

涂覆聚合物膜的 Love 波传播特性

王立君, 刘建生, 何世堂

(中国科学院 声学研究所, 北京 100190)

摘要:该文计算了涂覆聚合物膜的 Love 波传感器波速和波导层相对膜厚的关系, 并进行了实验验证。Love 波器件以 ST-90°X 石英晶体为基片, 在基片表面镀一层不同膜厚的聚乙烯醇(PVA)膜作为波导层兼吸湿层。采用网络分析仪测量了相对湿度 35% 左右器件的工作频率和插入损耗分别随膜厚的变化, 算出 Love 波波速和 PVA 相对膜厚的关系, 当 PVA 膜厚度从 0 增大到波长的 5% 时, Love 波速度由约 4 992 m/s 降低到 4 840 m/s, 和理论计算结果一致。

关键词:声表面波; Love 波; 聚乙烯醇; 聚合物膜; 传感器

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Propagation Properties of Love Waves in Polymer-Coated Devices

WANG Lijun, LIU Jiansheng, HE Shitang

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the relationship between Love wave velocity and the polymer film thickness was studied by combination of test and numerical calculation. The Love wave device consists of two interdigital transducers (IDTs), an ST-90°X quartz substrate, and a polyvinyl alcohol (PVA) layer. A network analyzer was used to measure the operation frequency and insertion loss of the sensor along with the change of film thickness at the relative humidity of 35%. Based on the experimental data, the relationship between Love wave velocity and the polymer film thickness was calculated and the propagation characteristic of Love wave was verified. When PVS film thickness was increased from 0 to 5% of the wavelength, the Love wave velocity decreased from ~4 992 m/s to 4 840 m/s, which is consistent with the calculated results.

Key words: surface acoustic wave; Love wave; PVA; polymer film; sensor

0 引言

声表面波(SAW)传感器^[1-3]的检测范围宽、灵敏度高,同时具有高频化、微型化、智能化等特点,因此广泛应用于粮食贮存与加工、气象预报、医药卫生的各个领域。

Rayleigh 型 SAW 中质点在垂直表面方向上的运动导致其在液相检测时能量损耗严重,因此在液相检测领域受到限制。水平剪切波模式只存在平行于器件表面方向的质点位移,在液相介质中工作时不会向液体中耦合造成能量损耗,因此可用于液相检测^[4-6]。除剪切波外, Lamb 波也适合液相检测,且理论灵敏度比 Love 波高^[5]。但是, Lamb 波传

器制作工艺复杂,若要得到高灵敏度就要降低膜厚,这样耐用性要降低。Love 波是众多剪切波模式中灵敏度最高的波型^[5]。Love 波基片和叉指换能器(IDT)上面存在一层波导,Love 波的能量积聚在波导和基片表面,具有更高的灵敏度,同时波导可降低对金属 IDT 的腐蚀。

常采用横波速度较低的聚合物制作波导,从而获得更大的灵敏度。本文以制作在 ST-90°X 石英基片上的 Love 波器件为基础,在其表面镀一层不同膜厚的聚乙烯醇(PVA)膜作为波导层,数值计算了 Love 波传感器相速度和波导层相对膜厚的关系,并进行了实验验证。详细阐述了 PVA 溶液的

收稿日期:2015-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11104314)

作者简介:王立君(1990-),女,山东聊城人,硕士生,主要从事声学微传感系统的研究。刘建生(1979-),男,副研究员,主要从事 Love 波、SAW 的传播理论及其在传感器、滤波器等领域的应用研究。

配制以及 PVA 薄膜的涂覆过程。采用网络分析仪测量了相对湿度 35% 左右, 室温下的器件工作频率和插入损耗随膜厚的变化。本文分析、验证了 Love 波的传播特性, 为开展相关传感器研究奠定了基础。

1 Love 波器件和数值计算

1.1 Love 波器件

Love 波器件由 ST-90° X 石英基片、激发和接收 IDT、PVA 覆盖层组成, 如图 1 所示。

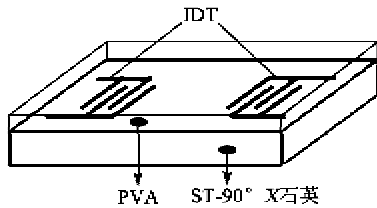


图 1 Love 波器件的结构

IDT 的结构参数如下: 声孔径为 $\varnothing 2\text{ mm}$; 叉指周期是 $28\ \mu\text{m}$, 每个叉指换能器 72 个周期; 两换能器中心距离为 4 mm ; 采用铝电极, 电极厚度为 200 nm 。工作频率约为 178 MHz 。采用旋涂法在 Love 波传播途径上涂覆一层不同厚度的 PVA 薄膜。

1.2 数值计算

Love 波是频散的。基于层状介质中声波传播理论模型得出的频散方程^[7-10]为

$$\mu_{L1}\beta_{L1}\tan(k\beta_{L1}h_1) = \frac{(D_2 - \overline{\epsilon_{L1}})T_1 - (D_1 - \overline{\epsilon_{L1}})T_2}{(D_2 - \overline{\epsilon_{L1}})A_1 - (D_1 - \overline{\epsilon_{L1}})A_2} \quad (1)$$

其中,

$$\overline{\epsilon_{L1}} = \epsilon_{L1} \frac{\epsilon_{L1} \tanh(kh_1) + \epsilon_0}{\epsilon_{L1} + \epsilon_0 \tanh(kh_1)} \quad (2)$$

$$\begin{cases} A_1 = \frac{U}{\Phi} \Big|_{\beta_1} = \frac{\epsilon_{33}\beta_1^2 - 2i\epsilon_{13}\beta_1 - \epsilon_{11}}{e_{34}\beta_1^2 - i(e_{14} + e_{36})\beta_1 - e_{16}} \\ A_2 = \frac{U}{\Phi} \Big|_{\beta_2} = \frac{\epsilon_{33}\beta_2^2 - 2i\epsilon_{13}\beta_2 - \epsilon_{11}}{e_{34}\beta_2^2 - i(e_{14} + e_{36})\beta_2 - e_{16}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} D_1 = (e_{34}\beta_1 - ie_{36})A_1 - (\epsilon_{33}\beta_1 - ie_{31}) \\ D_2 = (e_{34}\beta_2 - ie_{36})A_2 - (\epsilon_{33}\beta_2 - ie_{31}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_1 = (c_{44}\beta_1 - ic_{46})A_1 + (e_{34}\beta_1 - ie_{14}) \\ T_2 = (c_{44}\beta_2 - ic_{46})A_2 + (e_{34}\beta_2 - ie_{14}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: c 为弹性常数矩阵; e 为压电应力系数矩阵; ϵ 为介电常数矩阵; h_1 为波导层厚度; $\beta_{L1} = \sqrt{v^2/v_{L1}^2 - 1}$; $v_{L1} = \sqrt{\mu_{L1}/\rho_{L1}}$ 为波导层的横波速度。

根据频散方程可计算得出 Love 波传感器相速度和波导层相对膜厚的关系, 如图 2 所示。

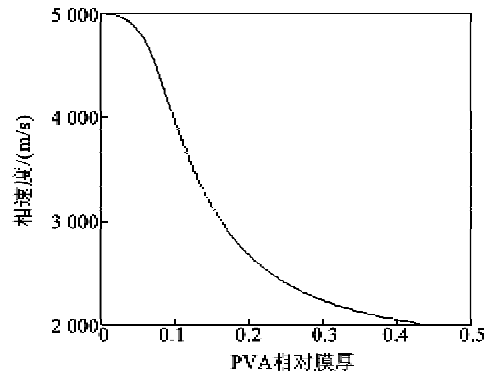


图 2 数值计算结果

2 实验

2.1 仪器和材料

采用 Agilent E5071C 型网络分析仪测量和记录 Love 波器件的频率和损耗。

美国 OMEGA RH32B-C2 型参考温湿度计的测量范围为 $0 \sim 100\% \text{ RH}$; 测量精度为 $\pm 2\% \text{ RH}$ ($0 \sim 90\% \text{ RH}, 25\text{ }^\circ\text{C}$)。

其他设备和材料: 磁力加热搅拌器; 旋涂机; Alpha-Step IQ 表面分析仪; PVA 絮状固体 (平均聚合度为 $(1\ 750 \pm 50)$) 由北京益利精细化学品公司提供; 去离子水; 密封盒; 变色硅胶干燥剂等。

2.2 PVA 膜的制作^[11-14]

PVA 是一种常用的吸湿性聚合物, 其具有大量亲水性羟基 ($-\text{OH}$), 可与空气中的水分子形成氢键从而吸附空气中的水分。

配制 PVA 溶液的步骤如下: 首先, 称量 30 g PVA 絮状固体, 量取 600 mL 去离子水。用玻璃棒搅拌的同时, 将 PVA 絮状固体缓缓加入到 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 左右去离子水中润湿; 然后, 用磁力加热搅拌器边加热边搅拌使其慢慢浸润, 具体加热搅拌方法为: 开始温度控制在 $60\text{ }^\circ\text{C}$, 搅拌约 40 min 后使温度缓缓上升, 到 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 左右持续搅拌约 50 min , 直到溶液不再含有微小颗粒并成粘稠状为止, 最后冷却 3 h 。

PVA 涂膜: 采用旋涂法, 将配好的 PVA 溶液用带刻度的胶头滴管滴 5 mL 在制作有 IDT 的石英晶片上, 进行甩胶, 调整转速和时间, 可通过控制旋涂转速和旋涂时间来得到不同的 PVA 膜厚度。然后将旋涂好的器件放在加热板上, 控制温度在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 持续 30 min 进行敏感膜的固化。采用 Alpha-Step IQ 表面分析仪测得 PVA 膜的厚度。

PVA 厚度和旋涂转速之间的关系如图 3 所示, 旋涂时间均设为 50 s 。由图可看出, 旋涂时间均相同的情况下, PVA 膜厚度和旋涂转速之间成反比关

系。转速越快膜越薄,反之亦然。

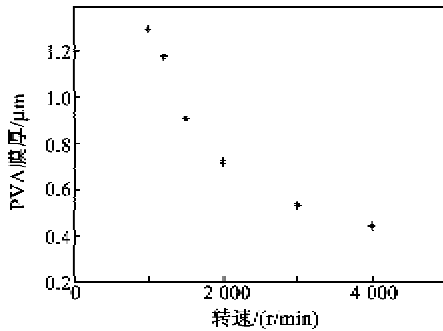


图 3 PVA 厚度和转速的关系

2.3 搭建实验平台

将镀膜后的晶片分割、封装后焊接在测试用 PCB 上。之后将 PCB 置入一密闭封装盒内,用 SMA 接头使之与网络分析仪(Agilent E5071C)连接。如图 4 所示。实验中用投入吸湿硅胶颗粒来降低测试盒中的湿度,投入湿海绵来增加测试盒中的湿度。通过控制盒子中的相对湿度,用网络分析仪测量出相对湿度 35%左右不同膜厚器件的频率和损耗。

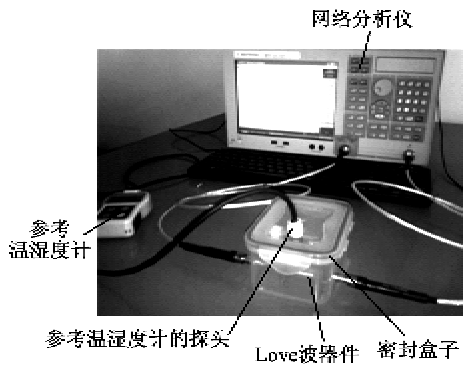


图 4 Love 波传感器实验示意图

3 实验结果及分析

首先测得 PVA 厚度为 0.23 μm 的 Love 波器件的响应如图 5 所示。由图可见,工作频率约为 178 MHz,其插入损耗为 10.7 dB,阻带抑制约 17 dB。

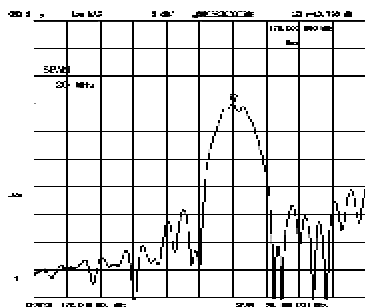


图 5 Love 波器件的频率特性

表 1 为涂覆不同 PVA 膜厚器件的频率测量值。由表可看出,室温相同湿度条件下,涂膜会导致器件的频率下降,随着涂膜厚度不断增加,器件频率下降越来越快。这是因为涂膜直接增加了 Love 波器件的质量,必然引起频率下降。频降程度与涂膜厚度或密度成正比。即涂膜厚度越厚,引起频降越大,反之亦然;涂膜密度越高,引起频降越大,反之亦然。

表 1 不同膜厚器件的频率(26 $^{\circ}\text{C}$, RH \approx 35%)

PVA 厚度/ μm	PVA 相对膜厚/%	最低损耗点频率/MHz
0.01	0.035	178.290 000
0.23	0.820	178.025 000
0.44	1.570	177.917 125
0.53	1.890	177.614 583
0.72	2.570	177.235 416
0.91	3.230	176.545 000
1.18	4.210	175.462 500
1.30	4.640	174.431 250

Love 波波速和 PVA 相对膜厚的关系如图 6 所示。由图可见,在较低膜厚情况下,膜厚越厚,器件的最低损耗点频率越低,Love 波的相速度越低。随着膜厚的增加,Love 波的相速度下降得也越来越快。没有涂覆 PVA 的器件,Love 波的相速度约为 4 992 m/s。涂覆 PVA 相对膜厚约 2.5%时,Love 波的相速度下降到 4 960 m/s。

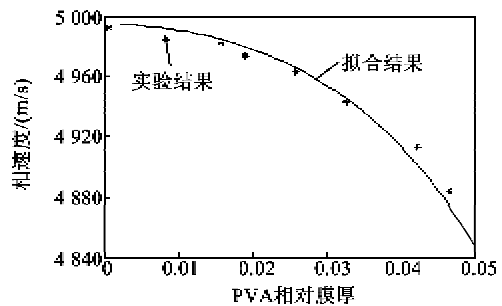


图 6 Love 波波速和 PVA 相对膜厚的关系

表 2 为涂覆不同 PVA 膜厚器件的损耗测量值。由表可见,室温相同湿度条件下器件损耗随着 PVA 膜厚的不同而变化。膜厚为 0.44~0.72 μm 的器件损耗最小,约为 7 dB, PVA 膜厚为 0.53 μm 后,器件损耗会随膜厚的增加而不断增加。这是因为 Love 波传感器聚合物波导层虽然具有体切变波速小,质量灵敏度高的优点,但聚合物波导层的粘弹性会使传感器的损耗随着镀膜厚度的增加而增加。

表2 不同膜厚器件的损耗(26 °C, RH≈35%)

PVA 厚度/ μm	PVA 相对膜厚/%	损耗/dB
0.01	0.035	26.70
0.23	0.820	10.72
0.44	1.570	7.96
0.53	1.890	6.70
0.72	2.570	7.01
1.30	4.640	9.87

4 结束语

以吸湿性聚合物 PVA 为波导层兼敏感膜,对以 ST-90°X 石英晶体为基片的 Love 波传感器波速和聚合物相对膜厚的关系进行了数值计算和实验验证。采用网络分析仪测量了相对湿度 35% 左右器件的工作频率和插入损耗分别随膜厚的变化。随着 PVA 膜厚的增加,器件工作频率逐渐降低,相应的 Love 波相速度随之降低,当 PVA 厚度增大到波长的 5% 时,Love 波速度降低到约 4 840 m/s。Love 波器件的损耗随 PVA 膜的增厚先减小后增大,PVA 膜厚度约 0.53 μm (约 1.9% 波长) 时器件损耗最低约为 6.7 dB。

参考文献:

- [1] BUVAILO A, XING Y, HINES J, et al. Thin polymer film based rapid surface acoustic wave humidity sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 156(1): 444-449.
- [2] LEI S, DENG C, CHEN Y, et al. A novel serial high frequency surface acoustic wave humidity sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167(2): 231-236.
- [3] HONG H S, CHUNG G S. Surface acoustic wave humidity sensor based on polycrystalline AlN thin film coated with Sol-Gel derived nanocrystalline zinc oxide film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 148(2): 347-352.
- [4] 胡友旺, 史建亮, 贾宏光, 等. Love 波传感器及其质量灵敏度测试[J]. *传感技术学报*, 2008(5): 2126-2129.
HU Youwang, SHI Jianliang, JIA Hongguang, et al. Love wave sensor and the measurement of mass sensitivity[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008(5): 2126-2129.
- [5] 苗圃, 李锋, 张平, 等. Love 波传感器的性能分析与实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2457-2463.
MIAO Pu, LI Feng, ZHANG Ping, et al. Performance analysis and experiment of the Love wave sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2457-2463.
- [6] 李正刚, 苗圃, 李锋, 等. Love 波传感器的分析与测试[J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(9): 143-145.
LI Zhenggang, MIAO Pu, LI Feng, et al. Analysis and measurement of Love wave sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(9): 143-145.
- [7] LIU J, HE S. Properties of Love waves in layered piezoelectric structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(2): 169-174.
- [8] LIU J, HE S. Theoretical analysis on Love waves in a layered structure with a piezoelectric substrate and multiple elastic layers[J]. *J Appl Phys*, 2010, 107(7): 73511.
- [9] LIU J. A theoretical study on Love wave sensors in a structure with multiple viscoelastic layers on a piezoelectric substrate[J]. *Smart Materials and Structures*, 2014, 23(7): 75015.
- [10] LIU J, LU Y. Response mechanism for surface acoustic wave gas sensors based on surface-adsorption[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 6844-6853.
- [11] LIU J, WANG L, LU Y, et al. Properties of Love waves in a piezoelectric layered structure with a viscoelastic guiding layer[J]. *Smart Materials and Structures*, 2013, 22(12): 125034.
- [12] LIU J, WANG L. Dynamics and response of a humidity sensor based on a Love wave device incorporating a polymeric layer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 204: 50-56.
- [13] WANG L, LIU J, HE S. Humidity sensing by Love wave detectors coated with different polymeric films [C]//Beijing: *Proceedings of 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, 2014.
- [14] RIMEIKA R, ČIPLYS D, PODERYYS V, et al. Fast-response surface acoustic wave humidity sensor based on hematoporphyrin film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 137(2): 592-596.