

文章编号 1004-924X(2018)02-0371-09

## 超薄硅衬底氮化铝 Lamb 波压电谐振器

李传宇<sup>1,2</sup>, 孔 慧<sup>1,3</sup>, 唐玉国<sup>1,2,3</sup>, 张芷齐<sup>1</sup>, 郭 振<sup>1</sup>, 张 威<sup>1</sup>, 周连群<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 中国科学院 苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

**摘要:**针对 Lamb 波压电声波传感器高品质因数(Q值)、低检测极限(LOD)和易集成的性能要求,本文基于 SOI(Silicon-on-insulator)硅片,通过底层硅(Handling layer)干法刻蚀和中间层(Boxing layer)自截止的方法实现 2  $\mu\text{m}$  超薄均一的硅衬底结构,然后沉积 2  $\mu\text{m}$  厚具备高 C 轴择优取向的氮化铝(AlN)压电薄膜。传感器薄膜区域外设置双端增强反射栅结构用于提高 Q 值,从而有效降低器件的检测极限,并通过微量水分测试验证性能。该谐振器零阶反对称模式( $A_0$ )和零阶对称模式( $S_0$ )的谐振状态的实测结果和 COMSOL 二维模型仿真结果一致,所制作的 Lamb 波谐振器  $A_0$  模式的主峰 Q 值为 703,  $S_0$  模式的主峰 Q 值为 403。微量水分测试  $S_0$  模式的检测极限优于  $A_0$  模式,最低检测极限值为 0.06%RH。结果表明,氮化铝超薄硅衬底 Lamb 波压电谐振器能够实现微量水分等高精度检测。

**关键词:**压电谐振器;Lamb 波薄膜;氮化铝;SOI 硅片;品质因数;微量水分检测

**中图分类号:**TP212.1;TP212.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182602.0371

## Aluminum nitride Lamb wave piezoelectric resonators based on ultrathin silicon substrates

LI Chuan-yu<sup>1,2</sup>, KONG Hui<sup>1,3</sup>, TANG Yu-guo<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Zhi-qi<sup>1</sup>,  
GUO Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, ZHOU Lian-qun<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,  
Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhoulq@sibet.ac.cn

**Abstract:** In order to achieve the performance requirements of piezoelectric acoustic Lamb wave sensor with high quality factor (Q factor), low limit of detection (LOD) and easy integration, a method was presented in the paper. First, an ultrathin and uniform 2  $\mu\text{m}$ -thick silicon substrate was obtained by dry etching of handling silicon layer and automatic stopping of boxing layer based on SOI (Silicon-on-insulator) wafer, and then a 2  $\mu\text{m}$ -thick Aluminum Nitride (AlN) piezoelectric thin film with high C axis oriented was deposited. High Q factor could be obtained by the double end reflectors outside the

收稿日期:2017-05-27;修订日期:2017-07-23.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2015AA042603)

membrane. The LOD could be effectively reduced by using the resonator, and could be verified by the application of trace moisture detection. The experimental results of the lowest anti-symmetric mode ( $A_0$ ) and symmetric mode ( $S_0$ ) were consistent with the simulation results obtained by using software CMOSOL. The prominent peak value of Q factor of the resonator for  $A_0$  mode was 703, and  $S_0$  was 403. The limit of detection of  $S_0$  mode was better than that of  $A_0$  mode, whose LOD was 0.06%RH. It can be concluded that Lamb wave resonator designed in the paper can be utilized as the high precision detection such as trace moisture detection.

**Key words:** piezoelectric resonator; thin film Lamb wave; AlN; SOI silicon wafer; quality factor; trace moisture detection

## 1 引言

微量水分检测和控制工业集成电路、石油化工仪器、医学设施等各个领域具有重要的作用。目前,典型的湿度传感器包括电容式、阻抗式以及压电式几种类型,其中压电类传感器中的石英晶体微天平(Quartz Crystal Microbalance, QCM)和表面声波传感器(Surface Acoustic Wave, SAW)已经被用于湿度检测<sup>[1-2]</sup>。但是,QCM和SAW均采用体状压电衬底材料制备,难以和标准CMOS工艺集成<sup>[3-4]</sup>。Lamb波传感器作为薄膜压电传感器的一种,采用MEMS体硅工艺从硅片反面刻蚀去除大部分的硅衬底材料,能够在压电振荡堆的下表面形成空气交界面,从而将声波限制于压电振荡堆之内;相比常规QCM和SAW两类器件,能获取更低的检测限,并能够与标准IC工艺兼容。另外,SAW传感器样品测试时电极一侧需要进行保护层涂覆,该传感器样品测试区域能够位于电极的另一侧,避免了上述操作过程<sup>[5]</sup>。

基于氮化铝(Aluminum Nitride, AlN)的Lamb波传感器具有良好的化学稳定性、与CMOS工艺兼容以及耐高温等优点,已被用于多种物理、生物、化学参量的检测<sup>[6-8]</sup>。Lamb波传感器的测试灵敏度、检测限和基底薄膜厚度相关,一定厚度的AlN压电材料,硅基底厚度越薄,器件测试灵敏度越高<sup>[9]</sup>,但是硅基底降低至5 $\mu\text{m}$ 器件制作的难度将大大提高。目前国内外学者采用硅基衬底制作Lamb波传感器时,厚度控制在50 $\mu\text{m}$ <sup>[10]</sup>、30 $\mu\text{m}$ <sup>[11]</sup>或者15 $\mu\text{m}$ <sup>[12-13]</sup>,传感器的信号强度受限。另外,器件的动态测试过程对于可靠性封装提出了更高的要求。

传感器的品质因数Q值直接影响到器件测试的检测限,而传统的延迟线结构空气中品质因数难以超过500<sup>[14]</sup>。Lamb波薄板研究表明,叉指电极(Inter-digital Transducers, IDT)两侧添加反射栅能够发生布拉格反射,并可获得高达98%的反射系数<sup>[15-16]</sup>。目前,基于AlN压电材料的Lamb波谐振器通常采用反射栅和IDT一起置于薄膜区域内的结构,该结构通过薄膜区域的谐振方式实现品质因数的增益<sup>[10,12-13,17]</sup>。但是相比Lamb波传感器薄膜处添加IDTs和反射栅,对于相同面积的薄膜区域,反射栅与IDT同时覆盖相比IDT单独覆盖,势必出现IDT数量变少或者线条尺寸变细的现象,而IDT数量变少会导致信号的谐振强度变弱,线条尺寸变细则加大了器件制作工艺的难度。

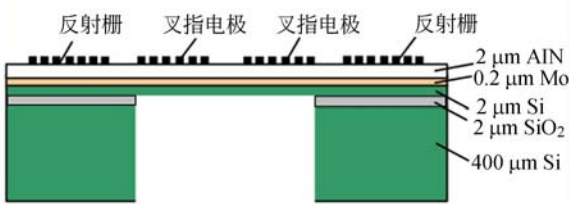
本文开发了一种基于AlN压电薄膜的Lamb波谐振器,并通过微量水分的测试验证性能。该谐振器采用具有2 $\mu\text{m}$ 厚度器件层的SOI硅片(Silicon-on-insulator),通过底层硅干法刻蚀和中间层自截止的方法实现超薄均一的硅衬底结构。相比硅基衬底大于10 $\mu\text{m}$ 的器件,该谐振器薄膜质量减小,能够区分薄膜处待测吸附物质更为微小的质量变化,从而有效降低了器件测试的检测限。另外,本谐振器电极反射栅结构置于薄膜区域外,相比反射栅和IDT置于薄膜区域内的结构,相同面积内IDT数量的增多有利于特定频率下幅频信号的增强。

## 2 Lamb波薄膜压电声波谐振器设计

### 2.1 谐振器结构原理

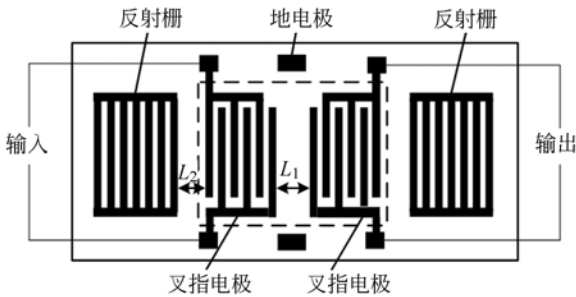
Lamb波传感器采用SOI硅片作为基底,如图1(a)所示。一方面,器件层控制在2 $\mu\text{m}$ 可有

效提高器件的质量灵敏度;另一方面,背面的二氧化硅层能够作为底层硅刻蚀的阻挡层,二氧化硅层经处理后硅基底厚度保持一致,因此 SOI 使 Lamb 器件厚度可控且均一。叉指电极信号传输同传统的延迟线型 Lamb 波传感器工作原理类似,如图 1(b)所示。Lamb 波谐振器的工作原理为叉指电极输入端获取电信号后,在薄膜处压电薄膜产生逆压电效应将电信号转变为机械能进行



(a)Lamb 波谐振器截面示意图

(a) Schematic diagram of cross section for Lamb wave resonator



(b)Lamb 波谐振器电极布局示意图

(b) Schematic diagram of electrode layout for Lamb wave resonator

图 1 双端反射栅 Lamb 波谐振器结构示意图

Fig. 1 Schematic view of Lamb-wave resonator with double end reflection

传播,后由压电薄膜的正压电效应,机械能转化为电能,并经叉指电极输出端引出电信号。其中,为使信号有效传输,输入输出叉指电极间距离  $L_1$  需要满足以下条件:

$$L_1 = \left( k - \frac{1}{4} \right) \lambda \quad (k=1,2,3,\dots). \quad (1)$$

Lamb 波谐振器短路栅置于薄膜外区域,反射阵列之间的距离为  $\lambda/2$  的整数倍,保证反射的声波能够满足布拉格反射条件形成驻波。叉指电极处出现谐振驻波峰,  $L_2$  需满足:

$$L_2 = \left( n - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} \quad (n=1,2,3,\dots). \quad (2)$$

为使频谱曲线能够有效地发生谐振,并且反射栅能够具有更强的反射效果,特定尺寸下的器件  $L_1$  和  $L_2$  通常取最小值,  $L_1=3/4\lambda$ ,  $L_2=1/4\lambda$ 。

### 2.2 谐振器模式仿真

Lamb 波谐振器通过 COMSOL Multiphysics 模块构建二维模型进行仿真分析。该仿真针对图 1(a)中所示 Si/SiO<sub>2</sub>/Si/Mo/AlN/Au 复合层结果,通过 0.1 MHz 至 120 MHz 进行扫频分析,可获取相应频段的位移信息<sup>[18]</sup>。为准确捕捉各频段的位移信息,步长设置为 0.1 MHz。表 1 为用于仿真的各层材料的特征属性。

理论上,Lamb 谐振器的薄膜厚度远小于薄膜波长时,仅存在两种模式,分别为零阶反对称模式  $A_0$  和零阶对称模式  $S_0$ 。图 2 所示 120 MHz 范围内的位移特性曲线表明,在 10.8 MHz 和 115 MHz 附近会出现较为明显的振动偏移量,而通过薄膜处位移特性图推断出两种谐振模式分别对应  $A_0$  和  $S_0$  模式。

表 1 采用的各层材料的物理属性<sup>[10]</sup>

材料特性	杨氏模量 E/GPa	泊松比 $\nu$	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Si	190	0.23	2330
SiO <sub>2</sub>	70	0.2	2200
Mo	329	0.31	10280
AlN	[C]	0.3	3260
Au	78	0.44	19320

注:[C]代表本文中仿真采用的 AlN 的弹性矩阵,其中  $[C_{11}=410.16, C_{12}=100.69, C_{13}=83.82, C_{33}=386.24, C_{44}=100.58, C_{66}=154.70] \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ <sup>[10]</sup>

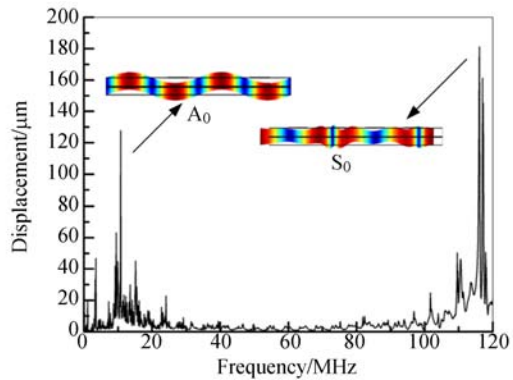


图 2 Lamb 波谐振器仿真模式图

Fig. 2 Simulation of mode properties of Lamb wave resonator

### 3 谐振器制作

#### 3.1 谐振器制作工艺

谐振器通过先沉积电极后背面刻蚀的方法,可避免溅射沉积过程中因腐蚀槽结构而带来的热应力影响,以及图形化各层结构时掩膜喷涂涉及的真空吸附问题。SOI 硅片上层外延硅为  $2\ \mu\text{m}$  厚,二氧化硅层厚  $2\ \mu\text{m}$ ,底层硅为  $400\ \mu\text{m}$ 。器件制作中首先沉积  $200\ \text{nm}$  厚的钼金属作为地电极,然后直流磁控溅射沉积  $2\ \mu\text{m}$  厚的 AlN 压电薄膜。氮化铝上层的溅射沉积金层厚度为  $100$

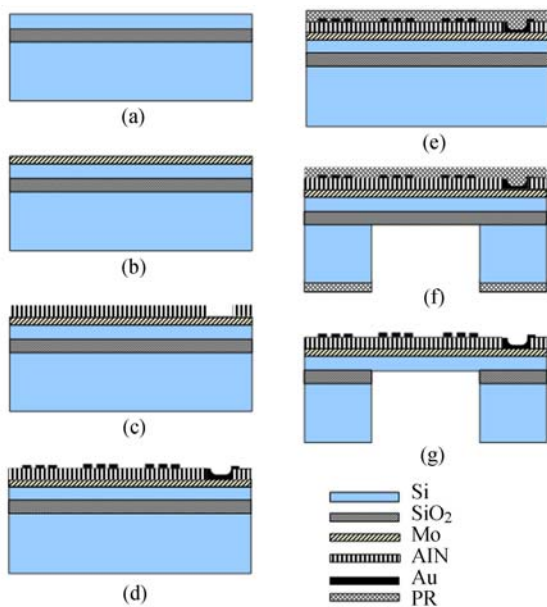


图 3 Lamb 波谐振器的制作工艺流程:(a)  $2\ \mu\text{m}/2\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$  的 SOI 硅片清洗;(b) 沉积  $0.2\ \mu\text{m}$  的 Mo 作为地电极;(c) 沉积  $2\ \mu\text{m}$  的 AlN 压电薄膜并图形化;(d) IDT 和反射栅的沉积及图形化;(e) 光刻胶保护 IDT 和反射栅一侧结构;(f) 以光刻胶作为掩膜干法刻蚀背面硅层;(g) 通过氢氟酸去除二氧化硅层。

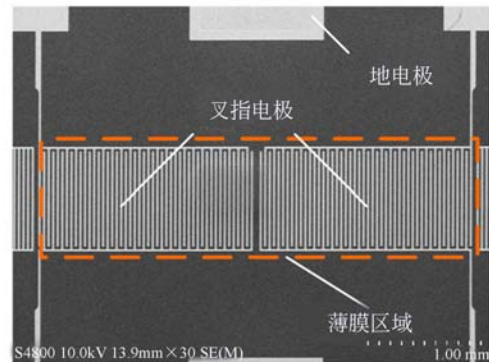
Fig. 3 Main fabrication process of Lamb wave resonator: (a) SOI cleaning with thickness of  $2/2/400\ \mu\text{m}$ ; (b)  $0.2\ \mu\text{m}$  Mo electrode deposition as ground; (c)  $2\text{-}\mu\text{m}$ -thick AlN piezoelectric thin film deposition and patterned; (d) IDTs and reflectors deposition and patterned; (e) protection of side of IDTs with photo-resist (PR); (f) backside silicon dry etching with PR mask; (g) removal of  $\text{SiO}_2$  boxing layer by HF.

nm, 经过剥离工艺, 叉指电极和反射栅一并制作。背面腐蚀槽通过光刻胶作为掩膜, 通过 ICP (Inductively Coupled Plasma) 进行干法刻蚀, 二氧化硅层作为阻挡层截止, 经刻蚀后用 HF 去除残留氧化层, 上层硅基底保持一致。

#### 3.2 谐振器表征

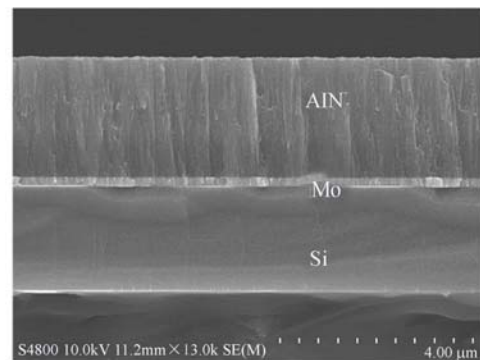
如图 4 所示, 谐振器传感器的尺寸为  $8\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$ , 薄膜区域尺寸为  $4\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ 。其中薄膜区域两侧各有电极 24 对, 周期为  $80\ \mu\text{m}$ , 薄膜区域外为短路栅, 两侧均为 30 对, 周期为  $40\ \mu\text{m}$ 。 $L_1$  和  $L_2$  均取最小值, 其中  $L_1 = 3/4\lambda = 60\ \mu\text{m}$ ,  $L_2 = 1/4\lambda = 20\ \mu\text{m}$ 。为便于后续的封装, 各个电极引线部分和薄膜区域进行有效分离, 地电极放置在对称位置, 如图 4(a) 所示。

薄膜区域基底为 SOI 的上层硅, 如图 4(b) 所示截面图, 上层硅严格控制厚度为  $2\ \mu\text{m}$ , 地电极层为  $200\ \text{nm}$  的 Mo 层, AlN 压电层厚度约为  $2\ \mu\text{m}$ 。AlN 的 SEM 图表明该薄膜具有优良的 C



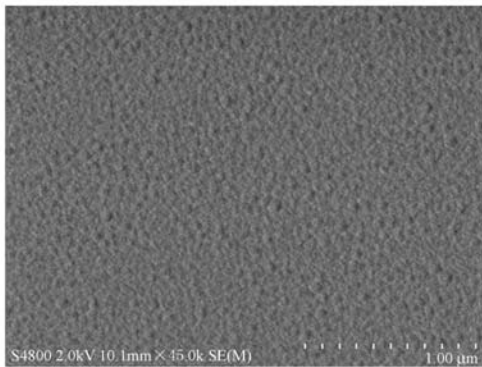
(a) 谐振器电极结构 SEM 图

(a) SEM image of resonator electrodes



(b) 薄膜处截面 SEM 图

(b) Cross sectional SEM image of membrane



(c) AlN 薄膜表面 SEM 图

(c) SEM image of AlN thin film surface

图 4 Lamb 波谐振器 SEM 表征

Fig. 4 Lamb wave resonator characterized by SEM

轴择优取向。而图 4(c)中 AlN 表面呈现出致密均匀的颗粒,颗粒直径为 50 nm。

### 3.3 碳纳米涂覆及测试

多壁碳纳米管 (Multi-wall Carbon Nanotubes, MWNTs) 具有大的比表面积,表面修饰后可以改善碳纳米管在溶剂中的分散性,已经证明能够作为水分检测中的敏感膜<sup>[19]</sup>。为了使多壁碳纳米管功能化,经混酸( $V_{H_2SO_4} : V_{HNO_3} = 3 : 1$ )超声氧化处理,在碳纳米管表面及缺陷处引入羧基。将引入羧基的多壁碳纳米管与二胺在 1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐和 N-羟基琥珀酰亚胺催化的条件下进行聚合反应,并在碳纳米管的表面及缺陷处引入胺基,实现碳纳米管的功能化。

为配制 5 mg/mL 的 MWNTs,通过移液枪吸取 50  $\mu$ L 5% 的全氟磺酸隔膜 (Nafion) 溶液滴入

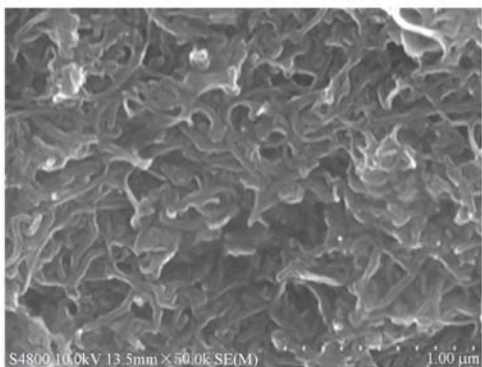


图 5 浓度为 5mg/mL 的 MWNTs 表面 SEM 形貌

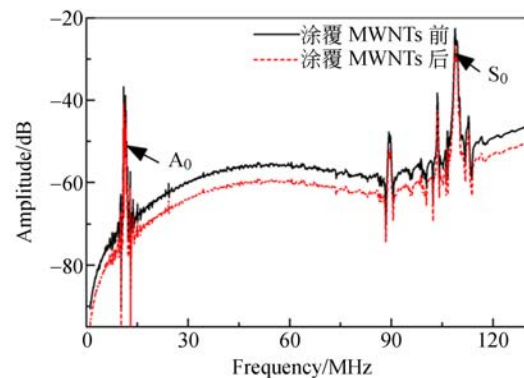
Fig. 5 SEM image of MWNTs surface with concentration of 5 mg/mL

烧杯,然后借助天平称取 2.5 mg 胺化多壁碳纳米管注入烧杯中,并滴取 450  $\mu$ L 正丙醇溶液将其稀释至 0.5%,然后超声 10 min 混匀。在 Lamb 波薄膜腐蚀槽一侧滴涂上述多壁 MWNTs,由于和电极不在同一侧,避免了额外的保护层涂覆。涂覆 MWNTs 后的 Lamb 波谐振器放入真空干燥箱,干燥温度为 90  $^{\circ}$ C,真空干燥 15 min 后缓慢降温,5 mg/mL 浓度的 MWNTs 表面形貌 SEM 图如图 5 所示。

## 4 测量实验与结果

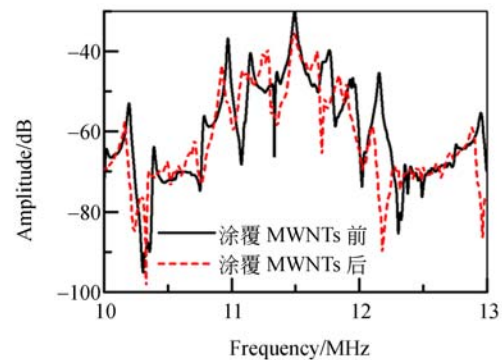
### 4.1 涂覆前后信号测试

本实验通过 Agilent E5061B 网络分析仪对器件进行幅频特性分析。其中,谐振器在 5k~130 MHz 内涂覆前后的幅频特性曲线如图 6(a)所示,涂覆前和仿真结果基本一致,在相应谐振



(a) 5k~130 MHz 全谱的幅值曲线变化

(a) Transmission spectra of full spectrum between 5k-130 MHz

(b)  $A_0$  模式的幅值曲线变化

(b) Transmission spectra of  $A_0$  mode

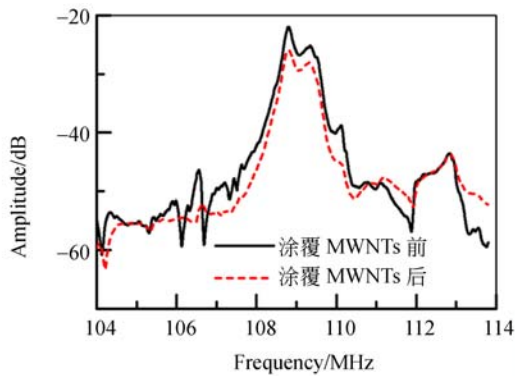
(c)  $S_0$  模式的幅值曲线变化(c) Transmission spectra of  $S_0$  mode

图 6 MWNTs 涂覆前后谐振器幅值曲线

Fig. 6 Transmission spectra of Lamb wave resonator without and with MWNTs coating

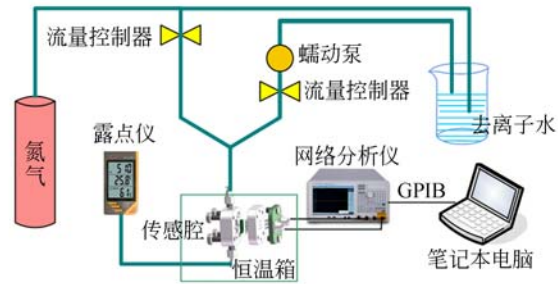
频率段出现  $A_0$  和  $S_0$  两种振动模式,涂覆后器件  $A_0$  和  $S_0$  模式下谐振频率均发生微小的左移。如图 6(b)所示,  $A_0$  涂覆前品质因数  $Q$  值为 703, 谐振频率为 11.492 55 MHz,涂覆后为 11.475 68 MHz;而图 6(c)中所示  $S_0$  模式涂覆前品质因数  $Q$  值为 403, 谐振频率为 108.80 MHz,涂覆后谐振频率为 108.725 MHz。由于 AlN 压电薄膜的实际沉积厚度由时间控制,沉积厚度略大于  $2 \mu\text{m}$ ,所以  $A_0$  模式的谐振频率相对仿真数据略大,而  $S_0$  模式谐振频率则相对偏小。

#### 4.2 测试装置

微量水分测试装置原理如图 7(a)所示,其中高纯氮气(99.999%纯度)一方面用于传感器所在气路的吹扫,另一方面和去离子水按一定比例混合,通过蠕动泵驱动微量水汽载入传感器腐蚀槽一侧的 MWNTs,两种功能的切换通过图中的流量控制器来实现,流速控制在 500 mL/min。传感器的微量水分通过英国 Michell Instruments 公司的露点仪来进行标准核对,信号则通过 Agilent E5061B 网络分析仪进行采集,并通过 GPIB-USB 线传输至电脑完成数据分析。由于温度对于微量水分测试具有显著的影响,所以整个实验进程通过恒温箱将温度控制在  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。

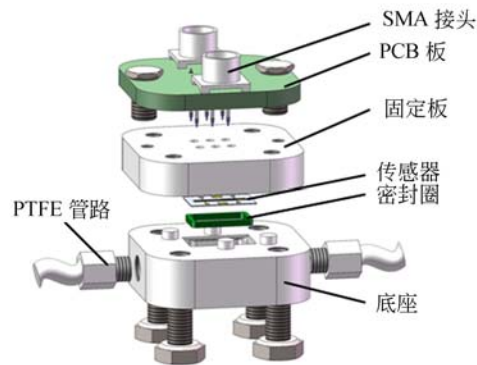
本实验装置中 Lamb 波谐振器可拆卸,易清洗,见图 7(b)。传感器的腐蚀槽一侧通过环状氟橡胶密封圈进行密封,PMMA 底座通过 PEEK 接头连接特氟龙 PTFE 管路。固定板底面覆盖一层 PDMS 柔性材料,将谐振器边缘压住,电路

板 PCB 的弹性探针端口和传感器的 IDT 以及地电极的 Pad 接触,最终信号通过 SMA 标准接头引出和网络分析仪连接。传感器实物图如图 7(c)所示。



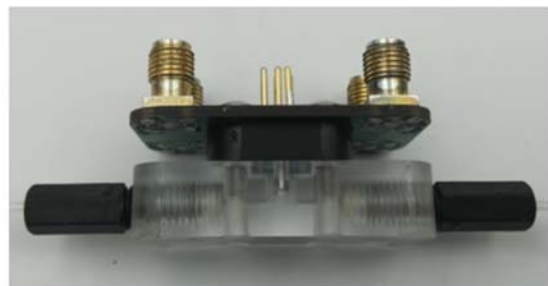
(a) 微量水分测试装置原理图

(a) Schematic diagram of experimental procedure for humidity detection



(b) 传感腔详细结构图

(b) Details of chamber structure with resonator



(c) 传感腔实物图

(c) Physical drawing of chamber structure with resonator

图 7 水分测试方案及装置

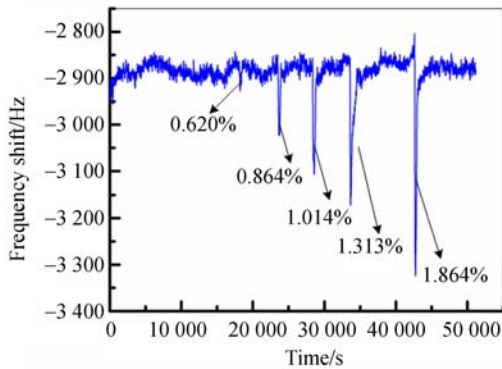
Fig. 7 Scheme and devices for humidity detection

#### 4.3 水分测试

本实验针对  $A_0$  模式进行了 5 组水分浓度的

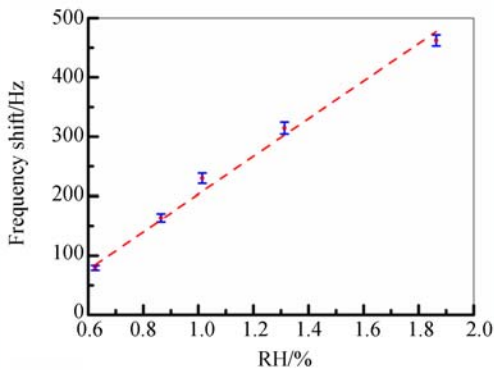
测试,分别为 0.620%RH、0.864%RH、1.014%RH、1.313%RH、1.864%RH,如图 8(a)所示。多次试验得到,谐振频率变化量和水分变化量成线性,拟合线性方程为  $Y=317.29X-113.98$ ,如图 8(b)所示,线性度为 99.059%。

同样方式针对  $S_0$  模式进行了 7 组水分浓度的测试,分别为 0.06%RH、0.139%RH、0.626%RH、0.804%RH、0.914%RH、1.213%RH 以及 1.864%RH,如图 9(a)所示,最低检测极限可达 0.06%RH。多次试验谐振频率变化量和水分变化量成线性,拟合线性方程为  $Y=362.66X+2.45$ ,如图 9(b)所示,线性度为 99.479%。



(a)  $A_0$  模式不同水分浓度下的谐振频率偏移量

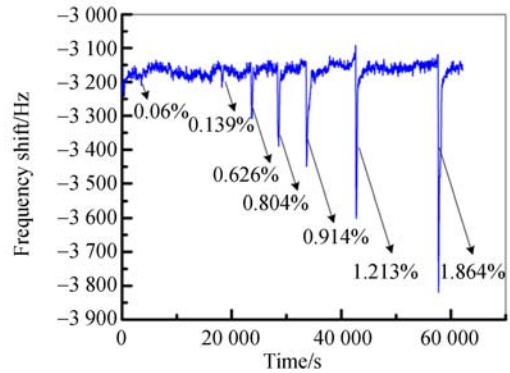
(a) Resonant frequency shifts under different concentrations of moisture for  $A_0$  mode



(b)  $A_0$  模式下不同水分浓度的谐振频率偏移线性图

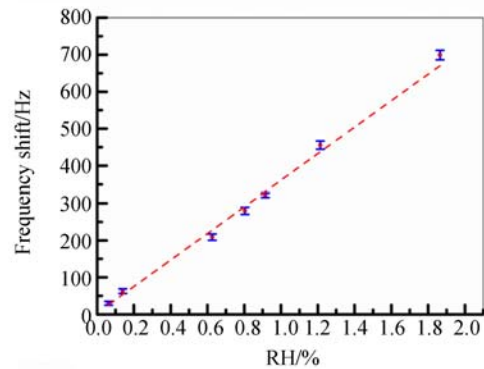
(b) Linear graph of frequency shifts under different concentrations of moisture for  $A_0$  mode

图 8  $A_0$  模式下不同水分浓度的实测谐振频率变化  
Fig. 8 Measured frequency shifts under different concentrations of moisture in  $A_0$  mode



(a)  $S_0$  模式不同水分浓度下的谐振频率偏移量

(a) Resonant frequency shifts under different concentrations of moisture for  $S_0$  mode



(b)  $S_0$  模式下不同水分浓度的谐振频率偏移线性图

(b) Linear graph of frequency shifts under different concentrations of moisture for  $S_0$  mode

图 9  $S_0$  模式下不同水分浓度的实测谐振频率变化  
Fig. 9 Measured frequency shifts under different concentrations of moisture in  $S_0$  mode

## 5 结 论

本文开发一种新型氮化铝 Lamb 波压电谐振器,该谐振器基于 SOI 硅片,通过底层硅干法刻蚀和中间层自截止的方法实现了  $2\ \mu\text{m}$  超薄均一的硅衬底结构,并沉积具备高 C 轴择优取向的 AlN 压电薄膜进行谐振器的构建。Lamb 波谐振器通过薄膜区域外设置双端增强反射栅结构可获得高 Q 值的谐振模式,其中谐振器  $A_0$  和  $S_0$  两种模式的谐振状态的实测结果和 COMSOL 二维模型的仿真结果基本一致。本文所制作的基于 SOI-AlN

的 Lamb 波谐振器  $A_0$  模式的主峰 Q 值可达 703,  $S_0$  模式主峰 Q 值为 403。由于谐振器最低检测限 LOD 和对应模式的谐振频率以及 Q 值均相关, 尽管  $A_0$  模式的 Q 值大于  $S_0$  模式, 但谐振频

率仅约为  $S_0$  模式的 1/10, 通过微量水分检测证实该谐振器  $S_0$  模式的检测限优于  $A_0$  模式, 可达到 0.06%RH, 能够用于微量介质的检测等相关领域。

#### 参考文献:

- [1] TAI H L, ZHEN Y, LIU CH H, *et al.*. Facile development of high performance QCM humidity sensor based on protonated polyethylenimine-graphene oxide nanocomposite thin film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 230: 501-509.
- [2] XUAN W P, HE M, MENG N, *et al.*. Fast response and high sensitivity ZnO/glass surface acoustic wave humidity sensors using graphene oxide sensing layer [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7206.
- [3] MIREA T, YANTCHEV V. Influence of liquid properties on the performance of  $S_0$ -mode Lamb wave sensors: a theoretical analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 208: 212-219.
- [4] 周剑, 吴学忠, 肖定邦, 等. 柔性声表面波器件的波模式分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1328-1334.  
ZHOU J, WU X ZH, XIAO D B, *et al.*. Analysis on wave mode of flexible surface acoustic wave devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1328-1334. (in Chinese)
- [5] MIREA T, YANTCHEV V, OLIVARES J, *et al.*. Influence of liquid properties on the performance of  $S_0$ -mode Lamb wave sensors II: experimental validation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 229: 331-337.
- [6] LU Y P, TANG H Y, FUNG S, *et al.*. Ultrasonic fingerprint sensor using a piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array integrated with complementary metal oxide semiconductor electronics[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(26): 263503.
- [7] PEREZ-CAMPOS A, IRIARTE G F, HERNANDO-GARCIA J, *et al.*. Post-CMOS compatible high-throughput fabrication of AlN-based piezoelectric microcantilevers[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(2): 025003.
- [8] 孔慧, 李传宇, 周连群, 等. 薄膜谐振 lamb 波传感器测量液体流速矢量的方法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(1): 155-162.
- KONG H, LI CH Y, ZHOU L Q, *et al.*. A method for fluid velocity vector measurement using thin film Lamb wave resonator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 155-162. (in Chinese)
- [9] GRATE J W, WENZEL S W, WHITE R M. Flexural plate wave devices for chemical analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1991, 63(15): 1552-1561.
- [10] MU X J, KROPELNICKI P, WANG Y, *et al.*. Dual mode acoustic wave sensor for precise pressure reading[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(11): 113507.
- [11] WANG T, MU X J, KROPELNICKI P, *et al.*. Viscosity and density decoupling method using a higher order Lamb wave sensor[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2014, 24(7): 075002.
- [12] HUANG I Y, LEE M C, HSU C H, *et al.*. Development of a flexural plate-wave (FPW) immunoglobulin-E (IgE) allergy bio-sensing microsystem [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 162(1): 184-193.
- [13] LAN J W, HUANG I Y, LIN Y CH, *et al.*. Development of an FPW biosensor with low insertion loss and high fabrication yield for detection of carcinoembryonic antigen[J]. *Sensors (Basel)*, 2016, 16(11): 1729.
- [14] ZHOU L Q, MANCEAU J F, BASTIEN F. Influence of gases on Lamb waves propagations in resonator[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(22): 223505.
- [15] ZAITSEV B D, JOSHI S G. Reflection of ultrasonic Lamb waves produced by thin conducting strips [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, 46(6): 1539-1544.
- [16] LIU J S, OMORI T, AHN C J, *et al.*. Impact of surface periodic grating on film bulk acoustic resonator structures to spurious transverse resonances[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113(14): 144507.
- [17] LIN CH Y, HUANG I Y, LAN J W. Improve-

ment of insertion loss and quality factor of flexural plate-wave-based alpha-fetoprotein biosensor using groove-type reflective grating structures[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2013, 12(1): 013017.

- [18] 凌明祥, 刘谦, 曹军义, 等. 压电位移放大机构的力学解析模型及有限元分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 812-818.

LING M X, LIU Q, CAO J Y, *et al.*. Analytical model and finite element analysis of piezoelectric displacement amplification mechanism[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 812-818. (in Chinese)

- [19] CHEN W P, ZHAO ZH G, LIU X W, *et al.*. A capacitive humidity sensor based on multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs)[J]. *Sensors (Basel)*, 2009, 9(9): 7431-7444.

#### 作者简介:



李传宇(1986—),男,山东曲阜人,博士研究生,助理研究员,2008年、2011年于山东大学分别获得学士、硕士学位,主要从事 MEMS 压电声波传感器方面的研究。E-mail: lichy@sibet.ac.cn

#### 导师简介:



唐玉国(1967—),男,吉林蛟河人,博士生导师,973 计划首席科学家,中科院特聘研究员,1995 年于中国科技大学获得博士学位,主要从事医用光学、应用光学、光谱学及相关仪器研发等研究工作。E-mail: tangyg@sibet.ac.cn