

文章编号:1004-2474(2015)02-0205-04

# 金属狭缝中 SAW 传感器信号传输的设计与优化

褚博文,丁杰雄,关利超,边志远,李海宁

(电子科技大学 机械电子工程学院,四川 成都 611731)

**摘要:**声表面波(SAW)器件可实现无源无线传感测量,为金属狭缝极端环境下接触应力的测量提供了解决思路。该文主要研究了狭缝中 SAW 器件的信号传输问题,选用微带线作为信号传输线。分析了金属狭缝对微带线传输性能的影响,设计出信号传输线及匹配电路。最后把设计出的微带线与谐振器键合连接,并进行实验测试。通过对金属狭缝中信号传输问题的研究,验证了狭缝等极端环境实施应力测量的可行性。

**关键词:**金属狭缝;SAW;微带线;阻抗匹配;键合连接

**中图分类号:**TN811;TN65 **文献标识码:**A

## The Design and Optimization of Signal Transmission for SAW Sensor in the Metallic Slit

CHU Bowen, DING Jiexiong, GUAN Lichao, BIAN Zhiyuan, LI Haining

(School of Mechanical and Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Surface acoustic wave (SAW) device can be used for wireless sensing measurement without power supply, so it's important to master the force condition in the metal slit intuitively by measuring contact stress with SAW device in metal slit. SAW signal transmission in the metal slit has been investigated by using the microstrip line as the transmission line in this work. The effect of the metallic slit on the transmission performance of the microstrip line has also been analyzed. The signal transmission line and its matching circuit have been designed. The wire bonding wire is adopted to connect the resonator and the microstrip line and tested through experiment. Through research on the problem of signal transmission in metal slit, the feasibility of the stress measurement in extreme environment such as metallic slit has been verified.

**Key words:** metal slit; SAW; microstrip line; impedance matching; wire bonding

### 0 引言

SAW 谐振器可在金属狭缝中实现无源无线传感测量。SAW 器件由叉指换能器(IDT)、反射栅和压电基底构成。受到外界压力的作用,下层压电基底产生应力、应变,使基底材料常数发生变化,同时 IDT 指条间距发生变化,最终导致谐振器的输出信号频率产生偏移<sup>[1]</sup>。SAW 器件的工作原理使其可应用于亚毫米级金属狭缝,通过压力与电信号的转换实现无源应力测量。为在金属狭缝中实现 SAW 器件高频信号的传输,平面传输线成为了必然选择。在信号传输的设计过程中,不仅需要限制传输线的厚度,分析金属狭缝对传输性能的影响,还需要对 SAW 器件与传输线进行阻抗匹配。在平面传输线

中,微带线的传输性能虽比带状线略差,但比槽线和共面微带好,厚度适中且便于安装连接,因此更适合于狭缝中传输。微带线因其结构简单,体积小,加工方便且易于与微波器件集成而获得广泛的应用。早期对微带线的研究大多都是基于准静态假设的,认为其所传输的模式为准 TEM 模式。从 1965 年后,多数学者对准静态法进行研究,出现了变分法、色散分析法及特征模式法等分析方法<sup>[2]</sup>。

### 1 金属狭缝对微带线传输特性的影响分析

金属狭缝中的微带线可看作屏蔽盒侧壁无限宽(即  $a \rightarrow \infty$ )的屏蔽微带线(见图 1),可用屏蔽微带线的方法来进行分析。屏蔽微带线的分析方法有准静态分析法、直线法、特征模式法及谱域分析法等。这

收稿日期:2014-06-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11076007)

作者简介:褚博文(1991-),女,河南商丘人,硕士生,主要从事精密仪器测控技术方面的研究。通信作者:丁杰雄(1966-),男,教授,博士生导师,主要从事机电系统精密测控技术的研究。E-mail:jxding@uestc.edu.cn。

些分析相对复杂,由于所设计的微带线满足相对介电常数  $\epsilon_r > 2, 5 \gg \delta > 1$  (变量  $\delta = d/h, d$  为空气腔的高度,  $h$  为介质基底厚度), 因此可选择一种简单的近似方法来进行屏蔽微带线的计算<sup>[5]</sup>。

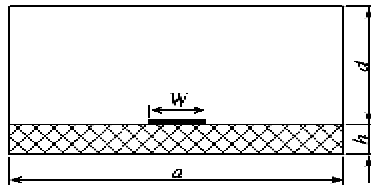


图1 屏蔽微带线示意图

屏蔽微带线的等效介电常数

$$\epsilon_e = C_r / C_0 \quad (1)$$

式中:  $C_r$  为屏蔽微带线的分布电容;  $C_0$  为空气屏蔽微带线的分布电容。

由于  $d > h, \epsilon_r > 2$ , 电容大部分集中在介质内, 故  $C_r$  可用标准微带线的分布电容来近似, 且

$$C_r = \epsilon_{e1} / (Z_{01} \cdot c) \quad (2)$$

式中:  $\epsilon_{e1}$  为标准微带线的等效介电常数;  $Z_{01}$  为空气填充标准微带线的特性阻抗;  $c$  为光速。

抽去介质后的空气屏蔽微带线, 上半部分可近似看成是高度为  $2d$  的带状线的一半, 而下半部分可近似看成是高度为  $2h$  的带状线的一半, 则

$$C_0 = 1/2(C_d + C_h) \quad (3)$$

式中:  $C_d$  是高度为  $2d$  的带状线分布电容;  $C_h$  是高度为  $2h$  的带状线分布电容。因此金属狭缝中微带线的等效介电常数为

$$\epsilon_e = \{ \pi \times \epsilon_{e1} \times [W/h + 2.42 - 0.44(h/W) + (1 - h/W)^5] \} / \{ 4 [2 \ln 2 + \pi/4 \cdot W/h(1 + h/d_0)] \} \quad (4)$$

式中  $W$  为微带线线宽。

金属狭缝中微带线的特性阻抗为

$$Z_0 = 50 \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{e1}}} \quad (5)$$

选择4种基底厚度进行计算, 由  $h$  可算出  $50 \Omega$  微带线的线宽  $W$  和  $\epsilon_e$  (见表1)。在 Matlab 里绘图,  $Z_0$  和  $\epsilon_e$  随狭缝宽度  $H$  的变化如图2、3所示。

表1 4种基底厚度的计算

$h/\text{mm}$	$W/\text{mm}$	$\epsilon_{e1}$
0.085	0.184 435	2.524
0.125	0.277 132	2.548
0.145	0.323 650	2.556
0.165	0.370 242	2.562

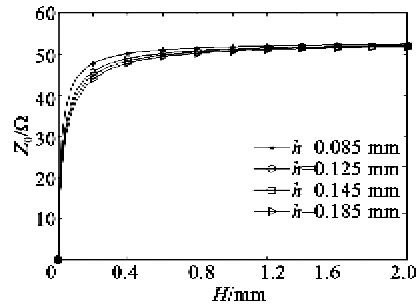


图2  $Z_0$  随  $H$  的变化

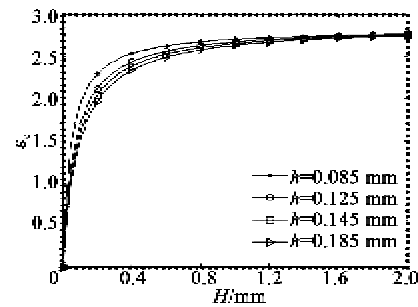


图3  $\epsilon_e$  随  $H$  的变化

在 HFSS 中对屏蔽微带线进行仿真, 选用微带线厚  $0.16 \text{ mm}$ , 铜厚  $17.5 \mu\text{m}$ , 基底厚  $0.125 \text{ mm}$ , 介电常数为  $3.3$ , 总长为  $150 \text{ mm}$ 。在 HFSS Design 中建立屏蔽微带线的模型, 设置变量  $\delta = d/h$ 。经过 HFSS 仿真, 得到  $\epsilon_e$  和  $Z_0$  随  $\delta$  的变化曲线如图4、5所示。

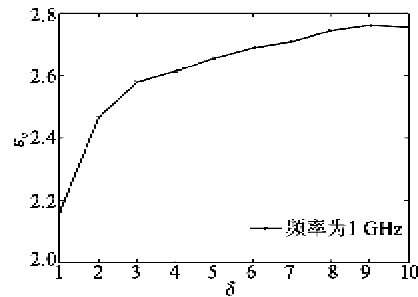


图4  $\epsilon_e$  随  $\delta$  的变化

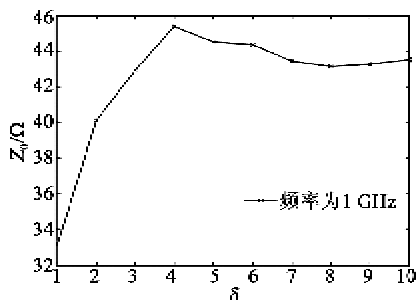


图5  $Z_0$  随  $\delta$  的变化

由图2~5可看出, 金属狭缝会对微带线的特性阻抗,  $\epsilon_e$  产生一定的影响, 而  $\epsilon_e$  的变化又会导致微带线电长度的变化。随着  $H$  的增大, 其影响越来越

小。 $H > 0.7 \text{ mm}$  时,影响可忽略。但在  $H < 0.3 \text{ mm}$  时影响较大。当  $H = 0.3 \sim 0.7 \text{ mm}$ ,对微带线有略微的影响,可通过调节匹配电路进行适当调整。

## 2 微带匹配电路设计与结构优化

随着信号频率的增大,信号线不再是简单的导线,应视为传输线,因此阻抗匹配的问题不容忽视。传输线的阻抗匹配在高速通信系统中很重要,一般负载阻抗与传输线特性阻抗不匹配,传输线呈行驻波状态。失配状态影响传输系统的传输效率、功率容量和微波源的工作稳定。此外,匹配还关系到微波测量系统的测量精度、微波源及器件质量等问题。

本文设计中选一种 SAW 谐振器作为匹配电路的负载,此谐振器的谐振频率为  $991 \text{ MHz}$ ,谐振点处阻抗为  $(12.55 - j \times 60.7) \Omega$ 。微带线的标准阻抗为  $50 \Omega$ ,因此必须对谐振器进行阻抗匹配才能使信号有效传输。为了满足金属狭缝对厚度的要求,且可很好实现电路匹配与传输的集成,选择微带匹配电路来进行阻抗匹配。

微带匹配电路分为单枝短截线匹配和双枝短截线匹配。微带双枝短截线匹配电路较单枝短截电路的优点是具有可调性,因此选用它作为匹配电路具有很好的实用价值。双枝短截线匹配电路中,两端开路或短路短截线并联在一段固定长度(通常选为  $\lambda/8, 3\lambda/8$  或  $5\lambda/8$  ( $\lambda$  为波长),高频中,更多采用  $3\lambda/8$  和  $5\lambda/8$ ) 的传输线的两端,以便简化可调匹配器的结构<sup>[4]</sup>。

双枝短截线匹配电路的拓扑结构如图 6 所示。 $y_A, y_B, y_C$  和  $y_D$  分别为  $Z_A, Z_B, Z_C$  和  $Z_D$  对应的导纳。理想的匹配状态要求使  $Z_n = Z_0$ ,即  $y_A = 1$ 。假设传输线无耗,则归一化  $y_B = y_A - j b_{s2}$  必落在 Smith 图中  $g=1$  的等电导圆上。其中,  $b_{s2}$  是长  $L_{s2}$  短截线的电纳。 $g=1$  圆向负载方向转角  $2\beta L_{s2}$ ,为确保匹配,导纳  $y_C$  必落在这个移动了的  $g=1$  圆上。

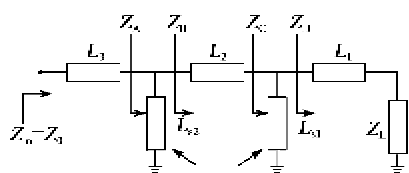


图 6 双枝短截线匹配电路的拓扑结构

在 ADS 构建仿真模型,用史密斯圆图匹配模块作为匹配电路。设置源阻抗  $50 \Omega$ ,负载阻抗

$(12.55 - j \times 60.7) \Omega$ ,在史密斯圆图工具(Smith chart utility)中设计好匹配网络后,用建立电路模块(build ADS circuit)在 ADS 中生成电路。根据选择的微带传输线的基板规格,用微带线计算模块(LineCalc)将普通的传输线换算成微带线。双枝节匹配电路整体制作在同一个基板上,按  $50 \Omega$  的微带线计算得到相同的线宽。经匹配后的 S 参数随频率的变化如图 7 所示。

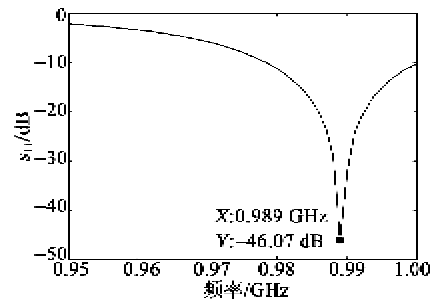


图 7 匹配电路的  $s_{11}$  曲线

SAW 谐振器在匹配前的反射曲线  $s_{11}$  如图 8 所示。将谐振器的 S 参数导入 ADS 中作为负载端,然后加入匹配电路进行联合仿真。匹配后的谐振器 S 参数随频率变化曲线如图 9 所示。显然,加了匹配电路后,谐振点处反射减小,对谐振点处信号起到了放大的作用。

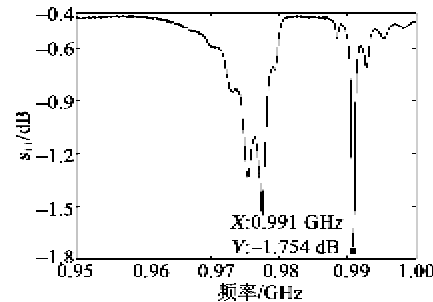


图 8 SAW 谐振器的  $s_{11}$  曲线

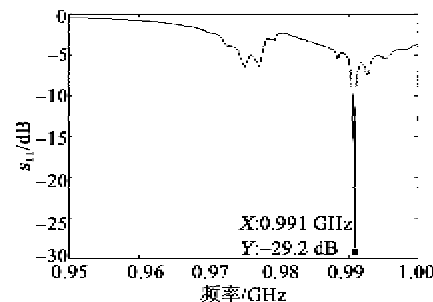


图 9 SAW 谐振器匹配后的  $s_{11}$  曲线

为减小传输线的尺寸便于实际应用,需要对微带线匹配电路的枝节进行折弯处理。微带线的折弯会造成枝节电长度的变化和阻抗的不连续<sup>[5]</sup>。由于

微带线的电长度可用  $s_{21}$  的相位反映,通过 HFSS 仿真直线和折弯微带线的  $s_{21}$  曲线,进行电长度的对比,进而确定折弯的尺寸。

由仿真得出 0.99 GHz 时,34.56 mm 长微带线的  $s_{21}$  相位为  $67.16^\circ$ 。微带线折弯后电长度的变化如表 2 所示。从中选择与直线微带相位最接近的长度。微带线折弯示意图如图 10 所示。其中  $a$  为折弯微带线的长度, $b$  为折弯微带线的距离。

表 2  $b=4$  mm 时微带线折弯电长度仿真

$c/mm$	$s_{21}$ 相位/ $^\circ$	$c/mm$	$s_{21}$ 相位/ $^\circ$
30.3	66.86	30.6	67.40
30.4	66.96	30.7	67.50
30.5	67.03	30.8	67.72

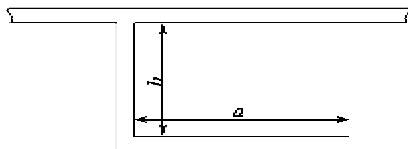


图 10 微带线折弯示意图

在微带双枝节匹配电路中还存在一些阻抗不连续处(如 T 形结,折弯处),可通过切角的方式对其进行补偿<sup>[6]</sup>,用 HFSS 进行优化。

通过折弯和补偿后,双截线微带线匹配电路可制作在一个方形的基板上,并在线端设置两个焊盘用于连接传感器;短路线用打孔方式进行接地(焊盘和接地孔用 HFSS 设计)。

### 3 微带线传输性能测试

设计好的微带线与 SAW 谐振器用引线键合方式连接进行测试。加工好的实物图如图 11 所示。用矢量网络分析仪对传输线及芯片进行测试,测试结果如图 12 所示。

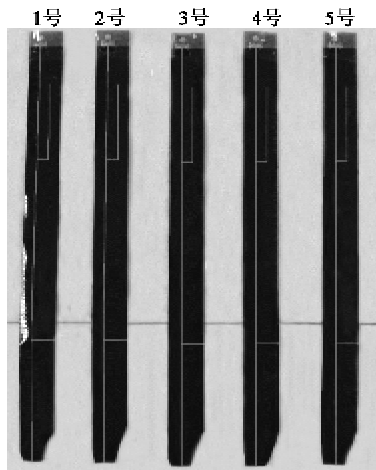


图 11 微带线与芯片连接实物图

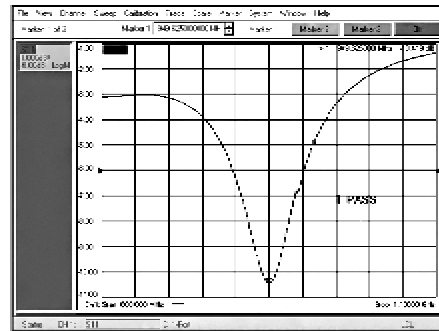


图 12 微带线与芯片连接后测试的  $s_{11}$  曲线

由图 12 可看出,加入匹配电路后, $s_{11}$  曲线有一个明显的谐振点,且谐振点处峰值较大,说明微带匹配电路可很好地传输谐振器信号,并起到滤波放大的效果。谐振器本身谐振点频率发生略微变化时,连接匹配电路后的信号也有明显变化。此外,微带线匹配电路总厚度为 0.16 mm,可应用于金属狭缝极测量环境,解决了狭缝传输的一大难题。

### 4 结束语

本文根据金属狭缝应用背景,设计了 SAW 信号传输线并进行测试。在微带线设计中,首先分析了金属狭缝对微带线传输性能的影响,其次考虑了微带线与芯片的阻抗匹配问题,并进行微带线的结构优化,最终加工出实物进行了测试。选择微带线进行信号传输,微带双枝短截线进行阻抗匹配,不仅能有效传输 SAW 谐振信号,且可把厚度设计为亚毫米级,因此在金属狭缝等极端环境下的信号传输有很好的实用价值。

微带线传输性能的测试结果很好的反映了谐振器信号的谐振点及其谐振点处频率的变化。但是,谐振器裸测信号与连接微带线后的信号有一些偏移,分析是由于在微带线制作过程中表面镀膜导致,因此有待进一步的深入研究。

### 参考文献:

[1] 李海宁,丁杰雄,姜忠,等.用于狭缝中的 SAW 应力传感器的设计与制作[J].压电与声光,2013,35(6):771-774.  
 LI Haining, DING Jiexiong, JIANG Zhong, et al. Design and process of SAW stress sensor in slit[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(6): 771-774.  
 [2] 黄玉兰. 射频电路理论与设计[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008.

(下转第 212 页)