

压电陶瓷声表面波电视 中频滤波器的研制

孙 慷

摘 要

本文介绍了用 PLCN 四元系压电陶瓷基片,采用积木式方法设计,制作压电陶瓷声表面波电视中频滤波器的方法。并测试了其幅频特性和群延迟特性。这些特性完全达到电视机所需要的质量要求。

一、前 言

自从 1965 年怀特 (R.M. White) 和沃尔特默 (F.W. Volmer) 在压电体表面制作叉指换能器 (IDT) 来激励和检测声表面波 (SAW) ^[1], SAW 技术获得了关键性突破,随后开始了飞速的发展,出现了各种各样的 SAW 器件,使 SAW 技术在通信、雷达、电视、收录、电子对抗等许多领域获得广泛应用 ^[2-5]。

SAW 器件对压电基片性能要求的 DeVries 条件及更严格的要求已为同行所共知 ^[6] 对于这些苛刻的要求,很难找到一种压电材料能全面满足要求。对于由几兆赫到 100 多兆赫的 SAW 滤波器,使用压电陶瓷基片是很有利的,因为压电陶瓷是各向同性体,不需要象单晶那样严格的定向切割,不存在束转向效应,既具有象 LiNbO_3 单晶那样高的机电耦合系数,又具有优于 LiNbO_3 甚至超过石英晶体的温度稳定性,且价格低廉,制备工艺简单。然而,传统的压电陶瓷,抛光表面平整度以及一致性和重复性都较差。因此,从七十年代,国外对 SAW 用的压电陶瓷材料就进行了研究,八十年代初取得了较大的突破,不仅研制出具有微晶、高致密、高耦合系数、高温稳定性 SAW 用压电陶瓷,而且也较好的解决了多晶压电陶瓷材料一致性和重复性差这一关键问题。据报导,日本已大量用压电陶瓷制作 SAW TVIF 滤波器和调频调谐滤波器。仅村田制作所年产陶瓷 SAW TVIF 滤波器就达 250 万支以上,而日立公司已用压电陶瓷材料制作了高达 630 MHz 的 SAW 滤波器 ^[8,7] 在国内,虽然许多单位,从八十年代初就开始了一些研究,可至今未取得突破性进展。为此继续深入研制高致密、高一致性和重复性的压电陶瓷,解决在陶瓷基片上设计和制作 SAW TVIF 滤波器的技术,使我国早日实现用廉价的压电陶瓷取代 LiNbO_3 单晶生产 SAW TVIF 滤波器,是一项具有很大经济效益和学术价值的工作。

二、SAW 压电陶瓷材料

SAW 压电陶瓷基片材料, 必须具备: 介电常数小、SAW 传播损耗小、SAW 有效耦合系数大、气孔小、晶粒细等特点^[2,5]。为了满足这些要求, 国外先后研制和报导了多种材料, 属于三元系的材料有 $\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_x\text{Zr}_y\text{Ti}_z\text{O}_3$ ^[7]; $\text{Pb}(\text{Sn}_{1/2}\text{Sb}_{1/2})_x\text{Zr}_y\text{Ti}_z\text{O}_3$, $\text{In}_x\text{Pb}_{y+z}(\text{Li}_{3/5}\text{W}_{2/5})_x\text{Zr}_y\text{Ti}_z\text{O}_3$ 等, 属于四元系的材料有 $\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})_x(\text{Cu}_{1/4}\text{Li}_{3/4})_y\text{Zr}_z\text{Ti}_w\text{O}_3$ 。属于二元系的材料有 $\text{Pb}(\text{Cd}_{1/2}\text{W}_{1/2})_x\text{Ti}_y\text{O}_3$, 属于一元系的材料有 $(\text{Pb}_{1-\frac{1}{2}x+\frac{1}{2}z}\text{Nd}_x)(\text{Ti}_{1-y-z}\text{Mn}_y\text{In}_z)\text{O}_3$ 等。其中一元系的改性钛酸铅具有晶粒细、气孔小、介电常数低、延迟温度系数接近零的特点, 很适于甚高频 SAW 器件应用。而四元系的铌锂铌铜铌钛酸铅(代号 PLCT)具有较强的压电性和较小的介电常数, 且容易极化容易获得较理想的抛光表面, 很适于几十兆的 SAW 滤波器应用。根据这些报导, 笔者对这两类压电陶瓷进行了研制, 关于 In、Mn、Nd 改性 PbTiO_3 的研制已在有关文章中进行了全面报导, 这里只介绍 PLCN 四元系压电陶瓷 SAW TVIF 滤波器的研制。

PLCN 四元系压电陶瓷首先由西德标准电气罗仑兹研究中心的 H. Schichl 研制和发表, 笔者在进行了配方和工艺的改进后, 采用国产三级试剂获得了较致密的介电常数更低的瓷料, 其化学分子式为:

$\text{Pb}(\text{Li}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})_{0.067}(\text{Cu}_{1/4}\text{Nb}_{3/4})_{0.023}\text{Zr}_{0.69}\text{Ti}_{0.24}\text{O}_3 + 0.5\% \text{Wt MnO}_2$ 这种瓷料是处于 R 相中的 R_{HT} 和 R_{LT} 相变区, 因而具有较大的耦合系数、较小的介电常数, 又因为在 R_{HT} 和 R_{LT} 相变区, 温度变化对纵波模式和横波模式所产生的声速变化是相互抵消的, 而瑞利声表面波正好是纵波模式和横波模式的合成, 因而这种瓷料又具有较小的延迟温度系数。其 SAW 参数的实测值如表 1 所示。

表 1 PLCN 四元系压电陶瓷 SAW 参数性能

SAW 参 数 名 称	SAW 参 数 符 号	实 测 值
声 表 面 波 速 度	V_s	2400 m/s
相 对 介 电 常 数	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	210
表 声 传 播 损 耗	B	4db/cm (30 MHz)
有 效 耦 合 系 数	K^2	0.02
机 械 品 质 因 数	Q_M	2400
延 迟 温 度 系 数	TCD	25 ppm/°C
平 均 晶 粒 尺 寸	d	2.5 μm
平 均 气 孔 尺 寸	d_0	1.5 μm

ASW 参数 V_s 、B、 K^2 、TCD 的测试方法, 笔者在有关文献中已详细介绍, 平均晶粒尺寸和平均气孔尺寸由扫描电镜测得, 体波参数均采用通用的测试方法, 这里不再介绍。利用这种四元系压电陶瓷, 可以光刻出指宽 6 μm 的 IDT 因此是一种很好的 SAW TVIF 滤波器基片材料。

三、器 件 设 计

SAW TVIF 滤波器是一种非对称频响的带通滤波器,总频响 $H(f)$ 是发射 IDT 的频响 $H_1(f)$ 和接收 IDT 频响 $H_2(f)$ 之积。通常 $H_2(f)$ 是一个与 $H_1(f)$ 相配合的宽带辛格函数,因此接收 IDT 是等指的,而发射 IDT 是变迹的。对于变迹的发射 IDT,设计方法有(1)频率本征函数展开法,即所谓积木式方法。(2)离散付里叶变换法。(3)奇偶分量技术法。由于积木式方法不需考虑截切效应,只要适当选取积木单元函数就可以得到长度较短的叉指结构,加之计算简单,直观灵活、易于修改,因此采用积木式方法设计。

积木式方法的基本思想是将发射 IDT 较复杂的非对称频响函数分解为一些简单的对称形式的频响函数的叠加。即

$$H_1(f) = \sum_i W_i H_i(f - f_i) \quad (1)$$

式中 $H_i(f - f_i)$ 为积木单元的频响函数, W_i 为加权系数, f_i 是 $H_i(f - f_i)$ 的中心频率。

关于 $H_i(f - f_i)$ 的选择,国外采用辛格函数和瓦什尔型 (Vasile-type) 函数,我们选取由四川大学邓盛刚提出的在雷达信号处理中常用到的时域上是组合余弦平方的频响函数,这有利于获得比较短的发射 IDT 长度和较深的邻近频道抑制^[19]。

$$H_i(f - f_i) = \frac{\sin X_i}{X_i} + 0.57 \left[\frac{\sin(X_i - \pi)}{(X_i - \pi)} + \frac{\sin(X_i + \pi)}{(X_i + \pi)} \right] + 0.08 \left[\frac{\sin(X_i - 2\pi)}{(X_i - 2\pi)} + \frac{\sin(X_i + 2\pi)}{(X_i + 2\pi)} \right] \quad (2)$$

式中 $X_i = \pi(f - f_i)T$; T 为组合余弦平方函数的时间长度,即脉响的时宽,则发射变迹 IDT 的频响可以表示为

$$H_1(f) = \sum_{i=1}^7 \left\{ \frac{\sin X_i}{X_i} + 0.57 \left[\frac{\sin(X_i - \pi)}{(X_i - \pi)} + \frac{\sin(X_i + \pi)}{(X_i + \pi)} \right] + 0.08 \left[\frac{\sin(X_i - 2\pi)}{(X_i - 2\pi)} + \frac{\sin(X_i + 2\pi)}{(X_i + 2\pi)} \right] \right\} \quad (3)$$

显然,发射变迹 IDT 的总脉响 $h_1(t)$ 就是每个频响函数 $H_i(f - f_i)$ 的脉响 $h_i(t)$ 的叠加,即

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^7 W_i h_i(t) \quad (4)$$

而 $h_i(t)$ 可由 $H_i(f - f_i)$ 的逆富利叶变换得到。求出 $h_i(t)$, 再进行相位抽样,就完全定了发射变迹 IDT 的结构。经相位抽样的发射变迹 IDT 的脉冲响应计算分式为:

$$h_1(n\Delta t) = \sum_{i=1}^7 \left\{ A_n \left[0.44 + 0.5 \cos \left(\frac{2\pi n \cdot \Delta t}{T} \right) + 0.07 \cos \left(\frac{4\pi n \cdot \Delta t}{T} \right) \right] \cdot \cos(2\pi f_i n \Delta t) \right\} \quad (5)$$

式中: n 为抽样点数; Δt 为抽样间隔; A_n 为幅值; T 为脉响宽度。

关于 $h_1(n\Delta t)$ 的计算以及零点位置、极点大小、声孔径包络的确定,关于变迹 IDT 的全部刻图数据的确定,均用电子计算机计算。计算表明,指条长度和间隔都是加权的。

在设计过程中, 考虑到压电陶瓷的介电常数比单晶大, 表面性能较差的特点, 必须对由此产生的输入和输出 IDT 的电磁馈通大, 体波干扰大, 衍射畸变大, 容易发生断指等问题, 采取适当的措施, 这些措施包括: (1) 适当减小 IDT 的声孔径。增大接收和发射 IDT 之间的距离。(2) 适当增加电极指条宽度, 减小电极指条间距。(3) 将基片背面进行开槽, 槽深槽宽为 0.2 mm 左右。

利用抽样后的 IDT 的 δ 函数模型, 计算了理论频响, 并通过计算程序打印出频响曲线, 算出理想频响指标, 即可以用于检验设计的正确性。

四、器 件 制 作

采用压电陶瓷制作 SAW TVIF 滤波器, 工序可分成九道。(1) 陶瓷切割。(2) 瓷片极化。(3) 瓷片表面研磨抛光。(4) 瓷片清洗。(5) 表面镀铝膜。(6) 光刻掩膜版的制备。(7) 光刻 IDT 图形。(8) 背面刻槽、划片。(9) 引线焊接和封装。由于压电陶瓷具有多孔、质软、易碎、居理点低以及抗酸性能差等物理化学特性。因此制作工艺与压电单晶有所不同。这里仅对抛光、清洗、腐蚀等工序做一些说明。

抛光采用沥青抛光盘和氧化铈悬浊水溶液进行, 沥青为 3~6 号, 硬度适中, 转速为 50 转/分, 每 5~10 分加一次氧化铈抛光液, 抛光时间约 20 小时左右。抛好后的瓷片在 100 倍的显微镜下观察, 应无划痕、桔皮状和麻点等痕迹, 抛光室必须清洁, 环境温度保持在 20℃ 左右。清洗不能采用超声清洗和酸碱清洗, 可以采用有机溶剂清洗, 但由于有机溶剂一般都有毒性, 而且价高, 因此我们采用市售洗涤精清洗, 效果很好。首先用汽油浸泡抛光好的瓷片, 除腊后再用乙醚溶解汽油, 然后依次在三盘洗涤精水溶液中煮洗, 每次数分钟, 再用清水煮洗 5~6 次, 即可获得抛光表面完全脱水的清洁瓷片。光刻工艺的腐蚀是一个关键, 应采用特种碱性腐蚀液进行, 腐蚀时间应与温度相配合, 整个光刻是否合格应严格在显微镜下检查, 要求 IDT 图形完整、无断指、连条、针孔现象, 图形各部位尺寸准确, 边缘平滑、整齐、挺直。

五、测 试 与 性 能

我们研制的压电陶瓷 SAW TVIF 滤波器幅频特性和群延迟特性用美国 HP 8507C 自动网络分析仪测试, 也可以用图 1 的线路诸点测试。而器件的输入电容和输出电容用 CD 4 B 型超高频导纳电桥测试。表 2 给出全部参数的测试数据。图 2 给出网络分析仪自动拍照系统

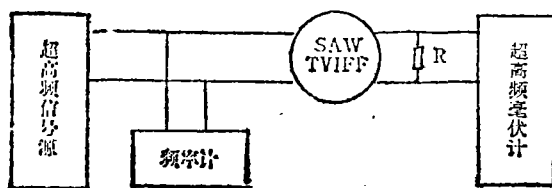


图 1 SAW TVIF 滤波器测试线路

拍照的幅频特性曲线及群延迟波动, 此曲线与表 2 数据完全对应。

表 2 SAW TVIF 滤波器参数性能

参 数 名 称	频 率	性 能
图 象 载 频 衰 减	37 MHz ₂	-3±1.5 db
彩 象 载 频 衰 减	32.5 MHz ₂	-2±1 db
伴 音 载 频 衰 减	30.5 MHz ₂	-15±1.5 db
伴 音 载 频 平 台 区	±300 K MHz ₂	<0.5 db
邻 近 图 象 抑 制	29.0 MHz ₂	≥30 db
邻 近 伴 音 抑 制	33.5 MHz ₂	≥35 db
带 外 抑 制	24~29; 33.5~43.5 MHz ₂	≥28 db
带 内 波 动		≤0.3 db
插 入 损 耗	(未调谐)	<28 db
群 延 迟 波 动		<60 ns
输 入 电 容		38 pf
输 出 电 容		20.5 pf

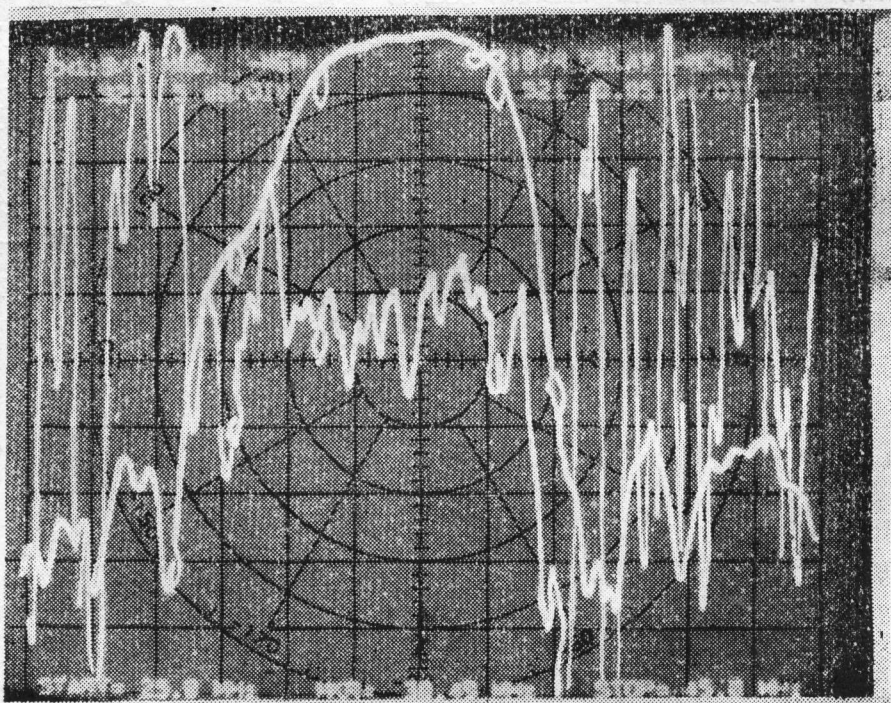


图 2 SAW TVIF 滤波器幅频特性和群延迟特性

我们还向重庆无线电三厂、上海无线电器厂等整机厂提供了数十支器件, 通过试用和整机性能测试, 从厂方提供的试用测试报告可知, 我们研制的 PLCN 压电陶瓷 SAW TVIF 滤波器是完全合格的, 它可以使“整机的图象灵敏度、伴音灵敏度、选择性等指标达到和超过部颁标准”。

六、结 束 语

我们研制的 SAW TVIF 滤波器, 不论是性能参数测试, 还是上机实验, 都是合格的, 完全可以取代国外进口元件。但至今未能在国内推广生产, 这是因为批量生产时瓷料的声速一致性和重复性还不能达到等于或小于 0.1% 的要求。今后必须改进压电陶瓷制造工艺, 在降低瓷料气孔率的同时, 提高 SAW 声速的一致性和重复性。

在研制 SAW TVIF 滤波器的过程中, 得到电子工业部 1426 所、上无六厂、上无四厂、重庆无线电三厂的大力支持, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] R.M. White et al. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves, Appl. Phys. Lett., 1965; 7: 314
- [2] 川瑞. 弹性表面波材料. 电子材料(日), 1977; 16(6):
- [3] エレフトロニク・セラミクス. 冬号, 1977: 71
- [4] 全国第一届声表面波论文集. 1978: 136
- [5] 日本电子材料工业会编. 许昌昆等译. 表面波器件及其应用. 科学出版社, 1984
- [6] エレフトロニク・セラミクス. 冬号, 1977: 33
- [7] エレフトロニク・セラミクス. 冬号, 1977: 71

The Development of SAW TVIF Filters made from Piezoelectric Ceramic

Sun Kang

ABSTRACT

This paper reports the process of designing in building block way, and fabricating surface acoustic wave television intermediate frequency filters which are made up of piezoelectric ceramic substrates of PLCN quaternary system. The amplitude frequency response and group delay response of SAW TVIF filters have been measured. These responses have fulfilled quality requirements for TV sets entirely.