**文章编号:**1004-2474(2019)06-0775-04

# 300 MHz 氮化铝轮廓模式谐振器的设计

袁 靖,高 杨,许夏茜

(西南科技大学信息工程学院,四川 绵阳 621010)

摘 要:氮化铝轮廓模式谐振器(CMR)能够满足现代无线通信对单片、多频段、可重构的多频率源的需求,具有 很大的应用前景。针对目前无具体单个 CMR 频点的设计方法,提出了一种结合 CMR 性能参数的影响因素分析和有 限元计算的 CMR 设计方法。该文对 CMR 的谐振频率、质量因子、机电耦合系数和动态电阻等谐振器主要性能参数 的影响因素进行理论分析得到 CMR 结构的初始尺寸,再利用 COMSOL 有限元软件建立 CMR 几何模型并进行频域 求解得到相应的频率-导纳曲线和频率-质量因子曲线;根据仿真结果和理论计算对 CMR 初始结构尺寸进行优化,并 仿真设计了一个氮化铝 CMR,其谐振频率为 300 MHz,质量因子约为1 010,机电耦合系数约为1.64%。

关键词:轮廓模式谐振器;氮化铝;谐振频率;动态电阻;质量因子;机电耦合系数

中图分类号:TN713+.2 文献标识码:A DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2019.06.003

## Design of 300 MHz AIN Contour-Mode Resonator

#### YUAN Jing, GAO Yang, XU Xiaxi

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: AlN contour-mode resonator (CMR) can meet the needs of modern wireless communication for single chip, multi-band, reconfigurable multi-frequency sources, and has great application prospects. Aiming at the current design method without a specific single CMR frequency point, a CMR design method combining the influence factor analysis of CMR performance parameters and the finite element calculation is proposed in this paper. Firstly, the influence factors of the main performance parameters of CMR, such as the resonance frequency, the quality factor, the electromechanical coupling coefficient and the dynamic resistance, are analyzed theoretically to get the initial size of the CMR; Then the geometric model of CMR is established by using COMSOL finite element software and the corresponding frequency-admittance curve and frequency-quality factor curve are obtained by solving frequency domain. According to the simulation results and theoretical calculations, the initial structural size of CMR is optimized and simulated. An AlN CMR with resonant frequency of 300 MHz, quality factor of about 1 010 and electromechanical coupling coefficient of about 1.64% is designed.

Key words:contour-mode resonator; AlN; resonance frequency; dynamic resistance; quality factor; electromechanical coupling coefficient

#### 0 引言

近年来,先进的无线通信系统对单片多频段的 射频解决方案的需求正在稳步增长,这就需要紧凑、 低成本和高性能的射频组件<sup>[1]</sup>。而微机电系统 (MEMS)谐振器的出现满足了现代通信系统对谐 振器的要求。基于静电<sup>[2]</sup>和压电换能<sup>[3]</sup>的不同谐振 器技术已有研究,在这些谐振器中,氮化铝轮廓模式 谐振器(CMR)由于其谐振频率只由谐振平面尺寸 决定,通过互补金属氧化物半导体(CMOS)振荡电 路可将多个不同谐振频率的器件集成在一起,实现 频率可调的功能,已成为最有希望在同一硅芯片上 制造多频率和高性能的谐振器<sup>[4]</sup>。G. Piazza 等<sup>[5]</sup> 最先提出了一种新型矩形盘和圆形环结构的氮化铝 CMR,其谐振频率为 19~656 MHz,并具有高质量 因子和低动态阻抗。Stephanou P 等<sup>[6]</sup>在矩形盘 CMR 基础上提出通过选择性的图案化电极和路由 电激励波形法,激励 CMR 工作在高阶模态,进而达 到吉赫兹以上高频率。文献[5-6]主要集中在对

收稿日期:2019-07-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61574131);西南科技大学研究生创新基金资助项目(19ycx0113)

作者简介:袁靖(1997-),男,四川广安人,硕士生,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:1390327211@qq.com。通信作者:高杨 (1972-),男,山西临县人,研究员,博士,主要从事微电子机械系统的研究。E-mail:29636791@qq.com。

CMR 结构和对电极图案化的改进设计,追求更高的 CMR 谐振频率,并未明确给出具体单个 CMR 频 点的设计方法。针对该问题,本文提出了一种结合 CMR 性能参数分析和有限元的 CMR 设计方法。 该方法首先对 CMR 谐振频率、质量因子、机电耦合 系数和动态电阻等谐振器性能参数的影响因素分析 得到 CMR 初始的结构尺寸,然后在 COMSOL 中建 立 CMR 的几何模型并进行频域求解,并根据仿真 结果和理论计算对 CMR 初始结构尺寸进行优化。 以 300 MHz CMR 设计为案例来描述该方法的具体 流程。

1 AIN CMR 原理

AlN CMR 传统结构为"三明治"结构,如图 1 所示。当通过 AlN 厚度 T 方向外加一电场 E 时, 弹性电介质内部正、负电荷的中心相对位移进行极 化,可以使用压电耦合系数 d<sub>31</sub>。转换产生横向的质 子运动,从而引起形变形成轮廓伸缩模式的振动<sup>[7]</sup>。 图中,E 为电场,W 为 AlN 宽度,L 为 AlN 长度。



图 1 CMR"三明治"结构

横向振动的谐振频率为

$$f_{0} = \frac{1}{2W} \sqrt{\frac{E_{eq}}{\rho_{eq}}} \tag{1}$$

式中: $E_{eq}$ 为 AlN 杨氏模量; $\rho_{eq}$ 为等效体密度。式 (1)表明谐振频率主要取决于  $W \ E_{eq} \ \rho_{eq}$ ,而与 AlN 薄膜的厚度 T 无关。可以独立地选择其他 2 个几 何尺寸、长度 L 和 T 来设置谐振器静态电容  $C_0$  及 其动态电阻  $R_m$ ,即

$$C_0 \propto \frac{LW}{T} \tag{2}$$

$$R_{\rm m} \propto \frac{T}{L}$$
 (3)

本文采用在谐振点附近近似等效电路的 Butterworth Van-Dyke(BVD)模型来分析"三明治"结 构的谐振特性如图 2 所示。图中, $C_m$ 、 $L_m$ 分别为与 机械振动相关的动态电容、动态电感<sup>[8]</sup>。



图 2 BVD 等效电路

"三明治"结构宽度伸缩模式下 BVD 表达式为

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{33} \, \frac{WL}{T} \tag{4}$$

$$C_{\rm m} = \frac{8}{\pi^2} \frac{WL}{T} E_{\rm eq} d_{31}$$
 (5)

$$L_{\rm m} = \frac{L^2}{8C_0 k_{\rm t}^2} \frac{\rho_{\rm eq}}{E_{\rm eq}} \tag{6}$$

$$R_{\rm m} = \frac{\pi}{8} \frac{T}{L} \frac{\rho_{\rm eq}^{1/2}}{E_{\rm eq}^{3/2} d_{31}^2 Q_{\rm s}}$$
(7)

式中: $\epsilon_0$ 为自由空间介电常数; $\epsilon_{33}$ 为AlN介电常数;  $d_{31}$ 为AlN压电常数; $Q_s$ 为串联谐振质量因数; $k_1^2$ 为机电耦合系数。

## 2 AIN CMR 初始设计

AlN CMR 设计要求:谐振频率为 300 MHz,高 质量因子  $Q \pi k_1^2$ ,低的  $R_m$ 。其中 AlN 的声学属性 为:密度 3 300 kg/m<sup>3</sup>,杨氏模量 3.89×10<sup>11</sup> Pa,  $d_{31} = -1$ .915 9 pC/N。CMR 金属电极选用 Al 电极。

#### 2.1 谐振频率分析

CMR 的谐振频率主要由谐振器平面尺寸决定,由式(1)可算出 300 MHz CMR AlN 宽度的初始尺寸。

#### 2.2 质量因子分析

Q定义为在一个周期内,谐振器储存能量与耗 散能量之比,受各种耗散机制的影响,可以表示为<sup>[9]</sup>

$$Q = \left(\frac{1}{Q_{\text{material}}} + \frac{1}{Q_{\text{air}}} + \frac{1}{Q_{\text{anchor}}}\right)^{-1}$$
(8)

式中 Q<sub>material</sub>, Q<sub>anchor</sub>, Q<sub>air</sub>分别为材料损耗、锚点损耗、 空气阻尼损耗。

Q<sub>material</sub>包括固有谐振结构所有能量损耗机制, 与声能到热能不可逆的转换相关。材料损耗可以用 声衰减系数 α 来量化,α 增大会导致 Q 减小。Q<sub>material</sub> 随电极厚度、AlN 厚度增加而增大,在设计时需尽 可能减小电极层和 AlN 层厚度。 Q<sub>anchor</sub>是由锚点引起的机械振动导致系统机械 能溢出。矩形板谐振器有不同的锚固方案,如图 3 所示,A,B方案的锚点在矩形板宽度方向,C,D方 案的锚点在长度方向,B,D方案使用两个支撑梁能 够提高谐振器的稳定性,减少杂散模式。一般情况 下,较短和较薄的支撑梁能提高 CMR 的 Q。

Q<sub>air</sub>不是一个重要的损耗机理,因为可使 CMR 工作在真空状态下来抑制空气阻尼的损耗。



2.3 机电耦合系数分析

CMR 要特别注意电极的图案化,它不仅决定 谐振器的  $R_{m}$ ,且也决定  $k_{t}^{2}$ 。对于矩形板 CMR,  $k_{t}^{2}$  为<sup>[10]</sup>

$$k_{\rm t}^2 \propto \frac{W_{\rm res}}{W_{\rm el}} \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{W_{\rm el}}{W_{\rm res}}\right) \right]^2 \tag{9}$$

式中 W<sub>res</sub>, W<sub>el</sub>分别为谐振器和电极的宽度(见图 4)。最大的电极宽度约为谐振器宽度的 3/4 时,在 CMR 初始设计时可以先把 W<sub>el</sub>设为 W<sub>res</sub>的 3/4。



#### 2.4 R<sub>m</sub>分析

为了使 MEMS 谐振器与 50 Ω 系统阻抗匹配, 在设计时应减小 R<sub>m</sub>。R<sub>m</sub>受 Q k<sub>t</sub><sup>2</sup> 和 C<sub>0</sub>等影响。其 相互关系<sup>[11]</sup>满足:

$$R_{\rm m} \propto \frac{1}{C_0 Q k_{\rm t}^2} \tag{10}$$

在初始设计时选择适当的 L 来提高 C<sub>0</sub> 以减 小 R<sub>m</sub>。

根据对 CMR 参数性能分析,得到 CMR 结构的 初始尺寸如表 1 所示。由 CMR 结构的初始尺寸在 COMSOL 中建立 3D 几何结构图(见图 5(a)),在对 其进行频域求解,可得到导纳曲线和振型及频率-质 量因子曲线分别如图 5(b)~(d)所示。

	表 1	CMR 结构	的初始尺	寸
Al	顶电极	底电极	电极	电极
	厚度/m	厚度/m	宽度/m	长度/m
	0.1	0.1	14	100
AlN -	压电层厚度/	m 压电层	宽度/m )	压电层长度/m
	1		18	100
支撑梁宽度/m			支撑梁长度/m	
	97		4	



图 5 初始设计 CMR 几何原理图、振型、导纳-频率曲线及 频率-质量因子曲线

CMR 初始仿真结果表明,串、并联谐振频率  $f_s, f_p$ 分别为 292 MHz 和 294 MHz,Q 约为 1 000,  $R_m = 253 \Omega, k_t^2$  可由下式计算得

$$k_{\rm t}^2 = \frac{\pi^2}{4} \frac{f_{\rm p} - f_{\rm s}}{f_{\rm s}} \times 100\% \approx 1.69\%$$
(11)

3 AIN CMR 优化设计

由 CMR 初始仿真结果可知, CMR 谐振频率偏低, R<sub>m</sub>过高且谐振频率点附近存在杂散模式。

谐振频率偏低是由于 CMR 的谐振频率会受到 锚点和电极厚度的影响导致频率偏移,由于频率偏 移量小,通过减小叉指电极的尺寸来提高谐振频率。

*R*<sub>m</sub>过高是因为在初始设计时并未过多考虑 *R*<sub>m</sub>。谐振频率点附近存在杂散模式的原因是 300 MHz CMR 横向尺寸的减少,将导致器件 *C*<sub>0</sub> 大 幅度下降,以至于其值可能低于支撑衬底的寄生电 778

容。这些寄生效应对谐振器的电响应产生负面影响 且可以完全屏蔽谐振器输出信号<sup>[12]</sup>。对此采用机 械耦合3个子谐振器,子谐振器的宽度为已缩放到 300 MHz的尺寸,采用正、负电极交错纵向激励 (TFE)谐振器工作在高阶谐振模态下,用来降低 R<sub>m</sub> 和抑制杂波如图 6 所示。



图 6 正、负电极交错激励谐振器

优化后的 CMR 结构尺寸如表 2 所示。在 COMSOL 中建立 3D 几何结构图(见图 7(a)),再对 其进行频域求解可得到导纳曲线、振型及频率-质量 因子曲线如图 7(b)~(d)所示。

表 2 CMR 结构的优化尺寸

	顶电极	底电极	电极	电极
Al	厚度/m	厚度/m	宽度/n	n 长度/m
	0.1	0.1	13	91
AlN	压电层厚度/r	n 压电层	宽度/m	压电层长度/m
	1	1	8	100
	支撑梁宽度/r	n 支撑梁	长度/m	叉指数量
	20		4	3



图 7 优化后 CMR 几何原理图、振型、导纳-频率曲线及 频率-质量因子曲线

CMR 结构优化后仿真结果表明,  $f_s =$  300 MHz,  $f_p =$  302 MHz,  $Q \approx 1$  010,  $R_m =$  86  $\Omega$ ,  $k_t^2 \approx 1.64\%$ 。

### 4 结束语

本文介绍了一种具有低动态电阻,高Q值及能够在同一衬底上制造多个不同谐振频率的 AlN CMR。为了得到具体的单个 CMR 频点,提出了一种结合 CMR 性能参数的影响因素分析和有限元计算的 CMR 设计方法,并以一个 300 MHz CMR 仿真设计为例,展示了该方法具体的设计流程。

## 参考文献:

- [1] RINALDI M, ZUO C, DER SPIEGEL J V, et al. Reconfigurable CMOS oscillator based on multifrequency AlN contour-mode MEMS resonators[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011,58(5):1281-1286.
- [2] WEINSTEIN D, BHAVE S A. Internal dielectrictransduction of a 4.5 GHz silicon bar resonator[C]//S. l. : IEEE International Electron Devices Meeting, 2007.
- WANG J, REN Z, NGUYEN C. 1. 156 GHz self-aligned vibrating micromechanical disk resonator [J].
  IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(12):1607-1628.
- [4] ZUO C, SINHA N, SPIEGEL J V D, et al. Multi-frequency pierce oscillators based on piezoelectric AlN contour-mode mems resonators[C]//S. l. : IEEE International Frequency Control Symposium, 2008:400-407.
- [5] PIAZZA G, STEPHANOU P J, PISANO A P. Piezoelectric aluminum nitride vibrating contour-mode MEMS resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(6):1406-1418.
- [6] STEPHANOU P J, PISANO A P. PS-4 GHz contour extensional mode aluminum nitride MEMS resonators [C]//S. l. : 2006 IEEE Ultrasonics Symposium, 2007.
- [7] RINALDI M, ZUNIGA C, ZUO C, et al. Super-high-frequency two-port AlN contour-mode resonators for RF applications[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(1): 38-45.
- [8] RINALDI M, ZUNIGA C, ZUO C, et al. AlN contourmode resonators for narrow-band filters above 3 GHz [C]//S. l. : IEEE International Frequency Control Symposium, 2009:70-74.
- [9] GRYBA T, CARLIER J, WANG S, et al. One port contour-mode ZnO piezoelectric MEMS resonator[J]. Microelectronic Engineering, 2011,88(9):3003-3010.
- [10] PIAZZA G, STEPHANOU P J, PISANO A P. One and two port piezoelectric contour-mode MEMS resonators for frequency synthesis [C]//S. l. : European Solid-state Device Research Conference, 2007.
- [11] 杨健,韩国威,司朝伟,等. 氮化铝面内伸缩模态谐振器 的研究现状[J]. 微纳电子技术,2014,51(6):374-380.
- [12] ZUO C, SINHA N, SPIEGEL J V D, et al. Multifrequency pierce oscillators based on piezoelectric AlN contour-mode MEMS resonators[J]. Journal of Microelectromechanical, 2010, 19(3):570-580.