

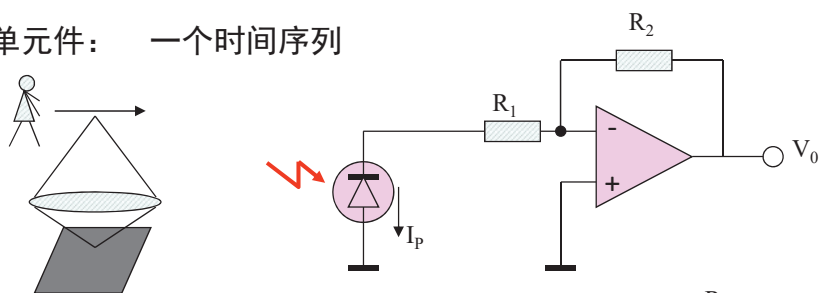
# 阵列传感器

- 多传感器检测的含义
  - 光电阵列传感器：空间滤波=》能做什么？
  - 多麦克风阵列：面对多声源=》能做什么？
  - 超声阵列探头：延迟叠加=》能做什么？
- +
- 已学过的MEMS传感器
  - MEMS传感器制造工艺、优势
  - MEMS热电传感器

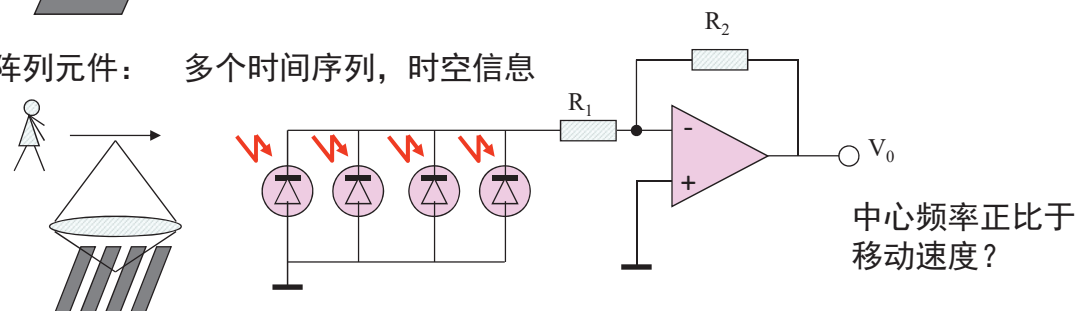
1

## 多传感器阵列检测的意义

(a) 单元件： 一个时间序列



(b) 阵列元件： 多个时间序列，时空信息

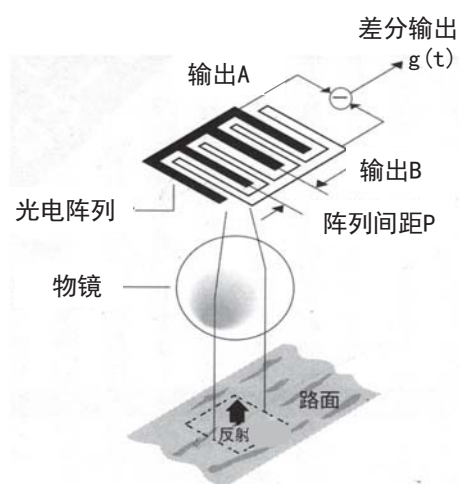
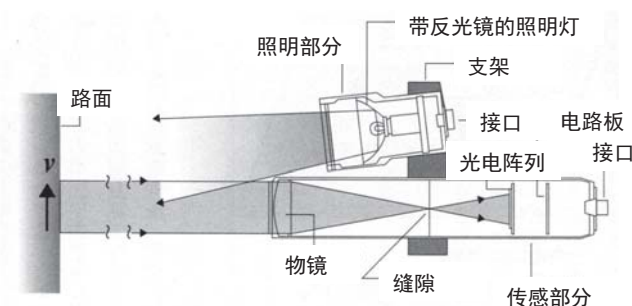


2

# 光电阵列应用—马拉松距离测量仪



Dis.=42.195km  
P=0.5mm  
a:b=1:10



差分输出 $g(t)$ 近似于正弦波，  
其频率正比于移动速度，  
其周期计数表示移动距离。

思考：这种测距法与光栅标尺法和二维码定位法有什么不同？

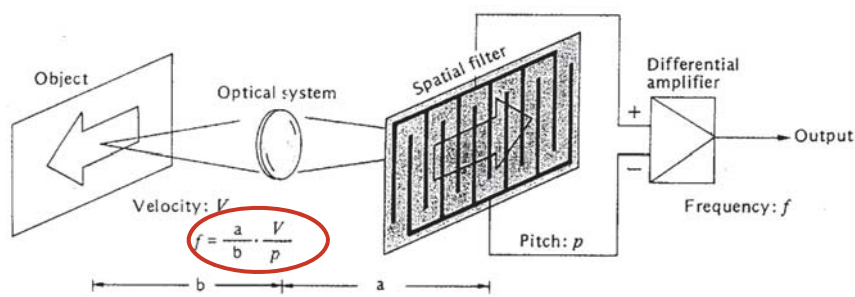
3

## 阵列传感器测距测速原理

光反射系数空间分布  
 $f(x, y, t)$

权重函数  
 $h(x, y)$

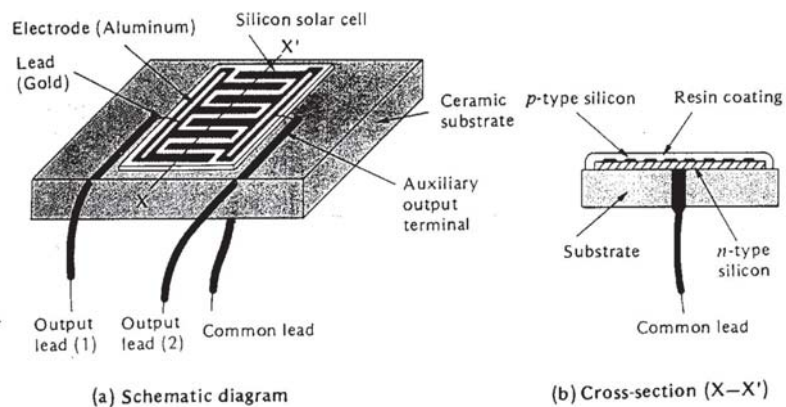
输出信号  
 $g(t)$



阵列传感器有空间频率滤波功能，  
差分输出 $g(t)$ 是窄频带信号。

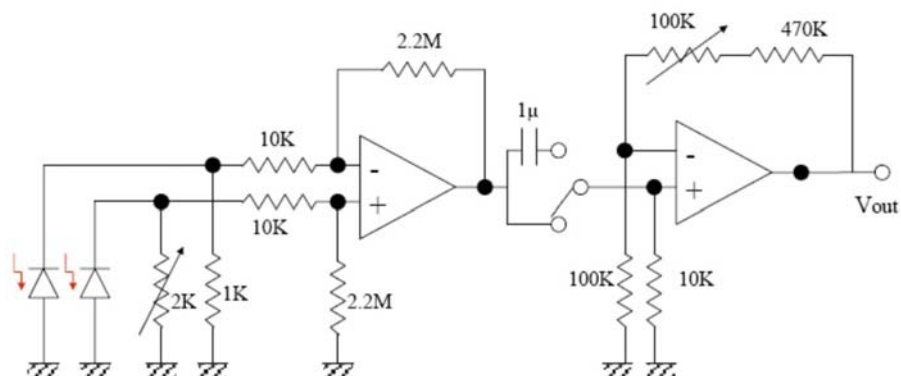
4

# 光电传感器阵列—器件结构



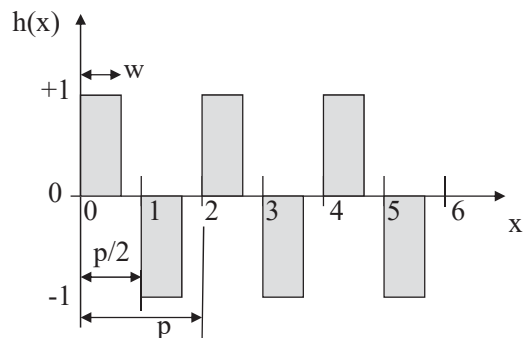
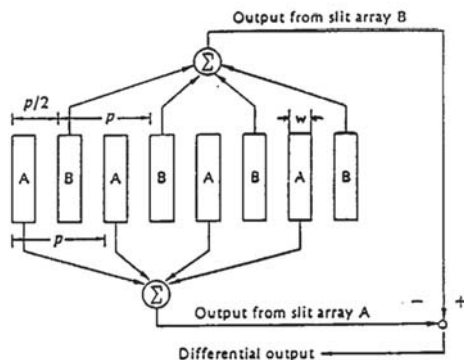
5

# 光电传感器信号放大电路



6

# 阵列传感器的差动输出和权重函数



7

## 权重函数 + 直线移动 =》卷积输出

$$g(t) = \int_a^b dy \int_0^{NP} f(x + Vt, y) h(x, y) dx$$

$$= \int_0^{NP} f(x + Vt) h(x) dx$$

$$f(x) \xrightarrow{\text{空间功率谱}} \Phi(\mu)$$

$$h(x) \xrightarrow{\text{傅立叶变换}} H(\mu)$$

$$g(t) \xrightarrow{\text{时间功率谱}} \Psi(f)$$

$$G(s) = H(s)F(s)$$

$$\Psi(f) = |H(\mu)|^2 \Phi(\mu)$$

$$f = V\mu$$

8

# 求解权重函数的功率谱

$$\begin{aligned}
 H(\mu) &= \int_0^{Np} h(x) \exp(-j2\pi\mu x) dx \\
 &= \int_0^p h_p(x) \exp(-j2\pi\mu x) dx \cdot \sum_{k=1}^N \exp(-j2\pi\mu(k-1)p) \\
 &= H_p(\mu) \cdot H_n(\mu)
 \end{aligned}$$

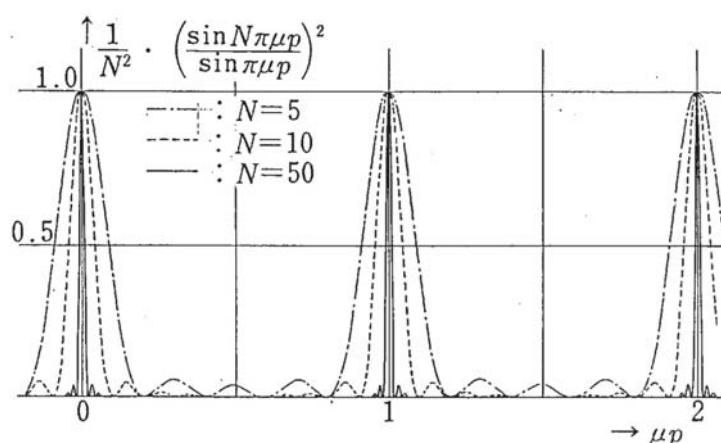
$$|H_p(\mu)|^2 = \frac{1}{(2\pi\mu)^2} (2 \sin \pi\mu w)^2 (2 \sin \pi\mu \frac{p}{2})^2$$

$$|H_n(\mu)|^2 = N^2 \left( \frac{\sin \pi\mu Np}{N \sin \pi\mu p} \right)^2$$

$$\text{提示: } H_p(\mu) = \int_0^w \exp(-j2\pi\mu x) dx - \int_{\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}+w} \exp(-j2\pi\mu x) dx$$

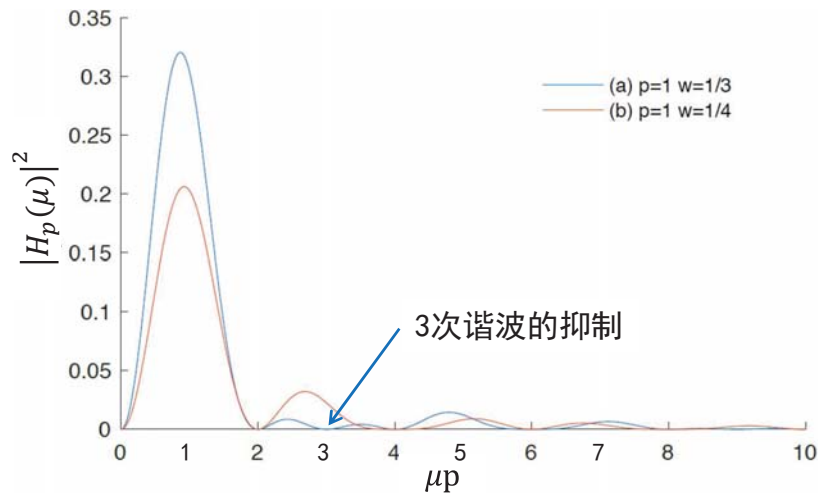
9

## 对应周期重复性的功率谱 $|H_n(\mu)|^2$



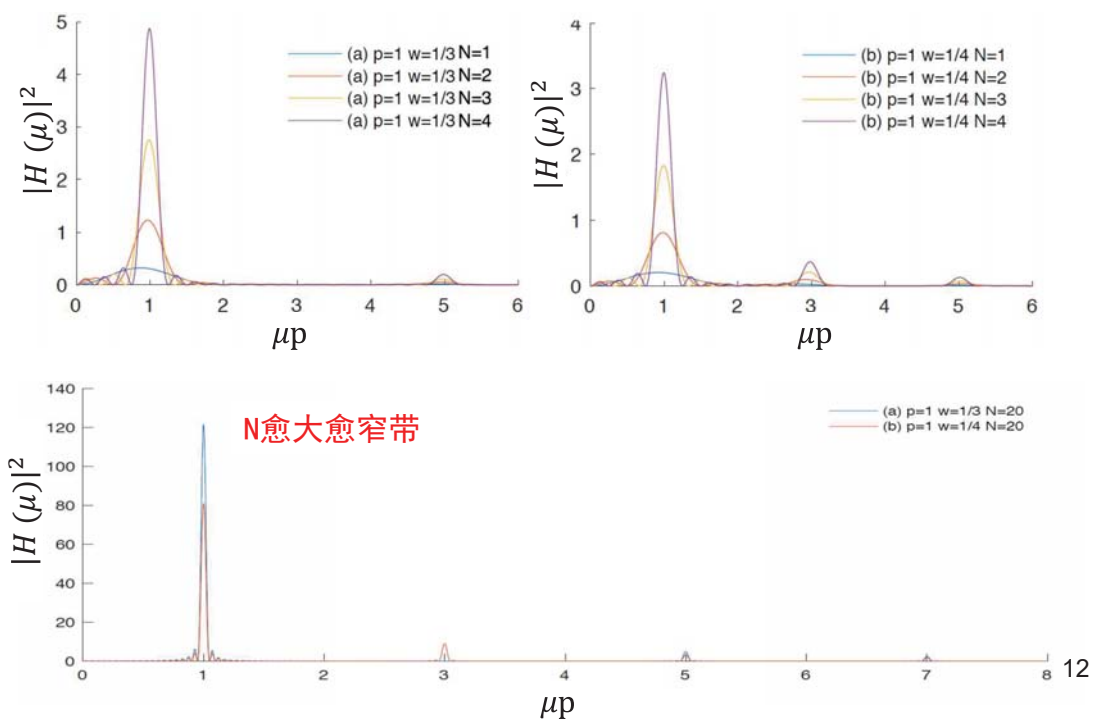
## 对应周期内权重的功率谱 $|H_p(\mu)|^2$

$$|H_p(\mu)|^2 = \frac{1}{(2\pi\mu)^2} (2 \sin \pi\mu w)^2 (2 \sin \pi\mu \frac{p}{2})^2$$



11

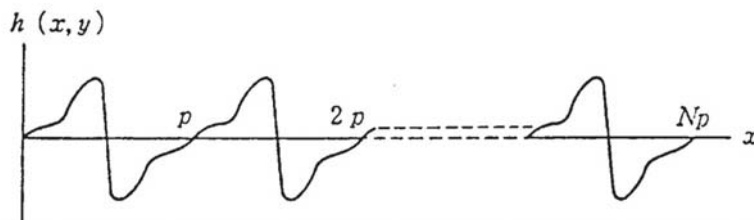
## 阵列传感器的空间滤波特性 $|H(\mu)|^2$



12

## 光电阵列传感器的空间滤波测速测距总结

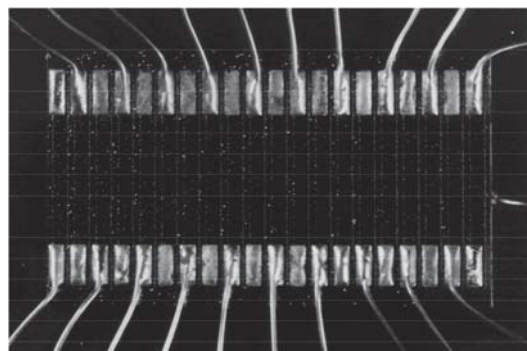
- A 空间滤波频率 $\mu$ 与阵列间距 $p$ 的关系是  $\mu=1/p$ 。
- B 阵列传感器输出信号为中心频率 $f=V/p$ 的窄带信号。
- C 移动物体在传感器平面上的投影每移动一个 $p$ 距离，则输出一个正弦波脉冲。
- D 光电阵列传感器可以用图像传感器模拟实现，但是其并行处理的实时性不能得到实现。
- E 下图周期性差动权重函数不具有窄带空间滤波特性。



提交

13

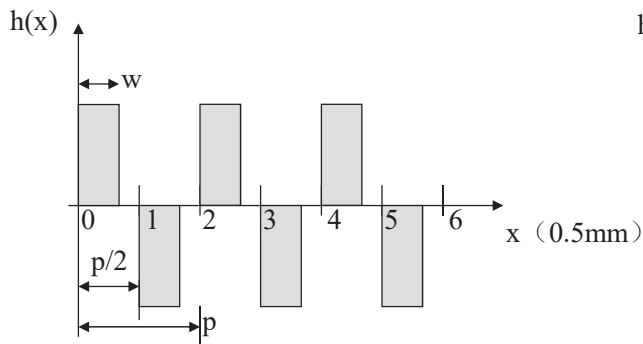
## 可以自由组合的多通道阵列传感器



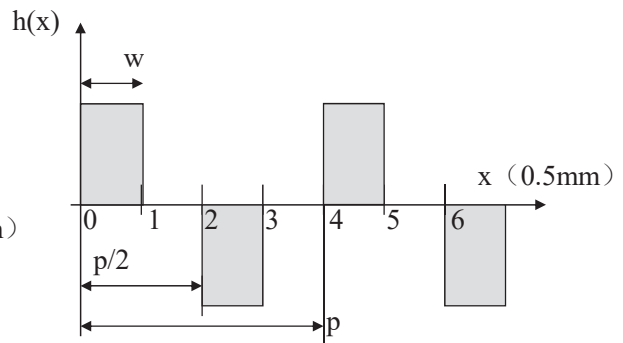
20ch.  
 Slit type photo detector  
 Pitch=0.50mm  
 Width=0.34mm  
 Length=3.00mm  
 Size(10mm\*6mm)

14

# 权重函数及阵元宽度的设计



(a)  $w=p/3$



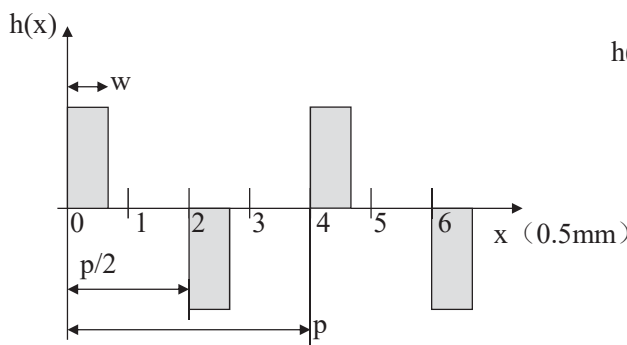
(b)  $w=p/4$

## 思考题

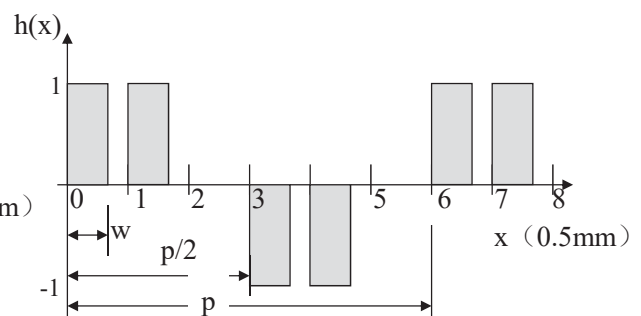
8-1 一周期内正负对称的情况下、 $1/p$ 的偶次谐波可以滤掉；但是，可以滤掉 $1/p$ 的3次谐波的权重函数是上图(a) 还是(b)？推导权重函数功率谱的式子，并画出功率谱图说明此问题。

15

# 权重函数及阵元宽度的设计



(c)



(d)

8-2 比较(c)、(d)两种情况下对于相同移动速度测量输出的不同？在中心频率方面和带宽方面分别考察。

设上述几种阵列传感器的周期数N都相同，取 $N=10$ ； $x$ 轴单位长度为0.5mm。

16



# 阵列传感器的空间滤波原理的总结

- 空间滤波阵列传感器的检测原理：
  1. 敏感元件阵列，差动信号处理，谐波抑止设计；
  2. 权重函数的周期性决定了空间滤波频率的选择性；
  3. 输出窄频带信号(正弦波)，中心频率与移动速度成正比；
  4. 通过被测物的移动将空间分布信息统计为时间变化信号。
- 基于空间滤波原理的测距测速的特点：
  1. 非接触式、检测不规则(可以是随机变化的)物体的移动速度
  2. 可以应用在光、热、电、声等阵列传感器中
  3. 与图像检测技术的区别在于：真正的实时并行处理

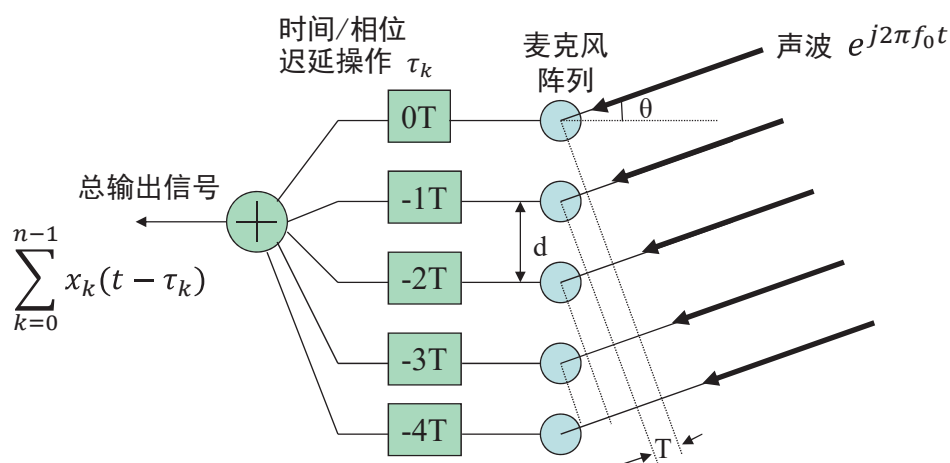
17

## 麦克风阵列传感器

- 麦克风阵列控制拾音指向性
- 基于麦克风阵列的声源定位分析
- 超声阵列探头的探伤成像
- 基于多麦克风的噪音成分/强度分布特性分析

18

# 麦克风阵列传感器与指向控制



麦克风k输出:  

$$x_k(t) = e^{-j2\pi f_0 kT} \cdot e^{j2\pi f_0 t} + n_k(t)$$

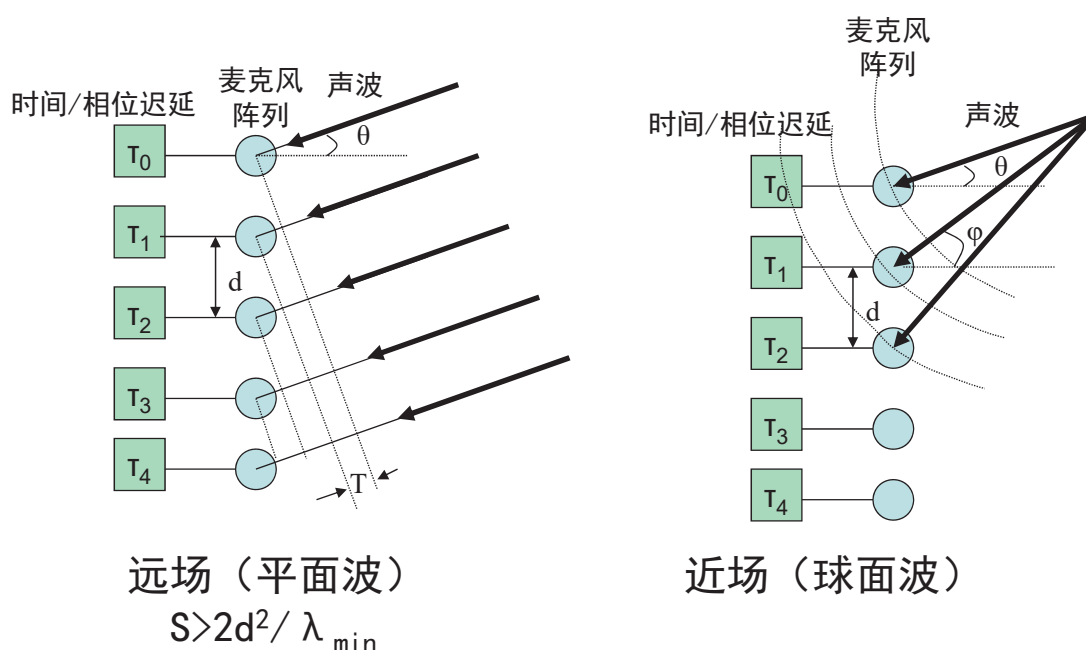
## 思考题

8-3 上图中，设 $f_0=1\text{kHz}$ ， $d=3.4\text{cm}$ ， $\theta=30^\circ$ ，求时延 $T$ 和相位延迟 $\Phi$ 。

$$T = d \sin \theta / c, \quad \varphi = 2\pi f_0 d \sin \theta / c$$

19

# 声波的近场及远场传播模型



20

# 声源定位模型

- 设有**M个声源**（方向角  $\theta_m$ ），**N个麦克**的线性传感器阵列，则**远场平稳窄带**信号的传感器输出模型：

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_N(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{-j\omega_0\tau_{21}} & e^{-j\omega_0\tau_{22}} & \cdots & e^{-j\omega_0\tau_{2M}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\omega_0\tau_{N1}} & e^{-j\omega_0\tau_{N2}} & \cdots & e^{-j\omega_0\tau_{NM}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_M(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ n_2(t) \\ \vdots \\ n_N(t) \end{bmatrix}$$

即

$$X(t) = A(\theta)S(t) + N(t)$$

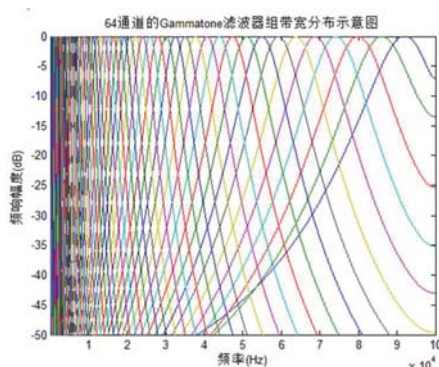
$$A(\theta) = [\mathbf{a}(\theta_1) \quad \mathbf{a}(\theta_2) \quad \cdots \quad \mathbf{a}(\theta_M)]$$

$$\mathbf{a}(\theta_m) = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\omega_0 \frac{d \sin(\theta_m)}{c}} & \cdots & e^{-j\omega_0 \frac{(N-1)d \sin(\theta_m)}{c}} \end{bmatrix}^T$$

- 非平稳宽带的语音信号**要经过加窗分帧和带通分频，分解成上述模型问题，构造**协方差矩阵求其特征值**，估计声源方位角度。

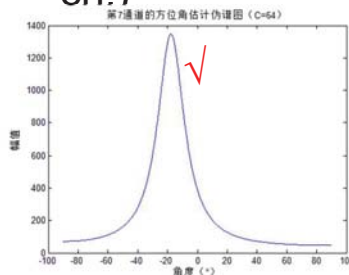
## 多声源定位算法和结果

- MUSIC算法** (Multiple Signal Classification) 解决多声源定位
- 滤波器组将信号频率分段，多通道上做**子空间分解**
- 不同通道的声源位置估计结果：有伪结果，需要融合处理

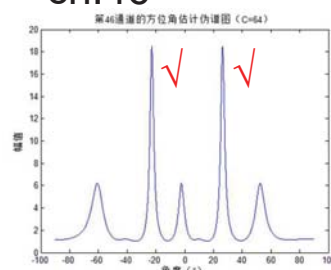


麦克风阵列：同步数据采集

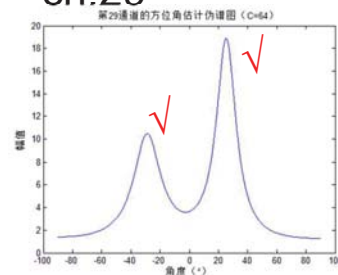
ch.7



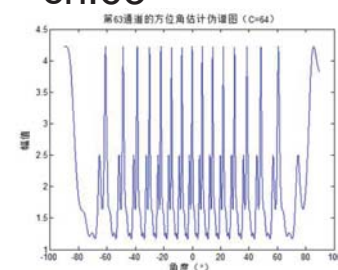
ch.46



ch.29

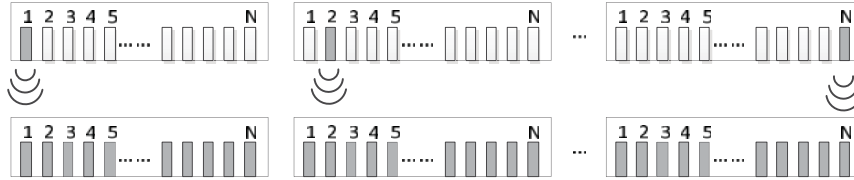


ch.63

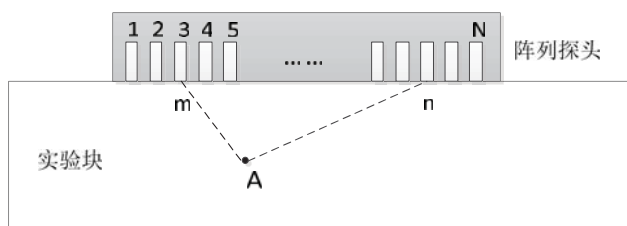


# 超声阵列探头和探伤

- 全矩阵方法：某一阵元发射其他接收，循环进行，共得到 $N \times N$ 个时域信号



- 延时叠加成像：



延时：

$$l_m = \sqrt{(x_A - x_m)^2 + y_A^2}$$

$$l_n = \sqrt{(x_A - x_n)^2 + y_A^2}$$

$$t_{\text{delay}} = t_m + t_n = \frac{l_m + l_n}{c}$$

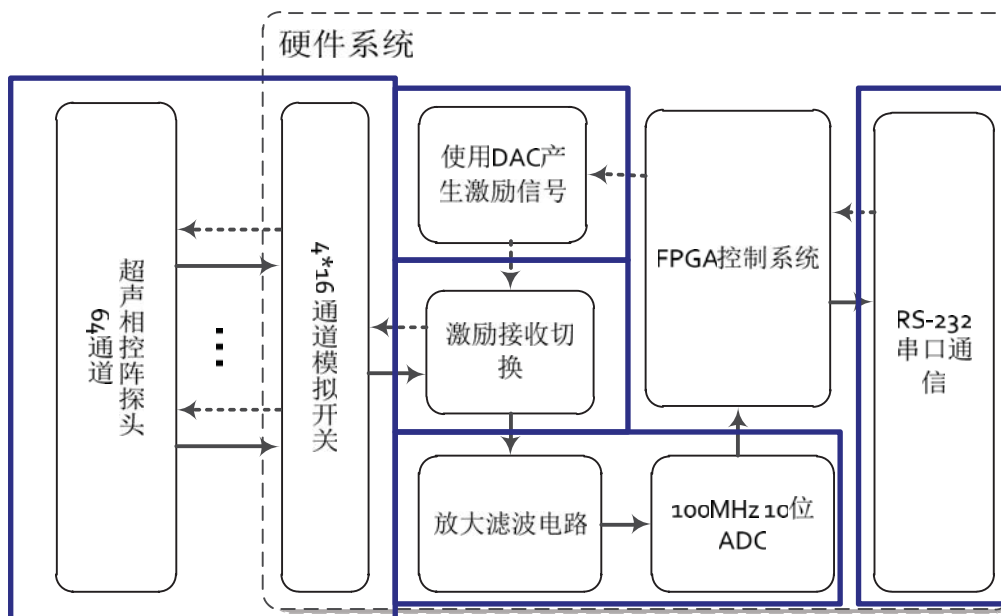
叠加：

$$W_A = \sum_{i=1}^{N^2} \text{Shift}(W_i, t_{\text{delay}_i})$$

$$V_A = \max(|W_A|)$$

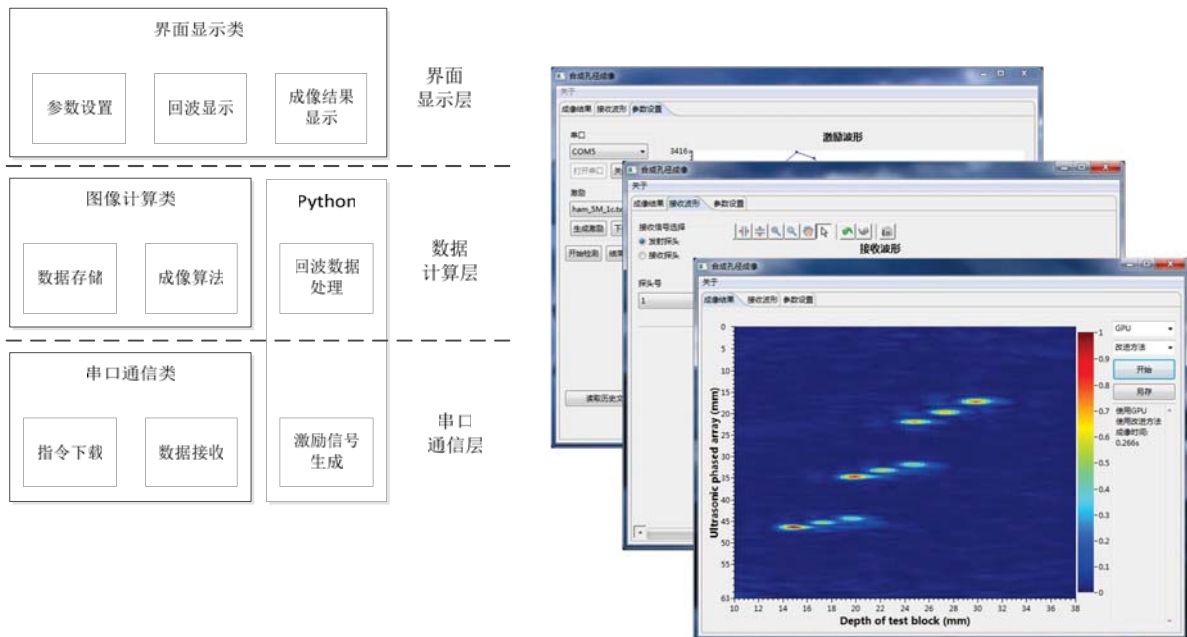
## 硬件系统设计

- 超声阵列探头：5MHz，64阵元，1mm间距
- 硬件电路：激励/接收电路各1路，**64通道模拟开关**，FPGA控制；100MHz 12bit DAC生成激励波形，10bit ADC接收转换



# 全矩阵聚焦探伤系统

- 三层结构：硬件控制，数据处理及成像，用户界面显示



## 全矩阵成像（Full Matrix Capture）

- 全矩阵成像：应用希尔伯特变换构造复信号进行叠加
- 希尔伯特变换：信号  $s(t)$  与  $1/\pi t$  的卷积

$$\hat{s}(t) = h(t) * s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(t - \tau) d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

- 原信号与其希尔伯特变换组成复信号：

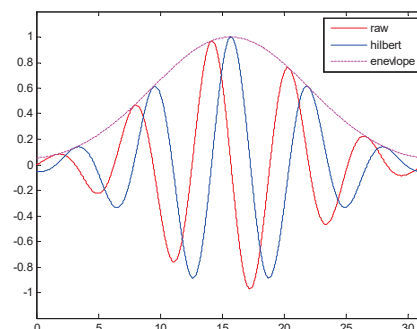
$$\tilde{s}(t) = s(t) + j\hat{s}(t)$$

- 先叠加后取模的方法有抑制缺陷周围幅度的作用

- 希尔伯特变换的包络提取：

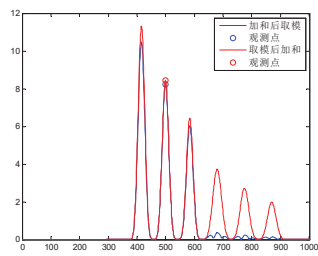
$$|\tilde{s}(t)| = \sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}$$

$$\arg \tilde{s}(t) = \arctan\left(\frac{\hat{s}(t)}{s(t)}\right)$$

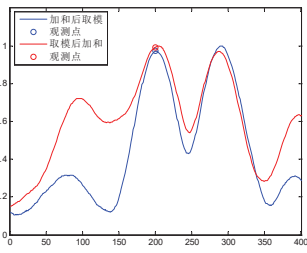


# 叠加方法的成像效果比较

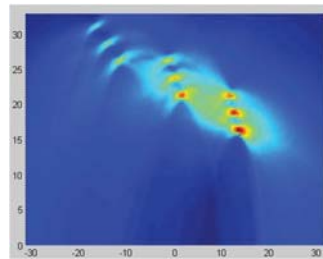
仿真：Field II工具包； 实验：9孔缺陷阵列探头回波数据；



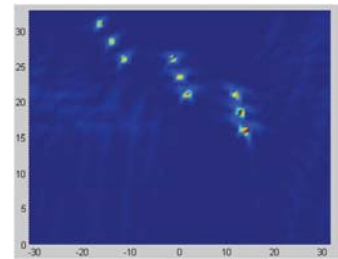
波形仿真结果



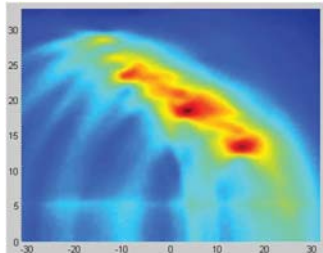
波形实验结果



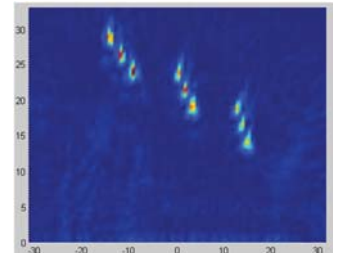
(a) 取模后叠加 (仿真数据)



(b) 叠加后取模 (仿真数据)



(c) 取模后叠加 (实验数据)



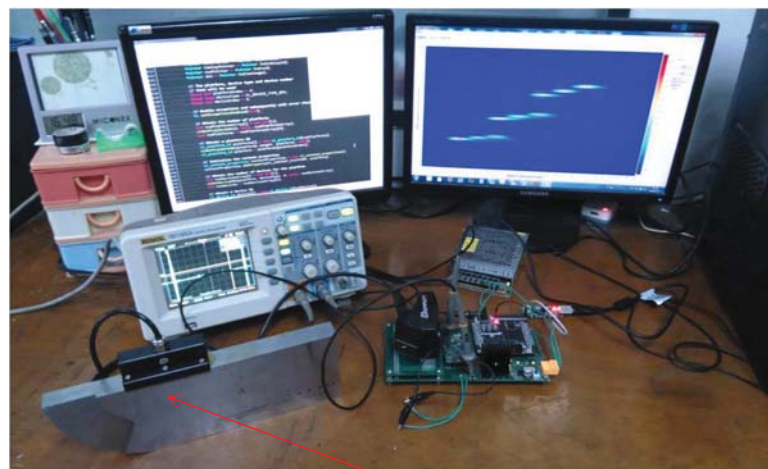
(d) 叠加后取模 (实验数据)

=》先叠加后取模的叠加方式成像效果更好。

27

## 超声阵列探头探伤实验系统

- 探头, 不锈钢标准测试样块,
- 电路板, 串口模块, 计算机,
- 软件, 成像



预埋缺陷的碳纤维复合测试板





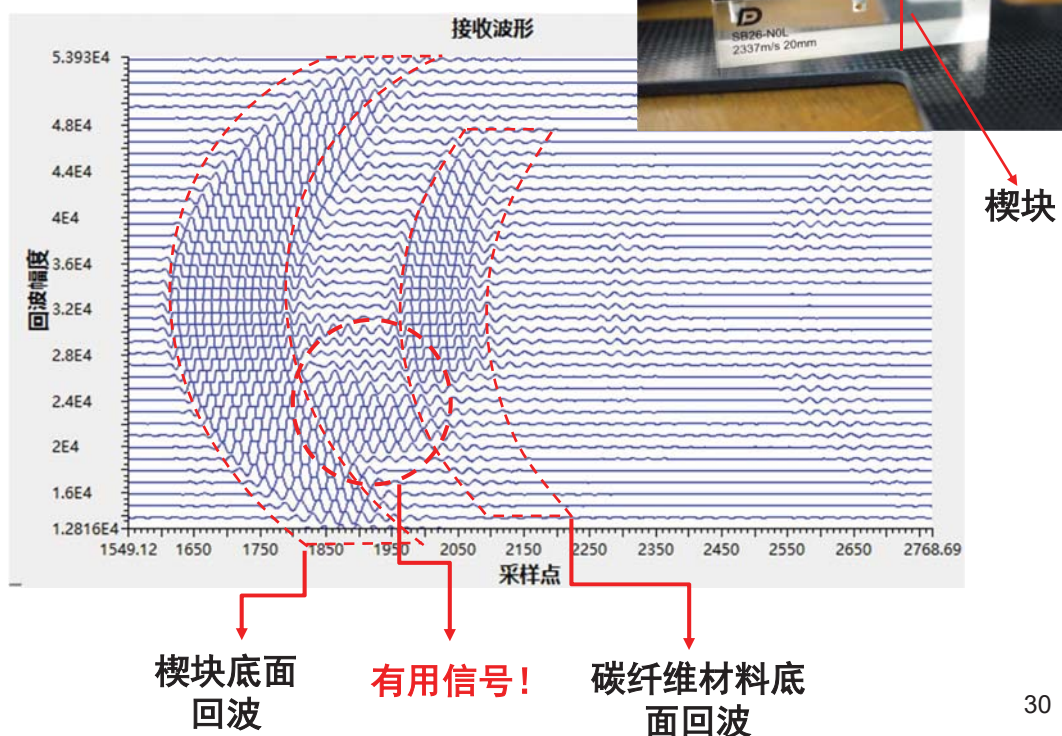
## Hilbert变换在延时叠加成像中的作用

- A 实值函数 $s(t)$ 的Hilbert变换是 $s(t)$ 与 $1/(\pi t)$ 进行卷积得到的 $\hat{s}(t)$ 。
- B  $\hat{s}(t)$ 与 $s(t)$ 相比较，幅度相同，相位滞后 $90^\circ$ 。
- C 利用Hilbert变换求包络的方法是取复函数的模。
- D 先取模后叠加的叠加方式缺陷成像分辨率更高。

提交

29

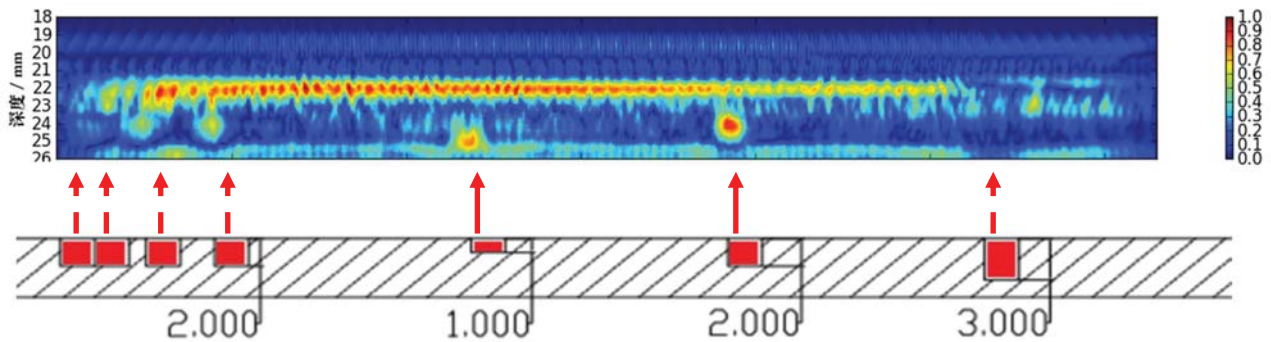
## 采集的回波波形



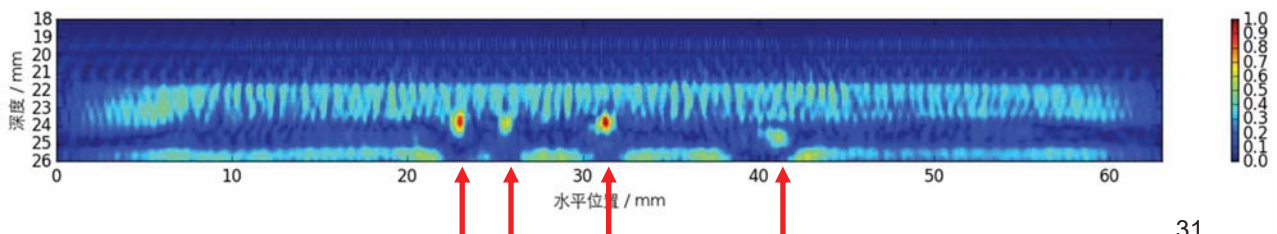
30

# 底面和侧面孔洞成像

## ➤ 底面2mm孔洞7个



## ➤ 侧面1.3mm孔洞4个



31

## Boeing Measures Reduced Aircraft Noise Emissions with NI PXI and LabVIEW

- Data from more than 600 ground-based microphones is collected and analyzed to determine the effectiveness of noise reduction technologies.



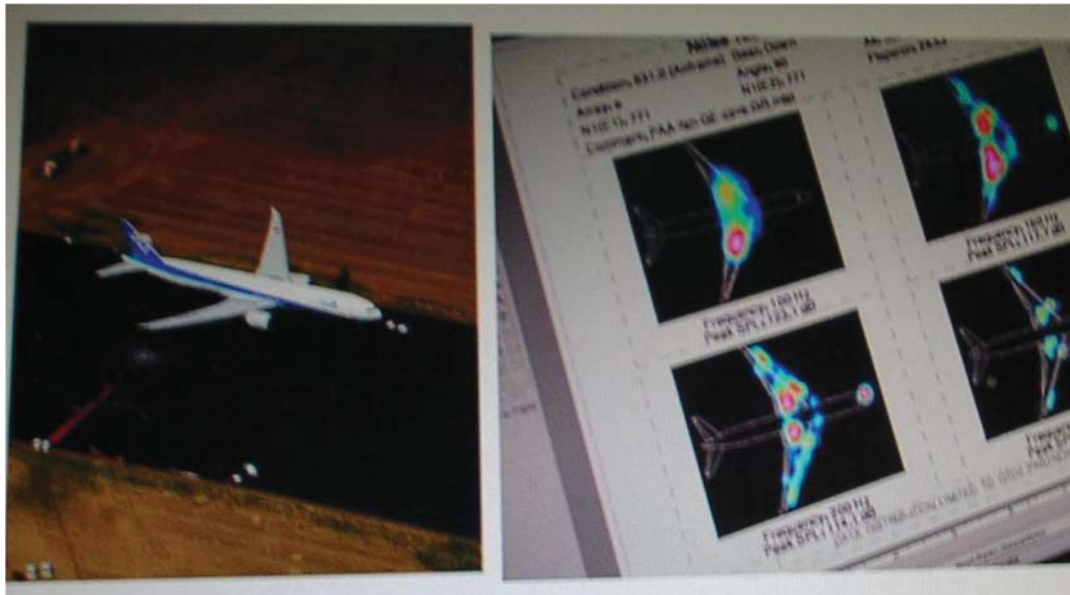
32



# Aircraft Noise Images

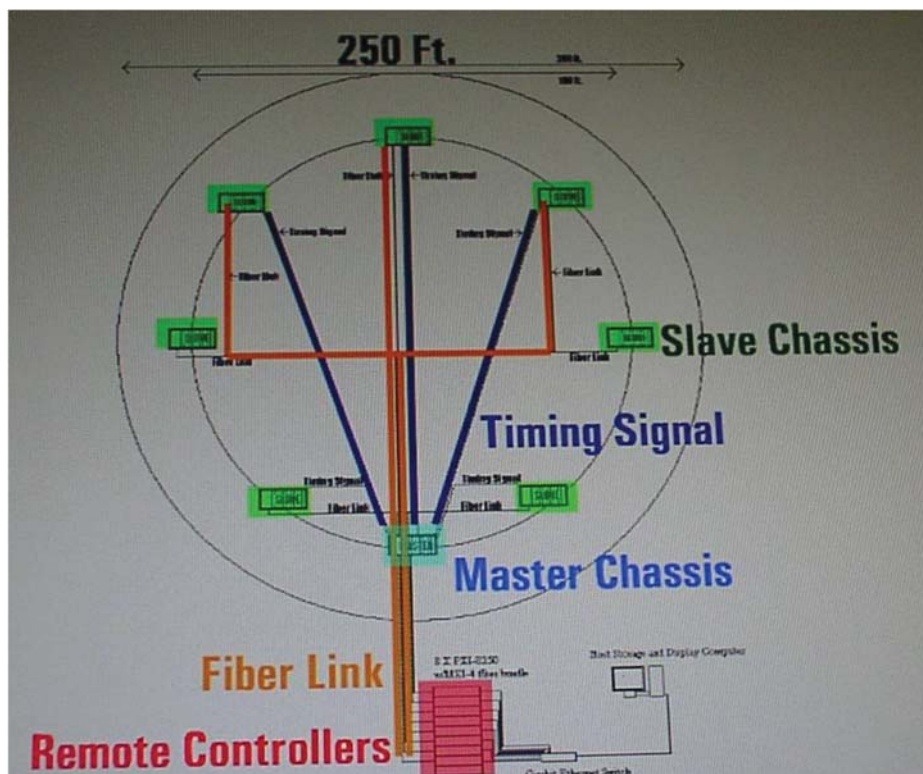
Flyby array (448-800 channels)

Noise maps



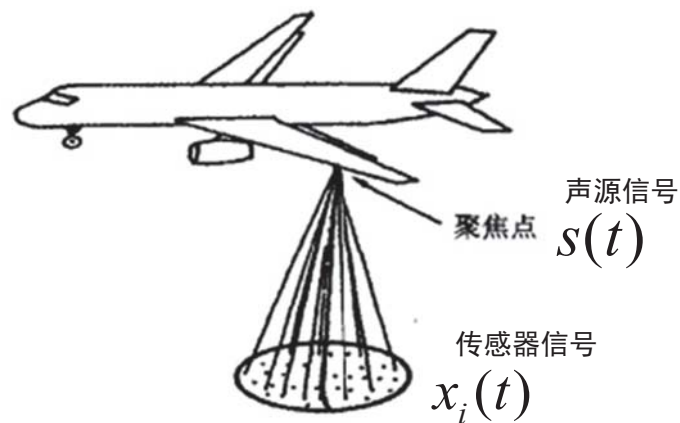
33

## Single Server and Multiclient Architecture Diagram



34

# 多麦克风信号的相移和去噪



第*i*个麦克风输出信号

$$x_i(t) = s(t - \tau_i) + n_i(t)$$

35

## Key Technologies on Assessing the effectiveness of noise reduction

- Distributed array  
(250 foot × 300 foot, flew over in 6 minutes)
- **Maintain tight timing and synchronization**
- Match 448 channels spread over 8 chassis within one degree at 93kHz
- Phased array data acquisition and storing
- Advanced in PC based instrumentation
- Flexible software tools for array configurations
- **Noise: where, what frequencies, how loud**
- Overlaying the noise level maps with a visual image

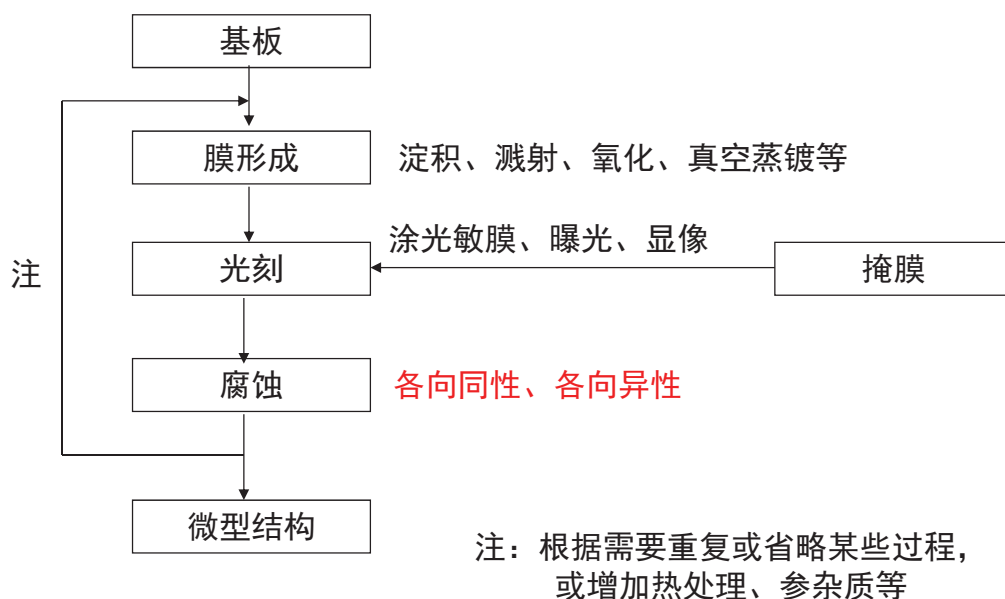
36

# MEMS传感器

- MEMS（Micro-electromechanical Systems）  
微机电系统：  
将机械结构嵌入到半导体芯片中的跨学科技术。
- 主要的MEMS传感器：  
1980-压力传感器（扩散硅电阻应变膜片）  
2000-加速度传感器（叉指电容，压电，扩散硅电阻，热电）  
角速度传感器（叉指电容，音叉振动与压电等）  
MEMS麦克风等
- MEMS传感器小型、轻量，能耗低；敏感、响应快；  
方便实现冗余设计，确保高可靠性。

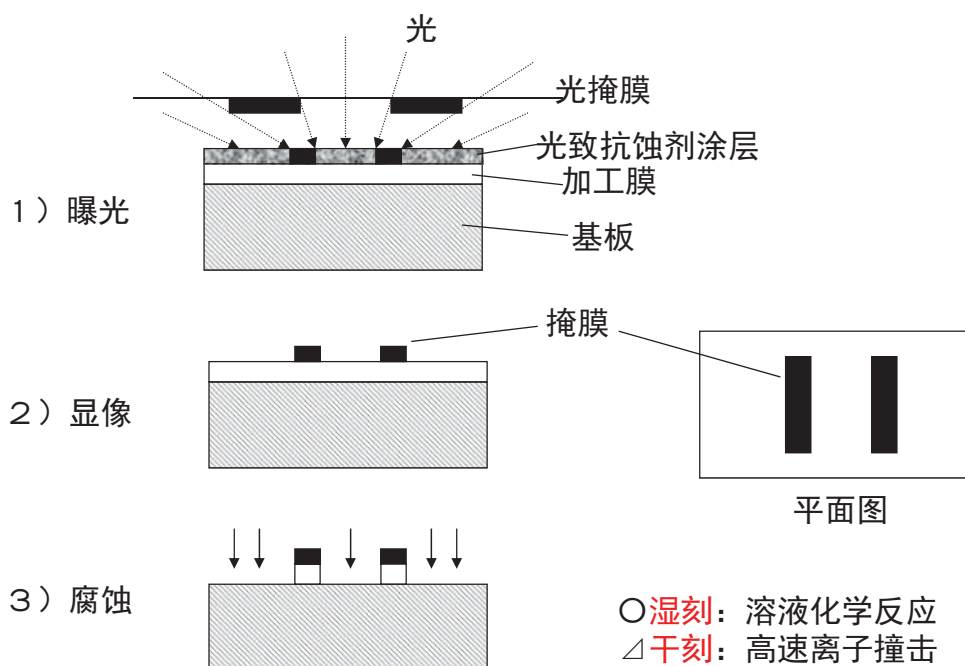
37

## MEMS传感器加工工艺



38

# 蚀刻（ Etching ） 加工方法



39

## 湿刻（Wet Etching）

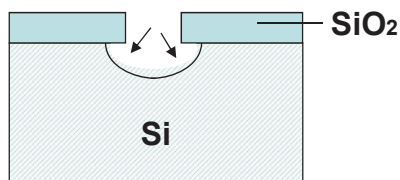
溶液成分	各向同性或异性	掩膜材料
HF + HNO <sub>3</sub> + CH <sub>3</sub> COOH (or H <sub>2</sub> O)	各向同性	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , Au, SiO <sub>2</sub>
EDP (Ethylene diamine + Pyrocatechol + Water)	各向异性	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Au, Cr, Ag, Cu, Ta等
◎ KOH + isopropyl alcohol + water	各向异性	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Hydrazine + isopropyl alcohol + water	各向异性	SiO <sub>2</sub> , Al

KOH: Si和SiO<sub>2</sub>的蚀刻比为100: 1, 蚀刻1μm的Si需要10nm 以上的SiO<sub>2</sub>

40

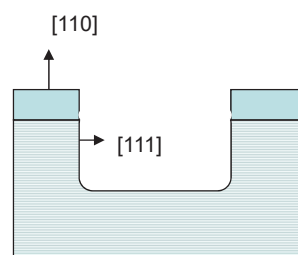
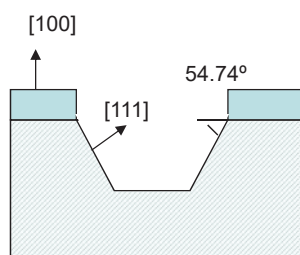
# 各向同性与异性腐蚀的不同

在 $[100]$ 、 $[110]$ 方向上腐蚀快， $[111]$ 上腐蚀慢



各向同性腐蚀：  
无法保证形状

各向异性：  
在特定的结晶方向上湿刻进展速度不一样

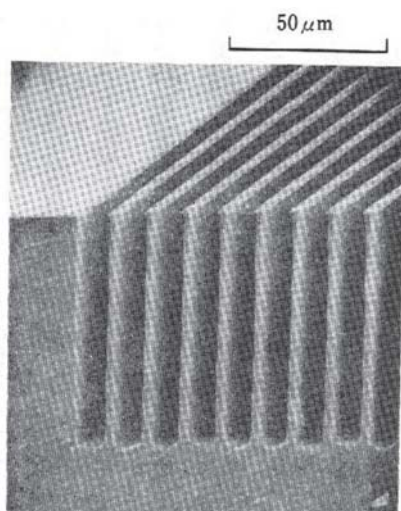


各向异性腐蚀：形状规整刻蚀

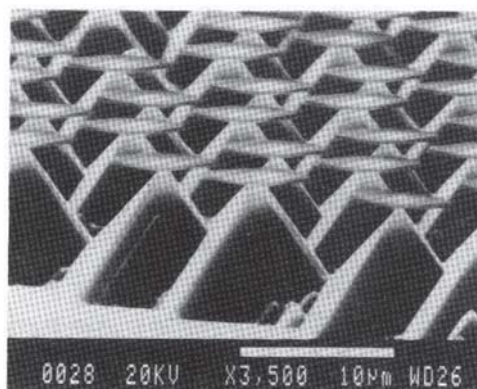
41

## 利用各向异性腐蚀的结构加工

在 $[111]$ 面上腐蚀慢



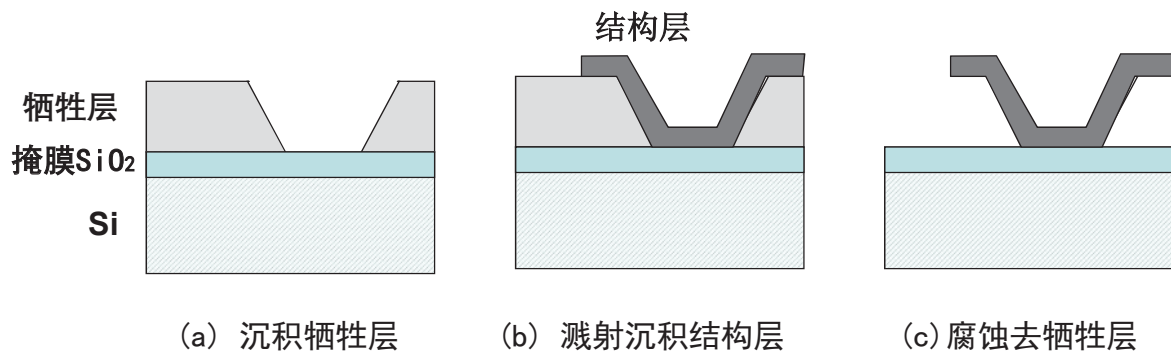
表面110面的硅基板：  
深槽加工，111面为垂直壁



表面100面的硅基板：  
金字塔结构加工，111面围成V形沟槽

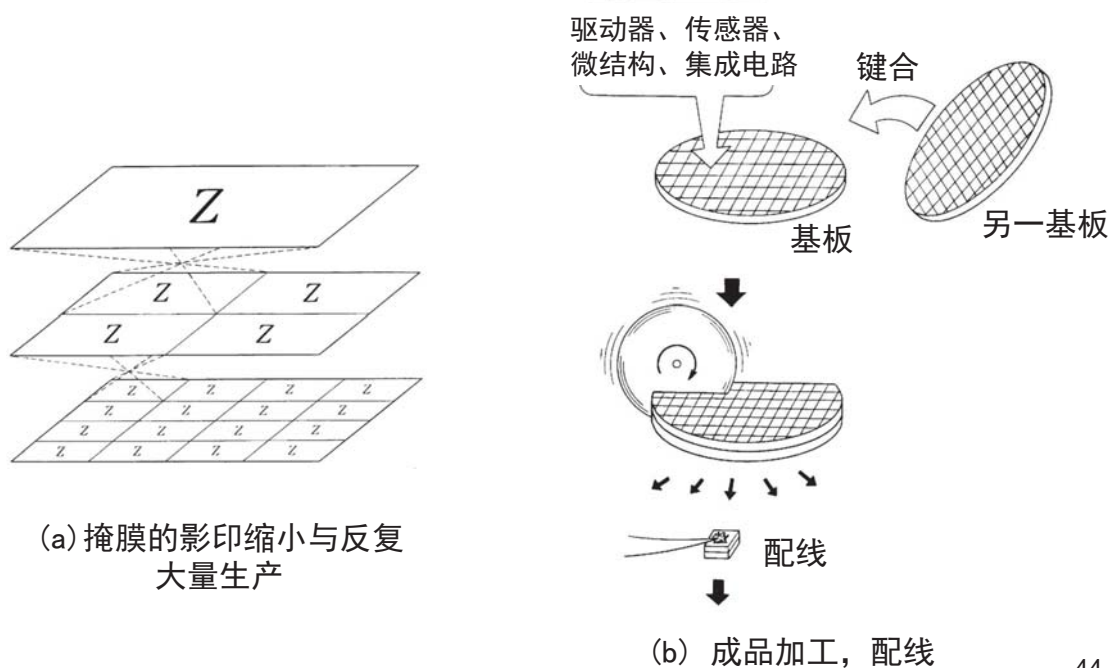
42

# 微机械结构加工工序



43

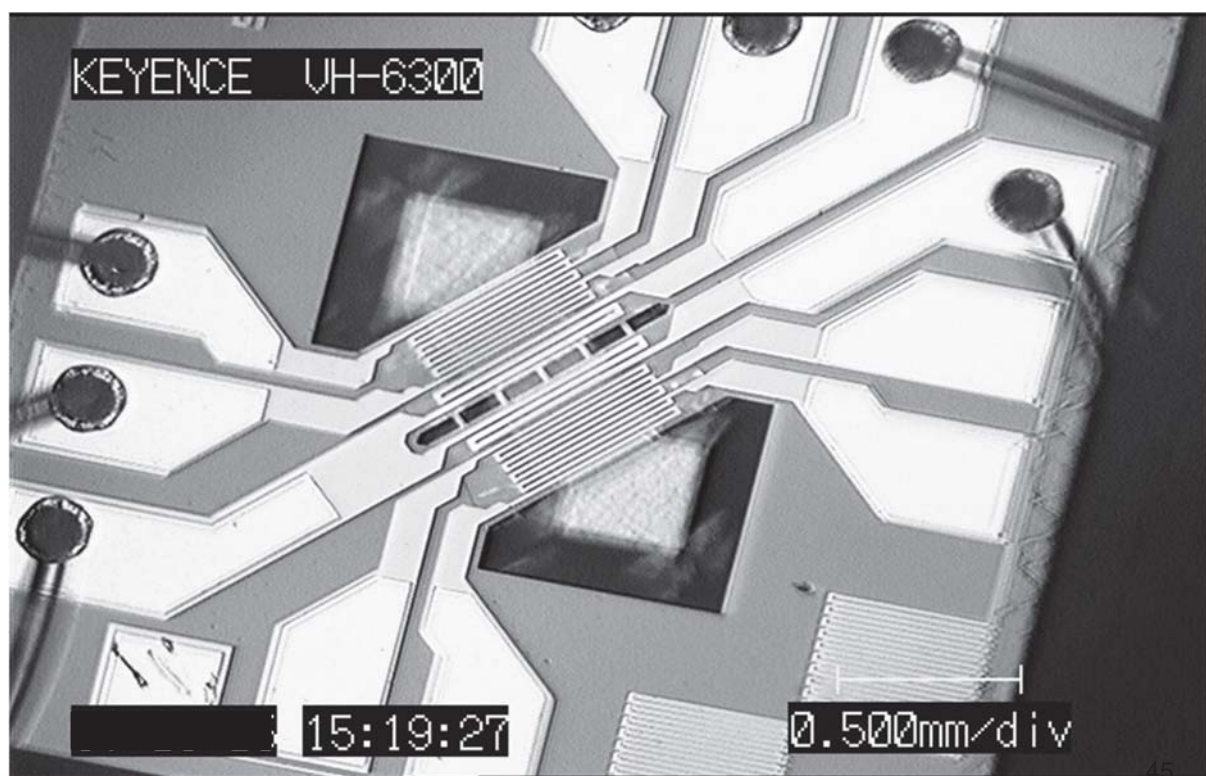
# 微加工的量产和低成本



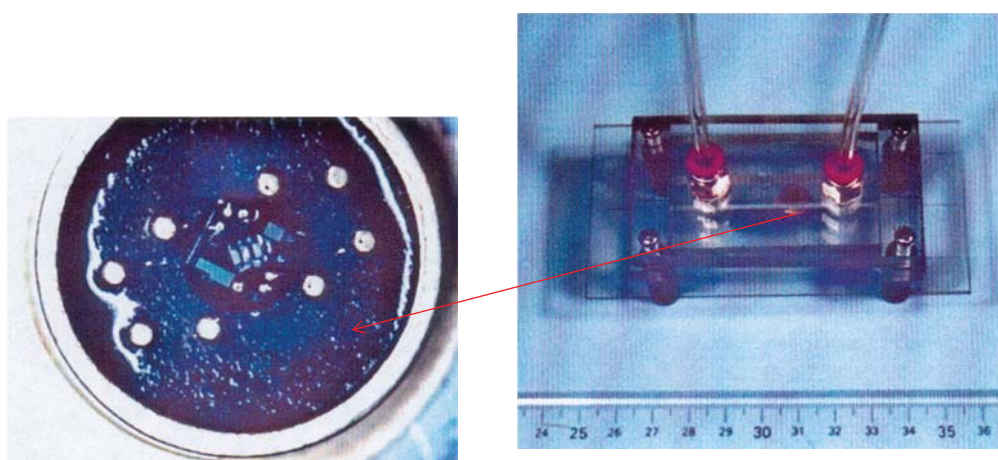
44



## 微型薄膜测温电阻

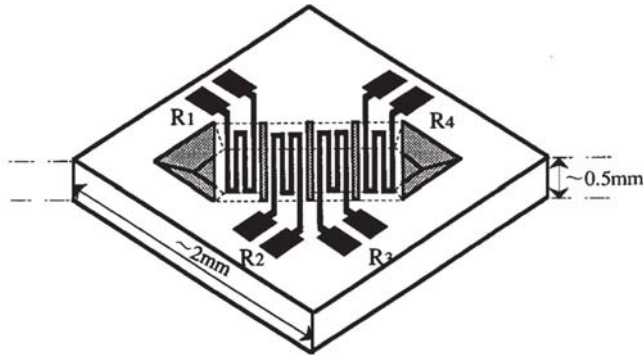


## 微型薄膜测温电阻传感器



气体微流量测量

# 微型薄膜测温电阻传感器



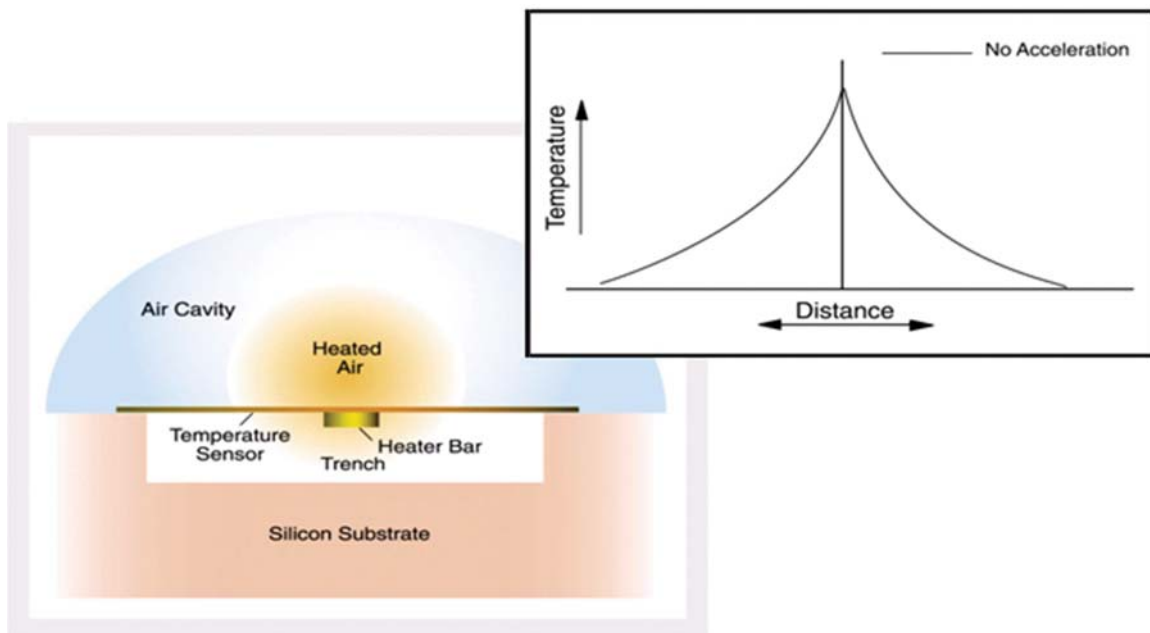
One heater resistor  
Multiple sensor resistors

Small size  
Small thermal capacity

High responsivity  
High sensitivity  
Low power consumption

47

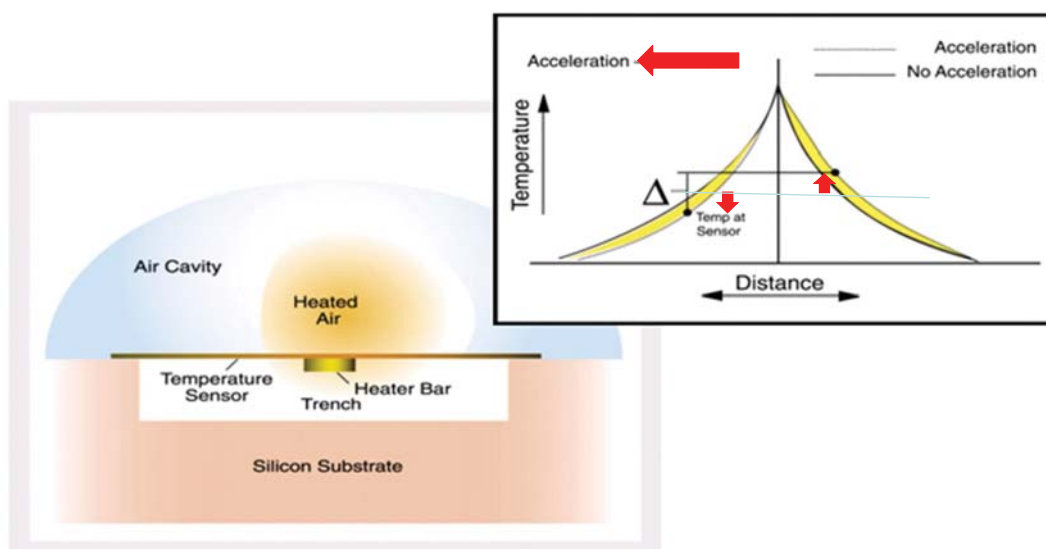
# 非质量块的热式加速度传感器



48



# 热空气团的偏移和热式加速度检测



没有可移动的质量块，没有谐振误差，  
适合于感测高振动环境中的低 $g$  ( $<10g$ )、低频 ( $<30\text{Hz}$ ) 加速度。  
耐撞击达 $50000g$ ，不易损坏。  
分辨率 $2\text{mg}$ ，带宽 $30\text{Hz}$ 可扩展至 $160\text{Hz}$ ，封装 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 2\text{mm}$   
<http://www.memsic.cn/Products/list.aspx?lcid=11>

49

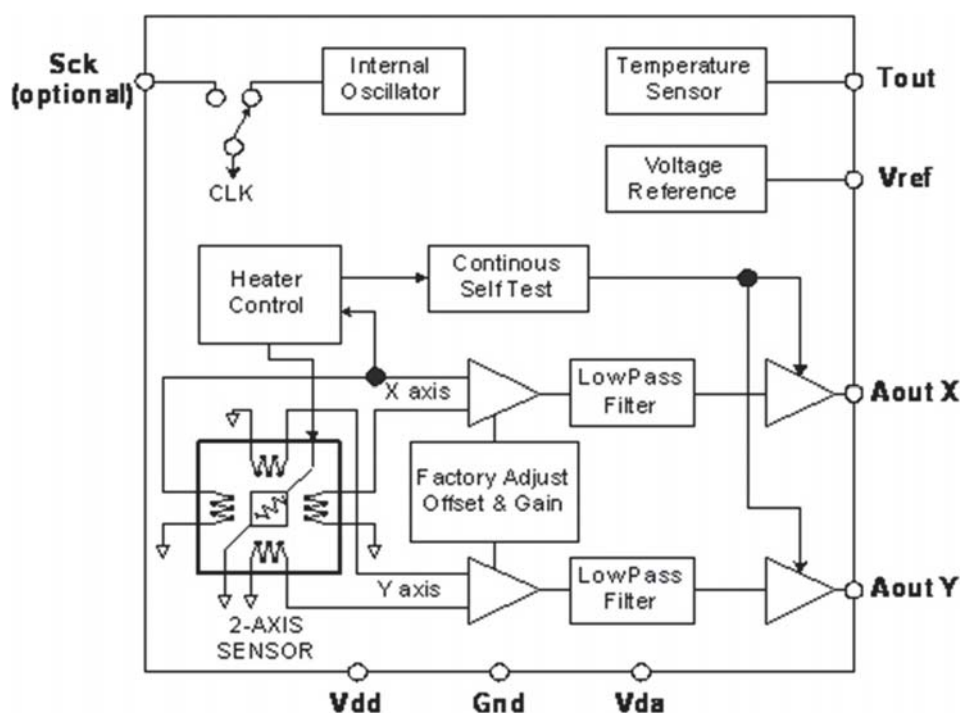
## 热电式加速度传感器

<http://www.memsic.cn/accelerometers/>

- 热对流MEMS惯性传感器
- 硅芯片中央热源，空腔，悬浮的热气团。
- 热电耦（Al和Si）组被等距对称地放置在热源的四个方向。
- 由于自然对流热场的传递性，任何方向的加速度都会扰乱热场的轮廓，从而导致其不对称。
- 自然对流是由温度引起的密度差产生的流动。

50

# 芯片内电路结构



51

## 思考题

- 8-1 如前述，权重函数(a)(b)的区别
- 8-2 如前述，权重函数(c)(d)的区别
- 8-3 如前述多选题，空间滤波测速测距的总结判断题
- 8-4 如前述，求麦克风阵列指向性控制的延时叠加表达式
- 8-5 如前述多选题，Hilbert变换的总结判断
- 8-6 各向异性蚀刻是指什么？
- 8-7 热式MEMS加速度传感器相比于叉指电容式MEMS加速度传感器的优点和缺点是什么？

热式：跌落测试100%通过，马达等高频信号无影响，对贴片应力容忍度大，零漂小；响应慢，精度稍差。

52