

# 高调节范围 RF MEMS 压控电容的设计与模拟\*

梁雪冬 刘泽文 刘理天 李志坚

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

**摘要:** 对传统平行极板 MEMS 压控电容的局限性进行了理论分析, 提出了一种新型的高调节范围 MEMS 压控电容. 它的特点在于使用了三对极板, 其中的一对是电容极板, 另外两对是控制极板. 电容极板用于传输交流信号, 而直流控制电压施加在控制极板上. 使用有限元分析软件 Ansys 对其进行了建模与仿真, 得出其调节范围高达 214%, 大大超出了传统的平板电容在调节范围上的自然限制(50%). 设计了该电容的工艺流程. 其工艺流程比较简单, 很容易集成在标准的 CMOS 集成电路中.

**关键词:** MEMS 压控电容; 崩塌效应; 牺牲层; 聚酰亚胺

EEACC: 2130; 1210; 2575

中图分类号: TM532.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)S0-0179-04

## 1 引言

随着射频通讯技术的发展, 微型化和可集成的无源器件越来越受到研究人员的重视. 由于 MEMS 技术易于制作带有调节功能的器件, 同时 MEMS 器件具有高  $Q$  值、低损耗的特点, 因此 RF MEMS 有广阔的发展前景. 对一些典型的射频电路, 例如压控振荡器(VCO)和滤波器, 已经有不少集成 MEMS 电感或 MEMS 电容的报道. 例如, Dec 和 Suyama 提出了一种集成了一个调节范围为 38% 的 MEMS 电容的压控振荡器<sup>[1]</sup>. 在压控振荡器中, 调频范围是一个重要的性能参数. 调频范围的大小完全由其中的压控电容的调节范围决定. 因此我们需要一个高调节范围的电容. 但是, 由于崩塌效应(pull-in effect)的存在, 传统的 MEMS 平板电容的理论调节范围不能超过 50%. 于是, 提出一种高调节范围的压控电容成为研究工作的焦点. Dec 和 Suyama 提出了一种由两个固定极板及一个悬挂极板构成的电容, 其调节范围为 87%<sup>[2]</sup>. 但是它有两层悬浮结构, 需要两层牺牲层, 因此制作工艺复杂. Zou 等提出了一种“凹”字型结构的压控电容<sup>[3]</sup>. 其调节范围为

69.8%, 仅略大于传统的平行极板 MEMS 电容的理论调节范围. 同时, 它用到了铜牺牲层技术以及电镀工艺, 实现较为困难.

我们设计了一种全新结构的 MEMS 压控电容, 只有一层悬浮结构, 因此其工艺流程比较简单, 只用了一层牺牲层. 我们使用有限元分析软件 Ansys 对其进行了模拟, 得出其调节范围高达 214%, 远高于传统的 MEMS 平板电容的调节范围. 该电容使用标准的表面 MEMS 工艺制造, 因此可以很容易地集成在标准 CMOS 集成电路当中.

## 2 MEMS 平板电容的理论分析

首先, 我们建立一个 MEMS 平板电容的理论模型(图 1). 它由一个活动极板与一个固定极板构成. 设极板的面积为  $S$ , 加在两极板间的直流电压为  $V$ , 两极板的间距为  $d$ . 当  $V=0$  时, 两极板的初始间距为  $d_0$ . 于是电容值可以表示为

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (1)$$

极板上的面电荷密度为

\* 国家重点基金研究发展规划资助项目(No. G1999033105)

梁雪冬 男, 1976 年出生, 硕士研究生, 主要从事 RF 电路设计及 RF MEMS 器件的研究.

$$\sigma = \frac{CV}{S} \quad (2)$$

于是两极板间的静电引力可以表示为

$$F_e = \frac{1}{2} \times \frac{\sigma}{\epsilon} \times \sigma S = \frac{1}{2} \times \frac{CV^2}{d} = \frac{1}{2} \times \frac{\epsilon SV^2}{d^2} \quad (3)$$

把静电力视作一个等效的弹簧,其弹性系数可定义为

$$k_e = \left| \frac{\partial F_e}{\partial d} \right| = \frac{\epsilon SV^2}{d^3} \quad (4)$$

悬臂梁也可等效为一个弹性系数为  $k_m$  的弹簧. 悬臂梁发生形变后,产生的回复力设为  $F_m$ ,可表示为

$$F_m = k_m(d_0 - d) \quad (5)$$

达到平衡时,  $F_e$  和  $F_m$  大小相等,因此

$$k_m(d_0 - d) = \frac{1}{2} \times \frac{\epsilon SV^2}{d^2} = \frac{1}{2} k_e d \quad (6)$$

在方程(6)中,  $k_m$  是一个恒量,而  $k_e$  随着  $V$  的增加而增加. 当  $d$  的值变化到  $\frac{2}{3}d_0$  时,  $k_m$  将和  $k_e$  相等. 如果电压继续增加,平衡将被打破,由于悬臂梁不能提供足够的回复力去对抗静电引力,因此两极板将吸合到一块. 这就是崩塌效应. 于是理论上的最大调节范围被限制在 50%.

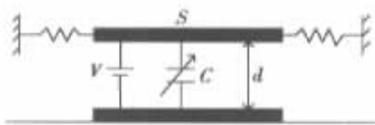


图1 MEMS 平板电容的模型

Fig. 1 Model of MEMS parallel-plate capacitor

### 3 新型高调节范围 MEMS 电容的设计与模拟

该电容的结构如图 2 所示. 它由三对极板构成,分别标记为  $P_1, P_2, E_1, E_2$ .  $P_1, P_2$  是电容极板,  $E_1, E_2$  是控制极板. 在使用的时候,直流电压  $V_{DC}$  加在  $E_1$  和  $E_2$  之间. 假设  $V_{DC} = 0$  时,  $P_1, P_2$  的初始间距为  $d_0$ ,  $V_{DC}$  不为 0 时,  $P_1, P_2$  的间距为  $d_1$ ,  $E_1, E_2$  的间距为  $d_2$ ,我们可以推断  $d_1 < d_2$ . 当崩塌效应发生时,  $d_2$  约等于  $\frac{2}{3}d_0$ , 因此  $d_1 < \frac{2}{3}d_0$ , 于是我们得到了超过 50% 的调节范围. 为了证实我们的推断, 并且得到调

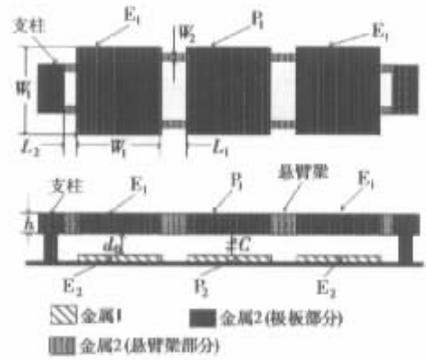


图2 新型 MEMS 电容结构图

Fig. 2 Structure of novel MEMS capacitor

节范围的确切数据,使用有限元分析软件 Ansys 进行了模拟. 模拟程序如下:首先,建立电容及介质层的几何模型. 然后,加上电压以及束缚. 第三,用合适的尺寸将整个模型栅格化. 最后,使用 Ansys 中的耦合计算工具进行模拟. 耦合计算的流程如图 3 所示. 模拟结果显示在表 1 中. 其中  $d_1(\min)$  和  $d_2(\min)$  分别表示在崩塌效应发生的临界点  $d_1$  和  $d_2$  的值.



图3 耦合计算流程图

Fig. 3 Process of coupled caculation

表 1 新型电容的结构参数与模拟结果

Table 1 Structure parameters and simulation results of novel capacitor

	$W_1/\mu\text{m}$	$W_2/\mu\text{m}$	$L_1/\mu\text{m}$	$L_2/\mu\text{m}$	$h/\mu\text{m}$	$d_0/\mu\text{m}$	$V_{\text{ctrl}}/\text{V}$	$d_1(\text{min})/\mu\text{m}$	$d_2(\text{min})/\mu\text{m}$	$C_{\text{min}}/\text{pF}$	$C_{\text{max}}/\text{pF}$	Tuning range/%
1	200	10	90	50	3	2	6.1	0.65	1.38	0.177	0.545	208
2	200	10	120	40	3	2	6.6	0.638	1.427	0.177	0.555	214
3	200	10	100	30	3	2	7.3	0.642	1.484	0.177	0.552	212

### 4 工艺流程设计

该电容用表面 MEMS 工艺制造. 衬底材料为 Si(100). 极板、悬臂梁以及支柱由铝制成. 我们使用聚酰亚胺作为牺牲层材料. 制作工艺流程如图 4 所示. 首先, 在硅衬底上长一层  $0.05\mu\text{m}$  厚的氧化层 (图 4(a)); 其次, 溅射一层  $0.5\mu\text{m}$  厚的铝并且进行光刻, 形成下极板及金属连线的图形 (图 4(b)). 第三, 用 PECVD 工艺淀积一层  $0.2\mu\text{m}$  厚的氮化硅并

进行光刻, 形成过电压保护结构 (图 4(c)). 第四, 涂一层  $2\mu\text{m}$  厚的聚酰亚胺作为牺牲层. 第五, 溅射一层  $0.5\mu\text{m}$  厚的铝并且光刻, 作为刻蚀聚酰亚胺的阻挡层, 然后用氧气等离子体刻蚀聚酰亚胺形成支柱孔 (图 4(e)). 第六, 溅射一层  $2\mu\text{m}$  厚的铝并且光刻形成上极板与悬臂梁 (图 4(f)). 最后, 除去聚酰亚胺牺牲层, 并且清洗烘干 (图 4(g)). 可以看出, 此工艺流程是比较简单的.

### 5 工艺实现

按照工艺流程设计, 我们在  $1\mu\text{m}$  工艺线上进行了流片, 之后进行了光学显微镜照相 (图 5). 流片过程与工艺设计一致, 非常顺利.

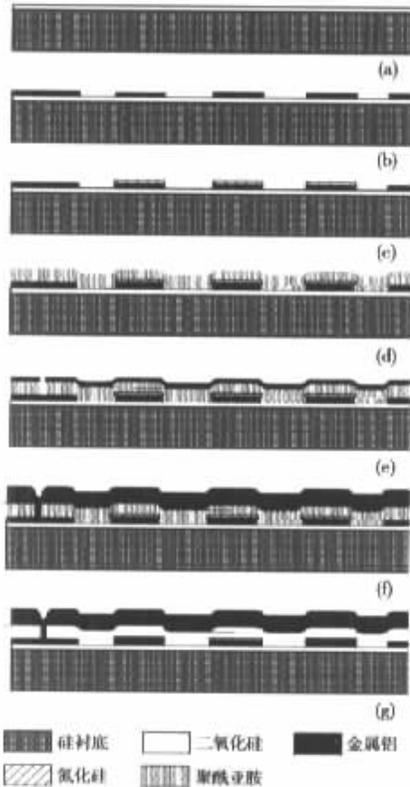


图 4 制作工艺流程图  
Fig. 4 Process of fabrication

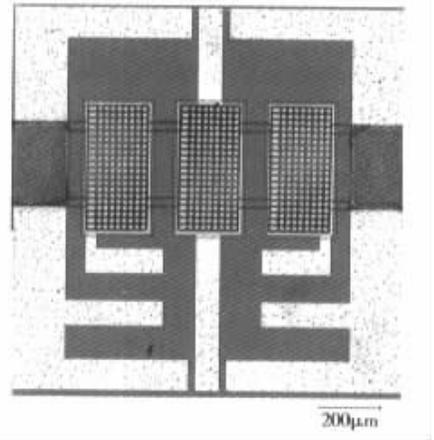


图 5 电容顶视图光学显微镜照片  
Fig. 5 Photomicrograph for capacitor

### 6 结果与讨论

根据模拟结果, 与国外同类设计比较可知, 本电容在性能与工艺实现方面都有着很大的优越性. 具体情况在表 2 中列出.

表 2 与同类设计在性能与工艺特点上的比较

Table 2 Comparison of performances and process

参考文献	[2]	[3]	本设计
电容值 /pF	3.40~6.35	0.057~0.084	0.177~0.555
调节范围	87%	69.8%	214%
工艺特点	两层牺牲层, 工艺较复杂	铜牺牲层,电镀工 艺,工艺较复杂	聚酰亚胺牺牲层,普通 甩胶工艺,工艺简单

## 7 结论

我们设计了一种全新结构的高调节范围 MEMS 压控电容. 通过模拟得出其调节范围高达 214%. 另一方面,它的制造工艺简单,与标准 CMOS 工艺兼

容,很容易集成在 RF CMOS 电路中.

## 参考文献

- [ 1 ] Dec A, Suyama K. A 1.9GHz CMOS VCO with micromachined electromechanically tunable capacitors. IEEE J Solid-State Circuits, 2000, 35(8):1231
- [ 2 ] Dec A, Suyama K. Micromachined electro-mechanically tunable capacitors and their applications to RF IC's. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1998, 46(12):2587
- [ 3 ] Zou Jun, Liu Chang, Jose S A, et al. Development of a wide tuning range MEMS tunable capacitor for wireless communication systems. Technical Digest of International Electron Devices Meeting, 2000:403

# Design and Simulation of a High-Tuning-Range RF MEMS Voltage-Controlled Capacitor\*

Liang Xuedong, Liu Zewen, Liu Litian and Li Zhijian

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Based on the analysis to the traditional parallel-plate capacitor, we present a novel MEMS tunable capacitor with a wide tuning range. Different from the conventional parallel-plate capacitors, this capacitor consists of three pairs of plates. One pair of them is used as capacitor plates, and the other two are used as controlling plates. AC signal passes through the capacitor plates while DC controlling voltage is applied between the controlling plates. By simulation with Ansys software, we get the tuning range is up to 214%, largely beyond the theoretical tuning range limit (50%) of conventional two-parallel-plate capacitors. It can be easily integrated in RF circuits for this simple process of fabrication.

**Key words:** MEMS voltage-controlled capacitor; pull-in effect; sacrificial layer; polyimide

**EEACC:** 2130; 1210; 2575

**Article ID:** 0253-4177(2003)S0-0179-04

\* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033105)

Liang Xuedong male, was born in 1976, graduate student. He is interested in RF circuit design and RF MEMS device.

Received 16 September 2002, revised manuscript received 17 October 2002

©2003 The Chinese Institute of Electronics