# A Novel MEMS Switch with Reconfigurable Driving Voltage Based on the Charge Injection Mechanism*

*ZHENG Congbing, ZHANG Pengfei, WANG Lifeng, HAN Lei, ZHANG Zhiqiang, HUANG Xiaodong**

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

**Abstract**: A new method to solve the problem of excessively high driving voltage of Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) switch has been presented based on the capacitive electrostatic driving. By intentionally injecting an appropriate amount of charges into the dielectric layer on the driving electrode, the stable built-in potential can be formed in the dielectric layer, and this built-in potential can effectively promote the drag operation of the MEMS beam, thus greatly reducing the driving voltage of the RF MEMS switch. In addition, even though the preparation of the MEMS switch is completed, the built-in potential in the dielectric layer can also be adjusted by modulating the number of the injected charges, therefore, the MEMS switch with a function of reconfigurable driving voltage can be realized without changing the structural parameters of the MEMS switch. The model of this novel MEMS switch was established by the combination of spring mass and parallel plate capacitor, and the detailed analysis of this model was carried out and the correctness of the model was verified.

**Key words**: MEMS switch; charge injection; driving voltage; reconfiguration

**EEACC**: 2575 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.06.001

# 基于电荷注入机制的驱动电压可重构的 MEMS 开关*

郑从兵, 张鹏飞, 王立峰, 韩 磊, 张志强, 黄晓东*

(东南大学 MEMS 教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要**: 本文提出了一种新方法来解决传统静电驱动的电容式微机电(MEMS)开关的驱动电压过高的问题。通过对介质层预先注入和存储适量的电荷, 在该介质层中形成稳定的内建电势, 这将优化 MEMS 固支梁的下拉操作, 从而有效降低 MEMS 开关的驱动电压。此外, 在开关制备完成后, 仍可通过调控介质层中注入电荷的数目来调节内建电势大小, 从而在不改变 MEMS 开关结构参数的条件下实现 MEMS 开关驱动电压的可重构功能。建立了该新型 MEMS 开关的解析模型, 对该新型模型进行分析, 并验证了模型的正确性。

**关键词**: MEMS 开关; 电荷注入; 驱动电压; 可重构

**中图分类号**: TN4+; TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2020)06-1191-06

微机电(MEMS)开关是 MEMS 领域的基础性和关键性器件, 较之于场效应晶体管和 PIN 二极管等电子开关, MEMS 开关具有尺寸小、损耗底、带宽大以及互调失真小等众多优点[1-3]。基于静电执行的电容式 MEMS 开关具有零直流功耗、小的结构电极、相对短的开关时间、小的接触力以及可用高阻偏置线给开关施加偏压等优势, 因此, 具有广阔的发展和应用前景。然而, 驱动电压过高(几十至上百伏)及其引起的可靠性差等问题已成为制约该类 MEMS 开关发展的主要瓶颈。当前的研究主要通过减小弹簧常数、增大重叠驱动面积或者采用折叠梁结构等调整和优化结构的方法, 来解决静电 MEMS 开关驱动电压过高的问题, 通过上述努力, 相应的驱动电压可降低到十几伏甚至几伏[4-7]。需指出的是, 虽然

**项目来源**: 国家自然科学基金项目(61604039, 61604040); 至善青年学者支持计划项目(2242019R40030)

**收稿日期**: 2020-09-22 **修改日期**: 2020-10-23

通过改变开关几何结构、尺寸等方式能够有效降低器件驱动电压,但是也会带来开关尺寸增大、结构复杂且不稳定以及工艺难度大等问题,这也增加了开关机械失效的风险。

如图 1 所示,在 MEMS 开关工作过程中,驱动电压在介质层中能够产生 1 MV/cm~3 MV/cm 的高电场并造成介质层中产生可观的漏电[8-9]。另一方面,介质层中存在许多陷阱,这些陷阱能够俘获注入到介质层中的电子,当俘获的电荷积累到一定程度后,其产生的电势会影响开关的正常工作。上述现象广泛存在于 MEMS 开关中,亟需方案来解决。本文设计的基于电荷注入机制的驱动电压可重构的 MEMS 开关,旨在利用上述介质层中电荷注入的现象,通过在介质层中预先注入和存储适量的电荷,使得介质层上形成稳定的内建电势,并通过内建电势及其调控,来降低静电 MEMS 开关的驱动电压并实现其驱动电压的可重构。

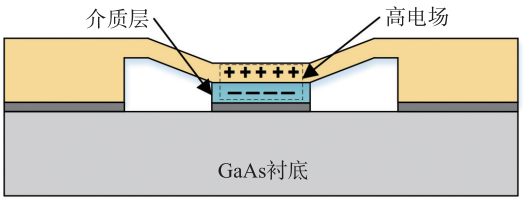



图 1 介质层电荷注入现象

## 1 新型 MEMS 开关的结构和机制

### 1.1 基本结构

如图 2 所示,本文设计的基于电荷注入机制的驱动电压可重构的 MEMS 开关采用并联电容式结构,它主要由一个 MEMS 固支梁结构、两个驱动电极以及两段共面波导(CPW)传输线构成。MEMS 固支梁的两端与 CPW 传输线的地线相连接并固定,该区域称为锚区,MEMS 固支梁下方为 CPW 信号线以及两个驱动电极,其中,CPW 信号线用于传输微波信号,驱动电极用于施加直流驱动电压,驱动电极和 CPW 信号线上覆盖有 $Si_3N_4$ 介质层。另外,

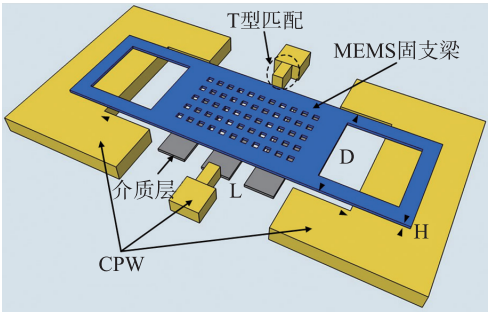



图 2 MEMS 开关的结构示意图

由于 MEMS 梁引入了额外的电容,因此,需要采用 T 型匹配结构进行电容补偿,从而减小微波信号的传输损耗。

### 1.2 工作机制

当开关介质层中存在电荷注入现象时,这些注入的电荷会影响开关的驱动电压。图 3 为下拉状态时 MEMS 开关的等效双层电容结构示意图,驱动电压在注入的电荷作用下所产生的漂移由下式给出[10]

$$\Delta V=-\frac{z}{\varepsilon}\cdot\sigma_z \tag{1}$$

式中:$z$ 是介质层中注入电荷所在位置到介质层底部的距离,$\sigma_z$ 是注入电荷的密度,$\varepsilon$ 是介质的相对介电常数。

在开关介质层中的电荷主要是由电荷注入所形成。在图 3 中,顶层电极与开关介质层上表面接触区附近的空气和电介质被视为一层等效介质层,其特性介于空气和开关电介质之间。

设定等效介质层的厚度为 $d_e$、介电常数为 $\varepsilon_e$、电导率为 $s_e$;分界面下开关电介质层的厚度设为 $d_s$、介电常数设为 $\varepsilon_s$、电导率为 $s_s$。利用电荷守恒定律,分界面上注入电荷 $\sigma_i(t)$ 的过程为[11]

$$\frac{\partial\sigma_i(t)}{\partial t}+m\sigma_i(t)=n \tag{2}$$

式中:$m$ 和 $n$ 为

$$m=\frac{d_s s_e+d_e s_s}{d_s\varepsilon_e+d_e\varepsilon_s},\ n=\frac{s_s\varepsilon_e-s_e\varepsilon_s}{d_s\varepsilon_e+d_e\varepsilon_s}V \tag{3}$$

初始时开关介质层中无注入电荷 $\sigma_i(t=0)=0$,式(2)可以简述为

$$\sigma_i(t)=\frac{n}{m}\cdot[1-\exp(-mt)] \tag{4}$$

当撤去偏置电压后,开关迅速恢复到初始状态。在这种状态下,由于此时空气层的厚度要远大于接触区的不平整高度,所以图 3 中的等效介质层主要由空气构成,此时注入电荷的消失过程可以表述为

$$\sigma_i(t)=\sigma_{si0}\cdot\exp(-mt) \tag{5}$$

式中:$m$ 和 $n$ 重写为

$$m\approx\frac{s_s}{\varepsilon_s},\ n=0 \tag{6}$$

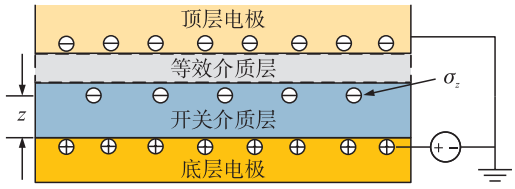



图 3 下拉状态时开关的等效双层电容结构

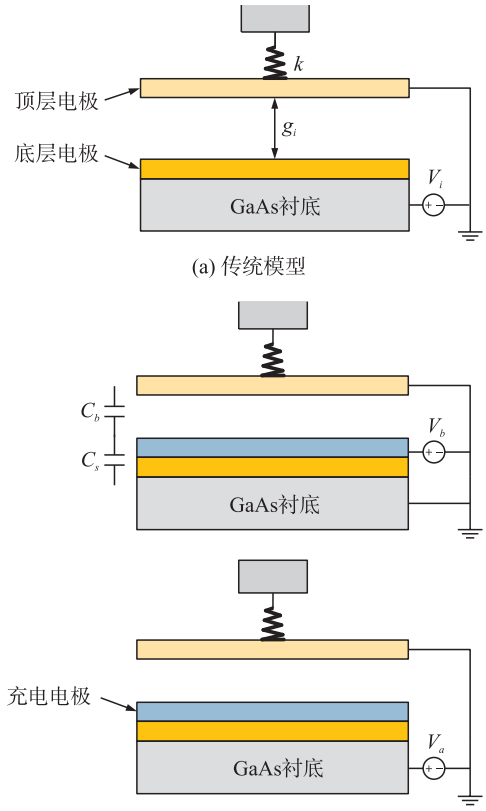
$\sigma_{si0}$表示消失过程初始时的注入电荷量。实验结果表明,介质层的电导率随着其偏置电场的增大而增大[12]。因此,式(3)中的介质层的电导率要远大于式(6)中的电导率。$1/m$ 代表式(4)和式(5)的时间常数。综上,电荷消失过程要远慢于电荷注入过程,这也是开关介质层中存在注入电荷的主要原因之一。

利用介质层的电荷注入现象,本文设计出一种新型的基于电荷注入机制的驱动电压可重构的 MEMS 开关,它通过增加充电电极(如图 4 所示),导致在充电电极上预先注入适量的电荷形成内建电势,进而降低 MEMS 开关的驱动电压。

## 2　模型

MEMS 开关可等效为弹簧质量和平行板电容器两部分,这两部分相结合可构成 MEMS 开关吸合操作的分析模型,通过引入充电电极,该模型可直观地展示充电电极预充电前后的驱动电压情况。

图 4(a)和 4(b)分别给出了传统的和基于电荷注入机制的 MEMS 开关吸合操作的分析模型。在图 4(a)中,对于传统 MEMS 开关,将 MEMS 固支梁看作为顶层电极,将驱动电极看作为底层电极,通过在这两个电极之间施加驱动电压 $V_i$ 可以驱动 MEMS 固支梁,使其下拉。所提出的基于电荷注入机制的模型与传统模型不同,在工作之前充电电极已经注入电荷。




(a) 传统模型

(b) 基于电荷注入机制模型

**图 4　MEMS 开关吸合操作的分析模型**

在图 4(b)中,对于基于电荷注入机制的 MEMS 开关,在顶层电极和底层电极之间增加了一个充电电极,其作为预充电的介质层。首先,用 $V_b$ 对充电电极进行一定时间的电荷注入,然后,断开 $V_b$,在顶层电极和底层电极之间施加驱动电压 $V_a$,此时充电电极和顶层电极之间的电压差为 $V_a+V_b$,$V_a$ 和 $V_b$ 共同驱动 MEMS 固支梁,使其下拉。当 $V_b$ 能够保持稳定,那么将显著降低驱动电压。因而,通过调控不同的 $V_b$,可实现 MEMS 开关的驱动电压可重构。

为了计算在预充电和 MEMS 固支梁下拉时充电电极的电势 $V_f$,可将基于电荷注入机制的 MEMS 开关视为两个电容器的串联连接,一个是 $C_0$,另一个是 $C_s$,如图 5 所示。当充电电极偏置到 $V_b$ 时,充电电极中的注入电荷总量为

$$Q_b=(C_b+C_s)\cdot V_b \tag{7}$$

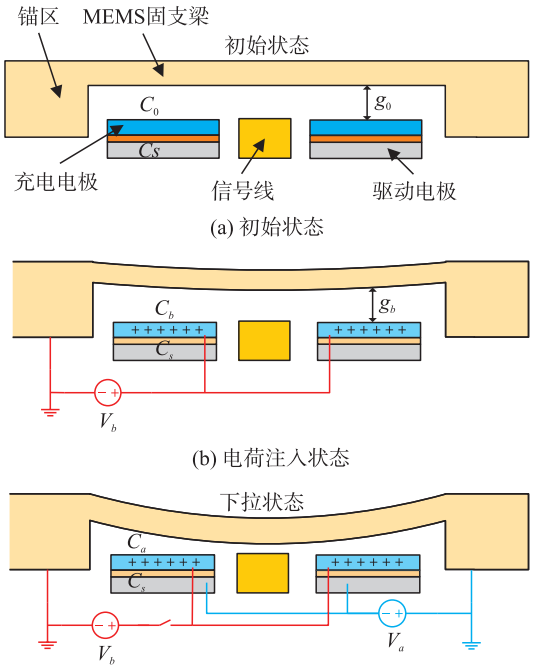
当充电电极已经断开电连接,底层电极被偏置到 $V_a$ 时,充电电极中的总电荷量可表示为

$$Q_a=C_a\cdot V_f+C_s\cdot(V_f-V_a) \tag{8}$$

通常充电电极中注入的电荷能稳定地存储,此时,底层电极被偏置到 $V_a$ 前后的注入电荷总量是相同的,即 $Q_a=Q_b$,并且 $V_f$ 可表示为

$$V_f=\frac{C_b+C_s}{C_a+C_s}V_b+\frac{C_s}{C_a+C_s}V_a \tag{9}$$

式中:$C_s$,$C_0$,$C_b$ 和 $C_a$ 可以表示为




(a) 初始状态

(b) 电荷注入状态

(c) 下拉状态

**图 5　基于电荷注入机制的 MEMS 开关的下拉模型**

$$C_s=nC_0=n\varepsilon_0\frac{A}{g_0},C_b=\varepsilon_0\frac{A}{g_b},C_a=\varepsilon_0\frac{A}{g} \quad (10)$$

然后可将顶层电极与充电电极之间的间隙表示为

$$g_b=\frac{1}{3}g_0+\frac{2}{3}g_0\cos\left(\frac{1}{3}\arccos\left(1-\frac{27\varepsilon_0 A}{4kg_0^3}V_b^2\right)\right) \quad (11)$$

在式(10)中,充电电极的电势($V_f$)和 MEMS 固支梁上总的平衡力可表示为

$$V_f=\frac{1/g_b+n/g_0}{1/g+n/g_0}V_b+\frac{n/g_0}{1/g+n/g_0}V_a \quad (12)$$

$$F_{total}=-k(g_0-g)+\frac{1}{2}\frac{\varepsilon_0 A}{g^2}\left(\frac{1/g_b+n/g_0}{1/g+n/g_0}V_b+\frac{n/g_0}{1/g+n/g_0}V_a\right)^2 \quad (13)$$

由式(13)可以得到 MEMS 固支梁的下拉不稳定点,此时的下拉间隙和下拉电压可表示为

$$g_{\text{down}}=\frac{2}{3}g_0\left(1-\frac{1}{2n}\right)=g_i\left(1-\frac{1}{2n}\right) \quad (14)$$

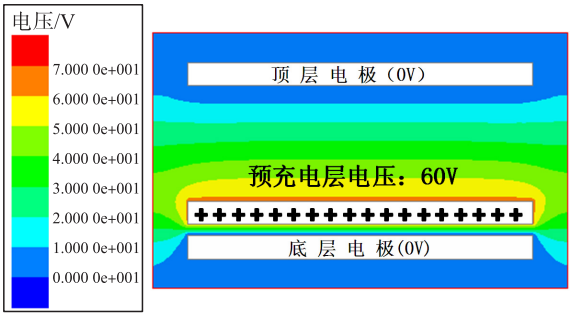
$$V_{a,\text{down}}=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\varepsilon_0 A}}-\frac{g_b+g_0/n}{g_b}V_b=\left(1+\frac{1}{n}\right)^{3/2}V_i-\frac{g_b+g_0/n}{g_b}V_b \quad (15)$$

式中:$g_i$ 和 $V_i$ 分别是传统平行板传动装置达到不稳定点时的下拉间隙和下拉电压,如图 4(a)所示。

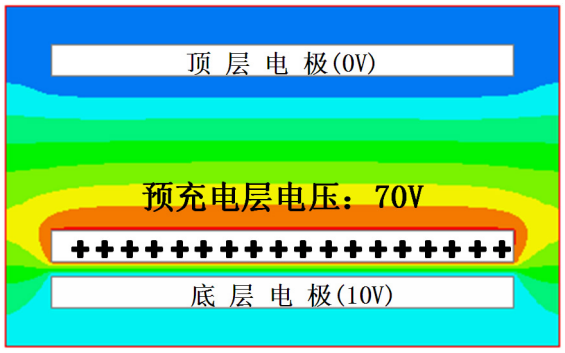
基于电荷注入机制的 MEMS 开关的下拉间隙仅由 $C_s$ 和 $C_0$ 之间的电容比 $n$ 决定,和充电电极上的电势 $V_b$ 无关,这说明基于电荷注入机制的 MEMS 开关的下拉不稳定点仅由电容比 $n$ 决定。此外,当 $n$ 达到无穷大时,此时间隙变化为初始间隙的三分之二,即 MEMS 开关的下拉间隙。

如果充电电极不注入电荷,那么基于电荷注入机制的 MEMS 开关的下拉电压将会略高于传统 MEMS 开关的下拉电压。但是,在电荷注入之后,下拉电压便会降低,这说明可以通过控制 $V_b$ 来调控下拉电压,并且理论上可以一直降低到接近零电压。此外,当 $C_s$ 远大于 $C_0$($n$ 达到非常大的值)时,实际的下拉电压变为 $V_i-V_b$,这恰好是传统 MEMS 开关的下拉电压与注入电荷所产生的电势之差。

图 6 为采用 Maxwell 软件对基于电荷注入机制的 MEMS 开关进行仿真。在图 6(a)中,当充电电极中预先注入适量的电荷后,在其界面形成了 60 V 的内建电势;在图 6(b)中,当充电电极注入电荷之后,在底层电极上施加 10 V 的电压,充电电极上便会得到 70 V 的电压值。其结果表明,在充电电极上形成的内建电势(60 V)与驱动电压(10 V)相叠加,共同作用于 MEMS 开关上,使得 MEMS 开关执行下拉操作。




(a) 无驱动电压




(b) 有驱动电压

**图 6 基于电荷注入机制的 MEMS 开关**

## 3 仿真结果与讨论

表 1 为本文设计的基于电荷注入机制的 MEMS 开关的结构尺寸,开关结构见图 1。

**表 1 MEMS 开关的结构尺寸**

| | |
|---|---|
| GaAs 衬底厚度/μm | 400 |
| CPW 信号线和地线厚度/μm | 3.44 |
| CPW 尺寸($G/S/G$)/μm | 37/68/37 |
| CPW 特性阻抗/Ω | 50 |
| MEMS 固支梁的长度 $L$/μm | 200 |
| MEMS 固支梁的宽度 $D$/μm | 100 |
| MEMS 固支梁的厚度 $H$/μm | 2 |

图 7 展示了 COMSOL Multiphysics 软件建模的 MEMS 开关的下拉仿真图。在图 7 中,MEMS 固支梁的中间部位呈现出最大的下拉位移,其位移约为 0.6

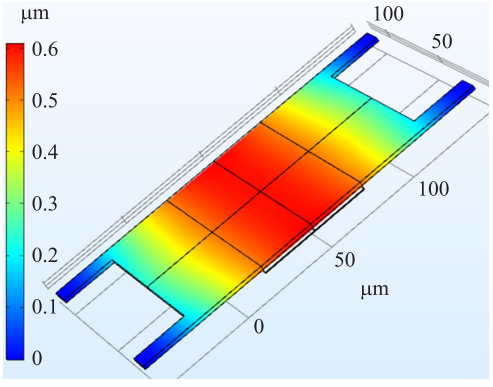



**图 7 MEMS 开关的下拉仿真图**

μm,而 MEMS 固支梁的两端呈现出最小的下拉位移,该结果符合 MEMS 开关的实际下拉情况。以 MEMS 固支梁的中心点作为求解点,当该求解点的下拉位移到达 MEMS 固支梁与充电电极初始间隙时,便可以求解出该 MEMS 开关的驱动电压。

图 8 为 MEMS 开关在电荷注入之前施加的驱动电压与 MEMS 固支梁高度 Z 的关系图。由图 8 可知,需要在电极上施加 84.6 V 的电压,才能够将 MEMS 开关的固支梁下拉至充电电极处。

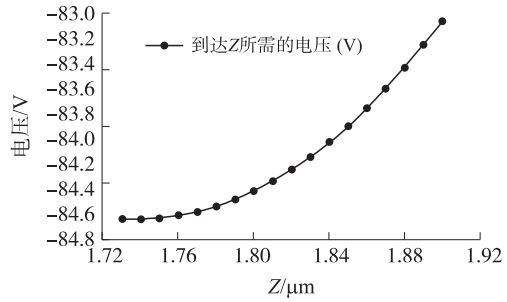



**图 8　在电荷注入前 MEMS 开关的驱动电压的求解图**

当对 MEMS 开关进行电荷注入后,未在驱动电极上施加驱动电压时,其电压和电场分布情况如图 9 所示。在图 9 中,充电电极上由于电荷注入所形成的电势约为 70 V,同时形成的电场约为 $3.5\times10^8$ V/m。

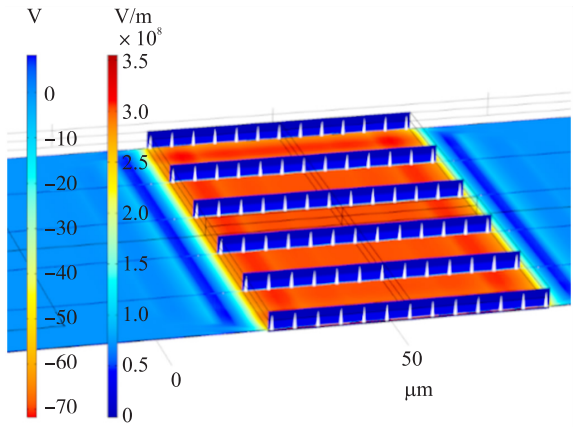



**图 9　MEMS 开关的电荷注入仿真图**

当电荷注入之后,在 MEMS 开关的驱动电极上施加一定的驱动电压时,开关的电压分布情况如图 10 所示。同时,得出如图 11 所示的 MEMS 开关的驱动电压求解图。由图 10 和图 11 可知,在 MEMS 开关进行电荷注入之后,驱动电极上只需施加约 15.4 V 的驱动电压便可将 MEMS 开关的固支梁下拉至充电电极处。

通过仿真模拟,在电荷注入前可得设计的 MEMS 开关的初始驱动电压约为 84.6 V,通过在充电电极上进行电荷注入形成约为 70.0 V 的内建电势,此时,MEMS 开关的驱动电压下降至 15.4 V 左右。在电荷注入前后,MEMS 开关的驱动电压减小约 81.8%。综上所述,通过调控注入的电荷量,实现了 MEMS 开关的驱动电压可重构。

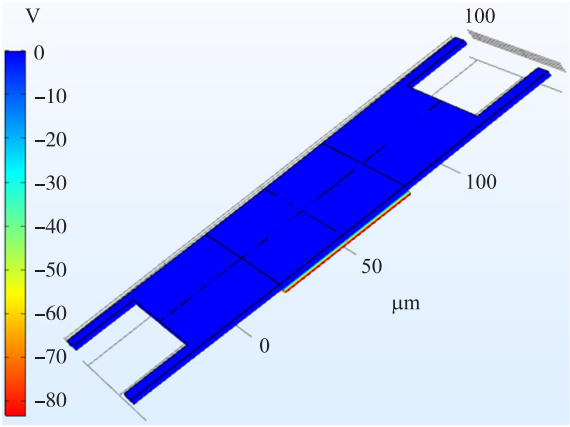



**图 10　在电荷注入后 MEMS 开关的驱动电压仿真图**

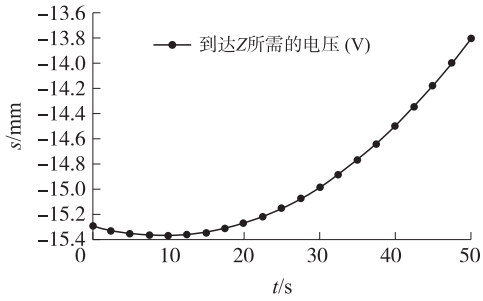



**图 11　在电荷注入后 MEMS 开关的驱动电压求解图**

## 4　结论

本文通过在充电电极上预注入电荷的方式,设计了一种驱动电压可重构的 MEMS 开关。分析结果表明:该新型 MEMS 开关可有效地解决传统 MEMS 开关驱动电压偏大的问题。该新型 MEMS 开关具有低功耗、高可靠性以及驱动电压可重构等特点,在可调谐滤波器、通路选择器和可调谐天线阵列等众多领域具有应用前景。

**参考文献:**

[1] Zheng W B,Huang Q A,Li F X,et al. RF MEMS Membrane Switches on GaAs Substrates[J]. Micronanoelectronic Technology,2003,7:395-403.

[2] Rebeiz G M,Patel C D,Han S K,et al. The Search for a Reliable MEMS Switch[J]. Microwave Magazine IEEE,2013,14(1):57-67.

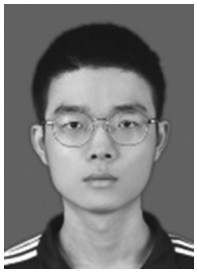
[3] Hyman D,Lam J,Warneke B,et al. Surface-Micromachined RF MEMS Switches on GaAs Substrate[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering,2015,9(4):348-361.

[4] Rebeiz G M,Muldavin J B,Schoenlinner B,et al. RF MEMS:Theory,Design,and Technology[M]. New Jersey:Wiley,2004:123-124.

[5] Ravirala A K,Bethapudi L K,Kommareddy J,et al. Design and Performance Analysis of Uniform Meander Structured RF MEMS Capacitive Shunt Switch Along with Perforations[J]. Microsystem

Technologies,2018,24:901-908.
[6] Molaei S,Ganji B A. Design and Simulation of a Novel RF MEMS Shunt Capacitive Switch with Low Actuation Voltage and High Isolation[J]. Microsystem Technologies,2017,23(6):1907-1912.
[7] Ya M L,Soin N,Nordin A N. Design,Optimization and Simulation of a Low-Voltage Shunt Capacitive RF-MEMS Switch[J]. Microsystem Technologies,2015,22:537-549.
[8] 许成龙,李朋伟,张文栋,等. 电容式 RF MEMS 开关介质层电荷积累消除方法[J]. 微纳电子技术,2013,50(9):559-565.
[9] Scarpulla J,Eng D C,Olson S R,et al. A TDDB Model of Si3N4-Based Capacitors in GaAs MMICs[C]//IEEE International Reliability Physics Symposium. 1999:128-137.
[10] Wibbeler J,Pfeifer G,Hietschold M. Parasitic Charging of Dielectric Surfaces in Capacitive Microelectromechanical Systems(Mems)[J]. Sensors and Actuators A,1998,71:74-80.
[11] Wang L F,Huang QA,Tang J Y,et al. A Hybrid Model for the Charging Process of the Amorphous $SiO_2$ Film in Radio Frequency Microelectromechanical System Capacitive Switches[J]. Chinese Physics B,2011,20(3):426-432.
[12] Riccò B,Gozzi G,Lanzoni M. Modeling and Simulation of Stress-Induced Leakage Current in Ultrathin $SiO_2$ Films[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,1998,45(7):1554-1560.

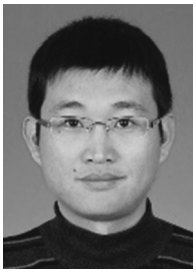
**郑从兵**(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为 RF MEMS 传感器,220184850@seu.edu.cn;



**张鹏飞**(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为 MEMS 传感器技术,230208650@seu.edu.cn;

**王立峰**(1981—),男,副教授,主要研究方向为微型传感器系统,wanglifeng@seu.edu.cn;

**韩 磊**(1982—),男,副教授,主要研究方向为 RF MEMS 器件、电路及系统集成技术,hanlei@seu.edu.cn;



**张志强**(1983—),男,副教授,主要研究方向为 RF MEMS 器件、物理量传感器及检测系统,zqzhang@seu.edu.cn;

**黄晓东**(1982—),男,教授,主要研究方向为微能源器件(能量收集与存储)、电路及系统集成技术,xdhuang@seu.edu.cn。