

# T/CMEEEA

团 体 标 准

T/CMEEEA XXXX—2026

## 晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR） 关联性测试方法

Test method for correlating wafer surface roughness with material removal  
rate (MRR)

（征求意见稿）

2026 - XX - XX 发布

2026 - XX - XX 实施

中国机电设备工程协会 发布

## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 原理 .....	1
5 测试条件 .....	2
6 试剂或材料 .....	2
7 仪器设备 .....	3
8 样品 .....	3
8.1 样品准备 .....	3
8.2 样品保存 .....	3
9 测试方法 .....	3
10 实验数据处理 .....	4
10.1 数据记录 .....	4
10.2 数据处理方法 .....	4
10.3 重复性与再现性评估 .....	4
10.4 数据审核与异常处理 .....	4
10.5 测试结果 .....	5
11 质量保证和控制 .....	5
11.1 仪器设备校准 .....	5
11.2 环境监测 .....	5
11.3 样品检查 .....	5
11.4 人员保证 .....	5
12 测试报告 .....	5

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由吉姆西半导体科技（无锡）股份有限公司提出。

本文件由中国机电设备工程协会归口。

本文件起草单位：吉姆西半导体科技（无锡）股份有限公司、北京中研华采技术服务有限公司、北京六只猫创意科技有限公司、北京彬诚科技有限公司、北京骏宇汽车科技有限公司。

本文件主要起草人：戈凤妍、乐志斌、夏卫彬、杨笛、朱军。

# 晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试方法

## 1 范围

本文件规定了晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试的原理、测试条件、试剂或材料、仪器设备、样品、测试方法、实验数据处理、质量保证和控制以及测试报告等内容。

本文件适用于集成电路制造中，晶圆表面粗糙度与材料去除率关联性的定量测试与评价。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1031 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值

GB/T 6462 金属和氧化物覆盖层 厚度测量 显微镜法

GB/T 32189 氮化镓单晶衬底表面粗糙度的原子力显微镜检验法

JB/T 10796 电子颗粒计数机

JJG 1036 电子天平检定规程

SJ 21127 化学机械抛光机通用规范

GB/T 25915.1 洁净室及相关受控环境 第1部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级

## 3 术语和定义

下列界定的术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**表面粗糙度** surface roughness

指加工表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度，其两波峰或两波谷之间的距离（波距）很小（通常 $\leq 2$  mm）。

### 3.2

**材料去除率** material removal rate (MRR)

单位时间内通过化学机械抛光工艺从晶圆表面去除的材料厚度，单位为nm/min。

### 3.3

**普雷斯顿方程** preston equation

描述MRR与抛光压力、相对速度关系的经验公式：

$$R = k \cdot p \cdot v \cdots \cdots (1)$$

式中：

$K_p$  —— 普雷斯顿系数，单位为 $\mu\text{m}/(\text{min} \cdot \text{kPa} \cdot \text{mm}/\text{s})$ ；

$P$  —— 抛光压力，单位为kPa；

$V$  —— 相对速度，单位为mm/s。

## 4 原理

在化学机械抛光（CMP）或其他材料去除工艺中，晶圆表面粗糙度（Ra）与材料去除率（MRR）之间存在非线性关联关系。该关系受工艺参数（如压力、转速、抛光液成分、pH值、温度等）影响显著。

基于普雷斯顿方程扩展模型，并结合表面形貌演化理论，建立如下拟合模型：

$$MRR = K \cdot P^a \cdot v^b \cdot f(Ra) \dots \dots \dots (2)$$

式中：

K：工艺常数，与抛光液类型、晶圆材质相关；

P：下压力，单位为kPa；

v：相对速度，单位为m/s；

a, b：经验指数；

f(Ra)：表面粗糙度修正函数。

实验数据表明，在稳态抛光阶段，Ra与MRR存在负相关趋势。通过实验拟合，采用公式（3）描述二者关系：

$$Ra = A \cdot e^{-B \cdot MRR} + C \dots \dots \dots (3)$$

式中：

A：初始粗糙度贡献系数（nm）；

B：衰减系数（min/nm）；

C：极限粗糙度（nm），反映工艺能达到的最低 Ra。

典型拟合参数参考值见表1。

表1 不同晶圆材料 Ra-MRR 拟合参数参考值

晶圆材料	A (nm)	B (min/nm)	C (nm)	适用 MRR 范围 (nm/min)
单晶硅	12.5	0.045	0.18	50~500
4H-SiC	18.2	0.032	0.35	20~200
GaN	15.0	0.038	0.28	30~300
蓝宝石	20.0	0.025	0.45	10~150

通过控制抛光工艺参数，包括压力、速度、时间等，在不同MRR条件下对标准晶圆进行抛光，采用接触式轮廓法测量抛光后表面粗糙度，建立MRR-Ra/Rz关联数据库。实现通过表面粗糙度预测MRR或反之优化工艺参数。

## 5 测试条件

试验应在以下环境条件下进行：

- 温度：（23±2）℃，温度波动≤±0.5℃；
- 相对湿度：45%~65% RH，湿度波动≤±5% RH；
- 洁净度：不低于GB/T 25915.1 Class 5；
- 振动：振幅≤0.1 μm，频率范围10 Hz~1000 Hz。

## 6 试剂或材料

晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试的试剂与材料应符合表2要求。

表2 试剂与材料要求

名称	规格要求
单晶硅晶圆	直径 200 mm，（100）取向
SiC 晶圆	4H-SiC，直径 150 mm
抛光液（硅用）	含胶体二氧化硅，pH=10.0

去离子水	电阻率 $\geq 18.2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$
抛光垫	IC1000/Suba IV 复合垫

## 7 仪器设备

晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试仪器设备应满足表3规定

**表3 晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试仪器设备**

设备名称	精度要求	参考标准
化学机械抛光设备	压力 $\pm 0.5 \text{ kPa}$ , 转速 $\pm 0.5 \text{ rpm}$	SJ 21127
膜厚测量仪	厚度分辨率 $\pm 0.5 \text{ nm}$	GB/T 6462
表面轮廓仪	Ra 重复性 $\pm 0.02 \text{ nm}$	GB/T 1031
原子力显微镜（AFM）	分辨率 $0.1 \text{ nm}$ （Z轴）	GB/T 32189
电子天平	精度 $0.01 \text{ mg}$	JJG 1036
颗粒计数器	$\geq 0.1 \mu\text{m}$ 颗粒检测限	JB/T 10796

## 8 样品

### 8.1 样品准备

晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试样品制备应符合以下要求：

- 晶圆尺寸：按测试需求选择直径  $150 \text{ mm}$  或  $200 \text{ mm}$ ，厚度  $(725 \pm 25) \mu\text{m}$ ，无裂纹、划痕等表面缺陷；
- 初始状态：制备后需经去离子水超声清洗  $15 \text{ min}$ ，去除表面杂质， $80^\circ\text{C}$  真空干燥  $2 \text{ h}$ ，真空度  $\leq 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ ；
- 表面预处理：未抛光样品初始粗糙度Ra需控制在  $5 \text{ nm} \sim 20 \text{ nm}$ ，符合对应材料测试范围要求；
- 样品数量：每组测试至少制备3个平行样，确保数据重复性，每个样品标注编号、材料类型、制备日期。

### 8.2 样品保存

晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试样品保存应符合以下要求：

- 储存环境：置于洁净密封容器中，存放于GB/T 25915.1 Class 5洁净室，避免灰尘污染；
- 储存时间：未测试样品保存期限不超过7天，避免表面氧化影响测试结果；
- 运输要求：样品运输过程中采用防静电、防碰撞包装，避免表面损伤；
- 测试前检查：测试前需目测检查样品表面，确认无污染、损伤后再进行试验。

## 9 测试方法

晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试方法应符合表4规定。

**表4 晶圆表面粗糙度与材料去除率（MRR）关联性测试方法**

测试项目	测试步骤	执行标准
材料去除率（MRR）测试	1. 使用膜厚测量仪或电子天平，测量抛光前晶圆的初始厚度或质量； 2. 将晶圆安装于CMP设备，按预设工艺参数（压力、转速、时间、抛光液流量）进行抛光； 3. 抛光后，彻底清洗并干燥晶圆，测量其终点厚度或质量； 4. 根据公式计算MRR	GB/T 6462
表面粗糙度测试	1. 抛光并清洗干燥后的晶圆，固定于表面轮廓仪或原子力显微镜（AFM）样品台；	GB/T 1031

	2. 根据设备规程, 在晶圆特定区域(如距离中心2/3半径处)进行测量; 3. 每种工艺条件下的样品至少测量5个不同位置, 取算术平均值作为该样品的粗糙度值	
--	---	--

## 10 实验数据处理

### 10.1 数据记录

在测试过程中, 应详细记录所有原始数据, 包括但不限于测试环境条件、仪器设备参数、样品信息、抛光工艺参数、抛光前后的厚度/质量测量值、表面粗糙度测量原始数据等, 并确保数据记录的准确性和完整性。

### 10.2 数据处理方法

#### 10.2.1 材料去除率(MRR)计算

采用厚度差法或质量差法计算MRR, 按照公式(4)或(5)计算。厚度测量精度不低于±0.5 nm, 质量测量精度不低于±0.01 mg, 计算结果保留三位有效数字。

厚度差法计算公式:

$$MRR = \frac{T_0 - T_1}{t} \times 60 \dots\dots\dots (4)$$

式中:

MRR— 材料去除率, 单位为nm/min;

$T_0$ — 抛光前晶圆厚度, 单位为nm;

$T_1$ — 抛光后晶圆厚度, 单位为nm;

$t$ — 有效抛光时间, 单位为s。

质量差法计算公式:

$$MRR = \frac{m_0 - m_1}{\rho \cdot A \cdot t} \times 60 \dots\dots\dots (5)$$

式中:

MRR— 材料去除率, 单位为nm/min;

$m_0$ — 抛光前晶圆质量, 单位为g;

$m_1$ — 抛光后晶圆质量, 单位为g;

$\rho$ — 晶圆材料密度, 单位为g/cm<sup>3</sup>;

$A$ — 抛光面积, 单位为nm<sup>2</sup>;

$t$ — 有效抛光时间, 单位为s。

#### 10.2.2 表面粗糙度取值

表面轮廓仪或AFM测得的多个位置的粗糙度数据, 计算其算术平均值作为该样品的最终表面粗糙度值。数据精度要求Ra重复性不低于±0.02 nm。

#### 10.2.3 Ra-MRR 关联模型拟合

将不同工艺参数下测得的多组(MRR, Ra)数据, 使用非线性最小二乘法, 按照本文件第4章中普雷斯顿方程扩展公式(3)进行拟合, 求解模型参数A、B、C。拟合优度(R<sup>2</sup>)应不低于0.95。

### 10.3 重复性与再现性评估

#### 10.3.1 重复性

同一实验室、同一操作员、使用同一设备对同一样品(或同一批次样品)在短期内进行多次测试, 其MRR及Ra测试结果的相对标准偏差(RSD)应分别不大于5%和8%。

#### 10.3.2 再现性

不同实验室或不同操作员对同一种标准样品进行测试, 其MRR及Ra测试结果的实验室间相对偏差应分别不大于10%和12%。

#### 10.4 数据审核与异常处理

#### 10.4.1 数据审核

对所有测试数据进行严格审核，包括数据的准确性、完整性和合理性。审核内容应涵盖数据记录是否规范、计算过程是否正确、测试结果是否符合预期趋势等。

#### 10.4.2 异常数据处理

当发现测试数据异常时，应进行复查。首先检查测试过程中是否存在操作失误、仪器设备故障、样品污染或环境条件不符合要求等情况。如确定数据异常，应重新进行测试，并在报告中记录异常原因及处理措施。

#### 10.5 测试结果

将测试结果以清晰、准确的方式呈现，包括数据表格、Ra-MRR关系曲线图、模型拟合参数表等。测试报告应给出特定材料在测试条件下的Ra-MRR关联模型及参数，并对模型的适用性和精度进行说明。

### 11 质量保证和控制

#### 11.1 仪器设备校准

所有仪器设备应定期送至专业计量机构进行校准，并在有效期内使用。

#### 11.2 环境监测

在测试过程中，应实时监测环境温度和湿度，并记录相关数据，当环境条件超出规定范围时，应暂停测试并采取相应的措施进行调整。

#### 11.3 样品检查

在测试前和测试后，应对样品进行外观检查，确保样品无损坏或污染。

#### 11.4 人员保证

测试人员应具备材料科学、机械工程、微电子等相关专业本科及以上学历，或持有相关测试领域专业技术资格证书。严格执行本文件规定的测试方法，对关键工序需双人复核并签署操作记录。

### 12 测试报告

实验报告应包括以下内容：

- a) 测试样品的基本信息，如型号、编号、材料组成、制备工艺等；
  - b) 测试环境条件，包括温度、湿度等；
  - c) 测试仪器设备的型号、参数及校准状态；
  - d) 测试步骤及原始数据记录；
  - e) 数据处理结果，包括晶圆表面粗糙度、材料去除率等；
  - f) 测试结果分析（如有）及结论；
  - g) 测试人员和审核人员签名及日期；
  - h) 附件，包括测试过程中记录的原始数据、图表、校准证书等复印件，以及其他需要说明的文件。
-