

# 声学梳谱信号产生器件的探索

朱昌安, 周 勇, 穆晓华, 郑泽渔, 徐 阳, 司美菊, 田亚睿, 李 晖

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

**摘 要:**介绍了工作频率在约为 10 GHz 的 UHF 频段, 可产生梳谱信号的高次谐波声体波谐振器(HBAR)的原理、设计和制作工艺方法。设计了  $\text{Au/Cr/ZnO/Au/Cr/YAG/Cr/Au/ZnO/Cr/Au}$  双端结构的谐振器, 试验样品在谐振频率 2.240 137 GHz 的品质因数(Q)值达到 23 000。进一步开展氧化锌成膜工艺技术的研究, 实现对 HBAR 设计修正, 提升器件的 Q 值。

**关键词:**声学; 梳谱信号; 高次谐波声体波谐振器; 压电换能器; 氧化锌薄膜; Q 值

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

## Exploration of the Acoustical Comb-spectrum Signal Generator

ZHU Chang'an, ZHOU Yong, MU Xiaohua, ZHENG Zheyu,

XU Yang, SI Meiju, TIAN Yarui, LI Hui

(26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The principle, design and fabrication process of the high overtone bulk acoustic resonator (HBAR) which can generate the comb-spectrum signal with the operating frequency of about 10 GHz at UHF band are presented in the paper. Also, the resonator with  $\text{Au/Cr/ZnO/Au/Cr/YAG/Cr/Au/ZnO/Cr/Au}$  two-port structure is designed, and the Q value of experimental sample is more than 23 000 at the resonance frequency of 2.240 137 GHz. The future work will focus on ZnO film growth, HBAR design modification and Q value improvement.

**Key words:** acoustics; comb-spectrum; high overtone bulk acoustic resonator; piezoelectric transducer; ZnO thin film; Q value

### 0 引言

梳谱信号是信号处理的重要组成部分, 传统的梳谱信号采用阶跃恢复二极管(SRD)激励。20 世纪 80 年代, K. M. Lakin 等<sup>[1]</sup>实现了在吉赫兹频率范围内的高品质因数(Q)值高次谐波声体波谐振器(HBAR), 它利用 HBAR 产生高频梳谱信号。HBAR 是声体波换能器与声谐振腔构成的复合结构器件, 属于无源器件, 其具有高激励效率的压电换能器, 激励工作频率在 UHF~10 GHz 等频率间隔(1~100 MHz)的梳谱信号, 信号带宽可达倍频程, Q 值能达到  $10^4 \sim 10^5$  量级。

HBAR 通过信号处理技术得到低相噪、高稳定的微波信号源, 该方案减少了倍频和混频的过程, 简化频率合成的设计方案, 有利于信号源的体积小化和低相位噪声的实现。在小型化和相噪要求较高的领域中有广泛的应用前景, HBAR 还可作滤波器

和传感器等应用<sup>[2-3]</sup>。

### 1 HBAR 原理及结构

#### 1.1 工作原理

HBAR 由谐振腔基片及其上的压电换能器组成, 示意图如图 1 所示。压电换能器激励的声波在压电薄膜厚度方向产生伸缩振动, 声波能量注入到谐振腔基片中, 当谐振腔基片有足够高 Q 值时, 在低损耗谐振腔基片内形成驻波, 整个结构谐振。因基片厚度远大于声波波长, 利用压电换能器可在两

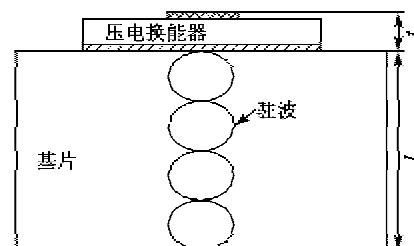


图 1 HBAR 原理示意图

收稿日期: 2015-08-10

作者简介: 朱昌安(1966-), 男, 四川省邻水县人, 高级工程师, 主要从事声体波薄膜器件及组件等的研究。

平行面间发射和提取基片基频响应的高次谐波频率。只要满足基片表面平行间隔为  $\lambda/2$  ( $\lambda$  为声波长) 整数倍的频率都有高  $Q$  值的谐振频率响应。

HBAR 的谐振频率  $f$  近似表示为

$$f = \frac{nv_s}{2(l+t)} \quad (1)$$

式中:  $v_s$  为基片材料厚度方向的纵波声速;  $l$  为基片的厚度;  $t$  为换能器的厚度。

由式(1)可知, 谐振频率的间隔与谐振腔基片材料及厚度、换能器厚度有关。

对于一维平面波纯模边界条件简单的谐振器阻抗, 不足以描述金属电极厚度及结合损耗, 考虑压电层是由两个声端和一个电端组成的三端网络, 对任意负载下电端阻抗可描述为

$$Z = \left( \frac{1}{j\omega C} \right) \left( 1 - k^2 \frac{\tan \varphi Z_m}{\varphi} \right) \quad (2)$$

$$Z_m = \frac{(Z_r + Z_L) \cos(2\varphi) + j \sin(2\varphi)}{(Z_r + Z_L) \cos(2\varphi) + j(Z_r + Z_L) \sin(2\varphi)} \quad (3)$$

式中:  $Z_r$ 、 $Z_L$  为负载阻抗与压电薄膜阻抗的归一化阻抗;  $\varphi = \theta/2$ ,  $\theta = kd$  为压电膜的相位跨越。

HBAR 的  $Q$  值由低损耗的谐振腔基片决定, 有

$$Q = \frac{f}{2} \frac{d\phi_z}{df} \quad (4)$$

式中  $\phi_z$  为 HBAR 阻抗的相位。

研究表明, 有载品质因数  $Q_L$  和无载品质因数  $Q_0$  与插入损耗 ( $IL$ ) 有如下关系:

$$\frac{Q_0}{Q_L} = \frac{1}{1 - 10^{-IL/20}} \quad (5)$$

根据式(5)可知, 要想获得高的  $Q_L$  值, 需降低 HBAR 的插入损耗。

## 1.2 HBAR 结构

在报道的 HBAR 研究工作中, 主要采用单端结构(见图 1)和双端结构(见图 2)。

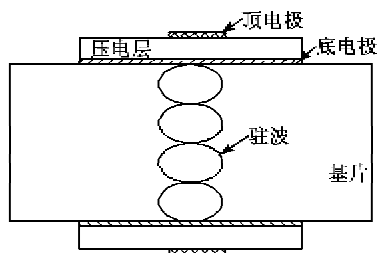


图2 双端 HBAR 原理示意图

HBAR 的基片材料一般有蓝宝石、钇铝石榴石(YAG)、石英、硅片、铌酸锂等, 基片厚度一般为几百微米, 可实现的谐振频率间隔一般 1~100 MHz。

压电换能器是由底电极、压电层和顶电极组成的叠层复合结构。底电极和顶电极的材料主要使用 Al、Ni、Mo、Au 和 Pt 等金属薄膜。压电层的典型材料有氧化锌(ZnO)薄膜、氮化铝(AlN)薄膜和铌酸锂单晶等材料。表 1 为常用压电膜、基片和电极材料参数表。

表 1 常用压电膜、基片和电极材料参数表

材料	$\rho/$ ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	$C_{33}/$ (GN/ $\text{m}^2$ )	$V_L/$ (km/ $\text{s}^2$ )	$\rho V_L/$ ( $10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )	$k_t^2$
压电薄膜					
ZnO	5.67	204.30	6.00	34.05	0.08
AlN	3.26	354.64	10.43	34.00	0.08
SiO <sub>2</sub>	2.65	97.00	6.05	16.03	
基片					
Si	2.33	186.50	8.94	20.84	
YAG	4.55	—	8.55	38.91	
Al	2.70	111.30	6.42	17.33	
Ag	10.60	—	3.60	38.16	
Ni	8.97	—	5.89	52.83	
电极					
Mo	10.00	—	6.30	63.0	
Au	19.49	220.20	3.36	65.49	
Pt	21.50	—	4.02	86.43	
W	18.71	512.00	5.23	97.85	

压电换能器的制备是 HBAR 的关键, 主要有以下 3 种方法。

1) 在基片上依次制备底电极、压电膜、顶电极。

2) 在基片和 LiNbO<sub>3</sub> 单晶材料上制备键合电极, 通过金键合将基片和 LiNbO<sub>3</sub> 单晶材料键合在一起, 再减薄 LiNbO<sub>3</sub> 单晶层到需要的厚度, 最后制备顶电极。

3) 在 LiNbO<sub>3</sub> 基片材料上制备金属电极, 并对 LiNbO<sub>3</sub> 单晶进行预定深度的离子注入; 通过分子键合技术将基片和 LiNbO<sub>3</sub> 金属电极面键合, 分离未离子注入的单晶材料层, 再进行热处理, 通过化学抛光获得需要的压电单晶厚度, 最后制备上电极。

## 2 设计与试验

### 2.1 设计方案

结合声体波延迟线的研究工作和 HBAR 换能器制备要求, HBAR 芯片的设计方案采用双端结构(见图 2), 即 Au/Cr/ZnO/Au/Cr/YAG/Cr/Au/ZnO/Cr/Au 结构。这种结构无需特殊的加工工艺及专用设备, 采用方法 1 即可实现。

### 2.2 基片

HBAR 采用高  $Q$  值的材料作为基片, 适当增加

其厚度可使 HBAR 具有高的  $Q$  值,但须考虑基片的厚度增加会使 HBAR 的机电耦合系数减小;且基片达到一定厚度,HBAR 的  $Q$  值趋向定值。同时,在高频工作下电极的影响不能忽略,电极的厚度和声阻抗也会影响 HBAR 的  $Q$  值和机电耦合系数。所以应选取适当的基片厚度,同时调整电极的材料和厚度,使 HBAR 的  $Q$  值和机电耦合系数满足设计要求。

HBAR 使用要求谐振频率的间隔越大越好,有利于信号的分离,谐振频率的间隔越大,基片的厚度将越薄,其自身的加工工艺难度也越大,同时增加 HBAR 换能器电极及压电薄膜的制作和芯片安装的难度。因此,选择基片厚度应兼顾频率间隔等因素折中考虑。

对于 HBAR 有大量的谐振频谱响应,谐振频率的间隔与谐振腔基片声传输时间成反比。采用延迟 50 ns 的腔体,谐振频率间隔为 10 MHz,要达到 S 波段,至少需要高达 400 次以上的谐波。

本试验 HBAR 选用谐振腔基片为 YAG,基片尺寸为  $40\text{ mm} \times 32\text{ mm} \times 0.43\text{ mm}$ ;换能器制备采用光刻技术方案,芯片尺寸  $6\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 。

### 2.3 换能器

换能器的作用是激励和提取谐振信号,换能器的各层膜质量和孔径的大小直接影响声电或电声转换的转换效率,转换效率越高,失配越小,能量损失越小,插入损耗越低。

HBAR 的插入损耗包括基片有带来的声衰减、换能器耦合  $Q$  值、平行度差、衍射等引起的损耗。基片材料和厚度、加工和 HBAR 换能器设计确定后,声衰减、换能器耦合  $Q$  值、平行度差的影响是固定的;而衍射是影响  $Q$  值的主要因素,其源于压电场能量进入不希望的模式和跨越换能器孔径相位发生变化。不同形状的换能器孔径需要确定最佳电极尺寸和降低衍射损耗的影响,同时考虑晶体各向异性、两平面的负载等影响,以期望获得低损耗和高  $Q$  值的 HBAR。

本试验 HBAR 采用的换能器孔径为  $\varnothing(0.15 \sim 0.35)\text{ mm}$  正方形电极。结合试验工作,对换能器孔径进行修正和优化,以确定最佳的有效面积。

### 2.4 氧化锌薄膜

HBAR 的压电换能器是由底电极、氧化锌和顶电极组成的叠层复合结构。氧化锌压电薄膜是 HBAR 中实现电声、声电转换的关键。氧化锌是用

溅射方式在基片及底电极端面上生长的压电薄膜。

氧化锌成膜质量将直接影响 HBAR 的性能,氧化锌压电薄膜的溅射生长受基片温度、靶基片距离及衬底金膜的质量、(111)面取向、缺陷密度、表面光洁度以及溅射功率、气氛、气压等多种因素影响。控制氧化锌压电薄膜的成膜条件,即使氧化锌压电薄膜的厚度、附着力、 $C$  轴择优取向、组成成分、晶粒粒度、内应力、体电阻率、晶界及表面形貌具有较好的一致性、重复性。按 S 波段设计 HBAR 的氧化锌厚度选择在  $1.2 \sim 1.5\text{ }\mu\text{m}$ ,并依据电极厚度适当修正压电薄膜的厚度。

### 2.5 工艺流程

根据 HBAR 设计,实现 HBAR 压电换能器双端的准直方法采用光刻工艺,制作工艺流程如图 3 所示。

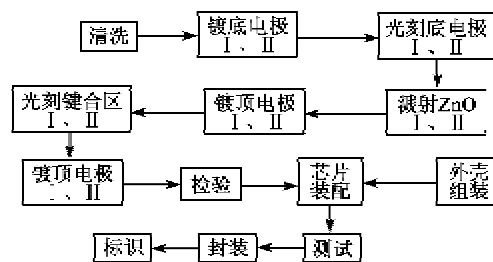


图3 工艺流程图

工艺方法是光刻制作换能器的图形。电极准直精度由曝光机的精度保证,光刻技术具有换能器图形精确控制的优点,便于对设计修正,但工艺过程复杂,周期长。

### 3 试验结果

根据设计方案和制备工艺流程,开展 HBAR 的研究试验及工艺试验工作。将制作好的 HBAR 芯片按照图 4 结构进行装配。

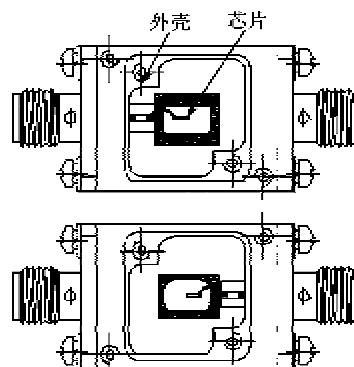


图4 HBAR 装配示意图

HBAR 的换能器制作完成后,要采用探针对 HBAR 换能器的单端时域回波信号进行检测,如果

出现单端或两端信号异常,则分析存在的问题,并回收基片,重新开始 HBAR 制作,直至探针检测合格后进行基片划片,最后进行 HBAR 性能检测。

图 5 为试验制作的 HBAR 频率谱测试曲线。图 6 为 HBAR 样品的 Q 值测试结果,初次试验样品在谐振频率 2.240 137 GHz 时,其 Q 值达到 23 000。

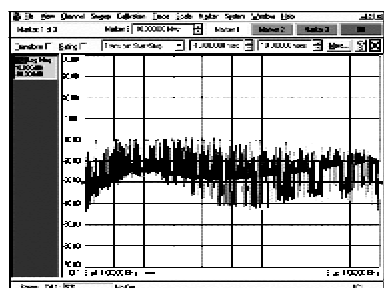


图 5 HBAR 的频谱响应

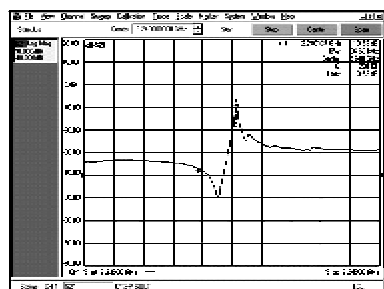


图 6 HBAR 的 Q 值

#### 4 结束语

本文采用光刻工艺研究 HBAR 的设计与制作技术,在 1.0~4.5 GHz 内获得了谐振频率响应。光刻工艺实现双端换能器的准直,满足设计要求;而存在的问题是压电膜的生长,同样的工艺条件在基片两端制备氧化锌薄膜在时域特性上反映出来的特性差别较大,对频率精度要求很高的 HBAR 器件,需要进行可重复的成膜技术研究,只有达到稳定的成膜条件,才能更好地评价设计的准确性,同时有利于对器件设计的修正,制备更高 Q 值的 HBAR。

#### 参考文献:

- [1] LAKIN K M, KLINE G R, KETCHAM R S, et al. Thin resonators technology[C]//S. I., IEEE International Frequency Control Symposium, 1987.
- [2] BALLANDRAS S, BARON T, LEBRASSEUR E, et al. High overtone bulk acoustic resonators: application to resonators, filters and sensors[C]//Nantes France, Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference, 2012.
- [3] PUJOLAT M, REINHARDT A, DEFAÏ E, et al. Large  $Q \times f$  product for HBAR using smart cut transfer of  $\text{LiNbO}_3$  thin layers onto  $\text{LiNbO}_3$  substrate[C]//S. I., IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2008.
- [3] 刘玲玲,田文杰,张福学.压电石英加速度传感器稳定性研究[J].压电与声光,2007,29(1):45-46.  
LIU Lingling, TIAN Wenjie, ZHANG Fuxue. Study on the stability of piezoelectric quartz accelerometer[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2007, 29(1): 45-46.
- [4] MASAOKI H, TAKASHI K, KENGOU N. Behavior of bolt force changes of flanged connections under thermal loading[C]//France; Proceedings of the Asme Pressure Vessels and Piping Conference, 2013.
- [5] MUHAMMAD A, KAMRAN A, KHAN J. Performance of a gasketed bolted flange joint under combined structural and thermal transient loading (taking bolt scatter into consideration): fea approach[C]//Prague: Proceedings of the Asme Pressure Vessels and Piping Conference, 2009.
- [6] 程冰尧.可换刀具压电测力仪的研制[D].大连:大连理工大学,2013.
- [7] 马飞.姿控发动机推力测试系统温度影响研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- [8] 作宗华.姿控火箭发动机推力测试系统温度影响研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [9] GAO Y, QIU Y, CHEN H. Four-channel fiber loop ring-down pressure sensor with temperature compensation based on neural networks[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(8): 1796-1799.
- [10] PRAMANIK C, ISLAM T, SAHA H. Temperature compensation of piezoresistive micro-machined porous silicon pressure sensor by ANN[J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(2/4): 343-351.
- [11] 孙艳梅,苗凤娟,陶佰睿.基于 PSO 的 BP 神经网络在压力传感器温度补偿中的应用[J].传感技术学报, 2014(3): 342-346.  
SUN Yanmei, MIAO Fengjuan, TAO Bairui. The application of BP neural network based on PSO algorithm to pressure sensor temperature compensation [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014 (3): 342-346.
- [12] 樊晓宇,王玉宝,卢国伟,等.基于遗传模拟退火算法的压力传感器温度补偿系统[J].传感技术学报, 2008 (9): 1532-1535.  
FAN Xiaoyu, WANG Yubao, LU Guowei, et al. Temperature compensation system of pressure sensor based on genetic and simulated annealing algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008 (9): 1532-1535.
- [13] 马庆芳.实用热物理性质手册[M].北京:中国农业机械出版社,1986.

(上接第 998 页)