

静电驱动可调微机械电容^{*}

方东明[†] 付世周 勇 赵小林

(微米/纳米加工技术国家级重点实验室, 薄膜与微细技术教育部重点实验室,
上海交通大学微纳科学技术研究院, 上海 200030)

摘要: 利用简单 MEMS 技术制作了高品质因数的射频可调微机械电容. 此电容由静电驱动, 利用 WYKO NT1100 光学表面轮廓仪测量在不同外加直流电压下可变电容的表面轮廓和位移等信息. 测试结果表明, 电容的吸合电压为 13.5V, 电容可调比为 1.31 : 1, 在 1GHz 下品质因数为 51.6, 电容值为 0.79pF.

关键词: 可调电容; 射频微机电系统; 品质因数

PACC: 0710C; 7230

中图分类号: TM53

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)09-1454-05

1 引言

电容是重要的电路元件, 它是滤波器、谐振器、振荡器的重要组成部分. 射频电路需要可调范围大、高 Q 值的可变电容器, 以实现宽频调变和有关电路功能. 与传统的变容二极管相比, 用 MEMS 技术制作的微机械可调电容没有静态电流, 信号损耗较小、 Q 值较高、调节范围更宽, 在射频下具有很小的损耗, 从而可以降低电路的损耗, 提高电路的优值. 为了提高 MEMS 可调电容的 Q 值和可调范围, 许多研究人员做了有益尝试和报道, 出现了各种结构的电容, 如单电容(二极管电容)、双电容(三极板电容)、叉指(梳状)电容和一些新颖结构的电容, 这些可变电容的驱动方式主要采用了热驱动、静电驱动、压电驱动、压阻驱动和电磁驱动.

2000 年, Dec 等人^[1] 使用 MUMP 多孔硅表面微加工工艺制作了二极管可变电容, 1.9GHz 下电容值为 2.1pF, Q 值为 9.3, 电容比为 1.38 : 1. 同年, Dec 等人^[2] 还利用多晶硅表面微加工技术制作了平板可变电容, 1GHz 时 Q 值为 23, 2GHz 时 Q 值为 14, 初始电容值为 1.4pF. 2004 年, Girbau 等人^[3] 也使用 MUMP 微加工工艺制作了二极管可变电容. 当上下极板间距为 0.52 μ m 时, 1GHz 下初始电容值为 0.575pF, Q 值为 15, 电容比为 1.43 : 1.

Feng 等人^[4] 在他们的可变电容结构中采用热驱动, 以消除由于静电驱动带来的吸合效应, 获得了 270% 的可调范围. 然而, 热驱动通常响应速度慢, 比

静电驱动耗能高, 而且利用热驱动使得电容器容易受温度变化的影响. Fritsch 等人^[5] 利用表面微机械加工技术, 采用多孔硅的干法刻蚀释放 Al-1%Si 薄膜, 用牺牲层干法刻蚀工艺 (silicon sacrificial layer dry etching, SSLDE) 制作了三极板可变电容. 在 100MHz~2GHz 时, 三极板可变电容可调范围大于 100%, 控制电压范围为 0~5V, 电容范围在 4~8V 之间, 吸合电压约在 4V. 但是 SSLDE 工艺使用了 ICP 等离子体刻蚀机, 其腔体温度要低于 -110 $^{\circ}$ C. 另外一种研究较多的 MEMS 可变电容是梳状可变电容^[6~11].

Yao 等人^[12] 报道了一种 200% 的可变电容, 它采用体硅刻蚀的横向梳状结构, 梳齿 30 μ m 厚, 获得了 3.28pF 的电容值, 但 Si 的深反应离子刻蚀 (deep reactive ion etching, DRIE) 要求精确的对准曝光, 而且 DRIE 工艺涉及到对材料的各向同性和异性刻蚀问题, 对器件表面粗糙度有着一定的影响, 另外, 加工成本高也在一定程度上限制了 DRIE 的应用. 随着 MEMS 加工技术的发展, 一些新颖结构的可变电容在最近几年被制作出来^[13~15].

虽然以上文献中电容的可调范围比较高, 但品质因数在高频下都很低, 在 1GHz 下不超过 30, 这是因为他们采用复杂的工艺, 引入了诸多限制提高 Q 值的因素, 比如寄生电阻. 本文利用 Al₂O₃ 作为牺牲层, 采用 MEMS 简单工艺制作静电驱动的传统二极管可变电容, 提高了工作效率并且降低了成本, 结果表明在高频下可变电容的品质因数较高, 电容值大于 0.7pF.

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03Z301), 上海应用材料研究与发展基金(批准号:0515), 非硅精密微机械制造技术研究基金(批准号:D2320060098)和上海市纳米专项基金(批准号:0652nm004)资助项目

[†] 通信作者. Email: fangdm2005@hotmail.com

2007-03-12 收到, 2007-04-16 定稿

2 微电容的设计和制作

图 1 是微电容的结构示意图,它由上极板(固定极板)、下极板(可动极板)和四个 T 字梁组成.图 2 是 T 字梁弹性系数等效模型.当直流电压加在两端的金属衬垫上时,上下极板带有电荷,由于静电力的作用,上极板会随着弹性梁往下移动,当电压加到一定值时,静电力会超过弹性梁的回复力,上极板和下极板会发生吸合效应,此时的电压成为吸合电压(pull-in voltage).考虑到可变电容的低功耗,理想的可变电容应是控制电压低、初始电容值高、可调范围大.由于吸合效应,理论上二极板可变电容的最大可调范围为 50%,上极板由于静电力作用引起的

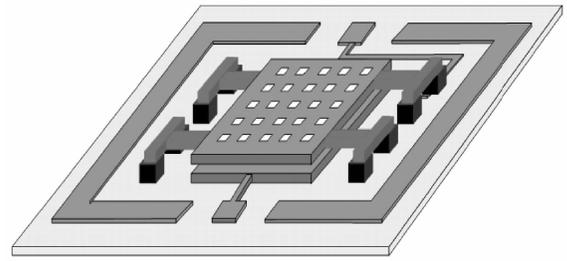


图 1 可变电容示意图

Fig.1 Schematic illustration of variable capacitor on substrate

最大位移为 $x_0/3$ (x_0 为上下极板间距),本文制作的可变电容的 x_0 为 $3\mu\text{m}$,也就是说,上极板最大位移为 $1\mu\text{m}$.

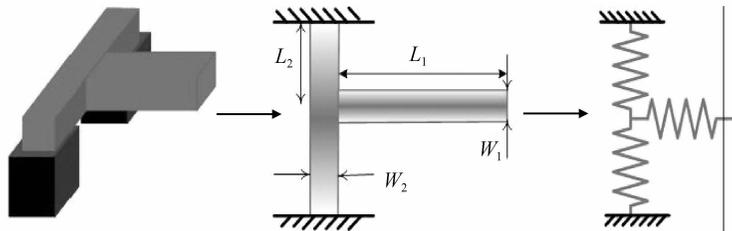


图 2 T 字梁示意图和其等效弹性模型

Fig.2 Simplified diagram and a spring model of the T-shape suspension

另外,由于设计的空气隙间距为 $3\mu\text{m}$,而极板的面积在 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 以上.对于这种情况,要考虑牺牲层的释放问题,因为牺牲层在溶液释放时由于表面张力作用而发生粘附效应,如果处理不当,很可能使电容器件受到损坏.为了降低或避免粘附效应,制作电容时在上极板上开孔或开槽,本文采用开方孔的形式.本文的结构金属材料采用 Ni,因为 Ni 在常温下的应力比较低^[16].

微电容的制作工艺见图 3,大致流程是:(a)在硅片上溅射种子层并甩胶,制作下极板、衬垫和共面波导线;(b)去胶后再甩胶,制作支撑上极板的 8 个柱子;(c)去胶、去底层种子后溅射 Al_2O_3 作为牺牲层,然后抛光抛出柱子;(d)溅射种子层并甩胶,制作上极板和 4 个 T 字悬梁;(e)无掩模曝光并去胶、去种子层,最后用 KOH 溶液刻蚀 Al_2O_3 牺牲层,电容制作完成.制作的可变电容可动极板的长、宽、高分别为 700, 700 和 $3\mu\text{m}$,悬梁的长、宽、高分别为 700, 30 和 $3\mu\text{m}$,刻蚀孔的面积为 $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$.

3 测试结果

图 4 是可变电容的 SEM 图,从图中看出,极板的表面很平整,空气隙和刻蚀孔清晰可见,说明牺牲

层 Al_2O_3 刻蚀得很成功.

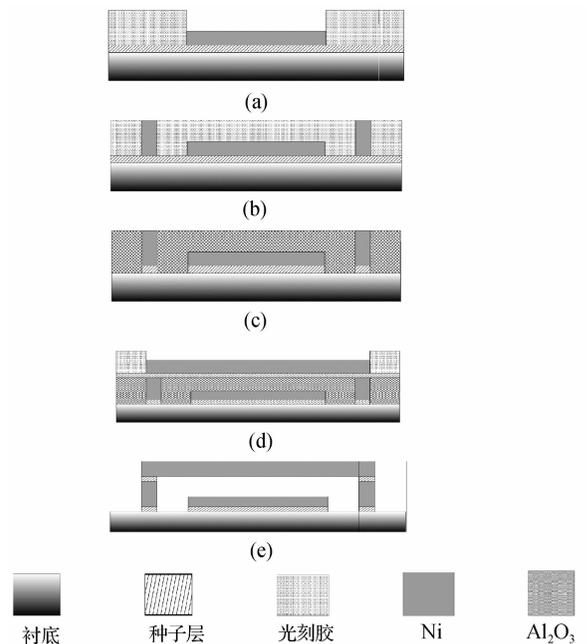


图 3 制作工艺流程图

Fig. 3 Schematic illustration of the fabrication process flow

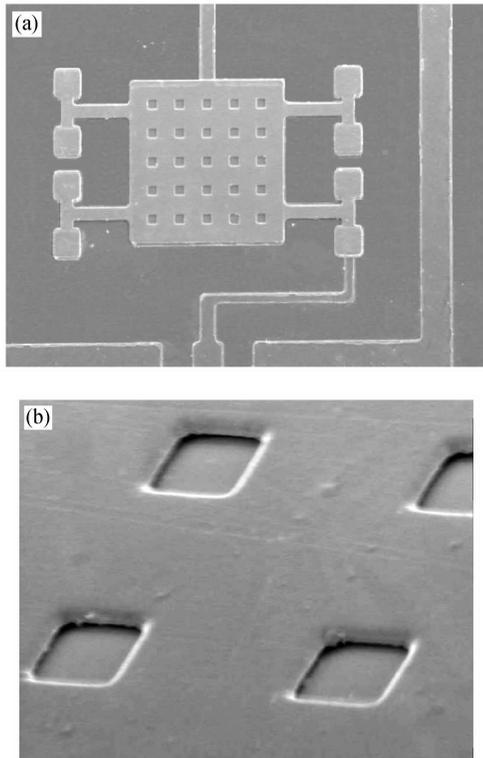


图 4 可变电容 SEM 图 (a)主体结构;(b)刻蚀孔
Fig. 4 SEM photographs of the capacitor (a) Main structure;(b) Etch holes

可变电容的散射 S 参数用 Agilent 8722ES 矢量网络分析仪来测量,测量频率从 500MHz 到 10GHz,系统特征阻抗 $Z_0 = 50\Omega$. 采用一端口网络模型来处理所测量的数据,可变电容的阻抗 Z_{cap} 、电容值 C 和品质因数 Q 等可以从 S 参数导出.

图 5 是测量的品质因数和电容值随测量频率变化图. 在 1GHz 下,测量的电容值和 Q 值分别为 0.79pF 和 51.6; 在 2GHz 下测量的 Q 值为 24. 高 Q 值对于射频应用是很重要的,可变电容的 Q 值可具体表示为:

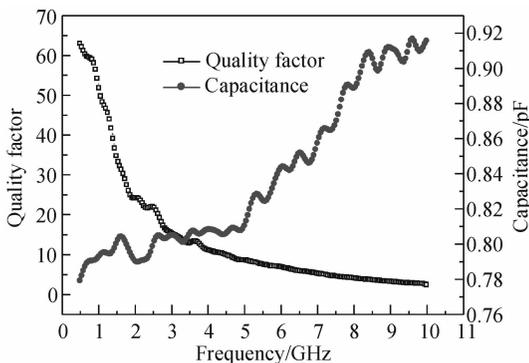


图 5 品质因数和电容值随频率变化图
Fig.5 Measured Q -factor and capacitance with the increasing of the frequency

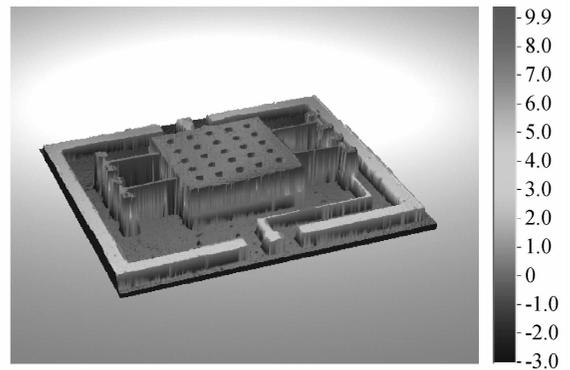


图 6 可变电容光学形貌图
Fig.6 Optical image of one stable state for the capacitor

$$Q = \frac{1}{\omega CR} \quad (1)$$

式中 ω 为工作频率; C 为电容; R 为结构的电阻. 本文衬底采用氧化过的硅片(氧化硅厚度约为 $2\mu\text{m}$),这可以减小衬底的寄生电容,保证较大的 Q 值,另外,由于制作工艺简单,电容结构极少引入寄生效应(寄生电阻和寄生电容),从而提高了 Q 值.

为测量可变电容的机械特性,使用 WYKO NT1100 光学表面轮廓仪测量在不同外加直流电压下可变电容的表面轮廓和位移. 图 6 所示的是 WYKO NT1100 型仪器测量的电容形貌,以衬底为参考,不同的颜色对应不同的高度. 图 7 是加载电压约为 10V 时,T 字梁的形变测量结果图,此时梁的形变位移为 $0.6\mu\text{m}$. 图 8 是电容-电压关系图,图中实线是理论计算值,实心点是测量值,当加载的直流电压为 0V 时,电容值为 0.759pF,当电压升到 12.8V 时,测量的电容值为 0.996pF,此时电容比为 1.31 : 1. 实验观测到的吸合电压约为 13.5V,比理论计算的 13V 要高出少许. 这是因为理论上的吸合电压值并没考虑板的非线性形变效应,事实上,当电压较高时,板只是中心部分弯曲,在加载的电压接近吸合电压时,只是板的中心接触到 $x_0/3$ 即 $1\mu\text{m}$ 处. 这个

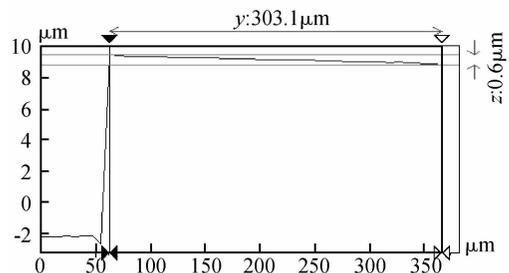


图 7 T 字梁形变位移图(外加电压 10V)
Fig.7 Profile of the T-shape beam when applied voltage is 10V

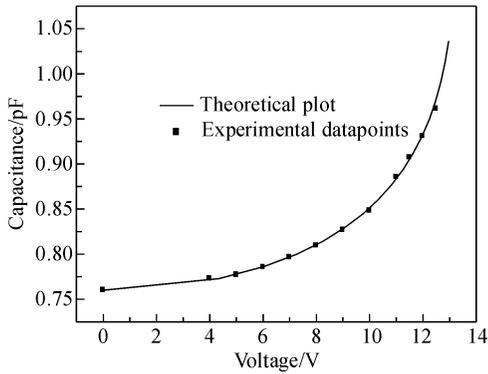


图8 当施加电压时电容-电压关系图

Fig.8 Theoretical and experimental capacitance of the capacitor when the voltage was applied

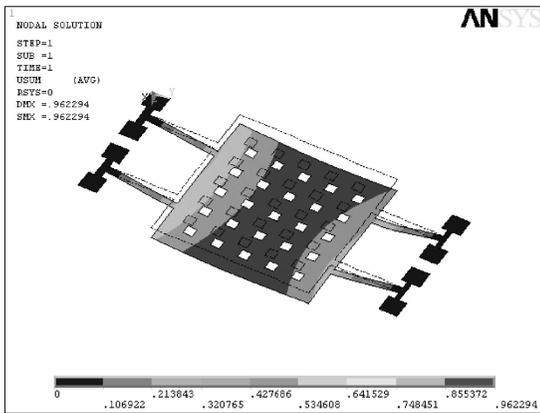


图9 ANSYS分析的电容形变图(外加电压12~13V)

Fig.9 Deformation shape of the capacitor with the actuated voltage 12~13V

现象可以用 ANSYS 进行模拟. 图 9 是当电压为 12~13V 时, 梁和板的形变和其位移状况, 从图中看到, 当电压接近吸合电压时, 只有板的中心接近于 1 μ m 处. 图 10 是 ANSYS 模拟的电容应力分布图,

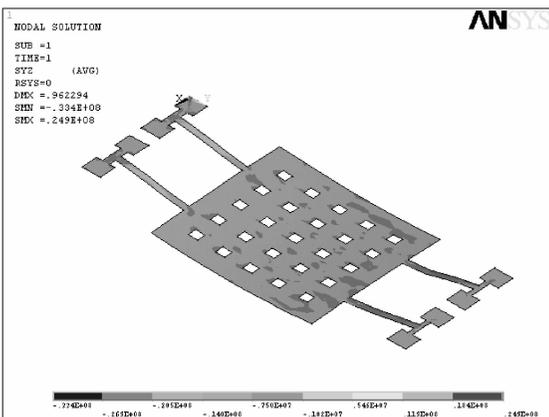


图10 ANSYS分析的电容应力分布图

Fig.10 Stress distribution of the capacitor

最大应力出现在悬梁和柱子固定端的连接处, 约为 25MPa, 悬梁和极板的应力都不是太大, 这有利于提高结构的寿命.

4 结论

设计并制作了高频下具有高品质因数的可调微电容, 该器件制作工艺简单, 与 IC 工艺相兼容. 测试结果表明, 在 1GHz 和 2GHz 下, 电容的 Q 值分别为 51.6 和 24. 可变电容的初始电容值为 0.759pF, 在 12.8V 下电容比为 1.31 : 1, 吸合电压为 13.5V, 比理论值稍高, 这是因为当加载的电压接近吸合电压时, 只是板的中心接触到原始空气隙的 1/3 处. 虽然这种电容的 Q 值比较高, 制造方法比较简易, 但可调范围不是很理想, 12.8V 下电容可调范围为 31%, 与二极管电容的理论最大可调范围为 50% 相比, 尚有改进的余地. 比如采用金属 Al 作为结构材料(不考虑更换金属材料后对吸合电压、 Q 值等的影响), 以降低寄生效应并提高可调范围, 或者对 T 字悬梁和极板的几何尺寸进行合理优化设计, 以提高可调范围; 另外, 为突破二极管电容最大可调范围为 50% 的限制, 可以采用三极板结构可调电容, 但此时 Q 值在理论上会有所下降.

参考文献

- [1] Dec A, Suyama K. A 1.9-GHz CMOS VCO with micromachined electromechanically tunable capacitors. *IEEE J Solid-State Circuits*, 2000, 35(8): 1231
- [2] Dec A, Suyama K. Microwave MEMS-based voltage-controlled oscillators. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48(11): 1943
- [3] Girbau D, Lázaro A, Pradell L. Extended tuning range RF MEMS variable capacitors using electrostatic and electrothermal actuators. *Proc SPIE*, 2004, 5344: 59
- [4] Feng Z, Zhang H, Zhang W, et al. MEMS-based variable capacitor for millimeter-wave applications. *Technical Digest of Solid-state Sensors and Actuators Workshop, Hilton Head Island, SC*, 2000: 255
- [5] Fritschi R, Frederico S, Hiber C, et al. High tuning range Al-Si RF MEMS capacitors fabricated with sacrificial amorphous silicon surface micromachining. *Microelectron Eng*, 2004, 73/74: 447
- [6] Xiao Zhixiong, Peng Wuyong, Wolfenbuttel R F, et al. Micromachined variable capacitors with wide tuning range. *Sensors and Actuators A*, 2003, 104: 299
- [7] Tsai C, Stupar P A, Bonvick R L, et al. An isolated tunable capacitors with a linear capacitance voltage behavior. *IEEE the 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystem, Boston*, 2003: 833
- [8] Ben Ahmed K, Kouki A B, Khebir A. Physics-based analysis of variable RF MEMS capacitors. *CCECE*, 2004: 0739
- [9] Yanl W D, Mansour R R, Khajepod A. A MEMS variable capacitor with high self-resonance frequency. *34th European*

- Microwave Conference Amsterdam, 2004, 1153
- [10] Bushyager N, Tentzeris M M, Gatewood L, et al. A novel adaptive approach to modeling MEMS tunable capacitors using MRTD and FDTD techniques. IEEE MTT-S Digest, 2001; 2003
- [11] Oz A, Fedder G K. CMOS-compatible RF-MEMS tunable capacitors. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. 2003; 611
- [12] Yao J, Park S, DeNatale J. High tuning ratio MEMS based tunable capacitors for RF communications applications. Technical Digest of Solid-State Sensors and Actuators Workshop, Hilton Head Island, SC, 1998; 124
- [13] He S, Ben Mrad R. A novel MEMS tunable capacitor. IEEE Proceedings of the International Conference on MEMS, NANO and Smart Systems (ICMENS'04), 2004; 618
- [14] Yeh J A, Chang C A, Cheng C C, et al. Microwave characteristics of liquid-crystal tunable capacitors. IEEE Electron Device Lett, 2005, 26(7): 451
- [15] Kim J, Christensen D, Lin L. Micro vertical comb actuators by selective stiction process. Sensors and Actuators A, 2006, 127; 248
- [16] Zhou Z M, Zhou Y, Yang C S, et al. The evaluation of Young's modulus and residual stress of nickel films by microbridge testings. Meas Sci Technol, 2004, 15; 2389

A Tunable Micromechanical Capacitor Driven by Electrostatic Force*

Fang Dongming[†], Fu Shi, Zhou Yong, and Zhao Xiaolin

(National Key Laboratory of Nano/Micro Fabrication Technology, Key Laboratory of the Ministry of Education for Thin Film and Microfabrication, Research Institute of Micro/Nano Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A radio frequency (RF) tunable micromechanical capacitor with a high quality factor driven by the electrostatic force was fabricated using simple MEMS technology. The surface profile and the displacement of the variable capacitor at different values of applied voltage are measured by using a WYKO NT1100 optical surface profiler. The measured results show that the pull-in voltage is 13.5V, the tuning ratio of the capacitor is 13.1 : 1, and the quality factor and the capacitance are 51.6 and 0.79pF at 1GHz, respectively.

Key words: tunable capacitor; RF MEMS; quality factor

PACC: 0710C; 7230

Article ID: 0253-4177(2007)09-1454-05

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2006AA03Z301), the Research and Development Foundation for Applied Materials of Shanghai (No. 0515), the Research Foundation for Non-Si Micromechanical Fabrication Technique (No. D2320060098), and the Specialized Foundation for Nano-Technology of Shanghai (No. 0652nm004)

[†] Corresponding author. Email: fangdm2005@hotmail.com

Received 12 March 2007, revised manuscript received 16 April 2007

©2007 Chinese Institute of Electronics