中国科学院声学研究所声学微机电实验室

基于声表面波技术的智能传感系统

Intelligent sensor system based on SAW technology

何世堂

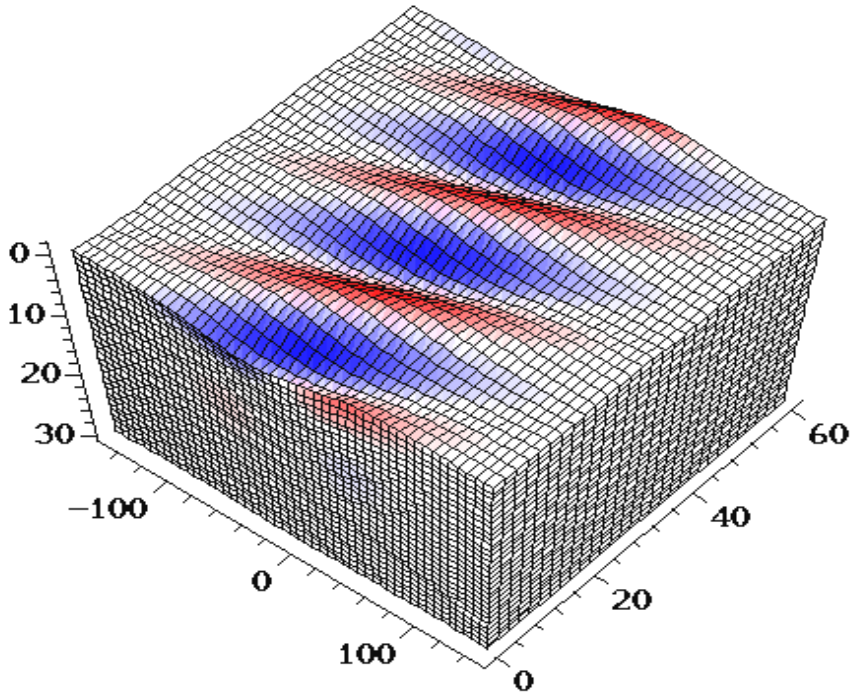
2012.8.8

“ Just as the personal computer was a symbol of the ’80s, and the symbol of the ’90s is the world wide web, the next linear shift, is going to be the advent of cheap sensors” ----*Paul Saffo,Institute for the furture*

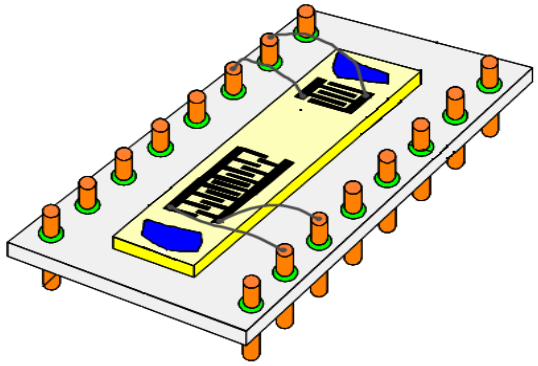
报告内容

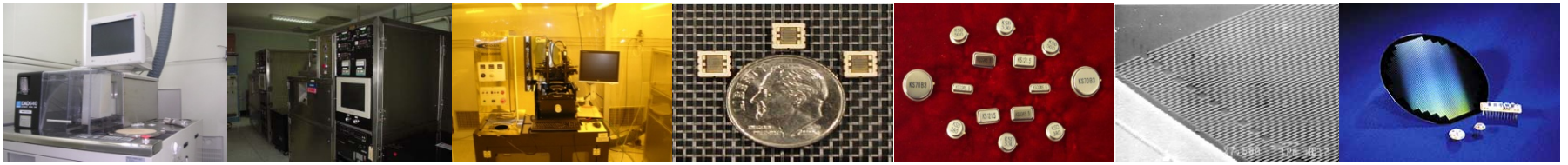
- 声表面波的基本原理
- 典型声表面波传感器基本应用
- 有源声表面波传感器
- 无源无线声表面波传感器
- 未来发展趋势

声表面波（SAW）

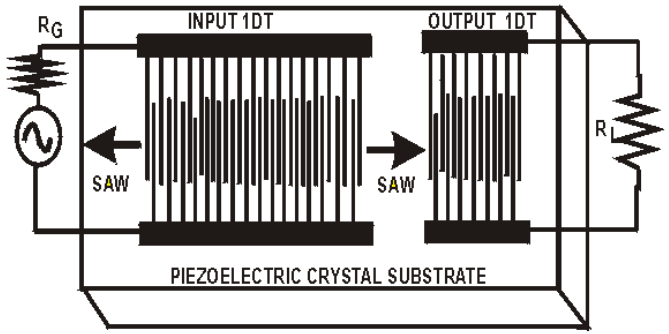


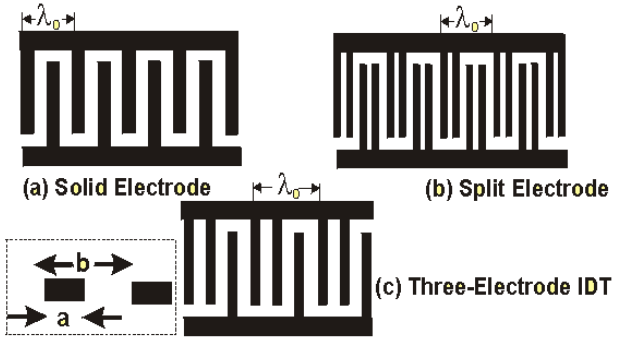
- ✓具有较低的传播速度，10^{-5}×光速
- ✓低成本，利用半导体工艺的光刻技术
- ✓高强度，易于设计
- ✓沿基片表面传播，符合传感器应用之特性

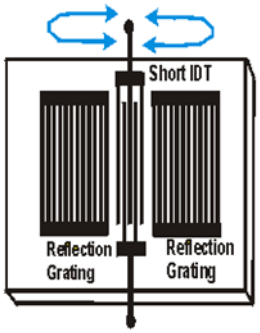


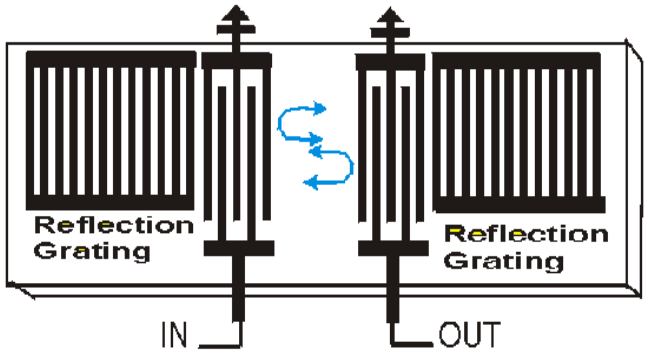


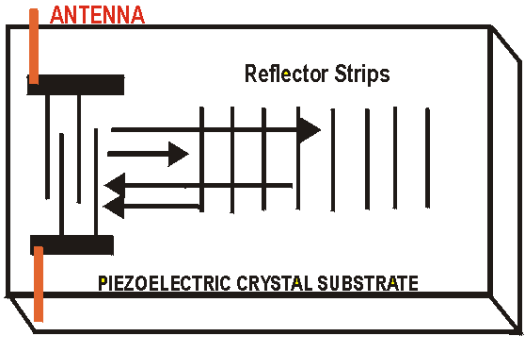
声表面波（SAW）器件


R_G
INPUT 1DT
OUTPUT 1DT
R
SAW
SAW
PIEZOELECTRIC CRYSTAL SUBSTRATE

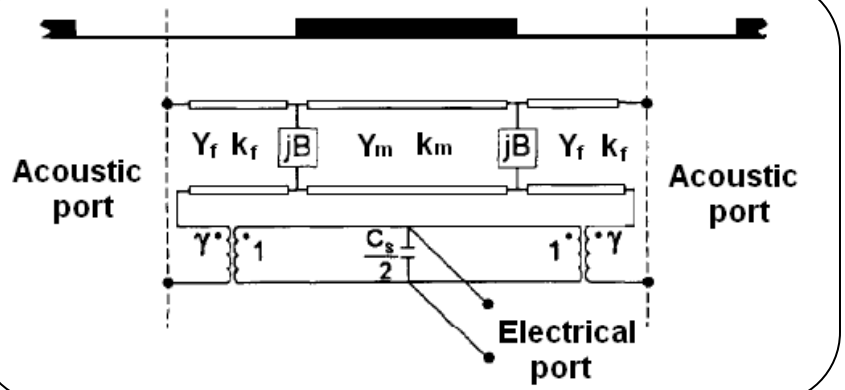

λ_0
λ_0
(a) Solid Electrode
(b) Split Electrode
λ_0
b
a
(c) Three-Electrode IDT


Short IDT
Reflection Grating
Reflection Grating

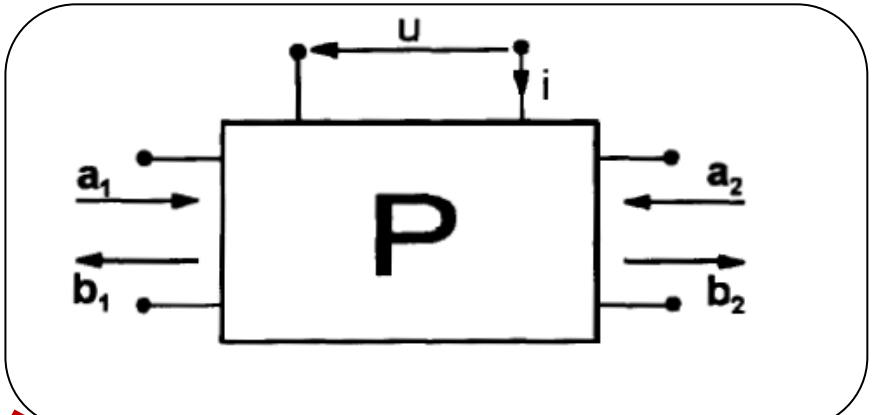

Reflection Grating
Reflection Grating
IN
OUT


ANTENNA
Reflector Strips
PIEZOELECTRIC CRYSTAL SUBSTRATE

典型SAW器件理论分析模型



等效电路模型(ECM)

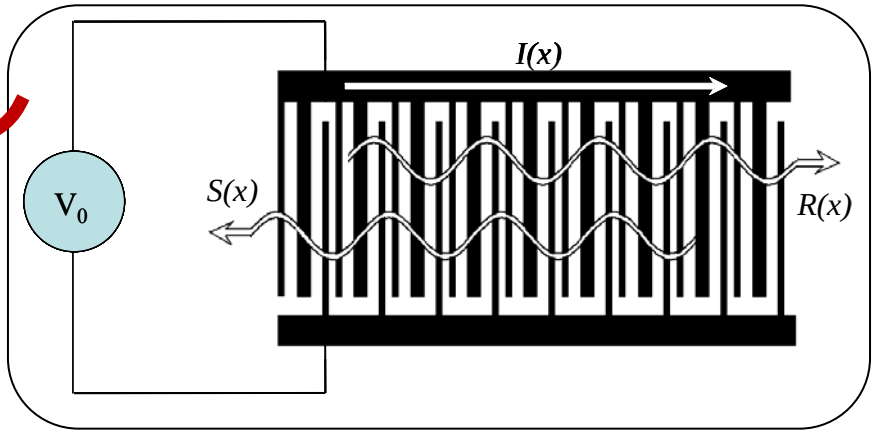


P矩阵模型(PMM)

目前主要有三种理论模型应用于SAW器件的模拟分析：**等效电路模型**（ECM），**P矩阵模型**（PMM）以及**耦合模**（COM）

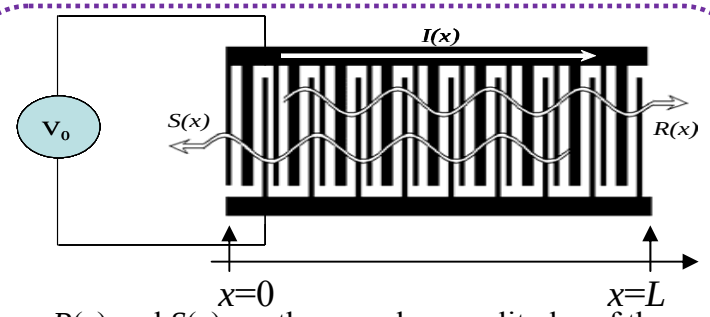
假设前提：视各向异性基片与金属结构中的声应力、位移以及动态电势为一单一标量

其中，耦合模理论模型对于各种低损耗SAW器件的模拟具有更为快速准确的特点

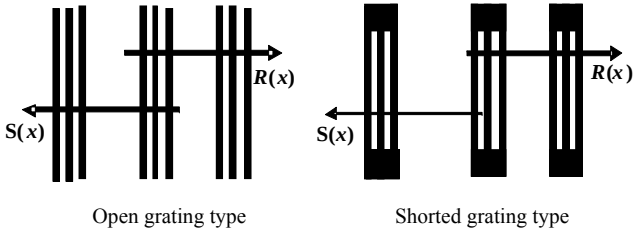


耦合模理论模型（COM）

SAW器件的耦合膜理论分析模型



$R(x)$ and $S(x)$ are the complex amplitudes of the forward and reverse waves and modes



Usually, for two-port resonator patterns, the shorted grating and open grating reflectors are used

COM equation

$$\begin{cases} dR(x)/dx = -jk_E R(x) + j\kappa_R e^{-j2k_0 x} S(x) + j\alpha_R(x) e^{-jk_0 x} V_T \\ dS(x)/dx = jk_E S(x) - j\kappa_S e^{j2k_0 x} R(x) - j\alpha_S(x) e^{jk_0 x} V_T \\ dI(x)/dx = -j\omega C(x) V_T + j2\alpha(x) e^{jk_0 x} R(x) + j2\alpha(x) e^{-jk_0 x} S(x) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{dR(x)}{dx} = -i\delta R(x) + i\kappa S(x) \\ \dfrac{dS(x)}{dx} = -i\kappa^* R(x) + i\delta S(x) \end{cases}$$

Shorted grating type

$$\begin{cases} \dfrac{dR(x)}{dx} = -i\delta_{oc} R(x) + i\kappa_{oc} S(x) \\ \dfrac{dS(x)}{dx} = -i\kappa_{oc}^* R(x) + i\delta_{oc} S(x) \end{cases}$$

Open grating type

针对耦合膜方程的P矩阵

$$\begin{bmatrix} S(0) \\ R(L) \\ I(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) \\ S(L) \end{bmatrix}$$

针对耦合膜方程的P矩阵

$$\begin{bmatrix} S(0) \\ R(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{ref\,11} & P_{ref\,12} \\ P_{ref\,21} & P_{ref\,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) \\ S(L) \end{bmatrix}$$

针对各器件单元P矩阵的级连

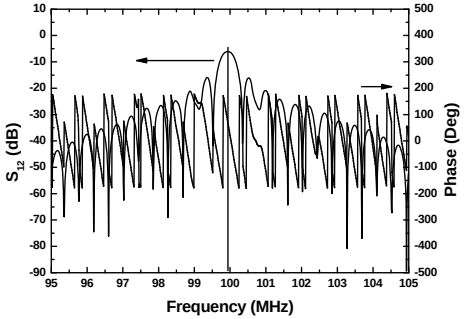
$$S_{21} = \frac{-2Y_{21}\sqrt{G_{in}G_{out}}}{(G_{in} + jB_1 + Y_{11})(G_{out} + jB_2 + Y_{22}) - Y_{12}Y_{21}} \qquad IL = 20 \times \log_{10}(|S_{21}|) \qquad \text{Phase=atan(Im(}S_{21}\text{)/Re(}S_{21}\text{))}\times 180/\pi$$

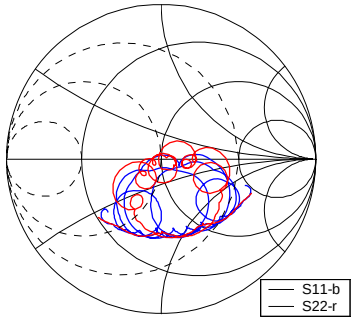
G_{in} 与 G_{out} are 为输入输出导，B_1 与 B_2 阻抗匹配纳

用于SAW传感器的典型器件响应

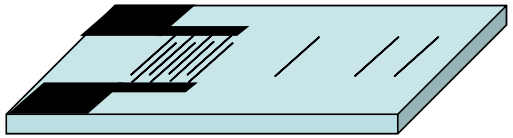


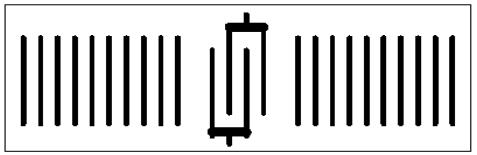
SAW延迟线的基本结构
常用于有源传感器

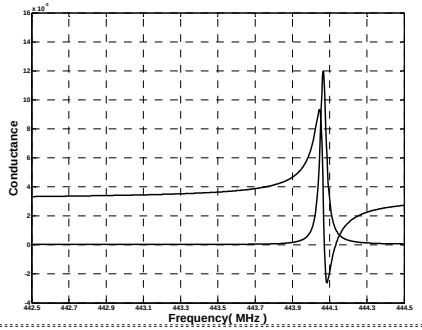


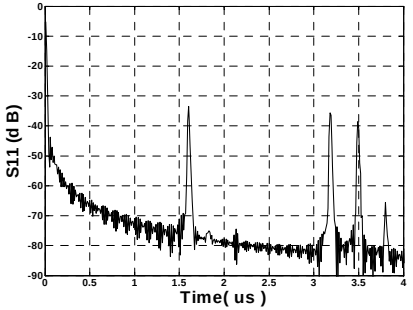


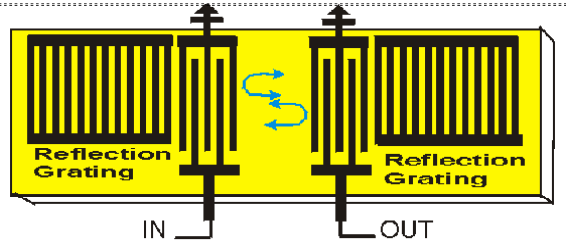
反射型SAW延迟线及单端谐振器：常用于无线无源传感器



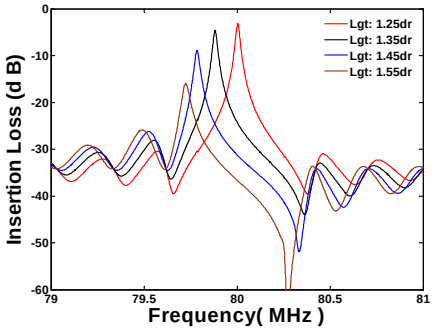


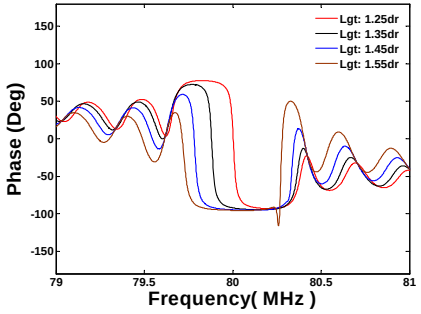




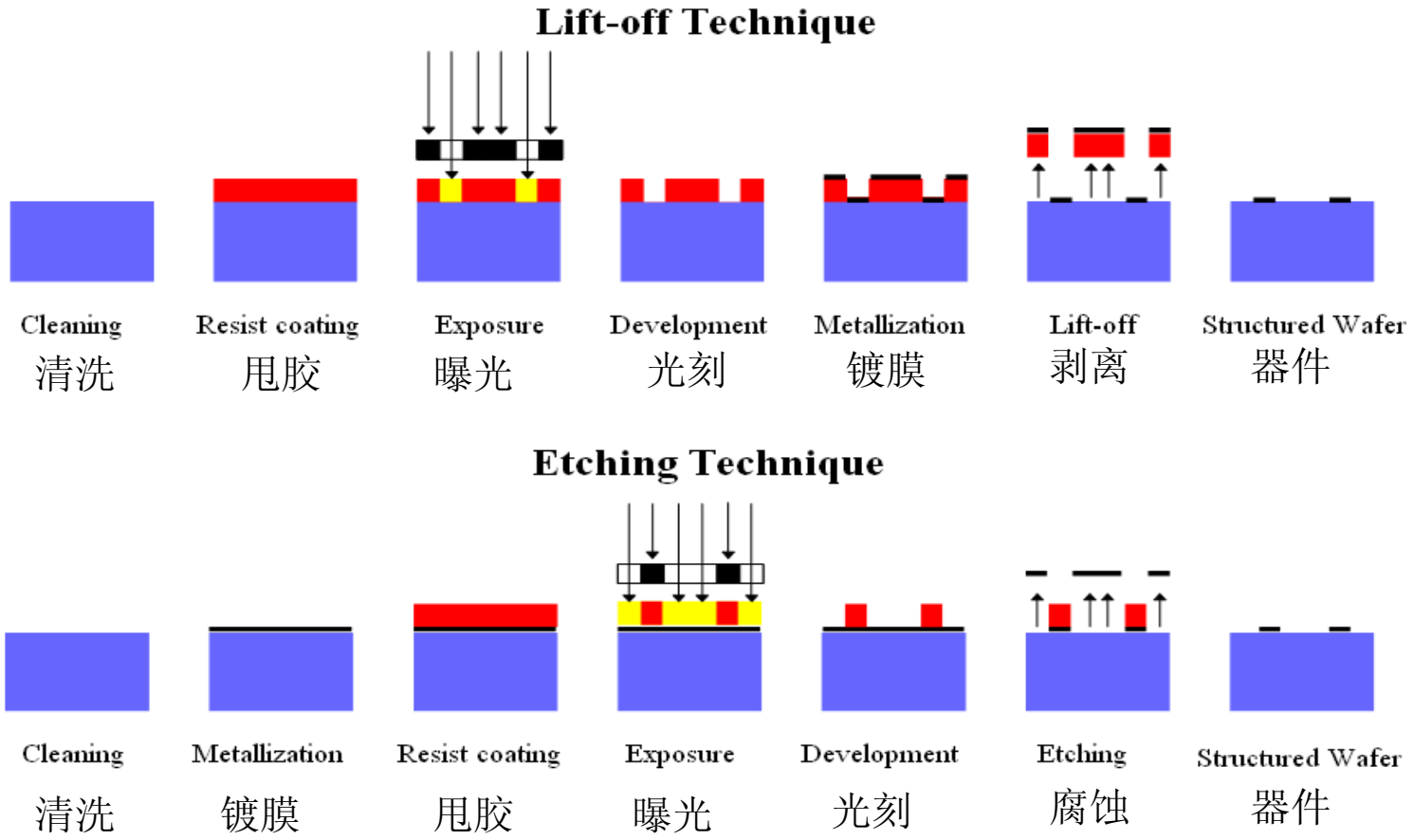


两端对SAW谐振器的基本结构
常用于某种物理（陀螺仪）与化学（气体检测）传感器





典型SAW器件加工过程

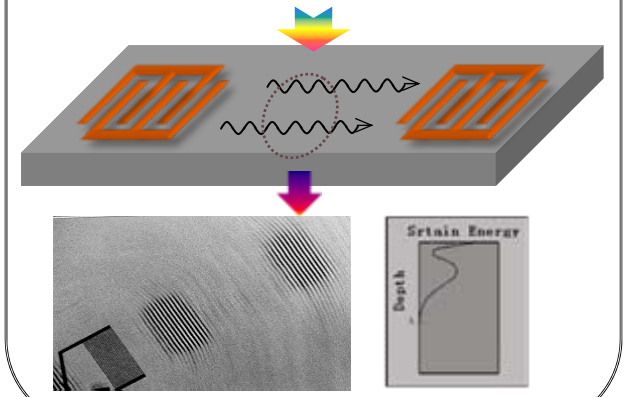


报告内容

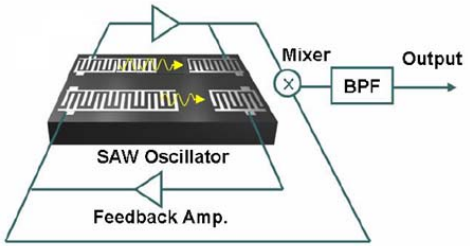
- 声表面波的基本原理
- 典型声表面波传感器基本应用
- 有源声表面波传感器
- 无源无线声表面波传感器
- 未来发展趋势

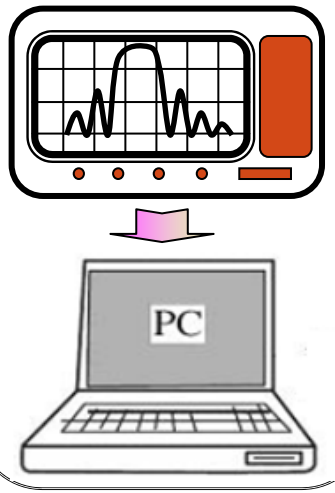
SAW传感器的基本原理

物理（温度、压力等）或者化学（气体、生物等）参量对声波的扰动



外围参量对声波衰减、速度的扰动效应 $\Delta\alpha/k_0$, $\Delta v/v_0$



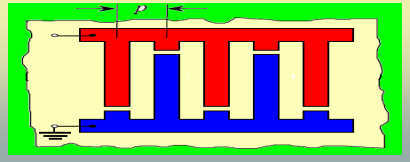


SAW特性

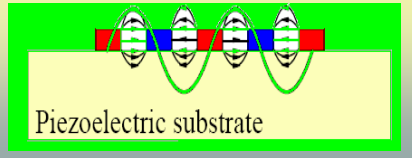
- ✓声表面波传播于压电基片表面
- ✓通过物理、化学参量对声波传播特性的扰动以此对待测参量进行检测

SAW传感器特点优势

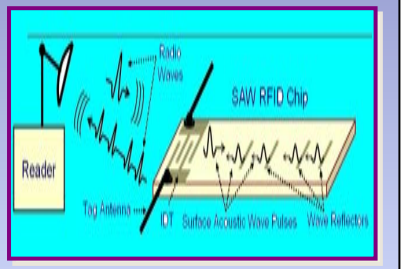
- ✓富有竞争力的价格优势－光刻技术，结构相对比较简单
- ✓高灵敏度－声波对表面扰动的快速响应，声波能量集中于基片表面
- ✓易于集成化－输出的频率电信号，易于与计算机接口组成自适应的实时系统
- ✓良好的可靠性与稳定性



声表面波传感器



电子标签应用



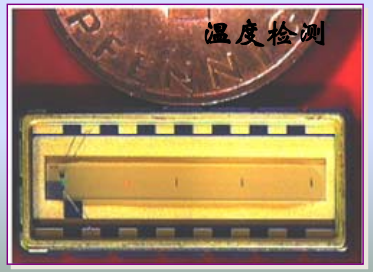




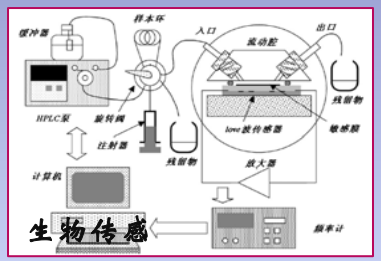
无线传感器应用







化学传感器应用

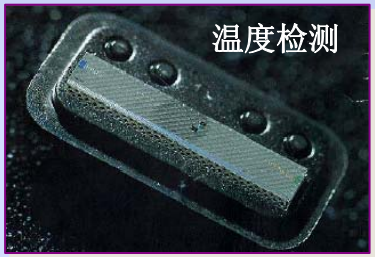






物理传感器应用







报告内容

- 声表面波的基本原理
- 典型声表面波传感器基本应用
- 有源声表面波传感器
- 无源无线声表面波传感器
- 未来发展趋势
- 总结

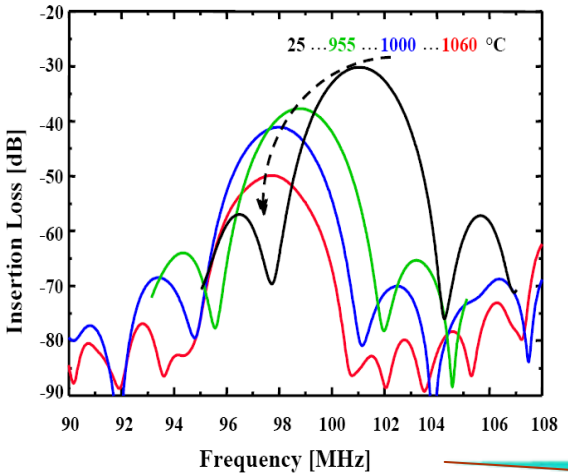
声表面波有源传感器：温度传感器

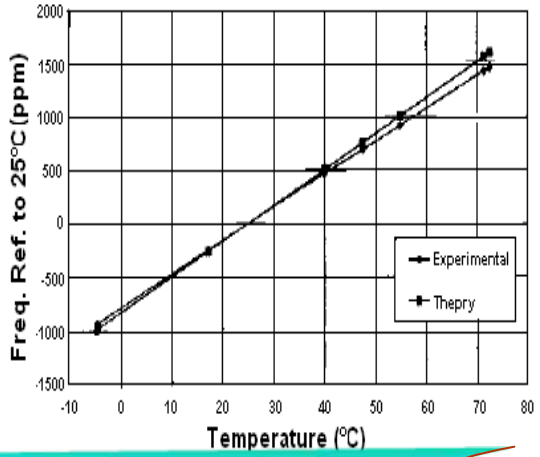
➢ ***原理***：基于SAW传播速度的温度（T）关联关系（如式（1）所示，其中TCD为延迟温度系数，通常取决于压电基片材料的晶体结构以及切向，Δv速度变化，v_0为SAW速度，T_{ref}为参考温度），SAW技术可用于温度的检测。

$$\Delta v = v_0 \times TCD\ (T - T_{ref})$$

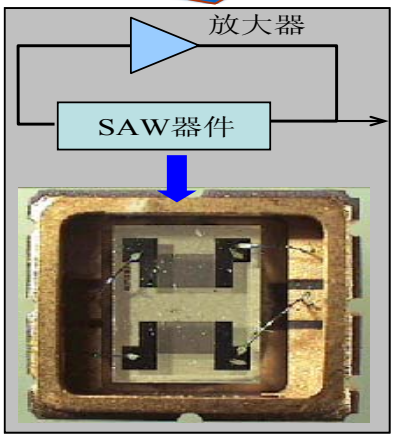
➢ ***压电基片选取***：一些具有较高温度系数的压电基片如铌酸锂，钽酸锂以及$La_3Ga_5SiO_4$等材料广泛应用于温度传感器之中。

➢***实例***：一种124MHz 基于ST切割的石英基片材料所激发的表面掠射体波（SSBW）以其良好的温度系数（32ppm/°C）应用到了温度传感器，其分辨率达到了0.22度。如左图





Material	Orientation [1] Cut	Prop.	Wave type	v_{ph} (m/s)	k^2 (%)	TCD (ppm/°C)	Loss (db/μs) 433 MHz	2.45GHz
Quartz	ST	X	gen. RW	3158	0.1	0	0.75	18.6
	37°rotY	90°rotX	SH wave	5094	≈0.1	0	-[3]	-[3]
$LiNbO_3$	Y	Z	pure RW	3488	4.1	94	0.25	5.8
	41°rotY	X	leaky SH wave	4750	15.8	69	-[3]	-[3]
	128°rotY	X	gen. RW	3980	5.5	75	0.27	5.2
$LiTaO_3$	36°rotY	X	leaky SH wave	4220	≈6.6	30	1.35	20.9
	X	112°rotY	gen. RW	3301	0.88	18	-	-



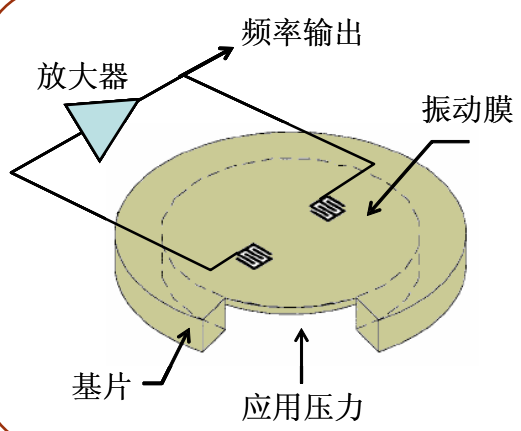
C.Wold et al, “Temperature measurement using surface skimming bulk waves”, in Proc. Ultrason. Symp., Vol.1, 1999, pp:441-444

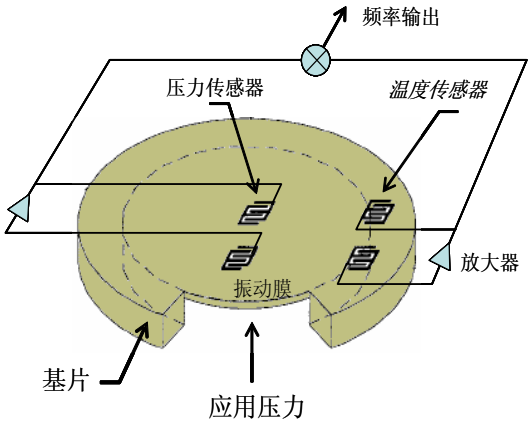
声表面波有源传感器：压力传感器

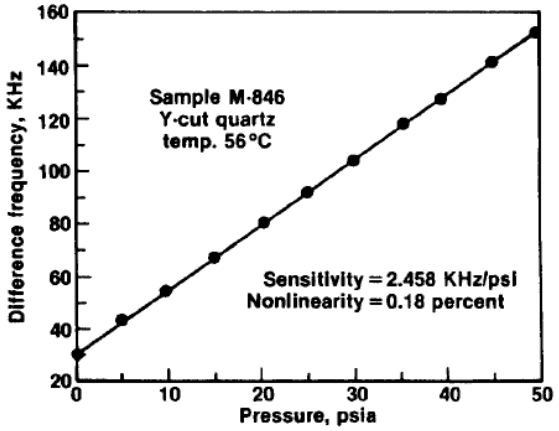
➢ ***基本思想***：以SAW器件压电基片如石英等为压力振动膜，由于外加压力引起振动膜弯曲变形及其表面的应力/应变的分布变化导致SAW传播速度发生改变，通过采用以SAW器件为反馈元的振荡器模式，其频率输出信号即与所应用压力呈现良好的线性关系，以此检测应用压力。响应公式： $v = v_0 \times (1 + \gamma_i \times \varepsilon_i)$, $(i=1, 2, 3)$, 其中 γ 为基片材料有关的弹性常数，而 ε 为施加压力引起的基片表面分布的应变分量，

➢ ***基本应用***：在某些心脏肺部驱动以及一些生物技术、工艺流程中得到一些较好的应用。

➢ ***趋势***：然而，目前这种有源压力传感器的应用仍然受到了较大的限制，主要原因是压力传感器的应用多是应用在一些工艺流程控制以及机动车轮胎压力控制之中，由于功耗而引起传感器的使用稳定性以及寿命等问题，因此，近年来借助于SAW电子标签技术，结合一种单端对SAW器件而研制了一种无线SAW压力传感器，在轮胎压力监控系统（TPMS）中得到很好的应用





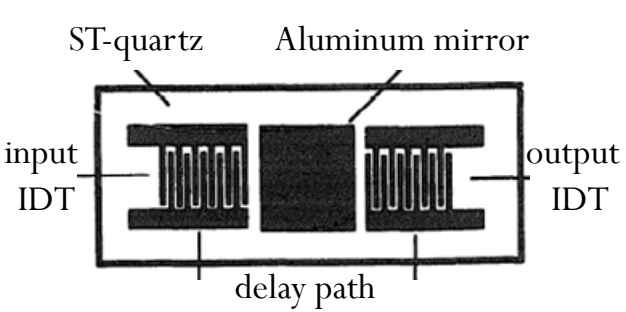


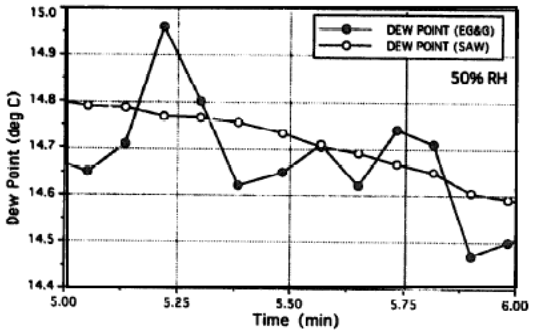
声表面波有源传感器：露点传感器

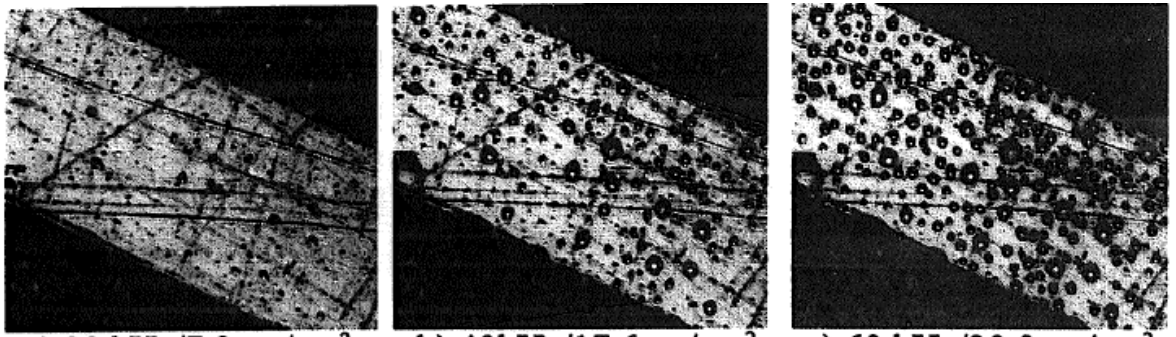
➢ ***基本原理:*** SAW传感器在具有温度控制的条件下，在任意大气环境中，水汽在其露点温度下冷凝在SAW器件表面，通过某种质量负载效应或者黏滞效应，引起SAW速度变化，从而实现一种有效露点传感器。

➢ ***特点及应用***：这种SAW露点传感器具有高精度、低成本与良好的稳定性特点，在大气科学、农业、以及微电子、钢铁、纺织、医药、造纸以及食品等工业流程中应用非常广泛。

Vetelino等报道了一种采用YZ $LiNbO_3$基片的基于50MHz双延迟线振荡器结构的SAW露点传感器：一路延迟线检测凝结物，而另外一个延迟线作为参考用以消除温度以及振动等干扰效应。这种露点传感器能很好的避免一般污染物的影响，相对于光学式传感器0.2°C的分辨率，这种传感器实现了0.025°C的分辨率。







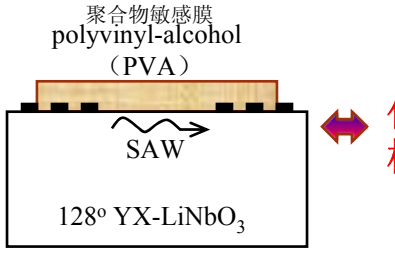
a) 20 kHz/7.2 ug/cm^2　b) 40kHz/17.6 ug/cm^2　c) 60 kHz/30.0 ug/cm^2

•K.Vetelino et al, "Improved dew point measurements based on a SAW sensor", Sensors and Actuators, B, Vol. 35-36, 1996, pp:91-98

声表面波有源传感器：湿度传感器

- ***基本原理***：在SAW功能器件（延迟线/谐振器）表面覆盖一层吸水性敏感膜，结合振荡器结构，即可实现一种湿度传感器。其传感机理即敏感膜对水汽的吸附通过质量负载、粘弹性以及电短路效应引起对声波传播的扰动，继而引起SAW器件频率、衰减以及相位的变化，以此来表征湿度的检测
- ***特点***：具有较高的灵敏度、稳定性、可靠性、低成本以及电信号输出易于与IC电路集成等特点
- ***主要应用***：在各种园艺、农业、医药以及过程控制等领域有着广泛应用前景

M. Penza等报道了一种采用聚合物PVA的湿度传感器，其工作频率位42MHz。具有良好的稳定性。重现性*
另外，经过非结晶与多孔渗水处理的SiO2薄膜以及一些纳米薄膜材料也在湿度传感器中得到应用

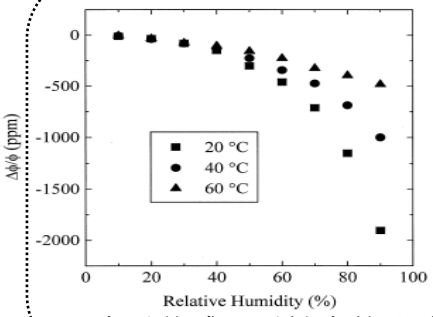


传感机制

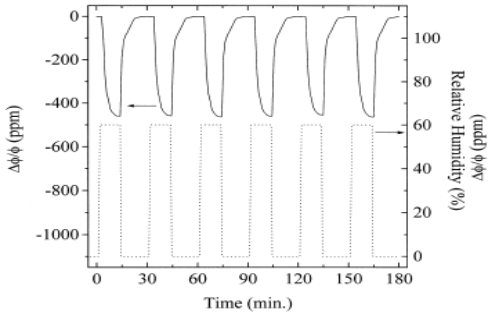
质量负载效应：敏感膜材料水汽吸附导致其质量发生变化

粘弹性效应：聚合物敏感膜水汽的吸附引起其机械模量参数的变化，其应力/应变分布变化进而引起对SAW的扰动

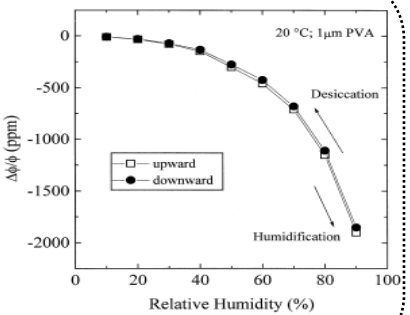
电短路效应：由于水汽的吸附，引起电位移的短路



温度对传感器灵敏度的影响



重复性试验

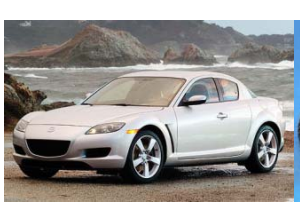


重现性试验

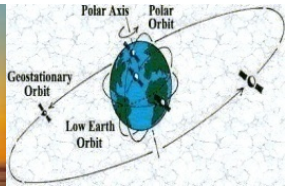
*M. Penza， Surface acoustic wave humidity sensor using polyvinyl-alcohol film，Sensors and Actuators 761999.162–166

声表面波有源传感器：陀螺仪（角速率传感器）

- *陀螺仪*(所谓角速率传感器): 主要应用于角速率的测量
- *主要应用*: 在消费性产品、工业以及医疗产品中有着广阔的应用前景，特别在军用应用方面，如一些智能弹以及新型武器系统的旋转稳定系统.









干涉式光纤陀螺仪(IFOG)

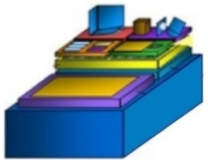


环形激光陀螺仪(RLG)



微机械（MEMS）陀螺仪

陀螺仪的发展：



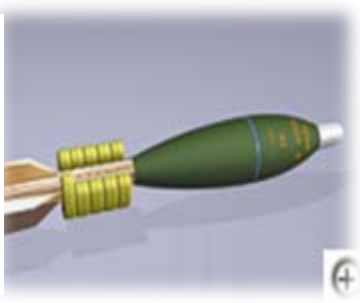
类型	性能	缺点
IFOG	采用自动旋转补偿技术以抵消偏置、高震动阻力	需要较长的附属L－D产品，并具有较大的体积，成本高
RLG	由于不采用移动部分而无摩擦，无内在漂移N；简明，轻便，具有较高的可靠性	
MEMS	轻便、小型化、低成本并具有低功耗	由于采用附加参考振动系统，易于对外围振动敏感，从而干扰系统性能
SAW	没有附加机械系统，对外围振动具有良好的抗震性，制作简单，成本低，可靠性高	具有较好的应用前景，然而鲜有实际应用报道







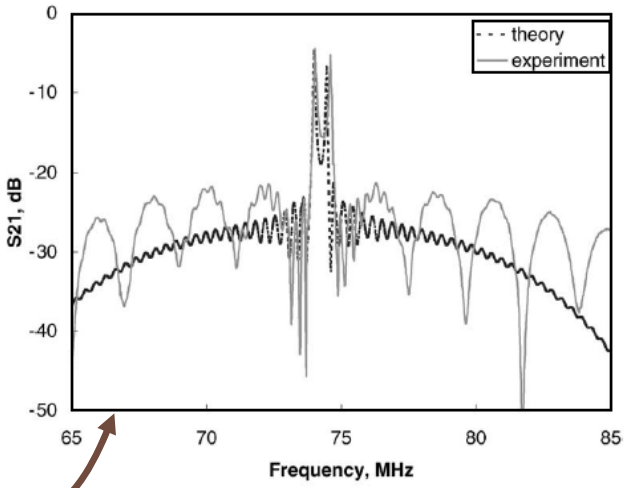


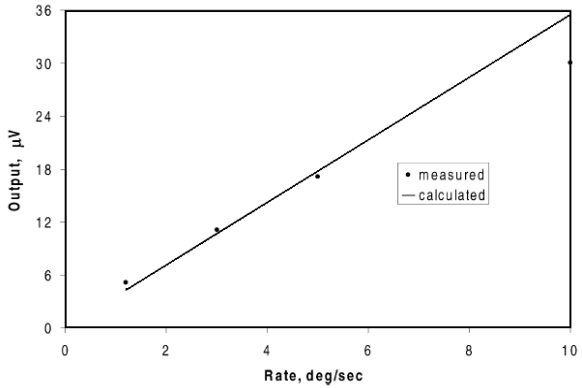


声表面波有源传感器：陀螺仪（驻波模式）

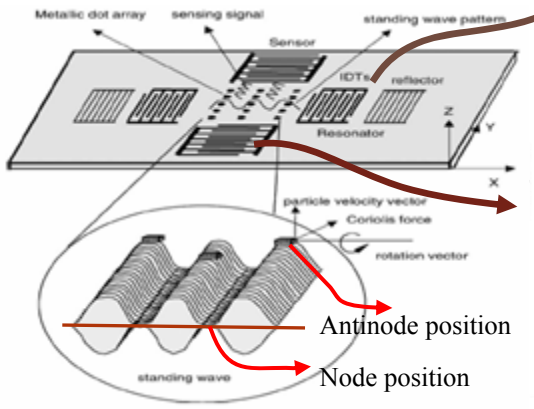
➢基于驻波模式的SAW陀螺仪：由一两端谐振器、分布于谐振腔内的金属点阵以及接收传感器组成：两端谐振器作为稳定的参考振动源，由于沿某一方向旋转，形成垂直于速度与旋转方向的Colriolis力，并通过分布于驻波反节点位置的金属点阵同相叠加获得沿y向的SAW，由传感器接收形成电信号输出

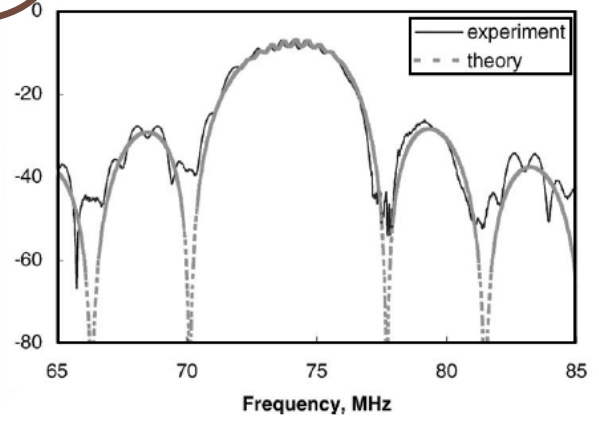
不足：传感器输出信号是微伏级电信号，这样精度低，系统的温度稳定性差





K.A.Jose研制了75MHz的基于YX 128° $LiNbO_3$ SAW 陀螺仪，其灵敏度达到了2.9μV/°/s*

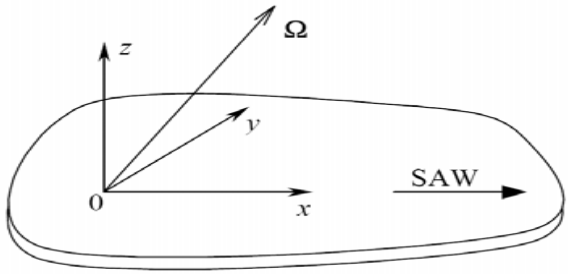


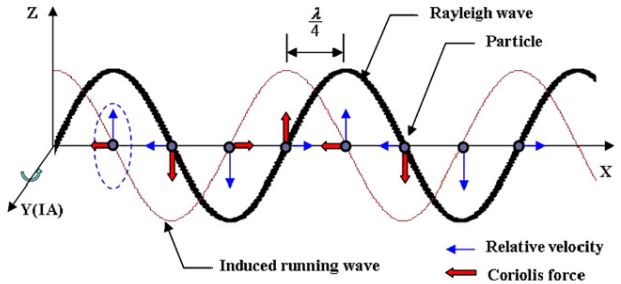


*K.A.Jose et al, “Surface acoustic wave MEMS gyroscope”, Wave Motion, Vol.36, 200, pp.367-381

声表面波有源传感器：陀螺仪（行波模式）

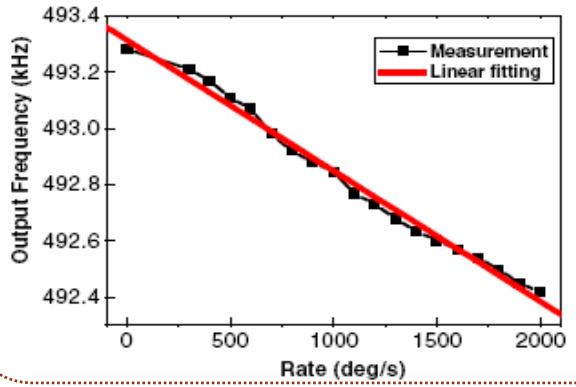
➢驻波模式陀螺仪基本思想：基于SAW的陀螺效应，垂直于声波传播方向的旋转矢量通过Colriolis力效应引起声波传播速度变化，从而引起传感器的频率发生变化，并采用差分结构较好的实现了温度补偿

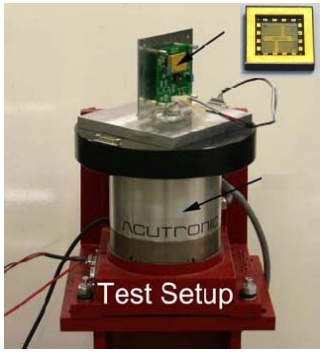


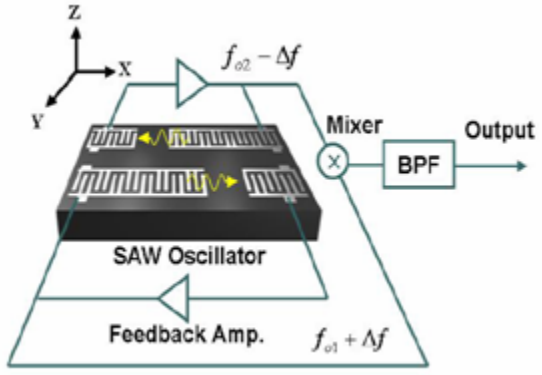


不足：哥氏利用作用微弱导致灵敏度极低

Sensitivity	0.431 Hz deg^{-1} s^{-1}

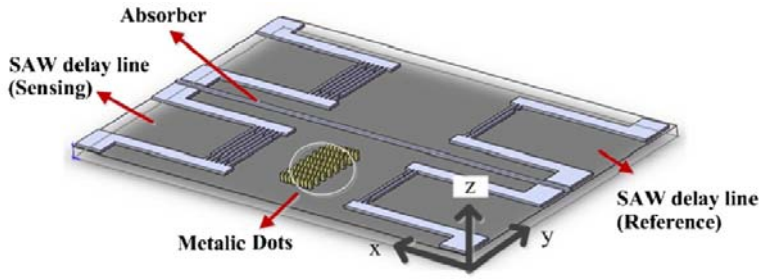


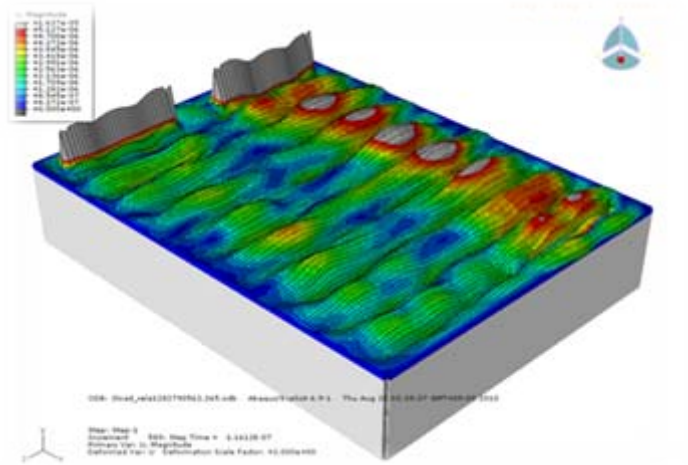




*S. Lee et al, "A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect", J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 2272–2279

声表面波有源传感器：陀螺仪（加点阵行波模式）

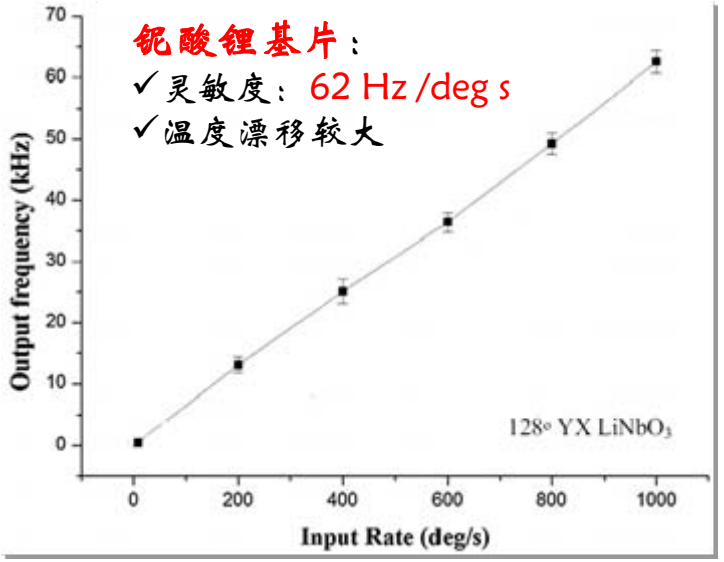


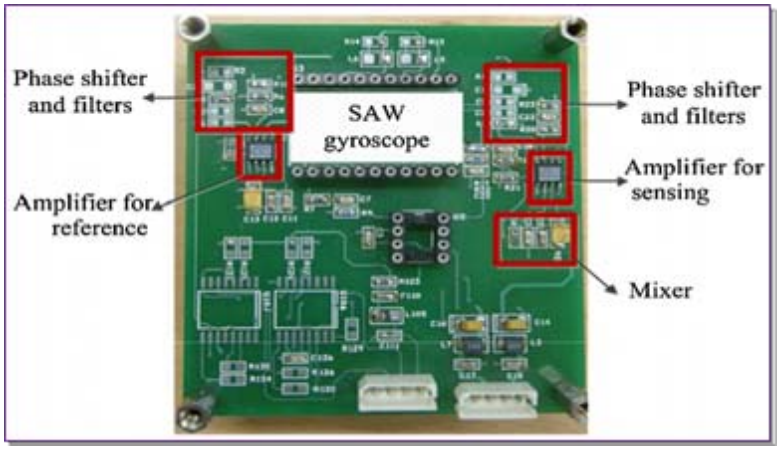


铌酸锂基片：

✓灵敏度：62 Hz /deg s

✓温度漂移较大





Haekwan Oh, et al," Development of Surface Acoustic Wave-Based Microgyroscope Utilizing Progressive Wave ", Jpn J Appl Phys 49 (2010) 06GN16

Haekwan Oh, Wen Wang, "Enhanced sensitivity of a surface acoustic wave gyroscope using a progress wave", J. Micromech. Microeng. 2011, 21, 075015

声表面波有源传感器：气体检测

现实要求：化学生物武器等恐怖威胁；各种突发性生产、环境等事故

列入国家战略规划：国家中长期科学和技术发展规划将环境和公共安全列为发展的重点领域，而环境质量检测、重大生产事故预警与救援、食品安全与出入境检验检疫、突发公共事件防范与快速处置和生物安全保障均被列为优先主题或其中的主要内容。

解决途径：现场快速检测手段是上述应用的共同迫切需求。高灵敏度气体现场快速检测仪器是实现现场检测的有效手段。

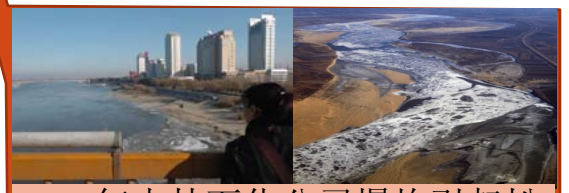
国内发展现状：我国相关研究几乎是空白，严重依赖进口，昂贵的价格及维护阻碍了其推广应用，阻碍了我国本应开展的现场检测工作。

应对策略：因此，开展有毒气体传感器的基础研究，突破其关键技术，实现这种传感器的国产应用是目前亟待解决的问题。


1995年东京地铁沙林事件


2003年重庆开县井喷事件


苏丹红事件


2005年吉林石化公司爆炸引起松花江重大污染事件

声表面波有源传感器：气体检测

现有气体传感技术：

接触燃烧式气体传感器：检测元件一般为铂金属丝（也可表面涂铂、钯等稀有金属催化层），使用时对铂丝通以电流，保持300℃～400℃的高温，通过燃烧可燃性气体引起铂丝电阻值变化并以此实现对气体的检测

特点：在环境温度下非常稳定，并能对处于爆炸下限的绝大多数可燃性气体进行检测。但是检测范围小，仅限于可燃气体

电化学气体传感器：是通过检测电流来检测气体的浓度，目前可以检测许多有毒气体和氧气以及血液中的氧浓度。

特点：高灵敏度以及良好的选择性。不足之处是有寿命的限制一般为两年。

半导体金属氧化物气体传感器：应用最普遍、最实用的气体传感器。它具有成本低廉、制造简单、灵敏度高、响应速度快、寿命长、对湿度敏感低和电路简单等优点。不足：必须在高温下工作、对气体或气味的选择性差、元件参数分散、稳定性不理想、功率高等方面。



美国AIM复合气体检测仪

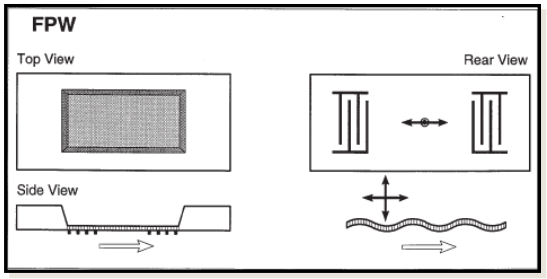


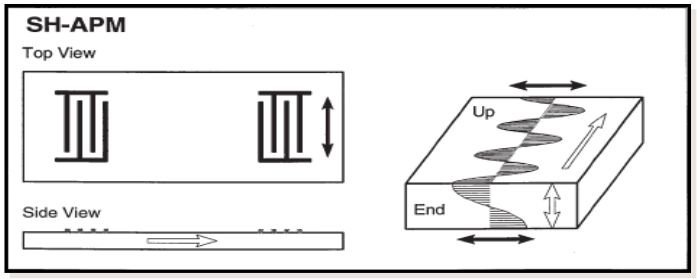
UniTox™ DM-200 电化学气体传感器

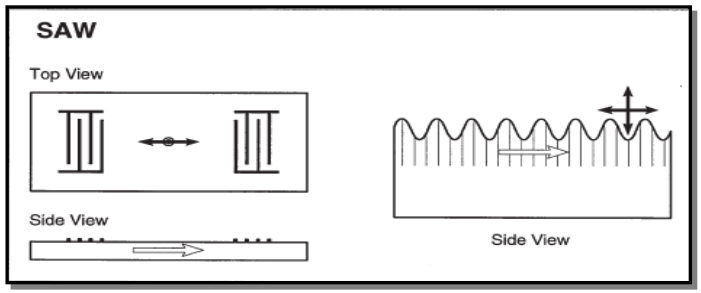


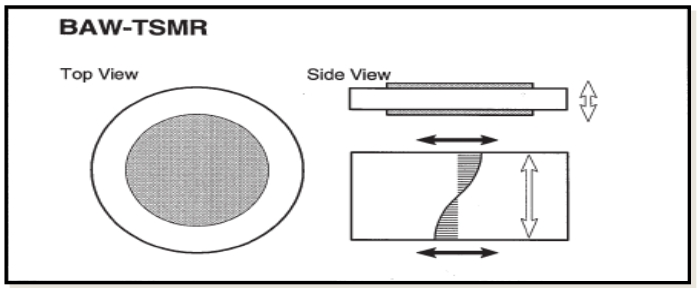
MQ2半导体气体传感器

声表面波有源传感器：气体检测





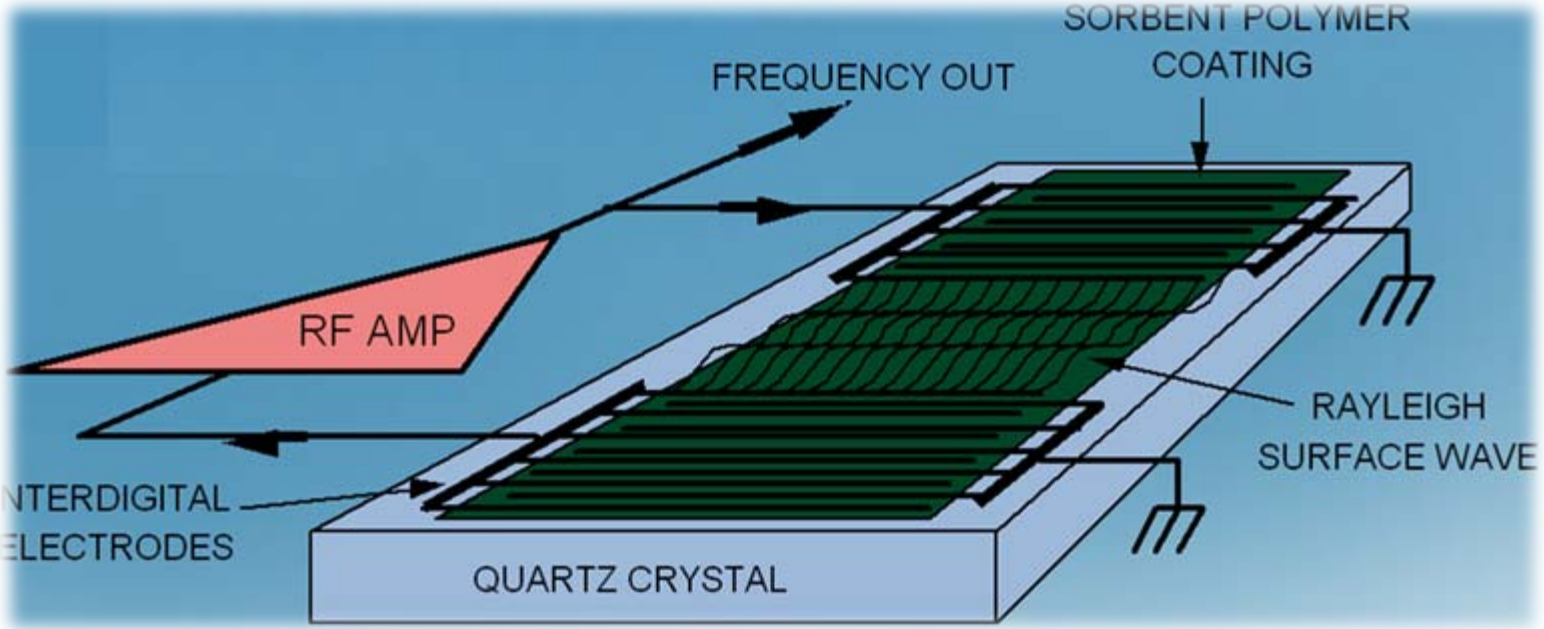




类 型	原 理	优 点	缺 点
体声波谐振器（BAW）	在器件两电极上应用可变电压以在晶体表面获得最大声位移，从而对表面扰动有良好的响应	结构简单、可靠性强且成本低	低质量负载灵敏度，低能量约束。绝对薄膜的基片材料难以实现，因为操作频率难以提高
声板波模式（APM）	利用基片顶层与底层的多次反射	具有较高频率（>100MHz）且能应用于液体传感	声能量分布于器件顶层与底层表面难以集中于传感表面，灵敏度依赖基片厚度导致制作难度
弯曲板波模式（FPW）	也即lamb波，瑞利型声表面波传播于薄板两面	能应用于液体介质，且利用硅微机械工艺制作，易于与电子电路集成	同样这种模式的传感器灵敏度与薄板厚度有关
声表面波模式（SAW）	利用叉指换能器淀积于压电基片表面，声能量集中于基片表面从而对外界扰动极为敏感	高质量灵敏度，平面工艺而且相对简单	由于液体介质中的高传播损耗，因为不能应用于液体传感器

SAW气体传感器基本思想

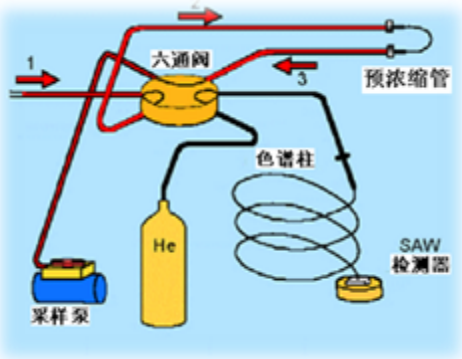
➢对象宽（多种相及界面）、范围广（多类物质与多种行业）、高灵敏（mg-pg级）、快速响应、体积小、低成本、可循环使用、可基阵组合和可智能网络化等，而得到重视，是当前国际上实际应用的最为先进的气体传感器，目前已开始在军用毒剂的检测、环境监测、药品食品分析及工业分析中得到应用。

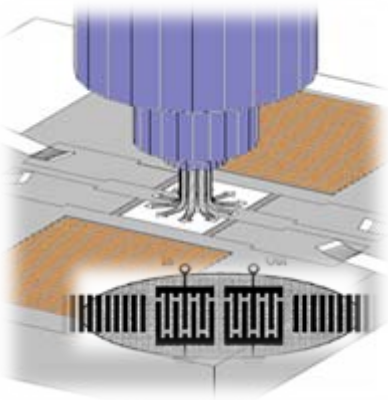


SAW气体传感器的主要类别

结合气相色谱的SAW气体传感器模式



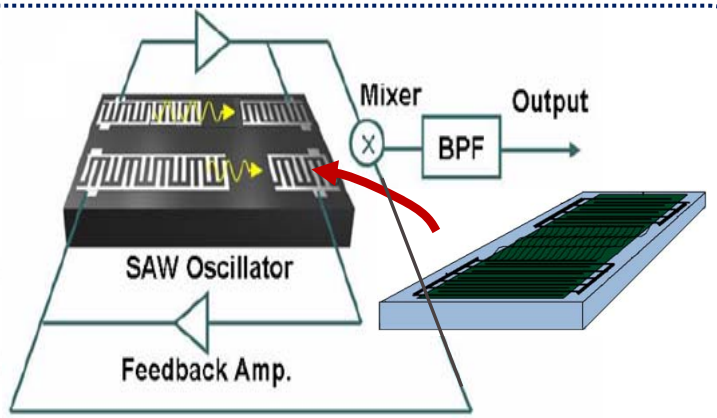




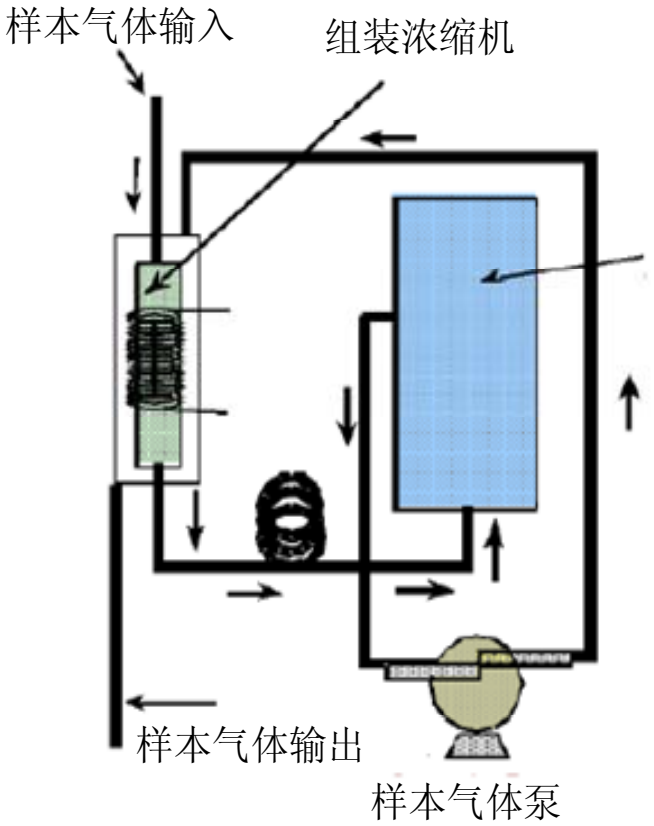
结合敏感膜的SAW气体传感器模式

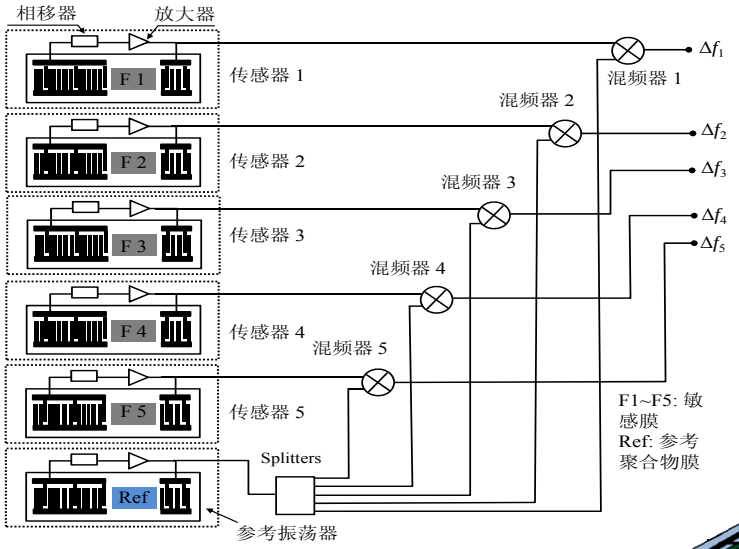


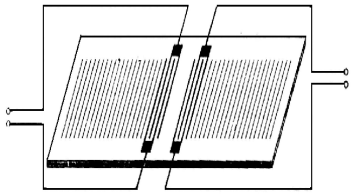


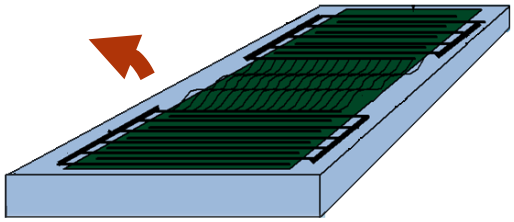


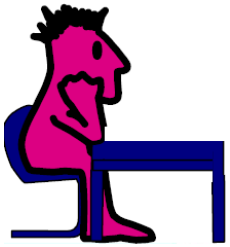
敏感膜式SAW气体传感器











采用敏感膜与声表面波技术相结合，利用阵列与模式识别技术提高传感器检测选择性；

特点：便携式，符合小型化的使用要求

敏感膜式SAW气体传感器

MITRE *The Joint Chemical Agent Detector (JCAD)*

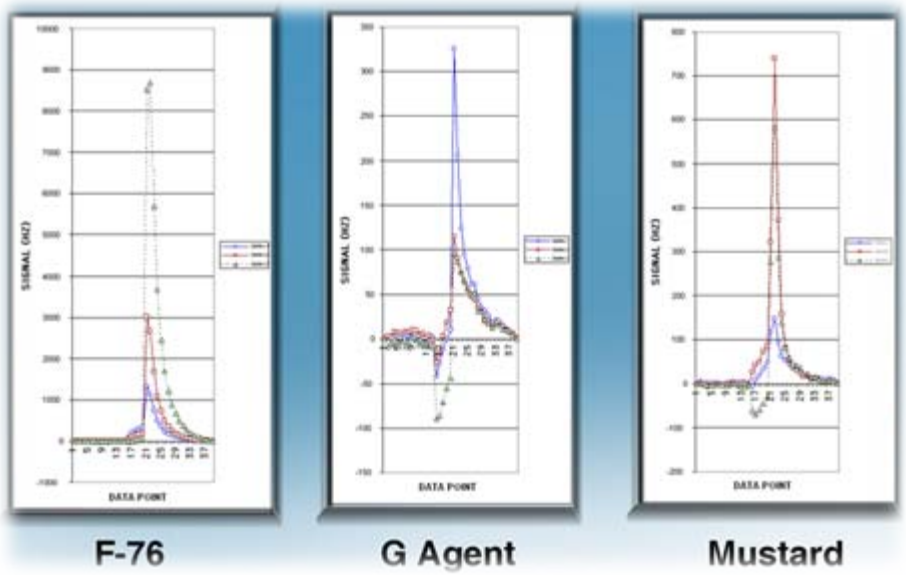


The current military requirement for the JCAD **is 257,135** units broken down as follows*:
US Army - 230,000; US Marine Corps - 15,485
US Air Force - 9,150; US Navy - 2,500

Agent	Threshold Exposure Concentration (mg/m^3) @	Threshold Exposure Response Time Max (sec) @	Relative Humidity (%RH) Range	Temperature Range (°C)
VX	1 0.1 0.04 0.001*	≤10 ≤30 ≤90 ≤1800	5 to 100	+9 to +49 at 1 mg/m^3 -6 to +49 at 0.1 mg/m^3 and 0.04 mg/m^3
GA, GB, GD & GF	1 0.1 0.001*	≤10 ≤30 ≤1800	5 to 100	-28 to +49
HD	50 2 0.02*	≤10 ≤120 ≤1800	5 to 100	-5 to +49 at 50 mg/m^3 -18 to +49 at 2 mg/m^3
L	50 2 0.02*	≤10 ≤120 ≤1800	5 to 100	-14 to +49
HN3	50 2 0.02*	≤10 ≤120 ≤1800	5 to 100	+16 to +49
AC	2500 22	≤10 ≤60	5 to 100	-32 to +49
CK	20	≤60	5 to 100	-32 to +49

*Maximum alert response time at low concentrations. Uses a pre-concentrator.

敏感膜式SAW气体传感器





MSA HAZMATCAD

- Solid State SAW array
- LED and Audible Tone Alarms
- Quick Warm Up Time (<30 s)
- Dual Mode Operation
  - 20 s Fast Mode Analysis Cycle Time
  - 120 s High Sensitivity Mode analysis cycle Time
- 3 Concentration Levels Reported (High, Medium, Low)
- AC or CG (TICs) analysis in Real-time
- Internal Data Log
- Limited System Maintenance

已通过美国环保署（EPA）环境检测认证

敏感膜式SAW气体传感器





SAW MiniCAD™ mk II Detector

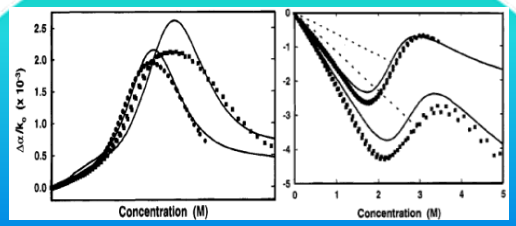
- 针对神经性与糜烂性毒剂检测检测，现已装备于美国各政府机构和地方当局

Features & Benefits:

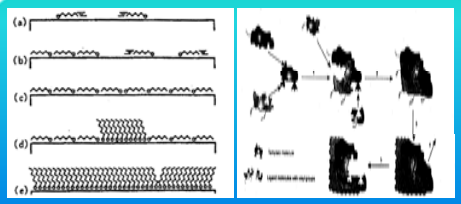
- Fully automated operation
- Compact, lightweight, portable
- LED and audible alarms
- Solid state, surface acoustic wave microsensor array detector
- Quick warm-up: 2 minutes
- 60-second cycle time
- Records data
- Requires no user maintenance
- 5-year shelf-life

敏感膜式SAW气体传感器—研究进展

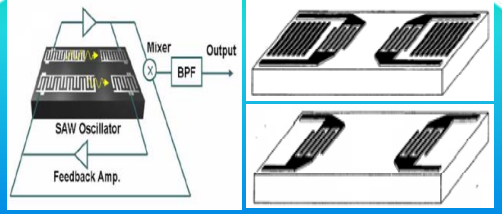
敏感膜式SAW气体传感器



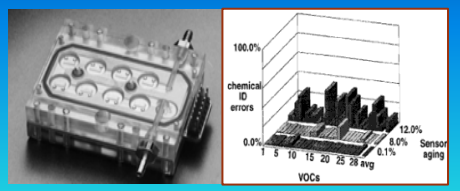
传感器响应机理的理论模型构建与分析



膜材料的合成与镀膜方法研究

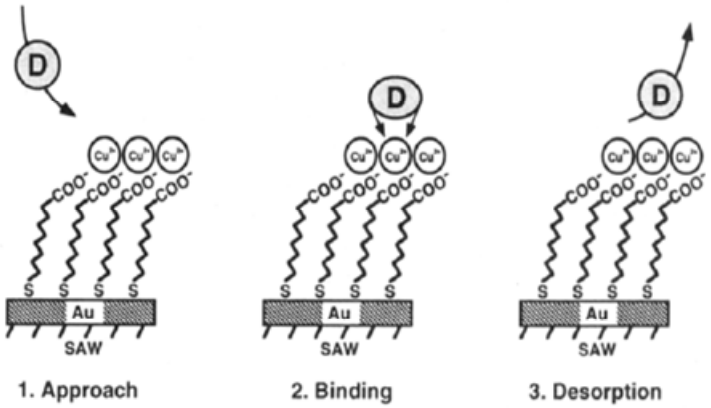


传感器功能器件的设计与研制

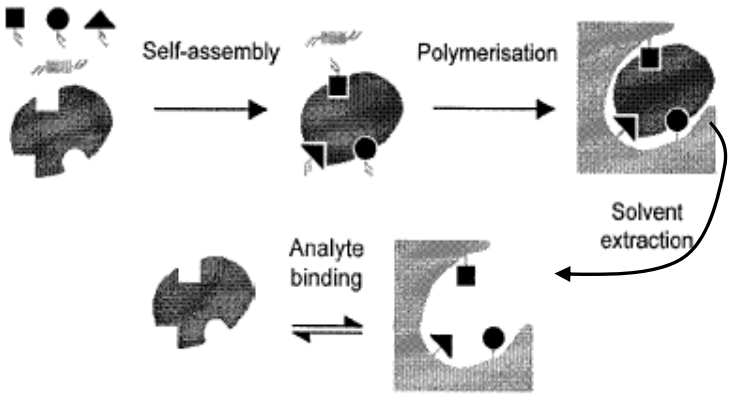


传感器阵列实现及模式识别方法研究

敏感模式SAW气体传感器—机理响应分析

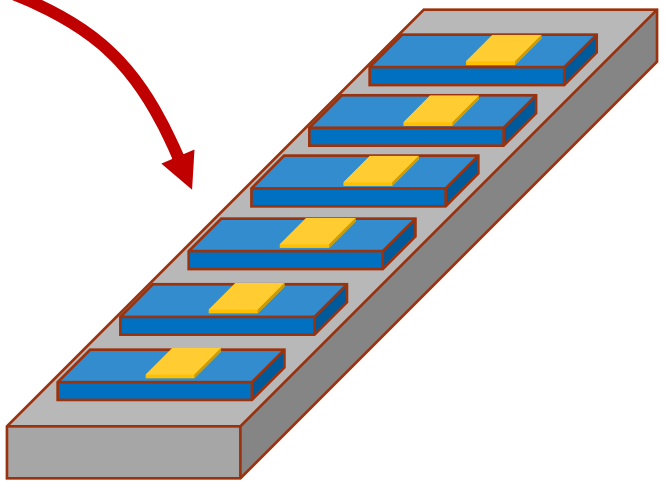


自组装成膜

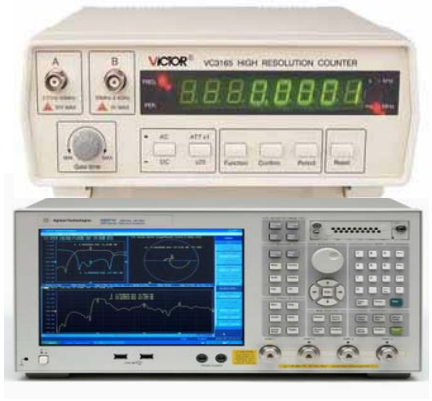


分子印迹法

- 常用的聚合物膜材料的镀膜方法有如下几种：旋涂，空气刷，滴定以及LB法
- 目前在SAW化学传感器敏感膜镀膜中采用两种新型成膜法即自组装以及分子印迹法（下图所示），这两种镀膜需要以金膜为载体
- 聚合物在不同条件下体现出三种不同状态即玻璃状（Glassy）、玻璃－橡胶状和橡胶(Rubbery)状



敏感模式SAW气体传感器—机理响应分析



实验验证



理论分析

层状介质中声波传播方法以及微扰理论

中间金膜对SAW速度的扰动

$$V = V_0\left(1 - \frac{c_1\beta_1\mu}{\omega}\tan(\beta_1 h) - \frac{c_2\beta_2\mu}{\omega}\tan(\beta_2 h) - \frac{c_3\beta_3(2\mu+\lambda)}{\omega}\tan(\beta_3 h)\right)$$

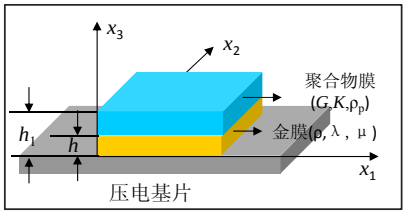
中间金膜对基片耦合参数c的扰动

$$c_i' = \frac{V}{\cos^2(\beta_i h)V_0}c_i \quad (i = 1 \sim 3)$$

微扰理论与表面机械阻抗方法

$$\frac{\Delta\gamma}{k_0} = \frac{\Delta a}{k_0} - j\frac{\Delta V}{V} = j\sum_i^3 c_i'\frac{\alpha_i M^i}{\omega}\cdot\tan(\alpha_i(h_1 - h))$$

$$\alpha_i = \omega\sqrt{\frac{\rho_p - E^i/V^2}{M^i}} \quad (E^1 = \frac{4G(3K+G)}{3K+G}, E^2 = G, E^3 = 0, M^1 = M^2 = G, M^3 = K)$$



聚合物膜对SAW传播的扰动

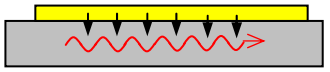
气体吸附中的聚合物膜厚效应

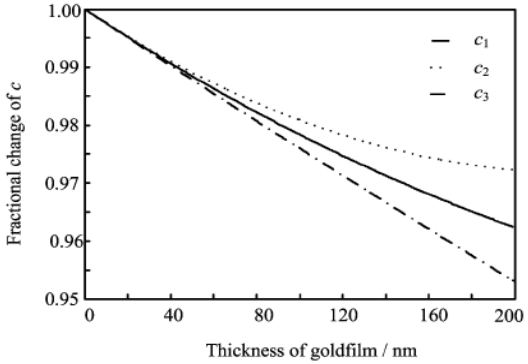
气体吸附中传感器的频率效应

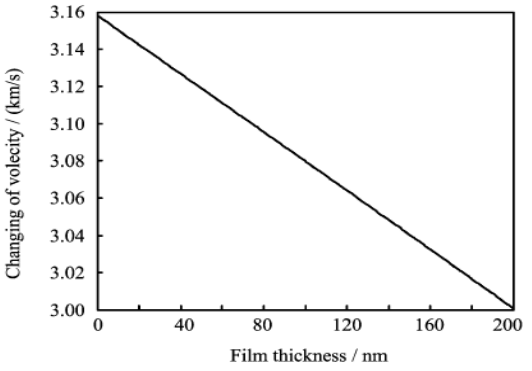
中间金膜对传感器性能影响

敏感模式SAW气体传感器—机理响应分析

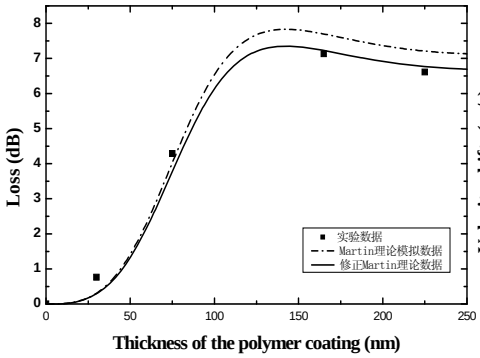
金薄膜对声波传播速度及耦合常数的扰动计算（158MHz延迟线）

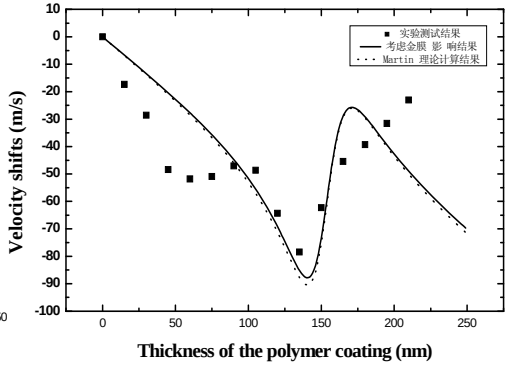


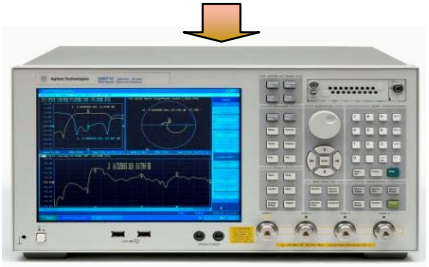




考虑金膜影响的聚合物膜材料对声波的扰动分析（与Martin理论结果以及试验结果进行对比）









测试条件：158MHz SAW双延迟线传感器，金膜厚度为800埃；聚合物为聚环氧氯丙烷，其密度为1.42 g/cm^3，聚合物为橡胶态高损耗型，其剪切模量参数可以根据J.D.Ferry的方法近似得到常态下为$0.5\times10^9+1.2\times10^7$（Pa），体模量近似为$K=1\times10^9+i\times10^9$ N/m_2；室温

* Wang Wen, He Shitang, “Analysis of Viscoelastic Effects of Polymer Coatings On Surface Acoustic Wave Gas Sensor Based on Gold Film”, Chinese Journal of Chemical Physics, vol.19(2006), No.1, pp: 47-53

敏感模式SAW气体传感器

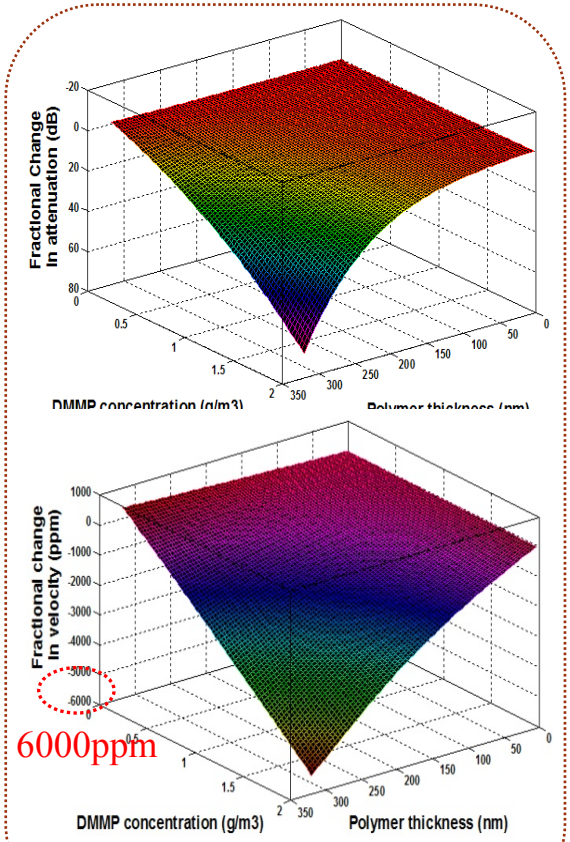
机理响应-气体吸附的膜厚效应

气体吸附中敏感膜膜厚的影响

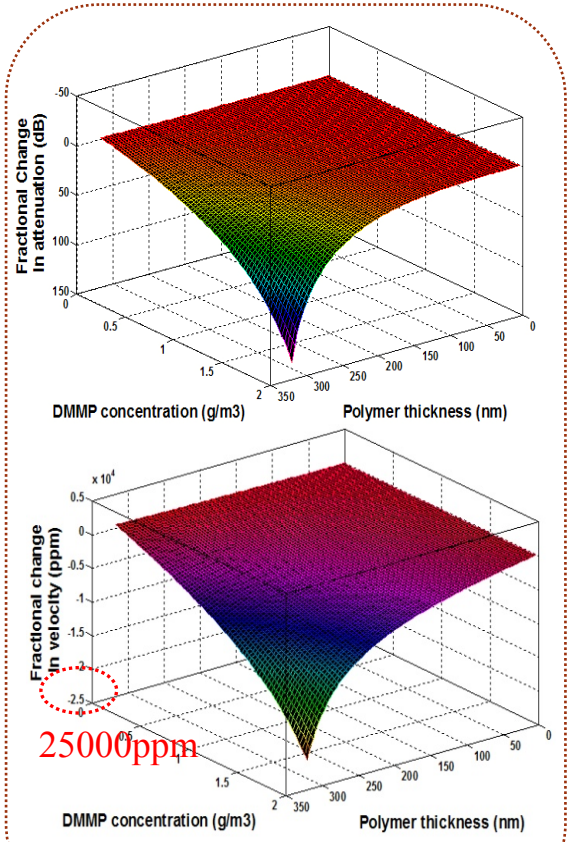
$$h(c_v) = h_0(1 + \kappa c_v / \rho_v)$$

$$\rho(c_v) = \frac{\rho_0 + \kappa c_v}{1 + \kappa c_v / \rho_v}$$

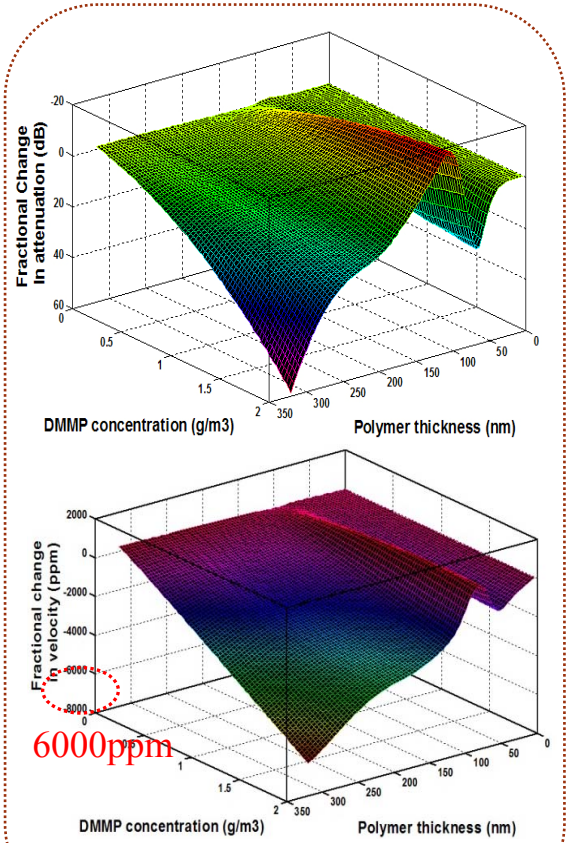
中间金膜：200nm，敏感膜假定为聚环氧氯丙烷，频率：300MHz，检测对象假定为：DMMP



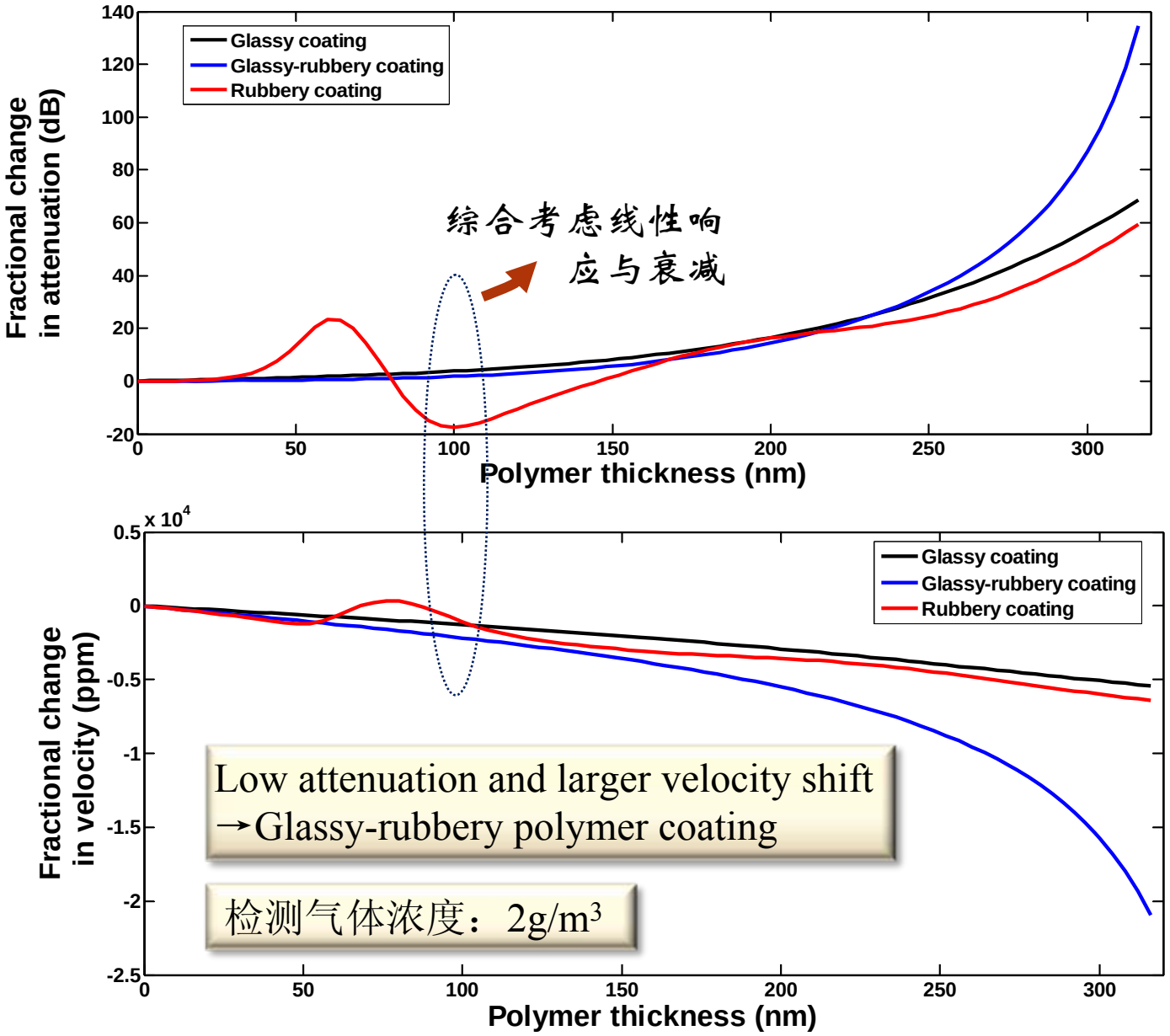
Glassy polymer



Glassy-rubbery polymer



Rubbery polymer


Glassy coating
Glassy-rubbery coating
Rubbery coating
Fractional change in attenuation (dB)
综合考虑线性响应与衰减
Polymer thickness (nm)
x 10^4
Fractional change in velocity (ppm)
Low attenuation and larger velocity shift
→Glassy-rubbery polymer coating
检测气体浓度：2g/m3

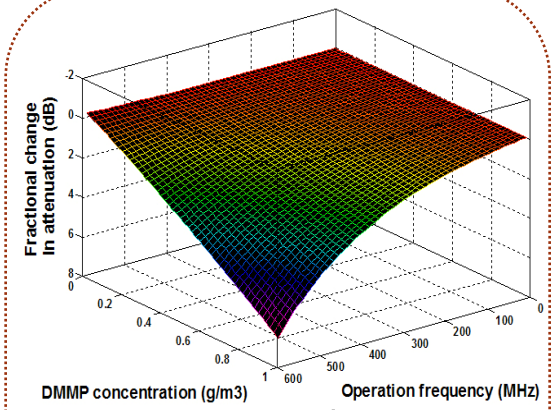
敏感模式SAW气体传感器

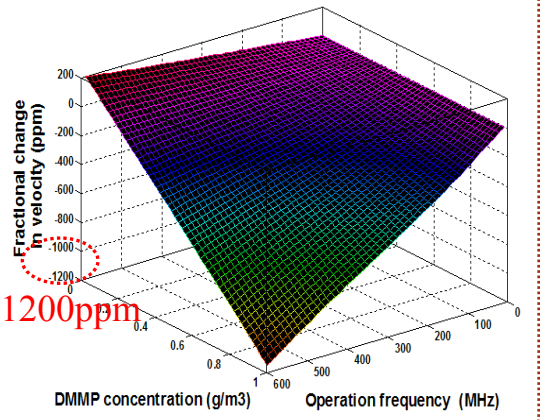
机理响应的模拟分析:气体吸附的频率效应

传感器频率对其响应的影响

$$\frac{\Delta\gamma}{k_0}=\frac{\Delta a}{k_0}-j\frac{\Delta V}{V}=j\sum_i^3 c_i'\frac{\alpha_i M^i}{\omega}\cdot\tan(\alpha_i(h_1-h))$$

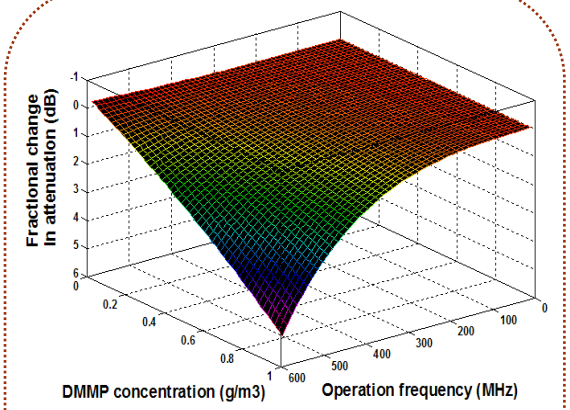
中间金膜：200nm，敏感膜假定为聚环氧氯丙烷，敏感膜厚：100nm，检测对象假定为：DMMP

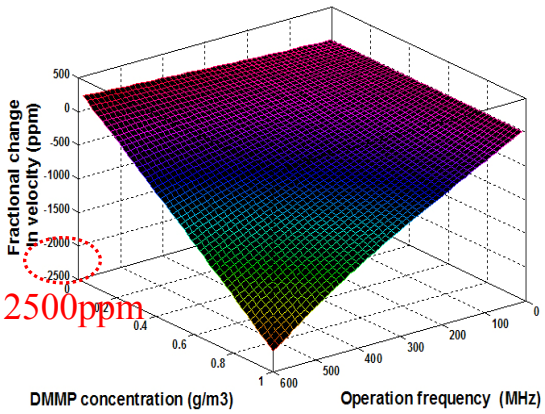




1200ppm

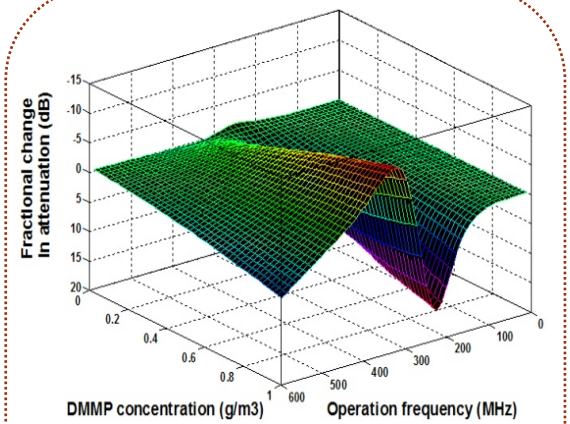
Glassy polymer

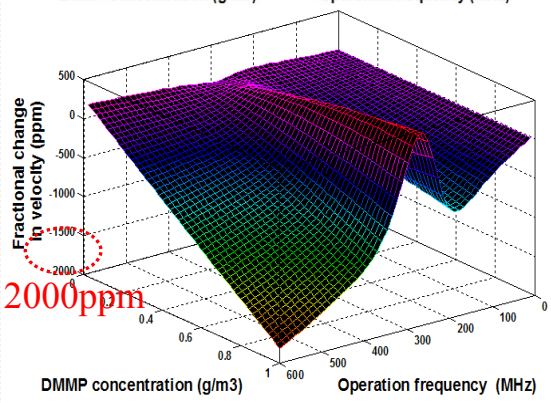




2500ppm

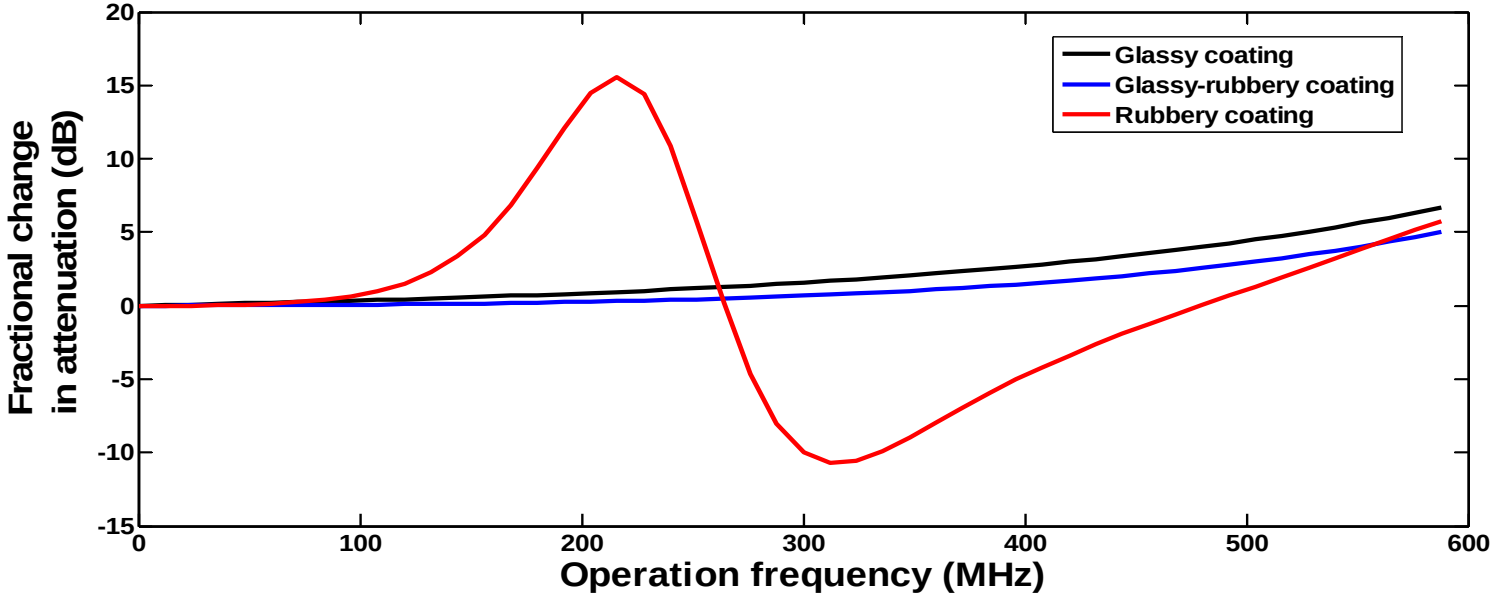
Glassy-rubbery polymer

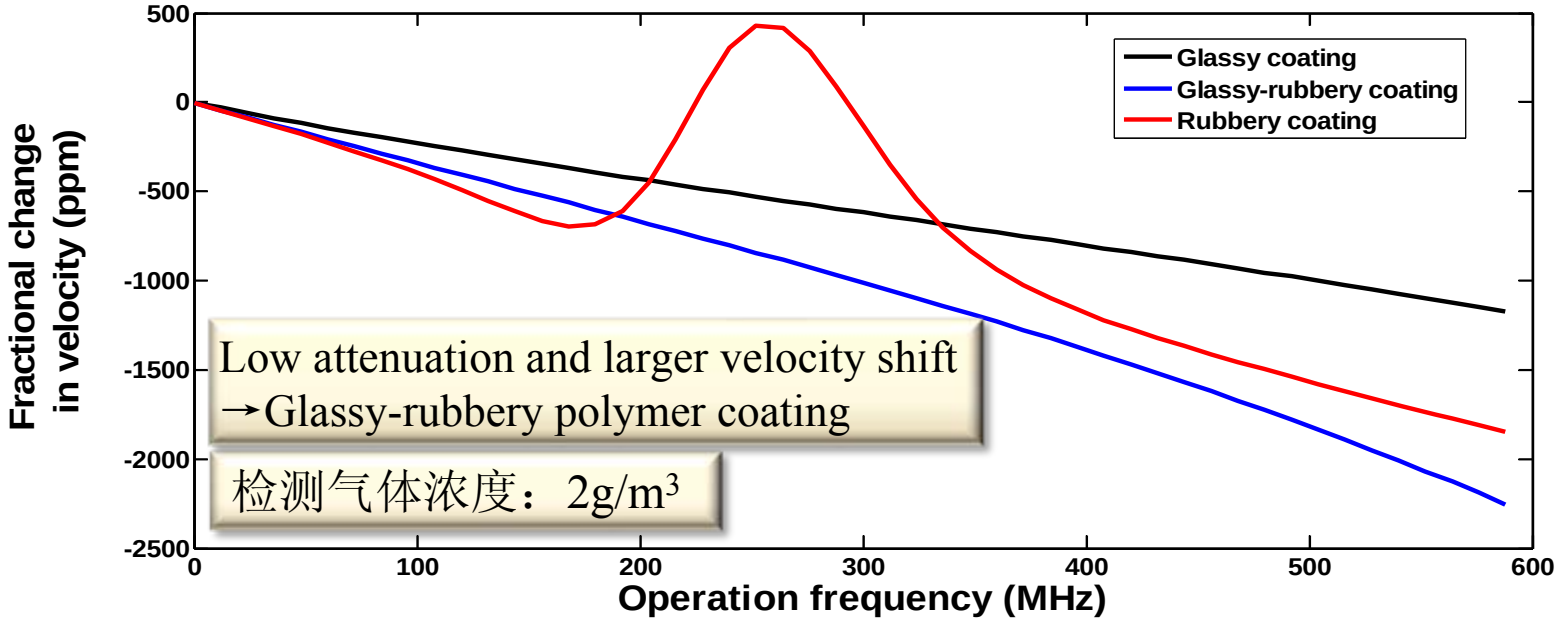




2000ppm

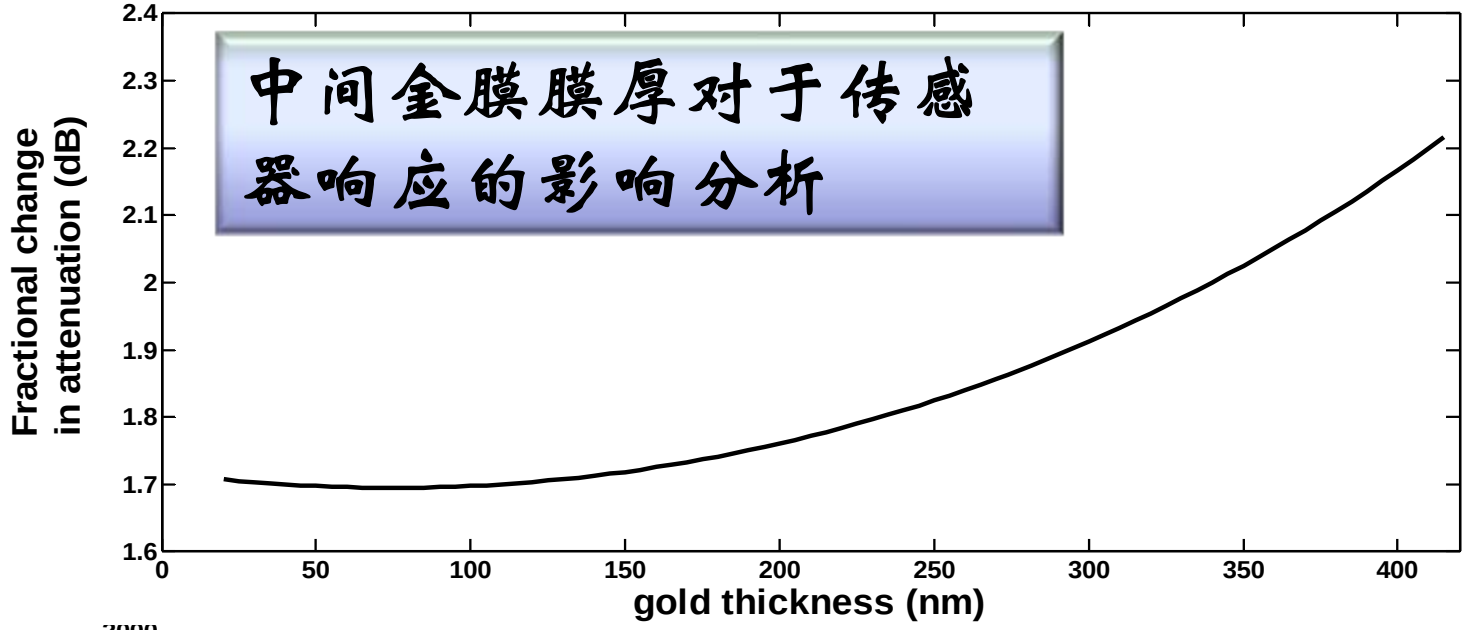
Rubbery polymer

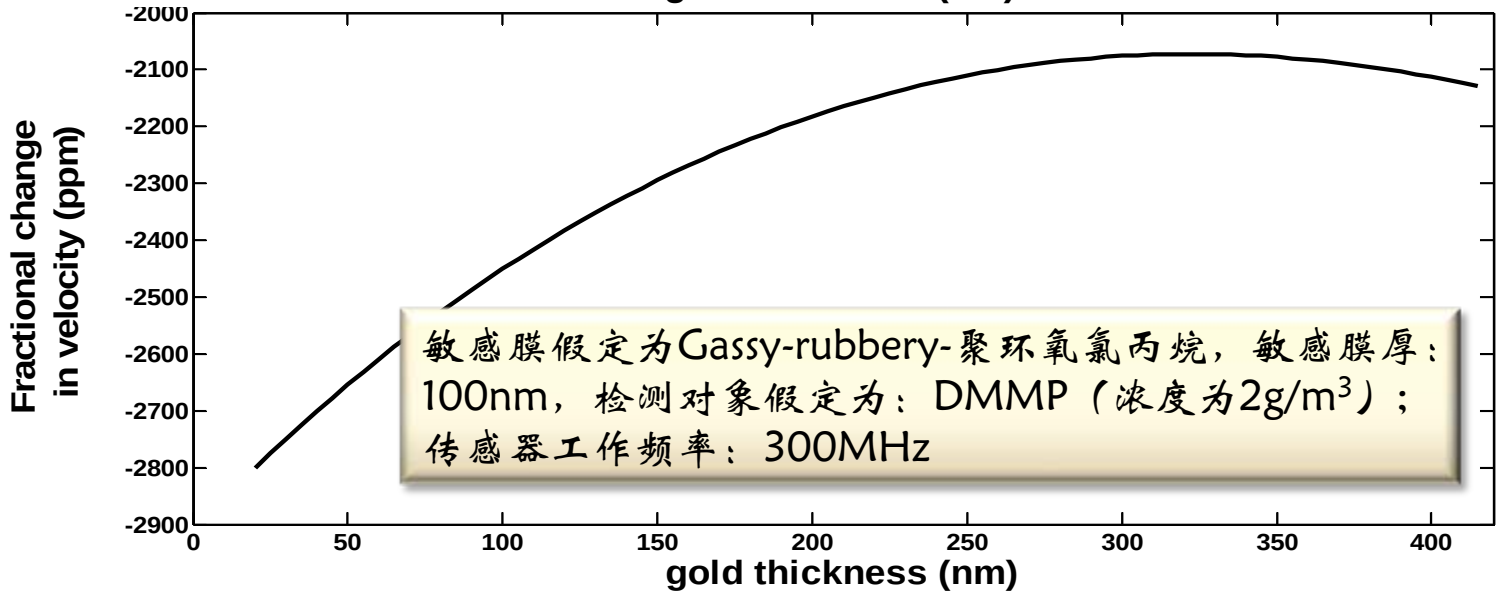




Wang Wen, et al, “Advances in SXFA-Coated SAW chemical sensors for Organophophorous Compound detection”, Sensors 2011, 11, 1526-1541

中间金膜膜厚对于传感器响应的影响分析

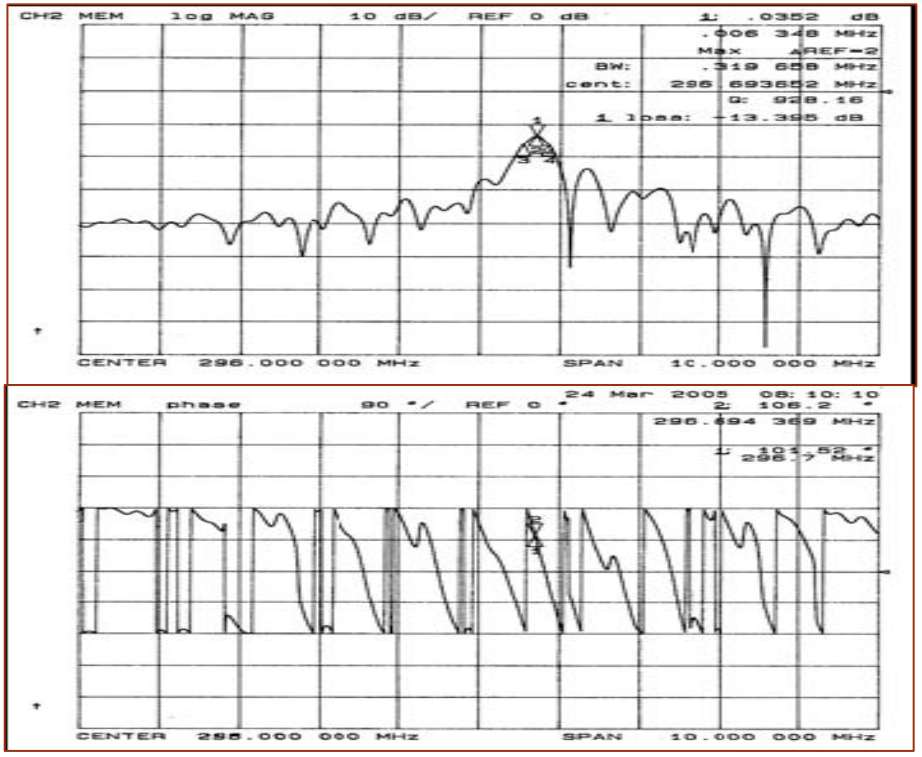


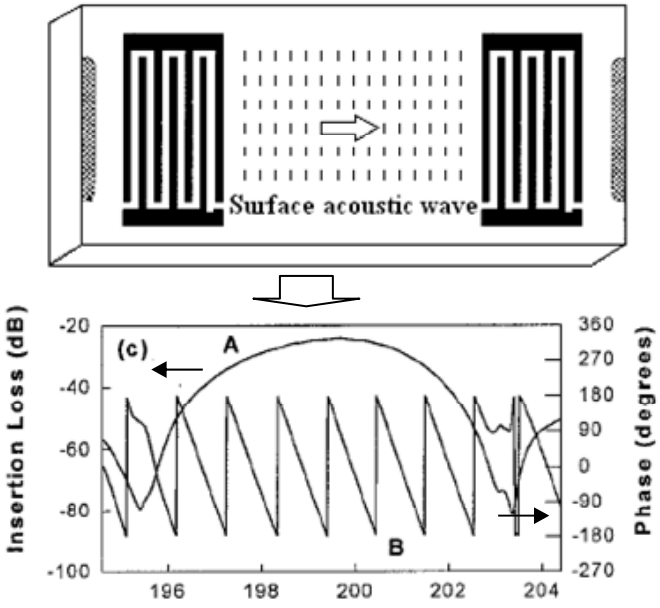


敏感膜假定为Gassy-rubbery-聚环氧氯丙烷，敏感膜厚：100nm，检测对象假定为：DMMP（浓度为2g/m^3）；传感器工作频率：300MHz

高性能敏感膜式传感器物理结构研究

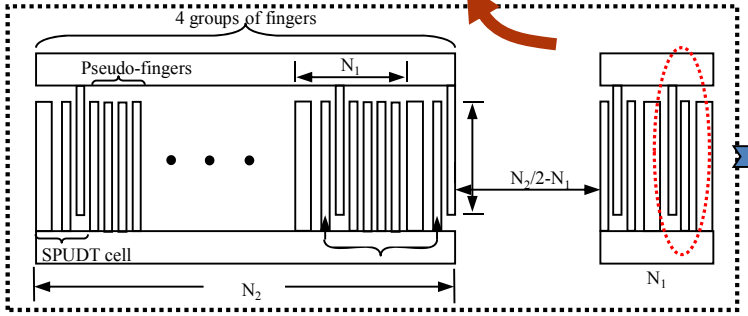
低损耗单一模式控制的延迟线设计

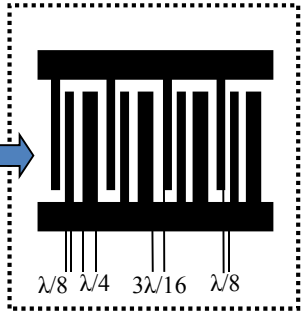


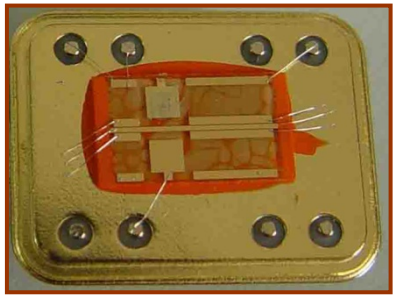


缺点：高插入损耗－基于石英基片材料的双向换能器结构；多模结构由外围电路完成如*AGC*系统

延迟线结构：SPUDT与梳状换能器

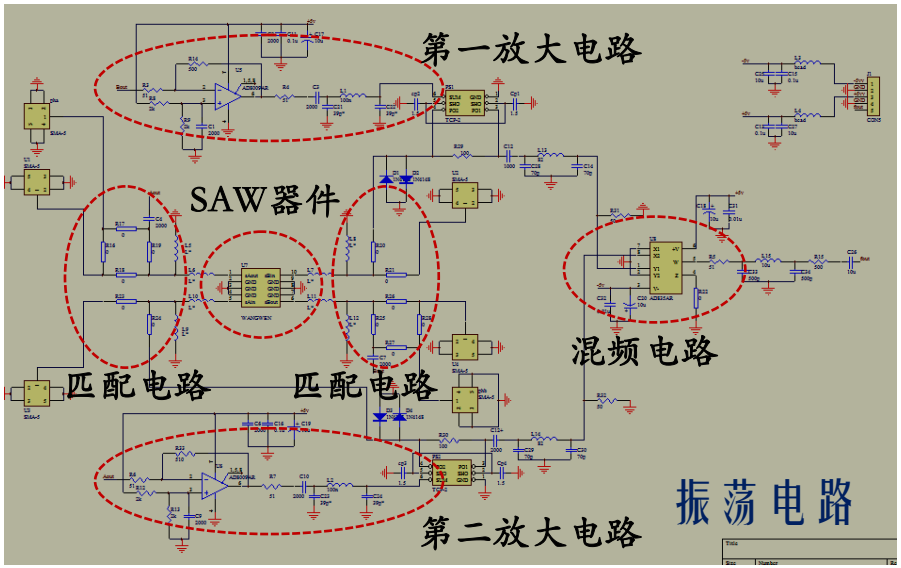


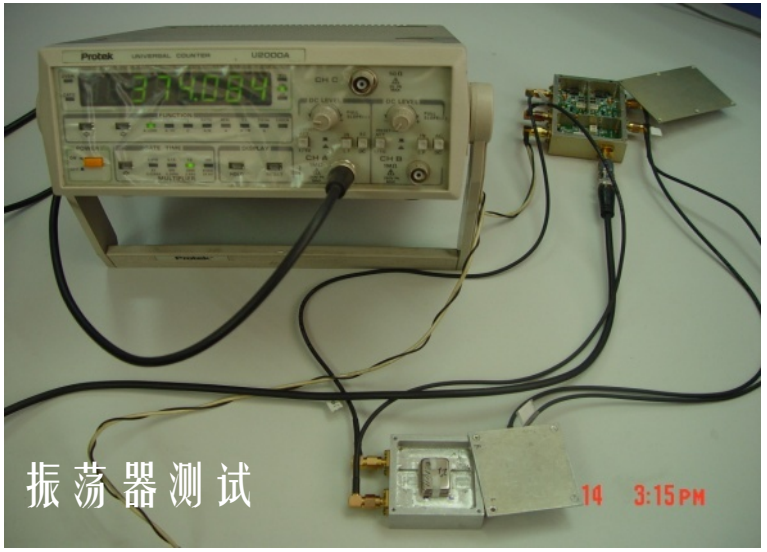




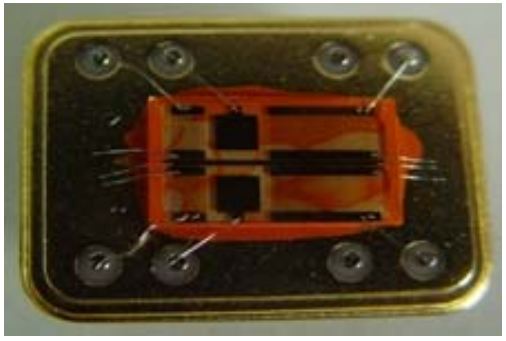
高性能敏感膜式传感器物理结构研究

振荡器研制与评价





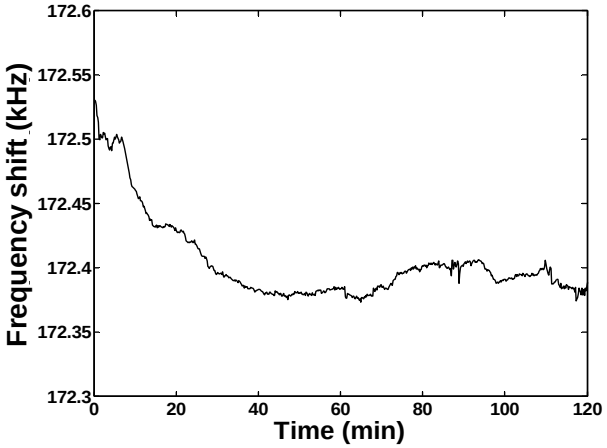
- ✓频率：300MHz
- ✓结合恒流源的放大器等振荡电路元件
- ✓采用最低损耗点振荡方法



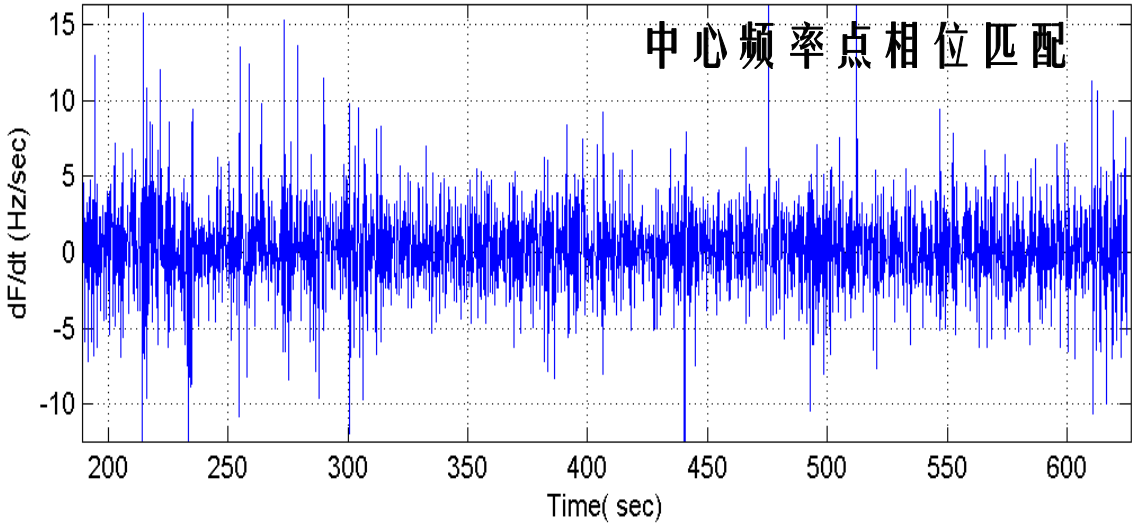


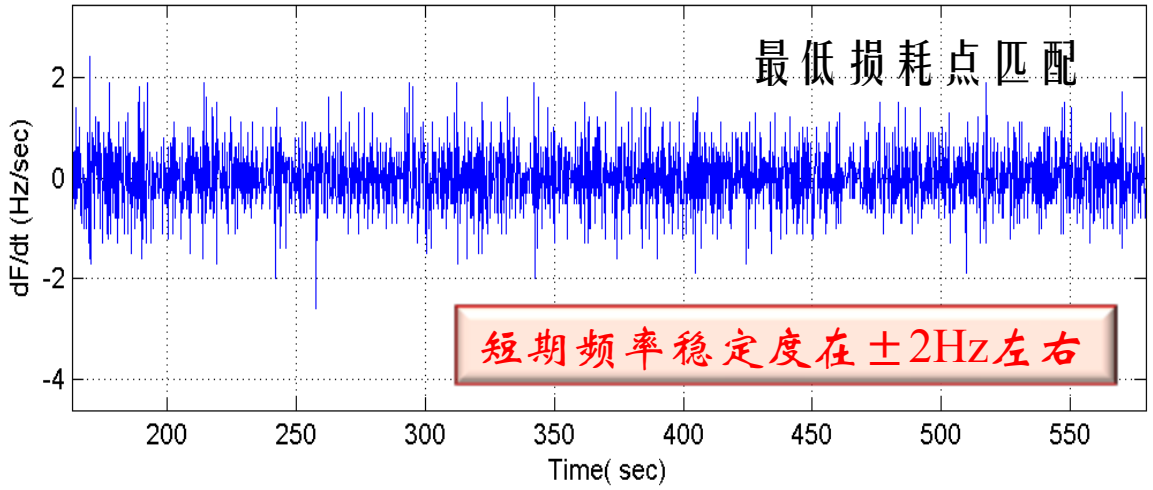
高性能敏感膜式传感器物理结构研究

振荡器研制与评价



300MHz SAW 延迟线型振荡器；器件损耗约10dB；采用全电极



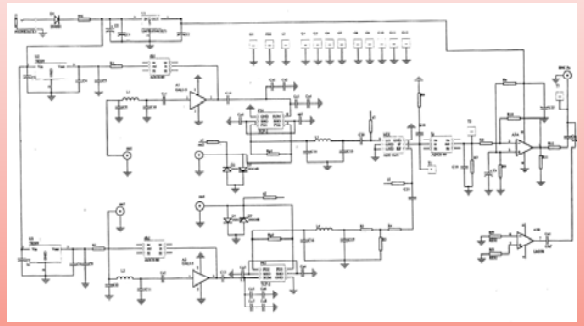


高性能敏感膜式传感器物理结构研究

阵列设计及性能评价

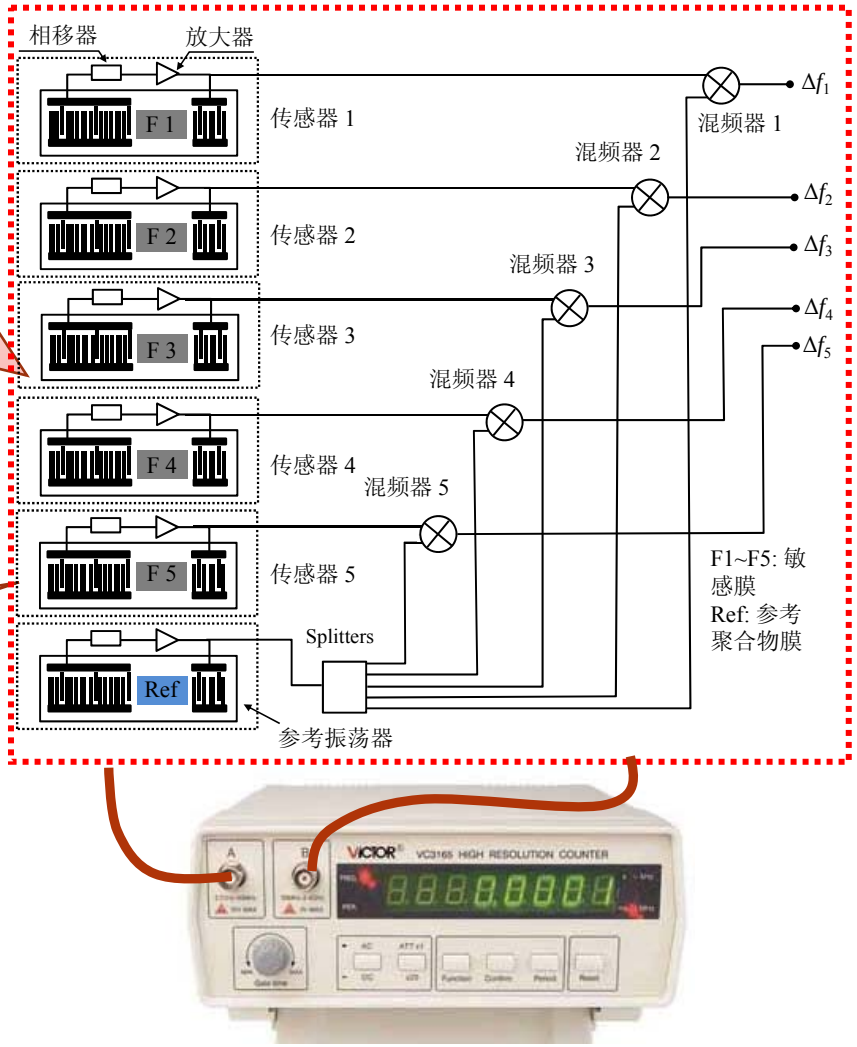
以所研制的SAW延迟线为反馈元，构成六通道SAW波振荡器

采用高可靠性与稳定性的恒流源运放振荡电路

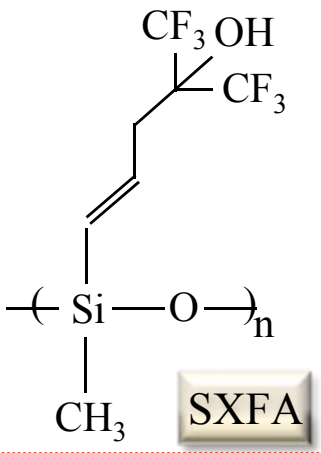


以具有低损耗与单一模式控制的Love波延迟线作为反馈元

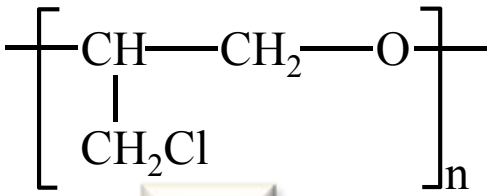




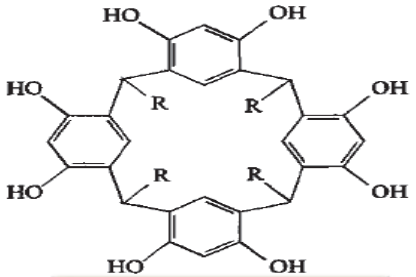
敏感膜材料选取



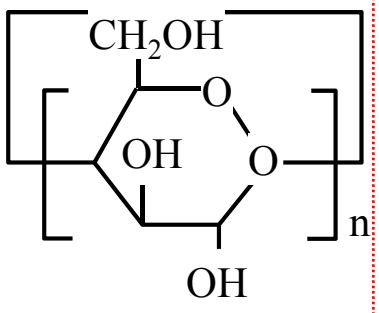
SXFA



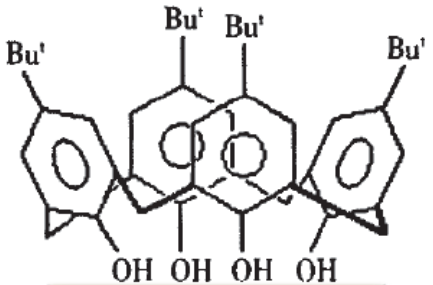
PECH



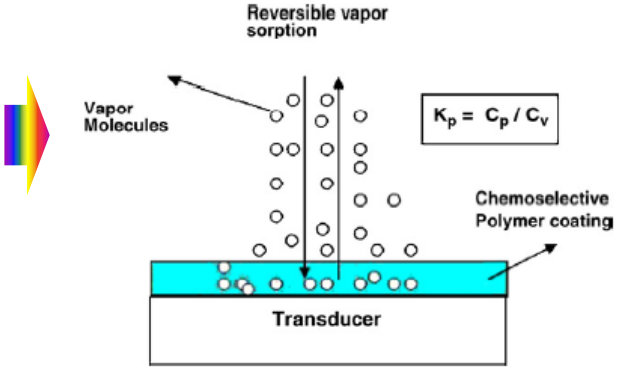
间苯二酚杯芳烃

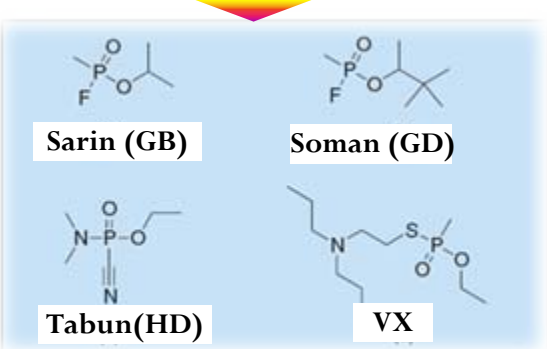


环糊精



对叔丁基杯芳烃



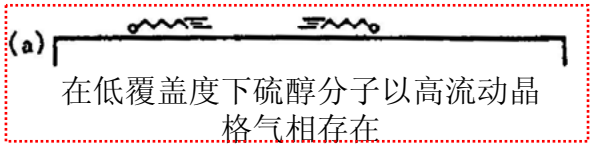


针对有机膦毒剂VX、GB、GD、HD的检测

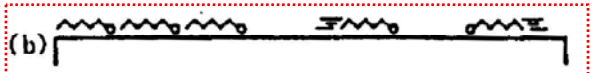
阵列式传感器膜材料选取

敏感膜材料镀膜技术研究

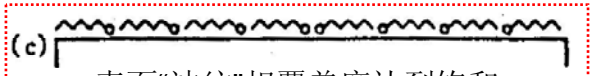
分子自组装：成膜容易、制备简单，具有良好的稳定性与有序性



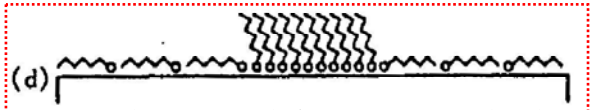
在低覆盖度下硫醇分子以高流动晶格气相存在



在表面覆盖度达到饱和之前，“波纹相”岛、多相成核及其生长与晶格气相达到平衡，硫醇分子平铺在基底表面



表面“波纹”相覆盖度达到饱和

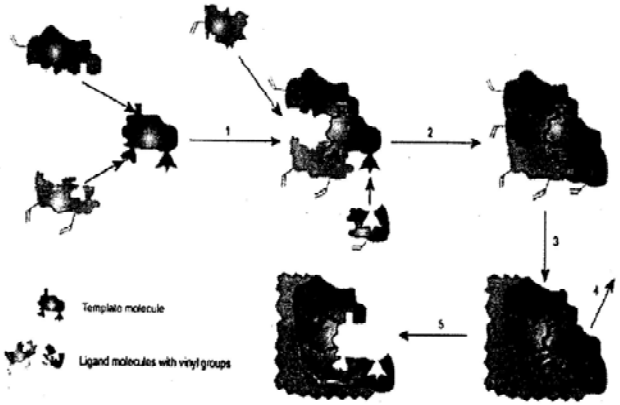


表面“波纹”相覆盖度达到饱和；在“波纹”相畴界，通过高密度岛的成核，表面进行侧压诱导的固-固相转移



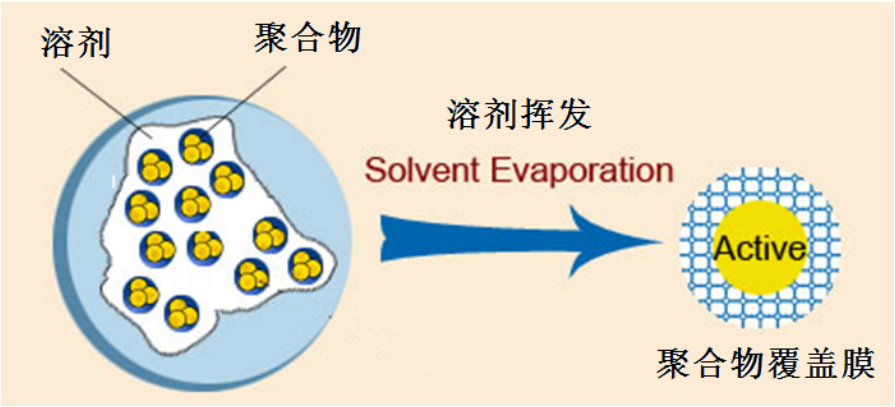
“波纹”相逐渐消失，高密度岛逐渐生长，直到表面达到饱和

分子印迹：成膜稳定性好，可耐高温高压及酸碱物等，可重复性实用且易于保存



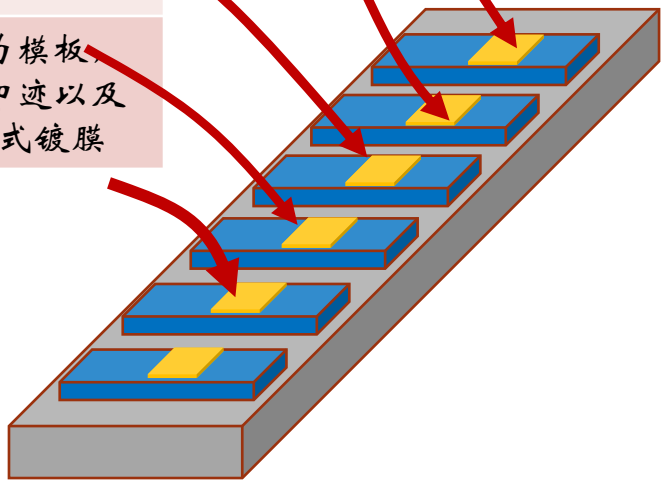
1、2：模板分子和配体分子的自组装；3：配体、模板符合物结合后进入聚合膜中；4：除去模板分子；5：模板孔穴的形成

溶剂挥发：成膜简单快速、但是成膜属于无定形膜，膜厚难以精确控制

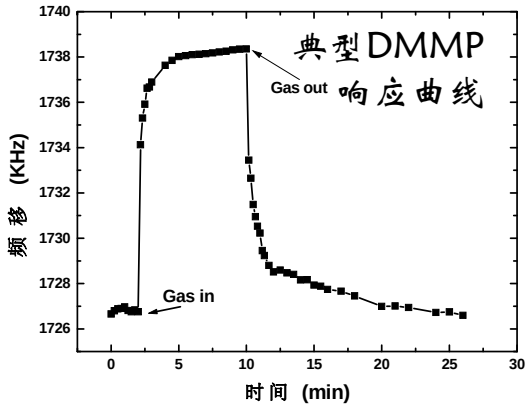


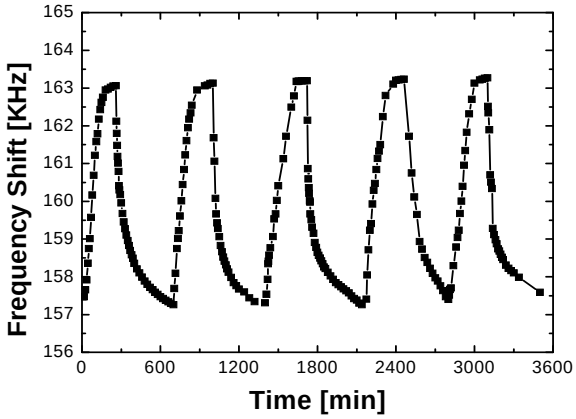
敏感膜材料选取与镀膜技术研究

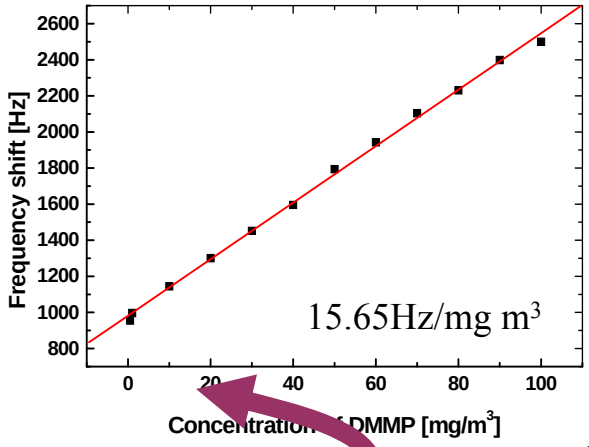
种类	膜材料	检测对象	镀膜方法
1	β-环糊精自组装巯基衍生物	GB	以沙林酸为模板，采用分子印迹以及自组装方式镀膜
2	聚环氧氯丙烷（PECH）	HD	溶剂挥发法
3	β-环糊精自组装巯基衍生物	VX	以VX为模板，采用分子印迹以及自组装方式镀膜
4	六氟甲基羟基聚硅氧烷（SXFA）	检测G类毒剂	溶剂挥发法
5	25-（硫基烷基烷氧基）-对叔丁基杯[4]芳烃	GB	以沙林酸为模板，采用分子印迹以及自组装方式镀膜

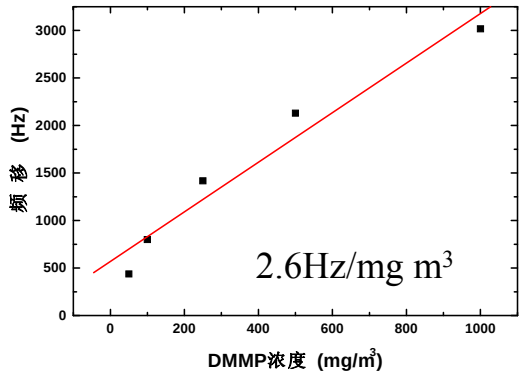


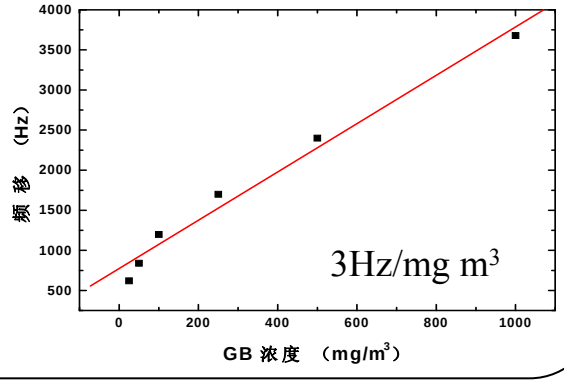
双通道传感器实验











自组装SAW-MUA-Cu+气体传感器性能测试

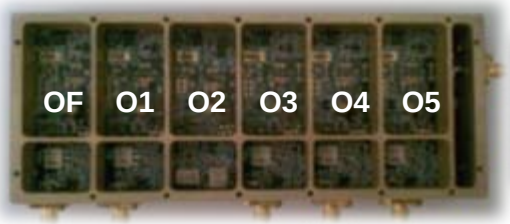
分子印迹SAW-MIP气体传感器性能测试

*Wen Wang, Shitang He, Yong Pang, "High Frequency Stability Oscillator for SAW-Based Gas Sensor", ***Smart materials and structures*****, 15, 2006, pp:1525-1530, (SCI)**

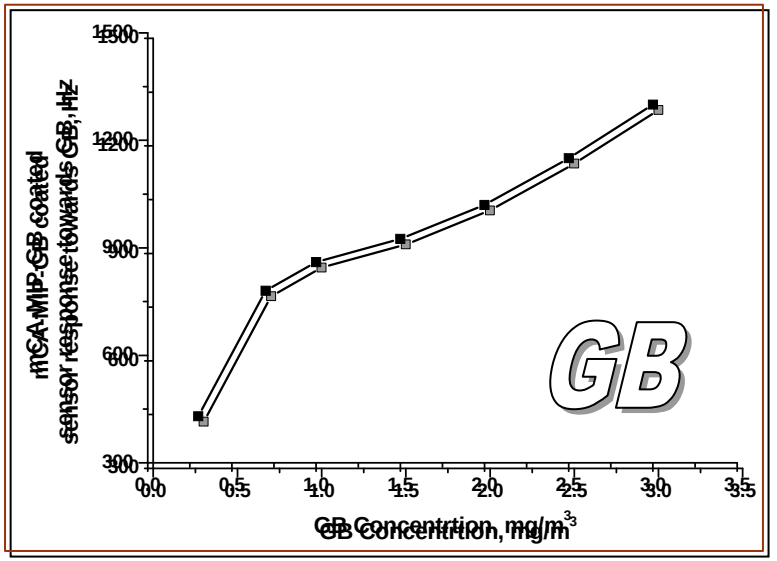
*Wen Wang, Shitang He, Shunzhou Li, Minhhua Liu, Yong Pan, "Enhanced Sensitivity of SAW Gas Sensor Coated Molecularly Imprinted Polymer Incorporating High Frequency Stability Oscillator", ***Sensors and actuators B***, 125, 2007**, pp:422-427 (SCI)**

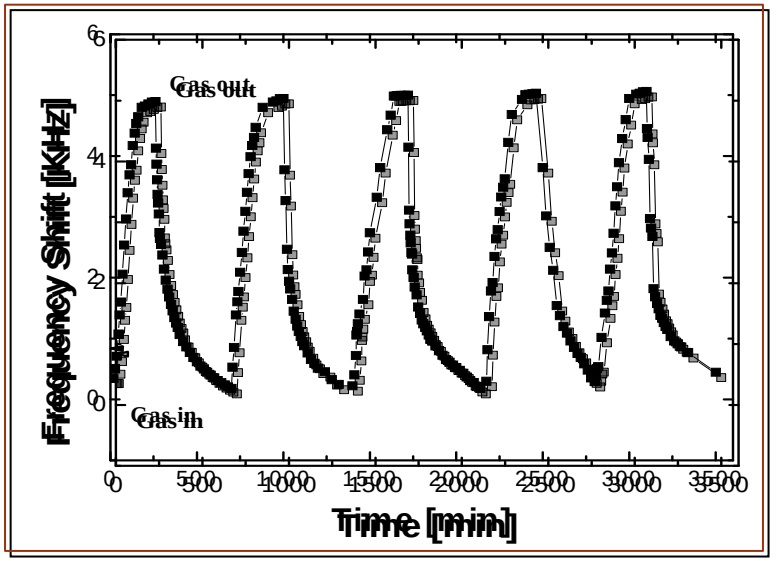
传感器阵列检测实验

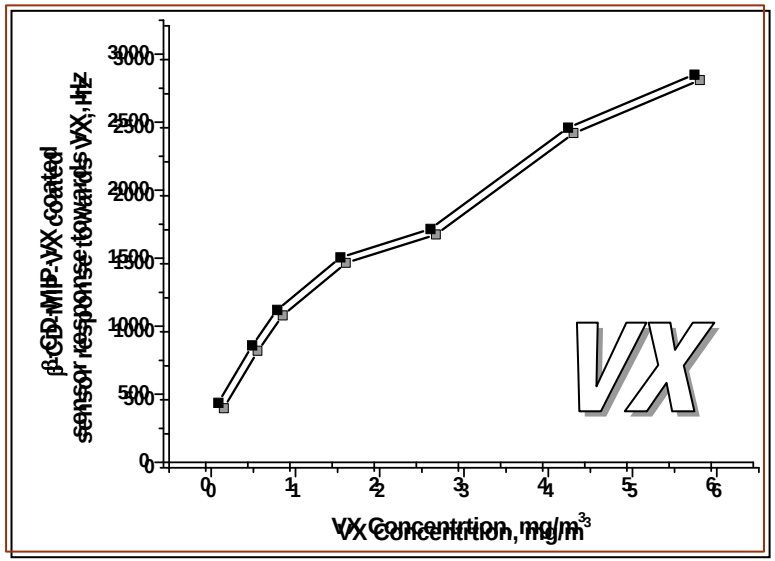

FHDF-01 型动态发生器
CX-1型多通道频率计

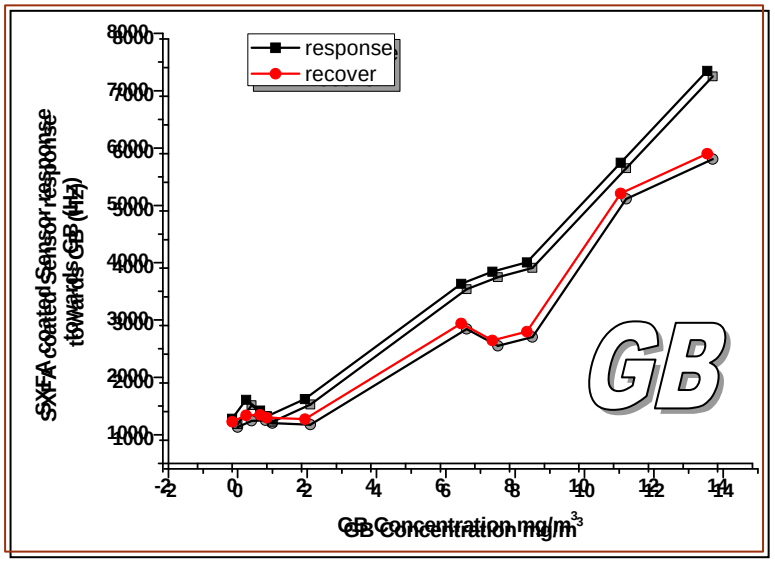

OF
O1
O2
O3
O4
O5



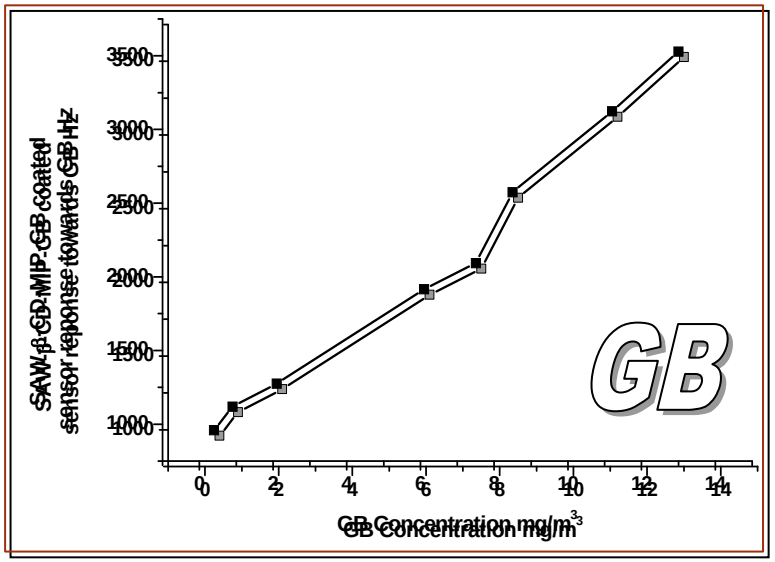

mCA-MIP-GB coated sensor response towards GB, Hz
GB Concentration, mg/m3
GB


Frequency Shift [KHz]
Time [min]
Gas out
Gas in

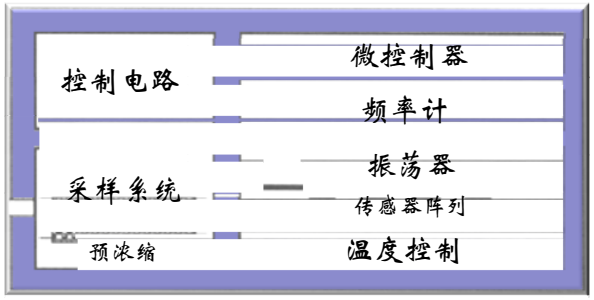

β-CD-MIP-VX coated
sensor response towards VX, Hz
VX Concentration, mg/m3
VX

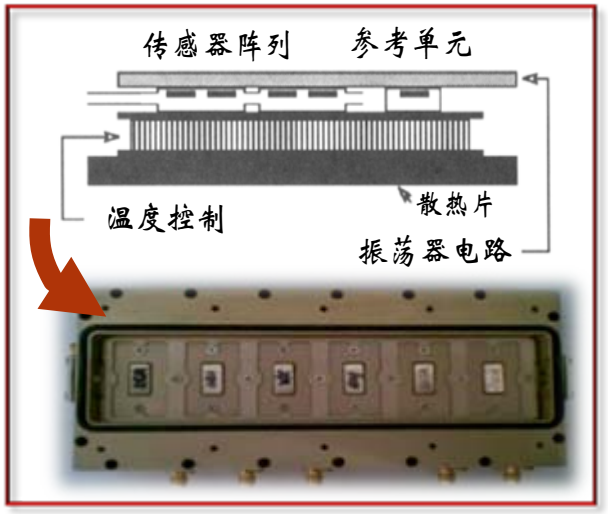

response
recover
SXFA coated Sensor response
towards GB (Hz)
GB Concentration mg/m3
GB


PECH coated sensor towards HD Hz
HD Concentration mg/m3
HD


SAW-β-CD-MIP-GB coated
sensor response towards GB Hz
GB Concentration mg/m3
GB

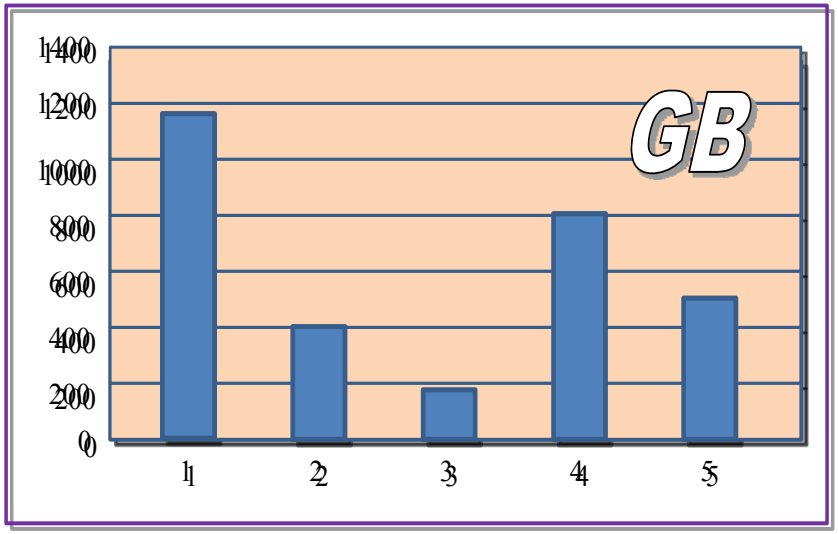
阵列技术及模式识别技术研究

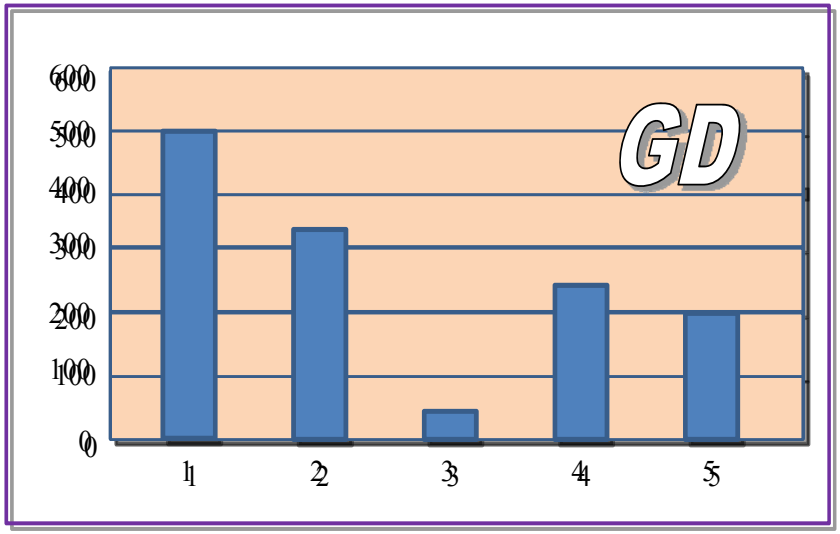


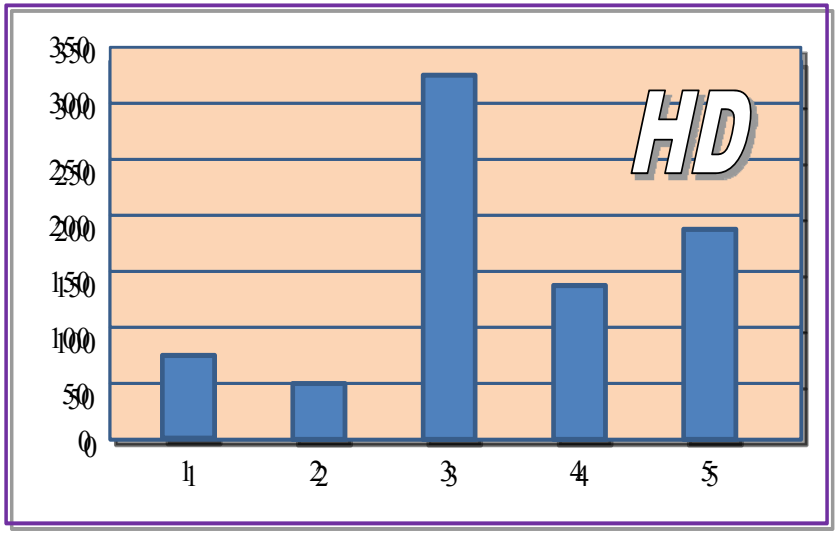


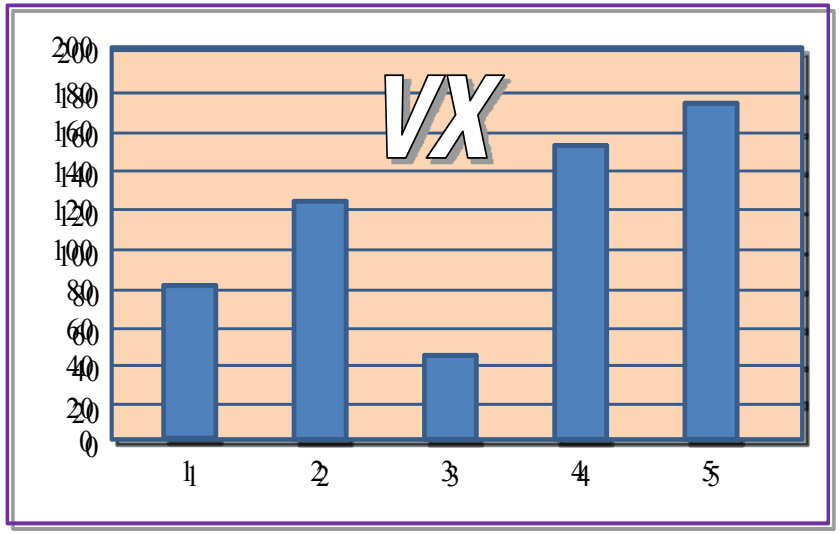


传感器原理样机



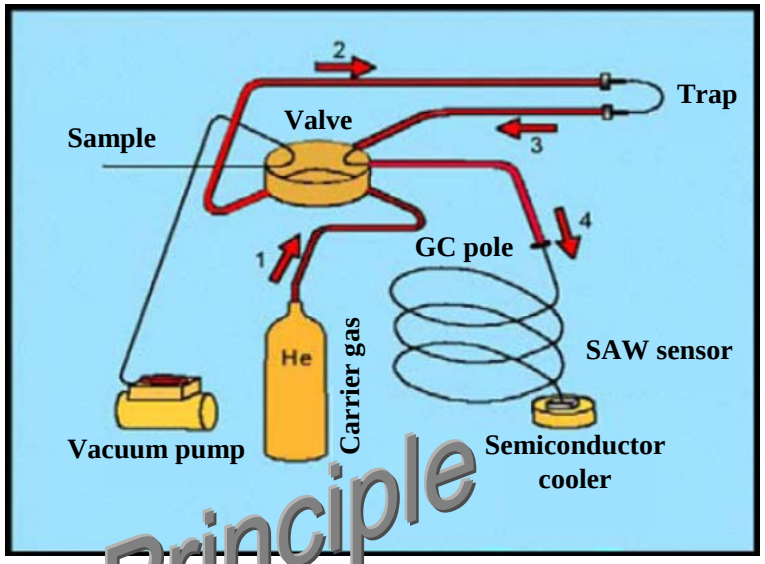






检测对象	GB	GD	HD	VX
浓度（mg/m³）	2.0	0.5	7.0	8.0

与气相色谱联用的SAW气体传感器



1-sample enrichment and sampling system including pump, valve and sample enrichment setup;

2-pole Separate System including GC pole and temperature control setup;

3-SAW sensor system including sensor probes, oscillator circuit and precise temperature control circuit

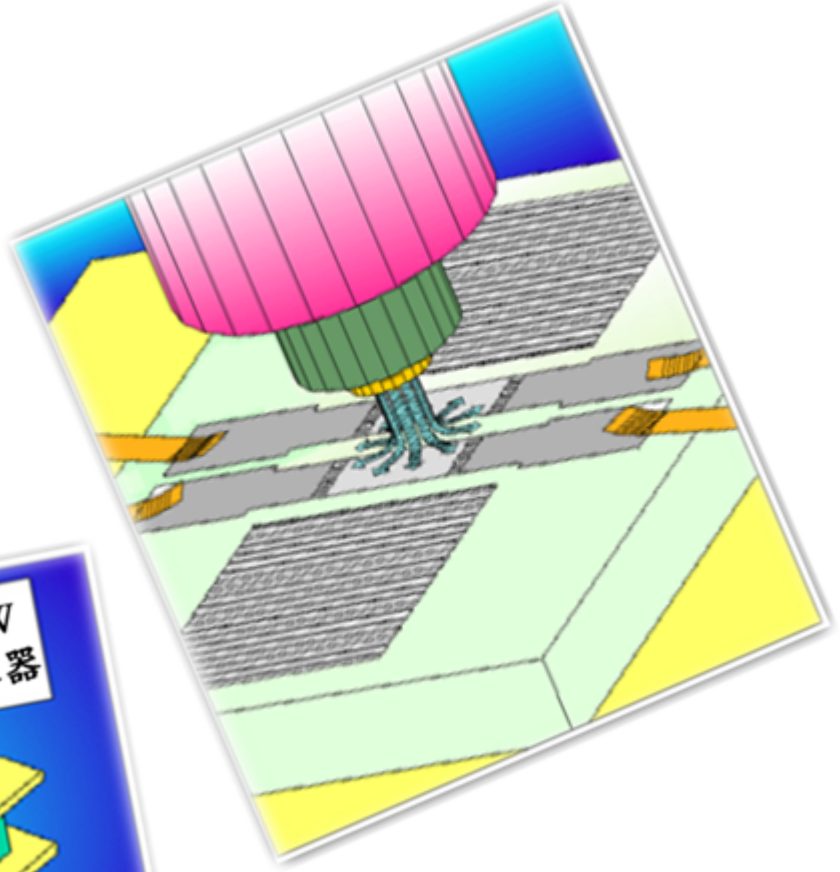
4-detection data processing system

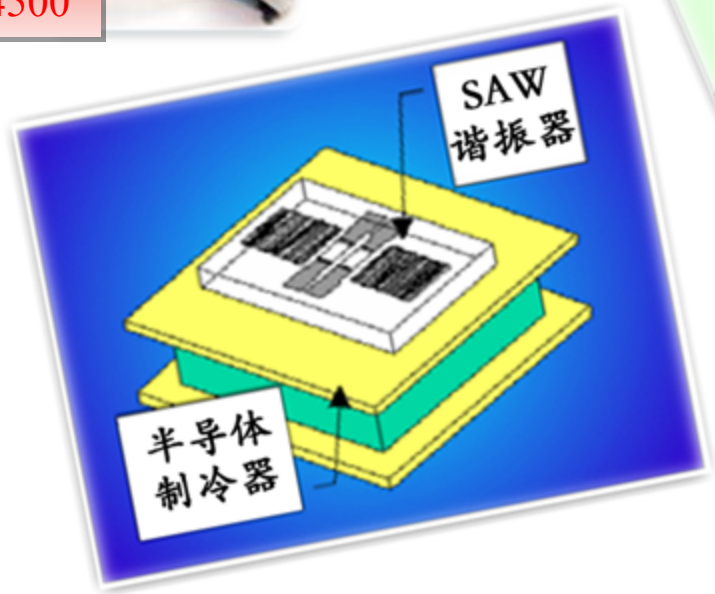
Sampling → Enrichment、flash vaporization (rapid heating) → GC pole → Sample and carrier separation (time domain) → SAW device surface → Precise temperature control → Condensation-detection

特点：检测对象宽、灵敏度高、极低的检测下限以及快速响应特点

与气相色谱联用的SAW气体传感器—现有技术







与气相色谱联用的SAW气体传感器—现有技术

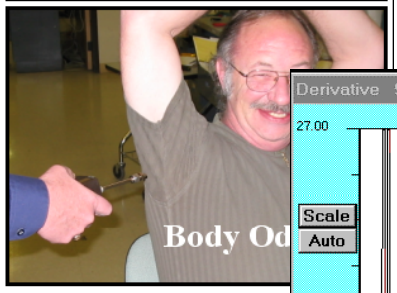








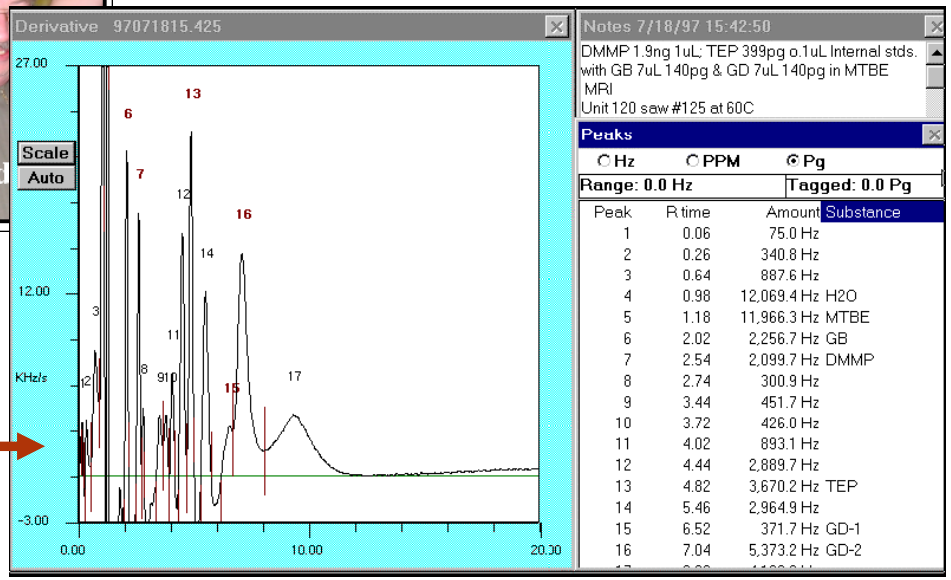






各种环境及人体气味分析

神经性毒剂检测分析

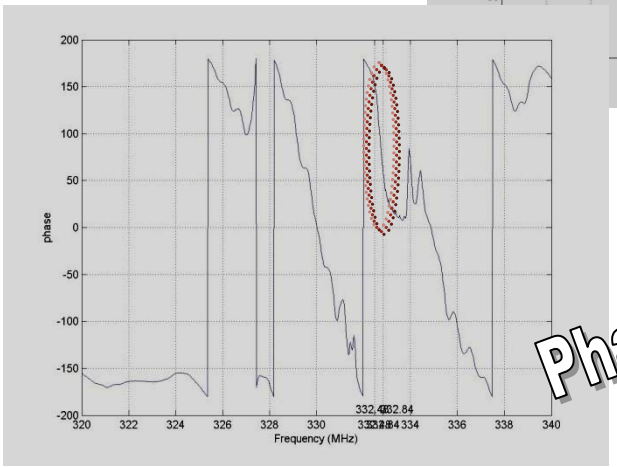


与气相色谱联用的SAW气体传感器—研究进展

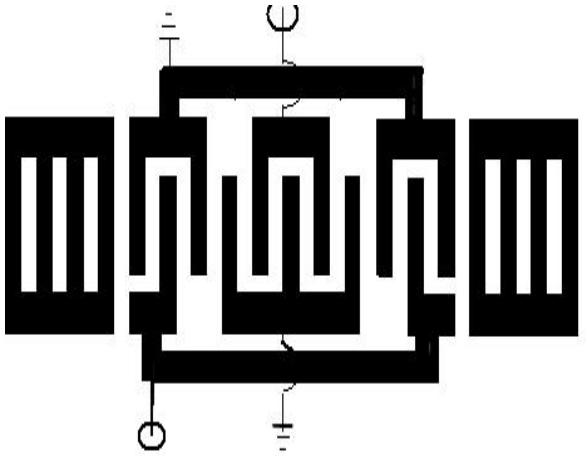
声表面波检测器－单模声表面波谐振器

Amplitude response



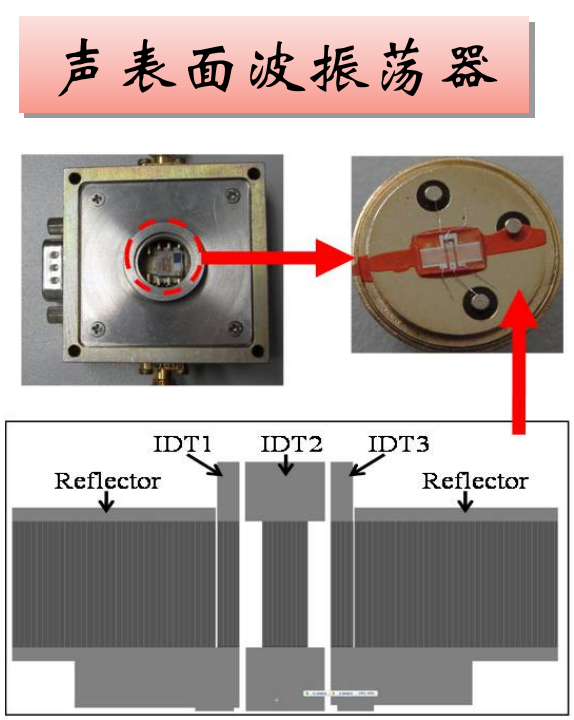


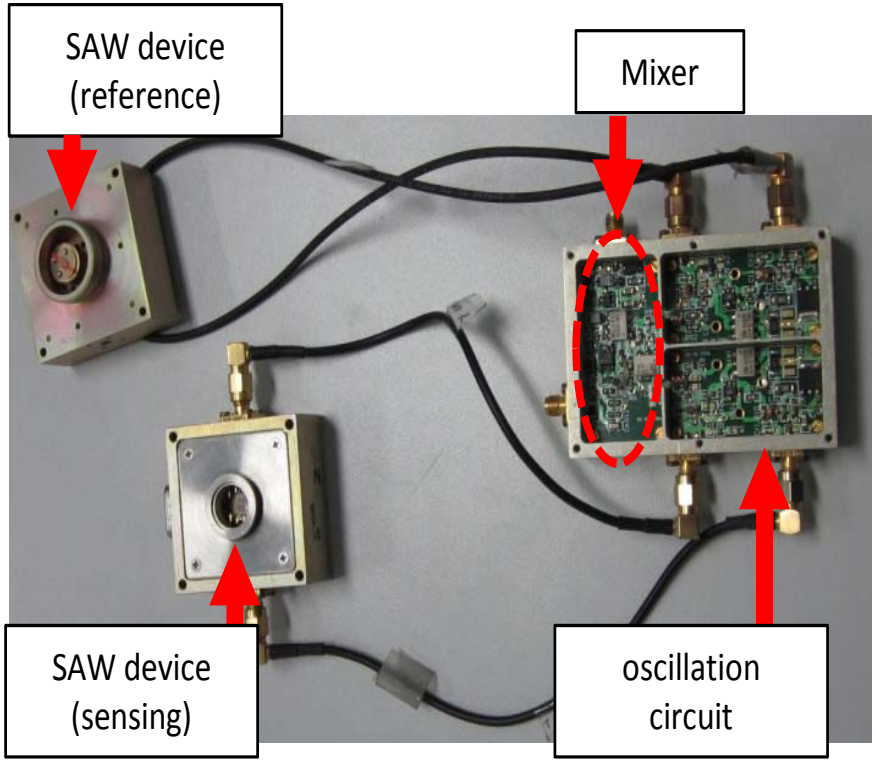
Phase response



ST-X quartz substrate, Very low insertion loss (3.7dB) and higher Q-values of 2800

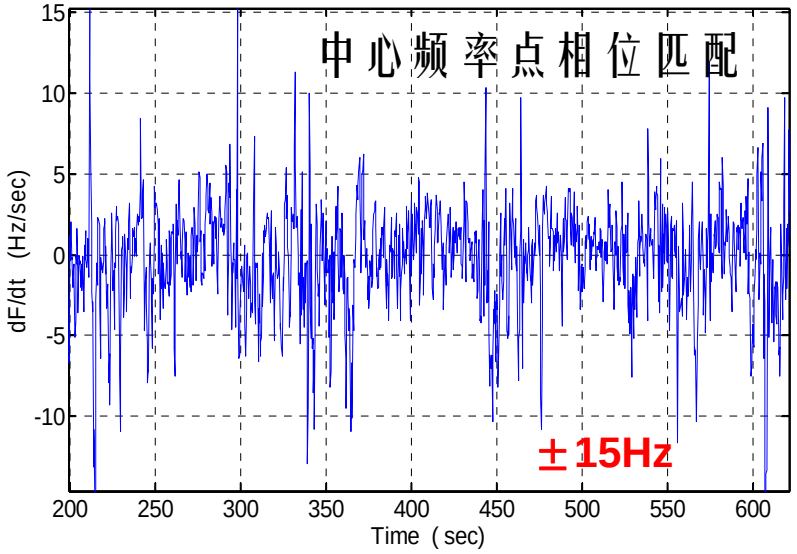
与气相色谱联用的SAW气体传感器—国内进展

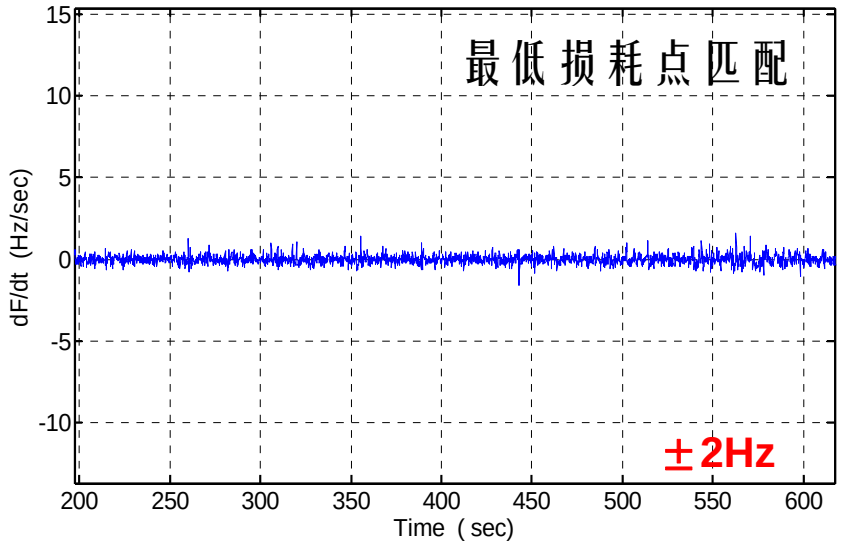




与气相色谱联用的SAW气体传感器—研究进展

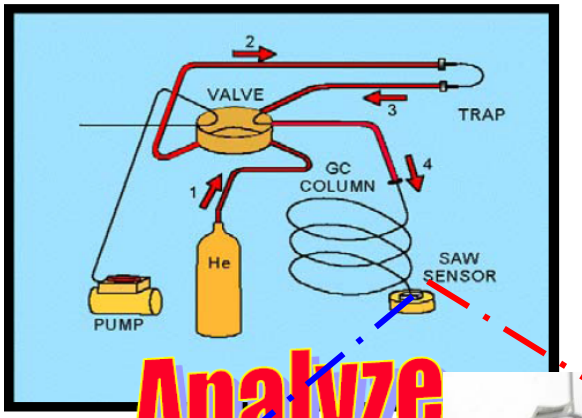
声表面波振荡器频率稳定性测试



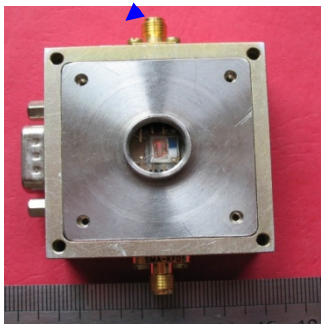


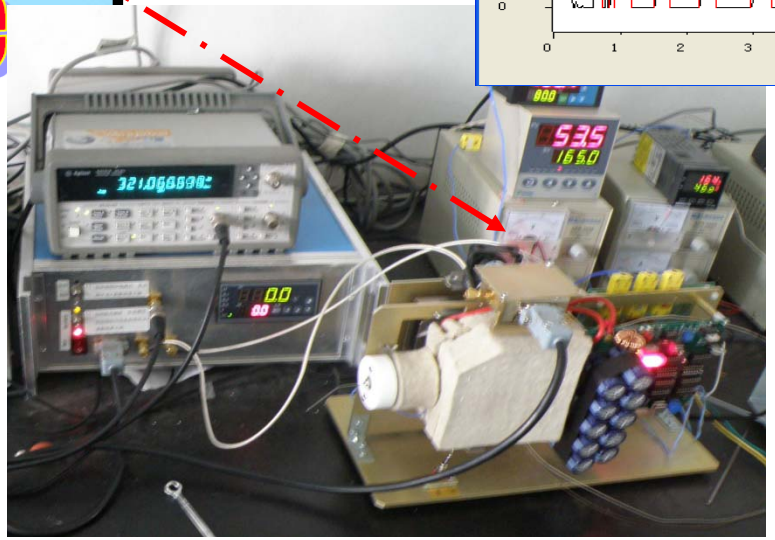
良好的频率稳定性对于改善传感器检测下限具有重要意义!

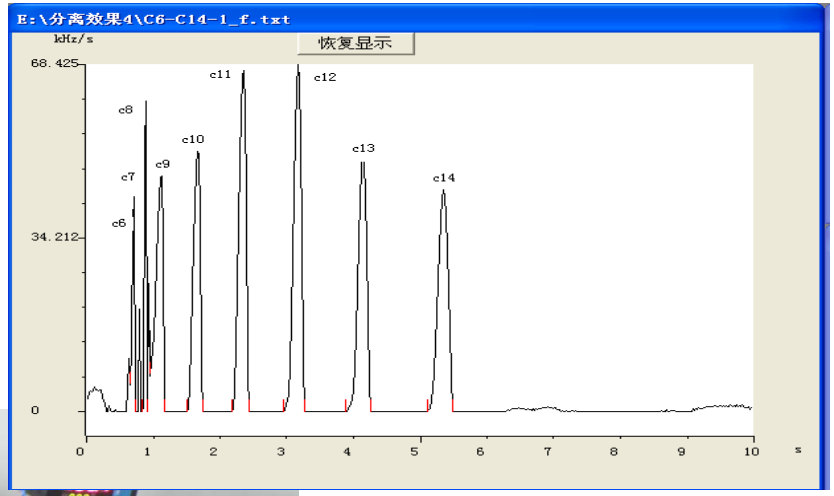
与气相色谱联用的SAW气体传感器—研究进展



Analyze



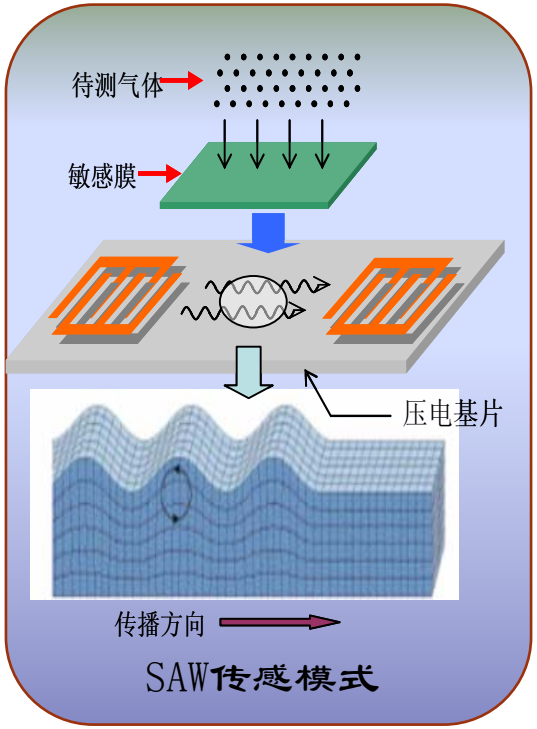




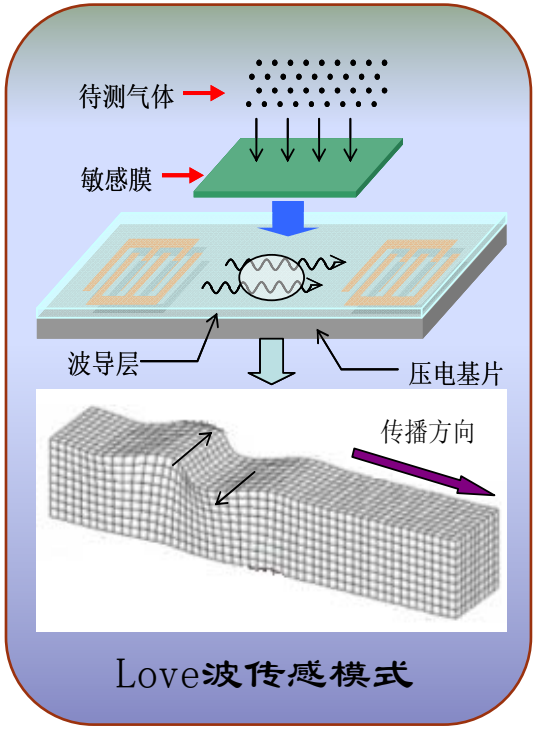
- ✓吸附管直径0.8mm，长50mm，柱上加热
- ✓色谱柱长1m，柱上加热
- ✓对C_6-C_{14}间的9种正构烷烃的完全分离只需6秒
- ✓苯检出限63ppb

声表面波有源传感器：Love波气体传感器

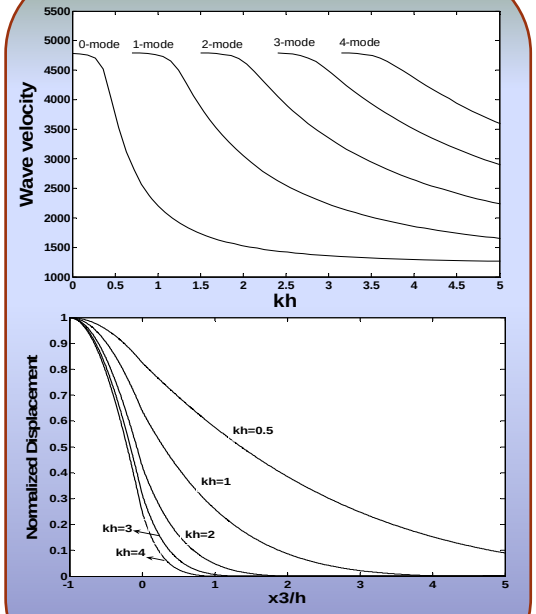
- 发展趋势：一种love波模式开始应用到气体检测之中
- 原理：在压电基片表面覆盖一层具有低密度低剪切声波速度的波导层，将声波能量集中于波导薄层之中，对外围扰动更为灵敏
- 优势：高灵敏度，波导层对叉指电极具有有效保护
- 相对难点：波导层的设计直接决定了传感器的灵敏度性能，即优化设计参数，寻取最优化波导层膜厚。



SAW传感模式



Love波传感模式



Love波频散曲线

声表面波有源传感器：Love波气体传感器

Love波形成的两个必备条件：

- **压电基片材料能支持剪切型声表面波的激发**

  —从其基片材料来看，激发SSBW波模式的AT石英、支持SH－SAW波模式的YZ 切割以及ST石英等弱压电特性但具有良好温度稳定性材料，这类材料能获得良好的温度稳定性，但是器件损耗较高，另外一类则是激发漏剪切波模式的36°YX $LiTaO_3$以及41°YX $LINbO_3$等强压电性能但温度系数较高的材料，能获得低器件损耗，但是需要对传感器进行温度效应的补偿。

- **在压电基片表面覆盖一层剪切声波速度远低于压电基片的低密度波导层**

  —目前广泛采用的波导层材料大致有两类，

  ✓一种为SiO_2，这种刚性材料具有低衰减，高强度特点，但是体波速度较高（>2000m/s），这样Love波模式转换效率低，限制了传感器灵敏度的进一步提高，另外SiO_2的镀膜过程相对复杂。

  ✓另外一种为各种聚合物膜，典型的如PMMA，具有低密度，低体波速度（<1100m/s），这样Love波转换效率高，传感器有可能获得更高的灵敏度，而且聚合物膜镀膜过程简单，然而，由于聚合物膜材料本身的黏弹特性，对声波有明显的衰减效应

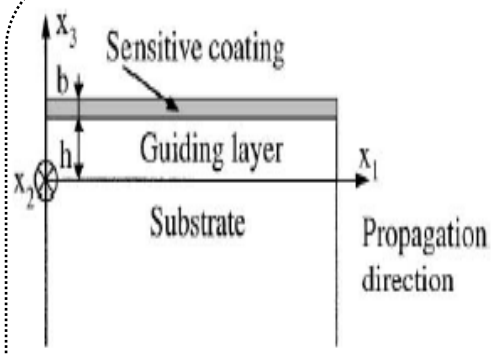
Love波传播特性分析方法

通常采用层状介质中波的传播方法，即从波动方程出发，分别求解各介质层的克里斯托佛方程，通过边界条件，求解love波传播特性包括频率曲线、优化波导层膜厚的提取

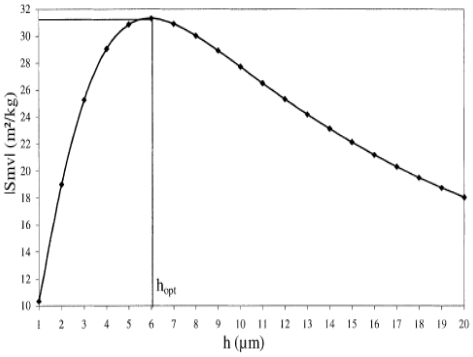
声表面波有源传感器：Love波气体传感器

应用实例*：C.Zimmermann, et.al：一种基于AT石英基片与SiO2波导层，并采用polysiloxane聚合物敏感膜的针对DMMP的传感器

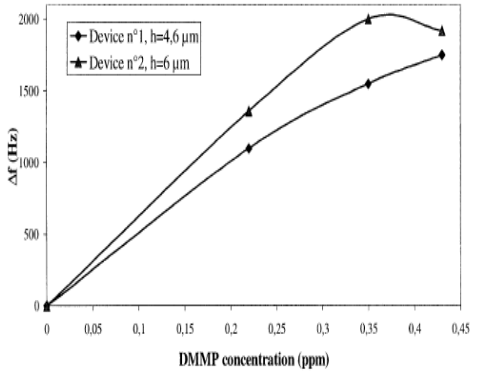
器件	压电基片	波长（μm）	频率（MHz）
Love wave1	AT-cut	40	115
Love wave2	AT-cut	40	111
SAW	ST-cut	32	98
器件	**敏感层膜厚**	**DMMP浓度（ppm）**	**频移 （Hz）**
Love wave 1	15	0.35	1550
Love wave2	15	0.35	2000
SAW	30	0.3	180



Love波传感器的基本结构



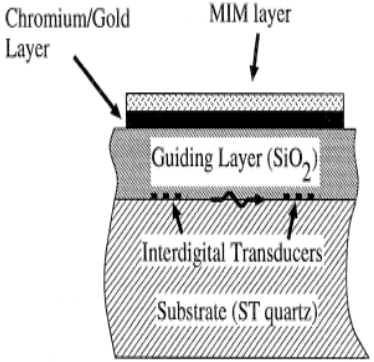
优化SiO_2波导层膜厚的提取

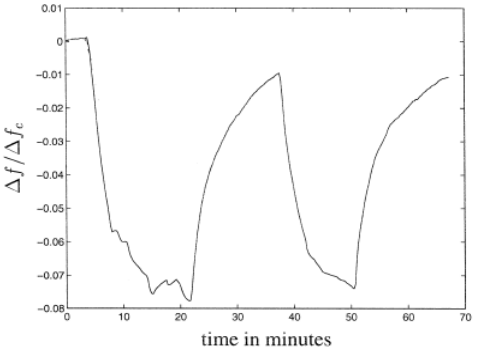


针对DMMP的检测结果

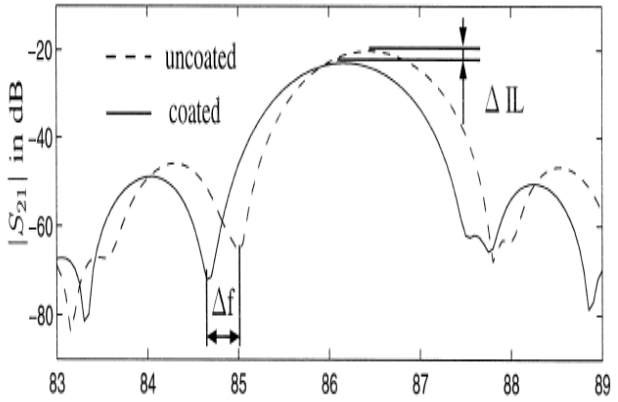
*C.Zimmermann, et.al, "A Love-wave gas sensor coated with functionalized polysiloxane for sensing organophosphorous compounds", Sensors and Actuators B 76, 2001, pp.86-94

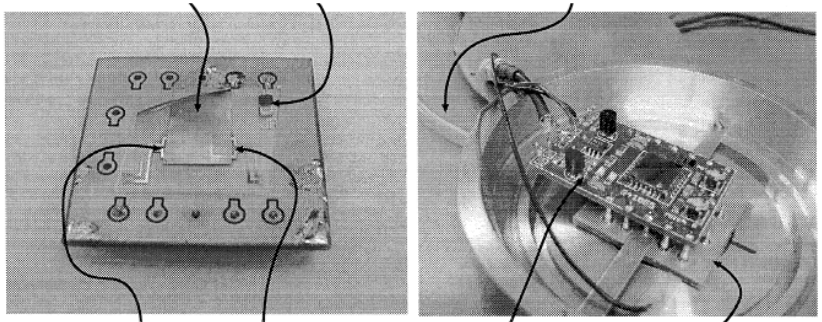
声表面波有源传感器：Love波气体传感器

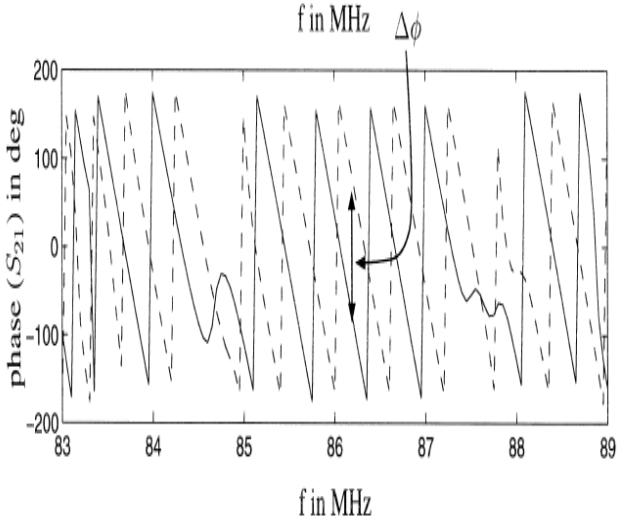




典型针对MMP的检测响应







Jakoby等报道的一种基于ST－90°X石英，SiO_2波导层并以分子印迹敏感膜针对MMP的检测*

*B.Jakoby, et al,"A novel molecularly imprinted thin film applied to a Love wave gas sensor", Sensor and Actuators 76, 1999, pp.93-97

声表面波有源传感器：生物传感器

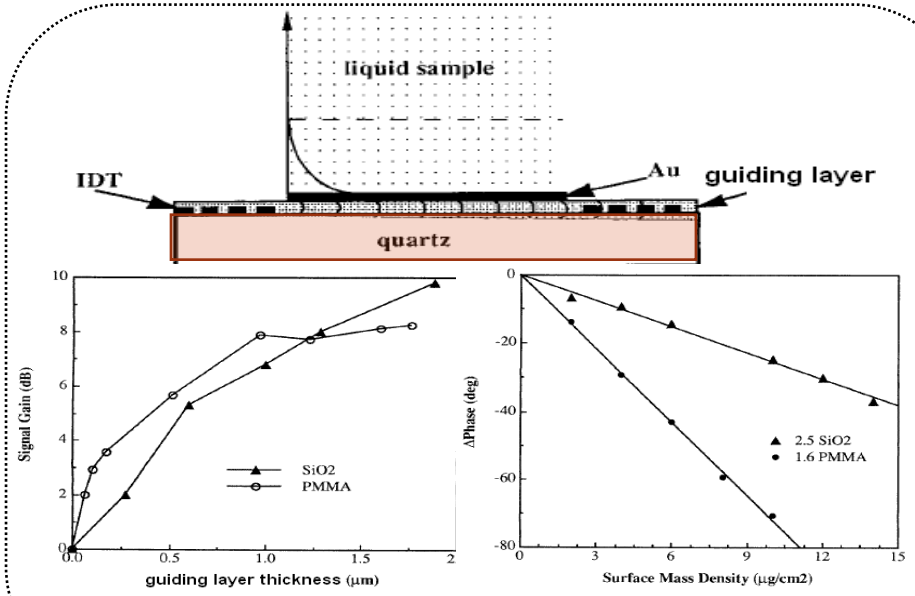
- SAW传感器的另外一个较为广泛的应用领域是与生物技术相结合，形成各种类型的生物传感器。
- 不同于上述SAW气体传感器，生物传感器的检测对象为液体介质。瑞利型的SAW模式由于传播波的纵向分量在液体环境中受到抑制导致很大的衰减而不适于生物传感器应用。
- 因此一些在液体环境下没有耦合声波能量衰减的剪切波模式波广泛应用于生物传感器之中，如厚度剪切模式（TSM），声板波模式（APM），表面掠射体波（SSBW）、漏剪切波（LSH）以及Bleustein－Gulyaev （BG）波模式。相对于上述剪切波模式，Love波模式传感器表现出卓越的灵敏度性能。
- 其基本思想：通过敏感层对待测对象的吸附性能对声波传播所引起的质量负载效应，从而导致声波速度发生变化，通过对声波器件响应（频率/相位）的监测而实现生物传感

目前主要研究内容：

- 主要生物传感器集中于Love wave模式，因此其传感功能结构是一研究重点，在于波导层优化设计，基片材料选取等
- 稳定且高选择性敏感膜层的寻取是这种生物传感器的另一个研究重点

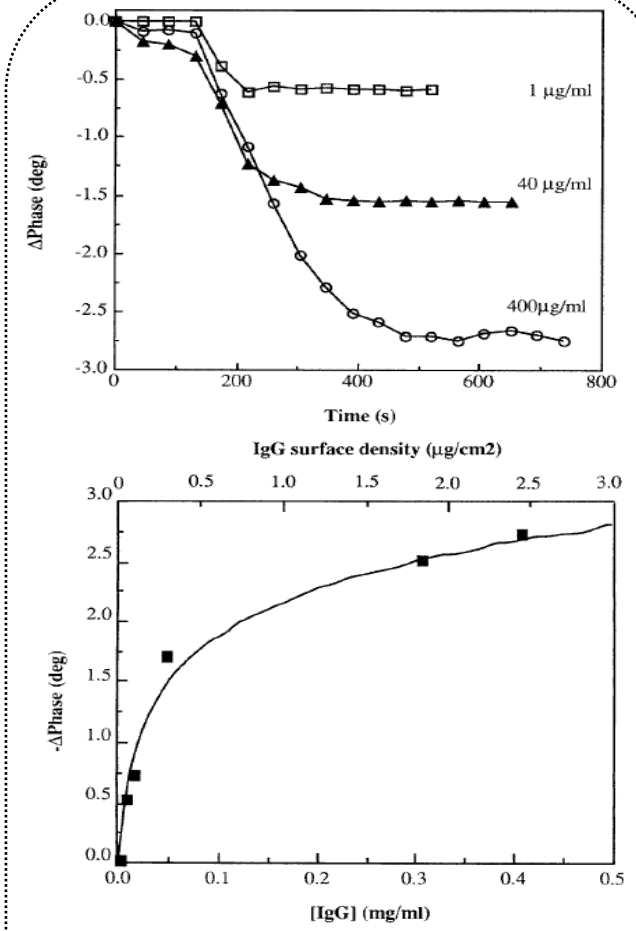
声表面波有源传感器：生物传感器

- 基本原理：典型生物传感器由Love波延迟线，波导层，载体金膜以及敏感层构成。敏感膜材料对待测物的吸附效应所产生的质量负载引起声波速度、衰减的变化
- Gizeli*曾对SiO_2与PMMA两种波导层材料构建的Love波传感器予以对比：覆盖聚合物膜材料的Love器件将获得更高的灵敏度



不同波导层材料的波导效应（增益）对比

不同波导层材料的质量负载灵敏度对比



以PMMA为波导层，并以Protein A修饰的金表面对IgG检测的生物传感器试验

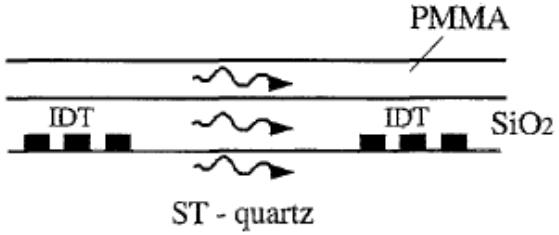
Electra Gizeli,et al, “Design considerations for the acoustic waveguide biosensor ”, Smart Mater. Struct. 6 (1997) 700–706.

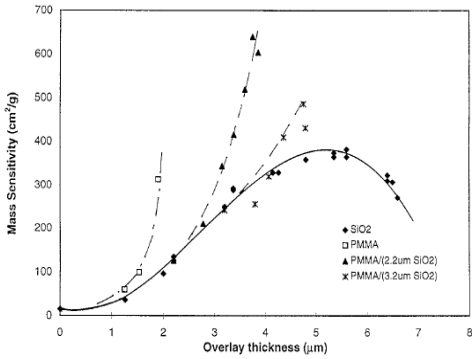
声表面波有源传感器：生物传感器

采用多波导层的Love波器件模式*：

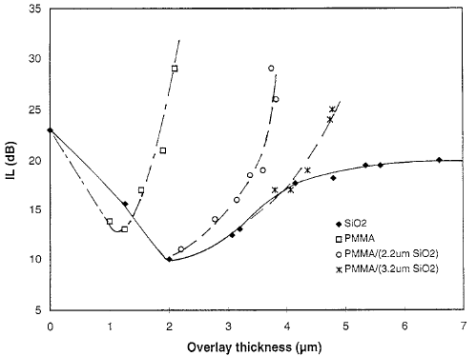
- 有可能更好的改善传感器的质量灵敏度
- 另外，由于不同波导层材料温度系数的不同极性，将有效的改善整个传感器的温度稳定性，因此具有良好的应用前景

难点：最优化的波导层膜厚的提取

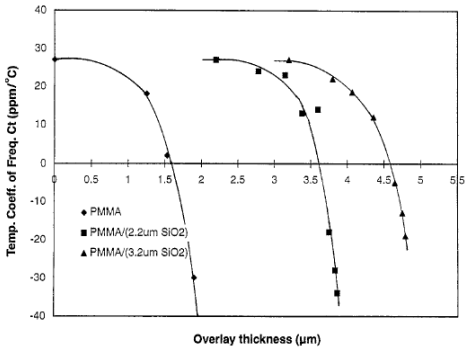




波导效应（质量灵敏度）



波导效应（增益）



采用多波导层的Love器件温度系数

Device characteristics	f_0 (Mhz)	Sensitivity ($cm^2\ g^{-1}$)	IL (dB)			Noise (ppm)[a]			T coeff. ($ppm\ °C^{-1}$)
			Air	Water	Buffer	Air	Water	Buffer	
SH	124.3	~14	23–24			0.01	x[b]	x	27–30
2.2 μm SiO_2	119.9	126	11	36	40	0.02	0.07–0.08	x	27
3.2 μm SiO_2	117.6	~250	13	36	38	0.01–0.02	0.03	0.05	27
1.25 μm PMMA	121.8	59	13–16	40	42	0.01	x	x	~18
1.53 μm PMMA	121.3	99	17	40	42	0.01	x	x	2–3
1.9 μm PMMA	119.8	313	20	43.6		0.04	x	x	–30
2.2 μm SiO_2/1.18 μm PMMA	116.6	415	19	40	42	0.06	0.08	0.09	~11–13
2.2 μm SiO_2/1.4 μm PMMA	115.7	519	16–19	42	43	0.02–0.03	0.08	x	~14
3.2 μm SiO_2/1.16 μm PMMA	114	410	19	39	41	0.04	0.17	x	~12

*Jia Du, A multilayer structure for Love-mode acoustic sensors, Sensors and Actuators A 65 (1998) 152-159

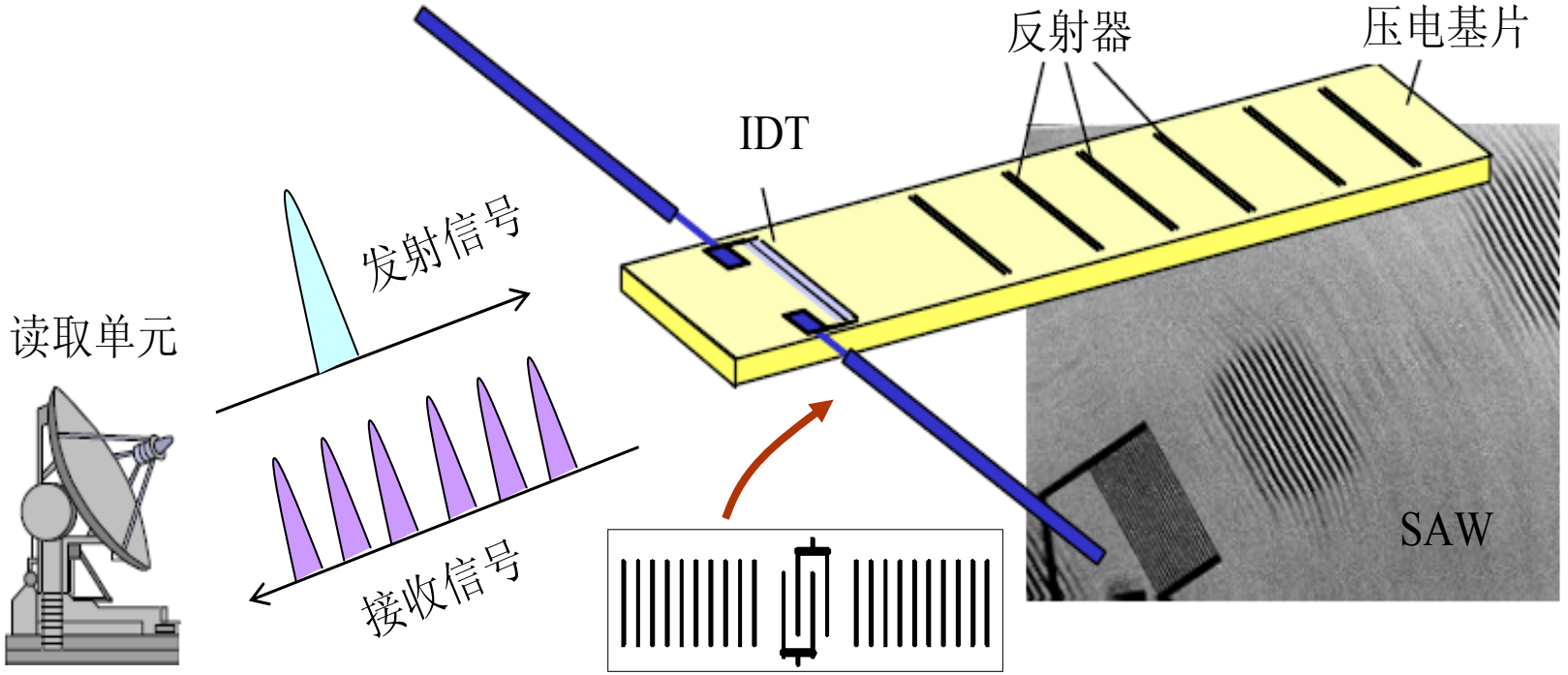
报告内容

- 声表面波的基本原理
- 典型声表面波传感器基本应用
- 有源声表面波传感器
- 无源无线声表面波传感器
- 未来发展趋势

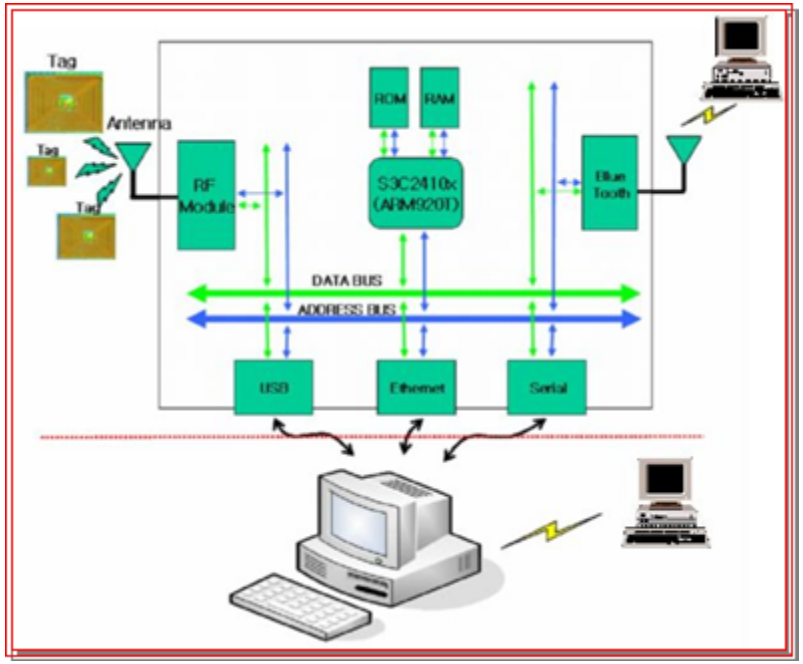
声表面波无源传感器：

- 基于声表面波的有源传感器一般将SAW器件（延迟线/谐振器）作为振荡器反馈元，通过检测振荡器频率输出来评价待测参量；
- 在各种物理、化学领域的应用中，这种有源传感器得到了较好的应用。
- 但是在某些特殊应用方面：如密封体内部参量检测（压力），毒气环境，人体检测等，有源体系难以胜任，因此，目前将无线识别系统与声表面波技术相结合，实现了一种SAW无线无源声表面波传感器

声表面波无线无源传感器：基本原理



声表面波无线无源传感器：雷达设计

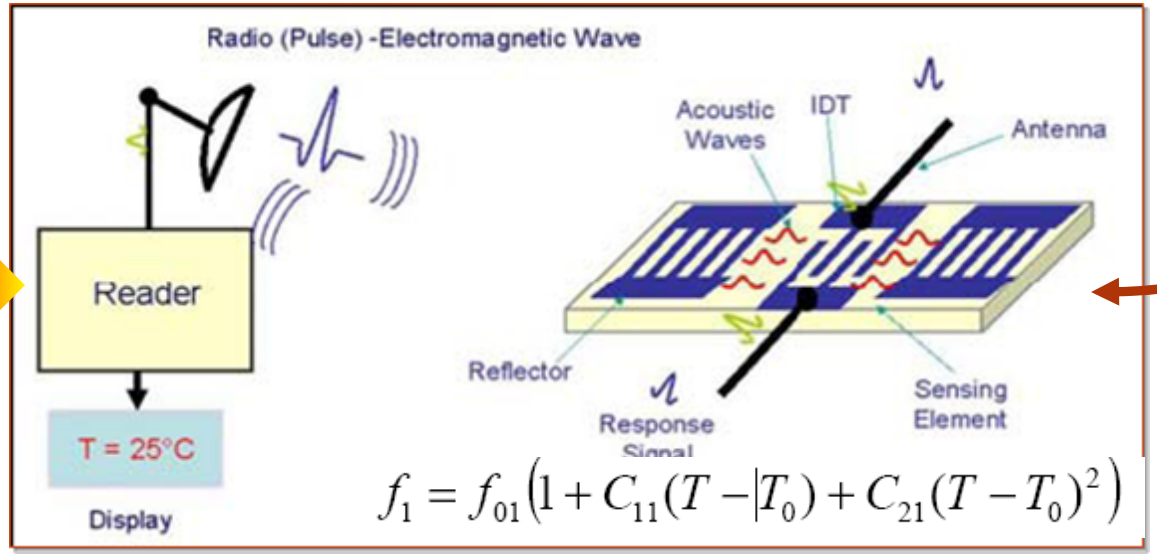




- 设计目标：低功耗（10dDm），小体积以及低成本；根据欧洲低功率器件(LPD)频率分配标准(ISM)，无线系统工作频率为433.07～434.77MHz与2.4～2.483GHz；
- 无线传感系统的识别单元类似于传统的雷达应用，不管使用何种无线射频传感器，测试对象是识别信号于传感器响应之间的基于时域的单端响应测量
- 作为雷达系统，接收器置于发送器附近以便于实现连续检测
- 实际测量一般可以采用时域或者频域方式

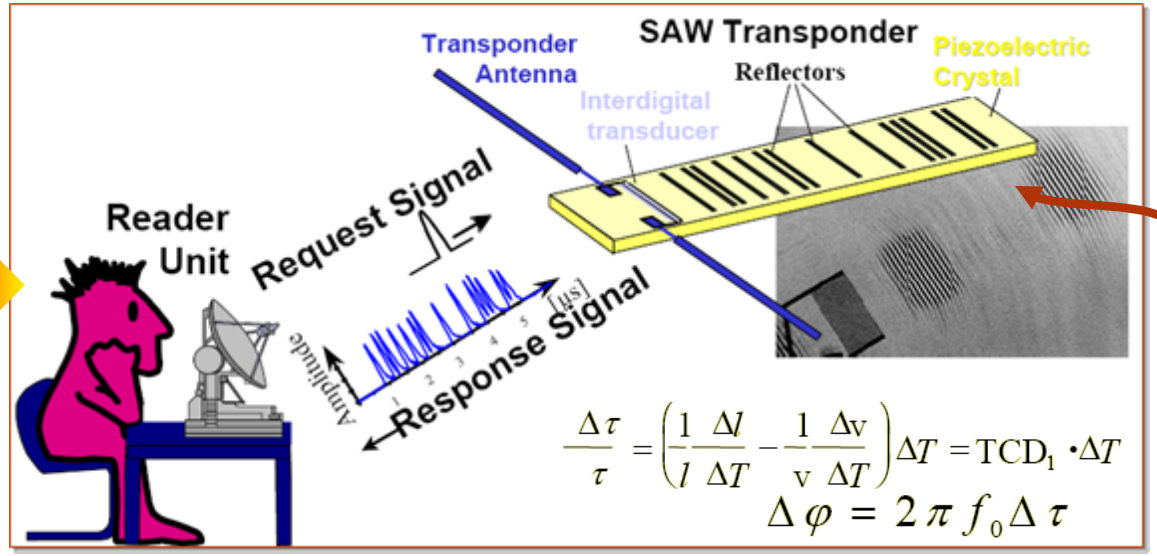
无源无线SAW温度传感器

系统对相简单，功能较为单一



谐振器模式

系统对相复杂，但可实现功能多化

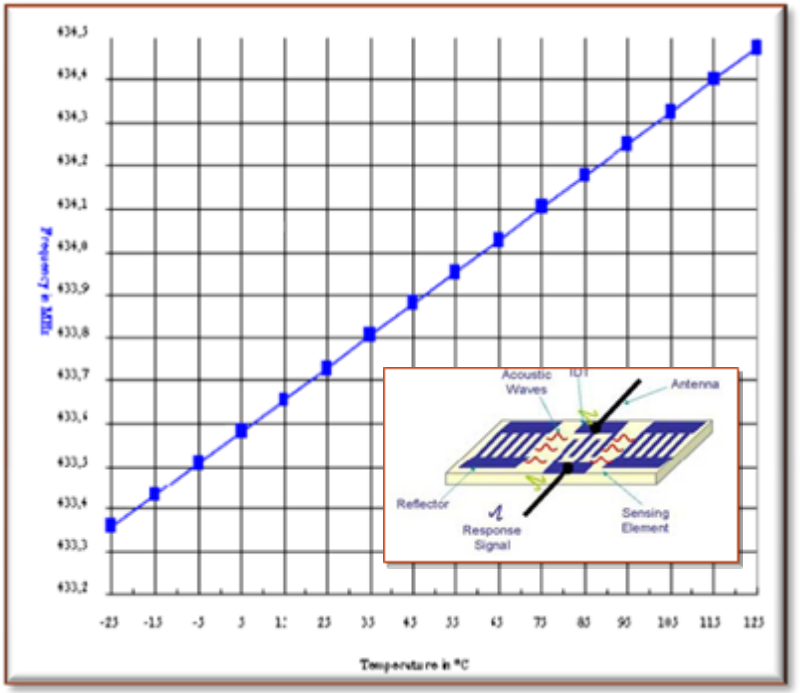


反射型延迟线模式

无源无线谐振器结构SAW温度传感器—现有技术

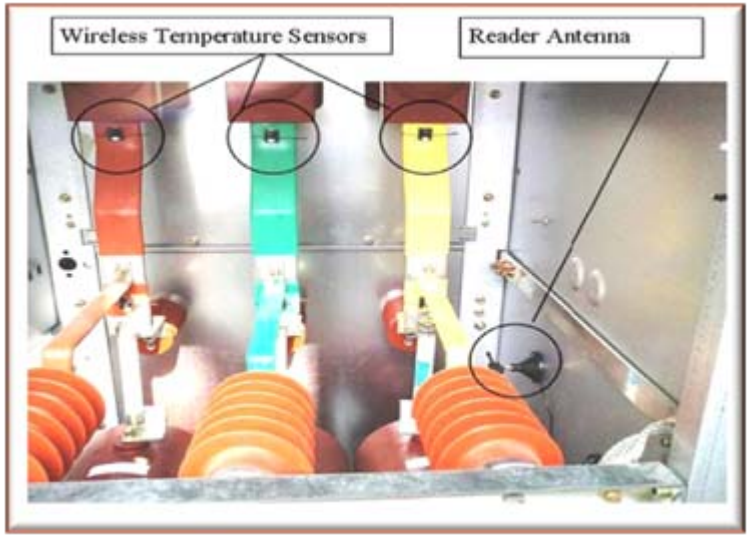




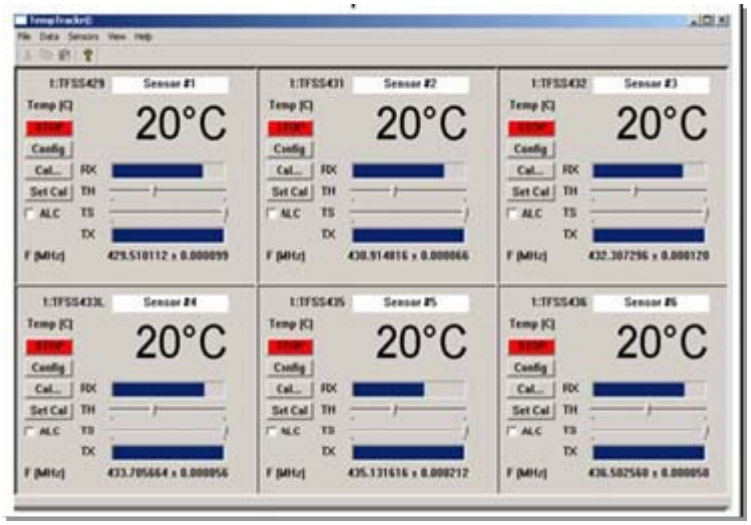


SENGENUITY
sensor engine technology

无源无线谐振器结构SAW温度传感器—现有技术









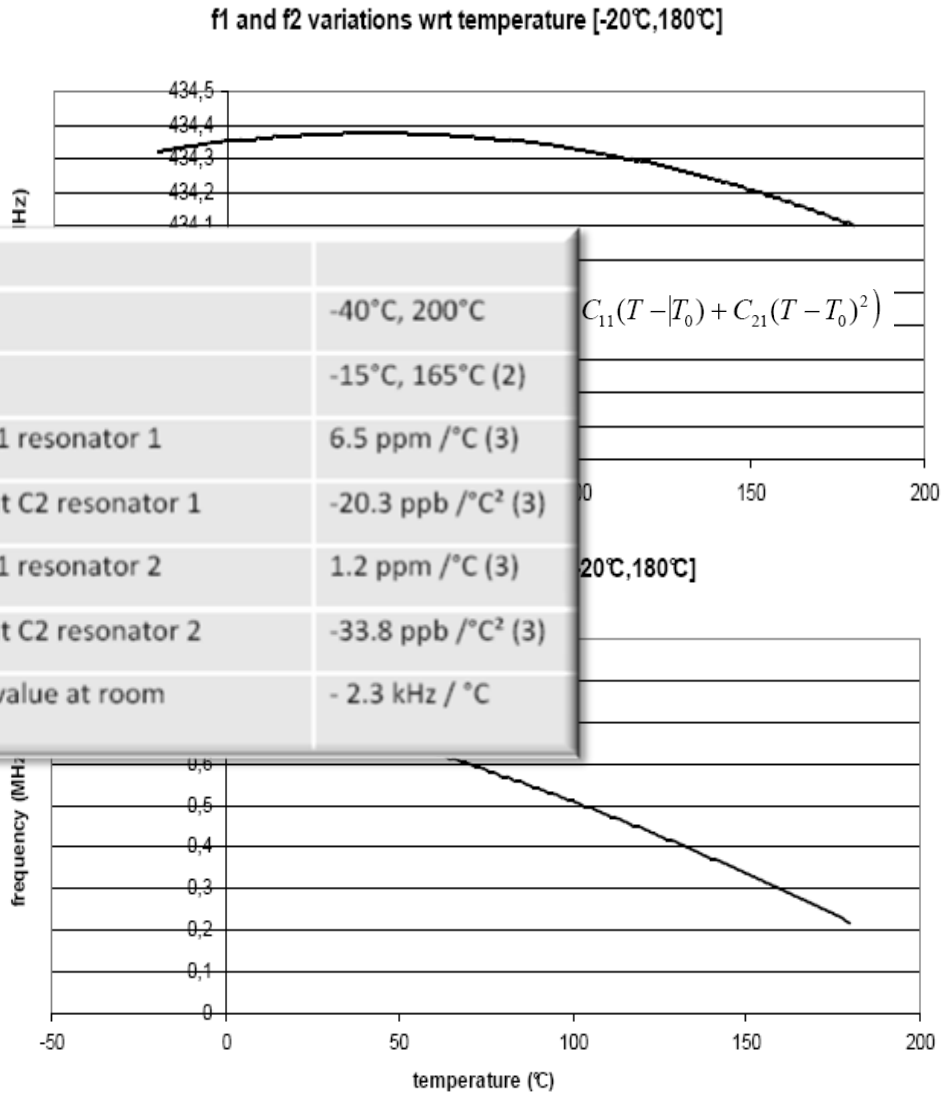
无源无线谐振器结构SAW温度传感器——现有技术

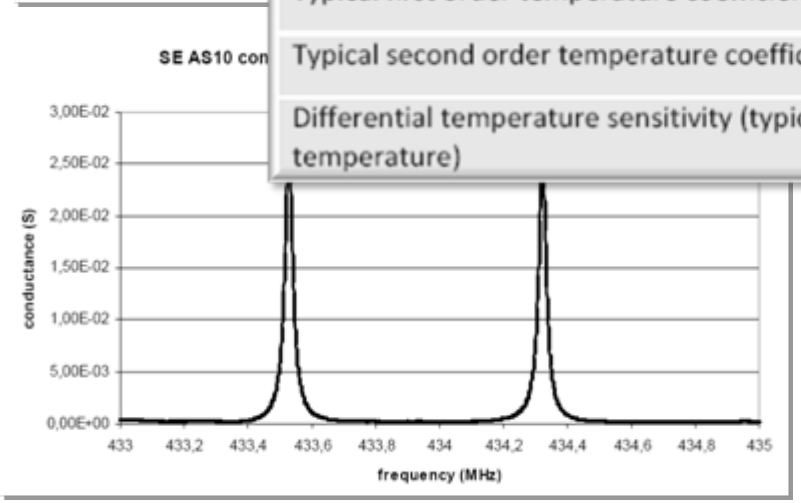




Transceiver
Ex. WR C001

Temperature specifications	
Operating temperature range	-40°C, 200°C
Measuring temperature range	-15°C, 165°C (2)
Typical first order temperature coefficient C1 resonator 1	6.5 ppm /°C (3)
Typical second order temperature coefficient C2 resonator 1	-20.3 ppb /°C² (3)
Typical first order temperature coefficient C1 resonator 2	1.2 ppm /°C (3)
Typical second order temperature coefficient C2 resonator 2	-33.8 ppb /°C² (3)
Differential temperature sensitivity (typical value at room temperature)	- 2.3 kHz / °C



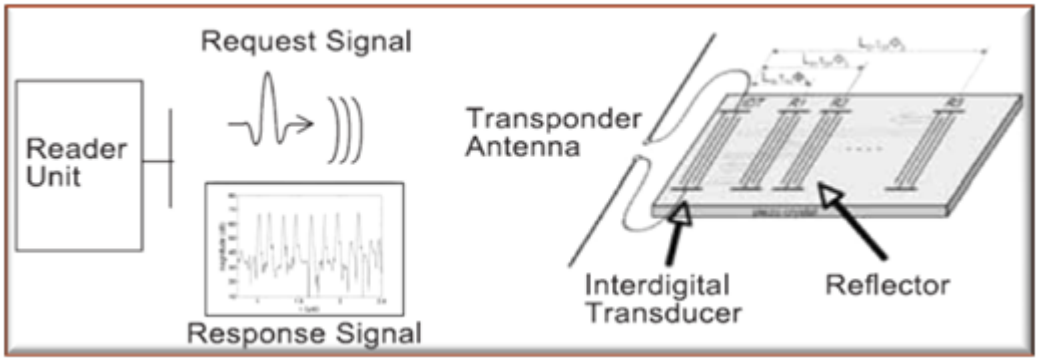


无源无线延迟线结构SAW温度传感器——现有技术





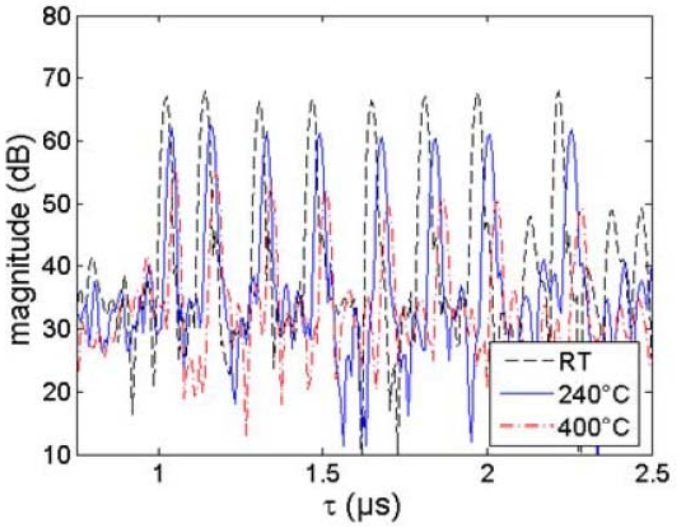


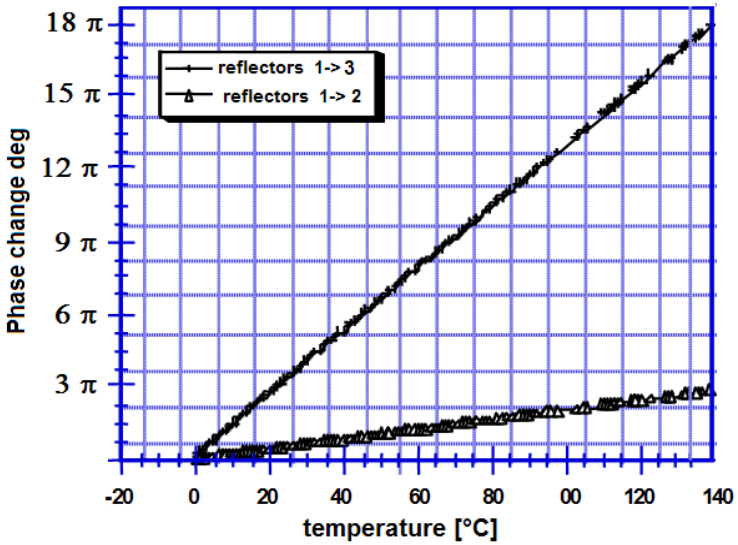




无源无线延迟线结构SAW温度传感器—现有技术

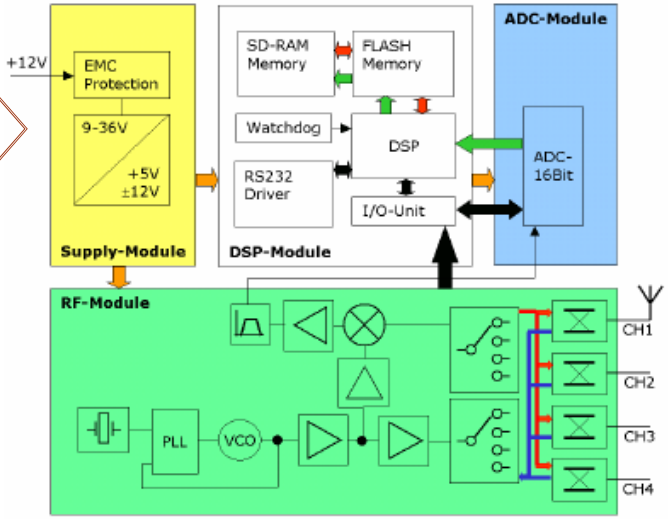
无线读数装置	工作频率	2.4至2.4835GHz（ISM-S-Band）
	循环读取时间	300ms
	最大输出功率	10dBm
	工作温度	-20℃~+50℃
	存储温度	-25℃~+60℃
	操作界面与系统	LED，windows XP
声表面波应答器	传输范围	18dBi 无线天线：5.0m
	温度监测范围	-55℃~+400℃
	温度分辨率	0.1℃
	温度准确度	+/-2℃
	电子标签功能	多位（按照要求）



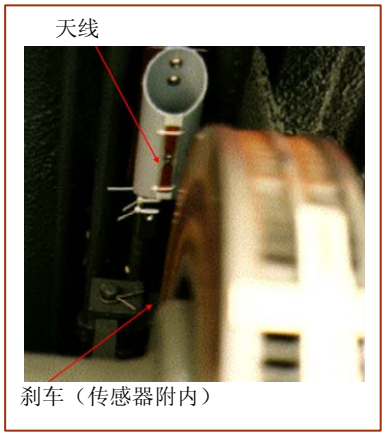


无源无线谐振器结构SAW温度传感器—现有技术

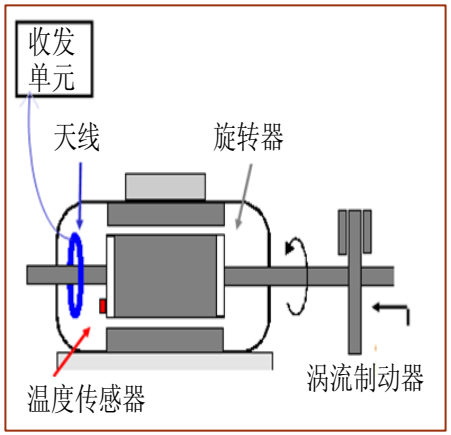




- ✓火车进站的刹车温度监测
- ✓用于高压避雷器的环境温度监测
- ✓马达中的旋转器温度监测
- ✓前景应用：物流系统



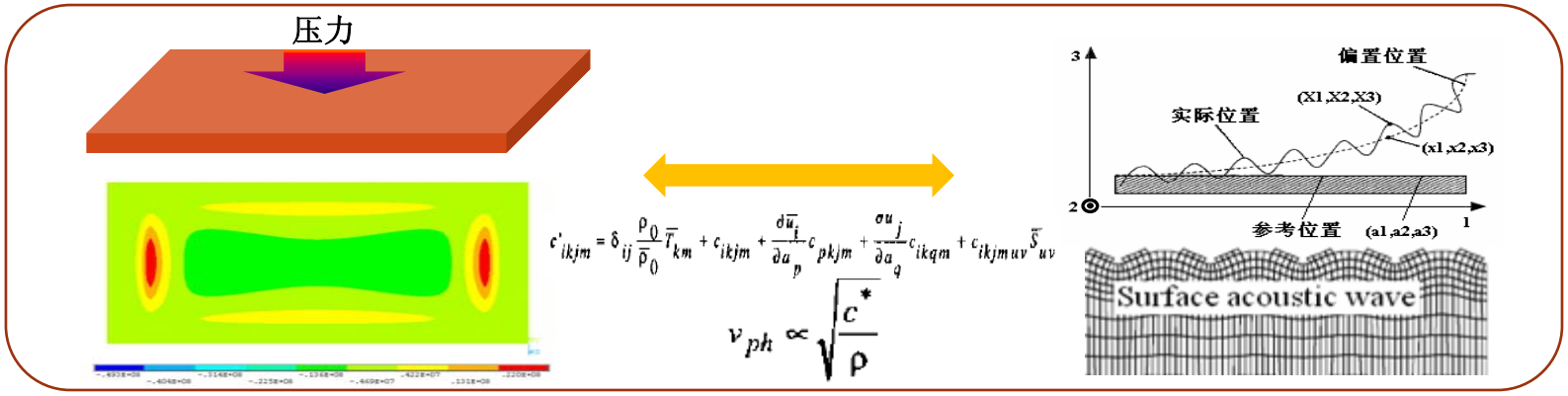




声表面波无线无源传感器：压力传感器

基本原理：无线传感器的另外一个重要应用则是压力检测，外加压力引起振动膜弯曲变形导致表面应力/应变分布发生变化，从而实现对声波传播的扰动，引起声波相应变化导致传感器输出信号发生改变，完成对压力的检测。

主要应用：无线压力传感器的主要应用在于轮胎压力监控系统（TPMS）之中，被称为“智能轮胎”。



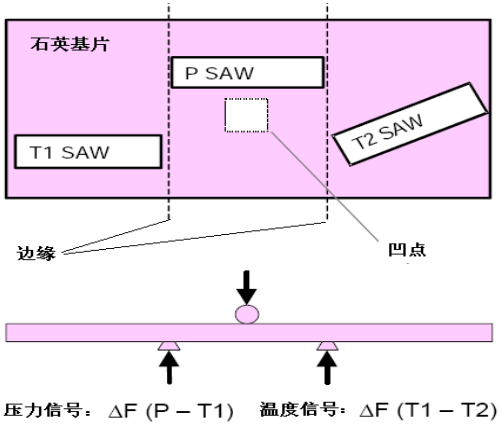
$$c'_{ikjm} = \delta_{ij}\frac{\rho_0}{\rho_0}\bar{T}_{km} + c_{ikjm} + \frac{d\bar{u}_i}{\partial a_p}c_{pkjm} + \frac{\sigma u_j}{\partial a_q}c_{ikqm} + c_{ikjmuv}\bar{S}_{uv}$$

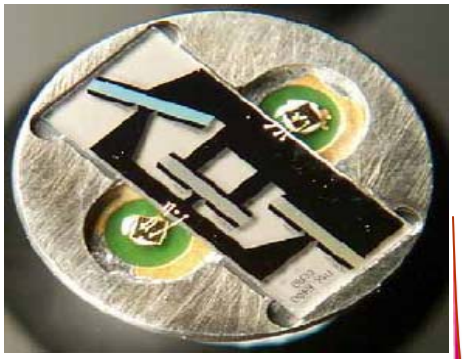
$$v_{ph} \propto \sqrt{\frac{c^*}{\rho}}$$

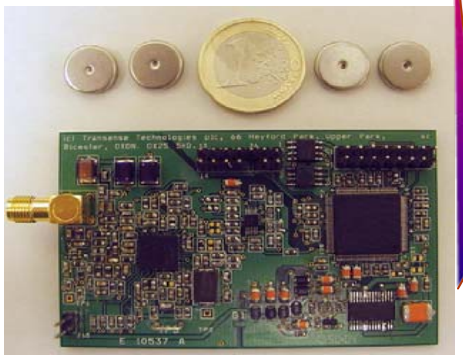
T_{km}, *is the bias stress,* S_{uv}, *the bias strain,* c_{ikjm} *the* elastic constants of second order, c_{ikjmuv} the elastic constants of third order, u_i, *the bias displacement of the* particle in direction *i*, a_i, *the position of the particle in the* global system of coordinates, ρ_0 the mass density of the unbiased substrate and $\underline{\rho_0}$ *the density of the biased SAW* guiding layer of the substrate.

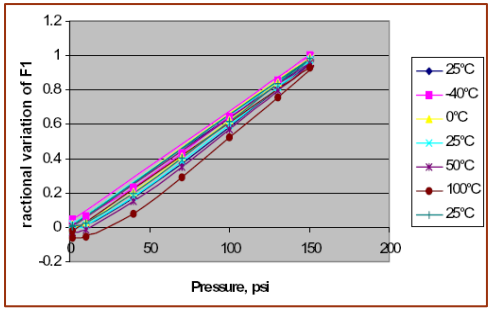
声表面波无线无源传感器：压力传感器

➢ 单端对谐振器型压力传感器





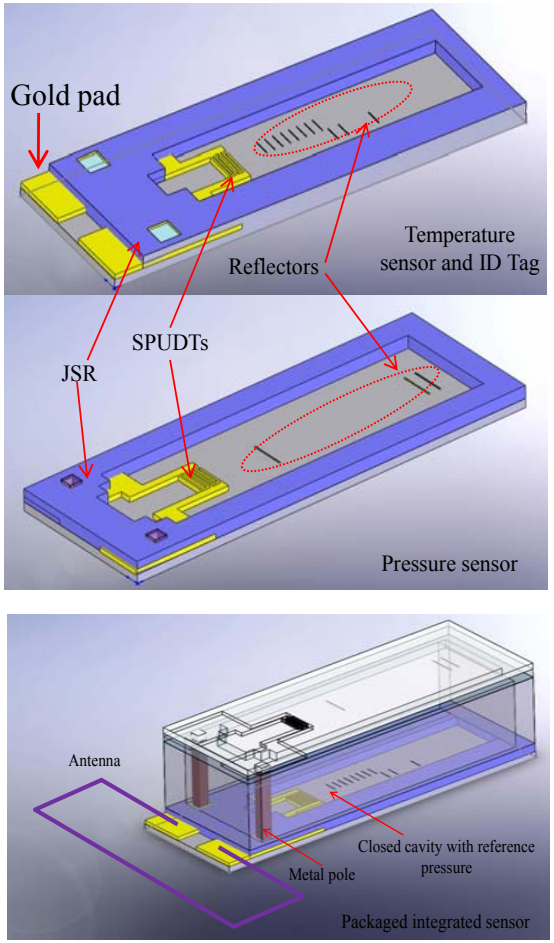






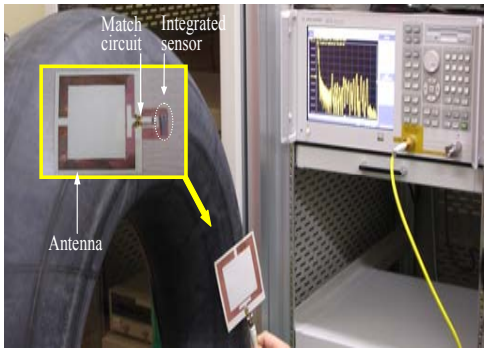
➢ *不足*：由于谐振器谐振频率的温度灵敏性，传感器的输出信号受到劣化，而且由于两谐振器位于振动膜的不同位置，由于振动膜的温度梯度效应，来自外围温度影响难以得到更好的补偿

声表面波无线无源传感器：集成式压力传感器

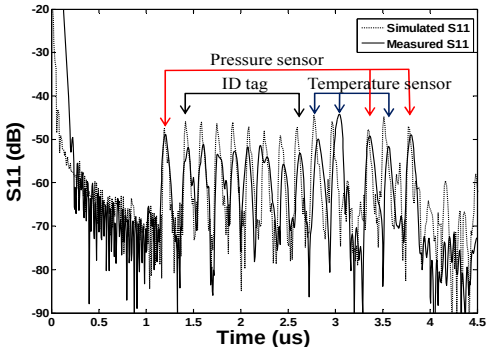


集成式压力传感器基本结构

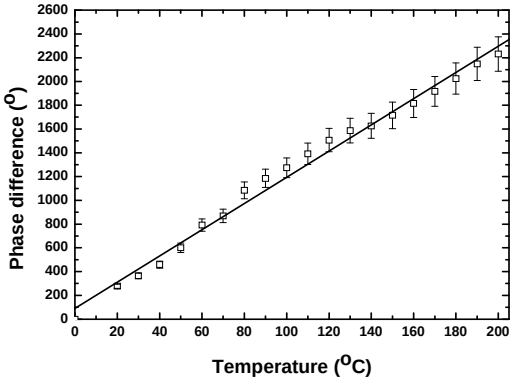
特点：采用41°YXLiNbO$_3$为压电基片；集成温度、压力检测与8位电子标签；采用反射性延迟线位传感元*



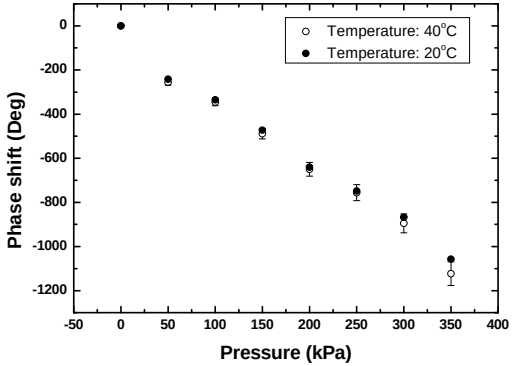
TPMS试验



反射性延迟线S_{11}测试



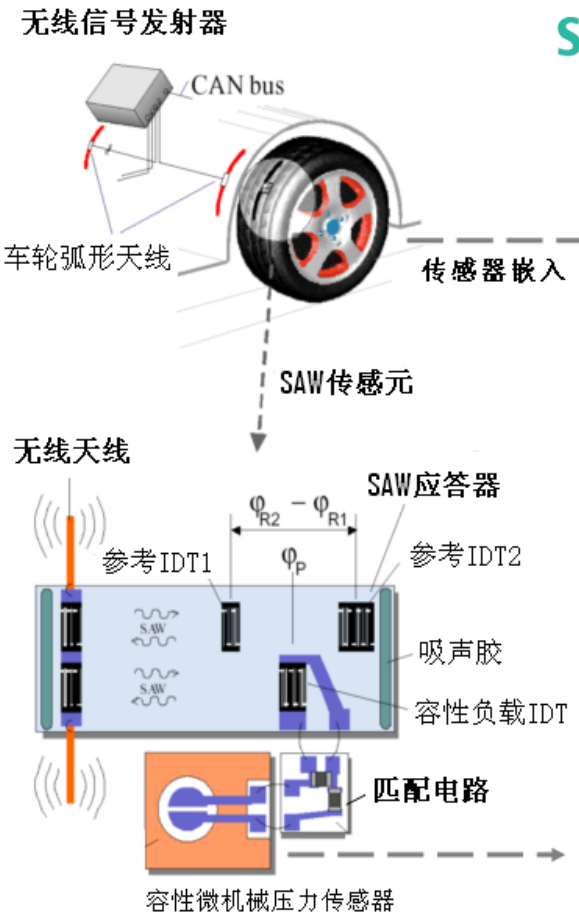
温度灵敏度评价

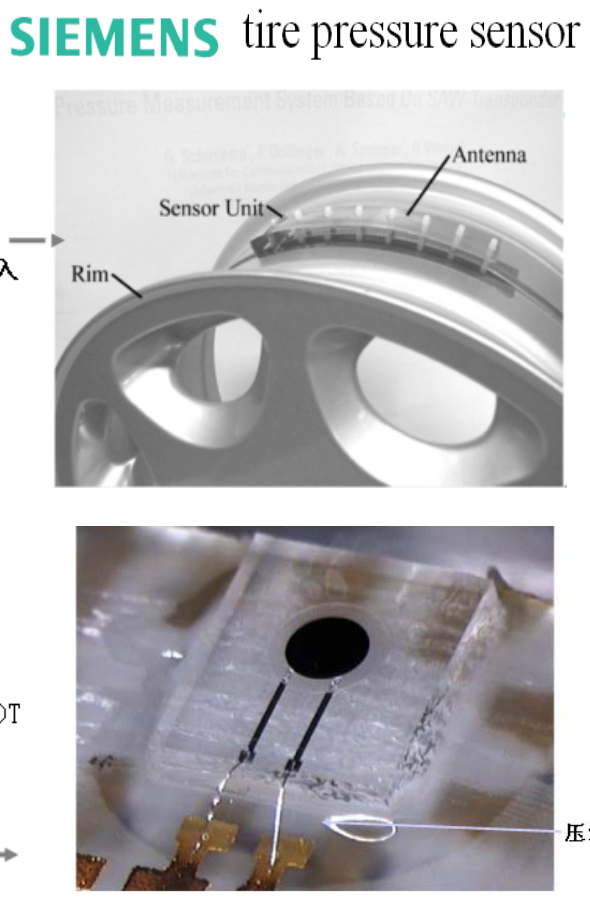


压力灵敏度评价

Keekeun Lee,WenWang, “A novel 440 MHz wireless SAW microsensor integrated with pressure–temperature sensors and ID tag”，J. Micromech. Microeng. 17 (2007) 515–523

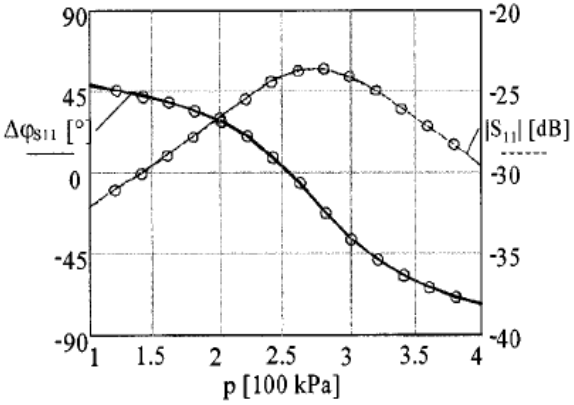
声表面波无线无源传感器：阻抗式压力传感器





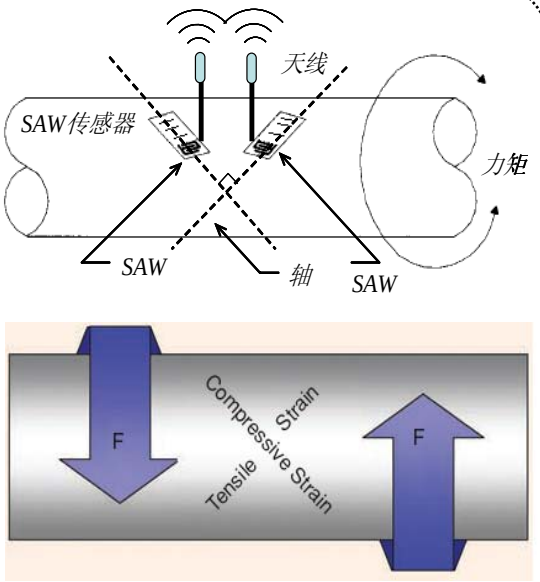
➢ *基本原理*：利用阻抗型反射性延迟线，通过外接传统压力传感器改变连接反射器的阻抗特性，从而引起反射波信号的幅度以及相位变化来实现对压力的检测。

➢ 西门子公司等研制了这种模式的无线压力传感器，其有效压力检测范围达到了600kPa

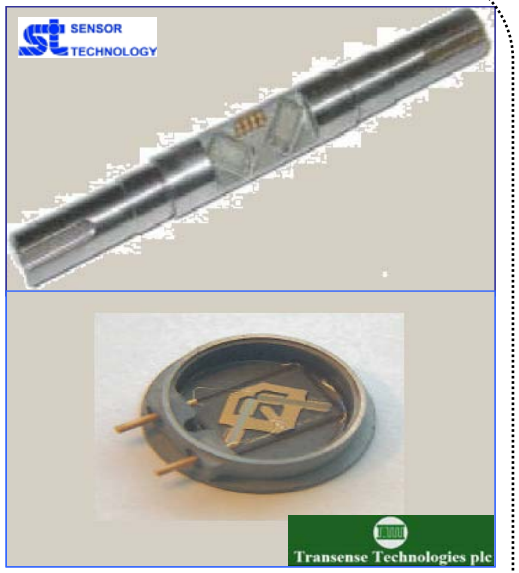


声表面波无线无源传感器：力矩传感器

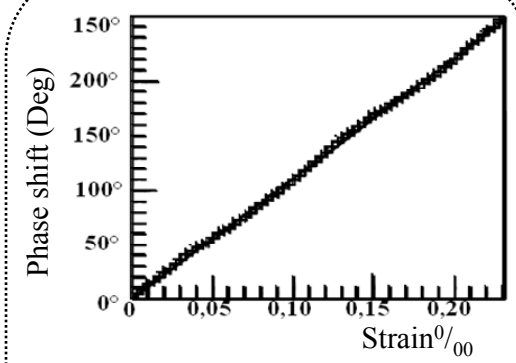
➢ *基本原理*：如果将SAW器件牢固绑定在机械轴的平点（flat spot），施加力矩于机械轴，将会引起SAW器件表面应力/应变分布变化，从而引起SAW传播特性发生改变，如果由此SAW器件连接无线天线即可构成无线传感器，这种变化即可转换成频率或者相位信号输出，实现对力矩的检测。



无线SAW力矩传感器的基本原理图



ST公司与Transense公司研制的无线SAW力矩传感器

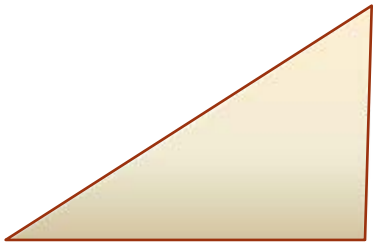


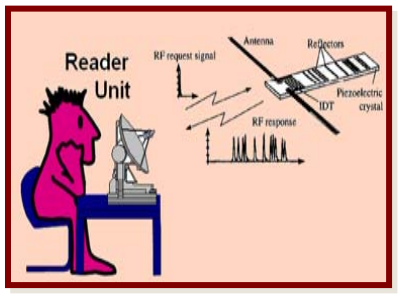
✓ 交叉状的器件分布将有效的实现温度补偿效应；
✓ 实际应用中多采用石英或者$LiNbO_3$结合反射性延迟线或者单端对谐振器的器件结构

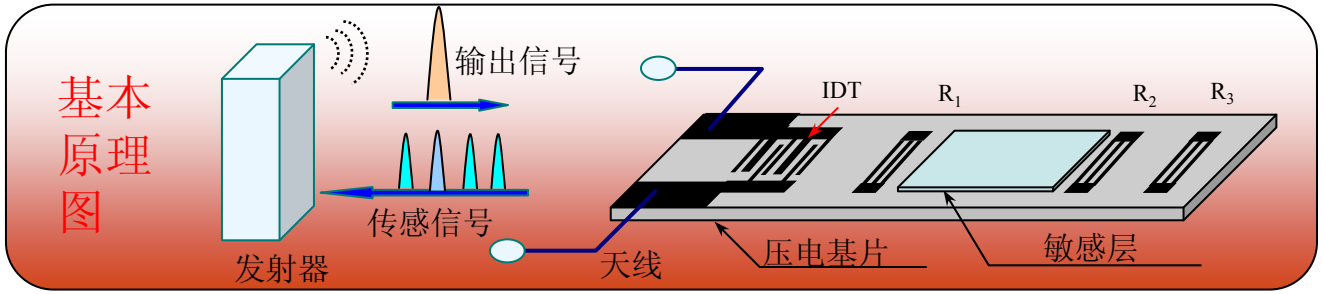
声表面波无线无源传感器：气体传感器

➢ *基本原理*：如果在SAW反射性延迟线表面镀上对气体具有选择性吸附特性敏感膜材料，即可实现一种无线SAW气体传感器，其基本原理是：敏感膜材料通过对待测气体的吸附作用，引起声波传播特性包括速度与衰减的变化，从而使得无线读取单元的反射波信号的相位或者幅度发生相应变化。

➢ 这种无线气体传感器相对目前广泛应用的有源气体传感器而言具有明显的特点，即结构简单而且能实现无源无线检测，对于某些剧毒危险环境有着特别的意义。

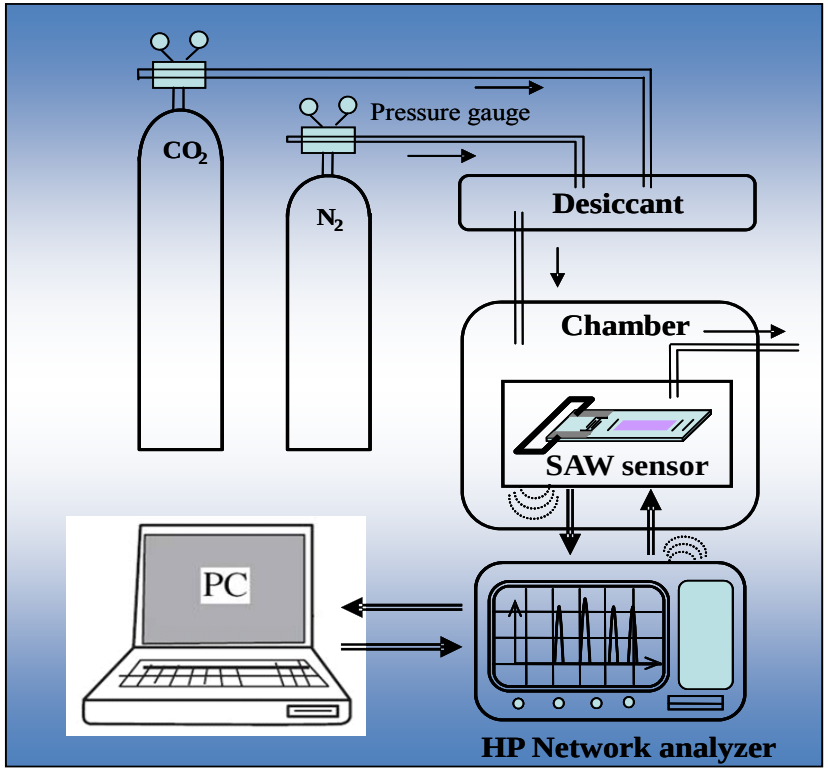


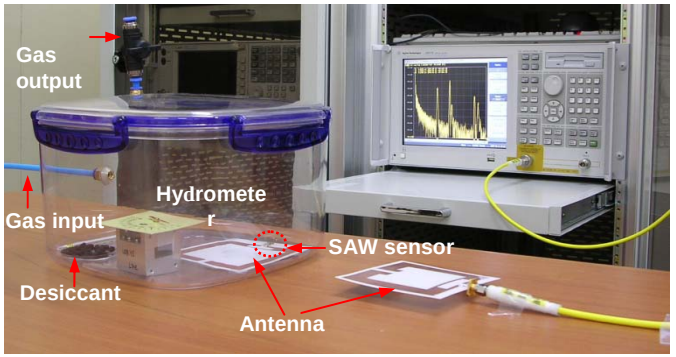


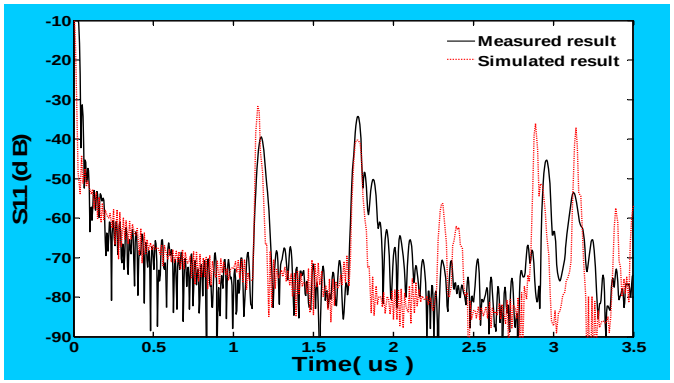


敏感膜材料对待测气体的物理吸附或者化学吸收 → 各种传感机制下，引起声波速度的线性变化 → 反射器反射峰时域响应 → 以反射峰相位变化对待测气体浓度予以表征

声表面波无线无源传感器：气体传感器*



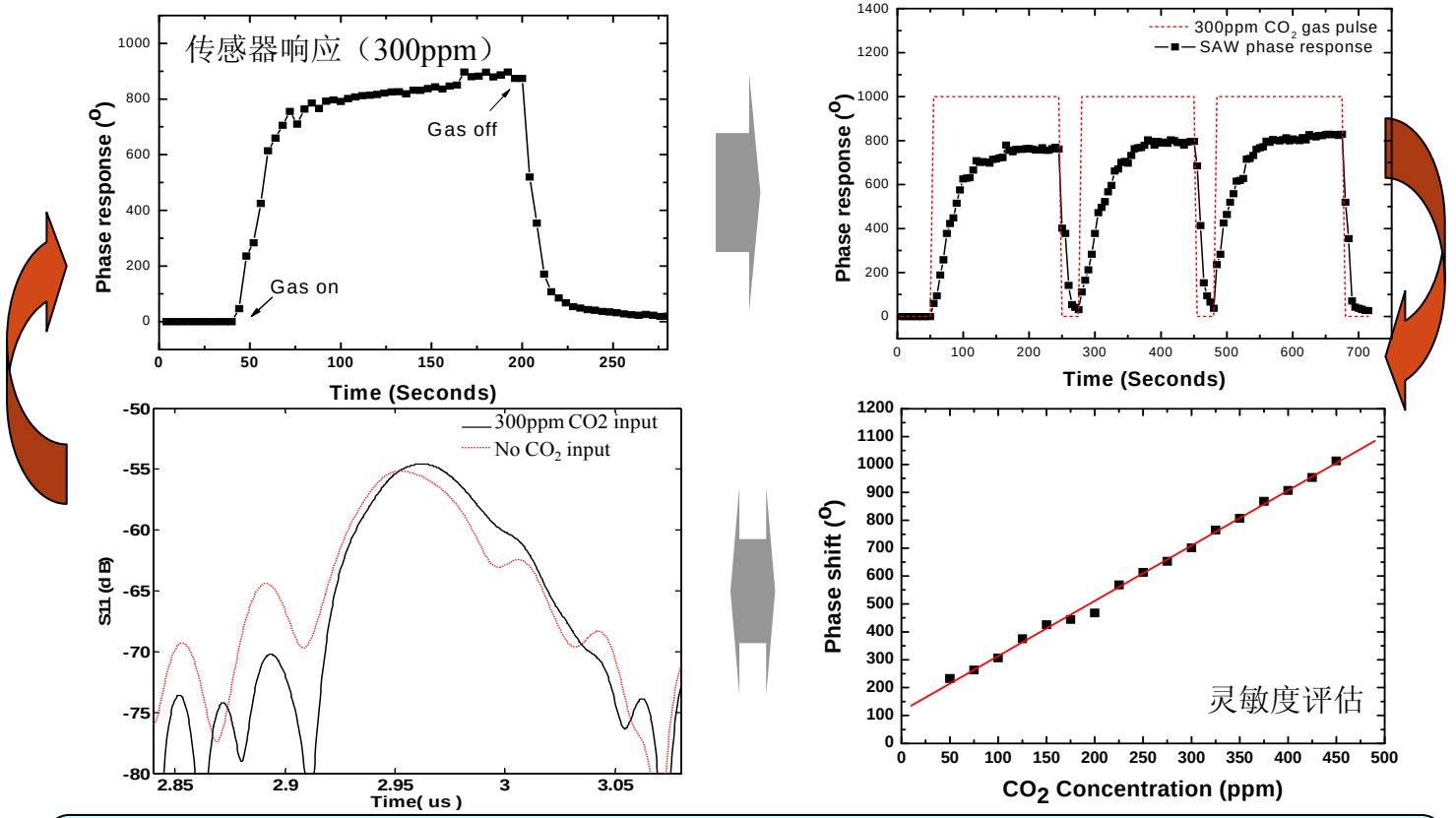




- 系统包括网路分析仪，SAW传感器，压力流控制器，温度控制以及试验腔体
- 测试之前，试验腔体之中存在之CO_2与H_2O用N_2除去
- SAW传感器在测试之前用N_2处理30分钟

*Wen Wang, A novel wireless, passive CO_2 sensor incorporating a surface acoustic wave reflective delay line, Smart Mater. Struct. 16 (2007) 1382–1389

声表面波无线无源传感器：气体传感器*

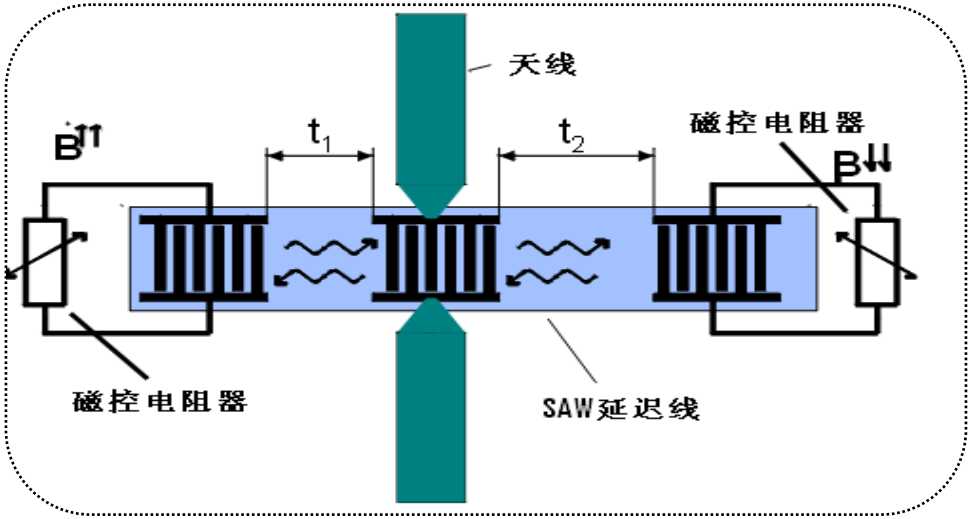


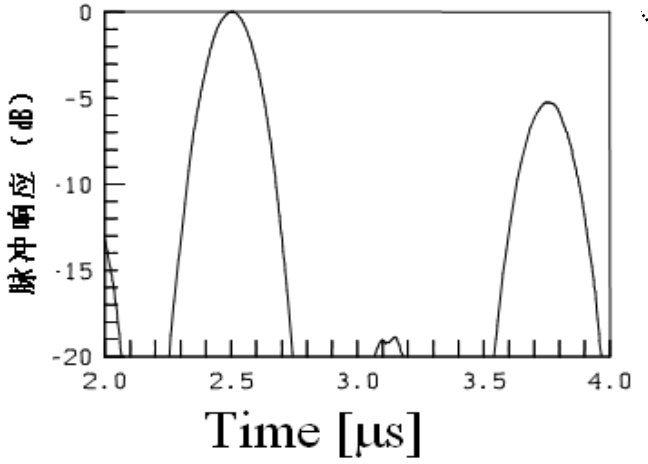
测试条件：室温（25°C）；1大气压；5%RH湿度,N_2作为carrier气体;

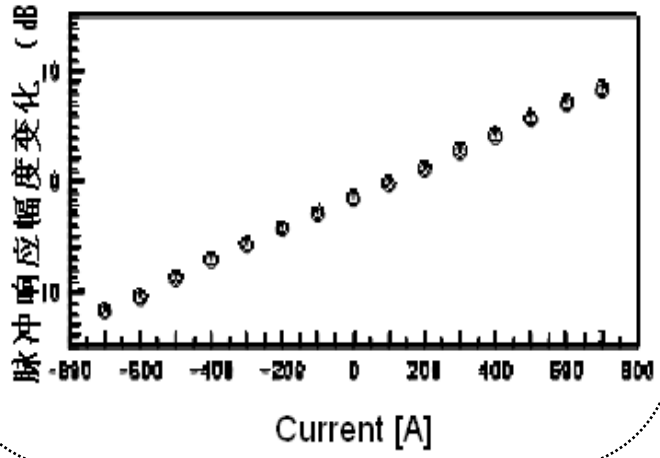
信号处理方法确定响应时延，从而得到传感器相位响应

快速的响应特性（20s），良好的响应稳定性与重现性；灵敏度为1.98°/ppm

声表面波无线无源传感器：电流传感器







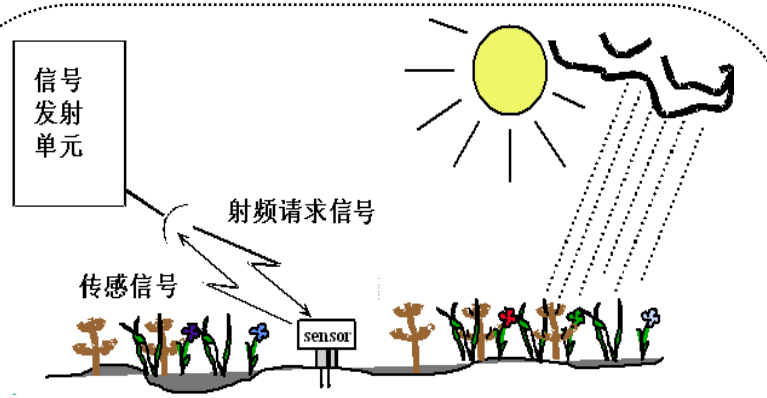
✓ 基本原理：SAW延迟线作为其应答器。实际测量则是采用外部传感器元对检测对象进行实际检测来调制SAW应答器的反射特性。结合阻抗型SAW应答器与磁控电阻器（作为磁场负载），即可构建这种无源射频电流传感器。

✓ 采用差分设计处理交叉灵敏度：两个磁控电阻器分别置于两组反极向的偏置磁场，并分别作为IDT反射器的负载。传感器信号则可以通过相应反射信号的比值获得。

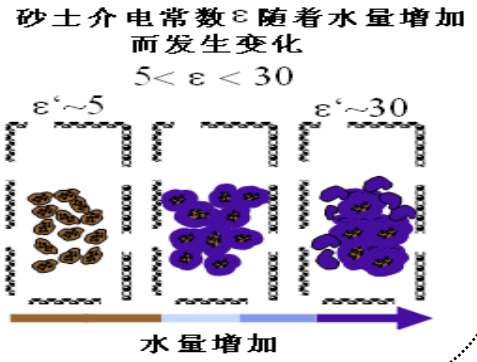
✓ 射频测量系统的分辨率目前已经达到5%。

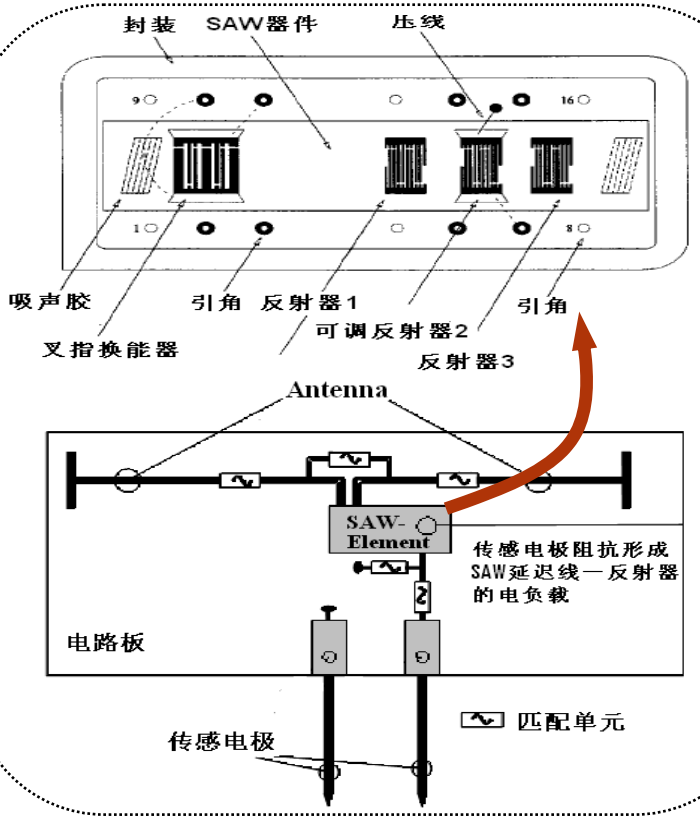
声表面波无线无源传感器：水量传感器

- ***基本原理***：将一并联电传输线（构成两传感电极）与一阻抗型SAW应答器相连即可构成一种无源射频请求水量传感器。传感电极则置于砂土之中，由于砂土中的介电常数随着含水量的增加而发生变化，因此通过传感电极，引起反射性延迟线IDT反射器的反射特性发生变化，从而通过检测反射峰相位或者衰减变化来实现对砂土中含水量的检测
- ***应用***：这种传感器主要用于农业或者园艺生长系统中的灌溉系统，特别是在半干旱或者干旱地区，具有重要的应用前景



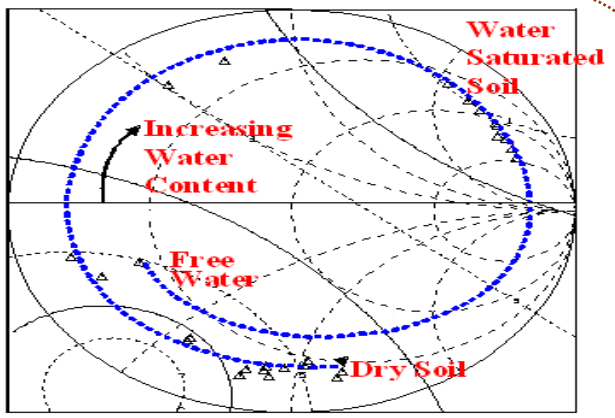
L. Reindl等首先对这种结合声表面波技术的无线水量传感器予以了报道



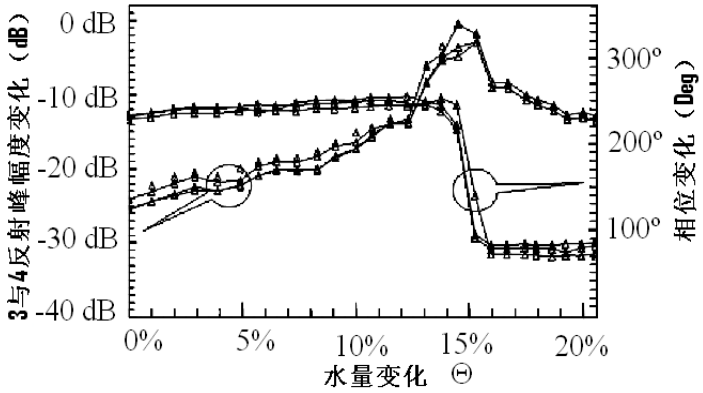


声表面波无线无源传感器：水量传感器

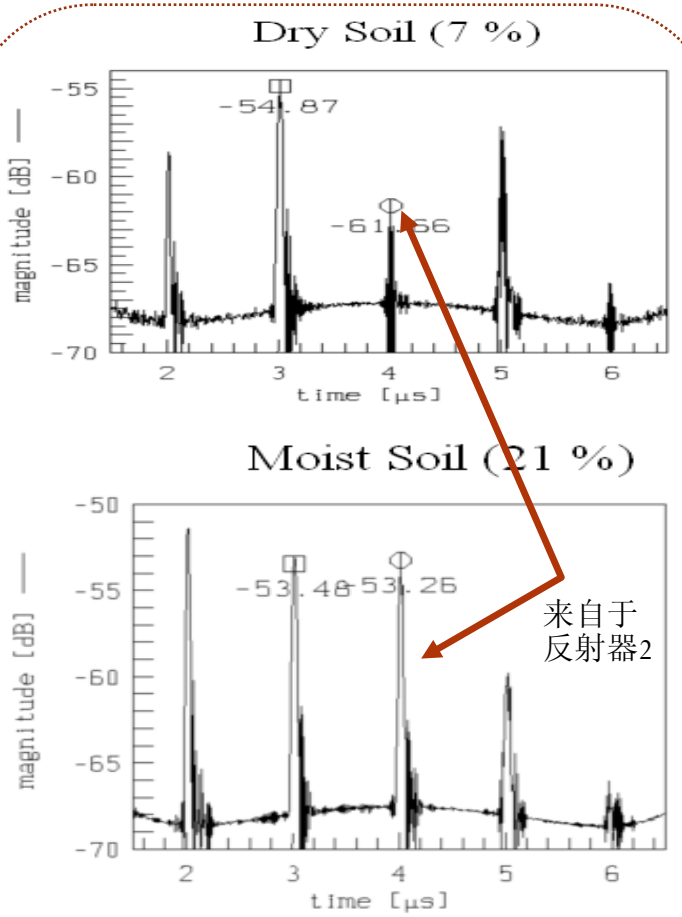
这种基于SAW技术的无线水量传感器的检测结果*



阻抗圆图检测结果



随着含水量的变化，检测反射器的幅度及相位发生变化



时域信号随着含水量的变化而发生变化

*Leonhard Reindl, Radio-Requestable Passive SAW Water-Content Sensor， IEEE Transactions on Microwave theory and techniques, vol. 49, no. 4, 2001,803-808

声表面波无线无源传感器潜在应用

- 标志识别（车辆，人员…）
- 移动物理的温度检测（行车，涡轮叶片，旋转电极）
- 转轴力矩检测
- 应力、压力、光、微粒子辐射、污染、电流、电压、湿度等
- 大功率开关燃烧
- 污水或者密封容器中化学物浓度检测
- 位置识别
- 由各种阻抗元与SAW器件相结合的混合传感器

报告内容

- 声表面波的基本原理
- 典型声表面波传感器基本应用
- 有源声表面波传感器
- 无源无线声表面波传感器
- 未来发展趋势

声表面波传感器的发展趋势

- ***高精度高灵敏度***：对于传感器应用，高精度与高灵敏度是其基本要求。在一些应用领域如角速率、温湿度以及某些气体传感器，SAW传感器的检测精度以及灵敏度还不能与传统传感器相比，因此需要采用一些新方法新技术，改善器件性能，提高系统稳定性。
- ***小型化/便携式***：传感器的应用大都不是单一的，多是与其他机械或者电子系统集成或者共同使用，这样SAW传感器系统必须尽可能减小体积，便携式且低功耗，满足各种机载、车载、航载等要求，这样才能相对于其他类型的传感器具有更大的竞争力；
- ***多功能集成化/低成本***：单一功能的传感器逐渐消失于人们的视野，主要是使用单一功能传感器成本高，系统合成困难且稳定性低。这样多功能集成SAW传感器就成为人们的一个兴趣热点，结构简单、系统体积小且大大降低了系统成本；
- ***智能化与无线传感网络***：许多参量的检测条件是危险剧毒环境，有的测试对象本身就是变化的，这样有源传感器难以满足这一检测需求，而无线传感网络则由于其无源多面特点即可解决这一问题。另外，智能化是当今信息化时代的一个显著特征，结合自动化控制等实现传感器的智能化也是SAW传感器的一个重要发展方向。

谢谢！

