

# 硅基 MEMS 技术\*

## TECHNOLOGY OF SILICON-BASED MEMS

郝一龙<sup>1</sup> 张立宪<sup>1,2</sup> 李婷<sup>1</sup> 张大成<sup>1</sup>

(1. 北京大学 微电子学研究所, 北京 100871)

(2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100080)

HAO Ylong<sup>1</sup> ZHANG Lixian<sup>1,2</sup> LI Ting<sup>1</sup> ZHANG Dacheng<sup>1</sup>

(1. *Institution of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

(2. *LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**摘要** 结合 MEMS 技术的发展历史, 概括了当今硅基 MEMS 加工技术的发展方向。指出表面牺牲层技术和体硅加工技术是硅基 MEMS 加工技术的两条发展主线; 表面牺牲层技术向多层、集成化方向发展; 体硅工艺主要表现为键合与深刻蚀技术的组合, 追求大质量块和低应力以及三维加工。SOI 技术是新一代的体硅工艺发展方向; 标准化加工是 MEMS 研究的重要手段。

**关键词** 微电子机械系统 牺牲层 体硅工艺 深刻蚀

**Abstract** Concerning the development history of MEMS technology, the present paper introduces a state-of-the-art developing direction of silicon-based MEMS machining, indicating that there are two main developing directions. One is sacrificial layers technology, and the other is bulk micromachining. Sacrificial layers technology is developing towards multiple layers and integration. Bulk-micromachining mainly includes combination of bonding and deep etching, pursuit to big mass and small stress, and three-dimensional fabrications technology which is the developing direction of new body-silicon technology. Standard process fabrication is becoming more and more important for MEMS study.

**Key words** Micro-electro-mechanical system; Sacrificial layers; Bulk-micromachining technology; Deep etching

Correspondent: HAO Yilong, E-mail: ylhao@ime.pku.edu.cn, Fax: +86-10-62751789

The project supported by a subproject of "973 Project" entitled MOEMS. Contract (No. G19990331109). And this project is also supported by innovation project of CAS.

Manuscript received 20010610, in revised form 20010828.

## 1 引言

微电子技术的巨大成功在许多领域引发了一场小型化革命, 以加工微米/纳米结构和系统为目的的微米/纳米技术 (Micro/Nano Technology) 在此背景下应运而生。一方面利用物理化学方法将原子和分子组装起来, 形成具有一定功能的微米/纳米结构。另一方面利用精细加工手段加工出微米/纳米级结构。前者导致了纳米生物学、纳米化学等边缘学科的产生, 后者则在小型机械制造领域开始了新的一场革命, 导致了微电子机械系统 (micro-electro-mechanical system, 缩写为 MEMS) 的产生。

制作 MEMS 的技术主要有三种。第一种是以美国为代表的利用化学腐蚀或集成电路工艺技术对硅材料进行加工, 形成硅基 MEMS 器件。第二种是以日本为代表的利用传统机械加工手段, 即利用大机器制造出小机器, 再利用小机器制造出微机器的方法。第三种

是以德国为代表的 LIGA (德文 Lithographie —— 光刻、Galvanoformung —— 电铸和 Abformung —— 塑铸三个词的缩写) 技术, 它是利用 X 射线光刻技术, 通过电铸成型和铸塑形成深层微结构的方法。其中硅基加工技术与传统 IC 工艺兼容, 可以实现微机械和微电子的系统集成, 而且该方法适合于批量生产, 已经成为目前 MEMS 的主流技术。

20 世纪 80 年代美国 U. C. Berkeley 发明了表面牺牲层工艺, 并采用该工艺制备了可动的微型静电马达 (图 1), 引起了国际社会的极大轰动, 人们发现集成电路技术的进一步发展可以制造可动部件。这一技术的发明使单片集成制作具有传感、信息处理、执行功能的新型芯片成为可能, MEMS 技术的研究开始出现突飞猛进的发展。进入 90 年代, 美国 Analog Devices 公司利用该技术实现了集成制作的微型加速度计的商品化, 成功的应用于汽车中的防撞气囊控制, 又一次产生极大反响, 人们也充分认识到 MEMS 技术的巨大商业

\* 20010610 收到初稿, 20010728 收到修改稿。国家重点基础研究发展规划(973)项目 ——“集成微光机电系统研究”子项目(G19990331109)和中科院创新性研究项目资助。

价值。许多著名的高技术公司也纷纷看好这一领域,投入大量经费开发 MEMS 技术, MEMS 技术特别是表面牺牲层技术的发展进一步加快。90 年代中期,随着 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 技术特别是 ICP(Inductance Coupling Plasma) 技术的出现,体硅加工技术的发展也迈上了一个新的台阶,多种基于深槽刻蚀技术之上的新工艺被开发出来。

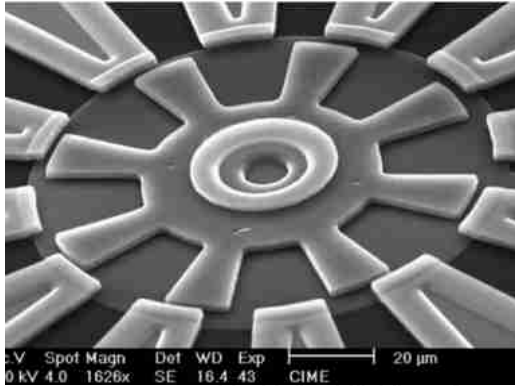


图 1 U. C. Berkeley 采用表面牺牲层工艺制备的世界上第一个 MEMS 器件——微型静电马达  
Fig. 1 The microelectrostatic motor that is the first MEMS machine in the world fabricated by U. C. Berkeley using surface sacrificial layers technology

## 2 硅基 MEMS 加工技术的发展

回顾硅基 MEMS 加工技术的发展过程,不难发现其主要依照表面牺牲层技术和体硅加工技术两条主线发展,具有如下特点:

- 1) 表面牺牲层技术向多层、集成化方向发展。
- 2) 体硅工艺主要表现为键合与深刻蚀技术的组合,追求大质量块和低应力以及三维加工。SOI 技术是新一代的体硅工艺发展方向。
- 3) 标准化加工是 MEMS 研究的重要手段。

### 2.1 表面牺牲层工艺

表面牺牲层工艺是典型的薄膜工艺,其技术特点与集成电路相近,通过与集成电路集成制作的可行性最大。正因为有如此鲜明的特点,表面牺牲层工艺从其诞生起发展方向就是集成化。典型的工艺包括美国 ADI 公司的 BiMEMS 工艺(图 2)和 Sandia 国家实验室的 MM/CMOS 集成 MEMS 工艺(图 3)。BiMEMS 工艺的特点是制作可动部件的表面微机械工艺与制作处理电路的 BiMOS 工艺的混合完成。该公司的微型加速度计就是采用这一工艺制作的。这一工艺的缺点是两种工艺在同一加工线完成,需要单独的

加工线,不能充分利用现有的 IC Foundry 线,成本较高,成品率受影响。为克服这一问题, Sandia 国家实验室的 MM/CMOS 集成 MEMS 技术首先在凹槽内制作可动部件,填充 SiO<sub>2</sub> 后平坦化,然后再用标准 CMOS 工艺制作处理电路。大大改进了 BiMEMS 工艺的不足。然而,先制作可动部件将影响衬底片质量,大部分专业 IC Foundry 由于惧怕玷污设备而拒绝接受。因而第三种工艺方案应运而生,即 CMOS MEMS 工艺,特点是先按标准 IC Foundry 制作处理电路,再制作可动部件,其成本和成品率都能得到保证。

表面牺牲层工艺发展的另一特点是多层化。由于机械结构的复杂性,仅采用单层结构往往不能制备出所需构件,多层化是其必然的发展趋势。图 4 所示为 Wisconsin 大学、三星公司和 Michigan 大学共同发表的

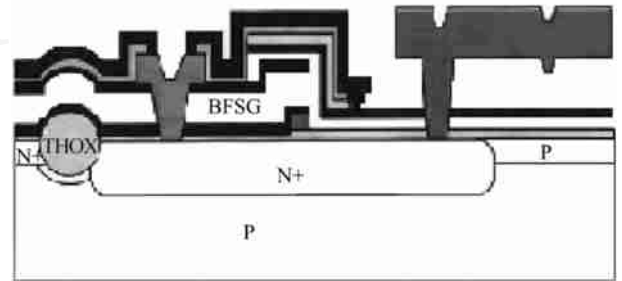


图 2 ADI 公司开发的表面牺牲层工艺 BiMEMS 剖面图  
Fig. 2 The BiMEMS section plane of surface sacrificial layers technology exploited by ADI Company

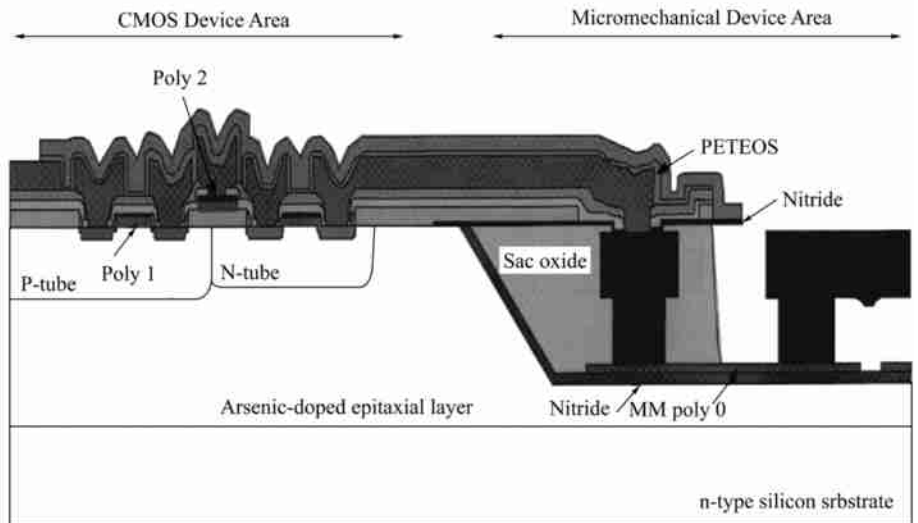


图 3 美国 Sandia 国家实验室开发的 MM/CMOS 集成 MEMS 工艺剖面图  
Fig. 3 The section plane of MM/CMOS integrating MEMS exploited by American Sandia National Lab

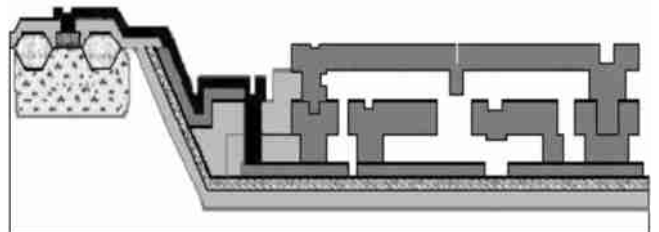


图 4 双层结构集成表面牺牲层工艺结构剖面图  
Fig. 4 The section of double layers integrated surface sacrificial layers technology

双层结构集成化表面牺牲层工艺的剖面图,代表了这一典型发展趋势。目前 Sandia 国家实验室开发的五层多晶硅表面牺牲层工艺代表了这一方向的最高水平,其工艺难点表现在化学机械抛光技术(CMP)和多晶硅应力控制技术。图 5 所示为采用这一技术制备的微型传动装置的一部分。

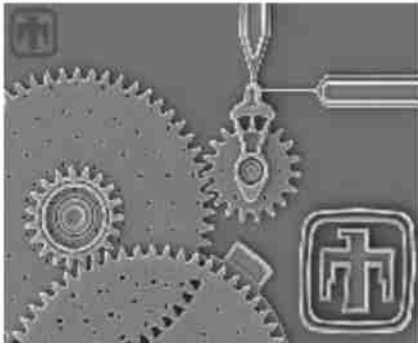


图 5 采用五层多晶硅工艺制备的微型传动结构  
Fig.5 The micro-driving structure fabricated using five layers polysilicon technology

### 2.2 体硅加工工艺

体硅加工技术指对硅衬底片进行加工,其所获得的有用部件由衬底材料构成。早期的体硅加工工艺围绕 KOH 腐蚀技术开展,20 世纪 70 年代就成功的用于压力传感器的制作。随着键合技术和硅深刻蚀(DRIE)技术的出现,多种体硅加工新工艺随之产生。Fusion Bonding 结合深刻蚀工艺就是其中的代表,图 6 所示为此种工艺的结构示意图。其特点是利用 DRIE 技术制作大的质量块,再通过键合技术将多层结构组合起来。由于采用单晶硅作结构,其应力被降到最小。

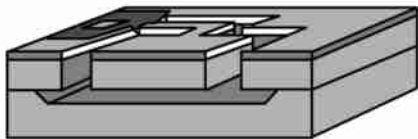


图 6 Fusion Bonding 工艺结构示意图  
Fig.6 The schematic of Fusion Bonding technology

三维加工技术是体硅工艺发展的一个重要方向。集成电路工艺是平面型工艺,无法在垂直的侧壁上进行加工。因而,开展三维加工技术的研究就成为一个重要的研究方向。图 7 所示为美国 Tuscon 大学开发的三维加工技术的流程图。虽然目前三维加工技术的发展还不成熟,但作为体硅工艺的发展方向已不容置疑。

SOI MEMS 是当前体硅工艺发展的另一重要方向和研究热点。介于两层单晶硅之间的氧化硅层类似于表面牺牲层工艺中的牺牲层,通过深刻蚀和牺牲层腐蚀技术可以直接获得具有较大质量块的结构。同时,SOI MEMS 十分适合 IC 与可动部件的集成制作。正是具有上述优点,SOI 目前被认为是较好的体硅加工技术的发展方向。图 8 给出一种 SOI MEMS 工艺的流程图。

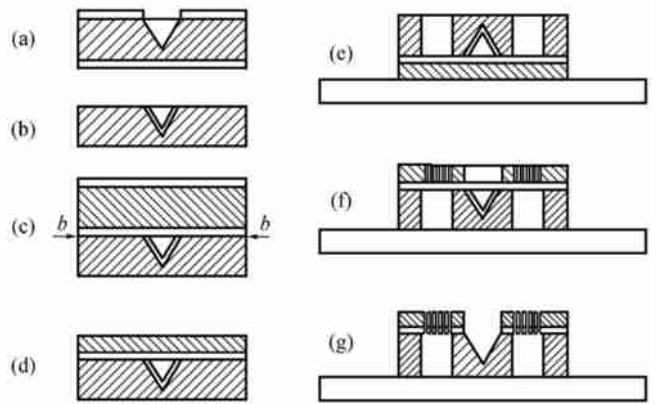


图 7 一种三维加工技术工艺流程  
Fig.7 A flow process diagram of three dimensional fabrication technology

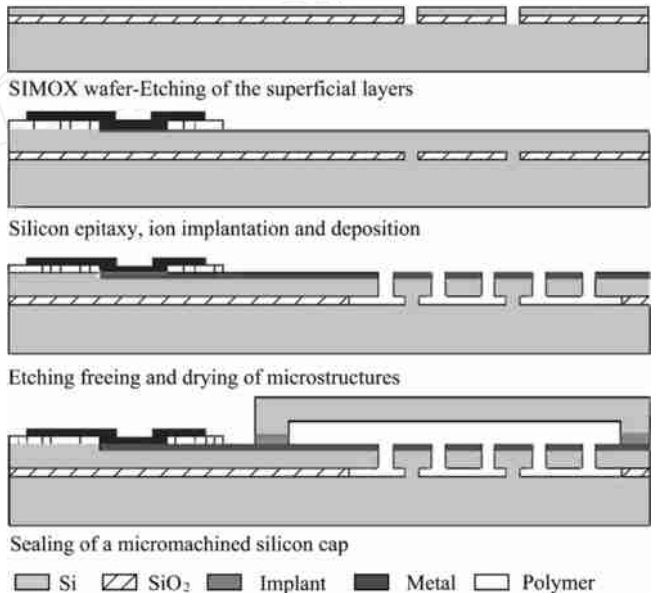


图 8 一种 SOI MEMS 工艺流程图  
Fig.8 A flow process diagram of SOI MEMS technology

### 2.3 标准化工艺

MEMS 器件的多样性导致了 MEMS 加工技术的多样性。怎样利用已有的工艺条件更有效的开展 MEMS 研究,成为各国 MEMS 研究人员的一道难题。标准化工艺是一种较为有效的研究手段,它为缺乏实验手段的研究人员提供了一种便宜、快捷、有成品率保障的加工手段。标准化工艺的核心是开发一种或多种适用性较广的、稳定的、成品率较高的工艺模块,辅助以相应的设计规则,对外发布。同时,加工线定期发布某种工艺的流水时间表, MEMS 研究人员根据工艺模块和设计规则设计器件版图,多个用户共享一批流水,共同负担流水费用。标准化工艺在国外已实施多年,如美国的 MCNC、ADI、Sandia 国家实验室均将其研究成熟的工艺作为标准化工艺对外发布,为 MEMS 研究提供服务。欧洲的德国、瑞士、法国等国家也陆续出现专门进行标准化服务的机构。标准化加工服务对推动 MEMS 的研究工作起到了极大的推动作用,特别是在美国,正是由于有了这一方便的服务机构,其大学和广大中小公司的 MEMS 研究工作才得以广泛开展。

建于北京大学微电子所的“微米/纳米加工技术国家级重点实验室”在前期研究工作的基础上,已开始开展标准化工艺的研究工作,标准化工艺模块和设计规则已开始试发布。图9所示为一种标准化工艺模块的工艺流程图。该工艺的特点是采用深刻蚀结合硅/玻璃键合工艺,单晶硅作质量块,工艺简单,寄生电容小。此外,该工艺还可进一步增加硅帽封装、结构间电隔离等附属模块,形成较强的覆盖面。

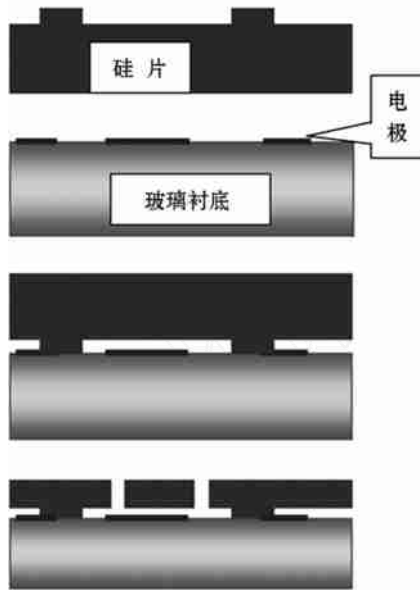


图9 一种试运行的标准化工艺流程  
Fig.9 A standard flow process of trial running

### 3 结束语

回顾 MEMS 的发展历程,总结当今硅基 MEMS 加工技术的发展方向,可以认为:表面牺牲层技术和体硅加工技术是硅基 MEMS 加工技术的两条主线发展;表面牺牲层技术向多层、集成化方向发展;体硅工艺主要表现为键合与深刻蚀技术的组合,追求大质量块和低应力以及三维加工。SOI 技术是新一代的体硅工艺发展方向;标准化加工是 MEMS 研究的重要手段。

#### References

- 1 Sniegowski J J, Rodgers M S. Multi-layer enhancement to polysilicon surface-micromachining technology. IEDM '97, Washington D. C. USA, Dec 1997. 903 ~ 906.

- 2 Howe R T. Surface-micromachining for microsensors and microactuators. Journal of Vacuum Science & Technology, 1988, B(6): 1 809 ~ 1 813.
- 3 Gianchandani Y B, Kim H, Shinn M, et al. A fabrication process for integrating polysilicon microstructure with post-processed CMOS circuits. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10: 380 ~ 386.
- 4 Klaassen E, Petersen K, Noworolski J M, et al. Silicon fusion bonding and deep reactive ion etching: a new technology for microstructures. Proceedings of the 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducers '95, Stockholm Sweden, 1995. 556 ~ 559.
- 5 Enikov E T, Nelson B J. Three-dimensional microfabrication for a multi-degree-of-freedom capacitive force sensor using fibre-chip coupling. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10: 492 ~ 497.
- 6 Renard S. Industrial MEMS on SOI. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 10: 245 ~ 249.
- 7 Zhang D C, Li Z H, Li Ting, et al. A novel isolation technology in bulk micromachining using deep reactive ion etching and a polysilicon refill. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2000, 11: 13 ~ 19.

#### 作者简介

郝一龙,男,1963年7月生,山东蓬莱人,汉族。北京大学微电子学研究所副研究员,副所长,“微米/纳米加工技术国家级重点实验室”副主任。从事 MEMS 工艺及设计技术研究,发表论文 40 余篇。

HAO Yilong, male, born in Shandong Province, in July 1963. He is associate professor of Institution of Microelectronics of Peking University, associate director of National State Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology. His research interests include technology and design of MEMS. Fax: + 86-10-62751789, E-mail: ylhao@ime.pku.edu.cn

张立宪,男,1978年11月,河北保定人,汉族。中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)在读研究生,研究方向为微系统力学。

李 婷,女,1967年12月,北京人,汉族。北京大学微电子所工程师,工艺实验室副主任。主要研究领域为 MEMS 加工技术、集成电路加工技术。

张大成,男,1961年4月,北京人,汉族。北京大学微电子所教授,副所长。主要研究领域为 MEMS 技术、集成电路技术。