

ST-X 石英基片上铬栅阵中单根栅条 反射系数实验研究

王一骝 刘明华 何世堂[†] 刘建生 李红浪

(中国科学院声学研究所 北京 100190)

摘要 精确的栅条反射系数对于声表面波器件的设计至关重要。本文利用网络分析仪的时域功能,采用短脉冲方法实验研究了ST-X石英基片上铬栅阵中单根栅条的反射系数。并推导出计算反射系数的公式。实验测量了不同铬膜厚度条件下单根指条的反射系数,再对实验结果作最小方差法拟合,得到反射系数随铬膜厚度变化的表达式,即反射系数中压电短路贡献和铬的力学负载贡献之和。最后将实验结果与采用有限元方法计算的理论结果比较,发现两者基本吻合。

关键词 反射系数, 栅条, 短脉冲法

Experimental study on the reflection coefficient of chromium gratings strip on a ST-X quartz

WANG Yi-liu LIU Ming-Hua HE Shi-Tang LIU Jians-Sheng LI Hong-Lang

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The strip reflection coefficient, which includes not only amplitude information but also phase information, is a key parameter in Surface Acoustic Wave (SAW) device design. In this paper, the experimental study on the reflection coefficient of chromium gratings strip is implemented on using the impulse response method with the aid of network analyzer time function. The reflection coefficient experimental expression is derived first. Then, experiments are implemented to measure reflection coefficients with different chromium strip thickness. Finally, by means of minimum variance curve fitting method, the relationship of the reflection coefficient v. s. chromium thickness is obtained, which shows that both piezoelectric short-circuiting and mass loading contributions to the reflection coefficient is determined. Experimental result agrees well with theoretical result by Finite Element Method (FEM).

Key words Reflection coefficient, Grating strip, Impulse response method

2006-10-08 收稿; 2008-04-16 定稿

作者简介: 王一骝(1983-), 男, 江苏常州人, 硕士研究生, 研究方向: 声表面波栅条反射系数。

刘明华(1978-), 男, 助理研究员。何世堂(1958-), 男, 研究员, 博士生导师。

刘建生(1979-), 男, 博士研究生。李红浪(1976-), 男, 副研究员。

[†] 通信联系人 E-mail: heshitang@mail.ioa.ac.cn

1 引言

声表面滤波器的研究进入20世纪90年代形成一次高潮,为满足移动通讯发展的要求,必须实现低插损。为此,工程上通常采用单相单向换能器、横向和纵向滤波器以及谐振式滤波器等低插损结构^[1-4]。指间多次反射在这些结构中用以降低损耗,而在以前高损耗器件中通常被当作“有害”成分而加以抑制。耦合模(Coupling-of-Modes)^[5-9]模型,为低插损滤波器设计提供了较好的分析工具。在模拟低插损滤波器的COM模型中,反射系数^[3]是一个至关重要的参数。

由于声表面波器件的基本构件是压电晶体基片和置于基片表面的金属或沟槽栅阵,因此,反射问题可以归结为一定压电晶体表面上栅阵的反射问题。栅阵对声表面波的反射由多种机制引起。对于短路金属栅有:压电短路效应和力学负载效应(包括质量负载和应力负载效应)。对短路金属栅中的单根栅条,反射系数的表达式一般可以写成:

$$r = R_m h / \lambda + R_s \quad (1)$$

(1)式中 $R_m h / \lambda$ 是力学负载的贡献, h 是栅条厚度, λ 是一阶Bragg频率处波长, R_s 是压电短路的贡献^[10]。

ST-X石英作为一种常用的基片材料而得

到广泛的研究,有关文献已经给出了铝、金、沟槽、银、铬的反射系数的理论计算值^[6,13],其中铝和沟槽的反射系数实验结果在文献^[13]中已经得到。然而,铬作为又一种重要金属栅材料,对于其反射系数尚没有相关实验结果报道。

本文利用网络分析仪实验测量ST-X石英基片上铬栅条的反射系数,然后拟合实验数据,得出反射系数随铬膜厚度变化的关系,即得出表达式(1)中的 R_m 和 R_s ,实验测得的反射系数与FEM理论计算结果基本一致。

2 实验原理与实验器件结构

在文献[12]中,Li和Melngailis描述了用短脉冲法测量反射系数的方法,脉冲发生器发出的脉冲信号和信号发生器发出的正弦信号一起输入调制器,从输入换能器输入射频脉冲信号,输出换能器输出的信号经放大器放大后输入示波器。该测试方法中涉及到的仪器较多,包括脉冲发生器、功率信号发生器、脉冲调制器、放大器及示波器。操作也较复杂。本文通过使用网络分析仪的时域功能,利用一台网络分析仪就能实现脉冲信号激发输入,频域及时域响应波形输出,完成反射系数测量,实验方法简单。

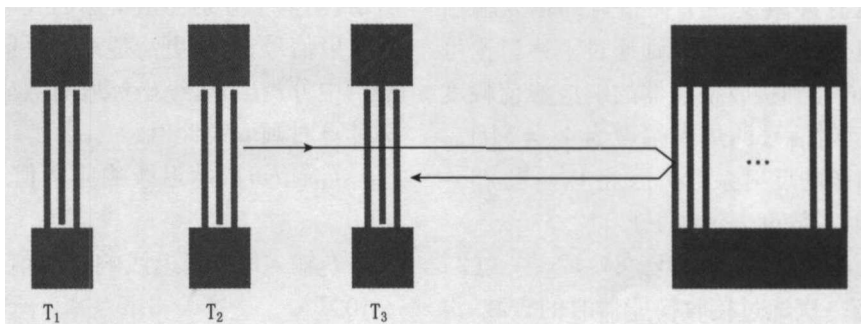


图1 反射栅和换能器结构示意图

实验的器件结构如图1所示,包括三个叉指换能器和一个反射栅。换能器从左往右依次

被简称为 T_1 、 T_2 、 T_3 ,其中 T_1 和 T_2 是发射换能器, T_3 是接收换能器,每个换能器有8对指。图

1 中最右边的为反射栅,它有 100 根栅条。换能器 T_3 可以接收 T_2 激发的直达信号和来自栅阵的反射信号,通过比较两者,可以确定反射系数。由于反射信号的声波比直达信号多通过一次 T_3 ,有一部分能量转化成电信号使入射声波衰减,所以设计了 T_1 来修正。因为一般仪器的输入、输出阻抗都是 50Ω ,可以先测量 T_2 到 T_3 的响应,然后 T_2 接 50Ω 负载,测量 T_1 到 T_3 的响应,比较两者就求出这一衰减因子。

下面推导利用网络分析仪测量反射系数的计算公式:

1 个脉冲电信号输入发射换能器 T_2 , 与其卷积,激发出 8 个周期的脉冲声波串,其幅度按时间顺序成如下排列 1 1 1 1 1 1 1 1。此信号通过接收换能器 T_3 , 部分能量转变为电信号,为 15 周期的脉冲串,其幅度按时间顺序作如下排列:1 2 3 4 5 6 7 8 7 6 5 4 3 2 1。衰减后的声波到达反射栅阵后发生反射,所得反射信号为入射声波与反射栅阵的卷积,卷积后的脉冲长度为 107,其幅度按时间顺序作如下排列:1 2 3 4 5 6 7 8 8 8 8……8 8 7 6 5 4 3 2 1,此信号通过接收换能器时,再一次与换能器 T_3 卷积。得出的电信号为 114 周期的脉冲串,其幅度按时间顺序作如下排列:1 3 6 10 15 21 28 36 43 49 54 58 61 63 64 64……64 63 61 58 54 49 43 36 28 21 15 10 6 3 1。假设 V_0 为用一个周期长度脉冲激发一个叉指对的输入输出换能器的延迟线响应幅度,则通过上述讨论可知,发射换能器到接收换能器的响应峰值幅度 $V_{D2} = 8V_0$, 反射信号的最大幅度为 $V_g = 64rV_0$, 其中 r 为栅条的反射系数。因此 $V_0 = V_{D2}/8 = V_g/64r$, 反射系数可表示如下:

$$r = 8V_g/64V_{D2} = V_g/8V_{D2} \quad (2)$$

考虑声波第一次通过接收换能器时的衰减,设衰减因子为 γ , 则(2)式应修改为:

$$r = V_g/8\gamma V_{D2} \quad (3)$$

令 T_1 和 T_2 输入时延迟线响应幅度分别为 V_{D1} 和 V_{D2} , 那么衰减系数可表示为:

$$\gamma = V_{D1}/V_{D2} \quad (4)$$

以上讨论中只考虑了声波的一次反射,并且假设声波通过栅阵时是不衰减的。实际上声波在栅条之间存在多次反射,且声波通过一根栅条后由于反射了一部分能量,会出现衰减。文献^[13]证明了即使考虑多次反射,其对反射波形的最大幅度影响很小,可以忽略不计。因此考虑多次反射的影响后,反射系数的计算公式仍为(3)式。

根据以上分析,我们在 ST-X 石英基片上制作了如图 1 所示的实验器件,换能器和栅阵采用的是金属铬,具体指标如下:

叉指换能器和反射栅具有相同的指条周期,且金属化比均为 0.5。因此指条宽度和指条边缘距均为 $\lambda/4$ 。相邻叉指对间距离 λ 为 $31.58\mu\text{m}$ 。因此,换能器和反射栅的一阶 Bragg 频率相同。不考虑栅阵的微扰时,由于声表面波在 ST-X 石英自由表面速度为 3158m/s , 当中心频率为 100MHz 时, $\lambda = v/f = 31.58\mu\text{m}$ 。声孔径为 100λ 。

3 实验结果与分析

3.1 铬膜厚度 500 埃情况下的反射系数实验结果

T_2 作为输入时器件时域脉冲响应如图 2 所示,图 2 中分别标出了延迟线响应信号和栅阵反射信号,为了更清楚地把反射信号从背景噪声中分辨出来,纵坐标取对数坐标。具体分析计算时则取线性值:

$$T_1 \text{ 输入时: 延迟线响应幅值 } V_{D1} = 8.2501 \times 10^{-4}$$

$$T_2 \text{ 输入时: 延迟线响应幅值 } V_{D2} = 8.6174 \times 10^{-4}$$

$$\text{由(4)式得: 衰减系数 } \gamma = V_{D1}/V_{D2} = 0.9574$$

从图 2 中读取反射信号和延迟线响应幅值,计算反射系数:

$$\text{反射信号最大幅度为 } V_g = 1.6 \times 10^{-5}$$

延迟线响应幅度为 $V_{D2} = 8.6174 \times 10^{-4}$

由以上结果,通过(3)式可以计算出反射系数如下:

$$r = 1.6 \times 10^{-5} / (8 \times 0.9574 \times 8.6174 \times 10^{-4}) = 2.424 \times 10^{-3} \quad (5)$$

3.2 多种不同铬膜厚情况下的反射系数实验结果及其分析

实验中测量不同铬膜厚度下的反射系数。反射栅上铬膜厚度依次分别为 150,200,250,300,500 埃时,归一化厚度依次为 $(4.750 \times 10^{-4}, 6.333 \times 10^{-4}, 7.916 \times 10^{-4}, 9.500 \times 10^{-4}, 1.583 \times 10^{-3})$ 。反射系数的测量结果如图 3 所示。作为对比图中同时画出了拟合直线及有限元方法^[14]计算的结果。图中横坐标是铬膜厚度与波长的比值,纵坐标是单根铬栅条的反射系数绝对值。离散点是实验得到的数据,点划线是 FEM 理论得到的结果,直线是对实验数据最小方差法线性拟合后得到的结果。该直线的表达式,即反射系数绝对值随铬膜厚度变化的表达式为:

$$|r| = 1.35 * h_{Cr} / \lambda + 2.22 \times 10^{-4} \quad (6)$$

从图 3 可以得出:

(1) 反射系数绝对值随着铬膜的厚度增加呈线性增加,且反射系数中压电短路贡献和力学负载贡献同相;

(2) 理论推导^[13]得到 ST-X 石英上铬的力学负载对反射系数的贡献是负号,因此单根栅条反射系数随铬膜厚度变化的表达式为:

$$r = -1.35 * h_{Cr} / \lambda - 2.22 \times 10^{-4} \quad (7)$$

(3) 比较实验数据结果和 FEM 结果,发现两者基本吻合。

4 结论

通过短脉冲实验方法,本文得到 ST-X 基片上单根铬栅条的反射系数,其中压电短路引起的反射 $R_e = -2.22 \times 10^{-4}$, 铬的力学负载引起的反射 $R_m = -1.35$ 。反射系数实验结果与 FEM 理论计算结果基本一致。

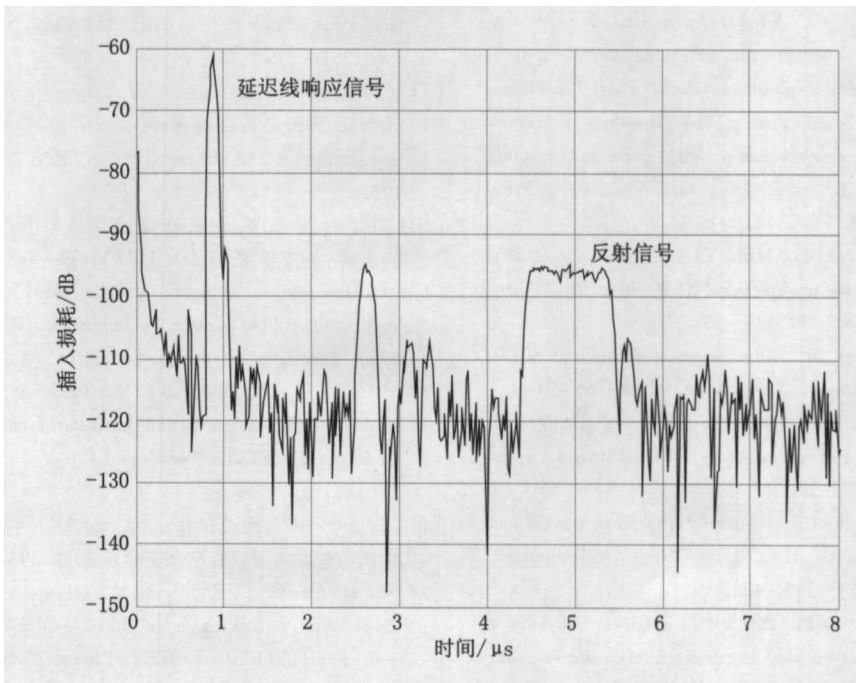
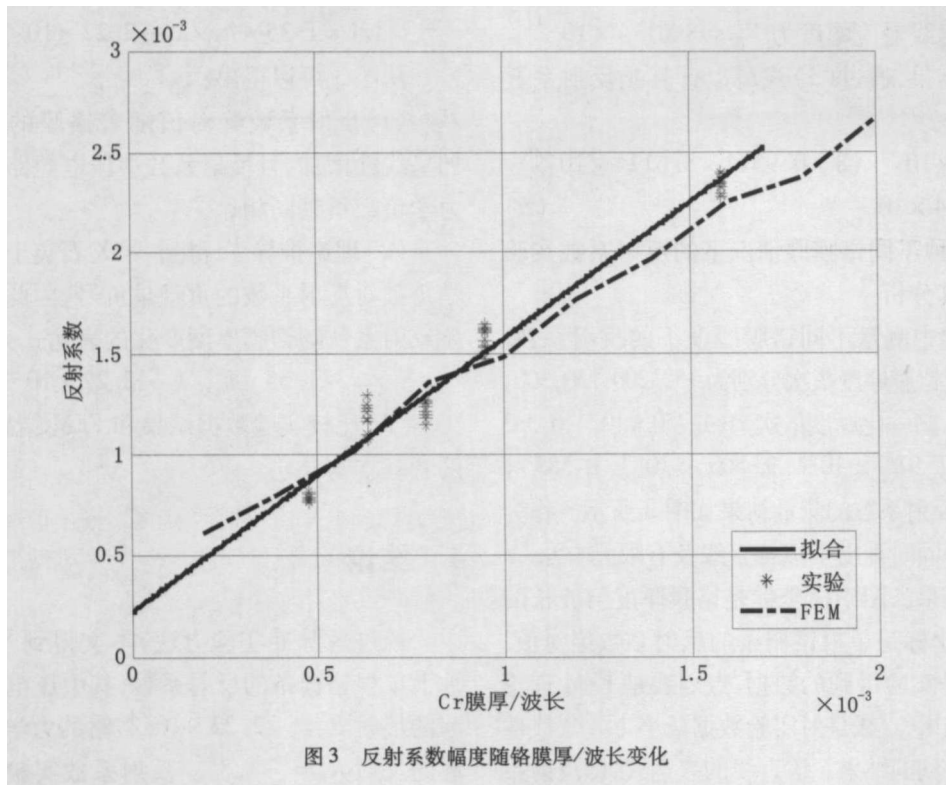


图 2 T_2 作为输入换能器时的时域脉冲响应波形



参 考 文 献

- [1] C. S. Hartmann, P. V. Wright. An analysis of SAW interdigital transducers with internal reflections and the application to the design of single-phase Unidirectional Transducer. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1984;40-45.
- [2] E. Acakaya. A new analysis of single-phase unidirectional transducer. IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec., Freq. Contr., 1987, UFFC-34(1):45-52.
- [3] C. S. Hartmann, B. P. Abbott. Overview of design challenges for single phase unidirectional SAW filters. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1989;79-89.
- [4] C. C. W. Ruppel, R. Dill. Design of generalized SPUDT filters. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1996;165-168.
- [5] H. A. Haus, P. V. Wright. The analysis of grating structures by coupling-of-modes theory. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1980;277-281.
- [6] D. P. Chen, H. A. Haus. Analysis of metal-strip SAW grating and transducers. IEEE Trans. Sonics and Ultrason., 1985, SU-32(3):395-408.
- [7] C. S. Hartmann, D. P. Chen and J. Heighway. Modeling of SAW transversely coupled resonators filters using coupling-of-modes modeling technique. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1992;39-43.
- [8] K. Hashimoto, G. Endoh and M. Yamaguchi. Coupling-of-modes modeling for fast and precise simulation of leaky surface acoustic wave devices. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1995;251-256.
- [9] K. Hashimoto, M. Yamaguchi. General-purpose simulator for leaky surface acoustic wave devices based on coupling-of-modes theory. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1996;117-122.
- [10] 何世堂, 陈东培, 汪承源. 声表面波单指无内反射叉指换能器. 声学学报. 1990, 15(3):180-188.
- [11] C. Dunnrowicz, F. Sandy, and T. Parker. Reflection of surface waves from periodic discontinuities. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1976;386.
- [12] R. C. M. Li and J. Melngailis. The Influence of Stored Energy at Step Discontinuities on the Behavior of Surface-Wave Gratings. IEEE Trans. Sonics and Ultrason., 1975, SU-22(3):189.
- [13] 何世堂. 声表面波单指无内反射叉指换能器的研究. 中国科学院声学研究所硕士学位论文. 1987.
- [14] K. Hashimoto, G. Zheng and M. Yamaguchi. Fast Analysis of SAW Propagation under Multi-Electrode-Type Gratings with Finite Thickness. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1997;279-284.