

# FBAR 有效机电耦合系数的影响因素分析

赵坤丽<sup>1,4</sup>, 高杨<sup>2,3</sup>, 韩超<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010; 2. 中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999;

3. 重庆大学 新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044;

4. 中国科学院高能物理研究所 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

**摘要:**针对有效机电耦合系数( $k_{\text{eff}}^2$ )的两种影响因素-薄膜体声波谐振器(FBAR)的电极/压电层厚度比与压电层薄膜的  $c$  轴取向, 分别建立了厚度比可变与  $c$  轴取向可变的三层复合结构的 FBAR 三维仿真模型。以一个谐振频率为 2.185 GHz 的 FBAR 谐振器作为分析案例, 通过仿真得出, 设计得到的膜层厚度比为 0.206 时, 虽然 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  略有下降, 但此时 Mo 电极厚为 0.247  $\mu\text{m}$ , AlN 压电层厚为 1.119 7  $\mu\text{m}$ , 使得 FBAR 电学性能较好, 工艺制备复杂度及时间降低。另外,  $c$  轴倾斜角度为  $3^\circ$  时, 会使 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  下降, 同时 FBAR 阻抗特性曲线产生较强的寄生谐振, 这会引起 FBAR 横向能量泄露, 恶化 FBAR 滤波器的带内插损。因此, 在制备 AlN 薄膜时应该严格把握各项工艺参数。此外, 通过适当放宽 FBAR 谐振器谐振频率增量能使  $k_{\text{eff}}^2$  具有一定冗余量来弥补工艺制备引起的  $k_{\text{eff}}^2$  下降。

**关键词:**薄膜体声波谐振器(FBAR);有效机电耦合系数;厚度比; $c$ 轴取向;寄生谐振;横向能量泄漏

中图分类号:TN713;TN603 文献标识码:A

## Analysis of Influence Factors of FBAR Effective Electromechanical Coupling Coefficient

ZHAO Kunli<sup>1,4</sup>, GAO Yang<sup>2,3</sup>, HAN Chao<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. Institute of Electronic Engineering, CAEP, P. O. Box 919-512, Mianyang 621999, China;

3. National Key Lab. of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

4. State Key Lab. of Particle Detection and Electronics, Institute of High Energy Physics, China Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For two species influence factors of the effective electromechanical coupling coefficient ( $k_{\text{eff}}^2$ ), i. e., the electrode/piezoelectric layer thickness ratio of FBAR and  $c$ -axis orientation of piezoelectric layer, a simulation model of three-layers composites FBAR was established focusing on the variable thickness ratio and variable degree of  $c$ -axis orientation in this paper. By using a FBAR with a resonant frequency of 2.185 GHz as a case study, its simulation results showed that the  $k_{\text{eff}}^2$  declined slightly when thickness ratio was 0.206, but the thickness of Mo electrodes was 0.247  $\mu\text{m}$  and AlN piezoelectric layer was 1.119 7  $\mu\text{m}$ , which resulted in good electrical properties of FBAR and reduced the process complexity and fabrication time. On the other hand, when the  $c$ -axis inclination angle was  $3^\circ$ , it would reduce the  $k_{\text{eff}}^2$  of FBAR. At the same time, the impedance characteristics curve of FBAR would present a strong sense of spurious resonance, causing the lateral energy leakage in FBAR and deteriorating the insertion loss of FBAR filters. So the key process parameters should be strictly adjusted to fabricate the high quality AlN thin film. In addition, the appropriate relaxation of the resonant frequency increment of FBAR would enable the  $k_{\text{eff}}^2$  to have a certain redundancy, which could compensate the  $k_{\text{eff}}^2$  reduction resulted by the preparation process.

**Key words:** film bulk wave resonator(FBAR);effective electromechanical coupling coefficient; thickness ratio; $c$ -axis orientation;spurious resonance;lateral energy leakage

收稿日期:2016-12-15

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(61574131);中国工程物理研究院超精密加工技术重点实验室基金资助项目(2014ZA001);核探测与核电子学国家重点实验室开放课题基金资助项目(2016KF-02);西南科技大学特殊环境机器人技术四川省重点实验室开放基金资助项目(14ZXTK01)

**作者简介:**赵坤丽(1991-),女,陕西宝鸡人,硕士生,主要从事微电子机械系统研究。E-mail:maodou\_klk@163.com。通信作者:高杨(1972-),男,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:gaoyang@caep.cn。

## 0 引言

有效机电耦合系数( $k_{\text{eff}}^2$ )是评价薄膜体声波谐振器(FBAR)声学性能的一个重要指标。 $k_{\text{eff}}^2$ 决定 FBAR 串、并联谐振点间的频率增量<sup>[1]</sup>,进而决定了 FBAR 滤波器的带宽,过低的  $k_{\text{eff}}^2$ 会限制 FBAR 在宽带滤波器中的应用<sup>[2]</sup>。其次,针对某一设计指标,如果实测出来的  $k_{\text{eff}}^2$ 低于设计值会导致 FBAR 器件失效(如  $k_{\text{eff}}^2$ 从 6.6%下降到 6.3%使良品率从 80%降为 0<sup>[3]</sup>)。由于测试一批 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$ 后再来调整初始设计参数或工艺参数条件会增加制备周期和成本。因此,有必要先对 FBAR 进行仿真分析预测造成  $k_{\text{eff}}^2$ 下降的影响因素。

影响  $k_{\text{eff}}^2$ 的因素包括 FBAR 电极/压电层厚度比( $t/d$ )<sup>[1-2]</sup>及压电层薄膜的  $c$  轴取向<sup>[4]</sup>。因此,本文分别建立了  $t/d$  可变与压电层薄膜  $c$  轴取向可变的三层复合结构的 FBAR 三维仿真模型,以一个谐振频率为 2.185 GHz 的 FBAR 谐振器为例,改变  $t/d$ ,仿真结果发现,得到的  $k_{\text{eff}}^2$ 先增大后减小,在  $k_{\text{eff}}^2$ 最大时 FBAR 谐振器的电学性能不佳,同时工艺制备时间和复杂度增加。因此,为了保证 FBAR 谐振器的整体性能较优,在满足  $k_{\text{eff}}^2$ 的基础上应适当增加顶、底电极厚度而减小压电层厚度。通过引入旋转坐标系定义  $c$  轴取向可变的仿真模型,仿真得到  $c$  轴的倾斜程度从  $0^\circ$ 变化到  $3^\circ$ ,计算得到的  $k_{\text{eff}}^2$ 从 5.61%下降为 5.50%,FBAR 阻抗特性曲线上出现横向寄生谐振,随着倾斜角度增加,寄生谐振的幅值增大,这会造成 FBAR 谐振器横向声能泄漏增大,导致构成的 FBAR 滤波器出现带内纹波。因此,在制备 AlN 薄膜时应严格把握各项工艺参数。此外,通过稍微放宽 FBAR 谐振器谐振频率增量,能使计算所得  $k_{\text{eff}}^2$ 具有一定冗余量来弥补工艺制备引起的  $k_{\text{eff}}^2$ 下降。本文提出的 2 种仿真模型对 FBAR 谐振器及滤波器的设计和制备具有一定参考价值。

## 1 模型

### 1.1 电极/压电层厚度变化的仿真模型

FBAR 谐振器的串联谐振频率  $f_s$  和串、并联谐振频率增量( $\Delta f = f_p - f_s$ ,  $f_p$  为并联谐振频率)决定构成的 FBAR 滤波器中心频率及带宽,因此,在滤波器设计阶段,单个 FBAR 的结构设计参数很关键。由于调整 FBAR 膜层结构中任意一层的厚度会使 FBAR 串联谐振频率  $f_s$  偏离设计值  $f_s$ ,如工

艺中为减少薄膜沉积时间通常使用较薄压电层,此时 FBAR 谐振频率  $f_{s'} > f_s$ ,为使  $f_{s'} = f_s$ ,则要补偿电极或支撑层厚度。

由于电极层紧挨压电层设置,同样厚度的电极层比支撑层对  $f_{s'}$  的改变量更大<sup>[5]</sup>。因此,一般更易选择电极层的厚度调节 FBAR 谐振频率。在保持  $f_s$  不变调节各层厚度的过程中,  $t$  紧随  $d$  发生变化。因此,将  $t/d$  看作影响  $f_{s'}$  的因变量,对于不同的  $t/d$ ,即便 FBAR 具有相同的  $f_s$ ,但是不同的  $t/d$  一定会使 FBAR 具有不同的  $f_p$ <sup>[6]</sup>,即

$$f_p = \frac{v}{2d} \quad (1)$$

式中  $v$  为声波的波速。

根据式(1)可知,这使得每一个  $t/d$  都对应一个不同的串、并联谐振频率差值  $\Delta f$ 。由于  $\Delta f$  决定 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$ 。因此,  $t/d$  会影响 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$ 。

为分析  $t/d$  对 FBAR  $k_{\text{eff}}^2$  的影响程度,本文建立了一个  $t/d$  可变的 FBAR 三维仿真模型(见图 1),FBAR 各膜层材料为 Mo-AlN-Mo,顶、底电极及压电层的初始平面尺寸分别为  $120 \mu\text{m} \times 120 \mu\text{m}$ 、 $140 \mu\text{m} \times 140 \mu\text{m}$ 。其中  $t$  与  $d$  可变。

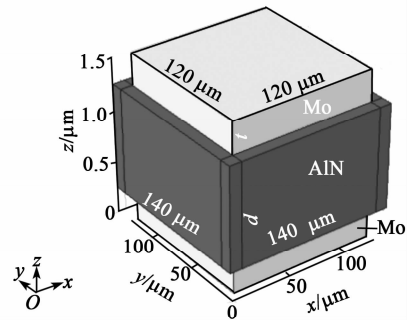


图 1 FBAR 谐振器的 3 层复合结构模型

### 1.2 $c$ 轴取向可变的模型建立

1.1 节设计 FBAR 时认为 AlN 薄膜的  $c$  轴曲线完全垂直底电极,因此,设计得到的 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  是理想值。实际制备中为使测试得到的 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  足够高,制备的压电薄膜  $c$  轴取向应尽量垂直<sup>[7]</sup>。但  $c$  轴的垂直程度与底电极表面的粗糙程度有关<sup>[4]</sup>,表面越粗糙的底电极上生长的 AlN 薄膜与底电极材料的晶格失配越严重<sup>[8]</sup>,AlN 晶粒在衬底上生长时发生的畸变也就越大,从而引起压电薄膜的倾斜生长。

为了预测  $c$  轴倾斜角度对 FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  造成的

影响,建立了3层复合结构的FBAR仿真模型,在FBAR 3D模型中引入旋转坐标系定义如图2<sup>[9]</sup>所示的AlN材料c轴的倾斜角,FBAR的各膜层材料及结构尺寸与图1的模型材料相同,基于1.1节仿真得到的结果设置。图中, $\alpha$ 为AlN薄膜的c轴取向与法线方向的夹角。

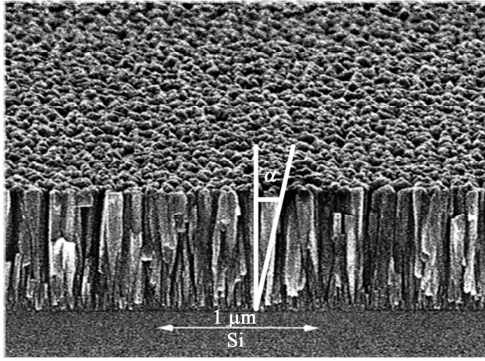


图2 Si上沉积的AlN晶粒的横截面SEM照片

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 电极/压电层厚度可变的仿真结果

以谐振频率为2.185 GHz的设计指标为例,仿真得到的FBAR振动位移如图3所示。 $k_{\text{eff}}^2$ <sup>[3]</sup>为

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{\pi^2}{4} \left( \frac{f_p - f_s}{f_p} \right) \quad (2)$$

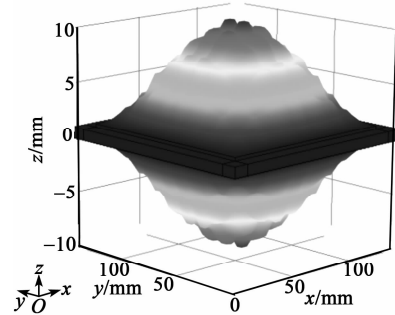


图3 谐振频率为2.185 GHz时的振动位移

表1为根据式(2)计算所得 $k_{\text{eff}}^2$ 与 $t/d$ 的关系。

表1 电极/压电层厚度可变的仿真结果

厚度比	Mo电极(顶/底)厚/ $\mu\text{m}$	AlN厚度/ $\mu\text{m}$	$f_s/\text{MHz}$	$f_p/\text{MHz}$	$\Delta f/\text{MHz}$	$k_{\text{eff}}^2/\%$
0	0	2.532	2 185	2 230	45	4.97
0.050 9	0.098	1.924	2 185	2 238	53	5.84
0.098 8	0.158	1.598	2 185	2 239	54	5.95
0.155 0	0.210	1.352	2 185	2 238	53	5.84
0.206 0	0.247	1.197	2 185	2 236	51	5.63
0.252 0	0.275	1.089	2 185	2 235	50	5.52
0.300 0	0.300	1.000	2 185	2 232	47	5.19
0.352 0	0.324	0.919	2 185	2 231	46	5.08

图4为仿真得到的 $t/d$ 与 $k_{\text{eff}}^2$ 的关系。由图可看出,当 $t/d=0.098$ 时,计算得到的 $k_{\text{eff}}^2$ 最大。结合表1可知,此时,Mo电极厚为158 nm,AlN厚为1.598  $\mu\text{m}$ 。

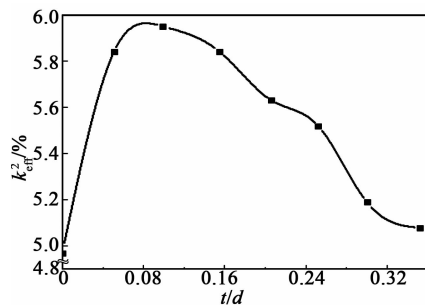


图4  $t/d$ 与 $k_{\text{eff}}^2$

刚开始时, $k_{\text{eff}}^2$ 的增加是由于驻波分布与FBAR上加载电势线性分布的匹配程度改善所致的<sup>[4]</sup>。虽然此时 $k_{\text{eff}}^2$ 存在最大值,但是会带来两个方面的影响:

1) Mo电极厚度太小(仅158 nm,见表1)会导致FBAR的电学阻抗增加,使构成的FBAR滤波器带内插损增大<sup>[3]</sup>,从而影响滤波器的电学性能。

2) 较小的电极厚度对应较大的AlN膜层厚度(见表1),将增加制备工艺的复杂性。

输入阻抗为

$$Z_{\text{in}} = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ 1 - k_t^2 \frac{\tan \phi_p}{\phi_p} \cdot \frac{(z_T + z_B) \cos^2 \phi_p + j \sin 2\phi_p}{(z_T + z_B) \cos 2\phi_p + j(z_T z_B + 1) \sin 2\phi_p} \right] \quad (3)$$

式中: $\omega$ 为角频率; $z_T$ 为从压电薄膜上表面向上看的声学阻抗; $z_B$ 为从压电薄膜下表面向下看的声学阻抗;理想情况下, $z_T$ 和 $z_B$ 均为0; $k_t^2$ 为压电薄膜的机电耦合系数; $\phi_p$ 为压电薄膜的相位移,且

$$\phi_p = \left( \frac{2\pi f}{v_p} - \frac{j\alpha_p}{8.686} \right) d \quad (4)$$

式中:  $f$  为频率自变量;  $v_p$  为压电薄膜的纵波声速;  $\alpha_p$  为压电薄膜的声损耗。

同时根据式(3)<sup>[10]</sup>可知,当  $Z_m = 50 \Omega$ ,式(3)中所需静态电容  $C_0$  一定,此时,

$$C_0 = \frac{\epsilon_{zz}^S \cdot A}{d} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_{zz}^S$  为压电薄膜的夹持介电常数;  $A$  为 FBAR 的谐振面积。

根据式(5)<sup>[11]</sup>可知,当  $C_0$  值大小一定的情况下,  $d$  增大将导致 FBAR 平面尺寸增大,违反 FBAR 器件集成化与小型化的发展趋势。对于厚度和面积均较大的 FBAR 谐振器,薄膜的生长质量不宜控制,且沉积各层薄膜所需时间过长导致工艺影响因素不可控,如仅是 AlN 薄膜的厚度从  $3.5 \mu\text{m}$  减小为  $1.5 \mu\text{m}$ ,所制作的 FBAR 谐振器的尺寸就会增大 3 倍,同时 AlN 膜层沉积时间是其 9 倍<sup>[3]</sup>,因此一般使用较薄的 AlN 薄膜。

综上所述,设计 FBAR 各膜层结构的厚度时,应综合考虑 FBAR 的电学性能、工艺沉积时间及  $k_{\text{eff}}^2$ 。根据表 1 可知,当  $t/d=0.206$  时,FBAR 的  $k_{\text{eff}}^2$  虽略有下降,此时 Mo 电极厚度  $t=0.247 \mu\text{m}$ ,AlN 压电层厚  $d=1.1197 \mu\text{m}$ ,但 FBAR 电学性能较好,且工艺制备时间较短。

## 2.2 $c$ 轴取向可变的仿真结果

结构设计参数  $t=0.247 \mu\text{m}$ ,  $d=1.197 \mu\text{m}$ ,通过设定旋转坐标系的角度模拟 AlN 薄膜  $c$  轴的倾斜角度,倾斜角度为  $0^\circ \sim 3^\circ$ ,仿真步长为  $0.5^\circ$ 。将扫频步长变为  $0.1 \text{ MHz}$ ,仿真得到的 FBAR 谐振器的  $\Delta f$  及根据式(2)计算得到的  $k_{\text{eff}}^2$  如表 2 所示。由表可看出,  $t/d=0.206$  时,倾斜角度为  $0^\circ$  时的串、并联频率值比表 1 中的值更精确。图 5 为  $c$  轴角度与  $k_{\text{eff}}^2$  的关系。由图可看出,  $k_{\text{eff}}^2$  随着倾斜角度的增大而减小。

表 2  $c$  轴倾斜角度可变的仿真结果

倾斜度/ $^\circ$	$f_s/\text{MHz}$	$f_p/\text{MHz}$	$\Delta f/\text{MHz}$	$k_{\text{eff}}^2/\%$
0	2 184.80	2 235.60	50.8	5.61
0.5	2 184.90	2 235.40	50.5	5.57
1.0	2 184.95	2 235.35	50.4	5.56
1.5	2 184.95	2 235.25	50.3	5.55
2.0	2 184.90	2 235.10	50.2	5.54
2.5	2 184.95	2 234.95	50.0	5.52
3.0	2 184.90	2 234.80	49.8	5.50

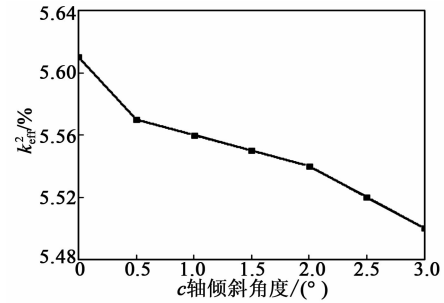


图 5  $c$  轴角度与  $k_{\text{eff}}^2$

图 6 为  $c$  轴倾斜角度不同时 FBAR 的阻抗特性曲线。由图可看出,各 FBAR 阻抗曲线上均在谐振点  $5.480 \text{ GHz}$  处出现谐振峰,这是由 FBAR 的二次谐振造成的,将扫频频段加宽,也会看到 FBAR 阻抗曲线上其他频点处存在高次谐振。由图 6 还可看出,随着角度增大,小于基频谐振频率的地方出现寄生谐振,寄生谐振的幅值增大,同时基频谐振的幅值却在不断减小。这是由于一旦 AlN 压电薄膜生长方向发生倾斜,FBAR 上施加电压的一部分电能转化为纵波能量的同时另一部分转换为在平面内传输的横波能量,导致在平面内产生横向的能量泄露,随角度增大,横向能量泄露严重,故而寄生谐振幅值增大。由于平面内横波的传输速率比纵波低得多,故而寄生谐振的位置在低于主谐振频率并离主谐振位置较远。事实上,只要  $c$  轴偏离法线方向  $0.3^\circ$ ,FBAR 上就会产生寄生谐振。因此,在制备 AlN 薄膜时应严格把握各项工艺参数。此外,通过稍微放宽各膜层厚度的设计值,能使计算得到的  $k_{\text{eff}}^2$  具有一定冗余量来弥补工艺制备引起的  $k_{\text{eff}}^2$  下降。

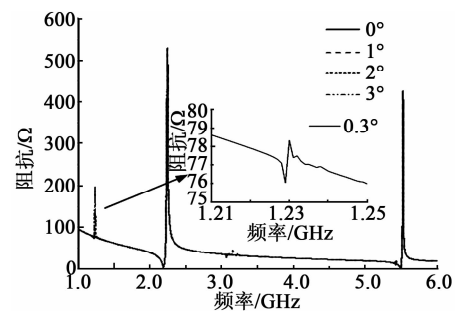


图 6 不同倾斜角度下仿真得到的 FBAR 阻抗特性曲线

## 3 结束语

本文建立了一个三层复合结构的 FBAR 三维仿真模型,分别讨论了电极/压电层厚度比及 AlN 薄膜  $c$  轴取向对  $k_{\text{eff}}^2$  的影响。由于  $k_{\text{eff}}^2$  最大时,FBAR 谐振器的顶电极膜层厚度较薄而压电层厚度太厚,导致 FBAR 谐振器电学性能不佳及沉积 AlN 薄膜

所需时间及工艺复杂性增加。因此,为了保证 FBAR 谐振器的整体性能较优,在满足  $k_{\text{eff}}^2$  的基础上应适当增加顶、底电极厚度而减小压电层厚度。由于  $k_{\text{eff}}^2$  随着  $c$  轴倾斜程度增加而下降,同时 FBAR 阻抗特性曲线上的寄生谐振增强,导致 FBAR 的横向声能泄露增强,使构成的 FBAR 滤波器带内插损增大。因此,在制备 AlN 薄膜时应严格把握各项工艺参数。此外,通过稍微放宽 FBAR 谐振器谐振频率增量,能使计算得到的  $k_{\text{eff}}^2$  具有一定冗余量来弥补工艺制备引起的  $k_{\text{eff}}^2$  下降。

#### 参考文献:

- [1] LAKIN M, BELSICK J, MCDONALD J F, et al. Improved bulk wave resonator coupling coefficient for wide bandwidth filters[C]// S. l.: Ultrasonics Symposium, 2001 IEEE, 2001, 1: 827-831
  - [2] HASHIMOTO K. RF bulk acoustic wave filters for communications[M]. USA: Artech House, 2009.
  - [3] AIGNER R. Bringing BAW technology into volume production: the ten commandments and the seven deadly sins[C]// Clermont-Ferrand, France: International Conference on Agricultural Engineering-Ag Eng, 2010; Towards Environmental Technologies, 2010.
  - [4] LEE S H, LEE J K, YOON K H. Growth of highly  $c$ -axis textured AlN films on Mo electrodes for film bulk acoustic wave resonators[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films, 2003, 21(1): 1-5.
  - [5] AIGNER R, ELBRECHT L, MARKSTEINER S, et al. Acoustic resonator: 10/380, 214[P]. 2001-9-10.
  - [6] CHIU K H, CHEN H R, HUANG S R S. High-performance film bulk acoustic wave pressure and temperature sensors [J]. Jpn J Appl Phys, 2007 (46): 1392-1397.
  - [7] DUBOIS M A, MURALT P, SAGALOWICZ L. Aluminum nitride thin films for high frequency applications[J]. Ferroelectrics, 1999, 224(1): 243-250
  - [8] 江洪敏. 薄膜体声波谐振器(FBAR)技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
  - [9] NAIK R S, REIF R, LUTSKY J J, et al. Low-temperature deposition of highly textured aluminum nitride by direct current magnetron sputtering for applications in thin-film resonators[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1998, 146(2): 691-696.
  - [10] 高杨, 赵坤丽, 赵俊武. 体声波力传感器灵敏度的微分综合分析法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(6): 1-7.
  - [11] 张亚非. 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.
- 
- (上接第 197 页)
- #### 参考文献:
- [1] ZHAO C. Ultrasonic motors[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2011.
  - [2] KARL F G, JUANA G J R. Power ultrasonics[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2015: 511-541.
  - [3] WAKAI T, KUROSAWA M, HIGUCHI T. Transducer for an ultrasonic linear motor with flexible driving part[J]. IEEE Ultrasonic Symposium, 1998, 1(1): 683-686.
  - [4] 杨东, 姚志远. 双变幅杆 V 形直线超声电机研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 685-687.  
YANG Dong, YAO Zhiyuan. Research on V-shape linear ultrasonic motor based on amplitude amplifier pole [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(5): 685-687.
  - [5] 简月, 姚志远, 杨模尖, 等. V 型直线超声电机梁式夹持的结构设计[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1358-1364.  
JIAN Yue, YAO Zhiyuan, YANG Mojian, et al. Structure design of beam type clamp for V-shape ultrasonic motor[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1358-1364.
  - [6] VYSHNEVSKYY O, KOVALEV S, WISCHNEWSKIY W. A novel, single-mode piezoceramic plate actuator for ultrasonic linear motors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(11): 2047-2053.
  - [7] ZHOU Shengli, YAO Zhiyuan. Design and optimization of a modal-independent linear ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2014, 61(3): 535-546.
  - [8] HO S, SHIN Y. Analysis of a linear piezoelectric motor driven by a single-phase signal[J]. 2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 2013, 47(1): 481-484.
  - [9] 王金鹏, 金家楣, 赵淳生. 用于精密定位平台的直线超声电机的异步并联[J]. 光学精密工程, 2011, 19(11): 2693-2701.  
WANG Jinpen, JIN Jiamei, ZHAO Chunsheng. Asynchronous bundling of linear ultrasonic motor for precision positioning stage[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(11): 2693-2701.
  - [10] 王佳男. 双 V 形振子并联压电直线电机[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
  - [11] 姚志远, 刘振, 简月. 一端铰支的直线超声电机的夹持定位装置; CN103944445A [P]. 2014-07-23.