

应崇福院士 90 生辰学术报告会论文

表面声波传感器及其应用*

张淑仪[†] 周凤梅 范理

(南京大学声学研究所近代声学实验室 南京 210093)

摘要 本文简要介绍多种表面声波传感器的结构、特点、应用及其研究进展概况。表面声波传感器依其波型分类,主要包括瑞利波、水平切变声板波、乐甫波和兰姆波传感器;其应用领域根据作用特点大致可分为物理传感器和化学、生物传感器,前者较易实现,后者特异性强,需要针对具体情况作更细致研究。由于表面声波的传播速度和相位对周围环境的参量变化极为敏感,因此有关传感器具有很高的灵敏度和广泛的应用领域。

关键词 表面声波, 传感器, 压电材料和器件

Surface acoustic wave sensors and their applications

ZHANG Shu-Yi ZHOU Feng-Mei FAN Li

(Lab of Modern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, Nanjing 210093)

Abstract This paper introduces briefly the structures, specifications and applications of surface acoustic wave (SAW) sensors, as well as the progresses in the related studies. The SAW sensors include Rayleigh wave, shear horizontal acoustic plate wave, Love wave and Lamb wave sensors. The application fields are classified according to the functions into physical sensors and chemical/biological sensors; the former can be performed more easily, but the latter homes special functions and so needs to be studied in more details based on the practical conditions. The SAW sensors have very high sensitivity and wide applications due to the velocities and phases of SAW are very sensitive to the parameter changes of environments.

Key words Surface acoustic wave, sensor, piezoelectric material and device

2008-08-22 收稿; 2008-09-26 定稿

* 国家自然科学基金委员会资助项目, 编号: 10774074

作者简介: 张淑仪(1935 -), 女, 南京大学教授, 中国科学院院士, 研究方向为声学。

周凤梅(1970 -), 女, 南京大学博士研究生。

范理(1980 -), 男, 博士, 南京大学讲师。

[†] 通信联系人 E-mail: zhangsy@nju.edu.cn

1 引言

自上世纪60年代提出利用叉指换能器在压电晶体表面激发表面声波以来,新型表面声波器件的应用已有40余年的历史。应用最广泛的是表面声波滤波器,包括射频和中频带通滤波器,特别是通信滤波器。其次是表面声波传感器,由于表面声波的传播速度和衰减与传播的环境和介质的参量有紧密的联系,利用表面声波器件制作传感器具有很高的灵敏度^[1]。因此在自动化、生物医学、化学工业、环境监测及军事、反恐、辑毒等领域有广泛应用。

表面声波有许多模式,应用最广泛的属瑞利波,因此“表面声波(Surface Acoustic Wave, SAW)”常专指瑞利波。广义而言,凡在固体表面及其附近传播的声波都属于表面声波。多种表面声波模式可用于制作传感器,主要有瑞利(Rayleigh)波、水平切变声板模(Shear horizontal acoustic plate mode或SH APM)、兰姆(Lamb)波及乐甫(Love)波四种,如图1所示^[2]。不同的波型模式适合于检测(传感)不同的介质或参量,瑞利模式一般只适合应用于气体环境;而水平切变声板模式、兰姆模式或乐甫模式则对于气体和液体环境都适合。

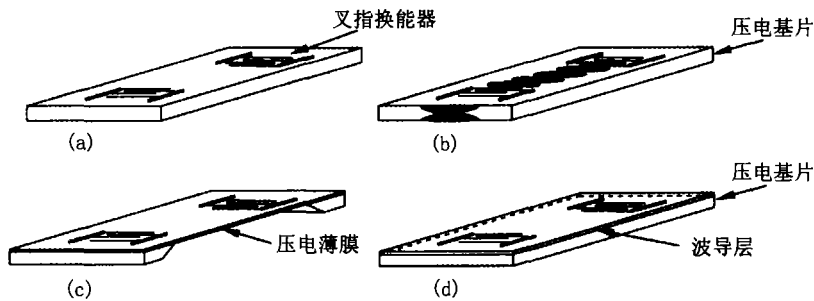


图1 表面声波器件结构:

(a)瑞利波;(b)切向水平板模;(c)兰姆波;(d)乐甫波

表面声波传感器以不同灵敏度敏感于周围物理参量的扰动,如温度变化或外力作用下引起表面声波传播动力学的变化,成为温度、压力、扭力、激波等传感器,通常称为物理传感器;如在表面声波器件表面涂敷薄层特种物质及催化膜,以高选择性、高效率吸附周围的气体、液体或固体粒子,使器件负载质量发生变化,形成质量、化学或生物传感器,后者通常称为化学或生物传感器。要实现这些目标、并提高检测灵敏度,一是改进传感器的结构,如选取适当基片材料及切割方向,以得到最佳的压电系数,二是优化设计叉指换能器的结构和工作频率(典型的工作频率范围为25~500 MHz)、并适当选取换能器电极的材料,以提高换能效率和检测波形^[3];对于化学或生物传感器而言,还要优化选择传感器的敏感层以及催化膜的材料及其厚度,针对不同的检测物质选取与所需检测物质具有高亲和力的敏感层材

料,以适当厚度吸附足够的被测物质又不影响器件的插损,并可多次反复吸附使用^[4,5]。为使传感器系统能同时检测不同的特定物质,可用多个表面声波器件组成阵列,每个器件的敏感膜吸附一种特定物质,利用适当的信号处理技术,可制成化学或生物分析谱仪。

表面声波器件常用的压电基片为多种切割和传播方向的石英(SiO_2)、铌酸锂(LiNbO_3)或钽酸锂(LiTaO_3)晶片等。近年来,由于薄膜及硅表面工艺技术的发展,常常利用在硅基片表面沉积压电薄膜而制作表面声波器件,以便与集成电路等微型器件系统组合。常用的压电薄膜为氧化锌(ZnO)、氮化铝(AlN)或锆钛酸铅(PZT)等。

许多情况下,表面声波的传感机理常常是由于表面吸附物质引起负载质量变化,使表面声波的速度和频率发生变化,表面声波质量传感器的灵敏度 S_m 通常定义为^[6]:

$$S_m = \frac{1}{f_0} \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta m} = \frac{1}{\rho h f_0} \Delta f \quad (1)$$

其中 f_0 为传感器的初始频率, Δm 为质量负载的变化, Δf 为质量变化引起的频率变化, ρ 为质量负载的密度, h 为质量负载层的厚度。

表面声波传感器的测量方法有多种, 主要

有四种如图 2 所示: (a) 网络分析仪测量频谱变化, (b) 矢量电压表测定相位变化, (c) 谐振回路测定频移, 以及 (d) 为消除环境变化(如温度变化)引起的误差, 采用双通道差分方法测定频移, 测量更准确、方便。在实际测量中, 可根据具体条件选择适当的方法。

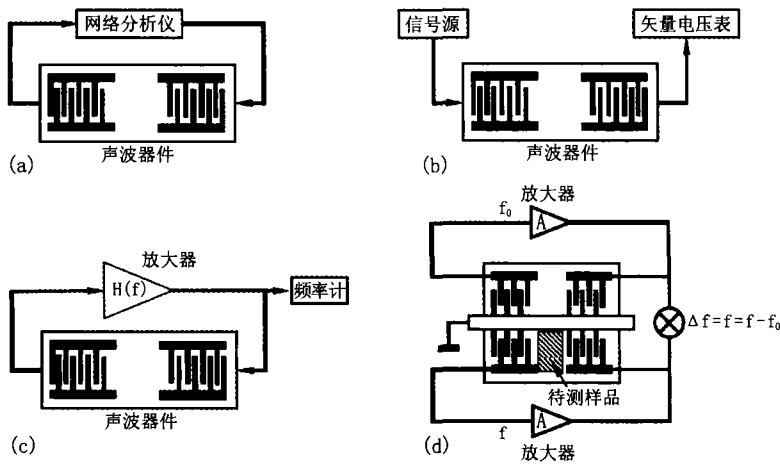


图 2 表面声波传感器测量方法

2 表面声波传感器结构及应用

2.1 瑞利波传感器

瑞利波传感器通常亦称为表面声波传感器, 一般利用 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 或 ST-X (传播) 石英晶片等为基片, 前者有高压电系数, 后者温度稳定性较好。制作瑞利波传感器工艺过程比较简单, 因此最容易达到商品化。由于瑞利波的质点位移为椭圆形轨道, 位移存在法向分量, 在液固界面传播时, 其能量会漏向液体, 不适合用于液体介质的传感检测, 因此只能应用于气体环境。由于传感器的频率明显受多种物理量的影响, 如测定压力时会受温度变化的影响, 因此常需保持在恒温条件下进行传感、检测, 或者压力和温度同时测定^[1,7]。

目前, 部分瑞利波传感器已比较成熟或已达到商用要求, 如已用于毒品、毒气、以及危险或有害气体的检测与分析; 但是在化学、生物或特种气体传感方面, 由于不同的化学气体需

要具有不同选择性的敏感膜, 仍需继续不断改进和提高检测灵敏度。

我组利用 128°YX -铌酸锂基片, 以 80 对频率约为 100 MHz 铝电极叉指换能器, 并利用射频磁控溅射三氧化钨 (WO_3) 薄膜为敏感层及超薄的金(或铂)为催化膜, 研制氢气传感器, 对合成空气中氢气浓度为 1% 进行检测, 获得常温下检测的灵敏度达到与已有的传感器在温度升至 270°C 时相近的结果, 即传感器频率变化约为 100 kHz^[5]。

2.2 切向水平板模传感器

由于环境科学及生物工程与技术的发展, 检测环境污染及生物物质的需求不断增加。传感器主要是用于液体环境, 因此瑞利波传感器不能使用, 通常选择切向水平位移的声波模式, 如水平切向声板波模式 (SH APM) 以及 Love 波等表面波模式。

水平切向板波传感器是一种声波导, 限制声波能量在薄板内, 质量检测灵敏度依赖于板

的厚度,其灵敏度 $S_m = 1/\rho d$ (d 为板厚),板越薄,集中于表面的声波能量越大,因此对于周围扰动的灵敏度越高。其独特优点是上下表面均有切向水平位移,因此上下表面都可用于传感。为保护叉指换能器,可将其背面用于传感。已制成水污染传感器,成功用于饮用水中水银含量的检测,如图3所示^[8]。

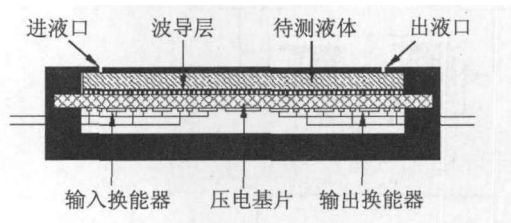


图3 切变水平声板模传感器结构

由于制作高灵敏的水平切向板波传感器的基片需很薄,其机械强度低,因此近年来较少研究与应用。

2.3 Love 波传感器

Love 波传感器是在水平切变表面波器件表面覆盖薄层波导及超薄金属催化膜得到,其声波能量集中在薄层波导内,因此 Love 波传感器能非常敏感地反映环境的扰动与变化。与水平切向声板模相比,如果两者达到相同的灵敏度,则切向水平声板波器件要非常薄,其机械强度很差,而 Love 波器件有较厚的基片衬底,强度要好得多,只是 love 波器件工艺复杂一些。

Love 波传感器常用的压电基片有 AT-(Z-传播)石英、ST-(Z-传播)石英或 36° YX-钽酸锂晶片等。波导层一般选用 SiO_2 、 Si_3N_4 及 ZnO 薄膜等。薄膜波导层材料的声速要小于基片的声速,同时弹性系数和衰减系数也比较小。为研制特种气体传感器,常用 WO_3 作为敏感层, WO_3 是 n-型半导体,对氧化和还原有很高的灵敏度;或者经混合修饰(如 $\text{WO}_3\text{-CuWO}_3$)能对不同的气体(如 O_2 、 CO 、 NO_2 、 NH_3 、 H_2 、 H_2S)敏感,成为很有实用价值的敏感物质。 WO_3 或混合修饰层可以用射频溅射、溶胶-凝胶(sol-gel)拉膜或摔胶的方法成膜。表面沉积超薄的 Pt、Au 或

Pd、Cu 等催化膜,实验结果表明,当空气的相对湿度为 0 和 50% 时,乙醇蒸汽 500 ppm 引起频移各为 119.9 kHz 和 86 kHz^[9]。

最近,利用 AT-(Z 传播)石英基片附加反射栅格形成 Love 波共振传感器,频率约为 200 MHz,如图4所示。表面覆盖 SiO_2 波导层,并利用光致刻蚀胶制成液槽,对 0.1% 牛血清蛋白注入于磷酸缓冲液的测试结果如图5所示^[10]。

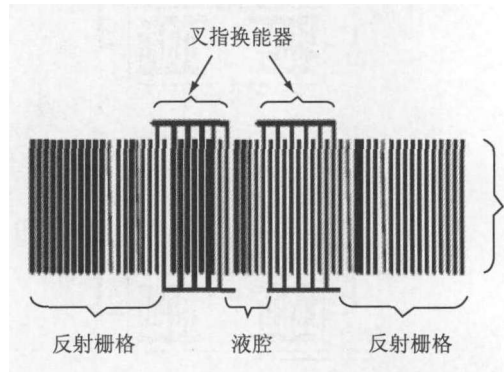


图4 Love 波共振器结构

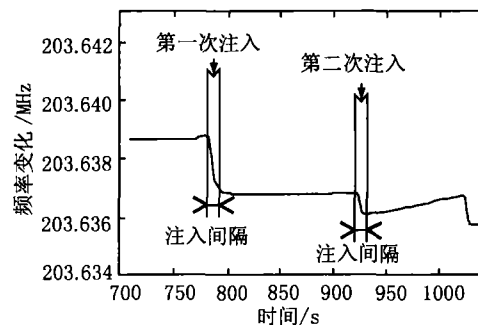


图5 Love 波共振器对牛血清蛋白的实验

我组在 36° YX- LiTaO_3 基片上制作分裂指叉指换能器,其波长 $50 \mu\text{m}$ 、频率 82 MHz,周期数 30、孔径 2 mm,并利用射频磁控溅射方法在其表面沉积 SiO_2 波导层厚 $4.5 \mu\text{m}$,研制 Love 波传感器。将传感器与放大电路构成振荡回路,进行液相免疫传感实验,传感器表面修饰羊抗人免疫球蛋白作为生物敏感膜,用以检测人免疫球蛋白 G (HIgG) 的浓度及其反应。实验时先后两次加入 $5 \mu\text{g}$ HIgG 于磷酸缓冲液,测定其响应曲线如图6所示。

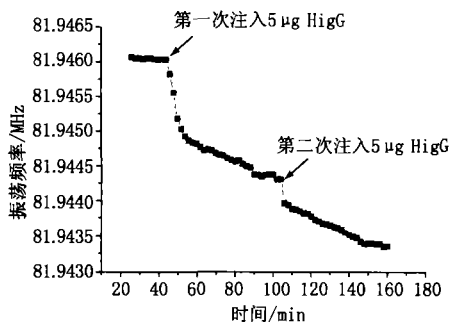


图 6 Love 波传感器响应曲线

当传感器频率提高,其灵敏度相应提高,当振荡频率为 127 MHz 时,HlgG 浓度为 100 µg/ml 引起免疫反应增强,30 分钟时频移可达 10 kHz,60 分钟时频移可达 13.7 kHz^[11]。

将 Love 波传感器与声表面波和 SH APM 传感器进行比较,结果如表 1 所示^[9]。一般说来,Love 波传感器是表面声波传感器中灵敏度最高、机械强度又好的传感器件。

表 1 几种表面声波传感器灵敏度比较

器件	基片	波长	频率	导波层厚度/nm	DMMP 浓度/ppm	频移 Δf (Hz)
Love 波 1	AT-cut 石英	40 µm	115 MHz	15	0.35	1550
Love 波 2	AT-cut 石英	40 µm	111 MHz	15	0.35	2000
声表面波	ST-cut 石英	32 µm	98 MHz	30	0.3	180
SH - APM	BT-cut 石英	32 µm	107 MHz	20	0.36	80

近年来,发展以聚合物薄膜(如有机聚合物 PMMA)为波导层,由于聚合物薄膜有更低的弹性系数和声速,其检测灵敏度更高^[12,13]。但聚合物衰减大,所以也还不是理想的波导材料,尚需发展新的更适合的波导材料。

2.4 Lamb 波传感器

Lamb 波传感器是在板中传播,可看作是由传播在板的上下表面的两列瑞利波所组成,如果板的厚度大于 2 倍波长,两列瑞利波可自由传播。如果板的厚度小于 2 倍波长,则有两群 Lamb 波可互相独立地在板中传播:即对称 Lamb 波和反对称 Lamb 波。通常有无限的对称和反对称 Lamb 波在板中传播,但是只有最低阶(零阶)的反对称 Lamb 波(A₀模)的速度随板厚减小而单调减小。而且 A₀模只有水平方向位移,没有垂直方向位移,只要流体介质的纵波速度大于 A₀模的速度,就可以用于流体介质传感。如果板很薄,只有 A₀模传播,板就成为 A₀模的波导,其声波能量集中在板的表面,对周围介质的参量变化非常敏感。曾利用 P(VF₂-VF₃)压电薄膜粘结在非压电体上制

作 Lamb 波传感器,通过测定 NaCl 溶液的声速来测定溶液的密度^[14]。

为了能和硅平面工艺集成的器件(如半导体集成电路、微电子机械系统等)兼容,在硅基片表面沉积压电薄膜(如 ZnO、AlN 薄膜等),利用叉指换能器在压电薄膜上激发声波,制作各种表面声波器件,包括表面声波传感器。我组在研制 Lamb 波传感器时,为提高灵敏度,将声传播区域的硅基片刻蚀减薄,考虑到器件的机械强度不能太脆弱,我们刻蚀硅基片时保留硅片 10µm 厚度,制成 Lamb 传感器结构如图 7(a)所示。作为温度传感器,测量的结果如图 7(b)所示。从图 7(b)看出,中心频率约为 169 MHz 的器件,绝对灵敏度为 -7.9 kHz/°C,相对灵敏度为 -46.6ppm/°C。对照 TFSS434A 瑞利波温度传感器:工作频率为 433.8 MHz,绝对灵敏度为 -7.03kHz/°C,相对灵敏度为 -16.2ppm/°C,我们制作的 Lamb 波传感器具有更高的灵敏度,但工作频率低 2.5 倍。由于制作工艺过程比较复杂,不易推广使用。但可以与硅集成器件同时使用。

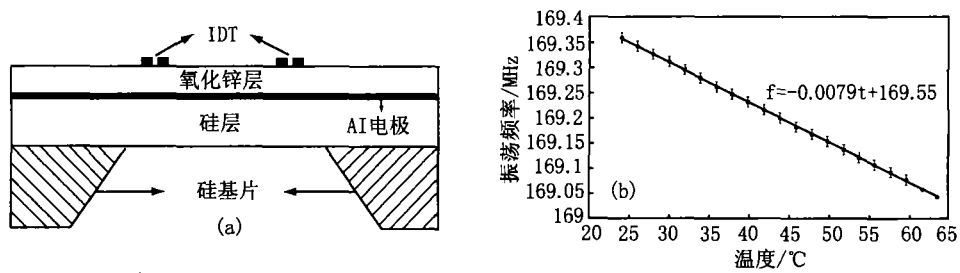


图7 Lamb传感器结构及其温度传感实验效果

必须指出,Lamb传感器的灵敏度和性能与压电薄膜的机电耦合系数和机械性能有密切的关系,所以研制高性能、高指标的压电薄膜是关键技术之一。已知锆钛酸铅(PZT)及PZT基的三元复合物薄膜具有高机电耦合系数,为此我组研制成功PZT及PMnN-PZ-PT压电薄膜,利用多种技术对所研制的薄膜进行定征,表明其性能、指标都有很大改进和提高^[15,16],现在正进一步应用于传感器的研制中。

3 结论

表面声波传感器由于高灵敏度、高分辨率、高稳定性、体积小以及输出信号容易处理等优点而得到广泛应用。利用多种波型发展了多种结构、多种材料的表面声波传感器,在气体和液体环境下,应用于物理、化学和生物方面的参量传感和检测。在物理传感方面有:质量、温度、露点、湿度、密度、浓度、压力、应力、扭力、紫外线、电压等等;在化学传感方面,主要是对各种化学蒸汽、配合物、溶液、环境、食品中的化学成分或有毒有害物质等进行检测;在生物传感方面,针对细胞、抗体、细菌、病原体等进行检测,都得到很好的效果。随着高科技、生物、化学及医学的发展,表面声波传感器必将发挥更大的作用。

由于篇幅所限,只能根据本组的工作情况对国际上已发表的结果做简单介绍,很不全面,遗漏很多,读者还需多多参考国内外文献资料。

参 考 文 献

- [1] H. Wohltjen. Acoustic Wave Sensor—Theory, Design, and Physico-Chemical Applications (Academic Press, San Diego, 1997).
- [2] M. J. Vellekoop. Ultrasonics, 36, 7-14 (1998).
- [3] T. Sato, IEEE Ultras. Sym. Proc. 2002;351.
- [4] W. P. Jakubik, M. W. Urbanczyk. Sensors and Actuators, B102, 605 (2005).
- [5] S. J. Ippolito, S. Kandasamy, K. Kalantar-Zadeh, et al. Sensors and Actuators, B108, 154 (2005).
- [6] J. A. Ogilvy. Sensors and Actuators, B42, 109 (1997).
- [7] W. Buff, M. Rusko, M. Goroll, J. Ehrenpfordt, et al. IEEE Ultras. Sym. Proc. 1997;359.
- [8] M. G. Schweyer, J. C. Andle, D. J. McAllister. IEEE Ultras. Sym. Proc. 1996;355.
- [9] C. Zimmermann, D. Rebiere, C. Dejous, J. Pistre, R. Planade IEEE Freq. Control Sym., Proc. 2002;281.
- [10] V. Blondeau-Patissier, W. Boireau, B. Cavallier, et al. Sensors, 7, 1992 (2007).
- [11] F. M. Zhou, Z. Li, T. Zhang, et al. IEEE Ultras. Sym. (Beijing, 2008)
- [12] Z. Wang, J. D. N. Cheeke, C. K. Jen. Appl. Phys. Lett. 64,2940(1994).
- [13] F. Bender, K. Lange, N. Barie, et al. Langmuir, 20, 2315(2004).
- [14] L. Scandelari, N. Noury, P. Benech, et al. IEEE Ultras. Sym. Proc. 1997;367.
- [15] K. Wasa. Handbook of Sputter Deposition Technology (Noyes Publications, New Jersey, 1991) P.148.
- [16] T. Zhang, S. Y. Zhang, K. Wasa, et al. IEEE Ultras. Sym. (Beijing, 2008)