

高频声表面波材料及器件制备工艺的研究

Research on Materials of High Frequency Surface
Acoustic Wave and Preparation of its Devices

李冬梅, 陈菁菁, 李 晖, 潘 峰

(清华大学材料系先进材料教育部重点实验室, 北京 100084)

LI Dong-mei, CHEN Jing-jing, LI Hui, PAN Feng

(Laboratory of Advanced Materials, Department of Materials

Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 研究了磁控溅射和电子束蒸镀工艺对在 LiNbO_3 基片上沉积铝膜的结构、表面形貌的影响。采用匀胶、曝光和反应离子刻蚀工艺, 制备出中心频率在 920 MHz 纵向谐振耦合换能器结构的声表面波滤波器。结果表明, 电子束蒸镀的铝膜与 LiNbO_3 单晶间具有较好的结合力, 具有适合 SAWF 器件制备所需的微观结构, 在随后的叉指换能器制备过程中表现出良好的加工性能和声传播特性。

关键词: 铝薄膜; 声表面波材料; LiNbO_3 ; 谐振耦合换能器

中图分类号: TN65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2003) 08-0040-03

Abstract: The effects of the DC magnetron reactive sputtering technique and the electron beam vapour deposition technique on surface morphology, microstructures of the Al thin films deposited on LiNbO_3 substrate were investigated. The 920 MHz surface acoustic wave (SAW) filter that use the longitudinally coupled transducers had been fabricated on LiNbO_3 substrate using electron beam direct writing and dry etching processes. These results show that electron beam vapour deposition technique can obtain the Al thin films with satisfied properties in the preparation of SAW filters because high binding force between LiNbO_3 substrate and Al thin films.

Key words: Al thin films; SAW filter materials; LiNbO_3 ; longitudinally coupled transducer

声表面波滤波器 (SAWF) 是一种对信号频率具有选择作用的无源器件, 因其具有体积小、质量轻、滤波性能优越、一致性好等优点, 在现代通讯系统中获得了广泛的应用^[1,2]。SAW 器件制作过程中, 通常采用 SiO_2 , LiNbO_3 , LiTaO_3 等压电单晶作为声波产生和传播的材料, 而用铝等声阻抗较小的薄膜作为信号的输入和输出材料^[3-6]。目前国内仅能生产中心频率低于 500 MHz 的 SAW 器件。随着 SAW 器件中心频率的提高, 叉指换能器线条越来越细, 铝膜结构、抗腐蚀性及其随后的微细加工技术成为 SAW 器件制备的关键。基于此, 本工作将选择 LiNbO_3 压电单晶为基片, 研究不同镀膜工艺对在 LiNbO_3 基片上沉积铝膜结构、抗腐蚀性、表面形貌及其加工性能的影响; 采用纵向谐振耦合换能器结构设计并制备出了利用基波和三次倍频波谐振耦合的声表面波滤波器。

1 实验方法

实验中分别采用电子束蒸镀和磁控溅射技术研究 LiNbO_3 基片上铝膜的制备工艺及其对铝膜形貌结

构的影响。 LiNbO_3 基片采用 H_3PO_4 、丙酮、酒精和去离子水清洗。

磁控溅射工艺: 靶材纯度为 99.999% 的高纯铝, 溅射工作介质为高纯 Ar 气 (99.995%), 真空室本底真空为 4×10^{-4} Pa, 溅射时 Ar 气压强为 3.5×10^{-1} Pa。用控制溅射功率来调整铝膜的沉积速率为 $1 \sim 2$ nm/s。

电子束蒸镀工艺: 采用异型电子枪和水冷铜坩埚, 镀料纯度为 99.9999% 的铝块。真空室本底真空为 2×10^{-4} Pa, 蒸镀气压 4×10^{-4} Pa, 镀膜速率 $0.5 \sim 1$ nm/s。

采用原子力显微镜, 扫描电子显微镜表征铝膜表面形貌和微结构, 网络分析仪分析 SAW 器件的性能。

2 SAW 滤波器的设计与制作

设计并制作了中心频率为 920 MHz 的纵向谐振耦合滤波器, 滤波器由图 1 所示的两个相同结构级联而成。图 1 结构采用两个周期性微扰的反射阵作为反射器来形成谐振腔。当反射阵指条数远大于叉指电极

的指数条数时,与反射阵相干的能量集中于中心频率附近的一个窄的频带内,即将声能关在反射器内^[2,7]。两个纵向谐振耦合换能器级联可以增加带外抑制。

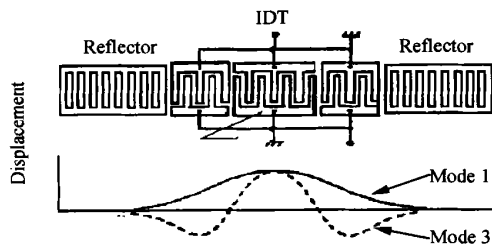


图1 纵向谐振耦合换能器结构示意图

Fig. 1 Structure of longitudinally coupled transducers

每个谐振耦合换能器采用三个叉指换能器,中心叉指换能器为18对指,两边叉指换能器为13对指,相邻换能器之间的距离为 $\lambda/2$ ($\lambda = 4.30 \text{ m}$),换能器指条和反射条宽度均为 $\lambda/4$ 。电极周期由换能器中心频率 f_0 (920 MHz) 和声表面波的相速 v_s (3980 m/s) 确定:

$$\lambda = v_s / f_0$$

采用电子束直写制作 SAW 换能器。压电基片采用 128°YX LiNbO₃ 单晶。LiNbO₃ 机电耦合系数为 5.5%, 声传播相速为 3980 m/s^[8]。滤波器制备工艺流程如下:

(1) 换能器图形的绘制; (2) 压电基片上沉积铝膜; (3) 在铝膜上涂光刻胶 (负性胶); (4) 电子束直接扫描曝光; (5) 显影; (6) 干式等离子刻蚀 (反应气体为 BCl₃); (7) 除胶; (8) 切片, 点焊、封装; (9) 测试。

3 实验结果与讨论

3.1 微观结构分析

铝叉指换能器与压电晶体间的结合力及铝膜自身的微观结构及表面形貌均会对 SAW 器件性能及其稳定性产生较大影响。实验中采用原子力显微镜对不同工艺在 LiNbO₃ 单晶上沉积铝膜结构及表面形貌进行了分析。图 2a, b 分别给出的是磁控溅射和电子束蒸镀技术制备铝膜的表面特征, 其扫描范围为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 膜厚均为 120 nm (较为适宜的铝电极厚度与声表面波波长的比 h/λ 为 2.5% ~ 2.8%^[12])。从图 2 可以看出, 采用电子束蒸镀的样品, 晶粒平均尺寸约为 200 nm, 薄膜结晶完整。而对于磁控溅射样品, 晶粒尺寸明显小于前者, 约为 20 nm。另外, 由于溅射沉积原子能量和薄膜沉积速度均高于蒸镀原子, 在溅射样品中存在较多缺陷。

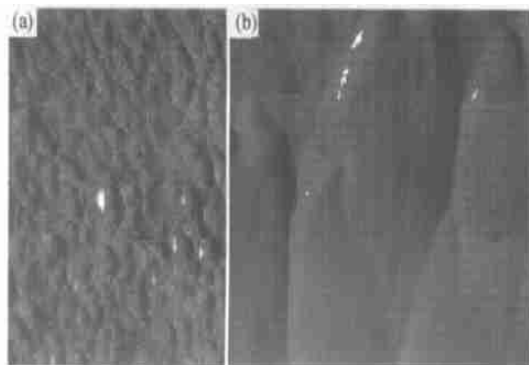


图2 采用不同沉积技术在 LiNbO₃ 表面沉积铝膜的原子力显微镜表面特征照片

(a) 磁控溅射; (b) 电子束蒸镀制备的铝膜 (扫描范围均为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)

Fig. 2 AFM image of Al films on the LiNbO₃ prepared by various deposition techniques

(a) magnetron sputtering; (b) electron beam deposition (The scan region is $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)

为了比较两种工艺制备的铝膜与 LiNbO₃ 基片间的结合力及其在随后 SAW 器件制备中的加工特性, 研究了不同样品在弱碱性显影液显影过程中的耐腐蚀行为。显影的目的是将电子束曝光后的基片放在显影液里, 将应去除的光刻胶膜溶除干净 (本实验中用负胶, 未曝光部分被溶去), 以获得反应离子刻蚀时所需要的抗蚀剂膜保护图形。如果铝膜质量不好, 显影时易引起铝膜图形边缘钻溶, 以及侧向腐蚀, 导致铝叉指图形变坏, 从而使 SAW 器件中心频率漂移, 插入损耗和通带内波动增大, 严重损坏 SAW 器件性能。SAW 器件中心频率越高, 叉指换能器线条越细, 铝膜侧向腐蚀对 SAW 器件性能影响会越明显。研究结果表明, 采用电子束蒸镀的铝膜制作的铝叉指换能器, 图形侧向腐蚀和钻溶现象明显少于溅射铝膜。分析其原因, 可能在于: 电子束蒸镀技术制备铝膜时, 镀膜的真空度较溅射沉积时高三个数量级, 薄膜缺陷和杂质明显少于溅射膜, 此外, 前者晶粒明显大于后者, 而腐蚀通常发生在能量较高的晶界和缺陷上。晶粒大, 缺陷少, 都有利于降低铝膜的侧向腐蚀, 提高其抗腐蚀性能。上述现象表明, 电子束沉积的铝膜与 LiNbO₃ 基片之间有良好的结合力, 薄膜表面均匀, 晶粒相对较大, 更适宜于制备 SAW 器件, 尤其是高频 SAW 器件。图 3 为电子束蒸镀铝膜经过匀胶、曝光、显影和刻蚀后又指电极图形的 SEM 表面形貌图, 从图中可看出, 插指完好均匀, 没有侧向腐蚀现象。

3.2 SAW 滤波器及其性能

按本文第二部分的方法设计并制备了 SAW 滤波器, 实验中选择了电子束蒸镀法制备铝膜, 按设计结构在 128°YX LiNbO₃ 基片上制作了 920 MHz 叉指换

能器滤波器, 膜厚为 120 nm, 图形尺寸为 $2.0\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ 。其匹配前性能测试曲线分别如图 4~6 所示。

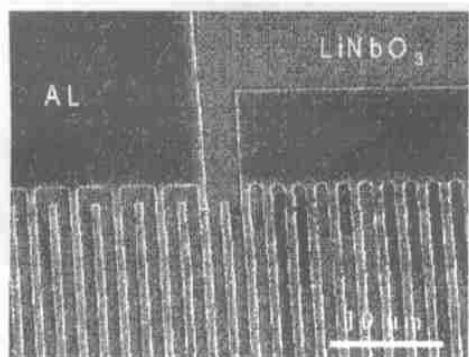


图 3 铝膜刻蚀后电极图形的 SEM 表面形貌像

Fig. 3 SEM image of interdigital transducer after etching

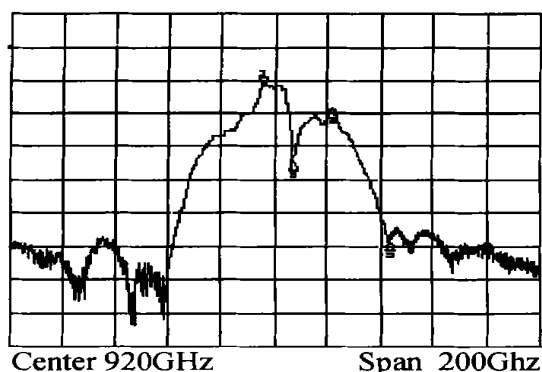


图 4 SAW 滤波器的频率特性

Fig. 4 Frequency responses of 920 MHz SAW filter

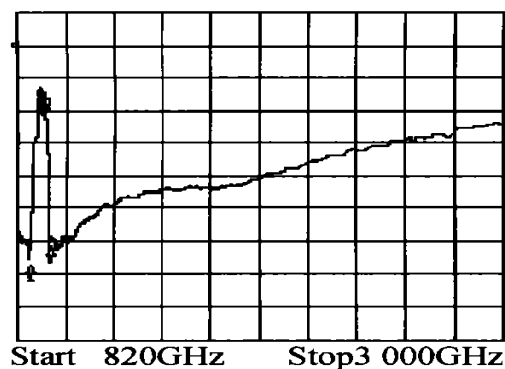


图 5 SAW 滤波器 0.82~3GHz 频率扫描图

Fig. 5 Frequency responses of 0.82~3GHz SAW filter

由图 4、5 可以看出, 器件中心频率为 920MHz, 与设计值一致。在 0.82~3GHz 范围内, 没有倍频 (如 1.84GHz, 2.76GHz) 波谐振峰的出现, 即没有高频信号的干扰。器件插损为 12dB, 带宽 20 MHz, 近带外抑制优于 35dB, 远阻带抑制优于 45 dB, 具有较好的频率响应特性。图 6 为滤波器的 Smith 圆图, 曲

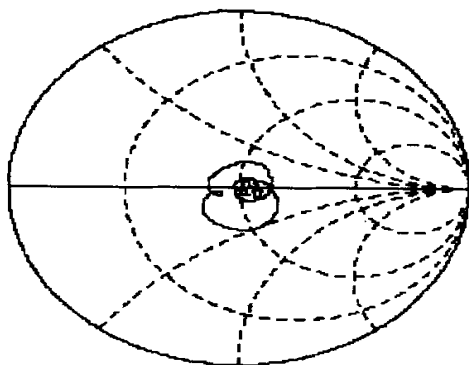


图 6 SAW 滤波器的 Smith 圆图

Fig. 6 Smith pattern of SAW filter

线的中心在 Smith 圆图中心, 说明在中心频率下换能器静电容引起的电纳分量被换能器声纳分量相互抵消, 换能器阻抗虚部为 0, 即又指换能器在通带内阻抗自匹配, 能量完全传输, 即表现为纯电阻特性, 阻抗为 56 Ω 。因此, 采用纵向耦合滤波器不仅可以去掉匹配网络, 将 6 个换能器制作在一个芯片上, 大大减少器件体积, 增加带外抑制的同时还能获得高的频率选择性。这也说明, 采用电子束蒸镀法制备的铝膜, 在叉指换能器制备过程中表现出良好的加工性能和声传播特性, 完全满足制备 SAW 器件的需要。将所设计 SAW 滤波器装入 Ericsson T18sc 移动电话中, 信号正常, 通话质量良好, 能够满足通讯质量的要求。

4 结论

电子束蒸镀的铝膜与 LiNbO_3 具有较好的结合力, 组织均匀, 抗腐蚀性强, 较之磁控溅射铝膜更适合用作高频 SAW 滤波器的制作。采用纵向谐振耦合设计, 可制出符合实际应用要求的 SAW 滤波器。

参考文献

- [1] Ahmed N. Surface Acoustic Wave Flow Sensor[A]. IEEE Ultrasonic Symp Proc [C]. 1985: 483-485.
- [2] 一之濑生, 尾上守夫, 坂本直志, 等. 声表面波器件及其应用[M]. 许昌昆, 孟秀林, 林江等译, 北京: 科学出版社, 1984. 1-2.
- [3] 李辉, 潘峰. 声表面波器件的研究进展[J]. 真空科学与技术, 2001, 21 (5): 376-380.
- [4] Dmitriev V F. Theory of an SAW Filter Operating in Weakly Coupled Resonance Modes [J]. Thch Phys 2003, 48 (2): 231-238.
- [5] Hikita M, Matsuura N, Yokoyama K, et al. SAW Front-end-Module for GSM-based Dual-band Cellular Phones with Direct-conversion Demodulation [A]. IEEE T Microw Theory [C]. 2002, 50 (11): 2629-2638.
- [6] Roh Y, Lee Y, Lee S. Development of a New Design Technique for Surface Acoustic Wave Ladder Filters[J]. Jpn J Appl Phys, 2001, 40 (8): 5173-5179.

(下转第 36 页)

图1为系统组成框图。

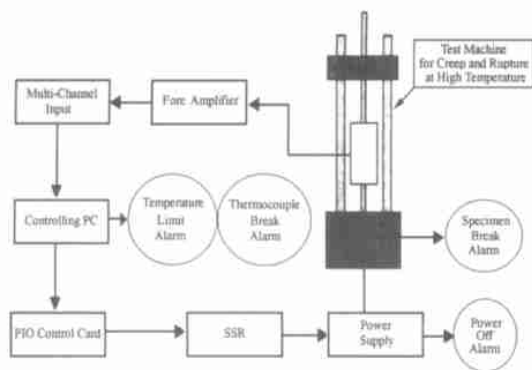


图1 系统原理示意图

Fig. 1 The scheme of computer system for temperature control

其中计算机控制系统包含计算机、PIO 插件板、固态继电器组、A/D 转换板、测温模块、温度控制和采集软件、断样报警系统。

试验机系统包含蠕变/持久试验机架、高温炉(三段炉丝绕组)、热电偶、温度冷端补偿系统、断样报警传感器。

2.2 系统功能

(1) 对三台蠕变试验机进行炉温闭环控制;

(2) 中文窗口界面, 控制参数通过键盘输入, 或鼠标选择确定, 试验结果可存盘或打印;

(3) 每台试验机有独立图形窗口, 显示各炉丝设定温度和测量温度, 并可显示试验全过程温度曲线, 曲线的温度范围和时间范围可调;

(4) 有多种蜂鸣报警信号: 温度超上限、下限, 断电, 试样断, 定时试验时间到, 加荷时间到, 热电偶断;

(5) 试验过程中可人为终止试验, 或再次启动, 计算机可以保留试验参数, 允许继续试验。

2.3 系统特点

(1) 系统的主要优点是控制稳定, 炉温上升和梯度调节快而且准确, 比手工调节提高了效率;

(2) 系统硬件中选择了1500V 隔离保护的前置信号放大器; 采样板输入端增加了对地滤波; 从而保证系统能长期安全运行、输入信号可靠;

(3) 系统软件中加入了数字滤波, 保证数据的准确, 同时还增加了定时启动功能, 以防因机器死机而导致停止采样和控制;

(4) 试验中如果热电偶断, 在发出报警信号的同时, 可继续恒定温度, 保证试验可继续进行;

(5) 在加荷后, 试验可自动独立进行, 在试验过程中如果没有异常, 不需要人工操作;

(6) 系统温度控制符合航标 (HB5150-96、

HB5151-96) 对温度波动的要求和温度梯度要求。

3 运行考察

在系统调试中和完成后, 对系统的各项功能分别进行了模拟试验, 如不同温度段的加热、保温, 设定不同的采样时间间隔, 人为造成超温, 断偶, 断电, 试样断等, 观察系统的反应是否符合试验要求。短时间要求达到后, 又进行了长时间的连续运行, 最长试验时间为500h。在长时试验中, 温度稳定, 工作正常。

4 结论

该系统是对采用计算机全数字方式进行蠕变/持久控温、测温和试验的一个研究, 从系统的试验结果看, 基本达到了设计预期目标, 可以做到完全的计算机自动化, 如果出现设备故障, 可以在任何时候终止试验。不需要人工调节温度, 不需要人工测量和记录温度, 对大炉膛工况, 可以在保证温度波动和梯度符合标准的前提下, 在较短的时间内平稳地达到试验温度, 提高了工作效率。通过500h 考核试验, 证明系统稳定, 具有一定的抗干扰能力。

参考文献

- [1] Evangelos Petroutsos [美]. Visual Basic 5 从入门到精通 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.
- [2] 谢剑英. 微型计算机控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

收稿日期: 2002-12-20; 修订日期: 2003-02-08

作者简介: 冯全 (1954-), 女, 工程师, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱 (100095)。

* * * * *

(上接第42页)

- [7] Otsuka k, Funami M, Ito M, Katsuda H, et al. Design and Evaluation of $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ Surface Acoustic Wave Filter[J]. Jpn J Appl Phys, 1995, 34: 2646- 2649.
- [8] Slobodnik A J. The Temperature Coefficient of Acoustic Wave Velocity and Delay on Lithium Niobate, Lithium Tantalate, Quartz and Tellurium Dioxide [A]. Physical Research Papers N-447 [C]. AFC RL, 1972: 72- 82.

基金项目: 国家高技术 (863) 计划课题 (2002AA325040) 和北京市科技项目 (H011510100111)。

作者简介: 李冬梅 (1966-), 女, 副教授, 博士研究生, 主要从事声表面波材料与器件、多层膜微结构与性能等的研究, 联系地址: 北京市清华大学材料系 (100084)。