

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

单根电极或沟槽形成的栅格对声表面波的散射*

韩 韬[†]

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘要 该文借鉴汪承灏先生研究栅格声表面波散射的技术路线,提出一种既不限制基片和栅格形状、类型,也不限制声波入射方向,可精确计算栅格对 SAW 散射的有限元通用模型。作为对《超声学》第六章“声表面波”中栅格对声表面波的反射和体波散射一节部分结论的进一步阐释和说明,计算了 YZ-LiNbO₃ 和 128°YX-LiNbO₃ 单晶上厚度为 200 nm、宽度为 1 μm 的单根悬浮铝栅条以及沟槽在不同频率下的反射系数曲线。提出的计算方法今后可推广应用于层状结构基底、应用到非规则指条、沟槽、金属点阵、基片端面、台阶等的反射的精确分析,为优化设计新型声表面波器件奠定理论基础。

关键词 声表面波, 散射, 有限元, 电极, 沟槽

中图法分类号: O426.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)01-0070-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.010

Surface acoustic wave scattering of an electrode or a groove

HAN Tao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China)

Abstract This paper reviews the research progress of the surface acoustic wave scattering from gratings on piezoelectric substrate. Based on Wang Chenghao's method, this paper extends it to a general model for arbitrary substrates, grating shapes and wave incidence angles using the finite element method. As examples, the frequency dependent SAW reflections of an aluminum electrode and a groove with the width of 1 micron and the height/depth of 2000 Armstrong on YZ-LiNbO₃ and 128°YX-LiNbO₃ substrate are calculated and discussed.

Key words Surface acoustic wave, Scattering, Finite element method, Electrode, Groove

2017-10-31 收稿; 2017-11-28 定稿

*国家自然科学基金项目 (11174205, 11474203), 国家重点研发计划项目 (2016YFB0402705)

作者简介: 韩韬 (1973-), 男, 山东莱芜人, 博士, 教授, 研究方向: 压电微声器件建模及 SAW 传感系统。

[†] 通讯作者 E-mail: than@sjtu.edu.cn

1 引言

栅格对声表面波(Surface acoustic wave, SAW)的散射及其与体波的相互作用一直是SAW理论研究中颇受关注的领域^[1-5]。栅格可以由特定厚度电极、介质或沟槽构成,其所在位置水平方向的电场总为零。入射的SAW在压电基体上所携带的电场受到栅格电短路的扰动和/或(与栅格的材料类型有关)因界面应力、应变改变所引起的质量加载扰动,分别产生表面波散射和一些向各个方向的体声波(BAW)散射。SAW器件的基本结构,如:叉指换能器、反射栅格等通常由周期排列的金属栅格构成。栅格的存在导致SAW传播特性的改变,使一般非色散表面波变成色散的,而且存在禁带和通带的区别。人们对无限周期金属栅格中SAW传播特性开展的理论研究已较为成熟。其中,耦合模(COM)理论的前提条件就是周期排列无限长栅格阵,中心频率处体声波辐射为零。这是因为每个周期中处于相同位置的相抵消,辐射为零。随着表面波在栅格阵中波速的降低,干涉加强的角度向着平行于表面的方向转,各指条都处于相同的条件下,向体内辐射体波时相当于周期线源阵列,所辐射的体波将互相干涉。无限周期源干涉的结果使得只有几个分立的角度下所辐射的体波将相互加强,其余的角度下干涉互动。当低于该体波模式的频率阈值后,便不再有体波向体内辐射。

对于有限长栅格阵或周期性被破坏的非同步栅格区域,邻近栅格相互干涉后各个方向的体波不再为零,即产生体波散射。例如:SAW纵向耦合双模谐振器型滤波器(DMS)中hiccup谐振器的非同步栅格区域而导致体波散射损耗^[6]。近20年发展起来的用于无线无源传感器或射频识别器件的反射型延迟线结构SAW器件具有类型多样的栅格结构。例如:仅有一根到数根电极构成的金属栅格、非规则指条、沟槽、金属点阵、基片端面、台阶等的反射,栅格之间存在很长的自由间隙。目前广泛使用的唯像模型如等效电路模型和COM模理论都不能对其进行精确的理论模拟。

1990年出版应崇福院士编著的《超声学》一书是我国超声领域的经典教材。汪承灏先生撰写了书中第六章“声表面波”部分^[7]。其中SAW在栅格阵中的传播特性分析是我这一代学者初涉SAW理论

时不可多得的重要中文学术资料。尤其是单一沟槽形成的栅格对SAW的反射和体波散射一节的物理阐释曾让我反复阅读和琢磨。其中的公式如何进行求解和计算起初并不得要领;对当初计算条件下能绘出YZ-LiNbO₃上单根沟槽在各个方向角的体波散射分布图感到崇拜,分析散射问题的思路对于我后续的研究工作确有很大帮助和启发。

声表面波领域知名学者Plessky首先采用南京大学水永安先生与其合作开发的FEMSAW软件,计算了数根电极构成的短栅格对声表面波的二次谐频反射^[8-9]。该软件的理论基础正是汪承灏先生在国际上首先推导得出了任意表面电源和声源激发的广义格林函数,可以将电极的质量加载效应考虑在内,目前被国际上公认是分析声表面波激发和传播的最严格的方法^[10-11]。Plessky的软件只能获得器件电学参数,因此其只能被迫首先计算一个三端对测试器件的两个输出端对上的电学导纳参数,再通过时域窗截取和快速傅立叶变换获得夹在两个输出端对之间的短栅格的反射、透射以及散射等参数,体波散射是扣除反射和透射残余量后获得的^[12],由于反射振幅约为入射的千分之几到百分之一二,能量比只有万分之一的数量级。散射能量与反射能量相当。这样对透射率的计算至少需要 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 的精度,难度很大。博士毕业后我跟随水永安先生,从2003年开始,同样基于格林函数结合有限元理论研究上述问题。我们基于广义格林函数计算的电学源(电荷或电势)与力学源(表面法向应力或振动位移)等核心中间结果,把反射看成入射SAW形成源和源再激发SAW的相互作用组合,散射看成入射SAW形成源和源再激发体波的相互作用组合,从而直接精确地计算出随频率变化的SAW反射系数、透射系数和体波散射,解决了利用傅立叶变换方法中计算速度慢、体波散射计算精度低等缺点。

随着计算技术的快速发展,采用纯有限元方法仿真有限长度SAW器件逐渐成熟^[13]。但纯有限元方法计算得到栅格下的场是由静电贡献、Rayleigh波贡献、渐进项贡献和体波贡献等所有激发源共同作用的结果,并不能像广义格林函数法那样可以解析地分离出Rayleigh波贡献。因此,很多学者采用有限元的时域分析方法^[14],以分离静电贡献和声表面波多次反射,但该方法很难消除体波影响,故计算

结果误差很大。我们课题组提出了一种既不限制基片和栅格形状、类型,也不限制声波入射方向,可精确计算栅格对SAW散射的有限元通用模型^[15],本文用其讨论了YZ-LiNbO₃和128°YX-LiNbO₃两种基底上单根金属或沟槽形成的栅格对声表面波的散射,作为对《超声学》第六章“声表面波”中栅格对声表面波的反射和体波散射一节部分结论的进一步阐释和说明,以庆祝汪承灏院士八十岁华诞。

2 有限元通用模型

利用商用化有限元软件COMSOL建立SAW器件的准三维模型如图1所示。孔径方向 $\pm y$ 方向加入周期边界条件。指定频率 f 的入射SAW模式由周期为 $p_I = V_{SAW}/f$ 的IDT激发。入射波波数为 $\beta_{SAW} = 2\pi f/V_{SAW}$, V_{SAW} 是自由表面的声表面波波速。

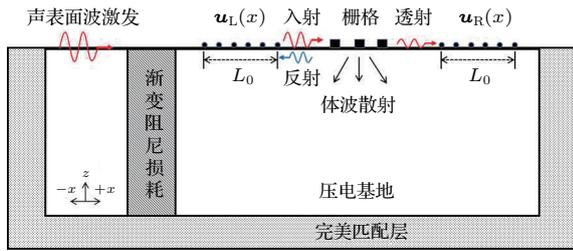


图1 准三维有限元模型

Fig. 1 Quasi-finite element model

为了有效地分离出SAW的贡献,设置渐变阻尼损耗模块(DLM)夹在SAW换能器和栅格之间,消除SAW $+x$ 正向入射模式与 $-x$ 方向反射模式之间相互作用。设置完美匹配层(PML)加在模型的底部和左右两侧,以缩减模型计算区域的尺寸和消除基底边界的BAW散射的影响。

在给定频率 f 下进行频域FEM分析,从结果中提取表面位移。如图1所示,基底表面($z = 0$)栅格的左侧和右侧两个区域,其表面位移 $\mathbf{u}_L(x)$ 和 $\mathbf{u}_R(x)$ 可以分别写成:

$$\mathbf{u}_L(x) = A_{inc} e^{-j\beta_{SAW}x} + A_{ref} e^{+j\beta_{SAW}x} + \sum_i^N A_{ref,i} e^{+j\beta_{ref,i}x}, \quad (1)$$

$$\mathbf{u}_R(x) = A_{tran} e^{-j\beta_{SAW}x} + \sum_i^N A_{tran,i} e^{-j\beta_{tran,i}x}, \quad (2)$$

其中, A_{inc} 、 A_{ref} 和 A_{tran} 分别是入射、反射和透射SAW的幅度, $A_{ref,i}$ 和 $A_{tran,i}$ 以及 $\beta_{ref,i}$ 和 $\beta_{tran,i}$ 是其他反向和正向散射模式的幅度和波数($i = 1, \dots, N$)。每个频率下不同波长的位移场叠加在一起,要想分离它们,需要对表面位移 $\mathbf{u}_L(x)$ 做傅里叶变换。正向入射和后向反射声表面波的幅度可以通过在波数 $\beta = \pm\beta_{SAW}$ 下的谱峰值计算得出。通过对表面位移 $\mathbf{u}_R(x)$ 作同样的处理,可以得到透射波的幅度 A_{tran} 。最后,反射系数 r 和透射系数 t 可以分别定义为

$$r = A_{ref}/A_{inc}, \quad (3)$$

$$t = A_{tran}/A_{inc}, \quad (4)$$

同时,可以计算由散射产生体声波引起的功率损耗率和模式转换 $1 - |r|^2 - |t|^2$ 。

由于模型有界, IDT激发和/或由PML产生的BAW都包含在 $\mathbf{u}_L(x)$ 和 $\mathbf{u}_R(x)$ 中,如果在 $\beta = \pm\beta_{SAW}$ 处的谱峰不够尖锐,会导致计算 r 和 t 的数值误差,因此,有必要正确设置PML层和DLM来抑制杂峰。今后可以采用文献[16]提出的方法直接产生一个虚拟的源场,不再需要DLM模块。

3 计算结果及分析

图2首先给出YZ-LiNbO₃和128°YX-LiNbO₃单晶上厚度为200 nm、宽度为1 μm (半周期为2 μm)的单根悬浮铝栅条在不同频率下的反射系数曲线。其中,计算结果与利用“源再生”方法的计算结果进行了比较,两种方法的计算结果之间的相对误差不超过3%。

根据这两种基片上的Rayleigh波波速,单根金属栅条的最大反射并非发生在Bragg频率处。YZ-LiNbO₃单晶上深度为200 nm、宽度为1 μm (周期为2 μm)的矩形沟槽在不同频率下的反射系数曲线,也表现出类似的特性。由于电极厚度或沟槽深度达到5%,此时计算出的单根电极或沟槽的反射系数与COM模型中单栅格反射系数数值也有较大差异(例如:基于COM模型计算128°YX-LiNbO₃上相同厚度的周期排列栅格的每根电极反射系数为0.103)。

128°YX-LiNbO₃上最大反射发生在2.1倍频处,且反射率远高于YZ-LiNbO₃上开路栅条的反射

率。当栅格由两根金属指条组成时，其反射系数可以比每个单根金属栅格反射峰值的2倍还大，这是其反射峰是两根金属指条的反射谐振、两根金属指

条共同相互作用以及体波辐射四个分量干涉的结果。当两根指宽度相等且指条中心距达到特定距离时，前三部分同相迭加，反射系数达到最大。

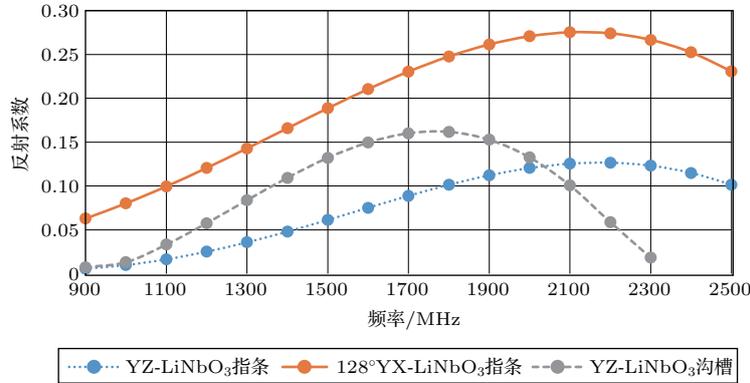


图2 随频率变化的单金属指条或沟槽的SAW反射系数

Fig. 2 The reflectivity of a single metal finger or groove with varying frequency

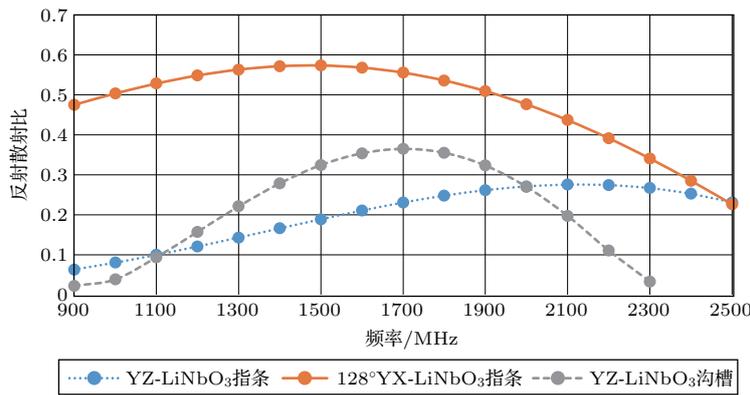


图3 单根金属指条或沟槽的反射与体波散射总能量的比值

Fig. 3 The ratio of the reflection of a single metal finger or groove to the total energy of the bulk wave scattering

汪承灏先生在书中指出：“YZ-LiNbO₃上散射的体波能量比反射的表面波能量要大一个数量级以上”，显然，入射的瑞利波经过这样为数不多的几条反射栅能量就会损失殆尽。图3则给出了单根金属指条或沟槽的反射与体波散射总能量的比值曲线也充分证明了该结论。相比而言，128°YX-LiNbO₃上开路指条的体波散射要小数倍，与该晶体切型具有较好的体波抑制能力有关。YZ-LiNbO₃上高金属化比的短路指条产生的体波散射则比开路指条的要小^[17]。YZ-LiNbO₃上快切变波为纯机械水平切变波，与瑞利波解耦，所以体波散射中只有慢切变波和纵波两个模式。只要对不同深度方向进行180°扫描，完全可以计算出不同体波模式的散射

所占的比重，绘制出各个方向角的体波散射波束及各个角度的强度。当数根栅条或沟槽相互组合时，某个指条间距对某方向的体波产生抵消作用时，对其他方向的体波的抵消作用就减弱，对其他体波模式也许会加强。采用不同的间距可以抵消不同的散射角，而使散射波束变窄。

4 结论

汪承灏先生在国际上首先推导得出了任意表面电源和声源激发的广义格林函数，可以将电极的质量加载效应考虑在内，被国际上公认是分析声表面波激发和传播的最严格的方法；基于上述方

法,他还较早研究了单根金属或沟槽形成的栅格对声表面波的散射问题。本文借鉴其研究思路,提出一种既不限制基片和栅格形状、类型,也不限制声波入射方向,可精确计算栅格对SAW散射的有限元通用模型。作为对《超声学》第六章“声表面波”中栅格对声表面波的反射和体波散射一节部分结论的进一步阐释和说明,本文计算了YZ-LiNbO₃和128°YX-LiNbO₃单晶上厚度为200 nm、宽度为1 μm(半周期为2 μm)的单根悬浮铝栅条以及沟槽在不同频率下的反射系数曲线。该计算方法今后可推广应用于层状结构基底、应用到非规则指条、沟槽、金属点阵、基片端面、台阶等的反射的精确分析,为优化设计新型声表面波器件奠定理论基础。

参 考 文 献

- [1] 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. Sonics. Ultrason., 1977, 24(3): 147-166.
- [2] Wang C, Chen D. Scattering of Rayleigh wave through a groove on surface of piezoelectric crystal[J]. Scientia Sinica (Series A), 1985(3): 286-300.
- [3] Wagner K C, Reindl L, Manner O. Surface wave to bulk wave conversion in SAW reflectors on strong coupling substrates[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1993: 209-213.
- [4] Simons D A. Scattering of normally incident Rayleigh waves by thin strips[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1976, 60(5): 1100-1107.
- [5] Darinskii A N, Weihnacht M, Schmidt H. Surface acoustic wave scattering from steps, grooves, and strips on piezoelectric substrates[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., and Freq. Contr., 2010, 57(9): 2042-2050.
- [6] Wang W, Zhang X, Shui Y, et al. Minimizing the bulk-wave scattering loss in dual-mode SAW devices[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., 2006, 53(1): 193-198.
- [7] 汪承灏. 声表面波[M]// 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1990.
- [8] Wang W, Han T, Zhang X, et al. Rayleigh wave reflection and scattering calculation by source regeneration method[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., 2007, 54(7): 1445-1453.
- [9] Han T, Wang W, Wu H, et al. Reflection and scattering characteristics of reflectors in SAW tags[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., and Freq. Contr., 2008, 55(6): 1387-1390.
- [10] Wang C, Chen D. Analysis of surface excitation of elastic wave field in a half space of piezoelectric crystal—general formulae of surface excitation of elastic field[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1985, 4(4): 232-243.
- [11] Wang C, Chen D. Generalized Green's functions at surface excitation of elastic wave fields in a piezoelectric half-space[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1985, 4(4): 297-313.
- [12] Lehtonen S, Plessky V P, Salomma M M. Short reflectors operating at fundamental and second harmonics on 128°LiNbO₃ [J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., 2004, 51(3): 343-351.
- [13] Solal M, Gallagher M, Tajic A. Full 3D simulation of SAW resonators using hierarchical cascading FEM[C]. 2017 IEEE Ultrasonics Symposium, 10.1109/ULTSYM.2017.8092571.
- [14] Peng D, Yu F. A novel FEA simulation model for RFID SAW tag[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., 2009, 56(8): 1753-1760.
- [15] Zhang Q, Han T, Zhang B, et al. Frequency domain FEM analysis of reflector scattering characteristics for SAW tags[C]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2016: 1-4.
- [16] Li X, Bao J, Huang Y, et al. Traveling wave excitation for FEM simulation of RF SAW/BAW Devices[J]. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., and Freq. Contr., 2017, 10.1109/ULTSYM.2016.7728495.
- [17] 王晓伟. 低损耗声表面波标签的设计及温度补偿研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.