

无调谐低插入损失表面漏波滤波器

章 德 水永安 吴文虬

(南京大学声学研究所)

1985年4月27日收到

摘要 本文选择了合理的铌酸锂切割方向,并利用了新型多条耦合反射器结构,实现了无调谐低插入损失表面漏波滤波器,它的最小插入损失仅仅 3dB,最佳相对带宽大约 2%—5% 之间,阻带抑制为 23dB. 如两个换能器采用加权形式,阻带抑制可提高到 40dB 以上.

UNTUNED LOW INSERTION LOSS SLW FILTERS

ZHANG DE SHUI YONG-AN WU WEN-QIU

(Institute of Acoustics, Nanjing University)

Received April 27, 1985

Abstract This paper presents a low insertion loss SLW filter on an optimum-cut orientation LiNbO_3 using new RMSC. The insertion loss have been reduced to 3 dB without external phase shift networks, and the out-of band rejection is up to 23 dB. The fractional bandwidth is up to 2—5%. The out-of band rejection can be reduced to 40 dB when two IDT are apodized.

一、引 言

六十年代中期,叉指换能器问世以来,经过二十年的发展,声表面波器件已进入一个成熟的阶段.尤其是声表面波滤波器(SAWF)在设计上的灵活多变,使它在许多特性上超过了其它种类的滤波器.电视接收机中的中频滤波器便是最好的证明.但是叉指换能器固有的双向性发射及为了抑制三次行程假讯号对阻抗失配的要求,使SAWF存在一个致命的弱点——插入损耗大.而且叉指电极静态电容的存在,使整个器件的损耗更大,为抵消静态电容的影响必须外加调谐电感,这就使它几乎失去了表面波滤波器稳定可靠的特点,也限制了SAWF在许多电子领域中的应用.近年来国内外声表面波工作者对低插损滤波器进行了各种研究^[1-3].但所提出的设想、方案及实验均存在着各自的弱点.如群型单向换能器必须附带 90° 的调相电路,三相、四相单向换能器^[1],由于工艺上的困难及复杂的调相电路,使它们几乎无法推广使用.半转移多条耦合器式的低插损滤波器^[2]的通带波纹比较大,在许多电子线路上是无法接受的.文献[3]提出的新型多条耦合器是一种较好的设计,但因瑞利波的机电耦合系数很小,反射器的条带数要很多时才能保证声能量全反射.使整个滤波器所用的电极通常要超过440个波长,相对带宽只能小于1%,而且众多的电极引起的工艺缺陷使整个滤波器性能变差.我

们合理地选择了适当的基片材料^[4] ($49^\circ y$ 旋转切割 x 传播方向的铌酸锂) 和利用了表面漏波, 得到了无调谐的低插损表面漏波滤波器。

二、无调谐的条件

当一个讯号源加在叉指换能器的两个电极上, 换能器便向两个方向发射声波。它的等效电路为一个三端对网络(如图 1 所示), 其中叉指换能器的导纳 $y_T = G_T + jB_T$, 外负载的导纳为 $y_L = G_L + jB_L$, z_c 为自由表面的声传播阻抗, 它的讯号散射系数

$$s_{13} = \frac{2\sqrt{G_L\hat{G}_0}}{y_T + y_L} \cdot \sqrt{\frac{G_T}{2\hat{G}_0}} \quad (1)$$

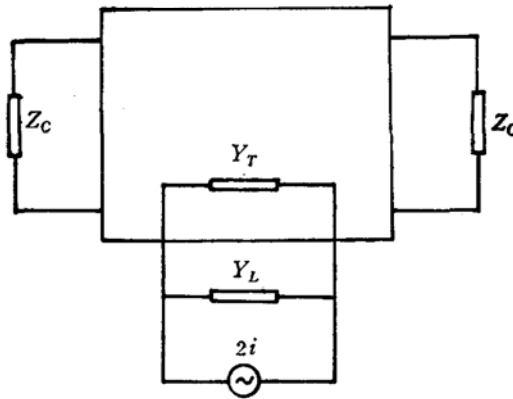


图 1 换能器的等效电路

The equivalent circuit of IDT

其中 $\hat{G}_0$ 为中心频率时叉指换能器的辐射导, 中心频率时的工作衰减为

$$\begin{aligned} b_{13} &= -20 \log s_{13} \\ &= -10 \log \frac{1}{2} - 20 \log \left| \frac{2\sqrt{\hat{G}_0 G_L}}{(\hat{G}_0 + G_L) + j(B_L + B_T)} \right| \end{aligned} \quad (2)$$

第一项为换能器的双向性损耗。当外电路为纯导时(即 $B_L = 0$), 要实现无调谐时插损最小, 必须满足:

$$B_T \ll (\hat{G}_0 + G_L) \quad (3)$$

并且外电路负载与换能器辐射阻相匹配 ($\hat{G}_0 = G_L$), 那么(2)式中的第二项几乎为零, 它的工作衰减仅留下双向性损耗。

我们假设叉指换能器的纳是以静态电容 C_s 为主 (C_s 为一根指的静态电容)

$$B_T = \omega N C_s \quad (4)$$

它的辐射导由下式表示

$$\hat{G}_0 = 8N^2 C_s k_t^2 f_0 \quad (5)$$

比较公式(4)与(5), 假设我们有两种材料, 它们的介电常数相差不大, 相同的叉指换能器就应当有接近的辐射纳 B_T , 但是 $\hat{G}_0$ 因机电耦合系数不同而不相等, k_t^2 越大就越容易满足公式(3)。因此我们选择 $49^\circ y$ - x LiNbO₃ 作为基片材料, 它激励表面漏波的机电耦合系数 k_t^2 比

$y\text{-LiNbO}_3$ 上瑞利波的 k_z^2 大三倍左右^[4], 在叉指换能器指对数不太多的情况下就能满足公式(3)的条件, 实现无调谐低损耗表面漏波滤波器。

三、 $49^\circ y\text{-x LiNbO}_3$ 上表面漏波的性能

对材料及波型的选择, 除去应选择 k_z^2 比较大之外, 还得考虑到我们利用了多条耦合反射器, 必须满足多条耦合器声能量转移的条件。文献[7]将多条耦合器下的声波传播定性地看成零阶的对称模与一阶的反对称模的叠加。对于 SLW, 为了达到全转移的目的, 希望对称模与反对称模的传播衰减相同, 在一个通道内声振幅相消至零, 另一个通道内叠加, 实现声能量的全转移。文献[7]对传输线每一周期段等效电路的简化, 将反对称模近似地看作每一金属条上的电势为零的传播情况(短路金属条), 又将对称模近似作每一金属条开路的条件。这样就必须要求表面漏波在开路周期栅格与短路金属周期栅格下传播衰减相同。文献[6]的计算表明 $49^\circ y\text{-x LiNbO}_3$ 表面, 两种条件下的传播衰减不大, 而且很接近。其性能: (a) 表面漏波的机电耦合系数 $k_z^2 \sim 0.17$ ^[4]。(b) 当工作频率 f 与条带截止频率 f_c 之比为 0.8 时最佳转移条带数为 32 条左右^[5]。(c) 短路金属条带下的传播衰减为^[6]: $1.21 \times 10^{-3} \text{dB}/\lambda$ (d) 开路金属条带下的传播衰减为^[6]: $4.40 \times 10^{-3} \text{dB}/\lambda$ (e) 自由表面下声传播速度^[6]: 4787m/s 从上述所列的数据可以看出, 它既能满足 k_z^2 比较大的要求, 又能满足两种模式的声波在多条耦合器下传播衰减不大又很接近的要求。因此, 选用 $49^\circ y\text{-x LiNbO}_3$ 作基片材料比较合理。

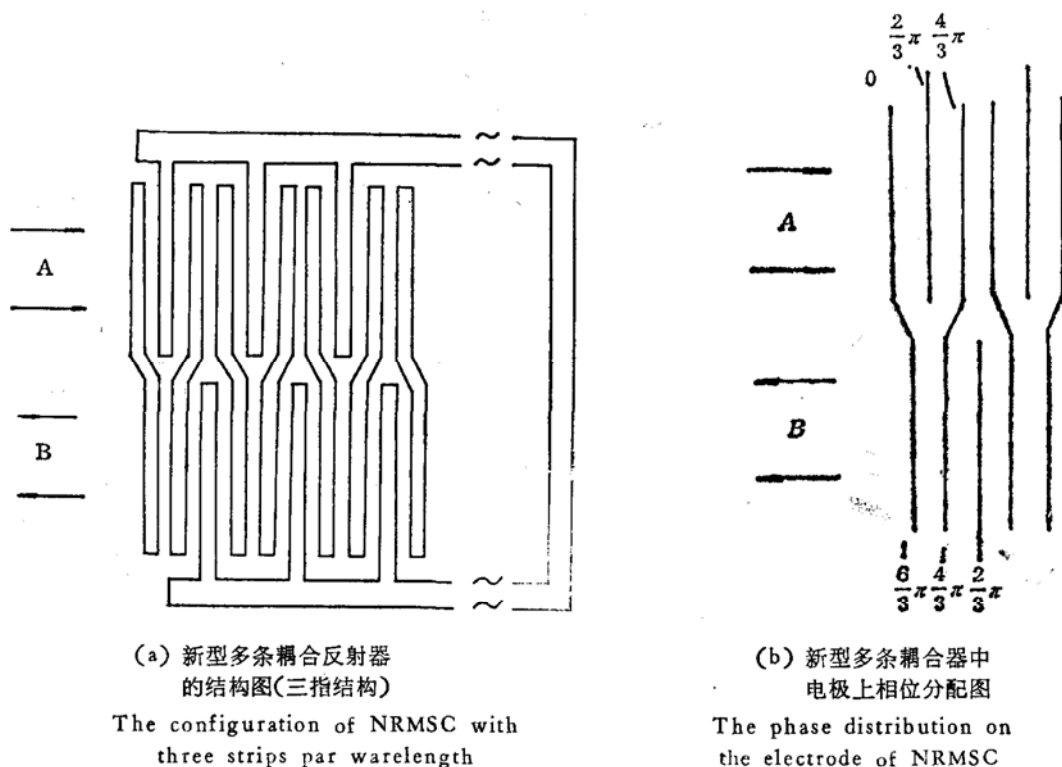


图 2 新型多条耦合反射器 NRMSC

四、新型多条耦合反射器结构

新型多条耦合反射器^[3]如图 2(a) 所示, 每根条带宽度为 $\lambda/6$, 间隙也为 $\lambda/6$. 中心频率为 f_0 的声波从 A 通道入射后在电极上产生的电势相位分配如图 2(b) 所示, 每个电极之间相差 $\frac{2}{3}\pi$, 类似于一个三相调相网络加在 B 通道的电极上, 使 B 通道内激发出一个向左反射的单向声波. 我们将电极条带的作用等同于多条耦合器, 反射能量的大小由电极条带的多少而定. 条带数不足时 A、B 通道之间仅有部份能量转移, 到一定数目的条带时, 可达到全转移, 机电耦合越强, 全转移条带数目越小. 但这种反射器又与一般多条耦合器不同, 因为经过不同条带的声波有不同的行程, 因而 B 通道发射的声波以不同的相位叠加(图 2(b)), 形成一个反射声波, 而且它的反射频率响应有一定的带宽与谷点. 条带数目越大, 带宽越窄, 谷点之间的频率差也

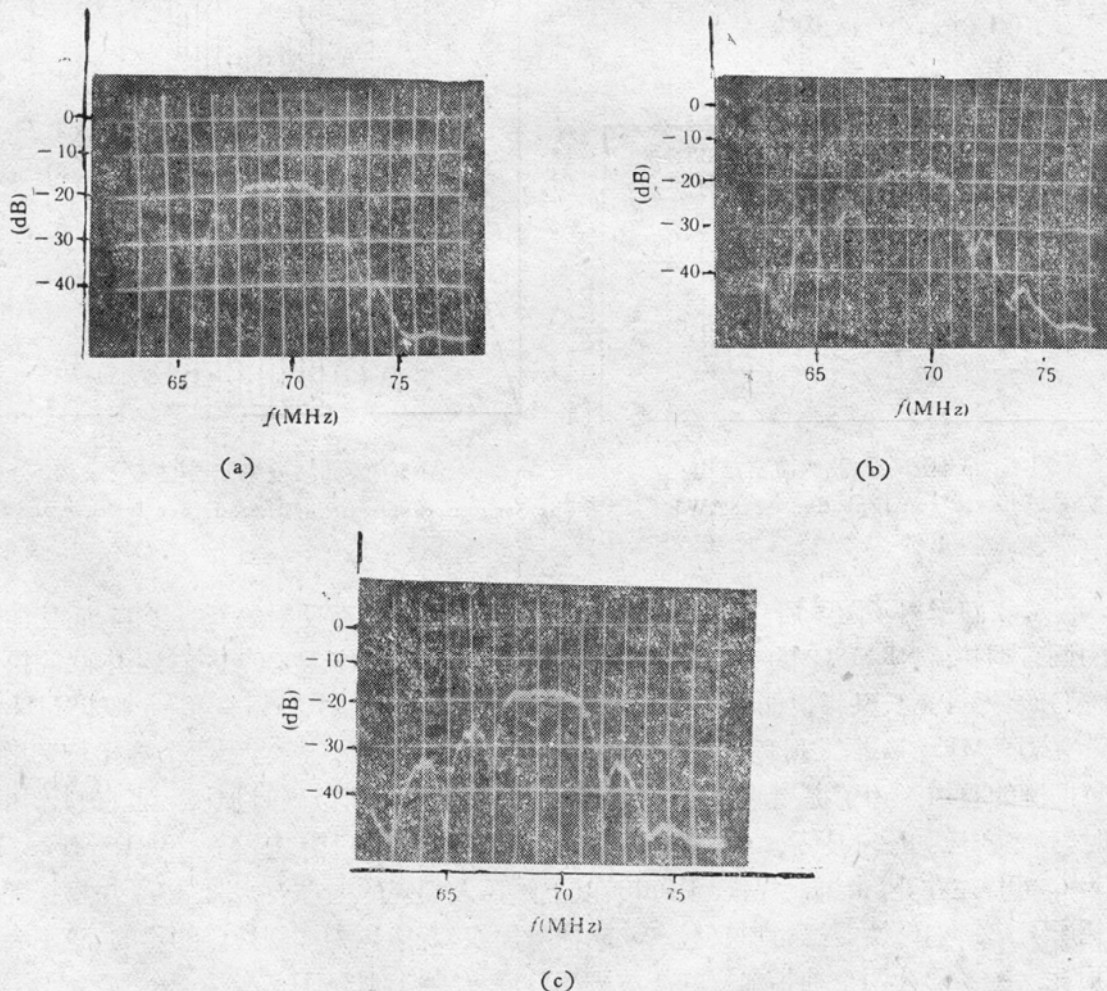


图 3 不同反射器长度时实验测得的反射频率特性

The experimental reflectivity frequency response with various length of reflector

- a. 每个反射器有 20 个波长 reflector with 20 wavelength
- b. 每个反射器有 18 个波长 reflector with 18 wavelength
- c. 每个反射器有 16 个波长 reflector with 16 wavelength

越小。我们通常希望同步频率处于全转移条带数,而且机电耦合系数增大,从而增加反射带宽。图3为不同反射器长度时实验测得的反射频率特性,顶部的通带波纹,主要由基片的端面反射所致。

五、实验结果

若采用图4所示的一发一接式的常规滤波器设计,尽管选择适当的 k_t^2 及指对数也可省去调谐电感,但固有的6dB双向性损耗仍无法消除。而且,在 $49^\circ y-x \text{ LiNbO}_3$ 表面激发的是准水平切变漏波,通常的吸声材料无法吸掉无用的声振动、端面反射会严重地影响滤波器的通带

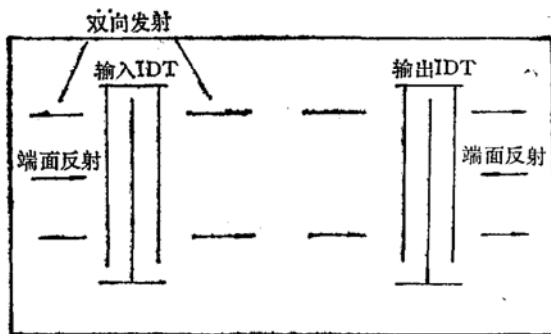


图4 常规声表面波滤波器结构
The ordinary configuration of SAWF

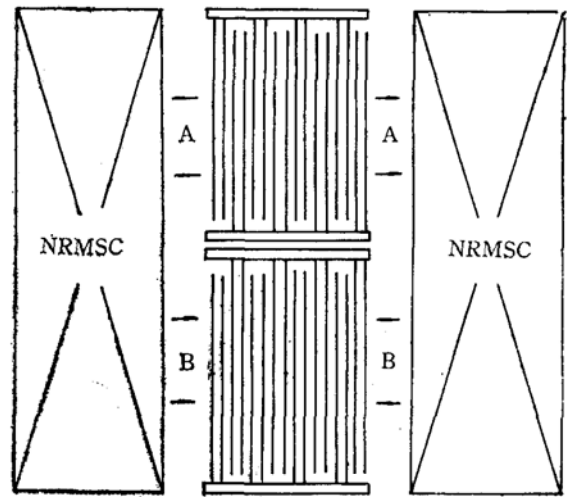


图5 表面漏波滤波器的实验结构
The structure scheme of the surface leaky wave filters

波纹,所以,我们采用了图5所示的实验结构,不但可以避免端面反射的严重影响,而且消除了6dB的固有损耗。NRMSC的指条宽度与指间隙各为 $\lambda/6$,总长度 20λ 左右。中间的换能器为30对分裂指等指长叉指换能器。图6为滤波器的频率响应,中心频率 $f_0 = 47.99\text{MHz}$,三分贝带宽 1.45MHz 。插入损耗 $IL = 3\text{dB}$,阻带抑制为 23dB ,相当于两个等指长叉指换能器阻带抑制的叠加。为了提高滤波器性能,输入、输出换能器可以同时加权。当它们采用海明加权时,频率响应如图7所示。中心频率 $f_0 = 48\text{MHz}$,三分贝带宽 $\Delta f_{3\text{dB}} = 1.5\text{MHz}$,插入损耗为 6.2dB 左右,阻带抑制提高到 40dB 以上。插入损耗的增加,主要是由于加权损耗。传播损耗所引起。如果换能器的加权形式改成抽指加权,既能达到抑制边瓣的目的,也不会引入加权损耗。图8即为两个抽指加权的滤波频率响应 $f_0 = 151.3\text{MHz}$, $\Delta f_{3\text{dB}} = 5.5\text{MHz}$,阻带抑制大于 40dB , $IL = 4.3\text{dB}$ 。

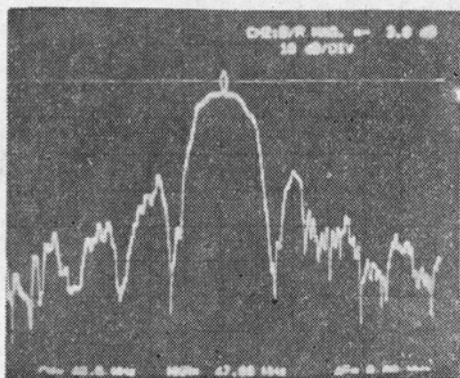


图 6 用两个 30 对不加权换能器时的实验频率响应
The experimental frequency response of a filter with two unpodized transducers of 30 finger pairs

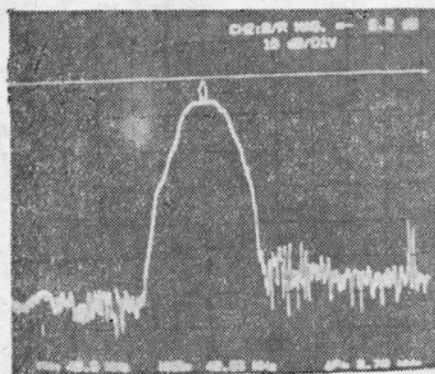


图 7 两个加权换能器时滤波器的频率响应
The experimental frequency response of a filter with apodized transducers

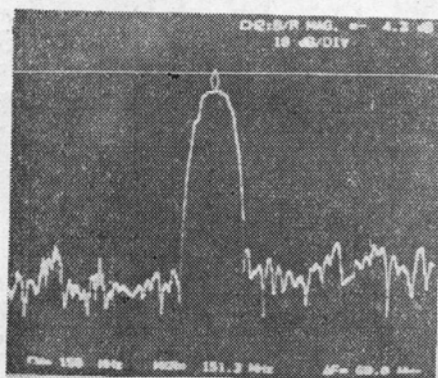


图 8 两换能用抽指加权时的频率响应
The experimental frequency response of a filter with withdrawal weighting transducers

参 考 文 献

- [1] Qiu Pangchuan, Shui Yongan, Zhang De Jiang Wenhua and Wu Wenqiu, 1982 *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*, 222—226.
- [2] Yasuaki Kinoshita, Mitsutaka Hikita, Toyoji Tahuchi, Hiroomi Kojima, "Broadband Resonant Filter Using Surface-Shear-Wave Mode and Twin-Turn Reflector", *Electronics Letters*, 15th February, 15(1979), No. 4, 130—131.
- [3] Pollock, W., Schofield, J., Milsom, R. F., Murray, R. J., Flin, I., "Low Loss Filter Using Single Phase idr's and No External Tuning", 1983 *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*, 7—92.
- [4] Zhang De, Shui Yongan, Jiang Wenhua, "Surface Quasi-Transverse Wave Resonator on Rotated Y-cut Lithium Niobate", 1982 *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*, 53—56.
- [5] 章德、吴文虬, "表面漏波多条耦合器", 第二届全国超声会议,
- [6] 薛强、水永安、章德, "周期金属栅格下表面漏波特性的研究", 第二届全国超声会议.
- [7] Marshall, F. G., Newton, C. D. and Paige, E. G. S., "Theory and Design of the Surface Acoustic Wave Multistrip Coupler", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. MTT-21 (1973), No. 4, 206—215.