

移动通信用声表面波器件发展近况

何世堂

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

1994年11月28日收到

摘要 本文首先回顾了民用声表面波器件的最新发展概况。随着移动通信的发展, 声表面波器件的最大应用市场将是通讯, 而低插损声表面波滤波器成为新的研究高潮。本文因此随后简要介绍了几种主要的低插损结构的研究情况及其在移动通信中的应用。最后, 展望了声表面波器件的发展趋势。

关键词 声表面波, 低插损滤波器, 移动通信

Overview of low loss SAW filters for mobile communication applications

He Shitang

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract This paper first reviews the current status of SAW devices. With the rapid growth of mobile communication, the largest SAW application will be for communications by 2000 and low loss filters have been new focus of research and development. Then, an overview of filter technique available for different applications is given. Finally, future trends for SAW devices research and development is predicted.

Key words SAW, Low loss filter, Mobile communication

1 引言

声表面波 (SAW) 器件的最早应用主要是在军用系统中, 如脉冲压缩滤波器用于脉冲压缩雷达和电子侦察压缩接收机中。从那以后, SAW 器件在民用领域的应用变得普遍。今天, 由于它们性能优异、体积小、重量轻、价格低及一致性高, 在许多民用系统中起着关键的作用。今天生产的每一台电视机都包含了一只 SAW 滤波器。在有线电视系统中, 邻频传输 SAW 滤波器解决了邻频传输中的邻频干扰问题。在

卫星接收机中, 含有中心频率 400—500MHz 的 SAW 滤波器。

最近几年, SAW 技术又出现一个新的研究高潮, 其主要原因是飞速发展的移动通信的需求。

从世界各国的发展情况来看, 移动通信设备在朝着体积小、重量轻的方向发展。各国都在开发体积更小, 重量更轻的设备, 体积和重量逐年下降, 飞利浦公司开发了一种重约 160g, 体积 160cm³ 的 GSM 手机。

在移动通信设备中, 滤波器的使用几乎遍

布系统的各个部分,例如日本电报电话公司的一种移动电话使用了7只滤波器^[1]。在这些应用中,声表面波滤波器与介质滤波器相互竞争。由于 SAW 滤波器具有体积小(是介质滤波器的约 1/40),重量轻(是介质滤波器的约 1/30)以及传输特性优异,如非常陡的过渡带、高近阻带抑制等优点,适应了移动通讯设备微型化的发展方向。早期声表面波滤波器的缺点是插入损耗较大,一般为 15—40dB。经过这一领域科学家的不懈努力,这一难题已被攻克,插入损耗已能做到 3—4dB,最低可达 1dB 左右。用 SAW 滤波器代替介质滤波器已成为移动通讯设备的技术发展方向之一。

此外,移动通讯系统目前采用的是频分多址体制,使系统容量受到很大限制。同时,系统的保密性能和抗干扰能力都很差。未来的移动通讯和个人通讯系统将采用扩展频谱技术^[2],使用码分多址体制,以提高系统容量、保密性能和抗干扰能力。这些技术的应用为声表面波卷积器和可编程匹配滤波器开拓了更大的应用市场。

随着移动通讯的发展,预计 SAW 器件的产值 90 年代将比 80 年代提高一个数量级。目前,SAW 器件主要以电视中频滤波器占优势,全世界每年生产一亿只。据报道,欧洲 1990 年电视中频滤波器的产值约占整个 SAW 器件产值的 58%,而通讯领域的应用只占 4%。预计到 2001 年,通讯领域的应用所占比重将上升到 39%,而电视中频滤波器将下降到 19%^[3](见图 1)。基于此,世界各大公司如德国的西门子、法国的汤普森、日本的松下、日立、富士通、东芝、日本电气、三洋、加拿大的北方贝尔公司等投入大量人力物力进行移动通讯用 SAW 滤波器的研制和生产。美国是以专门生产 SAW 器件的公司在研制生产。欧洲第一、世界第二的移动通讯设备生产厂商诺基亚公司在瑞士投资联合设厂专门生产移动通讯用低插损 SAW 滤波器。最近几年,IEEE 超声会议和 UFFC 杂志上有关这方面的文章占相当大的比重。1993 年第 5 期的 IEEE TRANS. UFFC 发表

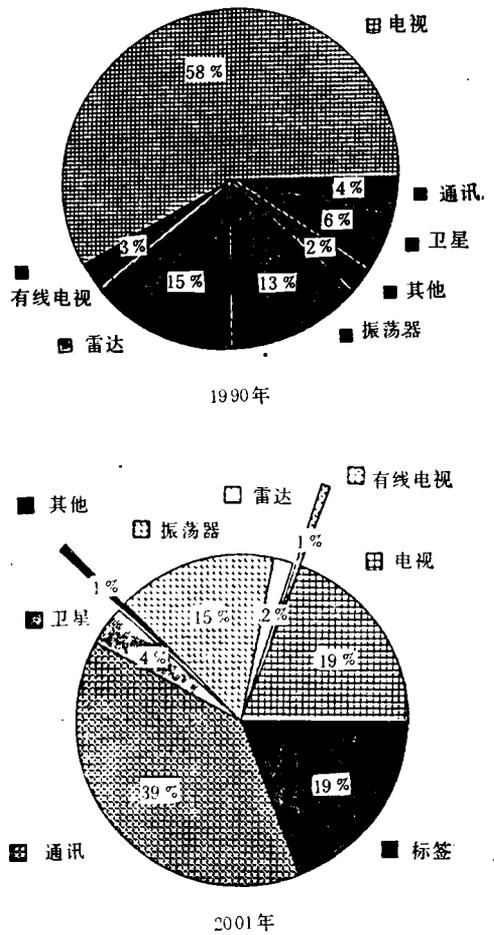


图 1 欧洲 SAW 器件市场分布

了一篇西门子公司写的特邀文章^[4],讨论 SAW 器件在消费通讯领域中的应用,作者数达 12 人,可见西门子公司对它的重视程度。

国内有关科研和生产单位也已投入力量进行低插损滤波器的研制。本文的第 2 部分将就用于移动通讯的低插损声表面波滤波器的发展情况作一简要评述。

2 低插损 SAW 滤波器的发展与应用

上节我们提到,SAW 器件由于一系列优点,在许多领域获得广泛应用。但 SAW 器件的最大缺点是插入损耗较大,大致范围是 15—40dB。这对于要求体积小,重量轻,功耗低的移动通讯设备,特别是作为前端滤波器是不能接受的。因此,从声表面波技术诞生之日起,降低

插入损耗即受到这一领域科学家的极大关注。

普通两换能器结构声表面波滤波器插入损耗大的主要原因是由于：输入输出换能器均采用双向换能器，输入换能器向两个方向辐射声波，而输出又指换能器只接受了一个方向的声波，故存在双向损耗，因而插入损耗较大。降低插入损耗主要是降低双向损耗，从原理上讲不外乎下列三种类型：一是谐振类型，在两换能器外面放置两个分布式反射栅阵，形成谐振腔结构，从而避免了双向损耗；二是单向换能器类型，使声波只向一个方向辐射；三是叉指叉指换能器类型，将多个双向输入、输出叉指换能器交替重复排列，使每个输入换能器的两边都有输出换能器，从而两边的声波都被接受，避免了双向损耗。

上述三种类型又包含了多种不同的结构，例如单向换能器有单相单向、群型单向、三相单向、四相单向等结构。早期的工作虽然在降低损耗方面取得了不少进展，但在器件的综合性能、工艺制作及外电路复杂性方面存在这样或那样的缺点，直到最近几年才取得突破性进展。其一是优异结构，包括提出了控制电极宽度的单相单向换能器结构、横向和纵向模式耦合谐振滤波器结构以及叉指叉指换能器结构。二是设计和分析理论——耦合模理论的发展。低插损耗滤波器的其他技术性能，如通带响应，阻带抑制，已能做到与普通高插损滤波器相同的水平，并能推广到大规模生产。

下面我们将就上面三种结构分别进行介绍，并给出利用这些结构研制的器件的例子。

2.1 单相单向换能器 (SPUDT)

单相单向换能器是美国的 C. S. Hartmann 于 1982 年首先提出来的^[5]，其结构如图 2 所示，工作原理是：在叉指换能器的内部同时放置一个反射阵结构，只要叉指换能器的声激发相位与反射阵结构的反射相位有一个相位差，就使向两个方向发射的声波不相等，当这个相位差大小适当时，整个结构的声波往一个方向发射，形成单向换能器。C. S. Hartmann 在图 2 的结构中，反射栅阵是靠在分裂指的第二

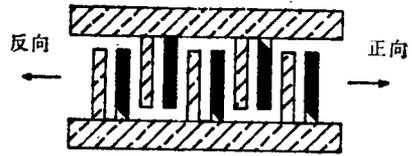


图 2 SPUDT 结构

根叉指上镀双层金属来实现的(图 2 中着黑的叉指)，因此工艺制作过程比较复杂，需要两次工艺制作。C. S. Hartmann 在 ST 石英上用此结构得到了 6.5dB 的插入损耗。此后，又有人提出悬浮电极、阶梯电极等结构。但由于工艺制作复杂、加权困难导致阻带抑制差等原因，使之无法走向应用。

在 1989 年的 IEEE 超声会议上 C. S. Hartmann 等人发表了一篇特邀报告^[6]，是 SPUDT 走向实用化的一个里程碑。在这篇报告中，提出了控制电极宽度的单相单向换能器结构 (EWC/SPUDT)，并给出了系统的设计方法。控制电极宽度单相单向换能器结构如图 3 所示，与图 2 的结构相比，将分裂指结构一个

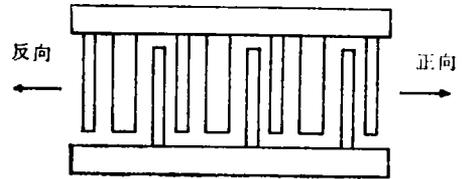


图 3 EWC/SPUDT 结构

周期叉指的两根合并成一根作为反射栅，代替了图 2 中的双金属结构，因此只需要一次工艺制作过程。换能抽头和反射阵可以分别进行加权，通带特性和阻带抑制都可以作得很好。此文发表后，国外即有人在 ST 石英上得到了插入损耗小于 5dB，带外抑制大于 50dB 的低插损滤波器^[7]。国内，中科院声学所分别在 ST 石英、Y112° LiTaO₃ 和 Y128° LiNbO₃ 基片上研制出低插损滤波器，最低插损 3dB，频率响应曲线如图 4 所示。

用 EWC/SPUDT 研制低插损滤波器，要求反射波足够大，因此可实现的滤波器带宽比

中频滤波器(如欧洲数字移动电话系统 GSM 和 PCN, 欧洲数字无绳电话 DECT) 及采用两次混频电路的寻呼机滤波器和家用无绳电话滤波器。

2.2 模式耦合谐振滤波器

2.2.1 横向模式耦合谐振滤波器

横向模式耦合谐振滤波器最初是由 Tie-rstan 和 Smythe 提出来的^[8]。其结构如图 5 左边所示, 它由两个单端对谐振器耦合在一起

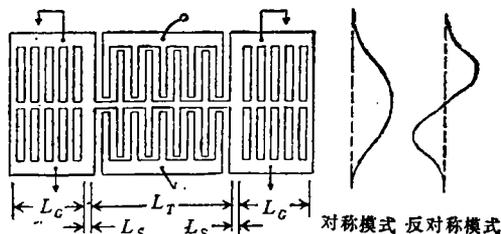
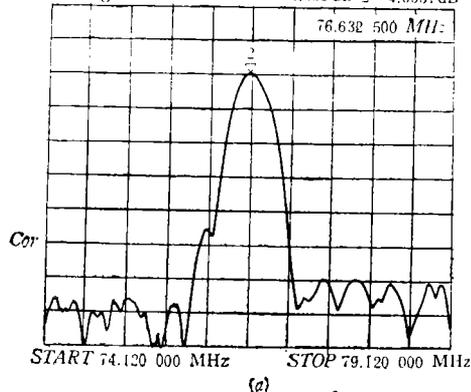


图 5 横向模式耦合谐振滤波器及最低二阶模式位移分布

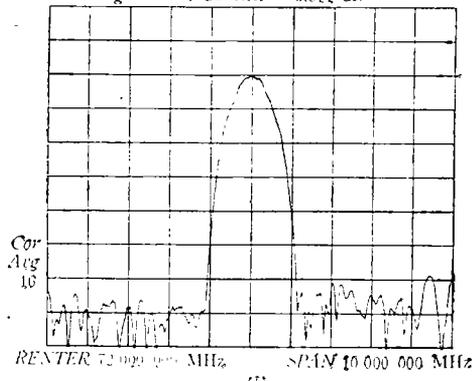
组成。两个通道形成一个声波导, 在这个波导中可以传播多个导波模式。如果每个通道的孔径非常小, 小到只有几个波长, 则波导中只存在一个对称模式和一个反对称模式(图 5 右边), 两个模式之间的速度差产生一个两极点响应, 即存在两个峰。匹配以后, 双峰消失, 得到一个平坦的通带。利用此结构可以获得非常窄的带宽, 0.5‰—0.75‰; 非常低的插入损耗, 最小 1—2dB; 非常高的阻带抑制, 最大 70dB; 以及陡的过渡带, 形状因子 2.5:1。此外, 由于其孔径小, 其体积也非常小。上述优点使它非常适合于作数字无线电话系统 IS-54(NADC) 和 CT-2 的中频滤波器及采用一次混频电路的寻呼机滤波器。同样它广泛地应用于模拟蜂窝移动电话系统, 如美国的移动电话系统 AMPS, 英国的 ETACS 和北欧移动电话 NMT 中。因其用途广泛, 吸引了不少研究机构和学者的研究兴趣, 日本^[9]、美国^[10]、德国^[5]均做出了比较出色的工作。国内, 图 6 为中科院声学所作的器件。近两年来有不少文章对其理论模式进行探讨, 其中最为成功的是 C. S. Hartmann 和陈东培等人提出的耦合模理论模型^[11]。

CH2 MEM log MAG 10 dB REF -4.636 dB 2-4.6351 dB



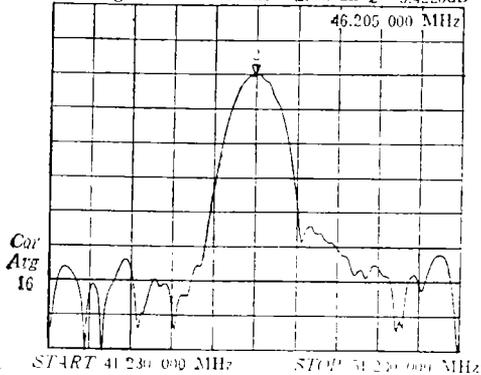
(a)

CH2 MEM log MAG 10dB REF -3.911 dB



(b)

CH2 B/R log MAG 10dB/REF -2.889 dB 2-3.4226dB



(c)

图 4 EWC/SPUDT 低插损滤波器

(中国科学院声学研究所)

- (a) ST 石英基片 (b) $Y112^\circ \text{LiTaO}_3$ 基片
(c) $Y128^\circ \text{LiNbO}_3$ 基片

普通高插损滤波器要窄, 带宽范围为 0.25%—2%。适用于数字式移动电话和无绳电话中的

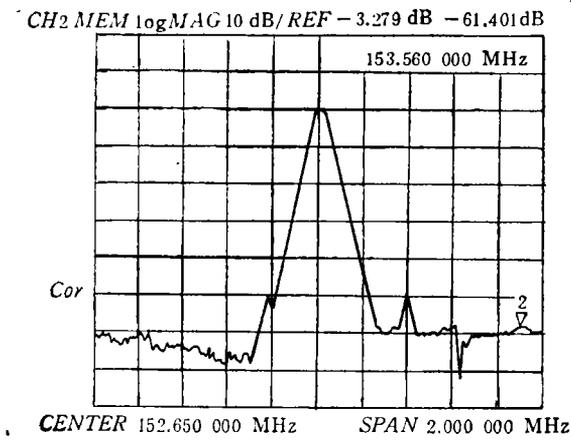


图6 横向模式耦合谐振滤波器频率响应
(中科院声学所)

2.2.2 纵向模式耦合谐振滤波器

对于移动电话的中频滤波器，不同的系统有不同的带宽。对于模拟系统，通道带宽是15—25kHz，对于欧洲数字移动电话系统 GSM 和 PCN，信道带宽是 200kHz。对于 15—25 kHz 的带宽，采用前面提到的横向模式耦合谐振滤波器非常合适，但对于数字系统的中频滤波器，采用此结构则带宽不够。若采用单相单向换能器结构，又嫌体积太大。因此，有人提出纵向模式耦合谐振滤波器，弥补了这两种结构的不足。

这种结构的工作原理是利用了反射栅阵的纵向不同模式(通常是最低的两个模式)的耦合而实现的，基本结构如图 7。用此结构，同样

在石英基底上可获得比横向模式耦合较宽的带宽，带宽 $\sim 1.5\%$ ，插损 $\sim 2\text{dB}$ 。缺点是阻带抑制较差，约 30dB。日本 NEC 公司已用此结构研制出用于个人手持电话的中频滤波器^[12]。若采用高耦合系数材料，如 $36^\circ \text{Y-X LiTaO}_3$ 和 $64^\circ \text{Y-X LiNbO}_3$ ，用此结构可以实现宽带滤波器，带宽可达 4%。同时可获得非常低的插入损耗，最小 1dB；陡的过渡带；非常好的群延迟特性，最小 20ns。缺点是阻带抑制很差，一级两极点滤波器只有十几分贝。采用多级级连可以克服这一缺点，而且保持较低的插入损耗。日本 TOYO 公司用两级和三级级连结构研制出用于美国模拟蜂窝移动电话 AMPS 和英国模拟蜂窝移动电话 ETACS 的射频滤波器，其中三级级连结构的阻带抑制为 35dB 和 45dB，插损 3.5dB (见图 8)^[13]。在 1994 年的 IEEE 超声会议上，报道了用四级级连结构研制的 DECT 中频滤波器，矩形系数小于 1.4，阻带抑制大于 40dB^[14]。

2.2.3 单相单向换能器共线耦合谐振滤波器

将单相单向换能器放在谐振器外边也可以构成高阻带抑制的低插损滤波器，这种结构既利用了单相单向换能器实现高阻带抑制的特点，又利用了易实现窄带的优点，因而可以减小器件尺寸。用此结构可获得大于 1% 的带宽，有人用此结构来设计用于 GSM 移动电话系统的中频滤波器^[15]。

2.2.4 梯状谐振器耦合滤波器

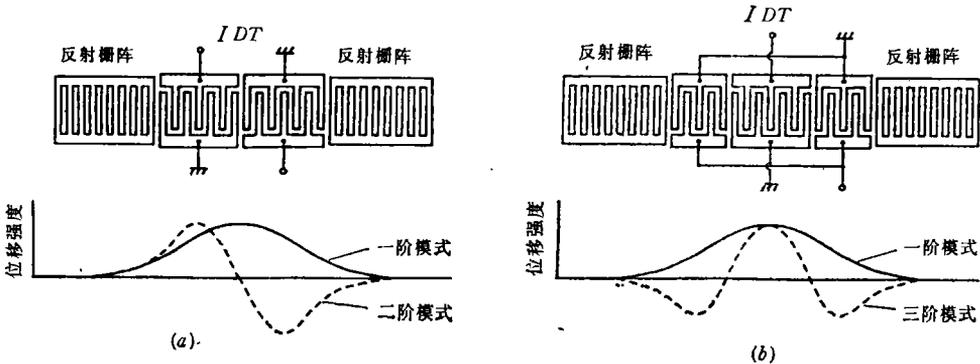


图7 纵向模式耦合谐振滤波器基本结构及位移强度分布
(a) 利用一阶和二阶模式 (b) 利用一阶和三阶模式

种结构的另一个优点是可承受更大的功率，带宽较宽。

这种结构的缺点是对匹配电路元件的变化比较敏感，容易出现通带波纹，阻带抑制较差，小于 30dB^[19]。

为了克服阻带抑差的缺点，有人提出了双通道叉指叉指换能器结构^[20,21]。将两组相同的叉指叉指换能器通过输出换能器耦合起来，如图 10 所示，前面的模式耦合谐振器也用到这种

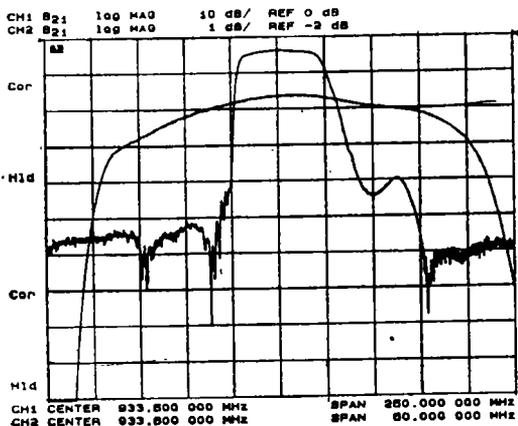


图 8 六极点纵向耦合滤波器(日本 TOYO 公司)

一般的声表面波低插损滤波器是很难获得好的形状因子的。日本日立公司的 M. Hikita 等人利用多极点网络的特性，用声表面波谐振器作为基本电路元件，组成梯状网络来获得陡的过渡带，并用此结构来研制移动电话系统的双工器^[16]。在 1994 年的 IEEE 超声会议上，又有人提出了平衡桥结构^[17]。

2.3 叉指叉指换能器

叉指叉指换能器是 M. Lewis 在 1982 年最先提出来的^[18]，基本结构如图 9 所示，它由一

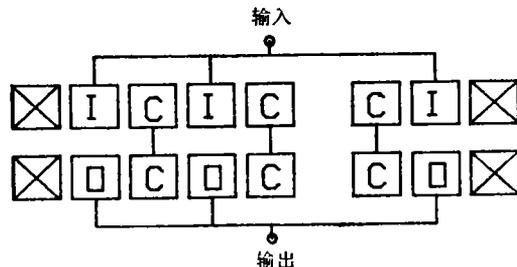


图 10 双通道叉指叉指换能器

方法。这种结构要求耦合换能器在通带内阻抗呈纯阻特性，以使能量从一个通道完全转移到另一个通道。在通带外随着频率偏离通带，阻抗中抗性增大，能量被大部分反射，损耗迅速增加，随着频率进一步偏离，耦合换能器的输入阻抗变成纯抗性，能量被全部反射形成阻带，因此这种结构可获得比较陡的过渡带和高的阻带抑制。利用高耦合材料可以获得较宽的带宽，最大可达 4% 左右。这种结构适合于作移动电话

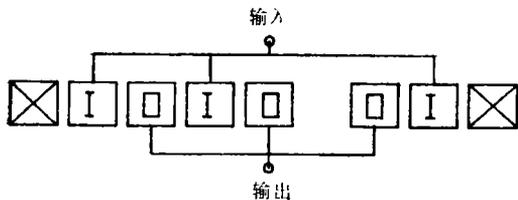


图 9 叉指叉指换能器

系列输入输出叉指换能器交替排列而成，类似于叉指换能器中叉指的周期排列，故得名。每个输入换能器两边都有输出换能器，因此，输入换能器向两边辐射的声波都被接收。同样，每个输出换能器的两端都有输入换能器，因此，输出换能器从两端接收到相等的声信号，它的两个声端不再是互相独立的，入射的声能量都将送往负载(在电端匹配条件下)，故不存在双向损耗。这种结构插入损耗最小可达 1dB。这

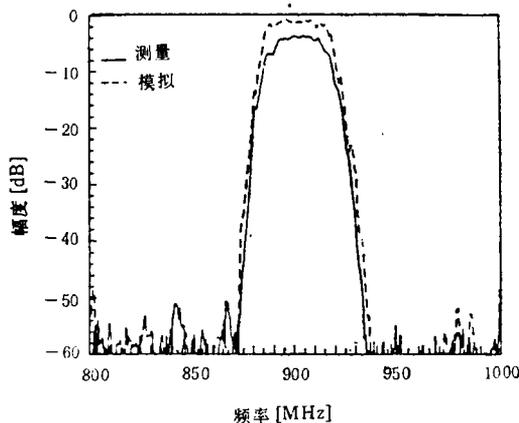


图 11 双通道耦合叉指叉指换能器滤波器(德国西门子公司)

和无绳电话中的射频滤波器^[22]。图 11 为西门子公司利用 18 个换能器所研制滤波器的频率响应,插入损耗约 3.7dB^[22]。

3 今后的发展趋势

SAW 技术的发展充满希望,也面临挑战。希望之所在是应用前景广阔,但应用上的要求愈来愈苛刻。从应用对 SAW 器件技术性能的要求来看,SAW 器件的发展趋势有如下特点:

3.1 向高频方向发展

根据前面的分析,SAW 器件应用领域增长最快的领域是通讯,目前移动通讯领域使用的 SAW 器件的频率已达 900MHz 左右,而下一代码分多址移动通讯系统和未来个人通信系统所使用的频率将在 1800MHz。将来还会进一步提高。提高 SAW 器件工作频率不外乎以下途径:(1)采用高声速材料,或采用声体波。(2)寻求更好的换能器结构,如单指无内反射叉指换能器结构。单指无内反射叉指换能器结构已被成功地应用于一般滤波器中,提高器件工作频率^[23]。对于低插损结构,可望在叉指叉指换能器结构中获得应用。(3)工艺技术的提高。在 1993 年的 IEEE 超声会议上,日本报道了 20GHz 的 SAW 器件工艺^[24]。

3.2 对器件的技术性能要求越来越高

首先是插入损耗将要求越来越低;其次是要求较大带宽;第三,非常小的通带波纹;第四,陡的过渡带;第五,高阻带抑制;最后,也是很重要的一点,要求好的群延迟特性,这是通讯系统朝多媒体化方向发展,即不仅要传语音,而且要传图象和数据,以至带宽要增加很多,而给 SAW 滤波器提出的要求。而现有的低插损结构,群延迟特性普遍较差。要满足应用上的这些要求,必须在以下几个方面有所改进或突破:(1)对晶体声学有更深入、更详细的研究,包括对基片材料的衍射、反射、传播损耗、温度特性和压电耦合系数等;(2)更好的设计和分析软

件;(3)更好的工艺条件控制。

致谢 本文成文过程中,得到汪承灏教授的帮助,谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] Ohmori H. IEE. May 1992: 63—67.
- [2] 朱云龙. 中国移动通信发展与展望论文集,1993: 28—34.
- [3] Heighway J, Morgan J D P. IEEE Ultrasonics Symp, Proc. 1991:217—223.
- [4] Ruppel C C W. *et al.* IEEE Trans. UFFC 1993, 40(5):438—452.
- [5] Hartmann C S. *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1982: 40—45.
- [6] Hartmann C S, Abbott B P. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1989:79—89.
- [7] Brown R B, Gopanis. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1991: 231—234.
- [8] Tiersten H F, Smythe R C. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1975:293—294.
- [9] Tanaka M, *et al.* 38th Frequency Control Symp, Proc., 1984:286—293.
- [10] Wright P V. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1992: 29—38.
- [11] Hartmann C S, Chen D P, Heighway J. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1992:39—43.
- [12] Yamamoto Y, Kajihara R. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1993:47—51.
- [13] Morita T. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1992: 95—104.
- [14] Sharif M A, Lambert C, Chen D P, Hartmann C S. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1994:135—138.
- [15] Almar R, *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1993:25—30.
- [16] Hikita w, *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1993:15—24.
- [17] Heighway J, Kondratier S N, Plassky V P. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1994:27—30.
- [18] Lewis M. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1982: 12—17.
- [19] Wadaka S. *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1983: 59—61.
- [20] Hikita M. IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1984: 82—92.
- [21] Anemoqiannis K. *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1988: 77—82.
- [22] Fisherauer G. *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1991: 235—239.
- [23] He S T, Chen D P, Wang C H. Proc of 14th ICA, 1992, Vol. 2: c8—3.
- [24] Yamanouchi K. *et al.* IEEE Ultrasonics Symp, Proc., 1993: 1263—1266.