

# 微平面机构的结构设计与制造

李伟 陆景唐 季超仁 宋汉斌 董鸣 蔡建中

(上海科学技术大学精密机械系,上海 201800)

**摘要** 本文通过微平面机构的设计制造和测试研究,提出了一整套行之有效的工艺方法,所制造的微机构运动自如,文章还进一步探讨了有关运动、动力、摩擦等方面的问题。

**关键词:**微机构;微型;IC工艺

## 1 概 述

微机械的研究以其巨大的开发潜力和发展前景正在全世界范围内迅速崛起并引起愈来愈多人的重视,我国为了跟踪这一国际前沿课题,已有各级政府部门和许多科研机构投入了人力和物力。

我国在微机械的研究中还未设立一个专门的学术机构,交流机会比较少。我们期望经过大量科技人员的努力,能够得到更多主管部门的支持和政府部门的资助,将这一课题的研究向更深层次开展。

现在我国进行微机械研究的单位把主要精力都放在微动力源的制造上,以期取得惊人的成绩。实际上,除了动力源以外,还有很多工作都可以研究,例如微机构、微器件、微传感器等,这些部件的研究制造在很大程度上都可以迅速进入实用阶段,并以其巨大的优越性—机电一体化而在现有的大规模集成电路中占据一席之地。去年日本学者林辉教授来华讲学时就提到,现在日本微机械研究主要集中在小型机械上,就是1mm~10mm大小的机械上,并没有一步到位去研究微米级的微机械,但是日本在微机械的理论研究中,如微表面现象、微摩擦学、力与尺寸的关系等均处于世界领先地位。我国在微机械的研究中应该建立一个统筹部门,规划我国的微机械发展重点、布局和步骤,这样可以集中人力物力,一步一个脚印,推动我国的微机械研究工作。

## 2 平面机构

在我国的微机械研究中,由于设备的限制,参与研究的大部分都是微电子学的专家,而从事机械学研究的人却不多,因此微机械研究中主要从事微机构研究的人更少,我们考虑到微

机构是微机械中的主要执行元件,是微机械研究的基础,微机构的研究必将带动整个微机械研究的发展,因此,我们选择了机构作为我们微机械研究的突破口。

国外微机构的研究中,齿轮机构研究较多,我国也有这方面的报道,我们考虑到机器人操作机构中大量采用的还是连杆机构,而微连杆机构的制造比微齿轮机构的制造要复杂得多,因此我们对照国外研究结果,进行了微四杆机构的研究制造,样品模型如图 1。

我们在一块光刻板上同时制造了三自由度微平面机构、单连杆机构、对称连杆机构(实际上相当于只有 2 个齿的齿轮)等多种形式的机构,从而得到了有关结构变化、尺寸变化的许多对比数据。我们制造的微机构样品其连杆的总长度从  $100\mu\text{m}$  到  $300\mu\text{m}$ ,其宽度从  $25\mu\text{m}$  到  $60\mu\text{m}$  不等,外连杆厚度约  $2.9\mu\text{m}$ ,内连杆厚度约  $2.4\mu\text{m}$ ,内连杆与外连杆的交接处有一个直角弯成的应力集中点,我们用电子扫描镜拍摄了部分照片,如图 2。

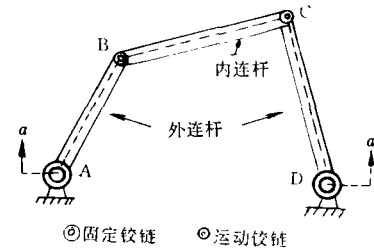


图 1 微四杆机构模型图

### 3 制造工艺

对微机构来讲,我们很难采用传统的机械切削方法进行加工制造,目前只能采用二种其它方法,其一是集成电路的加工方法(IC 工艺),即运用集成电路加工设备,通过氧化、低压化学气相沉积、蒸发、溅射、光刻以腐蚀等工艺过程,制造出微机械零件或部件;其二是采用 LIGA 技术,即通过辐射光刻、电铸和模铸工艺,制造出三维任意几何形状。

表 1 微机构主要加工工艺步骤

序号	工艺名称	用途	主要参数	
1	氧化	牺牲层	$\text{SiO}_2$ 厚度 $1.95\mu\text{m}$	
2	生长多晶硅		多晶硅厚 $3.6\mu\text{m}$	
3	磷扩散	增加多晶硅强度	$960\text{C}$	
4	第一次光刻、刻蚀	生成外连杆	用光刻胶	
5	第二次光刻	刻出轴孔		
6	腐蚀 $\text{SiO}_2$	生成下法兰模	约 $1\mu\text{m}$	
7	氧化	生成间隙	间隙 $0.6\mu\text{m}$	
8	第三次光刻	生成固定铰链孔		
9	生长多晶硅		多晶硅厚 $2.4\mu\text{m}$	
10	磷扩散	增加强度	$960\text{C}$	
11	第四次光刻	刻出内连杆		
12	退火	去内应力	$1000\text{C}$	
13	去牺牲层	最终能相对运动	$\text{HF}, 60'$	

国外研究单位在微机构的制造中,为了获取更大的零件厚度,往往采用 LIGA 工艺,但 LIGA

工艺对设备的要求较高,需要投入,没有现成可利用的条件,在我国现阶段难以推广,因此国内各研究单位普遍采用的 IC 工艺,我们在微机构的制造中就是采用了这种工艺,通过探索实践,研究出了一整套完善的微机械加工工艺,图 3 为图 1 中  $aa'$  横断面在微机械制造过程中的示意图,工艺过程见表 1。

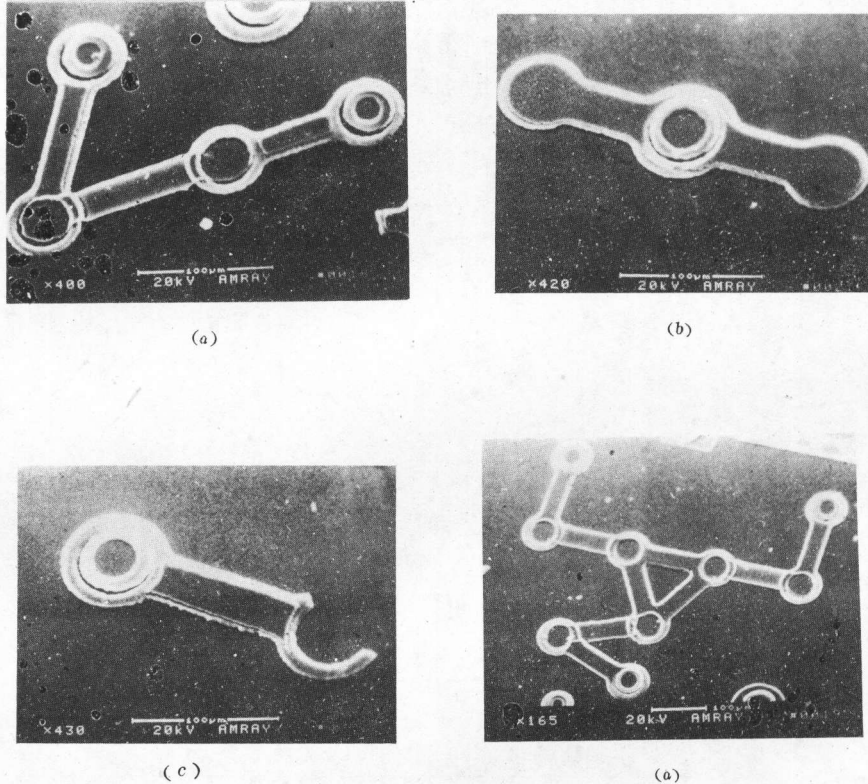


图 2 部分微机构的电镜扫描照片

(a)微四杆机构(b)对称单连杆(c)钩状单悬臂连杆(d)三自由度平台机构

经过以上工艺过程,四连杆机构的外连杆约厚  $2.9\mu\text{m}$ ,内连杆约厚  $2.4\mu\text{m}$ ,各铰链的活动间隙约  $0.6\mu\text{m}$ 。在制造过程中,连杆的长度、宽度对整个加工工艺影响不大,但宽度越小牺牲层越容易被腐蚀,且机构越易起动,但强度会减弱,经测试连杆的长度为  $100\mu\text{m}$  时,其宽度约为其  $\frac{1}{4}$  为宜,即  $25\mu\text{m}$ 。为了增加连杆的强度,每次多晶硅沉积后都应进行磷扩散处理,时间大约 90 分钟。微机构制造过程包括四次光刻,其光刻过程分为清洗、涂胶、曝光、显影、离子刻蚀和去胶等工艺,二次多晶硅沉积均采用 LPCVD 设备,去牺牲层后一般再清洗一次,但这次应特别小心,因为通常 IC 工艺清洗硅片时,水对硅片的冲击力会破坏已生成好的微机械。

由于活动间隙的存在,因此整个机构会倾斜,所以,机构的重量由二个固定铰链和二个活动铰链承担,在整个工艺过程中,比较复杂的是大厚度的多晶硅沉积以及大厚度多晶硅的刻

蚀,我们制定了特别的工艺过程,方才做出完整的、运动自如的微机构。

## 4 简单分析

在实际制造过程中,由于第二层多晶硅的沉积基础不是一个平面,因此用第二层多晶硅形成的内连杆就是一个立体弯曲的杆件,且基本上与外连杆相邻处成直角弯曲,因此,虽然常规下回转副都能  $360^\circ$  相对运动,但这时的回转副受到连杆的限制无法正常地  $360^\circ$  回转,以四杆机构为例(如图 1 所示),由于加工板面的限制,并考虑到回转副的运动范围,我们故意设计了一个双摇杆机构,通过试验我们得出了此四杆机构的运动范围,如图 4 所示。

按实际尺寸,经计算,二杆在铰链处连杆部分不能重叠,因此运动轨迹的范围减少 66.8%,当我们用样品试验时发现,由于制造过程中连杆的边上,特别是铰链弯曲部分直线度不是非常理想,弯曲程度也难以控制,因此实际的活动区域只有理论活动区域的 90% 左右。

为了改变以上情况,我们正在试制一种外连杆高于内连杆的结构形式,这种形式不仅避免了以上缺点,能够在铰链处  $360^\circ$  回转,而且连杆的机械强度大幅度提高,起动也异常灵敏,但其加工工艺比以上的形式要复杂一些。

## 5 运动特性

由于微机械不是用传统机加工工艺制造出来的,并且由于它的细小和微量,很多传统理论都难以应用或应该修正,很多现象也是传统观点无法解释的,我们在试验中初步发现微机构有以下一些特性。

### 5.1 起动特性

微机构的最后一道工序是腐蚀牺牲层,所谓牺牲层实际上是一层很薄的二氧化硅(约  $0.3 \sim 2$ )  $\mu\text{m}$ ,经过腐蚀烘干后,机构的连杆与硅片基体处于静止连接状态,因此,要想使微机构起动就不那么简单,需要较大的力,如果微机构一旦运动起来,则只需很小的力就能使机构运动,这两

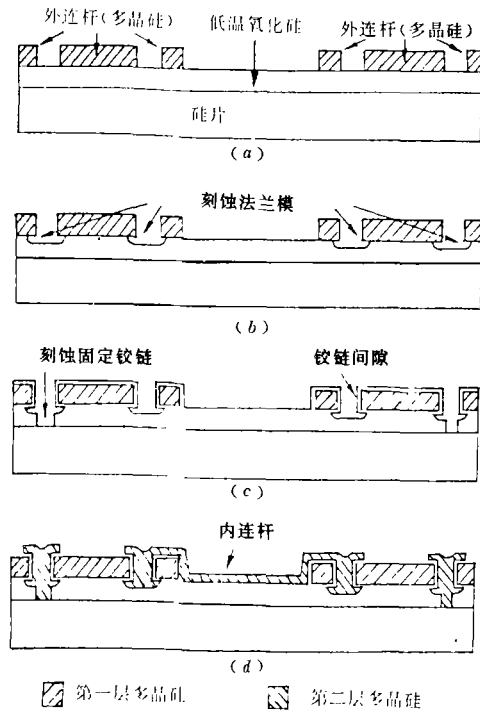


图 3 微机构制造过程(a)第一次多晶硅沉积(b)刻蚀法兰模(c)生长  $\text{SiO}_2$  形成铰链间隙,刻蚀轴连接孔(d)第二次多晶硅沉积,形成连杆机构

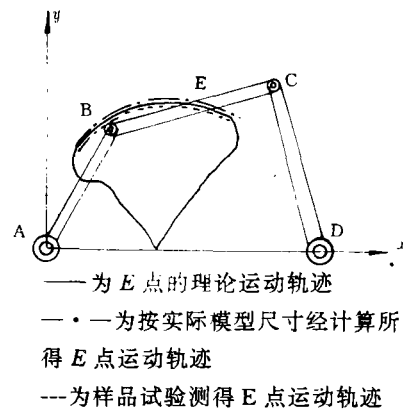


图 4 试验测得四杆机构的运动范围

种力具有比较大的差别,所以,今后在微机构产品的制造中必须事先考虑这个问题,否则机构要么运动不了,要么超载被破坏。

### 5.2 运动灵敏性

运动是否灵敏,主要取决于制造的精度和运动副间隙的合理选择,制造过程中,如果定位不准或刻蚀不好,机构中的铰链壁上产生毛刺、针孔等缺陷,那么运动起来就相当困难,有时连杆推断了也不会动起来,有的则只能小范围运动,另外我们发现,单个连杆做起来比多重连杆做起来要简单得多,我们做的对称连杆如图2中(b),实际上也可是只有2个齿的齿轮,其制造难度要比四连杆机构简单得多。

在制造过程中,运动副的间隙大小也相当关键,间隙取得太小,制造起来精度要求就高,稍一产生微小的针孔等缺陷就会使机械丧失运动功能;间隙取得太大,法兰盘就易脱出。因此铰链的间隙要适可而止,我们现在采用的是 $0.6\mu\text{m}$ ,实际上设备精度高的话还可以做得小一些。

### 5.3 强度特性

多晶硅在微米级范围内其物理性能可与不锈钢相比,但是如果机构设计不合理,仍然会产生应力集中并出现失效、破坏。例如,为制造方便,第二层多晶硅沉积时形成的外连杆存在直角转弯应力集中点,我们在试验中发现,这个点最易被破坏,也最薄弱,经常发生断裂,其断裂面基本上垂直于连杆的长度方向,而且在内连杆的远离铰链端。

由于外连杆比内连杆厚,因此,外连杆的强度较高,在试验中我们发现,固定铰链点的强度不高,这并不是因为铰链太细,试验表明,作为固定铰链用的多晶硅与硅片基体结合面结合得不太牢,其中原因还待进一步研究。

## 6 结 论

1. 经过多次试验,我们试制成功了能够相对运动的微机构样品,这些样品包括单连杆、对称连杆、四杆机构、三自由度平台机构等,并经测试,样品完全满足工程需要,只要配上相应的动力源即可。

2. 经试验发现微机构的起动摩擦相当大,运动摩擦相对较小,两者相差比较大。

3. 外连杆的强度明显大于内连杆,平面连杆的强度也明显大于弯曲的连杆强度。

4. 微机构的制造工艺还应不断改进,特别是大厚度多晶硅的刻蚀还要进一步探索。

### 参 考 文 献

- [1] Fariborz Behi, A Microfabricated Three-Degree-of-Freedom Parallel Mechanism. IEEE, 1990, CH2832-4, 159
- [2] 谢国章,《微机械的制造与应用》. 电子工业出版社,1990
- [3] 孙麟治、李伟,微机械的研究现状及动向. 上海科技大学学报,1993,16(1)

## Structure Design and Fabrication of the Micro-plane Mechanism

Li Wei, Lu Jingtang, Ji Chaoren,  
Song Hanbing, Dong Ming and Cai Jianzhong

*(Department of Precision Machinery,  
Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)*

### Abstract

By the design, fabrication and testing of many Micro-plane mechanisms, we have advanced a successful technological process and fabricated many micro-mechanisms which can move freely. We have further studied the problems about the kinematics, dynamics and friction of the mechanism.

**Key words:** Micro-mechanism, Micro-type, IC technology.