文章编号: 1004-0609(2011)07-1777-08

不同粒径核壳结构聚苯乙烯(**PS**)-CeO₂复合磨料的制备、表征及其化学机械抛光性能

陆锦霞1,陈志刚1,2,隆仁伟1

(1. 常州大学 材料科学与工程学院,常州 213164; 2. 苏州科技学院 化学与生物工程学院,苏州 215011)

摘 要: 以无皂乳液聚合法制备的不同粒径聚苯乙烯(Ploystrene, PS)微球为内核,以硝酸铈和六亚甲基四胺为原料,采用液相工艺制备具有核壳结构的 PS-CeO₂复合微球。利用 X 射线衍射仪(XRD)、透射电子显微镜(TEM)、场发射扫描电镜(FESEM)、傅里叶转换红外光谱仪(FT-IR)和热重分析仪(TGA)等对样品的成分、物相结构、形貌、粒径以及团聚情况进行表征。将所制备的 PS-CeO₂复合微球作为磨料用于二氧化硅介质层的化学机械抛光,用原子力显微镜(AFM)观察抛光表面的微观形貌,测量表面粗糙度。结果表明:所制备的 3 种 PS 微球呈单分散规则球形,粒径分别约为 120、170 和 240 nm; 3 种 PS-CeO₂复合微球具有核壳结构,粒径分别约为 140、190 和 260 nm, CeO₂壳厚约为 10 nm。随着 PS-CeO₂复合磨料粒径的减小,抛光表面粗糙度随之降低,经样品 F1 抛光后表面在 10 μm×10 μm 面积范围内粗糙度的平均值(*R*_a)及其均方根(*R*_{ms})分别为 0.372 和 0.470 nm。 关键词: PS-CeO₂复合磨料;核壳结构;化学机械抛光

中图分类号: TN305.2 文献标志码: A

Preparation, characterization and performance of core-shell PS-CeO₂ composite abrasives with different particle sizes

LU Jin-xia¹, CHEN Zhi-gang², LONG Ren-wei¹

School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
 School of Chemistry and Biological Engineering,
 Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Polystyrene (PS) microspheres were prepared by soap-free emulsion polymerization method. Core-shell structured PS-CeO₂ composite microspheres were synthesized by liquid phase process using cerium nitrate and hexamethylene tetramine as raw materials. The composition, phase structure, morphology, grain size and agglomeration of the as-prepared composite microspheres were characterized by XRD, TEM, FESEM, FT-IR and TGA. The as-prepared composite microspheres were collocated into polishing abrasives for chemical mechanical polishing (CMP) of silicon dioxide dielectric layer. The morphologies of the dielectric layer after polishing by the composite abrasives were investigated by AFM. The results indicate that the three kinds of PS microspheres are monodispersive and uniform, and the particle size of PS is about 120, 170 and 240 nm, respectively. The particle size of the three kinds of the as-prepared PS-CeO₂ composite microspheres is about 140, 190 and 260 nm, respectively, and the thickness of CeO₂ shell is about 10 nm. After CMP, the surface roughness of SiO₂ dielectric layer decreases with the decrease of the particle size of the average roughness R_a and root mean square of roughness R_{ms} of dielectric layer polished by PS-CeO₂ composite abrasives in the area of 10 μ m × 10 μ m are 0.372 and 0.470 nm, respectively.

Key words: PS-CeO₂ composite abrasives; core-shell structure; chemical mechanical polishing (CMP)

CeO₂ 是一种重要的稀土氧化物,虽然它较软(莫氏硬度为 6~7),但一直被用于有效地抛光高硬度的玻

璃基板等硬质材料^[1-3]。研究表明,相对于其他传统的 无机磨料(如 SiO₂、ZrO₂ 和 Al₂O₃ 等), CeO₂ 磨料更

基金项目: 江苏省工业支撑计划项目(BE2008037); 常州市工业科技攻关项目(CE2007068, CE2008083)

收稿日期: 2010-06-22; 修订日期: 2010-10-28

通信作者: 陈志刚, 教授, 博士; 电话: 0519-86330066; E-mail: czg@cczu.edu.cn

适合于超大规模集成电路(UISL)制造中二氧化硅介质 层的化学机械抛光(CMP),且具有抛光速率快和抛光 质量好等优点^[4-5]。随着 UISL 集成度的提高^[6-7],器 件的特征尺寸已降至亚微米级甚至纳米级,对于特征 尺寸为 0.35 µm 及以下的器件,必须采用 CMP 技术进 行全面平坦化。而单一的 CeO₂ 磨料在抛光过程中易 产生粒子污染及大颗粒所造成的划痕和凹痕等各种表 面缺陷^[5, 8-9],不能满足获得高质量抛光表面的要求。

近年来,具有核壳结构的有机/无机复合磨料的开 发及其在 CMP 中的应用已逐渐成为 CMP 相关技术领 域中的一个研究热点。CECIL 等^[10]制备了一种粒径为 800 nm 左右的有机/无机复合微球,该复合颗粒的聚 合物网络由硅氧烷和部分丙烯酰胺网络贯穿而成,表 面无机部分为纳米 CeO2 颗粒,并应用于氧化物 CMP, 结果表明,此种复合粒子适用于制备下一代抛光浆料。 ARMINI 等^[11-14] 制备了具有核壳结构的球形 PMMA/SiO₂复合磨料,并用于二氧化硅介质层以及铜 布线的抛光,获得了良好的抛光效果,研究了抛光工 艺参数对各种抛光表面缺陷的影响。但是, ARMINI^[15-16]等在制备 PMMA/CeO₂ 复合磨料时效果 并不理想,纳米 CeO2颗粒在 PMMA 内核表面包覆很 不均匀,尽管如此,该复合磨料仍然表现出较好的抛 光效果。有趣的是,ARMINI 等^[12]在研究中发现,较 大粒径的复合磨料反而表现出更好的抛光特性,所获 得的抛光表面反而具有更少的表面缺陷,但没有深入 探讨其原因。

本文作者首先以无皂乳液聚合法制备不同粒径的 聚苯乙烯(PS)微球,并以硝酸铈和六亚甲基四胺为原 料、以 PS 微球为内核,采用液相工艺制备具有不同 球径的 PS-CeO2 复合微球,对样品的物相、形貌和结 构进行表征,并将所制备的 PS-CeO2 复合磨料用于二 氧化硅介质层的抛光。

1 实验

1.1 原料

原料苯乙烯(styrene, St)为工业级,首先用

表1 用于制备 PS 微球的工艺参数

 Table 1
 Technical parameters for preparing PS microspheres

5%NaOH(质量分数)水溶液洗涤数次除去阻聚剂,并 用无水 CaCl₂干燥,再经减压蒸馏处理后置于4℃冰 箱中低温保存备用。

过硫酸钾(K₂S₂O₈)为分析纯,首先将过硫酸钾在 40℃溶解过滤,滤液用水冷却,过滤出结晶,并以冰 水洗涤,用氯化钡检验硫酸根离子,重复以上操作直 至无检测硫酸根离子为止。将白色晶体置于真空干燥 箱中干燥,在棕色瓶中低温保存备用。

二乙烯基苯(C₁₀H₁₀)、α-甲基丙烯酸(C₄H₆O₂)、六 水硝酸铈(Ce(NO₃)₃·6H₂O)、六亚甲基四胺(C₆H₁₂N₄, HMT)、十二烷基苯磺酸钠(SDBS)和氨水均购自上海 国药集团试剂有限公司,未进行任何处理,直接使用。

1.2 PS 微球的制备

将蒸馏水、一定量的苯乙烯(St)、适量的二乙烯基 苯和 α-甲基丙烯酸依次加入 250 mL 带有冷凝管、机 械搅拌装置和氮气导管的四口瓶中,搅拌均匀后置于 恒温油浴锅中加热到一定温度,10 min 后加入引发剂 过硫酸钾(溶于 10 mL 蒸馏水中),反应一段时间后即 可得到 PS 乳胶粒子分散液。制备工艺条件如表 1 所 列,所获得的 PS 微球样品依次标记为 P1、P2 和 P3。

1.3 PS-CeO2 复合微球的制备

分别量取 PS 乳胶液(P1~P3) 4 mL 加入到 200 mL 蒸馏水中,超声分散 10 min 后分别加入 2.443 3 g HMT 和 1.513 6 g Ce(NO₃)₃·6H₂O, 控制反应溶液中 Ce(NO₃)₃·6H₂O 和 HMT 的摩尔比为 1:5。将所配制的 反应液在电磁搅拌条件下于 75 ℃反应 2 h,将沉淀物 离心分离、洗涤(蒸馏水洗两遍、无水乙醇洗一遍), 置于 80 ℃鼓风烘箱中烘干,即可得到乳白色的 PS-CeO₂ 复合微球,所获样品依次标记为 F1、F2 和 F3。

1.4 样品的表征

采用荷兰 Philips 公司生产的 Tecnai-12 型透射电 镜(TEM)测定样品的微观形貌和壳层的厚度;采用日 本 Hitachi 公司生产的 S-4800 II 型场发射扫描电镜

Sample No.	V(St)/ mL	V(C ₁₀ H ₁₀)/ mL	V(C ₄ H ₆ O ₂)/ mL	<i>m</i> (K ₂ S ₂ O ₈)/ g	V(distilled water)/ mL	Temperature/ ℃	Time/ h	N ₂ protection
P1	10	0.5	0.75	0.125	60	75	6	Yes
P2	20	2	1	0.500	100	125	2	No
P3	20	2	1	0.250	100	125	2	No

(FESEM)观察样品的粒径大小、表面形貌和团聚情况; 采用日本理学公司生产的 D/max 2500 PC 型 X 射线衍 射仪(XRD)分析样品的物相结构;采用美国 Nicolet 公 司生产的 Nicolet Avatar 370 型傅里叶转换红外光谱仪 (FT-IR)对样品的红外吸收进行测定;采用美国 TA 公 司生产 SDT Q600TA 热重示差扫描量热仪(TG-DTA) 测定样品的热性能。

1.5 抛光试验

分别将所制备的 PS-CeO₂ 复合微球(F1~F3)配制 成 1%(质量分数,下同)的抛光浆料,再加入 0.5 % SDBS(质量分数)作为分散剂,用氨水将抛光液的 pH 值调至 10。在一定抛光工艺(抛光压力约为 0.028 MPa、上盘转速为 90 r/min、下盘转速为 120 r/min、 抛光时间为 1 min、抛光液流量为 100 mL/min)条件下, 使用丹麦 Struers 公司生产的 TegraForce-1/ TrgraPol-15 型精密抛光机对硅热氧化片(氧化层厚度 约为 1 μm)进行抛光试验,抛光垫型号为 MD Chem(丹 麦 Struers 公司生产)。将抛光后的晶片样品清洗、晾 干后用美国 DI 公司生产的 Nanoscope IIIa 型原子力显 微镜(AFM)观察抛光后晶片的表面二维和三维形貌, 并测定其表面粗糙度和表面轮廓曲线。

2 结果与讨论

2.1 PS 微球的 FESEM 观察

图 1 所示为所制备 PS 微球样品 P1~P3 的 FESEM 像。可以看出,所制备的 PS 微球呈规则球形,P1~P3 的粒径分别约为 120、170 和 240 nm,颗粒之间的边界清晰,单分散性好,粒度分布均匀。

2.2 样品的 FT-IR 分析

图 2 所示为所制备 PS 微球和 PS-CeO₂ 复合微球 样品 F1~F3 的 FT-IR 光谱。聚苯乙烯的重复单元由 1 个苯环、1 个亚甲基(一CH₂)和 1 个次甲基(一CH)组成, 苯环上有不饱和碳氢基团(=CH)和碳碳骨架(C=C), 4 个双键加 1 个苯环,正好为 5 个不饱和度。从 PS 微 球的 FT-IR 光谱中可以看出: 2 922、2 850 和 1 470 cm⁻¹ 附近的吸收峰分别对应于亚甲基的反对称伸缩振动 峰、对称伸缩振动峰和对称弯曲振动峰; 3 100~3 000 cm⁻¹处的伸缩振动吸收峰为苯环上不饱和碳氢基团的 伸缩振动峰; 3 000~2 800 cm⁻¹处对应于次甲基的伸缩 振动; 1 450~1 600 cm⁻¹对应于苯环骨架上 C=C 的伸 缩振动; 770~730 cm⁻¹和 710~690 cm⁻¹对应于苯环(苯



图 1 PS 微球样品的 FESEM 像

Fig.1 FESEM images of PS microsphere samples: (a) Sample P1; (b) Sample P2; (c) Sample P3





Fig.2 FT-IR patterns of PS and PS-CeO₂ composite microsphere samples

环上邻接 5 个氢)上不饱和碳氢基团的面外弯曲振动, 由此可知,产物即为聚苯乙烯。从 PS-CeO₂ 复合微球 F1~F3 的 FT-IR 光谱可以看出 PS 的所有伸缩振动吸收 峰,这说明复合微球样品中存在聚苯乙烯。此外, PS-CeO₂ 复合微球样品的 FT-IR 光谱在 690 cm⁻¹ 附近 出现了 Ce—O—Ce 的振动峰^[17],在 400 cm⁻¹ 附近出 现了 Ce—O 键的伸缩振动峰^[18],这说明样品中存在 CeO₂,由此可以证明形成了 PS-CeO₂ 复合材料。

2.3 样品的 XRD 分析

图 3 所示为所制备 PS 微球、纯 CeO₂和 PS-CeO₂ 复合微球 F1~F3 的 XRD 谱。从 PS-CeO₂ 复合微球样 品的 XRD 谱中可以看到一系列尖锐的衍射峰,说明 样品的结晶良好。经与 JCPDS 卡片对照,发现样品的 衍射特征峰的位置和相对强度均与立方萤石结构的 CeO₂ 标准卡(JCPDS, No. 34—0394)吻合良好,分别对 应于(111)、(200)、(220) 和 (311)晶面,且(222)、(400)、 (331)和(420)等晶面峰也很明显,说明样品中存在结晶 完整的 CeO₂。此外,复合微球样品的 XRD 谱在 2*θ*=20° 左右均出现了 1 个强度很弱的非晶衍射峰,这可能是 复合样品中的 PS 内核造成的,间接说明了所制备样 品具有核壳包覆结构。



图 3 PS 微球、纯 CeO₂和 PS-CeO₂复合微球的 XRD 谱 Fig.3 XRD patterns of PS, pure CeO₂ and PS-CeO₂ composite microsphere samples

2.4 PS-CeO₂复合微球的 FESEM 观察

图 4 所示为所制备 PS-CeO₂ 复合微球 F1~F3 的 FESEM 像。从图 4 可以看出,样品 F1~F3 均呈规则 球形,其粒径分别约为 140、190 和 260 nm。与图 1 对比可知,复合微球样品基本保持了包覆前 PS 微球 的规则球形,其粒径略有增大,且表面略显粗糙,这 可能是 CeO₂ 纳米颗粒在 PS 微球表面的包覆所造成 的,从而形成了杨梅状包覆结构。



图 4 PS-CeO₂ 复合微球的 FESEM 像 **Fig.4** FESEM images of PS-CeO₂ composite microsphere samples: (a) Sample F₁; (b) Sample F₂; (c) Sample F₃

2.5 PS-CeO2 复合微球的 TEM 观察

图 5 所示为所制备 PS-CeO₂复合微球样品 F1~F3 的 TEM 像。由图 5 可知,复合颗粒均呈规则球形, 复合微球表面均匀包覆着粒径约为 5 nm 的 CeO₂纳米 颗粒,中部颜色较浅的部分为 PS 内核,而边缘颜色 较深的部分则为 CeO₂ 包覆层,这说明所得复合微球 具有核壳结构, PS 微球表面包覆着 CeO₂ 壳层,形成 复合结构, CeO₂ 壳层的厚度约为 10 nm。

2.6 样品的 TGA 分析

图 6 所示为所制备 PS 微球和 PS-CeO₂复合微球 样品 F1~F3 的 TGA 曲线。可以看出:样品的质量损 失可分为两个阶段,第一阶段温度为 80~180 ℃,可 以认为是样品表面吸附水的脱出;第二阶段温度为



图 5 PS-CeO₂复合微球的 TEM 像

Fig.5 TEM images of PS-CeO₂ composite microsphere samples: (a) Sample F1; (b) Sample F2; (c) Sample F3

300~500 ℃,这是样品中聚合物 PS 内核受热分解所 致。500 ℃后,曲线呈水平状,这表明样品中的聚合 物已经分解完全。从 TGA 可计算出样品 F1、F2 和 F3 中 CeO₂的包覆量分别约为 64.62%、47.08%和 46.21%, 且计算时扣除了 CeO₂的表面质量损失(约 6.62%)。



图 6 PS 微球和 PS-CeO2 复合微球的 TGA 曲线

Fig.6 TGA curves of PS and PS-CeO₂ composite microsphere samples

2.7 抛光表面的 AFM 观察

图 7 所示分别为 PS-CeO₂ 复合磨料 F1~F3 抛光后 二氧化硅介质层表面典型的表面 AFM 像和轮廓曲线 (均选择对角线 *A* 和 *B* 作为测量位置),其中单位垂直 高度均为 10 nm。可以看出,经不同粒径复合磨料抛 光后的样品表面平整、无划痕,均获得了具有亚纳米 量级的表面粗糙度。

图 8 所示为纯 CeO₂ 磨料(粒径为 5~10 nm)抛光后 二氧化硅介质层表面典型的 AFM 像。可以看出,样 品表面虽比较平整,但是产生了一些明显的划痕,相 比较得出这种核壳结构复合磨料对二氧化硅介质层具 有良好的抛光效果,且随着复合磨料粒径的减小,抛 光表面的粗糙度随之减小,表面轮廓曲线也更趋于平 缓,这说明表面更为平整。 经样品 F1(粒径约为 140 nm)抛光后表面在 10 µm×10 µm 范围内粗糙度的平均 值 *R*a为 0.372 nm,粗糙度的均方根值为 0.470 nm,抛 光表面轮廓也最为平缓。

可以推测,复合磨料中聚合物内核的作用使得复 合磨料呈现固有的柔性,同时由于表面 CeO₂ 纳米颗 粒的包覆,复合磨料又具有可观的表面硬度,从而使 得这种特殊结构的有机物(核)/无机物(壳)的复合磨料 具有独特的"内柔外硬"的力学性质。此外,CeO₂ 还具 有多价的性质,Ce³⁺/Ce⁴⁺的氧化-还原反应使二氧化硅 介质层破坏,同时在抛光浆料中碱性组分的化学作用 下,二氧化硅介质层表面形成(Ce-O-Si)络合物而被 去除^[19-20]。

现有研究表明,在抛光过程中复合磨料可能产生 一定的弹性变形^[15],从而可以将抛光压力更加温和地 传递给抛光表面,这些特点对于减少抛光表面划痕以





Fig.7 AFM images of silicon dioxide dielectric layer polished by different composite abrasives: (a₁), (a₂), (a₃) Polished by composite abrasive F1, R_{ms} =0.470 nm, R_{a} =0.372 nm; (b₁), (b₂), (b₃) Polished by composite abrasive F2, R_{ms} =0.549 nm, R_{a} =0.426 nm; (c₁), (c₂), (c₃) Polished by composite abrasive F3, R_{ms} =0.718 nm, R_{a} =0.585 nm



图 8 CeO2 磨料抛光后晶片的 AFM 像

Fig.8 AFM images of silicon dioxide dielectric layer polished by CeO₂ abrasives: (a) 2D; (b) 3D

及降低缺陷具有重要作用,其具体的抛光机理有待通 过试验研究与模拟仿真相结合的方法进行深入研究。

3 结论

1) 采用无皂乳液聚合法制备了 3 种单分散近球 形 PS 微球,其粒径分别约为 120、170 和 240 nm。

2) 以 PS 微球为内核,采用液相工艺制备具有 3 种杨梅状包覆结构的核壳型 PS-CeO₂ 复合微球,其粒径分别约为 140、190 和 260 nm, CeO₂ 壳层厚度约为 10 nm,粒径约为 5 nm 的 CeO₂ 颗粒在 PS 微球表面包 覆均匀。

3) 经 PS-CeO₂ 复合微球抛光的二氧化硅介质层 表面平整、无划痕,均获得了具有亚纳米级粗糙度的 抛光表面,且随着复合磨料粒径的减小,抛光表面的 粗糙度随之降低,抛光表面的轮廓也更趋于平缓。经 样品 F1(粒径约为 140 nm)抛光后表面面积在 10 μm×10 μm 范围内的粗糙度的平均值 *R*_a 及其均方根 值 *R*_{ms}分别为 0.372 和 0.470 nm。

REFERENCES

- BELKHIR N, BOUZID D, HEROLD V. Wear behavior of the abrasive grains used in optical glass polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(20): 6140–6145.
- [2] SONG Xiao-lan, XU Da-yu, ZHANG Xiao-wei, SHI Xun-da, JIANG Nan, QIU Guan-zhou. Electrochemical behavior and polishing properties of silicon wafer in alkaline slurry with abrasive CeO₂[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of

China, 2008, 18(1): 178-182.

- [3] SAVIO G, MENEGHELLO R, CONCHERI G. A surface roughness predictive model in deterministic polishing of ground glass moulds[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(1): 1–7.
- [4] ARIMINI S, de MESSEMAEKER J, WHELAN C M, MOINPOUR M, MAEX K. Composite polymer core-ceria shell abrasive particles during oxide CMP: A defectivity study[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(9): 653–660.
- [5] HOSHINO T, KURATA Y, TERASAKI Y, SUSA K. Mechanism of polishing of SiO₂ films by CeO₂ particles[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 283(1/3): 129–136.
- [6] 檀柏梅,牛新环,时慧玲,刘玉岭,崔春翔. 纳米磨料在二氧 化硅介质 CMP 中的作用分析[J]. 功能材料, 2007, 38(2): 881-883.
 TAN Bo-mei, NIU Xin-huan, SHI Hui-ling, LIU Yu-ling, CUI Chun-xiang. Analysis of nano abrasive function on silica

dielectric CMP[J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(2): 881–883.

- [7] 宋晓岚,李宇焜,江 楠,屈一新,邱冠周. 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, QU Yi-xin, QIU Guan-zhou. Recent development of chemical mechanical polishing[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2008, 27(1): 26-31.
- [8] GILLISS S R, BENTLEY T, CARTER C B. Electron energy-loss spectroscopic study of the surface of ceria abrasives[J]. Applied Surface Science, 2005, 241(1/2): 61–67.
- [9] 许雪峰, 马冰迅, 黄亦申, 彭 伟. 利用复合磨粒抛光液的硅 片化学机械抛光[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1587-1592.
 XU Xue-feng, MA Bing-xun, HUANG Yi-shen, PENG Wei.
 Chemical polishing for silicon wafer by composite abrasive

1783

slurry[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1587–1592.

- [10] CECIL A C, SUBRAHMANYA R M, ASHOK K, VINAY K G. Novel ceria-polymer microcomposites for chemical mechanical polishing[J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5): 3090–3096.
- [11] ARMINI S, WHELAN C M, MOINPOUR M, MAEX K. Composite polymer core-silica shell abrasives: The effect of polishing time and slurry solid content on oxide CMP[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2007, 10(9): 243-247.
- [12] ARMINI S, WHELAN C M, MOINPOUR M, MAEX K. Composite polymer core-silica shell abrasives: The effect of the shape of the silica particles on oxide CMP[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(6): 401–406.
- [13] ARMINI S, WHELAN C M, MOINPOUR M, MAEX K.
 Copper CMP with composite polymer core-silica shell abrasives: A defectivity study [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(1): 18–26.
- [14] ARMINI S, WHELAN C M, MAEX K. Engineering polymer core-silica size in composite abrasives for CMP applications[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2008, 11(10): 280–284.
- [15] ARMINI S, WHELAN C M, MAEX K, HEMANDEZ J L, MOINPOUR M. Composite polymer core-ceria shell abrasive particles during oxide CMP [J]. Journal of the Electrochemical

Society, 2007, 154(8): 667-671.

- [16] ARMINI S, BURTOVYY R, MOINPOUR M, LUZINOY I, de MESSENAEKER J, WHELAN C M, MAEXA K. Interaction forces between a glass surface and ceria-modified PMMA-based abrasives for CMP measured by colloidal probe AFM[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(4): 218–223.
- [17] KSAPABUTR B, GULARI E, WONGKASEMJIT S. Sol-gel derived porous ceria powders using cerium glycolate complex as precursor[J]. Materials Chemistry and Physics, 2006, 99(2/3): 318–324.
- [18] TENG Mei-ling, LUO Lai-tao, YANG Xiao-mao. Synthesis of mesoporous Ce_{1-x}Zr_xO₂ (x=0.2–0.5) and catalytic properties of CuO based catalysts[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2009, 119(1/3): 158–164.
- [19] LIM D S, AHN J W, PARK H S, SHIN J H. The effect of CeO₂ abrasive size on dishing and step height reduction of silicon oxide film in STI-CMP[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(5/6): 1751–1754.
- [20] PARKA B, LEEA H, PARKA K, KIM H, JEONY H. Pad roughness variation and its effect on material removal profile in ceria-based CMP slurry[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 203(1/3): 287–292.

(编辑 陈卫萍)