

表面硅微器件中掩膜和工艺流程的自动生成方法

张长富^{1,2}, 任泰安¹, 卢德江¹, 蒋庄德¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安工业大学机电工程学院, 710032, 西安)

摘要: 为消除目前手工设计掩膜和工艺流程的繁琐过程, 提出了一种从表面硅微器件的三维结构模型自动生成掩膜和工艺流程的方法. 该方法将三维器件模型作为输入, 根据其组成特征的几何信息和材料信息识别出基底层、结构层、牺牲层和金属层等所有工艺层, 再根据工艺层的结构特点和材料信息自动生成掩膜和工艺流程, 并利用 SolidWorks 软件用户接口开发的应用程序验证了方法的可行性. 应用实例表明, 该方法不仅可以使设计者专注于器件结构本身的设计, 而且易于实现掩膜和工艺流程的自动化生成, 比传统的手工设计方法更加直观、高效, 为相应的设计工具开发提供了理论分析和实验验证.

关键词: 表面硅微器件; 掩膜; 工艺流程; 生成方法

中图分类号: TH39; TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1031-05

Automated Generation of Mask and Process Flow for Surface Micromachined Devices

Zhang Changfu^{1,2}, Ren Tai'an¹, Lu Dejiang¹, Jiang Zhuangde¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: To get rid of the abstract and tedious design of the current methodology, a new generation method of mask and process flow for surface micromachined devices is proposed, where the constructed 3D geometric models are employed to recognize and generate basic process layers, such as silicon substrate layers, structural layers, sacrificial layers and metal layers, by analyzing the 3D component features and material information. The mask and process flow are automatically generated from the basic layers according to the geometric characteristics and material information, and a program is developed through the application programming interfaces of SolidWorks to verify the method. A practical example shows that this method is effective and straightforward to obtain mask and process flow from the constructed geometric models of surface micromachined devices.

Keywords: surface micromachined device; mask; process flow; generation method

近年来,微机电系统(MEMS)技术已取得了很大进展,但其辅助设计方法仍然较为滞后,采用的主要设计模式依然是掩膜-结构-功能. 由于该模式是通过手工方法直接设计二维掩膜和工艺流程来仿真 MEMS 器件的结构,而不是直接设计器件的结构,因此直观性差、工艺难度大,不符合设计者所看即所

得的思维习惯.

事实上, MEMS 最理想的设计模式是功能-结构-掩膜^[1],即根据功能需求直接设计出器件的三维结构模型,再自动生成掩膜和工艺流程,其核心是从三维结构模型自动生成掩膜及工艺流程. 目前,该领域的研究虽然已成为一个热点,但取得的成果并不

多. Venkatarman 等人^[2]提出了从 MEMS 几何模型和给定的工艺参数中自动生成掩膜的方法,但该方法需要输入工艺信息,工艺难度很大. Schiek 和 Schmidt^[3]利用 MEMS 器件的二维截面形状研究了从结构模型生成掩膜的方法,但不能生成工艺流程且直观性较差. Ma 等人^[4]用遗传算法研究了从体硅工艺器件模型生成掩膜的方法,但该方法只适用于体硅工艺器件. 因此,目前的研究还有待于进一步深入. 本文在详细分析表面硅微器件结构特点的基础上,结合其组成特征的材料信息,研究了从结构自动生成掩膜及工艺流程的方法,旨在消除目前手工设计掩膜及工艺流程的繁琐过程,改善设计过程的直观性和效率,降低工艺难度,同时使设计过程更加符合设计者的思维习惯.

1 方法原理

三维模型自动生成掩膜和工艺流程的设计方法可以把设计者从掩膜和工艺的繁琐设计活动中解放出来,以便能集中精力设计出满足功能要求的器件结构. 与传统的设计方法相比,该方法更强调器件本身结构的设计,更符合设计者所看即所得的思维习惯.

掩膜和工艺流程是通过 MEMS 设计系统的自动生成模块实现的,该模块是整个设计系统的核心模块之一,它的前端是三维模型设计模块,后端为掩膜和工艺流程的仿真验证模块,如图 1 所示.

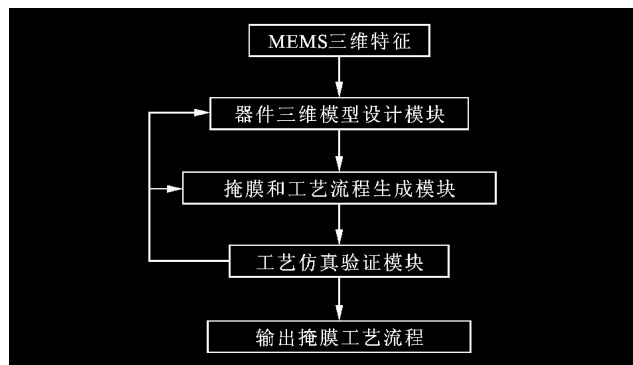


图1 MEMS设计系统的模块组成图

在三维模型设计模块中,设计者根据器件的功能需求,利用三维特征设计了结构模型,并对其进行有限元分析和形状修改,然后为每个三维特征选择工艺材料,并保存模型信息和材料信息. 掩膜和工艺流程自动生成模块则将这些设计信息作为输入,经过识别判断处理后自动生成掩膜和工艺流程. 图2主要包含2个阶段(虚线框内):在工艺层识别阶段,

其任务是将设计信息作为输入,以特征为单位,按照特征链表的结点顺序,从基底开始向上逐层识别出工艺层,然后保存到工艺层链表中;在掩膜及工艺流程的生成阶段,针对每个工艺层的结构形状特点及材料信息判断出相应的工艺步骤及其参数,进而生成掩膜和工艺流程.

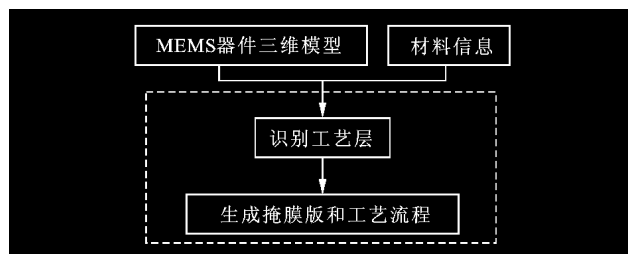


图2 自动生成方法的流程图

2 方法的2个关键步骤

2.1 工艺层识别

从工艺角度来讲,表面硅微器件是以工艺层为单位逐层堆叠起来的,同样,工艺层在掩膜和工艺流程的自动生成过程中也起着重要作用,只有先从器件的三维模型识别出工艺层,才可能生成相应的掩膜及工艺流程. 因此,自动生成模块的首要任务是识别出三维模型的工艺层.

2.1.1 表面硅微器件中的工艺层 通常认为,表面硅微器件中存在的典型工艺层是基底层、结构层、牺牲层和金属层,金属层可以当成结构层进行处理,因为它们的加工工艺类似. 牺牲层比较特殊,因为它在最后形成器件结构阶段被刻蚀掉了,所以从器件的结构中看不到它的形状,在器件模型设计阶段也并不需要设计它,但在加工中,它却是一个重要的工艺层,不但支撑了在它上面的工艺层,而且直接影响着上面工艺层的形状,所以在进行工艺层识别时,也必须识别出牺牲层. 总之,工艺层识别的任务是从器件三维模型中识别出基底层、结构层(金属层)和牺牲层.

2.1.2 工艺层的识别过程 由于在三维模型设计阶段保存的器件模型信息是以特征为单位的,因此需要判断特征构成工艺层的情况. 首先,从特征文件中读出各个特征并按设计时的先后顺序存入特征链表中,然后根据几何信息、拓扑信息和材料信息对特征进行逐个判断,识别出各个工艺层. 为了与加工顺序保持一致,识别时遵循从基底向上逐层进行的顺序,具体步骤如下.

(1)识别出基底层及其组成特征. 由于基底层位

于器件三维模型的底层,并且通常由1个基底特征(厚度较小的长方体或圆柱体)构成,所以特征链表的第1个结点中的特征便构成了基底层。

(2)找出基底层的所有覆盖特征.为叙述方便,将位于某个工艺层上方且与之共面(或拓扑相邻)的特征称为该工艺层的覆盖特征.从特征链表中的第2个结点开始向后逐个进行判断,找出基底层的覆盖特征,直到链表结束.具体做法是:把某个特征和基底层进行位置比较,如果它的下底面与基底层的上表面共面,则可判定它是基底层的覆盖特征,如图3中的特征1;如果它和基底层不共面,但它和其他已判定的覆盖特征相连,或者它们具有相同的材料和拓扑关系,也可判定该特征是基底层的覆盖特征,如图3中的特征2.用该方法可以找出基底层的所有覆盖特征。

(3)确定基底层的覆盖工艺层.由覆盖特征构成且是某个工艺层下一道工艺生成的工艺层,称为该工艺层的覆盖工艺层.找出的基底层覆盖特征可能属于一个或多个工艺层,但是基底层的真正覆盖工艺层只有一个,通过分析覆盖特征的几何位置和材料信息可以找出基底层的覆盖工艺层.在图4a中,基底层有2个覆盖特征,它们的材料相同且本身不存在覆盖关系,由此可知它们共同构成了基底层的覆盖工艺层.在图4b中,基底层有3个覆盖特征,其中特征1和特征3的材料相同,特征2为另外一种材料,可知特征1、特征2和特征3属于2个不同的工艺层,即特征1和特征3构成工艺层2,特征2构成工艺层3.由于工艺层3覆盖了工艺层2,因此判定基底层的真正覆盖层为工艺层2.如果基底层的覆盖工艺层为牺牲层,则它的识别过程需要借助其他结构层进行,因为特征链表中并不存在牺牲层的组成特征.在图4c中,基底层的覆盖特征为特征1,且它的形状呈上部横截面大而支撑部分横截面小的特点,据此可以推知基底层的覆盖工艺层是一个牺牲层,其沉积厚度为特征1的厚度.特征1则是在牺牲层被刻蚀掉一个小截面的通孔后沉积而成的(小孔形状为特征1的小柱体截面)。

(4)采用步骤(2)和(3)识别出其他的工艺层(含牺牲层),并将识别出的工艺层存入工艺层链表中,为掩膜和工艺流程的自动生成做好准备。

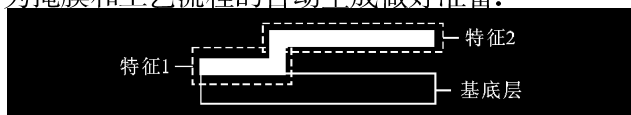
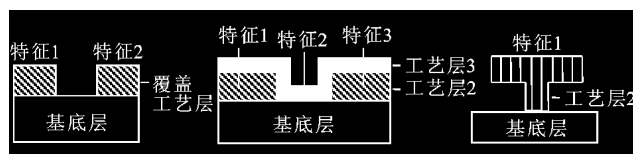


图3 基底层和结构层的截面图



(a)基底层和覆

盖工艺层

(b)基底层和相

邻工艺层

(c)基底层和

牺牲层

图4 典型的覆盖特征和覆盖工艺层

2.2 掩膜和工艺流程的生成

从MEMS器件的三维模型识别出工艺层之后,便可以从各工艺层中自动提取出掩膜和工艺流程.对不同类型的工艺层,应当采取相对应的提取方法,基底层为硅衬底,不需做提取处理,但如果其表面生长了一层 SiO_2 ,则需要将沉积 SiO_2 这道工艺加入工艺流程中.结构层和金属层的提取方法相同,但牺牲层的提取方法稍有不同.下面,分别对结构层和牺牲层的提取方法进行阐述,提取时遵循先沉积后刻蚀的顺序。

2.2.1 从结构层生成掩膜和工艺流程 从结构层生成掩膜和工艺流程时,需要充分利用其结构特点和材料信息.由于表面硅微器件的结构层都是从上表面开始向下进行加工的,所以可根据它的上表面结构形状判断出掩膜和工艺。

(1)如果结构层的上表面呈平面或折形结构,则需要结合下表面的形状进行具体分析,并分为3种情况:①上、下表面均呈平面结构,即整个结构层为平板结构,如果它下方的工艺层的上部有凹槽,则说明该结构层是采用盖板式沉积而形成的,沉积厚度为平板的厚度;②上表面为平面,下表面有凸起,如图4c中的工艺层2,则该工艺层是采用平面沉积而形成的,沉积厚度为工艺层2的厚度;③上、下表面呈折形且各处的厚度一致,如图4b中的工艺层3,则该工艺层是采用保型沉积而形成的,沉积厚度为该工艺层的厚度.这3种情况的结构层在加工时只需沉积加工,不需要掩膜,只生成工艺即可。

(2)结构层有凹槽(通孔)或上部有凸起结构,具有这种形状的结构层需要沉积加工和刻蚀加工,分2种情况:①结构层有凹槽或通孔,如图4a中的覆盖工艺层,是先沉积后刻蚀而形成的,沉积厚度为该工艺层的厚度,刻蚀时需要的掩膜形状可由凹槽(通孔)的截面形状推得,若极性为阴,则掩膜形状就是凹槽(通孔)的截面形状,若极性为阳,则掩膜形状为沉积的平面区域与凹槽(通孔)的截面区域进行布尔减法后得到的形状,刻蚀深度为凹槽的深度,若存在

通孔,确定刻蚀深度时还需结合通孔影响的其他结构层进行综合分析;②对于上部有凸起形状的结构层,生成掩膜和工艺的方法与有凹槽形状的结构层非常类似,都是先沉积后刻蚀形成的,而且确定沉积和刻蚀厚度的方法也相似,不同的是确定掩膜形状时,需要确保凸起结构是应该保留的部分而不是刻蚀的部分。

2.2.2 从牺牲层生成掩膜和工艺流程 通常牺牲层在加工中要经历沉积、形状刻蚀和释放刻蚀阶段,所以生成工艺流程时应该包含相应的信息。牺牲层生成掩膜和工艺流程时,需要借助其他结构层才能实现,如图4c中的牺牲层在生成掩膜和工艺时可借助于工艺层2,牺牲层沉积的厚度可由该工艺层的小截面柱体的高度确定。刻蚀所需的掩膜可由小柱体截面形状确定,若极性为阴,则掩膜的形状就是小柱体的截面形状,若极性为阳,则掩膜的形状为基底层上表面与小柱体的横截面区域进行布尔减法后得到的形状,刻蚀的深度为小截面柱体的高度。最后,在MEMS器件结构成型时,还需把释放刻蚀牺牲层这道工艺安排到工艺流程中。

利用上述方法实现了掩膜和工艺流程的自动生成后,还需将生成的结果保存到相应的文件中,为后续的验证阶段做好准备。生成的掩膜和工艺流程可

以采用 CoventorWare 软件的工艺仿真模块进行验证,也可以用自行开发的应用程序进行验证。

3 方法实现

以 SolidWorks 为基础平台,通过用户编程接口 (API) 开发了 MEMS 器件的掩膜和工艺流程自动生成模块,开发的具体方法见文献[5-6]。在 SolidWorks 环境下设计了如图5所示的器件模型,各工艺层的厚度分别为:Si基底为400 μm , SiO_2 层厚为0.3 μm , Si_3N_4 层1为0.22 μm , PolySi 层1为0.3 μm , Si_3N_4 层2为0.22 μm , PolySi 层2为2 μm , Al 层为0.8 μm 。将该模型作为输入,结合模型设计时选择的材料信息,经过自动生成模块的识别判断处理后,得到掩膜和工艺流程,经过整理后得到的结果如表1和图6所示。

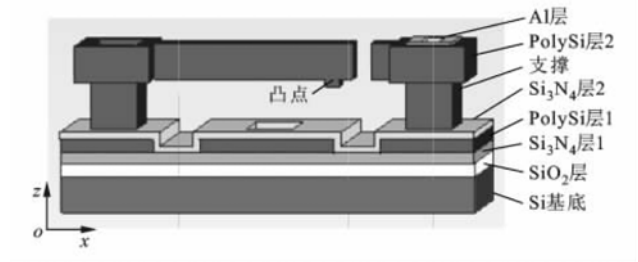


图5 器件的三维模型

表1 器件的关键工艺流程和掩膜

工艺步骤	材料	工艺层	沉积类型	层厚度/ μm	刻蚀深度/ μm	掩膜	极性
硅片制备	Si	基底层		400.00			
沉积	SiO_2	SiO_2 层	平面型	0.30			
沉积	Si_3N_4	Si_3N_4 层1	平面型	0.22			
沉积	PolySi	PolySi 层1	平面型	0.30			
刻蚀	PolySi	PolySi 层1			0.30	图6a	阳
沉积	Si_3N_4	Si_3N_4 层2	保型	0.22			
刻蚀	Si_3N_4	Si_3N_4 层2			0.22	图6b	阴
沉积	PSG	牺牲层	平面型	2.00			
刻蚀(凸点)	PSG	牺牲层			0.20	图6c	阴
刻蚀(支撑)	PSG	牺牲层					
	Si_3N_4	Si_3N_4 层2			2.22	图6d	阴
沉积	PolySi	PolySi 层2	保型	2.00			
沉积	Al	Al 层	保型	0.80			
刻蚀	Al	Al 层			0.80	图6e	阳
刻蚀	PolySi	PolySi 层2			2.00	图6f	阳
刻蚀	PSG	牺牲层					

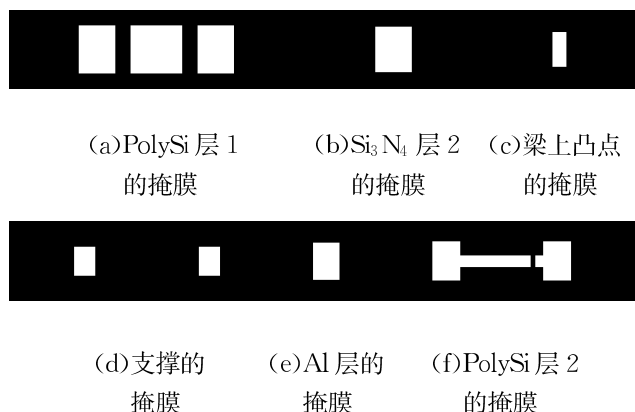


图6 器件的掩膜图

4 结 论

(1)提出了一种从 MEMS 器件三维模型自动生成掩膜和工艺流程的方法,消除了传统方法中手工设计掩膜和工艺流程的繁琐过程。

(2)利用 SolidWorks 用户编程接口开发的应用程序实现了掩膜和工艺流程的快速自动生成。

(3)验证了功能-结构-掩膜这种 MEMS 器件设计模式的可行性,为相应设计工具的开发进行了理论探索和实验验证。

参考文献:

[1] Antonsson K E. Structured design methods for MEMS

[C]//Structured Design Methods for MEMS Final Report. Pasadena, USA: California Institute of Technology, 1996: 53-57.

[2] Venkataraman V, Sarma R, Ananthasuresh G K. Part-to-art: basis for a systematic geometric design tool for surface micromachined MEMS [C]//Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences. Baltimore, USA: ASME, 2000: 11-14.

[3] Schiek L R, Schmidt C R. Automated surface micromachining mask creation from a 3D model [J]. Microsystem Technologies, 2006, 12(3):204-207.

[4] Ma Lin, Antonsson K E. Robust mask-layout synthesis for MEMS [C]//Proceedings of the 4th International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, Hilton Head, USA: ACRS, 2001: 128-131.

[5] 李卫民,刘淑芬. 基于 SolidWorks 平台的二次开发技术[J]. 机械制造,2003,41(3): 24-26.

Li Weimin, Liu Shufen. Secondary development based on SolidWorks platform [J]. Machinery, 2003, 41(3): 24-26.

[6] Zhang Changfu, Jiang Zhuangde, Lu Dejiang, et al. 3D MEMS design method via SolidWorks [C]//Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. Orlando, USA: IEEE, 2006: 747-751.

(编辑 管咏梅)