

用于元件抛光的CeO₂基复合材料的研究进展

贾世豪¹, 孟凡明^{2*}, 李建军²

¹安徽大学文典学院, 安徽 合肥

²安徽大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥

收稿日期: 2021年12月7日; 录用日期: 2022年2月11日; 发布日期: 2022年2月18日

摘要

CeO₂是高效抛光材料, 具有粒度均匀、抛光速率快、表面精度高、消耗低等优点, 成为高端抛光粉原料的第一选择。本文主要从磨料浓度、晶面结构、添加剂等几个方面论述了影响抛光性能的因素, 并讨论了对CeO₂基复合材料及其抛光性能的相关研究, 其中着重论述了核/壳结构和不同元素掺杂改性磨料的制备方法, 最后介绍了新型抛光技术的研究进展。

关键词

CeO₂, 抛光粉, 合成方法, 核/壳结构, ECMP, PCMP

Advances in the Research of CeO₂-Based Composites for Component Polishing

Shihao Jia¹, Fanming Meng^{2*}, Jianjun Li²

¹Wendian College, Anhui University, Hefei Anhui

²School of Materials Science and Engineering, Anhui University, Hefei Anhui

Received: Dec. 7th, 2021; accepted: Feb. 11th, 2022; published: Feb. 18th, 2022

Abstract

CeO₂ is an efficient polishing material with the advantages of uniform particle size, fast polishing rate, high surface accuracy and low consumption, which makes it the first choice of raw materials for high-end polishing powders. This paper mainly discusses the factors affecting polishing performance from several aspects such as abrasive concentration, crystal structure, additives, etc., and discusses the related research on CeO₂-based composites and their polishing perfor-

*通讯作者。

mance, which focuses on the preparation methods of core/shell structure and different elemental doping modified abrasives, and finally introduces the research progress of new polishing technology.

Keywords

CeO₂, Polishing Powder, Synthesis Method, Nuclear/Shell Structure, ECMP, PCMP

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在电子信息技术推动作用下, 集成电路的发展速度也逐渐加快, 集成电路特征尺寸正逐步减小, CMP 将摩尔定律从 0.25 μm 扩展到 5 nm 工艺节点, 并且 3 nm 制程芯片也即将实现量产, 在这一进程中 CMP 平坦化对于集成电路(IC)制造起着至关重要的作用[1] [2] [3] [4] [5]。传统的平坦化技术, 如反刻、玻璃回流和旋转膜层等平坦化技术在全局平坦化方面受到限制[2]。CMP 技术摒弃了传统的单一化学抛光或者单一机械抛光的缺点, 它通过原材料和一个抛光头之间的相对运动来平坦化材料表面, 在硅片和抛光头之间有抛光液, 并同时施加压力。它能精确并均匀地把材料抛光为需要的厚度和平坦度, 有效减少表面损伤并得到超光滑表面[2]。CMP 技术已经成为集成电路产业不可或缺的关键技术。

抛光液和抛光垫在化学机械抛光中不断地被使用和更换而被称为关键消耗品。其中抛光液包含平坦化所需的化学成分和抛光颗粒, 抛光液主要由磨料、pH 值调节剂、分散剂、氧化剂等部分组成[3] [4] [5]。抛光液主要分为金刚石抛光液、氧化铝抛光液、氧化铈抛光液、氧化硅抛光液等几类。与氧化铝、氧化硅等粉末相比, CeO₂ 抛光粉具有特殊结构和性质: CeO₂ 中的四价铈离子具有强氧化性, 对元件有高的化学活性; CeO₂ 硬度相对较小, 不会在元件表面留下明显的机械损伤; 在浅槽隔离技术中, CeO₂ 对 SiO₂ 和 Si₃N₄ 两种材料具有高的选择比, 同时它具有粒度均匀、用量少、能循环利用、易清洗等优点。目前 70%~100% 的优质抛光粉为 CeO₂ 基复合材料。本文将从磨料浓度、晶面结构、添加剂三个方面分析 CeO₂ 磨料抛光性能的影响因素, 并综述了掺杂改性、核/壳结构的 CeO₂ 基磨料的研究进展, 最后论述了新型抛光增强技术的相关研究, 以期本文对同行具有借鉴和参考意义。

2. 影响 CeO₂ 磨料抛光性能的不同因素

在实际的 CMP 过程中, 抛光液与元件表面之间存在复杂的相互作用, 包括机械作用、化学腐蚀和摩擦化学反应。影响抛光效果的因素不仅包括抛光浆的物理、化学性质, 还有其他工艺参数的影响, 如温度、湿度和光照等抛光环境, 以及下压力、转盘的转速和抛光垫的材质、粗糙度、硬度等。本人着重总结论述了以下几点。

2.1. CeO₂ 磨料的浓度对抛光性能的影响

一般情况下, 磨料浓度增加, 抛光颗粒数量增加, 去除率(MRR)会提高, 这是因为增加了磨料与硅片表面的接触面积。然而一些研究表明随着 CeO₂ 浓度的增加, MRR 会降低。Wang [6]等针对多分散系指出, 作为活性区域的 Ce³⁺随 CeO₂ 浓度增加而增加, CeO₂ 颗粒会变大, 而大颗粒会捕获小颗粒, 从而

限制小颗粒的功能,如图 1。Kwak [7]等使用扫描电子显微镜和数字显微镜对清洗后的晶圆表面进行分析,该团队指出,CeO₂颗粒即使在较低浓度下也能迅速吸附到 SiO₂表面,然而随着浓度的增加,快速形成的紧密结合的 CeO₂吸附层会干扰去除已与 Si 键合的 CeO₂颗粒和吸附新的 CeO₂颗粒的抛光过程。同时,吸附在 SiO₂上的 CeO₂颗粒由于静电而排斥新引入的 CeO₂颗粒,造成活性颗粒减少,且阻挡了 Si-O-Ce [8]的键合。

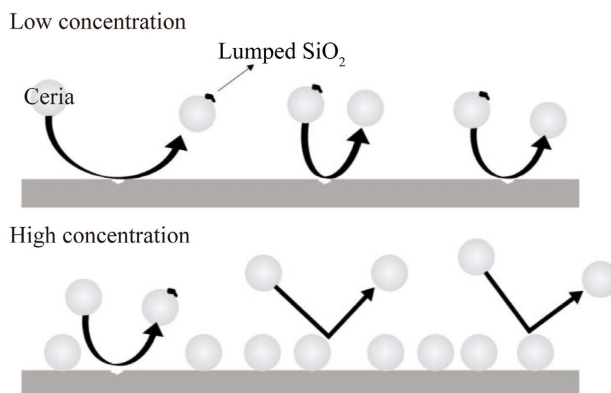


Figure 1. Schematic of the polishing process with at high and low ceria concentrations [7]

图 1. 高铈和低铈浓度下的抛光工艺示意图[7]

2.2. CeO₂ 磨料的晶面结构对抛光性能的影响

研究 CeO₂ 磨料的晶面结构有助于我们深入了解其作用机理,帮助我们对 CMP 工艺实现更好的控制。Xie [9]等在磁控溅射系统中,通过将 CeO₂ 磁控溅射到 ZrO₂(100), ZrO₂(110)和 ZrO₂(111)衬底上制备了相应晶面的 CeO₂ 薄膜,再利用原子力显微镜和扫描电子显微镜研究不同晶面 CeO₂ 对硅的去除性能, CeO₂ 对硅的去除率关系为 CeO₂(111) > CeO₂(100) > CeO₂(110),这与氧化铈磨损速率关系相一致,该团队认为 Si 与 CeO₂ 之间的主要磨损类型为粘着磨损,而 Si 与 CeO₂ 之间的摩擦力关系为 CeO₂(111) > CeO₂(110) > CeO₂(100) (如图 2 所示),这表明不同晶面的 CeO₂ 与 Si 之间的接触会影响磨料材料的去除率。Onodera [10]等使用 Car-Parrinello 分子动力学(CPMD)方法,认为表面硅原子会通过形成多个 Ce-O-Si 键变成五配位的中间体。由于这种状态很可能是不稳定的,当硅表面粗糙的原始硅氧键被打破时,这意味着晶圆表面将会变得平坦。原始 Si-O 键在硅表面的键解离反应仅发生在(111)表面的模型上,而在(100)表面上没有发生。该团队以表面原子的排列来解释:(111)表面提供六边形吸附位点,其固有地形成具有五个配位硅原子的结构,而(100)表面表现出正方形的吸附位点,很难形成所需的中间体。

2.3. 不同添加剂对抛光性能的影响

CeO₂ 抛光液分散性能较差,团聚严重。所以在使用 CeO₂ 抛光液通常通过加入不同添加剂的方法改善其分散性和悬浮特性,避免其团聚[4] [5]。添加剂对抛光速率的影响体现在改变分散剂和磨料的重量比来提高薄膜的去除率[11],同时,合适的化学添加剂能够调节 Ce³⁺/Ce⁴⁺之比(Ce³⁺的存在可以提供活性位点,有利于化学反应进行[12]),以获得较为满意的抛光率[13]。

pH 值对于 CeO₂ 抛光液十分重要。一方面合适的 pH 值调节剂能够为抛光液创造一个较为稳定的环境,使得抛光液的抛光速率及效率得到保障,另一方面,通过调节 pH 值可以 CeO₂ 粒子能稳定悬浮在抛光液中,改善 CeO₂ 抛光液的悬浮性能。夏[3]和陈[4]均得出 CeO₂ 抛光液使用的最佳 pH 值为 10 (碱性抛

光液), 此时抛光液 Zeta 电位的绝对值最大, 证明此时稳定性最好。二人使用不同碱性试剂进行实验、比较, 最终选用 NaOH 作为 pH 调节剂, 得到了沉降率低且长时间悬浮稳定的 CeO₂ 抛光液。

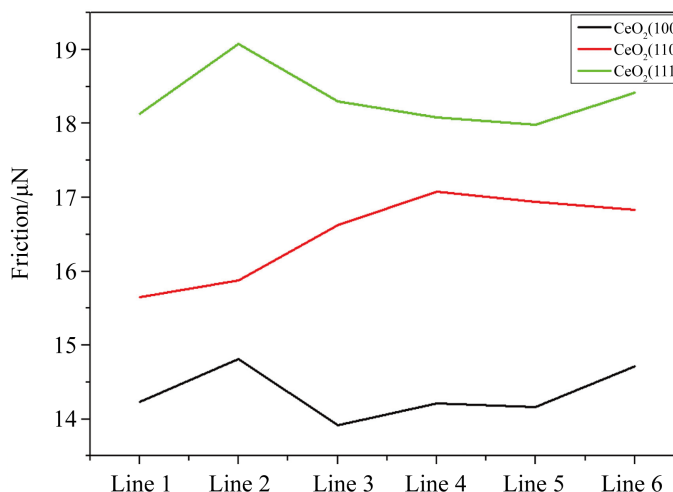


Figure 2. Average friction force of Lines 1 to 6 in the process of linear friction between Si and CeO₂(100), CeO₂(110), and CeO₂(111) films [9]
图 2. Si 与 CeO₂(100)、CeO₂(110)、CeO₂(111)薄膜线性摩擦过程中线 1-线 6 的平均摩擦力[9]

大多数分散剂是一类阴离子复合型的高分子聚电解质, 当其分散在水中时, 产生的带电基团或者高分子长链吸附在 CeO₂ 粒子的表面, 减少和阻碍 CeO₂ 粒子之间的吸引力及碰撞力[4], 使 CeO₂ 粒子能稳定悬浮分散在抛光液中。陈[4]通过对多种分散剂对 CeO₂ 抛光液悬浮性能的效果考察, 选出质量浓度为 0.4% PAAS (聚丙烯酸钠)、2.0% PVP (聚乙烯吡咯烷酮)、1.5% 硅酸镁铝为最佳复配分散剂配方。夏[3]在实验中同样得出结论选择 PAAS 作为分散剂。

3. CeO₂ 基磨料制备的研究

目前已经商品化的 CeO₂ 磨粒具有形貌不规则、粒径分布宽和分散稳定性差和易划伤抛光表面等缺点。为了提高 CeO₂ 磨粒的抛光效果, 研究人员开展了对 CeO₂ 磨粒的表面改性和掺杂等方面的研究。

3.1. 掺杂改性 CeO₂ 基磨料的制备及其性能研究

对于相同成分的抛光粉, 提高抛光效率的方法主要是增加材料的内部结构缺陷, 在 CeO₂ 中掺杂, 可以提高 Ce³⁺ 和氧空位的浓度, 增加其表面活性位点, 从而提高抛光效率, 另一方面, 第二相的掺入可以通过改变颗粒内部的分散性来增大颗粒的表面负电性, 进而改变抛光粉颗粒与硅片表面之间的电性和化学相互作用。

柴明霞等[14]采用正硅酸乙酯溶胶-凝胶法制备纳米 SiO₂, 并与氯化铯溶液混合, 用氨水沉淀法制备了悬浮稳定性较好的 SiO₂-CeO₂ 复合粉体, 并获得了理想的抛光效果; 韩磊等[15]以硅溶胶为硅源, 掺杂到硝酸铯溶液中, 经过喷雾干燥法得到前驱体, 再经过煅烧 CeO₂-SiO₂ 复合抛光粉, 抛光性能相对纯 CeO₂ 磨料或纯 SiO₂ 磨料得到了提高, 并得出了 CeO₂ 与 SiO₂ 的质量比(4:1)。

由于稀土金属元素具有特别高的化学活性, 利用稀土元素来掺杂改性成为研究人员选择的方向。Chen [16]的团队采用改进的初始浸渍法实现了镧系金属(La、Nd 和 Yb)对铯纳米颗粒表面的均匀掺杂, 且不存

在第二相, 提高材料抛光时 SiO_2 去除率的决定性因素之一是掺杂的氧化铈中 Ce^{3+} 的含量显著增加, La/CeO_2 、 Nd/CeO_2 和 Yb/CeO_2 对硅在碱性浆中的抛光率分别提高了 20.9%、29.6% 和 4.3%, 如图 3 所示。该团队[17]将 Sm 掺杂 $\text{SiO}_2@/\text{CeO}_2$ 复合颗粒, 得到平均尺寸为 310 nm 的 $\text{mSiO}_2\text{-Ce}_{1-x}\text{Sm}_x\text{O}_2$ ($x = 0.23$) 复合磨料, 抛光结果显示获得了原子量级表面粗糙度的超光滑表面, Sm 元素的掺入增强其摩擦化学反应活性, 与未掺 Sm 的磨料相比, 其复合磨料的抛光效率提高近 36% (62 nm/min 增大至 84 nm/min), 又将 Er 掺杂 [18] $\text{SiO}_2@/\text{CeO}_2$ 复合颗粒, 借助 PCMP 技术其去除率提高了 160%。

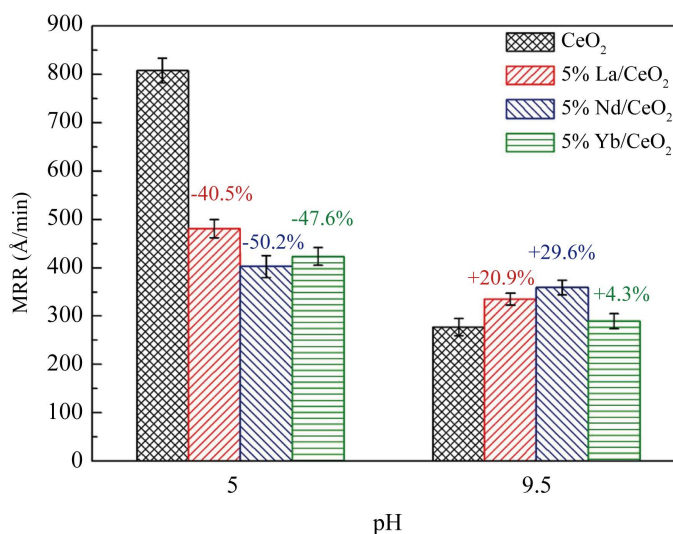


Figure 3. The material removal rate (MRR) of silica dielectric during chemical mechanical polishing (CMP) by using different CeO_2 abrasive particles. The slurry contains 0.25wt% abrasive particles [16]

图 3. 采用不同的 CeO_2 磨料颗粒进行化学机械抛光时, 二氧化硅介质的材料去除率(MRR)。泥浆中含有 0.25wt% 的磨料颗粒[16]

目前市售铈基抛光粉大多进行氟化处理, 即向氧化铈前驱体中加入氟化剂, 如氢氟酸、氟硅酸、氟化铵或氟化钠等进行氟化反应。贾[19]采用第一性原理方法, 研究了氟原子对 CeO_2 晶体弹性力学性能、晶体形貌变化的影响, 这些性能和结构的变化最终反映在氟化 CeO_2 抛光粉对 SiO_2 表面的磨削反应过程中。掺氟量达 25at%, 弹性模量和硬度迅速下降, 导致氟化抛光粉机械磨削能力大幅降低, 且 CeO_2 磨料表面稳定性顺序变为(100)面 > (111)面 > (110)面, 作者认为, 抛光过程中, F 原子没有直接与 SiO_2 晶粒反应成键, 但是 F 元素引起 CeO_2 晶体形貌改变, 并促进 Si 与 CeO_2 中的 O 成键, 所以 $\text{CeO}_{1.75}\text{F}_{0.25}$ (100) 对玻璃表面 Si 原子的去除率是 CeO_2 (111)表面的两倍。

另外, 基于为使抛光材料同时具有一定的刚性和柔韧性, 来提高抛光效率的同时, 减少表面的划痕, 马[20]等人利用熔融共混法制备了热塑性聚氨酯/氧化铈(TPU/ CeO_2)抛光复合材料, 这种方法有效改善了 CeO_2 基抛光液的分散性。复合材料的去除率达到 13.97 nm/min, 摩擦系数为 0.11 且随时间变化平稳, 在提升抛光质量、延长使用寿命方面有重要作用。

3.2. 核/壳结构 CeO_2 基磨料的制备及其性能研究进展

基于 CeO_2 的磨料的商业合成方法通常涉及到合适的前驱物的热分解。然而, 在煅烧和粉碎过程中, CeO_2 颗粒的大小和形状很难控制。因此, 具有锋利边缘、棱角和尖端的多面体磨料更容易划伤工件, 限

制了抛光表面质量的提高。在新型磨料中，由聚合物芯和 CeO_2 纳米颗粒壳组成的复合磨料，以及 CeO_2 接枝介孔 SiO_2 复合材料因其特殊的弹簧状结构和非刚性力学性能而受到越来越多的关注，在实现无缺陷表面方面具有潜在的应用前景[21] [22] [23]。

磨料的内芯自身具有非刚性的力学特性，同时作为支撑体，在磨料与工件表面的接触过程中可能发生少量弹性变形，使复合磨粒与衬底之间的真实接触面积增大，可更加柔和地将抛光压力传递至元件表面，在一定程度上减轻对元件表面的“硬冲击”带来机械损伤，避免加工表面出现微划痕。这使得复合磨粒抛光后元件表面有更低的表面粗糙度，并有效避免出现条状划痕等机械损伤、提高材料去除效率[21]。

陈杨[21]-[26]的团队致力于 CeO_2 核壳结构的研究。陈[24]制备表面带有负电荷的聚苯乙烯(PS)微球，再以硝酸铈为铈源为缓释沉淀剂，通过化学原位沉淀工艺制备具有核壳结构的复合微球，其抛光的热氧化膜的表面粗糙度和形貌变化均低于 CeO_2 纳米颗粒抛光，去除率可达 484.5 nm/min 。其另一项实验[25]在对铜的 CMP 中，PS/ CeO_2 混合磨料有助于减少机械损伤和划痕及凹坑的数量和深度，此进一步为铜和低 k 介电材料等具有机械挑战性的材料提供了潜在的 CMP 应用。马[21]利用化学沉积技术在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)表面嫁接氧化铈(CeO_2)纳米粒子，得到了核壳结构的 PMMA- CeO_2 复合颗粒，粒度均匀，有助于消除划痕，得到超光滑表面。

由于有机核的在较高温度的化学稳定性较差，陈爱莲等[22]用改进的 Stöber 法合成具有放射状孔道的介孔氧化硅(mSiO₂)微球，并实现 CeO_2 纳米颗粒在 mSiO₂ 内核表面的均匀包覆(mSiO₂ 微球的粒径约 300 nm ，平均孔径为 2.6 nm ，复合颗粒中 CeO_2 包覆层的厚度 $15\sim 20 \text{ nm}$)。与以实心氧化硅(sSiO₂)、sSiO₂/ CeO_2 复合颗粒相比(如图 4)，用 mSiO₂/ CeO_2 复合颗粒抛光后的氧化硅片工件具有更低的表面粗糙度(RMS = 0.267 nm)和更高的材料去除率(MRR = 45 nm/min)，且能避免出现表面微划痕等机械损伤，其抛光后的形貌图如图 5 所示。

在上述实验基础上，Chen [23] [26]等提出通过油水两相分层方法制备的亚 100 nm 单分散树枝状介孔二氧化硅(D-mSiO₂)的可调结构。然后在 D-mSiO₂ 纳米球上涂覆一层 CeO_2 薄壳，形成核/壳结构的 D-mSiO₂/ CeO_2 复合材料。具有良好的机械划痕消除效果，提高了机械划痕去除率。此外，增大的孔体积或孔隙率可以获得原子尺度的表面，具有相对较低的粗糙度、较少的变化和较高的去除率。

基于爆轰纳米金刚石(DND)硬度高、比表面积较大等特点，周[27]等人使用原位沉淀法实现了在 DND 颗粒表面包覆 CeO_2 ，得到了核壳结构的 DND@ CeO_2 复合磨料，相对于单一磨料，复合磨料在对蓝宝石的抛光中，去除率可达 73.26 nm/min ，抛光效率得到了提升，抛光后的蓝宝石表面粗糙度可降低至 4.47 nm ，且表面平整度很好，几乎没有损伤。

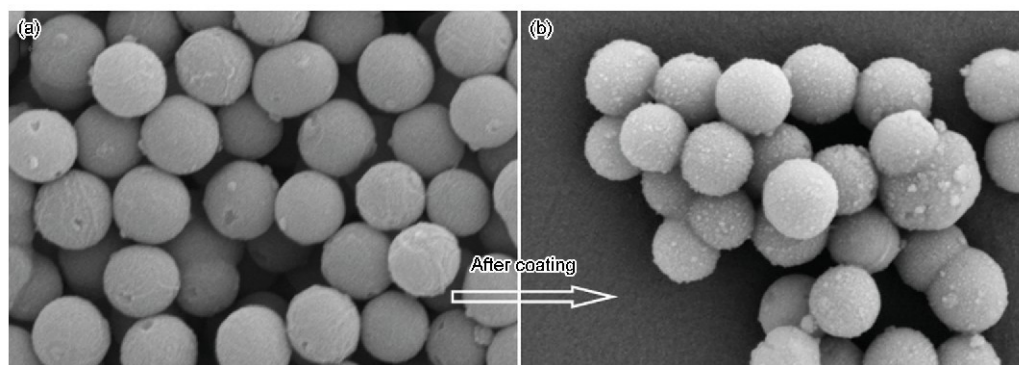


Figure 4. FESEM images of composite particles: (a) mSiO₂, (b) mSiO₂/ CeO_2 [22]

图 4. mSiO₂、mSiO₂/ CeO_2 样品的 FESEM 照片[22]

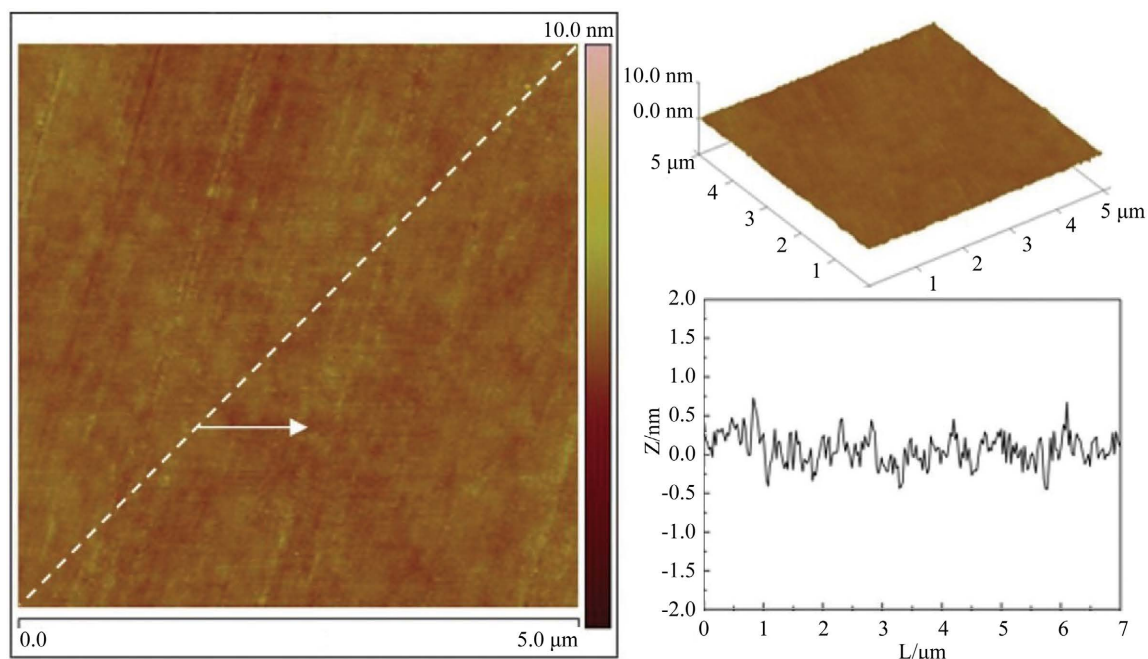


Figure 5. AFM topographies and profilograms of the substrate surfaces after polishing with $m\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ composite particles [22]
图 5. 使用 $m\text{SiO}_2/\text{CeO}_2$ 复合颗粒抛光的工件表面的 AFM 二维、三维形貌和微观轮廓曲线[22]

3.3. 提高 CeO_2 基磨料抛光性能的新型抛光技术研究进展

为了实现更高质量、更高效率地抛光，同时适应大规模生产，研究人员已经提出了电场辅助、磁场辅助和光辅助抛光方法。如 Murata [28] 使用 PU (聚氨酯)- CeO_2 核/壳结构的磨粒对 SiC 晶片进行电化学机械抛光，得出 MRR 为 $3\sim 4 \mu\text{m}/\text{h}$ ，远高于传统 CMP ($0.02 \mu\text{m}/\text{h}$)，最终获得了 5 nm 的表面粗糙度，且该方法不需要抛光垫。此外该团队[29]使用机械捏合机将聚合物、 CeO_2 、 Fe_3O_4 按 1:2:1 混合的粉末物理地粘附到球形聚合物内芯材料(PMMA，直径为 $10 \mu\text{m}$)，在磁场存在下的去除率明显高于常规磨料。Kim [30] 等用紫外光直接照射氧化铈浆料，利用 X 射线衍射仪(XRD)和透射电镜(TEM)对氧化铈磨料进行了表征，如图 6 所示：随着紫外光照射时间的延长， Ce^{3+} 浓度逐渐增加，且随着 Ce^{3+} 浓度的增加，去除率增大。

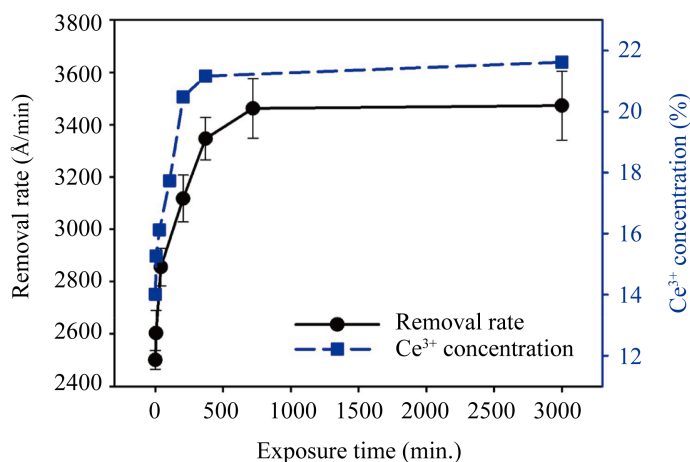


Figure 6. Removal rates and Ce^{3+} concentration according to UV-light exposure time [30]

图 6. 去除率和 Ce^{3+} 浓度随紫外线照射时间的变化[30]

这是因为 Ce^{3+} 在抛光中会在颗粒界面上产生更多可用的活性位点，这更有利于反应的进行。Chen [18] 使用介孔二氧化硅/掺铈氧化铈二元粒子作为光化学机械抛光(PCMP)的磨料，在 Er^{3+} 离子和紫外光照射下，使 MRR (去除率)增加超过 50%，并有效改善了表面质量。

Gao [31] 的团队提出了一种新的光电化学联合机械抛光(PECMP)技术，如图 7，借助弹性的核/壳聚苯乙烯(PS)/ CeO_2 核壳磨料和 TiO_2 极高的光催化活性，获得了超光滑 SiC 表面，在最佳实验条件下，抛光效果最佳(R_a : 0.738 nm, MRR: 1.109 $\mu\text{m}/\text{h}$)，证明了该方法的可行性。

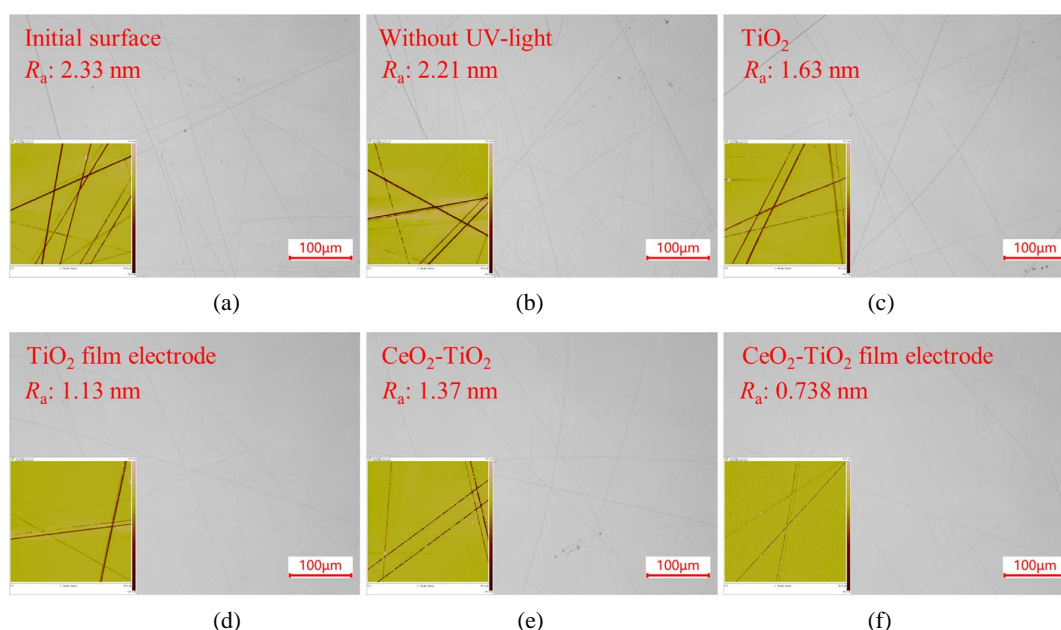


Figure 7. Morphologies and surface roughness values of (a) the initial surface and the polished surface under conditions of (b) without UV-light, (c) TiO_2 film electrode with UV-light, (d) TiO_2 film electrode with UV-light and anodic bias, (e) CeO_2 - TiO_2 composite-film electrode with UV-light and (f) CeO_2 - TiO_2 composite-film electrode with UV-light and anodic bias [31]

图 7. (a) 初始表面；(b) 无紫外光条件下抛光表面；(c) 有紫外光并使用 TiO_2 薄膜电极抛光下表面；(d) 在有紫外光和阳极偏压的 TiO_2 薄膜电极下抛光表面；(e) 有紫外光并使用 CeO_2 - TiO_2 复合膜电极下抛光表面；(f) 有紫外光和阳极偏压的 CeO_2 - TiO_2 复合膜电极抛光表面的形貌和表面粗糙度值[31]

4. 总结与展望

综上所述， CeO_2 抛光液以其独特的优势成为化学机械抛光领域的热点，同时 CeO_2 及其复合磨料的制备和 CMP 技术的应用已经取得了显著进展。但是用于半导体硅片的铈基抛光磨料的制备尚处于实验室研发阶段，在生产实践中存在许多亟待解决的问题：如 CeO_2 磨料粒子的均匀性问题、掺杂改性和结构改变带来的清洗问题和环保问题等。目前，我国的集成电路生产所使用的 CMP 抛光液全部为进口，国内几乎没有生产。因此，我国在铈基抛光磨料方面的合成工艺的研究及高性能 CMP 抛光液的研究急需加强，只有深入解决 CMP 工艺关键技术，才可以自主掌握拥有高端产业链。

基金项目

安徽大学(省级)大学生创新训练计划项目(编号: S202110357467)的阶段性研究成果；安徽大学(校级)大学生创新训练计划项目(编号: X202110357005)的阶段性研究成果。

参考文献

- [1] 许宁, 马家辉, 刘琦. CeO₂ 基磨粒在化学机械抛光中的研究进展[J/OL]. 中国稀土学报: 1-14[2022-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2365.TG.20211001.1132.002.html>
- [2] (美) Michael Quirk Julian Serda. 半导体制造技术[M]. 韩秋生, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 夏超. 纳米氧化铈抛光液的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2016.
- [4] 陈亮亮. CeO₂ 抛光液悬浮分散性能的研究与改进[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2021.
- [5] 吴媛媛, 衣守志, 魏志杰, 任立华, 方中心, 梁恩武, 叶雪芳, 张桂克. 氧化铈抛光液悬浮性和再分散性研究[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(2): 57-60.
- [6] Wang, L., Zhang, K., Song, Z. and Feng, S. (2007) Ceria Concentration Effect on Chemical Mechanical Polishing of Optical Glass. *Applied Surface Science*, **253**, 4951-4954. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.10.074>
- [7] Kwak, D., Oh, S., Kim, J., Yun, J. and Kim, T. (2021) Study on the Effect of Ceria Concentration on the Silicon Oxide Removal Rate in Chemical Mechanical Planarization. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **610**, Article ID: 125670. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125670>
- [8] Cook, L.M. (1990) Chemical Processes in Glass Polishing. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **120**, 152-171. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(90\)90200-6](https://doi.org/10.1016/0022-3093(90)90200-6)
- [9] Xie, L.L., Cheng, J., Wang, T.Q. and Lu, X.C. (2021) Mechanical Wear Behavior between CeO₂(100), CeO₂(110), CeO₂(111), and Silicon Studied through Atomic Force Microscopy. *Tribology International*, **153**, Article ID: 106616. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106616>
- [10] Onodera, T., Takahashi, H. and Nomura, S. (2020) First-Principles Molecular Dynamics Investigation of Ceria/Silica Sliding Interface toward Functional Materials Design for Chemical Mechanical Polishing Process. *Applied Surface Science*, **530**, Article ID: 147259. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147259>
- [11] Veera Dandu, P.R., Devarapalli, V.K. and Babu, S.V. (2010) Reverse Selectivity—High Silicon Nitride and Low Silicon Dioxide Removal Rates Using Ceria Abrasive-Based Dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, **347**, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.03.071>
- [12] Sabia, R. and Stevens, H.J. (2000) Performance Characterization of Cerium Oxide Abrasives for Chemical-Mechanical Polishing of Glass. *Machining Science and Technology*, **4**, 235-251. <https://doi.org/10.1080/10940340008945708>
- [13] Veera Dandu, P.R., Peethala, B.C., Amanapu, H.P. and Babu, S.V. (2011) Silicon Nitride Film Removal during Chemical Mechanical Polishing Using Ceria-Based Dispersions. *Journal of the Electrochemical Society*, **158**, H763-H767. <https://doi.org/10.1149/1.3596181>
- [14] 柴明霞, 胡建东, 冯晓平, 周雪珍, 罗军明, 李永绣. SiO₂-CeO₂ 复合氧化物的制备及抛光性能[J]. 无机化学学报, 2007, 23(4): 623-629.
- [15] 韩磊, 李梅, 柳召刚, 王觅堂, 胡艳宏, 陶豹. 喷雾干燥法制备 CeO₂-SiO₂ 复合抛光粉[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(3): 16-20.
- [16] Cheng, J., Huang, S., Li, Y., Wang, T.Q., Xie, L.L. and Lu, X.C. (2020) RE (La, Nd and Yb) Doped CeO₂ Abrasive Particles for Chemical Mechanical Polishing of Dielectric Materials: Experimental and Computational Analysis. *Applied Surface Science*, **506**, Article ID: 144668. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144668>
- [17] 陈爱莲, 王婉莹, 马翔宇, 蔡文杰, 陈杨. Sm 掺杂核-壳结构介孔 SiO₂@CeO₂ 复合颗粒的制备和抛光性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 919-926.
- [18] Chen, A.L., Duan, Y.H., Mu, Z.Y., Cai, W.J. and Chen, Y. (2021) Meso-Silica/Erbium-Doped Ceria Binary Particles as Functionalized Abrasives for Photochemical Mechanical Polishing (PCMP). *Applied Surface Science*, **550**, Article ID: 149353. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149353>
- [19] 贾慧灵. 铈基稀土抛光粉氟化行为的第一性原理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [20] 马驰, 刘紫婷, 史颖, 刘立志, 宋立新, 王连慧, 史胜男. 氧化铈改性热塑性聚氨酯抛光材料的制备与性能[J]. 塑料科技, 2021, 49(7): 1-7.
- [21] 马翔宇, 陈杨. 抛光压力和抛光垫硬度对 PMMA-CeO₂ 核壳复合磨粒抛光性能的影响(英文) [J]. 微纳电子技术, 2019, 56(10): 835-843.
- [22] 陈爱莲, 李泽峰, 陈杨. 氧化硅内核结构对核/壳包覆型 SiO₂/CeO₂ 复合颗粒抛光性能的影响[J]. 材料研究学报, 2017, 31(6): 429-436.
- [23] Wang, W.Y., Chen, Y., Chen, A. and Ma, X.Y. (2020) Composite Particles with Dendritic Mesoporous-Silica Cores and Nano-Sized CeO₂ Shells and Their Application to Abrasives in Chemical Mechanical Polishing. *Materials Chemi-*

- stry and Physics*, **240**, Article ID: 122279. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122279>
- [24] Chen, Y., Lu, J.X. and Chen, Z.G. (2011) Preparation, Characterization and Oxide CMP Performance of Composite Polystyrene-Core Ceria-Shell Abrasives. *Microelectronic Engineering*, **88**, 200-205. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.10.019>
- [25] Chen, A., Long, J., Li, Z. and Chen, Y. (2018) Copper Chemical Mechanical Polishing Performances of Polystyrene/Ceria Hybrid Abrasives with a Core/Shell Structure. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, **28**, 1655-1663. <https://doi.org/10.1007/s10904-018-0840-9>
- [26] Chen, Y., Zuo, C.Z., Li, Z.F. and Chen, A.L. (2018) Design of Ceria Grafted Mesoporous Silica Composite Particles for High-Efficiency and Damage-Free Oxide Chemical Mechanical Polishing. *Journal of Alloys and Compounds*, **736**, 276-288. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.112>
- [27] 周晨, 许向阳, 林顺天, 姚云飞. DND@CeO₂ 核壳型磨料的制备及其在蓝宝石表面的抛光机理研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(2): 115-120.
- [28] Murata, J., Yodogawa, K. and Ban, K. (2017) Polishing-Pad-Free Electrochemical Mechanical Polishing of Single-Crystalline SiC Surfaces Using Polyurethane-CeO₂ Core-Shell Particles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **114**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2016.11.007>
- [29] Murata, J., Ueno, Y., Yodogawa, K. and Sugiura, T. (2016) Polymer/CeO₂-Fe₃O₄ Multicomponent Core-Shell Particles for High-Efficiency Magnetic-Field-Assisted Polishing Processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **101**, 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2015.11.004>
- [30] Kim, E., Hong, J., Hong, S., Kanade, C., Seok, H., Kim, H.-U. and Kim, T. (2021) Improvement of Oxide Removal Rate in Chemical Mechanical Polishing by Forming Oxygen Vacancy in Ceria Abrasives via Ultraviolet Irradiation. *Materials Chemistry and Physics*, **273**, Article ID: 124967. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124967>
- [31] Gao, B., Zhai, W.J., Zhai, Q. and Wang, C. (2021) Novel Photoelectrochemically Combined Mechanical Polishing Technology for Scratch-Free 4H-SiC Surface by Using CeO₂-TiO₂ Composite Photocatalysts and PS/CeO₂ Core/Shell Abrasives. *Applied Surface Science*, **570**, Article ID: 151141. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151141>