

# RF MEMS 开关吸合电压的分析\*

董乔华 廖小平<sup>†</sup> 黄庆安 黄见秋

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 南京 210096)

**摘要:** 吸合电压是 MEMS 静电执行器的重要参数, 针对 RF MEMS 开关, 详细分析了开关在不同执行方式下的吸合电压. 对于执行电压是脉冲方式而言, 开关梁受迫振动, 不同于准静态方式, 此时使开关发生吸合的执行电压为动态吸合电压, 计算表明比准静态吸合电压小 8%. 通过简化的弹性系数和精确的电容计算公式, 详细分析了基于 CPW 的双端固支梁开关的准静态和动态吸合电压. 分析了环境阻尼对动态吸合电压的影响, 阻尼使得开关的两种吸合电压差别变小. 最后分析了射频输入功率对开关吸合电压的影响, 射频输入功率会降低吸合电压, 如果输入功率足够大, 吸合电压将会降为零, 此时 MEMS 开关会发生自执行失效.

**关键词:** RF MEMS; 开关; 吸合电压; 准静态; 动态; 阻尼  
EEACC: 1350

**中图分类号:** TN304      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2008)01-0163-05

## 1 引言

RF MEMS 开关由于其自身的诸多优点, 在微波集成电路中具有广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>. MEMS 开关的执行器种类很多<sup>[1~3]</sup>, 静电力执行器由于设计和制作简单而被广泛研究和应用. 吸合 (pull-in) 电压是静电力执行器的重要技术指标, 因而关于吸合电压的分析和计算成为研究的焦点, 计算吸合电压的方法大多是采用准静态的方法<sup>[1,2,3~6]</sup>, 即认为开关在吸合前的运动过程都是受力平衡的.

MEMS 开关的开关速度与开关的执行电压密切相关, 为了提高开关速度, 越来越多的开关采用方波电压执行开关<sup>[2,7]</sup>. 采用方波执行的开关, 其运动过程不再是准静态过程, 因而对其吸合电压的计算需要采用新的方法<sup>[8,9]</sup>, 开关在吸合前的运动过程中不满足受力平衡, 需要采用牛顿运动定律<sup>[8]</sup> 或者能量守恒的方法<sup>[9]</sup> 进行吸合电压的计算. 计算表明吸合电压降低约 10%, 吸合位移增加约 50%. 随着 MEMS 开关研究的深入, 功率处理能力的问题逐步被重视起来, 主要表现在射频的输入功率引起的开关的自执行和自锁及热效应等失效<sup>[2,10,11]</sup>, 射频输入功率在开关两端感应的电压是自执行和自锁失效的主要原因<sup>[2,10]</sup>. 从而开关的执行是射频输入功率和加载的执行电压共同作用的结果. 也就是说开关的吸合电压不仅与开关的结构参数有关<sup>[1~9]</sup>, 还与射频输入功率有关<sup>[10,11]</sup>.

本文主要从开关的实际工作过程出发, 考虑开关在采用方波执行电压以及开关的工作过程中有射频输入

功率的情况下的吸合电压. 文献[8,9]虽然已经分析了开关的动态过程的吸合电压, 但文献[8]给出的计算方式是二维方式, 相对较繁琐; 文献[9]针对的是平行板结构, 存在较大误差. 本文采用能量法对双端固支结构的开关进行分析, 给出了相对简单的开关动态过程吸合电压的计算方法. 对于射频输入功率的影响, 根据文献[2, 10, 11]和模拟软件进行了简化分析. 针对双端固支的开关结构考虑了非线性和边缘场对吸合电压的影响. 同时分析了运动过程中阻尼对吸合电压的影响. 利用模拟软件 Ansys 和 Coventor 进行了验证, 结果验证了计算方法的合理性和正确性.

## 2 理论模型

计算吸合电压的方法很多: 有采用简单的一维平板假设进行计算<sup>[2]</sup>; 考虑了梁的弯曲之后, 有采用竖直平面的二维方法进行计算<sup>[8]</sup>; 还有完全采用三维的有限元方法进行计算. 采用一维方法最简单, 精度也相对较低, 三维的方法最精确, 也最复杂. 为了在易用性和精度上折中, 已经有采用准一维的方法计算开关的吸合电压问世<sup>[4,5]</sup>, 也就是将二维的问题经过等效转化为一维问题进行处理.

RF MEMS 开关的结构很多, 本文主要针对普遍的双端固支结构进行讨论, 如图 1 所示为双端固支结构开关的示意图. 开关结构由共面波导和上面的梁结构组成, 通过锚区将梁和共面波导地线连接. 通过在共面波导的信号线和梁上加载电压可以执行开关. 开关的结构参数已示于图 1 中.

\* 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 60676043)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: xpliao@seu.edu.cn

2007-03-30 收到, 2007-07-27 定稿

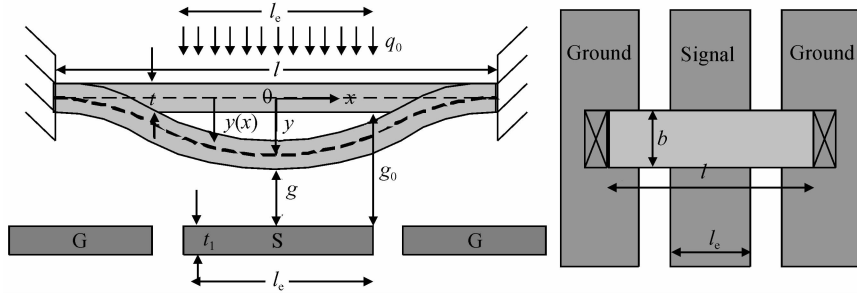


图 1 基于 CPW 的双端固支 RF MEMS 开关的结构示意图

Fig.1 Structure of a CPW clamped-clamped RF MEMS switch

由于是双端固支,开关在执行电压作用下,会向下发生碗状弯曲,为了更准确地计算开关的吸合电压,需要用二维的方法,根据已有的准一维方法<sup>[4,5]</sup>对开关进行简化.简化后的开关结构如图 2 所示.开关的梁等效为一刚性平板,开关的电容在平板电容的基础上加上修正因子<sup>[5]</sup>,开关梁的弹性系数采用  $k$  表示.在准静态假设下阻尼为零,否则需要考虑阻尼.

介于准静态过程是动态过程的特殊形式,下面在计算开关的吸合电压时认为开关是动态过程.开关在执行电压为  $V_0$  时的运动过程中,开关梁的运动过程满足达朗贝尔公式<sup>[2]</sup>:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + ky = F(V_0) \quad (1)$$

$$F(V_0) = -\frac{1}{2} \times \frac{\partial C}{\partial y} = V_0^2 \quad (2)$$

式中  $y$  和  $m$  分别为开关梁中心点的位移和有效质量; $b$  为阻尼系数; $F(V_0)$  为开关梁受到的静电力; $C$  为开关的电容.如果开关的执行电压大于吸合电压,开关梁被拉下,所需要的时间就是开关时间.如果加载的执行电压小于开关的吸合电压,开关梁将向下作受迫振动<sup>[2,9,10,12]</sup>.为了能够使开关正常的工作,必须计算出开关在动态过程中的吸合电压.

在执行电压小于吸合电压时,开关梁的运动过程在考虑阻尼的情况下是减幅的振荡<sup>[12]</sup>,在每个周期中开关梁都有一个最大位移.通过公式(1)和(2)就可以计算出开关梁的位移随时间的变化曲线.开关在执行电压下作减幅振荡,当开关梁在最大位移处时,速度为零,可以采用准静态的方法分析此时开关梁的受力,从而判断开关是否发生吸合.因为开关梁进行减幅振荡,从而只需

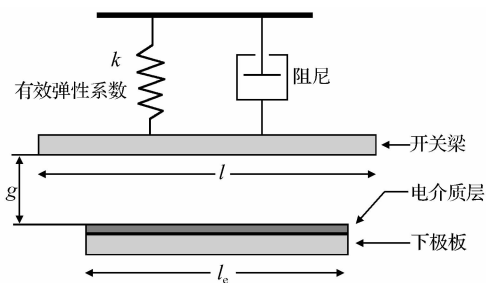


图 2 MEMS 开关的准一维等效模型

Fig.2 Equivalent model of the MEMS switch with one degree of freedom

分析开关第一次运动的最大位移  $y_{\max}$  处是否发生吸合即可.

## 2.1 吸合电压的计算模型

采用(1)和(2)式可以计算出开关的动态吸合电压<sup>[8]</sup>,但是相对比较复杂,需要知道开关梁的有效质量和阻尼系数,而这两个参数的计算相对比较复杂且影响因素较多<sup>[2]</sup>,并且在计算开关的吸合电压是可以通过能量法避开其中一个<sup>[9]</sup>,所以本文采用能量法计算吸合电压.对于开关系统而言,满足能量守恒定律,当开关梁位移为  $y_0$  时有<sup>[9]</sup>:

$$E_{\text{injected}} = E_{\text{kinetic}} + E_{\text{potential}} + E_{\text{dissipated}} \quad (3)$$

$$E_{\text{injected}} = \int_0^{y_0} F(V_0) dy \quad (4)$$

$$E_{\text{potential}} = \frac{1}{2} ky_0^2 \quad (5)$$

$$E_{\text{dissipated}} = \frac{2\pi}{Q} E_{\text{stored}} \quad (6)$$

式中  $E_{\text{injected}}$  是通过执行电压注入到开关系统的能量; $E_{\text{kinetic}}$  是开关系统的动能; $E_{\text{potential}}$  是开关系统的势能; $E_{\text{dissipated}}$  是开关系统在运动过程中耗能; $Q$  是开关系统的品质因素; $E_{\text{stored}}$  是开关系统储存的能量.

在开关梁运动到最大位移  $y_{\max}$  处,开关梁速度为零,满足:

$$E_{\text{kinetic}} = 0 \quad (7)$$

$$E_{\text{stored}} = E_{\text{potential}} = \frac{1}{2} ky_{\max}^2 \quad (8)$$

$$E_{\text{injected}} = \int_0^{y_{\max}} -\left(\frac{1}{2} \times \frac{\partial C}{\partial y} V_0^2\right) dy \quad (9)$$

将(6)~(9)式代入(3)式可得:

$$\int_0^{y_{\max}} -\left(\frac{1}{2} \times \frac{\partial C}{\partial y} V_0^2\right) dy = \left(1 + \frac{2\pi}{Q}\right) \frac{1}{2} ky_{\max}^2 \quad (10)$$

将(10)式进行转换可以得到执行电压  $V_0$  与梁的最大位移  $y_{\max}$  之间的关系为:

$$V_0 = \sqrt{\frac{\int_0^{y_{\max}} 2(Q + 2\pi)ky dy}{\int_0^{y_{\max}} Q \frac{\partial C}{\partial y} dy}} \quad (11)$$

由于此时的梁是静止的,可以利用准静态的分析方法判断此时开关的吸合电压和吸合位移<sup>[8,9]</sup>.因为准静态的开关结构,阻尼为零,整个过程中能量关系为:

$$E_{\text{injected}} = E_{\text{potential}} \quad (12)$$

从而在准静态情况下, 执行电压  $V$  与开关梁中心位移的关系为:

$$V = \sqrt{\frac{2ky}{\partial C/\partial y}} \quad (13)$$

根据文献[9], 开关在阶跃电压作用下, 可以联立公式(11)和(13)也就是解如下方程组:

$$\begin{cases} V_0 = \sqrt{\frac{\int_0^{y_{\max}} 2(Q + 2\pi)kydy}{\int_0^{y_{\max}} Q\partial C/\partial ydy}} \\ V_0 = \sqrt{\frac{2ky_{\max}}{\partial C/\partial y|_{y=y_{\max}}}} \end{cases} \quad (14)$$

通过上式就可以求出开关在阶跃电压作用下的动态吸合电压和吸合位移, 这种处理方式的合理性在接下来的 RF MEMS 开关实际的吸合电压模拟中将进一步说明。

### 2.2 弹性系数的计算模型

关于开关梁弹性系数的研究已经非常深入了<sup>[2,5,13]</sup>, 对非线性和残余应力的影响都已经引入到了弹性系数的计算公式中. 为了适应准一维的计算方法, 针对双端固支结构, 本文引入的有效弹性系数计算公式为<sup>[2,5]</sup>:

$$k = \left[ \frac{32 \hat{E} wt^3}{l^3 (2(2-\lambda)\lambda^2)} + \frac{8.52N}{l(2-\lambda)} \right] \quad (15)$$

$$N = (\hat{\sigma}_0 + \sigma_{NL})wt, \hat{\sigma}_0 = \sigma_0(1-\nu), \sigma_{NL} = \pi^2 E y_{\max}^2 / (4l^2) \quad (16)$$

$$\lambda = l_c / l \quad (17)$$

$$\hat{E} = \frac{E}{(1-\nu)^2} \quad (18)$$

其中  $l, w, t$  分别是开关梁的长度、宽度和厚度;  $l_c$  是共面波导信号线的宽度;  $y_{\max}$  为开关梁中心点的位移。

利用(15~18)式就可以求出开关梁的弹性系数, 并且与参考文献[2,5]以及 Ansys 软件作了比较. 比较结果示于图 3 中, 计算所需的参数列于表 1 中. 从图 3 可以看出公式(15)与 Ansys 有限元软件最接近, 可以较好地反映开关的弹性系数。

表 1 开关材料和结构参数

Table 1 Material and structure parameters of the switch

参数名称	表征	大小
梁长	$l$	$300\mu\text{m}$
下极板长度(信号线宽度)	$l_c$	$100\mu\text{m}$
梁宽	$w$	$100\mu\text{m}$
梁厚	$t$	$2\mu\text{m}$
下极板厚度	$t_1$	$1\mu\text{m}$
开关电容初始间距	$g_0$	$2\mu\text{m}$
梁的中心位移	$y_{\max} = g_0 - g$	$0 \sim g_0$
杨氏模量(金)	$E$	$57\text{GPa}$
泊松比	$\nu$	$0.35$
残余应力	$\sigma_0$	$0\text{MPa}$

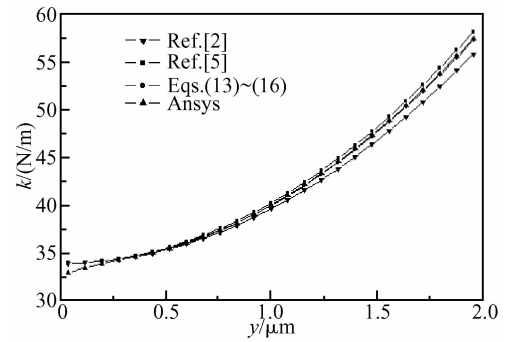


图 3 开关梁弹性系数与中心点位移的关系

Fig.3 Relationship between the spring coefficient and displacement at the center of the switch beam

### 2.3 开关电容的计算模型

对于双端固支的开关而言, 开关发生弯曲后不再是平板电容, 所以必须对电容的计算公式进行修正<sup>[5,8]</sup>. 为了使用准一维的计算方法, 本文采用的修正计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$C = \alpha C_p \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{2}{\pi\lambda} \sqrt{\frac{g}{g_0}} \arctan\left(\frac{\tan(\pi\lambda/2)}{\sqrt{g/g_0}}\right), \lambda = \frac{l_c}{l} \quad (20)$$

式中  $C_p$  是以开关梁中心点处间距为间距的平行板电容值。

由于开关尺寸较小, 并且上下极板不对称, 需要考虑边缘场对电容的影响<sup>[2,4,5,8]</sup>. 除了开关梁的厚度、宽度以及间距引起的边缘场<sup>[4]</sup>外, 由于上下极板长度方向上不相等( $\lambda \neq 1$ ), 需要考虑该效应对边缘场的影响, 结合文献[4], 推出了开关的平板电容模型为:

$$C_p = \epsilon \frac{bl_c}{g} \left( 1 + 0.77 \frac{g}{b} + 1.06 \left(\frac{g}{b}\right)^{0.75} + 1.06 \left(\frac{gt}{b}\right)^{0.5} \right) \times \left( 1 + 0.77 \frac{g}{l_c} + 1.06 \left(\frac{g}{l_c}\right)^{0.75} + 1.06 \left(\frac{gt_1}{l_c}\right)^{0.5} \right) \quad (21)$$

$$g = g_0 - y \quad (22)$$

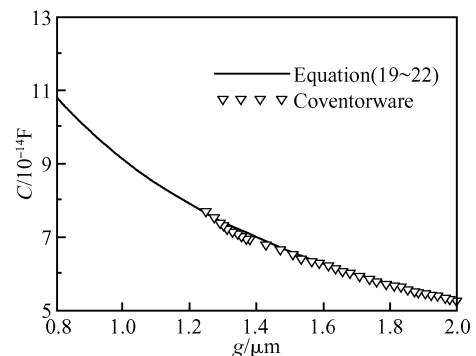


图 4 MEMS 开关的电容与间距的关系

Fig.4 Relationship between the capacitance and separation of the MEMS switch

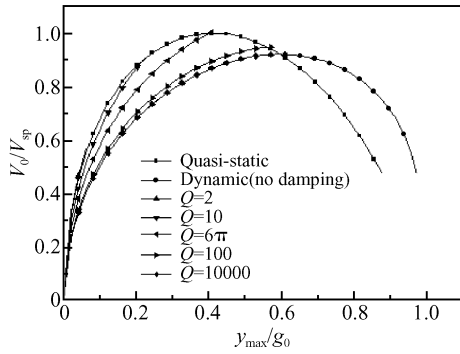


图 5 开关梁中心点最大位移与执行电压在不同环境下的关系

Fig.5 Relationship between the maximum displacement at the center of the switch beam and the activation voltage

联立公式(19~22)就可以计算出开关的实际电容值,利用表 1 中的参数可以求出开关梁在各个位置处的电容,并与 Coventor 软件进行了比较,结果示于图 4.从图中可以看出公式(19~22)可以较准确地反映开关的实际电容.

### 3 RF MEMS 开关实际的吸合电压模拟

准静态情况是目前讨论吸合电压的主要假设状态<sup>[1~7,10,11,13]</sup>,此情况下系统的动能和耗能始终为零,系统注入的能量始终等于弹性储能.该情况的吸合电压和吸合位移满足:

$$\begin{cases} V_{sp} = \sqrt{\frac{2ky}{\partial C/\partial y}} \\ \frac{dV_{sp}}{dy} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

对于目前主要应用的阶跃执行电压而言,准静态方式不再正确,该情况的吸合电压和吸合位移满足公式(12),重写为:

$$\begin{cases} V_0 = \sqrt{\frac{\int_0^{y_{max}} 2(Q + 2\pi)kydy}{\int_0^{y_{max}} Q\partial C/\partial ydy}} \\ V_0 = \sqrt{\frac{2ky_{max}}{\partial C/\partial y|_{y=y_{max}}}} \end{cases} \quad (24)$$

从上式可以看出,开关的动态吸合电压除了与开关结构和材料参数有关以外,还与系统的阻尼有关.

参照表 1 的开关参数,根据上述公式可得开关的准静态吸合电压为 34.05V,动态吸合电压为 31.36V,动态吸合电压比准静态吸合电压低 8%.

文献[14]利用了二维的方法计算开关的吸合电压,针对表 1 中的参数,计算出的准静态吸合电压为 33V,动态吸合电压为 30.28V.由此可见两种方法计算出的吸合电压比较接近,从而验证了本文方法的正确性.误差主要来自边缘场的计算方法不同,此外本文的一维简化也引入了误差.

公式(11),(13)反映了开关受力平衡时的执行电压与梁中心点位移的关系,图 5 所示为表 1 开关在受力平

衡时的准静态、动态执行电压与开关梁中心点位移的关系曲线.从图中可以看出环境阻尼对开关状态的影响较大.以准静态时的曲线为参考线,该曲线的最高点为准静态吸合电压,此时的吸合位移为  $0.4g_0$ .动态平衡时的曲线与参考线都有交点,对于小阻尼的情形,交点在最高点右侧,此交点就是开关的动态吸合电压,从图中可以看出动态吸合电压比准静态吸合电压低,但是随着阻尼的增加,两者的差距降低了;对于大阻尼的情况( $Q < 10$ ),交点在最高点左侧,如果执行电压大于交点处的电压,开关的运动过程就可以看成是准静态的,也就是此时开关的动态吸合电压等于准静态吸合电压;当  $Q = 6\pi$  时,交点与参考线的最高点重合,也就是说当  $Q < 6\pi$  时,开关的吸合电压可以采用准静态方法计算;当  $Q > 6\pi$  时,开关的动态吸合电压低于准静态方式,但是吸合位移却大大增加.

另一方面,由图 5 可以看出在阶跃电压作用下,将动态平衡时的曲线与参考线的交点作为吸合的临界点,或者说公式(11),(13)的联立求解吸合位移以及吸合电压是合理的.

### 4 射频输入功率对吸合电压的影响

开关的射频输入功率会在开关两端感应电压<sup>[2,10,11]</sup>,因而该电压会和执行电压共同作用使开关发生吸合.开关两端感应的电压与射频输入功率之间的关系为<sup>[10,11]</sup>:

$$V_s = |V_s| \sin(\omega t) = \sqrt{\frac{8PZ_0}{4 + (\omega CZ_0)^2}} \sin(\omega t) \quad (25)$$

其中  $P$  为射频输入功率; $Z_0$  为开关端口的特性阻抗; $C$  为开关的电容值; $\omega$  为射频输入信号的角频率.

由于射频输入信号的频率(GHz 量级)与开关梁的机械谐振频率(kHz 量级)相差很多,所以射频信号的谐波分量对开关的作用可以忽略<sup>[10~12]</sup>,因而实际需考虑的执行电压是感应电压的有效值:

$$V_{rf} = \frac{\sqrt{2}}{2} |V_s| = \sqrt{\frac{4PZ_0}{4 + (\omega CZ_0)^2}} \quad (26)$$

只要有射频功率通过开关,就会产生  $V_{rf}$  执行开关.所以在计算开关吸合电压的过程中需要考虑射频功率的影响,从(26)式中可以看出射频功率的大小和频率同时影响开关的吸合电压.

根据文献[2],当执行过程有射频功率通过开关时,实际的执行电压为加载的执行电压( $V_0$ )与射频感应电压( $V_{rf}$ )之和.虽然这不影响开关的吸合电压,但是却使开关吸合所需的实际执行电压降低了.为了正确地表征针对执行电压的吸合电压,需要对原来的吸合电压进行修正,也就是将射频功率的影响考虑进去.即考虑了射频输入信号后开关的执行电压为执行电压( $V_0$ )与射频感应电压( $V_{rf}$ )之和:

$$V_1 = V_0 + V_{rf} \quad (27)$$

注入到开关系统的能量为:

$$E_{injected} = \frac{1}{2} CV_1^2 \quad (28)$$

考虑了射频输入功率影响之后的吸合电压和吸合位移满足:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1 = \sqrt{\frac{\int_0^{y_{\max}} 2(Q + 2\pi)kydy}{\int_0^{y_{\max}} Q\partial C/\partial ydy}} \\ V_1 = \sqrt{\frac{2ky_{\max}}{\partial C/\partial y|_{y=y_{\max}}}} \\ V_{\text{pull-in}} = V_1 - \sqrt{\frac{4PZ_0}{4 + (\omega C_u Z_0)^2}} \end{array} \right. \quad (29)$$

从上式可以看出,射频输入功率仅仅影响吸合电压的大小,不影响吸合位移.如果射频输入功率  $P$  足够大可以使开关的吸合电压降为零,此时开关就发生自执行失效,也就是会发生功率处理能力问题.

## 5 结论

本文全面系统地分析了开关的准静态和动态吸合电压的计算方法.文献[8,9,14]对动态吸合电压的分析得出了一些结论,但是都有一些不足.本文从弹性系数和电容的准确计算入手,较为准确地提出了基于 CPW 的双端固支梁开关的弹性系数一维计算公式和考虑了边缘场的非平板电容计算公式,从而更加准确地计算了开关的吸合电压,通过与文献[14]的比较验证了本文理论的正确性.同时考虑了射频输入功率对开关吸合电压的影响.针对表 1 的开关参数,开关的动态吸合电压比准静态吸合电压低 8%,准静态吸合位移为  $0.4g_0$ ,动态吸合位移介于  $0.4g_0$  和  $0.6g_0$  之间,主要取决于环境阻尼.射频输入功率主要影响开关的吸合电压而不影响吸合位移.

## 参考文献

[1] Yao J J. RF MEMS from a device perspective. *Journal of Micro-*

- mechanics and Microengineering*, 2000, 10: 9
- [2] Rebeiz G M. RF MEMS theory, design, and technology. Hoboken, NJ: Wiley, 2003
- [3] Hector J, de Santos L. RF MEMS circuit design for wireless communications. Boston: Artech House, 2002
- [4] Chowdhury S, Ahmadi M, Miller W C. Pull-in voltage study of electrostatically actuated fixed-fixed beams using a VLSI on-chip interconnect capacitance model. *Journal of Micromechanical Systems*, 2006, 15(3): 639
- [5] Pamidighantam S, Puers R, Baert K, et al. Pull-in voltage analysis of electrostatically actuated beam structures with fixed-fixed and fixed-free end conditions. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2002, 12: 458
- [6] Muldavin J B, Rebeiz G M. High-isolation CPW MEMS shunt switches-part 1: modeling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2000, 48(6): 1045
- [7] Schauwecker B, Mehner J, Strohm K M, et al. Investigations of RF shunt airbridge switches among different environment conditions. *Sensors and Actuators*, 2004, 114: 49
- [8] Elata D, Bamberger H. On the dynamic pull-in of electrostatic actuators with multiple degrees of freedom and multiple voltage sources. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(1): 131
- [9] Nielson G N, Barbastathis G. Dynamic pull-in of parallel-plate and torsional electrostatic MEMS actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, 15(14): 811
- [10] Peroulis D, Pacheco S P, Katehi L P B. RF MEMS switches with enhanced power-handling capabilities. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 52(1): 59
- [11] Rottenberg X, Brebeks S, De Raedt W, et al. RF-power: driver for electrostatic RF-MEMS devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14: 43
- [12] Liu Yanzhu, Chen Wenliang, Chen Liqun. *Mechanics of vibrations*. Beijing: Higher Education Press, 1998 (in Chinese) [刘延柱, 陈文梁, 陈立群. 振动力学. 北京: 高等教育出版社, 1998]
- [13] Senturia S D. *Microsystem design*. Norwell, MA: Kluwer, 2001
- [14] Elata D. Modeling the electromechanical response of RF-MEMS switches. 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2006: 1

## Analysis of Pull-In Voltage of RF MEMS Switches\*

Dong Qiaohua, Liao Xiaoping<sup>†</sup>, Huang Qing'an, and Huang Jianjiu

(Key Laboratory of MEMS of the Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The pull-in voltage of RF MEMS switches at different actuations is presented. When the actuation voltage is a pulse voltage, the movement of the switch beam is in a vibration state rather than quasi-static, so the pull-in voltage is different from the quasi-static condition and is called dynamic pull-in voltage. It is about 92% of the quasi-static pull-in voltage. Following the simple formula of the spring coefficient of a beam and the exact formula of the capacitor for the switch, the quasi-static and dynamic pull-in voltages of the clamped-clamped beam switch on CPW are analyzed, and the damping effect is also included. The damping reduces the difference between the two kinds of pull-in voltages. Finally, the influence of the RF input power on the pull-in voltage is analyzed. The input power decreases the pull-in voltage, reducing the pull-in voltage to zero at a certain power, and then making the switch self-actuate.

**Key words:** RF MEMS; switch; pull-in voltage; quasi-static; dynamic; damping

**EEACC:** 1350

**Article ID:** 0253-4177(2008)01-0163-05

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60676043)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: xpliao@seu.edu.cn

Received 30 March 2007, revised manuscript received 27 July 2007