

# 在半导体生产中使用 压电式传感器测量动态力

## 摘要

人工智能、5G、物联网 (IoT)、高级驾驶辅助系统 (ADAS)、增强现实/虚拟现实 (AR/VR) 等新兴技术的发展, 正为半导体行业的增长开辟道路。这些新兴技术的应用, 对业内产品的性能提出了更高的要求。目前, 半导体业界全面应用微缩工艺制程和先进封装技术, 力求在缩小半导体产品尺寸的同时, 容纳更多功能; 这一目标, 使半导体生产过程更具挑战性。

半导体技术的进步和设备复杂性的提高, 对半导体封装过程的监控和控制提出了更高要求。生产过程优化是提高产品可靠性的前提, 为此, 生产商必须选择适当的材料, 同时掌握关键的工艺参数。当前, 光学传感器、位移传感器和电气测试, 是实现芯片测试和封装过程监控/控制的主要途径。但是, 为提高封装过程的质量与效率, 生产商需要使用更加完备的过程监控和故障识别方案。

力, 作为一项可能导致设备故障的物理变量, 难以通过常规的测量方法获取。但是, 力在键合、贴装、封装等半导体生产过程的监控和控制中, 均扮演着重要的角色。

奇石乐压电式动态测量技术, 能够实现力的精确监控和控制。依靠该技术, 半导体设备制造商可及早发现生产偏差、避免错误生产, 提高机器性能和加工精确度。半导体制造和封装企业则能够从更高的生产透明度、更优益的性能, 更低的质量成本, 以及可追溯的工艺数据中受益。

## 作者

### Robert Hillinger

瑞士温特图尔奇石乐集团, 8408  
robert.hillinger@kistler.com

### 李永超

奇石乐精密机械设备(上海)有限公司  
yongchao.li@kistler.com

## 目录

1. 引言	2
2. 压电式力测量	3
3. 半导体生产过程中的力测量	8
4. 结论	9

## 致谢

感谢Matthias Giese, Bernd Rueeck, Felix Meier, Stefan Affeltranger和Stefan Schäfer等奇石乐集团同事对本文提供的大力支持和宝贵建议。

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

# 1. 引言

当前,光学传感器、位移传感器和电气测试,是实现半导体生产过程监控和控制,确保产品质量的主要途径。但是,这些常规测量方法无法检测机械应力,而机械应力是实现过程控制、确保产品质量的重要参数。在半导体生产的前段制程(包括晶圆研磨、抛光、化学机械抛光(CMP)、划片、脱层和拾取-贴装等)中,各生产步骤对产品施加的力,是影响其质量的关键因素;此外,力在半导体后端制程中同样不容忽视,包括引线框架冲压、芯片键合、引线键合、倒装绑定、晶圆键合、热压键合、烧结、晶粒分拣、密封和成型,以及使用拉线测试器和测试分选器进行分拣、贴膜和测试等。在上述所有过程中,力(如机械应力)造成的偏差都可能引发产品质量问题。

避免缺陷的最好办法是防患于未然。力测量能够提高半导体生产过程的透明度,加强过程监测和控制,从而避免生产过程中因刀具磨损、材料特性变化和故障造成的机械应力。

故障类型:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 不可见的损坏</li> <li>• 晶片破裂</li> </ul>
故障原因:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 刀具磨损</li> <li>• 翘曲</li> <li>• 材料特性变化</li> <li>• 故障</li> </ul>
力测量可实现以下目的:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 评估并优化刀具磨损情况</li> <li>• 了解材料特性和不同类型材料的可加工性</li> <li>• 了解并优化机器设备</li> <li>• 将力信号与产品质量参数相关联</li> <li>• 通过力值实现全闭环控制机器和生产过程</li> </ul>

表1: 生产过程中的力偏差可能造成的影响

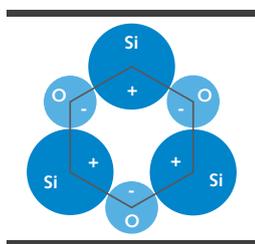
1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

## 2. 压电式力测量

### 2.1 压电效应

压电式力测量技术的基础是石英晶体等压电 (PE) 材料, 该材料在受到机械负载时, 会产生电荷信号。

石英晶体未受力



石英晶体受力

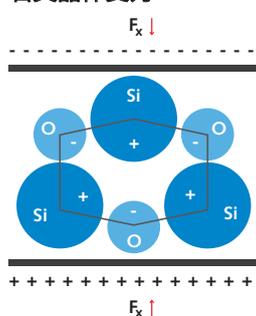


图1: 纵向压电效应原理

如图2所示, 电荷量 (单位: 皮库, pC) 与施加力值 (单位: N) 成线性关系, 而高线性度意味着可以在不同数量级进行测量 (0~10N, 0~100N, 0~100kN)。灵敏度是指电荷量与力值之比 (按校准后计算); 电荷信号既可通过工业电荷放大器转换为模拟信号 (例如0~10V), 也可转换为数字信号。由于石英晶体的刚度高, 可大幅降低测试偏差。

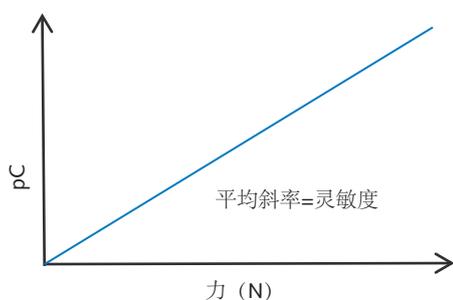


图2: 力与电荷 (单位:pC) 的比值示意图

用户可通过多种方式, 将压电式传感器集成至加工机器中。根据作用力的方向及其相对于晶体极轴的位置, 压电效应可以分为纵向压电效应 (与力的方向相同)、横向压电效应 (与力的方向相对) 或剪切效应 (力呈对角方向)。压电式力传感器的量程为0~1200kN; 此外, 源于高刚性的特点, 该等传感器具有极高的固有频率。因此, 压电式力传感器不仅能够对力的快速变化做出灵敏响应, 还具有极宽的可用测量范围。

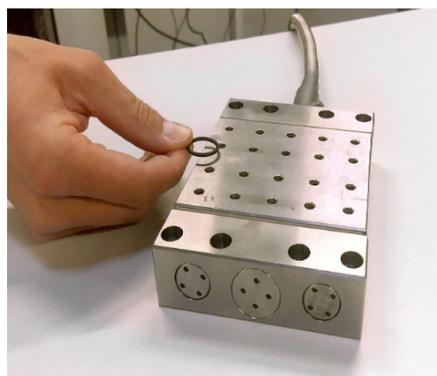


图3: 传感器监测O型圈作用力实验

如图3实验所示, 将一个O形圈放置于压电传感器上, 该传感器最大量程为10kN。图4中的测量结果显示, 即使在测量较小力的情况下, 压电式传感器也能检测其细微变化。

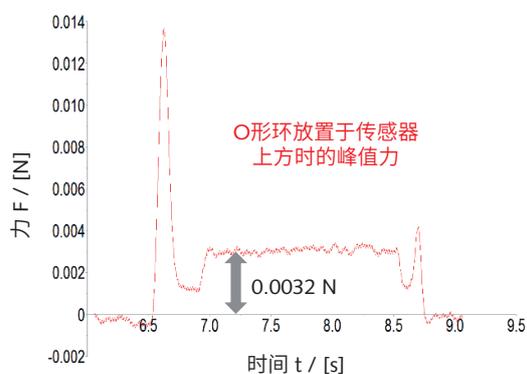


图4: 传感器测得的O型圈作用力

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

## 2.2 不同力测量方法的对比

大部分力传感器基于其内部的弹性或弹簧元件发挥测量性能。例如，应变式传感器是一种金属材质制作的电测量元件，适用于静态和准静态生产过程中的力测量。应变式传感器基于物理效应实现测量功能：即监测应变片在拉伸或压缩时产生的电阻与所受应力之间的比例变化。应变式传感器的高灵敏度基于其内部弹性元件的变形特性。表2针对半导体生产过程的测量要求，对比了压电式和应变式测量技术的主要特点。

此外，电机电流测量技术也是一种常用的力测量方法。该方法可根据电机的输入电流计算力值，从而检测施加于执行机构(或其它设备)上的力。但是，使用电机电流计算力数值时，由于功率损失和机器操作模式的差异，测量结果可能出现较大误差和测量不确定性。当然，对于精度要求较低的应用场景而言，电机电流测量技术不失为一项经济而高效的解决方案。

## 2.3 压电式测量链

图5展示了一条工业测量链。在该测量链中，压电式传感器用于力信号的测量，而电荷放大器则用于信号转换，并为可编程逻辑控制器 (PLC) 或工控计算机提供等同于被测力的电信号。



图5: 压电式传感器、电荷放大器、可编程逻辑控制器

在过程监控软硬件的帮助下，用户可根据测量曲线(力/时间或位移)检查和评估生产步骤的质量。此外，用户还可运用评估窗口(EO)，对测试的曲线做出评估。通过该方法，用户能够检查每一个生产步骤，判断零件质量是否合格。

### 2.3.1 选择压电式传感器

压电式传感器可利用压电效应，测量单分量或多分量的力(x、y、z)。在半导体生产中，单分量垫圈式传感器和预紧式传感器具有广泛应用场景。

主要特点	压电式传感器	应变式传感器
高动态测量	✓	✓ 受载体材料刚度的限制
测量力的细微小波动	✓	✓ 测量范围固定，测量效果非常有限
传感器紧凑性	✓	✓ 需占用较大空间
静态测量	✓ 未来可期	✓
温度影响	✓ 耐热性强	✓ 较易实现温度补偿
精准测量-线性-迟滞效应	✓	✓ 受载体材料特性的限制
使用寿命	✓	✓ 蠕变效应缩短使用寿命

表2: 不同力测量方法的特点对比

用户应根据具体的应用要求和可用安装空间，向压电传感器供应商咨询产品选择和安装方法，甚至可以定制解决方案，确保所选传感器充分满足应用需求。

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

机械预紧是单分量力传感器安装过程中不可或缺的步骤：预紧可提升传感器刚性，进而拓宽其频率范围。预紧力通常为可用测量范围的20%到70%。

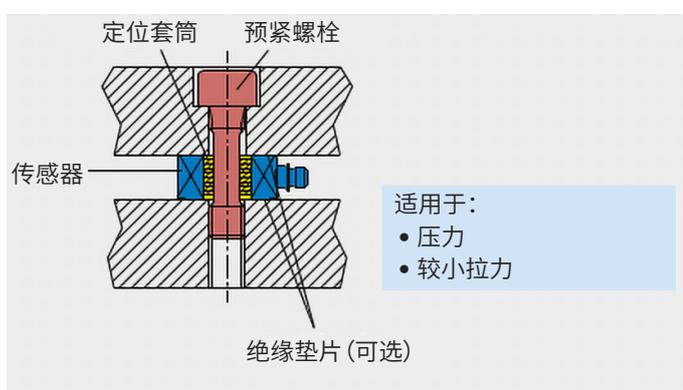


图6: 使用预紧螺栓安装传感器

预紧传感器(如图8c中的力传感器)可以轻松安装,无需重复校准。如图7所示,使用定制预紧元件和垫圈式力传感器,可使真空管路从传感器穿过。

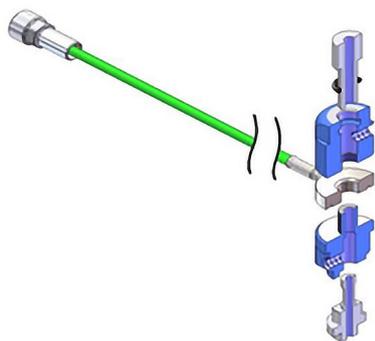


图7: 客户定制化传感器

压电式传感器作为一种精密型测量工具,只有经过正确的安装和固定,才能发挥并保持其测试精度。用户须确保将压电式传感器安装于平整、坚固、接地的平面之上;同时确保作用力的平均分布,从而充分利用压电式传感器的高刚性和高固有频率的特性,实现高动态力的精确测量。

<p>a</p>	<p><b>单分量垫圈式力传感器</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 整体高度较低——适用于有限空间内的安装</li> <li>• 对于拥有力传感器集成经验的客户而言,单分量传感器是一项实惠的选择</li> <li>• 安装: 需要使用螺栓或元件进行预紧</li> <li>• 为确保测量的准确性,安装后需再校准</li> </ul>
<p>b</p>	<p><b>被预紧的单分量垫圈式石英传感器</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 出厂前已完成预紧,安装便捷</li> <li>• 无需再校准,可随时开始测量</li> <li>• 支持客户定制化外形尺寸</li> </ul>
<p>c</p>	<p><b>单分量石英传感器,压力传感器</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 结构紧凑</li> <li>• 传感器已完成预紧,安装便捷</li> <li>• 无需再校准,可随时开始测量</li> <li>• 安装灵活</li> </ul>

图8: 适用于半导体生产应用的传感器

### 2.3.2 选择电荷放大器

电荷放大器是压电式测量链的组成部分,用于将传感器生成的电荷信号按比例转换为电压、电流或数字信号。在选择与自身测量需求相适应的的电荷放大器时,需考虑如下需求:

- 测量通道的数量
- 量程
- 测量类型(静态/动态)
- 输出信号类型(模拟信号或数字信号)
- 频率范围

### 2.3.3 选择电缆

用户须使用高绝缘型电缆连接压电式力传感器和电荷放大器。此外,也可选用低噪声同轴电缆,该电缆在运动过程中仅产生的极小的寄生电容。

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

## 2.4 测量中的考量因素

### 2.4.1 分辨率

测量系统的分辨率,使之能够检测并如实反映测量结果特性的细微变化。压电式传感器具有高分辨率的特点。限制分辨率的因素主要包括电荷放大器的信噪比,以及PLC和/或工控计算机的实时计算或后处理能力。当被测力值低于1N时,测量的精确度至关重要;而压电式传感器在工业测量应用中的分辨率最低可达0.01N。

### 2.4.2 重复性

重复性指“连续精度”:即表示在保持测量条件基本不变的情况下,多次测量的测量结果应具有一致性。在重复制造过程中,生产商需对多次生产中的相同步骤进行重复测量,而确保该等测量结果的一致性具有至关重要的意义。从这个角度而言,压电式测量链具有如下优势:在每个<测量>周期开始之前,用户可通过<复位>开关复位电荷,轻松重置测量零点。该操作可基本排除因漂移或随时间变化的因素(如温度)引起的外部变化造成的测量误差。在满量程输出的情况下,工业用压电式测量链的重复性误差可低至0.1%。

### 2.4.3 影响测量结果的因素

多年来,压电式力测量技术久经半导体行业考验,成为业内公认的高效测量方法。然而,压电式测量链中仍然存在一些影响测量结果的因素。如表3所示,影响测量结果的因素可分为三类:测量链,使用环境,后处理计算或实时计算。

1.测量链	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 灵敏度</li> <li>• 迟滞</li> <li>• 线性</li> <li>• 分辨率</li> <li>• 重复性</li> <li>• 电缆绝缘性</li> <li>• 漂移</li> <li>• 复位/测量切换跳动量</li> <li>• 电荷放大器噪音</li> <li>• 信号传输延迟</li> <li>• 温度</li> </ul>
2.应用环境	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 温度</li> <li>• 湿度</li> <li>• 电磁兼容性</li> <li>• 机器振动</li> <li>• 电缆(长度,弯曲性能,移动性能)</li> <li>• 力分流</li> <li>• 力传递</li> <li>• 相同的可生产性</li> <li>• 弯矩</li> <li>• 电荷放大器预热时间</li> <li>• 混叠效应</li> </ul>
3.后处理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 滤波器的使用</li> <li>• 舍入误差</li> <li>• 下游设备的精度,如数采卡、PLC、工控机</li> </ul>

表3: 影响测量结果的因素

使用压电式测量链时,需重点考量表3中列示的两项因素:漂移和复位/测量切换跳动量。通常情况下,任何测量过程都会出现 $\pm 0.05$  pC/s的漂移,与被测力的大小无关。换言之,用户须将测量的持续时间纳入考量,并在必要情况下进行漂移补偿。同样地,任何测量过程都会产生 $\pm 2$  pC的复位/测量切换误差,用户可通过程序进行补偿。

## 1. 引言

## 2. 压电式力测量

### 3. 半导体生产过程中的力测量

### 4. 结论

#### 2.4.4 获取优质测量结果的最佳使用方法

表4列出了测量过程中的最佳使用方法可帮助用户选择适当的测量链;同时,针对将力测量整合至半导体生产过程的方法,本表也提供了一些建议。

- 针对具体应用,向测量设备供应商寻求建议
- 按照测量设备供应商的说明选择、设计和安装测量链
- 在测量过程中避免加速度,或采取消除加速度影响的措施
- 在测量过程中避免温度变化,或采取消除温度变化影响的措施
- 确保电缆绝缘性和布线良好
- 定义最优复位/测量周期
- 使用maXYmos评估系统或PLC,对复位/测量切换误差进行补偿
- 考虑使用相对测量法,而非绝对测量法(即充分利用压电式传感器良好的重复性)
- 使用局部量程校准
- 考虑混叠效应
- 咨询并选用最适合的传感器
- 测量前,使用传感器和电荷放大器测试证书中的数据计算测量不确定性
- 聘请第三方认证实验室提供校准服务(例如经过中国CANS认证的实验室)
- 通过现场校准提高测量的精度

表4: 测量最佳实践

#### 2.4.5 在线测量

在线测量,指将力传感器安装于半导体生产设备的机械结构中;同时配合使用电荷放大器或过程评估单元完成测量。在线测量可实现以下目标:

- 力的监测和控制是一种重要的物理变量
- 记录力数据及评估结果
- 采集装配过程数据,实现生产工艺优化
- 可追溯性

#### 压电式力传感器

0 ... 5 kN



图9: 配备评估系统的测量链

通过集成在线测量,用户可测量每个生产步骤和/或产品的受力情况,从而实现量产产品的自动检查。

#### 2.4.6 离线测量——机械力验证

离线测量,指根据一定间隔,手动检验机器轴受力情况的测量方法。测量时,需使用特定校准工具(如图10所示),该工具将力传感器集成至机械结构内部,确保手动测量的准确性。此外,如需进行翘曲度测量,则须在机械结构中安装至少三个力传感器,用以测量机床刀具的平行度。

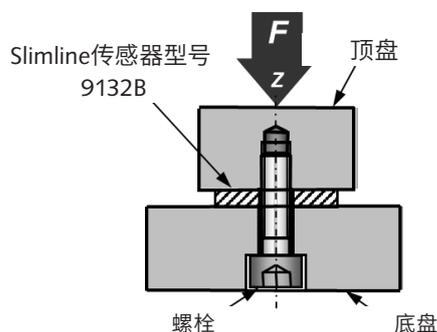


图10: 集成至机械结构中的传感器

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
4. 结论

## 3. 力测量在半导体生产工艺中的应用

纵观半导体行业,压电式力测量技术的应用场景稳步增加。过去压电式测量技术主要用于机器验证(校准)和高精度引线键合、晶圆研磨和抛光等生产步骤;而如今,多种半导体

制造过程中部署压电式测量技术用于监控力这一关键物理变量。表5列举了多种半导体测量应用场景和压电式力测量技术在各场景下的特点、优势与附加价值。

	制程步骤	力测量集成		
		特点	优势	附加价值
前制程	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 抛光</li> <li>• 研磨</li> <li>• 化学机械抛光(CMP)</li> <li>• 划片</li> <li>• 叠片</li> <li>• 脱层</li> <li>• 取放</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 提高设备(如晶圆抛光)压力的精度</li> <li>• 监控叠片和拾取-贴装过程中产生的力</li> <li>• 追踪关键生产过程中的力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 验证产品平稳性和力限制</li> <li>• 识别机器零件(如压力盘)磨损</li> <li>• 在重复生产中,确保晶圆抛光、研磨、清洗、划片工艺的一致性</li> <li>• 降低晶圆次品率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 提高机器性能(如加工速度和准确性)</li> <li>• 提高质量,降低成本</li> </ul>
后制程	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 引线框架冲压</li> <li>• 晶粒键合</li> <li>• 引线键合</li> <li>• 倒装绑定</li> <li>• 晶圆键合</li> <li>• 热压键合</li> <li>• 烧结</li> <li>• 晶粒分拣</li> <li>• 封装</li> <li>• 成型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在全闭环键合控制装置中集成力测量功能,提高键合精度</li> <li>• 监控键合过程中产生的力</li> <li>• 监控模腔压力</li> <li>• 追踪关键生产过程中的力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在键合过程中确保力这一关键物理变量处于合理的范围内</li> <li>• 验证产品稳定性</li> <li>• 识别机器零件磨损</li> <li>• 降低晶粒次品率</li> </ul>	
封装	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 键合拉线测试器</li> <li>• 分拣和贴膜</li> <li>• 测试分选器(拾取-贴装,转塔等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 检查键合力</li> <li>• 监测拾取-贴装过程中的力变化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 识别偏差</li> <li>• 确保工艺安全性</li> </ul>	

表5: 需进行力测量的半导体制造过程

1. 引言
2. 压电式力测量
3. 半导体生产过程中的力测量
- 4. 结论**

## 4. 结论

未来, 半导体生产工艺的复杂性仍将进一步提高, 业界需要部署与行业发展相适应的全新解决方案, 提高晶圆的质量和产量, 优化半导体封装和测试过程。

动态压电式力测量技术的优势不胜枚举, 能够充分满足半导体生产中的测量要求:

- 高度动态化测量
- 高分辨率和重复性 (适用于极小力测量情景)
- 高刚性——低磨损——使用寿命长
- 传感器结构紧凑

力测量可提高机械应力和工艺偏差的可见性, 从而提升用户的故障识别能力。通过力测量, 用户能够:

- 提高产品质量 (并降低故障率)
- 提高机器性能 (加工速度和准确性)
- 测量力数据, 全面掌握该关键物理变量, 并从产品的可追溯性和大数据中获益



请扫描关注奇石乐中国官方微信公众号，  
获取更多新闻推送及资料下载

### 瑞士奇石乐集团

Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur Switzerland  
电话: +41 52 224 11 11

奇石乐集团产品受不同知识产权保护。如需了解相关信息，  
则请访问网站：[www.kistler.com](http://www.kistler.com)。

奇石乐集团包括Kistler Holding AG及其所有在欧洲、亚洲、  
美洲及大洋洲的分部。

### 中国总部

地址：上海市闵行区申长路1588弄15号楼，201107  
电话：021-2351 6000  
邮箱：[marketing.cn@kistler.com](mailto:marketing.cn@kistler.com)  
[www.kistler.com](http://www.kistler.com)。