

一种硅基集成微晃动马达

孙曦庆 谢会开 刘理天 李志坚 钱佩信

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

摘要 本文介绍一种硅基集成微晃动马达, 该微马达的制作工艺非常简单, 主要包括四次光刻(共三块版)、两次 LPCVD 多晶硅膜淀积和两次 LTO SiO_2 膜淀积. 微马达转子和定子由厚度为 $4.2 \mu\text{m}$ 的多晶硅膜形成, 转子与定子之间的空气间隙为 $2.0-2.5 \mu\text{m}$, 转子的半径为 $40-50 \mu\text{m}$. 初步测量结果表明, 微晃动马达的最低驱动电压为 49V , 最高转速估计可达 600rpm .

EEACC: 8340, 4250

1 前言

在以前的工作中我们曾实现了一种闭环控制微马达^[1,2]. 该马达的制作工艺共计三十多步, 其中包括九次光刻、三次多晶硅膜淀积等; 因此, 制作周期长、难度大. 加之近十层薄膜材料累加厚度达 $10 \mu\text{m}$, 所以叠加膜的内应力一般较大, 而这又是造成微马达性能不稳定、成品率低的重要因素^[3].

针对上述不足, 我们通过参考 K. Deng 和 M. Mehregany 等人的加工方法并结合以前的工作基础^[3,4], 设计了一套快速制作微马达的简易流程. 整套工艺只需三块光刻版: 一块用于决定等平面上的转子和定子形状及其最小间隙, 这是本工艺的关键; 另两块则用于形成法兰盘轴承空腔和轴套. 在此基础上, 我们设计并制作了几种尺寸的微晃动马达, 测量结果表明它们具有较好的电气性能.

2 制作工艺

微晃动马达的简单制作流程如图 1 所示. 其主要加工步骤详述如下:

(1) 选择 N 型(100)、电阻率 $0.1-0.05 \Omega \cdot \text{cm}$ 的硅片作为微马达的基底. 先湿氧热生长 $1.0 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 , 然后低温淀积二氧化硅(LTO) $1.4 \mu\text{m}$, 于是构成了 $2.4 \mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 牺牲层. 在这里由热生长 SiO_2 和 LTO 一起构成牺牲层而不是单独由 LTO 构成牺牲层, 是为了提高牺牲层表面的均匀性, 有助于后步精细多晶硅膜的淀积.

(2) LPCVD 淀积 $4.2 \mu\text{m}$ 厚的多晶硅膜, 淀积温度为 605°C , 淀积速率为 $5 \text{nm}/\text{min}$. 接着在 965°C 下扩磷, 方块电阻控制在 $9 \Omega \cdot \text{cm}$ 左右. 扩磷后在 1040°C N_2 保护下退火 40min 以消除多晶硅膜的内应力. 然后漂去 PSG, 在高温下干氧化多晶硅膜形成 100

孙曦庆 男, 1964 年生, 讲师, 主要从事微电子学与微机械技术研究

谢会开 男, 1967 年生, 助研, 主要从事半导体传感器与微机械技术研究

1994 年 5 月 31 日收到

nm 的 SiO_2 层作为多晶硅刻蚀的部分掩膜。

(3) 涂正胶光刻多晶硅, 利用 RIE 垂直刻蚀出转子和定子形状. 由于用作转子和定子的多晶硅膜处于同一平面上, 所以刻蚀加工的特征尺寸(如定子-转子间隙)可以做得很小. RIE 刻蚀气氛是 $\text{SF}_6 + \text{N}_2$, 刻蚀形成的多晶硅转子和定子的台阶垂直度达 82° . 需要特别指出的是, 光刻多晶硅转子内环时一定要保证其边缘光滑, 否则形成的多晶硅转子内环表面将粗糙不堪, 这是导致转子与轴承“卡壳”的重要原因之一^[3].

(4) 负胶保护非轴孔区, 在氢氟酸腐蚀液 ($\text{HF}40\% : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$) 中形成法兰盘状空腔. 由于法兰盘空腔的横向腐蚀时间较长(本实验中为 15 min), 而负胶在此腐蚀液中的抗钻蚀时间大约在 6 min 左右, 因此需要对负胶进行多次坚膜处理方可完成法兰盘空腔的横向腐蚀过程. 此外, 法兰盘状空腔的横向腐蚀深度也是影响马达性能的重要参数. 太深则转子与法兰盘的摩擦力太大; 而太浅则法兰盘不能水平托起转子, 从而使器件失效. 在本实验中我们选择的法兰盘横向深度在 $3.0 - 3.2 \mu\text{m}$ 之间. 图 2 给出了马达转子和轴套剥离后的法兰盘的 SEM 照片.

(5) 淀积 800 nm LTO 作为第二层牺牲层. 由于是共膜淀积, 故在转子的垂直侧壁上也生长有 LTO, 厚度约为 550 nm; 而在法兰盘腔的转子底壁上的 LTO 约为 400 nm. 因此, 转子在纵向的最大位移量就是 $1.2 \mu\text{m}$, 而在横向的最大位移量则是 $1.1 \mu\text{m}$. 然后在 BHF 中刻蚀 LTO 形成轴-衬底接触孔.

(6) LPCVD 淀积第二层多晶硅膜, 厚约 $1.5 \mu\text{m}$. 接着浓磷扩散使多晶硅方块电阻小于 $10 \Omega \cdot \text{cm}$, 并在高温下退火处理以消除其内应力. 最后用 RIE 刻蚀多晶硅形成轴套.

(7) 将硅片投入 40%wt HF 中浸洗 8 min 即可释放多晶硅转子. 从光学显微镜中我们可观察到释放后的转子一般都偏离了原来的位置. 当然, 如果转子与轴承卡在一起就不可能发生偏转. 由于多晶硅定子的面积一般较大, 因此在 HF 中浸泡 8 min 尚不足以影响定子的机电性能. 图 3 示出了四种微晃动马达在转子释放后的 SEM 照片. 其中左边两种微马达的转子半径是 $40 \mu\text{m}$, 转子-定子间隙分别为 $2.0 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m}$; 右边两种微马达的转子半径都是 $50 \mu\text{m}$, 转子-定子间隙为 $2.0 \mu\text{m}$.

3 测量与结果

样品测量前的处理过程是必不可少的^[4]. 首先, 我们用 $\text{H}_2\text{SO}_4(98\%)$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2(1:1)$ 的混合液处理硅片. H_2SO_4 和 H_2O_2 剧烈反应除了能去掉硅表面的污垢外, 另一作用就是不断产生的气泡迫使转子发生振动, 从而达到清除掉夹在转子与轴承之间的微颗粒、

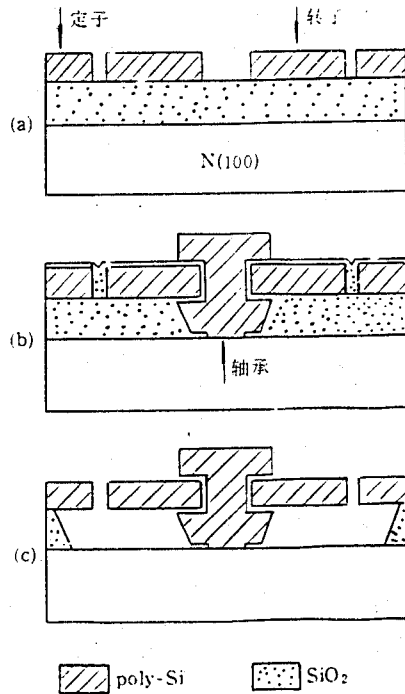


图 1 微晃动马达制作流程

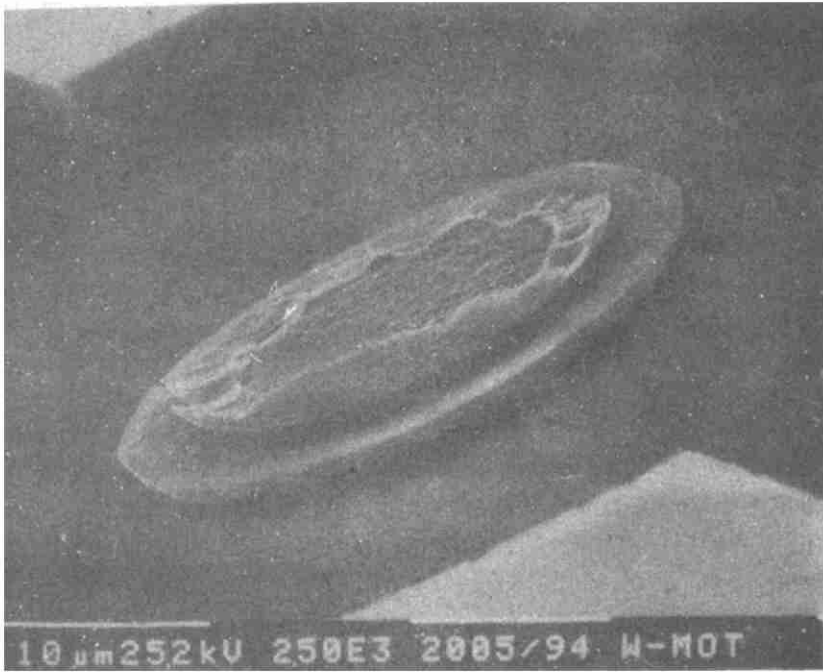


图 2 微马达转子和轴套剥离后的法兰盘

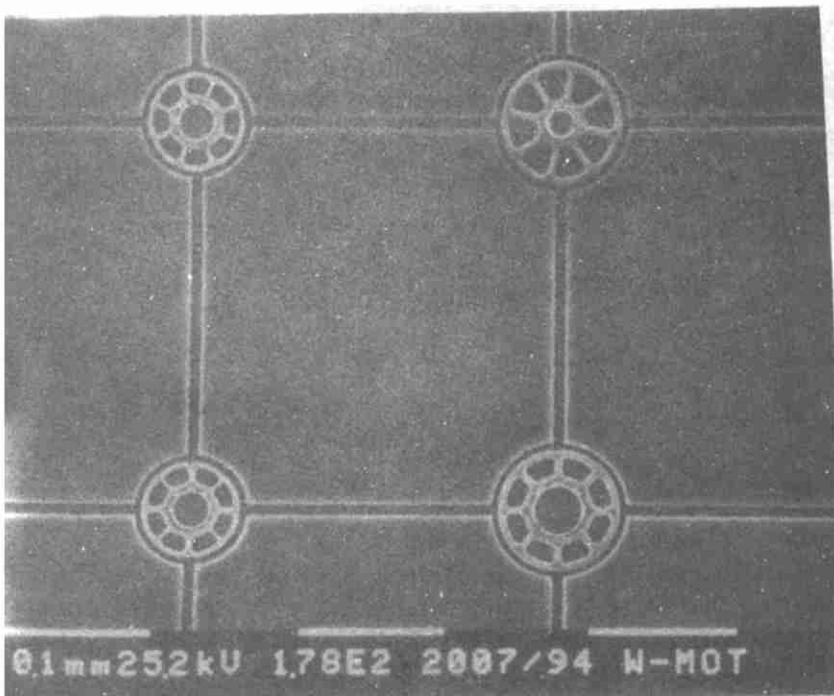


图 3 微晃动马达 SEM 照片

提高转子运动自由度之目的. 经 $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ 处理后的硅片再在 HF (40%wt) 中腐蚀 30 秒以去除多晶硅表面的自然氧化层, 然后在冷去离子水中浸泡片刻并立即取出用 N_2 吹干, 最后在干燥的空气中加电测量就能观察到微马达的连续旋转. 需要指出的是, 样品经上述预处理过程后应在尽可能短的时间内付诸测量, 否则多晶硅表面自然氧化层的生成将导致转子与轴承之间电接触不良^[3]. 在本实验中我们发现某些微马达经测量前处理后在半小时以内进行测量都具有较好的电气性能.

微晃动马达的定子电极有四个, 与此对应的激励信号源最多就只有四相. 在实验中供驱动马达使用的测试序列是 1000、0100、0010 和 0001, 其中 0 代表低电位而 1 代表高电位. 我们采用这一序列对转子半径为 $40\ \mu\text{m}$ 、转子-定子间隙为 $2.0\ \mu\text{m}$ 的微马达进行了测量. 当驱动电压超过 49 V 时某些微马达开始旋转. 当电压升至 176 V 时测得的最高转速估计可达 600 rpm. 在转动过程中, 微马达偶而出现停顿, 但只要稍加调整相频和相压即可恢复其运动. 对于某些失效的马达, 只要重复上述的测量前处理过程我们仍可望恢复其机、电性能. 而关于微马达的法兰盘深度、转子半径、转子内环半径、轴承-转子间隙、转子-定子间隙等参量与微马达电气性能的关系等内容我们将在更深的测量研究之后另文专门予以阐述.

致谢 感谢清华大学微电子所器件物理室各位同仁的大力支持以及中国科学院半导体所程美乔、周帆两位女士在样品加工方面所提供的诸多帮助.

参 考 文 献

- [1] 孙曦庆, 李志坚等, 半导体学报, 1993, 9(5): 331.
- [2] X. -Q. Sun, Z. -J. Li and L. Liu, Transducers'93, Yokohama, Japan, June 7-10, 1993, p. 760.
- [3] 孙曦庆, 若干硅微机械及其动力学基础研究, 清华大学博士论文, 1993. 6.
- [4] K. Deng, M. Mehregany and A. S. Dewa, Transducers'93, Yokohama, Japan, June 7-10, 1993, p756.

A Silicon-Based Integrated Wobble Micromotor

Sun Xiqing, Xie Huikai, Liu Litian, Li Zhijian and Tsien Peixin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Received 31 May 1994

Abstract We have successfully fabricated a silicon-based integrated wobble micromotor. The process for this motor is very simple, including four photolithography steps, two for polysilicon and two for silicon dioxide films by LPCVD. Both rotor and stator for this motor are formed from polysilicon films of $4.2\ \mu\text{m}$ thick. The rotor-stator air gaps are $2.0-2.5\ \mu\text{m}$, the diameters of the rotors are $40-50\ \mu\text{m}$. The initial test results show that the minimum driving voltage is 49 V and the maximum rotational speed is about 600 rpm.