

Silicon-Based Micro-Structural Flexural Plate Wave Devices*

LI Xin^{1,2*}, LIU Mengwei², XUE Mingxin^{1,2}

(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The design and fabrication of micro-structural flexural plate wave (FPW) devices based on the ZnO piezoelectric film are introduced. To reduce the film stress, LTO/ZnO/LTO/Si₃N₄ multi-layer composite plate structure is adopted. DC magnetron sputtering is applied to deposit ZnO piezoelectric film, two pairs of interdigital electrodes are deposited on the piezoelectric composite plate structure, the interdigital electrodes are adopted for the Lamb wave excitation and reception, respectively. X ray diffraction results show that the deposited ZnO film is highly preferred C axis piezoelectric film. The scanning electron microscopy shows that the prepared ZnO films are smooth, dense, and grain growth appears obvious columnar structure. The high harmonic bulk acoustic resonator (HBAR) devices are prepared to investigate the electrical properties of ZnO piezoelectric film indirectly. The higher quality factor of HBAR device indicates the films have good piezoelectric properties. The FPW device frequency response is analyzed with the Agilent E5071C network analyzer. The results show the measured center frequency of the antisymmetric A₀ modes Lamb wave is basically identical with the theoretical calculation result.

Key words: flexural plate wave; ZnO piezoelectric film; multi-layer composite plate; interdigital electrode

EEACC: 2860C

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.04.007

微型硅基弯曲板波器件*

李新^{1,2*}, 刘梦伟², 薛明鑫^{1,2}

(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院, 沈阳 110870; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100190)

摘要: 介绍了基于 ZnO 压电薄膜的微型弯曲板波 (FPW) 器件的设计与制作。为减小薄膜的应力, 器件采用 LTO/ZnO/LTO/Si₃N₄ 多层复合板结构, 并采用直流磁控溅射工艺制备 ZnO 压电薄膜, 在压电复合板结构上沉积两对叉指电极, 分别用于 Lamb 波的激发和接收。X 射线衍射分析表明, 沉积的 ZnO 薄膜 C 轴高度择优; 扫描电子显微镜分析表明, 制备的 ZnO 薄膜平整、致密, 晶粒生长呈现明显的柱状结构; 通过分析制备的高次谐波体声波谐振器 (HBAR) 器件性能来间接检验 ZnO 压电薄膜的电学性能, HBAR 器件的品质因子较高, 表明薄膜有较好的压电性能。利用安捷伦 E5071C 网络分析仪检测 FPW 器件的频率响应, 结果表明反对称 A₀ 模式 Lamb 波的实测中心频率与理论计算的频率结果基本一致。

关键词: 弯曲板波; ZnO 压电薄膜; 多层复合板; 叉指电极

中图分类号: TP212.16

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)04-0453-04

弯曲板波 FPW (Flexural Plate Wave) 传感器激发的波是反对称 A₀ 模式的 Lamb 波, 通常通过位于压电复合板上的叉指电极来激发和检测。Lamb 波有两种传播模式, 反对称模式和对称模式, 其中反对称 A₀ 模式的 Lamb 波用于化学或生物传感分析具有很高的质量灵敏度, 且灵敏度随板厚度的减小而增加^[1-2]。采用 MEMS 工艺制备的 FPW 传感器, 可以有效地减小板厚, 提高传感器的灵敏度, 同时可以在硅片上集成传感器

阵列, 实现对不同性质物质的同时检测。此外, FPW 传感器与其他声表面波传感器相比, 具有可实现电极与检测环境的隔离, 以及对液体物质的检测等优点, 使得 FPW 传感器在蒸汽识别^[3-4], 生物传感^[5], 化学检测^[6], 压力传感等方面具有广泛应用, 已经成为目前国际上传感器领域的研究热点。

弯曲板波 (FPW) 器件的核心是压电薄膜, 压电薄膜性能的优劣直接影响 FPW 传感器的性能^[7-8]。

项目来源: 国家自然科学基金项目 (10804119); 辽宁省自然科学基金项目 (20102162)

收稿日期: 2011-11-01 修改日期: 2011-12-12

ZnO 压电薄膜声速较低,是最早被用作压电薄膜的材料^[9]。对于 FPW 传感器,ZnO 薄膜应该具有 C 轴高度择优、低应力等特性^[10]。本文基于 MEMS 技术设计制作了弯曲板波(FPW)器件,为减小薄膜的应力,设计采用 LTO/ZnO/LTO/Si₃N₄ 多层复合板结构。对制备的 ZnO 薄膜的微观结构及电学特性进行了分析。并利用安捷伦 E5071C 网络分析仪分析了 FPW 传感器的频率响应。

实验

1.1 FPW 器件的结构与制备

FPW 器件的声波速度由基片厚度和基体材料共同决定。可以根据器件所要求的中心频率来设计叉指换能器的结构^[11-12],设计的 FPW 器件叉指电极的孔径和声波传播路径长度分别是 2.5 mm 和 5.6 mm。指宽和指间距都等于 25 μm,输入和输出叉指电极都为 25 对,周期(即波长)为 100 μm。薄板的尺寸定为 9 mm×3 mm。叉指电极的俯视图如图 1 所示。

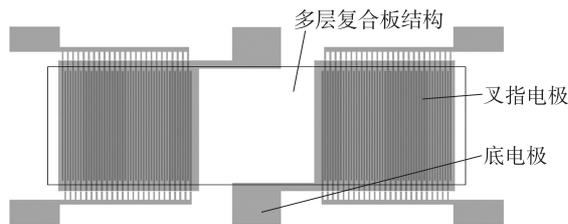


图1 叉指电极俯视图

FPW 器件采用硅微机械加工技术制备,工艺流程如图 2 所示。

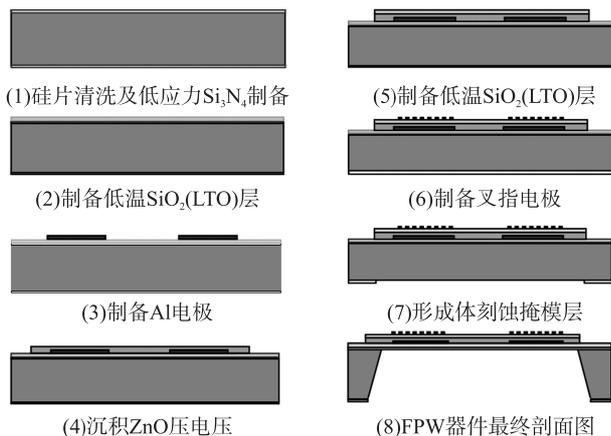


图2 FPW 器件工艺流程

(1)首先,将硅片清洗烘干,采用 LPCVD 工艺在硅片正反面各沉积一层 0.5 μm 的 Si₃N₄ 层。

(2)采用 PECVD 工艺在正面的 Si₃N₄ 上沉积一层 2 μm 厚的低温 SiO₂(LTO)。

(3)采用离子电镀技术在 LTO/Si₃N₄/Si 层上沉积一层厚度为 140 nm 的金属 Al 膜,作为器件的底电

极,Al 膜通过磷酸腐蚀来形成底电极图形。

(4)采用直流磁控溅射技术,在底电极上沉积一层厚度为 1 μm,C 轴高度择优的 ZnO 压电层,然后用稀磷酸(4% 磷酸96% 水)腐蚀 ZnO 薄膜形成与底电极的接触孔。磁控溅射的条件为:真空气压 4.6×10^{-4} Pa,基底温度 200 °C,溅射气压 7.8×10^{-1} Pa,气体比例 Ar₂:O₂ = 10:20,溅射功率 120 W,溅射时间 80 min。

(5)采用 PECVD 工艺在 ZnO 压电层上沉积 0.2 μm 厚的低温 SiO₂(LTO)层,以增加薄膜的电阻率。

(6)采用剥离工艺,制备两对 140 nm 厚的 Al 叉指电极,分别对 Lamb 波进行激发和检测。

(7)采用双面对准光刻和电感耦合等离子体(ICP)工艺,刻蚀背面的 Si₃N₄ 层形成体硅刻蚀窗口。

(8)最后,采用体硅刻蚀夹具将硅片正面保护并固定硅片,在 30wt%,95 °C 的 KOH 腐蚀液中进行体硅刻蚀。在刻蚀过程中,硅刻蚀的速度为 2.3 μm/min。硅全部刻蚀完成后,形成了 LTO/ZnO/Al/LTO/Si₃N₄ 压电多层复合板,完成了器件的制作。体刻蚀后器件的正面照片如图 3 所示。

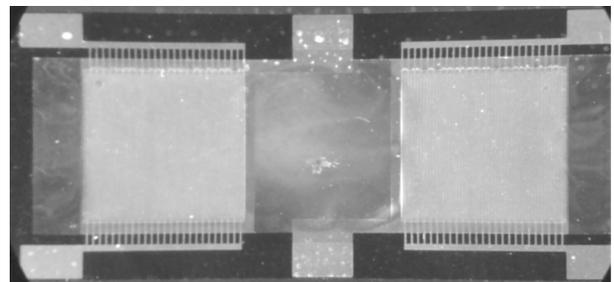


图3 体刻蚀后的器件正面照片

1.2 HBAR 器件制作

通过分析高次谐波体声波谐振器 HBAR 器件的性能来间接检验 ZnO 压电薄膜的电学特性^[13]。HBAR 器件的工艺制备流程相对简单,这是用它来检验压电薄膜性能的主要原因。HBAR 器件的工艺流程如图 4 所示。

(1)在清洗干净的衬底基片上蒸镀 Cr/Au,并光刻腐蚀形成底电极;

(2)直流磁控溅射制备 1 μm 厚的 ZnO 薄膜;

(3)采用剥离工艺形成 Al 上电极。

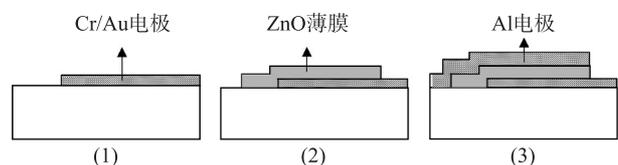


图4 HBAR 器件的工艺流程

2 结果与讨论

2.1 ZnO 压电薄膜性能分析

FPW 传感器是基于压电薄膜工作的器件, 因此压电薄膜是器件的核心, 通过测试 ZnO 薄膜的晶体结构和制备的 HBAR 器件的电学特性来分析 ZnO 压电薄膜的性能。ZnO 薄膜 X 射线衍射图如图 5 所示, 可以看出 ZnO 薄膜具有 (002) 择优取向。表明沉积的氧化锌薄膜是 C 轴高度择优的压电薄膜, 有很好的压电性能^[14-15]。

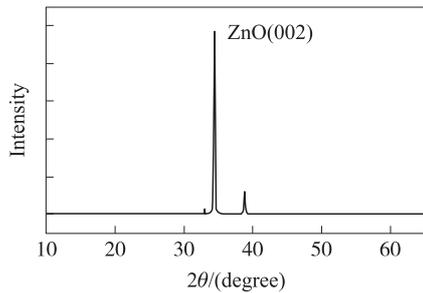


图 5 ZnO 薄膜的 X 射线衍射图

制备的 ZnO 薄膜的扫描电镜图如图 6 所示, 可以看出 ZnO 薄膜平整、致密, 晶粒尺寸约为 200 nm ~ 300 nm, 有明显的柱状结构。采用射频网络分析仪对制备好的 HBAR 器件进行了电学测试, 2 GHz 附近的 HBAR 器件反射系数图如图 7 所示。基于直流磁控溅射 ZnO 压电薄膜的 HBAR 器件的机电耦合系数 $k_{\text{eff}}^2 = 0.1\%$, 品质因子 Q 值为 9 000, 可知 ZnO 薄膜有很好的电学性能。

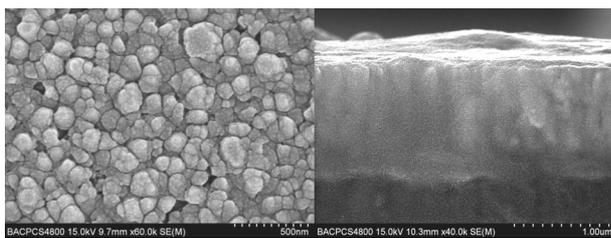


图 6 ZnO 薄膜表面和截面的 SEM 图

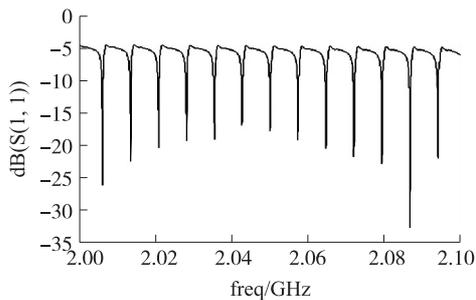


图 7 ZnO 压电薄膜的 HBAR 器件反射系数图

2.2 FPW 器件的频率响应

Lamb 波延迟线的传输特性采用安捷伦 E5071C

网络分析仪进行测试。FPW 器件的频率响应如图 8 所示, A_0 模式 Lamb 波的中心频率是 3.69 MHz。

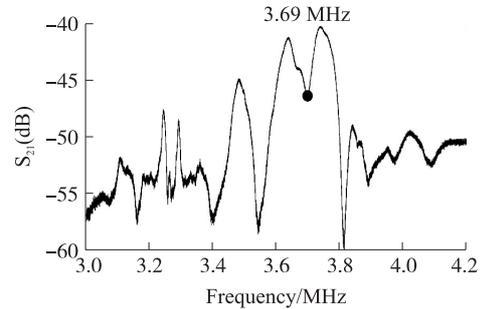


图 8 FPW 器件的频率响应

FPW 器件的频率为:

$$f_0 = V_p / \lambda \quad (1)$$

V_p 和 λ 分别为波速和波长。根据式 (1), 本文制备的 FPW 器件波速为 367 m/s。

对于各向同性板, A_0 模式 Lamb 波波速的近似表达式为^[16]:

$$V_p = \frac{2\pi h}{\lambda} \sqrt{\frac{E}{12(1-\nu^2)\rho}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi^2 h^2}{3\lambda^2} + 1}} \quad (2)$$

其中, E, ν, ρ 和 h 分别为板的杨氏模量、泊松比、密度和厚度, 表 1 为 LTO/ZnO/LTO/Si₃N₄ 多层复合板的厚度和材料参数, 板的材料参数采用厚度比进行估算, 如 $E = (0.5E_{\text{Si}_3\text{N}_4} + 2.2E_{\text{LTO}} + E_{\text{ZnO}}) / 3.7 = 95.5676$ GPa, ν 和 ρ 分别为 0.2554, 和 3503.2 kg/m³。根据式 (2), 计算得到 A_0 模式的 Lamb 波中心频率值是 3.62 MHz, 与本文的测试结果基本一致。

表 1 LTO/ZnO/Al/LTO/Si₃N₄ 多层复合板的厚度和材料参数

材料	厚度 h / μm	杨氏模量/GPa	泊松比 ν	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Si ₃ N ₄	0.5	146	0.25	3 000
LTO	2.2	73	0.17	2 660
ZnO	1	120	0.446	5 610

3 结论

设计和制备了基于 ZnO 压电薄膜具有 LTO/ZnO/LTO/Si₃N₄ 多层复合板结构的 FPW 器件。ZnO 薄膜具有较好的微观结构和压电性能, 器件采用 MEMS 技术制备, 结果表明, FPW 器件的理论中心频率与实际测量的中心频率结果基本一致。目前国内只是对 Lamb 波传感器进行了一些理论研究, 缺乏对基于 MEMS 技术的弯曲板波器件制备方面的深入研究。本文开展硅微型 FPW 器件制备的实

验研究,根据理论分析,合理优化选择制备 FPW 器件的制备工艺,研制出 MEMS 微型 FPW 传感器的原理性器件,对制备工艺中的参数及存在的问题进行了探索实验,为研制高性能的微型弯曲板波传感器奠定了理论和实验基础。

参考文献:

- [1] 姚守拙. 声波型化学与生物传感器[M]. 北京:化学工业出版社,2006:1-25.
- [2] Duhamel R, Robert L, Jia Hongguang, et al. Sensitivity of a Lamb Wave Sensor with 2 μm ALN Membrane[J]. Ultrasonics, 2006, 44: 893-898.
- [3] Cai Q Y, Park J, Heldsinger D. Vapor Recognition with an Integrated Array of Polymer Coated Flexural Plate Wave Sensors[J]. Sensor and Actuator, B 62(2000):121-130.
- [4] Grate J W, Wenzel S W, White R M. Flexural Plate Wave Devices for Chemical Analysis[J]. Analytical Chemistry, 1991, 63:1552-1554.
- [5] Cunningham B, Weinberg M, Pepper J, et al. Design, Fabrication and Vapor Characterization of a Microfabricated Flexural Plate Resonator Sensor and Application to Integrated Sensor Arrays[J]. Sensors and Actuators B, 2001, 73:112-116.
- [6] Pepper J, Noring R, Klempner M, et al. Detection of Proteins and Intact Microorganisms Using Microfabricated Flexural Plate Silicon Resonator Arrays[J]. Sensors and Actuators B, 2003, 96:565-569.
- [7] Li Junhong. Piezoelectric Films and Piezoelectric Micromachined Transducers [D]. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 2009:50-75.
- [8] Lin Chi-ming, Yen Ting-ta, Lai Yun-ju, et al. Temperature-Compensated Aluminum Nitride Lamb Wave Resonators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(3):524-529.
- [9] Fu Y Q, Luo J K, Du X Y, et al. Recent Developments on ZnO Films for Acoustic Wave Based Biosensing and Microfluidic Applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 143: 606-608.
- [10] Huang I Y, Lee M C. Development of a FPW Allergy Biosensor for Human IgE Detection by MEMS and Cystamine-Based SAM Technologies[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2008, 132: 340-350.
- [11] Bret A, Stuart W, Richard M. Viscosity and Density Sensing with Ultrasonic Plate Waves [J]. Sensors and Actuators A, 1990, 22: 704-708.
- [12] 郑利, 张正, 李丹. 基于声表面波技术的微流体混合及仿真[J]. 传感技术学报, 2011, 24(8):1098-1101.
- [13] 张翔, 包达群, 郭航. 薄膜体声波谐振器的结构参数优化分析[J]. 传感技术学报, 2008, 21(2):292-296.
- [14] Choujaa A, Tirole N, Bonjour C, et al. AlN/silicon Lamb-Wave Microsensors for Pressure and Gravimetric Measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1995, 46:179-189.
- [15] 李俊红, 徐联, 解述. 不同厚度 ZnO 薄膜取向和应力的研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(2):234-236.
- [16] Redwood M R. Mechanical Waveguides [M]. Oxford: Pergamon Press, 1960, 84-100.



李 新(1974-),男,博士后,副教授。研究方向为基于 MEMS 的微型传感器研究。2006~2008 年传感器国家工程中心博士后,从事基于 MEMS 高温压阻式压力传感器工艺研究工作。2008~2009 年,日本群馬大学非常勤研究员,从事量子点太阳能电池方面研究工作,lixin97@163.com。