

带反射栅结构的 RSPUDT 声表面波滤波器设计

董加和, 张显洪, 朱 勇, 陈彦光, 蒋世义, 蒋 欣, 王 岚

(中国电子科技集团公司第 26 研究所, 重庆 400060)

摘 要:一般的谐振型单相单向换能器(RSPUDT)滤波器结构由两个换能器组成, 声波在两个换能器之间形成谐振。在换能器间加入反射栅后, 由于中间反射栅的作用, 增加了声波的有效传输长度, 不仅提高了设计的灵活性, 最关键的是使芯片尺寸减小, 最多可以减小一半。该文采用了这种带反射栅结构的谐振型单相单向换能器设计技术, 设计出的谐振型单相单向换能器声表面波滤波器实测结果与仿真吻合较好。

关键词:声表面波滤波器; 谐振型单相单向换能器(RSPUDT); 反射栅

中图分类号:TN65 **文献标识码:**A

Design of RSPUDT SAW Filter with Reflective Gratings

DONG Jiahe, ZHANG Xianhong, ZHU Yong, CHENG Yangguang, JIANG Shiyi, JIANG Xin, WANG Lan

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: A simple RSPUDT filter is composed of two SPUDT interdigital transducers (IDT), and SAW resonates between the two IDTs. To improve designing flexibility and more importantly to reduce chip size, reflective gratings were added between the two IDTs. It is the reflective gratings that increase the effective length of SAW transmission, so that using the new structure the chip size can potentially reduced by a factor two. This structure was adopted in this paper, by which RSPUDT SAW filter was designed. The measurement accorded well with simulation results.

Key words: SAW filter; RSPUDT; reflective gratings

0 引言

单相单向换能器(SPUDT)主要是利用内部机械反射在一定程度上去抵消声电再生反射, 从而达到抑制 3 次行程信号的目的。该技术如果要实现窄带声表面波(SAW)滤波器设计需较大的芯片尺寸, 为了克服这个缺点, Pascal Ventura 等提出了谐振型单相单向换能器(RSPUDT)的概念^[1]。RSPUDT 技术可较容易地实现窄带小体积的声表面波滤波器设计, 这是 RSPUDT 技术的一大优势。RSPUDT 主要原理是利用 SPUDT 的单向性让 SAW 在传播路径上形成谐振。RSPUDT 滤波器在设计上比 SPUDT 滤波器更为复杂, 需要同时对换能和反射函数进行优化设计, 这是一个非线性优化的过程。普通的 RSPUDT 滤波器结构由两个换能器组成。在换能器间加入反射栅后, 不仅提高了设计的灵活性, 最关键的是减小了芯片尺寸, 这种结构被称为带反射栅结构的 RSPUDT, 简称为 SGS 结构^[2]。Pascal Ventura 等提出了 SGS 结构的全局优化算法^[3]。为了进一步减小尺寸, Marc Solal 等提

出了双通道 SGS 结构^[4], 这种结构是将两个单通道 SGS 结构并联而成。在版图的生成方式上, 双通道结构可采用并联平衡连接方式^[5], 这种滤波器可实现平衡输入/输出, 能进一步减小芯片尺寸。本文采用 SGS 结构, 开发了相应的 RSPUDT 滤波器设计技术, 研制出了实测与仿真吻合得较好的 SGS 结构的声表面波滤波器。

1 RSPUDT 滤波器的 SGS 结构原理

SGS 结构 RSPUDT 滤波器由两个非变迹 SPUDT 换能器和换能器之间的反射栅组成。输入输出换能器的电声和反射源分布可用换能函数和反射函数来描述。图 1 为单通道 SGS 结构。

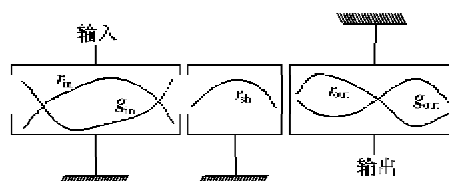


图 1 单通道 SGS 结构

收稿日期:2011-09-26

作者简介:董加和(1978-),男,云南玉溪人,工程师,硕士,主要从事声表面波滤波器设计的研究。

图中, $g_{in/out}$ 表示输入/输出的换能函数, $r_{in/out}$ 表示反射函数, r_{sh} 表示反射栅的反射分布函数。通过优化换能函数 $g_{in/out}$ 和反射函数 $r_{in/out}$ 来实现换能器的单向性, 于是在中心频率 f_0 附近, 声信号在声通道上产生多次反射, 形成声谐振及复杂的声电再生。通过优化反射函数可调节声谐振的强弱。

为了实现滤波器的平衡输入输出功能, 或进一步减小体积, 可采用双通道结构, 如图 2 所示。如果 $r_{in1/out1} = r_{in2/out2}$ 、 $g_{in1/out1} = g_{in2/out2}$, 同时满足上下通道反射栅和换能器间距相同, 则实现平衡输入输出功能。另外一种方案是保持换能和反射不变, 将上通道左换能器向左移动 0.25 波长, 上通道右换能器向右移动 0.25 波长, 下通道不变, 这样可抵消 1 次行程信号, 利用 3 次行程信号为主响应来实现器件性能, 这种方案可进一步的减小体积, 但对工艺较敏感。还有一种方案是把上下通道的换能器换能和反射函数都当成优化变量, 反射栅和间距不变, 这种方法由于优化变量增多, 使得设计更为灵活, 体积也会进一步减小, 但对工艺也较敏感, 对工艺要求较高。

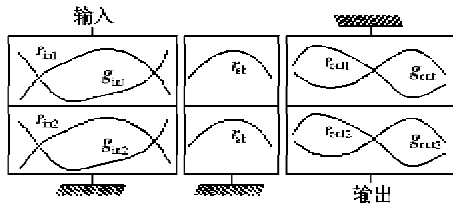


图 2 双通道 SGS 结构

换能器间加入的反射栅可减小换能器间的直通影响, 同时通过优化反射栅的反射函数可改善通带波纹; 但是, 反射栅最为关键的作用是增加延迟时间, 从而减小芯片尺寸^[6]。

假定输入换能器的延迟时间为 t_1 , 中间反射栅的延迟时间为 t_2 , 并假定输出换能器的延迟时间等于 t_1 , 那么声信号直接从输入到输出的延迟时间为

$$T = 2t_1 + t_2 \quad (1)$$

考虑中间反射栅的影响, 一部分声信号先被反射栅反射, 然后被输入换能器反射后到达输出换能器; 另外一部分透射过反射栅的声信号先被输出换能器反射, 然后被反射栅反射后到达输出换能器, 如图 3 所示。因此, 由于中间反射栅的作用, 声信号延迟时间变为

$$T_{new} = 4t_1 + 2t_2 = 2T \quad (2)$$

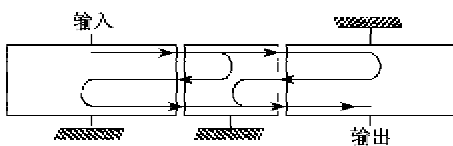


图 3 SGS 结构基本反射原理

可见, 在同样尺寸下, SGS 结构的延迟时间是传统声表面波滤波器的 2 倍, 因此, 采用 SGS 结构的滤波器芯片尺寸最多可减小一半。通过优化反射栅的反射和透射量, 可使设计达到非常满意的效果。对于双通道结构, 反射原理类似。

2 理论模型及优化设计

本文的 RSPUDT 滤波器由带有一定单向性的叉指换能器 (SPUDT) 和反射栅组成, 我们采用分布式声反射换能器 (DART)^[7-8] 单元来构成 SPUDT 及反射栅。均匀分布的 DART 结构每个周期的波长 λ_0 由两条宽度为 $\lambda_0/8$ 的电极 (一条接火电极, 一条接地电极) 和一条宽度为 $3\lambda_0/8$ 的电极 (反射条) 组成, 且所有电极间的间距都为 $\lambda_0/8$, 但在滤波器应用时都需进行加权。RSPUDT 类器件的带宽一般来说相当小, 同时为了弱化衍射效应的影响, 适合采用抽指加权方式。

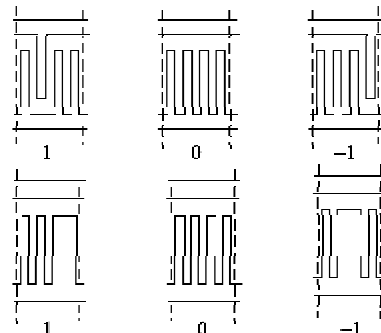


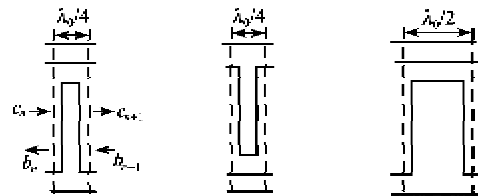
图 4 分别考虑换能和反射时的 DART 抽指加权

由此可见, 只要将图 1、2 中的换能和反射函数用图 4 的抽指方式实现, 并在一个 DART 单元上同时考虑换能和反射抽指加权, 就可实现 RSPUDT 滤波器。

我们采用反射阵列法 (RAM) 来分析 DART^[7-8]。DART 单元主要由 3 种基本电极组成, 如图 5 所示。本文 DART 结构换能器和反射条的可用 P 矩阵来描述^[3,7-8], 定义为

$$[A_{i1}, A_{i2}, I]^T = [P_{ij}] \cdot [A_{o1}, A_{o2}, V]^T \quad (3)$$

式中: A_i, A_o 分别为输入、输出波的幅值; I, V 分别为换能器的电流和电压。



(a) 无反射地电极 (b) 无反射火电极 (c) 带反射地电极

图 5 3 种基本电极

换能器是通过假定它被短路时来分析的, 计算出波的散射和短路产生的电流。假定能量守恒, 足

以得到所有的 P_{ij} 。当 $V=0$ 时,假定一个单元具有入射波 c_n 和 b_{n+1} ,输出波 b_n 和 c_{n+1} ,输出波可写成

$$b_n = Te^{-j\theta}b_{n+1} + Re^{-j3\theta/2}c_n \quad (4)$$

$$c_{n+1} = Te^{-j\theta}c_n + Re^{-j\theta/2}b_{n+1} \quad (5)$$

式中: R 为反射系数; T 为传输系数; $\theta=2\pi f/f_0$ 为渡越角。根据能量守恒有

$$|T| = \sqrt{1-|R|^2} \quad (6)$$

输入一个指条换能器的电流为

$$I_n = -j\gamma \cdot (c_n + b_{n+1})e^{-j\theta/8} \quad (7)$$

$$\gamma = [2\omega W\Gamma_s]^{1/2} (\epsilon_0 + \epsilon_p) 2\sin(\pi s) / P_v (\cos \Delta) \quad (8)$$

式中: $\Delta = \pi a/p$, a/p 为占空比,这里 $\Delta = \pi/2$; $s = kp/\pi < 1$; $P_v(x)$ 是勒让德函数; $\Gamma_s \approx \Delta v/v \cdot [\epsilon_s(\infty)]^{-1}$ 为压电耦合因子; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_p 为半空间无限层材料介电常数的函数 $\epsilon_s(\infty) = \epsilon_0 + \epsilon_p$ 。

对于图 5(a),假设只提供一个输出波但没有输入波,即 $c_0=0, b_0=1$ 。其 P 矩阵为

$$[b_n, c_{n+1}, I_n]^T = [P_{ij}] \cdot [c_n, b_{n+1}, 0]^T \quad (9)$$

对于每一个指的电流,如果说与火汇流条相连,在级联了 N 根指后,由式(9)得 $P_{22} = c_N/b_n, P_{12} = b_0/b_N = 1/b_N, P_{32} = I/b_n, P_{23} = -P_{32}/2$ 。同理,类似地级联方向从右到左,我们可得 P_{11}, P_{31} 和 P_{31} ,电导值 G_n 可由能量守恒等式得到

$$G_n = |P_{12}|^2 + |P_{32}|^2 \quad (10)$$

而

$$P_{32} = G_n + jB_n + j\omega C_n \quad (11)$$

电纳 B_n 是由 G_n 的希尔伯特变换得到, C_n 为整个换能器的静态电容。至此, P 矩阵的每一分量都可求出。同理考虑另一换能器 b , 它的 P 矩阵中矩阵元 P_{ij}^b 可用相同的方法求出。中间的反射栅由于没有换能作用,因此求出的 P 矩阵比较特殊,其中部分元素为 0,如

$$P_{3i} = P_{23} = P_{33} = 0 \quad (12)$$

式中 $i=1,2,3$ 。现在将所有的 P 矩阵级联起来,在级联过程中仅需简单修改就可包括换能器与反射栅之间的间隙影响。级联完成后,带入声端和电端边界条件就可求出 Y 矩阵。利用 Y 矩阵及 $Y_{12} = Y_{21}$,就可得到

$$S_{12} = S_{21} = \frac{2Y_{12}\sqrt{R_1R_2}}{R_1R_2Y_{12}^2 - (1+Y_{11}R_1)(1+Y_{22}R_2)} \quad (13)$$

式中: R_1, R_2 为连结测量仪器的传输线的特性阻抗,取值为 50Ω ; Y_{11}, Y_{12}, Y_{22} 为导纳矩阵元,插入损耗为 $20\log|S_{12}|$ 。

由于这是一个非线性优化过程,因此线性规划

之类的优化算法不适合本例。通常采用的是遗传算法、模拟退火等优化算法实现。本文采用了下山单纯形法来实现优化过程,优化中以换能函数、反射函数、孔径等为变量,根据指标评估出合理的目标函数。优化的目的是尽可能减小目标函数值,使指标满足设计要求。

3 设计实例

采用以上介绍的方法,设计了一个中心频率为 410 MHz 的单通道 SGS 结构声表面波滤波器,该设计采用 ST 水晶基片,膜厚为 100 nm,输入输出换能器 250 波长,中间反射栅 42 波长,芯片尺寸为 $1.2 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ 。实际研制的声表面波滤波器匹配后插入损耗小于 8.5 dB,带外抑制大于 40 dB,1 dB 带宽约 1 MHz。该滤波器匹配前后的仿真与实测情况如图 6、7 所示。由图可见,实测结果与仿真吻合较好。

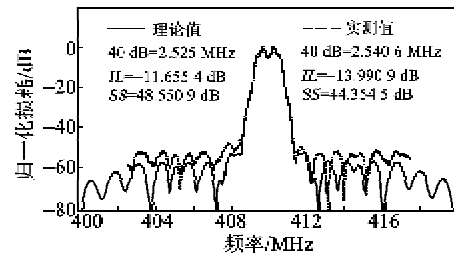


图 6 无匹配时理论模拟与实测频响对比曲线

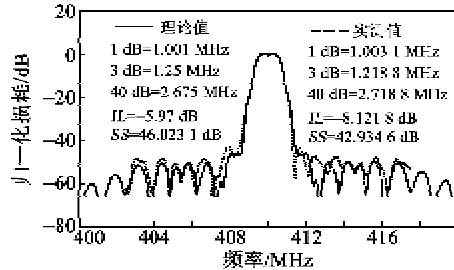


图 7 匹配后理论与实测的频响对比曲线

4 结束语

带反射栅结构的 RSPUDT 技术为设计窄带声表面波滤波器提供了灵活性,并使器件的芯片尺寸减小。我们用这种技术开发出了许多窄带中频滤波器,且实测结果与仿真吻合较好。

参考文献:

- [1] VENTURA P, SOLAL M, et al. A new concept in SPUDT design; the RSPUDT [J]. IEEE Ultrason Symp Proc, 1994, 1: 1-6.
- [2] HODE J M, DESBOIS J, DUFILIK P, et al. SPUDT-Based filters; design principles and optimization [J]. IEEE Ultrason Symp Proc, 1995, 1: 39-50.

(下转第 371 页)