

# 基于 AlN 压电层的薄膜体声波谐振器\*

胡光<sup>†</sup> 张凯 叶芸 吴雯 刘婵 顾豪爽

(湖北大学物理学与电子技术学院 湖北省铁电压电材料与器件重点实验室, 武汉 430062)

**摘要:** 以 AlN 薄膜为压电层,采用体硅微细加工工艺制备了背空腔型结构薄膜体声波谐振器.材料测试结果表明,在优化溅射工艺下沉积的 AlN 薄膜具有(002)择优取向及良好的柱状晶结构.扫描电镜表征证实所制得的空腔背部平滑且各向异性较好.用网络分析仪测试可知,最终所制得的谐振器具有较好的频率特性:谐振频率为 2.537GHz,机电耦合系数为 3.75%,串、并联品质因数分别为 101.8 和 79.7.

**关键词:** 薄膜体声波谐振器; 氮化铝; 择优取向; 空腔

**PACC:** 4260D

**中图分类号:** TN405

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)S0-0591-04

## 1 引言

随着无线通信系统的迅速发展,市场对于高性能的射频振荡器、滤波器和双工器的呼吁越来越高.与传统的微波陶瓷谐振器和表面声波(SAW)谐振器相比,薄膜体声波谐振器(FBAR)因具有体积小、插损低、功率容量大、工作频率高等优势而倍受关注<sup>[1~3]</sup>.

压电材料的选择及成膜质量是谐振器制作的关键,近年来,ZnO 和 AlN 薄膜成为研究的热点. AlN 材料因其具有宽带隙、高击穿电压、高声速、高的机电耦合系数等优点而成为制作谐振器的优选材料<sup>[4]</sup>.谐振器所用 AlN 压电薄膜的成膜质量,主要指(002)面(*c*轴)择优取向质量,受沉积工艺影响较大<sup>[5]</sup>,较难控制.

为提高谐振器的品质因数,需要制作特殊结构,以利用电极与外界声阻抗失配将声波限制在压电材料内的机理,减小声能向衬底的泄漏.目前研究的 FBAR 结构主要归为两种:一种是在电极-压电层-电极结构下制作空腔,形成金属-空气反射界面;另一种是制作由多层高、低阻抗薄膜形成的布拉格反射层<sup>[6]</sup>.布拉格反射层型因采用了多层结构致使器件厚度过高,不利于与其他射频芯片的集成.空腔型,以 Agilent 公司的 Ruby 等人<sup>[7]</sup>为首,多采用填充牺牲层然后移除的表面微加工工艺<sup>[7]</sup>,工艺过程较为繁冗,加工难度高,因此,有必要将流程改为较简单的背部刻蚀空腔型结构进行研制.

本文利用射频磁控反应溅射法,通过优化溅射

条件,沉积出适于器件所需要的 *c* 轴择优取向 AlN 薄膜;在此基础上,采用体硅微加工工艺,成功制备了背部空腔型薄膜体声波谐振器,并分析了其频率特性.

## 2 实验

### 2.1 AlN 薄膜的沉积及表征

采用射频磁控反应溅射制备 AlN 压电薄膜,优化的溅射沉积条件如表 1 所示.其中 Ti 用作电极的缓冲层,以增强电极与衬底的吸附.

表 1 AlN 薄膜溅射工艺参数

Table 1 Parameters of AlN films deposited under optimization

参数	数值
靶材	Al(99.999%)
基底	Pt/Ti/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub> /Si
靶基距	3cm
本底真空	4 × 10 <sup>-4</sup> Pa
射频功率	200W
衬底温度	300°C
溅射气压	0.2Pa
N <sub>2</sub> /Ar 比	3sccm : 2sccm
沉积速率	26.4nm/min

用 Form Talysurf S4C 型台阶仪测试膜厚,德国布鲁克 D8 型 X 射线衍射仪分析 AlN 的晶向结构,ΦJSM6700F 型扫描电子显微镜(SEM)表征薄膜的截面形貌.

\* 武汉市科技攻关计划(批准号:20061002073)和国家自然科学基金(批准号:50572026)资助项目

<sup>†</sup> 通信作者. Email: danielhu\_1@163.com

2006-12-28 收到

## 2.2 薄膜体声波谐振器的制备及测试

薄膜体声波谐振器的制作工艺如图 1 所示. 采用标准 RCA 工艺清洗双面抛光的 Si 片, 在基片两面都用 PECVD 沉积一层 100nm/100nm 厚的  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  薄膜, 作为谐振器结构的支撑层以及背部 Si 刻蚀的掩膜层(图 1(a)). 然后用直流磁控溅射沉积 100nm/10nm 的 Pt/Ti 作为底电极, 并用光刻、剥离工艺形成底电极图形(图 1(b)). 去胶后, 采用射频磁控反应溅射, 以优化的溅射条件制备 AlN 压电薄膜, 厚度约为 1.8 $\mu\text{m}$ , 之后以稀释的四甲基氢氧化铵(TMAH)溶液作为刻蚀液刻蚀出压电层图形(图 1(c))<sup>[9]</sup>. 再采用与底电极相同的制作工艺沉积 300nm 的 Au 上电极, 并得到上电极图形(图 1(d)). 最后在背部光刻并用反应离子刻蚀(RIE)工艺刻蚀  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  层, 形成待刻蚀空腔窗口; 再以 KOH 溶液(配以适当量的异丙醇)为刻蚀液, 刻蚀窗口下的 Si, 得到背部空腔(图 1(e)).

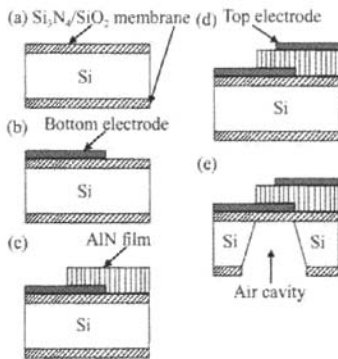


图 1 薄膜体声波谐振器制作流程 (a) PECVD 沉积  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  薄膜; (b) 底电极沉积及其图形化; (c) AlN 沉积及其图形化; (d) 上电极沉积及其图形化; (e) 背空腔的刻蚀  
Fig.1 Fabrication process of FBAR (a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$  film deposited by PECVD; (b) Bottom electrode deposition and patterning; (c) AlN deposition and patterning; (d) Top electrode deposition and patterning; (e) Si etching

谐振器的结构利用 SEM 观察截面获得, 其频率特性的测试采用 Agilent E5062 型网络分析仪完成.

## 3 结果与讨论

### 3.1 AlN 薄膜取向质量

薄膜体声波谐振器的机电耦合系数主要取决于

压电薄膜的质量, 薄膜的  $c$  轴择优取向性越好, 谐振器的机电耦合系数也就越高, 而 AlN 薄膜的取向生长, 受溅射条件影响很大, 包括: 靶基距、衬底温度、溅射功率及气压等. 究其原因, 在于不同条件下提供给溅射离子能量差异致使 AlN 生长可能存在的三个取向(100), (002), (101) 生长速率不同. 图 2 给出了在优化溅射条件下所得 AlN 薄膜的 XRD 图谱. 实验结果显示, 在  $2\theta = 35.997^\circ$  处出现很强的 AlN(002) 峰, 且附近没有 (100), (101) 峰出现, 表明了 (002) 取向 AlN 薄膜的六角密排结构<sup>[9]</sup>.

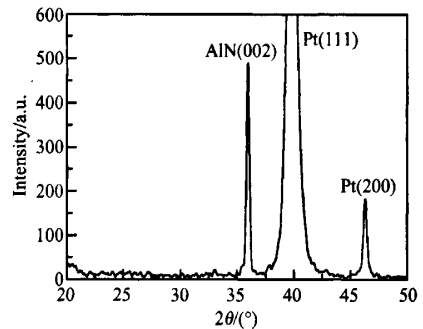


图 2 优化溅射条件下所制 AlN 薄膜的 XRD 图谱  
Fig.2 XRD pattern of AlN films deposited under optimized sputtering condition

图 3 为所制 AlN 薄膜的截面 SEM 图, 薄膜呈现出典型的柱状晶结构, 证明了在优化工艺下制得的 AlN 薄膜具有 (002) 面择优取向.

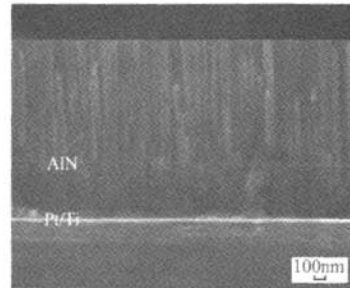


图 3 AlN 薄膜的截面 SEM 图  
Fig.3 Cross-sectional SEM of AlN films

### 3.2 背空腔型结构的表征

FBAR 截面 SEM 如图 4 所示, 图中清晰地反映了 Top electrode/AlN/Bottom electrode/Membrane/Residual Si/Air 结构, 同时也显示出硅的各向异性刻蚀较好, 底部平滑度较高, 形成了与理论值相符的  $54.7^\circ$  腐蚀倾角. 存在的问题在于, 湿法刻蚀硅的时间较难控制, 还残留有 20 $\mu\text{m}$  左右的硅.

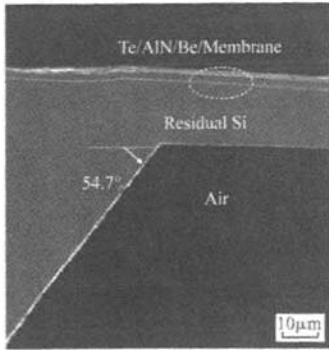


图 4 谐振器截面 SEM 照片  
Fig. 4 Cross-sectional SEM photo of FBAR

3.3 薄膜体声波谐振器的频率特性

衡量体声波谐振器的重要参数包括有谐振频率 ( $f$ )、机电耦合系数 ( $K_{eff}^2$ ) 及品质因数 ( $Q$ )。其中, 机电耦合系数决定带宽, 而器件的插损则取决于品质因数的高低。图 5 为测得的 FBAR 阻抗-频率图, 从图中可得谐振器的串、并联谐振频率分别为 2.537 和 2.627GHz。机电耦合系数及品质因数定义式<sup>[10]</sup>如下:

$$K_{eff}^2 = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (1)$$

$$Q_{f_x} = \frac{f_x}{2} \left| \frac{d\angle Z_{in}}{df} \right|_{f_x} \quad (2)$$

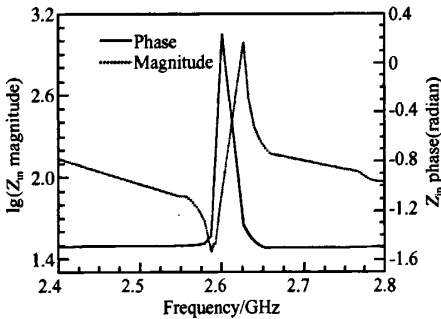


图 5 薄膜体声波谐振器的阻抗-频率特性  
Fig. 5 Frequency response of impedance of the FBAR

其中  $\angle Z_{in}$  为阻抗的相位幅角;  $f_s$  分别对应于串、并联谐振频率  $f_s, f_p$ 。由此, 可得到谐振器的机电耦合系数为 3.75%, 串、并联品质因数分别为 101.8 和 79.7。机电耦合系数不够高可能与制作过程中残存的硅有关; 品质因数较未制作空腔时有了很大的提高, 但仍有待于工艺的优化, 以得到进一步的改善。

4 结论

采用射频磁控反应溅射沉积 AlN 压电薄膜, 实验结果显示, 在优化溅射条件下可获得器件所需求的  $c$  轴择优取向薄膜。制备出的背空腔型体声波谐振器的谐振频率为 2.537GHz, 机电耦合系数为 3.75%, 串、并联品质因数分别为 101.8 和 79.7。

参考文献

[ 1 ] Lakin K M. Thin film resonator technology. IEEE International Frequency Control Symposium, 2003, 765  
 [ 2 ] Hara M, Kuypers J, Abe T, et al. MEMS based thin film 2GHz resonator for CMOS integration. IEEE MTT-S Digest, 2003, 1797  
 [ 3 ] Horwitz S, Milton C. Application of film bulk acoustic resonator. IEEE MTT-S Digest, 1992, 165  
 [ 4 ] Lakin K M, Wang L S. Acoustic bulk wave composite resonators. Appl Phys Lett, 1981, 38(3), 125  
 [ 5 ] Akiyama M, Nagao K. Influence of metal electrodes on crystal orientation of aluminum nitride thin films. Vacuum, 2004, 74, 699  
 [ 6 ] Ruby R C, Bradley P, Oshmyansky Y, et al. Thin film bulk wave acoustic resonators (FBAR) for wireless applications. IEEE Ultrasonics Symposium, 2001, 813  
 [ 7 ] Park J Y, Lee H C. Silicon bulk micromachined FBAR filters for W-CDMA application. 33rd European Microwave Conference, 2003, 907  
 [ 8 ] Kim H H, Ju B K. Fabrication of suspended thin film resonator for application of RF bandpass filter. Microelectron Reliab, 2004, 44, 237  
 [ 9 ] Tay K W, Huang C L, Wu L. Highly  $c$ -axis oriented thin AlN films deposited on gold seed layer for FBAR devices. J Vac Sci Technol B, 2005, 23(4), 1474  
 [ 10 ] Ruby R, Merchant P. Micromachined thin film bulk acoustic resonators. IEEE International Frequency Control Symposium, 1994, 135

## Film Bulk Acoustic Resonator Based on AlN Piezoelectric Cell\*

Hu Guang<sup>†</sup>, Zhang Kai, Ye Yun, Wu Wen, Liu Chan, and Gu Haoshuang

(Key Laboratory of Ferroelectric and Piezoelectric Materials and Devices of Hubei Province,  
Faculty of Physics & Electronic Technology, Hubei University, Wuhan 430062, China)

**Abstract:** Film bulk acoustic resonator was fabricated in backside air-gap structure using silicon bulk micromachining technique, with aluminum nitride films as piezoelectric material. Measurement results show that the AlN films, deposited under optimized sputtering condition, are featured in (002) preferred orientation and well-textured columnar structure. The fashioned air-gap, characterized by scanning microscope, is confirmed with smooth surface on the back and good anisotropy. The fabricated resonator is measured using a network analyzer, and finally achieves a resonant frequency of 2.537GHz, effective electromechanical coupling coefficient 3.75%, series quality and parallel quality of 101.8 and 79.7, respectively.

**Key words:** film bulk acoustic resonator; aluminum nitride; preferred orientation; air-gap

**PACC:** 4260D

**Article ID:** 0253-4177(2007)S0-0591-04

\* Project supported by the Key Technologies R & D Programme of Wuhan City (No. 20061002073) and the National Natural Science Foundation of China (No. 50572026)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: danielhu\_1@163.com

Received 28 December 2006