

# 新型声表面波式小波变换器件插入损耗的研究

卢文科<sup>1,2</sup>, 朱长纯<sup>2</sup>, 刘君华<sup>2</sup>, 方建安<sup>1</sup>, 文常保<sup>2</sup>

(1. 东华大学信息科学与技术学院, 上海 200051; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西西安 710049)

**摘 要:** 小波式叉指换能器使用机电耦合系数比较大的基片 (如 YZ-LNbO<sub>3</sub> 基片) 时, 其频率特性曲线不光滑, 但插入损耗小; 小波式叉指换能器使用机电耦合系数比较小的基片 (如 X112-YLiTaO<sub>3</sub> 基片) 时, 其频率特性曲线光滑, 但插入损耗大. 声表面波器件的指条对数 N 越少, 其带宽  $\Delta f/f$  越大, 插入损耗越大, 所以, 指条对数 N 要取的合适, 不宜过少. 在声表面波式小波变换器件中, 发射叉指换能器的条对数 N 取 57, 接收叉指换能器的指条对数是 57 的四分之一到三分之一之间.

**关键词:** 声表面波; 小波变换器件; 插入损耗; 叉指换能器

**中图分类号:** O426.9; O29 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 02-0371-03

## Study of Insertion Loss for Wavelet Transform Element of New SAW Type

LU Wen-ke<sup>1,2</sup>, ZHU Chang-chun<sup>2</sup>, LIU Jun-hua<sup>2</sup>, FANG Jian-an<sup>1</sup>, WEN Chang-bao<sup>2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract:** If the substrate of larger electromechanical coupling coefficient (such as YZ-LNbO<sub>3</sub> substrate) is used for wavelet type of interdigital transducer (IDT), its frequency characteristic curve is not smooth, but its insertion loss is smaller. If the substrate of smaller electromechanical coupling coefficient (such as X112-YLiTaO<sub>3</sub> substrate) is used for wavelet type of IDT, its frequency characteristic curve is smooth, but its insertion loss is larger. The less the finger pairs N of surface acoustic wave (SAW) element, the larger its bandwidth  $\Delta f/f$ , and the larger its insertion loss, so the finger pairs N is appropriately taken, and is not too small. In wavelet transform element of SAW type, the finger pairs N of the transmitting IDT is 57, the finger pairs N of the receiving IDT is between one-fourth of 57 and one-third of 57.

**Key words:** surface acoustic wave (SAW); wavelet transform element; insertion loss; interdigital transducer (IDT)

## 1 引言

现在小波分析的算法复杂, 其算法运算目前绝大部分是在计算机中完成的, 因而编程工作量大; 也有一些人正在研究利用大规模集成电路进行小波变换计算, 但还不成熟. 所以科学家和工程技术人员正在努力寻找一种简便的方法进行小波变换的计算, 企图避免复杂的、繁琐的数学计算. 通过大量分析和探讨, 发现声表面波器件的脉冲响应包络按照小波函数包络设计时, 得到声表面波器件的脉冲响应函数等于小波函数, 从而制造出了声表面波式小波变换器件及其重构器件, 为小波变换器件及其重构器件开辟了一种新的制造途径, 避免了小波变换及其重构中的复杂算法运算<sup>[2~6]</sup>.

参考文献 [2~6] 论述了声表面波式小波变换器件及其重构器件的理论及工作原理, 并且论述了三次行程反射信号、波形失真、衍射、体声波、声电再生等问题. 本文主要论述声表面波式小波变换器件的插入损耗方面的内容.

## 2 用声表面波器件实现小波变换的理论和声表面波式小波变换器件的工作原理

### 2.1 二进小波变换及重构<sup>[1]</sup>

二进小波可表示为

$$\psi_{2^k}(t) = 2^{-k/2} \left[ \frac{t-}{2^k} \right] \quad (1)$$

如果小波函数为  $\psi(t)$ , 其傅里叶变换为  $\Psi(\omega)$ , 并且存在二常数  $0 < A < B < \infty$ , 使得

$$A \leq \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\omega)|^2 d\omega \leq B \quad (2)$$

如果式 (2) 成立时, 式 (1) 的二进小波才有实用意义, 并且其逆变换存在, 这时称式 (2) 为二进小波的稳定条件; 若  $A = B$ , 则称为最稳定条件. 若  $f \in L^2(\mathbb{R})$ , 则二进小波变换为

$$\begin{aligned} WT_{2^k}(f)(t) &= f(t) \otimes \psi_{2^k}(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \psi_{2^k}(t-\tau) d\tau = 2^{-k/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \left[ \frac{t-\tau}{2^k} \right] d\tau \quad (3) \end{aligned}$$

收稿日期: 2005-09-01; 修回日期: 2005-12-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 6017020, No. 60476037); 863 项目 (No. 2001AA313090); 博士点基金 (No. 20020698014)

式(3)中,二进小波变换是用卷积表示,而不是用内积表示.当  $t = (-t)$  时,两种定义是相同的.

二进小波变换的重建公式为

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WT_{2^k}(\tau) \tilde{2^k}(\tau) d\tau \quad (4)$$

其中,  $\tilde{2^k}(\tau)$  为  $2^k(\tau)$  的对偶框架.

同离散小波框架相似,当  $A = B$  时,

$$\tilde{2^k}(\tau) = \frac{1}{A} 2^k(\tau)$$

当  $A > B$  时,  $2^k(\tau)$  的一阶近似为

$$\tilde{2^k}(\tau) = \frac{2}{A+B} 2^k(\tau) \quad (5)$$

当  $B/A$  接近 1 时,其重构误差小.

### 2.2 声表面波式小波变换器件的理论及其工作原理<sup>[2-6]</sup>

式(3)中所示的二进小波变换是  $f(t)$  和  $2^k(t)$  的卷积,即  $f(t)$  和  $2^{-k/2}(t/2^k)$  的卷积,  $k$  是从  $-\infty$  到  $+\infty$  之间的整数,这里  $k$  只取  $-1, -2, -3$ .

当  $k = -1, -2, -3$  时,式(3)分别为

$$WT_{2^{-1}}(\tau) = f(t) \otimes 2^{-1}(\tau) = 2^{1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \left[ \frac{\tau-t}{2^{-1}} \right] dt = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) [2(\tau-t)] dt \quad (6)$$

$$WT_{2^{-2}}(\tau) = f(t) \otimes 2^{-2}(\tau) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \left[ \frac{\tau-t}{2^{-2}} \right] dt = 2 \int_{-\infty}^{\infty} f(t) [4(\tau-t)] dt \quad (7)$$

$$WT_{2^{-3}}(\tau) = f(t) \otimes 2^{-3}(\tau) = 2\sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \left[ \frac{\tau-t}{2^{-3}} \right] dt = 2\sqrt{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) [8(\tau-t)] dt \quad (8)$$

从式(6)、(7)、(8)所表示的小波变换知道它们分别是  $f(t)$  与  $2^{-1}(\tau)$ 、 $f(t)$  与  $2^{-2}(\tau)$ 、 $f(t)$  与  $2^{-3}(\tau)$  的卷积.通过大量的分析研究,发现如果声表面波器件脉冲响应函数  $h(t)$  制作成某些小波函数  $2^k(\tau)$ ,就可以实现小波变换,如图 1 所示.

在图 1 中,如果小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 的脉冲响应函数  $h_{-1}(t)$ 、 $h_{-2}(t)$ 、 $h_{-3}(t)$  分别等于  $2^{-1}(\tau)$ 、 $2^{-2}(\tau)$ 、 $2^{-3}(\tau)$ ,则小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 可分别实现式(6)、(7)、(8)所示的小波变换(即卷积).小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 输出的小波变换  $WT_{2^{-1}}(\tau)$ 、 $WT_{2^{-2}}(\tau)$ 、 $WT_{2^{-3}}(\tau)$  均为声波信号.当这些声波形式的小波变换信号分别通过接收换能器 -1、-2、-3 转换为电信号形式的小波变换  $WT_{2^{-1}}(\tau)$ 、 $WT_{2^{-2}}(\tau)$ 、 $WT_{2^{-3}}(\tau)$ .所以接收换能器 -1、-2、-3 均为指条相等重叠、均匀周期的叉指换能器,并且它们的带宽比小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 的带宽大得多,因此,小波变换器件的带宽主要由小

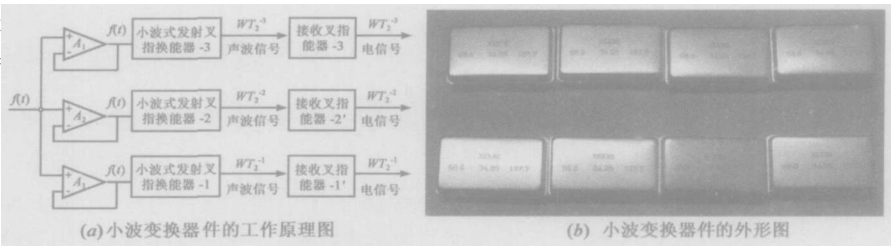


图 1 小波变换器件

波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 的带宽来决定.小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 和接收换能器 -1、-2、-3 的设计请见参考文献 [2~6].

### 3 插入损耗及其解决的方法

#### 3.1 声表面波器件的插入损耗与机电耦合系数的关系<sup>[7,8]</sup>

从图 1 知道小波式发射叉指换能器 -1、-2、-3 和接收叉指换能器 -1、-2、-3 均是声表面波器件.这里不详细地推导声表面波器件的带宽与插入损耗的关系,直接给出结论,如下所述.

声表面波器件的插入损耗为<sup>[7]</sup>

$$L = 10 \log |4(G/G_a + 1)|^2 = 10 \log |1/4K^2 (f/f_{max})^4| \quad (9)$$

式中  $G$ ——指条电导,如图 2 所示;

$G_a$ ——叉指换能器的声辐射电导;  $G_s$ ——叉指换能器在中心频率  $f_0$  处的声辐射电导;  $C_T$ ——叉指换能器的静电容;  $K^2$ ——机电耦合系数;  $(f/f)_{max}$ ——叉指换能器的最大相对带宽.

从式(9)中知道:当最大相对带宽一定时,机电耦合系数  $K^2$  越大,其插入损耗  $L$  越小.

图 3 是在 Y-Z  $LNbO_3$  基片上制作的小波式发射叉指换能器 -1 的频率特性曲线,并且 Y-Z  $LNbO_3$  的机电耦合系数(4.3%)比较大.图 4 是在  $X112^\circ Y-LiTaO_3$  基片上制作的小波式发射叉指换能器 -1 的频率特性曲线,并且  $X112^\circ Y-LiTaO_3$  的机电耦合系数(0.64%)比较小<sup>[8-12]</sup>.

我们从图 3 和图 4 比较知道:如果在小机电耦合系数的基片上制作小波式叉指换能器,其频率特性好(即光

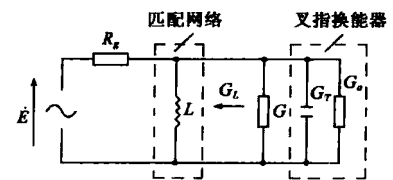


图 2 叉指换能器与匹配电路

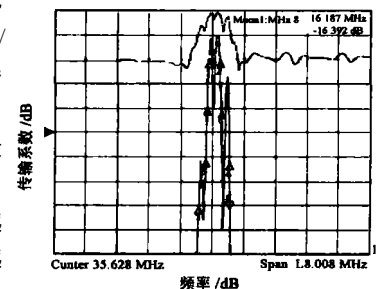


图 3 小波式发射叉指换能器 -1 的频率特性曲线(在 YZ-LNbO<sub>3</sub> 基片上制作)

滑),并且从式(9)中知道:当最大相对带宽一定时,机电耦合系数 $K^2$ 越小,其插入损耗 $L$ 越大。

图 3、图 4 所示的频率特性曲线是用 HP8712ET 网络分析仪进行测试的。

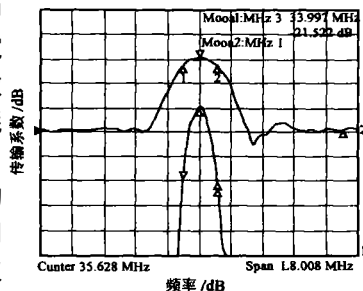


图 4 小波式发射叉指换能器 - 1 的频率特性曲线 (在 X 112 °Y-LiTaO<sub>3</sub> 基片上制作)

### 3.2 声表面波器件的指条对数与插入损耗的关系及减小插入损耗的方法

知道声表面波器件的指条对数  $N$  越少,其带宽  $f/f$  越大;又从式(9)知道其带宽  $f/f$  越大,插入损耗越大。即就是说,指条对数  $N$  越少,插入损耗越大。所以,指条对数  $N$  要取的合适,不宜过少。

在图 1 中,要求接收叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的带宽分别比小波式发射叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的带宽大的多,即接收叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的指条对数分别比小波式发射叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的指条对数少得多。但接收叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的指条对数不能取的过少,如果接收叉指换能器 - 1、- 2、- 3 的指条对数取的过少,那么插入损耗增大。

例如,小波式发射叉指换能器 - 1 的 - 3dB 带宽为

$$f_{-3dB} = 530\text{KHz}$$

并且知道带宽与指条对数  $N$  的关系为<sup>[8]</sup>

$$\frac{f_{-3dB}}{f_1} = \frac{0.8845}{N} \quad (10)$$

式中  $f_1$  ——小波式发射叉指换能器 - 1 和接收叉指换能器 - 1 的中心频率,这里取  $f_1 = 34.322\text{MHz}$

将  $f_1 = 34.322\text{MHz}$ ,  $f_{-3dB} = 530\text{KHz}$  代入式(10)中得

$$N = \frac{0.8845 \times 34.322}{0.530} \approx 57 \text{ (对数)}$$

从上面分析知道接收叉指换能器 - 1 的带宽比 530KHz 大得多,即接收叉指换能器 - 1 的指条对数比 57 要小得多,通常取接收叉指换能器 - 1 的带宽比 530KHz 大 3~4 倍,即接收叉指换能器 - 1 的指条对数是 57 的四分之一到三分之一之间。

### 4 结论

本文研究了声表面波式小波变换器件的插入损耗,从而得出了下面两个结论:如果在小机电耦合系数的基片上制作小波式叉指换能器,其频率特性光滑,但插入损耗比较大;指条对数  $N$  少,插入损耗越大,所以,指条对数  $N$  要取合适,不宜过少。

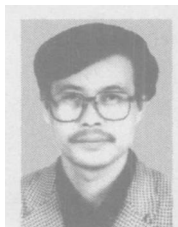
### 参考文献:

[ 1 ] 彭玉华. 小波变换及工程应用 [M]. 北京:科学出版

社,1999. 9. 33 - 34.

- [ 2 ] LU Wenke, ZHU Changchun Implementing wavelet transform with SAW elements [J]. 中国科学 E (中文版), 2003, 33 (11): 1028 - 1036; 中国科学 E (英文版), 2003, 46 (6): 627 - 638.
- [ 3 ] LU Wenke, ZHU Changchun Study of new wavelet transform element of SAW type [J]. 科学通报 (中文版), 2005, 50 (7): 717 - 720; 科学通报 (英文版), 2005, 50 (6): 598 - 620.
- [ 4 ] 卢文科,朱长纯,等. 声表面波式小变换及重构器件的实现研究 [J]. 电子学报, 2002, 30 (8): 1156 - 1159. LU Wen-ke, ZHU Chang-chun, et al Study on implementation of surface wave type of the wavelet-transformation and reconstruction element [J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30 (8): 1156 - 1159. (in Chinese)
- [ 5 ] 魏培永,朱长纯,刘君华,等. 用声表面波器件实现小波变换的方法 [J]. 西安交通大学学报. 2001, 35 (4): 394 - 397.
- [ 6 ] WEI Pei-yong, ZHU Chang-chun, LIU Jun-hua Realization of wavelet transform using SAW devices [J]. Semiconductor Photonics and Technology, 2001, 7 (2): 104 - 107.
- [ 7 ] 武以立. 声表面波原理及在电子技术中的应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1983. 8: 214 - 245.
- [ 8 ] 卢文科. 用声表面波器件实现小波变换的研究 [D]. 西安:西安交通大学, 2004. 4.
- [ 9 ] 日本电子材料工业会编. 声表面波器件及其应用 [M]. 许昌昆,等. 译. 北京:科学出版社, 1984. 8: 77 - 135.
- [ 10 ] 刘清洪. 声表面波滤波器的综合设计 [J]. 火控雷达技术, 2002, 31 (4): 38 - 43.
- [ 11 ] R H Tancrel, M G Holland Acoustic surface wave filters [J]. Proc IEEE 1971, 59 (2): 393 - 409.
- [ 12 ] S Takahashi, H Hirano, T Kodama SAW IF filter on LiTaO<sub>3</sub> for color TV receivers [J]. IEEE Trans Consumer Electron, 1978, CE-24, 3: 337 - 346.

### 作者简介:



卢文科 男,1962年出生,教授,现任东华大学教授;2001年3月到2004年4月在西安交通大学电信学院电子科学与技术专业攻读博士学位;从事电子科学与技术、仪器科学与技术、小波变换技术等方面的研究及教学工作,著书6本;在中国科学、科学通报、Measurement、电子学报、仪器仪表学报其他杂志上共发表论文80篇(10余篇获奖);完成了以国家六五计划攻关项目和国家自然科学基金项目为代表的研究项目共15项;获省部级、省教育厅及西安交通大学奖共8项。E-mail: luwenke3@163.com.