

基于 COMSOL 的声表面波标签仿真

卢旭,陈智军,黄鑫,陈涛,夏前亮

(南京航空航天大学自动化学院,江苏南京 210016)

摘要:以有限元法为基础,利用有限元软件 COMSOL 对声表面波标签进行仿真。声表面波标签的基片材料为铌酸锂压电单晶,叉指换能器与反射栅采用金属铝电极。通过频率特性仿真,提取了标签的谐振频率和反谐振频率,分析了叉指换能器金属电极对谐振频率的影响,获得了标签的幅频特性曲线。通过回波特性仿真,研究了不同反射栅编码对应的回波脉冲,分析了反射栅金属电极对回波脉冲的影响。

关键词:声表面波标签;有限元;叉指换能器;反射栅;谐振频率;回波脉冲

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Simulation of Surface Acoustic Wave Tag Based on COMSOL

LU Xu, CHEN Zhijun, HUANG Xin, CHEN Tao, XIA Qianliang

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the finite element method, the surface acoustic wave tag is simulated using COMSOL software. The substrate material is lithium niobate. The metal electrodes of the inter-digital transducers and the reflectors are both made up of aluminum. By the frequency characteristic simulation, the resonant and anti-resonant frequencies are extracted. The influence of the inter-digital transducers metal electrode on the resonant frequency is analyzed, and the amplitude-frequency curve is obtained. By the echo pulse characteristic simulation, the different echo pulses corresponding on different reflector encodings are researched. The influence of the reflector metal electrode on the echo pulse is analyzed.

Key words: surface acoustic wave tag; finite element analysis; inter-digital transducers; reflector; resonant frequency; echo pulse

0 引言

与传统的 IC 标签相比,声表面波(SAW)标签具有读取距离远,可实现对运动物体的识别,可在恶劣条件下工作,对金属和液体的抗干扰能力强等特点^[1]。SAW 标签越来越多的应用于射频识别系统,如德国西门子公司先后开发了挪威奥斯陆汽车过桥不停车收费系统^[2]和德国慕尼黑火车进站精确定位系统^[3],美国国家航空航天局(NASA)选择了 RF-SAW 公司生产的 SAW 标签用于国际空间站的包裹分拣^[4]。国内上海交通大学^[5]、中电集团 55 研究所^[6]、中科院深圳先进技术研究院^[7]等也先后开展了 SAW 射频识别标签的研究。

SAW 标签的精确设计是 SAW 射频识别系统的重要环节。随着计算机技术的迅猛发展,有限元

法(FEM)越来越广泛地应用于 SAW 器件的设计中^[8]。COMSOL 是一款大型的有限元分析软件,以高效的计算性能和杰出的多场直接耦合分析能力在有限元数值仿真领域里得到了广泛应用。本文基于 COMSOL 建立了 SAW 标签的有限元模型,仿真分析了标签的频率特性和回波特性,其研究结果可为 SAW 标签的精确设计提供仿真依据。

1 SAW 射频识别原理

SAW 标签由压电基片、沉积在基片上的叉指换能器(IDT)、反射栅及天线组成。基于 SAW 标签的射频识别系统如图 1 所示,其工作原理为阅读器发射的射频查询脉冲经标签天线接收进入 IDT,通过逆压电效应将电信号转换为 SAW 信号,SAW 在沿基片传播的过程中遇到反射栅产生反射和透

收稿日期:2011-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005121),航空科学基金资助项目(2010ZD52045),教育部博士点基金资助项目(200802871037),南京航空航天大学基本科研业务费专项科研基金资助项目(NS2010061)

作者简介:卢旭(1988-),男,安徽滁州人,硕士生,主要从事声表面波传感与识别的研究。陈智军(1976-),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要从事声表面波传感与识别的研究。

射,反射信号由 IDT 经正压电效应转换为脉冲回波信号经天线发射回阅读器。由于反射栅排列的不同,阅读器得到的回波脉冲串也各不相同,由此可通过反射栅编码来阅读标签信息。

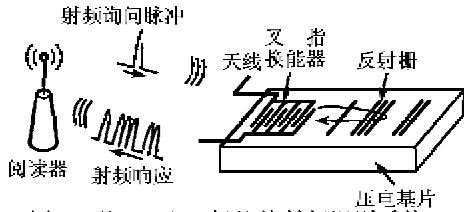


图 1 基于 SAW 标签的射频识别系统

2 频率特性仿真

在基于 SAW 标签的射频识别系统中,当 IDT 的外加激励电信号频率与标签的谐振频率相等时,SAW 的激发效率最高^[9]。外加激励电信号的频率是由阅读器发射查询脉冲决定的,标签谐振频率则由 IDT 结构和基片材料确定。因此,标签频率特性的分析是 SAW 标签设计的基础。

2.1 模态分析模型

模态是机械结构的固有振动特性,每一个模态具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。因此,通过模态分析可研究 SAW 标签的频率特性,同时也是研究标签回波特性的基础。

在 SAW 标签上, IDT 由周期性排列并与汇流条交替连接的多对电极构成。利用周期性边界条件,可把沉积在半无限压电基片上的 IDT 简化为一个由一对电极组成的周期结构,从而通过简化模型结构来减小计算量。标签模态分析模型如图 2 所

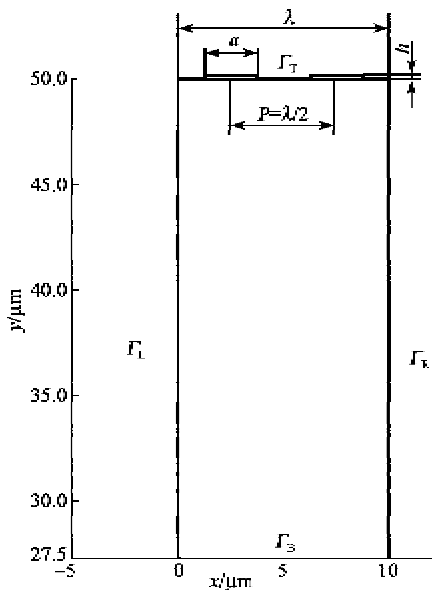


图 2 标签模态分析模型

示, IDT 电极宽度 a 为 $2.5 \mu\text{m}$, 高度 h 为 $0.2 \mu\text{m}$, 电极中心间距 P 为 $5 \mu\text{m}$, 基片宽度与 SAW 波长 λ 一致($\lambda = 2P$)。SAW 的能量主要集中在基片表面 1~2 个波长深度内,随着基片深度的增加其振幅呈指数衰减,因此基片厚度可简化为 2~5 倍波长。

基片材料为压电单晶铌酸锂,其切向和传播方向为欧拉角 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ 。IDT 电极为铝电极。模型边界条件的设定为

- 1) 上表面边界条件 Γ_T 为自由边界条件。
- 2) 下表面边界条件 Γ_B 为固定边界条件。
- 3) 左右边界条件 Γ_L 和 Γ_R 为一对周期性边界条件,即左、右边界上对应节点的 3 个自由度(x 方向位移 u , y 方向位移 w , 电势 Φ)是相等的。

2.2 特征频率分析

利用 SAW 能量集中在基片表面 1~2 个波长深度内的特点,可把 SAW 振型从很多各不相同的波动振型中提取出来,得到特征频率。图 3(b)为根据振动位移随基片深度的变化趋势,其对应的特征频率为 379.17 MHz。

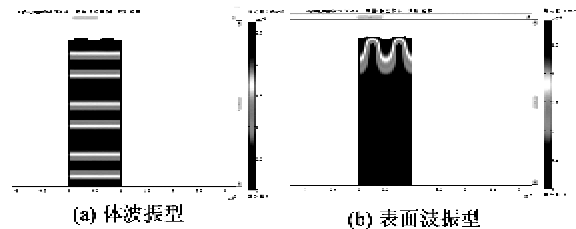


图 3 不同特征频率对应的波动振型

选择如图 3(b)对应的振型,振动位移随基片深度的变化如图 4 所示。横坐标表示振动质点距基片下表面的距离,即基片深度。声表面波振动位移随基片深度的增加呈指数衰减,能量主要集中在基片表面 1~2 个波长深度内,表明所选振型为 SAW 振型。

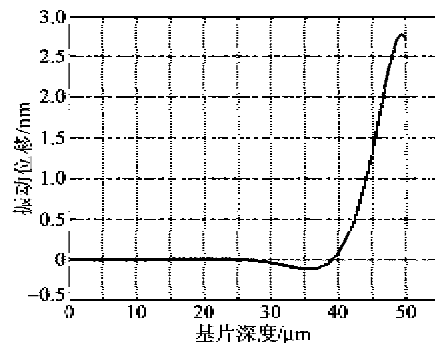


图 4 SAW 振动位移随基片深度的变化

2.3 叉指电极敷金比分析

通过模态分析提取到的标签特征频率包括谐振

频率 f_{sc+} 和反谐振频率 f_{sc-} , SAW 的传播速度 $v = (f_{sc+} + f_{sc-})P$. f_{sc+} 和 f_{sc-} 是由于 IDT 金属电极的电极效应引起的。定义叉指电极敷金比 $MR = a/P$. 当 $MR = 0$ 时, 可等效为基片上表面无电极情况, 为自由化边界条件, 此时表面电荷密度 $\sigma = 0$; 当 $MR = 1$ 时, 可等效为基片上表面覆盖一层金属薄膜, 为金属化边界条件, 此时表面电势 $\Phi = 0$.

当 $0 < MR < 1$, 通过模态分析得到的 SAW 波速随 MR 的变化如表 1 所示。随着 MR 的增大, SAW 波速减小。当 $MR = 0, 1$ 时, 基片上表面分别处于自由化边界条件和金属化边界条件, f_{sc+} 和 f_{sc-} 退化为一个特征频率, 与理论分析一致。文献[10]采用格林函数方法计算的自由化边界条件波速 $v_f = 3797.7$ m/s, 金属化边界条件波速 $v_m = 3788.0$ m/s. 两种方法计算结果基本一致, 误差仅为 0.48%, 表明了模态分析的有效性。

表 1 SAW 波速随 MR 的变化

MR	f_{sc+}/MHz	f_{sc-}/MHz	波速/(m/s)
0	364.26	384.26	3842.6
0.3	361.36	380.52	3809.4
0.5	379.47	377.46	3784.7
0.7	377.67	377.12	3773.9
1.0	377.02	377.02	3770.2

2.4 频率响应分析

频率响应分析用于确定器件在承受载荷时的稳态响应, 通过计算器件在不同频率下的响应来得到响应值与频率的关系曲线。

在模态分析模型的基础上, 给 IDT 的金属电极施加电压激励。通过电学边界条件的设置, 分别在 2 个 IDT 金属电极边界上施加简谐变化的 ± 1 V 电压。选择频率响应处理器, 设定频率响应分析范围在特征频率附近, 模型中 $MR = 0.5$. IDT 激发出的 SAW 振动位移随 SAW 激发频率的变化关系如图 5 所示。由图可知, 当 IDT 外加激励电信号频率与

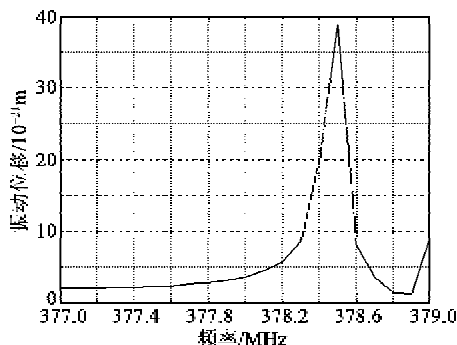


图 5 SAW 幅频特性

SAW 标签的谐振频率相等时, IDT 激发效率最高, 激发出的 SAW 振动位移最大。

3 标签回波特性的仿真

SAW 标签的编码是通过反射栅的不同排列方式来实现的[11]。阅读器发射的查询脉冲经 IDT 转换为 SAW 并沿基片表面传播, 每一个反射栅对 SAW 产生反射并在阅读器端得到一个回波脉冲, 通过在时域上观察回波脉冲来阅读标签信息。因此, 标签回波特性的分析是 SAW 标签设计的关键。

3.1 瞬态分析模型

瞬态分析用于确定器件承受任意的随时间变化载荷的响应, 也称为时间历程分析。SAW 标签的回波特性的仿真通过瞬态分析完成。

标签瞬态分析模型如图 6 所示。为简化模型减小计算量, 用一对 IDT 电极代表整个换能器。由于可通过固定位置反射栅的有无来实现对 SAW 标签的编码, 因此模型包括 4 个等间距的反射栅位置。

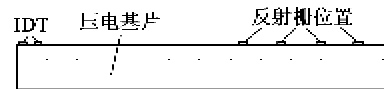


图 6 标签瞬态分析模型

实际应用时, 阅读器对标签发射一个宽度为 t_0 , 频率为 f_0 的查询脉冲。可通过在 IDT 两个金属电极上加随时间变化的电压激励来模拟查询脉冲, 其激励分别为 $\sin(\omega t)\text{rec}(t)$ 和 $\sin(\omega t + \pi)\text{rec}(t)$, 幅值为 1 V. 当 $0 < t < t_0$ 时, $\text{rec}(t) = 1$, 其余情况下 $\text{rec}(t) = 0$; $t_0 = 10^{-8}$ s; $\omega = 2\pi f_0$, f_0 为频率特性仿真得到的谐振频率。

当 $\lambda = 10 \mu\text{m}$ 时, 由频率特性仿真计算出的波速为 3784.7 m/s. 在 t_0 时间内, SAW 传播距离为 $37.847 \mu\text{m}$, 因此反射栅位置间距至少为 $37.847/2 = 18.92(\mu\text{m})$. 标签瞬态分析模型尺寸如表 2 所示。

表 2 标签瞬态分析模型尺寸

基体长度/ μm	基体深度/ μm	电极宽度/ μm	电极高度/ μm	反射栅位置间距/ μm	IDT 与第一条反射栅位置间距/ μm
400	50	2.5	0.2	30	270

3.2 反射栅编码分析

标签瞬态分析模型上有 4 个等间距的反射栅位置, 该位置上如果有反射栅时编码为 1, 若无反射栅时编码为 0. 为分析回波脉冲, 建立了反射栅编码分别为 1111 和 1101 两种标签模型。

瞬态分析得到两种反射栅编码对应的回波脉冲如图7所示。根据SAW传播速度和反射栅位置间距,可得出回波脉冲时间间隔约为16 ns,一个回波脉冲的宽度约为10 ns。图7中的回波脉冲比查询脉冲有约1倍宽度的增加,其原因是表面波在反射栅之间的多次反射叠加造成了回波脉冲的延展^[12]。图7中在4个回波脉冲后出现了小脉冲,其原因是基体右边界对SAW造成了一定的反射。在实际标签制作过程中,可通过在左右边界加上吸声材料来防止边界对SAW的反射。总之,图7的仿真结果可较好的反应不同反射栅编码对应的回波脉冲。

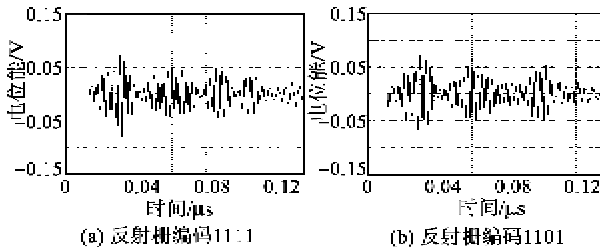


图7 不同反射栅编码对应的回波脉冲

3.3 反射栅反射率分析

对于SAW标签,每一个反射栅对查询脉冲同时产生反射和透射。随着反射栅数量的增加,透射的能量越来越小,回波脉冲的幅度减小直至无法分辨。可通过改变反射栅的反射率来优化每次反射透射的能量比,使回波脉冲尽可能达到等幅,以利于阅读器识别。

反射栅编码为1111,电极宽度由 $2.5\ \mu\text{m}$ 变为 $5\ \mu\text{m}$ 时,对应的回波脉冲如图8所示。与图7(a)对比,图8中第一个回波脉冲振幅增大,第4个回波脉冲振幅减小,第1、2个回波脉冲的幅值比增大。发生上述变化的原因是随着反射栅电极宽度的增加,反射栅的反射率变大。因此,设计标签时可通过改变金属电极宽度来实现对反射栅反射率的改变。

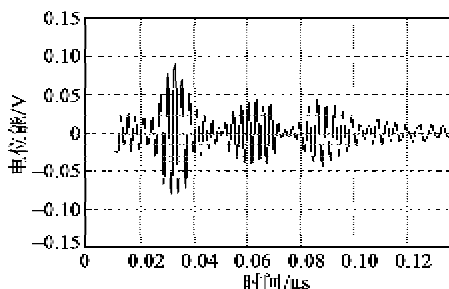


图8 反射栅编码为1111,金属电极宽度为 $5\ \mu\text{m}$ 时的回波脉冲

4 结束语

本文利用有限元软件COMSOL对声表面波标签进行了仿真。通过模态分析,把声表面波振型从很多各不相同的波动振型中提取出来,得到了特征频率,并且表明了叉指电极敷金比的增大会导致声表面波波速减小。通过瞬态分析仿真了反射栅编码对应的回波脉冲,并且表明了反射栅电极宽度的增加会导致反射栅的反射率变大。

参考文献:

- [1] PLESSKY V P, REINDL L M. Review on SAW RFID tags[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(3): 654-668.
- [2] 杨莺. 新结构声表面波质量传感器及声表面波集成声路隔离吸声技术的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2003.
- [3] REINDL L, RUILE W. Hybrid SAW-device for a european train control system[J]. Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium, 1994, 1(1): 175-179.
- [4] BROWN P, HARTMAN P, SCHELLHAS A, et al. Asset tracking on the international space station using global SAW tag RFID technology[J]. Proceeding of the IEEE Ultrasonics Symposium, 2007, 19: 72-75.
- [5] 韩韬. 基于声表面波器件的传感器信息无线传输及辨识标签系统的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2002.
- [6] 王玉林, 曹金荣, 前锋, 等. 声表面波射频识别无源电子标签[J]. 固体电子学研究与进展, 2007, 27(1): 109-114.
- [7] WANG Yulin, CAO Jingrong, QIAN Feng, et al. SAW RFID passive tags[J]. Research & Progress of SSE, 2007, 27(1): 109-114.
- [8] PENG Dasong, YU Fengqi. A novel FEA simulation model for RFID SAW tag[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2009, 56(8): 1753-1760.
- [9] 孙崇波. 基于有限元方法的高频SAW气体传感器建模仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [10] Hashimoto K 著. 声表面波器件模拟与仿真[M]. 王景山, 刘天飞, 孙玮, 译. 北京: 国防工业出版社, 2002: 50-51.
- [11] 陈智军. 声板波激发特性与液体传感研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [12] HARTMAN C S. A global SAW ID tag with large data capacity [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2002: 65-69.
- [13] 李庆亮. 声表面波射频识别标签与系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.