

# 适合硅微机械系统(MEMS)的集成 驱动结构——铝硅双金属膜片\*

战长青<sup>1</sup> 罗台秦<sup>2</sup> 刘理天<sup>1</sup> 钱佩信<sup>1</sup>

(1 清华大学微电子学研究所 北京 100084)

(2 香港科技大学微制造中心)

**摘要** 双金属效应是一种基本的物理效应,这一效应在硅微机械装置上的应用,有力地弥补了硅材料不具备压电效应,电信号难以直接转换为机械驱动力的缺陷。本文将介绍我们研制的铝硅双金属膜片。膜片尺寸为  $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times (20\mu\text{m} \text{ 单晶硅} + 10\mu\text{m} \text{ 金属铝})$ 。实验和分析结果表明,铝硅双金属膜片具有优越的力学特性,能提供足够大的动力和位移。这种集成的单片驱动结构不仅在材料及工艺上与 IC 工艺完全兼容,而且通过调整有关结构参数及工艺参数,可使该结构在 5 伏电压下稳定工作,为实现硅微机械系统(MEMS)奠定了基础。这种驱动方式是目前制造微阀门、微流量泵等需要大动力、大位移的硅微机械及其系统的理想驱动结构。

EEACC: 7230, 8340

## 1 引言

理想的驱动方式一直是左右硅微机械及其系统发展的关键因素。由于硅材料本身不具备压电效应,电信号难以直接转换为机械驱动力,因而必须采用其它的物理效应间接地实现这种转换。同时,集信号处理电路、微传感器、微执行器于同一芯片而构成的硅集成系统要求其中的微执行器的制造也要采用半导体微细加工工艺及材料。这就要求微执行器的驱动单元在制造工艺上应与 IC 工艺兼容,在结构上应采用层状薄膜结构,在材料选取上应采用硅及 IC 工艺常用材料。此外,考虑到硅集成系统应使用单一电源的要求,该驱动方式所需的驱动电压应以与电路电平相同为最佳。

迄今为止在各种各样的硅微执行器上大致使用了以下几种驱动方式,即电磁力<sup>[1]</sup>,静电引力<sup>[2]</sup>,粘接压电晶片<sup>[3,4]</sup>,热致驱动<sup>[5~8]</sup>等。

采用电磁力确可实现电信号到机械力的转换,但对于微执行器而言,微小尺寸线圈的制作及装配都是非常复杂的。而且由于允许通过的电流有限,使有限的输入功率所提供的驱动力较小。静电引力仅在电极间隙很小时驱动力才足够大,由于微驱动单元尺寸小,因此达到足够大的驱动力需要很高的电压。使用压电晶片作为驱动单元由于组装复杂和高压工作而

\* 本论文研究工作得到国家攀登计划 B 支持

战长青 男,1967 年出生,博士,从事微电子机械系统 MEMS 研究

1996 年 4 月 20 日收到初稿,1996 年 11 月 12 日收到修改稿

不受欢迎.

对于微小的结构,热致驱动变得很有吸引力.首先,电-热转换非常易于工艺实现.其次,由于受热结构热容量很小,因而实现驱动所需输入的能量较低.再次,发热元件的尺寸微小的支撑结构引起的热损失很小,保证了热致驱动结构具有较高的机械输出功率.利用低沸点流体受热相变产生蒸汽压力的热致驱动结构已在斯坦福大学制成.但是,这种方式的热效率不够高,而且在密封工作流体时存在装配上的困难,同时需制作比较复杂的密封腔结构.

荷兰 Twente 大学通过加热及冷却密封空腔内的空气实现了电热气动<sup>[5]</sup>,解决了密封工作流体的困难,但至少需要两层微结构芯片构成空腔结构,仍未实现驱动结构单片化、集成化的目标.

将热膨胀系数不同的两层材料(不一定是金属)的界面结合在一起而构成的层状结构受热时具有所谓的双金属效应<sup>[6,7]</sup>,即结构受热时,由于热膨胀系数的差异而使结构弯曲,提供动力和位移.

由于双金属结构采用电-热-力的转换途径,力的大小随输入热能增大而增大,而热能大小取决于输入电能大小,通过调整加热电阻的阻值,可以有效降低驱动信号电压,满足 MEMS 系统单一供电电源的要求.由于是层状薄膜结构,在结构上适于 IC 平面加工工艺.同时,从 IC 工艺采用的多种材料中选取两种热膨胀系数差异较大的材料也是非常容易的,因而可以避免引入 IC 工艺以外的材料.上述特色决定了双金属膜片结构简单、易集成、体积小、成本低、与 IC 工艺完全兼容.根据文献[7],双金属结构的响应时间在 1ms 到 1s 之间,足以满足通常微机械装置的要求.进一步的实验和分析表明,这种单片集成驱动膜片还具有驱动效率高、输出功率大等特点,特别适于作为微泵、微阀之类需要大动力、大位移的微执行器的驱动单元,并在材料、工艺方面为 MEMS 的实现提供了基础.

## 2 结构和工作原理

图 1 是我们研制的铝硅双金属驱动膜片的剖面结构示意图.通过各向异性腐蚀得到的单晶硅膜和蒸发(或溅射)的金属铝膜构成铝硅双金属膜片.单晶硅膜及金属铝膜之间夹有多晶硅加热电阻条,多晶硅加热电阻条与单晶硅膜及金属铝膜间用氧化硅膜隔离.

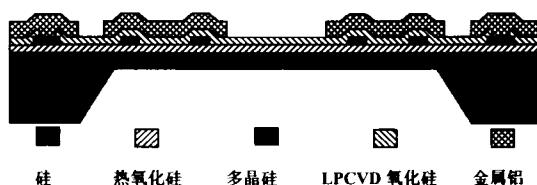


图 1 铝硅双金属膜片剖面结构

当通以电流时,多晶硅电阻发热,热容量很小的驱动单元的温度将迅速升高,由于热膨胀系数的差异,整个结构将发生显著的纵向位移,同时输出一定大小的力.如果通以时变的驱动信号,则上述电热效应将使驱动单元有节律地上下运动,实现机械振动.

## 3 双金属结构的力学特性分析

根据 Timoshenko 双金属结构的经典分析模型<sup>[9]</sup>,温度升高  $\Delta T$  度时,均匀受热的半径为  $R$  的双金属膜片的中心最大挠度为:

$$\omega_{\max} = K_y \frac{3(\alpha_b - \alpha_a)\Delta T}{t_a K_D} R^2 \quad (1)$$

其中  $\alpha_a$  和  $\alpha_b$  分别为两种材料的热膨胀系数,  $\alpha_b > \alpha_a$ ;  $t_a$  和  $t_b$  为两种材料厚度;  $K_y$  是与边界条件有关的常数;  $K_D$  取决于两种材料的相对刚度:

$$K_D = \left( \frac{t_a}{t_b} + \frac{t_a^2}{t_b^2} \right) \left( 4 + 6 \frac{t_a}{t_b} + 4 \frac{t_a^2}{t_b^2} + \frac{E_a}{E_b} \times \frac{t_a^3}{t_b^3} \times \frac{1 - \nu_b}{1 - \nu_a} + \frac{E_b}{E_a} \times \frac{t_b}{t_a} \times \frac{1 - \nu_a}{1 - \nu_b} \right) \quad (2)$$

其中  $E_a$  和  $E_b$  分别为两种材料的弹性模量;  $\nu_a$  和  $\nu_b$  为二者的泊松比.

式(1)建立了均匀受热的圆形双金属膜片中心最大挠度与组成双金属膜片的两种材料的热膨胀系数、温度变化量、弹性模量、泊松比等物理参数及两层膜片厚度、膜片半径等膜片结构参数的关系, 膜片中心最大挠度与构成双金属膜片的两种材料的热膨胀系数之差、膜片温度变化量成正比, 表明在同样的条件下, 构成双金属膜片的两种材料热膨胀系数相差越多, 双金属膜片的变形越显著. 提高膜片的温度, 增加温度变化量也是增大膜片纵向位移的一个措施, 考虑到功耗、响应速度、应用范围等因素, 不宜将提高温度作为增大纵向位移的主要手段. 由式(1)还可以看出, 双金属膜片的变形程度随膜片厚度的增加而减小, 表明为获得足够大的纵向位移, 需要双金属膜片的厚度足够薄.

与单晶硅的热膨胀系数相差较大并且所构成的双金属结构的热转换效率较高的金属依次是铅, 铝, 金, 镍等. 铝作为 IC 工艺中用得最多的布线金属, 与硅构成的双金属驱动结构又具有非常高的热转换效率, 使得这种驱动方式不仅加工工艺与 IC 工艺兼容, 而且所用材料也是 IC 首选材料. 因此工艺简单, 成本低廉.

构成双金属膜片的两种膜的厚度、相应物理参数也是影响膜片中心最大挠度的重要因素. 图 2 是根据式(2)得到铝硅双金属膜片相对厚度与相对刚度参量  $K_D$  的关系曲线, 当单晶硅膜与金属铝膜厚度比介于 1 和 2 之间时, 同样面积铝硅双金属膜片温度变化相同时所获纵向位移最大.

双金属结构是通过温度变化引起两种材料界面产生应力使之挠曲变形的, 应力是沿膜的方向的. 在许多情况下, 我们更关心, 或者说更习惯于知道膜片在其位移方向上能够输出的动力大小. 膜片最大输出动力在数值上与引起膜片发生同样大小挠度的正压力相等, 等效的正压力可以根据我们前面得到的中心挠度来估算<sup>[10,11]</sup>. 对于圆形膜片:

$$\frac{\Delta P R^4}{E h^4} = \frac{5.33}{1 - \nu^2} \times \frac{\omega_{\max}}{h} + \frac{2.83}{1 - \nu^2} \times \frac{\omega_{\max}^3}{h^3} \quad (3)$$

其中  $h$  和  $R$  为膜的厚度和半径;  $E$  为材料的弹性模量;  $\nu$  为材料的泊松比.

对于方膜膜片:

$$\frac{\Delta P a^4}{E h^4} = \frac{4.20}{1 - \nu^2} \times \frac{\omega_{\max}}{h} + \frac{1.58}{1 - \nu^2} \times \frac{\omega_{\max}^3}{h^3} \quad (4)$$

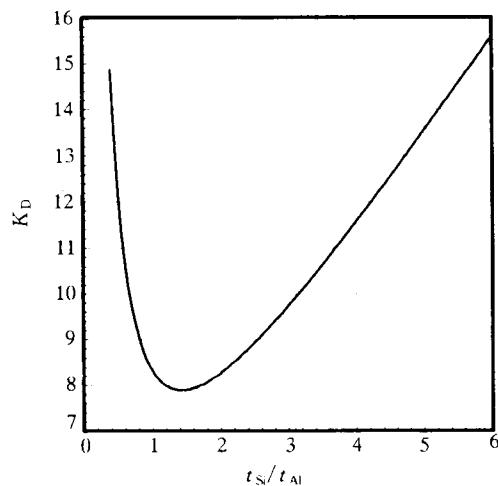


图 2 铝硅双金属膜片相对刚度参量  $K_D$  与单晶硅膜、金属铝膜厚度比的关系曲线

其中  $h$  为膜的厚度;  $a$  为方形膜片半边长;  $E$  为材料的弹性模量;  $\nu$  为材料的泊松比.

## 4 制造工艺

铝硅双金属驱动膜片的制造是在标准的 IC 工艺线上实现的. 这种工艺上的兼容性为硅微机械系统(MEMS)的实现提供了工艺基础. 将硅微机械制造工艺标准化、模块化,使之成为标准 IC 工艺的子过程,是目前微机械研究工作的重要目标之一. 我们初步考虑了这种工艺模块化的要求,就铝硅双金属膜片的制造,设计了如下工艺流程:

- 1) (100) 双面抛光硅片, 电阻率  $2\sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$ , 清洗备片;
- 2) 热氧化  $500\text{nm}$  后, LPCVD 淀积  $150\text{nm}$  氧化硅膜作为体硅腐蚀掩膜;
- 3) LPCVD 淀积  $500\text{nm}$  多晶硅膜, 多晶硅掺杂至  $10\Omega/\square$ ;
- 4) 光刻并干法刻蚀多晶硅形成回纹形加热电阻条;
- 5) LPCVD 淀积氧化硅膜以包覆多晶硅加热电阻, 刻氧化硅形成多晶硅电阻引线接触孔;
- 6) 正面蒸铝并反刻铝, 金属铝既作为多晶硅电阻引线, 同时又构成铝硅双金属膜片的上层膜(约  $10\mu\text{m}$ );
- 7) 背面光刻刻蚀形成硅杯腐蚀窗口, 正面保护蒸铝面, 用 KOH 腐蚀形成铝硅双金属膜片的下层膜(单晶硅薄膜, 约  $20\mu\text{m}$ ).

这一方案的特点是尽量使工艺向 IC 工艺靠拢, 把单晶硅腐蚀置于最后, 避免因单晶膜腐蚀带来的离子沾污及易碎片等问题.

考虑到方型膜片边角应力集中的缺点, 我们还利用削角补偿技术经各向异性腐蚀获得了直径 4.5 毫米的正八边形近似圆形单晶硅膜. 图 3 是我们研制的正八边形铝硅双金属膜片的正面光学照片和背面 SEM 照片.

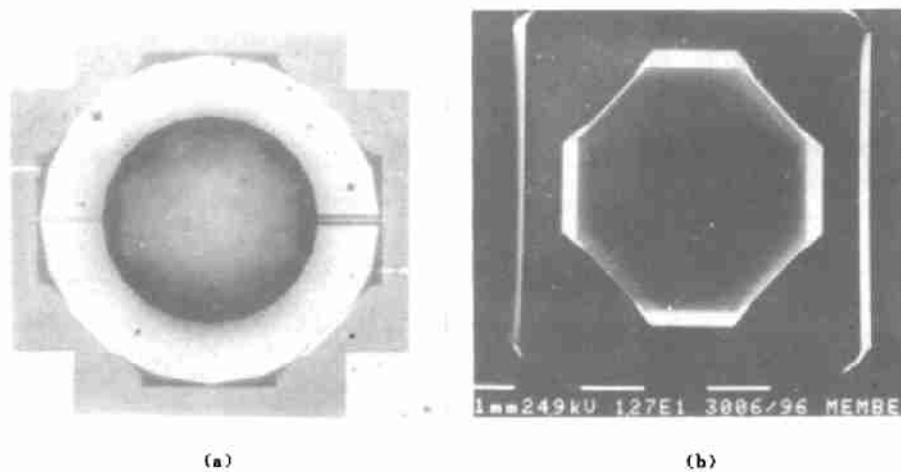


图 3 直径 4.5 毫米的正八边形铝硅双金属膜片正面光学照片(a)和背面 SEM 照片(b)

## 5 测试结果及讨论

双金属驱动膜片不仅制造工艺简单易行,而且其结构参数和工艺参数均可在很大范围进行调整。这样就为设计工作带来很大的便利,使得我们能够根据具体要求,采用不同的设计参数。我们设计了特征尺寸为 $4 \times 4$ 平方毫米的正方形双金属膜片。选取这一特征尺寸的目的,是为了同Zengerle等研制的同样尺寸的静电驱动结构<sup>[2]</sup>的性能作比较(因为静电驱动结构在工艺上也较为简单且与IC工艺兼容,但静电驱动结构需要两层微结构芯片构成)。同时,我们还设计了具有相同面积的、直径4.5毫米的正八边形近似圆形单晶硅膜,以克服正方型膜片边角应力集中的缺点。我们所设计的其它结构及工艺参数为:单晶硅膜厚20μm(同Zengerle),金属铝膜厚10μm,多晶加热电阻为26Ω。

图4是这种尺寸的铝硅双金属膜片在不同驱动电压下弯曲情况的测试结果。其中x为膜片上所测点距固支边界的距离。 $x = 2\text{mm}$ 处为膜片中心。测试设备为UNION TM7231测量显微镜,通过读取弯曲前后聚焦平面的位置参数,即可间接确定该点的弯曲量ω即挠度的大小。测量精度为±1μm。由图4我们可以看出,当驱动电压为8.0伏时,膜片中心最大挠度高达67μm。而对于静电驱动,其挠度受到电极间隙的限制,一般只有几个微米。根据膜片中心最大挠度由(4)式可估算不同驱动电压下方形双金属膜片所承受的等效正压力的大小。通过计算可以发现,当驱动电压为8.0伏时,双金属膜片提供的动力高达 $2.55 \times 10^5\text{Pa}$ 。而静电驱动方式在电压高达300伏时,提供的动力也不过 $2.0 \times 10^4\text{Pa}$ ,仅相当于双金属驱动膜片驱动电压为4.0伏的情况,而这时双金属膜片的位移已达13μm。实际上,膜片输出的动力和位移的大小,取决于输入功率大小。无论静电方式还是电磁方式,因为在微小尺寸下,驱动电流大小受到限制,驱动电压的大小也不可能无限提高,因此输入功率上不去,决定了输出的动力和位移较小。而双金属驱动方式,使用较低驱动电压时,可以通过降低加热电阻阻值来增大驱动电流,保证输入较大功率,从而输出较大的动力和位移。

图5示出双金属膜片中心最大挠度随输入功率变化的情况。二者呈线性关系。这是因为:根据(1)式,膜片中心最大挠度与温度变化量成正比,而温度变化量又与输入功率成正比,所以双金属膜片中心最大挠度随输入功率增加而线性增大。这种线性变化关系使双金属膜片位移大小的控制极为简便,特别适合需要精确控制位移的微动力机械。从图5还可以看出,双金属膜片中心挠度在未加偏压时存在初始变形,其原因在于蒸发(或溅射)金属铝时膜片温度高于室温,蒸发结束冷却至室温时,由于铝、硅热膨胀系数的差异,在二者界面处存在初始应力,该应力使膜片发生挠曲变形。

图6是根据我们所测量出的不同驱动电压下双金属膜片的中心最大挠度,利用分析模

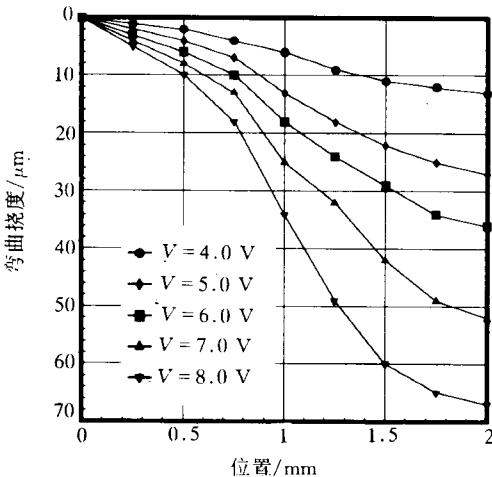


图4 不同驱动电压下双金属膜挠度曲线

型中表达式(1)反映的双金属膜片的中心最大挠度与膜片温度变化量的关系计算得到的不同驱动电压下双金属膜片的温度。结果表明, 双金属膜片的典型工作温度为 50~70℃, 比较容易达到。温度对双金属膜片可靠性的影响主要体现在高于 150℃时金属铝引线发生显著的电迁移, 最终导致加热电阻引线断路。更高的温度将使膜片发生很大的纵向位移, 同时产生很大的膜内应力。当膜内应力接近硅材料的抗张屈强度时, 膜片寿命就会大大降低。根据计算, 考虑膜片抗张屈强度的温升上限为 230℃。因此综合考虑温升对双金属膜片的影响, 其温升上限应为 150℃。在 50~60℃温度范围, 双金属膜片反复工作上百小时后看不到任何疲劳迹象。

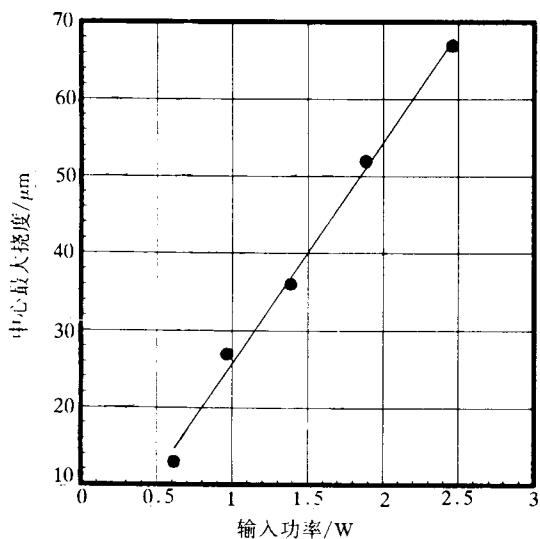


图 5 中心挠度与输入功率的关系

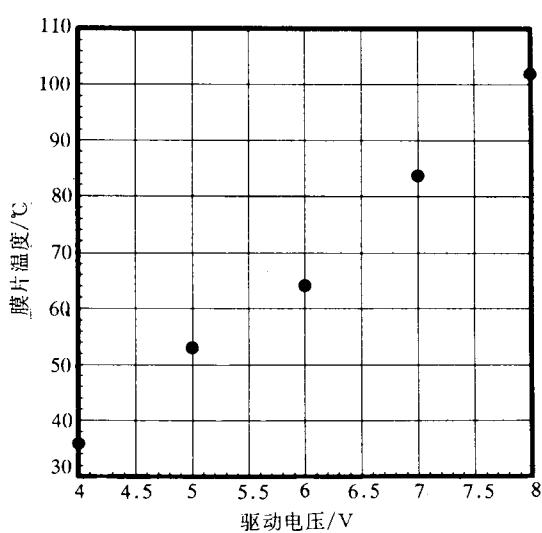


图 6 不同驱动电压下铝硅双金属膜片温度的理论计算值

## 6 结论

铝硅双金属膜片具有优越的力学特性, 能提供足够大的动力和位移。这种结构不仅在材料及工艺上与 IC 工艺完全兼容, 而且通过调整有关结构参数及工艺参数, 可使该结构在 5 伏电压下稳定工作, 为实现硅微机械系统(MEMS)奠定了基础。这种集成的单片驱动结构是目前制造微阀门, 微流体泵等需要大动力, 大位移的硅微机械及其系统的理想驱动结构。我们已经利用这种结构成功地研制了硅微流量泵(另文发表), 由于使用了双金属驱动膜片, 微流量泵的设计和制造工艺均非常简单, 成品率高, 性能可靠。

**致谢** 本研究工作得到清华大学微电子所器件物理研究室和香港科技大学 MFC 诸位同事的大力支持与合作, 作者在此深表谢意。

## 参 考 文 献

- [1] Yanagisawa K, Kuwano H and Tago A, "An electromagnetically driven microvalve", Technical Digest of Transducer, 1993, **93**: 102~105.
- [2] Zengerle R, Richter A and Sandmaier H, "A micro membrane pump with electrostatic actuation", Proc. MEMS 92 (Travemunde, Germany, 1992), 19~24.
- [3] Van Lintel, F. C. M. Van De Pol and S. Bouwstra, Sensors And Actuators, 1988, **15**: 153~167.
- [4] Smits, Sensors and Actuators, 1990, **A21~A23**: 203~206.
- [5] Van De Pol, H. T. G. Van Lintel *et al.*, Sensors and Actuators, 1990, **A21~A23**: 198~202.
- [6] Werner Riethmuller and Wolfgang Benecke, IEEE Trans. Electron Devices, 1988, **35**(6): 758~762.
- [7] H. Jerman, "Electrically-activated Micromachined diaphragm valves", Proc. Micro System Technologies 90 (Berlin, 1990), 806~811.
- [8] Parameswaran, Lj. Ristic, K. Chau *et al.*, "CMOS Electrothermal Microactuators", Proc. IEEE MEMS 90 (Napa, Valley, CA, 1990), 128~131.
- [9] S. Timoshenko, J. Opt. Soc. Amer., 1925, **11**: 233.
- [10] W. Bert and J. L. Martindale, Am. Inst. Aeronautics Astronautics, 1988, **26**: 235.
- [11] Hin-Leung Chau and K. D. Wise, IEEE Trans. Electron Devices, 1987, **34**: 851.

## Bimetal Membrane: An Integrated Driving Structure for Silicon Microelectromechanical Systems (MEMS) Fabrication

Zhan Changqing<sup>1</sup>, Lo Taichin<sup>2</sup>, Liu Litian<sup>1</sup> and Tsien Peihsin<sup>1</sup>

(1 Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

(2 Hong Kong University of Sciences and Technology Microfabrication Center)

Received 20 April 1996, revised manuscript received 12 November 1996

**Abstract** An integrated driving structure based on bimetal effect has been designed and fabricated by using advanced micromachining techniques. The processing and materials used are fully compatible to standard IC fabrication technology. The silicon aluminum bimetal membrane has an area of  $4 \times 4\text{mm}^2$  with  $20\mu\text{m}$  thick silicon and  $10\mu\text{m}$  thick aluminum film. By elaborate design and fabrication, the bimetal membrane can operate at 5V voltage level, providing sufficient strong driving force and distinct displacement. Silicon aluminum bimetal membrane is thought to be one of the best driving structure for fabricating silicon microactuators such as microvalve, micropump and corresponding systems.

**EEACC:** 7230, 8340