

Analysis on Parameter Optimization of Film Bulk Acoustic Wave Resonator*

ZHANG Yi, BAO Daqun, GUO Hang*

(Per Tung Sah MEMS Research Center, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

Abstract: We set up a new equivalent circuit model of micro film bulk acoustic wave resonator (FBAR) to study its frequency response. In this model, the electrodes for zinc oxide piezoelectric thin film and silicon nitride thin film layer, which is used for mechanical support of FBAR, are integrated into the circuit model by considering them as transmission lines. The PSPICE software is employed to study the effect of the structural parameters on the resonant frequency, quality factor and effective coupling coefficient of FBAR. Based on this, the structural parameters of the FBAR are optimized to obtain improved performance for FBAR.

Key words: film bulk acoustic wave resonator; piezoelectric equivalent circuit model; parameter optimization
EEACC: 7320

薄膜体声波谐振器的结构参数优化分析*

张 翊, 包达群, 郭 航*

(厦门大学 萨本栋微机电研究中心, 福建 厦门 361005)

摘 要: 建立了微型薄膜体声波谐振器的等效电路模型, 研究其整体频率响应特性。提出的等效电路模型考虑了氧化锌压电薄膜两端电极和作为支撑层的氮化硅薄膜对谐振器整体性能的影响, 将它们作为传输线引入到等效电路当中。运用 PSPICE 软件研究了谐振器各结构层的尺寸参数对谐振器谐振频率、品质因数和有效机电耦合系数的影响, 并讨论了使用不同材料的电极, 谐振器品质因数的变化情况。基于以上分析, 对谐振器的结构参数进行优化, 获得薄膜体声波谐振器性能的提高。

关键词: 薄膜体声波谐振器; 压电等效电路模型; 结构参数优化

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)02-0292-05

将 MEMS 技术与体声波谐振器结合起来的薄膜体声波谐振器(FBAR: Film Bulk Acoustic Wave Resonator), 具有体积小、可靠性高、温度特性好、相位噪声低等优点^[1-2], 目前在无线通讯等领域得到了大量应用, 如手机射频芯片用滤波器。随着通讯与其它射频应用向着更高工作频率的方向发展, 对薄膜体声波谐振器的研究也在进一步深入当中。

目前, 对谐振器频率响应特性的精确分析通常应用等效电路的方法, 它能说明整个系统的工作模式, 从而分析器件中各部分对整个系统特性的影响。基于 SPICE 软件的等效电路模型可以分析谐振器的等效电路, 建立等效电路中各参数变化与电

路谐振频率的关系, 及等效电路中各参数与谐振器有效机电耦合系数的关系, 从而实现等效电路中关键参数的设计和优化, 达到提高器件性能, 降低器件噪声的目的。本文应用 PSPICE 软件, 建立以氧化锌薄膜作为压电层的薄膜体声波谐振器的等效电路模型, 来研究整个器件的优化设计。

1 薄膜体声波谐振器的等效电路模型

图 1 所示为氧化锌薄膜体声波谐振器的基本结构, 由上下电极、氧化锌(ZnO)压电层、氮化硅(Si₃N₄)薄膜和单晶硅衬底构成。Leach 等人提出了谐振器的等效电路模型^[3], 在模型当中, 主要考虑

压电层的特性。但是, 随着薄膜体声波谐振器结构的缩小, 上下电极、氮化硅层对谐振器整体性能的影响显著增大, 因此有必要在等效电路中引入能体现上下电极、氮化硅层结构参数对器件影响的元件。图 2 所示为考虑了上下电极、氮化硅(Si₃N₄) 薄膜的谐振器电路模型。在此将上下电极、氮化硅(Si₃N₄) 薄膜作为无损耗的传输线替代(T₂, T₃ 和 T₄), 氧化锌(ZnO) 压电层看作有损耗的传输线(T₁), C₀ 为电容, 代表压电效应的变压器, 使用控制源来取代。V₁ 和 V₂ 是两个独立的电压源, 用来操作控制源 F₁ 和 F₂ 的值^[4]。E₁ 是电压控制电压源, 其值为 h/s · I(V₂), F₁ 是电流控制电流源, 其值为 hC₀₁(V₁), F₂ 是电流控制电流源, 其值为 hI(V₂)。B, F 和 E 分别表示传输线电路的前端接口, 后端结构和电源接口。V_{IN} 为输入电压, 使用大小为 10 V 的交流信号, R_G 为输入阻抗(50 Ω), R_B 和 R_F 为负载。

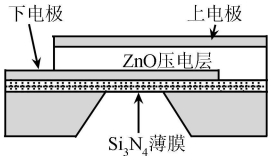


图 1 微型薄膜体声波谐振器的基本结构

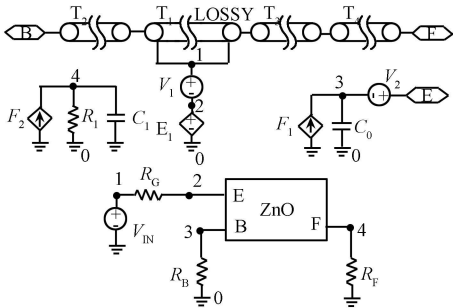


图 2 微型薄膜体声波谐振器的等效电路模型

对于氧化锌层的有损耗的传输线(T₁), 需要确定单位长度的电感、电容、电阻、电导系数和传输线的长度等参数。下面逐一说明。

单位长度的电感 L 为:

$$L = \rho l \quad (1)$$

式中 ρ 为氧化锌压电层的密度, A 为横截面积。

单位长度的电容 C 为:

$$C = \frac{1}{\rho l (v_p)^2} \quad (2)$$

式中 v_p 为传输线中的声速。

每单位长度传输线的电阻 R 为:

$$R = 2Q_p A \alpha_v = \frac{wL}{Q} \quad (3)$$

式中 α 为粘性衰减系数; w 为角频率; Q 为氧化锌压电层的品质因数。

每单位长度传输线的电导系数 G 为:

$$G = \frac{2}{\rho l v_p} \alpha_k \quad (4)$$

α_k 为热传导引起的衰减系数。

氧化锌压电层的电容 C₀ 为:

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon \cdot A}{d} \quad (5)$$

式中 d 为氧化锌压电层的厚度。对于由无损耗的传输线表示的上下电极、氮化硅(Si₃N₄) 薄膜, 其参数主要是阻抗特性 Z₀ 和阻抗传输延迟时间 τ₀, 可表示为:

$$Z_0 = A \cdot \rho \cdot V_0, \tau_0 = \frac{d_0}{\rho} \quad (6)$$

式中 ρ 为材料密度, V₀ 为各结构层的声速, d₀ 为厚度。

2 体声波谐振器等效电路的分析

使用 PSPICE 电路建模软件对图 2 表示的薄膜体声波谐振器的等效电路进行仿真分析。PSPICE 软件表示的等效电路如图 3 所示。

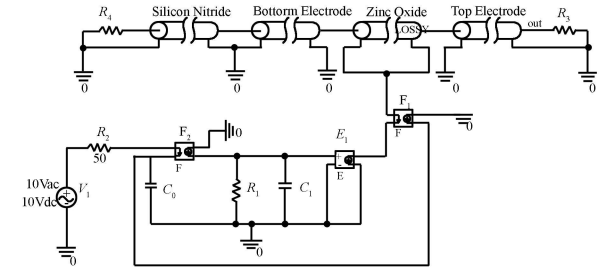


图 3 微型薄膜体声波谐振器的 PSPICE 等效电路

根据材料特性参数, 首先选择氧化锌层的厚度为 2.0 μm, 上下电极厚度均为 0.1 μm, 氮化硅薄膜厚度为 0.4 μm, 代入公式(1)~(6)可以确定氧化锌薄膜体声波谐振器的 PSPICE 等效电路的具体参数, 得到如图 4 所示, 薄膜体声波谐振器的谐振响应情况, 谐振频率为 1.644 GHz_o

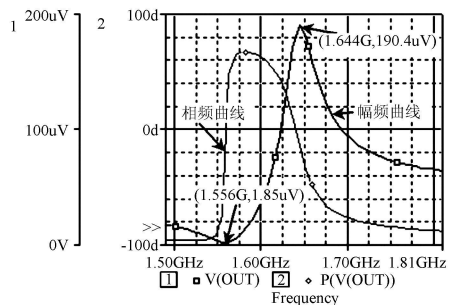


图 4 薄膜体声波谐振器的频率响应

3 谐振器结构参数对器件性能的影响

薄膜体声波谐振器所用材料及其结构参数, 对

谐振器性能有很大的影响, 这些性能主要包括: 谐振频率, 品质因数和有效机电耦合系数等。运用本文提出等效电路模型, 可分别研究不同谐振器结构参数和电极材料与这些性能参数的关系, 从而得到能提高谐振器性能的参数, 并有助于选择合适的谐振器各层材料和厚度。

3.1 谐振器结构参数对基频谐振频率的影响

由上节建立 PSPICE 软件模拟分析可以得出: 当 ZnO 压电层厚度固定时, 随着电极厚度的增大, 谐振器的谐振频率降低, 使用不同电极材料都具有这样的趋势, 但变化的快慢不同, 如图 5 和图 6 所示; 而当 ZnO 压电层厚度固定时, 随着氮化硅厚度的增大, 谐振器的谐振频率降低, 如图 7 所示; 当电极层和氮化硅层的厚度保持不变时, 氧化锌压电层厚度的增大使得谐振频率降低, 氧化锌压电层厚度越薄, 谐振频率变化率也越大。

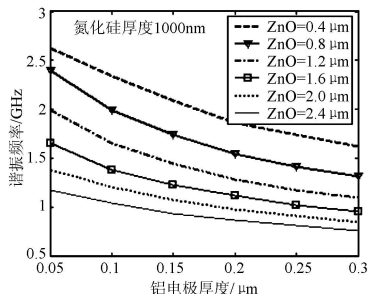


图 5 铝电极厚度变化与 FBAR 谐振频率的关系

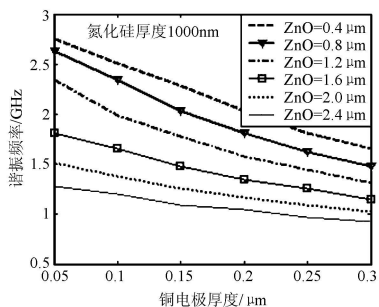


图 6 铜电极厚度变化与 FBAR 谐振频率的关系

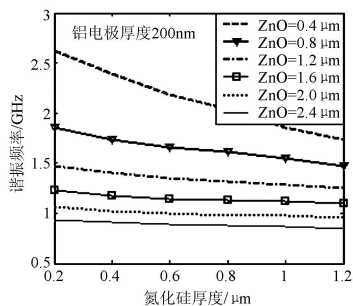


图 7 氮化硅厚度变化与 FBAR 谐振频率的关系

3.2 不同电极材料对品质因数的影响

应用图 3 所示的等效电路模型, 研究电极材料变化, 谐振器品质因数的变化情况。由于在 PSPICE

软件进行电路仿真时, 在等效电路中引入了表示负载的电阻, 使得等效电路模型得出的谐振器品质因数数值与实际情况不吻合, 但其趋势是准确的。在相同氧化锌厚度和氮化硅薄膜厚度情况下, 分析背层电极铜和背层电极铝的品质因数的变化。由图 8 可以看出: 将铜(声学阻抗 $Z=38.963 \text{ M Rayls}$) 改为与 ZnO 声学阻抗($Z=34.374 \text{ M Rayls}$) 相差较大的背层电极铝(声学阻抗 $Z=17.621 \text{ M Rayls}$), 谐振器品质因数可以从 19.72 提高到 24.98, 由此证明将背层改为声学阻抗较小的铝金属, 可以提高谐振器的品质因数。

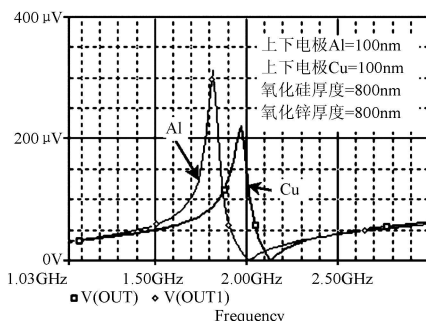


图 8 不同电极材料的谐振器频率响应图

3.3 谐振器结构参数对有效机电耦合系数的影响

FBAR 的另一个重要参数是 K_{eff}^2 , 即有效机电耦合系数:

$$K_{\text{eff}}^2 \approx \frac{\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p}}{2 \frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p} \sqrt{\left[\left(\frac{\pi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \frac{f_s}{f_p} \right)^2 \right]}} \approx \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \frac{f_p - f_s}{f_p} \quad (7)$$

式中 f_s 表示串联谐振时的频率, f_p 表示并联谐振时的频率, 从式中我们知道, K_{eff}^2 与相对带宽有关, 谐振器各层有效机电耦合系数的影响是不同的, 图 9、图 10 和图 11 分别表示了氮化硅厚度、氧化锌厚度和上电极厚度与有效机电耦合系数的关系。通过分析可见: 氮化硅厚度 400 nm, K_{eff}^2 最大; 氧化锌厚度为 1.6 μm 时, K_{eff}^2 最大; 上电极 Al 的厚度为 150 nm 时, K_{eff}^2 最大。

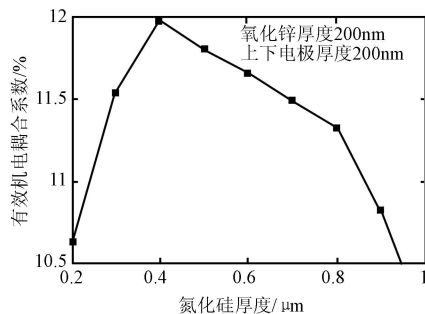
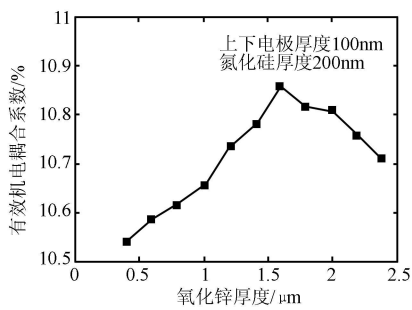
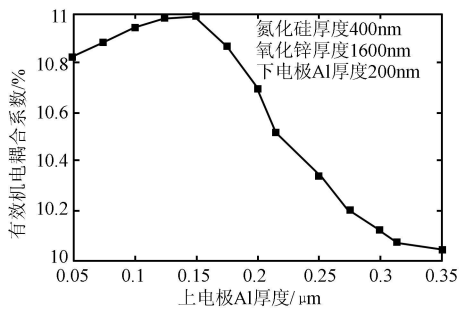


图 9 氮化硅厚度与 K_{eff}^2 的关系

图 10 氧化锌厚度与 K_{eff}^2 的关系图 11 铝材料上电极厚度与 K_{eff}^2 的关系

4 谐振器结构参数的优化选择

综合以上分析, 研究谐振器结构参数的优化选择的具体方案。

设计一个体声波谐振器, 首先是确定其工作频率。当忽略电极和支撑层的损耗时, 仅考虑氧化锌作为压电层的体声波谐振器的谐振频率计算如下:

$$f_{\text{ZnO}} = \frac{V_a}{\lambda} = \frac{V_a}{2d} \quad (8)$$

式中 V_a 是声波在氧化锌中的传播速度, 值为 5680 m/s; d 为氧化锌压电层的厚度。

如果由公式(8)确定的设计的氧化锌压电层谐振频率为 1.775 GHz, 则理论上氧化锌厚度应为 1.6 μm , 但是若考虑了上下电极和氮化硅对谐振器频率的影响, 根据前面所作的分析, 应用 PSPICE 软件进行仿真, 对于上下电极层和氮化硅层, 有效耦合系数大有利于谐振器性能的提高, 因此确定 FBAR 的上电极厚度 150 nm, 下电极厚度 200 nm, 氮化硅厚度 400 nm, 仿真得出的谐振频率是 1.698 GHz, 设计值与实际仿真计算出的结果有偏差, 由此可见, 电极层和氮化硅层的影响是不能忽略的。

为了得到理想的谐振器工作频率, 有必要对其结构参数进行优化, 为了得到更接近于理想的值, 可以利用减少氧化锌压电层的厚度来达到频率的提高。根据仿真计算, 当氧化锌厚度为 1.6 μm , 其频率为 1.698 GHz, 此时品质因数为 10.14, K_{eff}^2 为 10.98%, 当其他层厚度不变, 氧化锌厚度改为 1.5

μm 时, 谐振频率可以达到 1.768 GHz (接近理想值 1.775 GHz), 此时品质因数为 13.98, K_{eff}^2 为 10.78%。为了达到理想的谐振频率, 降低了氧化锌层的厚度, 此时品质因数有所提高, K_{eff}^2 也下降了, 但 K_{eff}^2 下降得较不明显。

进一步研究谐振器厚度参数优化后, 其整体输出噪声的情况, 利用图 3 的模型可以在 PSPICE 软件中研究厚度变化后, 谐振器等效电路噪声的情况。图 12 所示为氧化锌压电层厚度在 1.6 μm 和 1.5 μm 时的等效电路输出噪声电压的变化情况, 输出噪声电压由原来的 347 pV 降低到 322 pV, 这说明从等效电路噪声分析的角度研究, 谐振器等效电路的品质因数并没有降低, 反而有所提高。这说明所进行的参数优化, 在保证机电耦合系数的前提下, 实现了谐振器工作频率的提高, 器件性能也有所提升。

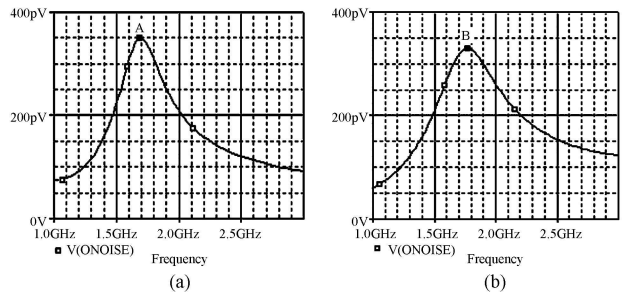


图 12 谐振器等效电路的输出噪声与频率的关系: (a) 氧化锌层厚为 1.6 μm , A 点为 1.698 GHz, 347 pV; (b) 氧化锌层厚为 1.5 μm , B 点为 1.768 GHz, 322 pV

5 结论

本文建立微型体声波谐振器机械结构的等效电路模型, 运用 PSPICE 软件研究谐振器的整体频率响应特性, 并针对谐振器各部分的材料, 分析其尺寸参数对谐振器基频频率的影响。在假设各部分结构的横截面积不变的情况下, 着重研究了谐振器压电层、电极层和氮化硅薄膜层厚度变化与谐振器有效机电耦合系数之间的关系。由模拟结果可以得出, 在其他结构尺寸保持不变的情况下, 谐振器压电层、电极层和氮化硅薄膜层厚度分别变化, 有效机电耦合系数均会有最大值, 据此就可以确定电极层和氮化硅薄膜层厚度的较优值。另外, 将背层电极改为声学阻抗较小的铝金属, 可以提高品质因数, 提高器件性能。

参考文献:

- [1] Leach W M, Jr.. Controlled-source analogous circuits and SPICE models for piezoelectric transducers[J]. IEEE Trans.

- Ultrason., Ferroelect[J]. Freq. Control. 1994, Vol. 41(1): 60-66.
- [2] Young S. Cho, Y. Eugene Pak, Chang S. Han, and Sun K. H a. Five Port Equivalent Electric Circuit of Piezoelectric Bimorph Beam[J]. Sensors and Actuators 84, 140 (2000).
- [3] Kirby P B, Su Q X, Komuro E, Zhang Q, Imura M, and Whatmore R W. PZT Thin Film Bulk Acoustic Wave Resonator and Filters [C]//Proc. IEEE Int. Freq. Contr. Symp. PDA Exhibition, 2001: 687-694.
- [4] Puttner A, Hauptmann P, Lucklum R, Krause O, and Herrming B. SPICE Model for Lossy Piezoelectric Transducers [J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq., Contr.. 1997, 44(1): 60-67.



张翊(1977),男,博士研究生,研究方向为微机电系统、应用于生物医学领域的碳纳米管传感器与系统, zhangy@xmu.edu.cn.



郭航(1967),男,厦门大学萨本栋微机电研究中心副教授,研究方向为微机电系统、MEMS技术在超声领域的应用、集成电路设计与制造以及纳米技术。先后承担了国家“863”高技术计划项目,国家自然科学基金课题等, hangguo@xmu.edu.cn.