

硅微型惯性器件理论及应用

王寿荣 编著

东南大学出版社

出版说明

根据国务院发(1978)23号文件批转试行的《关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定》，中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业规划教材编审、出版的组织工作。

为做好教材编审组织工作，中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组，聘请了有关院校的教授、专家 50 余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设研究、指导、规划和评审方面的专家组织，主要任务是协助船舶总公司做好高等学校船舶类专业教材的编审工作，为教材质量审查把关。

经过前四轮教材建设，共出版教材 300 余种，建立了较完善的规章制度，扩大了出版渠道，在教材的编审依据、计划体制、出版体制等方面实行了有成效的改革，这些为“九五”期间船舶类专业教材建设奠定了良好基础。根据国家教委对“九五”期间高校教材建设要“抓好重点教材，全面提高质量，继续增加品种，整体优化配套，深化管理体制和运行机制的改革，加强组织领导”的要求，船舶总公司于 1996 年又制定了“全国高等学校船舶类专业教材(九五)选题规划”。列入规划的选题共 133 种，其中部委级重点选题 49 种，一般选题 84 种。

“九五”教材规划是在我国发展社会主义市场经济条件下的第一个教材规划，为适应社会主义市场经济外部环境，“九五”船舶类专业教材建设实行指导性计划体制。即在指导性教材计划指导下，教材编审出版由主编学校负责组织实施，教材委员会(小组)进行质量审查，教材编审室组织协调。

“九五”期间要突出抓好重点教材，全面提高教材质量，为此教材建设引入竞争机制，通过教材委员会(小组)评审、择优确定主编，实行主编负责制。教材质量审查实行主审、复审制、聘请主编校以外的专家审稿，最后教材委员会(小组)复审，复审合格后由有关教材委员会(小组)发出版推荐证书，出版社方可出版。全国高校船舶类专业规划教材，就是通过严密的编审程序和高标准，严要求的审稿工作来保证教材质量的。

为完成“九五”教材规划，主编学校应充分发挥主导作用。规划教材的立项由学校申报，立项后由主编校组织实施，教材出版后由学校组织选用，学校是教材编写与教材选用的行为主体，教材计划的执行主要取决于主编校的工作情况。希望有关高校切实负起责任，各有关方面积极配合，为完成“九五”船舶类专业教材规划、为编写出版更多的精品教材而努力。

由于水平和经验局限，教材的编审出版工作和教材本身还会有很多缺点和不足，希望各有关高校、同行专家和广大读者提出宝贵意见，以便改进提高。

中国船舶工业总公司教材编审室

一九九七年四月

前 言

硅微型惯性器件是一类新型的惯性器件,具有体积小、重量轻、成本低,动态特性好、可靠性高等独特优点。自从 20 世纪 80 年代硅微型惯性器件问世以来,已受到各国同行的高度重视,纷纷投巨资加以研究。目前,国内外虽不断发表有关研究文章,但讲述这类惯性器件的专著和教材至今尚未见到。

本书是在参考国内外有关文献的基础上,依据船舶类专业教材“九五”规划指导小组所确定的大纲,并结合东南大学多年的科研实践编写而成。在编写过程中,充分注意了全书内容的系统性和完整性。

全书内容除绪论外,共分 7 章,第 1 章介绍微惯性器件的物理基础,第 2、3、4 章分别介绍硅微加速度计和硅微振动陀螺仪的结构、原理和误差理论,第 5、6 两章介绍了硅微惯性器件的加工和测控技术,第 7 章简单介绍了微惯性器件的组合及应用。

在本书编写过程中得到东南大学微机电系统研究课题组周百令、茅盘松、蔡体菁、张燕娥、陈德英、李宏生和苏岩等老师及博士生李明、裘安萍等的大力协助和支持,许多素材都直接来自他们的研究成果和文章。其中,周百令教授对全书编写进行了具体指导,张燕娥和苏岩做了大量的具体工作。书中还参考了黄庆安教授以及其他作者的有关著作和文章,特此鸣谢。

本书由哈尔滨工程大学张树侠教授和南京航空航天大学袁信教授担任主审,两位主审在百忙之中仔细审阅了书稿,并提出了不少宝贵意见。对于从事惯性领域研究的外校专家的支持,笔者表示诚挚的谢意。

由于微惯性器件理论发展时间较短,其理论体系和应用都有待进一步完善;还由于本书篇幅和作者专业知识所限,加上时间仓促,因此在取材和论述方面必然存在不当之处,敬请同仁批评指正。

本书系中国船舶工业总公司的“九五”规划教材,由东南大学组织实施出版,同时又是东南大学 100 年大庆规划的面向 21 世纪、体现东南大学教学改革成果的教材之一。

编 者

2000.8

目 录

0 绪 论

0.1 微机电系统与微型制造技术	(1)
0.2 硅微型惯性器件及微惯性测量组合	(3)

1 微型惯性器件的物理基础

(6)

1.1 硅材料的物理性能	(6)
1.1.1 微型惯性器件对材料的要求	(6)
1.1.2 硅的晶体结构	(6)
1.1.3 硅的导电性能	(9)
1.1.4 硅的机械性能	(10)
1.2 微型惯性器件的动力学基础	(12)
1.2.1 哥氏加速度和陀螺力矩	(12)
1.2.2 动量矩定理及刚体绕定点转动的欧拉动力学方程	(16)
1.2.3 常用坐标系及坐标系之间的转换	(19)
1.3 微机械元件的弹性理论基础	(22)
1.3.1 概 述	(22)
1.3.2 柱形杆的自由扭转	(24)
1.3.3 薄板弯曲问题	(26)

2 硅微型加速度计

(30)

2.1 概 述	(30)
2.2 原理结构	(30)
2.2.1 扭摆式硅微加速度计	(30)
2.2.2 悬臂梁式硅微加速度计	(37)
2.2.3 叉指式硅微型加速度计	(39)
2.2.4 隧道电流式硅微加速度计	(43)
2.3 误差分析及补偿	(46)
2.3.1 摆块的质心偏移引起的误差	(46)
2.3.2 挠性轴的初始自由角偏移引起的误差	(47)
2.3.3 非线性误差	(48)
2.3.4 温度误差及其他	(49)
2.4 硅微加速度计的测试与定标	(50)
2.4.1 概 述	(50)
2.4.2 加速度计重力场试验	(51)

2.4.3 加速度计的其他试验	(54)
3 硅微型框架驱动式陀螺仪	(56)
3.1 结构组成和作用原理	(56)
3.1.1 外框驱动式	(56)
3.1.2 内框驱动式	(57)
3.2 运动方程	(58)
3.2.1 坐标系及坐标变换	(58)
3.2.2 角速度的表示	(59)
3.2.3 运动方程	(60)
3.3 误差分析	(65)
3.3.1 重心偏移产生的干扰力矩	(65)
3.3.2 非等弹性力矩引起的漂移误差	(67)
3.3.3 结构变形和工艺误差引起的干扰力矩	(68)
3.3.4 运动物体线速度和交叉轴向角速度引起的误差	(69)
3.3.5 温度引起的误差	(69)
3.3.6 检测电路噪声引起的测量误差	(70)
3.4 结构设计	(70)
3.4.1 挠性轴的设计	(70)
3.4.2 框架的设计	(71)
4 硅微型梳状驱动陀螺仪	(75)
4.1 音叉式振动陀螺仪	(75)
4.1.1 基本原理	(75)
4.1.2 运动方程	(76)
4.1.3 误差分析	(77)
4.2 静电梳状驱动谐振器	(77)
4.2.1 静电梳状驱动线振动式谐振器	(78)
4.2.2 静电梳状驱动角振动式谐振器	(81)
4.3 硅微型梳状线振动驱动式陀螺仪	(81)
4.3.1 平板式梳状线振动驱动式陀螺仪	(81)
4.3.2 音叉式梳状线振动驱动式陀螺仪	(84)
4.4 硅微型梳状角振动驱动式陀螺仪	(86)
4.4.1 整体式 VWG	(86)
4.4.2 隔离式 VWG	(90)
4.5 谐振频率的调节	(92)
4.6 硅微型振动陀螺仪的计算机辅助分析	(93)
4.6.1 概述	(93)
4.6.2 动力学分析	(93)
4.6.3 静电场分析	(98)

5 硅微型惯性器件的制备	(102)
5.1 硅微机械加工技术简介	(102)
5.1.1 硅微机械加工环境	(102)
5.1.2 掺杂技术	(105)
5.1.3 光刻技术	(110)
5.1.4 腐蚀技术	(113)
5.1.5 LIGA 技术	(123)
5.1.6 键合技术	(125)
5.1.7 封装技术	(126)
5.2 硅微型惯性器件的制备	(127)
5.2.1 扭摆式硅微加速度计的制备	(127)
5.2.2 框架驱动式陀螺仪的制备	(128)
5.2.3 梳状驱动陀螺仪的制备	(129)
5.2.4 利用 LIGA 技术制备微电容式加速度计	(130)
6 硅微型惯性仪表的测控技术	(132)
6.1 几种微电容测量方法	(132)
6.1.1 利用闭环运算放大器对微小电容进行测量	(132)
6.1.2 基于电容充/放电原理的微电容测量	(136)
6.1.3 采用开关电容 Boxcar 积分的微电容测量	(141)
6.2 硅微型惯性仪表的测控回路	(150)
6.2.1 硅微加速度计的静电力平衡回路	(150)
6.2.2 框架驱动式陀螺仪的检测控制回路	(153)
6.2.3 梳状驱动陀螺仪的驱动检测回路	(155)
6.2.4 低电压的隧道电流加速度计的 CMOS 接口电路	(156)
7 硅微型惯性器件的组合及应用	(160)
7.1 硅微型惯性器件的组合形式	(160)
7.2 微惯性测量组合单元(MIMU)	(163)
7.2.1 基本结构组成	(163)
7.2.2 微机械惯性敏感装置的组合	(164)
7.2.3 单片集成的微惯性测量单元	(168)
7.3 硅微型惯性器件的应用	(169)
7.3.1 应用于汽车工程	(169)
7.3.2 应用于战术武器的制导系统	(172)
7.3.3 应用于小型、微型和纳米卫星	(175)
参考文献	(176)

0

绪论

0.1 微机电系统与微型制造技术

近几十年来,微电子科学发展非常迅速。超大规模集成电路(VLSI),特大规模集成电路(ULSI)等相继问世,集成度几乎每年翻一番。随着集成度的提高,其加工尺寸越来越小,已开始进入亚微米时期。微电子技术的进步,使得手持蜂窝式移动电话,地球低轨道上重仅10kg的电子新闻广播系统,以及能与20世纪70年代大型计算机相匹敌的个人计算机等都相继成为现实。微电子技术的进步也促进了微机械技术的兴起和发展,微膜、微梁、微齿轮、微凸轮、微弹簧、微沟道、微喷嘴、微锥体、微轴承、微连杆等微型构件相继面世。微机械技术和微电子技术相结合,就形成了一代全新的微机电系统(Micro Electromechanical Systems,简称MEMS),于是就有了各类微型传感器、微型执行器,如微米尺度的压力传感器、加速度计、陀螺仪、各类阀门、泵、微电机和谐振器等。一般来说,微机电系统是指可以批量制作的,集微型机械、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路,直至接口、通讯和电源等于一体的微型系统。微机电系统模型可以分成几个独立的功能单元,其输入是各类物理信号,通过传感器转换成电信号,经过量值处理、数据传输等环节后,通过执行器与外界作用或直接通过数据显示单元为观察者所接受。微机电系统的目标在于通过微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新技术领域,形成批量化产业。它们可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务。例如:尖端直径为 $5\mu\text{m}$ 的微型镊子可以夹起一个红血球;外形尺寸 $l\times b\times h$ 为 $7\text{mm}\times 7\text{mm}\times 2\text{mm}$ 的微型泵流量可达 $250\mu\text{m}/\text{min}$;已做出能开动的3mm大小的汽车和能钻入人体内脏和血管探测并排除故障的微机器人等。微机电系统在军事方面也有巨大的应用前景,例如:开发经济实用的微型制导、导航与控制系统;开发微小型和纳米卫星;开发新型的微型武器等。

微机电系统作为微米纳米科学与技术的一项主要研究内容,其目的在于开发物质潜在的信息和结构潜力,使单位体积物质储存和处理信息的能力实现又一次飞跃,在信息、材料、生物、医疗等方面将导致人类认识和改造世界能力的重大突破,从而给国民经济和军事能力带来深远的影响。因此,受到了美国、日本、俄罗斯和欧洲各国的高度重视,纷纷投巨资加以研究。

目前,美国在这方面的研究处于领先地位,早在20世纪60年代初期,就用各向异性蚀刻技术研制出第一个压力传感器,70年代已有部分微机械产品推向了市场,80年代研制出了首台硅微型静电电机。1982年,Binnig和Rohrer首先研制成功扫描隧道显微镜(STM),为人类在纳米级乃至原子级水平上研究物质的表面原子,分子的几何结构及与电子行为有关的物理、化学性质开辟了新的途径,因而获得1986年诺贝尔物理学奖。在军用方面的研究也处于领先地位。美国发展微机电系统关键性的研究中心基本上都分布在各个大学,如康奈

尔大学、斯坦福大学、加州大学柏克利分校、密执安大学及威斯康星大学等。美国国防部高级研究计划局重视并积极赞助 MEMS 的国防应用,现已建立了一条 MEMS 标准工艺线来促进新型装置的迅速开发和小批量生产。

微机电系统研究的最大投资国是日本。日本通产省制订了以工业界为主体的 MEMS 十年研究计划(1991~2000),由筑波大学、东京大学、东北大学、早稻田大学和富士通研究所等几十个单位参加,总投资 250 亿日元。计划研制两台微型样机,一台用于医疗,进入人体进行诊断和微型手术;另一台用于工业,对飞机发动机和原子能设备的微小裂纹维修。虽然日本在微机电系统技术领域目前还落后于美国,但日本拥有微机电系统开发所需的最先进的制造设备,潜力很大,发展速度很快。

欧洲各国的微机械传感器研究十分活跃。1992 年,欧共体为加强对微机械传感器研究工作的支持和领导,正式成立了 NEXUS 情报机构,挂靠在柏林微结构技术研究所,并投巨资对一些关键技术加以研究。

此外,俄罗斯应用力学研究所、荷兰德尔夫特大学等均积极开展精密微机械惯性传感器、微机电系统等研究。

我国政府也十分重视微机电系统技术的开发、研究及应用。1989 年,国家计委先后批准了侧重应用学科的南北两个传感技术国家重点实验室。南方基地设在中国科学院上海冶金研究所,其研究重点之一是:微传感器、微结构材料、微机械加工技术及微机电系统研究。北方基地设在中国科学院电子学研究所,侧重研究化学传感器、仿生传感器及灵巧智能传感器等。我国微机电系统研究始于 1992 年。目前,上海冶金所、长春光机所以及清华大学、东南大学等单位均开展了相应的研究工作,并做出了一定成绩。但就总体来说,我国目前尚处于工艺探索阶段。

微型机电系统研究涉及元件和系统的设计、材料、制造、测试、控制、集成、能源,以及它们与宏观世界的联接等多方面,研究理论涉及微电子学、微机械学、微动力学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微光学、材料学、物理学、化学和生物学等学科。

微小机械按尺度可分为 1~10mm 的微型机械,1 μ m~1mm 的微型机械和 1nm~1 μ m 的纳米机械。一般认为,微型机械是传统机械简单地缩小,它在工作原理、结构材料和设计理论等方面大体上可以沿袭传统理论。其制作方法大体上也是沿袭传统的加工方法,如超精密加工、电火花加工、激光加工、湿式腐蚀、离子束加工等。

随着机械结构尺寸的不断缩小,构件可承受的外载荷和体积力变得次要,而构件间的摩擦力和其他表面力成为影响性能的主要因素。微型机械的力学系统特征和材料特征大致有这样几个方面:

①力的尺寸效应 在微小尺寸领域,与特征尺寸 L 的高次方成比例的惯性力、电磁力(L^3)等的作用相应减小,而与尺寸的低次方成比例的粘性力、弹性力(L^2)、表面张力(L^1)、静电力(L^0)等的作用相对增大,这也就是 MEMS 常用静电力致动的理由。

②表面效应 随着尺寸的减小,表面积(L^2)与体积(L^3)之比相对增大,因而热传导、化学反应等加速,表面间的摩擦阻力显著增大。

③误差影响 对于微小构件,制造误差与构件尺寸之比相对增大;同时,由于微型机械往往是一次加工成型,一般不进行安装调试和修正,这样,微机构的运动特性受制造误差的影响较大。再加上弹性变形等的影响,使得运动精确度成为微机构研究的关键问题。

④材料的尺寸效应 构件尺寸减小,材料内部缺陷减少,材料的机械强度显著增加。微构件的弹性模量、抗拉强度、断裂韧性、疲劳强度以及残余应力等均与大构件的不同,而且有些表征材料性能的物理量需要重新定义等等。

由此可见,微型机械不是传统机械单纯地在尺度上的微小变化,微型机械在尺度、构造、材料、制造方法和工作原理等方面都与传统机械截然不同。因而作为微型机械设计基础的微机械学或纳米机械学在学科基础、研究内容和研究方法等方面也将与传统机械学不同。

微型机械一般用硅、金属薄膜、高分子聚合物、陶瓷等材料制作。其制造工艺类似于半导体加工工艺,包括光刻、刻蚀、淀积、外延生长、扩散、离子注入、测试、监测及封装等。微米级制造工艺是批制作工艺,可以批量制造,因而成本较低。当微结构尺寸小到纳米量级时,由于已经接近材料的极限尺寸,一般是先由有限个原子构成基本功能元件,再由这类新元件组成更复杂的器件。表征这种纳米功能元件的参量具有显著的量子效应和统计涨落特性,需要研究和发展新效应、新理论、新技术和新材料。纳米级制造包括微米级制造中的一些技术,如离子束光刻等,但也包括为了利用材料的本质特性以期获得理想的结果而对材料进行原子量级的修改及排列的技术。

0.2 硅微型惯性器件及微惯性测量组合

微机电系统和微型制造技术的发展推动了微惯性器件和微惯性测量组合(Micro Inertial Measurement Unit,简称MIMU)技术的发展,导致新一代陀螺仪和加速度计的产生。包括硅微机械加速度计、硅微机械陀螺仪、石英晶体微惯性仪表、微型光纤陀螺仪、微型光波导陀螺仪等等。其中,用硅材料制作微惯性器件不仅使传统的惯性器件实现微型化,而且由于硅的微加工技术与集成工艺技术的相容性,可以将敏感器件与处理电路完全集成在一个硅片上,从而能实现真正意义上的机电一体化,这正是目前人们追求的目标,其发展势头也最猛。

1977年,美国斯坦福大学首先采用各向异性蚀刻与微光刻技术制成一种开环微型加速度计,并于20世纪80年代初首次投放市场,随后许多公司也纷纷仿效研制,但这些装置性能较差,动态范围小,不能满足军用惯性系统的要求。1985年,在美国军方合同的资助下,德雷珀实验室(The Charles Stark Draper Laboratory Inc. 简称CSDL)开始研制可满足军用惯性系统要求的低成本微型惯性器件,并于1988年率先研制出了框架驱动式硅微角振动陀螺仪样品,具体结构详见图1.10,其平面尺寸为 $300\mu\text{m}\times 600\mu\text{m}$,该样品经过17道工艺流程,在60Hz带宽其分辨率为 $1\,000\,000^\circ/\text{h}$ 。与此同时,加州大学柏克利分校传感器与执行器研究中心(the Berkeley Sensor Actuator Center,简称BSAC)研制出了静电梳状驱动谐振器(electrostatic comb-drive resonator),如图4.3所示。在此基础上,CSDL与罗克韦尔公司(现在是波音北美公司,简称BNA)合作,于1993年研制出了第二代微机械陀螺仪——音叉式振动陀螺仪(Tuning Fork Vibrating Gyro,简称TFG),见图1.12,或者称之为硅微梳状线振动驱动式陀螺仪。该陀螺仪性能大大改善,同样在60Hz带宽下,1996年其分辨率已达 $120^\circ/\text{h}$,经过补偿后偏置稳定性达 $33^\circ/\text{h}$,预期将达 $1^\circ/\text{h}$ 以下。工艺流程也简化为3道工序,不仅提高了性能,也大大降低了成本。1996年,CSDL又研制出第三种结构型式的陀螺仪——振动轮式陀螺仪(VWG),见图4.13,或称之为硅微型梳状角振动驱动式陀螺仪。VWG和TFG的区别在于VWG采用角振动式梳驱动谐振器,而TFG是采用线振动式梳驱动谐

振器。此外,VWG 比 TFG 更容易实现驱动轴和检测轴谐振频率的一致。

CSDL 在发展微机械陀螺仪的同时,也在积极研制硅微扭摆式静电力平衡加速度计,到 1996 年已发展了量程分别为 100 000g、100g、10g 和 2g 的 4 个系列,动态范围达 10^5 ,基本满足了军用和民用的需要。

在研制成功微机械陀螺仪和微机械加速度计的基础上,CSDL 于 1994 年首次推出了由三只微机械陀螺仪和三只微机械加速度计组成的微惯性测量组合。他们的做法是将六只惯性传感器安装在立方体的三个正交平面上,构成微机械惯性敏感器组合(Micro Mechanical Inertial Sensors Assembly,简称 MMISA),其中每个传感器都拥有自己的专用集成电路(Application Specific Integrated Circuits,简称 ASIC),产生相应的输出,然后送给微处理器进行数据处理。

BSAC 在 1989 年首次研制成静电梳驱动谐振器后,也相继推出了单自由度和双自由度的硅微机械陀螺仪和加速度计,并与桑地亚国家实验室(Sandia National Lab. 简称 SNL)合作,于 1998 年采用桑地亚的模块化、单片微机电系统工艺(the Sandia Modular, Monolithic, Micro-Electro-Mechanical Systems Technology,简称 M³EMS)首次将陀螺仪、加速度计及相关的电路集成在同一芯片上(见图 7.7),构成了单片的三维 MIMU,实现了真正的机电一体化。

除了 CSDL、BSAC、BNA 和 SNL 外,在美国,加州理工学院喷气推进实验室(JPL)、罗克韦尔(Rockwell)的 Hughes 研究实验室,以及诺思罗普(Northrop)、利顿(Litton)、森德斯坦德(Sundstrand)、基尔福特(Kearfott)和 AD(Analog Devices)等公司,日本的姬路技术学院、多摩川精机公司、日立公司、东北大学、村田制作所等,瑞士 Neuchatel 大学,英国 Newcastle 大学、Durham 大学,荷兰德尔夫特大学,法国 SAGEM 公司,德国的 LITEF 公司、HSG-IMIT、Karlsruhe 原子能研究中心,以及俄罗斯的 Vector Ltd. 等都在积极研制微机械陀螺仪或微机械加速度计,并取得了瞩目的成就。其中德国的 HSG-IMIT 开发了一种解耦振荡模式的硅微梳状角振动驱动式陀螺仪(MARS-RR1,见图 4.16),其偏置稳定性在 1998 年已达到 $65^\circ/\text{h}$ 。美国 JPL 和 Hughes 研究室分别研究用隧道电流检测取代电容检测,以提高检测灵敏度,已研制出高灵敏度的硅微机械加速度计,正在研制高灵敏度的隧道电流式微机械陀螺仪,有望能开发出 $1^\circ/\text{h}$ 的 MIMU。

我国在这方面的研制工作尚处于起步阶段,目前的研究力量主要集中在清华大学、东南大学、北京大学、北京理工大学、南京理工大学、西北工业大学等少数高等院校和中科院上海冶金所、电子部 13 所、49 所等少数科研院所里。1995 年底,在原国家科委、国家教委、国防科工委和国家自然科学基金委员会的联合主持下,第二届微米/纳米技术全国研讨会在北京召开。会上确定,选择 MIMU 作为“九五”微米/纳米技术预研的需求牵引,并提出以 MIMU 中的微型惯性仪表为“九五”主攻方向,重点突破微型惯性仪表在材料、工艺、设计等方面的关键,并立项进行预研攻关。目前已有不少关键技术取得突破,并有望在“九五”末推出一些中低精度的微机械惯性仪表样品。

和传统的惯性仪表相比,硅微机械惯性仪表具有以下一些特点:

①体积小、重量轻 硅微机械惯性仪表都是利用高频振动的原理工作的,并且是通过半导体加工工艺制作的,整个芯片不仅体积小,而且重量轻。例如,CSDL 研制的微惯性器件,其边长都小于 1mm,惯性器件芯片的重量仅为 1.2mg;由 MMISA 和 ASIC 混合而成的三

维 MIMU, 体积仅为 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 0.5\text{cm}$, 重量仅为 5g 重。由 SNL 和 BSAC 研制的三维 MIMU 芯片, 其平面尺寸仅为 $0.6\text{cm} \times 1\text{cm}$ 。

②成本低 由于是批量制作, 一片 3 英寸或 4 英寸的硅片上可以制作成百上千个微惯性器件, 当采用成熟的工艺、大批量生产时, 成品率很高, 器件的成本是微不足道的, 这时, 微惯性仪表的成本将主要取决于封装、测试和 ASIC。当实现真正意义上的机电一体化时, 其成本将会大大降低。

③可靠性好 可靠性的提高来源于三个方面, 一是因为没有高速旋转的转子, 可视为固态装置, 所以工作寿命长、抗冲击, 甚至可以承受 $100\,000\text{g}$ 以上的冲击; 二是因为它的体积小、重量轻、成本低, 特别适合于采用冗余配置方案, 使可靠性得到进一步提高; 三是因为集成度高, 可将惯性器件和电子线路集成在同一芯片上, 减少了干扰, 提高了可靠性。

④功耗低 微惯性器件体积小、重量轻, 有的还工作在真空状态下, 其功耗微乎其微。

⑤易于数字化和智能化 微惯性仪表可做成频率输出形式, 能对输出信号进行全数字处理, 消除了因 A/D 或 V/F 变换而引入的误差, 同时也便于应用微处理器进行信号处理, 对输出信号进行补偿。

⑥测量范围大 传统的加速度计, 由于检测质量较大, 不宜测量高 g 的加速度, 而微机械加速度计, 其检测质量很小, 可以用来进行高 g 的测量。例如, CSDL 就研制出了 $100\,000\text{g}$ 量程的加速度计, 可用来对炮弹的发射过程进行在线检测和研究。陀螺仪是一种测量角速度的仪器, 对于一般的转子陀螺仪, 由于动量矩较大, 测量范围受到力矩器等诸多因素的制约。而微型陀螺仪则可以很容易达到较大的测量范围。

目前, 微机械加速度计的性能指标已可以和传统的加速度计相媲美, 但微机械陀螺仪的性能, 尤其是精度指标还比不上传统陀螺仪, 只能应用于中低精度要求的场合。随着技术的进步, 新原理、新结构、新材料、新工艺将不断涌现, 微惯性仪表的发展前景一片光明。

1 微型惯性器件的物理基础

1.1 硅材料的物理性能

1.1.1 微型惯性器件对材料的要求

微型惯性器件尺寸微小,通常在微米数量级,微型惯性器件加工制造是建立在微米/纳米加工技术基础上的。微型惯性器件对材料的要求是:

1) 具有可微机械加工的特性 微机械加工技术是在集成电路工艺技术,如光刻、扩散、离子注入、外延和淀积等技术的基础上,再通过腐蚀、键合及一些特殊的加工手段将材料加工成符合一定要求的尺寸和形状。

2) 具有一定的机械性能 微型惯性器件在一定的作用力作用下会进行高频振动或其他运动。因此,要求其材料必须具有足够的弹性性能,必须具有较高的强度和疲劳极限,具有较好的刚度和抗冲击性能,并具有稳定的磁性能和化学性能等。

3) 具有较好的电性能 微型惯性器件作为传感器或执行器件,需要进行非电信号和电信号之间的转换,而微惯性器件本身的结构尺寸又非常微小,这就要求微型惯性器件传递电信号部分具有优良的导电性能,而其余部分则要求具有较好的绝缘性能。

4) 具有较好的热性能 由于温度变化时,会引起微型惯性器件尺寸的变化、谐振频率的变化,以及阻尼的变化等,从而对微惯性器件的工作性能造成影响,因此制作微型惯性器件的材料必须具有较好的热性能。

目前,能基本满足上述要求的材料有:半导体材料硅、锗、砷化镓,金属铌,以及石英晶体等。其中,尤以硅材料为最常见。

1.1.2 硅的晶体结构

1) 多晶体和单晶体

固体可分为晶体和非晶体。原子(或分子、离子等)按一定的周期性排列的固体称为晶体。晶体材料可以是单晶体,或多晶体。常见的晶体有天然的石英、食盐、金刚石等。晶体的特点是原子的排列呈周期性,外形上通常都具有规则的几何形状,如食盐的晶体为立方体,石英的晶体为六方柱体等。

常见的非晶体有玻璃、松香、橡胶、沥青等,它们的原子排列没有周期性,通常也没有固定的外形。

晶体有固定的熔点,在晶体各个方向上的物理和化学性质,如导热性、导电性、酸碱腐蚀速度等是不一样的。这种性质称为物质的各向异性。

非晶体没有固定的熔点,当温度升高时,它们逐渐软化,最后变为完全流动的液体。在非晶体各个方向上的物理和化学性质相同。这种性质称为物质的各向同性。

单晶体是指在整个晶体内,原子都是按周期性规则排列的。

多晶体可把整个晶体分成许多小区域,在每个小区域内的原子是按周期性规则排列的,但这些小区域的晶体取向却各不相同。我们可以把多晶体看成是由许多取向不同的小单晶体(晶粒)组成的。在多晶体内,晶粒之间存在着晶粒间界,影响晶格的完整性。

2) 晶面和晶向

由于单晶体是原子周期性规则排列所组成,因此在单晶体中可以划分出一系列彼此平行的平面,这些平面被称为晶面。晶面的方位不止一种,为了加以区别,通常用“晶面指数”来表示某一方位的晶面。晶面指数是用该晶面与直角坐标系的三个坐标轴截距的倒数化为互质的整数比来定义的。例如某晶面与 x 、 y 、 z 轴的截距都为 a ,其倒数为 $1/a$,互质的整数都可化为1,这样的晶面就写成 (111) 面,如图1.1(a)所示。如果晶面与 x 、 y 轴的截距为 a ,而与 z 轴平行,这就是 (110) 面,如图1.1(b)所示。如果晶面与 x 轴的截距为 a ,与 y 、 z 轴都平行,这就是 (100) 面,如图1.1(c)所示。

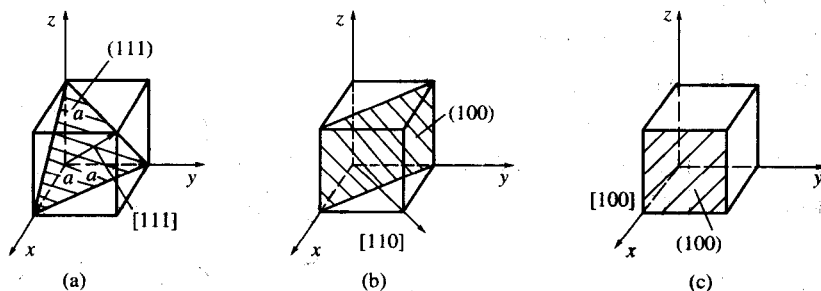


图 1.1 晶面和晶向

(a) (111) 面的晶面和晶向; (b) (110) 面的晶面和晶向; (c) (100) 面的晶面和晶向

晶体中的晶向是指和晶面垂直的方向,它是晶面生长的方向。通常用圆括号表示平面,用方括号表示晶向,如 (111) 、 (110) 、 (100) 晶面的晶向分别为 $[111]$ 、 $[110]$ 和 $[100]$ 。

晶体的各向异性是因为在晶体中不同晶面上的原子密度不一样。如单晶硅中 (111) 面上原子密度最大,在扩散中,杂质原子沿 $[111]$ 方向扩散速度最慢,所以便于控制,容易获得均匀平整的结面。其次,当晶体受到外力作用而破裂时,往往是沿着某一些晶面裂开,这种性质称之为晶体的解理性。裂开时所沿的晶面叫解理面。硅最容易解理的晶面是 (111) 面,其次是 (110) 和 (100) 面。通常所用的硅片都预先切好一个“定位面”,其目的就是在划片时能对准解理面的方向。这样,硅片会沿着解理面整齐地裂开。另外,在生长单晶时,沿 $[111]$ 方向生长速度也较慢,容易生长成单晶。

3) 硅的晶体结构

晶体中原子的排列是很规则的,根据其规律性,将其分割成无数个最小重复单元。整个晶体就是由这种最小单元重复地按一定规律,无间隙地排列而成的,这种最小单元称之为原胞。

硅晶体中原胞实际上是由两个面心立方晶格沿空间对角线彼此位移 $1/4$ 空间对角线套构而成。它们的原子结构如图1.2所示。在它八个顶角上各有一个原子,在六个面的中心也各有一个原子(故称之为面心立方体),另外,在四根空间对角线的四分之一处也各有一个原子。这种结构形式,因为与金刚石的晶体结构相同,所以称为金刚石结构。

硅原子最外层有四个价电子和四个空位。在晶格中,每个原子周围都有四个最靠近的原子做它的邻居,每个原子拿出一个价电子和它的一个邻居共用。同样,每个邻居也拿出一个价电子和它共用。这一对共用的价电子使两个硅原子之间产生了一种束缚力,就像链条一样把两个原子拴住。这两个共价电子所形成的束缚作用就称作共价键。

硅的共价键结构画成平面图如图 1.3 所示。图中,原子之间的共价键用平行的两条直线来表示。从图中可以看出,每个硅原子通过共价键与周围四个硅原子相结合。

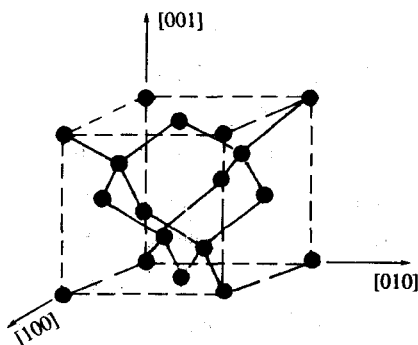


图 1.2 硅原子结构

4) 硅的晶格缺陷

硅单晶体中的原子排列是规则的,但它的晶格也会存在着缺陷。晶体中的缺陷可分为以下三类:

- (1) 点缺陷 —— 主要是空位和间隙原子;
- (2) 线缺陷 —— 主要是位错;
- (3) 面缺陷 —— 主要是层错。

其中影响最大的是位错。位错是一种线缺陷。单晶体中原子的排列是有规则的,但是在单晶的生长过程中,由于外界的影响,使得原子在排列的时候会出现一些差错。位错有好几种,其中一种如图 1.4 所示,称为棱位错。在图中“ $\perp$ ”处,原子的排列出现了缺陷,即是说在“ $\perp$ ”处出现了位错。位错在晶体中会延伸,在“ $\perp$ ”处出现的这个位错会沿着垂直于纸面的方向延伸到晶体的表面。

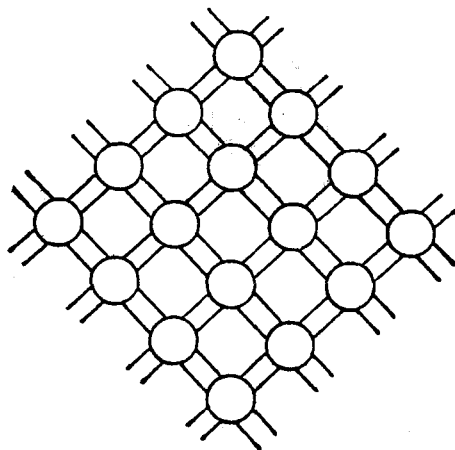


图 1.3 硅的共价键结构

产生位错的原因很多,除了在形成单晶时会产生位错外,在微型惯性器件的制造过程中也会产生位错——二次位错。产生二次位错的原因有:

(1) 内应力引起的失配位错 当硅中掺有那些原子半径与晶体原子半径大小不一样的杂质(失配杂质)时,或在外延层中,由于衬底和外延层的掺杂种类和浓度不同,形成衬底和外延层之间的失配引起外延层的弯曲。当弯曲达到一定程度时,就会出现失配位错。此外,晶体内金属杂质原子沉积也会出现位错。

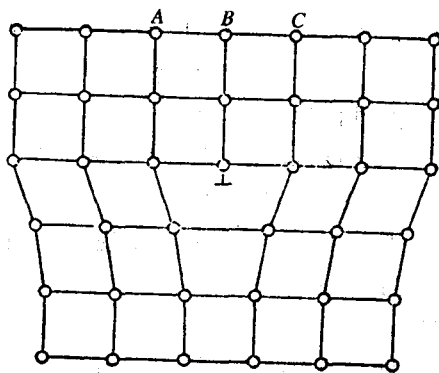


图 1.4 棱位错

(2) 外应力引起的位错 在晶片的加工(切片、磨片、抛光)和器件制造过程中引起的表面损伤,经高温处理会产生位错。此外,在氧化、扩散时的高温热处理过程中也会产生位错。

(3) 应力突变引起的位错 这是由于在扩散区边缘处应力发生突变所引起的。

位错的存在将严重影响到生产器件时的工艺控制,从而影响器件的性能和成品率。

针对产生位错的原因,我们可以采取以下几项措施来减少二次位错:

(1) 尽量避免晶片的一切机械损伤;

(2) 尽可能降低氧化和扩散的温度,以减小高温处理时的温度不均匀性;

(3) 尽量克服由于掺杂原子大小不匹配而产生的应力。例如用砷和磷以一定比例同时掺杂来代替再生的磷掺杂。

1.1.3 硅的导电性能

1) 本征半导体和平衡载流子

硅是一种半导体。纯净的半导体单晶在一定的温度下,由于热激发而成对地产生一些电子和空穴,这种没有杂质只有电子—空穴对参加导电的半导体称为本征半导体。在本征半导体中,电子和空穴的数目相等。

当导电电子在运动中与空穴相遇时,导电电子就有可能又回到空位上去,使一对电子和空穴消失,这种现象称之为“复合”。显然,如果晶体中的电子和空穴数目越多,则复合的机会也越多,这样就限制了半导体内的电子和空穴数目,不使它们越来越多。在一定的温度下,单位时间内产生的电子空穴和复合掉的电子空穴数目相等。这时半导体内的导电电子和空穴就可保持一定的浓度。此时所处的状态称为动态平衡状态。平衡时半导体内的载流子就称为平衡载流子。

当温度升高时,热激发的作用增强,电子和空穴的产生超过了复合,随着电子和空穴数的增加,其相遇而复合的机会也增加了。当电子和空穴数增加到一定数值时,产生和复合又达到新的平衡。这时本征载流子浓度又保持恒定,但比原来温度下的浓度要大。所以,平衡载流子浓度随着温度上升而增加。这就是为什么随着温度增加半导体导电能力大大增加的原因。

纯净的硅在室温下的本征电阻率为 $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$, 介于导体 ($< 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$) 和绝缘体 ($> 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) 之间。硅的导电类型可分为电子型(N型)和空穴型(P型),可以通过掺杂来进行控制。

2) 施主杂质和N型半导体

硅原子最外层有4个价电子,在晶格中以共价键与周围4个硅原子各共用一个电子。当在硅中加进少量磷原子,磷原子最外层有5个电子,当磷原子与周围4个硅原子形成共价键时,多出了1个价电子,它受原子核的束缚很弱。因此,一个五族元素原子加进硅中就可提供一个导电电子。五族元素的这种作用称为“施主”作用。五族元素称施主杂质或N型杂质。施主杂质除了磷以外,还有砷、锑等。

通过扩散向硅中掺入的磷原子最大浓度可达 $10^{20} \sim 10^{21}/\text{cm}^3$ 。在常温下,硅本征载流子浓度仅为 $10^{10}/\text{cm}^3$ 左右。因此掺入施主杂质后,硅中起导电作用的主要是由施主杂质所提供的自由电子。这种主要依靠电子导电的半导体称为N型半导体。

3) 受主杂质和P型半导体

如在硅中加进硼原子,硼是三族元素,当一个硼原子取代一个硅原子后,它同四个邻居共价结合时还缺少一个电子,它就从附近硅原子的共价键中夺取一个电子来填补。这样,被夺取了一个电子的地方就产生了一个空穴,而硼原子由于多了一个电子而成为带负电的硼离子。因此,三族元素在硅中能接受电子而产生空穴。三族元素的这种作用称为“受主”作

用。三族元素为受主杂质或 P 型杂质。除了硼外,属于三族元素的还有铝、镓、铟等。

通过扩散向硅中掺入的硼原子最大浓度可达 $10^{19} \sim 10^{20}/\text{cm}^3$ 。大大超过本征情况下的电子和空穴数。因此,掺入受主杂质后,半导体中起导电作用的主要是受主杂质产生的空穴。这种主要依靠空穴导电的半导体称为 P 型半导体。

硅中掺入微量的五价元素(磷)或三价元素(硼)后,其导电能力成百万倍地提高,并且这种导电能力随着掺杂浓度的提高而提高,这是硅材料的一个最突出也是最重要的特性。在微型惯性器件的制备中,常利用硅材料这个特性,研制电容极板,构成信号器、力矩器和驱动器。

例:硅原子的密度约为 $5 \times 10^{22}/\text{cm}^3$,若在本征硅中掺入 $6 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的磷原子,此时硅中磷原子所占的比例约为 10^{-7} (即仅占千万分之一),但其电阻率已降到 $1\Omega \cdot \text{cm}$,即导电能力提高了 20 万倍。

由此可见,虽然掺进的杂质原子含量甚微,但它们对硅的导电能力却起了决定性的作用。正是由于这种特性,在研制硅微型惯性器件的过程中,对工作环境要求特别严格,以防有害杂质进入而破坏器件的参数。这里要指出的是,上面所讲的硅材料是非常纯净的。硅的纯度常用 ppm(10^{-6} ,即百万分之一)来表示。 $1\text{ppm} = 10^{-4}\%$,其纯度为 99.9999%,即 6 个“9”。通常我们要求达到 9 个“9”以上的纯度(10^{-9} 或 1ppb,即十亿分之一)。

1.1.4 硅的机械性能

硅作为一种优良的半导体材料,广泛应用于各种半导体器件中。微电子工业就是利用了硅单晶极好的电子学方面的特性。而硅也有很好的机械特性。例如,硅单晶的断裂强度为 $7.0 \times 10^9 \text{Pa}$,比不锈钢($2.1 \times 10^9 \text{Pa}$)高;努氏硬度为 $850 \text{kg}/\text{mm}^2$,比不锈钢($660 \text{kg}/\text{mm}^2$)强;弹性模量最高为 $1.9 \times 10^{11} \text{Pa}$,与不锈钢($2.0 \times 10^{11} \text{Pa}$)接近……因此,硅也是一种重要的微机械材料,可作为微传感器、微执行器的基本材料。硅与其他材料的机械特性比较见表 1.1 所示。

和一般金属材料相比,硅也有其一定的特殊性。

(1) 硅晶体的各向异性,其机械特性会沿不同的晶向各异。图 1.5 显示了硅的弹性模量与其(100)平面内方向的相关性。

(2) 呈现一定的脆性,硅材料常以断裂方式屈服,而一般金属则以塑性形变屈服。微型惯性器件常用硅片制作,硅圆片很薄,其厚度一般为 $250 \sim 500 \mu\text{m}$,直径为 $5 \sim 13 \text{cm}$,极易碎裂,而同样尺寸的不锈钢片则很容易产生塑性形变。

(3) 单晶硅材料有沿着一定解理面解理的倾向,特别是当边缘、表面或体缺陷引起应力集中在(或沿着)解理面时,解理就更容易发生。事实上,碎片多数是由硅片边缘的滑移线和其他裂缝引起,需要加强对硅表面、边缘缺陷和机械损伤的控制。此外,切、磨、抛光等工序也会带来机械损伤,高温工艺、多重薄膜的淀积等也不可避免地要在硅片中引入一些内应力,这些应力与边缘缺陷、表面缺陷和体缺陷相耦合会引起应力集中,从而使硅片易于解理。

(4) 硅材料机械特性会随掺杂浓度的变化而变化,例如,其弹性模量 E 会随着离子浓度的增加而增加,当硼离子浓度达 1×10^{20} 时, E 增加 30% 左右。

上述因素说明,尽管高质量的单晶硅的机械性能较好,但用它制作的微型惯性器件的性能还将受到晶向、表面、边缘、体缺陷、晶体生长、抛光、掺杂等因素的影响。必须仔细考虑这些因素的影响。具体来说,应注意以下几个方面:

1.1 硅材料的物理性能

表 1.1 硅及在 IC 工艺中常用材料的机械性能及其比较

材料	屈服强度 /GPa	Knoop 硬度 /kg · mm ⁻²	杨氏模量 /(10 ² · GPa)	密度 /g · cm ⁻³	热导率 /W · (cm °C) ⁻¹	热膨胀系数 /(10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
金刚石*	53	7000	10.4	3.5	20	1.0
SiC*	21	2480	7.0	3.2	3.5	3.3
Al ₂ O ₃ *	15.4	2100	5.3	4.0	0.5	5.4
Al ₂ O ₃ #	—	—	—	3.5 ~ 3.8	—	—
Si ₃ N ₄ *	14	3486	0.89	3.4	0.2	1.5 ~ 3.0
Si ₃ N ₄ #	—	1000 ~ 4000	0.66	3.0 ~ 3.2	—	3.9 ~ 4.2
铁*	12.6	400	2.0	7.8	0.8	12
SiO ₂ (纤维)	8.4	820	0.7	2.5	0.014	0.55
SiO ₂ #	—	—	—	2.2	—	—
硅*	7.0	850	1.9	2.3	1.5	2.3
多晶硅#	2 ~ 3	—	1.5 ~ 1.7	—	0.3	—
钢	4.2	1500	2.1	7.9	0.97	12
W	4.0	485	4.1	19.5	1.8	4.5
不锈钢	2.1	660	2.0	7.9	0.33	17.3
铝	0.17	130	0.7	2.7	2.4	25
聚酰亚胺	—	—	0.06	—	—	—

注:上标带有 * 表示单晶结构;上标带有 # 表示薄膜结构。

- (1) 硅材料应具有尽可能低的缺陷密度,以保证潜在的应力集中的区域最小;
- (2) 设计微机械器件应尽可能小,以使其中包含的缺陷数尽可能少,当然有些器件可以做较大,但要用一些机械支承的办法,如把硅键合到玻璃上等。
- (3) 尽可能减少切、磨、抛光等机械加工步骤,最好是用化学腐蚀方法,而不是划片的方法把微机械元件从硅圆片中分离出来;
- (4) 如果一些切、磨、抛光等机械加工步骤必不可少,那么在这些步骤后应再用化学腐蚀的方法去除高损伤区域;
- (5) 许多用各向异性腐蚀形成的微机械结构常常边缘很尖,这也会引起应力积累和集中,所以在各向异性腐蚀之后,最好再用各向同性腐蚀液使边缘平滑化;
- (6) 可在硅表面应用一些不易磨损的、耐腐蚀的薄膜涂层,像 CVD、SiC 或 Si₃N₄ 等,以保护硅表面,避免直接的机械接触。
- (7) 在 VLSI 研制中应用的低温工艺,如高压氧化、等离子增强氧化、CVD 淀积等在硅的微机械学应用中同样重要。由于不同的淀积层、不同的掺杂区域具有不同的热膨胀系数,高温循环不可避免地在硅片中导致应力集中。低温工艺将会缓解上述热失配。