

# 微多晶硅梁开关振荡器

孙曦庆 李志坚 费圭甫

清华大学微电子学研究所,北京 100084

(1992年4月23日收到;1992年9月7日收到修改稿)

本文提出了一种新型的多晶硅梁微静电开关结构,并在考虑硅梁固定边张力的情况下对多晶硅梁的受力弯曲、静电吸合等情形进行了有效的静力学理论分析。

利用微静电开关的充电吸合、放电弹开这一电、机过程,本文还实现了一种成本极低的微硅梁静电驱动振荡器。初步研究结果表明,硅梁的振动频宽大约为 2.1kHz,振动幅度较小,振动平衡点在下电极附近。

EEACC: 1265H, 5180D, 2180B

## 一、引言

最近几年,硅微机械加工技术得到了迅速发展,各种微结构的广泛应用导致了一批新型器件的面世,如在微机械活动器件方面有微马达、微电泵和微滚动器等<sup>[1]</sup>;在敏感器件方面有加速度、压力和流量传感器等<sup>[2-4]</sup>。另外,微机械结构似乎还有一些其它方面的妙用,如动态存储器<sup>[5]</sup>、真空电子管<sup>[6]</sup>以及本文介绍的硅梁振荡器等。

微硅梁,作为一种比较简单的微机械结构,它的机械振动的产生主要有热驱动、压电驱动、磁驱动和静电驱动四种方式,其中尤以静电驱动方式最富有吸引力。因为多晶硅梁静电驱动方式结构简单,而且能够很方便地实现各种用途的谐振传感器<sup>[7]</sup>。谐振传感器的一个突出优点是它的数字输出,能够减少智能化所需的量化界面。而其缺点则是它的反馈环电路和电容检测结构比较复杂。

用于描述在静电驱动方式下硅梁平衡弯曲的分析方法主要有有限元法<sup>[9]</sup>、等效机械力法<sup>[5]</sup>和最小势能法<sup>[10]</sup>。前两种方法在考察硅梁发生弯曲时,将弹性场和静电场隔离开来分别加以分析,所以误差较大。最小势能法在统筹考虑静电场和弹性场相互作用的基础上,运用最小势能原理得到了硅梁的平衡弯曲情况,这是比较正确的方法。但文献[10]的结果仅适合于硅梁挠度很微小的情形,当硅梁发生较大弯曲、甚至与下电极接触时,其结果已不能成立。因为该文没有考虑固定边张力对弹性场的贡献。

基于微多晶硅梁构成的微静电开关,在静电驱动下除了具有谐振特点外,还有静电吸合的特点。当开关两电极间电位超过某一值即吸合电压时,硅梁向下弯曲并与下电极“接触”吸合后两电极间发生放电,硅梁在弹性恢复力作用下弹回。依据微静电开关的这一特

点,我们提出了一种新型的多晶硅梁非谐振振动方式,该振动方式不依赖于任何电容检测结构和放大电路,因而大大简化了振荡器的结构和电路组成,降低了成本.

本文的第二、三部分将着重描述微静电开关的静电吸合理论及微梁振荡器的工作原理,第四部分将给出微静电开关的制作工艺和硅梁振荡器的测量结果.

## 二、微静电开关的理论分析

图 1 给出了微静电开关的基本构造.上电极是弹性多晶硅梁,下电极是硅衬底,硅梁的两端由  $\text{Si}_x\text{N}_y$  电绝缘层支撑.微静电开关的基本特征是当两电极间存在电位差时多晶硅梁将向下弯曲,甚至与下电极吸合放电.

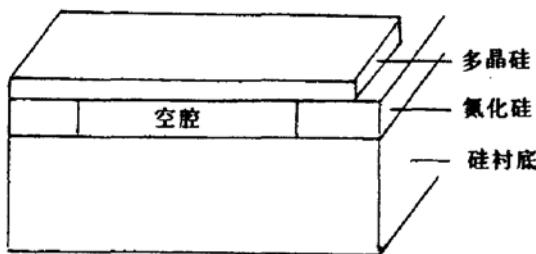


图 1 微静电开关的基本构造

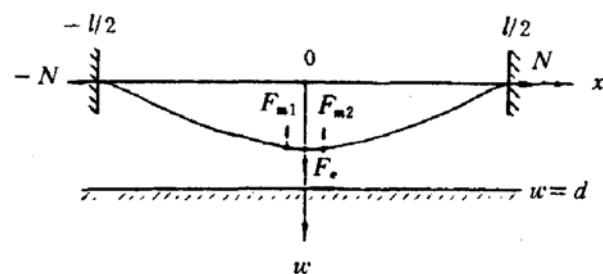


图 2 硅梁简化模型

为了描述多晶硅梁在静电-弹性场中的弯曲情况,我们假定:(1)多晶硅薄梁材料是均匀的;(2)硅梁两端刚性固定;(3)忽略两电极间电场的发散性.因此,在上述综合场作用下的硅梁弯曲可简化为一维问题来处理,如图 2 所示.令硅梁的轴向张力为  $N$ ,各点挠度  $w(x)$ ,中心挠度  $w_1$ ,硅梁长度  $l$ ,宽度  $b$ ,厚度  $h$ ,两电极间距为  $d$ .则硅梁的平衡挠度可近似表达为<sup>[1]</sup>:

$$w(x) \approx w_1 \cos^2 \frac{\pi x}{l}. \quad (1)$$

硅梁的弹性势能包括两部分:一部分是由轴向力  $N$  引起的变形能  $U_{m1}$ ,另一部分是由横向弯曲形成的变形能  $U_{m2}$ .相应地,硅梁弹性恢复力也有两部分,即由轴向力造成的  $F_{m1}$  和由横向弯曲造成的  $F_{m2}$ .它们分别表示为:

$$U_{m1} = \frac{hE}{1} \left( \int_{-l/2}^{l/2} \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 dx \right)^2, \quad (2)$$

$$U_{m2} = \frac{EJ}{2} \left( \int_{-l/2}^{l/2} \left( \frac{d^2w}{dx^2} \right)^2 dx \right)^2, \quad (3)$$

$$F_{m1} = - \frac{dU_m}{dw_1} = - \frac{1.5\pi^4 w_1 E J}{l^3} (w_1/h)^2, \quad (4)$$

$$F_{m2} = - \frac{dU_m}{dw_1} = - \frac{2\pi^4 w_1 E J}{l^3}, \quad (5)$$

式中  $E$  为杨氏模量,  $J$  为转动惯量 ( $= \frac{bh^3}{12}$ ).

若静电开关两电极间电压为  $V$ , 则两极板间电场储存的电能及有效库仑力为:

$$U_e = \frac{1}{2} \int_{-1/2}^{1/2} \rho V_{ex}, \quad (6)$$

$$F_e = -\frac{dU_e}{dw_1} = \frac{C_0 V^2}{4d(1 - \frac{w_1}{d})^{3/2}}, \quad (7)$$

式中  $\rho$  为极板电荷线密度,  $C_0$  为开关平衡电容值 ( $= \epsilon_0 lb/d$ ).

很明显, 硅梁系统合力为:

$$F = F_m + F_e. \quad (8)$$

图 3 给出了  $F_e$  和  $F_m$  ( $F_m = F_{m1} + F_{m2}$ ) 在不同电压作用下的定性示意曲线. 可以看出, 硅梁系统在  $(V_1, V_2)$  电压范围内总存在这样一个临界值  $V_t$ , 当  $V < V_t$  时硅梁满足力学平衡条件, 而当  $V > V_t$  时硅梁不存在任何平衡点且与下电极发生吸合. 表征这一临界点的关系式为:

$$\begin{cases} F_e + F_m = 0, \\ \frac{\partial F_e}{\partial w_1} + \frac{\partial F_m}{\partial w_1} = 0. \end{cases} \quad (9)$$

解此方程组就能得到  $V_t$  及其对应的中心挠度  $w_t$ .

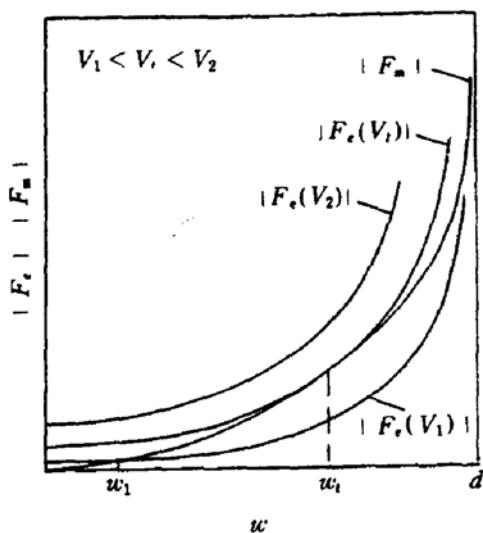


图 3  $F_e$  和  $F_m$  在  $[0, d]$  范围内的变化曲线

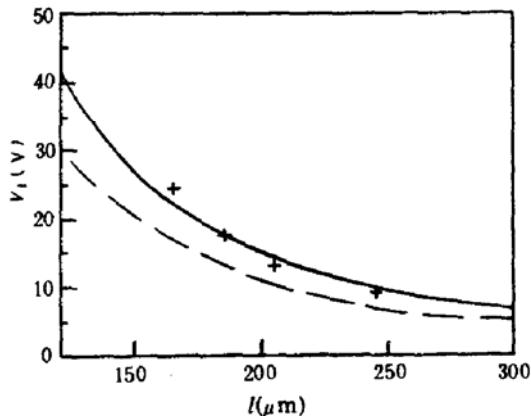


图 4 吸合电压与硅梁长度关系特性开关尺寸为  
 $b = 25 \mu m, d = 1.1 \mu m, h = 1 \mu m$

对于不同长度硅梁的吸合电压  $V_t$ , 我们进行了一些实验研究和理论计算, 其结果如图 4 所示. “+”表示实测结果, 实线表示由方程组 (10) 得到的模拟结果, 虚线则是根据文献 [10] 在未考虑轴向力  $N$  的作用项  $F_{m1}$  情况下的模拟结果. 很显然, 实线较虚线更好地描述了硅梁吸合电压与硅梁长度的变化规律. 这说明在静电开关的静电吸合过程中硅梁的轴向作用项  $F_{m1}$  的贡献已不容忽略.

### 三、硅梁振动器工作原理

图 5 示出了硅梁振动器的原理电路。其中微静电开关是振动器的关键构成，用  $C_x$  表示其电容，大约在  $0.1\text{pF}$  以下。为了调整频率的变化范围以及消除  $C_x$  变化引入的非线性因素，我们在  $C_x$  两端并联一个较大的电容  $C_r (\gg C_x)$ 。于是总电容  $C \approx C_r$ 。

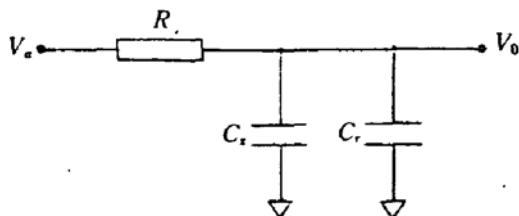


图 5 硅梁振荡器测试电路

硅梁的振动是这样产生的：直流电压源  $V_a$  通过电阻  $R$  对开关充电，当开关电压达到吸合电压  $V_t$  时开关上电极向下弯曲与下电极发生吸合并放电，然后在弹性恢复力作用下弹开，如此周期性地重复上述电、机过程在测试电路输出端便得到了一族连续的锯齿波。

描述开关充电过程的表达式为：

$$V_o = V_s + (V_a - V_s)(1 - \exp(-\frac{t}{RC_r})), \quad (10)$$

当  $V_o = V_t$  时开关发生吸合，因此开关充电上升时间可表示为：

$$t_r = RC_r \ln(\frac{V_a - V_s}{V_a - V_t}), \quad (11)$$

式中  $V_s$  是开关充电起始电平。

如果认为开关的放电过程很短，则硅梁振荡频率为：

$$f \approx \frac{1}{t_r} \quad (12)$$

当电压较大时，上式变成：

$$f \approx \frac{V_a - V_s}{RC_r(V_t - V_s)}, \quad (13)$$

即振荡频率与电压成线性关系。

### 四、实验与讨论

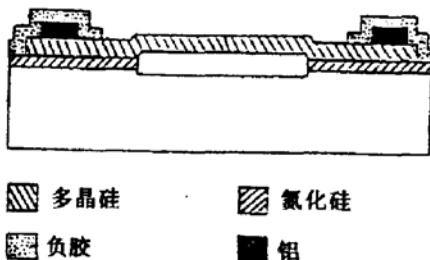


图 6 多晶硅梁剖面结构

#### (1) 微静电开关制造工艺

微静电开关的剖面结构如图 6 所示，其制作工艺主要包括：①在氮化过的 N 型硅衬底上淀积一层约  $3500\text{\AA}$  厚的  $\text{Si}_x\text{N}_y$  膜，并刻出下电极；②生长一层约  $1.1\mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  作为牺牲层，对  $\text{SiO}_2$  注入大剂量的磷以加速牺牲层的腐蚀速度；③淀积一层  $1\mu\text{m}$  厚的掺磷多晶硅膜，方块电阻为  $20\Omega/\square$ ，并进行快速热退火处理以消除多晶硅的本征机械应力，然后刻出开关上电极；④溅铝、刻出压焊块，接着涂胶保护预置电学区，最后进行  $\text{SiO}_2$  牺牲层的腐蚀，从而形成了如图 7(见图版

I)所示的微静电开关结构.微静电开关的尺寸为: $l=50\sim250\mu\text{m}$ , $b=25\mu\text{m}$ , $h=1\mu\text{m}$ , $d=1.1\mu\text{m}$ .

### (2) 硅梁振动特性

我们对图5所示的硅梁振荡器的输出特性进行测量,取 $R=25\text{ k}\Omega$ , $C_r=0.1\text{ }\mu\text{F}$ .图8是振荡器在不同频率下的输出波形照片,(a)说明当硅梁刚起振时,开关的充电过程呈现明显的指数关系;(b)说明当偏压较大时,由于开关电极放电过程的影响锯齿波回程已很明显,此时的振动频率为1.7kHz.另外,从图8(见图版I)还得到锯齿波峰值 $V_t=17.8\text{ V}$ ,谷值 $V_s=12.9\text{ V}$ .图9给出了硅梁振荡器的电压-频率关系曲线,实线是根据(12)式计算得到的理论值.测量得到的硅梁振荡器的最高频率为2.1kHz.在较高频率段,计算值与实测值相差较大,这是因为(12)式未考虑开关放电过程影响的缘故.

开关的充放电过程是一个十分复杂的电、机过程.借助于光学显微镜通过观察多晶硅梁的机械振动我们发现,多晶硅梁的平衡振动点位于下电极附近,而且振幅很小.当充电吸合时,硅梁仅向下轻微弯曲就会导致两电极“接触”放电.实际上,两电极放电无需真正接触,因为当两极板距离较近场强超过 $10^8\text{ V/m}$ 时,极间气体将发生电离并充当放电煤体.而通过气体放电后的开关,不可能释放掉全部的电荷,因而依然维持有较高的电平 $V_s(=12.9\text{ V})$ ,只是在这个电平下两电极间不再存在放电或放电速率低于充电速率而已.由于开关的充电过程覆盖整个硅振动过程,因而当电压 $V_a$ 太大时多晶硅梁将停止振动并始终处于“1”状态,此时的电压 $V_a-V_t=36\text{ V}$ .如果进一步加大电压则会因发热而导致硅梁发生范性形变.

微机械器件的稳定性是人们非常关心的问题.对于本文介绍的多晶硅梁振荡器,在选择合适的充电电压范围内,我们经过长时间的测量并未发现性能蜕化现象.

由于微硅梁振动频率依赖于电阻 $R$ 、电容 $C_r$ 以及充电电流 $I$ 等,所以对于以电阻、电容或电流等电学参数为敏感量的各种传感器,微梁振动器都能实现检测和数字输出.

## 五、结 论

①在考虑轴向张力的情况下,推导出了关于多晶硅梁的横向弯曲以及微静电开关的吸合电压的理论估算模型,计算和测量结果定性相符.

②利用微静电开关的充电吸合、放电弹开这一电、机过程,实现了一种新型的多晶硅梁振荡器.该振荡器的输出频率受电压控制.因设计没有优化,实验制成的硅梁振荡器的最高频率只达到2.1kHz,仍有潜力改进.

### 致谢

本工作曾得到清华大学微电子所的郑心畲副教授、刘理天副教授和熊大菁副教授的帮助,在此表示感谢.

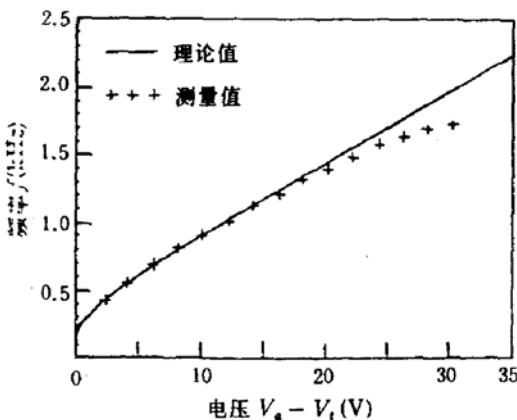


图9 硅梁振荡器频率输出特性

## 参 考 文 献

- [1] R. S. Muller, *Sensors and Actuators*, **A21—A23**, 1(1990).
- [2] B. Puers L. Reynaert, et al., *IEEE Transactions on Electron Devices*, **35**, 764(1988).
- [3] J. R. Mallon, Jr., et al., *Sensors and Actuators*, **A21—A23**, 89(1990).
- [4] E. Yoon and K. D. Wise, IEDM 88, p. 670.
- [5] B. Halg, *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED—37**, p. 2230(1990).
- [6] H. H. Busta, J. E. Pogemiller and M. F. Roth, IEDM 89, p. 533.
- [7] C. Linder and N. F. De Rooij, *Sensors and Actuators*, **A21—A23**, 1053(1990).
- [8] M. W. Putty and S. Chang, *Sensors and Actuators*, **20**, 143(1989).
- [9] S. C. Jacobsen, R. H. Price, J. E. Wood, T. H. Rytting and M. Rafaelof, *Sensors and Actuators*, **20**, 17 (1989).
- [10] H. Fujita and T. Ikoma, *Sensors and actuators*, **A21—A23**, 215(1990).
- [11] 张福范,《弹性模板》,科学出版社,p22(1984).

## Micro Polysilicon Beam Switch Vibrator

Sun Xiqing, Li Zhijian and Fei Guifu

*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084*

(Received 23 April 1991; revised manuscript received 7 September 1992)

### Abstract

This paper proposes a novel micro electro-static switch structure of polysilicon beam, and makes an effective statics analysis for the forced bending and the electrostatic switching process of polysilicon beam by considering the fixed boundary tensions.

Utilizing the electro mechanical process corresponding to charge-and-switch-on and discharge-and-switch-off of the micro electro-static switch, it also realizes a very cheap micro polysilicon beam vibrator driven by static electricity. The results of the initial study show that the maximal output frequency is about 2.1kHz, the vibrating amplitude is very small and the vibrating balance point is close to the lower electrode.

**EEACC:** 1265H, 5180D, 2180B