

文章编号:2095-0411(2016)02-0008-06

## 核壳结构 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料 对氧化硅片的抛光特性

陈 杨,赵晓兵,李霞章,付 猛,陆晓旺  
(常州大学 材料科学与工程学院,江苏 常州 213164)

**摘要:**磨料的种类和性质对抛光质量具有重要影响,核壳结构有机/无机复合磨料的可控制备为实现无损伤抛光提供了有益思路。本实验利用基于正负电荷间静电作用的化学原位包覆技术,设计合成了具有可控无机壳层包覆量的 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料,借助红外、扫描电镜、透射电镜和热重分析等手段对样品进行表征。借助原子力显微镜分析抛光试验前后热氧化硅片衬底表面的微观形貌、粗糙度和轮廓曲线,探索了复合磨料的 CeO<sub>2</sub> 壳层包覆量对抛光性能的影响。电镜结果显示,复合磨料呈单分散规则球形,CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒均匀包覆在 PMMA 内核(280~300nm)表面;热重分析表明,本实验所得复合磨料样品中的 CeO<sub>2</sub> 壳层质量分数在 40%~56%。抛光试验结果显示,复合磨料的 CeO<sub>2</sub> 包覆量对抛光衬底表面质量有明显影响,当 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒在 PMMA 内核表面呈单层包覆时(样品 C2),可获得无损伤的超光滑加工表面,抛光后表面粗糙度( $R_a$ )平均值由  $0.63 \pm 0.07 \text{ nm}$  降至  $0.25 \pm 0.01 \text{ nm}$ ,粗糙度均方根值(RMS)由  $0.79 \pm 0.08 \text{ nm}$  降至  $0.31 \pm 0.02 \text{ nm}$ 。

**关键词:**聚甲基丙烯酸甲酯;氧化铈;核壳结构;复合颗粒;磨料;抛光

**中图分类号:** TB 383

**文献标志码:** A

**doi:**10.3969/j.issn.2095-0411.2016.02.002

## Polishing Performance for Oxidized Silicon Wafer of the Core-Shell Structured PMMA/CeO<sub>2</sub> Composite Abrasives

CHEN Yang, ZHAO Xiaobing, LI Xiazhang, FU Meng, LU Xiaowang

(School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**Abstract:** The properties of abrasive particles play a key role in chemical mechanical polishing (CMP) process. The structural design of core-shell structured organic/inorganic composite abrasives provides a helpful solution to obtain damage-free surfaces. In this work, the polymethylmethacrylate coated ceria (PMMA/CeO<sub>2</sub>) with controlled coating amounts were synthesized *via* an in-situ chemical precipitation technique based on electrostatic interaction. The as-prepared samples were characterized by Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR), field emission scanning electron microscopy (FESEM), transmission electron microscopy (TEM), and thermogravimetric analysis (TGA). The topography, roughness and profile curve of the oxidized silicon substrate before and after polishing were characterized by atomic force microscopy. The effect of ceria coating amounts of the PMMA/CeO<sub>2</sub> composites on polishing behavior was investigated. FESEM and TEM results show that the composite particles are spherical in shape, and the ceria nanoparticles are uniformly located on the surfaces of PMMA cores (280—300nm). TGA results indicate that the ceria mass content in the composites range from 40% to 46%. CMP test results indicate that

收稿日期:2015-09-17。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51205032, 51405038, 51575058)。

作者简介:陈杨(1978—),男,回族,安徽凤阳人,博士,副教授,主要从事化学机械抛光技术及纳米摩擦学研究。

there is an obvious effect of ceria coating amounts of the composites on polishing behavior. An ultra-smooth and damage-free surface is achieved using the composites C2, in which CeO<sub>2</sub> nanoparticles are monolayer-coated on the PMMA cores. The average ( $R_a$ ) and root mean square (RMS) roughness of the wafers is reduced from  $0.63 \pm 0.07$  nm and  $0.79 \pm 0.08$  nm to  $0.25 \pm 0.01$  nm and  $0.31 \pm 0.02$  nm, respectively.

**Key words:** polymethylmethacrylate; ceria; core-shell structure; composite particle; abrasive; polishing

化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 是一种基于机械磨损与化学腐蚀协同作用的超精密制造技术<sup>[1]</sup>, 高效获得无损伤加工表面一直是 CMP 技术追求的目标。在抛光材料去除过程中, 磨料作为承担机械磨损作用的载体, 其种类和性质对各种抛光表面缺陷、机械损伤和材料去除率等均具有重要影响。抛光试验<sup>[2-3]</sup>与理论分析<sup>[4]</sup>均表明, 实现高效无损伤抛光的关键在于: 调控磨料与衬底表面之间的微观界面接触行为和状态, 优化局部真实接触微区内的物理和/或化学环境。

近年来, 研究人员开始致力于开发具有特殊结构、特殊物理/化学性质的新型抛光介质材料, 以期进一步优化抛光效果。美国 Ferro 公司奉向东博士与美国 Georgia 大学王中林教授合作, 通过火焰燃烧工艺制备了以六边形 CeO<sub>2</sub> 单晶为内核, 表面包覆无定形 TiO<sub>2</sub> (壳厚 1 ~ 2 nm) 的均匀球形 Ce<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>O<sub>2</sub> ( $0 \leq x \leq 0.25$ ) 复合掺杂磨料<sup>[5]</sup>, 明显改善了对 SiO<sub>2</sub> 介电薄膜的抛光效果, 使得去除率提高近 50%、表面缺陷率降低近 80%。本课题组<sup>[6]</sup>也曾利用 X 射线光电子能谱技术研究了核壳结构 SiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> 复合磨料中壳层 CeO<sub>2</sub> 颗粒与 SiO<sub>2</sub> 内核之间的界面结合状态, 推断两者以 Si-O-Ce 键结合。

包含聚合物微内核及无机物壳层的核壳结构有机/无机复合磨料, 由于其特殊的非刚性力学特性<sup>[7]</sup>能够以一种非损伤的方式施加局部应力, 可将抛光应力以更加温和、分布均匀的方式传递给工件表面, 在降低抛光表面机械损伤方面发挥了积极作用。以获得无损伤加工表面为目标, 比利时微电子中心、中科院上海微系统所、美国英特尔公司以及常州大学等研究机构, 在核壳结构聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)/SiO<sub>2</sub><sup>[8]</sup>、PMMA/CeO<sub>2</sub><sup>[9-10]</sup>、聚苯乙烯 (PS)/SiO<sub>2</sub><sup>[11]</sup>、PS/CeO<sub>2</sub><sup>[12]</sup> 复合磨料的合成及其抛光特性方面开展工作。然而, 非刚性有机/无机复合磨料的无损伤抛光机理尚未得到澄清, 复合磨料的微观结构 (内核尺寸、壳层形态及壳层包覆量等) 与其抛光性能之间的关系仍需深入研究。

为进一步研究 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料, 在本课题组前期研究工作<sup>[12]</sup>基础上, 本文利用基于电荷作

用的化学原位包覆技术对 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料的壳层包覆量进行控制。将抛光前后氧化硅片衬底的表面形貌、粗糙度和微观轮廓作为评价指标, 考察了复合磨料的壳层 CeO<sub>2</sub> 包覆量对抛光特性的影响, 并通过基于磨料与衬底之间压痕深度作用机制对试验结果进行了分析讨论。

## 1 实验部分

### 1.1 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料的制备与表征

采用无皂乳液聚合法制备含有单分散 PMMA 微球的乳胶液, 简要制备过程如下: 依次将 9.4 g 甲基丙烯酸甲酯单体和 125 g 去离子水加入带有冷凝管的三口烧瓶中, 水浴升温至 70℃ 后缓慢滴加引发剂 (取 0.4 g 过硫酸钾溶于 25 g 去离子水中), 在磁力搅拌 (300 r/min) 条件下反应 7 h 后自然冷却至室温, 备用。

采用本课题组所提出的液相原位包覆工艺<sup>[10,12]</sup>, 在超声条件下将 4 mL 上述 PMMA 乳胶液加入至 200 mL 去离子水中, 分散均匀后依次加入适量硝酸铈和过量六亚甲基四胺。将反应液在磁力搅拌条件下置于 75℃ 恒温水槽中反应 2 h, 反应结束后将所得产物离心分离、洗涤后经 80℃ 烘干。在本试验中, 调整反应溶液中硝酸铈的质量别为 0.82 g、2.4 g 和 3.3 g 以制备具有不同 CeO<sub>2</sub> 包覆量的复合磨料, 所得样品依次标记为 C1, C2 和 C3。

利用美国 Nicolet 460 型 Fourier 变换红外光谱仪 (FTIR) 对样品进行红外分析, 扫描波长范围 400 ~ 4 000 cm<sup>-1</sup>; 在氮气气氛下, 用美国 TA 公司 SDT Q600TA 型热重示差扫描量热仪 (TGA) 对样品进行热重分析; 用日本日立公司 S-4800 II 型场发射扫描电镜 (FESEM) 和荷兰飞利浦公司 Tecnai-12 型透射电镜 (TEM) 观察样品的形貌。

### 1.2 抛光试验及评价

抛光衬底: 常州市华诚常半微电子有限公司提供的 4 英寸热氧化硅片, 其表层 SiO<sub>2</sub> 薄膜厚度约为 1 μm, 切割成约 2 cm × 2 cm 的方块进行抛光试验。

抛光液的配制: 称取 1 g 复合磨料分散在去离子

水中,配制成质量分数为 1% 的悬浮液,用浓度为 0.1mol/L 的 NaOH 溶液将溶液的 pH 值调至 8,抛光试验前超声分散 10min。抛光设备及工艺参数:丹麦司特尔公司 TegraForce-1/TrgraPol-15 型精密抛光机,配备美国罗门哈斯公司 IC1000 型抛光垫;抛光压力为 21kPa,工件转速、抛光盘转速分别为 120、90r/min,抛光液流量为 100mL/min。晶片表面质量评价:在轻敲模式下,用美国 Digital Instruments 公司 Nanoscope IIIa 型原子力显微镜(AFM,配备 Dimention V 控制器)测定抛光前后衬底表面形貌、粗糙度及微观轮廓。选用保加利亚 Budget-Sensors 公司 Tap300Al-G 型探针(针尖曲率半径小于 10nm,弹性系数约为 40N/m),扫描频率为 1Hz,扫描范围为  $5\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 样品的结构表征

图 1 给出了 PMMA、 $\text{CeO}_2$  和 PMMA/ $\text{CeO}_2$  复合颗粒样品 C1 的 FTIR 光谱图。可见,复合颗粒的红外光谱图中在 1 148、1 442、1 487、1 731、2 952 和  $2\,996\text{cm}^{-1}$  附近处出现了聚甲基丙烯酸甲酯的特征吸收峰<sup>[13]</sup>,同时在 400 和  $484\text{cm}^{-1}$  附近处出现了氧化铈的红外特征峰<sup>[14]</sup>。由此可以说明复合颗粒样

品中同时包含 PMMA 和  $\text{CeO}_2$ 。

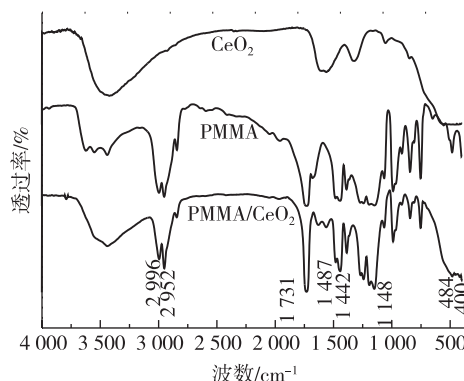
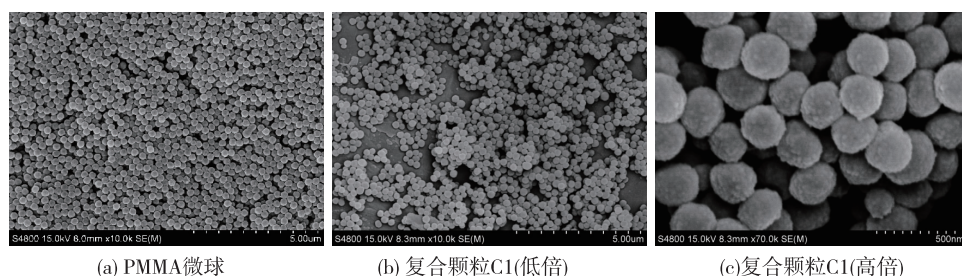


图 1 PMMA、 $\text{CeO}_2$  和 PMMA/ $\text{CeO}_2$  复合颗粒样品 C1 的红外光谱图

Fig.1 FT-IR spectra of PMMA,  $\text{CeO}_2$  and PMMA/ $\text{CeO}_2$  composites C1

图 2 给出了所得 PMMA 微球和 PMMA/ $\text{CeO}_2$  复合颗粒样品 C1 的 FESEM 图片。图 2(a)表明,采用无皂乳液聚合法制备的 PMMA 颗粒呈规则单分散球形,粒度分布窄,样品一致性较好,其粒径在 280~300nm。样品 C1 的低倍 FESEM(图 2(b))则表明,经  $\text{CeO}_2$  包覆后的复合颗粒仍呈规则球形,样品之间无明显团聚现象;由样品的高倍电镜图片(图 2(c))可知,与未经包覆的 PMMA 内核相比,包覆后复合颗粒的表面略显粗糙。



(a) PMMA微球

(b) 复合颗粒C1(低倍)

(c) 复合颗粒C1(高倍)

图 2 PMMA 微球和复合颗粒样品 C1 的 FESEM 图片

Fig.2 FESEM images of PMMA spheres and composites C1

借助 TEM 进一步分析 PMMA/ $\text{CeO}_2$  样品的结构特征,其结果图 3 所示。3 个复合颗粒样品的边缘和心部均出现较为明显的衬度差,颜色较深的部分为大量粒径约为 5~10nm 的  $\text{CeO}_2$  纳米颗粒,颜色较浅的部分则为 PMMA 内核,表明样品具有草莓状核壳包覆结构。当反应液中硝酸铈含量较低时,在复合颗粒 C1 的 TEM 图片(图 3(a))中可以清晰地观察到裸露的 PMMA 内核,说明  $\text{CeO}_2$  纳米颗粒未能将有机内核表面完全包覆。随着体系中硝酸铈含量的增加,所得复合颗粒 C2 和 C3(图 3(b),3

(c))则形成了较为完整的壳层。特别是对于样品 C2 而言,利用 TEM 图片中的标尺可估算出其壳层厚度约为 10nm,由此可推断  $\text{CeO}_2$  纳米颗粒基本上在 PMMA 内核表面呈单层包覆。

为了定量确定复合颗粒中  $\text{CeO}_2$  的质量分数,对样品 C1~C3 进行了热重分析。由图 4 可知,复合颗粒样品的失重主要集中在 350~450℃ 范围内,对应于 PMMA 的热分解<sup>[15]</sup>。当温度超过 500℃ 后失重曲线基本走平,表明此时复合颗粒中 PMMA 内核已完全去除,而壳层中的  $\text{CeO}_2$  颗粒则保留下来,



根据 TGA 曲线可计算出 PMMA/CeO<sub>2</sub> 样品 C1~C3 中 CeO<sub>2</sub> 的质量分数分别为 40.2%、51.1% 和 55.3%。首先用热重分析仪确定经 80℃ 干燥至恒

重的 CeO<sub>2</sub> 颗粒(空白实验制备)的表面质量损失约为 6.6%,在计算复合颗粒中 CeO<sub>2</sub> 质量分数时已扣除了 CeO<sub>2</sub> 的自身失重。

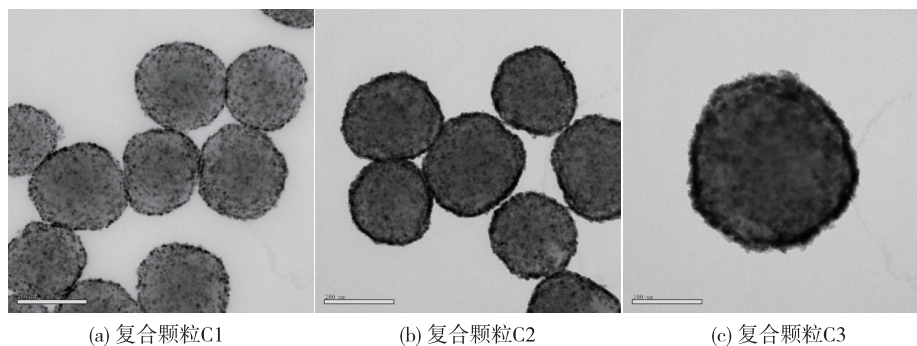


图3 复合颗粒样品的 TEM 图片

Fig.3 TEM images of the obtained composite particles

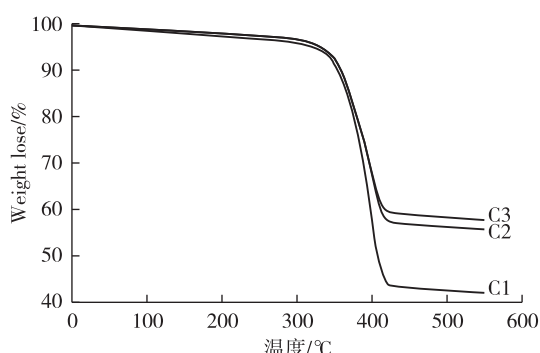


图4 复合颗粒样品的 TGA 曲线

Fig.4 TGA curves of the obtained composite particles

## 2.2 抛光表面形貌分析

一般认为,氧化硅片材料去除过程与玻璃抛光<sup>[16]</sup>类似:首先利用碱性抛光液中的水分子在衬底表面的扩散,将薄膜表层 Si—O 键转变成具有键能相对较低的 Si—OH 键,在衬底表层形成腐蚀软质层(Si(OH)<sub>4</sub>);最终使得热氧化硅片的表面硬度和化学耐久性降低,随后再通过磨料和抛光垫的机械磨损作用将水合层去除。在化学腐蚀与机械磨损的循环交替作用下,最终获得超光滑无损抛光表面。对于 CeO<sub>2</sub> 磨料而言,除了发挥机械磨损作用之外, CeO<sub>2</sub> 还将与 SiO<sub>2</sub> 之间发生固相反应,通过形成 Ce—O—Si 键加速材料去除。这种特殊效应也被称之为 Chemical tooth(化学齿)<sup>[16]</sup>,同时这也能是氧化铈磨料对氧化硅薄膜或玻璃表现出较高抛光速率的原因。根据 Ruth DeJule 的报道<sup>[17]</sup>,标准 IC1000 抛光垫与工件表面之间的接触比例约为 1%,当在对晶片施加 21~35kPa 的抛光压力时,在局部真实接触区域的压力可能会达到数个兆帕。这将有可能导

致一系列复杂的摩擦化学反应,进一步加速材料的去除。然而常规 CeO<sub>2</sub> 磨料通常形状不规则,易于在抛光表面造成划痕等机械损伤。

图 5 给出了热氧化硅片抛光前后的 AFM 二维和三维形貌,表 1 则给出了抛光前后衬底表面的粗糙度  $R_a$  和 RMS 值。为了更加清晰地显示样品表面形貌的差异,本文将 AFM 形貌图中 Z 轴方向单位垂直高度设置在 5nm。AFM 高度图中的亮度条表示相对位置的高低,颜色较亮的位置代表该处相对较高;反之,颜色较暗的位置则表示该处相对较低。同理,高度图的颜色越均匀则说明样品表面的平整度越高(为了更好的区分,建议读者下载彩色电子版阅读)。抛光前衬底表面(图 5(a))较为粗糙( $R_a=0.63\pm0.07\text{nm}$ ,  $\text{RMS}=0.79\pm0.08\text{nm}$ ),且存在一定数量的椭圆状微凸峰聚集物(形成原因未知),而 CMP 的目的正是在于使得凹凸不平的表面平坦化。利用 AFM 系统自带的 NanoScope Analysis 软件对椭圆体长轴方向进行轮廓分析,由局部轮廓曲线(图 5(a))可知其微观起伏主要集中在(-2~3nm)范围内。经复合磨料 C1 抛光后的衬底表面形貌如图 5(b)所示。未得到明显改善( $R_a=0.58\pm0.05\text{nm}$ ,  $\text{RMS}=0.73\pm0.06\text{nm}$ ),同样观察到了少量椭圆形微凸峰聚集物,轮廓分析(图 5(b))显示其高度起伏多集中在-1~2nm 范围内。这可能是由于复合磨料 C1 壳层中 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒未能在 PMMA 内核表面实现完整包覆(其 TEM 图片如图 3(a)所示),可能由于复合磨料过低的表面硬度及机械作用,及其与衬底表面发生直接接触的 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒数量过少,使得 CeO<sub>2</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 薄膜表面之间未能形成足够数量的 Ce—O—Si 键,从而导

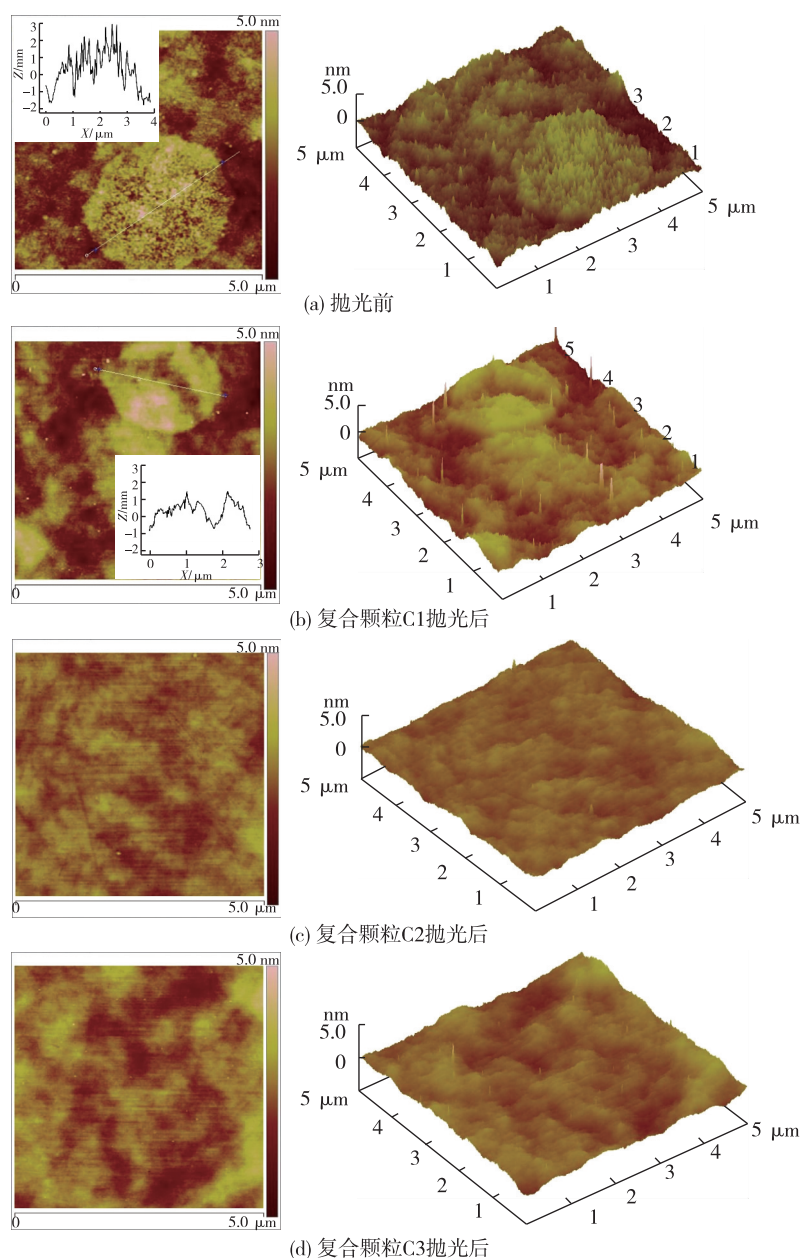


图5 抛光前后衬底表面的 AFM 二维和三维形貌

Fig.5 2D and 3D AFM images of the substrates before and after CMP

致平坦化效果不明显。

如图 5(c)所示,经复合磨料 C2( $\text{CeO}_2$ 壳层的质量分数为 51.1%)抛光后衬底质量得到了明显改善,表面无明显的划痕,粗糙度  $R_a$  值由  $0.63 \pm 0.07$  降至  $0.25 \pm 0.01 \text{ nm}$ , RMS 值由  $0.79 \pm 0.08$  降至  $0.31 \pm 0.02 \text{ nm}$ 。而复合磨料中  $\text{CeO}_2$  壳层的质量分数增至 55.3%时(样品 C3),抛光后表面的粗糙度  $R_a$  和 RMS 值分别为  $0.38 \pm 0.02 \text{ nm}$  和  $0.47 \pm$

$0.02 \text{ nm}$ 。这可能是由于随着复合磨料中  $\text{CeO}_2$  质量分数的增大,表层  $\text{CeO}_2$  纳米颗粒由单层包覆(样品 C2)变为多层包覆,使得复合颗粒的密度增大。当抛光液的固含量一定时,抛光液中磨料的数量则随着磨料密度的增大而减少。根据磨料与衬底之间的压痕深度作用机制<sup>[18]</sup>,这将使得单个磨料所承受的载荷增大,磨料在衬底表面的压痕深度亦随之增大,最终导致抛光后晶片表面粗糙度的增大。

表 1 抛光前后衬底表面的粗糙度  $R_a$  和 RMS 值  
Table 1 The  $R_a$  and RMS roughness values of the substrates before and after polishing

Samples	Surface roughness	
	$R_a$ /nm	RMS/nm
Before polishing	$0.63\pm0.07$	$0.79\pm0.08$
Polished with composites C1	$0.58\pm0.05$	$0.73\pm0.06$
Polished with composites C2	$0.25\pm0.01$	$0.31\pm0.02$
Polished with composites C3	$0.38\pm0.02$	$0.47\pm0.02$

3 结 论

选择以过硫酸钾为引发剂,通过采用无皂乳液聚合的方法合成了粒径为 280~300nm 的单分散 PMMA 微球。再以硝酸铈为铈源、六亚甲基四胺为缓释沉淀剂,实现了 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒在 PMMA 内核表面的均匀包覆,得到了核壳结构 PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料。利用热失重曲线定量确定本实验所得复合颗粒 CeO<sub>2</sub> 壳层的质量分数在 40%~56% 范围内。抛光试验结果表明,PMMA/CeO<sub>2</sub> 复合磨料中 CeO<sub>2</sub> 的质量分数对抛光后热氧化硅片的表面形貌和粗糙度具有明显影响。当复合磨料中 CeO<sub>2</sub> 纳米颗粒在 PMMA 内核表面呈单层包覆时,抛光后衬底表面最为光滑平坦,粗糙度平均值和均方根值分别为  $0.25\pm0.01\text{nm}$  和  $0.31\pm0.02\text{nm}$ 。在本实验条件下,当复合磨料中 CeO<sub>2</sub> 包覆量过低或过高时均不利于得到超光滑抛光表面。

参考文献:

[1]KRISHNAN M, NALASKOWSKI J W, COOK L M. Chemical mechanical planarization: slurry chemistry, materials, and mechanisms [J]. Chemical Reviews, 2010, 110 (1): 178-204.  
[2]BIDDUT A Q, ZHANG L C, ALI Y M, et al. Damage-free polishing of monocrystalline silicon wafers without chemical additives [J]. Scripta Materialia, 2008, 59 (11): 1178-1181.  
[3]PAN G S, ZHOU Y, LUO G H, et al. Chemical mechanical polishing (CMP) of on-axis Si-face 6H-SiC wafer for obtaining atomically flat defect-free surface[J]. Journal of Materials Science, 2013, 24 (12): 5040-5047.  
[4]GUO D, XIE G, LUO J. Mechanical properties of nanoparticles: basics and applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47: 013001.  
[5]FENG X D, SAYLE D C, WANG Z L, et al. Converting ceria polyhedral nanoparticles into single-crystal nano-

spheres[J]. Science, 2006, 312 (6): 1504-1508.  
[6]陈杨,隆仁伟,陈志刚.包覆结构 SiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> 复合磨料的合成及其应用[J].中国有色金属学报,2010, 20 (1): 163-169.  
[7]CHEN Y, QIAN C, MIAO N. Atomic force microscopy indentation to determine mechanical property for polystyrene-silica core-shell hybrid particles with controlled shell thickness[J]. Thin Solid Films, 2015, 579: 57-63.  
[8]ARMINI S, WHELAN C M, MOINPOUR M, et al. Composite polymer core-silica shell abrasive particles during oxide CMP: A defectivity study[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2007, 154 (8): H661-H671.  
[9]ARMINI S, DE MESSEMAEKER J, WHELAN C M, et al. Composite polymer core-ceria shell abrasive particles during oxide CMP: A defectivity study [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155 (9): H653-H660.  
[10]CHEN Y, LI Z, MIAO N. Polymethylmethacrylate (PMMA)/CeO<sub>2</sub> hybrid particles for enhanced chemical mechanical polishing performance[J]. Tribology International, 2015, 82: 211-217.  
[11]CHEN A, MU W, CHEN Y. Compressive elastic moduli and polishing performance of non-rigid core/shell structured PS/SiO<sub>2</sub> composite abrasives evaluated by AFM[J]. Applied Surface Science, 2014, 290: 433-439.  
[12]CHEN Y, LU J X, CHEN Z G. Preparation, characterization and oxide CMP performance of composite polystyrene-core ceria-shell abrasives[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88 (2): 200-205.  
[13]WANG C, YAN J, CUI X, et al. Preparation and characterization of magnetic hollow PMMA nanospheres via in situ emulsion polymerization[J]. Colloids and Surfaces A, 2010, 363: 71-77.  
[14]YANG Z, YANG Y, LIANG H, et al. Hydrothermal synthesis of monodisperse CeO<sub>2</sub> nanocubes[J]. Materials Letters, 2009, 63: 1774-1777.  
[15]STEFANESCU E A, TAN X, LIN Z, et al. Multifunctional fiberglass-reinforced PMMA-BaTiO<sub>3</sub> structural/dielectric composites[J]. Polymer, 2011, 52: 2016-2024.  
[16]COOK L M. Chemical processes in glass[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1990, 120: 152-171.  
[17]DEJULE R. CMP 工艺参数改进[J].集成电路应用, 2008(Z2): 39-42.  
[18]CHEN X, ZHAO Y, WANG Y. Modeling the effects of particle deformation in chemical mechanical polishing [J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 8469-8474.

(责任编辑:李艳)