

文章编号:1673-9981(2021)04-0432-09

化学机械抛光技术研究现状及发展趋势

燕 禾¹,吴春蕾¹,唐旭福¹,段先健¹,王跃林²

1. 广州汇富研究院有限公司,广东 广州,510663;2. 湖北汇富纳米材料股份有限公司,湖北 宜昌,443007



摘要: 综述了化学机械抛光技术的发展现状. 介绍了化学机械抛光系统的组成及工作原理,着重阐述了系统各部分的构成及作用,并对化学机械抛光未来的发展趋势作了展望.

关键词: 化学机械抛光;研究现状;发展趋势

中图分类号: TN305.2

文献标识码: A

引文格式: 燕禾,吴春蕾,唐旭福,等. 化学机械抛光技术研究现状及发展趋势[J]. 材料研究与应用,2021,15(4):432-440.
YAN He, WU Chunlei, TANG Xufu, et al. The research status and development trends of chemical mechanical polishing[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(4): 432-440.

化学机械抛光(Chemical Mechanical Polishing, CMP)技术被誉为是当今时代能实现集成电路(IC)制造中晶圆表面全局平坦化的目前唯一技术,化学机械抛光的效果直接影响到芯片最终的质量和成品率. 化学机械抛光的概念由Walsh^[1]等人于1965年提出,最早是用于制造高质量的玻璃表面,如军用望远镜等. 1986年,IBM公司首次将该技术应用于金属机械抛光工艺中. 随着IC制造技术节点的不断推进及低介电常数(low- k)材料^[2-3]的引入,传统的CMP工艺由于抛光压力较高会破坏low- k 介质材料,因此CMP工艺开始朝着低压力、低磨料^[4-5]的方向发展,并成功地应用到IC制造工艺中,逐渐成长为IC制造过程中必不可少的关键技术,特别是当IC制造技术节点发展到14 nm及以下时CMP已成为实现最新的鳍式场效应晶体管(Fin FET)和硅通孔(TSV)的最核心的技术. 在技术进步的同时,CMP全球市场规模也得到了快速提升,2018年全球CMP市场约42.91亿美元,预计到2026年全球市场规模可以达到71.6亿美元. 介绍了CMP系统的组成和工作原理,对抛光设备、抛光液、抛光垫的构成及主

要作用和研究现状进行了综述,对CMP技术未来的重点发展方向进行了展望.

1 CMP系统组成和工作原理

与传统的纯机械抛光和纯化学抛光的工艺相比,CMP有效的结合了两者的优点,避免了由单纯机械抛光造成的表面损伤及单纯化学抛光造成的抛光速率低、表面平整度低和一致性差的缺点. CMP系统主要由抛光设备、抛光液和抛光垫三个部分组成,其工作原理如图1所示.

在CMP工作过程中,待抛光材料被固定在抛光头上,通过对抛光头施加一定压力使其与抛光垫充分接触,抛光头和抛光盘在电机带动下以一定速度和方向旋转,抛光液通过抛光机的加液系统以一定流量滴加到抛光垫,在离心力的作用下均匀分布到整个抛光垫上,CMP用的抛光液中的化学试剂将使被抛光基底材料氧化,生成一层较软的氧化膜层,然后再通过机械摩擦作用去除氧化膜层,这样通过反复的氧化成膜-机械去除过程,从而达到了有效抛光

收稿日期:2020-12-31

作者简介:燕禾(1992-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要研究方向为超精密加工.

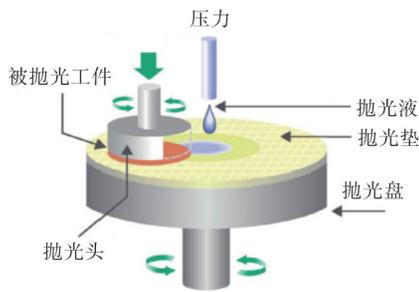


图 1 CMP工作原理示意图

Fig. 1 The operating principle diagram of CMP

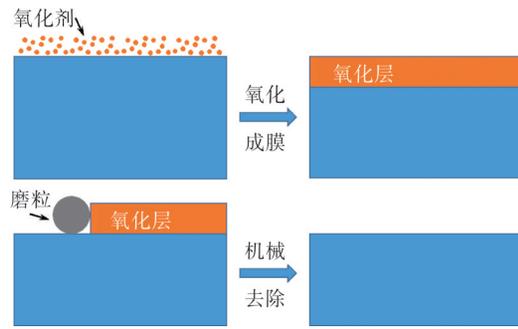


图 2 CMP反应原理示意图

Fig. 2 The reaction principle diagram of CMP

的目的,其反应原理示意图如图 2 所示. 在完成抛光过程后,由于抛光液等的残留,往往还需要对被抛光工件进行后清洗处理,最终制备出具有超精密表面的材料.

2 抛光设备

CMP 设备是一种集机械学、流体力学、材料化学、精细化工、控制软件等多领域先进技术于一体的设备,是 IC 制造设备中较为复杂和研制难度较大的设备之一^[6]. 高性能的 CMP 设备是实现高效、高精度和高表面质量的关键,也是研究 CMP 技术所必须的硬件基础^[7].

现有的 CMP 设备主要有旋转型、轨道式和直线

式三种基本类型. 旋转型抛光机具有很高的抛光线速度,可单个或者多个抛光头同时进行加工,生产效率较高,但缺点是被抛光工件上任意点的运动轨迹相对简单,抛光过程中存在不同点间抛光线速度相差较大的情况. 轨道式抛光机是在旋转式的基础上增加了抛光头的轨道运动,抛光头可以沿直线或者弧线摆动,从而解决了旋转式运动轨迹简单的缺点,更容易实现工件的表面平坦化. 直线式抛光机采用传送带式设计替代传统的抛光盘,通过电机带动抛光垫,实现了抛光头相对抛光垫的直线运动,该设计可以消除抛光平面内不同点线速度差异引起的均匀性问题,能精确控制抛光加载压力及有效的减少抛光液的使用量. 图 3 为不同类型抛光机的示意图.

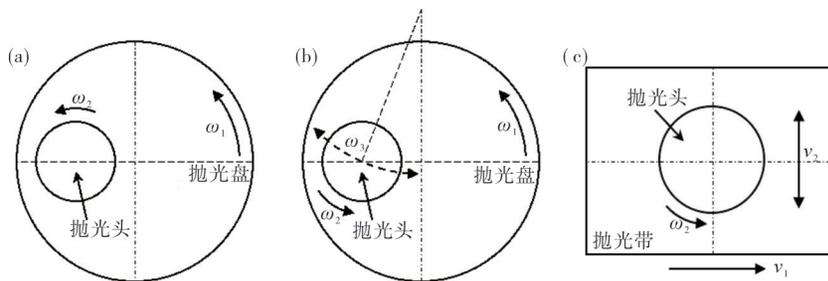


图 3 不同类型的 CMP 设备

(a) 旋转式; (b) 轨道式; (c) 直线式

Fig. 3 Different kinds of CMP equipment

(a) rotation type; (b) rail type; (c) linear type

在 CMP 设备的研发方面,国外相关机构处于大幅领先的地位,我国 90% 的高端 CMP 设备都依赖进口,全球 CMP 设备的供应商主要有 Applied Materials(美国应用材料)、Ebara Technologies(日本荏原)和 Accretech(东京精密). 国内 CMP 设备的主要研发机构有天津华海清科和中国电子科技集团

公司第四十五研究所等. 国产 CMP 设备目前主要为中低端(用于直径 200 mm 及以下晶圆)产品,这类设备的技术已比较成熟,正在逐步完成进口产品的替代化. 国产的高端(用于直径 300 mm 晶圆)的抛光 CMP 设备仍处于产品验证阶段,其市场占有率较低. 华海清科和中电 45 所自主研发的 300 mm 晶

圆抛光 CMP 设备已通过中芯国际、上海华力等企业的产品验证并相继投入使用,填补了国内高端市场的空白,为 CMP 设备国产化替代做出了重要贡献。

目前国际龙头企业已经基本停止了中低端 CMP 设备的研发生产,现主要致力于半导体芯片新制程的研究工作,5 nm 制程的半导体芯片生产线已经成功建立。随着 300 mm 晶圆的 CMP 设备技术的成熟化,450 mm 设备研发早已提上日程,然而建立 450 mm 设备生产线需要巨额的资金投入,新一代 CMP 设备的实际应用被推迟,这为缩小国内 CMP 设备技术与国外先进技术的差距提供了缓冲时间。

3 抛光液

抛光液是影响化学机械抛光质量和抛光效率的关键因素,一般通过测定材料去除率(MRR)和表面粗糙度(R_a)的方法来评价抛光液性能优良程度。抛光液的组分一般包括磨粒、氧化剂和其它添加剂。添加剂一般包括络合剂、螯合剂、缓蚀剂、表面活性剂,以及 pH 调节剂等。通常根据被抛光材料的物理化学性质及对抛光性能的要求,来选择所需

的成分配置抛光液。

3.1 磨粒

磨粒是抛光液最主要的组成部分,磨粒在抛光过程中通过微切削、微擦划、滚压等方式作用于被加工材料表面,达到机械去除材料的作用,其作用原理如图 4 所示^[8]。

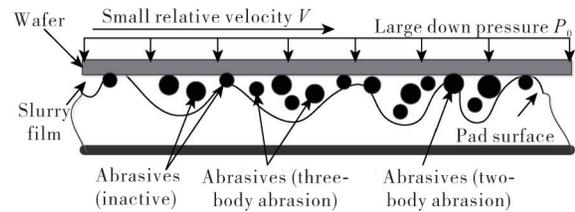


图 4 磨料机械去除原理示意图

Fig. 4 The mechanical removal principle diagram of abrasive particles

3.1.1 单一磨料抛光液

化学机械抛光液在研究初期大多是使用单一磨粒,如三氧化二铝(Al_2O_3)、二氧化硅(SiO_2)、二氧化铈(CeO_2)、二氧化锆(ZrO_2)和金刚石微粒等,其中研究及应用最多的是 Al_2O_3 、 SiO_2 和 CeO_2 这三种磨粒,三种粒子的透射电镜图如图 5 所示^[8]。

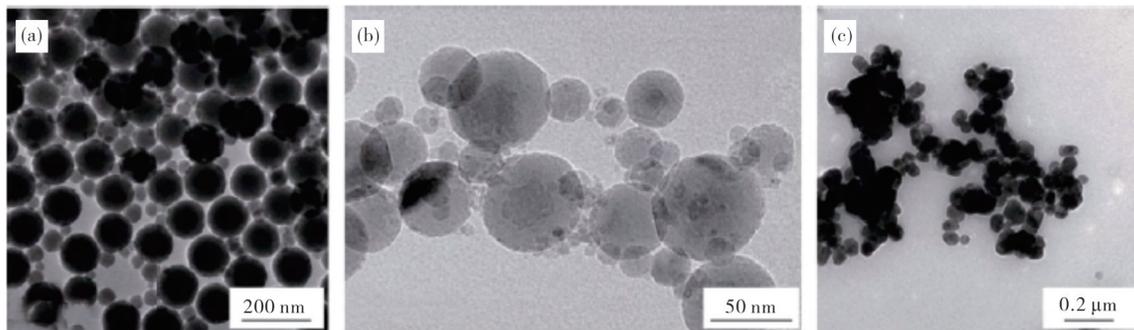


图 5 三种常用磨粒透射电镜图

(a) SiO_2 磨粒; (b) Al_2O_3 磨粒; (c) CeO_2 磨粒

Fig. 5 The TEM pictures of three types of abrasive particles

(a) SiO_2 ; (b) Al_2O_3 ; (c) CeO_2

Al_2O_3 的硬度高,多用于光学玻璃、晶体和合金材料的抛光,但含 Al_2O_3 的抛光液具有选择性低、分散稳定性不好、易团聚的问题,容易在抛光表面造成严重划伤,一般需要配合各种添加剂使用才能获得良好的抛光表面。王新泽等人^[9]研究出一种含质量

百分数为 3%、平均粒径 30 nm 的 Al_2O_3 磨料,以 1% 的 H_2O_2 及苹果酸作为添加剂的抛光液,该抛光液中苹果酸同时起到了络合剂和 pH 调节剂的作用,在经过去质子化处理后还能增强抛光液的稳定性,该抛光液用于镍金属的抛光,抛光后的镍金属表面粗

糙度能达到 0.869 nm. 宋晓岚等人^[10]将异丙醇胺作为分散剂,加入到含 6% 和粒径为 20 nm 的 γ - Al_2O_3 浆料中发现,当异丙醇胺含量为 Al_2O_3 粉体质量的 1%,且 pH 值在 4 左右时,Zeta 电位约为 40 mV,可以获得长时间稳定的浆料. 刘林林^[11]将硝酸铝加入到 Al_2O_3 抛光液中发现,硝酸铝 pH 调节的效果远优于硝酸,质量添加量 0.1%~1.0% 的条件下即可维持 pH 偏移量在 10% 以内,且反应后一段时间内 pH 能恢复至原本状态.

SiO_2 具有良好的稳定性和分散性,不会引入金属阳离子污染,其硬度与单质硅接近,对基底材料造成的刮伤、划痕较少,适合用于软金属、硅等材料的抛光,是应用最广泛的抛光液,但其材料去除率相对较低. 张楷亮^[12]研究了硅溶胶粒径大小对硅片抛光效果的影响发现:随着粒径增大 MRR 先增大后减小,而 R_a 先减小后增大. 分析认为:当粒径较小(20 nm)时,化学腐蚀起主导作用;随着粒径的增大机械作用被加强,达到一定粒径(75 nm)时化学作

用与机械作用达到平衡,此时的 MRR 及 R_a 均达到最优值;随着粒径继续增大至 100 nm 时,机械作用超过化学作用,导致材料表面出现局部划伤,降低了抛光质量. 蔡荣^[13]通过研究发现,粒径为 40 nm 左右且具有异形结构的 SiO_2 磨粒比粒径 60 nm 左右的圆形 SiO_2 磨粒表现出更高的 MRR 和更低的 R_a . 分析认为,异形结构相对球形结构在同样的加载压力下与基底的接触应力更大,异形结构与基底材料表面为双点接触,相比球形结构的单点接触起到了提高材料去除率的作用,同时较小的粒径仍能保持抛光后材料表面粗糙度较小,磨粒结构示意图如图 6 所示. 于志坚^[14]研发出一种组成非常简单的酸性铜抛光液配方,其只含有质量份数为 6% 的 20 nm 硅溶胶、6% 的过氧化氢、0.8% 的壳寡糖和去离子水,其中壳寡糖同时起到了络合剂、缓蚀剂、表面活性剂和 pH 调节剂的作用,在最优工艺条件下最终得到 $R_a=0.444$ nm 的铜表面.

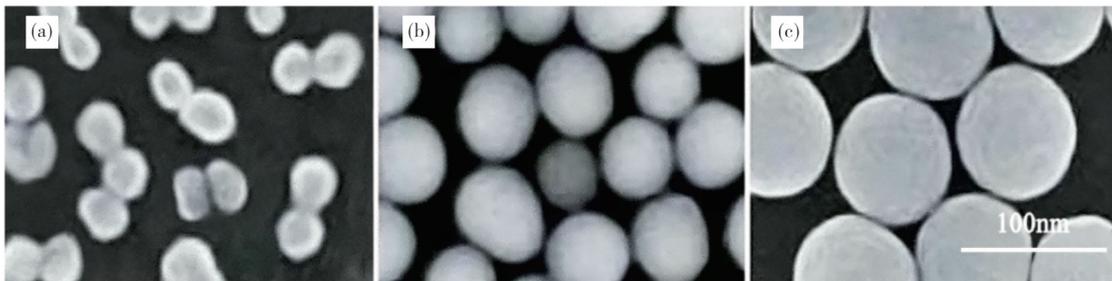


图 6 硅溶胶磨粒

(a) 40 nm, 异形结构; (b) 60 nm, 球形结构; (c) 90 nm, 球形结构

Fig. 6 Silica sol abrasive particles

(a) 40 nm, special-shaped structure; (b) 60 nm, spherical structure; (c) 90 nm, spherical structure

CeO_2 具有较为适中的硬度,由于 Ce 元素具有多种价态且不同价态间易转化,容易将玻璃表面物质氧化或络合,因此 CeO_2 被广泛应用于手机屏幕、光学玻璃、液晶显示器和硬盘等产品的化学机械抛光中. 但是 Ce 为稀土元素,且现有加工工艺较为复杂,生产出的 CeO_2 磨粒的粒径分布不均匀,而导致 CeO_2 抛光液的使用成本较高,限制了 CeO_2 抛光液的发展应用. 王婕^[15]采用液相法制备纳米 CeO_2 粉体,在不同温度(400~800 °C)下热处理 2 h 后将其分散于去离子水中,获得平均粒径在 300~600 nm 的抛光液. 同时发现:热处理的温度越低,获得的抛光液中磨粒的平均粒径越小,磨粒的分散性相对越好;

热处理温度为 400 °C 时所得抛光液平均粒径为 349 nm,粒径分布范围较宽,Zeta 电位为 -59.7 mV,抛光液较为稳定. 夏超等人^[16]发明了一种仅含 2.5% 的中位粒径为 200~300 nm 的 CeO_2 和 3% 的聚丙烯酸钠及余量为去离子水的抛光液,将其用于硅片的化学机械抛光,在 pH=10 的条件下 MRR 能达到 1100 nm/min,抛光后的硅片 R_a 在 1 nm 以下,该抛光液利用 CeO_2 中的四价 Ce 本身具有氧化性的特点,省去额外氧化剂的添加使用,可以有效的降低抛光液的成本,避免氧化剂带来的环境污染等问题. 谢圣中等人^[17]研究了 pH 值对 CeO_2 分散液稳定性的影响并发现:在 pH 小于 4 或 pH 大于 9 时,分散液的

Zeta 电位绝对值均高于 30 mV; 微量的焦磷酸钠 (SPP) 及柠檬酸 (LA) 作为添加剂, 可以显著提高分散液的 Zeta 电位绝对值 (大于 50 mV), 但 LA 由于

自身分解的原因提升效果不稳定. 图 7 为不同添加剂浓度对 CeO_2 分散液 Zeta 电位及平均粒径的影响图.

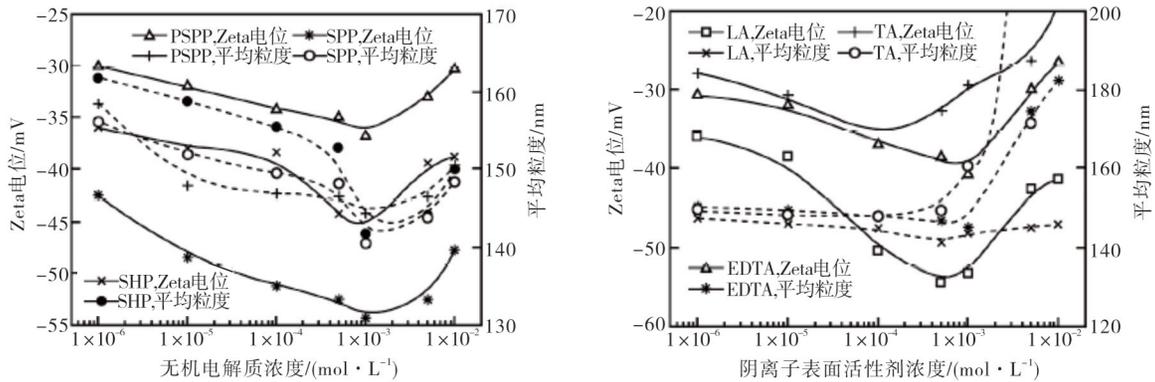


图 7 不同类型添加剂浓度对 CeO_2 分散液 Zeta 电位及平均粒径的影响

Fig. 7 Effects of different additive concentrations on Zeta potential and average particle size of CeO_2 dispersion

3.1.2 混合磨料抛光液

随着研究的深入, 单一磨粒已无法满足使用需求, 研究人员开始尝试将不同粒径、不同形貌的一种或多种粒子组合到一起使用, 获得了大量的研究成果.

汪亚军等人^[18]通过将硅酸钠缓慢滴加到氧化铝-柠檬酸悬浮液中的方法制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 混合磨粒, 研究了柠檬酸-硅酸钠含量等因素对 SiO_2 包覆 Al_2O_3 效果的影响. 然后在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 混合磨粒的基础上制备出 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ /介孔 SiO_2 混合磨粒, 用于 K9 光学玻璃的化学机械抛光时发现, 与纯 Al_2O_3 和纯 SiO_2 磨粒相比, 混合磨粒能表现出更高的 MRR 和更低的 Ra. Lee 等人^[19]将不同粒径 (30, 70 nm) 的 SiO_2 按照不同比例混合制备出碱性抛光液, 将其用于氧化硅薄膜的化学机械抛光时发现, 当质量分数比 $w(D_{30}):w(D_{70})=2:1$ 时混合磨粒的 MRR 最大. 此外, Lee 等人^[20]还将不同形貌 (球形和非球形) 的 SiO_2 混合, 用于氧化硅薄膜的化学机械抛光时发现, 以一定比例混合后的磨粒抛光速率明显优于单一 SiO_2 磨粒, 但抛光后的表面粗糙度略有下降. 汪海波等人^[21]将粒径相差较大的两种硅溶胶按照一定比例混合, 进行抛光实验时发现, 在大粒径硅溶胶中加入小粒径的硅溶胶能明显提高抛光速率, 且粒径相差越大提升率越高, 分析认为在磨粒总的质量分数不变的条件下, 增大小粒径磨粒的占比能增加硅溶胶颗粒的总体数量, 从而起到了提高抛

光速率的作用.

大量的研究成果表明, 混合粒子的使用能够不同程度的提高化学机械抛光的速率, 但是对抛光后表面粗糙度的影响有好有坏. 迄今为止, 还没有发现不同粒径、不同形貌及不同种类磨粒混合使用对抛光结果的影响规律, 针对混合磨粒的研究工作仍需要进一步推进.

3.1.3 复合磨料抛光液

随着科学技术的发展, 不同学科之间的交叉应用, 各种新兴的材料制备方法被用来制备复合磨粒, 常用的方法有纳米粒子包覆和掺杂等.

Jaehoon Ryu 等人^[22]采用快速冷却的方法, 制备出一种表面带有均匀褶皱的纳米 SiO_2 颗粒 (WSNs). 该方法能将成核阶段和生长阶段分开, 制备出的纳米粒子具有优良的分散性 (图 8), 且粒径可以根据反应时间及反应温度人为的控制, 该方法制备出的 WSNs 粒子相比同等粒径的气相 SiO_2 和硅溶胶能表现出更好的 MRR 和 Ra. 张磊等人^[23]通过在聚苯乙烯 (PS) 胶体中水解正硅酸乙酯 (TEOS) 的方法, 制备出氧化硅包覆 PS 复合磨粒 ($\text{SiO}_2@PS$), 并配置成碱性抛光液后用于铜的化学机械抛光. 与大粒径的硅溶胶相比, 在抛光液其它组分和工艺参数相同的情况下, $\text{SiO}_2@PS$ 对铜的抛光速率略高于硅溶胶, $\text{SiO}_2@PS$ 抛光后铜表面 RMS 值为 0.58 nm, 而硅溶胶抛光后铜表面 RMS 值为 1.95 nm, 抛光效果提升显著.

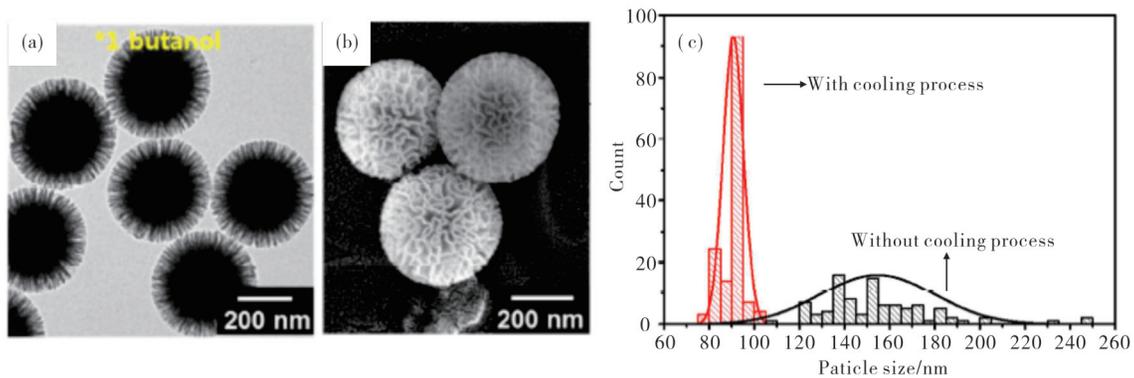


图 8 WSNs 的 TEM 图(a)和 SEM 图(b)及不同方法制备出的粒子粒径分布图(c)

Fig. 8 The TEM picture (a) and SEM picture (b) of WSNs, and particle size distribution graph (c) prepared by different methods

复合磨粒相比混合磨粒和单一磨粒,在材料去除率及表面粗糙度方面均有明显的优势,能实现纳米级或亚纳米级超低损伤的表面形貌。但复合磨粒的制备工艺相对比较复杂,目前仅处于实验室探索阶段,距离复合磨粒在大规模生产上的应用还有较远的距离。

3.2 氧化剂

在化学机械抛光过程中,氧化剂的作用是将被抛光工件表面的材料氧化,生成一层质地较软且与基底结合力较弱的氧化膜,然后通过磨粒的机械去除作用将氧化膜层去除,以达到抛光的目的。氧化剂的种类决定了氧化膜生成的速率及氧化膜去除的难易程度,对抛光速率以及抛光效果有显著的影响。

朱玉广等人^[24]研究碱性抛光液中 H_2O_2 浓度对铝合金 CMP 效果的影响时发现:当 H_2O_2 浓度较低时,随着浓度的升高铝合金表面生成 Al_2O_3 和 $Al(OH)_3$ 膜层,其中 $-OH$ 可以溶解 $Al(OH)_3$ 膜层,使得 Al_2O_3 膜层变得疏松多孔,有利于磨粒的机械去除过程;随着 H_2O_2 浓度继续升高,生成的 Al_2O_3 膜层变得致密且厚度增大,形成了钝化层,而磨料的机械去除作用难以除去钝化层,导致了 MRR 减小和 R_a 增大。张金等人^[25]的研究成果表明:氧化剂浓度较低时,机械研磨过程起主导作用;当氧化剂浓度达到一定值时,氧化腐蚀过程与机械研磨过程达到动态平衡,此时的 MRR 达到最大值;随着氧化剂浓度继续增加,一方面是氧化膜生成速率大于去除速率,氧化膜层朝着致密化和厚度增大的方向发展,另一方面多余的氧化剂也会降低抛光液的稳定性,这些因素

都导致了 MRR 减小。倪自丰等人^[26]研究了不同 pH 值及不同氧化剂对 SiO_2 磨粒抛光 SiC 晶片的影响结果时发现: $KMnO_4$ 作为氧化剂时,抛光液在弱酸性($pH=6$)条件下 MRR 达到最大值; H_2O_2 作为氧化剂时,抛光液在弱碱性($pH=8$)条件下 MRR 达到最大值。董柏先^[27]研究了多种氧化剂对 CVD 金刚石膜化学机械抛光的影响时发现,含有高锰酸钾、重铬酸钾和高铁酸钾等氧化剂的抛光液,其表现出更高的材料去除率。

针对不锈钢、铜及铜合金、钛合金等金属材料的化学机械抛光,初期研究阶段抛光液中大多采用具有强氧化性的氧化剂,一般都包括重金属离子,对实验人员及当地环境有危害作用。随着当今社会环保意识的逐步提高,开发新型绿色环保抛光液是必然的趋势。 H_2O_2 作为一种绿色环保的氧化剂已经被广泛采纳,但是 H_2O_2 仅在强酸性体系中稳定性较好,碱性体系中稳定性较差,且自身有自分解现象,导致了含 H_2O_2 的碱性抛光液不能长时间稳定存在。因此,采取合适的方法提高 H_2O_2 在碱性体系中的稳定性是目前亟待解决的问题。

3.3 其它添加剂

抛光液中磨粒、氧化剂和去离子水的含量一般占整个抛光液质量的 99% 以上,虽然添加剂含量较少,但是能显著的改善抛光液的性能。常用的添加剂包括络合剂(螯合剂)、缓蚀剂、pH 调节剂和表面活性剂。

刘苹^[28]研究了乙二胺四乙酸(EDTA)、三乙醇胺、乙胺、乙二胺、尿素、羟基亚乙基二膦酸

(HEDP)、氨基三甲叉磷酸(ATMP)、二乙三胺五乙酸这八种络合剂对金属铜化学机械抛光的影响结果发现,只有乙二胺可得到较高的MRR. 河北工业大学微电子研究所^[29-33]自主研发的FA/O系列整合剂已完成工业化生产,FA/O整合剂属于多羟基多胺

基大分子化合物,具有4个胺基、16个羟基和13个以上的螯合环,对 Cu^{2+} 等金属离子及CMP过程中产生的微溶性氧化产物具有优良的螯合效果,可以有效提高MRR,其分子结构如图9所示.

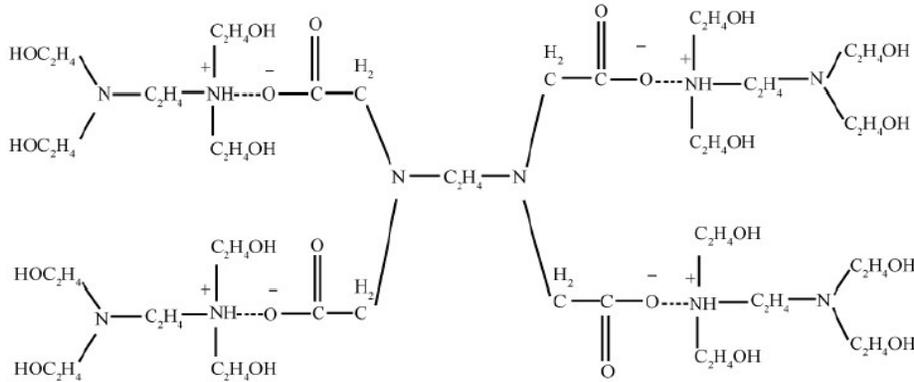


图9 FA/O II型大分子螯合剂结构示意图

Fig. 9 Structural representation of FA/O II macromolecular chelating agent

苯丙三氮唑(BTA)是铜化学机械抛光工艺中最常用的缓蚀剂之一. Byoung-Jun Cho等人^[34]研究了BTA在铜化学机械抛光过程中的作用机制,发现pH值在4~10的范围内铜表面会形成稳定的Cu-BTA络合物. 栾晓东^[35]研究发现,BTA可以大幅减缓铜抛光过程中的腐蚀现象,但在铜表面形成的Cu-BTA膜需要较大的机械力才能去除,导致了铜的CMP后清洗较为困难,不利于后续工艺. Zhou等人^[36]发现,肌氨酸能与 Cu^{2+} 形成水溶性的复合物,部分吸附在铜的表面,肌氨酸与甘氨酸搭配使用时可作为缓蚀剂有效减少铜的表面腐蚀程度,与BTA相比Cu-肌氨酸复合物更容易在铜CMP后清洗工艺中被去除.

抛光液分为酸性和碱性两类. 酸性抛光液最早由化学腐蚀液改进而来,具有溶解性强、氧化剂选择范围大、抛光效率高等优点,常用于金属材料的CMP工艺. 碱性抛光液具有选择性高、腐蚀性弱等优点,常用于非金属材料的CMP工艺. 抛光液的酸碱度由pH调节剂来进行调节,传统的pH调节剂一般选择KOH, NaOH和HCl, HNO_3 等,但其中的 Na^+ , K^+ , Cl^- 及 NO_3^- 会造成芯片性能下降^[37],甚至失效等问题. 因此,越来越多的研究者选择有机酸或有机碱来作为pH调节剂. Yao等人^[38]选择四乙基氢氧化铵(TEAH)替代KOH作为弱碱性铜抛光

液的pH调节剂,发现TEAH能有效提高抛光液的稳定性. 杨金波等人^[39]研究了有机和无机pH调节剂对硅片CMP的影响,发现相同pH条件下,采用有机碱作为调节剂时的抛光速率要明显高于无机碱作为调节剂时的抛光速率.

表面活性剂的作用是改善抛光液的分散稳定性,还可以起到降低抛光液表面张力的作用,有利于抛光液快速润湿被抛光的工件表面及CMP工艺抛光后清洗流程的进行. 李炎等人^[40]发现,多元胺醇型非离子表面活性剂能大幅降低抛光液的表面张力,同时也会小幅降低抛光液的黏度,通过控制该类活性剂的添加量可以在不影响抛光速率的条件下有效的避免磨粒导致的划伤,降低表面粗糙度. Xu等人^[41]向含有BTA的铜抛光液中加入脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO),发现AEO可以吸附在磨粒和铜的表面,减少了磨粒对铜表面的划伤,提高了抛光选择性,对提高抛光后铜表面的均匀性和提高表面质量有促进作用.

抛光液作为CMP工艺中最为重要的一个部分,对IC制造业的发展至关重要,现有的抛光液研究方向已经在朝着弱碱性、绿色环保、一剂多用以及复配协同^[42]等方向发展,研发出一种对设备、人员、环境友好,成分较为简单、容易维护,抛光效率与质量良好的抛光液是今后科研工作者的努力方向.

4 抛光垫

在化学机械抛光过程中,抛光垫的作用主要有:存储抛光液及输送抛光液至抛光区域,使抛光持续均匀的进行;传递材料,去除所需的机械载荷;将抛光过程中产生的副产物(氧化产物、抛光碎屑等)带出抛光区域;形成一定厚度的抛光液层,提供抛光过程中化学反应和机械去除发生的场所。

抛光垫的合理选择对于控制和优化CMP过程有重要作用,抛光垫根据材料可以分为硬质和软质两类^[43]。硬质抛光垫可以较好的保证工件表面的平面度,软质抛光垫可以获得表面损伤层薄和表面粗糙度低的抛光表面。常用的硬质抛光垫有粗布垫、纤维织物垫、聚乙烯垫等,软质抛光垫有聚氨酯垫、细毛毡垫、绒毛布垫等。抛光垫在使用前的微观表面是相当不平整的,表面分布大量的不规则微孔,随着CMP过程的进行,抛光垫的物理及化学性能会发生变化,具体包括表面残留物质、微孔体积缩小和数量减少、表面粗糙度降低及表面分子重组而形成釉化层^[44],这些都会导致抛光效率和抛光质量的降低。因此,抛光垫每经过一段时间的使用后都需要进行修整,以恢复抛光垫原有的性能。改进抛光垫材料、延长抛光垫的使用寿命、减少抛光垫修整加工时的损耗,是当前抛光垫研究的主要内容及方向。

5 结语

介绍了化学机械抛光(CMP)技术的研究现状,并对CMP工艺中各重要组成部分的作用原理和发展趋势作了展望。CMP作为大尺寸晶圆表面全局平坦化的不可取代关键技术,是实现21世纪IC制造业技术革新的关键点之一。我国半导体行业起步较晚,在国家政策的扶持下CMP中低端领域中已基本完成了国外技术和产品的国产替代,但在高端设备、前沿技术领域与国际巨头仍有较大的差距。继续深入研究CMP技术,产出带有自主知识产权的关键材料、设备或工艺,不仅可以促进我国IC制造业的良性发展,同时也能带来巨额的经济效益。

参考文献:

[1] HERZOG A H, WALSH R J. Process for polishing

semiconductor materials[C]. In: 1965.

- [2] 孙鸣,刘玉岭,刘博,等.低k介质与铜互连集成工艺[J].微纳电子技术,2006,43(10):464-469.
- [3] 苏祥林,吴振宇,汪家友,等.低k层间介质研究进展[J].微纳电子技术,2005,42(10):463-468.
- [4] 何彦刚,王家喜,甘小伟,等.低压下极大规模集成电路碱性铜化学机械抛光液的研究[J].河北工业大学学报,2011,40(3):10-14.
- [5] 刘效岩,刘玉岭,梁艳,等.铜互连线低压无磨料化学机械平坦化技术[J].稀有金属材料与工程,2012,41(4):717-721.
- [6] 李丹.化学机械抛光(CMP)设备市场概况[J].电子产品世界,2019,26(5):11-13.
- [7] 李丹.化学机械抛光(CMP)技术、设备及投资概况[J].电子产品世界,2019,26(6):31-34.
- [8] 孟凡宁,张振宇,郜培丽,等.化学机械抛光液的研究进展[J].表面技术,2019;48(7):1-10.
- [9] 王新泽.纯镍及镍合金化学机械抛光研究[D].大连理工大学,2019.
- [10] 宋晓岚,王海波,曲鹏,等.水相体系纳米 γ - Al_2O_3 浆料的分散稳定性研究[J].材料科学与工艺,2005,(5):60-62.
- [11] 刘林林.酸性氧化铝纳米颗粒的稳定性研究及在化学机械抛光中的应用[D].青岛:山东大学,2018.
- [12] 张楷亮.CMP纳米抛光液及抛光工艺相关技术研究[D].上海:中国科学院研究生院(上海微系统与信息技术研究所),2006.
- [13] 蔡荣.纯铅的化学机械抛光[D].重庆:西南科技大学,2020.
- [14] 于志坚.铜的化学机械抛光液研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [15] 王婕.金属钎的化学机械抛光研究[D].合肥:安徽工业大学,2013.
- [16] 夏超.纳米氧化铈抛光液的制备与性能研究[D].北京:中国石油大学(北京),2016.
- [17] 谢圣中,胡卓民,黄健,等.碱性水介质中纳米氧化铈的稳定分散研究[J].矿冶工程,2019,39(3):132-135.
- [18] 汪亚军.氧化铝/二氧化硅复合磨料的制备及其CMP性能研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [19] LEE H, JEONG H. Analysis of removal mechanism on oxide CMP using mixed abrasive slurry [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2015, 16(3):603-607.
- [20] LEE H, LEE D, KIM M, et al. Effect of mixing ratio of non-spherical particles in colloidal silica slurry on oxide CMP [J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2017, 18(10):1333-1338.

- [21] 汪海波, 杨金, 鲁世斌, 等. 磨料混合对蓝宝石抛光效果的影响[J]. 润滑与密封, 2018, 43(6):43-48.
- [22] RYU J, KIM W, YUN J, et al. Fabrication of uniform wrinkled silica nanoparticles and their application to abrasives in chemical mechanical planarization[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 7b15952.
- [23] 张磊, 汪海波, 张泽芳, 等. 一种新型复合磨料对铜的化学机械抛光研究[J]. 功能材料与器件学报, 2011, 17(5):520-525.
- [24] 朱玉广, 王永光, 钮市伟, 等. 低压力下环保型络合剂和氧化剂对铝合金化学机械抛光的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2020, 40(1):74-78.
- [25] 张金, 刘玉岭, 闫辰奇. 氧化剂对铝栅化学机械抛光的影响[J]. 电镀与精饰, 2020, 42(1):18-21.
- [26] 倪自丰, 陈国美, 徐来军, 等. 不同氧化剂对6H-SiC化学机械抛光的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(19):224-231.
- [27] 董伯先. CVD金刚石膜化学机械抛光液的研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [28] 刘苹. 碱性抛光液对铜平坦化的影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [29] 高娇娇. 65纳米以下IC碱性阻挡层CMP材料与工艺的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2016.
- [30] 洪姣. GLSI多层铜布线低磨料碱性阻挡层CMP材料与工艺的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [31] 闫辰奇. GLSI多层铜布线平坦化技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [32] 陈国栋. GLSI多层铜布线碱性抛光液稳定性的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [33] 张玉峰. GLSI多层铜布线阻挡层CMP及其后清洗表面粗糙度的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [34] CHO B J, PARK J G, SHIMA S, et al. Investigation of Cu-BTA complex formation and removal on various Cu surface conditions[C]. In: *International Conference on Planarization/CMP Technology*, 2017.
- [35] 栾晓东. 以化学作用为主的碱性抛光液对GLSI多层铜布线平坦化的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- [36] ZHOU J, NIU X, YANG C, et al. Surface action mechanism and planarization effect of sarcosine as an auxiliary complexing agent in copper film chemical mechanical polishing [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 529:147109.
- [37] 廉进卫, 张大全, 高立新. 化学机械抛光液的研究进展[J]. 化学世界, 2006(9):565-567.
- [38] YAO C, NIU X, WANG C, et al. Study on the weakly alkaline slurry of copper chemical mechanical planarization for GLSI[J]. *ECS Journal of Solid State Science & Technology*, 2017, 6(8):P499-P506.
- [39] 杨金波, 刘玉岭, 刘效岩, 等. pH值调节剂对Si片CMP速率的影响[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(10):643-646.
- [40] 李炎, 刘玉岭, 李洪波, 等. 新型表面活性剂对低磨料铜化学机械抛光液性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(8):325-329.
- [41] XU Q, YANG F, CHEN L, et al. Effect of non-ionic surfactant on chemical mechanical planarization performance in alkaline copper slurry [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2018, 19(11):1585-1595.
- [42] 周佳凯, 牛新环, 杨程辉, 等. 用于铜互连CMP工艺的抛光液研究进展及发展趋势[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(9):12-18.
- [43] 魏昕, 熊伟, 黄蕊慰, 等. 化学机械抛光中抛光垫的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2004, (5):40-43.
- [44] 胡伟, 魏昕, 谢小柱, 等. 化学机械抛光中抛光垫修整的作用及规律研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007, (5):58-63.

The research status and development trends of chemical mechanical polishing

YAN He¹, WU Chunlei¹, TANG Xufu¹, DUAN Xianjian¹, WANG Yuelin²

1. *Guangzhou Huifu Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China*; 2. *Hubei Huifu nanomaterial Co., Ltd., Yichang 443007, China*

Abstract: The current development status of Chemical Mechanical Polishing (CMP) technology was reviewed in this paper. The principle of each important part of CMP was emphatically introduced, and the future development trend of CMP was also prospected.

Key words: CMP; research status; development trends