

# 基于 AlN 轮廓模式矩形盘谐振器的研究

郑升灵, 李 丽, 要志宏, 李宏军, 李 丰

(中国电子科技集团公司 第十三研究所 十六专业部, 河北 石家庄 050051)

**摘 要:**介绍了一种微型化体声波谐振器的理论模型和实作结果,采用微电子和微机械加工技术,实现了一种上、下电极覆盖压电 AlN 的“三明治”空气腔悬梁结构。该谐振器具有微型化,高品质因数,低成本的特点,实作的谐振器频率约 20 MHz,品质因数为 800,机电耦合系数约 0.5%。

**关键词:**氮化铝(AlN);轮廓模式;体声波;矩形盘谐振器

**中图分类号:**TN75 **文献标识码:**A

## Study on the Resonator of AlN Contour-mode Rectangle Plate

ZHENG Shengling, LI Li, YAO Zhihong, LI Hongjun, LI Feng

(The Sixteen Dept., 13th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** This paper reports on theory modeling and experimental verification of a miniature resonator of bulk acoustic wave. An AlN sandwiched air-cavity cantilever structure between a bottom electrode and a top electrode is fabricated by using the microelectronic and micromechanical technology. The resonator has the features of miniature, high  $Q$  and low cost. The resonant frequency of the fabricated resonator is 20 MHz,  $Q$  is about 800 and the electro-mechanical coupling coefficient is about 0.5%.

**Key words:** aluminum nitride(AlN); contour-mode; bulk acoustic wave; rectangle plate resonator

### 0 引言

随着无线通信的发展,有限的信道资源日益拥挤,高性能的窄带器件成为关键,而谐振器起着决定作用。一直以来,陶瓷谐振器由于易加工及温度稳定性高,从而占据着射频领域大部分市场;随着小型化、低成本化的需求,声表面波谐振器和 Avago 公司的声体波(FBAR)谐振器<sup>[1]</sup>的广泛应用为无线通讯带来了新的革命。但近几年,随着微电子的发展和微机械的工艺逐渐趋于成熟,一种基于该技术应运而生的微型、低成本、高品质因数  $Q$  值的轮廓模式压电谐振器成为研究的热点。它具有陶瓷、声表谐振器无可比拟的优点:工作频率范围更宽,更高的  $Q$  值,体积更小,更重要的是可与 IC 等工艺兼容,实现与其他器件一体化集成。

本文介绍了基于轮廓模式谐振的一种典型结构原理和 Butterworth Van-Dyke(BVD)<sup>[2]</sup>分析方法,利用射频反应溅射法进行了高质量的压电薄膜制备,采用表面硅工艺成功制作出约 20 MHz 的矩形

盘谐振器,并计算分析了谐振器的重要表征参数机电耦合系数( $k^2$ )和  $Q$  值。

### 1 谐振器模型

#### 1.1 工作原理

该微型谐振器主要由输入、输出电极和中间夹持压电薄膜组成的“三明治”结构,如图 1 所示, $L$  为长度, $W$  为宽度, $T$  为厚度<sup>[3]</sup>。

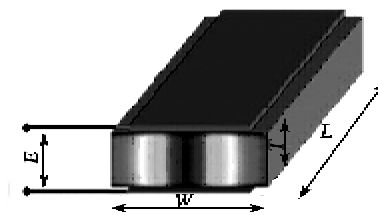


图 1 结构图

当通过在上、下电极厚度( $T$ )方向外加一电场  $E$  时,弹性电介质内部正负电荷的中心相对位移而进行极化,通过压电耦合系数  $d_{31}$  转换产生横向的质子运动,从而引起形变形成轮廓伸缩模式的振动,此模式的谐振器称盘状模式谐振器。这种矩形盘状伸

收稿日期:2013-03-28

作者简介:郑升灵(1976-),男,江西人,高级工程师,主要从事微型单片压电体声波的谐振、滤波等技术研发与制作研究。

缩振动主要激励起两种模式,即长度伸缩和宽度伸缩振动,两种谐振模式同时存在,如图2所示。

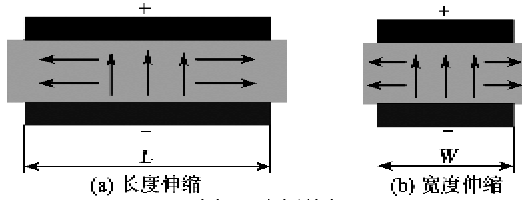


图2 原理图

长度伸缩的振动谐振频率<sup>[4]</sup>为

$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_{eq}}{\rho_{eq}}} \quad (1)$$

式中: $E_{eq}$ 为等效弹性模量; $\rho_{eq}$ 为等效体密度。式(1)表明谐振频率主要取决于 $L$ 、 $E_{eq}$ 、 $\rho_{eq}$ ,而与薄膜的厚度无关。宽度伸缩振动即把式(1)中长度 $L$ 换成宽度 $W$ ,就可得到宽度振动频率。

若要获得较低的谐振频率,通过增大 $L$ 或 $W$ 可得,特别是单一芯片上可设计多个不同的 $L$ 或 $W$ ,实现了频率的多样性,而类似的FBAR谐振器主要由压电薄膜的厚度决定器件的频率,相对单一。更重要的是通过电极尺寸的特殊设计,可获得高次泛音的谐振,频率可达10 GHz,覆盖了FBAR常规的设计频段,所以从适用频率范围、成本、灵活性来说,压电轮廓模式谐振器将会成为最有发展的谐振器技术,它的相关应用会越来越广泛。

### 1.2 谐振分析

体声波谐振器的分析方法有Mason模型、Modified Butterworth Van-Dyke(MBVD)模型及有限元压电分析等。下面介绍一种简单、最常用的谐振点附近近似等效电路的Butterworth Van-Dyke(BVD)模型来分析“三明治”结构的谐振特性,是MBVD的简化模型,它完整解释了压电生参数,具有实际意义,如图3所示。图中, $C_0$ 为静态电容, $C_m$ 、 $L_m$ 、 $R_m$ 分别为与机械振动相关的动态电容、电感和损耗<sup>[2,5]</sup>。

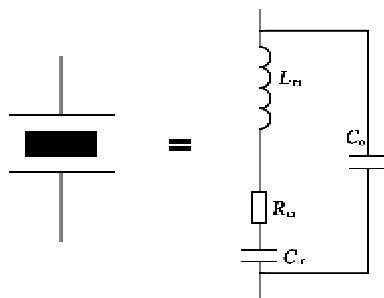


图3 BVD等效电路

矩形盘状结构,长度伸缩模式下BVD表达式为

$$C_0 = (\epsilon_{zz}^S A) / T \quad (2)$$

$$C_m = \frac{8}{\pi^2} k_t^2 C_r \quad (3)$$

$$L_m = \frac{L^3}{8 C_0 k_t^2} \frac{\rho_{eq}}{E_{eq}} \quad (4)$$

$$R_m = \frac{\pi L}{8 C_0 k_t^2 Q_s} \sqrt{\frac{\rho_{eq}}{E_{eq}}} \quad (5)$$

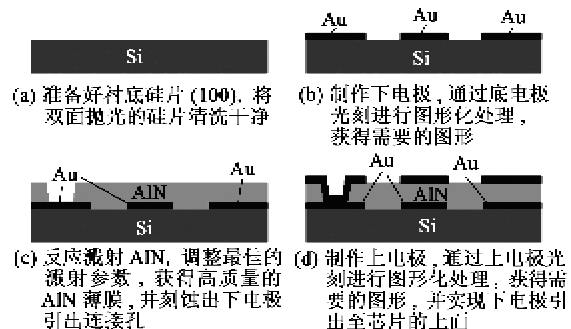
式中: $\epsilon_{zz}^S$ 为夹持介电常数; $A$ 为夹持面积; $Q_s$ 为串联谐振品质因数。

给定谐振器的物理尺寸,能得出对应的 $C_0$ ,而 $C_m$ 、 $L_m$ 、 $R_m$ 主要与 $k_t^2$ 、 $E_{eq}$ 、 $\rho_{eq}$ 等相关,这些参数的大小取决于压电和电极材料的特性。特别是 $k_t^2$ 和 $Q$ 与压电薄膜的质量密切相关,要想得到低的 $R_m$ ,必须获得高 $Q_s$ 、大的 $k_t^2$ ,则需要高 $C$ 轴的002择优取向的薄膜。表征 $C$ 轴取向的重要参数之一是薄膜XRD测试强度下的半高宽值(FWHM),半高宽值越小,薄膜质量越好, $Q_s$ 值越高, $k_t^2$ 越大。

由于AlN具有优良的声学性能和物理性能,如高声速、热导率高、化学稳定性好等,所以我们选用AlN作为压电薄膜材料。声学属性为:声速11 000 m/s,声阻抗 $3.7 \times 10^7$  kg/m<sup>2</sup>s,弹性模量 $3.95 \times 10^{11}$  Pa,密度3 260 kg/m<sup>3</sup>。因制作AlN工艺差异,得到的材料参数可能有差异,所以一般先设计合理的物理尺寸。设计一种 $T$ 为1  $\mu$ m, $L$ 为200  $\mu$ m, $W$ 为50  $\mu$ m的矩形盘,然后制作器件进行测量,从测量数据中提取准确的材料参数及 $k_t^2$ 和 $Q$ 。

### 2 制备流程

针对给定的物理尺寸,制作了适合工艺的芯片版图,采用半导体工艺结合微机电系统(MEMS)技术,实现了器件的制作,其基本工艺流程如图4所示<sup>[6]</sup>。



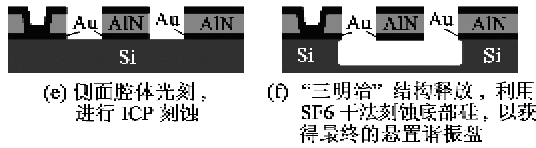


图 4 基本流程图

### 3 实践结果

实际制作的图片如图 5 所示:

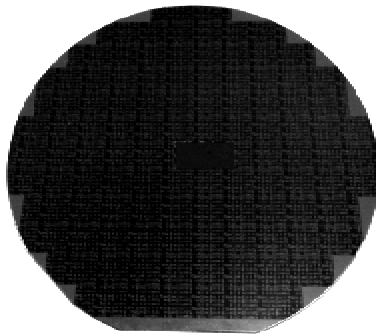


图 5 图片图

通过对器件进行测量和参数的提取<sup>[7]</sup>,表 1 为长度伸缩模式典型的 BVD 谐振参数。表中,  $f_s$  为串联谐振频率,  $f_p$  为并联谐振频率。

表 1 谐振参数

$f_s/\text{MHz}$	19.50	19.40	20.28
$f_p/\text{MHz}$	19.54	19.44	20.33
$C_o/\text{pF}$	0.65	0.53	0.64
$L_m/\text{mH}$	29.107	32.535	19.237
$C_m/\text{fF}$	2.287 5	2.068 0	3.203 0
$R_m/\Omega$	4 460	5 250	3 062

$k_t^2$  和  $Q$  值<sup>[2]</sup>分别为

$$k_t^2 = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (6)$$

$$Q_s = \frac{f_s}{2} \left| \frac{dZ/Z}{df} \right|_{f_s} \quad (7)$$

$$Q_p = \frac{f_p}{2} \left| \frac{dZ/Z}{df} \right|_{f_p} \quad (8)$$

式中:  $Z$  为谐振阻抗特性;  $Q_p$  为并联谐振品质因数。

我们希望同时获得高的  $k_t^2$  和  $Q_s$ , 这样更具应用价值。为此, 用优值  $FOM = k_t^2 Q_s$  表示谐振器的优劣。研制的谐振器约为 0.5%,  $Q_s$  值约 800, FOM 值约为 4, 单胞平面尺寸为  $350 \mu\text{m} \times 350 \mu\text{m}$ 。图 6 为实测曲线。

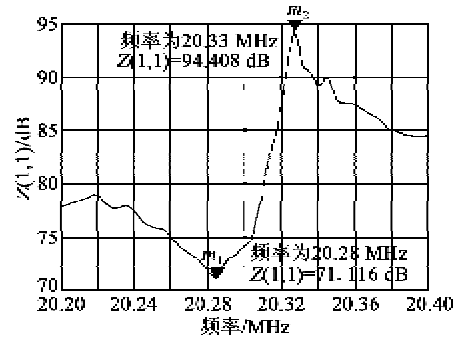


图 6 实测曲线

### 4 结束语

本文阐述了基于 ALN 轮廓模式盘状谐振器的原理、方法及应用价值。通过一种频率约为 20 MHz 的谐振器的实际制备、测试分析及提取谐振器参数的过程, 让我们更深入地掌握了矩形盘谐振器设计特点和制备流程, 为进一步应用化的设计提供了实用化分析方法。未来我们的工作将致力于研究如何提高  $Q$  值和机电耦合系数上, 特别是研究制备高质量的 ALN 膜, 实现更高性能、更可靠地谐振器, 以满足市场需求的小型化谐振、滤波相关产品。

### 参考文献:

- [1] 金浩. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [2] 张亚非, 陈达. 薄膜体声波谐振器的原理、设计与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2011.
- [3] RINALDI M, ZUNIGA C, ZUO Chengjie, et al. Super-high-frequency two-port AlN contour mode resonators for RF applications[C]//S. I.; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(1): 38-45.
- [4] YAN Le, PANG Wei, EUN S K, et al. Single-chip multiple-frequency VHF low-impedance micro piezoelectric resonators[C]//S. I.; IEEE Electron Device Letters, 2006, 27(14): 246-248.
- [5] ZUO Chengjie, SINHA N, PIAZZA G. Very high frequency channel-select MEMS filters based on self-coupled piezoelectric AlN contour-Mod resonators [J]. Sensors and Actuators A, 2010, 160: 132-140.
- [6] RINALDI M, ZUNIGA C, PIAZZA G. Ultra-thin-film AlN contour-mode resonators for sensing application [C]//S. I.; 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceeding, 2009: 714-717.
- [7] RINALDI M, ZUNIGA C, PIAZZA G. Modify butterworth-van dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system[C]//S. I.; 2000 IEEE Ultrasonics Symposium, 2000: 863-868.