

# MEMS E 类放大器\*

顾洪明<sup>1</sup> 吕 苗<sup>2</sup> 梁春广<sup>2</sup> 高葆新<sup>1</sup>

(1 清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2 河北半导体研究所, 石家庄 050051)

**摘要:** 对采用 MEMS 开关的 E 类放大器进行了原型仿真, 并且通过工艺流片制作 MEMS 开关, 搭建 E 类放大器电路进行测试。测试结果显示, 这种机械式的放大器同样能实现有源放大器的功能。测试得到的放大器实际效率与原型模拟结果一致, 而放大器的功率增益高达 2000。

**关键词:** MEMS; 开关; E 类放大器

**EEACC:** 1220B; 2180B; 2575F

中图分类号: TN 722.5<sup>+</sup> 1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)04-0401-05

## 1 引言

晶体管开关和 MEMS 开关都可以用来构成 E 类放大器。由于 MEMS 开关固有的特性, 有可能使放大器获得极高的效率和超高的功率增益。E 类放大器与常规放大器(A类/AB类/B类/C类)的区别在于 E 类放大器中的晶体管工作在开关模式。它通过优化输出网络, 保证晶体管上瞬时电压与瞬时电流的乘积(晶体管上的耗散功率)达到最小值, 从而得到超高的直流-交流转换效率, 理想输出效率可达 100%。但由于晶体管固有导通电阻( $1\sim 5\Omega$ )的存在, 在晶体管导通时, 会产生功率损耗, 这是限制 E 类放大器的实际效率(通常在 96% 左右<sup>[1]</sup>)进一步提高的主要因素。同时, 晶体管的非线性效应也会导致放大器输出信号失真。与其相比, 近年来新兴的 MEMS(micro-electron-mechanical system)工艺不断制作出高性能的开关<sup>[2,3]</sup>。MEMS 开关具有低插损、高隔离度、低导通电阻( $0.1\sim 0.2\Omega$ )等优点。将 MEMS 开关应用于 E 类放大器, 会带来以下优点:

第一, 较低的导通电阻可以带来较低的功率损耗, 从而进一步提高放大器的效率。理论分析显示, 当开关的导通电阻从  $1\Omega$  降低到  $0.1\Omega$  时, 放大器的效率可以从 95.03% 提高到 99.09%; 第二, 静电驱动开关的控制功率(即 E 类放大器的输入功率)通常为几  $\mu\text{W}$ , 这使得放大器获得超高的功率放大率(1000~2000 倍); 第三, 整个电路可以由单一的 MEMS 工艺制作完成, 回避了目前 MEMS 工艺和标准 IC 工艺不完全兼容的困难, 探索了 MEMS 工艺的一个新的应用方向。另外, 采用 MEMS 开关构成的 E 类放大器, 是一种全机械式的放大器(即不含有源电子器件), 同样实现了有源放大器的功能, 使得对放大器的理论有了更深一层的认识。同时, 在设计放大器时, 也给设计者提供了一条新的思路, 拓展了设计空间。

## 2 放大器设计方法

E 类放大器的原理如图 1 所示, 晶体管按照开关方式工作, 即在饱和导通(开)和截止(关)两个状

\* 信息产业部电子十三所砷化镓高速集成电路国防重点实验室(批准号: 00JS02. 7. 1. JS0206) 和北京大学微米纳米加工技术国防科技重点实验室资助项目(批准号: 00JS97. 4. 1. DJ2306)

顾洪明 男, 1976 年出生, 博士研究生, 从事 RF MEMS 器件的理论研究。

高葆新 男, 1934 年出生, 博士生导师, 从事微波集成电路、微波有源电路理论、CAD 软件技术以及 MEMS 理论的研究。

梁春广 男, 1939 年出生, 中国工程院院士, 主要从事光电子、微电子、MEMS 领域的研究。

2002-05-30 收到, 2002-09-27 定稿

©2003 中国电子学会

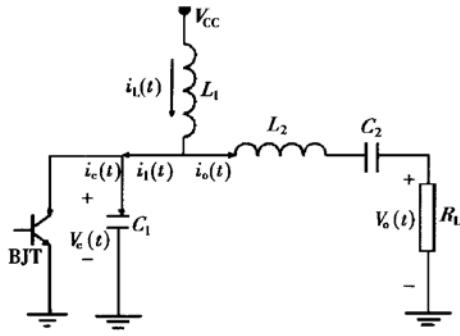


图 1 E 类放大器的典型电路

Fig. 1 Typical circuit of class E amplifier

态之间切换。电感  $L_2$  和电容  $C_2$  等效于一个理想的串联谐振回路和一个剩余电抗，剩余电抗用以调节输出相位，提高放大器的效率。E类放大器的具体设计过程如下<sup>[4]</sup>：

(1) 列出开关导通和关断状态下  $i_L(t)$  满足的方程。

由图 1, 流经扼流电感的电流可以表示为：

$$i_L(t) = i_s(t) + i_c(t) + I_o \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

其中  $I_o$  是输出电流的幅度； $\omega$  是工作角频率； $\varphi$  是输入与输出信号的相移。对  $L_1$  和  $C_1$  列出开关导通状态和关断状态下的  $i_L(t)$  满足的方程如下：

$$\begin{aligned} C_1 L_1 d^2 i_{\text{Lon}}(t) / dt^2 + \frac{L_1}{R_{\text{on}}} di_{\text{Lon}}(t) / dt + i_{\text{Lon}}(t) \\ = V_{\text{CC}} / R_{\text{on}} + I_o \sin(\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$C_1 L_1 d^2 i_{\text{loff}}(t) / dt^2 + i_{\text{loff}}(t) = I_o \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

其中  $\varphi = \varphi_l - \pi$

(2) 求解  $i_L(t)$  满足的方程。

求解(2)、(3)式, 得到  $i_{\text{Lon}}(t)$  和  $i_{\text{loff}}(t)$  的表达式如下：

$$\begin{aligned} i_{\text{Lon}}(t) = A_{\text{on}} e^{\lambda_1 t} + B_{\text{on}} e^{\lambda_2 t} + V_{\text{CC}} / R_{\text{on}} \\ + I_o (Y_1 \sin(\omega t + \varphi) - Y_2 \cos(\omega t + \varphi)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_{\text{loff}}(t) = A_{\text{off}} \cos(\omega t) + B_{\text{off}} \sin(\omega t) \\ + I_o \sin(\omega t + \varphi) / (1 - \beta^2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } \lambda_{1,2} = -\frac{1}{2R_{\text{on}}C_1} \pm \sqrt{\frac{1}{4R_{\text{on}}^2C_1^2} - \frac{1}{L_1C_1}} \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \end{aligned}$$

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_0}$$

$$Y_1 = \frac{R_{\text{on}}^2 (1 - \beta^2)^2}{R_{\text{on}}^2 (1 - \beta^2)^2 + L_1^2 \omega^2}$$

$$Y_2 = \frac{L_1 R_{\text{on}} \omega}{R_{\text{on}}^2 (1 - \beta^2)^2 + L_1^2 \omega^2}$$

(3) 应用边界条件求解系数  $A_{\text{on}}$ 、 $B_{\text{on}}$ 、 $A_{\text{off}}$ 、 $B_{\text{off}}$ 。

由电感中的电流连续和电容上的电压连续, 得到 4 个边界条件:

$$i_{\text{Lon}}(0) = i_{\text{loff}}(\frac{\pi}{\omega}) = I_o \sin \varphi \quad (6)$$

$$i_{\text{loff}}(0) = i_{\text{Lon}}(\frac{\pi}{\omega}) \quad (7)$$

$$\left. \frac{di_{\text{Lon}}(t)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_{\text{loff}}(t)}{dt} \right|_{t=\frac{\pi}{\omega}} \quad (8)$$

$$\left. \frac{di_{\text{loff}}(t)}{dt} \right|_{t=0} = \left. \frac{di_{\text{Lon}}(t)}{dt} \right|_{t=\frac{\pi}{\omega}} \quad (9)$$

其中  $\pi/\omega$  为半周期  $T/2$ . 将上述条件代入(4)、(5)式求得系数  $A_{\text{on}}$ 、 $B_{\text{on}}$ 、 $A_{\text{off}}$ 、 $B_{\text{off}}$ .

(4) 确定输出功率  $P_{\text{out}}$ .

E类放大器的两个最佳工作条件是:

$$V_{\text{soft}}(\frac{\pi}{\omega}) = 0 \Rightarrow \left. \frac{di_{\text{loff}}(t)}{dt} \right|_{t=\frac{\pi}{\omega}} = \frac{V_{\text{CC}}}{L_1} \quad (10)$$

$$\left. \frac{dV_{\text{soft}}(t)}{dt} \right|_{t=\frac{\pi}{\omega}} = 0 \Rightarrow \left. \frac{di_{\text{loff}}^2(t)}{dt^2} \right|_{t=\frac{\pi}{\omega}} = 0 \quad (11)$$

求解后可将  $i_L(t)$  表示为  $V_{\text{CC}}\cdot L_1 \cdot C_1 \cdot \omega$  的函数。 $i_L(t)$  的平均值  $I_{\text{dc}}$  与  $V_{\text{CC}}$  的乘积即为直流输出功率  $P_{\text{DC}}$ . 最佳条件下放大器损耗功率是  $R_{\text{on}}$  上的耗散功率. 代入  $i_L(t)$  与  $V_s(t)$  最终得到  $P_{\text{DC}}$  与损耗功率  $P_{\text{loss}}$  的解析表达式. 输出功率  $P_{\text{out}}$  将呈现为下面的函数形式:

$$P_{\text{out}} = P_{\text{DC}} - P_{\text{loss}} = f[L_1, C_1, V_{\text{CC}}, \omega] \quad (12)$$

即输出功率是  $L_1$ 、 $C_1$ 、 $V_{\text{CC}}$  和  $\omega$  的函数. 对于给定的  $V_{\text{CC}}$  和  $\omega$ , 每一个确定的  $P_{\text{out}}$  值,  $L_1$ 、 $C_1$  构成二维解空间中的一条解曲线, 选择一个合适的  $C_1$  值, 即可得到相应的  $L_1$ , 进一步确定  $R_{\text{L}}$ 、 $L_2$ 、 $C_2$  等参数, 完成放大器的设计.

### 3 开关设计和制作

#### 3.1 开关设计

按照与电路中其它元件的连接方式, 可以把 MEMS 开关分为串联式和并联式两种. 在信号频率小于 1MHz 时, 串联开关的性能优于并联开关. 在本设计中的信号频率为音频, 故采用串联的金-金接触串联 MEMS 开关以获得更佳性能. 串联式 MEMS 开关的主要参数为开关速度和阈值电压, 设计时需综合考虑开关的力学特性和电学特性.

MEMS 开关的最高工作频率不能超过其悬臂

梁的最低自由振动频率。由动力学分析,构成开关的悬臂梁最低自由振动的频率为:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (13)$$

式中  $k$  为悬臂梁的等效弹性系数;  $M$  为悬臂梁质量。其中等效弹性系数由开关的几何尺寸、材料的杨氏模量等参数确定。由(13)式可知:为了提高开关速度,即要提高开关的最低自由振动频率,就要增大悬臂梁等效弹性系数  $k$  与其质量  $M$  的比值。采用的方法是合理优化悬臂梁几何尺寸,以及选择高杨氏模量的材料。在本设计中选择高杨氏模量的单晶硅材料作为开关的结构层,并通过有限元仿真来优化悬臂梁几何尺寸。实际采用的悬臂梁开关的几何尺寸如图 2 所示,按照实际尺寸仿真得到最低自由振动频率为 24kHz。

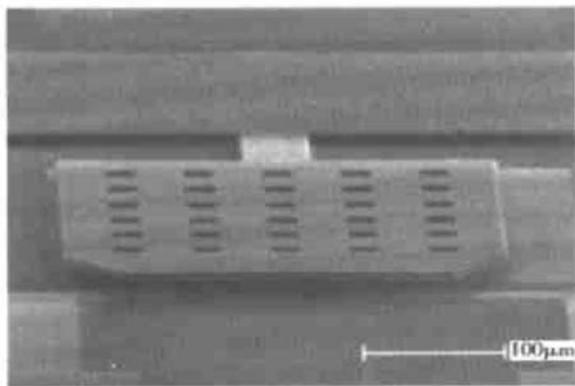


图 2 MEMS 开关的显微照片

Fig. 2 Microphotograph of completed MEMS switch

由静力学分析,驱动开关的静电力可以近似表示为:

$$F = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2(g + \frac{t_d}{\epsilon_r})^2} \quad (14)$$

式中  $\epsilon_0$  为空气介电常数;  $V$ 、 $g$  和  $A$  分别为极板间电压、极板间距离和电极板面积;  $t_d$  为上极板上覆盖的相对介电常数为  $\epsilon_r$  的介质的厚度。由(14)式可知,开关所受静电力与加在开关极板上驱动电压的平方成正比。在驱动电压逐渐增大的过程中,存在一个阈值,当驱动电压超过阈值电压时,悬臂梁会被猛然下拉至与下极板接触。阈值电压通常由下式确定<sup>[5]</sup>:

$$V_p = \sqrt{\frac{8k g_0^3}{27\epsilon_0 A}} \quad (15)$$

其中  $g_0$  为悬臂梁到下极板的初始距离,其它参数

上面已经提到,MEMS 开关的运动是电场力、开关弹性回复力和空气阻力共同作用的结果。忽略空气阻力,并假设开关的动作缓慢的准静态动力学过程(对应于最简单的动力学情况),则开关的位移是电场力和弹性回复力的合力达到平衡时的位置,不同的位移对应不同的电场力-弹性回复力平衡。根据以上分析,采用有限元仿真进行静电-机械耦合场仿真即可确定开关阈值电压的大小。对于上面提到的优化结构开关,同样采用单晶硅材料,仿真得到开关的阈值电压为 46V。

### 3.2 开关制作

性能良好的单晶硅悬臂梁开关通常由三维体硅工艺制作完成<sup>[6,7]</sup>。本设计中采用的具体过程如下:首先选用 n 型单晶硅硅片作为基底材料,第一次光刻,RIE 刻蚀浅槽,形成键合区。然后对硅片进行浓硼扩散,扩散深度为 4μm。扩散后采用 ICP 工艺在硅片上形成悬臂梁结构。在悬臂梁结构上面采用 LPCVD 淀积一层 SiO<sub>2</sub>(200nm) 薄膜,作为控制电极之间的绝缘层。接下来采用电子束蒸发在 SiO<sub>2</sub> 薄膜上面溅射 50/200nm 的 Cr/Au 薄膜,再次光刻,形成悬臂梁上的信号线。开关的信号线和下驱动电极制作在玻璃片上,首先光刻并挖槽,在玻璃表面蒸镀 50/200/500nm 的 Ti/Pt/Au 金属层,之后采用剥离工艺去掉多余金属层。以上工艺完成后,将制作好金属引线的玻璃片和悬臂梁结构的硅片放在键合炉里进行玻璃-硅阳极键合,不需要的硅片通过 EDP 腐蚀液溶解,划片之后得到的实物扫描电镜(SEM)照片如图 2 所示。

## 4 结果

### 4.1 原型模拟

MEMS E 类放大器的原型需要综合考虑开关的机械谐振频率的限制、熔断电流限制和获得较高放大器效率三个方面。本设计中的放大器工作频率为 3kHz,输出功率低于 10mW。由于受目前工艺所限,测试得到的开关导通电阻为十几欧姆(典型值为 15Ω)。在原型模拟时取导通电阻为 15Ω,由前所述的解析方法,计算得到放大器电路中其它元件值。当 E 类放大器的直流工作电压  $V_{cc}$  为 1V 时,仿真得到的放大器输出参数和放大器的元件值一同列在表 1

中. 其中,  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$  参考图 1,  $P_{\text{out}}$  为放大器输出功率,  $\eta$  为放大器效率. 由表 1 可知, 仿真得到的放大器效率为 66.3%, 输出功率为 2.89mW. 图 3 所示为仿真得到的典型波形, 其中(a) 为电感  $L_1$  上的电流波形图, (b) 为放大器输出电压波形图, (c) 为开关上的电流波形图, (d) 为开关上的电压波形图. (a) 中的电流在一个周期内方向为正, 表示没有电流反向流入电源, 这说明 E 类放大器能够正常工作. 比较(c) 和(d) 可以看出, 任意时刻开关上的电压和电流的乘积都较小, 使得放大器获得较高的效率.

表 1 E 类放大器的实验结果

Table 1 Experimental results of mechanical class E amplifier

参数	$L_1/\text{mH}$	$C_1/\mu\text{F}$	$L_2/\text{mH}$	$C_2/\mu\text{F}$	$P_{\text{out}}/\text{mW}$	$V_{\text{CC}}/\text{V}$	$\eta/\%$
数值	5	0.49	13.9	0.22	2.89	1	66.3

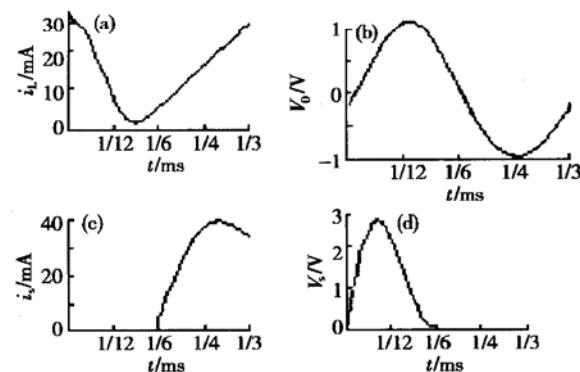


图 3 仿真得到的 E 类放大器电路参数波形图

Fig. 3 Simulated waveforms of circuit parameters of class E amplifier

#### 4.2 测试

将划片之后的开关放置在中心平台上, 通过引线键合, 使片上引线与封装管壳引脚相连, 再经过密封, 形成 DIP4 封装. 管壳的两只引脚作为控制信号路, 另两只引脚作为工作信号路. 测试采用的控制信号为频率 3kHz, 占空比 50%, 幅度 60V 的方波(高于开关阈值电压 46V, 用以减小开关的响应时间). 电路的测试结果如图 4 和图 5 所示. 由图 4 可看出, 开关的电压和电流在任意时刻乘积都很小, 即开关上的耗散功率很小, 这样放大器可以获得高效率. 测试得到放大器的输出功率为 2.54mW, 效率为 64.3%. 开关的输入功率(MEMS 开关的控制功率)约为 1μW, 由此得到放大器的功率增益约为 2000.

由图 5 可看出, 放大器输出电压波形与开关上的电压波形有一定的相移, 这段相移的作用是调节输出相位, 满足放大器最高效率输出, 符合 E 类放大器的工作原理.

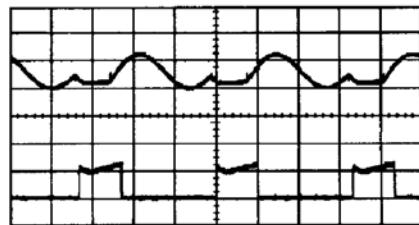


图 4 实验测得的开关上的电压波形(上, 2V/格)和电流波形(下, 10mA/格) 水平刻度为 100μs/格

Fig. 4 Experimental waveforms of voltage on switch (upper trace, 2V/div) and current on switch (lower trace, 10mA/div) of 3kHz class E amplifier. The horizontal scale is 100μs/div.

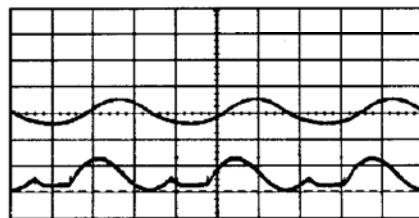


图 5 实验测得的放大器输出的电压波形(上, 1V/格)和开关上的电压波形(下, 2V/格) 水平刻度为 100μs/格

Fig. 5 Experimental waveforms of output voltage on switch (upper trace, 1V/div) and voltage on switch (lower trace, 2V/div) of 3kHz class E amplifier. The horizontal scale is 100μs/div.

## 5 结论

采用 MEMS 开关, 成功地进行了 E 类放大器的设计. 放大器输出频率为 3kHz 的正弦波, 输出功率为 2.54mW, 功率增益约为 2000. 放大器效率的理论仿真值和测试结果符合得很好. 通过进一步改进工艺, 将开关的导通电阻降低到 0.1Ω, 放大器的效率有可能达到 99%. 如果这种放大器能够达到实用阶段, 将会在音频放大器以及无人职守灯塔等低频领域有很大的应用前景.

## 参考文献

- [1] Sokal N O, Sokal A D. Class E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching-end switching power amplifier.

- IEEE J Solid-Sated Circuits, 1975, SC10: 168
- [ 2 ] Liang Chunguang, Xu Yongqing, Yang Yongjun. Fabrication of MEMS optical switches. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22( 12): 1151( in Chinese) [ 梁春广, 徐永青, 杨拥军. MEMS 光开关. 半导体学报, 2001, 22( 12): 1151]
- [ 3 ] Yao J J, Chang M F. A surface micromachined miniature switch for telecommunications with signal frequencies from dc to 4GHz. In: 8th Int Conf Solid-State Sens, Actuators Stockholm, Sweden, 1995: 384
- [ 4 ] Herman K J, Zulinski R E. The infeasibility of a zero-current switching class E amplifier. IEEE Trans Circuits and Systems, 1990, CAS-37: 152
- [ 5 ] Peterson K E. Dynamic micromechanics on silicon: techniques and devices. IEEE Trans Electron Devices, 1978, ED-25: 1242
- [ 6 ] Yee Y J, Chun J K, Lee J D, et al. Polysilicon surface-modification technique to reduce sticking of microstructures, Sensors and Actuators, 1996, A52: 145
- [ 7 ] Lee Y I, et al. Dry release for surface micromachining with HF vapor-phase etching. J Microelectromechanical Syst, 1997, 6( 3): 1

## MEMS Class E Amplifier<sup>\*</sup>

Gu Hongming<sup>1</sup>, Lü Miao<sup>2</sup>, Liang Chunguang<sup>2</sup> and Gao Baoxin<sup>1</sup>

(1 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(2 Hebei Semiconductor Research Institute, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** A class E amplifier can be constructed using either bipolar transistor or MEMS switch. Because of the intrinsic properties of MEMS switch, the amplifier may easily get high efficiency and high power gain. This concept is demonstrated by prototype design and measurement. The measured results show that the mechanical amplifier can act as the active amplifier, with the amplifier efficiency agrees well with the simulation result, and the amplifier power gain tested as high as 2000.

**Key words:** MEMS; switch; class-E amplifier

**EEACC:** 1220B; 2180B; 2575F

**Article ID:** 0253-4177(2003)04-0401-05

\* Project supported by State Key Laboratory on High Speed GaAs Integrated Circuit(No. 00JS02. 7. 1. JS0206) and State Key Laboratory on Micro- and Nano- Fabrication Technology ( No. 00JS97. 4. 1. DJ2306)

Gu Hongming male, was born in 1976, PhD candidate. He is engaged in RF MEMS and circuit.

Gao Baoxin male, was born in 1934, professor. He is engaged in the research on MMIC, microwave active circuit, CAD technology and MEMS.

Liang Chunguang male, was born in 1939, academician of The Chinese Academy of Engineering. He is engaged in the research on optoelectronics, microwave and millimeter-wave device, and MEMS.