

SAW 谐振器传播属性的有限元仿真

黄小林, 曹培, 朱嘉林

(北京信息科技大学 传感技术研究中心, 北京 100101)

摘要:首先从理论上阐述了声表面波(SAW)谐振器传播属性的有限元分析(FEA)法;然后利用 ANSYS 软件,对 ST 切石英晶片的 SAW 谐振器进行模态分析和谐响应分析;最后处理仿真结果并得到结论:通过合成表面节点横向和纵向的模态位移得出 SAW 中质点的运动轨迹是椭圆,通过模态频率和对应的波长算出 SAW 在 ST 切石英晶片中的传播速度,通过分析纵向节点模态位移得出 SAW 的能量集中在距表面 2 个波长深度的范围内,通过幅频特性图得出谐振器在 SAW 频率处具有最大的频率响应。这些结论与理论基本一致,为设计 SAW 器件和研究 SAW 传感器提供了仿真依据。

关键词:声表面波(SAW)谐振器;传播属性;有限元;ST 切石英

中图分类号: O422.1; O732+.1; TN712+.5 **文献标识码:** A

A Finite Element Simulation of Propagation Properties of Surface Acoustic Wave Resonator

HUANG Xiaolin, CAO Pei, ZHU Jialin

(Sensing Technique Research Center, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100101, China)

Abstract: Firstly, the finite element analysis(FEA) method of the propagation properties of SAW resonator has been presented theoretically. Secondly, the modal and harmonic analyses of SAW resonator constructed with ST-cut quartz slice have been performed by utilizing ANSYS software. Lastly, the simulation result data have been processed and come to the following conclusion; that the motion track of each particle in the SAW is an ellipse has been obtained by combining the transverse modal displacement and longitudinal modal displacement of each surface node, the velocity of SAW propagating on the ST-cut quartz slice has been calculated by the model frequency and relevant wavelength, that the SAW energy is concentrated within the depth of two waves from surface has been obtained by analyzing the node displacement variation with depth, that the resonator has largest response at the SAW frequency has been acquired from the amplitude-frequency characteristic graph. These conclusions are mainly identical to the theoretical values, which offer the simulation basis for designing SAW device and studying the SAW sensor.

Key words: SAW resonator; propagation property; finite element; ST-cut quartz

0 引言

声表面波(SAW)是一种存在于半空间固体表面、沿固体表面传播、能量集中于固体表面的弹性波。由于激励和检测 SAW 存在问题,SAW 器件一直没有被利用。直到 1965 年, R. W. White 和 F. W. Voltmer 发明了激励和检测 SAW 的叉指换能器(IDT), SAW 器件才得到广泛的应用。SAW 谐振器是 SAW 器件的核心,早前对它建立的模型有 δ 函数模型和等效电路模型,当前建立的模型有 COM 模型和 P 矩阵模型。 δ 函数模型是最简单的模型,

从这个模型可得出频率响应函数和相对插入损耗,但不能计算输入、输出阻抗、体波干扰和进行谐响应分析;等效电路模型是基于将真实电场近似为交叉电场得出的,它可以对输入导纳、反射和吸收特性进行分析,但未考虑二次效应,不能计算电极的反射率和能量储存;COM 模型是一维模型,可得出导纳、波的幅度和波间的相互作用,但因为波受到电极的强反射,所以忽略了其他相互作用,仅考虑了两个反向传播的波的耦合作用,并未考虑波深度方向的损耗; P 矩阵模型是 COM 模型的矩阵形式,因此它具有

收稿日期:2011-06-03

基金项目:北京市教育委员会科技计划面上基金资助项目(KM201110772010)

作者简介:黄小林(1982-),男,江西赣州人,硕士生,主要从事声表面波角速率传感器的研究。E-mail: sunrise0203@163.com

有和 COM 模型类似的特点^[1-3]。有限元分析 (FEA) 方法是将模型划分成有限的单元, 然后以压电方程为基础, 采用变分原理和虚功原理对这些单元建立矩阵方程, 最后解这个矩阵就可得到各种解, 因此, 利用有限元法对 SAW 谐振器进行仿真是完备的。

1 SAW 谐振器传播属性的有限元理论计算

FEA 法是将模型分成有限的单元来对模型的各种性质进行分析和研究的方法。利用 FEA 法对 SAW 谐振器进行仿真, 先将模型划分成有限的单元, 然后用形函数、压电方程、变分原理和虚功原理对每个单元建立一个矩阵方程, 再接着以单元的公共节点为纽带将单个单元的矩阵方程叠加起来, 最后对这个叠加后的矩阵方程进行求解, 就可得到自由度解和各种所需的派生解^[2,4-6]。

压电耦合场有限元的矩阵方程组^[2]:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}_{\text{me}}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_{\text{me}}\mathbf{u} + \mathbf{K}_{\text{up}}\varphi = \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_P \\ \mathbf{K}_{\text{up}}^T\mathbf{u} + \mathbf{K}_{\text{pp}}\varphi = \mathbf{Q}_S + \mathbf{Q}_P \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{K}_{me} 为机械刚度矩阵; \mathbf{F}_B 为机械体力矩阵; \mathbf{F}_S 为机械面力矩阵; \mathbf{F}_P 为机械点力矩阵; \mathbf{D}_{me} 为机械阻尼矩阵; \mathbf{K}_{up} 为压电耦合矩阵; \mathbf{K}_{pp} 为介电刚度矩阵; \mathbf{Q}_S 为面电荷矩阵; \mathbf{Q}_P 为点电荷矩阵。

消去式(1)中的电势 φ , 并认为无机械阻尼, 即 $\mathbf{D}_{\text{me}} = 0$, 得到矩阵方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + (\mathbf{K}_{\text{me}} - \mathbf{K}_{\text{up}}\mathbf{K}_{\text{pp}}^{-1}\mathbf{K}_{\text{up}}^T)\mathbf{u} = \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_P - \mathbf{K}_{\text{up}}\mathbf{K}_{\text{pp}}^{-1}(\mathbf{Q}_S + \mathbf{Q}_P) \quad (2)$$

式(2)的齐次解对应模型的各种模态和相应的模态频率。 $u(t)$ 标准解的形式为

$$u(t) = \mathbf{u}'e^{i\omega t} \quad (3)$$

式中: \mathbf{u}' 为自然模态的节点位移矩阵, 假设与时间无关; ω 为模态频率。将式(3)代入式(2), 并令其右边等于 0, 得到

$$\mathbf{u}'(-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K}_{\text{me}} - \mathbf{K}_{\text{up}}\mathbf{K}_{\text{pp}}^{-1}\mathbf{K}_{\text{up}}^T)e^{i\omega t} = 0 \quad (4)$$

要使式(4)有非零解, 必须使

$$-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K}_{\text{me}} - \mathbf{K}_{\text{up}}\mathbf{K}_{\text{pp}}^{-1}\mathbf{K}_{\text{up}}^T = 0 \quad (5)$$

解式(5)得出的 ω 即是模态频率。把解得的 ω 代入式(4), 可解出对应频率的模态位移 \mathbf{u}' 。

2 SAW 谐振器的建模和仿真

2.1 ST 切石英晶片的系数转换

压电晶体都是各向异性的, 为了利用其某种特

定性, 需要选择特定的切型, 这里选择具有零温度系数的 ST 切石英晶片。因为 ANSYS 软件最终都按 e 型压电方程进行运算, 故这里针对 e 型压电方程进行系数转换。e 型压电方程为

$$\begin{cases} T = cS - e^T E \\ D = eS + \epsilon E \end{cases} \quad (6)$$

式中: T 为应力; S 为应变; E 为电场强度; D 为电位移; c 为刚度系数矩阵; e 为压电系数矩阵; ϵ 为介电系数矩阵。

ST 切石英晶片的无线电工程学会 (IRE) 表示是 (YX1)42.75°, 其坐标变换矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 42.75^\circ & \sin 42.75^\circ \\ 0 & -\sin 42.75^\circ & \cos 42.75^\circ \end{bmatrix} \quad (7)$$

介电系数矩阵的坐标变换公式为

$$\epsilon' = \mathbf{A}\epsilon\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}\epsilon\mathbf{A}^T \quad (8)$$

刚度系数矩阵的坐标变换公式为

$$c' = \mathbf{M}c\mathbf{M}^T \quad (9)$$

式中 \mathbf{M} 为邦德矩阵, 由 \mathbf{A} 矩阵^[7] 得出。

压电系数矩阵的坐标变换公式为

$$e' = \mathbf{A}e\mathbf{M}^T \quad (10)$$

$$(e')^T = (\mathbf{A}e\mathbf{M}^T)^T = \mathbf{M}e^T\mathbf{A}^T \quad (11)$$

经过 Matlab 编程计算, 可得到晶片坐标系下的各系数矩阵。

2.2 模型简化

由于 SAW 在 ST 切石英晶片任意垂直 Z' 轴平面内的传播方式都相同, 故可将三维模型简化成二维模型; 又因实际器件中叉指对数目通常几十到成百, 可看作无限对叉指对, 所以实际建模时只需建立 1 个周期, 然后在两边施加对称边界条件可达到相同效果。为更好地察看仿真结果, 实际建模时在 $X'Y'$ 平面内建立了 2 个周期, 模型示意图如图 1 所示。图中, Γ_T 为石英晶片的上边界, Γ_B 为石英晶片下边界, Γ_L 为石英晶片左边界, Γ_R 为石英晶片右边界。

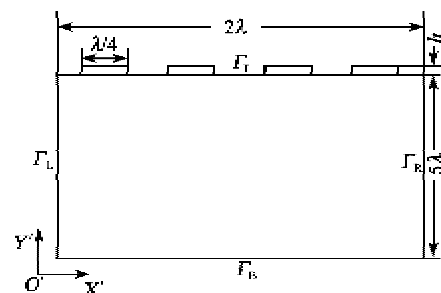


图 1 模型示意图

图 1 中基底是 ST 切石英晶片,叉指对是铝电极。ST 切石英晶片瑞利波速度为 3 158 m/s,密度为 2 649 kg/m³;铝的密度为 2 710 kg/m³,杨氏模量为 7×10¹⁰ N/m²,泊松系数为 0.33。这里对频率 100 MHz 左右的 SAW 进行仿真,根据

$$\lambda = v/f \quad (12)$$

式中:λ 为波长;v 为波速;f 为频率

选定 SAW 的波长 λ=32 μm,又选 h/λ=3%(h 为叉指对厚度),由此确定模型的尺寸:压电基底高度 5λ=160 μm;压电基底长度 2λ=64 μm;λ/4=8 μm;叉指对厚度 h=0.96 μm。

2.3 选择单元类型和定义材料属性

压电材料中结构和电场是相互作用的,所以应该选择耦合场单元类型。铝电极叉指对选择 PLANE13,其 Options 选项中单元自由度选择“UX UY VOLT”,单元行为选择“Plane strain”;石英晶片选择 PLANE223,其 Options 选项中分析类型选择“Piezoelectric”,单元行为选择“Plane strain”。选择完单元类型后,分别为单元定义材料属性。按上面给出的值定义铝的密度、杨氏模量和泊松系数。因为教材中 T、S 各元素的次序与 ANSYS 中 T、S 各元素的次序不同,所以定义石英晶片各系数矩阵时,需输入按其不同的次序转换后的系数矩阵;又因为模型已简化到 X'Y'平面,所以只需输入 X'Y'平面的参数。

2.4 建立模型及划分网格

定义好材料属性后,按图 1 的参数建立模型,用 glue 命令将所有的面连接起来以传递载荷;然后将铝材料属性和电材料属性分别赋给相应的面;接着为模型划分网格,产生有限元。

2.5 加载和求解

2.5.1 模态分析

划分网格后,选择模态分析,在 Analysis Options 的模态提取数和模态扩展数中都输入 30,点击 OK 后出现对话框,在对话框的开始频率处输入 80 MHz,结束频率处输入 120 MHz。接着定义载荷,如图 1 所示,上边界 Γ_T 为自由应力边界,不加任何约束;底部边界 Γ_B 加 Dirichlet 边界条件,令其 all DOF=0;按照 Thirumalai Kannan 的论文^[1],要在左右边界施加边界条件

$$\begin{cases} U_L = U_R \\ \phi_L = \phi_R \end{cases} \quad (13)$$

式中 U_L、U_R 和 φ_L、φ_R 分别为左右边界的位移和电势。如果在设定的波长存在 SAW 模态,那么它自然就满足式(13),故不需加这两个边界条件,而把这个模型看作无限对称,只在左右边界施加位移对称边界条件。加载完上述载荷,就开始求解;求解完后,进入通用后处理器查看所需结果。

2.5.2 谐响应分析

接着上面的步骤,选择谐响应分析,然后 Analysis Options 的求解方法选择模态叠加法,最大模态数填 25,最小模态数填 1。接着在 1、3 电极加载 1 V 的电压,在 2、4 电极加 0 电压。加载完上述载荷,开始求解,求解完后,进入时间历程处理器查看所需结果。

3 仿真结果及分析

经过求解,在 113.714 MHz 频率存在符合要求的 SAW 模态,其节点纵向位移分布图如图 2 所示。

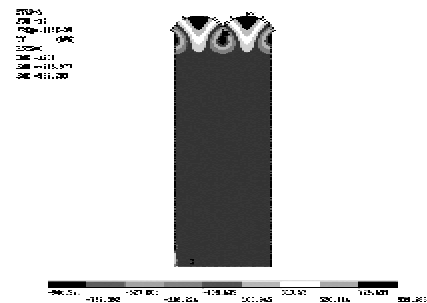


图 2 节点纵向位移分布图

由图 2 可见,SAW 是在固体表面传播的波,因其最大、最小位移全集中在固体表面,中下部节点的位移基本接近 0。

通过自上往下提取模型中某一纵向路径上节点的模态位移,并归一化,得到节点模态位移沿纵向的分布图,如图 3 所示。图中的数据更充分证明了 SAW 的能量集中在距表面 2 个波长范围内。

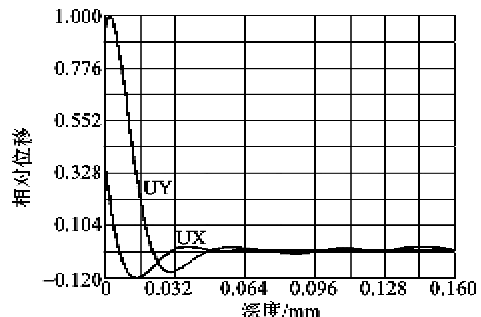


图 3 节点位移沿纵向的分布图

通过提取上边界 Γ_T 节点沿 X'和 Y'方向的模态位移,并以模态位移为纵坐标,节点距 Y'轴的距

离为横坐标,得到节点模态位移分布图,这即是某一时刻 SAW 的波动图,如图 4 所示。

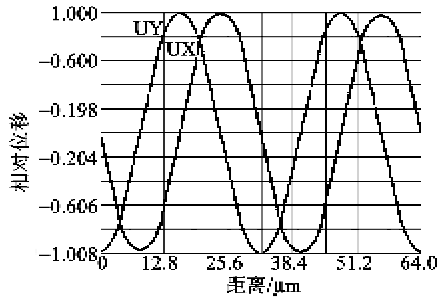


图 4 节点位移沿横向的分布图

由图 4 可明显看出,每个节点在 X' 和 Y' 方向的振动都是简谐运动,且在 Y' 方向简谐运动的相位超前在 X' 方向简谐运动的相位 90° 。因此,对表面上任意一个节点,其在 X' 方向的位移 x 、在 Y' 方向的位移 y 与时间 t 的关系满足:

$$\begin{cases} y = b \cos \omega t \\ x = a \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中 a 、 b 分别是节点在 X' 、 Y' 方向简谐运动的振幅,消去 t ,得到

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (15)$$

由式(15)得出 SAW 中每个质点的运动轨迹都是椭圆,与理论相符。根据图 4 中的波长和频率,再用式(12)可计算得到 SAW 的声速为 3 638 m/s,与理论值有误差。误差主要是由网格划分的密度和叉指电极的质量沉积效应引起,通过提高网格划分密度和减小叉指对的高度,可使速度接近理论值^[1]。

通过提取上边界 Γ_T 节点的电势,得到节点电势沿横向的分布图,这即是某一时刻节点电势的波动图,基本成正弦信号,如图 5 所示。

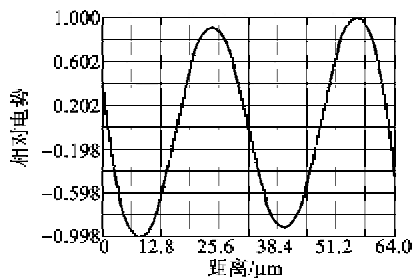


图 5 节点电势沿横向的分布图

通过谐响应分析得到某一节点位移的幅频特

性图,得出谐振器在 SAW 频率具有最大的频率响应,与理论完全吻合,如图 6 所示。

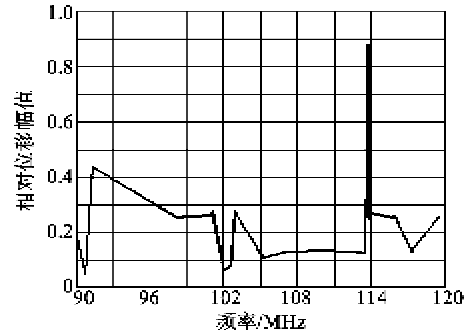


图 6 节点位移幅频特性图

4 结束语

SAW 器件的广泛应用带来如下问题:怎样缩短器件的开发时间和节约开发成本;选择何种材料、什么切型、设计怎样的结构才能使设计的器件实现特定的功能,并最符合设想。采用有限元软件对器件进行建模和仿真,可便于分析和解决这些问题。本文通过对 SAW 谐振器的有限元理论计算和 ANSYS 仿真,以及对仿真结果进行深入的分析,得到了 SAW 传播属性的各种数据,且这些数据和理论值基本一致;这为分析和解决上述问题,研究各种 SAW 传感器和设计 SAW 器件提供了仿真依据。

参考文献:

- [1] KANNAN T. Finite element analysis of surface acoustic wave resonators[D]. Saskatchewan: University of Saskatchewan, 2006.
- [2] GOWINI M M EL, MOUSSA W A. A reduced three dimensional model for SAW sensors using finite element analysis[J]. Sensors, 2009, 9: 9945-9964.
- [3] GOWINI M M EL, MOUSSA W A. A finite element model of a MEMS-based surface acoustic wave hydrogen sensor[J]. Sensors, 2010, 10: 1232-1250.
- [4] LOGAN D L. A first course in the finite element method[M]. Third Edition. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.
- [5] MOAVENI S. Finite element analysis-theory and application with ANSYS[M]. Second Edition. Beijing: Electronics Industry Press, 2005.
- [6] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [7] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.