

## Belt-Filter-Based Forms of Frequency Hopping Communication\*

YAN Qin, FENG Yong-jian\*

(Department of Electronic-mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**Abstract:** In wireless communications, the use of frequency-hopping military communications technology is one of the most important means of interference, and if the system which uses the appropriate center frequency bringing rapid change, the tracking forms of frequency hopping-filter system will be significantly improved antijamming capabilities. We introduces a micro capacitive device fabricated by silicon glass static bonding technology, design and produce micro-driven variable capacitor pieces by the electrostatic MEMS technology. The device producing with this method has excellent linearity, relatively high sensitivity and relatively good stability. And a belt-filter was designed which can be used for 15~ 50 kHz forms of frequency-hopping applications to the purpose of consecutive election frequency.

**Key words:** frequency-hopping; consecutive election frequency; band-pass filter; variable capacitor  
**EEACC:** 7220; 7310G

## 基于跳频通信的带通滤波器\*

严 琴, 冯勇建\*

(厦门大学机电系, 福建厦门, 361005)

**摘要:** 在无线通信中使用跳频技术是军事通信中最主要的抗干扰手段之一, 而如果系统中使用合适的中心频率可以快速跟踪跳频变化的带通滤波器将可以明显改善系统的抗干扰性能. 介绍了一种用硅玻璃键合工艺制作的微型梁式可变电容器, 设计并制作了由 MEMS 工艺实现的微型的静电驱动的可变电容器件. 用这种方法制作的电容器件具有良好的线性、较小的滞后和稳定的工作特性. 设计了可用于 15~ 50 kHz 跳频应用的带通滤波器, 可达到连续选频的目的.

**关键词:** 跳频; 连续选频; 带通滤波器; 可变电容器

**中图分类号:** TN713.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2007)06-1303-04

本文所描述的是一种应用于跳频通讯的带通滤波器, 它将涉及到静电驱动可变电容器的设计. 近年来, 随着集成电路技术、微机械加工技术的发展, 越来越多地把它应用于微执行器如: 微马达、微齿轮、微泵、微阀门、微开关、微喷射器、微扬声器、微谐振器等. 本文所描述的对象就是一种应用于通讯中的静电驱动可变电容器. 由静电的方式来驱动, 与压电、压阻、热膨胀和电磁等驱动方式相比, 静电作用虽然驱动力比较小, 但其工艺兼容好, 可以用体硅和表面微机械加工, 便于实现系统集成, 其中电容器件所具有的结构简单、体积小、适应性强、输出能量低、动态响应快等优点得到了进一步的发展. 微电容式

器件因其结构简单而成为微传感器技术领域中发展较快的一种器件<sup>[1,2]</sup>, 可变电容器由于能够广泛应用于军事中的跳频通讯而受到重视.

由可变电容的连续变化, 可以得到连续变化的带通特性, 达到连续选频的目的. 在调制无线和卫星通信系统中, 利用跳频扩展频谱和直接顺序扩展频谱调制系统, 使得能源分布广泛的通讯信号, 在波段频率使用的同时, 允许多渠道的用户<sup>[3,4]</sup>, 这使得滤波电路的带通特性要求更加严格.

### 1 跳频带通滤波器的设计

持续发展的无线电 MEMS 技术使得实现可调

范围的滤波成为可能,这种滤波电路能耗低,线性度高,尺寸小和成本低<sup>[5]</sup>.

考虑该滤波器用于 15~ 50 kHz 频段跳频接力通信系统中,由系统方案,初步确定其主要技术指标为:

- ① 3 dB 带宽 2 kHz;
- ② 100 kHz 处的衰减 25 dB;
- ③ 中心频率 15 kHz

根据设计要求,采用二级基本滤波电路.第一级主要针对高频设计,达到高频带外衰减指标和要求的高端截止频率;第二级由一个调谐和两个低通滤波结构组成,主要针对低频,中心频率和带宽进行设计,第二个和第三个放大器部分都是对电路低频进行滤波(采用相同结构),应具有相同的低端截止频率,电容值相等,设  $R_1 = 150\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = r = 100\text{ k}\Omega$ ,  $R_8 = R_9 = R = 1\text{ M}\Omega$ ,  $C_1 = 1\text{ }\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 10\text{ pF}$ , 电路如图 1 所示. 得出以下关系式:

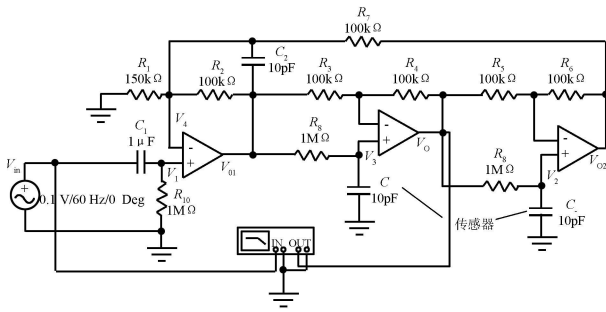


图 1 带通滤波器电路图

$$V_1 = V_{in} \frac{R_{10}C_1S}{R_{10}C_1S + 1}$$

$$V_2 = \frac{V_0}{1 + R_9CS} \quad V_3 = \frac{V_{01}}{1 + R_8CS}$$

$$\frac{V_0 - V_2}{R_5} = \frac{V_2 - V_{02}}{R_6} \text{ 代入 } V_2 \text{ 有}$$

$$V_{02} = \frac{1 - RCS}{1 + RCS} V_0 \dots\dots (1)$$

$$\frac{V_{01} - V_3}{R_3} = \frac{V_3 - V_0}{R_4} \text{ 代入 } V_3 \text{ 有}$$

$$V_{01} = \frac{1 + RCS}{1 - RCS} V_0 \dots\dots (2)$$

分析可知经过  $R_8, R_9$  的电流之和等于经过  $R_7$  电流与  $R_2, C_2$  电流之和, 则

$$\frac{-V_{01}}{R_8 + \frac{1}{CS}} - \frac{V_0}{R_9 + \frac{1}{CS}} = \frac{V_{02} - V_1}{R_7} + (V_{01} - V_1) \left( \frac{1}{R_2} + C_2S \right)$$

方程(1)、(2)代入上式可以得到带通滤波器的传递函数为:

$$\frac{V_0}{V_{in}} = - \frac{R_{10}C_1S}{R_{10}C_1S + 1}$$

$$\frac{S^3 + \frac{2}{rC_2}S^2 - \frac{1}{R^2C_2^2}S - \frac{2}{R^2rC^2C_2}}{S^3 + \left(\frac{2}{rC_2} + \frac{2}{RC}\right)S^2 + \left(\frac{2}{R^2CC_2} + \frac{1}{R^2C^2}\right)S + \frac{2}{R^2rC^2C_2}}$$

$$\text{令 } S^3 + \left(\frac{2}{rC_2} + \frac{2}{RC}\right)S^2 + \left(\frac{2}{R^2CC_2} + \frac{1}{R^2C^2}\right)S + \frac{2}{R^2rC^2C_2} = (S + P)(S^2 + 2\delta\omega S + \omega^2)$$

代入  $R, r, C_2$  可近似为  $\omega = \frac{1}{R^2C^2}$   $P = \frac{2}{rC_2}$ , 计算在中心频率 15-50 Hz 时, 电容  $C$  为 3.2 ~ 10.6 pF, 也可以使用 matlab 做更加精确的计算.

### 1.1 可变电容器的结构与制作工艺

MEMS 结构近来引进用于改善无线射频系统的性能或增加一些新功能<sup>[6]</sup>. 例如 MEMS 天线开关器, 可调滤波器都是建立在 MEMS 可变电容<sup>[7]</sup>和有 MEMS 变容二极管的电压控制振荡器<sup>[8]</sup>.

可变电容器由硅膜片、玻璃、小电极和驱动电极构成, 如图 2.

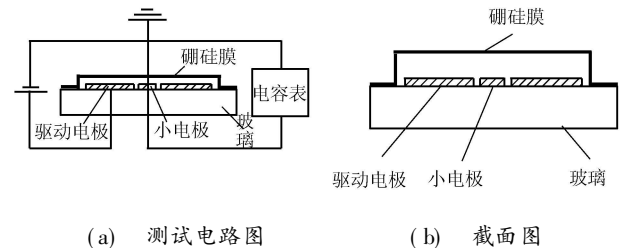


图 2 可变电容器结构截面示意图

如图 2, 由控制电压建立的电场在两极之间产生一个静电力, 引起膜片发生形变向下弯曲, 变形量随电压而改变, 同时, 小电极与硼硅膜之间的电容随硼硅膜的形变而改变; 撤掉控制电压后, 电场力消失, 硅膜片在弹性回复力的作用下恢复初始状态.

表 1 主要材料和参数

Si	玻璃牌号	驱动电极面积	小电极面积径	硼硅膜厚	Gap
P type(100)	7740	0.40mm <sup>2</sup>	0.34mm <sup>2</sup>	2μm	1μm

可变电容器主要制作步骤如图 3 和图 4 所示. 主要制作工艺过程如下.

- ① 取硅片 A, 清洗后经湿氧氧化 2h, 形成 8 000 Å 氧化膜图 3(b);
- ② 在氧化膜上涂光刻胶烘干后, 进行离子反应刻蚀形成 0.5 m 深的腔体图 3(c)、(d)、(e)、(f);
- ③ 去氧化层图 3(g);
- ④ 在 1 125 °C 下进行浓硼扩散 6 h, 使其上面形成 P<sup>+</sup> 膜, 再进行 CMP (chemical mechanical polishing) 将 P<sup>+</sup> 膜表面抛光图 3(i);
- ⑤ 清洗玻璃片图 3(i); 涂胶、曝光、显影、溅射

金属图 3(j)、(k)、(l)、(m);

⑥ 剥离制作电极图 3(n);

⑦ 硅、玻璃静电键合图 3(o);

⑧ 用 KOH 溶液深腐蚀键合后位于上方的硅片腐蚀到 P+ 膜图 3(p);

⑨ 在 P+ 膜上涂光刻胶,烘干后进行离子反应刻蚀,制作梁结构图 4;

⑩ 完成以上工作后切割晶片,封装、焊线.

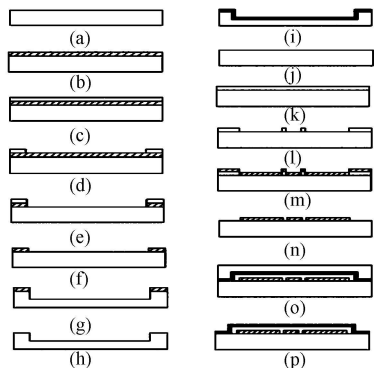


图 3 可变电容器的 MEMS 工艺

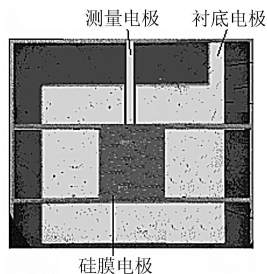


图 4 梁式电驱动可变电容器件

### 1.2 器件的测试电路

器件的测试电路输入电压为一直流电压和方波激励电压的叠加.利用方波激励信号把测量电容的变化转换为直流电压输出,通过输出电压就可以来测量外加的压力大小.

如果图 5 所示电路完全对称(即构成模拟开关的四个传输门的特性是一致的,并且测量电容值等于参考电容值),则一个周期内从 A 点转移到 B 点的电荷与从 B 点转移到 A 点的电荷相等,A、B 两点之间不存在电势差,输出电压值为 0.如果测量电容  $C_x$  受压力作用,电容值增大,则这种平衡条件被破坏,在激励信号的作用下从 B 点转移到 A 点的电荷大于从 A 点转移到 B 点的电荷,使得在 A 点、B 点积累了一定的净电荷,从而 A 点电位上升,B 点电位下降,导致从 A 点转移到 B 点的电荷增加,从 B 点转移到 A 点的电荷减少.经过若干个周期后,一个周期内的电荷转移达到动态平衡.达到平衡后,A、B 两点各自的直流电位同迭加在它们上面的交流激励信号通过 RC 低通滤波器后,输出信号只有

直流信号  $V_0$  ( $V_0$  为 A、B 两点的直流电位差).输出直流信号大小的变化就可以反映出作用在测量电容  $C_x$  上压力值的变化.

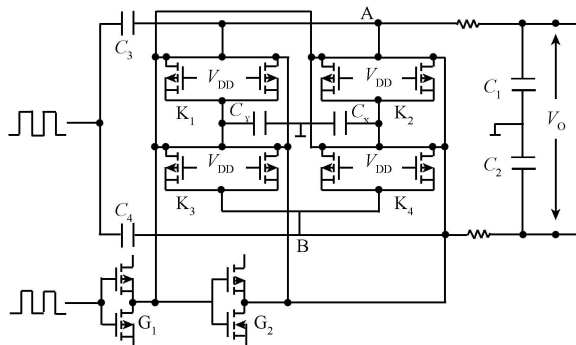


图 5 电容信号测量电路图

按照图 5 电路所示,对制作的 MEMS 可变电容器在常温下进行测试.驱动电压的变化步长是 5 V,如图 6 所示,在加载电压时,可变电容器的线性特性良好.

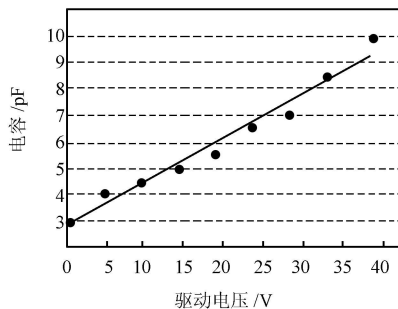


图 6 加载驱动电压测得的电容

### 1.3 连续选频实验

对不同  $C$  下进行 Workbench 仿真,其输出带通特性如表 2.

表 2 不同电容值时输出特性

参数	C (pF)			
	3	5	8	10
3 dB 带宽/kHz	4.5	2.1	4	2.1
100 kHz 衰减/ dB	26	29	25.25	27
中心频率/kHz	44.6	28.2	17.8	15.8

从表 2 可以看出,当  $C$  值在 3 pF 和 10 pF 间变化时,中心频率位于 50~15 kHz 符合设计要求的指标.

由图 7 可以看出,电容连续变化时,带通滤波输出连续变化,达到连续选频的要求.

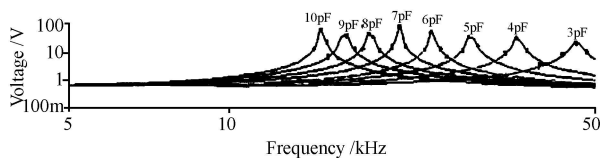


图 7 连续变化的电容下的带通滤波特性实验

## 2 结束语

微电容式器件因其结构简单而成为微传感器技

术领域中发展较快的一种器件,而由于可变电容器能够广泛应用于军事中的跳频通讯受到重视.在驱动方式中的静电驱动,由于具有效率高、精度高、不发热、响应速度快、能量损失小;最主要的方面是静电驱动技术完全与硅材料、集成电路处理技术相一致,便于集成化、一体化的优点得到广泛应用.

本文设计了用于跳频通信中心频率为 15-50 kHz 的带通滤波器,达到了很好的跳频连续选频的要求,实际上跳频滤波器可以运用到其他很多地方,而且将逐渐用于各类跳频电台中.

#### 参考文献:

- [1] 许金海,冯勇建,卓勇. 零点增益可调的电容式微传感器[J], 仪表技术与传感器, 2000, (7): 68.
- [2] 许金海,冯勇建,邓俊泳. 电容式测压微传感器的特性分析[J], 仪器仪表学报, 2001, 22(4): 434-440.
- [3] Feher K, Wireless Digital Communications: Modulation and Spread Spectrum Applications[M], Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, 1995. 131 Gao W, Soderstrand M A and Fe

her K, Gaussian Filter Screens TDMA and Frequency Hopping Spread Spectrum Signals[J], Microwave and RF, May 1995: 17-19.

- [4] Yan, Soderstrand, Borowski, Feher. DSP Implementation of GFSK, GMSK and FQPSK Modulated Wireless Systems[J], RF Digital Communications, June 1995, 28.
- [5] Yu A B, Liu A Q and Zhang Q X, Wide Tuning Range MEMS Band Pass Filter with Inductance Change[C]// Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. Transducers05. The 13th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems. Seoul, Korea, June 5-9, 2005, 1.
- [6] Nguyen C T- C, Katehi L P B and Rebeiz G M, Micromachined Devices for Wireless Communications [C]// Proc. of the IEEE, 1998, 1756-1768.
- [7] Kim H-T, Park J-H, Kim Y-K, Kwon Y. Millimeter Wave Micromachined Tunable Filters[C]// IEEE MTT-S 1999, 1235-1238.
- [8] Dec A, Suyama K, A 1.9 GHz CMOS VCO with Micromachined Electromechanically Tuned Capacitors[J]. IEEE J. Solid State Circuits, August 2000, 35(8): 1231-1237.



严琴(1983),女,厦门大学,研究方向为 IC 集成电路设计, yanqin2001@163.com

冯勇建(1958),男,新疆石河子人,副教授,主要研究方向为微系统和集成电路设计, yjfeng@xmu.edu.cn