

文章编号 1004 924X(2004)03 0298-07

基于腔结构的射频微机械谐振元件的设计

李应良, 潘 武

(重庆邮电学院 微光机电研究所, 重庆 400065)

摘要: 对圆柱形复合腔结构微机械谐振元件进行了设计研究, 提出了一种基于柱形腔结构的微机械复合谐振元件的设计方法, 并对其结构及特性进行了研究。建立了复合腔结构的电磁场数学方程, 腔体基于体微机械微细加工技术实现工艺设计, 最后对该元件进行了仿真分析。TM₀₁₀ 模式下, 谐振腔谐振频率为 24.313 299 GHz, Q 值为 3 529.707 890, 考虑微带耦合时仿真出复合谐振元件的最佳谐振频率为 24.75 GHz。仿真实验结果和理论值的平均误差不到 1%, 两者吻合得很好, 说明了该设计的可行性。进一步改变结构参数, 可获取不同谐振频率的器件, 且可在腔体中填充高介电常数介质来减小器件的谐振频率, 克服了以往使用腔体结构在低频段时体积过大等问题。

关键词: 微机械谐振器; 腔结构; 微细加工技术; 微机械设计

中图分类号: TH703 文献标识码: A

Design of RF MEMS resonator components based on cavity structure

LI Ying-liang, PAN Wu

(*Institute of MOEMS, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China*)

Abstract: The structure and performance of a complex cavity Micro Electro Mechanical System resonator are analyzed with its electromagnetism equations established. Its fabrication was realized by built micromachining, and the structure is simulated on computer at the end. A micro machined cavity resonator was designed with a TM₀₁₀ resonance quality factor of 3 529.707 890 at 24.313 299 GHz. When the micro strip coupling conditions are considered, the best guess for the highest eigen frequency would be 24.75 GHz, and the average error of theoretical results and simulated results is less than 1%. The simulation results are in very good agreement with the theoretical value and this testifies the feasibility of the design. The structure parameters of the component are further varied, to obtain multivarious frequency components. The resonance frequency of a component is reduced by filling high permittivity medium, and this makes it possible to keep the design of a component compact at low frequency even.

Key words: MEMS resonator; cavity structure; micromachining technology; MEMS design

1 引 言

当前, 对微观条件下的机械系统的运动规律, 微小构件的电磁和热力学特性等尚缺乏充分的理

论基础和实践经验, 还没有形成基于一定理论基础之上的微机械系统的设计理论与方法, 只能根据经验和试探的方法进行研究^[1]。因此, 微机械系统的设计过程至关重要, 是微机械系统研制过程中的关键阶段, 微机械系统的制造须

收稿日期: 2003 11-29; 修订日期: 2004 02-07.

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(D2002 26); 重庆邮电学院博士科研基金项目(A2002-36)

根据设计的参数和方法进行加工, 它们将决定随后制造的微机械系统的性能。

在射频系统中, 可使用微机械系统技术实现一些关键器件^[2], 它们具有较好的性能参数(如微机械滤波器的插入损耗、相位噪声、热稳定性等)。这些微机械射频元件的一个显著特征是在射频电路中加入了微机械(如梁、板、腔等)、热、流体等元件, 利用某一信号激励这些元件, 寻求它们的响应规律, 进而选择相应的微机械元件, 并加上一些外围设备, 最后设计出相应的射频器件。随着通信技术的发展, 近年来国内外兴起一股研究射频微机械技术热潮, 主要研究领域有开关、微机械带贴片天线、微机械电感、谐振器、滤波器等高性能器件^[3]。

基于腔结构的射频微机械器件是射频微机电系统的一个研究分支, 它可把信号通过波导(或其他介质)耦合到集成电路中, 进而与集成电路构成一片上系统, 具有微小尺寸、高 Q 值、高频特性稳定等优点^[4]。近年来移动通信技术高速发展, 对射频谐振器的工作频带、 Q 值、插入损耗等方面性能要求更高, 而尺寸要求却更小, 为此本项目设计出一种基于腔体结构的微机械谐振元件, 并对该元件特性进行了研究。根据组成微器件的电磁场数学方程和微细加工工艺设计出元件结构尺寸和耦合方式, 通过对它们的电磁特性和结构特性(主要是微尺度特性)进行理论推导, 得出各元件的理论性能参数, 最后对该结构模型进行计算机辅助分析, 得出该结构模型性能的仿真参数。仿真计算结果和实际理论的平均误差不到 1%, 二者吻合得很好, 说明了该设计的合理性。该设计可克服目前的微机械谐振元件工作频段低、器件体积大、批量生产困难等问题。最后根据结论提出了要获取实际的腔结构微机械谐振器还需进一步的探索。

2 微机械谐振元件设计

2.1 谐振腔的选择

普通电感、电容式谐振器有一个弱点, 就是当工作频率增加时, 为了保持谐振器谐振, 必须减少谐振电路的电感和电容, 而谐振电路的增益-带宽有限, 因此普通的谐振器不能在较宽的频率范围内产生一个大的输出。要保证在宽带范围内得

到大的增益, 必须尽量采用高 Q 值的结构, 而使用谐振腔无疑是一个理想的选择。射频系统中谐振腔主要用来储存电磁波能量和选择电磁波频率, 其结构形式主要有矩形、圆柱形和球形等。它的主要特性参数有固有谐振频率 f_0 、固有品质因素 Q_0 、特征阻抗 Z_0 等。理论上, 一个给定的谐振腔有无穷个谐振模式, 每一个模式对应一个谐振频率, 当某个特征信号频率等于谐振频率时, 将出现最大的驻波振幅, 且存储在电场和磁场中的峰值能量相等。一般情况下, 谐振腔的基模模式最为稳定, 因此这里只讨论谐振腔的基模谐振模式。同等条件下, 圆柱形腔比其他结构谐振腔有更高的 Q 值, 故微机械谐振腔的形状可选择圆柱结构。

2.2 圆柱谐振腔谐振模式选择及其 Q 值分析

腔内的电磁场满足麦克斯韦方程, 同时满足金属腔壁上的切向电场和法向磁场为零的边界条件^[5]。微机械圆柱形腔可由一些微型圆薄片通过微细加工技术组合而成, 在分析时, 可考虑它是两端封闭起来的一段波导, 如图 1 所示。因此, 在理想状态下其电磁场特性和一段两端短路的金属波导一样。但实际上, 由于微细加工技术和材料等因素的影响, 实际的微机械谐振腔的损耗和金属波导谐振腔有一些不同。这里首先对金属波导谐振腔进行分析。对于图 1 所示的圆柱形谐振腔, 在 $TM_{n,p}$ 的谐振波长可以写成^[6]:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{v_{ni}}{2\pi a}\right)^2 + \left(\frac{p}{2l}\right)^2}}, \quad (1)$$

TE 谐振模式一般用 TE_{mnp} 表示, m , n 和 p 分别代表在 x , y 和 φ 方向的半驻波的数目。不同的谐振模式可得到不同的 Q 值, 而圆柱形谐振腔的 TE_{011} 模式的 Q 值最高(因为在这一模式下,

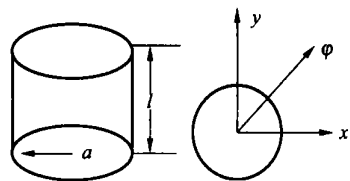


图 1 圆柱形谐振腔
Fig. 1 Column resonant cavity

$H_{\varphi} = 0$, 没有轴向电流, 所以损耗最小); 但该模式不是主模, 极其不稳定。在设计激发模式时, 应尽量采用基模。当在 $D/l > 0.95$ 时, TM_{010} 波型是低次型, 故选择该模式可减少干扰。此时谐振腔的 Q 值表达式为:

$$Q = \frac{\omega W}{p_i} = 2\pi \frac{\text{最大储存能量}}{\text{每周波损耗的能量}}, \quad (2)$$

由该表达式可推算出当波型为 $TM_{n,ip}$ 时, 圆柱形谐振腔的 Q 值可表示为^[7]:

$$Q\delta/\lambda = \sqrt{\frac{(v_{ni})^2 + (\frac{p_i \pi \cdot D}{2l})^2}{2\pi(1 + (D/l))}}, \quad (3)$$

在式(3)中, n, i, p 为模式阶数; D 为圆柱直径; v_{ni} 为 n 阶贝塞尔函数的根; δ 为趋肤深度, 其表达式为:

$$\sqrt{2\omega\mu\sigma} = \frac{2}{\delta}, \quad (4)$$

式(4)中, ω 为频率; μ 为磁导率; σ 为电导率。

2.3 微带线设计

在传输线设计中, 微带线可取代波导和同轴线来作为腔中电磁波的导行线, 但必须是 TEM 波导型, 它具有传输频率高、与集成电路兼容性良好、损耗微小、易传播电磁波等特点。由于微机械谐振元件设计需考虑和其他器件做在一片上系统上(称为片上微带线)的可行性, 故设计其结构如图 2。而采用微细加工技术可有效减少微带线的辐射损耗和机械损耗^[8]。根据传输线理论, 传输模式为 TM_{010} 时, 设计微带结构尺寸如下: 基底上是微带线, 其厚度 $t = 0.01 \text{ mm}$, 导带宽度 $W = 40 \text{ }\mu\text{m}$, 长度 $L = 3000 \text{ }\mu\text{m}$, 基底厚度 $h = 100 \text{ }\mu\text{m}$ 。微带材料选择金, 其相对磁导率为 1, 电导率 $\sigma = 4.10 \times 10^7 \text{ s/m}$, 其在 $f > 10 \text{ GHz}$ 时, 损耗特性为: $\tan \delta = 1.4 \times 10^{-5}$ 。基底材料选择蓝宝石, 相对介电常数为 10, 相对磁导率为 1。当 $W/h \geq 1$ 时, 在计算出微带线特征阻抗 Z_0 时, 可用下式计算:

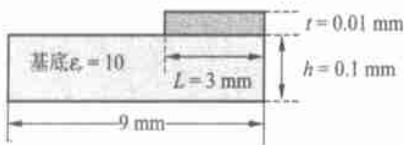


图 2 微带线结构
Fig. 2 Structure of microstrip

$$Z_0 =$$

$$\frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_c}} \left[\frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{W}{h} + 1.44 \right) \right]^{-1} (\Omega), \quad (5)$$

ϵ_c 为有效介电常数, 可表示为:

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

由(4), (5)两式可计算出 Z_0 为 $176.8467 \text{ }\Omega$ 。当考虑介质损耗和导体损耗时, 可计算出微带在频率达到 40 GHz 时损耗达到 $3.529414 \times 10^{-6} \text{ dB/}\mu\text{m}$, 当频率为 24.5 GHz 时, 计算出损耗为 $2.762203 \times 10^{-6} \text{ dB/}\mu\text{m}$ 。这里的损耗计算没有考虑微尺度效应。

当考虑微尺度效应时, 这里主要讨论表面粗糙度(Surface Roughness, 简称 SR)对微带线带来的影响。表面粗糙度带来的损耗影响主要有 2 个方面^[9]: (1)使得基底吸附金属层更为容易, 带来损耗; (2)电流传输距离增加时将带来频率损耗的增加; 表面粗糙度带来的衰减可表示如下:

$$\alpha'_c = \alpha_c \left[1 + 2/\pi \tan^{-1} \left\{ 1.4 \left[\Delta/\delta \right]^2 \right\} \right], \quad (7)$$

在式(7)中, α'_c 是表面粗糙度损耗; α_c 是光滑表面损耗; δ 是趋肤深度; Δ 是表面粗糙高度(R. M. S Surface Roughness Height)。由式(7)可以看出, 微尺度效应的影响主要取决微细加工的工艺, 加工精度越高, 损耗越接近理想损耗状态。假设 Δ 为 $0.1 \text{ }\mu\text{m}$, 则可以计算出考虑微带的微尺度效应下的损耗状况。

可见, 微带线的损耗主要有介质损耗、导线损耗、机械损耗(微尺度效应)。利用 Ansoft 仿真软件 HFSS 计算上面设计微带线的损耗情况, 计算结果如图 3 所示。图中 3 种表示考虑了 3 种损耗(即介质、导体、机械损耗), $m = 1$ 表示的是考虑微带双边损耗, $m = 0.5$ 考虑的是单边损耗情况。该情况计算出在考虑微尺度效应下, 微带在频率为 24.5 GHz 时, 损耗为 $3.6543 \times 10^{-6} \text{ dB/}\mu\text{m}$, 可见, 微尺度效应的影响还是很大的。当然, 在微尺度效应中, 还有温度、动力等微尺度效应, 在此不做详细分析。

2.4 腔结构微机械谐振元件的结构设计

考虑腔结构微机械谐振元件设计时, 可从两方面着手: 一是器件的性能; 二是器件的微型化和集成化。器件的性能参数可以运用介质谐振器基础理论计算, 而器件的微型化与集成化则从微细

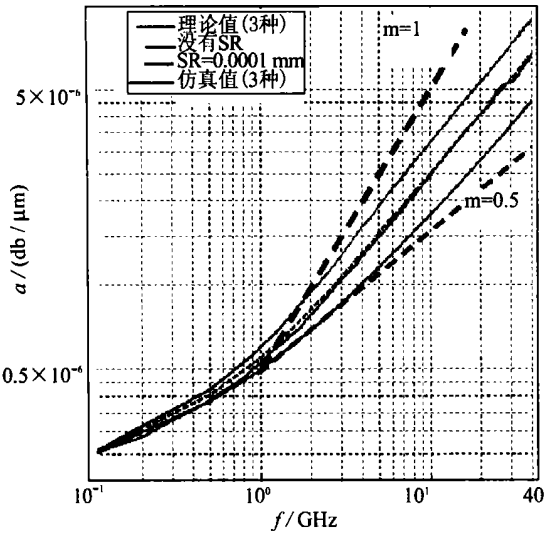


图 3 微带结构损耗特性
Fig. 3 Microstrip HFSS simulations

形谐振腔之间考虑的是端面耦合, 把谐振腔、微带线、基片等用微机械技术封装在一起, 构成微机械谐振元件。

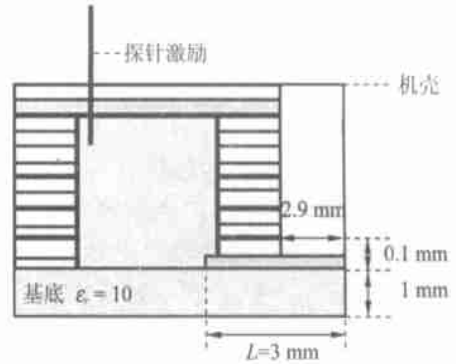


图 4 谐振器模型侧视图

Fig. 4 Schematic of profile view of resonator

加工技术方面考虑。在射频器件中(如振荡器、滤波器)加入谐振腔可获得较高的 Q 值, 谐振腔为了达到谐振, 必须满足腔体的电磁谐振条件, 即在某个方向上的尺寸为信号半个波长的整数倍。因此, 当频率很高时, 谐振腔的尺寸可以变得很小, 这对器件的微型化有利。此时, 微型腔的设计应重点放在微细加工技术方面。在低频时, 可以在谐振腔中加入介质来降低谐振频率, 同样达到器件微型化的目的。将微机械谐振腔看作一个二端口网络, 即可利用 S 参数理论对其特性进行分析。根据上面的分析, 本文设计的微机械谐振腔结构采用圆柱形腔结构, 电磁波的传播采用微带线(这主要是从器件的集成化考虑), 模型如图 4, 图 5 所示。由于微机械谐振器的设计关键是要解决和 IC 电路集成的问题, 因此材料的选择可采用集成电路的常用材料: 二氧化硅和氮化硅。在 IC 电路中, 已经实现了微带线和基底之间的集成问题^[10]。目前关于介质谐振器和微带线之间的耦合理论已经基本成熟, 因此设计的微机械谐振器结构如下: (1) 采用圆柱形腔结构; (2) 采用微带线耦合; (3) 使用微机械封装形式。利用微细加工技术把腔和微带线共同蚀刻在一块基片上, 在微带和腔的结合体采用屏蔽封装技术, 以减少器件的辐射损耗和器件干扰。下面根据设计的模型来分析它的参数。腔中间采用聚苯乙烯填充, 相对磁导率 $\mu_r = 1.0$, 介电常数 $\epsilon_r = 2$, 电导率 $\sigma = 1.0 \times 10^{-5} \text{ S/m}$, 腔体壁材料采用金。微带线和圆柱

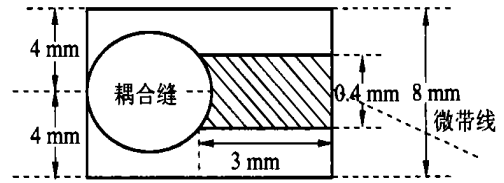


图 5 谐振器模型俯视图

Fig. 5 Schematic of top view of resonator mode

2.5 谐振腔参数确定

对于圆柱形谐振腔, 谐振模式为 TE_{nlp} , 谐振波长 λ_0 与谐振尺寸之间存在如下关系^[11]: 对于 TE_{nlp} 模式下, 满足:

$$\left(D/\lambda_0 \right)^2 = \left(p/2 \right)^2 \left(D/l \right)^2 + \left(\mu_{ni}/\pi \right)^2, \quad (8)$$

对于 TM_{nlp} 模式下, 满足:

$$\left(D/\lambda_0 \right)^2 = \left(p/2 \right)^2 \left(D/l \right)^2 + \left(v_{ni}/\pi \right)^2, \quad (9)$$

λ_0 为谐振波长; v_{ni} , μ_{ni} 分别为 n 阶贝塞尔函数及其导数的第 i 个根; n, i, p 为模式指数, 分别为沿着场 r, φ, z 方向的变化指数; D, l 分别为腔体的直径与长度(如图 1 所示)。满足以上两式, 必须有:

$$\left(D/\pi \right)^2 < \left(\mu_{ni}/\lambda_0 \right)^2 \text{ 或 } \left(D/\pi \right)^2 < \left(v_{ni}/\lambda_0 \right)^2, \quad (10)$$

圆形腔中, TE_{0lp} 和 TM_{1lp} 两种模式波长相等, 这里选择 $\mu_{ni} = \mu_{0i} = v_{ni} = v_{1i}$, 则有:

$$\left(p/2 \right) \left(D/l \right) = \sqrt{\left(D/\lambda_0 \right)^2 - \left(\mu_{ni}/\pi \right)^2} = \sqrt{\left(D/\lambda_0 \right)^2 - \left(v_{0i}/\pi \right)^2}, \quad (11)$$

选择腔体直径 $D = 6 \text{ mm}$, $f_0 = 40 \text{ GHz}$, 由上面分析

可知, TM_{010} 模式具有很多优点。模式选取 TM_{010} 条件下, 求得 $v_{01} = 2.045$, 则可求出腔体长度 $L = 5$ mm。在谐振腔中填充上介质后, 谐振频率 f_0 可以用式(12)计算:

$$f_0 = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \left[\sqrt{\left(\frac{\mu_{ni}}{2\pi a} \right)^2 + \left(\frac{p}{l} \right)^2} \right], \quad (12)$$

式中 f_0 是谐振频率; c 是真空中光速; μ_r 、 ϵ_r 分别是填充介质的相对磁导率和相对介电常数。根据上面的计算结果, 可以计算出填充介质后的谐振腔的谐振频率为 $f_0 = 24.6428$ GHz。根据式(3), 式(4)可进一步计算出该频率下的 Q 值为 1 384 487.568 7, 当然这里的 Q 值计算没有考虑腔体的表面损耗。

2.6 谐振腔的制造工艺设计

目前, 微细加工工艺技术主要有表面微细加工、体微细加工、LIGA 技术、SU-8 胶工艺等^[12]。将驱动器、传感器、控制器和执行机构在 mm 或几百 μm 尺度的空间里高密度集成起来形成微机械系统的思想源于电子电路的大规模集成, 故早期的静电式微电机、微传感器等都是在传统的集成电路工艺基础上发展起来的。目前, 表面微细加工技术仅仅适合硅类材料, 并且限制于平面结构, 厚度很薄^[13], 因此很难实现深度蚀刻; 而其他几种不是成本偏高(如 LIGA)就是技术不成熟(如 SU-8 胶工艺), 为此复合谐振腔的工艺设计可以采用体微细加工技术, 在基片上通过 10 片厚度为 500 μm 薄片叠加, 最后在顶端键合一薄金片, 形成闭合圆柱腔体, 基底采用 $\epsilon_r = 10$ 的蓝宝石材料。体微细加工技术可实现批量生产, 降低成本, 且可沿用很多 VLSI 工艺技术, 它也是目前使用广泛的一种微细加工工艺。

单片氮化硅制造过程可设计如下: 采取双面蚀刻硅片, 利用一直径为 6 mm 的圆柱形 SiO_2 片, 其厚度为 500 μm , 在圆柱形 SiO_2 片周围淀积一层厚度为 0.1 mm 的 Si_3N_4 ^[14], 两端面不淀积, 最后腐蚀掉 SiO_2 后就形成了一圆柱形空腔。在低端圆柱形 Si_3N_4 片下表面的中间开一个宽为 0.4 mm 的槽, 并在槽中镀上金, 就构成了微带的一部分。最后采取热键合技术把 10 块 Si_3N_4 片键合在一起, 形成一个厚度为 5 000 μm 的圆柱形深腔。腔形成后, 在腔体内的周围通过化学蒸镀法镀上一层 0.1 μm 厚的金。填充上介质, 将顶端金属金片和深腔临界键合在一起, 底端采用粘接方法把 Si_3N_4 片和基底结合在一起, 就形成了一个深度为 5 000 μm 的深腔。假设表面粗糙度为 0.1 μm , 在

基底的上面是片上微带线, 模型如图 6 所示。

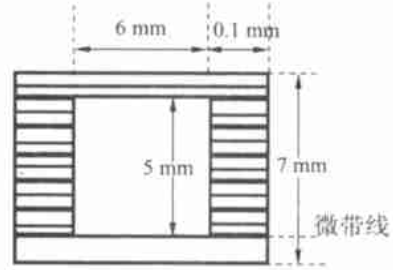


图 6 圆柱腔微细加工工艺设计模型

Fig. 6 Design mode of column cavity micromachined process

3 复合微机械谐振元件的仿真分析及优化设计

3.1 谐振腔本征模式仿真

根据设计的腔结构, 利用 ansys 软件计算其 Q 值和谐振频率, 如表 1 所示。假设表面 $SR = 0.1 \mu\text{m}$, 可以看出, 谐振腔的谐振频率为 24.313 299 GHz, 其 Q 值为 3 529.707 89, 实际理论推导频率为 24.642 8 GHz。图 7 所示的是内磁场矢量图, 磁场沿圆弧方向旋转, 说明谐振模式是 TM_{010} 模式。仿真和推导误差很小, 说明谐振腔仿真结果和理论值吻合得很好。

表 1 谐振腔 ansys 软件分析

Tab. 1 Analyses with software of ansys

Summary of Quality Factor Calculation Q 值计算	
频率(f)	24.313 299 GHz
质量因子(介电损耗)(Q 值)	1 384 507.3
质量因子(表面损耗)(Q 值)	3 538.729 64
质量因子(介电和表面损耗)	3 529.707 89

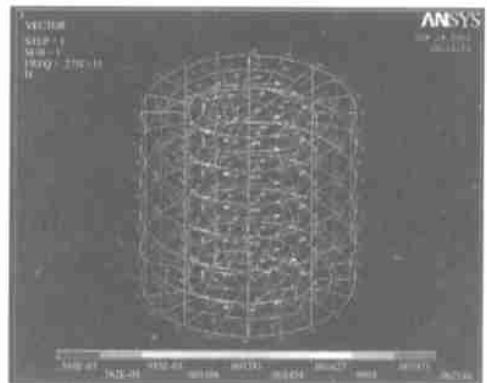


图 7 谐振腔内磁场矢量图

Fig. 7 Schematic of electromagnetic field of resonator cavity

3.2 微机械谐振元件仿真分析

当将微机械圆柱谐振腔和微带经过微细加工技术加工成一微机械元件时, 模型如图 4, 图 5 所示。下面利用微波工作室软件 CST 对微机械谐振元件进行仿真分析, 最后得出最佳频率。假设腔体的 SR= 0.1 μm , 微带的 SR= 0.1 μm , 计算出的 SII 参数曲线如图 8 所示。可以看出, 在频率为 24.75GHz 的时候, 其损耗最小。结构仿真计算最佳谐振频率为 24.75 GHz, 软件计算过程如表 2 所示, 谐振腔的谐振频率的理论值为 24.642 8 GHz, 平均误差不到 1%, 说明仿真结果和理论值吻合得很好。

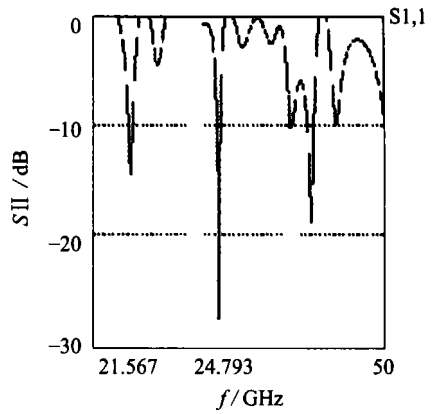


图 8 SII 参数曲线图

Fig. 8 Schematic of SII

表 2 复合结构的本征频率优化分析

Tab.2 Optimum analyses of eigermode frequency

模型数量	频率(GHz)	精确度			
		$ (Ax - x) / x$	Max(e)	Div(e)	Rotrot(e)
1	9.685 492 74e+ 000	4.89e- 010	3.71e- 003	9.74e- 008	8.62e- 005
2	1.216 911 87e+ 001	2.46e- 010	1.75e- 003	9.14e- 008	4.64e- 005
3	1.553 485 52e+ 001	7.82e- 011	1.01e- 003	9.51e- 008	2.72e- 005
4	1.829 429 61e+ 001	7.25e- 012	8.64e- 004	1.27e- 007	1.37e- 005
5	1.971 613 29e+ 001	6.41e- 011	5.32e- 004	1.23e- 007	1.30e- 005
6	2.098 645 04e+ 001	2.47e- 011	5.44e- 004	1.19e- 007	1.29e- 005
7	2.144 696 99e+ 001	1.33e- 011	6.26e- 004	1.20e- 007	1.06e- 005
8	2.275 204 15e+ 001	6.87e- 011	3.12e- 004	1.20e- 007	1.06e- 005
9	2.364 000 51e+ 001	2.25e- 011	9.11e- 004	1.25e- 007	1.06e- 005
10	2.475 004 72e+ 001	1.49e- 011	8.51e- 004	1.13e- 007	1.19e- 005

最佳本振频率为: 24.75 GHz

4 结 论

目前, 典型的基于腔体结构的微机械谐振元件是基于 X 波段的谐振元件^[15]。本文利用介质谐振理论方法研究了圆柱形谐振腔与微带构成的微机械谐振元件的设计方法, 得出了该元件的结构参数与性能参数。最后利用两种不同计算方法软件(有限元法和有限差分法, 其中 ansys 软件基于有限元法, CST 软件基于有限差分法) 对元件模型进行了仿真分析。结果表明, 研究设计的微机械谐振元件参数的理论值和仿真值吻合得很好, 证明了该设计的可行性, 进一步说明了可利用介质谐振器的经典电磁场理论来分析设计微机械器件的电磁特性。基于腔结构的复合元件的微机械谐振器相对其他结构的微机械谐振元件而言, 具

有高频率、低损耗、结构简单、容易加工、成本低等特点, 并可在腔体中加入介质, 有效减小了谐振频率, 从而克服了以往的谐振腔结构在低频段时尺寸过大, 同集成电路加工技术难兼容等问题。目前基于腔结构微机械谐振器的研究还处于起步探索阶段, 主要还需要解决以下几个问题, 深度微细加工工艺、微机械腔损耗、微小尺度理论、信号稳定等。

当然, 本文在设计研究过程中, 忽略了一些因素, 如要真正实现其实际应用, 还需要进一步探索以下几点: (1) 微带线本身损耗, 包括机械损耗, 主要是表面粗糙度的损耗, 当频率很高(如 > 25 GHz) 时, 可能会在传输微带中激发起其他的传导模式, 这就在几种模式之间会产生干扰, 带来了信号的失真; (2) 复合腔微机械谐振腔各个硅片之间的键合损耗, 谐振腔壁面的粗糙度损耗, 谐振腔的

能量和封闭壳之间的介质损耗, 谐振腔和基片之间的损耗; (3) 微细加工工艺, 只是提出了微细加工的基本思路和材料的选择, 真正的具体实现过

程还需要进一步依靠试验设备研究; (4) 如何克服其他模式激励问题; (5) 微机械谐振器件封装等问题。

参考文献:

- [1] 李勇, 李玉和, 李庆祥, 等. 体硅工艺静电致动微夹持器的试验研究[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(1): 1-5.
LI Y, LI Y H, LI Q X, et al. Electrostatically actuated microgripper based on silicon bulk micromachining[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 11(1): 1-5. (in Chinese)
- [2] KIM CH W, SONG I, SONG C, et al. A micromachined cavity resonator for millimeter-wave oscillator applications[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 83(1-3): 1-5.
- [3] 巫正中, 钟先信, 李晓毅, 等. 微机械多层短接式蓝牙天线[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(6): 572-575.
WU ZH ZH, ZHONG X X, LI X Y, et al. Multilayer shorted micromachined Bluetooth antenna[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(6): 572-575.
- [4] CLARK J R, HSU W H, NGUYEN C T C. High Q VHF micromechanical contour mode disk resonator[C]. *Technical Digest, IEEE Int Electron Devices Meeting, San Francisco, California*. 2000. 493-496.
- [5] 卢国铭, 姜遵富, 黄伟嘉译. 微波器件和电路[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 94-103.
LU G M, JIANG Z F, HUANG W J. *Microwave devices and circuits*[M]. Beijing: Science Press, 1987. 94-103. (in Chinese)
- [6] 陈国瑞. 工程电磁场与电磁波[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. 224-232.
CHEN G R. *Electromagnetic field and wave of engineering*[M]. Xi'an: Northwest Ploytechnical University Press, 1998. 224-232. (in Chinese)
- [7] 李英编. 电磁介质谐振器理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1988. 259-265.
LI Y. *The theories and applications of electromagnetism medium resonators*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1988. 259-265. (in Chinese)
- [8] Chi CH Y, Rebeiz G M. Conductor loss limited stripline resonator and filters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, 44(4): 626-629.
- [9] Don L DeVoe, Piezoelectric thin film micromechanical beam resonators[J]. *Sensor and Actuators A*, 2001, 88(3): 263-272.
- [10] 王子宇, 张肇仪, 徐承和. 射频电路设计—理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 375-378.
WANG Z Y, ZHANG ZH Y, XU CH H. *RF circuit design: theory and applications*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. 2002. 375-378. (in Chinese)
- [11] 白向钰, 吴苏, 鹿安理, 等. 陶瓷材料微波加工用高均匀多模谐振腔的研究[J]. 清华大学学报, 1998, 38(2): 37-39.
BAI X Y, WU S, LU AN L, et al. Study on the multimode cavity with high uniformity used for microwave processing of ceramics[J]. *Journal of Tsinghua University*, 1998, 38(2): 37-39. (in Chinese)
- [12] 张立国, 陈迪, 杨帆, 等. SU-8 胶光刻工艺研究[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(3): 266-270.
ZHANG L G, CHEN D, YANG F, et al. Research on SU-8 resist photolithograph process[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(3): 266-270. (in Chinese)
- [13] 李呈德, 万盈, 陈涛, 等. 准分子激光直刻微加工制作微机械[J]. 中国科学(E), 2001, 31(1): 14-19.
LI CH D, WAN Y, CHEN T. Excimer laser direct writing micro machining micromechanism[J]. *Science in China (Series E)*, 2001, 31(1): 14-19 (in Chinese)
- [14] STICKEL M, ELEFTHERIADES G V, KREMER P. A high Q bulk micromachined silicon cavity resonator at Ka band[Z]. *Accepted for Publication in Electronic Letters*.
- [15] JOHN P, CHENG J CH, Linda P B. A micromachined high X band resonator[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1997, 7(6): 168-170

作者简介: 李应良(1979-), 男, 贵州册亨县人, 1999年毕业于贵州工业大学应用电子技术专业, 现为重庆邮电学院研究生, 主要研究方向为 RF MEMS 及移动通信. E-mail: sea2599@vip.sina.com; lyld@etang.com