

Date: 2025.11.17

作者：上海奥法美嘉科技有限公司微纳米应用工程中心

SPOS 单颗粒技术在优化蓝宝石晶圆 CMP 工艺中硅溶胶磨料粒度分析的应用

摘要：在蓝宝石晶圆的化学机械抛光（CMP）工艺里，硅溶胶磨料是影响抛光质量与效率的关键要素，其颗粒粒度极大影响了晶圆的品质与性能，尤其是少数大粒子（LPC）更是关键影响因素。SPOS 单颗粒光学技术能全面精确检测不同粒径范围的粒子，优化硅溶胶磨料粒度分析，提升蓝宝石晶圆 CMP 加工质量与效率，提高良品率。

关键词：蓝宝石精加工；CMP；硅溶胶磨料；粒度；SPOS

一、蓝宝石晶圆 CMP 工艺基础

在半导体产业持续演进的进程中，蓝宝石晶圆凭借其卓越的物理与化学属性，诸如高硬度、高热导率、出色的化学稳定性以及良好的光学透过性等，在众多关键领域占据了不可或缺的地位。蓝宝石晶圆主要加工工艺流程如图1所示，其中化学机械抛光（CMP）是实现蓝宝石表面全局平坦化的主要且唯一的加工方式。

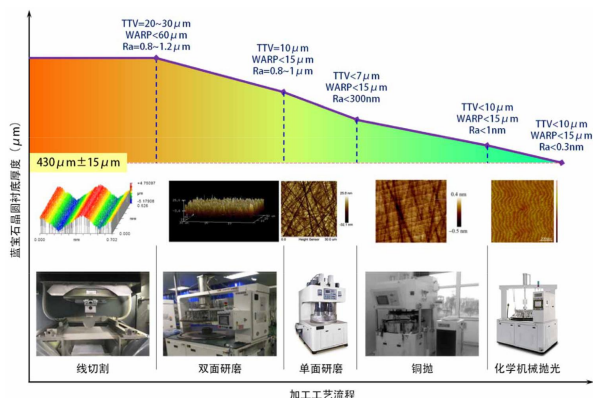


图1 蓝宝石晶圆主要加工工艺流程^[1]

1.1 蓝宝石 CMP 工艺

CMP（化学机械抛光）将化学腐蚀与机械研磨结合起来，化学腐蚀利用化学反应溶解材料表面的原子，实现微观层面的平整化；机械研磨则通过研磨头与磨料对材料表面进行物理磨削，去除表面的凸起和缺陷，二者协同作用，让材料表面达到极高的平整度和光洁度。

1.2 蓝宝石 CMP 关键材料——硅溶胶研磨液

在蓝宝石晶圆的 CMP 工艺中，硅溶胶磨料扮演着不可或缺的关键角色，其性能和特性直接决定了抛光过程的效率、质量以及最

终的产品性能。硅溶胶研磨液一般由硅溶胶磨料、溶剂、pH 调节剂、表面活性剂、分散稳定剂、其他添加剂等组成，其中硅溶胶磨料作为研磨液的核心部分，其粒径大小、浓度及纯度，直接关乎研磨的速率与精度。

1.3 硅溶胶研磨液粒度控制点

硅溶胶研磨液的平均粒径和 LPC（尾端大颗粒）是粒度控制的关键点。

一般来说，较小粒径的硅溶胶磨料适用于精抛阶段，能够实现更高的表面质量和更低的粗糙度；而较大粒径的磨料则在粗抛阶段具有更高的材料去除速率。磨料浓度过高可能会引起磨粒的团聚现象，降低抛光的均匀性；而浓度过低则会导致材料去除速率过慢，影响生产效率。

在硅溶胶研磨液的粒度控制中，平均粒径和 LPC（尾端大颗粒浓度）是两个至关重要的指标。平均粒径是决定研磨液适用于粗抛还是精抛的关键因素，只有符合特定粒径范围的颗粒，才能在 CMP（化学机械抛光）过程中发挥有效的研磨作用。而 LPC 指标则专注于控制大颗粒的数量。这些偏离主体粒径分布的大颗粒，在抛光过程中极易划伤晶圆，引发缺陷，从而显著降低产品的良品率。这些缺陷不仅影响器件的电性能，还会在后续的工艺步骤中引发更多问题。研磨液中的大颗粒还会影响 CMP 过程中的抛光速率和均匀性；大颗粒在抛光过程中会导致局部压力增大，使得抛光速率不均匀，从而影响整个晶圆表面的抛光均匀性。并且研磨液中的大颗粒容易在抛光过程中对抛光垫造成损伤，增加设备的维护和更换成本，还可能导致研

磨液供给系统的堵塞，影响工艺的连续性和稳定性。

二、常见磨料粒度分析方法

2.1 激光衍射法

激光衍射法基于光的衍射现象，颗粒样品以合适的浓度分散于适宜的液体或气体中，使其通过单色光束（通常是激光），当光遇到颗粒后以不同角度散射，由多元探测器测量散射光，存储这些与散射图样有关的数值随后的分析。通过适当的光学模型和数学过程，转换这些量化的散射数据，得到一系列离散的粒径段上的颗粒体积相对于颗粒总体积的百分比，从而得出颗粒粒度体积分布。

激光衍射法分辨率低、灵敏度低；一般适用于微米级到毫米级的颗粒测量，对于纳米级的微小颗粒，由于其散射光信号较弱，测量精度会受到影响。

2.2 动态光散射法

动态光散射法（DLS）是依据颗粒在作布朗运动时，散射光的总光强会产生波动、散射光频率产生频移的原理，从而通过测量散射光强度函数随时间的衰减程度，利用斯托克斯-爱因斯坦关系来分析得到颗粒的流体动力学尺寸及其分布信息。采取动态光散射法测量可将粒子直径的检测范围延伸到纳米级或亚纳米数量级。

动态光散射法在测量多分散体系时存在较大的局限性。多分散体系中包含了多种不同粒径的颗粒，这些颗粒的散射光信号相互

叠加，使得测量结果难以准确反映各粒径组分的真实情况。

LPC 往往以极低浓度存在于样品中，检测时极易因含量稀少而被忽略。无论是静态光散射还是动态光散射，其无法对体系中的颗粒进行一颗颗计数，也就意味着，其对体系中的少量大颗粒不敏感，从而导致检测结果的准确性大打折扣。

2.3 透射电子显微镜法

透射电子显微镜法（TEM）是一种能够直接观察到硅溶胶磨料颗粒微观形貌和粒径大小的分析方法，其原理基于电子束与样品的相互作用。在 TEM 中，由电子枪发射出的高能电子束，在高真空环境下经过聚光镜的会聚作用，形成一束高度聚焦的电子束，照射到非常薄的硅溶胶磨料样品上，与样品原子作用产生散射、吸收，透过样品的电子束强度改变，经多级电磁透镜放大，在荧光屏或探测器形成高分辨率图像。

透射电子显微镜法只能对少量样品进行观测，且观测区域有限，无法全面反映整个样品的粒度分布情况，存在一定的抽样误差。

三、SPOS 单颗粒技术

3.1 SPOS 技术

SPOS 单颗粒技术将光阻法与光散法结合起来，通过光消减获得较大的动态粒径范围，能够检测从亚微米到数百微米的粒子；通过光散射增加对小粒子的灵敏度，实现了不同粒径范围粒子的全面、精确检测，原

理如图 2 所示。可以检测 0.5-400um 的粒子，在注射液、研磨液、乳剂方面都有广泛应用。

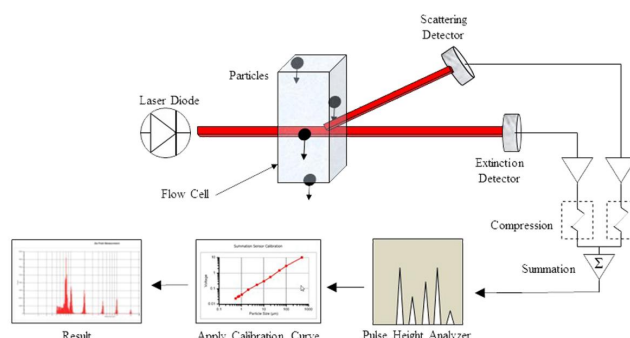


图 2 SPOS 原理图

在实际应用中，当对硅溶胶磨料进行粒度分析时，SPOS 技术能够同时利用光阻和光散射原理，对磨料中的各种粒径的颗粒进行逐一检测和计数，从而构建出真实、准确的粒径分布图谱。

3.2 SPOS 技术优势

3.2.1 识别尾端大粒子

在许多实际应用中，尤其是在半导体制造等对材料质量要求极高的领域，少量的大颗粒（即尾端大粒子）可能会对产品的性能和质量产生严重的影响。但这些大颗粒的浓度极低，在检测时容易被忽视，或与背景噪音混淆。SPOS 技术具有高灵敏度，能够区分并精确计数少量大颗粒。同时，搭配自动稀释系统及强大的信号处理模块，具有高的计数效率，可以快速统计几十万颗粒子，具有统计学意义。AccuSizer 颗粒计数器系列具有 1024 个数据通道，对颗粒计数器而言，数据通道是指在检测量程范围内，按照粒径大小划分的精细程度。通道数越高，则划分的越精细，展现出来更加真实的颗粒分布情况。

3.2.2 适用高浓度样品

Slurry 的浓度通常非常高,这导致颗粒之间的相互干扰增加,影响测量的准确性。此外,高浓度还可能导致颗粒在测量过程中发生聚集,进一步影响检测结果。对于 SPOS 单颗粒传感技术而言,其宗旨是确保颗粒一颗颗进行计数,从而确保其分辨率和准确性。对于高浓度的 CMP slurry 而言,其在经过 SPOS 传感器时也要确保颗粒浓度在合适范围,避免将多个颗粒当成一个颗粒进行计数。

美国 PSS 粒度仪(现归属于 Entegris 公司)专为其 AccuSizer 颗粒计数器系列开发出两套自动稀释系统,分别是自动稀释系统和二步稀释系统。该系统可将超高浓度样品稀释至目标浓度,减少人工稀释的误差和时间成本。将样品自动稀释后,保证粒子“单个”通过传感器,开始采集数据。系统根据稀释因子自动还原样品的原始颗粒浓度,解决了高浓度样品的检测难题。

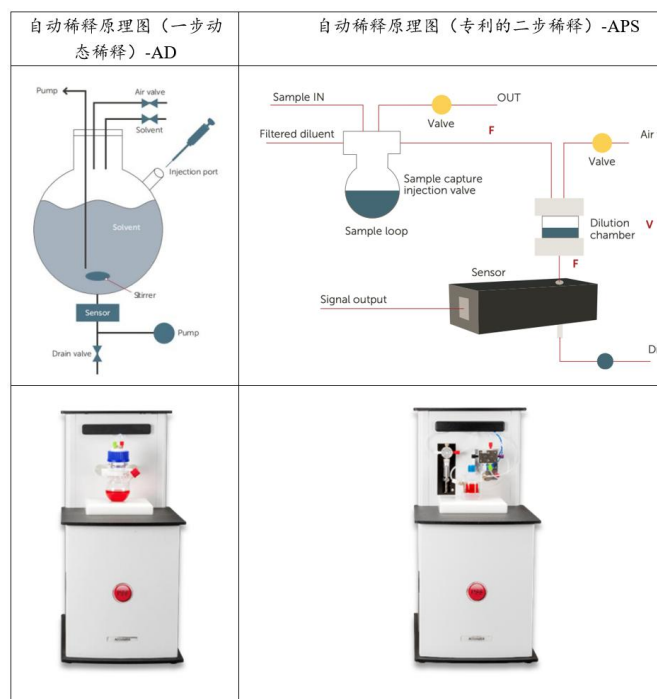


图 3 AccuSizer 系列稀释原理图与设备图

3.2.3 适用更低检测下限——从 150nm 开始计数

针对粒径更小的颗粒,PSS 采用光学聚焦技术,对纳米级别的微粒进行颗粒计数,可实现 150nm 开始计数,加载自动稀释模块,对极高浓度样本进行检测,在半导体研磨液中大量采用。

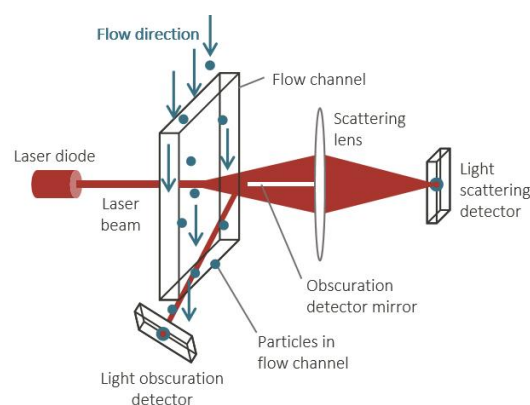


图 4 聚焦光束纳米技术原理图

3.2.4 粒径分布和颗粒浓度

SPOS 技术能够对单个粒子进行逐一检测,直接获取每个粒子的真实粒径和数量信息。通过对大量粒子的检测和统计分析,能够精确地计算出粒子的浓度和粒度分布,为研究人员提供更为准确和详细的数据。在对硅溶胶磨料进行粒度分析时,SPOS 技术可以准确地测量出不同粒径的二氧化硅颗粒的浓度,以及它们在整个磨料体系中的占比,这对于优化 CMP 工艺参数、提高抛光质量具有重要的指导意义。**总结 SPOS 技术对优化粒度分析的重要意义**

通过 SPOS 技术,能够实现对硅溶胶磨料粒度的精确控制,确保了磨料在抛光过程中的均匀性和稳定性。这使得磨料能够在蓝宝石

石晶圆表面进行均匀的磨削，有效填平表面的微小起伏和沟槽，从而实现了更高的表面平整度。

4.2 提高良品率

通过精确了解硅溶胶磨料的粒径分布，企业可以合理调整抛光压力、转速、抛光液流量等参数，使这些参数与硅溶胶磨料的特性相匹配，从而实现最佳的抛光效果。在确定硅溶胶磨料的粒径后，可以根据粒径大小调整抛光压力，确保磨料能够有效地去除蓝宝石晶圆表面的材料，同时避免过度磨削导致表面损伤。通过优化工艺参数，能够显著缩短抛光时间，提高生产效率及良品率。

4.3 降低生产成本

在半导体制造行业，成本控制是企业生存和发展的关键因素之一。在传统的 CMP 工艺中，由于抛光质量不稳定，可能会导致部分蓝宝石晶圆因表面质量不合格而报废，造成材料的浪费。而 SPOS 技术通过精确控制硅溶胶磨料粒度，有效提高了抛光质量，降低了废品率。这使得企业可以充分利用每一块蓝宝石晶圆，减少了材料的浪费，降低了生产成本。

在 CMP（化学机械抛光）浆料的制备以及 CMP 工艺中，粒度控制始终是至关重要的环节。粒度分布的均匀性以及颗粒浓度的高低，直接关系到 CMP 工艺的效率 and 良品率。以下是 CMP 浆料的关键关注点总结，如图所

示

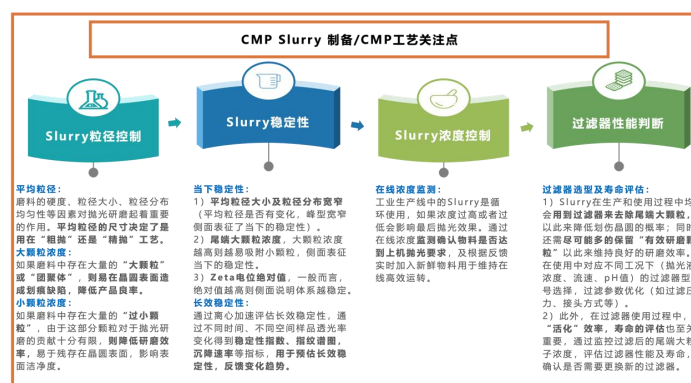


图 5. CMP 浆料的关键关注点总结

四、总结

SPOS 单颗粒技术为优化蓝宝石晶圆 CMP 工艺提供了有力的支持。通过精确控制硅溶胶磨料的粒度，显著提升了抛光质量，减少了表面划痕和缺陷的产生，提高了表面平整度和光洁度。基于 SPOS 技术提供的准确粒度信息，能够更加科学地优化 CMP 工艺参数，缩短抛光时间，提高生产效率。SPOS 技术还有助于降低生产成本，减少材料浪费和设备损耗。

参考文献：

- [1] 李重阳. 蓝宝石双面化学机械抛光加工机理与关键技术研究 [D/OL]. 湖南科技大学, [2025][2025-02-24].
<https://doi.org/10.27738/d.cnki.ghnkd.2023.000017>.