

一种计算声表面波在周期栅阵中传播特性的方法

徐方迁, 金步平

(浙江传媒学院电子信息学院, 杭州 310018)

摘要: Hashimoto 有限元程序是日本 Chiba 大学研究人员从 1973 年开始、历时几十年用 Fortran 语言编写、计算声表面波在周期栅阵中传播特性的一个软件包。该程序能计算 Rayleigh 波、漏表面波、SH 型表面波、表面横波等多种声表面波的传输特性,同时它能适用于一个周期内单根指条、两根指条和多根指条及声表面波在栅阵中斜入射的情况。该程序已在声表面波(SAW)研究人员中得到了广泛的应用。

关键词: 程序;声表面波;频散关系

中图法分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2008)-04-0612-04

A method for calculating the properties of surface acoustic waves propagation in periodic metal gratings

XU Fang-qian, JIN Bu-ping

(Department of Electronics and Information, Zhejiang Institute of Communication and Media, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The Hashimoto's FEM program is a complete set of software written in the form of FORTRAN source codes, which was developed by Japanese researchers of Chiba university after spending several ten years from 1973 and used to calculate the properties of surface acoustic wave propagation in periodic metal gratings. The program can simulate Rayleigh wave, leaky wave, SH-type SAW and surface transverse wave devices in the cases of single-electrode gratings, double-electrode gratings and triple-electrode gratings. It is now widely used by SAW researchers.

Key words: Hashimoto program; acoustic surface wave (SAW); dispersion relation

1 引 言

对于研发高性能的声表面波器件,需要快速和精确的模拟和设计工具,由于计算机技术的发展,在器件设计时可以编写程序实现基于声表面波场分析的器件模拟运算,在设计声表面波器件时对其精确模拟是非常重要的。为了这个目标,日本 Chiba 大学 Hashimoto 等 SAW 研究人员用 FORTRAN 原代码编写了一套计算机程序^[1]用于 SAW 器件的模拟计算,公布在网站^[2]上,可以免费下载,该程序能对实际器件进行理论分析

和模拟。不仅如此,它的原代码完全开放,一些数学子程序可以直接用于相关的声表面波理论研究中,已在世界范围内得到了广泛的应用^[3,4]。由于 Hashimoto 是主要研究人员,将这套程序称之为 Hashimoto 程序。程序编写最早是 1973 年,目前仍在进一步的完善中。凝聚了日本千叶大学 SAW 研究小组几代人的心血。掌握 Hashimoto 程序的使用方法、物理原理和算法对于 SAW 研究人员具有重要意义。本文首先介绍 Hashimoto 程序所依据的声表面波的基本理论及其程序结构。然后以 Femsda 程序为例说明其具体使用方法,并给出一个算例。

2 Hashimoto 有限元程序的组成和子软件包的功能

收稿日期:2008-01-03;修回日期:2008-04-25

基金项目:本文受浙江省中青年学科带头人和浙江省自然科学基金(Y606238)资助。

作者简介:徐方迁(1965-),男,安徽青阳人,博士,副教授,研究方向为声表面波器件的理论分析和制作。

通讯作者:徐方迁,E-mail:xufangqian2005@163.com

Hashimoto 等人对计算 SAW 在周期性有限厚

金属栅中传播时频散特性提出了自己的方法^[5],在这种方法中,分析栅电极的电荷分布时用 FEM(Finite Element Method)方法,并把间隙上的电荷分布作为晶片上的电量的一部分来考虑。为了分析 SAW 在不等宽栅电极、不等宽栅间距或不等厚栅电极中的激励和传播特性,他们用 Aoki 理论分析 SAW 在每一周期包括两根电极栅阵中激励和传播特性,用它的推广理论分析 SAW 在每一周期包括三根电极栅阵中激励和传播特性。根据这种方法设计的软件有 Femsda,Obliq,Multi,分别计算速度与机电耦合系数、确定频散关系、以及声波斜入射、多指栅等情况。另外,文件夹 Common 是公用子程序,Eps 是计算有效介电常数 $\varepsilon(S)$,Vcal 是用有效介电常数理论(其它用离散 Green 函数理论)计算速度和机电耦合系数,Manual 是程序使用手册,Tools 是制作动画、显示场分布,Makefile 说明各子软件包的构成,文件夹 Sync 和 Msync 分别是 Femsda 及 Multi 的修正版,运算速度比原来的快。

3 以 Femsda 为例说明 Hashimoto 程序具体使用方法

由于有限元方法(FEM)用于电极区,要适当权衡 FEM 取样点之间的距离以便有较快的收敛速度。为简单起见,该程序假定电极横截面是矩形。程序能够计算的基底材料是:LiNbO₃,LiTaO₃,Li₂B₇O₄,GaAs,quartz,La₃Ga₅SiO₁₂和 K₂NbO₃共七种,电极材料仅铝和金两种。Femsda 由三个程序组成,分别命名为 Femsd4,Femsd3 和 Femsd2,其中 Femsd4 适用于每一个位移分量都与电势耦合的情况;Femsd3 适用于水平剪切分量与电势解耦的情况。Femsd2 适用于纵向位移分量和垂直位移分量都与电势解耦的情况,但是三种程序的使用方法完全一样。

程序可以在 Visual Fortran 开发环境中运行,首先建立一个“工程”,然后往该工程中添加所要运行的主程序和相应的子程序,这样即可编译、运行。具体步骤是:

第一步:“输入文件名”,程序输出的数据将存入该文件中。

第二步:“对于 LNOW(arnar), LNON(akagawa), LNOK(ovacs), LTOW(arnar), LTOS(mith), LTOk(ovacs), LBO, GaAs, quartz, LGS and KNO 输入 1-11”以确定基底材料。若输入其它数据,程序将被终止。LNOW(arnar), LNON(akagawa), LNOK(ovacs),

LTOW(arnar), LTOS(mith), LTOk(ovacs) 这种写法意指:

- ① LNOW(arnar)=LiNbO₃+Warner(人名)
- ② LNON(akagawa)=LiNbO₃+Nakagawa(人名)
- ③ LNOK(ovacs)=LiNbO₃+Kovacs(人名)
- ④ LTOW(arnar)=LiTaO₃+ Warner
- ⑤ LTOS(mith)=LiTaO₃+ Smith(人名)
- ⑥ LTOk(ovacs)=LiTaO₃+ Kovacs

即当基底是 LiNbO₃ 材料时,材料参数可以在 Warner、Nakagawa 和 Kovacs 三人计算的材料参数中选择你认为最精确的一种;当基底是材料 LiTaO₃ 时,材料参数可以在 Warner、Smith 和 Kovacs 三人计算的材料参数中选择你认为最精确的一种。四人计算的材料参数可以在相关文献中得到^[6]。另外,LBO,LGS 和 KNO 分别指 Li₂B₇O₄,La₃Ga₅SiO₁₂和 K₂NbO₃三种晶体材料。

第三步:“输入坐标轴和旋转角”以确定基底的切向和传输方向,要进入程序的下一步操作,对旋转坐标轴输入“0”即可。例如:用欧拉角(45°,30°,-20°)来代表基底的切向和 SAW 的传播方向时,输入:

```
3,45 <回车>
1,30 <回车>
3,-20 <回车>
0,0 <回车>(进入程序下一步操作)
```

然后,程序打印出体波速度和基底的有效介电常数 $\varepsilon(\infty)/\varepsilon_0$ 。假如位移分量 u_i 与电势出现不适当的耦合或解耦,程序会显示其状态(耦合或解耦)。并回到第二步。

第四步:“对于铝指条输入 1、金指条输入 2”以确定指条材料,“对开路栅输入 0,短路栅 Short-Circuit Grating 输入 1”以确定电学边界条件,然后程序打印出分别代表基底和指条内的两个体波速度。

第五步:“输入 nmax,nxdiv,nydiv,fs,vnorm,w/p, and h/p”,这里 w,h,p 分别代表指条的宽度、高度和栅阵的周期。整数 nmax 表示 Floquet 展开式中有多少项被用于计算。整数 nxdiv, nydiv 分别表示有限元在 w/2,h/2 范围内的分割数, V_{norm} 表示用于频率归一化的任意值,然后工作频率用 V_{norm}/p 进行归一化。 f_s 用于在下一步确定 SAW 速度初始值的相对频率。若要回到第二步,输入“0 0 0 0 0 0 0”。

第六步:“输入 vrs,vre and vrint”,这里 v_{rs}, v_{re}, v_{rint} 分别代表手工搜索 SAW 速度初始值时的一个速度范围(如 3000m/s~8000m/s)的开始值,终止值和间隔值。“输入 als, ale and alint”,这里 $\alpha_{rs},$

$\alpha_{re}, \alpha_{rint}$ 分别代表搜索衰减系数时的一个衰减系数范围(如 0.1dB~0.9dB)的开始值、终止值和间隔值。输完后、程序列表显示速度、衰减系数和计算得到的行列式(有效介电常数的复数值)。当行列式值为零时的速度值就是在频率 f_s 时的 SAW 速度。其值对应于行列式的实部或虚部符号改变的地方。对于某个给定值,若行列式的零值(实际是极小值)被认为在足够精确的范围内(在 10^{-5} 左右),输入“0 0 0”进入下一步。

第七步:“输入 fs,fe,fint,vstart and alpha”,这里 f_s, f_e 和 f_{int} 分别代表用于确定 SAW 传输特性的一个频率范围的起始值、终止值和间隔值。 v_{start} 和 α 分别是在前一步通过手工搜索确定的 SAW 速度和用 dB 为单位的衰减系数的近似值。输完后、程序列表显示相对频率、速度、衰减系数、机电耦合系数 K^2 (复数值)及行列式的绝对值(复数的模)。这些值同时也存入在第一步创建的文件中。在列出这些数据之前,将首先列出一些指定值和 $\varepsilon(\infty)/\varepsilon_0$ 。当所有的迭代完成后,程序重新执行这一步。若要回到第二步输入“0 0 0 0”。

4 算 例

为了更好地使用 Hashimoto 程序,以 Rayleigh 波在 $128^\circ\text{YX-LiNbO}_3$ 基片、铝(厚度取 $h/p=0.01$)金属栅中传播作为例子,进一步说明该程序的用法。

在这里、有些参数是可以改变的,如速度的取值范围、步长等,而有些参数是唯一的、如欧拉角等。参见文献[7]。

第一步:“输入文件名”,输入“Al_01”。

第二步:“对于 LNOW(arnar),LNON(akagawa),LNOK(ovacs),LTOW(arnar),LTOS(mith),LTOK(ovacs),LBO,GaAs,quartz,LGS and KNO 输入 1-11”,输入“3”。

第三步:“输入坐标轴和旋转角”,3,0 <回车>; 1,37.86<回车>; 3,0<回车>; 0,0<回车>(进入程序下一步操作)。

第四步:“对于铝输入 1、金输入 2”以确定膜(指条)材料,对“OG”(开路栅 Open-Circuit Grating)输入 0,对“SG”(短路栅 Short-Circuit Grating)输入“1”,输入“1,1”。

第五步:“输入 nmax,nxdiv,nydiv,fs,vnorm,w/p,and h/p”,输入“10,6,4,0.47,4025,0.5,0.01”。

第六步:“输入 vrs,vre and vrint”,输入“3880,

4000,0.1”,“输入 als,ale and alint”,输入“0.01,0.7,0.01”,程序运行完该步后,可得到在起始频率(即相对频率为 0.47)的 Rayleigh 波速度为 3908。

第七步:“输入 fs,fe,fint,vstart and alpha”,输入“0.47,0.51,0.0001,3908,0.01”。

在输入完这些数据后,FEMSDA 程序列表显示相对频率、速度、衰减系数、机电耦合系数 K^2 及行列式的绝对值。根据这些数据、用 Origin 画图软件可以直接得到速度频散曲线如图 1。禁带内的衰减系数如图 2。在图 2 中衰减系数只有在禁带内不为零,而在禁带外全为零,这说明 Rayleigh 波传播只在禁带内存在损耗、而在禁带外是无损耗传播的。

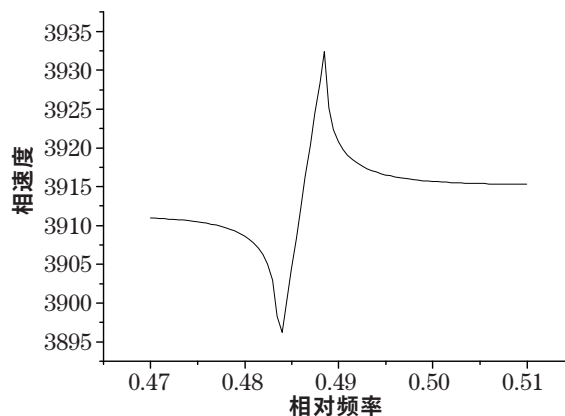


图 1 用 FEMSDA 计算的频散曲线

Fig.1 Dispersion relation calculated by FEMSDA

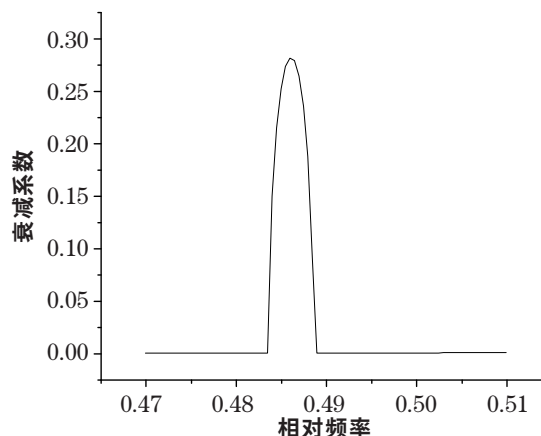


图 2 用 Femsda 计算的禁带内衰减系数

Fig.2 Attenuation in stopband calculated by FEMSDA

5 结 论

本文介绍了一种计算声表面波在周期栅阵中传播特性的方法,具体介绍了 Hashimoto 程序所依据的声表面波的基本理论及其程序结构。再以 Femsda 程序为例说明其具体使用方法,读者掌握了单指条 Femsda 的使用方法后,可以很快知道声表面波倾斜

入射 Obliq 和多指条 Multi 等程序的使用方法。另外,Hashimoto 程序原代码完全开放,很多子程序 SAW 研究人员可以直接使用。作者希望本文的发表、能为国内声表面波研究人员学习和掌握 Hashimoto 程序带来方便,在进行声表面波器件设计时,能用 Hashimoto 程序进行精确模拟,从而提高设计水平。

参 考 文 献

[1] Hashimoto K and Yamaguchi M. Free software products for simulation and design of surface acoustic wave and surface transverse wave devices[J]. Proc. IEEE International Frequency Control Symp. 1996, 300-307.
[2] <http://www.sawlab.te.chiba-u.ac>.
[3] Shiba. Balance characteristics studies using winger distribution analysis for SAW devies [J]. IEEE Ultrasonics

Sump.Proc., 2006, 1042-1047.
[4] Omori T. Suppression of transverse mode lowloss SAW filters on a cugrating/15° YX-LiNbO₃ structure [J]. IEEE Ultrasonics Sump.Proc., 2006, 1056-1060.
[5] Endoh G, Hashimoto K, Yamaguchi M. SAW propagation charaterisation by finite element method and spectral domain analysis[J]. Jpn. J. Appl. Phys. 1995, 34(5B): 2638-2641.
[6] G.Kovacs, M.Anhorn, and H.E.Engan: Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃[J]. Proc. IEEE ltrason. Symp, 1990, 435-438.
[7] [日]Ken-ya Hashimoto 著,王景山等译.声表面波器件模拟与仿真[M].北京,国防工业出版社,2002,238-239. Ken-ya Hashimoto. Surface acoustic wave devices in telecommunications modeling and Simulation[M]. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2002, 238-239.



更正:《声学技术》2008 年第 1 期 p79 金学成文章中,题目“修正倒谱和动态规划的基频估计算法”更改为“基于修正倒谱和动态规划的基频估计算法”,p83 右栏倒数第 13 行“当基频估.围加以调整,使其能够达到最优效果。”更正为“当基频估计值与标注的基频值之间的误差超过 10%时,称为基频毛误差(gross pitch errors, GPE)。表 1 给出了分别利用四种算法对 25891ms (约 2531 帧)男性语音和 26388ms(约 2579 帧)女性语音进行基频估计的误差统计数据,其中 V-UV 和 UV-V 分别表示把浊音误判为清音和把清音误判为浊音的误判率。实验中发现,所有算法的效果都受基频搜索范围的影响,所以在实验中,都根据实际基频人为地对搜索范围加以调整,使其能够达到最优效果。”特此更正。

《声学技术》编辑部