

声表面波低插入损耗滤波器的研制 (II)

—— 横向耦合谐振滤波器

郭艳明 何世堂 汪承灏 解 述

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

1998 年 3 月 2 日收到

1998 年 6 月 18 日定稿

摘要 目前移动通讯设备对窄带低插损高阻带抑制的滤波器有极大需求, 而横向模式耦合谐振滤波器是实现这些性能的最佳方案之一。在理论上, 本文应用陈东培和 Hartmann 等提出的耦合模理论模型对这种滤波器进行了分析设计; 在实验上, 以 ST 石英为基底材料, 设计制作了 152.55 MHz 频率的器件, 器件性能接近目前国外已报道同类器件的水平, 最低插损达 2.7 dB, 阻带抑制约 60 dB, 相对带宽 0.5 % ~ 0.75 %, 并能获得平坦的通带。

PACS 数 43.35

Design and performance of SAW low insertion loss filters(II)

—Transversely-Coupled Resonator Filter

GUO Yanming HE Shitang WANG Chenghao XIE Shu

(Institute of Acoustics, The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

Received Mar. 2, 1998

Revised Jun. 18, 1998

Abstract Currently the mobile communication system has a great need of the filter with narrow bandwidth, low loss and high rejection. SAW transversely-coupled resonator filter (TCRF) is the optimum physical implementations of the filter above mentioned. In this paper, we first analyzed theoretically TCRF using Coupling-of-Modes model presented by Chen & Hartmann et al. The experimental results of the filter fabricated on ST Quartz substrate is given. The device achieved favorable characteristics with an insertion loss of 2.7 dB, a sidelobe rejection of about 60 dB, a fractional bandwidth of about 0.5 % and a very flat passband.

引言

横向模式耦合谐振滤波器 (TCRF) 最早是由 Tiersten 和 Smythe 提出来的^[1], 后来 Tanaka 等作了比较详细的研究, 并设计出了性能很好的器件^[2], 使其逐渐走向实用化。

横向耦合谐振滤波器的结构如图 1 所示, 它由两个单端对谐振器耦合在一起组成, 中间是叉指换能器, 两边是金属反射栅阵, 输入和输出换能器通过一个公用的接地汇流条连接起来。图中, L_T 和 L_G 分别是换能器和反射栅的长度, L_S 是换能器与反射栅间距离, AP 是换能器孔径, 公用接地汇流条宽 WG 。

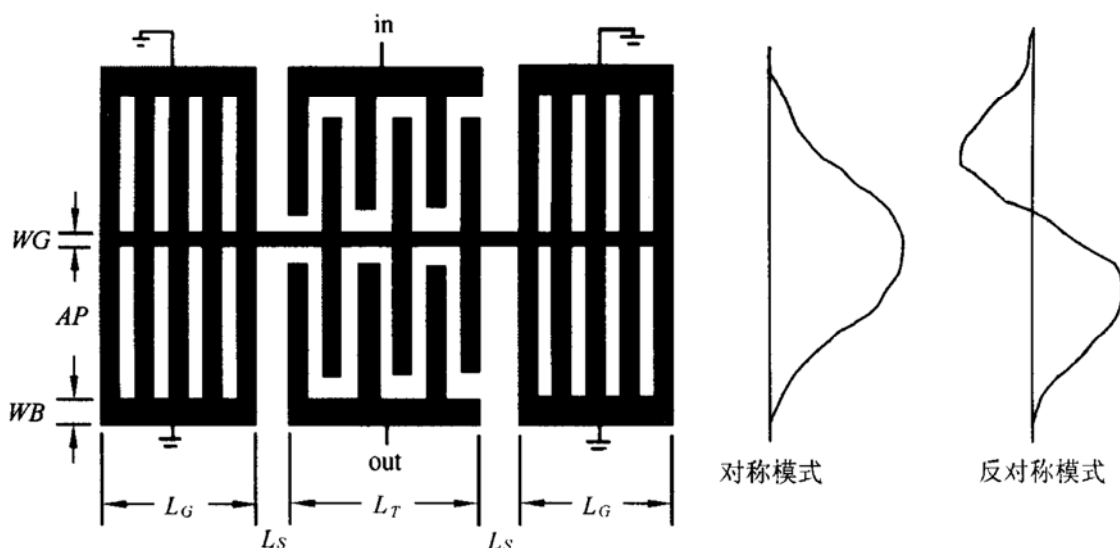


图 1 横向耦合谐振滤波器结构及其模式

TCRF 结构由于每个通道的孔径非常小, 只有几个波长, 并且中间耦合汇流条非常窄, 只有一个波长左右, 则两个通道形成一个声波导, 在这个声波导中可以传播多个导波模式, 其中形成滤波器频响通带的仅仅是最低阶的对称模式和反对称模式 (见图 1 右边), 其他高阶模式形成阻带寄生响应, 在设计过程中应想办法消除。最低阶的对称模式和反对称模式之间存在速度差, 产生一个两极点响应, 表现在频响上即是在通带内存在两个峰, 外加匹配网络后, 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, $0.5\% \sim 0.7\%$; 非常低的插入损耗, 最小 2 dB; 非常高的阻带抑制, 最大 70 dB。此外, 由于其孔径小, 其体积也非常小。以上优点使它适合于作模拟移动通信系统的中频滤波器和采用一次混频电路的寻呼机滤波器。

最近, 伴随移动通信的迅速发展, 这种滤波器在通讯中得到广泛应用。前面提到 Tanaka 等人的工作, 虽然给出了很好的实验结果, 但其理论分析模型采用的是集总参数模型, 只能对滤波器通带宽度作出预计, 无法对滤波器的整个频率响应, 特别是阻带特性作出准确的预计。因此, 吸引了不少人对其理论模式进行深入分析, 其中最为成功的是 Hartmann 和陈东培等人提出的耦合模理论模型^[3,4]。不但可以很好地预计通带的宽度, 也可以较好地预计高阶模式的响应, 即阻带特性。本文的理论分析即以这一模型为基础。

1 等效电路及耦合模理论分析

不同于传统的横向滤波器, TCRF 结构具有两维特性, 必须同时考虑其纵向和横向的声波分布, 所以分析起来要复杂得多。Hartmann 等是通过把两维问题转化成一维问题来分析, 由此建立一个一维谐振器模型, 总的谐振器特性即是这些一维谐振器特性叠加的结果^[3]。根据图 1 的结构, 可以画出如图 2 所示的一维谐振器等效电路。图中 C_0 是每个叉指换能器的静电容, C_b 是从输入到输出的桥电容, R_G 是公共接地汇流条的分布电阻。

等效电路中, Y_S 、 Y_A 分别表示所有对称模式和反对称模式的输入声导纳之和, 可通过耦合模模型方法来求取。为此, 可以把整个结构的声激励表示成各横向导波模式之和, 对任意 i 次模式, 可用一组对应的耦合模微分方程来描述其波动行为。每一模式都具有一组它自己的耦合模参数如速度 V_{Ri} 、反射率 K_i 、换能耦合强度 α_i 等。即使是同一模式, 在栅区和换能区其耦合模参数也可能略有不同。通过求解耦合模微分方程组得出栅区和换能区的 P 矩阵, 再级联起来即可得到整个一端对谐振器的 P 矩阵:

$$P_{33}^R = P_{33}^T + \frac{4(P_{13}^T)^2 P_{11}^G}{P_{11}^G(P_{11}^T + P_{12}^T) - 1} \quad (1)$$

公式 (1) 中上标为 T 的是换能区的 P 矩阵, 由耦合模微分方程可求得:

$$P_{11}^T = \frac{-jK \sin(D_T L_T) e^{-j2kL_S}}{D_T \cos(D_T L_T) + j\Delta_T \sin(D_T L_T)} \quad (2)$$

$$P_{12}^T = \frac{D_T e^{-j2kL_S}}{D_T \cos(D_T L_T) + j\Delta_T \sin(D_T L_T)} \quad (3)$$

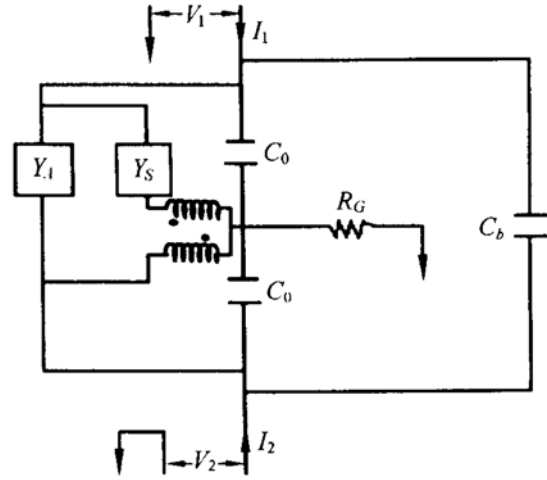


图 2 TCRF 的等效电路

$$P_{13}^T = \alpha L_T e^{-j2kL_S} \frac{\sin(D_T L_T/2)}{D_T L_T/2} \frac{(\Delta_T - K) \sin(D_T L_T/2) - jD_T \cos(D_T L_T/2)}{D_T \cos(D_T L_T) + j\Delta_T \sin(D_T L_T)} \quad (4)$$

$$P_{33}^T = \frac{4\alpha^2 (K - \Delta_T)}{D_T^3} \left[jD_T L_T + \frac{(K - \Delta_T) [\cos(D_T L_T) - 1] - jD_T \sin(D_T L_T)}{D_T \cos(D_T L_T) + j\Delta_T \sin(D_T L_T)} \right] \quad (5)$$

公式 (1) 中上标为 G 的是栅区的 P 矩阵, 也可由耦合模微分方程求得:

$$P_{11}^G = \frac{-jK \sin(D_G L_G)}{D_G \cos(D_G L_G) + j\Delta_G \sin(D_G L_G)} \quad (6)$$

$$P_{12}^G = \frac{D_G}{D_G \cos(D_G L_G) + j\Delta_G \sin(D_G L_G)} \quad (7)$$

L_T 、 L_G 和 L_S 的定义见图 1。 Δ_T 和 Δ_G 分别是换能区和栅区的归一化波矢, D_T 和 D_G 分别是 Δ_T 和 Δ_G 由于内反射引起的失调。

$$\Delta_T = \frac{2\pi(f - f_T)}{V_{RT}} - j\gamma \quad (7)$$

$$\Delta_G = \frac{2\pi(f - f_G)}{V_{RG}} - j\gamma \quad (8)$$

$$D_T = \sqrt{\Delta_T^2 - K^2} \quad (9)$$

$$D_G = \sqrt{\Delta_G^2 - K^2} \quad (10)$$

其中, f_T 和 f_G 分别是换能区和栅区的布拉格频率, V_{RT} 和 V_{RG} 是这两个区的瑞利波速, K 是单位长度的反射率, α 是单位长度的压电耦合强度, γ 是单位长度的传播损耗。

由 (1) 式得到 P_{33}^R , 它即是等效的单模式一端对谐振器的输入导纳, 因此立即可以得到 Y_S 、 Y_A 。 Y_S 是所有对称模式的 P_{33}^R 之和, Y_A 是所有反对称模式的 P_{33}^R 之和。

$$Y_S = \sum_{i=\text{even}} P_{33i}^R \quad (11)$$

$$Y_A = \sum_{i=\text{odd}} P_{33i}^R \quad (12)$$

根据上面 (11)、(12) 式, 声导纳即可求出。

2 器件的理论响应和实验结果

器件的理论响应可以通过求解图 2 等效电路的导纳矩阵来得到。导纳矩阵元可求得为:

$$Y_{11} = Y_{22} = \frac{Y'_{11} + R_G[Y'_{11}]^2 - R_G[Y'_{12}]^2}{1 + 2R_G[Y'_{11} + Y'_{12}]} \quad (13)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{Y'_{12} + R_G[Y'_{11}]^2 - R_G[Y'_{12}]^2}{1 + 2R_G[Y'_{11} + Y'_{12}]} \quad (14)$$

其中 Y'_{11} 和 Y'_{12} 是当图 2 电路中 $R_G = 0$ 时的导纳矩阵元。

$$Y'_{11} = Y_S + Y_A + j\omega(C_0 + C_B) \quad (15)$$

$$Y'_{12} = Y_S + Y_A + j\omega C_B \quad (16)$$

如果在图 2 的电路中的输入和输出端口各串入一个电感 L 进行调谐, 则此时整个电路的导纳矩阵为:

$$Y_{11}^L = Y_{22}^L = \frac{Z_{11} + j\omega L}{(Z_{11} + j\omega L)^2 - Z_{12}^2} \quad (17)$$

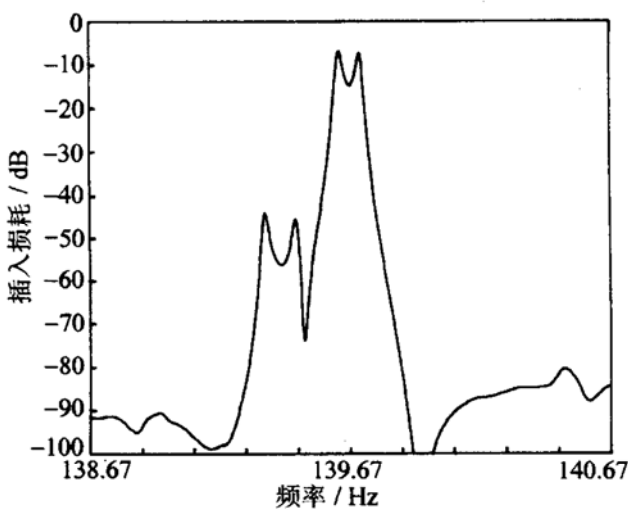
$$Y_{12}^L = Y_{21}^L = \frac{-Z_{12}}{(Z_{11} + j\omega L)^2 - Z_{12}^2} \quad (18)$$

其中:

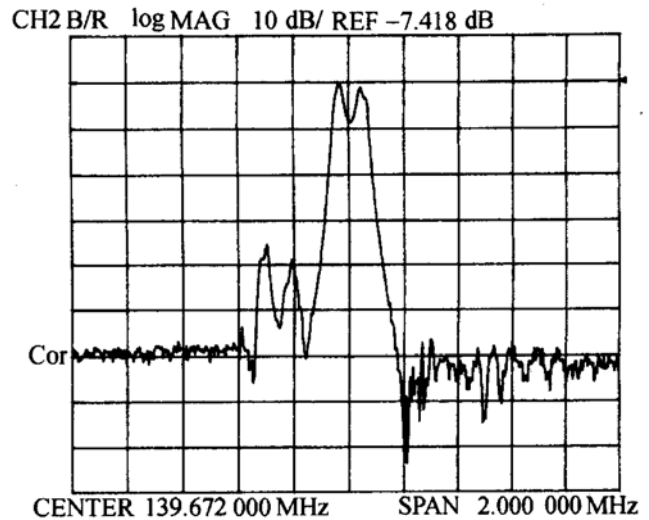
$$Z_{11} = \frac{Y_{11}}{Y_{11}^2 - Y_{12}^2} \quad (19)$$

$$Z_{12} = \frac{-Y_{12}}{Y_{11}^2 - Y_{12}^2} \quad (20)$$

应用上面讨论的方法计算了我们所设计的两个不同的四极点 (即图 1 所示基本结构的两级级连) 滤波器的理论频响, 分别示于图 3(a)(未调谐) 和图 4(a)(串联电感调谐)。采用 TCRF 结构设计滤波器的难点和关键是抑制高阶模式的激发, 以提高旁瓣抑制。图 3 所示的滤波器未采取抑制高阶模式的措施, 低频端存在高阶模式引起的旁瓣。图 4 所示的滤波器对栅阵的结构作了改进, 抑制了高阶模式的激发, 低频端旁瓣得到了很好的抑制。图 3(b)、图 4(b) 分别给出了这两个滤波器的实验频响。理论与实验结果相比较可看出, 二者在通带附近基本吻合。



(a) 理论频响



(b) 实验频响

图 3 普通设计的滤波器

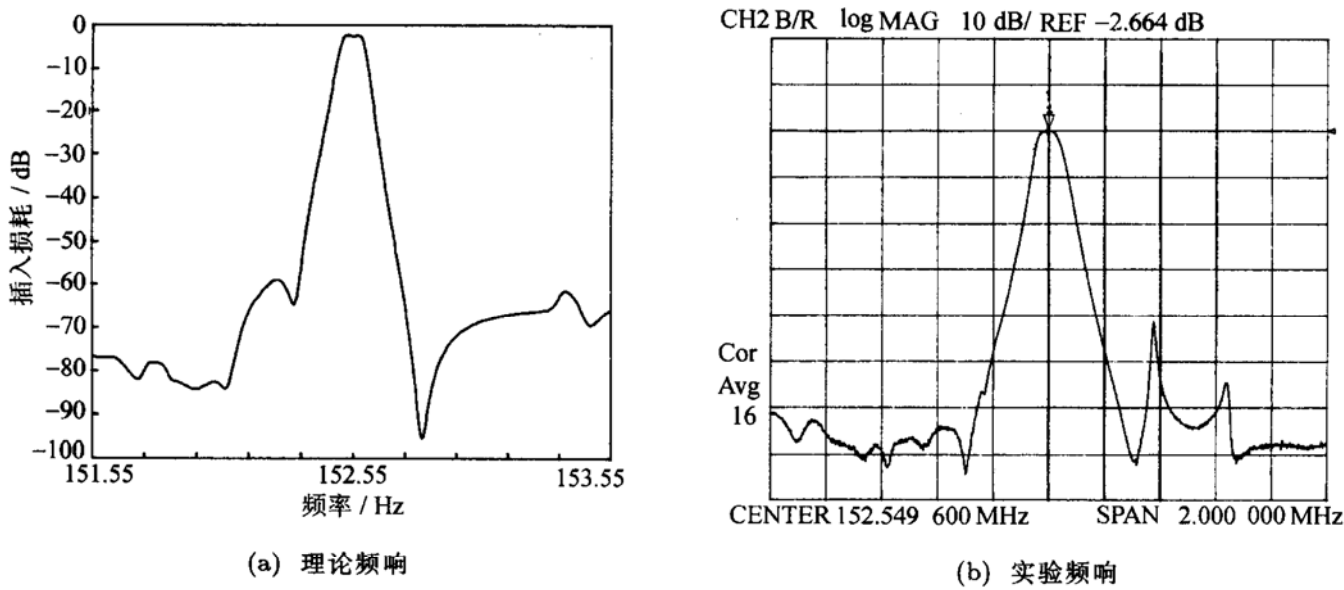


图 4. 抑制高阶模式后的滤波器

3 结论

以上我们采用陈东培和 Hartmann 等提出的耦合模理论模型对 TCRF 进行了分析；并给出了我们的实验结果。采取了抑制高阶模式的措施后，最终获得的实验器件，高次模式引起的旁瓣得到很好的抑制，从而获得高的阻带抑制；同时也获得了低的插损和平坦的通带。整个器件的综合性能接近目前国外已报道同类器件的水平^[5]，完全能满足移动通讯中的较高要求。

上述器件 1995 年初即已研制成功，并得到寻呼机生产厂家的认可，准备定货。由于我们的工艺水平保证不了频率的一致性，未能批量生产。

参 考 文 献

- 1 Tiertten H F et al. *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, 1975: 293—294
- 2 Tanaka M et al. *38th Freq. Cont. Symp. Proc.*, 1984: 286—293
- 3 Hartmann C S, Chen D P et al. *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, 1992: 39—43
- 4 Chen D P et al. *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, 1994: 67—70
- 5 Clements C W et al. *IEEE Trans. UFFC*, 1993, 40(5): 438—451