

Introduction to Microsystem Design

Second Edition

微系统设计导论

(第2版)

[德] 沃纳·卡尔·施默博格 (Werner Karl Schomburg) 著

董 瑛 等译



清华大学出版社

微系统设计导论 (第2版)

微系统由微米级结构组成, 并作为完整的系统进行优化, 以提供一种或多种特定功能。本书是以微结构设计与系统功能优化为基础, 详细介绍微系统设计的教科书。全书共23章, 包括了微传感、微驱动、微流体控制、微光学等微系统的关键结构与功能元件的设计。本书通过建立和求解系统方程来进行参数设计, 而微系统和微结构的工作原理是建立解析方程的基础, 因此本书着重介绍微结构在微系统中的应用及其工作原理的表达式。为帮助读者熟练掌握这些公式的用法, 本书在每章最后都给出了一些习题以供读者练习。

本书可供高等工科院校微机电系统技术、测控技术、仪器仪表、机电一体化等专业师生使用, 也可供相关专业的教学、科研和工程技术人员参考。

清华社官方微信号



扫我有惊喜

ISBN 978-7-302-51757-3



9 787302 517573 >

定价: 68.50元

Introduction to Microsystem Design

Second Edition

微系统设计导论

(第 2 版)

[德] 沃纳·卡尔·施默博格 (Werner Karl Schomburg) 著

董 瑛 等译

贵州师范学院内部使用

清华大学出版社
北京

Translation from English language edition:

Introduction to Microsystem Design

by Werner Karl Schomburg

Copyright © Springer Berlin Heidelberg 2015

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science+Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字翻译版由德国施普林格公司授权清华大学出版社在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)独家出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2016-9513

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

微系统设计导论:第2版/(德)沃纳·卡尔·施默博格著;董瑛等译.—北京:清华大学出版社,2019

书名原文:Introduction to Microsystem Design

ISBN 978-7-302-51757-3

I. ①微… II. ①沃… ②董… III. ①微电子技术—设计 IV. ①TN40

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第272627号

责任编辑:许龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:丛怀宇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫丰华彩印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15

字 数:366千字

版 次:2019年9月第1版

印 次:2019年9月第1次印刷

定 价:68.50元

产品编号:069616-01

贵州师范学院内部使用

译者序



德国亚琛工业大学 Werner Karl Schomburg 教授在清华大学讲授“Design in Micro Technique”课程的时候,我负责翻译课程资料,因此当课程教材 *Introduction to Microsystem Design* 出版后,把它翻译成中文就成了我的责任。Schomburg 教授非常高兴这本书能出中文版,他还指出了第 2 版的几处错误,希望能在中文版中及时订正,因此本书既是“Introduction to Microsystem Design”第 2 版的中文版,同时也是修订版。

微系统技术,在中国被称为微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)技术,是一个交叉学科的技术领域。关于微机电系统设计已有一些经典书籍,但大多是从微尺度下的传感和驱动机理出发的,往往需要多学科的基础知识。本书则是从微结构和功能单元出发,通过分析微结构的特性,从而利用这些特性来实现特定的功能。这与我们宏观机电系统从结构,到零件,再到部件,最后到系统的设计过程相似,因此对于具备机电系统设计基础的学生和工程人员来说,也许更容易接受。得益于德国学者的严谨,本书给出了大量描述微结构特性的数学公式。虽然目前微机电系统设计都需要利用有限元仿真,但是微结构的数学模型仍然是设计的开端和基础,因此本书非常适合作为教材或参考书。

原书由我的学生挑选自己感兴趣的章节进行翻译,然后交给我修改和统稿。具体翻译分工如下:张旭东(绪论、第 1、18、21 章),谭羽杉(第 9、20 章),孙宇(第 13、15、16 章),杨拓宇(第 8、12、23 章),王玺(第 5、11、14、17、22 章),刘跃明(第 6、7 章),廖呈玮(序言、第 2、3 章),张文阳(第 4、10 章),刘子韬(第 19 章),在这里对他们表示由衷的感谢。原书大部分内容最初是用德语写的,英文转译难免会出现一些不容易理解或不习惯的表述,对于这些内容的翻译我们是通过讨论和商榷最后确定的。

由于翻译水平有限,书中难免会有错译、误译或不恰当之处,恳请读者批评指正。

董瑛

2019 年 5 月

第 2 版前言



《微系统设计导论(第 2 版)》纠正了第 1 版中发现的错误,并增加了电学测量章节、8 个表格、14 幅图、57 个方程和 12 个练习题。第 2 版对导路、膜片、膜片上的应变计、电容力和压力传感器等章节进行了重大改进。所有练习题都经过了学生的实际解答并给出反馈。有兴趣使用本书进行教学并且需要练习题答案的老师可以写信给作者(Schomburg@KEmikro.RWTH-Aachen. de),练习题和答案也有德语版本。

为了方便查找具体的内容,我在本书中系统地排列了各个章节。在本书的最后,还列出了传感器和执行器的所有特性曲线以及方程式。因此,对于教学顺序与本书不同的情况,使用这本书开展教学可以变得更有趣和更有效。例如,电学测量章节中的反馈测量,可以在压力传感器章节中首次需要使用的地方进行介绍。

衷心感谢帮助我找到不足和纠正错误、提出建设性意见和对本书作出贡献的助手和学生们。希望这本书的读者可以和我多多交流,并且提出宝贵的建议与意见。

第 1 版前言



微系统技术(MST)或微机电系统(MEMS)在美国是一种相对新兴的技术,该技术可用于制造微型设备,例如用于制造可植入给药系统和微全分析系统(μ TAS)的微阀门,它可以在几厘米的聚合物芯片上建造一个小型实验室。MST 起源于 30 多年前,标志性的事件是硅的各向异性腐蚀的发现^[1]和牺牲层技术的发明^[2]。

如今,MST 已经是一种成熟的技术,是许多产品的技术基础。现代生活的许多领域都是基于容易被我们忽视的微系统技术。在大多数汽车中,微型传感器用于测量加速度、角速度、压力和流量。手表、助听器、移动电话、投影机、喷墨打印机、PC 机和用于微创手术的导管等都是 MST 的实际应用案例。因此,许多工作都需要用到而且必须用到微系统技术。

在过去的几十年中,MST 的制造技术一直是研究和开发的主要问题,从而形成了一些现在的标准生产工艺,如体硅蚀刻、反应离子蚀刻、表面微加工、微成型、硅熔融键合等。这些工艺流程在几本教科书^[3-6]中有详细的介绍,可用于相关行业和大学的教学。

然而,MST 不仅以其新颖的制造工艺为特征。系统在向微小尺寸过渡的同时要与设计的需求相结合。小型化的传感器或执行器由于新的制造技术和较小的尺度而需要不同的设计,这导致了作用效果和受力的显著变化。例如,毛细管力在宏观世界中并不重要,但它可以用作微系统的驱动力。压电效应和热应变是大家所熟知的,需要在宏观工程中加以考虑,但在 MST 中则起着更加重要的作用。

到目前为止,还没有系统地描述微系统设计的教科书。因此,本书的出版填补了这个空白。本书以亚琛工业大学和清华大学在第五学期或更高学期的本科生课程为基础编写。本书可以作为类似课程学习、自学的基础,或作为有经验的工程师的参考书。书中提出的所有方程式都不仅限于微系统,在宏观世界基本也是有效的。因此,本书也可以帮助在不同领域工作的工程师。

本书虽然没有描述 MST 的制造过程,但即使不知道这些过程也可以理解书中的内容。它提供了在 MST 计算中非常重要的效应和作用力,或者至少估计其数量级所需要的基本方程。

目录



绪论	1
第 1 章 尺度效应	3
第 2 章 弹性变形	5
第 3 章 薄膜	7
练习题	11
第 4 章 导路	15
练习题	19
第 5 章 电学测量	21
练习题	29
第 6 章 膜片	30
练习题	47
第 7 章 膜片上的应变计	49
练习题	58
第 8 章 梁	60
练习题	70
第 9 章 振动	74
练习题	85
第 10 章 微流道	88
练习题	101

第 11 章 电容力	103
练习题	112
第 12 章 压电效应	114
练习题	127
第 13 章 热执行器	131
练习题	140
第 14 章 微光学技术	144
练习题	151
第 15 章 扩散	152
练习题	157
第 16 章 微阀	159
练习题	171
第 17 章 微泵	175
练习题	185
第 18 章 微量给料	190
第 19 章 物理域的类比性	191
练习题	195
第 20 章 机械电子器件	197
练习题	203
第 21 章 压力传感器	206
练习题	211
第 22 章 流量传感器	213
练习题	220
第 23 章 惯性传感器	222
练习题	226
参考文献	227

绪 论

本书是从德国亚琛工业大学和中国清华大学的课程中发展而来的。它可以作为关于微系统设计的类似课程的基础教材。因为本书的每一章节都是建立在之前章节的基础上,因此建议按照本书的顺序进行阅读。强烈建议学生去解决本书中的习题,因为这对于熟悉技术中所遇到的单位和数量级很重要。除此之外,当一个计算实例显示出所教内容的重要性时,课程的相关性就变得更加明显了。

本书的编写不需要读者知道微系统是如何搭建的,以及什么是微系统技术的可能性和局限性。当要设计真实的微系统时,需要大量系统制造的可能性的知识。本书没有提供这方面的知识,因为其他的文献^[3-6]涵盖了这个主题。可以在学生没有任何微系统制造过程的知识的情况下,就本书的内容对其进行教学。但是,仍然建议首先进行微系统制造的教学,然后在可能的情况下再进行微系统的设计。除了教学之外,本书的另一个目的是提供计算基本元件的行为和物理效应所需的方程,这在微系统技术中是很重要的。

本书中介绍的方程式不限于微系统技术,它们在宏观世界里也是有效的。然而在宏观应用中,也许诸如毛细管力的影响就不太重要。另一方面,本书也期望对于诸如应变器和压电效应等主题的相关描述也能有助于不在微系统领域工作的读者。

如今,有限元方法(FEM)可用于以高精度计算宏观结构以及微观结构和元件的行为。然而,FEM无法提供对相互关系的描述和理解,以及如何针对特定应用来优化结构。因此,希望通过分析计算能够首先提供对给定问题的一个总体理解,并且在得出解决问题的有效方式之后,可以使用FEM来找到精确的最佳值。通过分析方程对问题的近似描述,将有助于通过FEM进行优化,因为该方程给出了在哪里寻找最佳值以及哪些参数会显示出最佳效果的好的线索。

FEM的存在还允许在分析计算中进行更粗略的近似,因为不再需要计算来找到精确的结果。在本书中,可以接受非常粗糙的近似来实现对结构的整体行为的分析描述,例如当压应力超过临界应力时膜和梁的弯曲。这说明了现在的分析计算和FEM是如何实现互补的。

微系统技术结合了许多技术领域,例如机械学、电子学、流体学、光学等。因此,所有这些领域的符号都需要混合,而避免变量的混淆不是一个容易的任务。本书中每个变量都有一个唯一的符号。因此,有些变量需要通过下标来区分。例如,希腊字母 α 可以用于角度、阻尼常数、热膨胀系数和电阻的温度系数。这些量分别被赋予有区别的符号 α 、 α_D 、 α_{th} 和 α_T 。

在微系统技术中,通常非常小的结构和形状的变化与大得多的结构和形状的变化相邻。如果微型和大型结构都按比例显示,则一般不能识别较小的结构。因此,通常在微系统技术和这本书中,在绘制较小的结构时,与周围更大的结构相比往往画的比其本身更大。实际尺寸会在图形标题或与其相关的文字中给出。

第 1 章

尺度效应

如果要将立方体分离成更小的立方体,可以采用这种方式,即每个边缘被切成两个相等的块(参见图 1),需要进行穿过立方体的三次切割。每个切口产生的表面积等于平行于切口的原始立方体的表面的表面积。所有加在一起的整个表面积加倍了,而体积仍然是相同的。如果每个边缘被切割成 n 片,则表面增加了 n 倍。因此,表面积与体积的比率随着因子 s_f 的倒数而改变, s_f 是立方体(以及通常情况下的任何物体)的尺寸按比例放大或缩小的因子。

这就是为什么船只建造得尽可能大的原因。建筑成本与船体-船舶表面积成正比;驱动成本与水的摩擦力成正比,而摩擦力又与表面积成正比。但是收益与货物运输量(船舶的体积)成正比。因此,成本与表面积一样随船舶的缩放因子 s_f 的平方增加,而收益与体积一样按照 s_f 的三次方增加,即船舶越大越经济。这也意味着,如果要运输大量的货物,微型船就不是一个好主意。然而,在其他的一些问题中小型化却是有利的。

简单的几何事实即表面积与体积之比与 s_f^{-1} 成比例,在一般的微技术特别是微组件和微系统的设计上有很多的结果。例如,贵金属广泛用于微技术,因为腐蚀作用在微组件的大面积上,而小体积被快速耗尽。如果宏观桥的支柱被腐蚀掉 $100\mu\text{m}$,没有人会关心,但如果 $100\mu\text{m}$ 的微结构被腐蚀掉,它可能已经消失。另一方面,小体积的贵金属的成本是无关紧要的。

当发生腐蚀时,化学反应的增强是缺点,但是当在小体积中进行化学分析时是有利的。这是用于 DNA 识别以及其他生物或化学测定的化学微反应器和微量分析芯片的基础。

表面积与体积之比是微组件快速热交换的原因。大的表面积有助于热交换,而小的体积导致小的热容量。当尺寸减小时,热、流体和电流的流量按比例缩小,因为横截面减小 s_f^{-2} ,而长度仅减小 s_f^{-1} 。这表明微技术不仅仅是减少尺寸,而是需要新的概念和新的设计原理。

这一点在当力的影响按比例缩小时变得尤其清楚。作用在物体表面上的所有力与作用

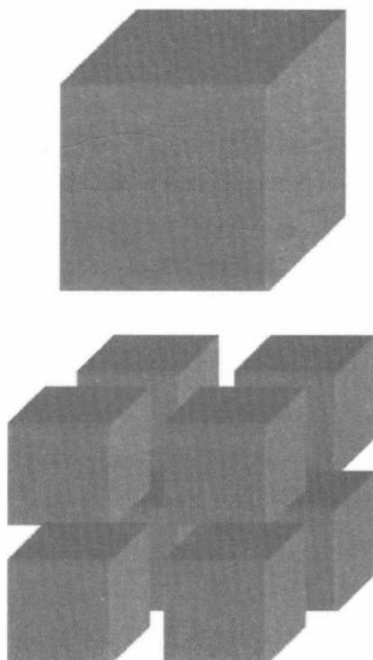


图 1 立方体的分离使表面增加

在体积或质量上的力相比变得更大。因此,微观技术中的静电力、压电力、毛细作用力和摩擦力比控制宏观世界的重力、惯性力和磁力更重要。

当它们的整体大小改变时,改变事物性质的主要相互关系称为尺度效应。尺度效应不仅适用于效应和力,也适用于本书中描述的所有传感器和执行器。尺度效应是编写本书描述微观技术所需的创新设计的原因。

第2章

弹性变形

在描述微系统技术基本单元的力学特性之前,有必要介绍物体在力的作用下发生弹性变形的三个主要参数:由于应变产生的应力、残余应力和形变。

当力正在拉动或推动弹性体时,由于物体发生应变而产生应力。例如,力 F 在自由端沿纵向方向拉动其另一端固定的梁的端部(参见图 2(a))。这个力导致了梁产生应变 ϵ_B 和应力 σ_B 。应力是作用在梁横截面 A_B 单位面积的力。应力与应变的相互关系遵循胡克定律:

$$\frac{F}{A_B} = \sigma_B = E_B \epsilon_B \quad (1)$$

比例常数 E_B 是梁的材料特征参数,称为杨氏模量。根据胡克定律,梁的长度增加则其直径以泊松比 ν_B 减小, ν_B 小于纵向应变 ϵ_B 。因此,梁的宽度 Δb_B 和厚度 Δd_B 的变化量为

$$\Delta b_B = -\nu_B \epsilon_B b_B, \quad \Delta d_B = -\nu_B \epsilon_B d_B \quad (2)$$

如果作用在梁上的力被释放,并且力的数值不是太大,那么梁的变形部分将还原到其原始位置,应力和应变也会消失。除了由于应变引起的应力之外,物体也可能残余一些应力。这仅发生在主体多余一个部分被固定时发生,例如,梁两端被固定(参见图 2(b))。微技术中的残余应力往往是在制造过程中产生的。以两端被固定的梁为例,梁可能被拉伸或压缩以适配两端的固定点。如果残余应力没有超过一定值,在没有外力作用时,梁看起来与没有残余应力的梁相同。但是当在外力作用下,梁发生了显著的弯曲,例如,如果力横向作用在梁的中心处,由于残余应力,梁会发生更多的弯曲、更少的压缩。如果固定点移动或释放,则残余应力会发生变化,梁也会发生一些变化,例如变得更厚和更短。

弯曲导致物体在一侧产生拉伸的应力和应变,在另一侧产生压缩的应力和应变(参见图 2(c))。当外力消失时,物体厚度方向上的压力梯度产生使物体还原到初始位置的弯矩。当仅涉及弯曲时,横截面上的应力的积分为零。所以,弯曲不改变梁的长度。在每个弯曲体中存在无限小的应力为零的薄层,称为中性层。然而,当力或力分量作用于梁的纵向时,中性层是张紧的。因为中性层不能以这种方式变形,所以在一端固定且仅在横向方向上加载

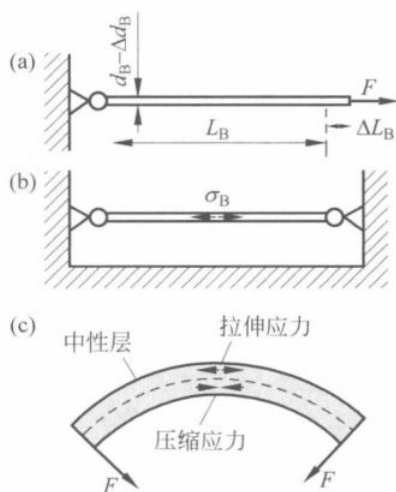


图 2

(a) 梁因外力产生应力; (b) 有残余应力; (c) 梁发生弯曲

的梁,只能弯曲而弹性变形。

通过弯曲产生的梁的轴向应变 ϵ 是无限小长度 dL_B 的变化,如图 3(a)所示。

$$\epsilon = \frac{ds - dL_B}{dL_B} = \frac{(R_c + z)d\alpha - R_c d\alpha}{R_c d\alpha} = \frac{z}{R_c} \quad (3)$$

在下式中, R_c 表示梁曲率半径。半径函数 $w(x)$ 的曲率可以通过文献[32]计算:

$$R_c = \pm \frac{\left(1 + \left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}} \quad (4)$$

当曲线的斜率小时(如果 x 轴平行于梁),第一个导数可以被忽略,式(3)变为

$$\epsilon = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5)$$

作用在梁上的弯曲力矩 M 是作用在梁的横截面的无限小表面 dA 上的力 dF 与梁弯曲所围绕的轴的距离 z 之积的积分(y 轴见图 3(b)):

$$M = \int_A z dF = \int_A z \sigma dA \quad (6)$$

在该方程中,代入根据胡克定律式(1)和式(5)的应力:

$$M = \int_A z \sigma dA = - \int_A z^2 E_B \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} dA = - E_B \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \int_A z^2 dA = - E_B I \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (7)$$

在式(7)中, I 表示由下式定义的面积惯性矩:

$$I = \int_A z^2 dA \quad (8)$$

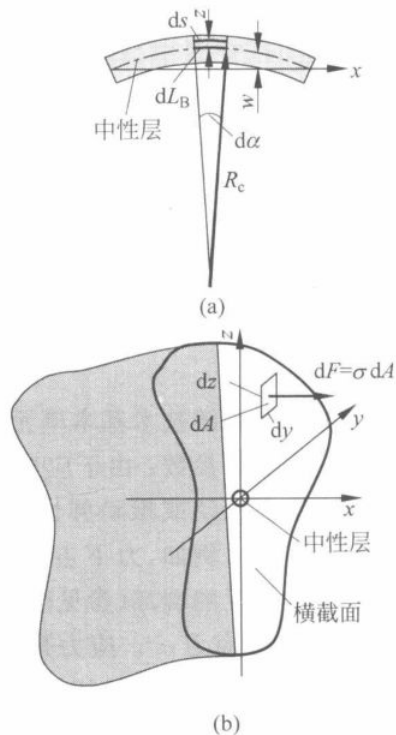


图3 计算梁的应变和弯矩

第 3 章

薄 膜

薄膜是微系统设计的重要基本要素。它们被用作蚀刻工艺中的掩膜、扩散阻挡层以及其他功能元件,例如电导体、膜片和梁。薄膜几乎可以由所有固体材料组成。典型的例子有金属、聚合物、氧化物和氮化物。薄膜的厚度通常为 $50\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 。厚度小于 50nm 的薄膜很难均匀地形成,因为它们倾向于形成分离的团簇。厚度大于 $10\mu\text{m}$ 的膜在微技术中不再是“薄”膜,并且生产厚度大于 $10\mu\text{m}$ 的膜需要通过电镀工艺,不能通过溅射和蒸发等工艺快速生成。在处理薄膜时,应力是重要的参数,可能会决定新开发的微系统的成功或失败。这就是为什么应力控制如此重要(在任何应力大小下的设计工作都是如此)。本章描述了应力是如何影响薄膜的,当薄膜部分被固定时应力对它的影响,以及如何改变应力。想要在基底上沉积薄膜而没有任何应力残余几乎是不可能的,唯一的例外是外延生长。导致没有残余应力的原因是沉积层的分子在基底表面上运动,直到它找到能量低的位置并附着在这个位置上。如果衬底和薄膜材料的晶体结构不匹配,就会导致薄膜的晶格发生应变,因此会产生一些应力。如果聚合物层通过诸如旋涂或仅仅喷涂的方法沉积,则会以不同的机理运作。当溶剂从薄膜蒸发时导致尺寸减小,这会使薄膜中产生一些拉应力,残余应力会使衬底发生一点弯曲。通常,在直径 100mm 、厚度为 $500\mu\text{m}$ 的硅晶片上,厚度为 100nm 的薄膜的弯曲量为 $100\mu\text{m}$ 量级。在宏观尺度上,这不重要。然而,在微观尺度上,我们必须要考虑这个影响(参见图 4)。

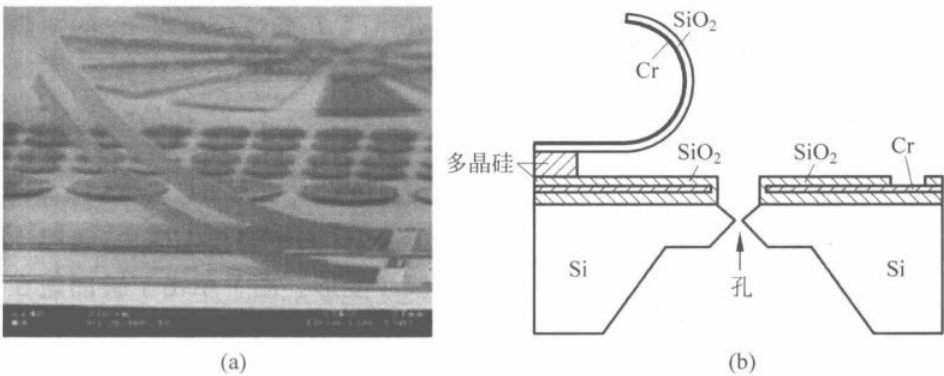


图 4 薄膜弯曲(a)和两个用于微阀门设计的弯曲薄膜(b)

基底弯曲用于测量薄膜的残余应力 σ_0 。当膜的厚度 d_f 远小于基底的厚度 d_{su} 时,残余应力可以用 Stoney 方程^[9]近似计算:

$$\sigma_0 = \frac{E_{Su}}{6(1-\nu_{Su})R_{Su}} \frac{d_{Su}^2}{d_f} \quad (9)$$

薄膜的弹性性质通常是难以测量的,但是从式(9)可以看出这个参数不是必需的,只需要知道杨氏模量 E_{Su} 、泊松比 ν_{Su} 和基底的曲率半径 R_{Su} 就足够了。基底的曲率半径可以用表面轮廓仪测量。

薄膜具有趋于剥离基底的初始拉应力^[10],而压应力增强薄膜对基底的黏附。如图5所示(附图没有按照比例绘制,允许较大尺寸的间隙紧邻较小尺寸间隙),拉应力拉动薄膜的上部远离基底,产生将薄膜从基底剥离的弯曲力矩。因此,为了保证良好的黏附性,需要在薄膜中增加压应力。

应力还对用作掩膜的薄膜下层的刻蚀有影响。如图5所示,具有压应力的掩膜的卷曲降低了掩膜下层的不期望的刻蚀,而拉应力的弯曲增强了掩膜下层的侧向刻蚀。

薄膜也可能由于应力梯度而卷曲。当薄膜沉积在基底上时,经常产生应力梯度。如上所述,基底和薄膜材料的晶体结构失配导致薄膜的晶体产生应变。当晶体继续生长,晶粒消失并且形成薄膜的自然晶格,这会导致残余应力的产生,其绝对值随着与基底距离的增加而变小。图6示出了当薄膜最初处于压缩应力下,随着与基底的距离减小时薄膜下方的牺牲层被刻蚀掉时发生的情况。图4中,左侧的梁由于初始应力的梯度而卷曲。

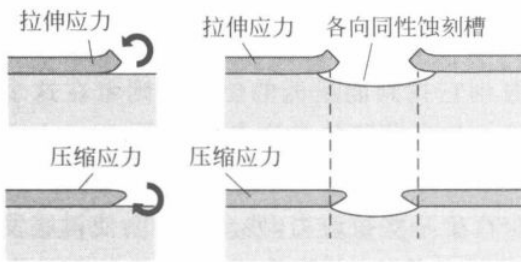


图5 基底上分别具有拉伸和压缩应力的薄膜

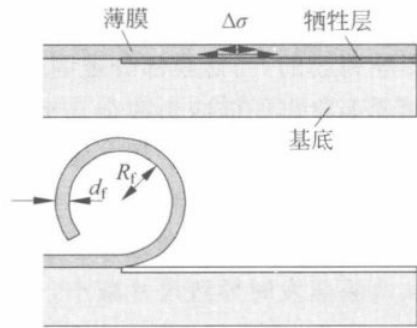


图6 在沉积(上图)和刻蚀牺牲层(下图)之后具有应力梯度的基底上的薄膜

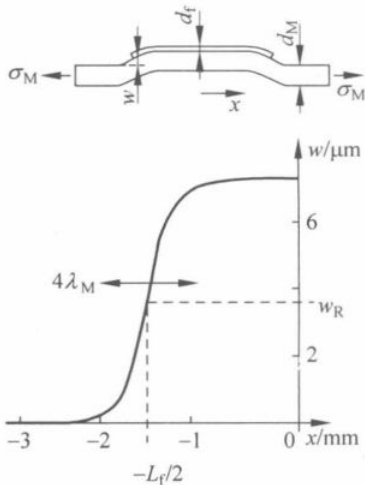


图7 具有压应力的基底上的薄膜(上图为例示意图,下图为使用式(11)~式(14)计算的偏差)

具有厚度 d_f 和杨氏模量 E_f 的薄膜的曲率半径和应力差 $\Delta\sigma$ 可以由下式计算:

$$R_f = \frac{d_f E_f}{\Delta\sigma} \quad (10)$$

薄膜也会使膜片变形。如果具有拉应力的膜片承载薄膜,薄膜中将产生应力,薄膜中的弯曲力矩将使膜片变形。图7示出了被固定在框架中的具有拉应力的膜片上承载了具有压应力的薄膜(图中未示出),在薄膜边缘附近产生的弯曲力矩使膜片发生了弯曲。在远离边缘的位置,在未被薄膜覆盖或部分被覆盖的区域中几乎没有膜片弯曲。