

文章编号: 1001-3806(2005)06-0632-04

微尺度下新型 MEMS 滤波器的研究

赵继德¹, 李应良², 马传龙³

(1. 烟台师范学院, 烟台 264025; 2. 华信邮电咨询设计研究院有限公司, 杭州 310014; 3. 重庆通信学院, 重庆 400039)

摘要: 分析了 MEMS 共面波导结构, 在 MEMS 共面波导的基础上设计了一种 MEMS 滤波器, 研究了它的电磁学、热应力等微尺度效应。在这些微尺度条件下分析了器件的相关性能, 这些参数为获取实际的 MEMS 滤波器提供了一些有意义的参数。若改变设计参数, 可获得其它同类型的带阻、带通滤波器, 为无线通信中的 MEMS 器件研究在材料选择、器件设计等方面提供了一些理论依据及其实际经验。

关键词: 微尺度; 微机械技术; 滤波器; 共面波导

中图分类号: TN713 **文献标识码:** A

Design of MEMS coplanar waveguide cavity bandstop filter

ZHAO Ji-de¹, LI Ying-liang², MA Chuan-long³

(1. Yantai Normal University, Yantai 264025, China; 2. Huaxin Posts & Communications Consulting Designing Institute Co Ltd, Hangzhou 310014, China; 3. Chongqing Institute of Communications, Chongqing 400014, China)

Abstract: The MEMS CPW is analyzed, and a novel MEMS designed based on the CPW. The electromagnetism and thermal stress are studied. The parameters of the microscale filter are analyzed, and significant data is obtained for actual MEMS filter. If the design parameters are changed, the different performance of MEMS resonators and filters are obtained. The partial theory and practicality experience of material choice and components design study of wireless communications MEMS devices are provided.

Key words: microscale; micro-electromechanical systems (MEMS); filter; coplanar waveguide (CPW)

引 言

随着毫米波、亚毫米波技术的发展, 共面波导 (coplanar waveguide, CPW) 在微波、毫米波集成电路中应用越来越广泛, 与微带线相比较, 它有损耗低、色散小、与其它电路集成时不需在基底上开孔等优点^[1]。但随着系统 (或器件) 功能增多, 器件的体积将变大, 这给传统共面波导和其他器件集成带来了困难, 同时增加了成本, 而对于传输线的要求损耗确较小, 要克服这些困难, 利用传统的共面波导技术显然无法达到, 但可以利用近年来发展迅速的微机械技术 (MEMS) 实现, 进一步且可以利用它实现射频谐振、滤波等高性能无源器件。

目前, 已经有许多关于平面传输线类微波、毫米波滤波器设计、研制和开发的报道^[2], 但绝大多数都采用微带结构, 且一般都包含一个高介电常数的基底, 这增加了介质损耗, 在较低工作频段尺寸过大等。为了克服这些问题, 作者在国内、国外的一些研究基础上, 设计了一种微机械共面波导滤波器 (同一结构实现

带阻和带通性能), 与常规滤波器相比, 具有通带损耗极低、带外抑制大、体积小、利于集成等突出优点, 特别是利用折叠形状结构可实现一定频率的微尺度滤波器, 克服了以往在小尺度下研制的滤波器工作频率过高而无法在数兆赫兹至数十兆赫兹之间使用的缺点, 在无线通信基站、空间卫星通信等领域应用前景广阔。

1 MEMS 滤波器的设计

1.1 MEMS 共面波导的设计

由于 MEMS 滤波器是根据 MEMS 共面波导结构设计的, 因此有必要先对 MEMS 共面波导进行分析。所设计的 MEMS 共面波导见图 1 和图 2。为了克服高介电常数基底带来的损耗, 在基底蚀刻出一个梯形的开放腔, 并在腔壁面镀上一层金; 基底是两部分组成的复合基底, 上层是 SiO_2 (厚度为 $60\mu\text{m}$), 下层是硅 (厚

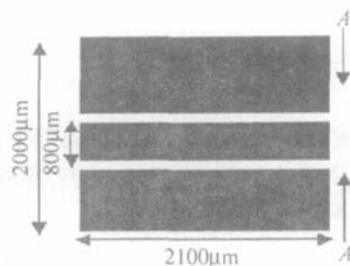


Fig 1 MEMS CPW

作者简介: 赵继德 (1951-), 男, 教授, 研究方向为物理与微电子学、射频通信技术, 计算机应用等。

E-mail: lyde_yeah_net@yeah.net

收稿日期: 2004-08-03; 收到修改稿日期: 2004-10-11

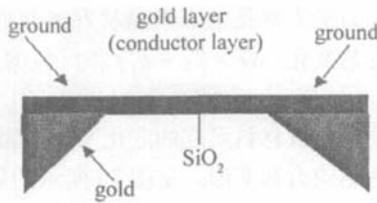


Fig 2 Section of MEMS CPW

度为 200μm);顶端的金层导带厚度为 4μm,其结构见图 1。在顶端还可以采用屏蔽技术以减少辐射损耗。

关于图 1和图 2所示的微机械共面波导结构,可以采用准静态法、全波分析法、保角变换法等分析,本文中不具体去分析这里电磁学方法,有兴趣的读者可查阅相关资料。文中重点讨论了相关微尺度效应的特性。通常在分析共面波导时,都把导带的厚度看为是 0,但实际上,一般导带的厚度在 0.5μm~50μm之间,因而金属的厚度效应不可忽略^[3]。在金属厚度效应的影响下,共面波导的损耗特性有介质损耗 α_d,导体损耗 α_c和辐射损耗,忽略辐射损耗,则损耗可由下面 3 个式子给出^[4]:

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\epsilon_t (\epsilon_t - 1) \tan \delta}{\epsilon_{re} (\epsilon_t - 1) \lambda_0} \quad (1)$$

$$\alpha_c = 0.23 \frac{R_s}{Z_{ocp}} \left(\frac{\partial Z_{ocp}}{\partial \omega} - \frac{\partial Z_{ocp}}{\partial s} - \frac{\partial Z_{ocp}}{\partial t} \right) \quad (2)$$

$$Z_c = \frac{60\pi}{\sqrt{\frac{K(K_1)}{K(K_1 + \Delta K)} + \frac{K(K_1 + \Delta K)}{K(K_1)}} \left[\frac{\epsilon_t K(K_1)}{K(K_1)} + \frac{K(K_1 + \Delta K)}{K(K_1 + \Delta K)} \right]}$$

上面 3个公式中的相关参数的物理意义可参见文献 [4]。

在微细加工微机械结构时,在导带表面会形成一定的表面粗糙度,这对微机械结构的损耗特性也有影响,上面考虑金属厚度效应时的损耗设为 α,表面粗糙度设为 Δ,则此时损耗为^[5]:

$$\alpha_s' = \alpha \{ 1 + 2/\pi \tan^{-1} [1.4(\Delta/\delta_s)^2] \} \quad (4)$$

式中,α_s是考虑表面粗糙度的 MEMS 微带损耗特性,δ_s为导体趋肤深度。

可以看出,要在该微尺度下计算微机械共面波导的损耗特性非常困难,且计算量巨大,但可以用计算机来对该结构进行模拟,下面将用计算机模拟软件 HFSS 对设计的微机械共面波导结构进行仿真计算,考虑的

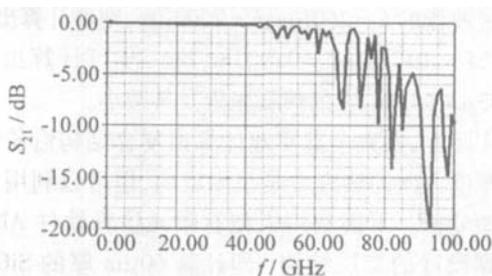


Fig 3 S₂₁ parameters of MEMS CPW

表面粗糙度为 0.01μm,其损耗曲线见图 3。由图 3 可以看出,设计传输线在 60GHz 以上后损耗就较大了,这是色散现象的引起,在 60GHz 以内,最大损耗不到 -3dB,其性能还是较理想。

1.2 微机械滤波器的设计

根据上面设计的共面波导结构,可在它的导带上蚀刻出复杂的图形以形成性能优良的带阻滤波器。设计滤波器结构见图 4,白色是共面波导腔、黑色的是

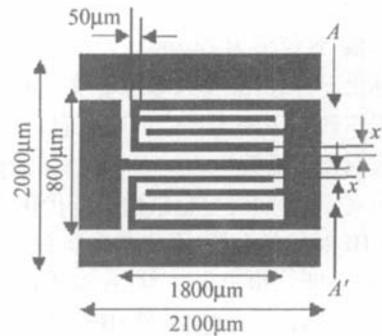


Fig 4 Filter of MEMS CPW

金属层。利用复杂叉指结构可有效减少同频率下器件的尺度^[1]。图 4 所示为对称结构,至上而下,缝隙宽度为 60μm,40μm,40μm,40μm,x(变量,单位为 μm),而金属宽度除中间为 30μm,其它的为 57.5μm;中间金属宽度为 30μm,左边金属宽度为 150μm,且从左到右方向的所有缝隙宽度均为 50μm。改结构利用这些耦合缝隙等效为开路或短路电路来代替集中参数元件中的电感器和电容器,从而实现带阻、带通滤波功能。该复合结构可用全波分析法对其分析,也可利用空域积分方程(space domain integral equation, SDIE)^[6]。

该滤波器的基底可选择厚度为 200μm 的硅片,在硅片上键合一层厚度为 60μm 的 SiO₂ 隔离层,该层可增加 MEMS 共面波导的传输带宽。最后在 SiO₂ 层上淀积一层厚度为 4μm 的金,腐蚀掉金层的一部分,形成图 4 表面结构。最后利用微细工艺在器件的基底的中心部分加上一 920μm × 2100μm × 2000μm 的空腔,在腔体内壁利用蒸镀法加上一层厚为 0.1μm 的金层,可减少基底损耗且增加了基底的阻抗。

1.3 MEMS 滤波器优化设计

由于设计的滤波器结构复杂,要精确的计算它的损耗参数是较困难的,利用三维有限元电磁学软件 HFSS 分析该结构的性能。设金属导带表面粗糙度为 0.01μm,选取图 4 所示的 x 作为优化变量,寻求最佳值。取值范围选择 20μm~60μm,步长为 1μm,优化频率为 20GHz,即以 x 作为变量,其它波导腔尺度不变(如 x=50μm 时,其它的尺度按照上面设计的尺度,但中心之上、下的第 1 块金属宽度变化了,结构依然是对称结构)。优化曲线如图 5 所示。可以看出,在

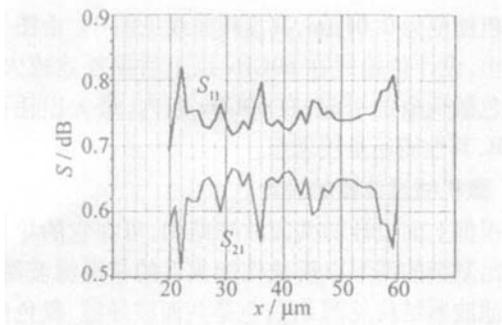


Fig 5 Optimizing curve of MEMS filter ($f=20\text{GHz}$)

$f=20\text{GHz}$ 时候,最佳值为 $22\mu\text{m}$ 。

但实际上,上面的优化只考虑了单一工作频率,但滤波器的工作频率不一定是 20GHz ,所以还需要进一步优化。选取损耗函数为 $S_{11} - S_{21}$,在 $x=22\mu\text{m}$ 时,选取频率作为变量,再次对复合结构进行优化,得出工作频率在 24GHz 时损耗最低,再将工作频率为 24GHz 固定,再次优化变量 x ,得出 x 在 $34\mu\text{m}$ 时损耗最小,因而可选取变量 $x=34\mu\text{m}$ 。利用软件 HFSS对 $x=34\mu\text{m}$ 时的结构进行仿真计算,见图 6。由图 6可以看出,该

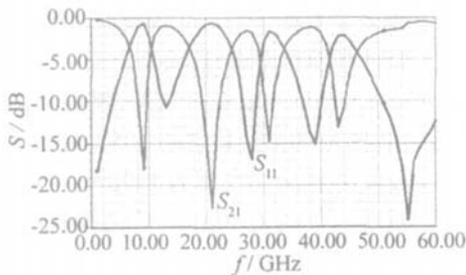


Fig 6 S parameters of filter

结构具有带通、带阻滤波器件性能,其带宽均大于 5GHz 损耗性能较为理想,但在工作时,需要注意工作频率,以让带通、带阻滤波器较好的工作。表 1中列举出带通、带阻滤波器的中心频率和损耗情况。

Table 1 Loss of MEMS filter

center frequency/GHz	loss/dB	type of filter	band stop/GHz	band pass/GHz	S parameter
9	- 18.13	band stop	2.8		S_{21}
21	- 22.69	band stop	6		S_{21}
31	- 14.68	band stop	2.6		S_{21}
43	- 13.16	band stop	4		S_{21}
13	- 10.76	band pass		6.1	S_{11}
28	- 16.92	band pass		3.9	S_{11}
39	- 15.07	band pass		3.7	S_{11}

2 MEMS滤波器热应力分析

研究的 MEMS 共面波导滤波器由多种不同的材料组成,在温度一定变化时,材料的膨胀系数不匹配而产生热应力。如果产生的热应力过大, MEMS 器件将会失效,因而有必要在微尺度条件下分析该器件的热

应力。热应力最为常见的表现是材料的热胀冷缩,它主要由温度的变化 ($\Delta T = T_2 - T_1$)和材料的热膨胀系数 α 决定。

下面简单分析材料尺度的变化及其热膨胀系数不匹配导致的热应力和变形。见图 7b所示的梁,总的膨

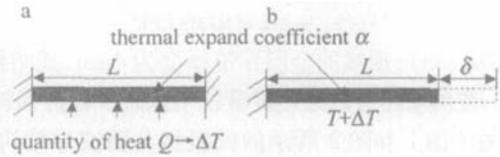


Fig 7 Fixation beam of temperature variety

a—beam of anchor b—free expand of single end fixation beam

胀 ($+\Delta T$)或收缩 ($-\Delta T$)可由公式 $\delta = L\alpha\Delta T$ 计算,其中, L 为梁在参考温度下的原始长度。由此,导致的热应变为 $\epsilon_t = \delta/L = \alpha\Delta T$ 。在图 7a中,梁的两端固定,当温度升高至 $\Delta T = T_2 - T_1$ 时,梁将产生热应力,材料的杨氏弹性模量设为 E ,则热应力可表示为:

$$\sigma_t = E\epsilon_t = -\alpha E\Delta T \quad (5)$$

由于 MEMS 共面波导腔滤波器由多层材料复合而成,如图 8所示,右边的图是截面图。梁 1 的厚度为 h_1 ,梁

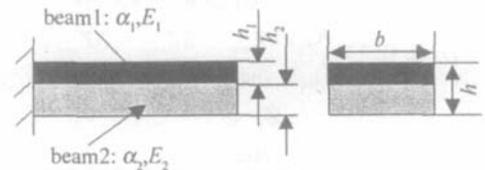


Fig 8 Complex beam of temperature variety

2 的厚度为 h_2 ,复合梁厚度为 h ,宽度为 b 。设两种不同的材料组成的梁粘接在一起,梁 1 的热膨胀系数和杨氏模量为 α_1, E_1 ;梁 2 的热膨胀系数和杨氏模量为 α_2, E_2 。则界面力 F 和梁产生的曲率 ρ 可写为^[7]:

$$F = \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) T}{8} \left[\frac{hb}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}} \right] \quad (6)$$

$$\rho = \frac{2h}{3(\alpha_2 - \alpha_1) T} \quad (7)$$

(6)式和 (7)式中, T 表示的是上升温度,相当于 ΔT 。只考虑结构的 Si 和 SiO_2 的复合部分,假设温度上升 $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ 。它们的材料性能为 $E_{\text{SiO}_2} = E_1 = 385000\text{MPa}$, $E_{\text{Si}} = E_2 = 190000\text{MPa}$;热膨胀系数: $\alpha_{\text{SiO}_2} = \alpha_1 = 0.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{Si}} = \alpha_2 = 2.33 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 。本文中设计滤波器的 $h = 260\mu\text{m}$, $b = 2000\mu\text{m}$,则可计算出 $F = 3162.21 \times 10^{-6}\text{N}$; $\rho = 0.903\text{m}$;进一步可计算出 $\delta = 0.0443\mu\text{m}$,可见,它的热膨胀量及其微小。

实际上,要完全真实地计算出复合结构沿长度方向和厚度方向的热应力是很困难的,但可以利用计算机辅助分析。下面利用大型有限元仿真软件 ANSYS 来计算设计的二层结构,即计算 $60\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 和 $200\mu\text{m}$ 厚的硅的复合梁,选取沿边界线下方的 $13\mu\text{m}$

至上方的 $13\mu\text{m}$ 的范围 (共计 $26\mu\text{m}$) 作为研究对象, 考察这段复合材料的热应力分布。分别选取温度变化范围为: (1) $60\text{C}\sim 100\text{C}$; (2) $-20\text{C}\sim -50\text{C}$ 。则在条件 (1) 下, $\Delta T=10\text{C}$, 可计算出的沿纵向热应力范围为 $190\times 10^{12}\text{Pa}\sim 3435.230\times 10^{12}\text{Pa}$; 横向热应力范围为 $190\times 10^{12}\text{Pa}\sim 1364.698\times 10^{12}\text{Pa}$; 在条件 (2) 下, $\Delta T=10\text{C}$, 可计算出的沿纵向合横向热应力范围为 $6.72\text{Pa}\sim 236.697\text{Pa}$; 而上述复合薄膜产生残余应力的范围是 $2000\text{MPa}\sim 5000\text{MPa}$ 范围内^[8], 可以看出, 上述复合结构在温度范围为 $-20\text{C}\sim 80\text{C}$ 、且温差为 10C 时, 不会产生残余应力现象, 从而薄膜不会产生较大的变形, 器件不会失效。

3 结 论

研究了基于 MEMS 共面波导腔结构带阻、带通滤波器件, 分析了它们的微尺度热应力、表面效应、厚度效应, 该器件显示了良好的性能。模拟出阻带中心频带可达到 21GHz , 插入损耗大于 22dB 、阻频带为 6GHz , 尺度微小; 带通滤波器中心频率为 39GHz , 损耗小于 1.5dB , 实现了同一结构实现带通、带阻两种滤波器件的片上系统, 大大缩减了器件的体积。若改变该设计结构的参数, 可获取其它频段的带阻、带通滤波器。根据设计的器件特征, 该器件加工方便, 符合表面微机

械加工工艺标准, 设计具有一定的可行性和实用性。

当然, 要获取实际的 MEMS 无线通信器件需要解决的问题很多, 特别是一些基础理论及其微细工艺, 这需要广大科研工作者的共同努力。

参 考 文 献

- [1] CHAN K T, CHEN C Y, CHN A *et al* 40GHz coplanar waveguide bandpass filters on Silicon substrate [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2002, 12 (11): 429~431.
- [2] AHN D, PARK J S, KM Ch S *et al* A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2001, 49 (1): 86~93.
- [3] HAYDL H, KITA ZAWA T, BRAUNSTEIN J *et al* Millimeterwave coplanar transmission lines on gallium arsenide, indium phosphide and quartz with finite metallization thickness [A]. IEEE MTT-S Int Microwave Symp Dig [C]. Denver, Denver Co, 1991. 691~694.
- [4] 蒋振新, 丁桂甫, 杨春生 *et al* 共面波导有限金属厚度效应的研究 [J]. 微波学报, 2004, 20 (2): 25~28.
- [5] 李应良. 射频系统中 MEMS 谐振器、滤波器基础理论及其应用研究 [D]. 重庆: 重庆邮电学院, 2004. 21~29.
- [6] D B N I, KATEH I L, P B, FONCHAK G E *et al* Theoretical and experimental characterization of coplanar waveguide discontinuities for filter applications [J]. IEEE on Trans Microwave Theory and Techniques, 1991, 39 (5): 873~882.
- [7] HSU T R. EMS & microsystems: design and manufacture [M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2002. 91~147.
- [8] MADOU M. Fundamentals of microfabrication [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997. 100~125.

(上接第 616 页)

角 A 的增大两谱线之间的夹角 $\Delta\theta$ 也逐渐增大这一非常重要的结论。并在此基础上介绍了熔石英三棱镜在 LD 抽运固体激光器中的应用, 即作为分光的应用、估算和较粗略鉴定波长的应用、制造多波长激光器的应用。这些应用将会进一步拓宽激光器的应用领域, 促进激光器产业化的快速发展。

衷心感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室的郑权博士后在实验过程中提供的指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] 刘宏发, 刘 莉, 邓瑞平 *et al* 灯泵钛宝石激光器调 Q 运转 [J].

光学技术, 2002, 28 (2): 130~131.

- [2] 章若冰, 马 晶, 庞冬青 *et al* 激光晶体角色散对克尔透镜锁模激光器二阶三阶色散的影响 [J]. 物理学报, 2002, 51 (2): 262~269.
- [3] 廖 睿, 文锦辉, 刘智刚. KLM 钛宝石激光器产生亚 10fs 光脉冲 [J]. 科学通报, 2002, 47 (5): 345~348.
- [4] 周 城, 叶子青, 郑 权 *et al* Cr^{3+} YAG 被动调 Q 4 倍频全固态紫外激光器的研究 [J]. 激光技术, 2003, 27 (4): 339~341.
- [5] 骆成洪, 吴也文. 棱镜折射率和色分辨本领公式新的推导方法 [J]. 南昌大学学报 (理科版), 2002, 26 (3): 305~306.
- [6] 杨丽君, 安程辉. 三棱镜的应用及相应的参数选择 [J]. 保定师范专科学校学报, 2002, 15 (4): 10~12.
- [7] 章若冰, 庞冬青, 孙敬华 *et al* 非布儒斯特角情况下四棱镜组二阶、三阶色散的解析表示 [J]. 物理学报, 2000, 49 (3): 468~473.
- [8] 姚启钧. 光学教程 [M]. 3 版, 北京: 高等教育出版社, 2002. 295.