

文章编号 1004-924X(2016)06-1328-07

柔性声表面波器件的波模式分析

周 剑¹, 吴学忠^{1*}, 肖定邦¹, 何兴理², 金 浩³, 董树荣³, 张伟策⁴

(1. 国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073;

2. 福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350108;

3. 浙江大学 信息与电子工程学院, 浙江 杭州 310027; 4. 南昌陆军学院, 江西 南昌 330100)

摘要:用反应磁控溅射法在柔性聚酰亚胺衬底上沉积了 ZnO 压电薄膜, 并制备了基于 ZnO 压电薄膜的柔性声表面波 (SAW) 器件。制备的柔性 SAW 器件显示了良好的谐振性能, 而且展现出两个波模式: 模式 0 和模式 1。当波长为 32 μm , ZnO 厚度为 4 μm 时, SAW 器件的模式 0 和模式 1 的谐振频率分别为 34.4 MHz 和 158.5 MHz, 对应声速为 1 100.8 m/s 和 5 072 m/s。模式 0 为已知的瑞利波, 模式 1 为新的高频模式。沉积了不同厚度的 ZnO 薄膜制备柔性 SAW 器件, 进一步分析了薄膜厚度对 SAW 器件和模式 1 的影响。分析认为该高频模式不是传统硬质衬底上 SAW 器件产生的 Sezawa 波, 而是 S_0 兰姆波, 并且是有衬底情况下的 S_0 兰姆波。文中还采用 Comsol 仿真分析了新的高频模式 1 的粒子振动位移, 结果和 S_0 兰姆波粒子振动位移一致, 从而验证了其作为广义兰姆波的正确性。

关键词:声表面波器件; 柔性衬底; 聚酰亚胺衬底; 压电薄膜; 波模式; S_0 兰姆波

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1328

Analysis on wave mode of flexible surface acoustic wave devices

ZHOU Jian¹, WU Xue-zhong^{1*}, XIAO Ding-bang¹, HE Xing-li²,
JIN Hao³, DONG Shu-rong³, ZHANG Wei-ce⁴

(1. College of Mechatronic Engineering & Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Information Science & Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China;

3. College of Information Science & Electron Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Nanchang Military Academy, Nanchang 330100, China)

* Corresponding author, E-mail: xzwwu@nudt.edu.cn

Abstract: ZnO piezoelectric films were deposited on polyimide substrates by reactive magnetron sputtering method, and flexible Surface Acoustic Wave (SAW) devices were prepared based on the ZnO piezoelectric films. The flexible SAW devices show excellent resonant characteristics and two wave modes, mode 0 and mode 1. The resonant frequencies of the SAW devices with a ZnO layer by thickness of 4 μm are 34.4 MHz and 158.5 MHz for the mode 0 and mode 1, and corresponding acoustic phase velocities are 1 100.8 m/s and 5 072 m/s, respectively. The Mode 0 is Rayleigh wave, while the

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2016-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61204124); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目 (No. 2014QNA5002)

Mode 1 is a new high frequency mode. The ZnO piezoelectric films with different thicknesses were deposited for preparing the SAW devices, and the effects of ZnO film thicknesses on the SAW devices and the new mode were analyzed by Finite Element Method. The results show that the new high frequency mode is not the Sezawa wave produced on the traditional hard substrate but is a S_0 Lamb wave with a substrate. Moreover, the Comsol was used to simulate and analyze the vibration and surface displacement of the Mode 1 with PI or without PI substrates and the results indicate that the vibration and surface displacement of the Mode 1 is in agreement with that of S_0 Lamb wave, which validates that the new mode is S_0 Lamb wave.

Key words: Surface Acoustic Wave(SAW) device; flexible substrate; polyimide substrate; piezoelectric film; wave mode; Lamb wave

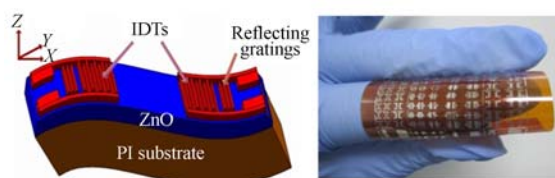
1 引 言

声表面波(Surface Acoustic Wave, SAW)器件因具有小型化、高可靠、多功能、灵敏度高等优点,而在雷达、电子战、声纳、无线通信、光纤通信及传感领域中获得了广泛的应用。近年来,SAW器件由于具有微型化、抗干扰能力强、多参数敏感性等独特优势,开始逐步应用于生物传感、生物医疗和微流体等领域^[1-7]。目前,传统的SAW器件一般是在压电晶体如铌酸锂、正硅酸镓镧(LGS)上制备的^[8-9],或者在硬质衬底如硅片、玻璃和蓝宝石上沉积一层压电 ZnO 或者 AlN 薄膜,然后制备成 SAW 器件^[10-11]。然而,对人和对物的健康护理(Healthcare)的应用需求中,无论是刚性物体,如航空航天飞行器、汽车、建筑物,还是柔软的生物体,如人体器官、皮肤等,都需要与柔性器件完美的贴合,以实现最佳的传感检测效果^[12-14]。柔性 SAW 器件成为满足人和物的“Healthcare”此类需求的优良选择。与传统的硬质 SAW 器件相比,柔性 SAW 具有质量程轻、成本低、可弯曲变形,并附着于任何形状的表面,减少外界撞击时的影响;能够大面积使用,能源消耗少等独特优势。柔性 SAW 器件的研发和大规模生产将打开一个柔性 MEMS 领域,开创基于柔性 SAW 器件的柔性传感器、柔性滤波器、柔性微流体系统、柔性片上实验室,从而为实现整个物联网的感知层奠定坚实的基础。目前,浙江大学微纳课题组在柔性 SAW 器件研究方面进行了一些探索^[15-16],制备了柔性温度传感器和柔性微流控器件,发现基于 PI 衬底的柔性 SAW 器件会表现出两种波

模式,其中一种是新的波模式。本文详细地分析和讨论了柔性 SAW 器件的这种新的波模式,对该波模式进行了定性解释,为柔性 SAW 器件第二个波模式的应用奠定了基础。

2 柔性 SAW 器件的实验和表征

柔性衬底选用具有良好电学、机械特性以及耐高温($-260\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$)特性的杜邦公司的聚酰亚胺(PI)衬底(100H,厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$)。采用直流反应磁控溅射在柔性 PI 衬底上沉积 ZnO 压电薄膜,相关沉积参数见参考文献[15]。所有的 SAW 器件的制备均采用传统的超紫外光刻和剥离工艺。采用磁控溅射沉积 100 nm 的 Al 作为叉指换能器,叉指电极对数为 20,叉指换能器的输入和输出间距为 20 倍波长。图 1(a)和 1(b)分别为柔性 SAW 器件的结构示意图和柔性实物图。该器件表现出良好的可弯曲性和柔软性。



(a)结构示意图 (b)实物图
(a) Cross-sectional view (b) Photographs of flexible thin film SAW devices

图 1 制备的柔性 SAW 器件

Fig. 1 Proposed flexible thin film Al/ZnO/polyimide SAW devices

采用安捷伦 E5071C 矢量网络分析仪测量 SAW 器件的 S 参数。当器件波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 时, 制备的 SAW 器件的传输特性和反射特性曲线如图 2 所示。SAW 器件表现出模式 0 和模式 1 两个波模式, 谐振频率分别为 $34.4\ \text{MHz}$ 和 $158.5\ \text{MHz}$ 。SAW 器件的相速度 v_p 可以由波长和谐振频率算出, 即 $v_p = \lambda f_0$, 计算得到柔性 SAW 器件对应模式 0 和模式 1 的相速度分别为 $1\ 100.8\ \text{m/s}$ 和 $5\ 072\ \text{m/s}$ 。

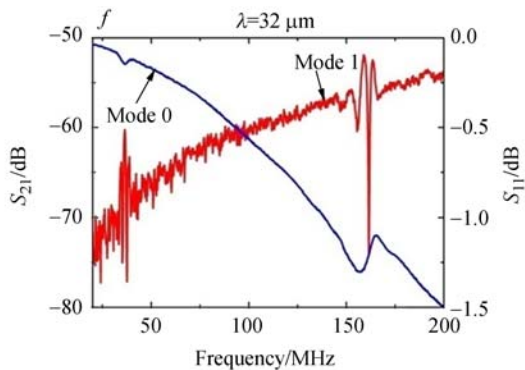


图 2 波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的柔性 SAW 器件的实验结果

Fig. 2 S parameters of flexible Al/ZnO/polyimide SAW devices with ZnO thin film of $4\ \mu\text{m}$ thickness at wavelength of $32\ \mu\text{m}$

3 实验结果与仿真分析

3.1 模式 1 的分析讨论

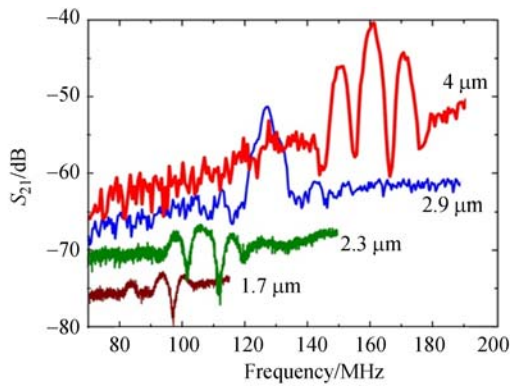
常见的 SAW 波导传输有^[15] Rayleigh SAW (瑞利波), 乐甫波 (Love wave, 如 Sezawa 波), 水平剪切波 (SH-SAW), 弯曲平板波 (Flexural plate wave), S0 兰姆波 (Zero-order Symmetrical Lamb Wave, S0-LW) 和斯通利波 (Stoneley wave) 等。由参考文献^[16]可知, 模式 0 为柔性 SAW 器件的瑞利波。由于 ZnO 压电薄膜的瑞利波波速为 $2\ 650\ \text{m/s}$, PI 衬底的瑞利波波速为 $754\ \text{m/s}$ ^[16], 而制备的柔性 SAW 器件的模式 1 的相速度却大于 $5\ 000\ \text{m/s}$, 因此有必要对该波模式进行详细分析和探究^[17]。

首先由于模式 0 是基模谐振的瑞利波, 所以模式 1 应该不是基模谐振的瑞利波, 那么需要判断它是不是瑞利波的高次谐波。当波长 $\lambda = 32\ \mu\text{m}$ 时, $f_0 = 34.4\ \text{MHz}$, $f_1 = 158.5\ \text{MHz}$, $f_1/f_0 = 4.61$, 因此如果说模式 1 是模式 0 的高次

谐波, 也只可能是三次谐波或者五次谐波; 而由参考文献^[18]可知, 当波长 $\lambda = 10\ \mu\text{m}$ 时, 模式 0 的 $f_0 = 198.1\ \text{MHz}$, 模式 1 的 $f_1 = 447\ \text{MHz}$, 所以 $f_1/f_0 = 2.26$, 可以看出当波长 λ 为不同尺寸时, 模式 1 和模式 0 的频率比值相差甚远, 所以可以断定模式 1 不是模式 0 的高次谐波, 也就是说模式 1 不是柔性 SAW 器件的瑞利高次谐波。

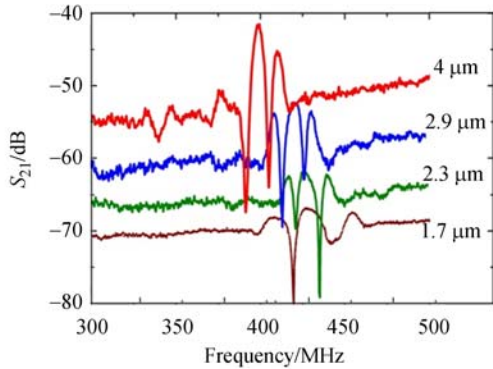
其次, 判断它是否是 Love 波中的 Sezawa 波。第二个模式很容易被认为是 Sezawa 波, 因为 ZnO 在普通的硅片、玻璃和金刚石上呈现的第二个波模式都是 Sezawa 波。比如 2008 年剑桥大学的骆季奎在 Si 上沉积了不同厚度的 ZnO 薄膜制备了 SAW 器件^[17]。ZnO 在 Si 上展现出两个波模式: 一个是瑞利波, 而另一个便是 Sezawa 波。他们还研究了 Sezawa 波的微流体特性。不过, 因为 Sezawa 波的产生条件是需要上面一层的声速比衬底的要小^[17], 比如 ZnO 的声速为 $2\ 650\ \text{m/s}$, 硅上的瑞利波声速为 $4\ 680\ \text{m/s}$ ^[15], 玻璃的瑞利波声速为 $3\ 200\ \text{m/s}$ ^[19], 金刚石的瑞利波声速为 $11\ 000\ \text{m/s}$ ^[20], 所以当 ZnO 沉积在比它高的声速材料硅、玻璃和金刚石上都会产生 Sezawa 波。但是很明显, 柔性衬底的声速只有 $754\ \text{m/s}$ ^[15], 远比 ZnO 的 $2\ 650\ \text{m/s}$ 小得多, 为此可以判别不是 Sezawa 波。另外, 在参考文献^[17]中, 当 ZnO 薄膜的厚度从 $1.5\ \text{mm}$ 增加到 $6.6\ \text{mm}$ 时, Sezawa 波与瑞利波的谐振频率都随着厚度的增加而减小, 也就是说随着厚度的增加, 瑞利波和 Sezawa 波的谐振频率变化趋势是一样的。因此, 本文制备了 4 个不同厚度的 ZnO 薄膜, 分别为 $1.7, 2.3, 2.9$ 和 $4\ \mu\text{m}$, 当器件波长为 $12\ \mu\text{m}$ 时, 结果如图 3 所示。由图可知, 所有柔性 SAW 器件都表现出两个波模式。第一个为瑞利波, 并且谐振频率随着厚度的增加而增大, 但是第二个波模式的谐振频率却随着厚度的增加而降低, 表现出与瑞利波相反的趋势, 由此进一步验证模式 1 非 Sezawa 波。

然后需要判断它是不是 SH-SAW (水平剪切波)。水平剪切波的粒子振动方向是平行于表面的, 可以用 Comsol 仿真, 然后看粒子振动方向来判定它是否是 SH-SAW, 而后面的仿真会发现粒子有上下振动, 所以排除此模式。



(a) 瑞利波

(a) Rayleigh wave



(b) 兰姆波

(b) Lamb wave

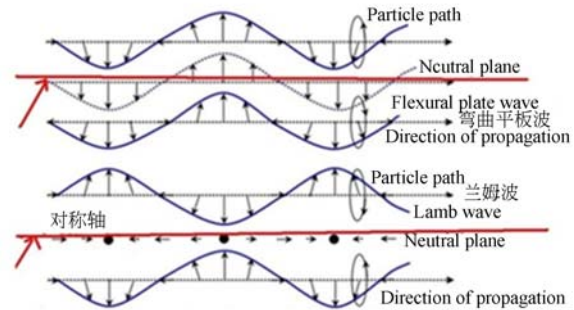
图 3 器件波长为 $12 \mu\text{m}$,不同厚度 ZnO 对柔性 SAW 器件谐振响应的影响

Fig. 3 Effect of thickness of ZnO film on resonant responses of Rayleigh wave and Lamb wave respectively for flexible SAW devices with a wavelength of $12 \mu\text{m}$

由于斯通利波的声速应该介于 ZnO 压电薄膜的瑞利波和水平剪切波之间^[15],即介于 ZnO 的瑞利波声速 $2\ 650 \text{ m/s}$ 和 ZnO 的剪切波声速 $2\ 850 \text{ m/s}$ 之间,远小于模式 1 的声速 $5\ 072 \text{ m/s}$,所以排除掉。

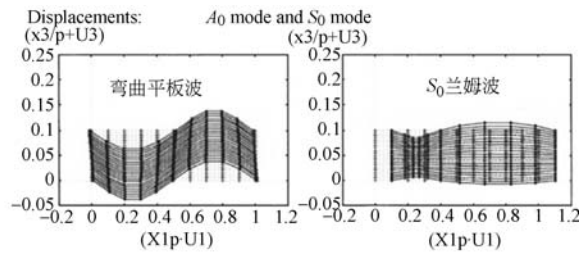
弯曲平板波(Flexural Plate Wave, FPW,也叫非对称兰姆波),对称兰姆波(Zero-order Symmetrical Lamb Wave, S_0 -LW)都属于板波(意为一个平板,上下界面都是空气),即粒子的运动方向只有 X 方向和 Y 方向,没有 Z 方向的振动。实际上,弯曲平板波也属于兰姆波的一种,只因为是非对称粒子振动方向,所以单独把它列开分类。图 4(a)为弯曲平板波和兰姆波的粒子振动方向,

可以看出弯曲平板波属于非对称波,粒子同时往上或者往下;而兰姆波属于对称波,粒子振动相对于中轴线对称分布。图 4(b)为弯曲平板波和兰姆波的粒子位移图^[21]。



(a) 弯曲平板波和兰姆波的粒子振动方向

(a) Vibration directions of flexural plate wave and symmetrical Lamb wave



(b) 弯曲平板波和兰姆波的粒子位移图

(b) Vibration displacements of flexural plate wave and symmetrical Lamb wave

图 4 弯曲平板波和兰姆波

Fig. 4 Flexural plate wave and symmetrical Lamb wave

弯曲平板波一般谐振频率和相速度很低^[22],与本文得到的高频和高声速不相符合,而 ZnO-Lamb wave 的相速度为 $5\ 500 \text{ m/s}$ ^[21],与本文获得的 $5\ 000 \text{ m/s}$ 左右的声速相隔非常近,所以模式 1 有可能是 Lamb wave。

3.2 模式 1 的有限元仿真

基于上述几点探讨,模式 1 很可能是 Lamb wave,但是不能仅由声速就判断它是 Lamb wave,为此对第二个波模式进行了有限元仿真。采用 Comsol Multiphysics 4.4 软件对柔性 SAW 器件进行有限元仿真。由于 SAW 器件的 IDT 沉积在压电基片表面,由周期性排列并与汇流条交替连接的多对电极构成。利用周期性边界条件,可把 IDT 简化为由一对电极组成的周期结构,从而建立简化的二维模型以减小计算量。仿真以图

2 中波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的柔性 SAW 器件为例。基片衬底为柔性聚酰亚胺衬底,宽度与 SAW 波长 $\lambda=32\ \mu\text{m}$ 一致,由于 SAW 的能量主要集中在基片表面 $1\sim 2$ 个波长深度内,随着基片深度的增加其振幅呈指数衰减,因此衬底基片高度可简化为 $1\sim 2$ 倍波长。这里选取衬底基片高度约为 2 倍波长 $50\ \mu\text{m}$,然后衬底基片底部固定;Al 电极厚度为 $100\ \text{nm}$,宽度 $\lambda/4=8\ \mu\text{m}$,中心间距 $p=\lambda/2=16\ \mu\text{m}$;ZnO 压电薄膜层的宽度为一个波长 $\lambda=32\ \mu\text{m}$,高度为制备的压电薄膜的厚度 $4\ \mu\text{m}$ 。由于模式 0 为瑞利波,所以只需要仿真模式 1。为了更加精细地划分网格,同时尽量少占用计算机内存,仿真区间选在 $160\ \text{MHz}$ 左右,所以从 $130\ \text{MHz}$ 仿真到 $190\ \text{MHz}$,得到的仿真曲线如图 5 所示。在 $130\sim 190\ \text{MHz}$ 确实存在一个高频率的谐振,谐振点在 $163\ \text{MHz}$ 左右。该谐振点和实验的模式 1 对应的谐振频率 $158\ \text{MHz}$ 符合得很好,这说明确实存在第二个模式。

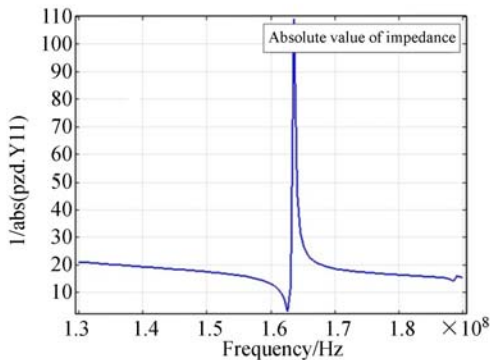
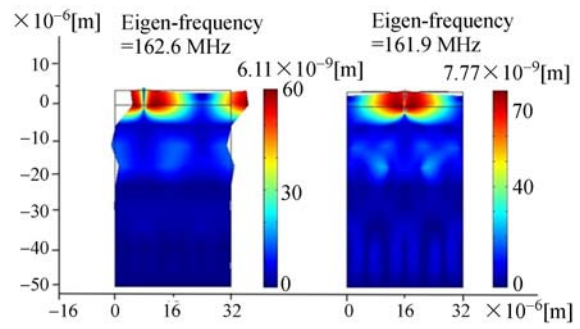


图 5 Comsol 仿真波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的柔性 SAW 器件结果

Fig. 5 Simulation results of flexible SAW devices at wavelength of $32\ \mu\text{m}$ with $4\ \mu\text{m}$ thickness of ZnO films

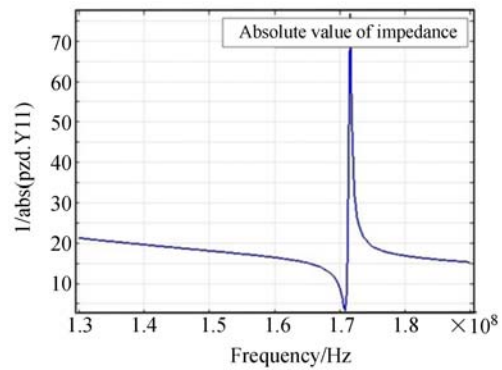
现在最关键的是观测第二个模式的粒子振动模式,为此本文在 $163\ \text{MHz}$ 附近做了本征频率分析,得到模式 1 的粒子位移振动图,如图 6 所示。将该粒子振动位移图和图 4 中的标准 S_0 兰姆波的粒子位移图进行对比,可以看出,模式 1 和标准的 S_0 兰姆波粒子位移图基本一致。由此初步判读模式 1 是 S_0 兰姆波。不过,一般来讲 S_0 兰姆波只存在一个平板内(这也就是为什么叫板波原因),底下一般没有衬底,是悬空的。实际上兰姆波是一个体波模式,它是由一个纵波和一个横波



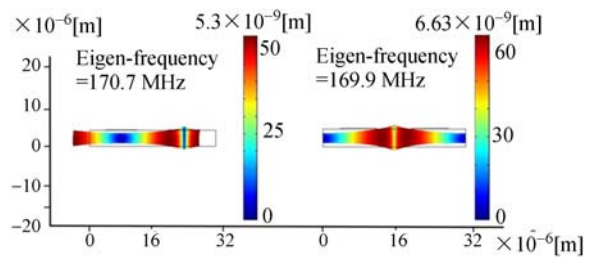
(a) 并联谐振点 (b) 串联谐振点
(a) Parallel resonance (b) Series resonance

图 6 Comsol 仿真波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的柔性 SAW 器件粒子位移结果

Fig. 6 Particle displacements of flexible SAW devices at wavelength of $32\ \mu\text{m}$ with $4\ \mu\text{m}$ thickness of ZnO films



(a) 仿真频率响应图
(a) Frequency response



(b) 并联谐振粒子位移图 (c) 串联谐振粒子位移图
(b) Parallel resonance (c) Series resonance

图 7 没有 PI 衬底的波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的 SAW 器件仿真结果

Fig. 7 Simulation results of flexible SAW devices without PI substrate at wavelength of $32\ \mu\text{m}$ with $4\ \mu\text{m}$ thickness of ZnO films

组合而成的,然后在一个很薄的平板内传播,而本研究制备的柔性 SAW 器件显然不止一层板,它除了有一层 ZnO 压电层,还有一层 PI 衬底。因此在波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 的条件下,将 PI 去除掉进行仿真,也就是说只有一层 $4\ \mu\text{m}$ 的 ZnO 压电层,这样设计产生的模式 1 肯定是兰姆波了,仿真结果如图 7 所示。由图 7(a)可知, $130\sim 190\ \text{MHz}$ 之间确实有一个谐振频率,而且这个谐振频率可以确定为兰姆波,因为它只有一层 ZnO 压电薄板层。从这个频率来看,谐振在 $170\ \text{MHz}$,与没有 PI 衬底的仿真得到的 $163\ \text{MHz}$ 非常接近。另外由图 7(b)和 7(c)的粒子振动位移图可以看出,这个兰姆波是对称的,所以是 S_0 兰姆波。对比没有 PI 衬底的粒子位移图 7 与有 PI 衬底的粒子位移图 6,发现粒子位移图也基本一致,由此认为模式 1 为对称兰姆波。

而有 PI 衬底的仿真结果中, S_0 兰姆波的谐振频率比没有 PI 衬底的频率略低,这是网格划分造成的。当 PI 层网格划分得更加精细时,频率几乎一致,由此可知 S_0 兰姆波即能在一个平板内传播,也能在双层板中的上层传播。实际上 B. A. Auld 在 *Acoustic Fields and Waves in Solids*^[15] 书中就提到,当上层声速远远大于下层声速时就有可能激励兰姆波,又称作广义兰姆波(Generalized Lamb Wave, GLW)。而本文制备的柔性

SAW 器件的 ZnO 压电层声速为 $2\ 650\ \text{m/s}$,远大于 PI 衬底声速 $754\ \text{m/s}$,所以也会激励兰姆波,记为 S_0 广义兰姆波。

4 结 论

本文在 PI 衬底上反应磁控溅射沉积了 ZnO 压电薄膜,并制备了基于 ZnO 压电薄膜型的柔性 SAW 器件。制备的柔性 SAW 器件表现出良好的谐振性能,当波长为 $32\ \mu\text{m}$, ZnO 厚度为 $4\ \mu\text{m}$ 时,SAW 器件表现出两个波模式,模式 0 和模式 1,谐振频率分别为 $34.4\ \text{MHz}$ 和 $158.5\ \text{MHz}$,对应声速分别为 $1\ 100.8\ \text{m/s}$ 和 $5\ 072\ \text{m/s}$ 。模式 0 为瑞利波,文章详细分析了新的高频模式 1 的波模式,并沉积了不同厚度 ZnO 薄膜来制备柔性 SAW 器件研究高频波模式,认为其不是传统硬质衬底上 SAW 器件产生的 Sezawa 波,而是 S_0 兰姆波,而且是有衬底情况下的 S_0 兰姆波。采用 Comsol 仿真分析了高频模式 1 的粒子振动位移,得到的结果和 S_0 兰姆波粒子的振动位移一致。本文在去除 PI 衬底后进行了 Comsol 仿真,并与 PI 衬底 Comsol 仿真的结果进行了对比,二者的粒子振动模式非常吻合。由于柔性 SAW 器件具有 PI 衬底,所以模式 1 为广义兰姆波。该结论对促进柔性 SAW 器件的应用具有积极意义。

参考文献:

- [1] SENVELI S U, AO Z, RAWAL S, *et al.*: A surface acoustic wave biosensor for interrogation of single tumour cells in microcavities[J]. *Lab Chip*, 2016, 16: 163-171.
- [2] WANG J, HU H, YE A, *et al.*: Experimental investigation of surface acoustic wave atomization[J]. *Sens. Actuators A*, 2016, 238: 1-7.
- [3] 刘凤娟, 胡佐富, 李振军, 等. 分子束外延生长的 ZnO 压电薄膜及其声表面波器件特性[J]. *发光学报*, 2012, 33: 328-333.
LIU F J, HU Z F, LI ZH J, *et al.*: Surface acoustic wave based on ZnO thin films grown by RF-MBE [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2012, 33 (3): 328-333. (in Chinese)
- [4] 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: 346-350.
ZHOU J, HE X L, JIN H, *et al.*: Flexible ZnO thin film SAW device on polyimide substrate[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2014, 22(2): 346-350. (in Chinese)
- [5] 高阳, 李以贵, 张俊峰. 利用声表面波实现液体的二维驱动[J]. *光学精密工程*, 2009, 17: 1548-1552.
GAO Y, LI Y G, ZHANG J F. Two-dimensional actuation of liquid using surface acoustic wave[J]. *Opt. and Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1548-1552. (in Chinese)
- [6] LUO J K, FU Y, ASHLEY G, *et al.*: Integrated ZnO film based acoustic wave microfluidics and biosensors[J]. *Adv. Sci. Tech.*, 2011, 67: 49-58.
- [7] FU Y, LUO J, DU X, *et al.*: Recent developments on ZnO films for acoustic wave based bio-sensing

- and microfluidic applications; a review[J]. *Sens. Actuat. B*, 2010,143:606-619.
- [8] SHU L, PENG B, YANG Z B, *et al.*. High-temperature SAW wireless strain sensor with langasite[J]. *Sensors*, 2015,15: 28531-28542.
- [9] SHILTON R J, MATTOLI V, TRAVAGLIATI, *et al.*. Rapid and controllable digital microfluidic heating by surface acoustic waves[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2015,25:5895-5901.
- [10] LAN X D, ZHANG S Y, WANG Y, *et al.*. Humidity responses of Love wave sensors based on view the MathML source ZnO/R-sapphire bilayer structures[J]. *Sens. Actuat. A*, 2015,230:136-141.
- [11] CHEN J K, GUO H W, HE X L, *et al.*. Development of flexible ZnO thin film surface acoustic wave strain sensors on ultrathin glass substrates [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2015, 25: 1150051-7.
- [12] 张冬至, 童俊, 刘哲, 等. 基于电话性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J]. *光学精密工程*, 2014,22:2151-2158.
- ZHANG D ZH, TONG J, LIU ZH, *et al.*. Tactile sensing characteristics of electroactive polymer film based flexible devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(8): 2151-2158. (in Chinese)
- [13] KIM D H, LU N, MA R, *et al.*. Epidermal electronics[J]. *Science*, 2011,333:838-843.
- [14] 陈龙龙, 张建华, 李喜峰, 等. 基于柔性 PI 基底的氧化物 IGZO TFT 器件工艺及特性研究[J]. *液晶与显示*, 2015,30:796-800.
- CHEN L L, ZHANG J H, LI X F, *et al.*. Process and properties of oxide IGZO TFT device based on flexible PI substrate[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015,30(5): 796-800. (in Chinese)
- [15] AULD B A. *Acoustic Fields and Waves in Solids* [M]. 1973.
- [16] ZHOU J, HE X L, JIN H, *et al.*. Crystalline structure effect on the performance of flexible ZnO/polyimide surface acoustic wave devices[J]. *J. Appl. Phys.*, 2013,114:044502-044508.
- [17] DU X Y, FU Y Q, TAN S C, *et al.*. ZnO film thickness effect on surface acoustic wave modes and acoustic streaming[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008,93:0941051-0941053.
- [18] JIN H, ZHOU J, HE X, *et al.*. Flexible surface acoustic wave resonators built on disposable plastic film for electronics and lab-on-a-chip applications [J]. *Sci. Rep.*, 2013,3:2140-2148.
- [19] ZHOU J, HE X L, WANG W B, *et al.*. Transparent surface acoustic wave devices on ZnO/glass using Al-doped ZnO as the electrode[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2013,34:1319-1321.
- [20] SHIH W C, WANG M J, LIN I N. Characteristics of ZnO thin film surface acoustic wave devices fabricated using nanocrystalline diamond film on silicon substrates[J]. *Diamond Relat. Mater.*, 2008,17: 390-395.
- [21] LAURENT T, BASTIEN F O, POMMIER J C, *et al.*. Lamb wave and plate mode in ZnO/silicon and AlN/silicon membrane: Application to sensors able to operate in contact with liquid[J]. *Sens. Actuat. A*, 2000,87:26-37.
- [22] LIU Y, LI Y F, EL-HADY A M, *et al.*. Flexible and bendable acoustofluidics based on ZnO film coated aluminium foil [J]. *Sens. Actuat. B*, 2015,221:230-235.

作者简介:



周 剑 (1988—), 男, 湖南长沙人, 讲师, 主要从事 MEMS 器件的研究。E-mail: 11031028@zju.edu.cn

通讯作者:



吴学忠 (1965—), 男, 山东人, 教授, 博导, 机电工程系主任, 主要从事精密工程与计算机控制、微机电系统与微纳器件等领域的研究。E-mail: xzwu@nudt.edu.cn