

声表面波射频标签的快速有限元/边界元分析

柯亚兵,李红浪,何世堂

(中国科学院声学研究所声学微机电系统实验室,北京 100190)

摘要:改进了漏波近似体波格林函数的快速有限元/边界元法,并应用该声表面波射频标签的分析。Peach提出漏波近似体波格林函数的理论但其方法需要经验公式计算漏波参数,该文提出了不需要经验公式的改进方法。该方法根据不同衰减的漏波在空间域不同分布的原理,在空间域格林函数中区分出各漏波的贡献,然后采用数学拟合提取出漏波参数,最后以 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片为例计算证实了该方法的有效性。采用改进的快速有限元/边界元分析一种声表面波射频标签器件,仿真与实验吻合证明了该方法的精确性。

关键词:声表面波器件;射频标签;有限元/边界元;体波;格林函数

中图分类号:TN65

文献标识码:A

Fast FEM/BEM Analysis for SAW RFID

KE Yabing, LI Honglang, HE Shitang

(Acoustical Micro-Electric Mechanics System Lab., Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The fast FEM/BEM method that approximates the residual Green's function by a superposition of leaky wave modes is improved in this paper, and is used to analyze surface acoustic wave (SAW) radio frequency identification (RFID) devices. The improved method distinguishes their contributions from the spatial Green's function and then contract the coefficients of leaky wave modes, which can avoid Peach's problem of calculating the coefficients of leaky wave modes by empirical formula. For an example of $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ substrate, the feasibility of the improved method is confirmed. The improved method is used for the simulation of a SAW RFID device. The simulation result agrees well with the experimental result, which shows that the improved method is accurate.

Key words: surface acoustic wave devices; radio frequency identification; FEM/BEM; bulk wave; Green's function

0 引言

射频标签(RFID)广泛应用于物流、制造和公共信息服务等行业,其标签主要采用集成电路(IC)技术实现。与IC标签相比,声表面波(SAW)RFID^[1]具有纯无源,读出距离长,环境适应性强,集成传感和标识功能等优点。有限元/边界元^[2-6](FEM/BEM)是一种全波分析法,可精确模拟任意叉指换能器结构的SAW器件。采用FEM/BEM模拟研究SAW RFID,成为广大学者的研究热点。

早期的FEM/BEM模型由Milsom^[2]提出,但只用BEM法模拟基片,忽略了质量负载效应,Morgan^[3]忽略了体波效应,近年来提出的有限长器件FEM/BEM法,以Ventura^[4], Plessky^[5], Peach^[6]等为代表,可考虑所有的效应,成为SAW

器件的精确模拟方法。国内大多数学者以Ventura的工作为基础,王为标^[7]首先实现有限长器件FEM/BEM方法,在王为标的基础上,罗为^[8]和本文作者^[9]采用分段多项式近似格林函数的方法,以解决FEM/BEM计算量大的问题,但由于体波部分仍存在大量积分计算,计算量较大。Peach采用漏波近似体波格林函数,使体波部分的积分简化为解析形式,但其缺点是需要经验公式计算漏波参数。

SAW RFID采用以瑞利波为主的基片材料,但由于反射条的指条数少,体波效应影响器件性能。现有FEM/BEM模拟SAW RFID需考虑体波贡献,其计算量很大。

为减小FEM/BEM模拟SAW RFID的计算量,采用漏波近似体波格林函数,提出在空间域格林

收稿日期:2012-03-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10834010, 11174318, 61071054)

作者简介:柯亚兵(1984-),男,湖北黄石人,博士生,主要从事声表面波传感器与射频电子标签的研究。通信作者:李红浪, E-mail: lhl@mail.ioa.ac.cn.

函数上区分各漏波贡献的漏波参数提取方法,解决了 Peach 方法中需求经验公式计算漏波参数的问题。以 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片材料为例计算,证实了漏波参数提取法的有效性。采用上述改进的 FEM/BEM 法仿真一种 SAW RFID 器件,并与实验结果和已报道的方法比较,以验证该改进方法的精确度。

1 理论模型

1.1 SAW RFID

图1为 SAW RFID 的原理图。读出器通过天线发送一个射频访问信号,标签的天线接收到访问信号后通过叉指换能器转化为 SAW 信号,SAW 经反射条反射后返回到叉指换能器,然后经天线发送回一个射频信号即标签的应答信号,应答信号是一系列的反射脉冲信号,读出器接收应答信号后通过解读反射脉冲的信息可解出标签的编码值。



图1 SAW RFID 的原理图

1.2 FEM/BEM 模型

采用 FEM/BEM 模拟 SAW RFID 有如下假设:压电基片是半无限大,准静态的;由于叉指换能器和反射条的指条足够长,因而场量沿指条长度方向不变,标签只需考虑其横截面,图2为 SAW RFID 的二维模型。

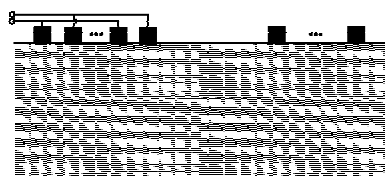


图2 SAW RFID 的二维模型

压电基片存在压电效应,需考虑声场和电场的耦合;叉指换能器和反射条由金属电极组成,只需模拟电极的声场。界面即基片和金属层交界面上的边界条件是在指条和基片接触面上,应力和位移连续,电荷密度等于界面电位的不连续量;在基片界面上无指条的地方,认为是自由表面,即应力和电荷密度都为0。

针对上述物理问题,FEM/BEM 模型的原理是 BEM 将基片内的物理微分方程转化为界面上的积分方程,因而将考虑的问题限定在界面上,界面的各场量的关系由积分方程决定;叉指换能器的各个电

极均采用 FEM 模拟,电极上的外力只存在于与基片的接触面上,其他边界是自由表面即无外力,根据 FEM 原理可得到接触面上各场量的关系方程;联立 BEM 和 FEM 得到的关系方程,根据界面上的边界条件,可求解出该问题。

2 FEM/BEM 速度优化

由于 BEM 模拟基片存在大量积分计算,导致 BEM 的计算量很大,是 FEM/BEM 的主要问题。根据格林函数分为静电、表面波、渐进项和体波4部分,BEM 的计算量相应分为4部分,其中以体波部分计算量最大,渐进项部分对器件性能影响很小,其他部分计算量很小,因此该文只考虑体波部分。

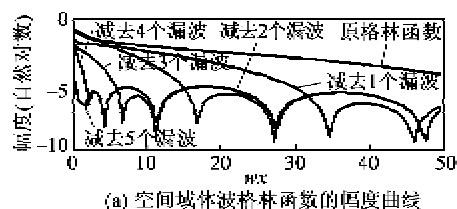
为减小体波部分的计算量,根据 Peach 的原理对体波格林函数采用漏波近似公式,即

$$G(wx) = \sum_{n=1}^N -jg_n e^{-j s_n wx}, x > 0 \quad (1)$$

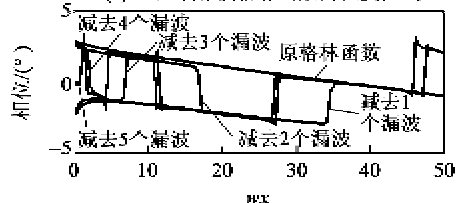
使体波部分的积分计算变为解析形式求解,以加快计算速度。式(1)中: $G(wx)$ 为体波格林函数; N 为漏波的个数; g_n, s_n 是第 n 个漏波的2个参数, g_n 为初始幅度和相位, s_n 为相速度和衰减; w 为角频率; x 为空间坐标。由于格林函数的对称性,只需考虑 $x > 0$ 的情况。

为克服 Peach 的漏波参数需要经验公式计算的问题,提出了一种不需要经验公式的漏波参数提取方法。该方法根据漏波衰减快慢不同,各漏波项在空间域分布也不同,因而可在空间域格林函数上区分出各漏波的贡献,然后根据数学拟合原理提取出漏波参数 g_n, s_n 。

以 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 材料,体波格林函数分量 $G_{44}(wx)$ 为例,如图3所示, $G_{44}(wx)$ 采用上述方法共提取出5个漏波,图中给出了 $G_{44}(wx)$ 依次减去



(a) 空间域体波格林函数的幅度曲线



(b) 空间域体波格林函数的相位曲线

图3 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 材料的体波 $G_{44}(wx)$ 的漏波近似

1~5个漏波后的剩余结果,可看出5个漏波取主要贡献的区域是不同的,依次是从远到近,因而5个漏波的贡献可区分开。图中减去5个漏波的曲线是 $G_{44}(wx)$ 减去5个漏波后的剩余部分即近似误差,与原 $G_{44}(wx)$ 值相比,误差较小,因此可见上述漏波参数提取方法是有效的。

类似上述方法采用漏波近似体波格林函数其他分量。考虑到 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 材料以瑞利波为主,因而只需分析2个位移分量和9个格林函数分量。格林函数每个分量提取出的漏波项数不一样,其中分量 G_{44} 的漏波项最多,有5个。

上述方法既保留了Peach方法的优点,使复杂积分计算变为简单的解析形式计算,又解决了Peach方法存在的问题,即不需要经验公式计算漏波参数,简化了漏波参数的提取。因此该方法改进了Peach的漏波近似体波格林函数方法。

3 RFID器件仿真与实验

将上述改进的快速FEM/BEM法应用于SAW RFID的仿真,以验证该方法的精确度。标签器件的叉指换能器结构如图4所示,基片材料采用 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$,叉指换能器的波长 λ 为 $19.2\text{ }\mu\text{m}$,指条对数为24,金属化比为0.5,孔径为 40λ ,铝膜厚 $0.576\text{ }\mu\text{m}$,反射条的指条宽度 $4.8\text{ }\mu\text{m}$,反射条之间间隔 40λ ,第一个反射条与叉指换能器的最后一个指条的间距 120λ 。



图4 SAW RFID器件的指条结构示意图

通过网络分析仪测量出实际器件的散射参数 S_{11} ,实验结果与仿真结果如图5所示。仿真程序在Intel Xeon CPU 5130@2.00 GHz运行。

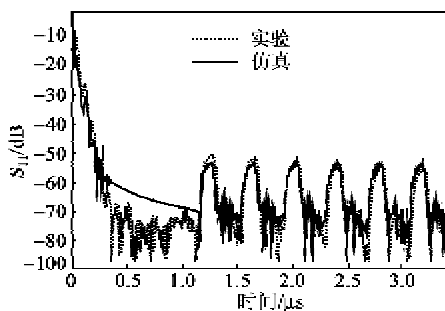


图5 SAW RFID器件的散射参数 S_{11} 的时域幅度响应

图5中,实验结果与仿真结果吻合,证实了改进的快速FEM/BEM方法是精确的。

4 结束语

根据Peach的原理采用漏波近似体波格林函数,提出在空间域格林函数上区分各漏波贡献的漏波参数提取方法,既保留了Peach方法的优点,使复杂积分计算变为简单的解析形式计算,又解决了Peach方法存在的问题,即不需要经验公式计算漏波参数,简化了漏波参数的提取。通过 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 为基本材料的SAW RFID仿真分析,仿真与实验吻合,证实了文章的改进方法是精确的。

参考文献:

- [1] PLESSKY V P, REINDL L M. Review on SAW RFID tags[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 2010, 57(3): 654-668.
- [2] MILSOM R F, REILLY N H C, REDWOOD M. Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by interdigital transducers[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 1977, 24 (Suppl3): 147-166.
- [3] MORGAN D P. Quasi-static analysis of generalized SAW transducers using the Green's function method[J]. IEEE Trans Sonics and Ultrason, 1980, 27 (Suppl3): 111-123.
- [4] VENTURA P, HODE J M, LOPES B. Rigorous analysis of finite SAW devices with arbitrary electrode geometries[C]//S. 1.; Proc IEEE Ultrason Symp, 1995: 257-262.
- [5] PLESSKY V P, THORVALDSSON T. Periodic green's functions analysis of SAW and leaky SAW propagation in a periodic system of electrodes on a piezoelectric crystal[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 1995, 42(2): 280-293.
- [6] PEACH R C. The numerical analysis of general SAW and leaky wave devices using approximate Green's function representations[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelec Freq Contr, 2009, 56(10): 2282-2291.
- [7] 王为标. 有限长声表面波器件的精确模拟[D]. 南京: 南京大学, 2004.
- [8] 罗为. 基于FEM/BEM方法的无线无源阻抗负载SAW传感器模拟与设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.
- [9] 柯亚兵, 李红浪, 何世堂. 声表面波器件的快速精确模拟[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2011, 41(10): 1210-1215.