光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023122602

基于变刚度悬臂梁的 MEMS 静电驱动器的动态响应优化

高宇帆，戴旭涵*，王怀治，张卓尔，丁桂甫

（上海交通大学 微米/纳米加工技术国家级重点实验室，上海 200240）

摘　要： 传统的微机电系统(MEMS)静电驱动器存在驱动电压高和超调振荡的问题，可动极板稳定在平衡位置前会发生持续的振荡，难以满足可变电容、光开关等应用领域的综合要求。针对上述问题，采用变刚度悬臂梁的设计，利用刚度随行程增大的特性抑制了极板吸合及释放过程的振荡现象，在缩短调节时间的同时，有效降低了器件的驱动电压。仿真和实验结果表明，当器件悬臂梁的刚度随位移由 5 N/m 增大到 35 N/m 时，在相同电压下，动态响应的调节时间减少了 55.5%，在相同行程下，动态响应的调节时间减少了 21%，对应的驱动电压减少了 23%。

关键词： 微机电系统；静电驱动器；变刚度；动态响应

中图分类号： TM313　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0188－07

Dynamic Response Optimization of MEMS Electrostatic Actuator Based on Variable Stiffness Cantilever Beam

GAO Yufan, DAI Xuhan, WANG Huaizhi, ZHANG Zhuoer, DING Guifu

(National Key Lab. of Advanced Micro and Nano Manufacture Technol., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: Traditional MEMS electrostatic actuators have the problems of high actuation voltage and overshoot oscillation. The movable electrode oscillates continuously before stabilizing at the equilibrium position; hence, satisfying the comprehensive requirements of variable capacitors, optical switches, and other applications is difficult. To solve the above problems, this study adopts the design of a variable stiffness cantilever beam. With the characteristic of increasing stiffness with travel, the oscillation phenomenon is suppressed. The actuation voltage is effectively reduced, and the transient time is shortened. The simulation and experimental results show that when the stiffness of the cantilever beam increases from 5 N/m to 35 N/m, the transient time of the dynamic response decreases by 55.5% under the same voltage and 21% under the same travel, and the actuation voltage decreases by 23%.

Key words: MEMS; electrostatic actuator; variable stiffness; dynamic response

0　引言

微机电系统(MEMS)静电驱动器是通过静电力驱动可动结构运动的器件，以光开关为例，MEMS 光开关具有功耗低、插入损耗小、隔离度和线性度好等优势[1]，有利于解决光通信能耗高和信号失真等问题。然而，驱动电压高、响应速度慢、可靠性差[2]以及动态响应稳定性差等问题，增加了 MEMS 光开关应用的复杂度和成本[3]，针对这些问题，国内外学者进行了很多研究与探索。

Kundu 等[4]设计了一种双可动极板结构的 MEMS 静电驱动器，两极板可同时相向移动，使驱动电压和响应时间同时降低 20%；Kim 等[5]设计了一种带有粘滞恢复电极的 MEMS 静电驱动器，将弹簧刚度降到非常低而又不会发生粘附失效问题，降低驱动电压的同时提高了可靠性；Rahim等[6]提出

收稿日期：2023－12－26.

* 通信作者：戴旭涵

了一种双电极结构的控制方法，抑制了驱动器的吸合弹跳现象，提高可靠性的同时优化了驱动器吸合时的动态响应性能。此外，还有许多方案被提出，如使用可靠性更高的接触结构[7-8]、设计新型悬臂梁结构[9-10]、增加驱动电极极板面积等[11]，从多个方面改善了 MEMS 静电驱动器的性能。然而，这些研究难以兼顾驱动器动态响应的速度和稳定性，动态响应的整体性能依然没有提高。

为了降低驱动电压和提高动态响应的稳定性，本文采用了变刚度悬臂梁结构的设计，更小的初始刚度降低了驱动器的驱动电压，随位移增大的刚度抑制了极板的振荡。分别制备了不同悬臂梁结构的 MEMS 静电驱动器，并对所制备的静电驱动器进行了力学特性测试和动态响应测试。测试结果表明，变刚度设计在降低驱动电压的同时，将相同电压和相同行程下的驱动器动态响应调节时间分别缩短了 55.5%和 21%。

1　MEMS 静电驱动器设计与仿真

1.1　变刚度悬臂梁的力学特性

本文设计的悬臂梁一端固定，另一端只能沿竖直方向上下位移，悬臂梁变形时的弹性曲线如图 1 所示。悬臂梁的变形可以看成竖直方向的纯弯曲应变 σ_d 和水平方向的纯拉伸应变 σ_l 的叠加，因此将端点力看作产生这两种应变的力的合力 F_d+F_l。

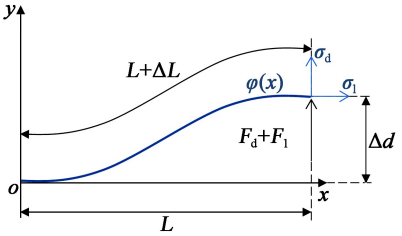


图 1　非线性悬臂梁弹性曲线

在竖直方向，发生纯弯曲应变，由欧拉-伯努利梁理论可得：

$$\frac{\mathrm{d}^3 y}{\mathrm{d}x^3}=-\frac{F_d}{EI} \tag{1}$$

由图 2 可以看出，悬臂梁弹性曲线的边界条件可以写为：

$$\begin{cases}\varphi(0)=0\\ \varphi(L)=\Delta d\\ \varphi'(0)=0\\ \varphi'(L)=0\end{cases} \tag{2}$$

由此解得，悬臂梁弹性曲线方程为：

$$\varphi(x)=-\frac{2\Delta d}{L^3}x^3+\frac{3\Delta d}{L^2}x^2 \tag{3}$$

将式(3)代入式(1)可得：

$$F_d=\frac{EWt^3}{L^3}\Delta d \tag{4}$$

式中，E 为材料杨氏模量，L，W 和 t 分别为悬臂梁的长、宽和厚度。

在水平方向，发生纯拉伸应变，对有限元积分可以得到：

$$L+\Delta L=\int_0^L\sqrt{1+(\varphi'(x))^2}\,\mathrm{d}x \tag{5}$$

因此，

$$\Delta L=\int_0^L(\sqrt{1+((\varphi'(x))^2}-1)\mathrm{d}x\approx\int_0^L\frac{((\varphi'(x))^2}{2}\mathrm{d}x=\frac{3\Delta d^2}{5L} \tag{6}$$

则水平方向应变能为：

$$E_l=\iiint\frac{1}{2}\sigma\varepsilon\,\mathrm{d}V=\frac{E}{2}\left(\frac{\Delta L}{2}\right)^2LWt=\frac{9EWt}{50L^3}\Delta d^4 \tag{7}$$

由卡式定理可得：

$$F_l=\frac{\partial E_l}{\partial\Delta d}=\frac{18EWt}{25L^3}\Delta d^3 \tag{8}$$

因此变刚度悬臂梁的力学特性为：

$$F=\frac{EWt^3}{L^3}\Delta d+\frac{18EWt}{25L^3}\Delta d^3 \tag{9}$$

悬臂梁的力学特性中含有关于位移的三次方项，因此具有随位移变化的刚度。

1.2　MEMS 静电驱动器结构和原理

本文的 MEMS 静电驱动器主要包括可动极板、固定极板和悬臂梁结构，器件的三维结构如图 2 所示。可动极板由四根变刚度悬臂梁支撑悬空，当固定极板接地、可动极板施加电压时，在静电力的作用下，可动极板克服悬臂梁的弹力向下移动，当静电力与悬臂梁弹力平衡时，可动极板悬停在平衡位置，该位置的位移称为可动极板的行程。

如图 3 所示是传统的常刚度悬臂梁弹力和静电力与位移关系示意图，当可动极板第一次到达平衡位置时，由于仍具有速度，极板会继续向下移动，此时悬臂梁弹力将大于静电力，将极板向上拉回时仍会超过平衡位置，如此反复，形成在平衡位置附近的振荡，动态响应的稳定性较差。同理，当电压撤去时，极板释放回到初始位置时也会产生持续的振荡。

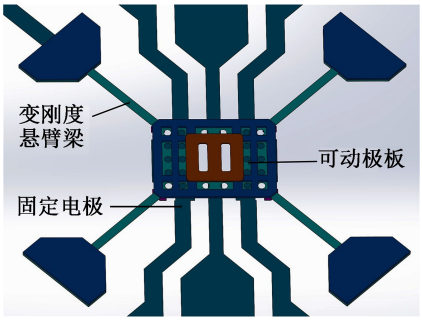


图 2 MEMS 静电驱动器三维结构图

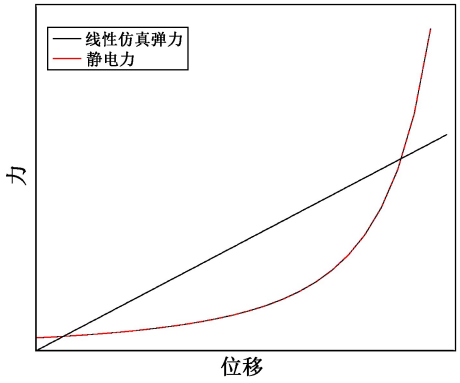


图 3 常刚度悬臂梁弹力和静电力与位移关系示意图

如图 4 所示是本文设计的变刚度悬臂梁弹力和静电力与位移关系示意图，初始阶段悬臂梁的刚度很小，相同位移下变刚度悬臂梁的弹力比常刚度悬臂梁更小，因此达到相同极板行程所需施加的电压更小。同时，在极板的平衡位置，变刚度悬臂梁弹力曲线与静电力曲线更加贴合，因此极板受到的回复力合力更小，导致极板振荡过程中加速度更小、速度更大，受到的粘性阻尼更大，因此稳定前振荡的时间缩短，动态响应的稳定性提高。此外，极板释放时，在初始位置附近，变刚度悬臂梁受到的由弹力提供的回复力也更小，因此动态响应稳定性也更高。

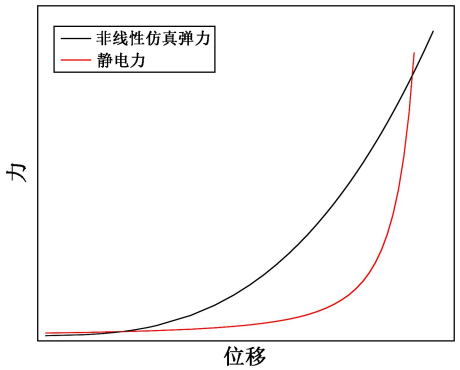


图 4 变刚度悬臂梁弹力和静电力与位移关系示意图

1.3 建模仿真

如图 5 所示是仿真时建立的简化模型，其中可动极板尺寸为 270 μm × 210 μm，悬臂梁尺寸为 200 μm×20 μm×0.5 μm，极板间初始间隙为 5 μm。首先对器件进行力学特性仿真，结果如图 6 所示，力学特性呈现明显的非线性。根据仿真结果计算不同位移对应的悬臂梁刚度，如图 7 所示，悬臂梁刚度随位移增大而增大，从 0.5 N/m 增加到 35.5 N/m。

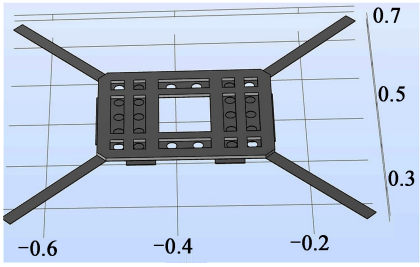


图 5 仿真模型

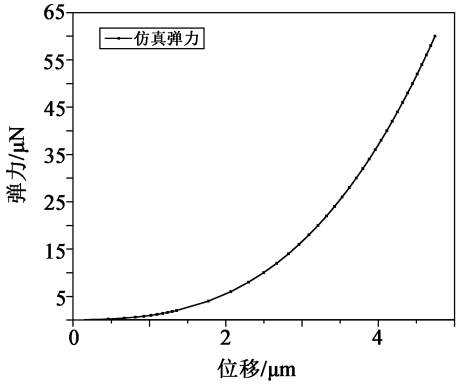


图 6 悬臂梁弹力与位移关系仿真结果

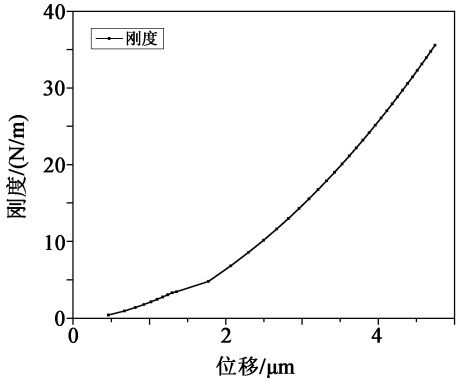


图 7 悬臂梁刚度与位移关系仿真结果

再对器件进行机电耦合仿真，结果如图 8 所示，可动极板的行程随施加电压的增大而增大，当电压超过 21 V 后，极板迅速吸合，因此静电驱动器的临界驱动电压在 21～22 V 之间，极板吸合前最后一个平衡位置的位移为 2.37 μm，因此极板的可控行程为 47.4%。

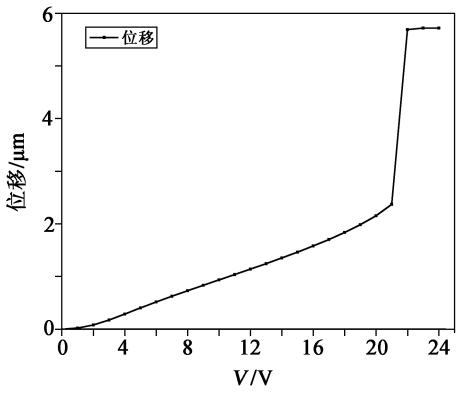


图 8　可动极板位移与电压关系仿真结果

2　MEMS 静电驱动器制备工艺

本文所设计的基于变刚度悬臂梁的 MEMS 静电驱动器采用表面微加工工艺制备，其中包括磁控溅射工艺、光刻胶叠层工艺、电镀工艺、化学机械抛光工艺和牺牲层释放工艺等多种微纳加工工艺。器件的整体制备工艺大致可分为四层：布线层、填充层、可动极板层和加强筋层，如图 9 所示是器件的主要制备流程，具体描述如下：

(a)清洗玻璃基片并烘干，溅射一层 Cr/Cu 种子层，厚度为 40 nm/60 nm。

(b)布线层旋涂光刻胶 AZ4330，光刻出固定极板和支撑底座的图案，电镀金属 Ni，厚度为 500 nm。

(c)去除残留的光刻胶，旋涂光刻胶 AZ4620 作为填充层，光刻出支撑底座的图案，使用化学机械抛光工艺进行表面平坦化，以保证其上制备的悬臂梁下表面平整。

(d)继续旋涂光刻胶 AZ4330，使填充层厚度达到 5 μm，光刻出支撑底座的图案，溅射一层 Cr/Cu 种子层，厚度为 40 nm/60 nm。

(e)可动极板层旋涂光刻胶 AZ4330，光刻出可动极板、悬臂梁、支撑底座的图案，电镀金属 Ni，厚度为 500 nm。

(f)加强筋层旋涂光刻胶 AZ4620，光刻出加强筋、支撑底座的图案，电镀金属 Ni，厚度为 5 μm。

(g)使用氢氧化钠溶液、去铜液和去铬液去除填充层光刻胶和全部种子层，使用二氧化碳超临界干燥工艺释放器件的悬空结构，MEMS 静电驱动器制备完成。

如图 10 所示是所制备器件的 SEM 照片。

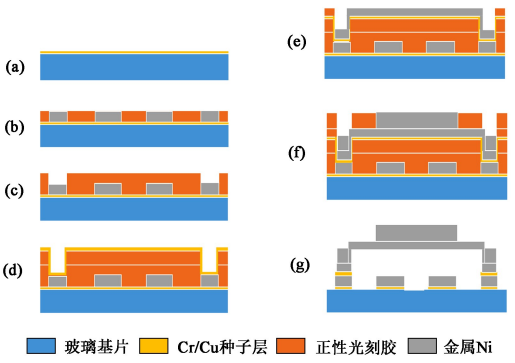


图 9　MEMS 静电驱动器制备工艺流程

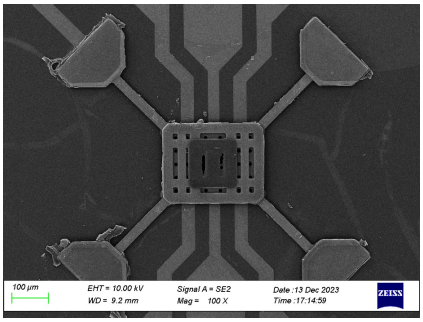


图 10　MEMS 静电驱动器 SEM 照片

3　MEMS 静电驱动器测试

对制备的 MEMS 静电驱动器的测试分为静态测试和动态测试，首先通过静态测试表征悬臂梁的力学特性、静电驱动器的吸合电压及不同电压下极板的行程，根据静态测试结果，挑选不同悬臂梁结构的静电驱动器进行动态测试，表征它们在相同电压或相同行程下的动态响应区别，验证极板振荡抑制的效果。

3.1　静态测试

悬臂梁力学特性的静态测试由 FT-RS1000 微力微位移测试系统完成，如图11所示，器件基片固

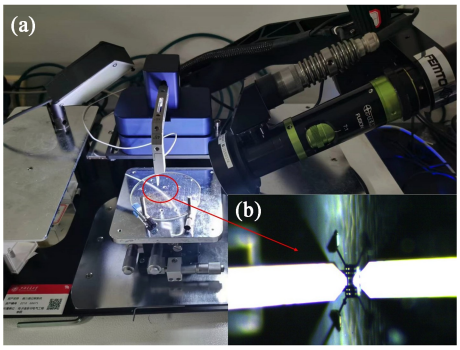


图 11　(a)微力微位移测试系统；(b)微力微位移探针与待测器件

定在测试平台上，微力探针悬于器件顶部，启动测试后，探针压着静电驱动器的可动极板向下移动，同时不断输出探针位移与当前位移检测到的力的值。

将测试结果与仿真结果对比，如图 12 所示，悬臂梁力学特性呈现明显的非线性，与仿真结果相符。

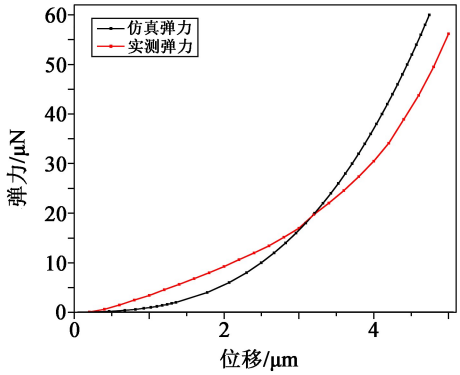


图 12 悬臂梁弹力与位移关系仿真和实际对比

根据结果计算不同位移对应的悬臂梁刚度，与仿真结果对比，如图 13 所示，随着位移增大，悬臂梁刚度从 1.8 N/m 增加到 33.5 N/m，与仿真结果大致相符。

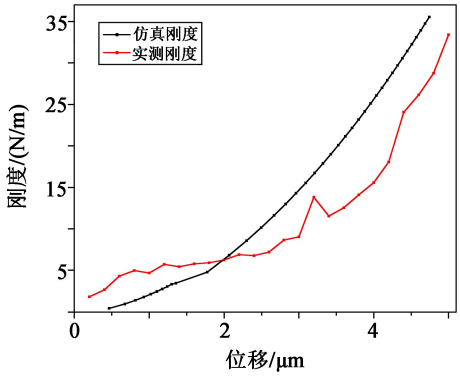


图 13 悬臂梁刚度与位移关系仿真和实际对比

静电驱动器的吸合电压和不同电压下极板行程的表征由激光测振系统完成，如图 14 所示，将待测器件固定在测试平台上，调整激光器位置使光点位

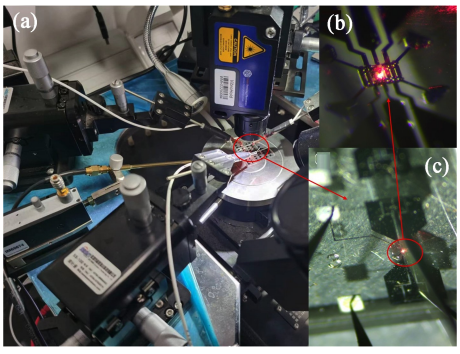


图 14 (a)激光测振系统；(b)激光器光点；(c)测试探针

于极板上，驱动电压由信号发生器产生，经过电压放大器放大输出，通过探针接入器件 pad，可动极板的位移可由激光器直接测量。

将不同电压下的测试结果与仿真结果对比，如图 15 所示，实测数据与仿真基本相符，极板在 22 V 时吸合。

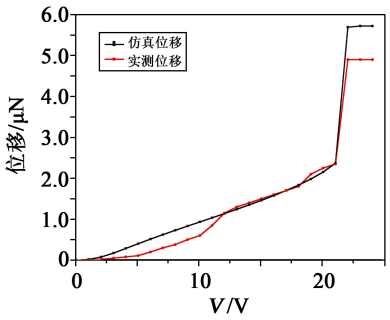


图 15 极板位移与施加电压的关系仿真和实际对比

3.2 动态测试

动态测试也由激光测振系统完成。分别制备常刚度和变刚度悬臂梁结构的静电驱动器，除悬臂梁结构外其他参数均相同。对器件进行静态测试，根据结果挑选器件进行动态测试，表征不同悬臂梁结构的驱动器在相同电压和相同行程下的动态响应区别，验证极板振荡抑制的效果。挑选的依据为施加给定电压时，将变刚度悬臂梁在平衡位置时的刚度，作为常刚度悬臂梁的刚度标准。

3.2.1 相同电压

如图 16 所示是变刚度和常刚度悬臂梁的弹力和施加电压为 55 V 时静电力与位移的关系，图 17 是两种驱动器悬臂梁刚度与位移的关系，当施加电压为 55 V 时，变刚度悬臂梁的位移约为 1 μm，在该位移下，变刚度悬臂梁的刚度约为 32 N/m，与常刚度悬臂梁的刚度相等。常刚度悬臂梁位移为 0.6 μm，即在相同电压下，变刚度悬臂梁结构使极板的行程延长了 66.7%。

如图 18(a)，(b)所示是在 55 V 电压下上述两静电驱动器的动态响应结果，可以看出变刚度悬臂梁的静电驱动器动态响应的调节时间为 300 μs，常刚度悬臂梁驱动器的调节时间为 675 μs，变刚度设计使动态响应的调节时间减少了 55.6%，符合理论分析。此处的调节时间定义为响应到达并保持在终值的±5%误差带内所需的最短时间。

如图 19(a)，(b)所示是上述驱动器释放时的动态响应结果，变刚度悬臂梁驱动器释放的调节时间为 400 μs，常刚度悬臂梁驱动器释放的调节时间为

780 μs，变刚度设计使释放的调节时间减少了 48.7%。

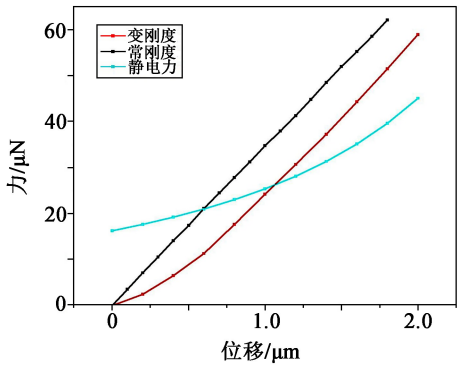


图 16　变刚度、常刚度悬臂梁弹力和 55 V 静电力与位移关系

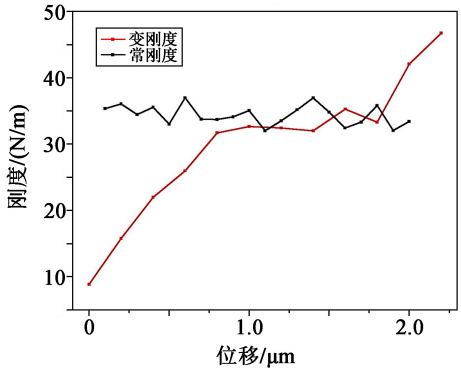


图 17　变刚度、常刚度悬臂梁刚度与位移关系

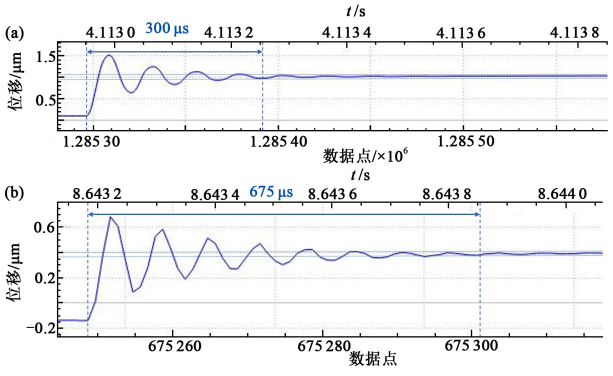


图 18　(a) 变刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压下的动态响应；(b) 常刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压下的动态响应

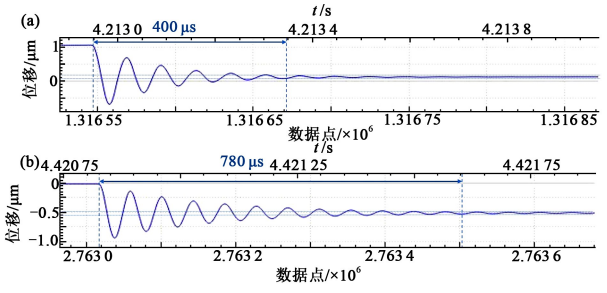


图 19　(a) 变刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压释放后的动态响应；(b) 常刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压释放后的动态响应

3.2.2　相同行程

增大常刚度悬臂梁静电驱动器上施加的电压，当电压为 68 V 时，两极板行程相同，即变刚度设计将电压降低了 19.1%。此时两驱动器的动态响应结果如图 20 所示，悬臂梁弹力和静电力与位移关系如图 21 所示。变刚度悬臂梁的静电驱动器动态响应的调节时间为 300 μs，常刚度悬臂梁驱动器的调节时间为 380 μs，变刚度设计使动态响应的调节时间减少了 21%。这是因为两极板行程相同时，虽然所受回复力相同，但变刚度悬臂梁上施加的电压更小，因此极板第一次到达平衡位置时的速度更小，从而需要更短的时间达到稳定。

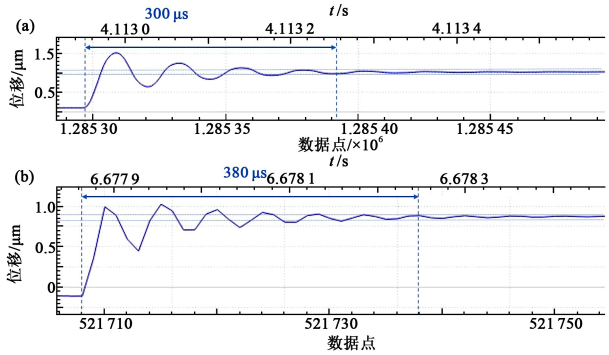


图 20　(a) 变刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压下的动态响应；(b) 常刚度悬臂梁静电驱动器 68 V 电压下的动态响应

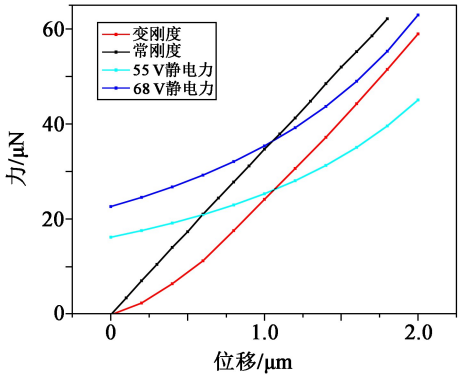


图 21　变刚度、常刚度悬臂梁弹力和 55 V、68 V 静电力与位移关系

如图 22(a)，(b)所示是上述驱动器释放时的动态响应结果，变刚度悬臂梁的静电驱动器释放的调节时间为 400 μs，常刚度悬臂梁驱动器释放的调节时间为 940 μs，变刚度设计使释放的调节时间减少了 57.4%。

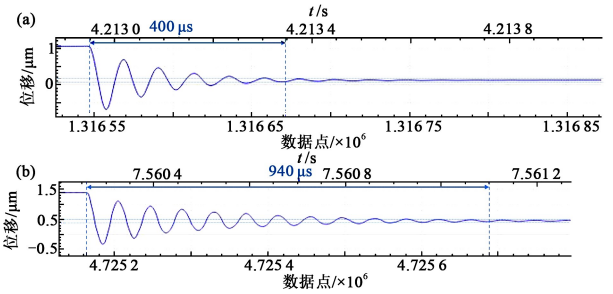


图 22 (a) 变刚度悬臂梁静电驱动器 55 V 电压释放后的动态响应;(b) 常刚度悬臂梁静电驱动器 68 V 电压释放后的动态响应

4 结论

针对 MEMS 静电驱动器的驱动电压高和稳定性差的问题,本文提出了一种基于变刚度悬臂梁结构的动态响应优化方法,采用表面微加工工艺制备了多种悬臂梁结构的 MEMS 静电驱动器并进行测试分析。测试结果表明,在降低静电驱动器驱动电压的同时,变刚度悬臂梁结构抑制了可动极板吸合和释放稳定前的振荡现象,缩短了驱动器动态响应的调节时间,提高了动态响应的稳定性,为进一步优化静电驱动 MEMS 器件的动态响应性能提供了有效的解决思路。

参考文献:

[1] Kumar R. A review on RF micro-electro-mechanical-systems (MEMS) switch for radio frequency applications [J]. Microsyst. Technol., 2021, 27(7): 2525-2542.

[2] Rebeiz G M, Muldavin J B. RF MEMS switches and switch circuits[J]. IEEE Microwave Mag., 2001, 2(4): 59-71.

[3] Bansal D, Bajpai A, Kumar P, et al. Design and fabrication of a reduced stiction radio frequency MEMS switch[J]. J. Micro/Nanolithogr. MEMS MOEMS, 2015, 14(3): 035002.

[4] Kundu A, Sethi S, Mondal N C, et al. Analysis and optimization of two movable plates RF MEMS switch for simultaneous improvement in actuation voltage and switching time[J]. Microelectron. J., 2010, 41(5): 257-265.

[5] Kim M W, Song Y H, Yang H H, et al. An ultra-low voltage MEMS switch using stiction-recovery actuation [J]. J. Micromech. Microeng., 2013, 23(4): 045022.

[6] Abdul Rahim F, Younis M I. Control of bouncing in MEMS switches using double electrodes[J]. Math. Probl. Eng., 2016: 3479752.

[7] Ke F, Miao J, Oberhammer J. A ruthenium-based multimetal-contact RF MEMS switch with a corrugated diaphragm[J]. J. Microelectromech. Syst., 2008, 17(6): 1447-1459.

[8] Liu Y, Liu J, Yu B, et al. A compact single-cantilever multicontact RF-MEMS switch with enhanced reliability[J]. IEEE Microwave Wireless Compon. Lett., 2018, 28(3): 191-193.

[9] Reddy B L, Shanmugananthan T. Design of novel capacitive RF MEMS shunt switch with aluminum nitride (AlN) dielectric[J]. Procedia Mater. Sci., 2014, 6: 692-700.

[10] Manivannan M, Daniel R J, Sumangala K. Low actuation voltage RF MEMS switch using varying section composite fixed-fixed beam[J]. Inter. J. of Microwave Science and Technol., 2014: 862649.

[11] 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 Electron., 2017, 127: 32-37.

作者简介:

高宇帆(1999—),男,硕士生,主要从事 MEMS 静电驱动器、MEMS 静电开关等方面的研究;

戴旭涵(1974—),男,博士,副教授,从事电磁 MEMS 器件设计与制造方面的研究,完成多项国家“863”及自然科学基金项目。