

微电子机械系统中的压电薄膜微马达*

崔天宏 王立鼎 吕琼莹 马建旭 梁静秋

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文提出了压电薄膜微马达的工作原理,介绍了该马达的优良性能、结构形式和加工工艺,最后指出了该马达研制的关键技术以及应用前景。

关键词: 压电薄膜微马达; 广义瑞利波; IC 工艺; 微型机械

1 引言

随着大规模集成电路制作设备、工艺与技术的发展,以毫米级尺寸为特征的微电子机械系统(简称微型机械)的研究已成为全世界瞩目的重大科技发展方向,并且受到越来越广泛的重视。微电子机械系统研究的目标是使仪器设备小型化、微型化,最后研制集成机械系统甚至于智能化微机器人。对此深入研究,它将比大规模集成电路有更加广泛的应用前景和深远意义。

微电子机械系统主要由微驱动器、微传感器、微执行器、微控制器以及微能源等要素技术组成。这些要素技术的实现必须有相应的基础理论和工艺手段的支持。以微马达为代表的微驱动器的研究一直是微电子机械系统研究的焦点课题。压电薄膜微马达是一种区别于其他类型微马达,具有崭新原理的微驱动器,它有诸多优良的性能,目前已经引起国际上一些重要研究机构的高度重视,并已开展初步的研究工作。1990年,美国麻省理工学院人工智能实验室、林肯实验室和宾西法尼亚大学材料实验室的 A·M·Flynn 等人首次研制成功压电薄膜微马达。我国在这一领域的研究工作起步并不算晚,中国科学院长春光机所于1992年初得到国家自然科学基金重点项目的资助,现在正从事这一课题的理论、实验研究。

本文提出了压电薄膜微马达的工作原理,对 A·M·Flynn 等人在实验过程中遇到的单电极致动现象进行理论分析,介绍了该马达的优良性能、结构形式和加工工艺,最后指出了该马达研制的关键技术以及应用前景,为我国压电薄膜微马达的研究工作奠定基础并指明方向。

2 广义瑞利波致动机理

以广义瑞利波振动的物体表面上的质点都在做着方向一致的椭圆运动,从而在振动物体表面形成广义瑞利波旋转应力场。这样另一个压在振动弹性体表面的物体将在广义瑞利波旋

* 国家自然科学基金重点资助项目

收稿日期:1995年6月26日

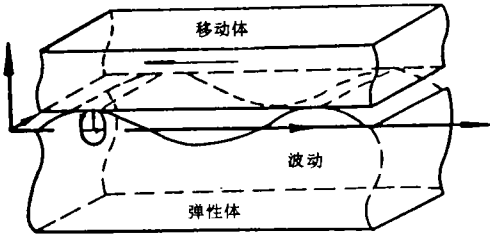


图1 广义瑞利波致动机理

转应力场作用下,靠质点摩擦力的作用向着与广义瑞利波前进相反的方向运动。这就是压电薄膜微马达的基本工作原理,如图1所示。

产生广义瑞利波旋转应力场的方式多种多样,但产生机理都是一样的,那就是设法构成两个在时间和空间上都正交的交变应力场,使它们互相叠加,则在弹性体表面上就会产生与这两个交变应力场角频率相同的广义瑞利波旋转应力场。所谓时间正交,

是指交变应力场的相位差为 $\pi/2$;空间正交包括两种:对于横波指波振方向的正交;对于纵波指传播方向的正交。构成压电薄膜微马达广义瑞利波旋转应力场有两种方法;一种方法是对压电薄膜进行电极分割,然后移相加电,这是通常压电薄膜微马达的工作原理;另一种方法是通过对同一波源的分解与再合成的方式获得,这便是单电极致动现象的基本原理。如图2所示。

3 压电薄膜微马达的优良性能

基于广义瑞利波致动机理制作的压电薄膜微马达,能充分利用在微观尺寸范围内起主要作用而又往往是负作用的表面摩擦力,这使得理论上具有诸多优于其他微马达的特点:

(1)高换能/储能密度

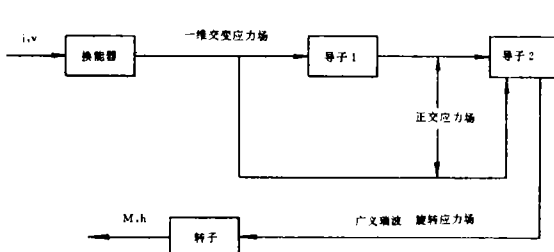


图2 压电薄膜微马达单电极致动现象机理

压电薄膜微马达电场的能量可表达成 $\frac{1}{2} \epsilon E^2$,其中 ϵ 为相对介电常数, E 为电场强度。我们知道 $\epsilon_{PZT} = 1300\epsilon_0$ (PZT 为压电薄膜, ϵ_{PZT} 、 ϵ_0 分别为压电薄膜、静电微马达的相对介电常数);PZT 可以很容易做到厚度为 $0.3 \sim 0.4 \mu\text{m}$,而静电微马达的电容间隙做到 $1 \mu\text{m}$ 是很困难的,这样在相同的激励电压下,PZT 的电场强度

可达静电微马达的2.5倍以上。由此推论,压电微马达的换能、储能密度可达静电微马达的8000倍。又由“尺寸效应”原理可知,压电薄膜微马达的换能、储能密度在一定尺寸范围内也必将高于电磁微马达。

(2)低驱动电压

由于 PZT 薄膜技术的出现,不需要很高的驱动电压即可使 PZT 达到饱和输出,而现有静电微马达则一般需要几十伏甚至上百伏的驱动电压。

(3)无需悬浮措施

静电微马达为克服内摩擦力,采取了许多技术措施,其中包括悬浮,即通过空气、静电或磁场等使转子悬浮起来。这增加了静电微马达的制作和操作难度,也限制了微马达的使用。压电薄膜微马达转子和定子间是利用接触摩擦传动的,因而无需悬浮措施。

(4)可直接轴向耦合

以往静电微马达的机械输出问题很难考虑,事实上,已有的静电微马达很难在轴上做直接的机械耦合。压电薄膜微马达在这一点上具有独特的优点。

(5) 转子材料不限

从广义瑞利波致动机理来看,转子无需任何电联接,如果定子电极绝缘良好的话,转子可采用任何材质(包括导体和绝缘体)的固体材料。甚至可不用转子而直接由定子驱动回转件。

(6) 低速、大力矩

因为压电薄膜微马达具有高换能、储能密度,且其转速较低,这使其有可能在不需减速装置的情况下输出较大的力矩。这一点明显优于静电微马达和电磁微马达。

(7) 结构简单、易微型化

压电薄膜微马达是把压电薄膜的振动量,通过接触摩擦转换成转动量,所以其结构简单,易于微型化。

以上优良特性给压电薄膜微马达的发展必将带来美好的应用前景。

4 压电薄膜微马达的结构及其加工工艺

这里将介绍两种已报道的压电薄膜微马达:一种是1990年美国麻省理工学院 A·M·Flynn 等人制作的首台压电薄膜微马达;另一种是1993年瑞士 Neuchâtel 大学 G·A·Racine 等人制作的混和型压电薄膜微马达。

(1) 首台压电薄膜微马达

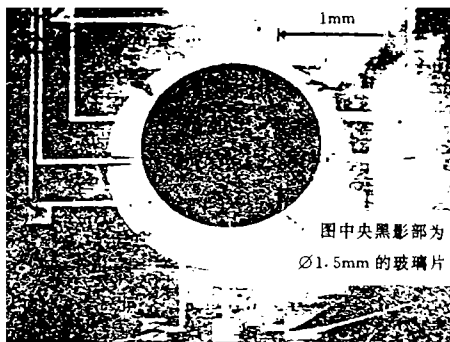


图3 首台压电薄膜微马达

图3是 A·M·Flynn 等人制作的首台压电薄膜微马达的扫描电镜照片。该微马达的定子是用 IC 工艺制作而成,具体结构及其制作工艺如下:首先在2英寸的 Si<100>上沉积 $1\mu\text{m}$ 厚的氮化硅薄膜,然后在其上沉积20nm厚的 Ti 层,接着沉积460nm的 Pt 层做底电极。在底电极上用溶胶—凝胶法沉积6—8层的 PZT 薄膜,每层50nm,之后进行 500°C 退火。在 PZT 薄膜上沉积 $0.5\mu\text{m}$ 的 Au 层做顶电极,并对顶电极进行八或十二极划分。另外在基底 Si<100>的底面需开设相应窗口。最后,可以在这个硅片上做出120个压电微马达的定子。

压电薄膜微马达定子结构是基于这样的设计思想:氮化硅薄膜兼作定子膜和三甲胺(TMAH)硅异向性刻蚀的掩膜,并且与开设窗口共同起降低刚度增大变形量的作用。Ti 层作为粘附层,并与底电极 Pt 层以及氮化硅层共同防止 PZT 与 Si<100>发生反应,起阻挡层的作用。PZT 薄膜是换能元件,其特性明显优于块体 PZT 材料。Au 层是顶电极,导电性能良好并具有耐磨作用。

该微马达的转子没有特殊制作,只有将一个直径 $\varphi 1.5\text{mm}$ 的凸透镜置于定子之上,在8个电极上加峰峰值4V、90kHz的交流电。观察到转子转速范围为 $100\sim 300\text{rpm}$,归一化启动力矩为 41pNm 。

(2) 混合型压电薄膜微马达

图4是 G·A·Racine 等人制作的混和型压电薄膜微马达的结构图。该微马达是运用 IC 工艺和传统精密机械加工工艺相结合的方法制作而成。最底层是一块印刷电路板(PCB),它做为

操作和测试微马达的基底。定子硅薄膜用环氧树脂粘在 PCB 之上,然后用对中圆盘的宝石轴承将转子对中心。最后,在转子轴的另一端安装一个手表分针以便于旋转测试。

其中,该微马达定子薄膜是用 IC 工艺经以下五道工序完成:(a)在 Si<100>基底上沉积一薄层低刚度氮化硅;(b)用 100nm 厚化学气象沉积 SiO₂定型及覆盖 Al 底电极;(c)用湿蚀刻法做 ZnO 层,然后再沉积一层 100nm 的 SiO₂做钝化层;(d)沉积 Al 顶电极;(e)最后,在硅基底的另一面开设窗口及定位槽。

该微马达的外形尺寸为 6×6×2mm³,最高转速为 600rpm,力矩为 50nNm。这种微马达采用驻波驱动原理,具有效率高、造价低廉、转速和力矩易于控制等优点。

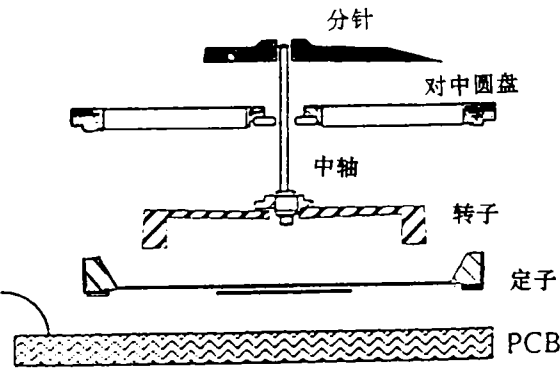


图4 混合型压电薄膜微马达的结构装配图

5 关键技术及应用前景

由于我国 IC 工艺基础比较薄弱,所以压电薄膜微马达的研制工作相对比较困难,但通过国内压电马达的研究单位与 IC 工艺的研究单位密切合作,我国压电薄膜微马达的研究工作有可能取得突破性的进展。对于我国的研究工作者,压电薄膜微马达可能有如下关键技术有待突破:

(1) 压电薄膜的制备

压电薄膜 PZT 是压电薄膜微马达的换能元件,其制作质量及性能直接关系到该微马达能否研制成功。所以 PZT 原材料和溶胶——凝胶法工艺,即压电薄膜 PZT 的制备将是该微马达的关键。

(2) 硅基底的窗口开设

硅基底窗口的开设质量及其与定子的对准精度直接影响定子的固有频率和定子表面广义瑞利波的合成,这关系到微马达成功与否及其动力输出性能的好坏。

(3) 一体化驱动电源的设计

未来的目标是使压电薄膜微马达的本体结构与驱动电源一体化,实现马达整体结构的微型化。压电薄膜微马达的驱动电源是一种大功率高频振荡电路,所以其性能稳定性及微型化程度将是压电薄膜微马达实用化研究的关键问题。

虽然压电薄膜微马达的研究刚刚起步,尚存在许多理论和技术难点,但其优良的性能特点必将使其具有广阔的实用化前景。首先,压电薄膜微马达有可能应用于成像、测试设备。例如照相机的微型化是其主要的发展方向之一。现在每台照机内需三、四台微电磁马达及其减速机构,这使微型化受到限制。将来若应用低速、大力矩的压电薄膜微马达,不需要减速机构则照相机的微型化将会向前跨出一大步。其次,压电薄膜微马达有可能取代电磁微马达而应用于微磁盘驱动,甚至可以用压电薄膜微马达的定子直接驱动微磁盘,这可能使微型计算机驱动器进一步微型化。另外,压电薄膜微马达很有可能应用于集成机械系统甚至于智能化微型机器人。因

为该微马达是应用 IC 工艺制作而成,所以它更适合于大批量廉价生产。由此可见压电薄膜微马达具有美好的应用前景。

6 结 论

1988年,第一台静电微马达的问世轰动了世界,从此开始了微电子机械系统这一学科的广泛而深入的研究,但静电微马达的微摩擦问题一直阻碍着其发展。压电薄膜微马达是更新原理更新形式的微马达。理论上讲,一方面由于微电子机械系统的“尺寸效应”,它在一定微尺寸范围内必然优于传统的电磁微马达;另一方面由于它是利用接触摩擦传动的,所以它又必然优于静电微马达。目前,压电薄膜微马达的研究在国际上也刚刚起步,有许多理论和实验问题有待于深入探讨。但可以相信,压电薄膜微马达的进一步实用化研究,必将极大地推动微驱动器以致于微电子机械系统学科的发展,为集成机械系统以及智能微机器人的研究奠定基础,具有极其重要和深远的意义。

参 考 文 献

- [1]崔天宏,王立鼎,吕琼莹,超声波微电机传动机理的研究.机械工程学报,1995,31(2)
- [2]Cui Tianhong, Wang Liding and Lu Qiongying, Theoretical Analysis and Design of Ultrasonic Micromotors, IEEE 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science, Japan, October 2-4,1994
- [3]A. M. Flynn, et al., Piezoelectric Micromotors for Microrobots. Journal of Microelectromechanical Systems, 1992, 1(1),44-50
- [4]K. R. Udayakumar, et al., Ferroelectric Thin Film Ultrasonic Micromotors. IEEE MEMS 1991:109-111
- [5]G. A. Racine, et al., Hybrid Ultrasonic Micromachined Motors. IEEE MEMS, 1993:128-132
- [6]R. M. Moroney, et al., Ultrasonic Micromotors: Physics and Application. IEEE MEMS, 1991:109-113
- [7]M. Kurosawa, et al., Simulation and Experimental Study on Elastic Fin Ultrasonic Motor. Ultrasonic Symposium, 1992:893-896
- [8]C. H. Ahn, et al., A Planar variable Reluctance Magnetic Micromotor with Fully Integrated Stator and Wrapped Coils. IEEE MEMS, 1993:1-6
- [9]H. Guckel, et al., A First Functional Current Excited Planar Rotational Magnetic Micromotor. IEEE MEMS, 1993:7-11
- [10]W. Tjhen, et al., Properties of Piezoelectric Thin Films for Micromechanical Devices and Systems. IEEE MEMS, 1991: 114-119
- [11]S. C. Jacobsen, et al., The Wobble Motor: An Electrostatic Planetary Armature Microactuator. IEEE MEMS 1989, 17-24
- [12]W. Trimmer, et al., An Operational Harmonic Electrostatic Motor. IEEE MEMS, 1989: 13-16

Piezoelectric Thin Film Micromotors in MEMS

Cui Tianhong, Wang Liding, Lu Qiongying, Ma Jianxu and Liang Jingqiu

*(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

Abstract

This paper presents the drive mechanism of the piezoelectric thin film micromotors (PTFM), then introduces the fine performance, structure and machining process of PTFM, finally points out the key technology and application prospect of PTFM.

Key words: Piezoelectric thin film micromotor (PTFM), Extended Rayleigh wave, IC process, MEMS.