

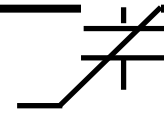
测量薄膜压电系数

Joe T. Evans, Jr.

Radiant Technologies, Inc.

October 29, 2019

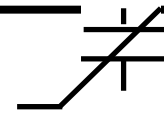
概要



Radiant公司提供了两种工具，可以在产品开发和制造过程中对压电薄膜进行表征和控制。

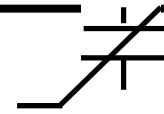
- 激光干涉法测量压电MEMS
- e_{31} 表征用于过程监控

引言



- 定义压电系数，什么可以测量，什么不可以测量。
- 测量压电薄膜的 d_{33}
- 测量压电薄膜的 e_{31}
- 压电性能控制过程中的推荐做法。

压电系数



➤ 四个常用的压电系数：

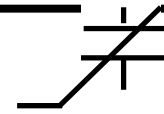
d_{33} 平行电极间施加电压时薄膜表面的垂直位移

d_{31} 在 d_{33} 激活过程中，薄膜垂直扩展时的横向收缩

e_{33} 在 d_{33} 激活过程中，薄膜上表面所施加的垂直力

e_{31} 在 d_{33} 激活过程中，薄膜在移位时所施加的横向力

压电系数



➤ 在薄膜上只能测量四个压电系数中的两个：

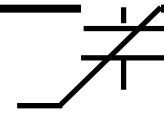
d_{33} 这是一个很小的值，需要激光传感器来分辨

d_{31} 用传感器是不可能观测到这个运动的

e_{33} 用原子力显微镜测量垂直力是可能的，但很难使其精确

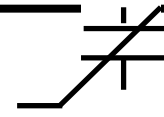
e_{31} 薄膜产生的横向力将使悬臂弯曲，这种运动可以用激光或光子传感器观测到

物理限制

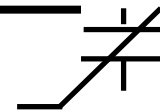


- 被测设备的物理尺寸限制了传感器的使用
- 光子传感器的最小光斑直径一般为0.3mm到3mm
 - 用光子传感器只能测量比较大的平面结构
 - 光子传感器很便宜
- 压电MEMS中移动的结构通常太小而不能被光子传感器观测到
 - 激光传感器的光斑尺寸可以缩小到 $2\mu\text{m}$
 - 激光传感器比光子传感器更昂贵

计量工具

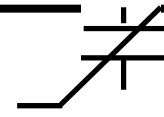


- 光子传感器适用于测量精密、大面积的薄膜系数
 - 激光多普勒测振仪具有小光斑尺寸，适用于现场测量生产用的压电MEMS器件
 - 两者配合得很好：
 - 在监控晶圆片的过程中，光子传感器测量薄膜的全局 e_{31} 系数
 - 薄膜 d_{33} 系数是用激光传感器直接从夹住的电容器上测量的
 - 利用测得的 e_{31} 和 e_{31} 值对器件的性能进行预测
 - 激光传感器直接测量压电MEMS的移动
- 通过与预测值的偏差来表明存在的过程问题



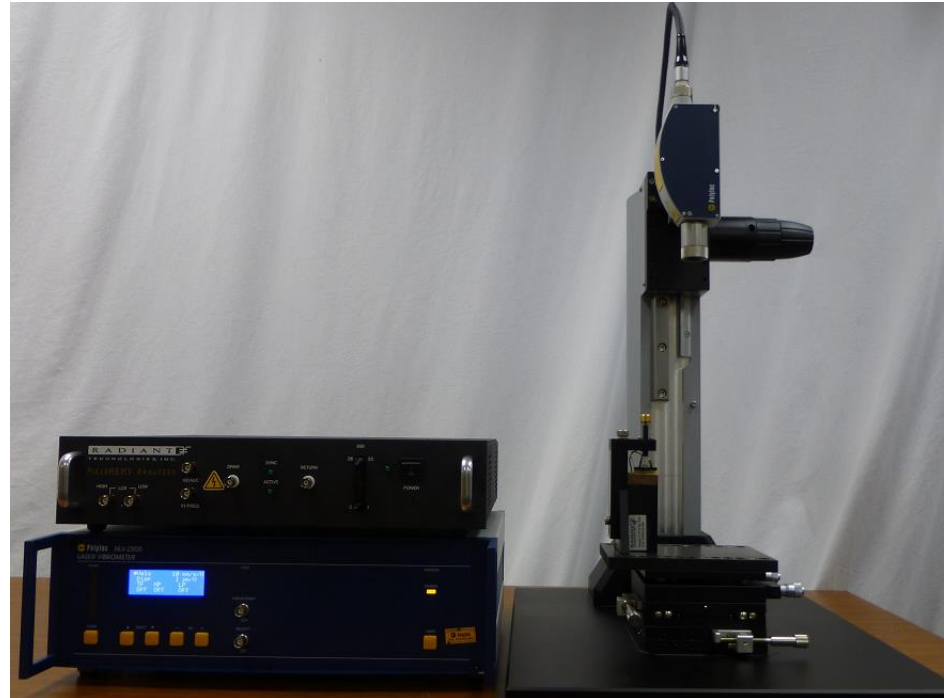
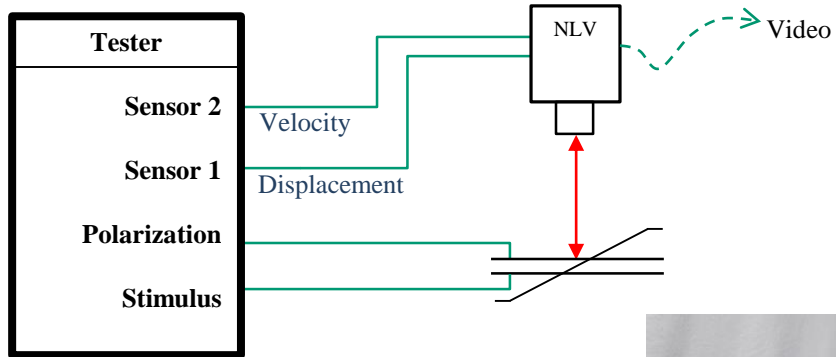
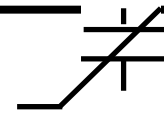
激光干涉法简介

NLV

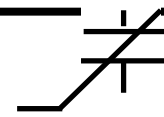


- Radiant已广泛测试Polytec的NLV激光多普勒振动仪去适配到Radiant材料分析仪
- Precision LC II, Premier II, Precision Multiferroic 和 piezoMEMS 测试仪使用的是18位的ADC，每位分辨率为 $76\mu\text{V}$ ，一次测试通过的固有噪声电平 $\sim 300\mu\text{v}$
 - 单节ADC分辨率是通过16次测试平均值得到的
- 搭配NLV，在测试 d_{33} 过程中，这些型号的测试仪可以达到 0.2\AA (0.02 nm)的分辨率
- NLV的最小光斑直径为 $2\mu\text{m}$

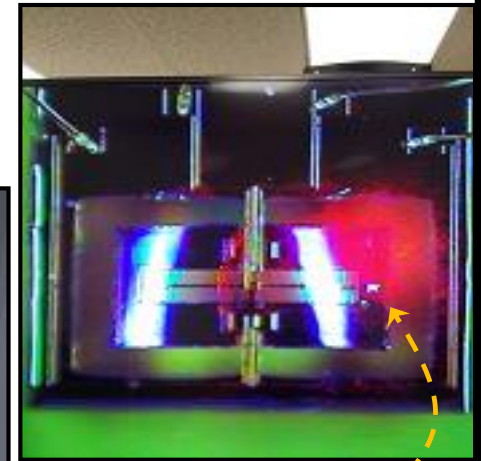
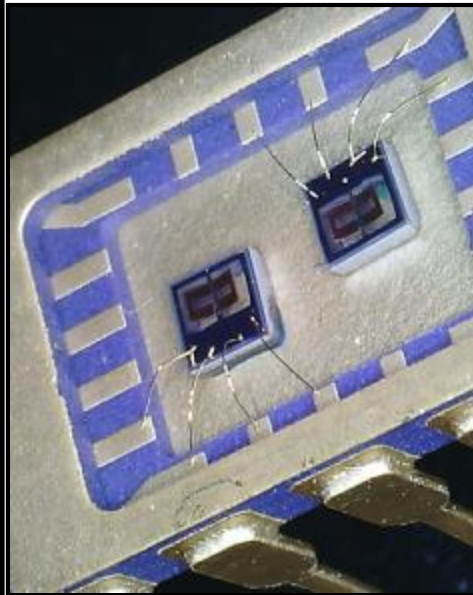
NLV 示例



压电MEMS测量

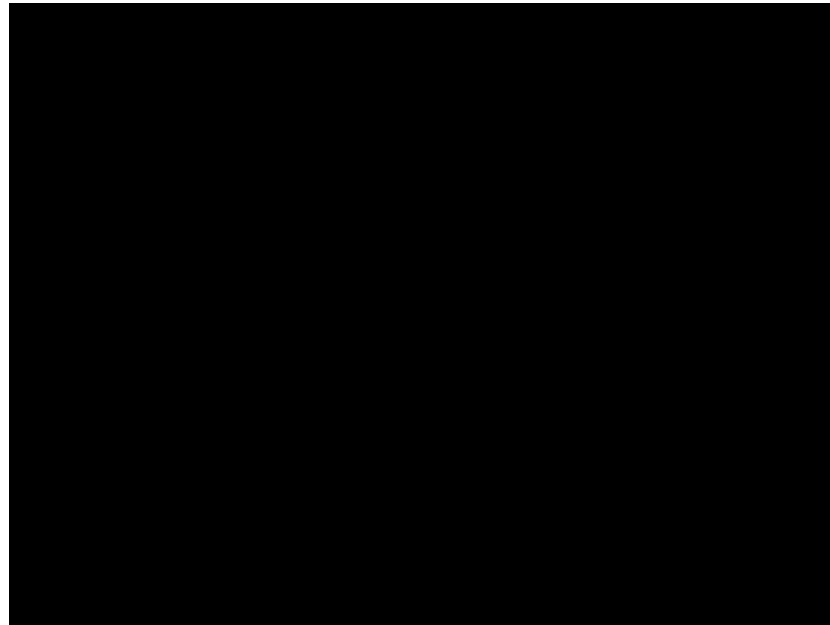
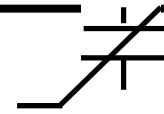


- ▶ NLV 通过 $580\mu\text{m}$ 长的悬臂可测量 $460\mu\text{m}$ 的宽度



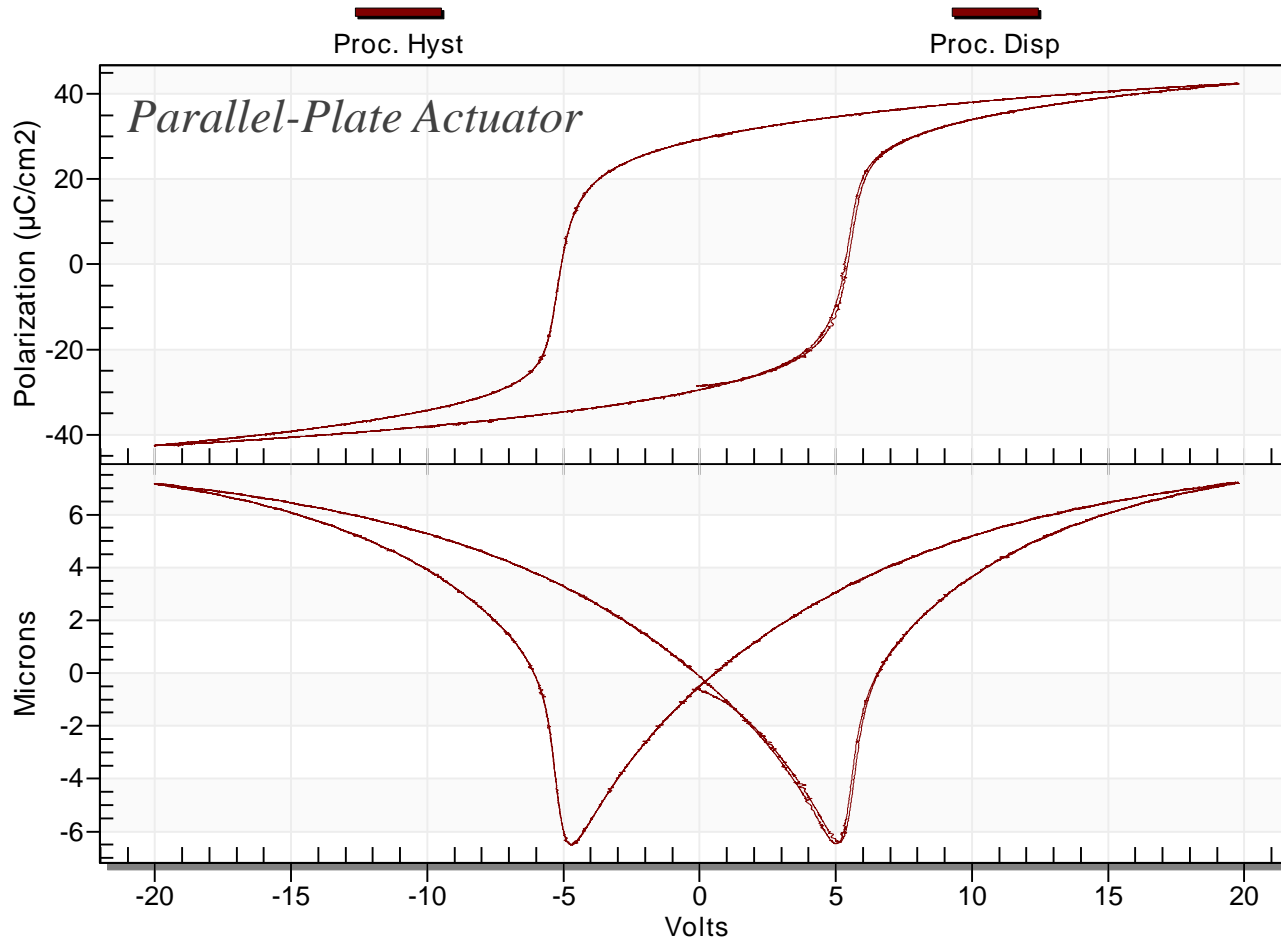
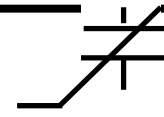
LDV laser

二元翅膀



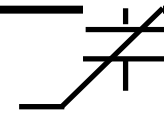
- 频率为1Hz的平行板电容器的电滞回线
- 大约 $\pm 6\mu\text{m}$ 末端位移

蝴蝶曲线

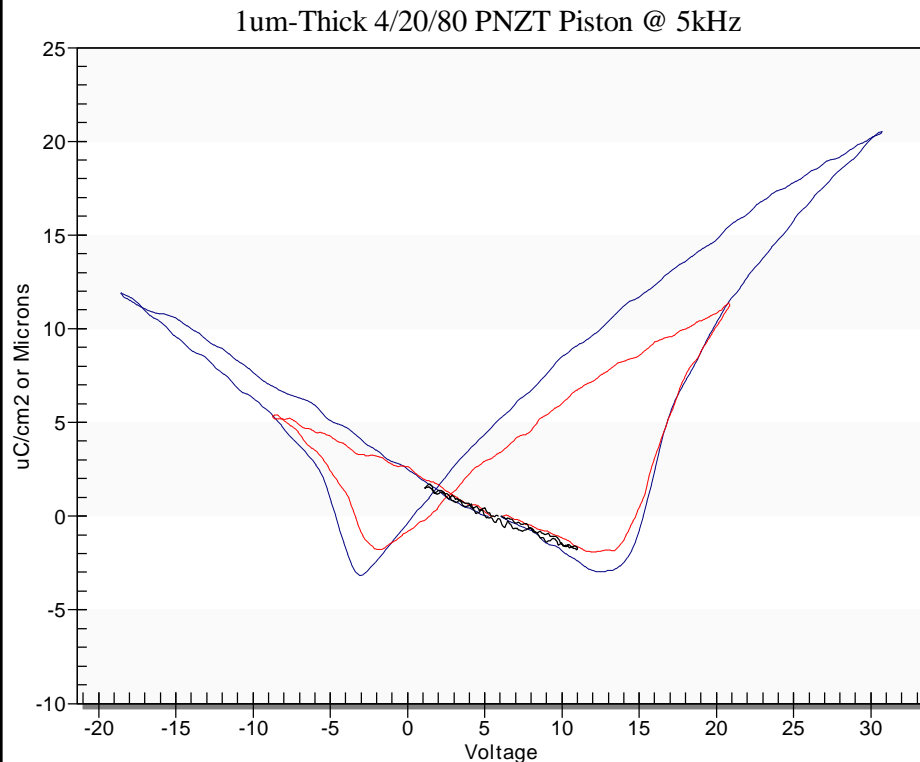


- 通过悬臂测量得到的蝴蝶曲线，用1Hz/20V驱动周边平行板电容器采样32000个点。

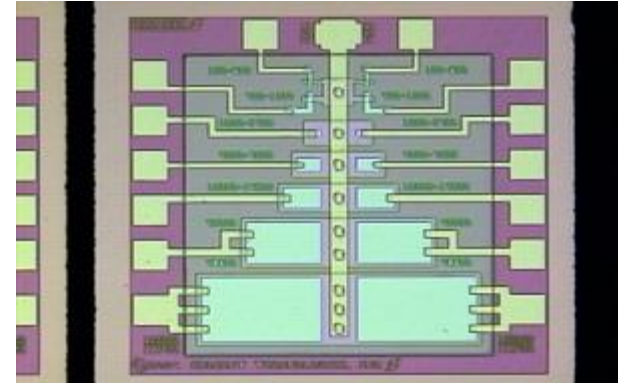
d_{33} with NLV

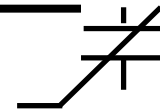


- NLV可以观测到夹紧薄膜的夹具的活塞运动



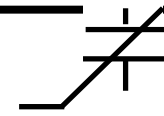
电容器下硅衬底厚度= 550 μ m



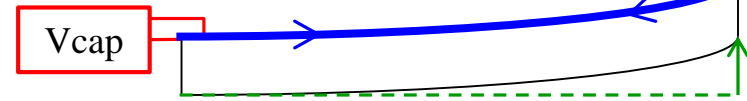


E31介绍

为什么是 e_{31} ?



- 1909年, George Stoney推导出一个公式, 描述当温度变化导致悬臂表面薄膜收缩时, 厚悬臂如何弯曲
- 取而代之的是, 通过施加电压来使压电薄膜发生形变:



- **悬臂 = 机械放大器**: 由 e_{31} 产生的电压所产生的横向应力使悬臂尖端垂直移动的距离远大于由 d_{33} 引起的压电薄膜顶部表面的微小应变。

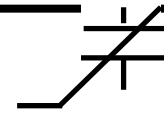
$$\text{悬臂尖端位移} = [\text{机械放大器}] \times [e_{31} E_3]$$

Larger Displacement =

Cheaper Displacement Sensor =

Inexpensive Instrument!

为什么是 e_{31} ?



- 表征材料所需的压电系数为 d_{33} 和 d_{31}

$$\mathbf{Strain}_1 = d_{31} \times \mathbf{Electric Field}_3$$

- 为了使压电材料改变其尺寸，它必须对自身施加一个力以使其收缩或扩展
- 杨氏模量计算在压电材料中产生应变所需的应力

$$\mathbf{Stress}_1 = \mathbf{Young's Modulus} \times \mathbf{Strain}_1$$

$$\therefore \mathbf{Stress}_1 = \mathbf{Y} \times [d_{31} \times \mathbf{Electric Field}_3]$$

$$[\text{define: } e_{31} \equiv \mathbf{Y} d_{31}]$$

$$\sigma_1 = e_{31} E_3$$

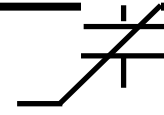
为什么需要一个悬臂？

- ▶ 在 e_{31} 测量中，将压电薄膜电容器置于被动悬臂梁的上表面
- ▶ 该压电电容器产生的应变使悬臂弯曲，导致悬臂尖端垂直移动的距离远远超过压电薄膜的表面。
 - 悬臂是 e_{31} 测量中的 *机械放大器!*

$$\sigma_1 = e_{31} E_3$$

$$\text{悬臂尖端位移} = e_{31} E_3 \times [\text{机械放大器}]$$

Mazzalai 方程



- Radiant使用Mazzalai方程来计算 e_{31} 系数，该系数产生了测量到的悬臂尖端在电压V下的位移。

$$e_{31} = -\frac{1}{3} \left[\frac{Y_{Cant} (t_{Cant})^2}{(1 - \nu) [x_1 (2x_2 - x_1)]} \right] \left(\frac{\text{Cantilever Width}}{\text{Capacitor Width}} \right) \frac{z(\text{at } x_2)}{V}$$

→ ν = 基片的泊松比

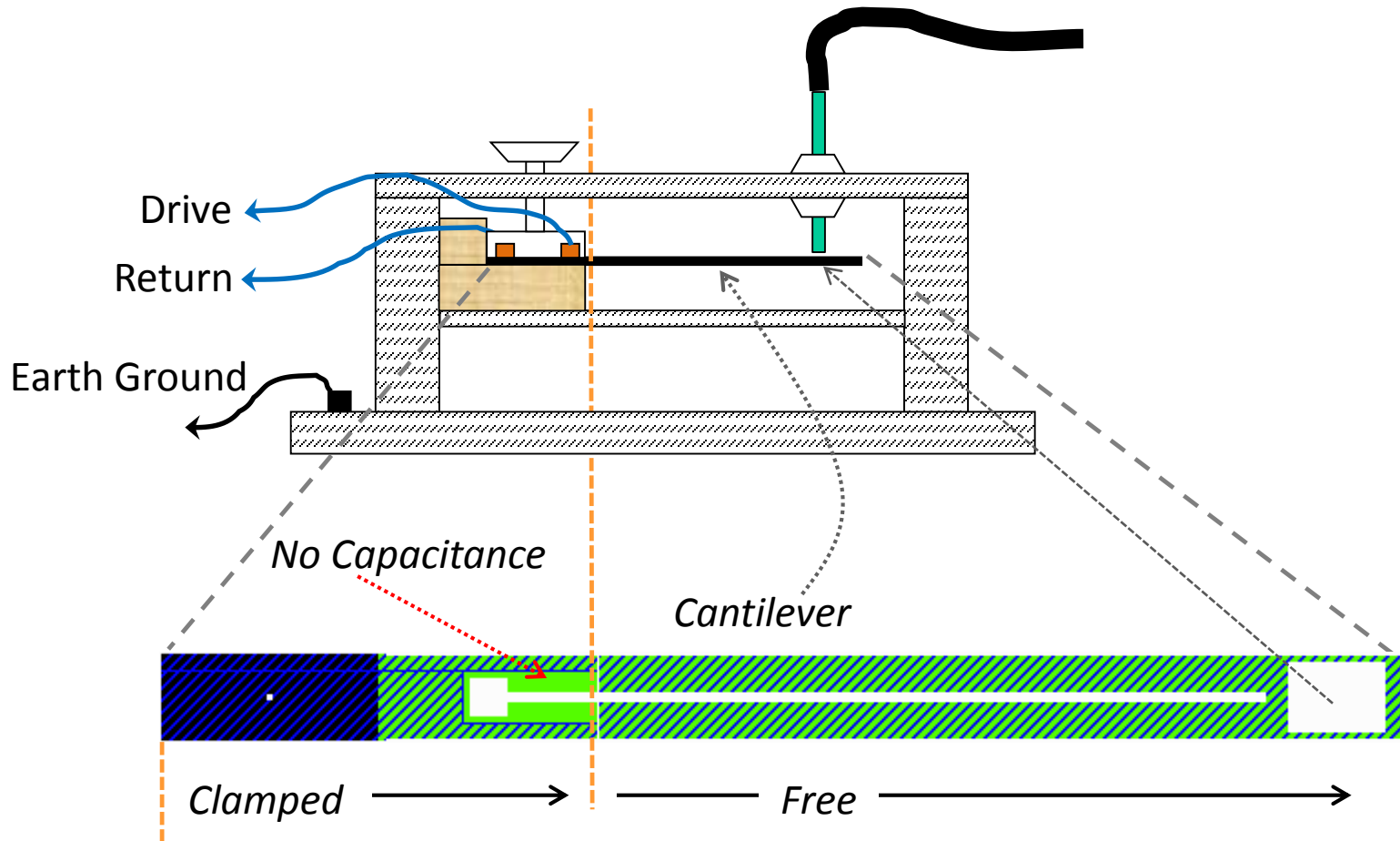
→ x_1 = 夹点到压电电容器末端的距离

→ x_2 = 夹点到位移传感器的距离

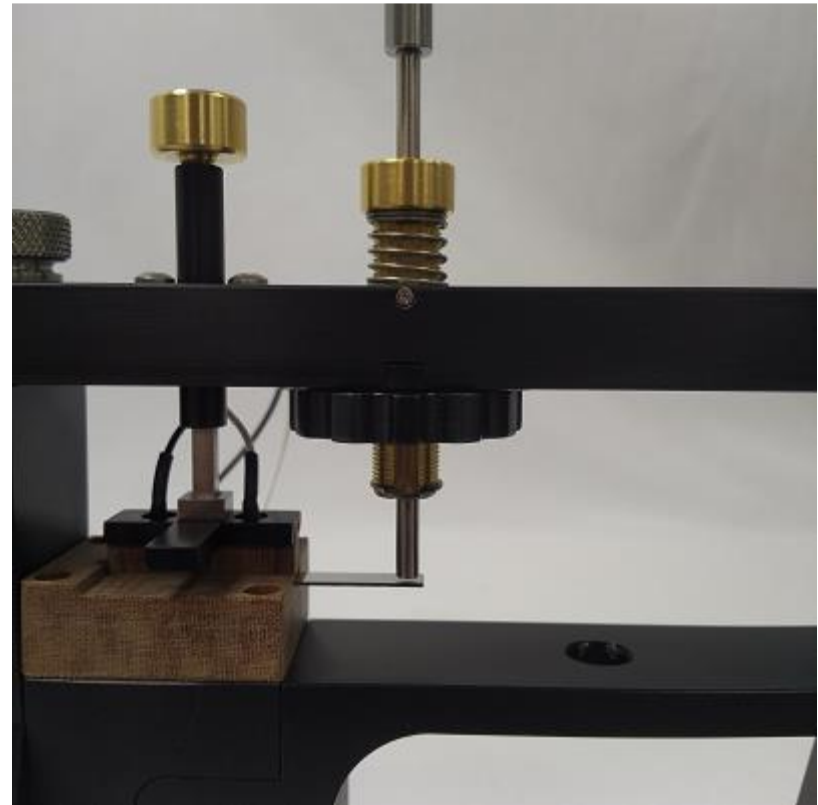
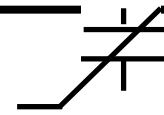
[Mazzalai, Balma, Chidambaram, Jin, & Muralt, *International Symposium on Applications of Ferroelectrics – ISAF/PFM*, Prague, Czech Republic; 07/2013]

- 该方程表明， e_{31} 可以精确地计算任何几何形状的悬臂。

夹具和传感器的形状

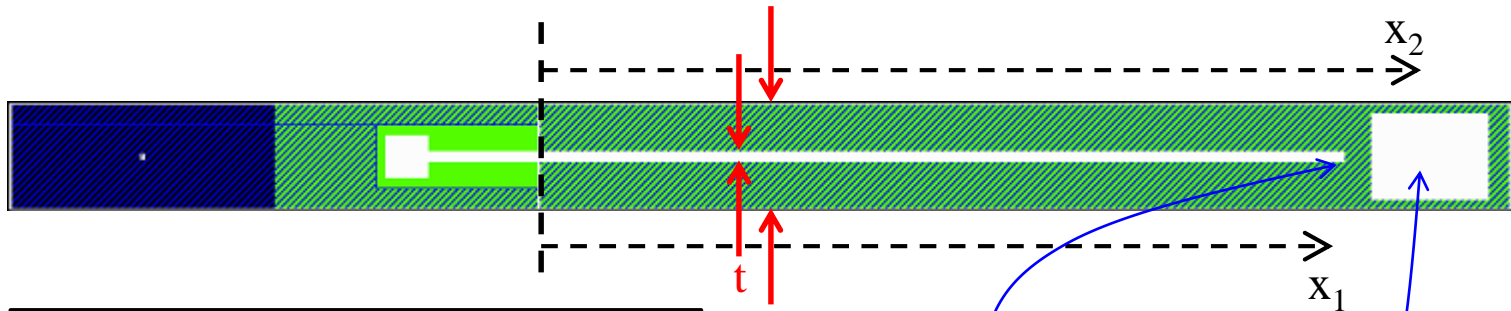


E_{31} 夹具和悬臂



方程的定义

➤ Mazzalai方程中参数的定义:



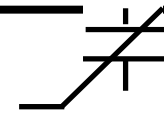
$$\text{Actuator Aspect Ratio} = c_f = \frac{t}{w}$$

$$e_{31} = -\frac{1}{3} \frac{Y_{\text{Cant}} (t_{\text{Cant}})^2}{(1-\nu)c_f x_1 (2x_2 - x_1)} \frac{z(x_2)}{V}$$

→ ν = 悬臂材料的泊松比

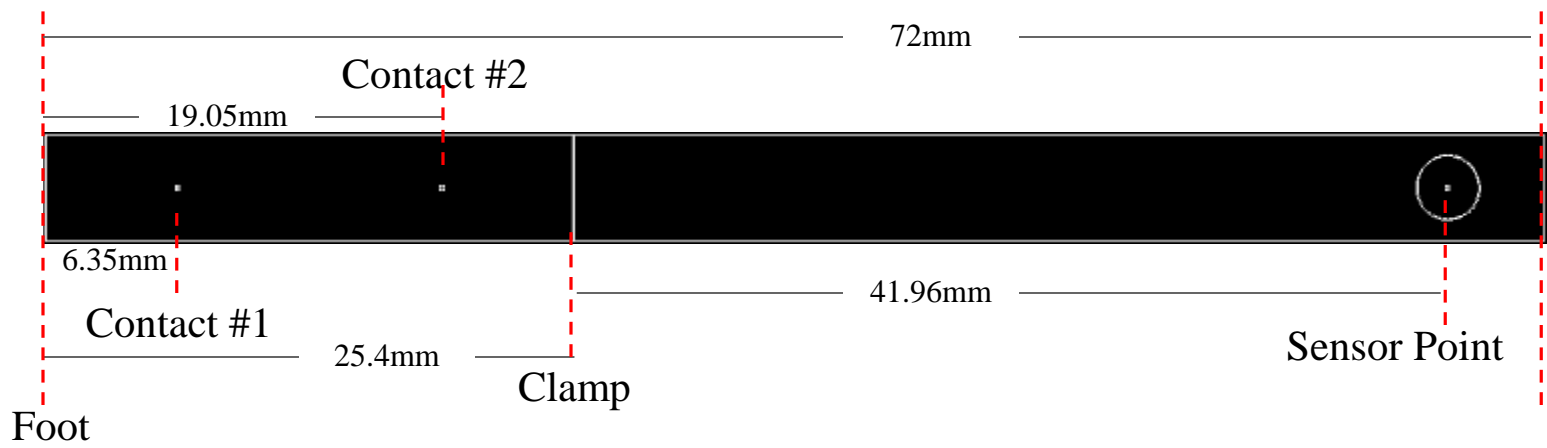
→ Y = 悬臂材料的杨氏模量

→ t_{Cant} = 悬臂厚度

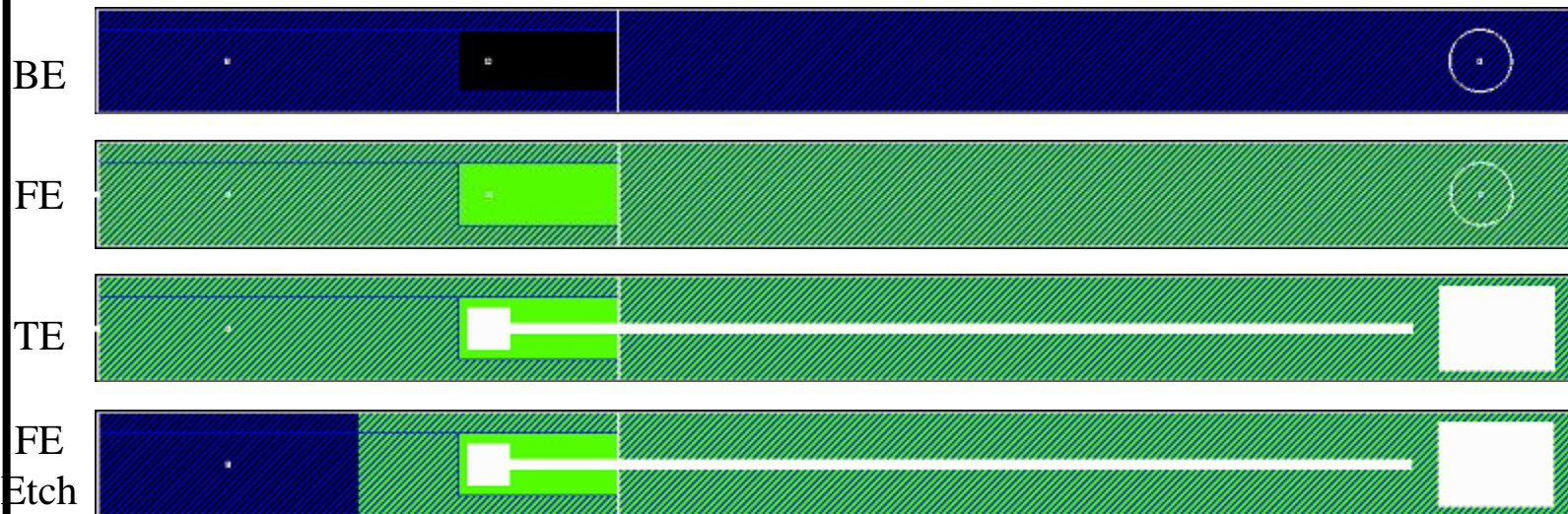
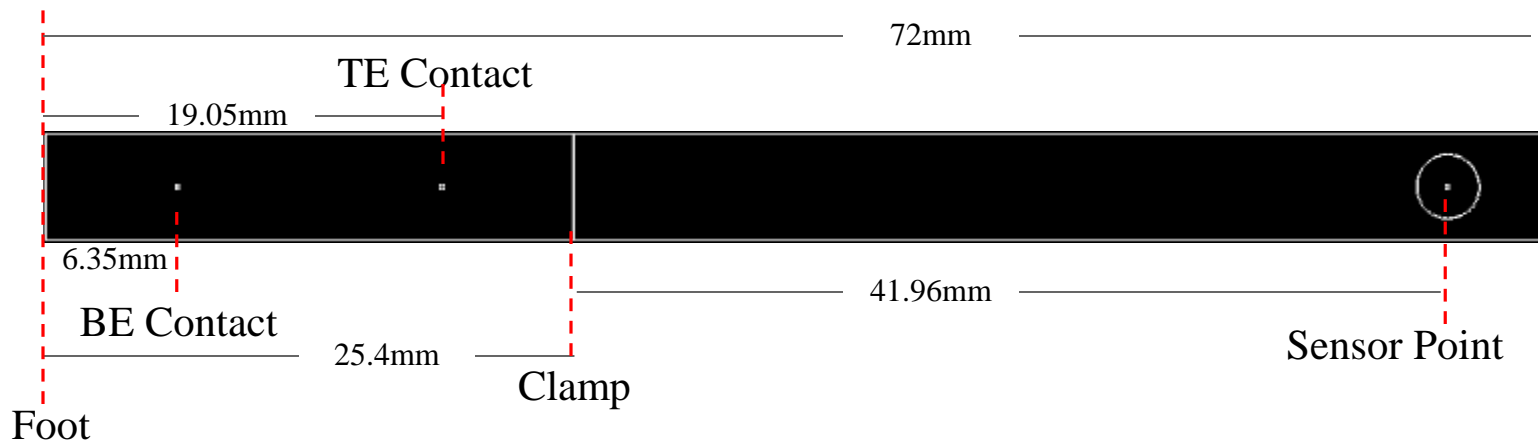
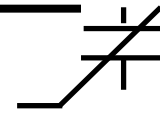


悬臂的几何参数

100mm 硅片衬底[4" wafer]

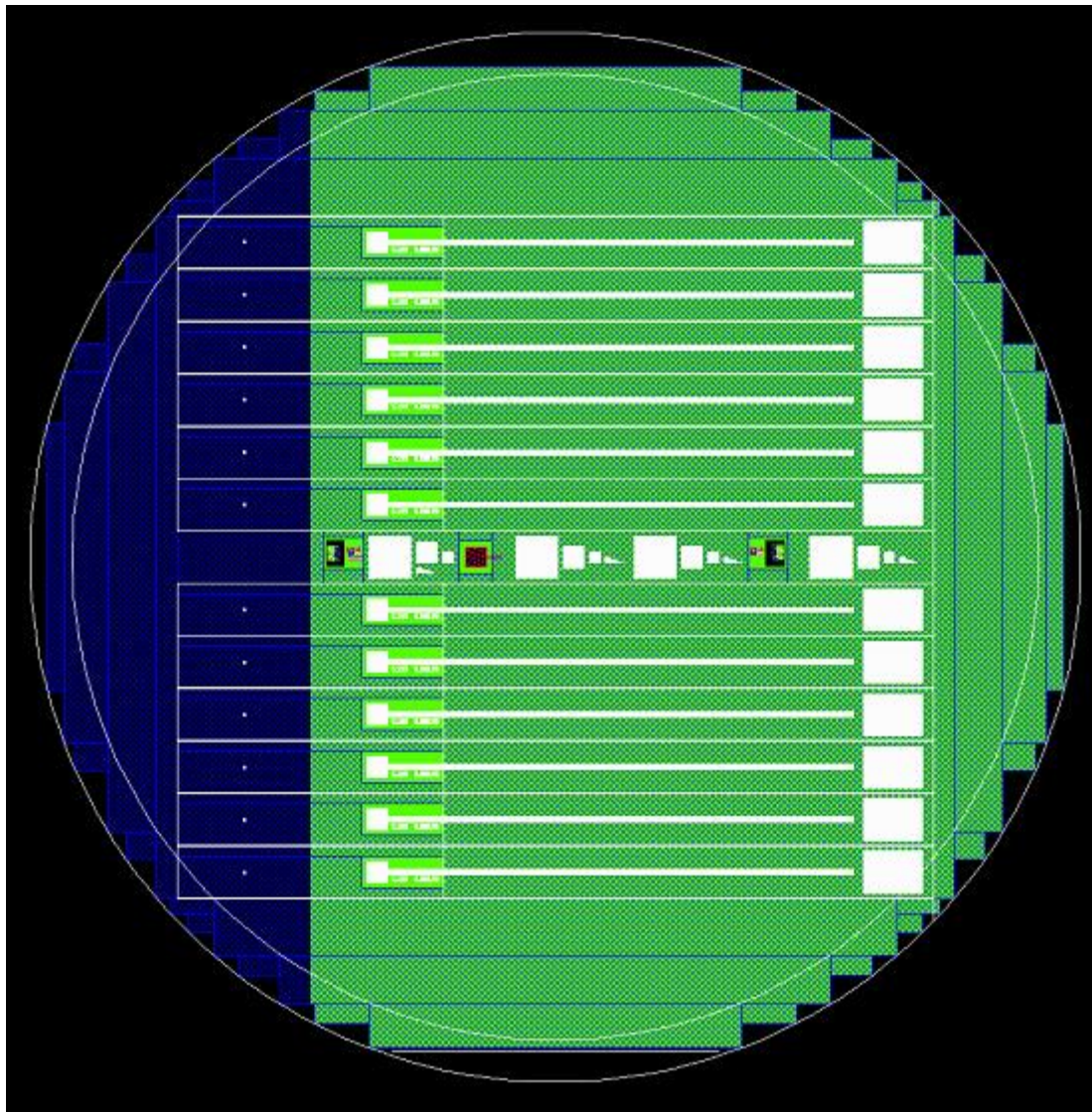
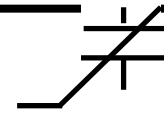


Radiant 悬臂制程



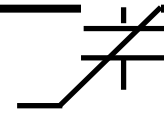
- 寄生电容通过底部电极上的一个孔来降低。

悬臂晶圆示例

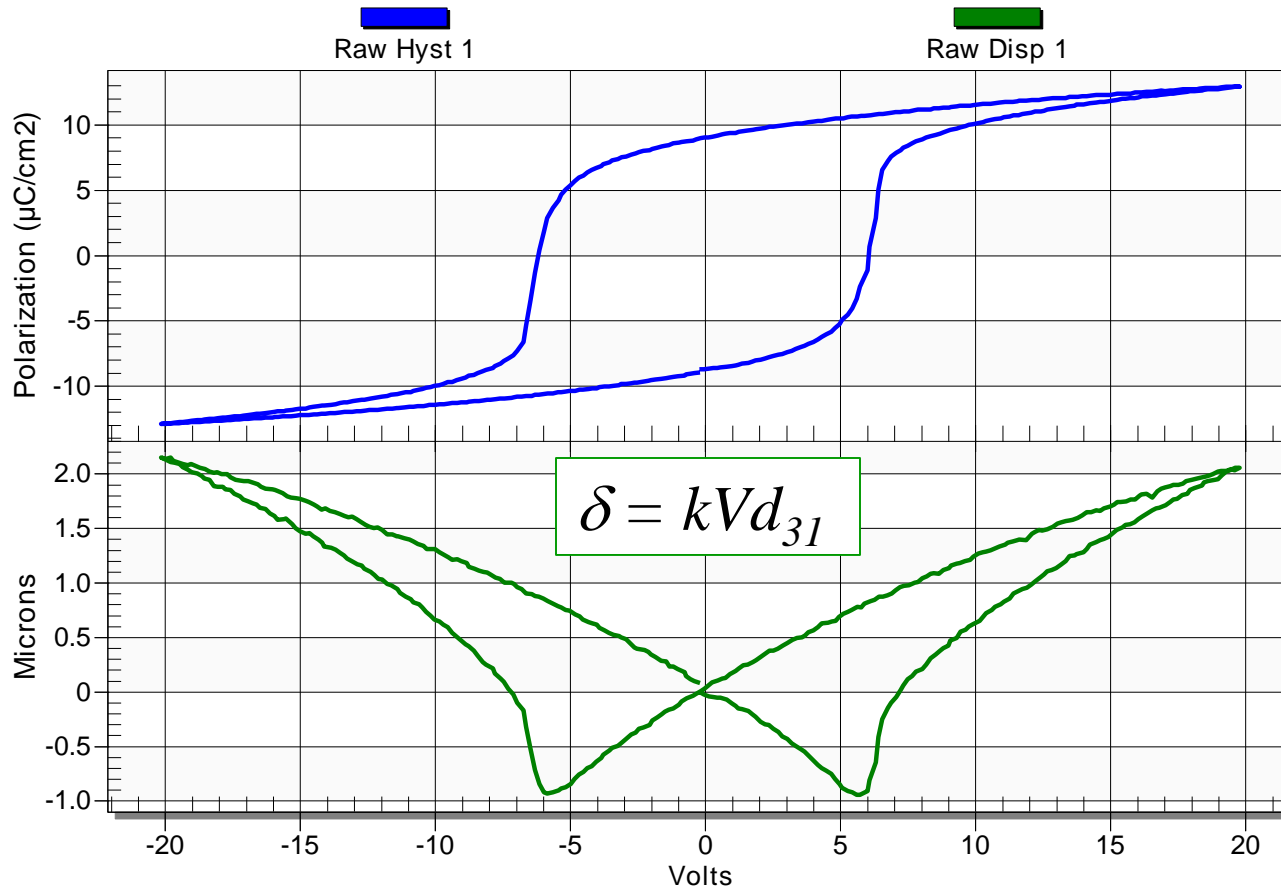


每个晶圆片被切割或锯成适当的宽度和长度来释放悬臂。

经典曲线

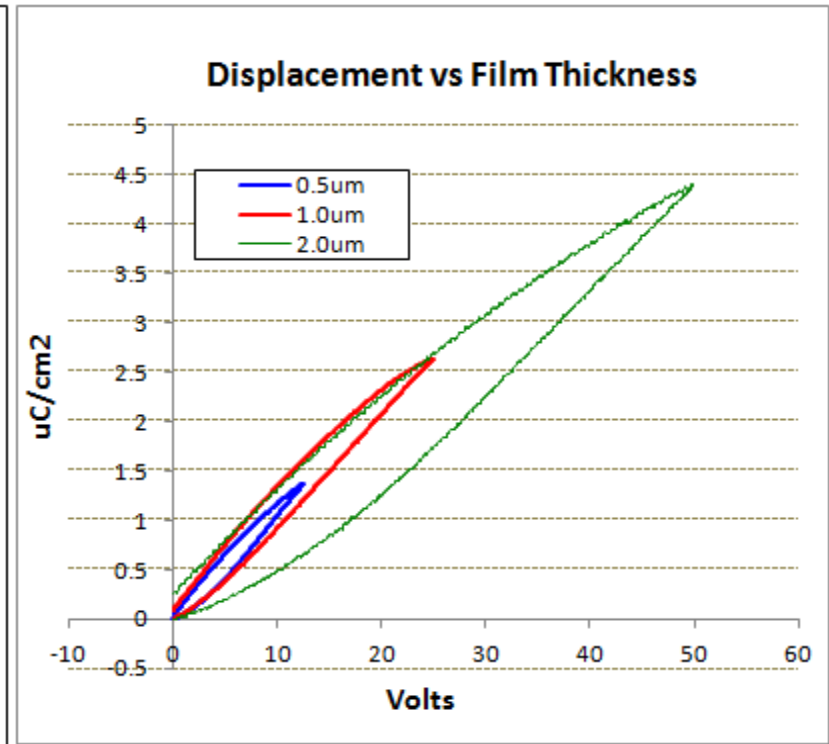
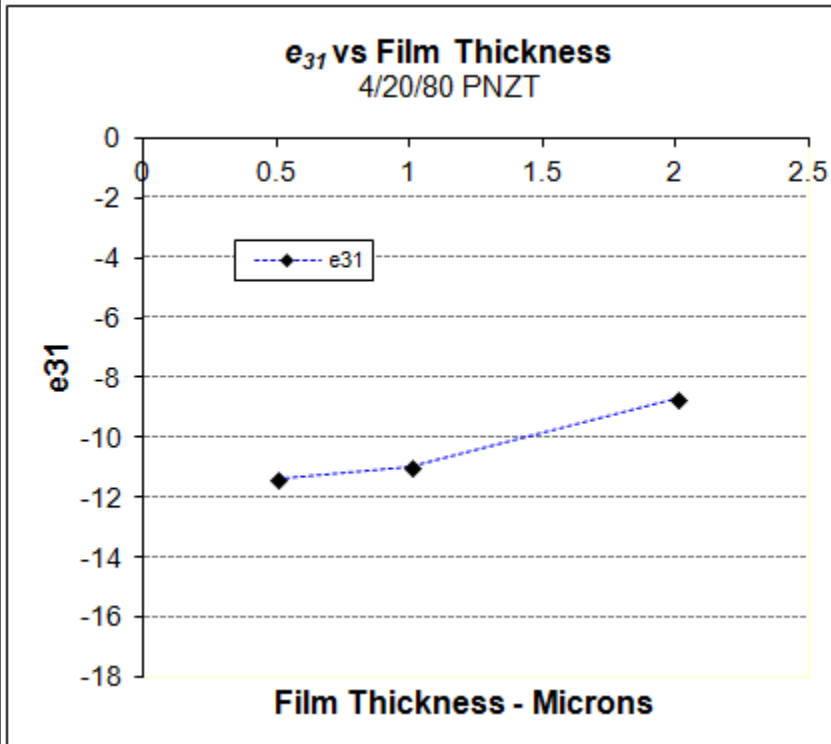
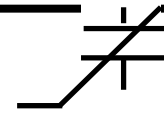


RTI PNZT 1um after 750C anneal



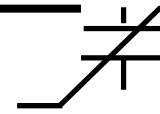
- 极化和尖端位移是并行捕获的
- 由于 $\delta = kVd_{31}$, 然后蝴蝶曲线与薄膜压电响应具有相同的形状

e_{31} VS 厚度

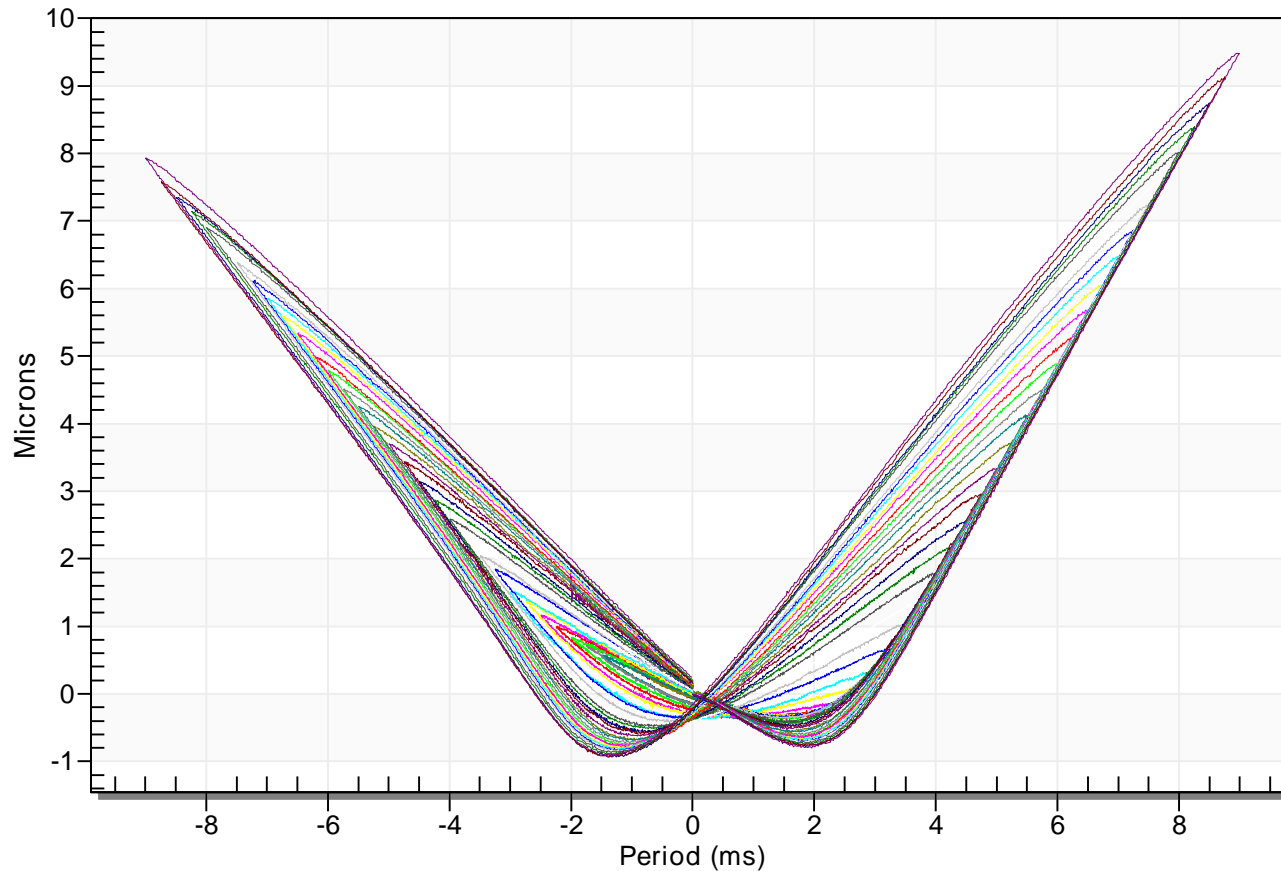


- 由于对极化的顺电性效应， E_{31} 随着电压的增加而降低。

位移 vs 电压

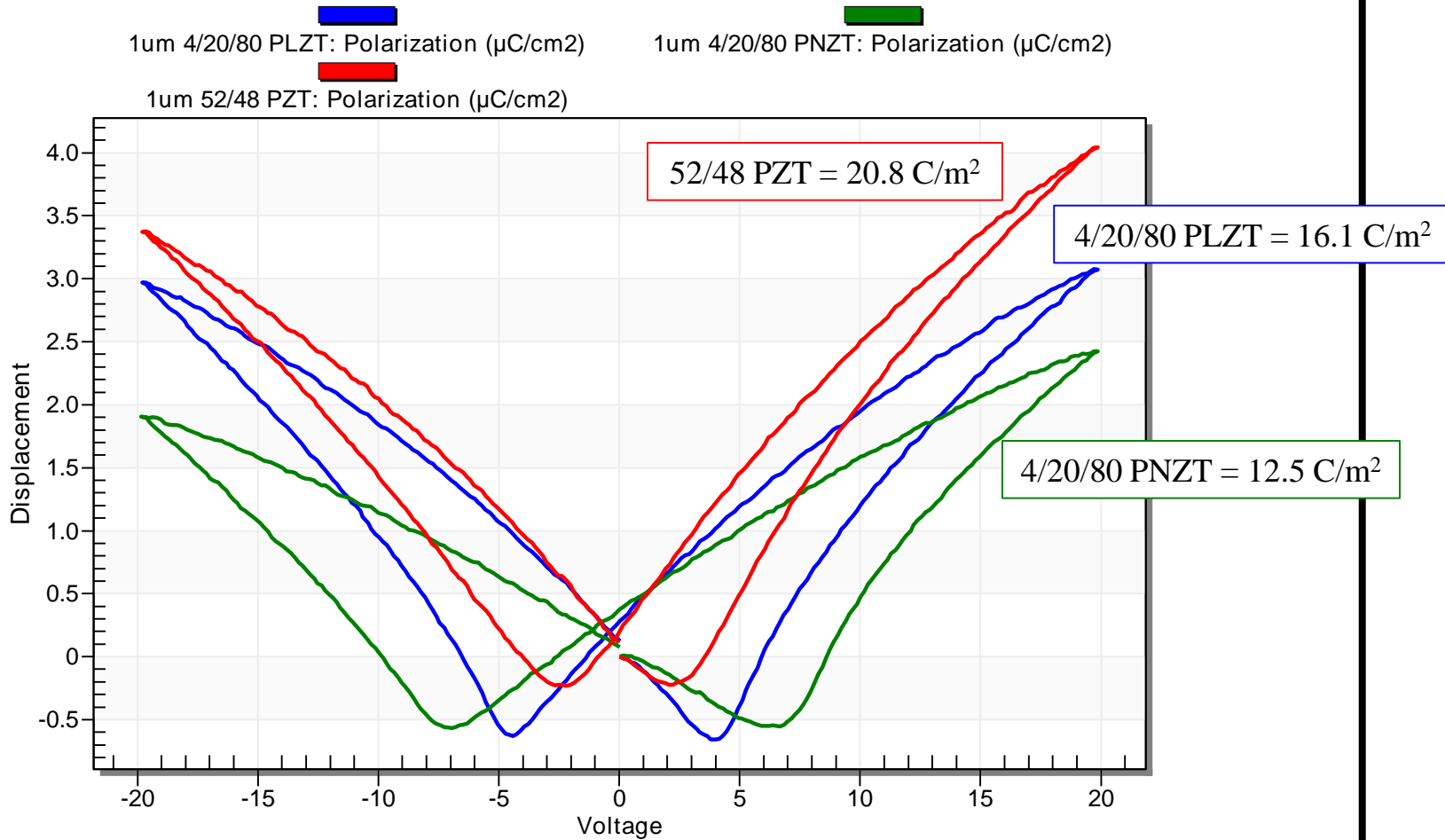
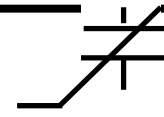


Displacement vs Volts
0.5 μm 52/48 PZT on 75mmx5mm Cantilever



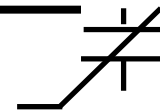
- 0.5 μm 52/48 in 0.25V steps
- 随着剩余极化转换的增加，位移是如何变化的？

不同成分比较



三个组成相同的悬臂和电容器

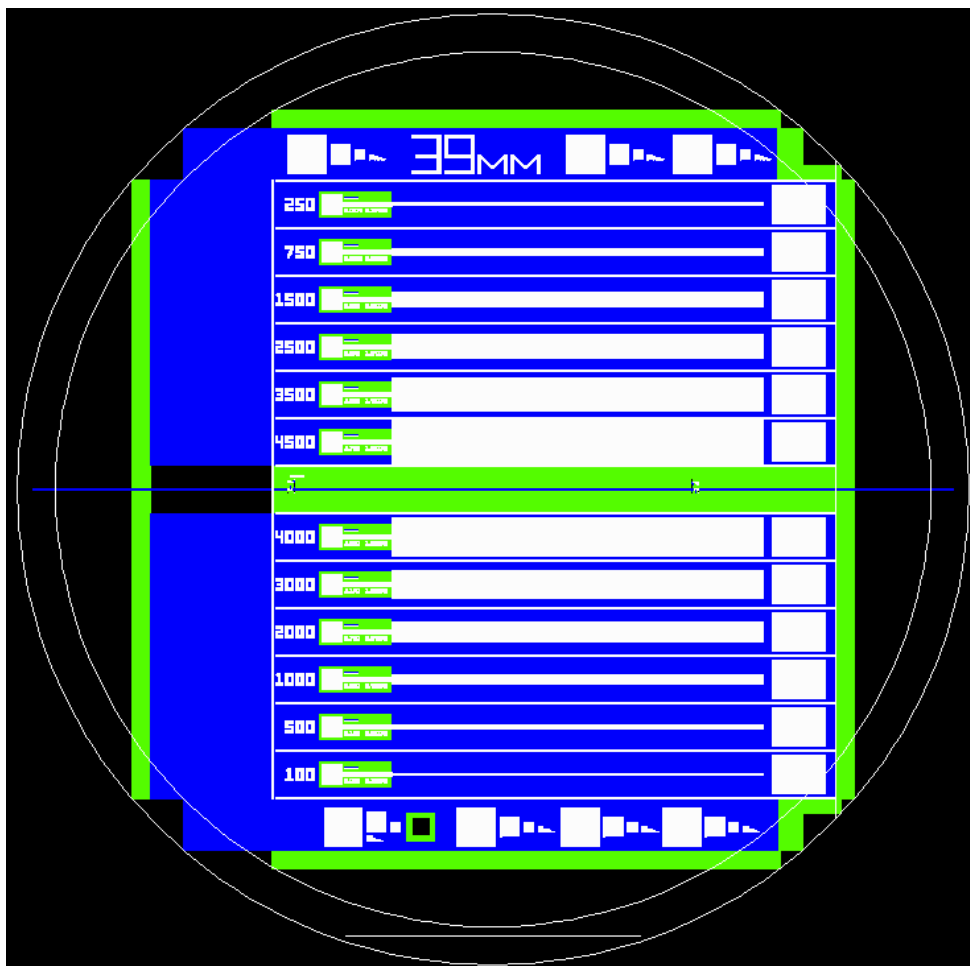
测试建议



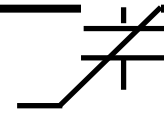
建议:

在同一晶圆片上制造一系列的 e_{31} 悬臂，需具有相同固定悬臂宽度的执行器电容器宽度范围。

测量和比较所有悬臂的 e_{31} 系数。

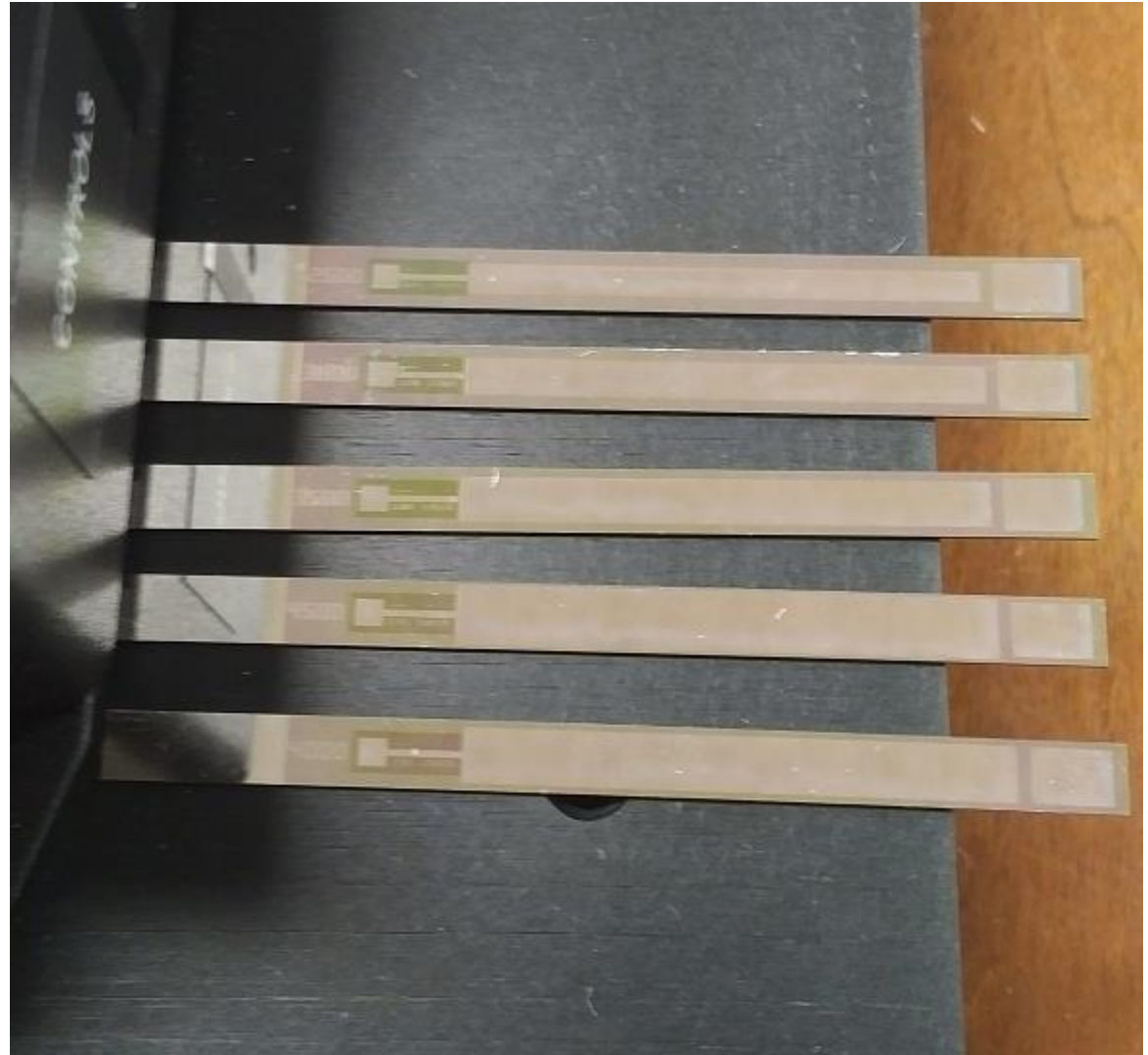


示例

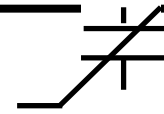


12个悬臂中的5个，
在图像底部展示的是
宽度为 $4500\mu\text{m}$ 的
。

顶部电极宽度从
 $4500\mu\text{m}$ 到 $100\mu\text{m}$ 不
等，分为12个等级
。除此之外，悬臂
是相同的。



2 μm -thick 52/48 PZT



测试流程

在Vision测试定义中，以相同的顺序对每个悬臂执行以下测试：

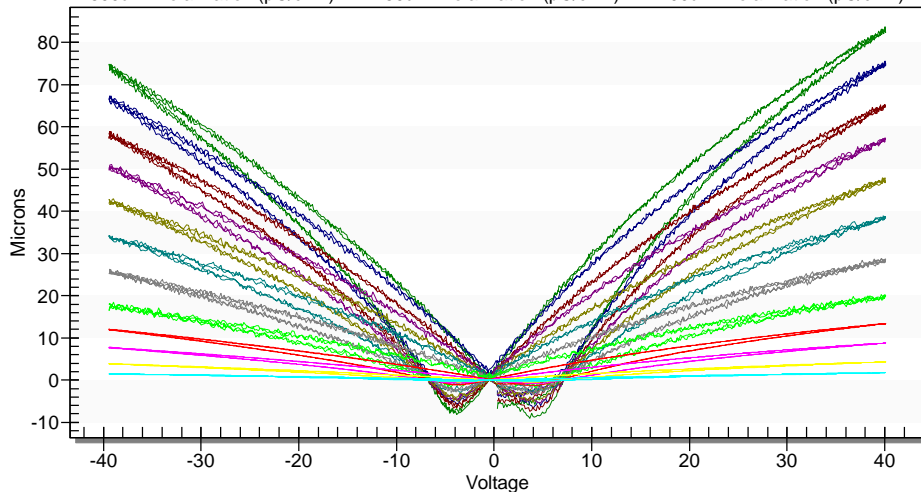
1. 初次40V双极电滞回线。（起初每一个悬臂都没有被碰触过）
2. 40V剩余电滞回线任务
3. 40V单极转换和不转换半循环电滞回线
4. 40V单极不转换的半循环电滞回线
5. 单次5V单极电滞回线
6. 平均16次的5V单极电滞回线
7. 其他回路使用比例电压或恒位移条件

采用平均5V单极驱动器位移计算 e_{3I} ，选择5V振幅以便使最宽的悬臂产生的位移在光子传感器的最佳灵敏度范围内。最窄的电极需要平均。

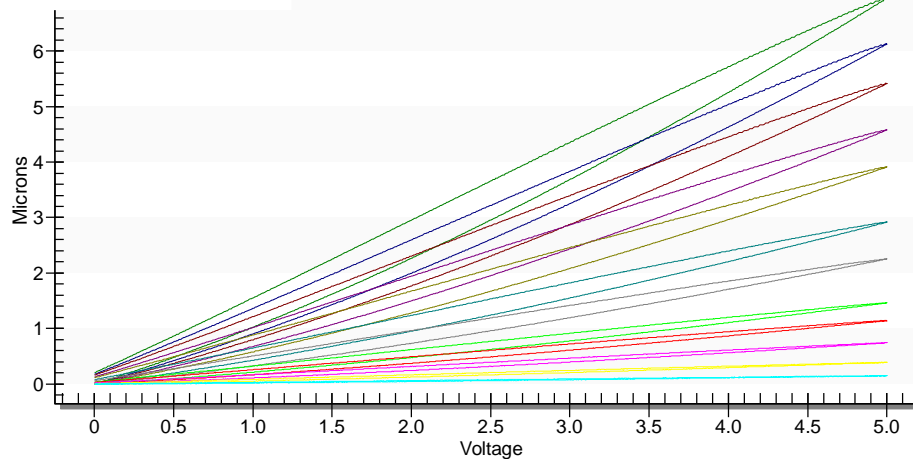
样品响应



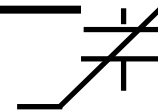
- | | | |
|--|--|--|
| 4500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 4000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 3500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| 3000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 2500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 2000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| 1500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 1000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 750um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| 500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 250um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 100um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |



- | | | |
|-----|--|--|
| cm2 | 4000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 3500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| cm2 | 2500um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 2000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| cm2 | 1000um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 750um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |
| m2 | 250um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) | 100um: Polarization ($\mu\text{C}/\text{cm}^2$) |

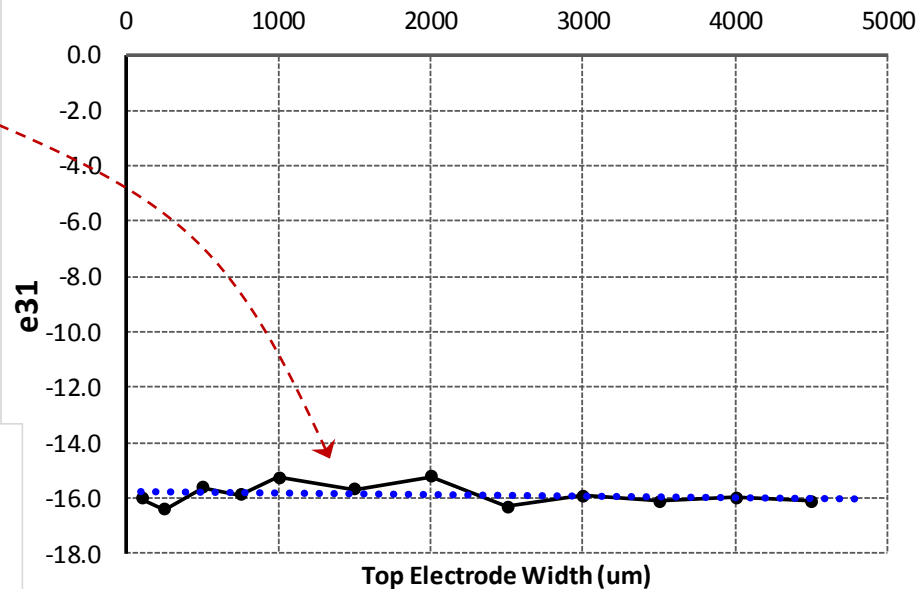


5V 结果

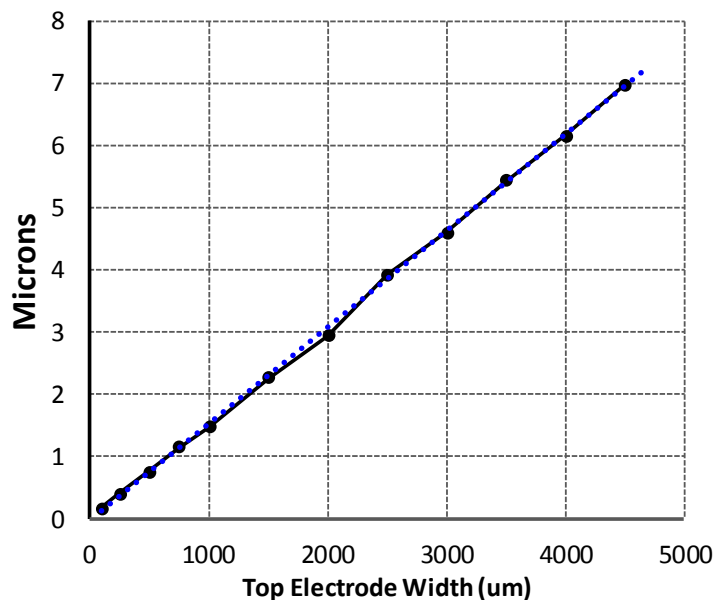


e_{31} 系数的变化是由于晶圆片垂直方向与每个悬臂在晶圆片上的位置的差异造成的

e31 @ Constant 5V across 2 μ m



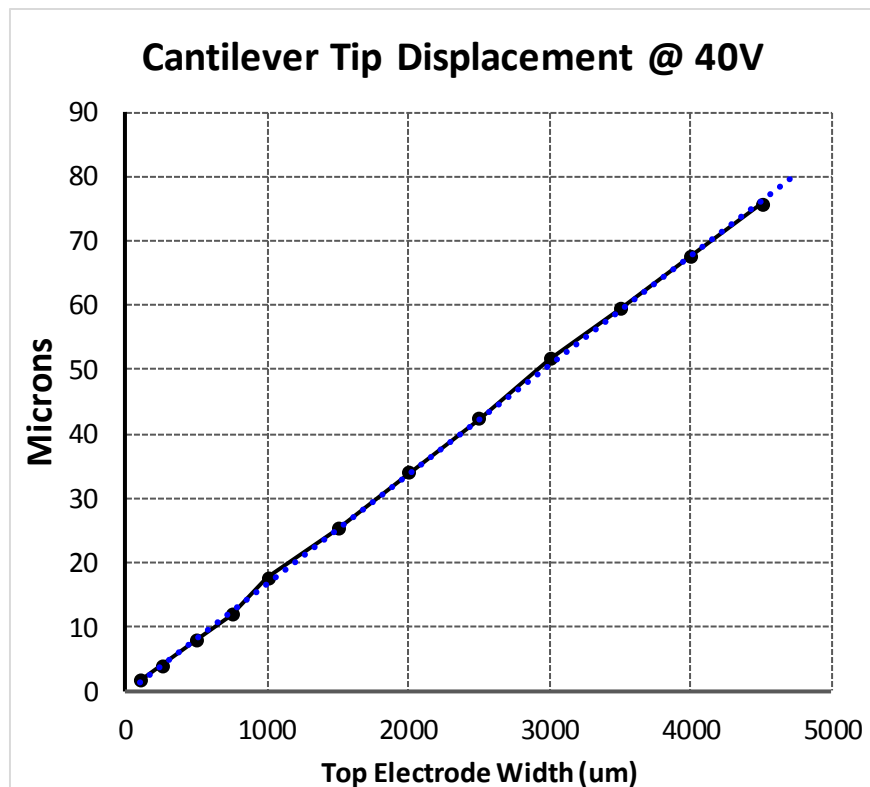
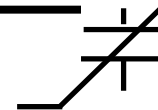
Cantilever Tip Displacement



TE宽度对 e_{31} 的影响在数据中不明显!

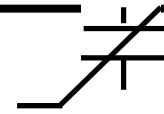
可能是低压造成的?

40V 结果



同样，在40V时，TE宽度对 e_{31} 的影响不明显。

总结



- Radiant的E31夹具简单的表征了铁电薄膜和压电薄膜的 e_{31} 系数。
- 与Radian精密材料分析仪相连的Polytec NLV能够将夹紧的压电或铁电薄膜的 d_{33} 系数测量到小于1埃。
- 小的NLV的斑点尺寸和大的动态范围使它可以直接测量一个压电MEMS结构构件的运动。
- 结合使用，Radiant E31夹具和NLV提供了一个灵敏的过程监测和控制计量工具包。