

催化剂浓度对 6H-SiC 晶片 Si 面 化学机械抛光性能的影响

滕康¹, 陈国美², 倪自丰¹, 钱善华¹, 白亚雯³

(1.江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2.无锡商业职业技术学院 机电技术学院, 江苏 无锡 214153; 3.无锡太湖学院, 江苏 无锡 214064)

摘要:目的 提高 6H-SiC 晶片 Si 面化学机械抛光 (CMP) 的材料去除率 (MRR), 改善其抛光表面质量。**方法** 使用含有不同 Cu^{2+} 浓度和甘氨酸形成的配合物作为催化剂、 H_2O_2 作为氧化剂的抛光液, 对 6H-SiC 晶片 Si 面进行 CMP。使用精密天平称量 SiC 晶片抛光前后的质量, 计算其 MRR。使用 AFM 观测 SiC 晶圆表面, 测其表面粗糙度 (R_a)。使用 Zeta 电位仪测量在不同 Cu^{2+} 浓度下纳米氧化硅磨粒的 Zeta 电势和粒径分布。使用摩擦磨损试验机测量不同 Cu^{2+} 浓度时 SiC 晶圆的摩擦系数。对比不同压力和转速在 CMP 中对 SiC 的 MRR 和 R_a 的影响。**结果** 随着 Cu^{2+} 浓度的增大, MRR 先增大后减小, 在 Cu^{2+} 浓度为 $300 \mu\text{mol/L}$ 时, MRR 有最大值, 为 82 nm/h , 此时, R_a 为 0.156 nm ; 相比之下, 不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物的 MRR 为 62 nm/h , R_a 为 0.280 nm 。同时, 随着 Cu^{2+} 浓度的增大, 一方面, 溶液中磨粒的 Zeta 电势绝对值不断减小, 但高于不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物时的 Zeta 电势绝对值; 另一方面, 其平均粒径逐渐增大, 但低于不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物时的平均粒径 (104.0 nm)。另外, 随着 Cu^{2+} 浓度的增大, SiC 晶圆的摩擦系数先增大后减小, 在 $300 \mu\text{mol/L}$ 时达到最大, 为 0.6137 。最后, 随着压力的增大, MRR 不断增加, 但压力过大, 使得 R_a 增大。随着抛光盘转速的增大, MRR 先增大后减小, R_a 无明显变化, 在 120 r/min 时, MRR 有最大值, 为 96 nm/h , R_a 为 0.161 nm 。**结论** Cu^{2+} -甘氨酸配合物作为催化剂能够加快 SiC 化学机械抛光中的化学氧化速率, 从而提高 MRR, 并且能够提高抛光液分散稳定性, 改善 SiC 晶圆表面质量。另外, 增大抛光压力可以增强机械磨削作用, 提高 MRR, 但压力过大, 会损伤晶片表面。抛光盘转速的增大也可以提高 MRR, 但其过大则会使抛光液外溅, 降低化学作用, 导致 MRR 降低。

关键词: 碳化硅; 化学机械抛光; 催化剂; 材料去除率; 表面粗糙度; 粒径分布

中图分类号: TG356.28 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2019)03-0291-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.039

Effect of Catalyst Concentration on Chemical Mechanical Polishing Performance of Si Surface of 6H-SiC Wafer

TENG Kang¹, CHEN Guo-mei², NI Zi-feng¹, QIAN Shan-hua¹, BAI Ya-wen³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Mechanical and Electrical

收稿日期: 2018-08-22; 修订日期: 2018-11-21

Received: 2018-08-22; Revised: 2018-11-21

基金项目: 国家自然科学基金 (51305166)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51305166)

作者简介: 滕康 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为超精密抛光。

Biography: TENG Kang (1994—), Male, Master, Research focus: ultra-precision polishing.

通讯作者: 倪自丰 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为超精密加工。邮箱: nizf@jiangnan.edu.cn

Corresponding author: NI Zi-feng (1981—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: ultra-precision manufacturing technology. E-mail: nizf@jiangnan.edu.cn

Engineering, Wuxi Vocational Institute of Commerce, Wuxi 214153, China, 3. Taihu University of Wuxi, Wuxi 214064, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the material removal rate (MRR) and the surface quality of the Si-face 6H-SiC wafer by chemical mechanical polishing (CMP). CMP was performed on the Si-face of 6H-SiC wafer with a polishing slurry including the different concentrations of Cu^{2+} and glycine as catalysts and the hydrogen peroxide (H_2O_2) as an oxidant. The SiC wafer was weighed by a precision balance to calculate the MRR before and after polishing. AFM was used to observe the surface of the SiC wafer and the surface roughness (R_a) was measured. The Zeta potential and particle size distribution of the nano-silica abrasive particles were measured by a Zeta potential meter at different concentrations of Cu^{2+} . The friction and wear tester was used to measure the friction coefficient of SiC wafer with different concentrations of Cu^{2+} . The effects of different pressures and rotational speeds on the MRR and R_a of SiC during CMP were compared. With the increase of Cu^{2+} concentrations, the MRR increased firstly and then decreased. When the Cu^{2+} concentration was 300 $\mu\text{mol/L}$, the MRR had a maximum of 82 nm/h, and in this case, the R_a was 0.156 nm. In contrast, the MRR was 62 nm/h and the R_a was 0.280 nm without the addition of the Cu^{2+} -glycine complex. At the same time, with the increase of the Cu^{2+} concentrations, on the one hand, the absolute values of the zeta potential of the abrasive particles in the slurry decreased, but was still higher than the absolute value of the zeta potential without the addition of the Cu^{2+} -glycine complex; on the other hand, the average particle diameters of the abrasive particles gradually increased, but was still smaller than the average particle diameters (104.0 nm) without the addition of the Cu^{2+} -glycine complex. In addition, as the Cu^{2+} concentration increased, the friction coefficient of the SiC wafer firstly increased and then decreased, reaching a maximum of 0.6137 at 300 $\mu\text{mol/L}$. Finally, as the pressure increased, the MRR increased gradually, but the R_a increased when the pressure was too high. With the increase of the polishing plate speed, the MRR increased firstly and then decreased, but there was no significant changes in the R_a . At the speed of 120 r/min, the MRR had a maximum of 96 nm/h with the R_a of 0.161 nm. As a catalyst, the Cu^{2+} -glycine complex can accelerate the chemical oxidation rate in the CMP of SiC to increase the MRR, and can improve the dispersion stability of the slurry to make the surface quality of the SiC wafer better. In addition, increasing the polishing pressure can enhance the mechanical grinding effect and magnify the MRR, but if the pressure is too high, the wafer surface will be damaged. An increase in the rotational speed of the polishing plate can also increase the MRR, but if the speed is too high, the polishing solution will splash out, lowering the chemical effect and resulting in a decrease of the MRR.

KEY WORDS: silicon carbide; chemical mechanical polishing; catalyst; material removal rate; surface roughness; particle size distribution

作为第三代半导体材料, 碳化硅 (SiC) 具有带隙宽、击穿电高、电子饱和迁移高、热导率高、热膨胀系数低、高温稳定性好和与外延 GaN 晶格匹配良好等优点, 在高温和高功率等器件方面有着十分广阔的应用前景^[1], 并将成为 LED 衬底应用最为广泛的 III-V 族复合材料^[2]。

为了避免衬底表面上的微观缺陷(划痕、凹坑等)影响 GaN 外延层的生长质量, 必须对 SiC 衬底的表面质量有严格的要求。因此, 获得原子级光滑、无损和无缺陷的全局平坦化 SiC 衬底表面显得尤为关键。然而, 由于 SiC 的硬度极高, 且化学稳定性好, 使得其加工时难以获得高的去除率和表面质量。目前, 已有多种抛光方法应用于 SiC 衬底加工, 如化学机械抛光 (CMP)^[3-4]、等离子体辅助抛光 (PAP)^[5-6]、摩擦化学抛光 (TCP)^[7-8]和氢蚀刻^[9-10]等, 但是, PAP 和氢蚀刻需要复杂的结构、高温和大功率等条件, 而通过 TCP 获得的表面质量较低, 使其应用受到限制。化学机械抛光能够实现全局平坦化, 并且能够获得高

的材料去除率 (MRR) 和无缺陷的高质量表面, 是目前应用最广泛的抛光方法。梁庆瑞等人^[11]使用不同粒径和形状的金金刚石微粉对 SiC 进行机械抛光, 去除率可达 36.2 nm/min, 但晶片表面有许多划痕出现, 经 CMP 去除 1 μm 后, 其表面质量得以改善, 获得原子级台阶, 但 CMP 时的 MRR 并未得知。Lee 等人^[12]使用含有胶体二氧化硅和纳米金刚石的混合磨粒抛光液对 6H-SiC 晶片进行 CMP 抛光, 实现了高去除率和低表面粗糙度, 但表面具有划痕。H. Hara 等人^[13]提出并研究了一种无磨料的催化剂蚀刻 (CARE) 方法, 对 4H-SiC 晶片 Si 面进行抛光, 其表面粗糙度 R_a 可达 0.114 nm, 但材料去除率仅为 0.1~0.2 $\mu\text{m/h}$, 去除效果不明显。Zhou Y.等人^[14]揭示了 SiC 晶片 Si 面化学机械抛光 (CMP) 的去除机理。此外, 他们还使用 Fe 纳米颗粒和 Pt/C 纳米颗粒作为添加到胶体二氧化硅浆料中的催化剂, 发现含催化剂的浆料可以产生更多羟基 (—OH) 自由基, 从而诱导 SiC 的氧化, 使得 4H-SiC 晶片 Si 面的 MRR 达到 120 nm/h 以上,

Ra 为 $0.05 \text{ nm}^{[15]}$ 。据报道, Cu^{2+} -氨基酸配合物(整合物)作为催化剂能够分解 H_2O_2 , 使 $-\text{OH}$ 自由基浓度显著增加^[16]。

结合上述文献, 本文提出了一种以过氧化氢(H_2O_2)为氧化剂、 Cu^{2+} 和甘氨酸形成的配合物为催化剂, 对 6H-SiC 晶片 Si 面进行 CMP 的新方法。研究了在 CMP 中, 催化剂浓度对 6H-SiC 抛光效果的影响。另外, 用 Zeta 电位和粒径分析研究了磨粒的分散稳定性和与晶片表面间的相互作用力。通过摩擦系数研究了抛光表面的去除机理。最后, 研究了压力、转速等工艺参数对 6H-SiC 抛光效果的影响。

1 试验

1.1 抛光实验和抛光液制备

实验采用直径为 50.8 cm 、厚度为 $445 \text{ }\mu\text{m}$ 的 6H-SiC 晶片 Si (0001) 面。化学机械抛光实验使用 CETR CP-4 型抛光机(沈阳科晶自动化设备有限公司, 辽宁沈阳)。采用聚氨酯抛光垫(IC-1000, 陶氏电子材料公司, 中国), 表面具有凹槽。抛光压力为 4.2 psi (6 kg), 抛光头/抛光盘转速为 $80\sim 120 \text{ r/min}$, 抛光液流量为 90 mL/min , 抛光时间为 20 min 。每次抛光实验至少重复三次。

初始抛光液的配制: 在机械搅拌的条件下, 在烧杯中加入一定量的二氧化硅溶液(平均粒径 100 nm , 30% , 宣城晶锐新材料有限公司, 安徽宣城)和过氧化氢(H_2O_2 , 国药集团, 中国上海)。先将含不同 Cu^{2+} 浓度的六水合硝酸铜($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 国药集团, 中国上海)和一定量的甘氨酸(国药集团, 中国上海)混合搅拌溶解, 再添加到初始抛光液中。之后, 使用去离子水填充抛光液至所需体积。最后, 在磁力搅拌的条件下, 用硝酸(HNO_3 , 70% , 国药集团, 中国上海)或氢氧化钾(KOH , $\geq 80\%$, 国药集团, 中国上海)将 pH 值调节至 10。此时, 抛光液中纳米 SiO_2 为 6% (质量分数, 后同), H_2O_2 为 4% , 甘氨酸物质的量浓度为 0.01 mol/L 。

1.2 性能测试

使用精确度为 0.01 mg 的电子天平(Mettler Toledo AG 285, 瑞士)来测量 6H-SiC 晶片的材料去除率(MRR)。通过原子力显微镜(AFM, Rtec, 美国)测量晶片表面形貌及粗糙度。采用 Zeta 电位仪(Malvern Zetasizer, 英国)测量不同 Cu^{2+} -甘氨酸配合物浓度下的电势和粒径分布。采用摩擦磨损试验机(MFT5000, Rtec, 美国)测量在不同抛光液浓度下, 抛光垫与晶片表面的摩擦系数。测试方法为: 首先, 将 2 英寸 6H-SiC 晶片固定在能够在 X 方向上往复运动的塑料容器中; 然后, 将直径为 5 mm 的聚氨酯垫粘贴在不锈钢圆柱销上, 并且将其压在浸入含 6%

SiO_2 、 $4\% \text{ H}_2\text{O}_2$ 和不同浓度 Cu^{2+} -甘氨酸配合物的抛光液中的 6H-SiC 晶片上; 测试在 4.2 psi (6 kg) 负载下进行 5 min , 往复振幅为 10 mm , 频率为 2 Hz 。在每次测试之前, 将 6H-SiC 衬底用 6% 的 SiO_2 在 $\text{pH}=10$ 下预抛光 5 min , 并且每个衬垫仅使用一次。

2 结果与分析

2.1 6H-SiC 的 CMP 材料去除率和表面粗糙度

图 1 所示为初始抛光液中加入不同浓度 Cu^{2+} 和 0.01 mol/L 甘氨酸形成的配合物的材料去除率(MRR)。由图可知, 随着 Cu^{2+} 物质的量浓度的增大, MRR 先增大后减小, 在 Cu^{2+} 物质的量浓度为 $300 \text{ }\mu\text{mol/L}$ 时, MRR 有最大值, 为 82 nm/h , 而在不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物的条件下, MRR 为 62 nm/h 。这表明随着 Cu^{2+} 浓度的增大, 晶片表面的化学氧化作用不断增强, 使得晶片表面生成的氧化层增加, 而由于氧化层硬度低, 更有利于去除, 从而使 6H-SiC 晶片的材料去除率提高。而在 $300 \text{ }\mu\text{mol/L}$ 时, 化学氧化与机械磨削的协同作用达到一致, 此时 MRR 达到最大, 并且如图 2 所示, 此时表面粗糙度(Ra)为 0.156 nm , 优于不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物时的 Ra (0.280 nm), 表明 Cu^{2+} -甘氨酸配合物是一种有效的催化剂。但是, 当 Cu^{2+} 浓度过大时, 双氧水更多分解成氧气而散逸在空气中^[15], 不利于 6H-SiC 晶片表面的氧化, 使化学作用减弱, 从而导致去除率降低。

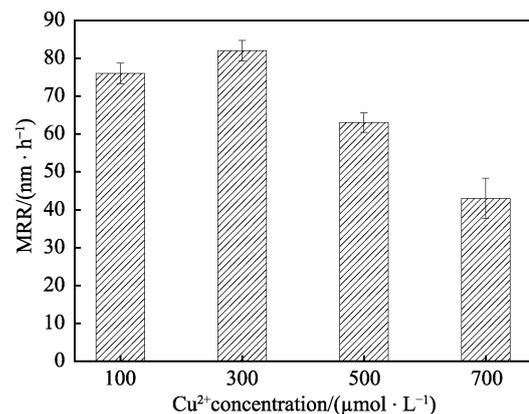


图 1 不同 Cu^{2+} 浓度下 6H-SiC 晶片 Si 面的材料去除率(MRR)

Fig.1 Material removal rate (MRR) of Si-face 6H-SiC at different Cu^{2+} concentrations

2.2 Zeta 电势测量

通过图 3 所示不同 Cu^{2+} 浓度下的 Zeta 电势可以看出, 随着 Cu^{2+} 浓度的增大, Zeta 电势绝对值逐渐减小。一方面, 与图中相比较而言, 在不加入 Cu^{2+} -甘氨酸配合物时, Zeta 电势为 -33.3 mV , 其绝对值小于

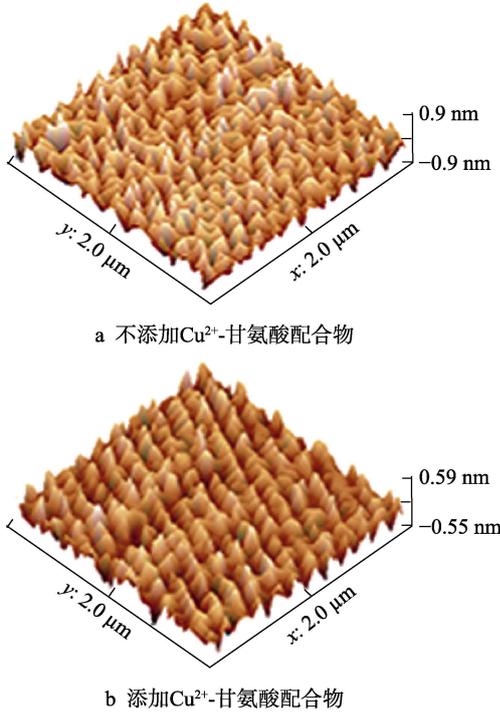


图2 对比添加和不添加 Cu²⁺-甘氨酸配合物 (Cu²⁺ 300 μmol/L, 甘氨酸 0.01 mol/L) 的 AFM 表面形貌
Fig.2 Surface morphology of AFM (a) with and without (b) Cu²⁺-glycine complex (Cu²⁺ 300 μmol/L, glycine 0.01 mol/L)

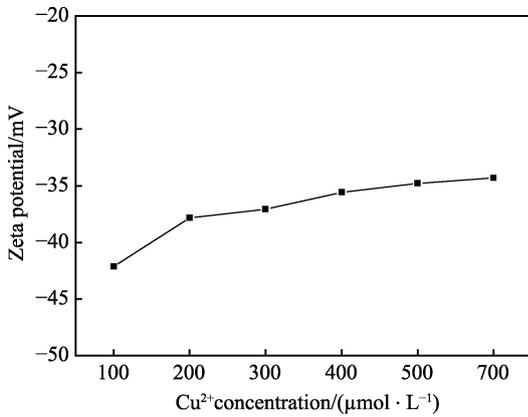


图3 pH=10 时不同 Cu²⁺ 浓度下的 Zeta 电势
Fig.3 Zeta potential of different Cu²⁺ concentrations at pH=10

加入 Cu²⁺-甘氨酸配合物的 Zeta 电势绝对值。这可能是由于 Cu²⁺-甘氨酸配合物能够催化双氧水分解产生的羟基自由基 (·OH)，而·OH 在溶液中表现出极强的电负性，使得溶液中的 Zeta 电势绝对值增大，有良好的分散稳定性，同时，SiC 的等电点在 pH=10 时，其 Zeta 电势为负值^[17]，因此在抛光过程中，氧化硅磨粒与 SiC 晶片表面静电斥力增大，减小了磨粒对于晶片表面的损伤，从而有更好的表面质量 (如图 2 所示)。另一方面，随着 Cu²⁺浓度的增大，Cu²⁺吸附在纳米氧化硅磨粒表面，根据 DLVO 理论，这降低了磨粒间的静电斥力，使得磨粒的分散稳定性降低，进而影响晶片表面质量。

2.3 粒径分析

图 4 为二氧化硅抛光液 (不同 Cu²⁺浓度下) 中的粒径分布图。在不加入 Cu²⁺-甘氨酸配合物时，平均粒径为 104.0 nm，而加入 Cu²⁺-甘氨酸配合物后，粒径减小，但随着 Cu²⁺浓度的增加，其粒径又逐渐增大。这表明在加入 Cu²⁺-甘氨酸配合物后，氧化硅磨粒团聚现象减弱，分散稳定性提高，这将使抛光后的晶片表面质量提高。而随着 Cu²⁺浓度的增加，Cu²⁺吸附在磨粒表面，降低了磨粒间的静电斥力，磨粒容易发生团聚，分散稳定性减弱，将影响 6H-SiC 晶片的抛光效果。

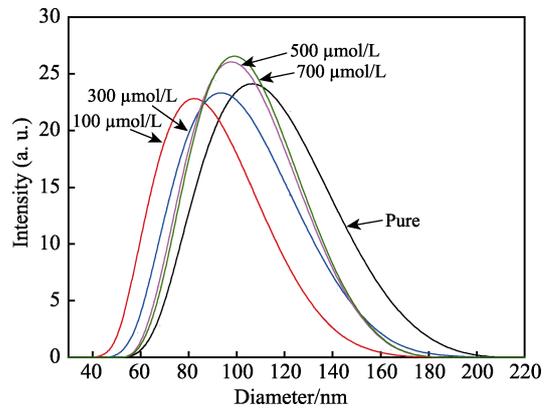


图4 pH=10 时不同 Cu²⁺浓度下的粒径分布
Fig.4 Particle size distribution of different Cu²⁺ concentrations at pH=10

2.4 对比不同 Cu²⁺浓度下的摩擦系数

图 5 展示了在 pH=10 时，不同 Cu²⁺浓度下的摩擦系数。从图中可以看出，随着 Cu²⁺浓度的增大，摩擦系数先增大后减小，在 300 μmol/L 时达到最大，为 0.6137。根据以往研究表明，双氧水在室温下会自分解为水和氧气，同时在催化剂作用下，会产生·OH^[16]。由于·OH 自由基和氧气，SiC 可以氧化成更软的 SiO₂层^[18]，这将更易于去除^[15]。一般来说，

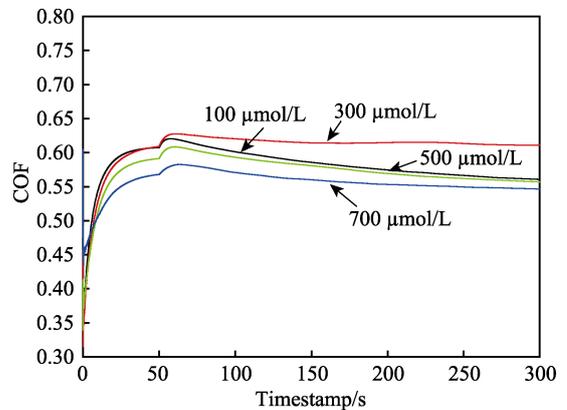


图5 pH=10 时不同 Cu²⁺浓度下的摩擦系数
Fig.5 Friction coefficient of different Cu²⁺ concentrations at pH=10

由于 SiC 硬度高, 使得 SiO₂ 磨粒在晶片表面的去除主要以滚动摩擦为主, 而在相同的压力下, 随着 Cu²⁺ 浓度的增大, 双氧水分解产生更多的一OH 自由基, 可以氧化生成更多的氧化层, 使得吸附在晶片表面的 SiO₂ 磨粒由滚动摩擦逐渐转变为滑动摩擦, 摩擦系数增大, 磨粒的犁削作用增强, 材料去除增加。在 300 μmol/L 时, 化学氧化作用与机械磨削作用达到一致, 此时 MRR 最高; 当 Cu²⁺ 浓度继续增大时, 双氧水分解为更多的水和氧气, 减弱了对 SiC 晶片表面的氧化, 氧化层减少, SiO₂ 磨粒的滑动犁削作用减弱, 使得摩擦系数降低, 材料去除减少。

2.5 对比不同压力下的材料去除率和表面粗糙度

图 6 为在不同压力下的材料去除率 (MRR) 和表面粗糙度 (*Ra*)。由图可知, 随着压力的增大, 材料去除率随之增加, 表明随着压力的增大, 磨粒的机械磨削作用不断增强, 从而增大了 MRR; 而随着压力的增大, *Ra* 在 4~8 kg (2.8~5.6 psi) 时变化不大, 之后则急剧增大, 这说明在 4~8 kg (2.8~5.6 psi) 时, 机械磨削作用弱于化学氧化作用, 氧化层硬度较低, 磨粒去除氧化层较易, 磨粒磨削速率小于氧化层形成速率, 对晶片表面影响较小, 因而 *Ra* 较低且变化较小。压力达到 10 kg (7.0 psi) 时, 由于机械磨削作用强于化学氧化作用, 磨粒磨削速率大于氧化层形成速率, 使得磨粒与晶片表面接触, 损伤晶片表面, 从而影响晶片表面质量, 表面粗糙度 *Ra* 随之增大。

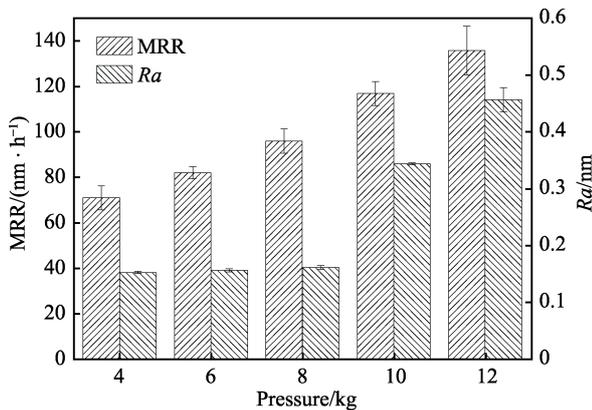


图 6 不同压力下 6H-SiC Si 面的材料去除率 (MRR) 和表面粗糙度 (*Ra*)

Fig.6 Material removal rate (MRR) and surface roughness (*Ra*) of Si-face 6H-SiC under different pressures

2.6 对比不同抛光盘转速下的材料去除率和表面粗糙度

图 7 为在压力 8 kg (5.6 psi) 下, 不同抛光盘转速下的材料去除率 (MRR) 和表面粗糙度 (*Ra*)。由图可知, 随着转速的增大, MRR 先增大后减小, 在 120 r/min 时有最大值, 为 96 nm/h, 此时 *Ra* 为 0.161 nm。

这表明随着转速的增大, 表面反应产物能够迅速被分离, 使得新的裸露表面能够及时参与化学氧化反应, 从而加快去除; 而当转速继续增大时, 由于离心力过大, 使得抛光液外溅, 未能与 SiC 晶片表面充分反应, 降低了化学氧化作用, 从而使得 MRR 降低。此外, 随着转速的增大, *Ra* 略微降低, 晶片表面质量有所改善。

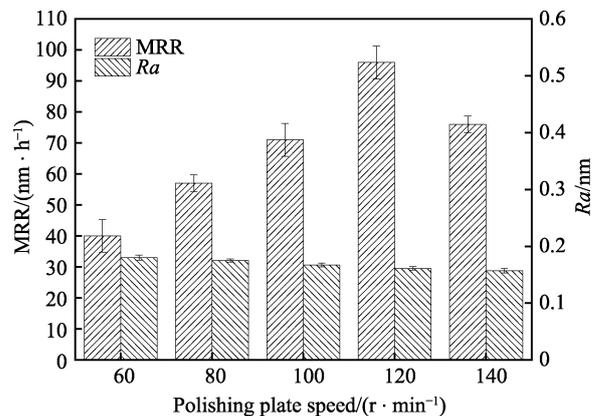
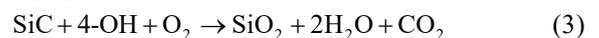


图 7 不同抛光盘转速下 6H-SiC Si 面的材料去除率 (MRR) 和表面粗糙度 (*Ra*)

Fig.7 Material removal rate (MRR) and surface roughness (*Ra*) of 6H-SiC Si surface at different polishing plate speeds

2.7 抛光机理分析

SiC 晶片表面的材料去除是通过化学氧化和机械磨削作用相结合而实现的, 其主要是在化学机械抛光过程中, 晶片表面由于化学氧化而生成硬度较低的软化层, 同时通过机械磨削作用, 从而实现软化层的去除。根据以往的研究^[14-15], 并结合以上分析, 得出 SiC 晶片材料去除机理, 其具体反应式如下:



3 结论

1) 本文使用 Cu²⁺-甘氨酸配合物作为催化剂, 提高了 6H-SiC 晶片 Si 面的材料去除率, 改善了其表面质量。

2) 通过 Zeta 电位和粒径分析表明, 加入 Cu²⁺ 可以增大抛光液的分散稳定性, 改变磨粒与晶片表面的相互作用力, 进而改善表面质量; 此外, 通过摩擦系数分析可知, Cu²⁺ 的加入也加快了化学反应速率, 使得化学氧化层增加, 提高了材料去除率。另外, 通过增大压力, 使机械磨削作用增大, 提高了材料去除率, 但压力过大, 则会使 SiC 表面形成划痕, 造成表面质量降低。

3) 通过提高抛光盘转速, 加快了化学氧化速率, 从而提高了去除率, 但转速过快, 会使得抛光液飞溅, 造成化学氧化不充分, 降低化学作用, 使得去除率反而降低。研究中还发现, pH 值能够更大程度地提高 SiC 的材料去除率, 但其作用机理有待进一步研究。此外, 对于 Cu^{2+} -甘氨酸配合物作为催化剂的作用机理也有待于研究。

参考文献:

- [1] MORKOC H, STRITEA S, GAO G B, et al. Large band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies[J]. Journal of applied physics, 1994, 76(3): 1363-1398.
- [2] KONG H S, IBBETSON J, EDMOND J. Status of GaN/SiC-based LEDs and their application in solid state lighting[J]. Physical status solidi, 2014, 11(3-4): 621-623.
- [3] 雷红, 雒建斌, 张朝辉. 化学机械抛光技术的研究进展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2003, 9(6): 494-502. LEI Hong, LUO Jian-bin, ZHANG Zhao-hui. Advances in chemical mechanical polishing[J]. Journal of Shanghai University (natural science), 2003, 9(6): 494-502.
- [4] 宋晓岚, 李宇烟, 江楠, 等. 化学机械抛光技术研究进展[J]. 化工进展, 2008, 27(1): 26-31. SONG Xiao-lan, LI Yu-kun, JIANG Nan, et al. Recent development of chemical mechanical polishing[J]. Chemical industry and engineering progress, 2008, 27(1): 26-31.
- [5] DENG H, UEDA M, YAMAMURA K. Characterization of 4H-SiC(0001) surface processed by plasma-assisted polishing[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 497(1-4): 156-159.
- [6] YAMAMURA K, TAKIGUCHI T, UEDA M, et al. Plasma assisted polishing of single crystal SiC for obtaining atomically flat strain-free surface[J]. Cirp annals-manufacturing technology, 2011, 60(1): 571-574.
- [7] LIN Y C, KAO C H. A study on surface polishing of SiC with a tribochemical reaction mechanism[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2005, 25(1-2): 33-40.
- [8] ZHU Z, MURATOV V, FISCHER T E. Tribochemical polishing of silicon carbide in oxidant solution[J]. Wear, 1999, 225-229: 848-856.
- [9] RAMACHANDRAN V, BRADY M F, SMITH A R, et al. Preparation of atomically flat surfaces on silicon carbide using hydrogen etching[J]. Journal of electronic materials, 1998, 27(4): 308-312.
- [10] OWMAN F, HALLIN C, MÅRTENSSON P, et al. Removal of polishing-induced damage from 6H-SiC(0001) substrates by hydrogen etching[J]. Journal of crystal growth, 1996, 167(1-2): 391-395.
- [11] 梁庆瑞, 宗艳民, 王希杰, 等. 金刚石微粉对 SiC 机械抛光的影响研究[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(2): 295-300. LIANG Qing-rui, ZONG Yan-min, WANG Xi-jie, et al. Effect of diamond powder on SiC mechanical polishing[J]. Journal of synthetic crystals, 2015, 44(2): 295-300.
- [12] LEE H S, KIM D I, AN J H, et al. Hybrid polishing mechanism of single crystal SiC using mixed abrasive slurry (MAS)[J]. Cirp annals-manufacturing technology, 2010, 59(1): 333-336.
- [13] HARA H, SANO Y, MIMURA H, et al. Novel abrasive-free planarization of 4H-SiC(0001) using catalyst[J]. Journal of electronic materials, 2006, 35(8): L11-L14.
- [14] ZHOU Y, PAN G, SHI X, et al. XPS, UV-vis spectroscopy and AFM studies on removal mechanisms of Si-face SiC wafer chemical mechanical polishing (CMP)[J]. Applied surface science, 2014, 316(1): 643-648.
- [15] ZHOU Y, PAN G, SHI X, et al. Chemical mechanical planarization (CMP) of on-axis Si-face SiC wafer using catalyst nanoparticles in slurry[J]. Surface & coatings technology, 2014, 251(1): 48-55.
- [16] HARIHARAPUTHIRAN M, ZHANG J, RAMARAJAN S, et al. Hydroxyl radical formation in H_2O_2 -amino acid mixtures and chemical mechanical polishing of copper[J]. Journal of the electrochemical society, 2000, 147(10): 3820-3826.
- [17] SINGH B P, JENA J, BESRA L, et al. Dispersion of nano-silicon carbide(SiC) powder in aqueous suspensions [J]. Journal of nanoparticle research, 2007, 9(5): 797-806.
- [18] YAGI K, MURATA J, KUBOTA A, et al. Catalyst-referred etching of 4H-SiC substrate utilizing hydroxyl radicals generated from hydrogen peroxide molecules[J]. Surface & interface analysis, 2008, 40(6-7): 998-1001.