

文章编号 1004-924X(2017)12-3048-08

## Parylene 增强型声表面波传感器及其温度响应

李 敬<sup>1,2</sup>, 潘海曦<sup>3</sup>, 郭 振<sup>1</sup>, 李传宇<sup>1</sup>, 姚 佳<sup>1</sup>, 周连群<sup>1\*</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. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

3. 西北工业大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**针对声表面波(SAW)传感器对品质因数、寿命和成本的要求,研制了 Parylene 增强型 SAW 传感器。根据金属剥离工艺要求,利用 LOR 剥离胶和 AZ5214 光刻胶双层胶旋涂工艺制作了梯形结构;在传统光学光刻条件下制作了  $2\ \mu\text{m}$  的超细叉指电极。传感器制作过程利用了 MEMS 工艺,不仅实现了传感器的微型化,还可以批量化生产,得到的以石英为基底的传感器谐振频率达到 249.077 953 MHz。最后在传感器的表面镀制 Parylene 聚合物薄膜以提高基底温度灵敏度。实验对比了未增强型(未镀 Parylene)和增强型 SAW 传感器(镀 Parylene)的温度灵敏度。结果显示:未增强型 SAW 传感器温度灵敏度为 2.048 kHz/°C, Parylene 增强型 SAW 传感器温度灵敏度为 2.855 kHz/°C,比前者提高了 0.807 kHz/°C,且镀 Parylene 之后谐振频率变化量与温度具有较好的线性度,线性相关系数达到 0.996 15。实验证明, Parylene 增强型 SAW 传感器的性能优于未增强的 SAW 传感器。

**关键词:**声表面波(SAW)传感器;倒梯形结构;金属剥离;Parylene 增强;温度

**中图分类号:**TP212.16 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3048

## Parylene-enhanced SAW sensor and its temperature response

LI Jing<sup>1,2</sup>, PAN Hai-xi<sup>3</sup>, GUO Zhen<sup>1</sup>, LI Chuan-yu<sup>1</sup>, YAO Jia<sup>1</sup>, ZHOU Lian-qun<sup>1\*</sup>

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

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology,  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)  
\* Corresponding author, E-mail: zhoulq@sibet.ac.cn

**Abstract:** According to the requirement of Surface Acoustic Wave (SAW) sensors for quality factors, long life and low costs, a Parylene enhanced SAW sensor was developed. In consideration of metal stripping process, the LOR stripping rubber and AZ5214 double-layer spin-coating process were used to produce a trapezoidal structure, and the traditional optical lithography was used to fabricate a  $2\ \mu\text{m}$  superfine fork finger electrode. By utilizing MEMS technology, the sensor implements the miniaturization, but also the quantified production. The obtained quartz-based sensor shows its resonant fre-

收稿日期:2017-05-19;修订日期:2017-06-22.

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

quency to be 249.077 953 MHz. Finally, a Parylene polymer film was coated on the surface of the sensor to increase the temperature sensitivity of the substrate. The temperature sensitivities of unenhanced SAW sensor (uncoated parylene) and enhanced SAW sensor (coated parylene) were compared experimentally. The results indicate that the temperature sensitivity of the former is 2.048 kHz/°C and that of the latter is 2.855 kHz/°C, which is higher 0.80 kHz/°C than that of the former. Moreover, the resonant frequency offset and the temperature of the Parylene-enhanced SAW sensor show an excellent linearity, and the linear correlation coefficient reaches to 0.99615. These experiments demonstrate that performance of Parylene-enhanced SAW sensors is superior to that of the unenhanced SAW sensors.

**Key words:** Surface Acoustic Wave (SAW) sensor; trapezoidal structure; metal stripping; parylene enhancement; temperature

## 1 引 言

传感器不仅在工业生产领域有着广泛的应用,而且与我们的日常生活也密不可分<sup>[1]</sup>。声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)传感器因具有高精度、功耗小、便于批量生产等优点而在国内外得到迅速发展,并在气体检测、药物研发、生物特性等分析和生命科学等领域具有十分广阔的应用前景<sup>[2-5]</sup>。

在环境监测、工业及其设备、材料检测以及生活中温度都是一个重要的参数。目前,常用的温度传感器<sup>[6]</sup>有热电偶、热电阻(金属热电阻和半导体热电阻)、集成温度传感器和红外传感器等。热电偶需要物理线缆才能进行实时数据通信,而非接触的红外传感器<sup>[7]</sup>进行温度检测,需对准检测物且中间不能存在障碍物。金属热电阻不适合用于富含金属氛围大的环境中,半导体热电阻有严重的非线性,互换性比较差。常用的集成温度传感器输出的都是模拟信号,所以容易受到干扰信号的影响。

SAW 温度传感器具有很多优良特性<sup>[6,8]</sup>: (1)其材料温度特性稳定,传感器具有高稳定性和高可靠性;(2)基于 MEMS 制作,一致性和重复性好,易于加工;(3)热导率和热容量高,响应时间快;(4)抗干扰信号能力强。1992 年,浙江大学陈裕泉副教授以铌酸锂为基底,从理论上研究了延迟线型温度传感器实现的可能性,这为 SAW 温度传感器的研究提供了重要的理论支撑<sup>[9]</sup>。2014 年,华中科技大学吴展翔等通过在石英衬底上涂覆一层 ZnO 薄膜制作 SAW 温度传感器,得

到的传感器的温度灵敏度为 8.8 kHz/°C<sup>[10]</sup>。2015 年,R. G. Kryshtal 等以铌酸锂为基底,采用双输入双输出的方式得到谐振频率为 342 和 427 MHz 的 SAW 温度传感器,该传感器的灵敏度极限为 0.001 °C,具有较高的检测水平<sup>[11]</sup>。2014 年,Tang YL 等在室温下研究了用于氨检测的基于 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> 复合敏感膜的 SAW 传感器,发现 SiO<sub>2</sub> 的存在提高了氨检测的性能,显示出最佳的感测特性<sup>[12]</sup>。2016 年,Lyes Djoumi<sup>[13]</sup> 等以石英为基底制作了叉指宽度为 200 nm、谐振频率为 150 MHz 的延迟线型 SAW 传感器。Jennifer Brookes 等以石英为基底同时在传感器表面添加了金引导层,制作了叉指宽度为 2.5 μm、谐振频率为 250 MHz 的谐振型 SAW 传感器<sup>[14]</sup>。用于温度检测<sup>[15]</sup>的 SAW 传感器一般以铌酸锂<sup>[11]</sup>为基底,或者在不具有压电特性的基底(如硅、玻璃)上沉积一层压电薄膜<sup>[16]</sup>,但是铌酸锂相较于石英价格较贵,若要获得质量优良的压电薄膜,需要大型沉积设备且对工艺的要求也比较严格。

金属剥离是传感器制作中的关键步骤,而剥离法是一种牺牲光刻胶的图形化工艺。剥离工艺技术主要包括单层光刻胶和多层光刻胶剥离技术。其中,单层光刻胶剥离技术是指在压电基片表面涂敷一层光刻胶,经软烘焙、曝光、硬烘焙、显影形成掩膜图形。最终在不需要镀金属膜的地方留有光刻胶,然后用镀膜的方法在掩膜图形上镀一层金属薄膜,最后将有光刻胶存在的金属剥离<sup>[17]</sup>。多层光刻胶剥离技术常采用双层结构。而形成倒“八”形结构的关键在于顶层,这是因为顶层结构决定了最终制得的金属图形的尺寸。底层只是增加顶层与金属层的厚度差,这个厚度差

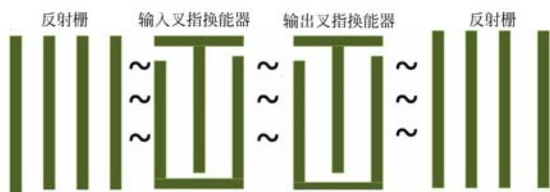
可以消除金属台阶覆盖,使剥离能够成功进行。因此,通过提高传感器的制作技术来提高传感器的性能从而扩大其应用范围具有十分重要的意义。

Parylene 是聚对二甲苯材料系列的统称,属于一种具有完全线形、高度结晶的高聚物,同时 parylene 还是一种新型的压电材料,因此,在石英晶体表面涂覆 parylene,又指换能器在双层压电材料表面激励的声波发生耦合,能够增强传感器的输出信号。用真空气相沉积工艺制备的 parylene 薄膜透明、无残余的热应力和机械应力、优异的电绝缘性、热稳定性好及化学惰性,常温下可抵抗任何强酸、强碱及溶剂的腐蚀。在 SAW 传感器的表面涂覆 parylene 可以起到防护传感器的作用。2012 年, Mao F 等<sup>[16]</sup>将 parylene 涂在热敏电阻表面以改善环境稳定性,在 20~55 °C 内热敏电阻具有良好的线性。2015 年, Wu HY 等<sup>[18]</sup>在 SAW 传感器表面涂覆 parylene,该传感器在腱干细胞监测中表现出高灵敏度和稳定性。因此,本文研究了以石英为基底、涂覆 parylene 的 SAW 传感器的性能。

## 2 工作原理

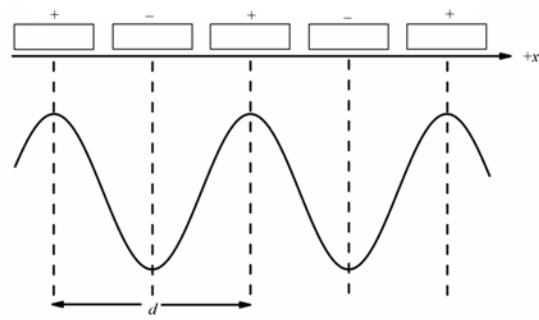
### 2.1 SAW 传感器的工作原理

图 1(a)中,“~”符号代表声表面波的传播。输入叉指换能器受到交变电信号激励,由于逆压电效应压电基底材料产生与交变信号同频率的声表面波,声表面波沿基底材料向两端传播,在反射栅内发生反射。同相位的反射波相叠加,声表面波的能量叠加到一定程度时,反射栅之间形成谐振腔,声表面波在谐振腔内发生谐振<sup>[19]</sup>。最后,通过输出叉指换能器将谐振频率信号输出。图 1(b)为声表面波的传播示意图,图中方框代表一个叉指电极,  $d$  代表一个波长。



(a)声表面波谐振器原理图

(a)Schematic diagram of SAW resonator



(b)声表面波传播示意图

(b)Schematic diagram of propagation of acoustic wave

图 1 声表面波谐振器原理图和波形传播图

Fig. 1 Schematic diagram of SAW resonator and propagation of acoustic wave

### 2.2 SAW 传感器的温度测量原理

当激励出的声表面波的中心频率与两端对声表面波谐振器的中心频率达到一致时,声表面波在谐振腔内形成谐振。声表面波的频率与叉指间的距离和波速有关,当温度、压力等外界因素发生变化时,声表面波的谐振频率也会发生变化。

传感器的谐振频率  $f$  与声波速度  $v$  之间的关系如下<sup>[20]</sup>:

$$df = N_s(dv - dL), \quad (1)$$

其中,  $v$  和  $L$  都容易受温度的影响,不过温度对  $L$  的影响远小于对  $v$  的影响,因此  $L$  可以忽略不计。 $v$  的级数展开式为:

$$v(T) = v(T_0) \left[ 1 + \sum_n \frac{1}{n!} \frac{(T - T_0)^n}{v(T_0)} \frac{\partial^n L}{\partial T^n} \right] = v(T_0) + \frac{1}{n!} T_v^{(n)} (T - T_0)^n, \quad (2)$$

式中  $T_v^{(n)}$  代表  $v$  的第  $n$  阶温度系数。对于特定晶体,可以选择性选取晶体的切向和波的传播方向,从而使  $T_v^{(n)} = 0, (n=2, 3, \dots)$ , 因此,由温度与速度的关系得到温度与频率的关系如下:

$$f_s - f = k_T (T - T_0). \quad (3)$$

由式(3)可知,SAW 传感器的谐振频率与温度呈线性关系。

### 2.3 Parylene 提高温度灵敏度原理

Parylene 在 SAW 表面形成致密、平整的膜结构,减少了激励能量的损耗。Parylene 是一种聚合物材料,当环境温度发生变化时,聚合物受热膨胀,因此在石英晶体表面涂覆 parylene 之后可以有效地提高传感器的温度灵敏度。

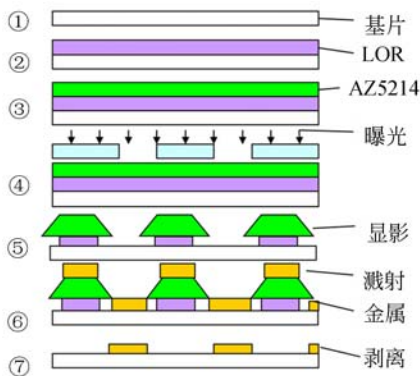
### 3 器件制作

#### 3.1 光刻

光刻是制备叉指换能器的重要步骤。目前,主要的光刻方法有电子束扫描、接触式光刻、投影式光刻、接近式光刻等。其中,电子束扫描法产率低、成本昂贵;接触式光刻容易损坏掩模版并且还容易形成缺陷;接近式光刻虽然受衍射效应影响,分辨率会下降,但是经过光刻胶处理工艺、调整波长或间隙等方法仍可以实现类似于投影式光刻的较小的线条尺寸。光学光刻的主要流程有<sup>[19]</sup>:(1)表面准备;(2)涂敷光刻胶;(3)软烘培;(4)曝光;(5)显影;(6)硬烘焙;(7)显影检验;(8)刻蚀;(9)去除光刻胶;(10)最终目检。

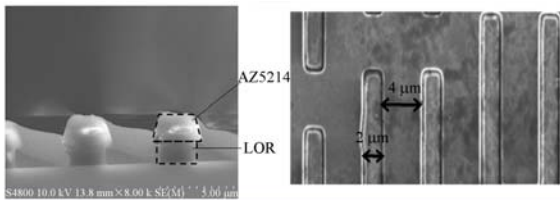
#### 3.2 梯形结构的实现

LOR 剥离胶对紫外线不敏感,光刻曝光对其在显影液中的溶解速率没有影响;但烘焙温度和时间对它有影响,因此,通过调整烘焙温度和时间来控制 LOR 剥离胶在显影液中的溶解速率。



(a) LOR 和 AZ5214 双层胶光刻剥离工艺图

(a) LOR and AZ214 double layer lithography lift-off process



(b) LOR 和 AZ5214 倒梯形 SEM 图 (c) 叉指换能器 SEM 图  
(b) SEM image of inverted trapezoidal of LOR and AZ5214 (c) SEM image of IDT

图 2 叉指电极制作

Fig. 2 Fabrication of Interdigital Transducer(IDT)

AZ5214 光刻胶作为正型光刻胶使用,曝光后,处于曝光区域的光刻胶比未曝光的区域显影速度快。因此,先旋涂 LOR 剥离胶,再旋涂 AZ5214 光刻胶,调整 AZ5214 光刻胶的显影速率,以实现 LOR 剥离胶的侧蚀,最终实现梯形结构。其原理如图 2(a)所示,图 2(b)是 LOR 剥离胶和 AZ5214 光刻胶光刻显影后的 SEM 结构剖面图,虚线框标示出的整体结构呈梯形,图 2(c)是金属剥离后的叉指图形。

#### 3.3 SAW 传感器的制作

SAW 传感器的外形尺寸长度为 6 mm,宽度为 2 mm,其基本几何参数如表 1 所示。

表 1 SAW 传感器的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of SAW sensor

参数	值
波长/ $\mu\text{m}$	12
叉指宽度/ $\mu\text{m}$	2
反射栅宽度/ $\mu\text{m}$	2
声孔径/ $\mu\text{m}$	1680
叉指间距/ $\mu\text{m}$	4
叉指对数/对	200
反射栅数量	100
输入输出叉指间距/ $\mu\text{m}$	225
反射栅与叉指间距/ $\mu\text{m}$	200

传感器以 ST 切型石英为基底,Al 为金属电极。接近式光学光刻方法实现  $2\ \mu\text{m}$  超细叉指电极,从而可以在有效地面积上实现更多的叉指电极和声反射栅的制作,进一步提高了传感器的谐振频率。制作完成的传感器结构如图 3(a)所示,该传感器的制作采用 MEMS 工艺,工艺流程为:基片-清洗-光刻-镀膜-剥离-划片-在线检测-涂覆 parylene-粘片-引线-检测。金属叉指宽度仅为  $2\ \mu\text{m}$ ,不仅实现了传感器的微型化,还实现了批量化生产,进一步降低了传感器的成本。封装后的传感器如图 3(b)所示。

#### 3.4 Parylene 镀膜工艺

Parylene 镀膜设备如图 4 所示。基本工艺为:首先在腔室中和冷头上均匀涂抹脱模剂,打开制冷机,使冷头降温,随后投料,关闭各个通气口;打开真空泵,待压强示数达到  $533.288\ \text{Pa}$ (4 torr) 时开始蒸镀,parylene 膜蒸镀在 SAW 表面形成过程经由投料室中真空  $120\ ^\circ\text{C}$  条件下将固态原料



(a) SAW 传感器阵列 (b) 封装后的 SAW 传感器  
(a) Arrays of SAW sensors (b) Packaged SAW sensors

图 3 SAW 传感器阵列和封装图

Fig. 3 Arrays and package of SAW sensors

升华为气态,由固体颗粒单体生成气态二聚体;通气管道中 650 °C 条件下将气态原料裂解成具有反应活性的单体进入反应腔室;气态单体在室温条件下沉积并聚合在传感器表面形成致密的多聚体膜结构,为保证成膜均一、致密性良好,反应完全后在反应腔中静置 1 h,然后再取出修饰后的 SAW 传感器。



图 4 Parylene 镀膜设备

Fig. 4 Photo of parylene coating instrument

## 4 实验测量和结果讨论

### 4.1 SAW 传感器的响应测试

将 SAW 传感器放置在空气中,用网络分析仪测量室温下传感器的频率响应,如图 5 所示。其中,未增强型 SAW 传感器的谐振频率为 249.077 953 MHz, Q 值为 3 072, Q 值是通过计

算最高峰对应的中心频率除以频率幅值下降 3 dB 对应的频率带宽得到的, parylene 增强型 SAW 传感器的谐振频率为 249.197 209 MHz, Q 值为 3 139, Q 值提高了 67,谐振频率变小了。这是因为涂覆 parylene 之后引起基底表面发生变化,引起声表面波的波速发生变化,进而引起谐振频率的变化。相比未增强型 SAW 传感器, parylene 增强型 SAW 传感器的信号响应幅值提高了 1.66 dB。这是因为 Parylene-C 是一种新型的压电材料,在 SAW 表面形成致密、平整的膜结构减少了激励能量的损耗,同时,叉指换能器在 parylene 表面激励产生的剪切波和在石英基底产生的表面波耦合,从而使传感器的有效信号叠加增强。文献[14]中 IDT 的宽度为 2.5  $\mu\text{m}$ ,通过在石英表面添加金引导层使 SAW 传感器的谐振频率提高到 250 MHz;而文献[13]中采用延迟线结构 SAW 传感器,虽然 IDT 的线宽已经减小到 200 nm,但是传感器的谐振频率只有 150 MHz。器件的线性通过率如图 6 所示,涂 parylene 之后

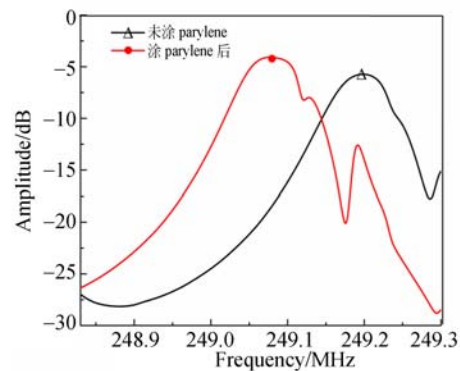


图 5 SAW 传感器的频率响应

Fig. 5 Frequency response of SAW sensor

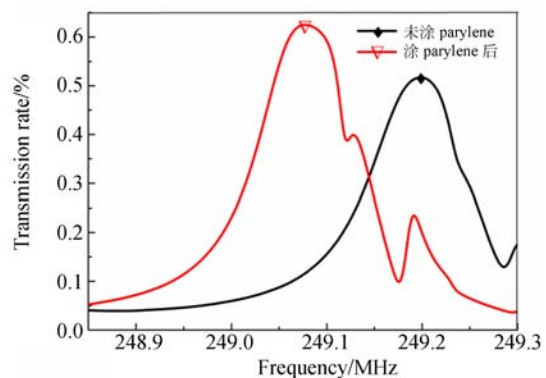


图 6 SAW 传感器的线性通过率

Fig. 6 Transmission rate of SAW sensor

传感器在谐振频率处的线性通过率明显提高。可见, parylene 增强型 SAW 传感器在性能上优于未增强的 SAW 传感器。

### 4.2 测量装置

测量装置如图 7 所示,将 SAW 传感器放在烘箱的中心,并且保持悬空,以防止烘箱的箱体对传感器的测试产生影响。传感器通过外接数据线与网络分析仪连接,网络分析仪与计算机连接,计算机采集各温度下网络分析仪测出的 SAW 传感器的数据信息。

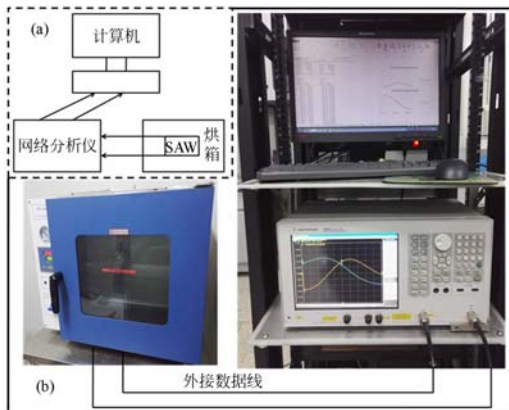


图 7 SAW 传感器的实验测量装置

Fig.7 Experimental setup of SAW sensor

### 4.3 未增强型 SAW 传感器实验结果

在 2.2 的分析中,在忽略温度对 L 的影响并选择合适切型的晶体材料的情况下,谐振频率与温度呈线性关系。图 8 是谐振频率与振幅的关系,随着温度的变化,幅值不变,大小为 -4.2 dB。网络分析仪采集了未镀 parylene 时 30~130 °C 传感器的数据信息。由图可以看出,随着温度的

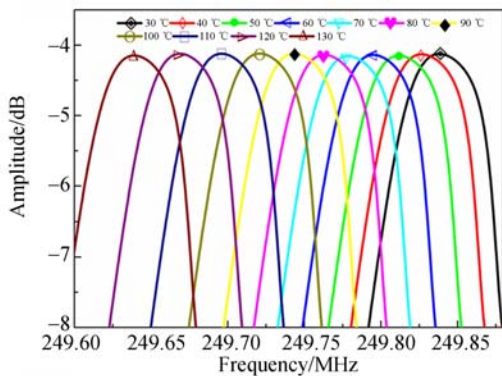


图 8 未镀 parylene 时谐振频率与振幅关系

Fig.8 Relationship between resonant frequency and amplitude of unenhanced SAW sensor

升高,传感器的谐振频率减小。

谐振频率与温度的关系如图 9 所示,与理论分析相符,此时线性相关系数为 0.979 18,温度灵敏度为 2.048 kHz/°C,两者线性度较差,其关系式为:

$$f = -0.00201T + 249.91361 \quad (4)$$

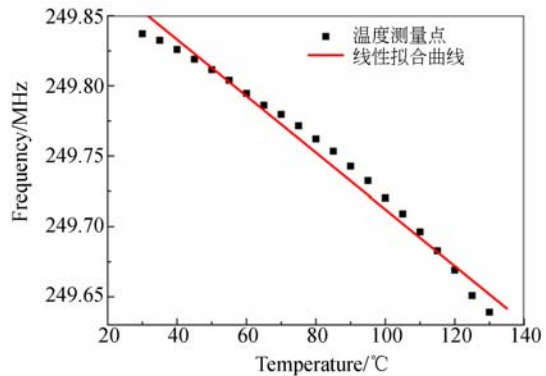


图 9 未镀 parylene 时谐振频率与温度的关系

Fig.9 Relationship between resonant frequency and temperature of unenhanced SAW sensor

### 4.4 Parylene 增强型 SAW 传感器实验结果

石英晶体的温度灵敏度不高,机电耦合系数比较低,在传感器表面涂覆 parylene 聚合物以提高传感器的温度灵敏度。图 10 是 parylene 增强型 SAW 传感器的谐振频率与振幅的关系,实验采集了 30~140 °C 的传感器的数据信息,此时谐振频率的变化与未涂 parylene 时相同,幅值为 -5.86 dB,比未镀 parylene 时谐振频率振幅提高了 1.66 dB。

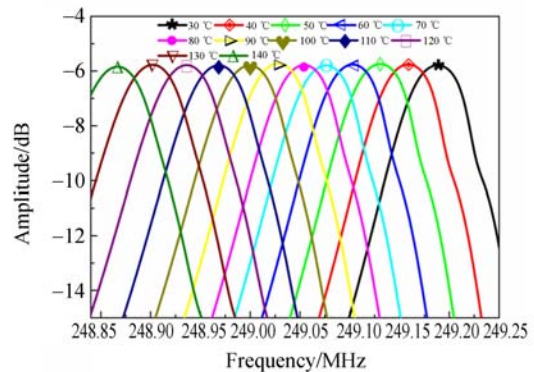


图 10 Parylene 增强型 SAW 传感器谐振频率与振幅关系

Fig.10 Relationship between resonant frequency and amplitude of parylene-enhanced SAW sensor

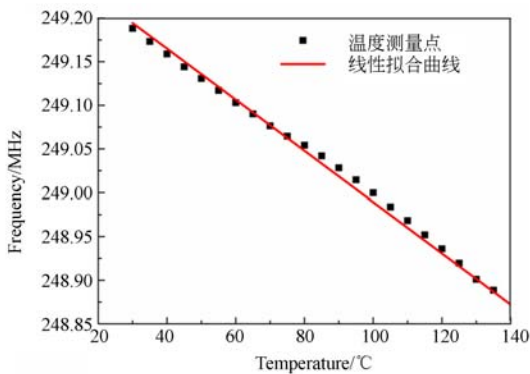


图 11 Parylene 增强型 SAW 传感器谐振频率与温度的关系

Fig. 11 Relationship between resonant frequency and temperature of parylene-enhanced SAW sensor

Parylene 增强型 SAW 传感器的谐振频率与温度的关系如图 11 所示。此时线性相关系数达到 0.996 15,比未涂 parylene 提高了 0.016 97,温度灵敏度为 2.855 kHz/°C,其线性关系为:

$$f = -0.002\ 93T + 249.282\ 24. \quad (5)$$

#### 参考文献:

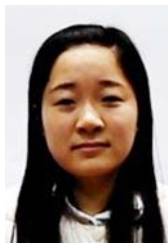
- [1] 孔慧,李传宇,周连群,等.薄膜谐振 Lamb 波传感器测量液体流速矢量的方法[J].光学精密工程,2017,25(1):155-162.  
KONG H, LI CH Y, ZHOU L Q, et al.. A method for fluid velocity vector measurement using thin film Lamb wave resonator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 155-162. (in Chinese)
- [2] DEVKOTA J, OHODNICKI P R, GREVE D W. SAW sensors for chemical vapors and gases [J]. *Sensors*, 2017, 17(4): 801.
- [3] FU Y Q, LUO J K, DU X Y, et al.. Recent developments on ZnO films for acoustic wave based bio-sensing and microfluidic applications: a review [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 143(2): 606-619.
- [4] FU Y Q, GARCIA-GANCEDO L, PANG H F, et al.. Microfluidics based on ZnO/nanocrystalline diamond surface acoustic wave devices [J]. *Biomicrofluidics*, 2012, 6(2): 024105.
- [5] LUO J K, FU Y Q, ASHLEY G, et al.. Integrated ZnO film based acoustic wave microfluidics and biosensors [J]. *Advances in Science and Technology*, 2011, 67: 49-58.
- [6] 张静端.一种用于图书档案库的小波加权式声表面波温度传感器的关键问题研究 [J].电子学报,2016,44(5):1162-1167.  
ZHANG J D. Study of a wavelet weighting surface acoustic wave temperature sensor applied in library and archives [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2016, 44(5): 1162-1167. (in Chinese)
- [7] 李聪明,罗怡,周传鹏,等.微热管红外测温系统的设计 [J].光学精密工程,2016,34(10):2449-2455.  
LI C M, LUO Y, ZHOU CH P, et al.. Design of infrared temperature measurement system for micro heat pipe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 34(10): 2449-2455. (in Chinese)
- [8] 林卓彬.声表面波温度传感器特性研究 [D].长春:吉林大学,2010.  
LIN ZH B. *Research of Characteristics on Surface Acoustic Wave Temperature Sensor* [D]. Changchun: Jilin University, 2010. (in Chinese)
- [9] 陈裕泉.SAW 温度传感器的设计和研制 [J].仪表技术与传感器,1992(2):13-15.

## 5 结 论

本文首先根据 MEMS 器件制作中金属剥离工艺快速、高质量剥离的要求,提出利用 LOR 剥离胶和 AZ5214 光刻胶双层胶剥离的方法实现易于金属剥离的梯形结构,在传统光学光刻条件下实现 2  $\mu\text{m}$  的超细叉指电极的制作,然后,制作出 SAW 传感器,谐振频率达到 249.077 953 MHz;最后,对 parylene 增强型和未增强型 SAW 传感器进行了温度实验。未涂覆 parylene 时,传感器的线性相关度为 0.979 18,谐振频率振幅为 -4.2 dB,温度灵敏度为 2.048 kHz/°C;涂覆 parylene 之后,传感器的线性相关度为 0.996 15,比未涂 parylene 提高 0.016 97,谐振频率振幅为 -5.86 dB,比未涂时提高 1.66 dB,温度灵敏度为 2.855 kHz/°C,比未涂时提高 0.807 kHz/°C。传感器的制作采用石英为基底,MEMS 工艺制作以及 parylene 镀膜保护,不仅实现了低成本,而且在提高器件性能的同时对器件进行了有效保护。

- CHEN Y Q. Investigation and design of SAW temperature sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1992(2): 13-15. (in Chinese)
- [10] 吴展翔, 刘文, 卢小荣. 声表面波温度传感器的仿真与设计[J]. *压电与声光*, 2014, 36(1): 8-11.
- WU ZH X, LIU W, LU X R. Simulation and design of SAW temperature sensor[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2014, 36(1): 8-11. (in Chinese)
- [11] KRYSH TAL R G, KUNDIN A P, MEDVED A V. Devices based on surface acoustic waves for temperature sensors[J]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, 62(3): 282-288.
- [12] TANG Y L, LI ZH J, MA J Y, *et al.*. Highly sensitive room-temperature surface acoustic wave (SAW) ammonia sensors based on  $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2$  composite films[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 280: 127-133.
- [13] DJOUMI L, BLONDEAU-PATISSIER V, VANOTTI M, *et al.*. Surface acoustic wave sensors for PM2.5 and PM10 concentration[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 168: 696-699.
- [14] BROOKES J, BUFACCHI R, KONDOH J, *et al.*. Determining biosensing modes in SH-SAW device using 3D finite element analysis[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 234: 412-419.
- [15] 周剑, 何兴理, 金浩, 等. 基于 ZnO 压电薄膜的柔性声表面波器件[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 346-350.
- ZHOU J, HE X L, JIN H, *et al.*. Flexible ZnO thin film SAW device on polyimide substrate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 346-350. (in Chinese)
- [16] MAO F, LINDEBERG M, HJORT K, *et al.*. A polymer foil non-contact IR temperature sensor with a thermoresistor integrated on the back of a vertically configured thermopile[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 179: 56-61.
- [17] 陈德鹤, 吴志明, 李伟, 等. 图形反转工艺用于金属层剥离的研究[J]. *半导体技术*, 2009, 34(6): 535-538.
- CHEN D E, WU ZH M, LI W, *et al.*. Image reverse technique for research of metal lift-off[J]. *Semiconductor Technology*, 2009, 34(6): 535-538. (in Chinese)
- [18] WU H Y, ZU H F, WANG Q M, *et al.*. Monitoring the adhesion process of tendon stem cells using shear-horizontal surface acoustic wave sensors [C]. *2015 Joint Conference of the IEEE Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, IEEE*, 2015: 310-315.
- [19] 潘峰. 声表面波材料与器件[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- PAN F. *Surface Acoustic Wave Materials and Devices*[M]. Beijing: Science Press, 2012 (in Chinese)
- [20] 田爽, 郝淑娟, 赵军发, 等. 带有温度检测的声表面波气体传感器[J]. *南开大学学报: 自然科学版*, 2011, 44(2): 27-31.
- TIAN SH, HAO SH J, ZHAO J F, *et al.*. The surface acoustic wave gas sensor with temperature detection[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis: Science and Technology*, 2011, 44(2): 27-31. (in Chinese)

## 作者简介:



李 敬(1989—),女,山东济宁人,2015年于山东中医药大学获得学士学位,主要从事 Lamb 波传感器和声晶体的设计、制作及其应用的研究。E-mail: 840761010@qq.com

## 导师简介:



周连群(1981—),男,山东金乡人,博士,研究员,博士生导师,主要从事微纳生物传感器及系统的研究。E-mail: zhoulq@sibet.ac.cn