

MEMS 开关宽频程控步进衰减器设计与实现

南雪莉, 张斌珍, 杨 昕, 崔建利, 葛少雷

(中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 提出了一种基于 MEMS 开关的射频衰减器设计方案。首先对整体电路的基础结构进行了设计, 选择以 CPW(共面波导)为传输线, 接触式 MEMS 开关作控制器件, 同时以开关中的电容作为断路时的平衡电容进行 Q 值匹配; 其次, 通过理论推导与计算得到了波导的截面尺寸; 然后按所需衰减量计算 T 型网络各个电阻的阻值大小。再按照计算值在 CST 微波工作室中建模仿真, 对比单级衰减和展频二级衰减的 S 参数, 可以发现, 在 Q 值匹配后的电路中, 射频信号可以在更宽的频段内保持稳定衰减。最后通过 UV-LIGA 技术结合氧化钽电阻工艺对衰减器进行了样片试制与结果测试。结果表明, 通过 Q 值匹配可以扩展衰减器的工作频段, 为高频信号的稳定衰减提出了一种可行性方案。

关键词: MEMS 开关; 射频衰减器; Q 值匹配

中图分类号: TN62 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1020002

Design and implementation of MEMS switch broadband programmable step attenuator

Nan Xueli, Zhang Binzhen, Yang Xin, Cui Jianli, Ge Shaolei

(Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The design of the radio frequency attenuator was based on the MEMS switch. First of all, the basic structure of the electronic circuit was presented with CPW as the transmission line, the contact MEMS switch as the controller and the electric capacity in the switch as the balance criteria to match the Q value. Secondly, the size of cross section of waveguide was calculated abstractly. Thirdly, the resistance values in the T system were calculated according to the reduction. From the simulation on the CST microwave studio, the comparison of S values of first-order and second-order attenuator revealed that the radio frequency could keep a stable reduction in the wider band after the Q values were matched. Finally, the attenuator was sampled and tested. The result shows that the work frequency range of attenuator could be extended by Q value match which is a new feasibility for the stable attenuation of high frequency signal.

Key words: MEMS switch; RF attenuator; Q value match

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51475438); 山西省研究生创新项目(2016BY124); 山西省回国留学人员科研资助项目(2014-055); 山西省中北大学基金项目(20161348)

作者简介: 南雪莉(1987-), 女, 博士生, 主要从事微纳器件与系统方面的研究。Email: nanxueli@yeah.net

导师简介: 张斌珍(1974-), 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微纳机电器件与系统方面的研究。Email: zhangbinzhen@nuc.edu.cn

0 引言

程控步进衰减器是一种可供编程控制不同衰减量的微波无源射频器件,具有工作频道宽、端口驻波比小、衰减精度高等优点。是微波系统中不可或缺的电平控制部件^[1],用来对输入信号进行最大衰减量的步进衰减而不使信号发生畸变的重要射频组件^[2-3],可实现信号源与负载之间的匹配,系统输出信号功率的控制等功能。广泛应用于频谱仪、矢量网络分析仪、合成信号源、相控阵雷达系统、以及卫星通信等各类测试源和测试系统中^[4-5]。目前程控步进衰减器主要采用射频开关技术,静电驱动开关弹片在直通传输线与衰减片之间切换,控制多个衰减单元的不同组合,从而达到衰减程控、步进衰减的目的^[6]。弹片切换过程中,与衰减片和直通线之间采用直接机械式接触,射频机械开关既是射频微波信号的传输通道,也是弹片在衰减片和直通线之间切换的执行机构^[7],它的稳定性与可靠性对微波测试仪器和系统的指标和性能有决定性影响。

总体来说现阶段的程控步进衰减器主要的缺陷在于:体积过大;精度、容量过低;频带低,工艺复杂,难以满足射频微波领域的基础要求;程控步进衰减器主要电路元件是开关和衰减片^[8]。薄膜电阻型衰减片因其更小的体积、稳定的性能、设计的灵活性、优良的高频性以及高精度的衰减量等特点^[9],使得信号通信设备的体积更小、质量更轻、性能更加优良,近年来成为设计人员研究的重点^[10],但同时对其开关部件的设计与加工提出了更高的要求,开关作为衰减器的关键部件,其射频参数及物理参数直接影响衰减器的插入损耗和衰减精度,传统 MMIC 及 LTCC 技术已经不能满足小体积、高频段信号传输的高精度要求^[11-12],有关于 MEMS 开关的衰减器报道,但目前还没有人制备出成品,也就是说还没有进行实验验证。

文中提出一种基于 MEMS 开关的程控步进衰减器,在 DC~20 GHz 范围内实现 20 dB 衰减,详细给出了衰减器的整体结构及其重要组件 MEMS 开关的设计与实现,通过调节波导尺寸和电阻大小,使衰减电路获得更好的衰减效果。并将 UV-LIGA 开关技术与薄膜电阻型衰减片技术相结合,实现了对衰

减器的高精度低成本制备,最后进行了在片测试并给出了测试结果,测试结果显示该衰减器实现了高精度平稳的衰减。

1 设计

基于 MEMS 开关的程控步进衰减器设计原理如图 1 所示。

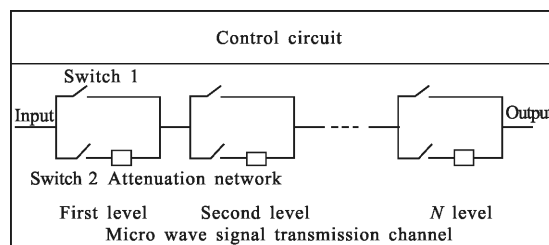


图 1 MEMS 开关程控步进衰减器整体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the whole structure of MEMS switch programmable step attenuator

文中设计的衰减器总衰减量为 20 dB,以 CPW (共面波导)为基础传输线,通过 T 型衰减电路对功率进行吸收衰减。该衰减器由两个衰减单元串联而成,衰减量都为 10 dB,将衰减网络和 MEMS 开关串行联接。每组开关包括两个:一个负责短路衰减单元,一个负责断路衰减单元与接地端,通过每组开关的通断,选择衰减单元的短路与接入,从而达到不同分贝的衰减效果。结合接触式 MEMS 开关中的旁路电容对整体路进行 Q 值展宽匹配,使电路在整个带宽内保持稳定衰减。如图 1 所示,在输入和输出端口间,由开关部分确定衰减部分是否接入电路。

电路中的衰减量即 S_{21} 与电路转换损耗 TL 的关系为:

$$TL=|S_{21}|^{-2} \quad (1)$$

$$TL=\frac{|2Z_0+Z|^2}{(2Z_0)^2} \quad (2)$$

由公式可从衰减量推导出衰减电路中需要的特征抗值,阻抗值由两部分组成,一部分为 T 型衰减网络的特征阻抗,另一部分为整体电路中的等效感抗值。

在 T 型衰减网络部分,三个隔离电阻分别为:

$$R_1=\frac{1+A}{1-A}R_{in}-R_3 \quad (3)$$

$$R_2=\frac{1+A}{1-A}R_{out}-R_3 \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{2\sqrt{AR_{in}R_{out}}}{1-A} \quad (5)$$

式中： R_{in} 和 R_{out} 分别为输入输出阻抗； A 为目标衰减量。

传输线及开关电容部分，通过展宽 Q 值的匹配方式对电路进行设计，从而使电路在更宽的频带内有稳定的衰减。在电路的串并联等效变换中，并联阻抗 R_p 和并联电抗 X_p 分别可以表示为：

$$R_p = R_s(1+Q^2) \quad (6)$$

$$X_p = \frac{R_s(1+Q^2)}{Q} \quad (7)$$

式中： R_s 为串联电路的电阻； Q 为品质因数。在展宽 Q 值匹配时，特征阻抗与目标匹配阻抗的比值 R 和品质因数 Q 的关系可以表示为：

$$(1+Q^2) = \sqrt[n]{R} \quad (8)$$

n 为展宽的阶数，即多次匹配的次数，此次设计中选取了二次展宽。

基于以上理论，设计出了二次展宽的衰减器结构，如图 2 所示，首先对未进行展宽 Q 值匹配的电路进行了不同参数(包括波导长度，高宽比，以及信号线宽度与地线间的距离比等)的仿真优化。由仿真图可知，未匹配前，在频段大于 5 GHz 时， S_{21} 开始出现较大的漂移，到 20 GHz 时，衰减量仅剩 17 dB 左右。再对展宽匹配后的电路进行仿真优化。图中下极板与下拉电极间的绝缘介质，是为了防两级接触时，驱动电压接入电路，损坏射频系统。薄膜电阻是主要的功率吸收部位。每个衰减网络中有两组开关同时控制，保证在短路衰减电路的同时，T 型衰减器的接地端同时断开。

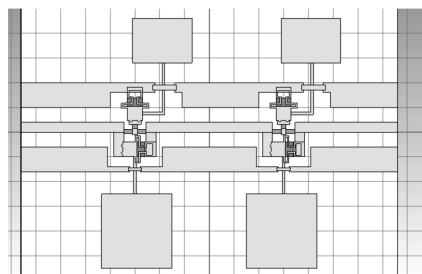


图 2 二次展宽衰减器设计结构图
Fig.2 Model of second-order attenuator

2 制作

按照设计方案，以 UV-LIGA 牺牲层技术为基

础，对设计的开关结构进行了流片，工艺上以 2 英寸 P-type 硅片作为衬底，这样可以减少 RF MEMS 开关导通状态下由于射频信号在衬底中引起的涡流所产生的损耗，而且硅与 Au, PMMA 等具有很好的黏附性，可以满足工艺需求。

主要工艺流程如图 3 所示：(a) 首先对硅片进行清洗，依次使用丙酮、酒精、去离子水伴随超声处理 15 min，氮气吹干后在硅片上气相沉积 1 μm 的二氧化硅作为缓冲层，防止 CPW 传输线与硅基底之间出现直流漏电流，因为硅基底是非绝缘材料；(b)在氧化层上电镀一层 1.5 μm 厚的金层，并刻蚀出 CPW 传输线，传输线如(c)所示，同时对氧化层进行刻蚀，使之不连续，便于降低衰减损耗；(d)然后，在 CPW 传输线表面沉积一层薄薄氮化硅作为介质层；(e)并刻蚀出所需的结构；(f) 旋涂 3 μm 的 PMMA 光刻胶作为牺牲层；(g)光刻出锚区(图左)及触点(图右)；(h)制作金属梁结构，厚度为 5 μm ；(i)最后进行牺牲层的释放，得到具有悬臂梁结构的开关模型。

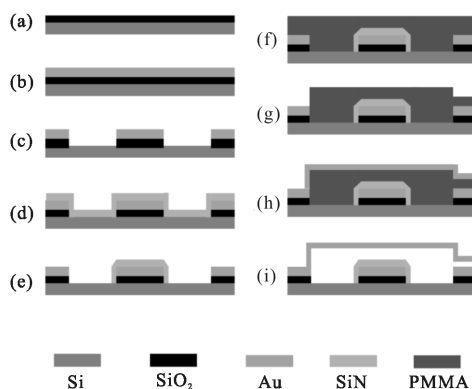


图 3 串联接触式 MEMS 开关工艺流程图

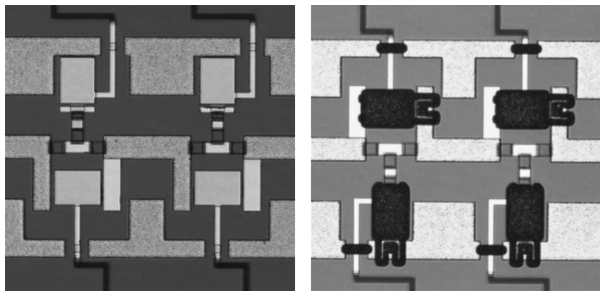
Fig.3 Technological processes for DC-contact series MEMS switches

3 结果与分析

按照设计方案，进行相应的工艺改进，通过以上步骤最终得到了 MEMS 衰减器样品，并对实际样品进行了在片测试。实验中通过多次光刻与电镀，按层对电路结构进行了加工，实际生产中为了便于加工，将外延式折叠梁开关改为了后折梁开关。

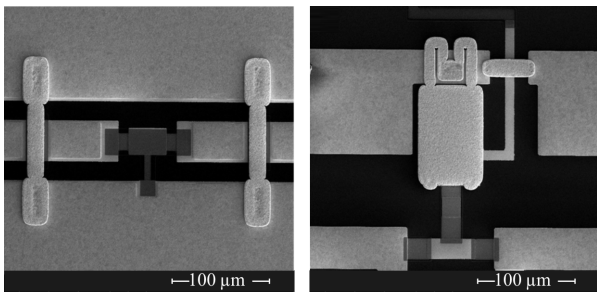
图 4(a)、4(b)为光学显微镜拍摄的图片，其中，图 4(a)为开关与空气桥成形前的电路结构，图 4(b)为开关制备完成后的衰减器整体结构图；图 4(c)、4(d)

为电镜拍摄的图片;其中,图 4(c)为开关成型前衰减网络部分图,从图中可以看出三个薄膜电阻由中间导线连接;单个衰减单元两侧有一对空气桥,其作用是保证 CPW 两侧的地线具有相同的电平;图 4(d)为开关制备完成后最终整体结构的局部放大图,从 SEM 照片中可以看出,电镀后的上电极非常平整,具有应力小的优点,放大倍数为 1 000,整体尺寸小于 (2.0 mm×0.8 mm),衰减模块从左到右的衰减量均为 10 dB,联合实现 20 dB 的衰减量。



(a) 开关制备前衰减片光学显微镜图 (b) 开关制备完成后衰减器整体结构光学显微镜图

(a) Optical microscope of attenuation before the fabrication of the switch (b) Optical microscope of the whole structure of the attenuator after the fabrication of the switch



(c) 开关制备前衰减片 SEM 图 (d) 开关制备完成后衰减器放大图

(c) SEM patterns of the attenuation before the fabrication of the switch (d) SEM patterns of partially enlarged drawing of the prepared attenuator after the fabrication of the switch

图 4 衰减器制备完成的结构图

Fig.4 Whole structure of the attenuator

对加工获得的样品进行了驱动电压和射频性能的测试,驱动电压为 140 V,射频特性如图 5 所示。图中横坐标为频率范围,单位为 GHz,纵坐标分别为回拨损耗(S_{11})和衰减量(S_{21}),单位为 dB;其中,Standard_S

参数表示供参考的衰减器参数,而 S 参数表示实际测得的参数曲线图;图 5(a)为相应衰减量下的回波损耗(S_{11})参数对比;图 5(b)为在不同端测得的衰减量;图 5(c)为相应衰减量下参考衰减器与工作衰减器的衰减量对比;图 5(d)为从不同端测得的端口匹配对比。

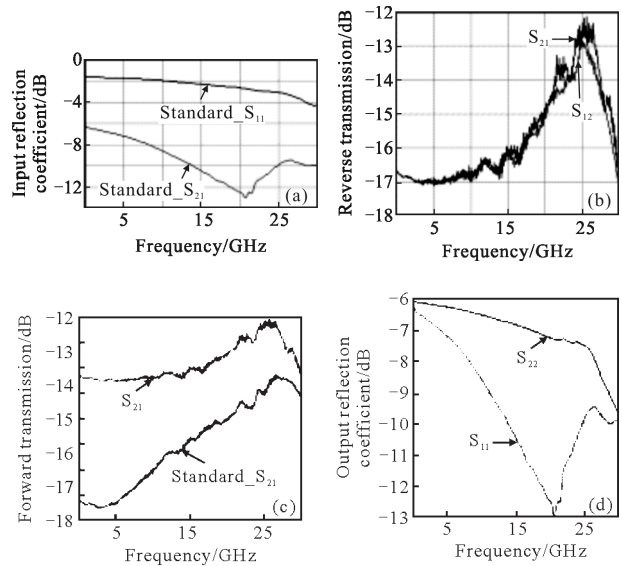


图 5 S 参数测试曲线图

Fig.5 Curve of S-parameter

由测试结果可以看出,整个工作频段上的回波损耗均大于 6 dB,最大达到了 15 dB,整体结构的回拨损耗控制较好。不同端口对应的衰减量一致;设计的器件衰减量与理想情况还存在一定的差距,但在 0~20 GHz 范围内差距逐渐缩小,在 20 GHz 达到 5 dB 的衰减偏差;可见,实际的测试结果与理想状态的衰减器的衰减性能基本一致,满足衰减器的射频性能要求,但仍存在一定的误差。分析原因主要有两个方面:其一是在设计中,因为设计器件的尺寸极小,即使是不同的网格划分对结果会有不同的影响,此次设计中采用的是统一的网格划分,所以会对角及边界处的仿真有所失真;其二是工艺制备,方块电阻基本是以 25 Ω 为单位的电阻,所以精度有限,无法达到仿真中的要求,会对整体的电路射频性能有所影响。

4 结论

根据器件越来越小型化需求及现阶段最先进的微型器件制造技术,设计了一种 MEMS 开关的射频衰减器,通过调整接触式 MEMS 开关中电容的大小

与传输线的长度, 达到 Q 值的匹配, 从而使信号在更宽的频带内保持稳定的衰减量。以 DC~20 GHz 为例, 从理论上进行了推导计算, 进一步设计了电路结构, 波导的尺寸, 以及衰减量所对应的电阻大小的确定。最后利用 UV-LIGA 工艺结合氧化铝薄膜电阻工艺实现了微型衰减器的成功制备并对其进行了在片测试, 从扫描电镜下可以看出制备获得的器件结构完整, 精密度高, 从测试结果可以看出, 测试结果虽存在一定误差但基本满足衰减器射频性能要求, 可见文中设计的基于 MEMS 开关的展频衰减器方案可行, 所采用的工艺满足精度要求, 该方法设计制备衰减器及其他高频器件在微型设备需求领域具有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] Askari M, Kaabi H, Kaviani Y S. A switched T-attenuator using 0.18 μm CMOS optimized switches for DC-20 GHz [J]. *AEU -International Journal of Electronics and Communications*, 2015, 69: 17605.

[2] Gao F, Ouyang X, Yang H, et al. A novel pulsation attenuator for aircraft piston pump [J]. *Mechatronics*, 2013, 23: 566-572.

[3] Cáceres-Vélez P R, Fascineli M L, Yate L, et al. Humic acid: A natural attenuator of toxicity of silver nanoparticles in zebrafish embryos[J]. *Toxicology Letters*, 2015, 238: S205.

[4] Reiner B, Wang W, Liu J, et al. Platelet-activating factor attenuation of long-term potentiation in rat hippocampal slices via protein tyrosine kinase signaling [J]. *Neuroscience Letters*, 2016, 615: 83-87.

[5] Angira M, Rangra K. A novel design for low insertion loss, multi-band RF-MEMS switch with low pull-in voltage [J]. *Engineering Science and Technology*, 2016, 19: 171-177.

[6] Abhilash P, Sebastian M T, Surendran K P. Structural, thermal and dielectric properties of rare earth substituted eulytite for LTCC applications [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, 36: 1939-1944.

[7] Yoshida M, Matsumoto H, Shintake T, et al. High-power microwave attenuator employing slow wave structure, nuclear instruments and methods in physics research section A: accelerators, spectrometers [J]. *Detectors and Associated Equipment*, 2012, 693: 6-10.

[8] He X J, Lv Z Q, Liu B, et al. High-isolation lateral RF MEMS capacitive switch based on HfO₂ dielectric for high frequency applications [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, 188: 342-348.

[9] Zhang Y, Zhuang Y, Li Z, et al. A 5-bit lumped 0.18- μm CMOS step attenuator with low insertion loss and low phase distortion in 3-22 GHz applications [J]. *Microelectronics Journal*, 2014, 45: 468-476.

[10] Yin Jianlin, Huang Xuguang, Liu Songhao. A variable optical attenuator based on the photonic crystal wave-guide [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(5): 671-674. (in Chinese)
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 光子晶体波导可调光衰减器[J]. *中国激光*, 2007, 34(5): 671-674.

[11] Zhang Yuncong, Chen Zhe, Jiang Peifan, et al. All-fiber thermo-optical variable optical attenuator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(8): 1110-1114. (in Chinese)
张云聪, 陈哲, 江沛凡, 等. 全光纤热光型可变光衰减器 [J]. *中国激光*, 2007, 34(8): 1110-1114.

[12] Xu Shengqi, Xin Yujun, Han Wenjie, et al. Research on a continuously tunable space optical attenuator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 673-676. (in Chinese)
徐圣奇, 辛玉军, 韩文杰, 等. 一种可连续调谐空间光学衰减器的研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 673-676.

[13] Su An. Photonic crystal quantum well with function of multi-channel photonic filtering and amplifying [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 727-732. (in Chinese)
苏安. 实现多通道光滤波与放大功能的光子晶体量子阱 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 727-732.

[14] Li Zhiquan, Tian Xiuxian, Wang Huibo. Novel fiber-typed variable optical attenuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(8): 1371-1376. (in Chinese)
李志全, 田秀仙, 王会波. 新型全光纤可调光衰减器 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(8): 1371-1376.

[15] Wang Siwen, Guo Lihong, Zhao Shuai, et al. Experiments of high power CO₂ laser disturbance to far field HgCdTe detectors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 798-804. (in Chinese)
王思雯, 郭立红, 赵帅, 等. 高功率 CO₂ 激光对远场 HgCdTe 探测器的干扰实验 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 798-804.