



多晶硅微机械构件 材料力学行为及微机械粘附问题研究

Studies on Mechanical Behaviors of Microfabricated
Polysilicon Thin Films and Sticking Problem in MEMS

丁建宁



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



多晶硅微机械构件 材料力学行为及微机械粘附问题研究

Studies on Mechanical Behaviors of Microfabricated
Polysilicon Thin Films and Sticking Problem in MEMS

丁建宁



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

多晶硅微机械构件材料力学行为及微机械粘附问题研究/丁建宁.—北京:高等教育出版社,2004.12
ISBN 7-04-015990-2

I. 多... II. 丁... III. 机械制造材料—研究
IV. TH14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 116920 号

策划编辑	林 琳	责任编辑	刘 洋	封面设计	张 楠
责任绘图	尹文军	版式设计	史新薇	责任校对	杨凤玲
责任印制	韩 刚				

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本	850 × 1168 1/32		
印 张	7.125	版 次	2004 年 12 月第 1 版
字 数	170 000	印 次	2004 年 12 月第 1 次印刷
插 页	1	定 价	15.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号:15990-00

作者简介



丁建宁,男,1966年3月出生,江苏省镇江市人。中共党员,汉族,博士,教授,博士生导师,江苏大学科技处副处长,微纳米科学技术研究中心主任,江苏省材料摩擦学重点实验室副主任,机械工程学院机械电子工程博士点学科带头人。

1998年师从著名机械学专家、中国科学院院士、清华大学精密仪器与机械学系摩擦学国家重点实验室温诗铸教授攻读博士学位。在校期间曾获一二·九、清华之友——CAST等各种奖项。担任精博八班党支部书记和精仪系研究生纵向班集体班长,带领班集体获1998—1999年度清华大学优秀党支部、1999—2000年度清华大学优秀党支部、1999—2000年度清华大学先进班集体和1999—2000年度北京市先进班集体。2001年荣获清华大学第六届“航海鹰杯”学术新秀称号,受到著名科学家吴文俊院士的亲切接见。2001年7月于清华大学取得工学博士学位。毕业论文“多晶硅微机械构件材料力学行为及微机械粘附问题研究”荣获2003年清华大学优秀博士学位论文及2003年全国优秀博士学位论文奖。2002—2003年于香港城市大学担任研究员。2002年被评为江苏省高校“青蓝工程”第二期计划首批优秀青年骨干教师培养对象,2003年被评为镇江市十大杰出青年、教育部优秀青年教师。截止到2003年,在微纳米科学技术研究领域,已发表学术论文80余篇,其中SCI论文20篇、EI论文24篇,论文被SCI刊物引用40篇次以上,取得专利1项。目前为江苏省摩擦学学会、电子学会理事,承担国家、部省科研项目13项。

导师简介



温诗铸,男,1932年11月出生,江西省丰城人,1955年毕业于清华大学机械制造系,获优秀毕业生金质奖章。留校任教后,历任机械设计教研室第一教学秘书、副主任、主任。1979年赴英国帝国理工学院进修。1981年以来,主持清华大学摩擦学学科建设,先后担任清华大学摩擦学研究室主任、摩擦学研究所副所长、摩擦学国家重点实验室主任兼学术委员会副主任。

1999年被选为中国科学院院士。现任清华大学精密仪器与机械学系教授、学术委员会主任。研究领域涉及润滑理论、摩擦磨损机理与控制、纳米摩擦学以及微机械学等学科。出版学术著作5部,发表学术论文400余篇。所主持的研究项目共获奖18项,包括:国家自然科学二等奖1项,国家发明奖三等奖1项,全国优秀科技图书一、二等奖各1项,省部级科技进步一等奖3项、二等奖8项、三等奖2项,2002年度何梁何利科学技术奖等。获专利5项。所指导的博士生中有2人获全国优秀博士学位论文。

内 容 简 介

本书是一部论述微机电系统基础问题的专著,取材于作者在博士学位论文阶段的研究成果。作者在系统总结国内外有关微机电系统的最新研究进展基础上,论述了微型机械设计学的研究范畴,系统地阐述了微机械构件材料力学行为和微机械粘附问题。

全书共七章,内容涉及多晶硅微悬臂梁的形变特性、多晶硅微构件拉伸形变特性、多晶硅微机械构件材料强度的尺寸效应、多晶硅微机械构件材料的损伤特性、微机械粘附及结构稳定性问题等研究领域。

本书可供从事微机电系统设计和研究的科技工作者和高等院校师生参考。

前 言

随着现代科学技术的发展,人们不断追求尺度微小型化的机械装置,以适应生物、环境控制、医学、航天航空、数字通信、传感技术、灵巧武器等领域日益增长的要求。20 世纪 60 年代以来,微电子技术渗透到机械工程各个领域,机电一体化为机械装置在系统结构和性能方面都带来了革命性的变化,也大大地促进了机械装置微型化的发展,并由此诞生出了微型机械(或称微机电系统, MEMS)和纳米机械(或称纳机电系统, NEMS)。早在 1959 年,著名的物理学家、诺贝尔奖获得者 R. P. Feynman 就预言了这一技术的诞生。微机电系统的研究最初是由美国斯坦福大学于 1970 年开始的,1987 年美国投入大量经费资助微型机械开发,首先制造出了直径为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的静电微型电动机,其转子直径仅为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 。这一项突破性的成就,轰动了当时的科技界和产业界。随后,外形尺寸在几十微米到几百微米的微型齿轮、微型弹簧、微型涡轮等可以做转动、移动和滑动的微机构也相继制造出来。借助于 MEMS 技术和生物技术实现化学分析系统从试样处理到检测的整体微型化、集成化与便携化的微全分析系统也已成为目前分析仪器发展的重要方向和前沿。继美国之后,日本和西欧各国也相继将微型机械研究列为重要发展领域。我国在国家自然科学基金、国防科

工委、总装备部和科技部的资助下,从20世纪90年代开始也开展了相关研究。从世界范围看,微型机电系统(MEMS)的研究及其产业化发展很快,应用范围也从汽车、医疗领域逐渐向通信、机械工程、生物技术、分析和诊断技术、化学技术、制造和生产技术、环保技术领域扩展。微型机械最明显的特征是由于几何尺寸的微型化,表面效果(静电力和表面凝聚力等)将取代体积效果(质量)而占支配作用,呈现出明显的表面效应。全部由机械机构组成的微型机械几乎不存在,通常是机械与电子、生物技术组合而成的机电一体化系统。微型机械以其本身外形微小或其操作尺度极小为特征,已成为人们在微米范围内认识和改造客观世界的一项新技术。随着人们对自然界的认识和改造已从微米层次进入原子级、分子级的纳米层次,在纳米尺度上研究和应用原子、分子现象及其结构信息的一门高新科学技术——纳米科技便应运而生。1991年,《Science》杂志出版了以微型机械为主题的专集,将近十年后,又出版了以纳米机械为主题的专集,反映了这一领域的成果和重要性。

微机电系统(MEMS)和纳机电系统(NEMS)是机械科学技术的前沿领域,涉及电子工程、机械工程、材料科学、物理学、化学以及生物医学等多种工程技术和科学。微型机械的出现,一方面是现代科技发展的需要,另一方面也反映了人类对事物极限本质的认识和追求。微型机械由于几何尺寸的微小化,许多物理现象与宏观世界有很大的不同,这就向微小尺寸体系的物理研究提出了一个又一个急需回答的问题和挑战。传统的机械设计理论与方法在微型机械设计中已不再适用。微型机械研究发展至今,人们已经能够制造出各种微器件,然而,要将各种微器件有效地组合成具有一定功能的微机电系统就需要发展微机械设计理论。目前在微型机电系统研究中存在许多急需解决的有关机械设计的基础问题,如微摩擦学、微热力学、微流体力学和材料的微观力学特性和微机构学等。这些问题已严重限制了微机电系统的发展,必须

开展微型机械设计的基础研究。

作者从 1998 年开始涉足微机电系统的研究,在系统总结国内外有关微机电系统的最新研究进展基础上,在国内首先提出开展微机电系统设计基础研究,论述了微型机械设计学的研究范畴。针对微机械设计中存在的问题,选择具有代表性的两个关键问题:微机械构件材料力学特性和微机械特有的粘附问题来展开理论与实验研究。发展了纳米硬度计弯曲法,研究了多晶硅微构件的弯曲力学特性,并利用自行研制成功的电磁线圈力驱动的微拉伸装置研究了多晶硅微构件拉伸力学特性,得到了一系列有价值的实验数据;对微尺度下多晶硅薄膜微构件的强度随构件尺寸的变化进行了比较系统的研究;运用断裂力学理论对多晶硅微构件的断裂损伤特性进行了分析研究,提出表面粗糙度是引起多晶硅微构件断裂失效的主要原因,并研究了表面施加 OTS 膜后对微机械构件力学性能的影响;分析了表面张力以及 Casimir 力对微构件的粘附和稳定性的影响,给出了多晶硅微悬臂梁和微腔的抗粘附结构尺寸参数设计依据。作者在本研究领域做出了创造性的结果,发表了一系列有价值的学术论文,主要工作都发表在《Journal of Micromechanics and Microengineering》、《J. Mater. Res.》、《Materials Science and Engineering》、《Chinese Science Bulletin》、《Science in China A》等国际重要刊物上,有近 20 篇论文收入 SCI,SCI 引用 40 余次,在 Johns Hopkins University 著名的专家 William N. Sharpe 的综述论文“Fracture Strength of Polysilicon at Stress Concentrations”(《Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 12, No.3, 2003, pp302—312》)一文中,作者的研究成果被作为标志性成果引在图中,并给予较高的评价。本书正是上述问题的研究成果总结。令作者感到欣慰的是,在作者完成以上研究工作中,这一领域的研究工作仍得到很多研究人员的关注,有关专家又建议国家自然科学基金设立了两个重点项目(微机械学的若干基础问题研究、微-纳米尺度力学行为测量中的若干基本力学问题

研究)来深入开展这一领域的研究,相信这必将进一步推动微型机械的发展。

作者1998年在温诗铸院士指导下开始微型机械的研究,正是在温诗铸院士的精心指导下完成了博士学位论文。温诗铸院士渊博的知识、敏锐的洞察力、严谨求实的治学态度和兢兢业业的工作作风都给我留下了深刻的印象,并将对我今后的学习工作有极大的帮助。在此,谨向温诗铸院士表示衷心的感谢和深深的敬意。

作者感谢副导师孟永钢研究员多年来给予的鼓励、支持和帮助。此外,中国科学院物理研究所解思深研究员、清华大学摩擦学国家重点实验室邵天敏教授、邹茜、杨文言、赵蕾等老师在实验方面给予了很多帮助;北京大学微米/纳米国家重点实验室郝一龙、李志宏、李亭老师在构件制作方面给予了帮助;清华大学摩擦学国家重点实验室沈赢生、胡波、陈真勇、田煜、于浩等同学也给予了不少帮助;清华大学校医院、中国科学院物理研究所三环公司在实验方面也提供了帮助。在此,谨向上面提到的各位老师和同学表示诚挚的谢意。

作者还要感谢参加博士论文评阅和答辩的各位先生。他们是大连理工大学王立鼎院士,国家自然科学基金委雷源忠研究员,清华大学周兆英教授、胡元中研究员、刘理天教授,石油大学张嗣伟教授,上海大学龚振邦教授,中科院力学所赵亚溥研究员,北京理工大学毛谦德教授,武汉理工大学陈定方教授。

本研究得到了博士点基金(项目编号:2000000338)、国家自然科学基金重点项目(项目编号:50135040)、江苏省自然科学基金(项目编号:BK2002147)、江苏省高校自然科学基金重点项目(项目编号:02KJA460001)和教育部优秀青年教师资助计划项目的资助,谨在此表示衷心的感谢。

最后,还要感谢我的父母多年来对我的教育和培养,我的妻子和女儿对我的支持,以及所有在此期间关心过我的人们。

作者水平有限,许多观点、结论仅是个人一管之见,其中难免存在错误和不足,谨请读者批评指正。

丁建宁

2004年6月18日

摘 要

微机电系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)是一门新兴的交叉学科,微机械设计学是机械科学研究的前沿领域。本论文针对微机械设计中存在的问题,选择具有代表性的两个关键问题:微机械构件材料力学特性和微机械特有的粘附问题来展开理论与实验研究。本文首先发展了利用纳米硬度计弯曲法研究多晶硅微悬臂梁力学特性的方法,然后又研制了一种电磁力驱动微拉伸装置。分别利用这两种测试方法,实验研究了多晶硅微构件的弯曲和拉伸形变特性,得到了弹性模量和断裂强度的测量数据。用弯曲法和拉伸法测得的弹性模量分别为 $156 \text{ GPa} \pm 4.54 \text{ GPa}$ 和 $164 \text{ GPa} \pm 1.21 \text{ GPa}$ 。其中,拉伸法测得的数据与利用织构理论模型预测的结果十分吻合。经统计分析,测量得到的弯曲强度和拉伸强度分别为 $2.885 \text{ GPa} \pm 0.408 \text{ GPa}$ 和 $1.36 \text{ GPa} \pm 0.14 \text{ GPa}$ 。实验结果显示,多晶硅薄膜微构件的弯曲强度和拉伸强度随构件几何尺寸而变化。本文着重分析了试件宽度对拉伸强度的影响,从而指出 Toshiyuki Tsuchiya 等学者得出的微构件的拉伸强度与试件宽度无关的结论不可靠。此外,还研究了多晶硅微构件的断裂韧性,得到平均断裂韧性为 $1.53 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。采用极大似然法估计了断裂失效起源,并结合断口分析对多晶硅薄膜材料的断裂物理进行了研究,运用断裂力学理论对此进行了分析,提出表面粗糙度是引起多晶硅微构件断裂失效的主要原因。本文还研究了表面施加 OTS 膜后对微机械构件力学性能的影响,结果表明,施加 OTS 膜后显著提高了其拉伸强度。最后,详细讨论了在大气环境或有液体的环境下,表面张力对多晶硅微悬臂梁结构粘附的影响以及真空条件下量子力——Casimir 力对多晶硅微腔薄膜结构的粘附和稳定性的影响,探讨了不同表

面力作用下的抗粘附结构参数设计。结果表明,多晶硅微悬臂梁和薄膜微腔结构的粘附与材料的弹性特性、表面特性、构件的长度、厚度和构件与基体之间的间隙有关,而与构件的宽度无关。本文首次给出了不同间隙和表面力作用下典型的多晶硅微悬臂梁结构参数设计图和薄膜微腔结构参数设计图。这些结果可以应用于微型机械的设计,对于建立微型机械设计的理论体系具有重要意义。

关键词:微型机械,弹性模量,弯曲强度,拉伸强度,断裂韧性,粘附

Abstract

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) is a newly rising interdisciplinary technology. The mechanical design of MEMS is one of the frontiers of mechanical engineering. This dissertation takes up two key points among the existing problems in the development of MEMS, the mechanical behavior of MEMS materials and the stiction phenomenon in MEMS, for investigating theoretically and experimentally in detail. Firstly, a novel, direct and convenient method for micromechanical property measurements by beam bending using a nanoindenter has been developed. Secondly, a microtensile test device with a magnet-solenoid actuator and a fibre-optical displacement sensor has been designed and constructed. With these two test methods, Young's modulus and fracture strength of polysilicon films were measured. It has been found that the measured average values of Young's modulus are $156 \text{ GPa} \pm 4.54 \text{ GPa}$ and $164 \text{ GPa} \pm 1.2 \text{ GPa}$ by beam bending test and tensile test respectively. The latter falls within the bounds of the theoretical prediction based on the texture model. Statistical analysis of bending strength and tensile strength for various specimen sizes shows that the average bending strength of polysilicon microcantilever beams is $2.885 \text{ GPa} \pm 0.408 \text{ GPa}$, and the average tensile strength of polysilicon thin films is $1.36 \text{ GPa} \pm 0.14 \text{ GPa}$. Experimental results demonstrate that bending strength and tensile strength vary with the size of specimen. Especially, the size effect of specimen width on tensile strength was theoretically and experimentally studied. The study points out that the conclusion, given by Toshiyuki Tsuchiya, of the independence

of tensile strength on specimen width, is incorrect. In addition, the fracture toughness of microfabricated polysilicon thin films was measured to be $1.53 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0.11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. Furthermore, the rupture physics and crack origin of polysilicon thin films were analyzed by means of AFM, SEM and TEM. The maximum-likelihood method was also applied. It is indicated that the crack origin of polysilicon thin films is located on the surface of the specimens, and the surface roughness is the main factor dominating the fracture of polysilicon thin films. The mechanical properties of polysilicon thin films coated with OTS film were also investigated. It was found that tensile strengths of polysilicon thin films are enhanced greatly when they were coated with OTS films. At last, the roles of two microscale forces, the capillary force in ambient environment or with the rinse liquid and the Casimir force in vacuum, in stiction and stability of MEMS were discussed. The study on the design of anti-sticking structures under the forces shows that sticking and stability of microcantilevers and micro membrane strip cavities relate to Young's modulus of materials, surface properties, length of structures, thickness of structures and separation between the fixed surface and the deflecting component. The width of structures has no effect on the sticking and stability. A map of the size design of anti-sticking structures has been proposed for the first time. These results are expected to be useful for the design of MEMS, and of significance for establishing a framework of the design theory of MEMS.

Keywords: Micromachines, Young's modulus, Bending strength, Tensile strength, Fracture toughness, Sticking

符 号 表

A	弹性接触区面积
A_b	液桥面积
A_0	Hamaker 常数
A_s	有效裂纹面积
A_t	总的表面积
a	裂纹半长
a_0	平衡状态时的原子间距
a_c	裂纹失稳扩展的临界尺寸
a_1	线圈的内径
a_2	线圈的外径
B_m	常数
B_{rem}	剩磁感应强度
b	宽度
C_i	常数
C_{ij}	材料常数
c	光速
D	抗弯刚度
d_0	平均晶粒尺寸
E	样品的弹性模量
E_r	综合弹性模量
E_i	压头的弹性模量
E_s	两平板间的总表面能
E_{ox}	ox 方向的弹性模量
F	拉力

F_s	叶片弹簧产生的弹性恢复力
F_m	激励电流下产生的磁力
$F(d)$	修正后的 Casimir 力
$F(t)$	失效分布函数
$F_0(d)$	单位面积 Casimir 力
$f(\alpha, \beta)$	Fabry 因子
G	剪切模量
H	材料的硬度
H_x	磁场强度
$H_x\left(\frac{x}{a_1}\right)$	沿线圈轴向的磁场分布
$H_x(0)$	线圈中心的磁场强度
h_c	沿载荷垂直方向的接触深度
h_s	周边表面位移
$h_{\max}$	压入深度
h_i	卸载后残余压深
h_p	压深中塑性变形分量
h_e	压深中弹性变形分量
h^*	普朗克常数
$h_{i=0,1,2}$	不同高度
I_c	截面惯性矩
I	电流
J	J 积分值
K_I	断裂韧性
K_m	Loubet 弹塑性参数
K_0	刚度
K	量纲一平衡常数
K_C	量纲一极值平衡常数