

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306706

减少静电漂移的高可靠 RF MEMS 开关研究*

翟雷应 张钰瑶 刘文进 南敬昌
(辽宁工程技术大学 葫芦岛 125000)

摘要:RF MEMS 开关具有制作工艺简单、易于集成等优点。而目前由电介质膜电荷积累造成的静电漂移及频繁机械碰撞导致严重的可靠性问题阻碍了其嵌入终端射频系统稳定性的提高。因此结构上采用电介质悬空薄膜改善电荷积累问题,并对开关机械结构限位实现开关的动态缓冲,降低高频次的机械碰撞损伤。同时依靠凸台触点结构,减少静电漂移。确立了电介质膜充电、开关寿命的理论模型并预测开关的寿命。结果表明,所设计开关寿命超过 12 900 h。相比已有 RF MEMS 开关,在两极板间距及金属梁-电介质膜间距分别相等的情况下,所提出的开关结构,寿命分别提高 253 倍和 166 倍,极大地改善静电漂移问题。在 52.2 GHz 工作频率下,隔离度为-41.31 dB,损耗为-0.25 dB,响应时间为 50 μ s,为高性能、高可靠、长寿命射频开关提供了理论模型。

关键词: RF MEMS 开关;可靠性;介质充电;开关寿命;电荷注入;接触碰撞
中图分类号: TH39 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 51010

Research on anti-static and long-life high stability RF MEMS switch

Zhai Leiying Zhang Yuyao Liu Wenjin Nan Jingchang
(Liaoning Technical University, Huludao 125000, China)

Abstract: RF MEMS switches have the advantages of simple fabrication process and easy integration. However, the electrostatic drift and frequent mechanical collisions caused by the charge accumulation of dielectric film currently result in serious reliability problems that hinder the stability improvement of its embedded terminal RF system. Therefore, the structure of the dielectric suspension film is used to improve the charge accumulation problem, and the switch mechanical structure limit to realize the dynamic buffer of the switch to reduce the high-frequency mechanical collision damage. At the same time relying on the tab contact structure to reduce electrostatic drift. The theoretical models of dielectric film charging and switch life are established and the switch life is predicted. The results show that the designed switch life exceeds 12 900 hours. Compared with the existing RF MEMS switches, the proposed switch structure improves the lifetimes by 253 and 166 times, respectively, and greatly improves the electrostatic drift problem when the bipolar plate spacing and the metal beam-dielectric film spacing are equal, respectively. The isolation of -41.31 dB, loss of -0.25 dB, and response time of 50 μ s at 52.2 GHz operating frequency provide a theoretical model for high-performance, high-reliability, and long-life RF switches.

Keywords: RF MEMS switches; reliability; dielectric charging; switching life; charge injection; contact collision

0 引言

RF MEMS 开关是射频领域和无线通信领域的重要器件^[1],在射频电路、相控阵天线^[2]、卫星交换网络的开

关矩阵、X 波段的移相器、微波功率计、可重构天线、雷达、无人机等方面有着广泛的应用。可靠性问题始终是制约 RF MEMS 开关应用的重要因素。一些特殊应用中,如太空环境、军事远程控制中的微波信号调制及传输应用中,射频开关稳定性影响巨大、更换成本高,研制高可

收稿日期:2023-07-05 Received Date: 2023-07-05

* 基金项目:国家自然科学基金(61971210)、辽宁省应用基础研究计划项目(2022JH2/101300275)、辽宁工程技术大学横向课题(21-2334)项目资助

靠、长寿命的射频开关是发展的必然趋势。

目前影响 RF MEMS 高可靠性的因素主要存在电介质充电和金属梁频繁闭合导致损坏两类问题,造成了严重的静电漂移及机械开关结构的破坏,极大地降低了开关的稳定性和使用寿命^[3]。电介质充电造成的电荷积累问题,在达到一定的阈值后会导致较高的电压偏移,最终造成驱动电压不断上升,直到形成驱动失效。而大量静电荷的积累也极易在开关闭合过程由于强静电力产生的静电吸附作用造成黏附失效。

对于减少电介质膜充电方法的研究主要集中在如下几个方面:1)改变电介质膜的材料。文献[4]表明 Al_2O_3 可作为电介质膜的首选,在 50~100 GHz 的频率范围内提供良好的性能。文献[5]中提到选择材料时使用具有高介电常数的介电层材料和具有低电阻的导体材料会提高开关的可靠性。然而很多文献中会选择 SiN_x 作为电介质膜^[6]。文献[7]中表明在具有不同 Si 含量 ($x = 0.47 \sim 1.04$) 的 SiN_x 电介质膜充电情况也会不同。此外研究人员还研究了具有嵌入 CNT 的纳米结构 SiN_x 薄膜在 RF MEMS 电容开关的应用,较低的充电量和较小的放电时间是其应用在 RF MEMS 电容开关的优势^[8];2)改变输入驱动电压波形。利用双脉冲驱动电压等特性,以较高电压作为开关的开启电压,以较低电压作为维持电压。连续两次开启电压的极性相反,将之前电介质中的电荷中和。而电荷积累主要发生在开关闭合的前 1 200 s^[9],开关闭合时维持电压较小,可以减少电荷积累。然而电介质充电的过程受环境影响较大,驱动波形上的变化难以确定;3)改进 RF MEMS 开关机械结构。例如采用无介质的结构设计避免电介质膜充电。该方法通过电压阈值控制开关的闭合状态,任何微小的波动极易吸合并造成短路,更易引起开关失效。其次,金属梁与驱动电极是金属与金属之间直接碰撞会损坏上方的金属梁,开关也会因此退化,严重影响开关的寿命。为了改进以上问题,可在驱动电极上增加凸点或者在可动梁下方增加凸点来避免可动梁与驱动电极的大面积直接碰撞,但是此类开关的机械结构设计复杂,加工流程繁琐,对于加工制造的准确度要求也很高,容差性小。此外,有报道采用斥力对开关进行驱动^[10]。但此种方法控制较差,并不常用。

国内外对开关可靠性的研究持续进行,不断推出高性能长寿命的 RF MEMS 开关。国内众多高校中成果较为显著的如东南大学于 2015 年通过改善工艺流程将开关循环周期提升至 10^7 次^[11]。北京邮电大学于 2022 年设计一款高电容比低驱动电压的并联式 RF MEMS 开关,通过改变金属梁的结构来降低驱动电压,进而减少介质的充电延长开关寿命,将开关循环周期延长至 1.26×10^8 次^[12]。国外研究所也多从工艺^[13]、金属梁结构^[14] 等的方面提高开关的可靠性,开关循环周期可达 10^7 次。

由于微机械开关仍为通过机械碰撞的方式实现频繁的闭合和开启,长时间工作状态下,机械碰撞带来的损伤是 RF MEMS 失效的一个重要原因。对此,文献[15-16]通过采用改变电压以控制开关金属梁的碰撞,但操作难度较大。文献[17]在信号线两侧增加了支柱来减缓金属梁的速度。该结构的问题在于支柱对于金属梁的止停依旧是刚性的,支柱面临较大冲击,容易损坏。机械碰撞带来的开关可靠性问题依然没有得到更好的解决。

为此,本文针对电容式 RF MEMS 开关中存在的电介质充电和机械碰撞的双重难点首次提出采用电介质悬空膜结构来改善电荷充电问题并通过在电介质悬空膜上设计 MEMS 悬臂梁结构实现悬空膜对可动金属机械开关的缓冲保护,通过调节悬臂梁的组合刚度实现快速响应。金属机械开关下方设计了凸台触点结构,在减少充电面积的同时,进一步降低接触时间的电荷充电效应。通过数值仿真模型对所设计 RF MEMS 开关寿命进行了评估,本设计成功将开关循环周期增至 9.288×10^9 次。寿命得到了大幅度的提升。本文对相关微机械结构及射频特性进行了有限元仿真,结果表明本文提出的结构设计可为射频应用系统需求的高可靠、长寿命、高性能射频开关提供重要技术支撑。

1 理论模型与设计

1.1 电介质充电

1) 电介质充电的原理

开关处于关态,金属梁与电介质膜接触时,金属梁上的电子经过电发射,进入到电介质膜中被电介质膜中的陷阱捕获。电介质的能带结构中,其禁带宽度远大于半导体和导体的禁带宽度。价带中的电子很难从价带穿过禁带进入导带,因此电介质膜中的电子很难释放,就一直在电介质内部中积累下来。这种情况造成了 C-V 曲线的漂移。

电介质膜中的电子大致分为两个部分,一部分是来自注入电荷,主要来自于金属梁和电介质膜下方的驱动电极,原理如图 1 所示。还有一部分是由于电场极化产生的电子,又称感应电荷^[18]。文献[18]中提出非接触充电过程的电场非常低,因此感应电荷的电量相比于注入电荷微乎其微。因此本文主要讨论注入电荷对开关的影响。

2) 开关的寿命

开关的充电情况与可用的陷阱数量,捕获横截面和注入电流 3 个因素有关。而影响开关寿命的主要因素就是电介质充电导致的黏附失效和驱动失效。

在驱动电压的驱动下,开关进行闭合发生电荷注入。当开关中的电荷积累到一定程度的时候,断开驱动电压

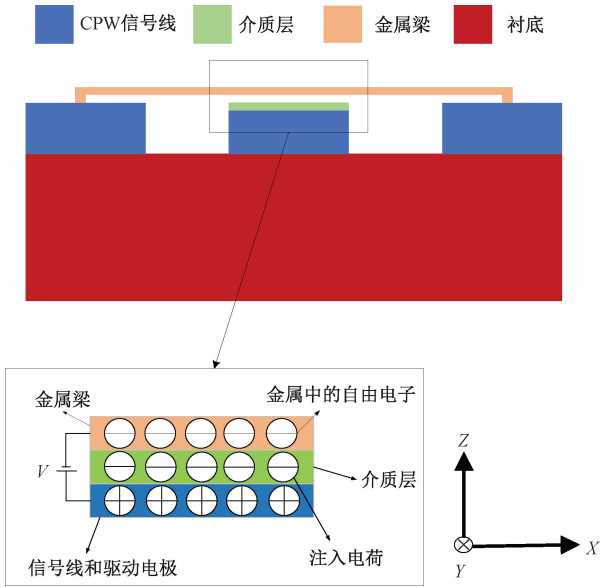


图 1 电荷注入

Fig. 1 Charge injection

时,开关金属梁会受到电介质膜注入电荷的力和上下电极由于注入电荷而产生的镜像电荷的力 F_q ,方向向下。一旦两力之和大于金属梁自身的弹力 F_k 就无法顺利弹开,发生黏附失效。图 2 是对黏附失效时金属梁进行受力分析。而 RF 信号对充电过程没有显著影响,因此忽略 RF 信号对金属梁的力。

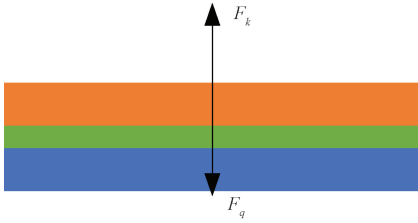


图 2 黏附失效时金属梁的受力分析图

Fig. 2 Force analysis of metal beam in case of adhesion failure

介质中电荷产生的静电力为:

$$F_q = \frac{1}{2} Q_{\text{image}} E = \frac{Q_{\text{image}}^2}{2Ch} \quad (1)$$

此时金属梁的弹力为:

$$F_k = kx \quad (2)$$

$$x = h_0 - d \quad (3)$$

力学平衡可以得出镜像电荷:

$$Q_{\text{image}} = \sqrt{2ChF_k} \quad (4)$$

因此此时电介质膜注入的电荷量为:

$$Q_{\text{trapped}} = 2Q_{\text{image}} \quad (5)$$

结合式(1)开关的寿命时间为:

$$t = \frac{Q_{\text{trapped}}}{\xi \cdot \eta \cdot J \cdot S} \quad (6)$$

其中, C 是开关的电容, S 是上下极板重合的面积, d 是电介质膜的厚度, h 是金属梁与驱动电极之间的高度, h_0 是初始状态下金属梁与驱动电极之间的高度。 J 为单位面积注入的电流密度, ξ 是开关驱动电压的占空比, $\eta = \eta_0 \cdot d$ 是电介质俘获系数, η_0 是单位厚度的电介质电荷俘获系数。

当 $h = 2/3h_0$ 时,开关金属梁塌陷与下方的电介质膜发生吸合。然而,如图 3 所示,若在 $h = 2/3h_0$ 的临界位置时,电介质膜中的电荷对金属梁产生向上的静电力 F_q 与金属梁受到向上的弹力 F_k 之和与驱动电压对金属梁产生的向下的静电力 F_{pull} 数值上刚好相等则金属梁会悬停在 $h = 2/3h_0$ 的位置,无法完成下拉,即为驱动失效。

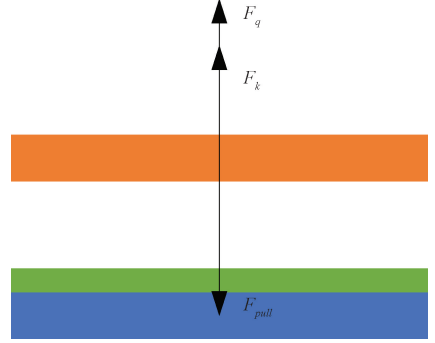


图 3 驱动失效时金属梁的受力分析图

Fig. 3 Force analysis diagram of metal beam in case of drive failure

此时电介质膜注入的电荷量:

$$Q_{\text{trapped}} = \sqrt{2ChF_q} = \sqrt{2Ch(F_{\text{pull}} - F_k)} \quad (7)$$

同理可以通过式(6)得到开关到达驱动失效的时间。

对于驱动电压产生的电压漂移,若想要开关在相同位移时达到相同的电容,电压应该变为 v_1 , v_1 产生的静电力为 F_1 :

$$F_1 = F_q + F_{\text{pull}} \quad (8)$$

则:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2hF_1}{C}} \quad (9)$$

因此电压的漂移 Δv 为:

$$\Delta v = v_1 - v \quad (10)$$

式中: v 为初始状态下施加的电压。

本文选用 SiN_x 作为电介质膜,因此注入电流的公式采用 Poole-Frenkel 传导,即式(11)^[19]。因此最终单位面积注入的电流密度为:

$$J_{FP} = \sigma_{FP} E_{field} \times \exp\left(\frac{-q\left(\phi_0 - \sqrt{\frac{E_{field}}{\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right)}{k_B T}\right) \quad (11)$$

式中: σ_{FP} 是 Frenkel-pool 效应的传导常数, T 是温度, E_{field} 为电场强度, ϕ_0 是缺陷能级, ϵ_0 是真空介电常数, ϵ_r 是电介质材料的相对介电常数。

1.2 RF MEMS 开关结构设计

图 4 为开关整体结构示意图。本结构主要创新在于开关金属梁的凸台触点和悬空电介质膜, 其中电介质膜带有梁结构。如图 5 所示, 凸台触点与电介质膜中心平板水平位置相同。因此即使在极限情况下(即在驱动电压过大时, 凸台触点的压力使电介质膜中心平板接触到下电极), 也能够保证只有电介质膜中心平板部分发生充电。

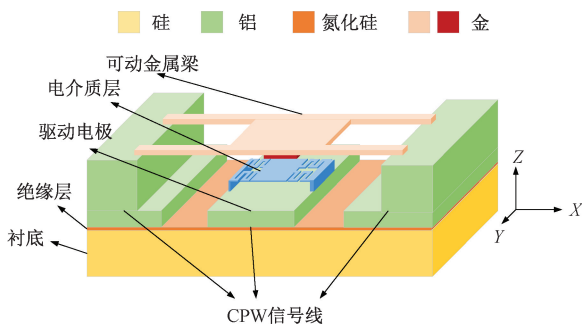


图 4 开关的整体结构设计图

Fig. 4 Overall structure design of the switch

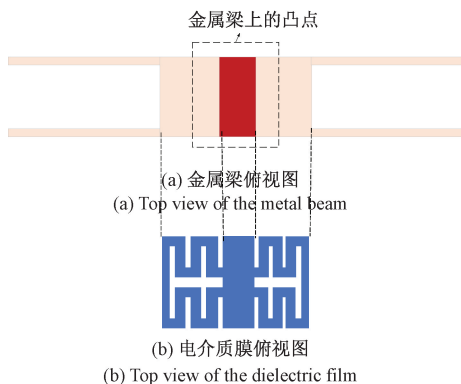


图 5 金属梁和电介质膜尺寸比较图

Fig. 5 Comparison of metal beam and dielectric film dimensions

图 6 为所设计 RF MEMS 开关的开关两态以及尺寸示意图, 金属梁的高度为 h_8 , 凸台触点的厚度为 d_1 , 电介质膜的厚度为 d , 电介质膜悬空高度为 h_1 。图中可知本设计在开关金属梁上附加的凸台触点高度为 $0.3 \mu\text{m}$, 电介质膜悬空高度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。凸台触点的高度要高于电介质膜悬空的高度 $0.1 \mu\text{m}$ 。因此在施加驱动电压时, 介

质梁结构与金属梁和下电极二者不发生接触。相比于传统 RF MEMS 电容并联式开关的结构, 接触面积减小为原来的 $1/5$, 起到了减小电介质充电的目的。由于金属梁在到达电介质膜时的速度并不为 0, 质地较软的金属梁易发生形变, 可能会导致器件的粘连或者断裂失效, 而本文结构中将电介质膜悬空形成碰撞保护结构, 通过缓冲降低金属梁的速度, 减小电介质结构对金属梁带来的机械损伤, 增加开关可靠性。

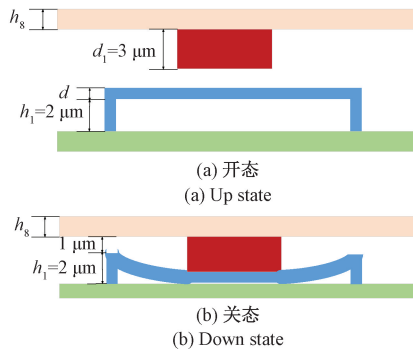


图 6 开关开态和关态

Fig. 6 Switching up and down states

2 RF MEMS 开关性能数值计算

2.1 理论模型

为了获得长寿命 RF 开关结构, 本文通过结构优化确定开关结构参数。根据开关寿命理论模型, 设计了多组结构参数, 通过数值分析评估开关寿命。设置了如下两组对比试验: 1) A 组: 静电驱动器上下极板间距相同; 2) B 组: 静电驱动器上极板与电介质膜间距相同。两组金属梁上分别设计为无凸台触点的金属梁和有凸台触点的金属梁两种结构, 如图 7 和 8 所示。

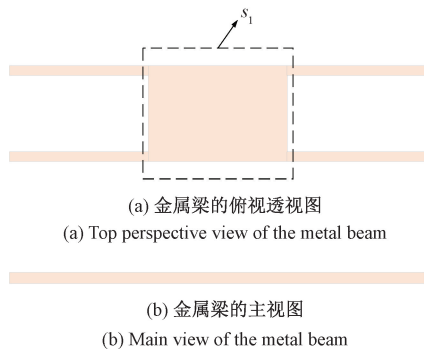


图 7 无凸台触点的金属梁

Fig. 7 Metal beam without tabbed contacts

电介质膜分别设计为非悬空完整电介质膜、非悬空两端蛇形梁电介质膜、悬空完整电介质膜和悬空两端蛇

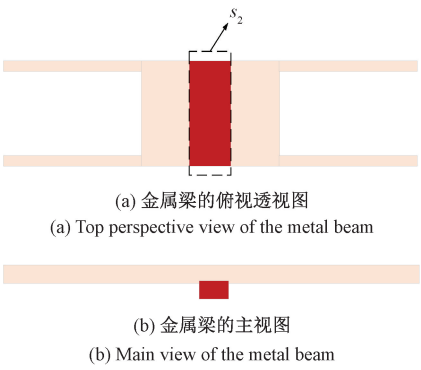


图 8 有凸台触点的金属梁
Fig. 8 Metal beam with tabbed contacts

形梁电介质膜 4 种结构,如图 9 所示。两种金属梁结构与 4 种电介质膜排列组合存在 8 种不同的开关结构设计。依照控制变量的原则,在 A 和 B 两种情况下存在 16 种结构设计,如表 1 所示。对于每组结构,本文将 RF MEMS 开关的黏附失效时间、驱动失效时间对开关寿命

的影响情况及每组开关的寿命值进行了数值计算及讨论。

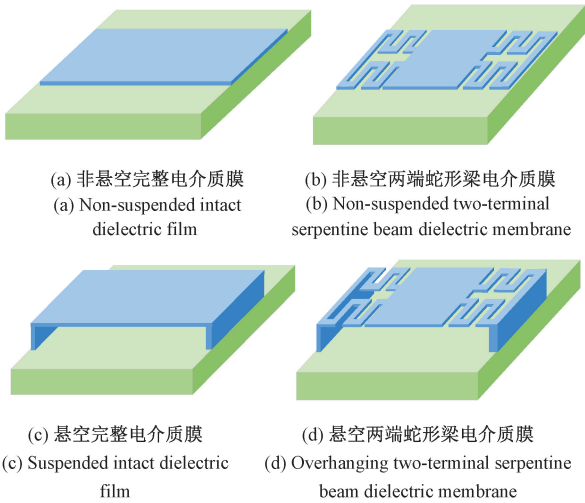


图 9 电介质膜的类型
Fig. 9 Types of dielectric films

表 1 16 种 RF MEMS 开关研究方案
Table 1 16 RF MEMS switch research options

序号	距离参量	Z 向电介质膜结构	金属梁结构	X、Y 平面内电介质膜结构
1	静电驱动器上下极板 间距相同-A 组	非悬空	无凸台触点	膜层完整
2			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
3			有凸台触点	膜层完整
4			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
5		悬空	无凸台触点	膜层完整
6			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
7			有凸台触点	膜层完整
8			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
9	静电驱动器上极板与电 介质膜间距相同-B 组	非悬空	无凸台触点	膜层完整
10			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
11			有凸台触点	膜层完整
12			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
13		悬空	无凸台触点	膜层完整
14			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构
15			有凸台触点	膜层完整
16			有凸台触点	两端设计蛇形梁结构

2.2 结构设计对射频开关寿命的影响分析

图 10 为 A、B 两组所设计 16 种开关的黏附失效时间、驱动失效时间和开关寿命的关系曲线。从图中能够看到,所有设计的开关驱动失效总是先于黏附失效发生。因此,本文将驱动失效可以作为开关寿命结束的标志,开关寿命为开关工作至驱动失效的时间。图 11 为 A、B 两组开关寿命数值计算结果,从图中能够看出,在极板间距相同的情况下,本文所提出的开关结构工作寿命是传统开关的 253 倍;当金属梁-电介质膜距离相同的情况下,其寿命为传统开关的 166 倍。

分别对比 A、B 两组中的(1 | 5)、(2 | 6)、(3 | 7)、(4 | 8)、(9 | 13)、(10 | 14)、(11 | 15)、(12 | 16)开关结构对,可以看出具有悬空介质梁结构的 RF 开关,将发生黏附失效的时间、驱动失效的时间和开关寿命都提高了超过了两个数量级。

通过分组比较(1 | 2)、(5 | 6)、(9 | 10)、(13 | 14)开关结构对,可以看出在没有凸台触点时,电介质膜面积的减小使开关寿命分别提高了 9.876、879、15、1 174 h,影响效果较为明显;对比有凸台触点时(3 | 4)、(7 | 8)、(11 | 12)、(15 | 16)开关结构对,开关寿命分别减少了

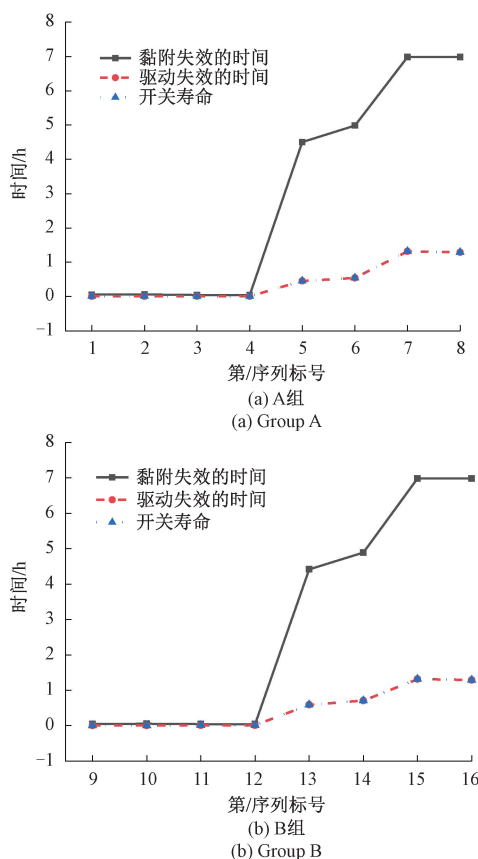


图 10 A、B 两组黏附、驱动失效时间和开关寿命的关系

Fig. 10 Relationship between adhesion, drive failure time and switch life for groups A and B

0.2、290、2.035、290 h,说明在有凸台触点的情况下,电介质膜面积的减小对于开关寿命的减少影响比较小。这是由于存在凸台触点时,完整电介质膜和引入介质悬臂梁结构的电介质膜发生充电的面积相差不多,此时,电容的大小会是影响开关寿命的关键,所以两者开关寿命比较接近。对于开关可靠性而言,介质梁作为缓冲开关机械碰撞受力的调节机构,结构设计需要同时考虑损伤受力及缓冲时间,后者会影响开关响应时间。对介质梁结构的设计将在 3.2 节中进行介绍。

另一方面通过改变金属梁与电介质膜接触面积对寿命进行对比。图 12 为悬空/非悬空电介质膜结构与有/无凸台触点的金属梁的组合。图 12 中每种结构都对应着图 13 中两种电介质膜状态分别为图 13(a) 中面积为 S_1 的完整电介质膜层和图 13(b) 中面积为 S_3 的两端设计蛇形梁结构的电介质膜。电介质膜中间部分的面积与图 8 中凸台触点的面积相同为 S_2 。结合图 7、8 两种结构的金属梁,在方案 A、B 的情形下,8 种结构组合发生电荷注入的面积分别是完整电介质膜上下面 $2 \times S_1$ 、蛇形梁结构的电介质膜上下面 $2 \times S_3$ 、与凸台触点接触电介质膜面

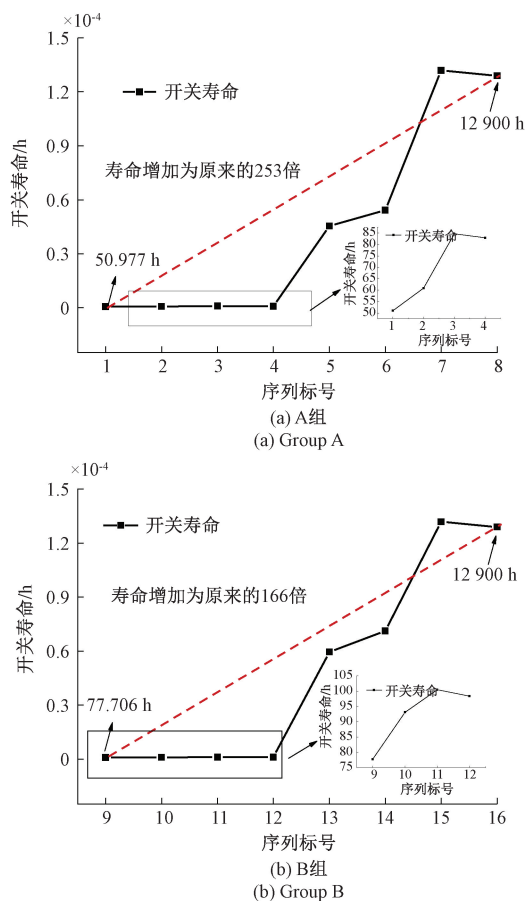


图 11 A、B 两组开关寿命

Fig. 11 Switching life of groups A and B

积和完整电介质膜下面 $S_1 + S_2$ 、与凸台触点接触电介质膜中心部分面积和蛇形梁结构的电介质膜下面 $S_2 + S_3$ 、完整电介质膜的上表面 S_1 、蛇形梁结构的电介质膜上表面 S_3 、与凸台触点接触电介质膜面积 S_2 和与凸台触点接触电介质膜面积 S_2 。通过对比 (1 | 3)、(2 | 4)、(5 | 7)、(6 | 8) 开关结构对,可以看出凸台触点的结构成功通过减小发生注入电流的电介质膜面积延长了开关使用寿命,验证了减小金属梁与电介质膜接触面积能够延长开关寿命的设想。

图 14 为 A、B 两组开关结构在发生驱动失效的临界情况存在的电压漂移数值计算结果。从图中能够看到, B 组中的 RF 开关,当金属梁与电介质膜的距离相同时,由电介质膜充电造成的电压漂移状况得到了缓解。对比图中的数据,可以看到电介质膜中介质梁结构、电介质膜的悬空、凸台触点结构设计分别将开关的电压漂移降低了 0.05、0.689 和 0.577 V。综合前述 3 种结构的改进,开关电压漂移从原来的 5.68 V 变成了 4.242 V,降低了 25%,说明在金属梁与电介质膜的距离相同时,本文所提出的结构成功缓解了电压的漂移。

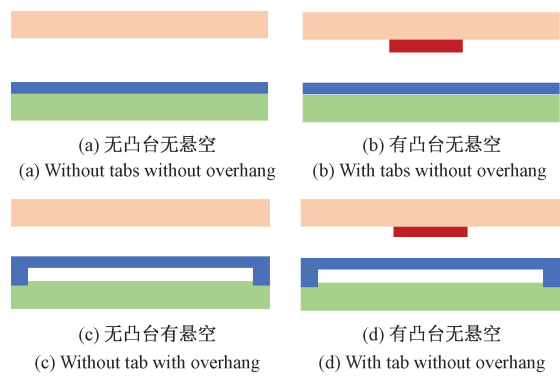


图 12 电介质膜与金属梁的组合

Fig. 12 Combination of dielectric film and metal beam

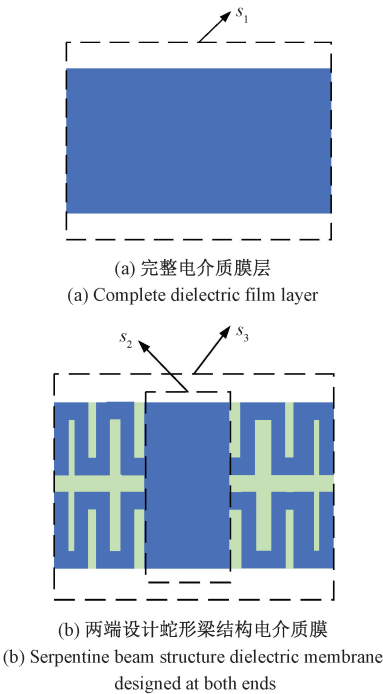


图 13 电介质膜面积示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the dielectric film area

图 15 为 A、B 两组 RF 开关注入电流密度和发生驱动失效时介质层中需要储存电荷量的数值计算结果。通过对比可以发现相比于传统结构的两组开关,电介质膜悬空后,注入电流的密度分别从 $3.134 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$ 降到了 $7.043 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$,实现了两个量级的改善,证明了通过减少接触面积能够减少注入电流密度。从图 15 中能够看到,A 组 RF 开关,当静电驱动上下电极板间距离相同时,电介质膜上的电荷量相比于传统开关变大,这是因为凸台触点存在,减小了充电时的接触面积,导致开关的电容变小。因此开关要达到驱动失效时需要积累更多的电荷量;B 组 RF 开关,在金属梁与电介质膜的距离相同时,由于电容的变小,发生驱动失效时电介质膜上的电

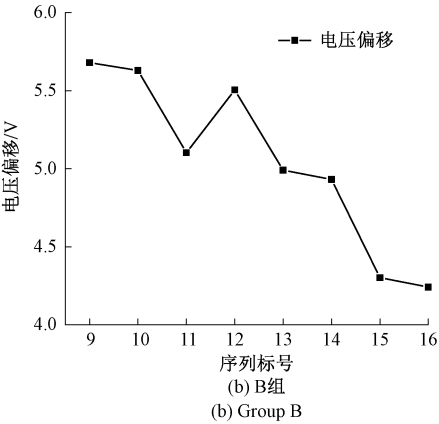
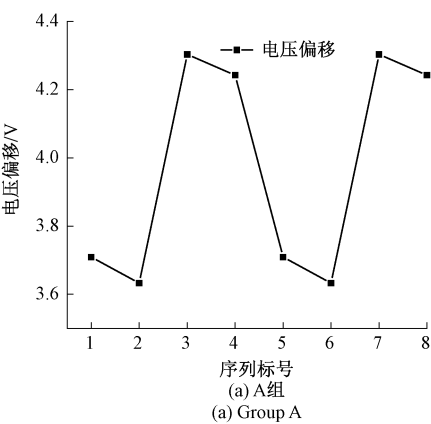


图 14 A、B 两组开关电压漂移

Fig. 14 Switching voltage drift in both groups A and B

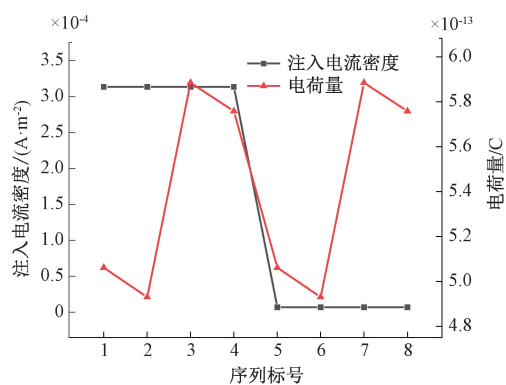
荷量相比于传统开关变小。

综上所述,本文中对 RF MEMS 开关在结构上进行金属梁上增加凸台触点、将介质梁悬空并将电介质膜两端设计蛇形梁结构的更改确实对开关寿命起到了提高的作用。

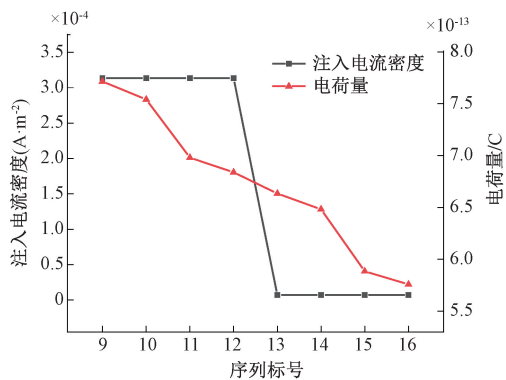
2.3 结构参数的优化

通过 MATLAB 对开关两种失效机制发生失效的时间进行对比,如图 16 所示,在 15~46 V 的电压范围驱动失效会先于黏附失效发生,因此开关的寿命即是开关发生驱动失效的失效时间。因此着重通过研究驱动电压 V 、电介质膜厚度 d 、电介质膜悬空高度 h_1 以及电介质膜面积 S 等 RF 开关结构参数对开关寿命的影响进行数值优化。

图 17(a) 为驱动电压与发生驱动失效时开关电介质膜中注入电荷量和发生电荷注入时电流密度的关系曲线。随着电压的增加电流密度呈现指数型增加,电压越大,对电流密度影响越大。发生驱动失效的注入电荷量随着电压的增加而增多。图 17(b) 为驱动电压与开关寿命和电压漂移的关系曲线。开关的寿命最长可达 17 383 h。随着电压的增加,发生失效时电压的漂移也越来越严重。从最初 15 V 漂移 0.4~46 V 时电压漂移



(a) A组
(a) Group A



(b) B组
(b) Group B

图 15 A、B 两组 RF 开关注入电流密度和注入电荷
Fig. 15 Injected current density and injected charge of RF switches in groups A and B

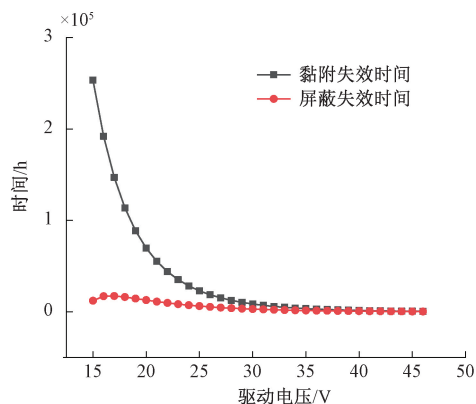
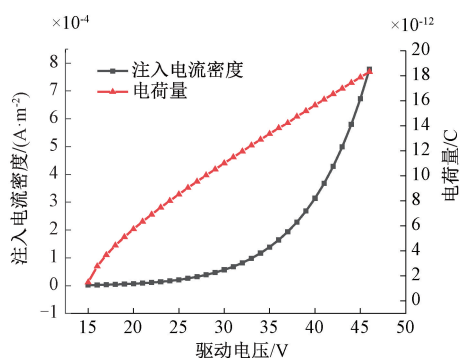


图 16 开关寿命与失效机制的关系

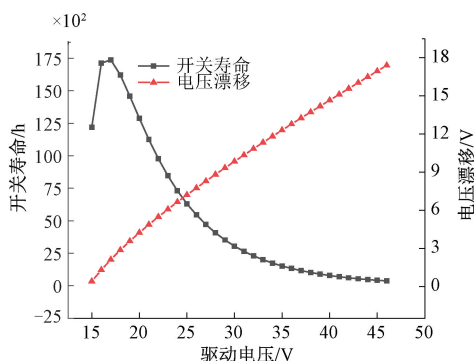
Fig. 16 Relationship between switch life and failure mechanism

17.4 V。

图 18(a) 为驱动电压为 20 V 时, 电介质膜厚度与注入电荷和电流密度的关系曲线。电介质膜以 $0.05 \mu\text{m}$ 为步进从 $0.2 \mu\text{m}$ 增加到 $0.45 \mu\text{m}$ 。使得开关的注入电荷从 $5.75 \times 10^{-13} \text{ C}$ 增加到 $6.79 \times 10^{-13} \text{ C}$, 注入电流密度从



(a) V 对电介质充电的影响
(a) Effect of V on dielectric charging



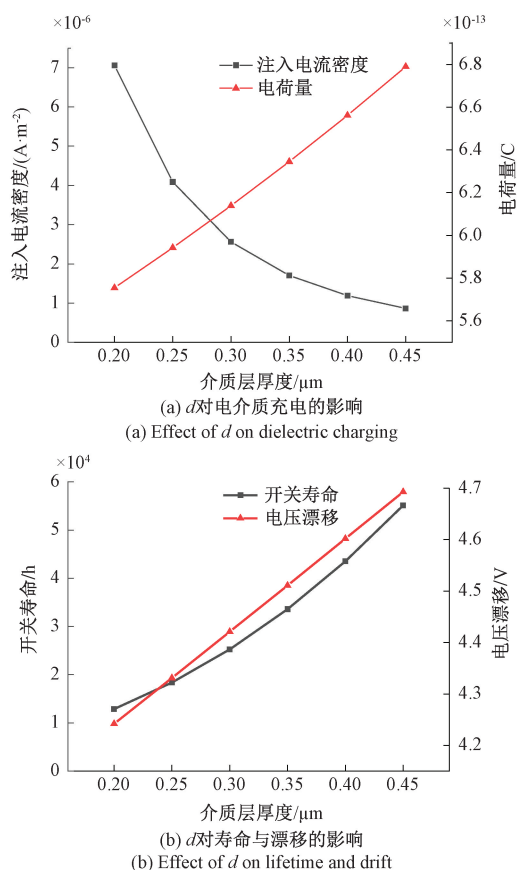
(b) V 对寿命与漂移的影响
(b) Effect of V on lifetime and drift

图 17 驱动电压 V 对电介质充电和开关寿命的影响

Fig. 17 Effect of drive voltage V on dielectric charging and switch life

$7.05 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$ 减小 $8.6 \times 10^{-7} \text{ A/m}^2$, 注入电流密度实现了一个数量级的减小。说明电介质膜厚度的增加对注入电荷的影响较小, 对注入电流密度的影响较大。图 18(b) 为驱动电压为 20 V 时, 电介质膜厚度与开关寿命和电压漂移的关系曲线。可见电介质膜厚度增加可以增加开关寿命且影响极大。从 $0.2 \mu\text{m}$ 开始以 $0.05 \mu\text{m}$ 逐步增加到 $0.45 \mu\text{m}$, 寿命分别增加 5 488.7、12 363、20 719、25 161 和 36 754 h。符合理论分析中电介质材料厚度的增加让可用的陷阱数量增多, 电压漂移增高; 因此在针对电介质充电的问题中, 电介质膜的厚度要大。然而开关的漂移电压也随电介质膜厚度变大, 综合射频性能和对工艺精度的思考, 选择电介质膜的厚度为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

图 19(a) 为电介质膜悬空高度与注入电荷和电压漂移的关系曲线。从图中能够看到电介质膜悬空高度对发生驱动失效时电介质膜注入电荷量没有变化, 大小始终维持在 $5.75 \times 10^{-13} \text{ C}$ 。注入电荷时的电流密度随电介质膜悬空高度的增加而减小。随着电介质膜的悬空高度增大, 电流密度不断减小, 减小趋势却在减小。图 19(b) 为电介质膜悬空高度与开关寿命和电压漂移的关系曲线。电介质膜悬空高度的增加对电压漂移没有造成影响但延

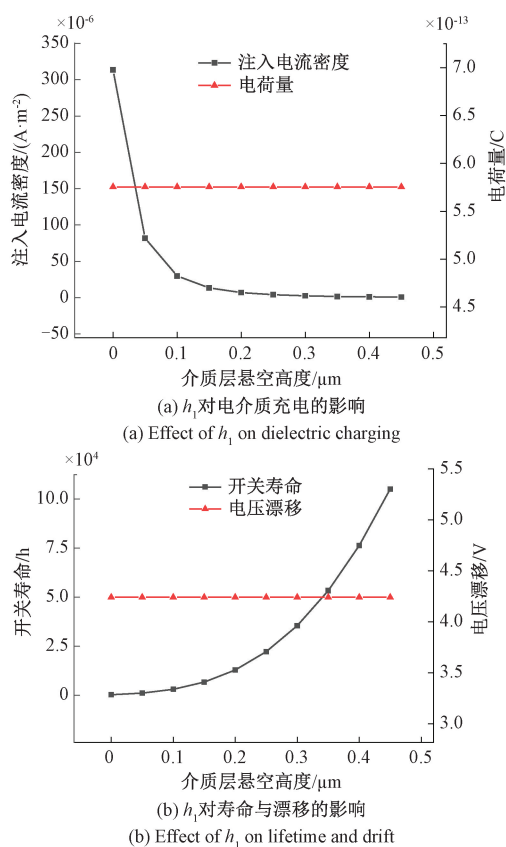
图 18 电介质膜厚度 d 对电介质充电和开关寿命的影响Fig. 18 Effect of dielectric film thickness d on dielectric charging and switching life

长了开关的寿命。开关寿命从电介质膜不悬空的 290 h 提高到电介质膜悬空 $0.45 \mu\text{m}$ 的 105 123 h。寿命提高了 3 个数量级,可靠性增大。然而最终电介质膜悬空高度的设置不仅要考虑开关的寿命还要考虑开关的射频性能。因此,综合射频性能和对工艺精度的思考,开关中电介质膜悬空 $0.2 \mu\text{m}$ 。

图 20 (a) 为电介质膜面积与注入电荷和电流密度的关系曲线。电介质膜面积的增大并没有影响电流密度,电流密度始终保持在 $7.06 \times 10^{-6} \text{ A/m}^2$ 。而注入电荷呈现线性增加的趋势。图 20 (b) 为电介质膜面积与电压漂移和开关寿命的关系曲线。随着电介质膜面积从 $3.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 增大到 $8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,电压漂移从 4.24 V 增大到 5 V,开关的寿命从 10 402 h 减小到 4 913 h。电介质膜面积的改变对开关寿命的改变显著。因此本结文采用介质梁的结构来减小电介质膜的面积以提高开关的寿命。

3 RF MEMS 开关有限元分析

对于所建立的数值模型,采用有限元 Comsol 软件进

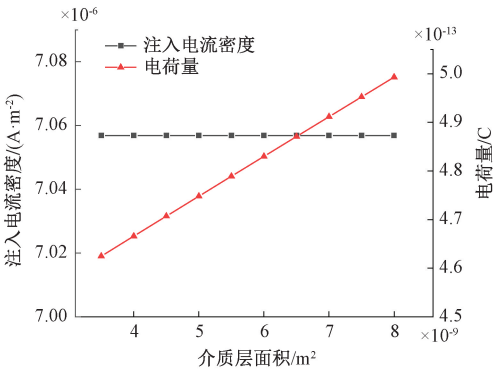
图 19 电介质膜悬空高度 h_1 对电介质充电和开关寿命的影响Fig. 19 Effect of dielectric membrane overhang height h_1 on dielectric charging and switching life

行开关结构静力学仿真,施加偏压 5~20 V,步长 5 V。本章根据电介质膜两侧悬臂梁结构,提出了以下 3 种电介质膜铰接结构:模型 1 为两端双铰接蛇形梁,模型 2 为两端单铰接蛇形梁,模型 3 为两端单铰接蛇形梁。

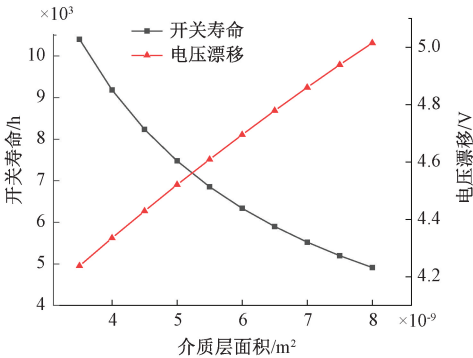
3.1 金属梁静力学分析

图 21 为在金属梁上分别施加 5、10、15、20 V 的偏压下的静态位移结果。从图 21 中能够看到,当偏压为 20 V 时,金属梁中心位移最大,能够达到 $2/3h_0$,获得所设计的目标位移。由于金属梁下方的介质膜的限位作用,所设计金属梁开关完全避免了静电驱动中固有的 Pull-in 问题。当偏压为 20 V 时,金属梁三维结构的位移仿真结果如图 22 所示,开关下方凸台触点部分位移最大,验证了凸台结构可以有效避免金属梁其他部分接触电介质膜发生充电。

进一步对于开关金属梁的本征模态进行了仿真分析,结果如图 23 所示。结果表明所设计梁本征频率为 5 377.8 Hz,如图 23 所示,金属梁振形为垂直振动,与工作时的开、关态振形一致,表明所设计开关能够工作于快速谐振状态。



(a) S对电介质充电的影响
(a) Effect of S on dielectric charging



(b) S对寿命与漂移的影响
(b) Effect of S on lifetime

图 20 电介质膜面积 S 对电介质充电和开关寿命的影响
Fig. 20 Effect of dielectric film area S on dielectric charging and switching life

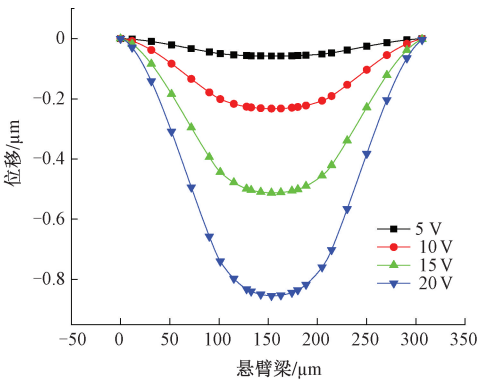


图 21 不同电压下金属梁的垂直位移

Fig. 21 Vertical displacement of metal beam at different voltages

3.2 介质悬空膜力学性能分析

图 24、25 为模型 1、2、3 的力学仿真结果,其中图 24 为电介质膜位移图,图 25 为电介质膜应力分布图。3 个模型在兼顾射频性能与力学性能之后,都得出模型结构的最佳结构数据。根据 3 种模型在相同电压下的不同位移,分别将 3 种电介质膜悬空 0.2、0.1、0.1 μm。仿真结

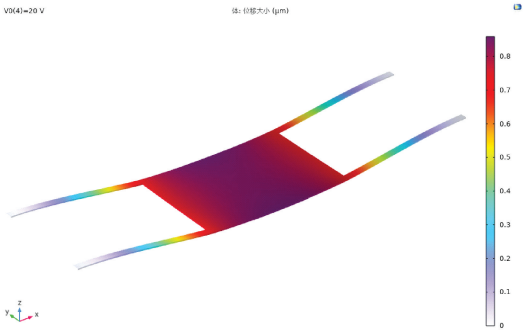


图 22 20 V 金属梁位移图

Fig. 22 20 V metal beam displacement diagram



图 23 模态分析

Fig. 23 Modal analysis

果表示模型 2、3 的介质梁刚度要比模型 1 的大,因此位移较小,对金属梁的缓冲不足。在金属梁和电介质膜碰撞时,模型 2、3 的梁中部都出现了向上翘曲。模型 2 最大翘曲高度为 0.04 μm,模型 3 最大翘曲高度为 0.07 μm。两种模型与凸台触点接触不稳定。而模型 1 没有发生发生梁的翘曲,因此模型 1 与凸台触点接触更具稳定性。同时图 25 中应力分布可以看出,模型 1 介质梁的应力远小于模型 2、3。由此模型 1 的力学稳定性要由于模型 2、3。

当对开关施加 20 V 偏压到达平衡态时,介质悬空膜形变位移结果如图 24(a) 所示。结果表明电介质膜的最大位移位于介质膜中心处,不足 0.2 μm。据此,为了保证介质膜有足够的活动空间,同时为尽可能获得高的隔离度,综合考虑介质梁悬空的高度设定为 0.2 μm。因此,本文所设计 RF 开关的闭合过程为柔性止停的过程,构建的由弹性梁铰接的电介质缓冲机构有效地降低了金属梁由于冲量造成的反作用力,将开关频繁开、关带来的结构损伤降至最低。

整个电介质膜在到达平衡位置时电介质膜的应力分布如图 25(a) 所示。从图中能够看到最大应力为 1.6 × 10⁸ N/m²,位于介质薄膜中心,小于氮化硅电介质膜断裂

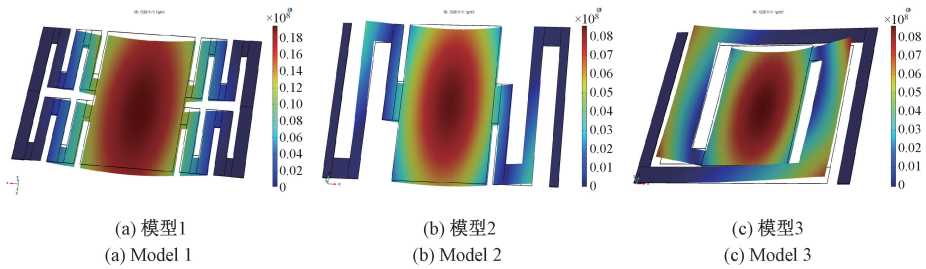


图 24 电介质膜位移图

Fig. 24 Dielectric film displacement diagram

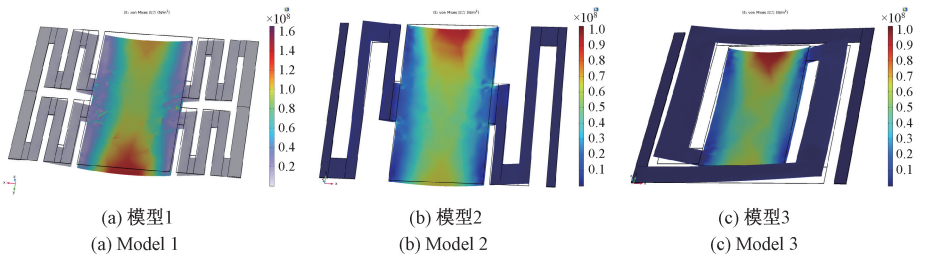


图 25 电介质膜应力分布图

Fig. 25 Stress distribution in the dielectric film

强度 $1.4\times10^{10}\text{ N/m}^2$ 。说明所设计的结构参数能够保证电介质膜在正常工作范围,不会发生断裂。电介质膜应力变化基本与位移变化一致。电介质膜中间部分与金属梁的接触面积与金属梁下方的凸台触点面积相等,保证开关的冲力完全由膜层外的刚度更低的悬臂梁缓冲,避免了开关接触时悬空膜区域内金属凸台周边应力集中的问题。

图 26 为 3 种模型的响应时间仿真结果。开关与悬空膜接触后的瞬态模型阻尼由悬空膜下方形成的空气域决定。结果表明模型 1、2、3 的响应时间分别为 50、30、30 μs ,三者响应时间接近,均具有较快的响应。从图中能够看到 3 个模型均工作于过阻尼情况,模型 1 达到的平衡位移比 2、3 要大,但响应时间的增加量不大,说明模型 1 中的悬空膜在对金属机械开关起到最大缓冲作用的同时,弹簧质量块系统仍具有快速的响应,因此,为最佳选择方案,3 种模型进一步的力学性能总结于表 2。根据电介质膜的响应时间,开关循环周期能够达到 9.288×10^9 次。

表 2 3 种模型力学性能数据表

模型	电介质膜面	最大位移/	响应时间/s	最大应力/	是否
	积/ μm^2	μm		(N/m^2)	
1	8 300	<0.2	5×10^{-5}	1.6×10^8	否
2	5 900	<0.1	3×10^{-5}	1×10^8	否
3	6 990	<0.1	3×10^{-5}	1×10^8	否

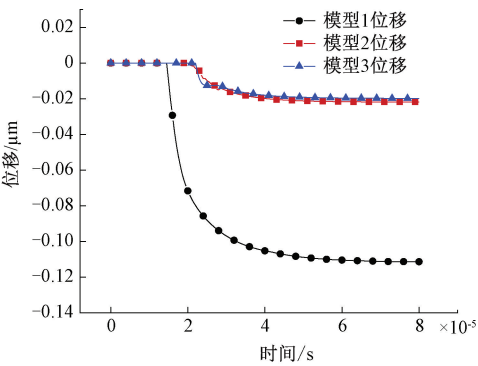


图 26 电介质膜响应时间

Fig. 26 Dielectric film response time

通过对比表 2 数据可见,模型 1 的最大位移大于其他两个模型的最大位移,介质梁刚度小于另两种模型,因此可以得到更大缓冲。模型 1 开关响应时间略长与其他两种模型,说明模型 1 对于金属梁速度的缓冲更为有效,降低了金属梁的运动速度。结合介质梁上的应力分析和与凸点接触稳定性,在力学性能方面,模型 1 的性能较好。

3.3 射频特性

采用 HFSS 软件对 3 种模型进行仿真。通过模型的力学特性,将略大于电介质膜最大位移的数值设置为电介质膜的悬空高度进行射频性能的仿真。仿真结果如表 3 所示。

表 3 4 种模型射频性能对比

Table 3 Comparison of the RF performance of the four models

模型	电介质膜面积/ μm^2	隔离度/ dB	插入损耗/ dB	电介质膜悬空高度/ μm
1	8 300	-41.31	-0.25	0.2
2	5 900	-36.54	-0.67	0.1
3	6 990	-40.91	-0.28	0.1

表 3 数据中可见模型 1 的射频性能更为优越。主要原因是模型 1 的电介质膜面积大于模型 2、3,因此模型 1 的隔离度和插入损耗优于模型 2、3。综合考虑 3 种模型的射频性能和力学性能,模型 1 结构更好,更稳定,可靠性更佳。因此本文选择了模型 1 作为最终结构。

采用 HFSS 软件对数值优化后的模型 1 进行仿真,对于所设计的开关射频性能受结构参数的影响进行了深入讨论。

图 27 为所设计 RF MEMS 开关的隔离度和插入损耗随金属梁结构参数变化的结果。从图中能够看到,开关的隔离度随金属梁厚度 h_s 的增大而增大,而且随着 h_s 的增大,隔离度的增大幅度降低,逐渐趋于一个固定值。而开关的插损随金属梁的厚度增加而减小,但减小幅度较小。然而,随着金属梁厚度的增加,最大隔离度对应的开关中心频率向右移动,这也是插入损耗变大的原因,而且频率右移幅度基本与插入损耗增大量成正比。此外,随着金属梁厚度的增加,金属梁刚度的增加会导致开启电压增大,这也会使开关的寿命减小。除此之外金属梁参数的设定要需考虑梁的弹性系数等因素对其力学性能的影响。综合考虑之后,开关金属梁厚度设定为 $1\ \mu\text{m}$ 。图 28 为凸台触点厚度 d_1 对射频性能的影响结果。随着 d_1 的增加,隔离度基本不变,但最大隔离对应的中心频率明显右移。同一频率下 d_1 的增加使插入损耗减小。随频率的增加, d_1 的增加对插入损耗的影响变大。由于中心频率偏移较明显,中心频率的插入损耗变大。因此应减小凸台触点的厚度,最终凸台触点的厚度设为 $0.3\ \mu\text{m}$ 。

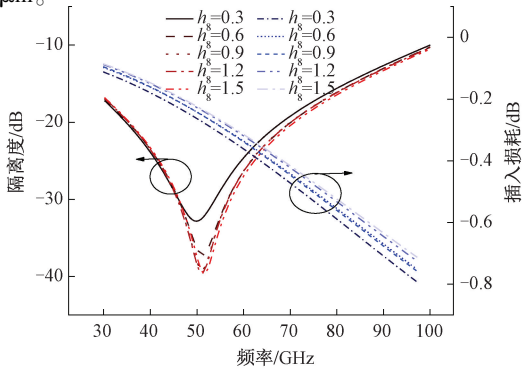


图 27 金属梁厚度 h_s 对射频性能的影响

Fig. 27 Effect of metal beam thickness h_s on RF performance

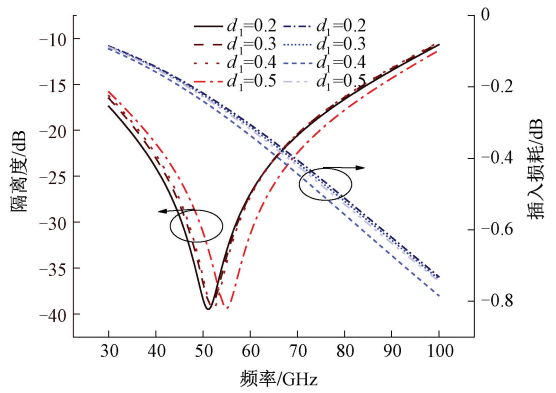


图 28 凸台触点厚度 d_1 对射频性能的影响

Fig. 28 Effect of tab contact thickness d_1 on RF performance

进一步,改变电介质膜的相关参数。通过对隔离度和插入损耗随电介质膜的厚度 d 的变化进行仿真,可知图 29 所示相同频率下,电介质膜厚度的增加会导致隔离度和插入损耗的减小。但由于电介质膜厚度的增加会导致最大隔离对应的中心频率右移,最终造成开关工作中心频率插入损耗增大,因此电介质膜的厚度值尽量小。隔离度和插入损耗随电介质膜与下电极间隔 h_1 的变化如图 30 所示。从图中能够看到隔离度随 h_1 变化不明显,但是中心频率发生左移。插入损耗随 h_1 的增加而减少,且随频率的增大, h_1 对插入损耗的影响变大。因此,介质悬空膜的悬空高度主要以介质悬空膜的力学要求决定。综合考虑后,电介质膜的悬空高度设定为 $0.2\ \mu\text{m}$ 。

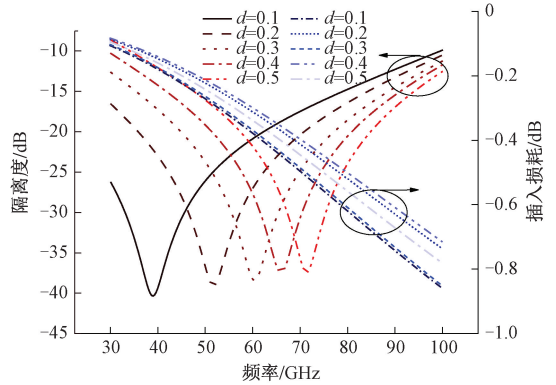
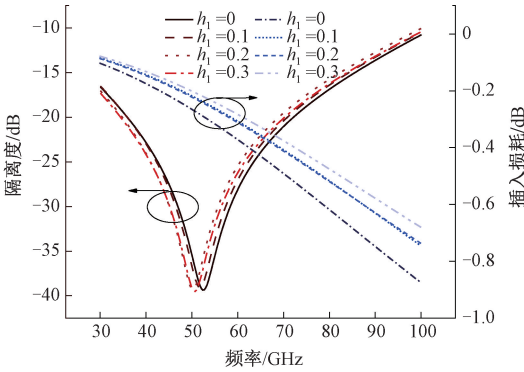


图 29 电介质膜厚度 d 对射频性能的影响

Fig. 29 Effect of dielectric film thickness d on RF performance

本文所设计的 RF MEMS 开关与现有开关性能指标参数对比如表 4 所示。从表中能够看到所设计开关的射频性能以及寿命均高于现有开关。开关循环周期能够达到 9.288×10^9 次,远高于所调研文献中的开关指标,表明所设计 RF MEMS 开关在射频性能及可靠性方面均具有巨大发展潜力。



4 结 论

本文针对 MEMS 静电驱动射频开关存在的电介质充电和频繁接触碰撞损伤失效问题,提出了一种新颖的 RF MEMS 开关结构,设计了介质悬空膜结构减少静电荷积累与机械碰撞损伤。建立了基于电介质充电理论的 RF MEMS 开关寿命预测理论模型,分析了黏附失效与驱动失效机制,研究了金属梁结构及基于悬臂梁的介质悬空膜结构对 RF MEMS 开关电介质充电的影响,预测了开关理论模型的寿命值。结果表明,所设计 RF MEMS 开关寿命超过 12 900 h,开关循环周期能够达到 9.288×10^9 次。相比于相同极板距离和相同金属梁-电介质膜距离的现

图 30 电介质膜与下电极间隔 h_1 对射频性能的影响

Fig. 30 Effect of dielectric film and lower electrode spacing h_1 on RF performance

表 4 已开发的电容式 RF-MEMS 开关的比较

Table 4 Comparison of developed capacitive RF-MEMS switches

序号	频率/GHz	驱动电压/V	插入损耗/dB	隔离度/dB	寿命/次	文献
1	52.2	20	-0.25	-41.31	9.288×10^9	本文
2	6	15	-0.77	-53	10^7	[11]
3	32	16	-0.5	-35	1.26×10^8	[12]
4	40	4.8	-0.55	-47.6	10^7	[13]
5	60	4.8	-0.6	-40	10^7	[14]
6	40	2.54		-47.6		[20]
7	25~35	15.8	-0.5	-20		[21]
8	6	21	-0.73	-46	10^7	[22]
9	6	82	-0.04	-23	100 倍	[23]
10	30	40	-0.62	-20	10^9	[24]
11	20~60	6	-0.62@ 60 GHz	-34@ 60 GHz; -22@ 30 GHz		[25]
12	35	18.3	-0.29	-20.5	10^4	[26]
13	35~40	0.16	-1.2@ 40 GHz	-60@ 35 GHz	10^5	[27]
14	25	25~40	-0.8	-20	10^6	[28]
15	20	65	-1@ DC~20 GHz	-11@ 20 GHz	10^4	[29]

有传统开关,寿命分别提高 253 倍和 166 倍,极大地改善了由于电介质充电造成的静电漂移问题。利用 COMSOL 和 HFSS 有限元工具,验证了开关模型的力学可靠性,仿真了微波特性。所设计的 RF MEMS 开关响应时间为 50 μ s,满足通信系统对快速开关的需求。在中心工作频率 52.2 GHz,隔离度为 -41.31 dB,损耗低于 -0.25 dB,展现了较好的微波特性。这为高可靠性,长寿命、高性能快速开关提供了理论模型和研究思路。

参考文献

[1] JAAFAR H, BEH K S, YUNUS N A M, et al. A comprehensive study on RF MEMS switch [J]. Microsystem Technologies, 2014, 20: 2109-2121.

[2] WANG C, YING K, LI H, et al. Electromechanical coupling modelling of distributed MEMS phase shifter for phased array antennas [J]. International Journal of

Electronics, 2018, 105(8): 1358-1373.

[3] SALEEM M M, NAWAZ H. A systematic review of reliability issues in RF-MEMS switches[J]. Micro and Nanosystems, 2019, 11(1): 11-33.

[4] KARTHICK R, BABU S P K. Review on radio frequency micro electro mechanical systems (RF-MEMS) switch[C]. International Conference on Communication, Computing and Electronics Systems: Proceedings of ICCCES 2019. Springer Singapore, 2020: 437-453.

[5] KURMENDRA K R. Investigations on beam membrane and dielectric materials using Ashby's methodology and their impact on the performance of a MEMS capacitive switch[J]. Microsystem Technol, 2021, 27(12): 4269-4289.

[6] TIAN W, LI P, YUAN L X. Research and analysis of MEMS switches in different frequency bands [J].

- Micromachines, 2018, 9(4): 185.
- [7] KOUTSORELI M, BIRMPILIOTIS D, PAPAIOANNOU G. A study of material stoichiometry on charging properties of SiNx films for potential application in RF MEMS capacitive switches [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113759.
 - [8] KOUTSORELI M, STAVRINIDIS G, BIRMPILIOTIS D, et al. Thermally activated discharging mechanisms in SiNx films with embedded CNTs for RF MEMS capacitive switches [J]. Microelectronic Engineering, 2020, 223: 111230.
 - [9] YAN H, LIAO X. Balanced-bridge method for the characterization of dielectric charging in RF MEMS cantilever switches [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(4): 1928-1933.
 - [10] 许成龙. 用于消除 RF MEMS 开关介质充电的新型微驱动结构[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
XU CH L. A novel micro-drive structure for eliminating dielectric charging of RF MEMS switches[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
 - [11] WANG L F, HAN L, TANG J Y, et al. Laterally-actuated inside-driven RF MEMS switches fabricated by a SOG process [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(6): 065007.
 - [12] DENG Z, WANG Y, DENG K, et al. Novel high isolation and high capacitance ratio RF MEMS switch: Design, analysis and performance verification [J]. Micromachines, 2022, 13(5): 646.
 - [13] SHEKHAR S, VINOY K J, ANANTHASURESH G K. Design, fabrication and characterization of capacitive RF MEMS switches with low pull-in voltage [C]. 2014 IEEE International Microwave and RF Conference (IMaRC). IEEE, 2014: 182-185.
 - [14] SHEKHAR S, VINOY K J, ANANTHASURESH G K. Low-voltage high-reliability MEMS switch for millimeter wave 5G applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2018, 28(7): 075012.
 - [15] DE PASQUALE G, BARBATO M, GILIBERTO V, et al. Reliability improvement in microstructures by reducing the impact velocity through electrostatic force modulation [J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(9-10): 1808-1811.
 - [16] SPASOS M, NILAVALAN R. Resistive damping implementation as a method to improve controllability in stiff ohmic RF-MEMS switches [J]. Microsystem Technologies, 2013, 19: 1935-1943.
 - [17] FENG H, ZHAO J, ZHOU C, et al. Design and analysis of the capacitive RF MEMS switches with support pillars [J]. Sensors, 2022, 22(22): 8864.
 - [18] YAN H, LIAO X. Balanced-bridge method for the characterization of dielectric charging in RF MEMS cantilever switches [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 20(4): 1928-1933.
 - [19] KOSZEWSKI A, SOUCHON F, DIEPPEDALE C, et al. Physical model of dielectric charging in MEMS [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2013, 23(4): 045019.
 - [20] LIU Y, HAN K, JIANG Z, et al. A high capacitive ratio and low actuation voltage RF MEMS switch for multi band: Design and performance analysis [C]. 2021 9th International Conference on Communications and Broadband Networking, 2021: 305-309.
 - [21] DENG K, YANG F, WANG Y, et al. Design and fabrication of a Ka band RF MEMS switch with high capacitance ratio and low actuation voltage [J]. Micromachines, 2021, 13(1): 37.
 - [22] ZHU Y, PAL J. Low-voltage and high-reliability RF MEMS switch with combined electrothermal and electrostatic actuation [J]. Micromachines, 2021, 12(10): 1237.
 - [23] LIU Y, BEY Y, LIU X. Extension of the hot-switching reliability of RF-MEMS switches using a series contact protection technique [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(10): 3151-3162.
 - [24] 黄哲. RF MEMS 开关机电性能研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
HUANG ZH. Research on the electrical performance of RF MEMS switching machine [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2016.
 - [25] 周光亚. RF MEMS 开关可靠性研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
ZHOU G Y. Reliability study of RF MEMS switch [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
 - [26] LI M, ZHAO J, YOU Z, et al. Design and fabrication of a low insertion loss capacitive RF MEMS switch with novel micro-structures for actuation [J]. Solid-State Electronics, 2017, 127: 32-37.
 - [27] ZHU Y, HAN L, QIN M, et al. Novel DC-40 GHz MEMS series-shunt switch for high isolation and high power applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 214: 101-110.
 - [28] PERSANO A, TAZZOLI A, FARINELLI P, et al. K-band capacitive MEMS switches on GaAs substrate: Design, fabrication, and reliability [J]. Microelectronics

Reliability, 2012, 52(9-10): 2245-2249.

- [29] YANG H H, ZAREIE H, REBEIZ G M. A high power stress-gradient resilient RF MEMS capacitive switch[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 24(3): 599-607.

作者简介



翟雷应 (通信作者), 2002 年于太原理工大学获得学士学位, 2006 年于太原理工大学获得硕士学位, 2012 年于中科院微系统所获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为 MEMS 传感与系统。

E-mail: zlygsl@hotmail.com

Zhai Leiying (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2002, M. Sc. degree from Taiyuan University of Technology in 2006 and Ph. D. degree from Chinese Academy of Sciences Microsystems in 2012, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include MEMS sensing and systems.



张钰瑶, 2021 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 主要研究方向为 RF MEMS 器件及系统、MEMS 器件及系统的研究。

E-mail: 1401504859@qq.com

Zhang Yuyao received her B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2021.

Now she is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. Her main research interest includes RF MEMS.



刘文进, 1992 年于辽宁工业大学获得学士学位, 2005 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向图像识别与处理、射频微波电路系统。

E-mail: lntuliuwenjin@163.com

Liu Wenjin received the B. Sc. degree from Liaoning University of Technology in 1992 and the M. Sc. degree from Liaoning University of Engineering and Technology in 2005. Now she is an associate professor in Liaoning University of Engineering and Technology, with main research interests in image recognition and processing, RF microwave circuit systems.



南敬昌, 1993 年于阜新矿业学院获得学士学位, 2003 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2007 年于北京邮电大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学教授, 主要研究方向为射频电路与系统、信号处理与信息编码、通信系统仿真等。

E-mail: nanjc886@sina.com

Nan Jingchang received his B. Sc. degree from Liaoning Technical University in 1993, M. Sc. degree from Liaoning Technical University in 2003 and Ph. D. degree from Beijing University of Posts & Telecommunications in 2007, respectively. Now he is a professor in Liaoning Technical University. His main research interests include RF circuits and systems, signal processing and information coding, communication system simulation, etc.