

ZnO 单晶声表面波谐振器传播特性的研究

姚恒斌, 胡芳仁, 吴成玲

(南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:基于有限元压电材料中表面波传播的有限元分析原理,利用有限元分析软件 COMSOL 对基于 ZnO 单晶材料的声表面波器件进行多物理域耦合建模与仿真,提取出了符合声表面波振型的对称模态变形图和反对称模态变形图。通过谐振频率分析,计算出了 ZnO 单晶的相速度和机电耦合系数;通过频率响应分析,得出谐振器输入导纳、阻抗与频率之间的关系图;最后讨论了叉指换能器的结构对谐振频率、反谐振频率的影响,得出输入、输出叉指换能器(IDT)的叉指电极对数越大,插入损耗值越大,信号衰减越小。

关键词:ZnO 单晶;单端谐振器;声表面波(SAW);叉指换能器(IDT);COMSOL

中图分类号:TN712;TN702

文献标识码:A

Study on Propagation Characteristics SAW Resonator Based on ZnO Single Crystal

YAO Hengbin, HU Fangren, WU Chengling

(College of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts of Telecommunicates, Nanjing 210023, China)

Abstract: Based on the finite element analysis of surface wave propagation characteristics in a piezoelectric material, the multi-physics field coupling analysis software of COMSOL was used to simulate the single crystal ZnO-based surface acoustic wave resonators. Symmetric mode and antisymmetric mode of the ZnO surface acoustic wave were established. The phase velocity and electromechanical coupling coefficient of the ZnO single crystal were calculated by the analysis of the resonance frequency. By analyzing the frequency response, the relationship of the resonator's input admittance, impedance and frequency was obtained. Finally, the effect of IDT structure on the resonant frequency, anti-resonant frequency were discussed. The more the IDT's input and output interdigital electrode pair is, the larger the insertion loss and signal attenuation is.

Key words: ZnO single crystals; one-port resonator; SAW; IDT; COMSOL

0 引言

声表面波(SAW)是在压电基底材料表面上产生并传播,且振幅随着深入基底材料的深度增加而迅速减小的一种弹性波。1965年,R. W. White 和 W. Voltme^[1]发明了激励、检测 SAW 的叉指换能器(IDT)。常见的 SAW 单晶材料有石英晶体、铌酸锂、锆酸锂、锆酸钛及铈酸锂等。而 ZnO 单晶是一种新型的直接带隙的宽禁带半导体材料,它在 SAW 器件、传感器、液晶显示、发光显示器件等领域有广泛的应用,备受国内外研究机构的关注。日本东北大学和东京电波公司成功生长了具有优异物理化学性能的 5.08 大小的 ZnO 单晶。该单晶可望在表面声波传感器和体声波传感器方面得到广泛的应用。目前研究较多的是基于 ZnO 薄膜制成的

SAW 器件^[2-4],但基于单晶氧化锌的目前还未有研究。

1 SAW 谐振器的原理

SAW 单端谐振器的结构如图 1 所示,由 1 个放置在中间的 IDT 和旁边的两个短路或开路反射栅构成。IDT 电极材料一般为 Al、Au 等材料;换能器下方是基底材料(ZnO, PZT-5h 等压电材料)。单端口谐振器的基本工作原理^[5]:将交变的激励电压加载到中心 IDT 时,在压电基底表面建立的交变电场,利用压电基底的逆压电效应向两边传输 SAW, SAW 入射到两边一定周期放置的反射栅中,几乎完全反射回中心叉指电极,与下一个时间激发的 SAW 在中心叉指电极处产生共振,形成 SAW 驻

收稿日期:2014-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61274121);江苏省自然科学基金资助项目(BK2012829);南京邮电大学人才基金资助项目(NY212007)

作者简介:姚恒斌(1989-),男,江苏扬州人,硕士生,主要从事氧化锌单晶声表面波器件的研究。

波,然后通过压电效应转化为电信号输出。因此,当声波波速已知时,可算出谐振频率为

$$f_{\text{谐振}} = v/\lambda \quad (1)$$

式中: v 为声速; λ 为波长。

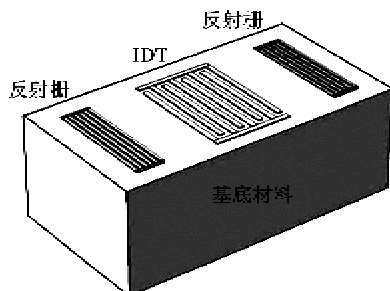


图1 SAW单端谐振器结构

压电基底存在声场和电场的耦合,并且满足压电本构方程和固体声波方程。经过数学推导,可以得到压电基底中的基本波动方程,方程将电势和位移的3个分量耦合在一起:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial t^2} - c_{ijkl}^E \frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_i \partial x_j} - e_{kij} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k \partial x_j} = 0 \\ e_{jkl} \frac{\partial^2 \mu_k}{\partial x_i \partial x_j} - \epsilon_{jk} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k \partial x_j} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: c_{ijkl}^E 为弹性常数; e_{kij} 为压电常数; ϵ_{jk} 为介电常数; φ 为电势; ρ 为压电材料密度。

有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 拥有强大的求解器,可很好地用来对式(2)这类波动方程进行求解。

2 仿真与结果分析

2.1 二维结构模型的建立

图1中的 SAW 谐振器为三维结构模型,减少了仿真计算量并确保仿真的精度。一般可采用如下假设^[6]:

1) SAW 只在表面上进行传播,在基底厚度方向上呈几何级数的衰减,因此仅模拟10倍波长深度就能很好地反应表面波特性。

2) 因为表面波的传播方向垂直于电极声孔径方向,声孔径方向的位移没有被耦合到波动方程中,在电极长度方向上场量不变,故可将三维结构模型简化成二维结构模型。

3) 一般 IDT 的对数几十、几百甚至上千对,为减小计算量,可采用周期性边界条件对模型进行进一步的简化。

因此,经简化后的谐振器模型如图2所示。图中, a 为电极宽度, h 为电极高度, p 为电极中心间

距。

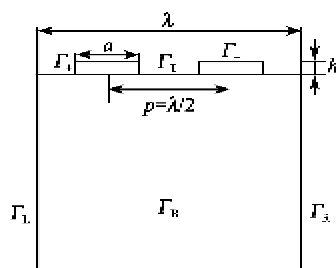


图2 谐振器简化后的二维模型

由于 SAW 器件的结构特殊,因此可通过分析一个周期来研究电极形状、材料等因素对 SAW 器件性能的影响。下面利用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics,设计一个基底材料为 ZnO 单晶,电极材料为 Al 的 SAW 单端口谐振器。

2.2 仿真

2.2.1 建立几何结构

为了减小仿真计算量又能确保仿真的精度,一般采用周期边界条件利用一对叉指电极对 ZnO 单晶单端口谐振器进行了模态分析。

首先,建立单端口谐振器的二维几何模型(见图2),其尺寸大小如表1所示。

表1 单端口谐振器的几何参数

边界	Γ_+, Γ_-	Γ_T	Γ_D	Γ_L, Γ_R
机械边界条件	自由	自由	固定	自由
电学边界条件	电位能	零电荷	零电荷	周期性边界条件

2.2.2 设置边界条件

压电晶体的边界条件^[1]如表2所示。

表2 单端口谐振器的边界条件

$\lambda/\mu\text{m}$	$p/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$
8.0	4.0	0.2	2.0

2.2.3 设置材料参数

ZnO 单晶的弹性矩阵、压电系数、介电常数^[7]分别为

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 20.7 & 11.77 & 10.61 & 0 & 0 & 0 \\ 11.77 & 20.70 & 10.61 & 0 & 0 & 0 \\ 10.61 & 10.61 & 20.95 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4.48 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.48 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4.46 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2 \quad (3)$$

$e =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.37 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.37 & 0 & 0 \\ -0.62 & -0.62 & 0.96 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

C/m^2

$$\epsilon = \begin{bmatrix} 8.33 & 0 & 0 \\ 0 & 8.33 & 0 \\ 0 & 0 & 8.81 \end{bmatrix} \quad F/m \quad (5)$$

$$\rho = 5704 \text{ kg/m}^3 \quad (6)$$

2.3 仿真结果分析

在 SAW 的有限元分析中,主要利用 COMSOL 有限元分析软件对 ZnO 单晶单端口谐振器的谐振频率和频率响应进行分析。利用模态分析模块,可提取到符合 SAW 特性的对称模态和反对称模态,如图 3 所示。

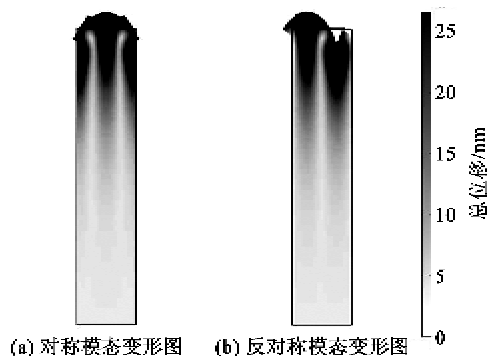


图 3 对称模态变形图与反对称模态变形图

谐振频率 f_{sc+} 和反谐振频率 f_{sc-} 的出现是由 IDT 金属电极的电极效应引起的^[3]。由图 3(a)可见,该振型的左、右边界上 x 方向的位移为 0,对应的谐振频率为 $3.348\ 086 \times 10^8 \text{ Hz}$;由图 3(b)可见,它的振型左右、边界上 y 方向的位移为 0,对应的反谐振频率为 $3.365\ 623 \times 10^8 \text{ Hz}$ 。图 3 右侧的标尺反映了质点的振动强度,颜色越深表示质点的振动强度越强,同时能量也越高。黑色区域主要集中在 ZnO 单晶表面 1~2 个波长范围内,这说明 SAW 的大部分能量集中在表面附近,符合 SAW 的特性。已知对称模态和反对称模态,利用

$$v_{sc} = p \times (f_{sc-} + f_{sc+}) \quad (7)$$

可计算出 ZnO 单晶的 SAW 相速度 $v_{sc} = 2\ 683.9 \text{ m/s}$ 。

图 4 为总位移与频率间的关系图。由图可知,当器件处于谐振状态,即 IDT 所加载的电信号频率与谐振频率相等时, IDT 激发出的 SAW 总位移最

大,电声转换效率最高。

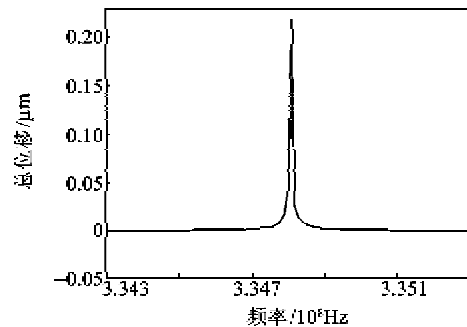
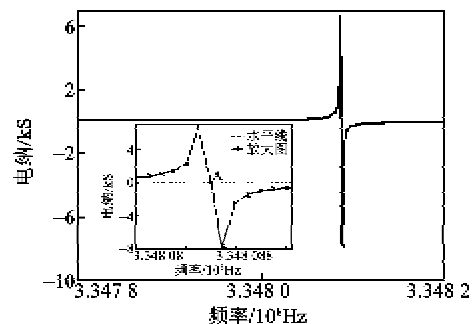
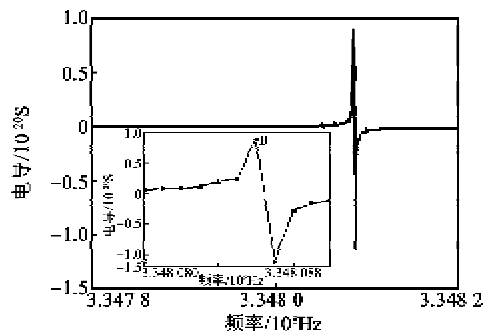


图 4 总位移与频率间的关系图

图 5 为 ZnO 单晶谐振器电纳、电导特性图。电导表征了 IDT 因向外辐射 SAW 能量而损耗的电能;相反,电纳表征了 IDT 存储能量的能力。图 5(a)中 A 点表示当频率为谐振频率($3.348\ 086 \times 10^8 \text{ Hz}$)时,电纳值为 0,这说明当谐振器工作在谐振频率时,这时 IDT 将电能完全转化成机械能,不存储能量。图 5(b)中 B 点表示当频率为谐振频率($3.348\ 086 \times 10^8 \text{ Hz}$)时,电导值最大,这说明了当谐振器工作在谐振频率时,此时的电能与机械能间的转换效率最高。因此,当电极上所加的交流信号频率等于谐振频率时,信号的插入损耗最小^[9]。



(a) 单端谐振器的电纳特性



(b) 单端谐振器的电导特性

图 5 单端谐振器、阻抗随频率变化图

2.4 IDT 结构对器件的影响分析

利用 COMSOL 软件建模和仿真的目的是根据仿真的结果找到对器件性能影响的相关参数及变化

规律,为以后器件的设计提供依据。经过大量的实验与仿真发现,叉指电极的敷金比(M_R)和 h 对 SAW 谐振器的 f_{sc+} 和 f_{sc-} 影响较大。

2.4.1 M_R 分析

首先,定义 $M_R = a/p$,由定义可知 $0 \leq M_R \leq 1$,由仿真可知 $M_R^{[10]}$ 与 f_{sc+} 、 f_{sc-} 关系,如图6所示。

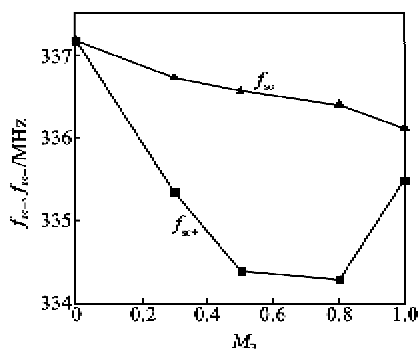


图6 f_{sc+} 、 f_{sc-} 与 M_R 间的关系

由图6可发现,当 $0 \leq M_R \leq 0.8$ 时, f_{sc+} 逐渐减小,当 $0.8 \leq M_R \leq 1$, f_{sc+} 反而增大;而 f_{sc-} 随着 M_R 的增大逐渐减小。其中, $M_R=0$ 表示基底表面无电极,这时基底上表面为自由边界条件。 $M_R=1$ 表示基底表面沉积一层金属电极,此时基底表面为金属化边界条件。

此外,还可由下式(Ingebrigtsen近似式)^[5]计算得到ZnO单晶的机电耦合系数 $k^2=0.816\%$ 。

$$k^2 \approx [2(\nu_f - \nu_m)] / \nu_f \quad (8)$$

式中: ν_f 为自由表面波速,即基底表面为没有电荷累积的自由表面($M_R=0$); ν_m 为金属化表面波速,即基底表面铺满金属电极($M_R=1$)。

2.4.2 h 的影响

为使谐振频率不受 M_R 的影响,这里令 $M_R=0.5$ 。通过改变 h 得出ZnO单晶谐振器的 f_{sc+} 、 f_{sc-} 与 h 之间的关系,如图7所示。由图可见,当 h 从100 nm增加到260 nm, f_{sc+} 逐渐变小,而 f_{sc-} 相对平稳(约336.5 MHz)。因此在设计ZnO单晶SAW

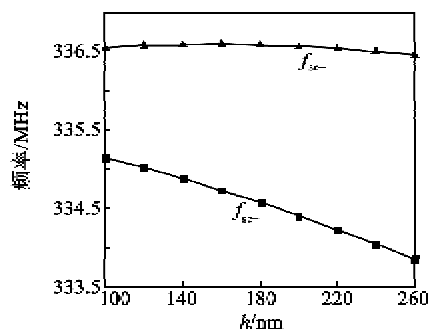
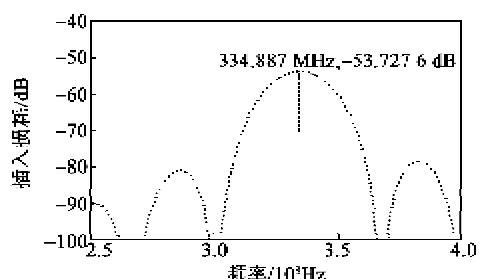


图7 谐振频率与 h 的关系

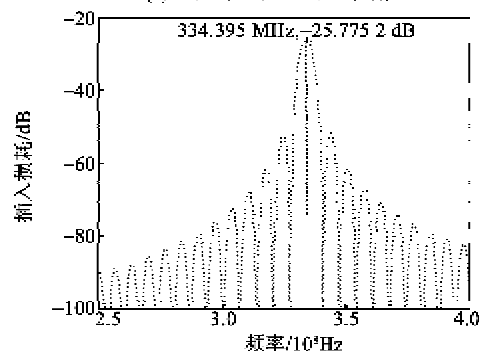
谐振器时,可通过调节电极高度使谐振器达到理想的谐振频率。

2.4.3 叉指数目的影响

图8是叉指数目为10、50的频率响应图。由图可知,当输入、输出叉指电极对数为10对时,中心频率为334.887 MHz,中心频率插入损耗为-53.727 6 dB;而当输入、输出叉指电极对数为50对时,中心频率为334.395 MHz,中心频率插入损耗为-25.775 2 dB。由此可知,改变输入、输出IDT的叉指电极对数会影响中心频率及中心频率的插入损耗值。



(a) 叉指数目为10的频率响应



(b) 叉指数目为50的频率响应

图8 叉指数目为10、50的频率响应图

3 结束语

本文利用有限元分析软件COMSOL对基于ZnO单晶材料的声表面波谐振器进行仿真,成功地提取了符合声表面波振型的对称模态变形图和反对称模态变形图,并计算出ZnO单晶的相速度 $v_{eff}=2683.9$ m/s,机电耦合系数 $k^2=0.816\%$,还得出谐振器输入导纳、阻抗与频率之间的关系图;最后,还分析了IDT结构对仿真结果的影响,为ZnO单晶声表面波谐振器的设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] WHITE R M, VOLTMER F W. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves[J]. Appl Phys Lett, 1965, 17: 314-316.

(下转第557页)