚀速率成为可能. 此外 ICP 刻蚀设备还具有结构简单、外形小、操作简便、便于自动控制、适合大面积基片刻蚀等一系列优点, 因此在 SiC 器件制备中得到广泛的应用.

目前已有大量不同刻蚀气体下 ICP 刻蚀 SiC 材料的相关报道^[4-7], 包括 NF_3 、 SF_6 、 CF_4 、 Cl_2 及其含 O_2 或 Ar 的混合气体等. 研究表明, ICP 刻蚀使用的最有效的刻蚀气体为 SF_6 . Kim 等人利用 SF_6 刻蚀气体获得了高达 $1.50 \mu\text{m}/\text{min}$ 的 SiC 刻蚀速率^[8]. 研究还发现不同刻蚀参数对刻蚀速率有很大的影响, 因此研究不同刻蚀参数对 SiC 刻蚀速率的影响是必要的. 此外, 在干法刻蚀过程中不可避免地将引入表面损伤, 这在很大程度上影响着器件的最终性能, 因此进一步研究 ICP 刻蚀对 SiC 表面的损伤也有着重要的意义.

本文采用 CF_4/O_2 作为刻蚀气体, 研究了不同工作压强下 ICP 刻蚀 SiC 材料刻蚀速率的变化, 同时利

用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对刻蚀后样品表面化学元素及其化学结合状态进行分析, 研究了不同工作压强下 ICP 刻蚀对 SiC 材料引入的表面损伤。

1 实验

实验采用 4H-SiC 外延片; 衬底为 n^+ 型, 电阻率为 $0.02 \Omega \cdot \text{cm}$, 厚度为 $400 \mu\text{m}$; 外延层为 n 型, 掺杂浓度为 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度为 $4 \mu\text{m}$ 。经标准清洗后, 在样品表面涂覆一层正性光刻胶, 利用图形曝光技术去除一半光刻胶, 接着溅射一层 290 nm 的 Ni , 利用剥离工艺图形化 Ni 作为刻蚀掩膜, 然后进行 ICP 刻蚀。刻蚀在北京创威纳科技有限公司生产的 ICP-2B 型刻蚀机中进行, 采用 CF_4 和 O_2 作为刻蚀气体。将样品置于反应腔内, 利用抽气系统使反应腔内的真空度达到 $3.9 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。接着通入刻蚀气体, 气体流量由流量计控制。调节节流阀改变反应腔内工作压强, 使工作压强为 $0 \sim 2.5 \text{ Pa}$ 。本实验采用的其他刻蚀参数固定为: ICP 源功率 $P_1 = 300 \text{ W}$, 偏压源功率 $P_2 = 100 \text{ W}$, CF_4 流量 15 mL/min , O_2 流量 5 mL/min 。刻蚀时间 20 min 。刻蚀深度由 DekTak-3 探针轮廓仪测量。刻蚀后使用 PHI Quantum 2000 Scanning ESCA Microprob 型 XPS 仪对样品的刻蚀区域进行 XPS 分析。仪器使用的 X 射线源为单色化的 $\text{AlK}\alpha$, 能量为 1486.6 eV , 工作在 15 kV 电压下。由于存在荷电效应, 实验结果按 C_{1s} 的结合能为 282.5 eV (对应为 SiC 中的 C-Si 键^[9]) 进行能量校正, 其他谱峰也相应随之移动。所有的 XPS 谱图均采用线性背景类型扣除背景, 再利用 Gaussian 拟合获得表面元素化学结合状态信息, 相对原子个数由元素谱峰面积除以其灵敏度因子获得。

2 结果与讨论

图 1 给出了不同工作压强下 ICP 刻蚀对 4H-SiC 样品的刻蚀速率。从图 1 中看出, 在较低工作压强时 SiC 的刻蚀速率随着压强的增加而缓慢增加; 在较高工作压强下, 随着压强的增加, SiC 的刻蚀速率明显下降。这是由于工作压强与粒子的平均自由程成反比, 随着工作压强的增加, 电子撞击粒子的频率增加, 使得粒子的平均自由程减短, 粒子在与电子碰撞的过程中获得能量, 形成更多的高活性中性粒子。高活性中性粒子吸附在材料表面, 与材料发生化学反应, 刻蚀进行。因此, 随着工作压强的增加, 实验观察到 4H-SiC 样品的刻蚀速率增加。此时, 化学刻蚀机制占主导地位。然而, 随着工作压强的进一步增加, 4H-SiC 的刻蚀速率却明显降低。这是因为, 在以 F 基气体 (本实验采用 CF_4/O_2) 作为刻蚀气体时, 反应腔内有如下化学反应:



这个过程会在样品表面产生难以挥发的含 F 聚合物, Liu Di Jiang^[9] 等人的研究表明, 此含 F 聚合物为 CF_x ($x = 1 \sim 3$)。在本实验中, 利用 XPS 对样品表面进行化学元素及元素化学结合状态分析, 发现刻蚀后 4H-SiC 样品表面确实有 F 残留, 对 C_{1s} 谱进行 Gaussian 拟合发现, 在 $\sim 287.5 \text{ eV}$ 处存在一个 Gaussian 峰, 此峰对应为 C-F 键, 这与文献 [9] 的研究结果一致。在文献 [9] 的实验中还发现, 刻蚀后样品表面有 CF_2 、 CF_3 物质存在, 然而在本实验中没有观察到相关物质存在, 原因在于刻蚀过程中 CF_2 、 CF_3 在 CF 形成之后产生, 其含量相对较少, 由于实验精度的限制无法获得此信息。在本实验刻蚀过程中, 随着工作压强的增加, 高能离子的平均自由程也随之降低, 导致其与材料表面的轰击作用减弱, 使得表面含 F 聚合物得不到充分的去除而覆盖在样品表面, 含 F 聚合物阻碍了气相中高活性中性粒子与 4H-SiC 样品的进一步接触与反应, 因此刻蚀速率降低。

为了研究 ICP 刻蚀对样品表面造成的污染损伤, 利用 XPS 对不同工作压强下刻蚀所得的样品表面进行了分析。图 2 给出了不同工作压强下 ICP 刻蚀后样品表面 F/O 与 Si 的相对原子数之比。如图 2 所示, 随着工作压强的增加, F/Si 的比值先缓慢增加, 然后急剧增加。在较低压强时, 表面含 F 聚合物的增加缓慢, 其原因在于, 在较低压强下高能离子的轰击作用一定程度地辅助了含 F 聚合物的去除, 虽然此时更多

的高活性中性粒子参与刻蚀, 形成更多的非挥发性产物, 但表面含 F 残留物的含量增加缓慢. 而在较高压强下, 高能离子与材料表面的轰击作用进一步减弱, F/Si 的比值急剧增加. 此外, 由于本实验使用的刻蚀气体为 CF_4/O_2 , O_2 的引入使得刻蚀过程中样品表面形成一层类氧化层 (oxide-like layer). 对 Si_{2p} 谱进行 Gaussian 拟合, Gaussian 峰峰值位置分别位于 100.2 ± 0.2 eV 和 101.2 ± 0.3 eV, 分别对应为 Si-C 键及 O-Si-C 键^[9]. 在 ~ 103.3 eV 处 Gaussian 谱峰的缺失意味着刻蚀后 4H-SiC 样品表面不存在 SiO_2 . 这层类氧化层的存在也一定程度地阻碍了刻蚀的进行^[10]. 随工作压强的增加, 表面 O/Si 比值也随之缓慢增加, 这也是由于高压下高能离子对材料表面的轰击作用降低造成的. 因此, 随着工作压强的增加, 我们发现, ICP 刻蚀后 4H-SiC 样品表面的 F、O 含量均有所增加, 表面污染增加, 从而 ICP 刻蚀造成的表面损伤增加.

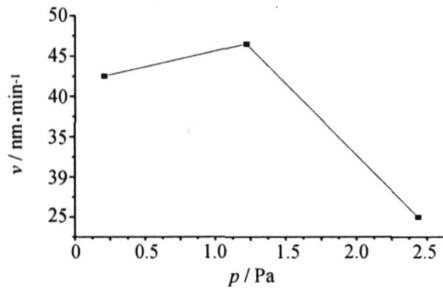


图 1 不同工作压强下 SiC 的刻蚀速率
Fig. 1 Etch rate of SiC vs work pressure

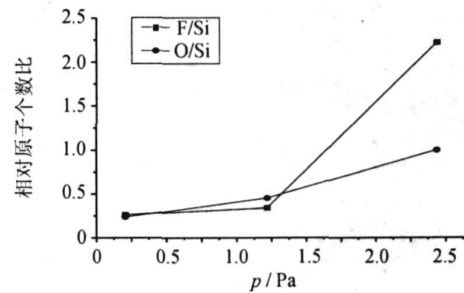


图 2 不同工作压强下 F/Si、O/Si 比值
Fig. 2 F/Si and O/Si ratio vs work pressure

3 结语

采用 CF_4/O_2 作为刻蚀气体, 对不同工作压强下 ICP 刻蚀 4H-SiC 的刻蚀速率以及随之引入的刻蚀损伤进行了研究. 结果表明, 随着工作压强的增加, ICP 刻蚀 4H-SiC 的速率先缓慢增加, 然后急剧降低; XPS 光电子能谱分析发现刻蚀后样品表面的 F、O 含量均有所增加, 表面污染增加, 从而 ICP 刻蚀引入的表面损伤随着工作压强的增加而增加. 因此, 由于初始时刻蚀速率随工作压强变化不大, 在 SiC 器件的制备过程中, 为了获得低损伤的刻蚀表面, 应在低工作压强下对 4H-SiC 进行 ICP 刻蚀.

参考文献:

- [1] 郝跃, 彭军, 杨银堂. 碳化硅宽禁带半导体技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-6
- [2] Yeh P H, Steckl A J. Residue-free reactive ion etching of 3C-SiC and 6H-SiC in fluorinated mixture plasmas [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1995, 142: 2853-2860
- [3] Xia J H, Rusli S F, Choy et al. The role of oxygen in electron cyclotron resonance etching of silicon carbide [J]. Microelectronic Engineering, 2006, 83: 9-11.
- [4] Cao L H, Binghui L Z, Zhao J H, et al. Etching of SiC using inductively coupled plasma [J]. Electrochem Soc, 1998, 145: 3609-3612
- [5] Plank N O V, Blaw M A, Drift E W J M, et al. The etching of silicon carbide in inductively coupled SF_6/O_2 plasma [J]. J Phys D: Appl Phys, 2003, 36: 482-487.
- [6] Jiang L D, Plank N O V, Blaw M A, et al. Dry etching of SiC in inductively coupled C_2F_4/Ar plasma [J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37: 1809-1814
- [7] Byung-han K, Byany T L, et al. Etching of 4H-SiC using a NF_3 inductively coupled plasma [J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33: 1308-1312
- [8] Kim D W, Lee H Y, Park B J, et al. High rate etching of 6H-SiC in SF_6 -based magnetically-enhanced inductively coupled plasmas [J]. Thin Solid Films, 2004, 447-448: 100-104
- [9] Jiang L D, Cheung R, Brown R, et al. Inductively coupled plasma etching of SiC in SF_6/O_2 and etch-induced surface chemical bonding modifications [J]. J Appl Phys, 2003, 93: 1376-1383
- [10] Xia J H, Rusli S F, Choy et al. CHF_3-O_2 reactive ion etching of 4H-SiC and the role of oxygen [J]. Microelectronic Engineering, 2006, 83: 381-386

(责任编辑: 郑美莺)