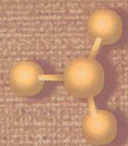




国防科技图书出版基金

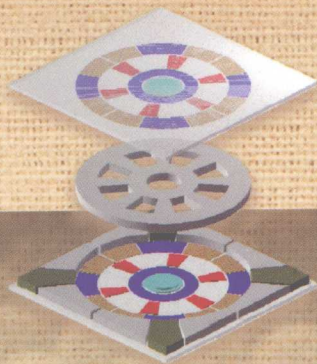


微米纳米技术丛书
MEMS与微系统系列

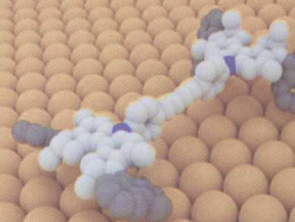
微型惯性器件 及系统技术

Micro Inertial Devices and
System Technologies

■ 丁衡高 朱荣 张嵘 等著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



014039249

TN965

26



国防科技图书出版基金

微米纳米技术丛书 · MEMS 与微系统系列

微型惯性器件及 系统技术

Micro Inertial Devices and System Technologies

丁衡高 朱荣 张嵘 董景新 杨拥军 郭美凤 等著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1726663

TN965
26

045020110

图书在版编目(CIP)数据

微型惯性器件及系统技术/丁衡高等著. —北京:国防工业出版社, 2014. 2

(微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列)

ISBN 978-7-118-09082-6

I. ①微... II. ①丁... III. ①微电子技术-惯性元件-研究 IV. ①TN965

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第018350号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 235 千字

2014年2月第1版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 76.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰			
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新	
秘 书 长	杨崇新			
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明		
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	邬江兴
	刘世参	芮筱亭	李言荣	李德仁
	李德毅	杨 伟	肖志力	吴有生
	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起
	崔尔杰	韩祖南	傅惠民	魏炳波

《微米纳米技术丛书·MEMS与微系统系列》

编写委员会

主任委员 丁衡高

副主任委员 尤 政

委 员 (以拼音排序)

邓中亮	丁桂甫	郝一龙	黄庆安
金玉丰	金仲和	康兴国	李佑斌
刘晓为	欧 黎	王晓浩	王跃林
温志渝	邢海鹰	杨拥军	张文栋
赵万生	朱 健		

序

1994年11月2日,我给中央领导同志写信并呈送所著《面向21世纪的军民两用技术——微米纳米技术》的论文,提出微米纳米技术是一项面向21世纪的重要的军民两用技术,它的出现将对未来国民经济和国家安全的建设产生重大影响,应大力倡导在我国及早开展这方面的研究工作。建议得到了当时中央领导同志的高度重视,李鹏总理和李岚清副总理均在批示中表示支持开展微米纳米技术的跟踪和研究工作。

国防科工委(现总装备部)非常重视微米纳米技术研究,成立国防科工委微米纳米技术专家咨询组,1995年批准成立国防科技微米纳米重点实验室,从“九五”开始设立微米纳米技术国防预研计划,并将支持一直延续到“十二五”。

2000年的时候,我又给中央领导写信,阐明加速开展我国微机电系统技术的研究和开发的重要意义。国家科技部于当年成立了“863”计划微机电系统技术发展战略研究专家组,我担任组长。专家组全体同志用一年时间圆满完成了发展战略的研究工作,这些工作极大地推动了我国的微米纳米技术的研发和产业化进程。从“十五”到现在,“863”计划一直对微机电系统技术给以重点支持。

2005年,中国微米纳米技术学会经民政部审批成立。中国微米纳米学术协会经过十几年的发展,也已经成为国内学术交流的重要平台。

在总装备部微米纳米技术专家组、“863”专家组和中国微米纳米技术学会各位同仁的持续努力和计划的支持下,我国的微米纳米技术已经得到了长足的发展,建立了北京大学、上海交通大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国电子科技集团公司第十三研究所等加工平台,形成了以清华大学、北京大学等高校和科研院所为主的优势研究单位。

十几年来,经过国防预研、重大专项、国防“973”、国防基金等项目的支持,我国已经在微惯性器件、RF MEMS、微能源、微生化等器件研究,以及微纳加工技术、ASIC技术等领域取得了诸多突破性的进展,我国的微米纳米技术研究平台已经形

成,许多成果获得了国家级的科技奖励。同时,已经形成了一支年富力强、结构合理、有影响力的科技队伍。

现在,为了更有效、有针对性地实现微米纳米技术的突破,有必要对过去的研究工作做一阶段性的总结,把这些经验和知识加以提炼,形成体系传承下去。为此,在国防工业出版社的支持下,以总装备部微米纳米技术专家组为主体,同时吸收国内同行专家的智慧,组织编写一套微米纳米技术专著系列丛书。希望通过系统地总结、提炼、升华我国“九五”以来微米纳米技术领域所做出的研究工作,展示我国在该技术领域的研究水平,并指导“十二五”及以后的科技工作。

丁衡高

2011年11月30日

前 言

微(型)惯性器件和系统技术是微机电系统技术的重要组成部分,在工业、军事等领域被广泛应用,发展迅速,正形成新的产业、新的技术平台和新的方法学。

《微型惯性器件及系统技术》汇集了近年来国内微惯性器件和系统技术方面的最新科研成果,主要阐述微型惯性器件和系统的发展状况、典型器件和系统的基本工作原理、实现方法和测试技术等,分章重点介绍微惯性器件技术发展现状、硅微机械陀螺、硅微机械加速度计、微型气流式陀螺仪、微型热对流加速度计和微惯性系统技术。本书由国内专家学者分章撰写,参与编写各章内容的作者均是相关领域的知名专家,主要内容为撰稿作者及研究团队的研究成果,所包含的技术内容多为最新前沿技术。

本书共分6章,各章题目、作者和作者所在单位如下:第1章:绪论(清华大学,丁衡高、朱荣、蔡嵩林);第2章:振动式硅微机械陀螺(清华大学,张嵘、周斌、陈志勇);第3章:硅微机械加速度计(清华大学,董景新);第4章:微型气流式陀螺(清华大学,朱荣);第5章:MEMS热对流加速度传感器(中国电子科技集团公司第十三研究所,杨拥军);第6章:微惯性系统技术(清华大学,郭美凤、朱荣、刘云峰)。本书撰写工作由丁衡高院士总体指导,丁院士仔细审阅了全书内容,并提出了宝贵的修改意见。

本书可作为相关领域本科生、研究生学习和教师教学的参考书,并可供相关的科技人员参考。由于作者能力有限,书中不当之处及尚未认识的错误之处,敬请读者们批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 微惯性器件发展历史及技术现状	1
1.2 微惯性器件应用及发展方向	9
1.3 微惯性传感器主要厂商及其特点	14
参考文献	17
第2章 振动式硅微机械陀螺	19
2.1 振动式硅微机械陀螺的基本理论及模型	19
2.1.1 振动式硅微机械陀螺的基本原理	19
2.1.2 振动式硅微机械陀螺的典型结构	20
2.1.3 振动式硅微机械陀螺动力学方程	22
2.1.4 线振动微机械陀螺的动态输出特性	28
2.1.5 小结	30
2.2 敏感结构的设计	30
2.2.1 材料特性	30
2.2.2 总体设计	31
2.2.3 关键结构设计	35
2.3 信号检测、处理和运动控制	42
2.3.1 微小电容检测技术	43
2.3.2 信号处理与提取	46
2.3.3 陀螺运动控制	49
2.4 测试技术	52
2.4.1 振动式硅微机械陀螺主要指标	52
2.4.2 测试方法	53
2.4.3 数据处理	55
参考文献	58
第3章 硅微机械加速度计	60
3.1 硅微挠性加速度计	61

3.1.1	梳齿式电容加速度计	61
3.1.2	“跷跷板”摆式电容加速度计	72
3.1.3	“三明治”摆式电容加速度计	76
3.2	硅微谐振式加速度计	80
3.2.1	工作原理	80
3.2.2	结构特点	82
3.2.3	系统组成	85
3.3	硅微静电悬浮式加速度计	86
3.3.1	工作原理	86
3.3.2	结构特点	88
3.3.3	系统组成	89
	参考文献	96
第4章	微型气流式陀螺	97
4.1	工作原理及模型	98
4.1.1	对流换热原理	98
4.1.2	热敏元件的检测方法	100
4.1.3	系统信号检测电路	103
4.2	微型热对流陀螺	106
4.2.1	器件结构和工作原理	106
4.2.2	系统建模及数值模拟	108
4.2.3	陀螺加工工艺	112
4.2.4	交叉耦合效应及补偿技术	114
4.3	微型射流陀螺	117
4.3.1	器件结构和工作原理	117
4.3.2	数值模拟分析方法	120
4.3.3	陀螺加工工艺	124
4.4	总结	126
	参考文献	126
第5章	MEMS 热对流加速度传感器	128
5.1	热对流加速度传感器工作原理	129
5.2	计算机仿真与分析	130
5.2.1	线性度分析	131
5.2.2	灵敏度分析	132
5.3	结构设计和制作工艺	136

5.4	三轴微型热对流加速度传感器	139
5.4.1	三轴热对流加速度传感器工作机理	139
5.4.2	三轴热对流加速度传感器结构设计	140
5.4.3	三维流体场的计算机仿真	141
5.4.4	三轴微型热对流加速度传感器三维立体加工	143
5.4.5	三轴微型热对流加速度传感器的封装	145
5.5	检测电路	147
5.5.1	加热器温度控制电路的模型和控制电路	147
5.5.2	加速度信号检测电路	148
	参考文献	149
第6章	微惯性系统技术	151
6.1	微惯性测量单元(MIMU)的基本概念和组成	151
6.1.1	MIMU的发展现状	151
6.1.2	MIMU的组成	154
6.2	MIMU的基本种类和工作原理	154
6.2.1	微机械航姿参考系统	154
6.2.2	微型惯性导航系统	156
6.2.3	微惯性卫星组合导航系统	159
6.2.4	无陀螺捷联导航系统	161
6.2.5	多传感器融合系统	163
6.2.6	多轴单片集成系统	167
6.3	MIMU的应用和发展	172
6.3.1	武器装备	173
6.3.2	航空航天	176
6.3.3	车辆	177
6.3.4	船舶	179
6.3.5	石油勘探	179
6.3.6	机器人	180
6.3.7	医疗健康	181
6.3.8	消费电子	182
	参考文献	182

Contents

1 Introduction	1
1.1 Development and State-of-the-art of Micro Inertial Device Technologies	1
1.2 Applications and Development Trend of Micro Inertial Devices	9
1.3 Main Manufacturers and Specialties for Micro Inertial Sensors	14
References	17
2 Micromachined Silicon Vibratory Gyroscope	19
2.1 Fundamental Theory and Model of Micro-machined Silicon Vibratory Gyroscope	19
2.1.1 Elements of Micro-machined Silicon Vibratory Gyroscope	19
2.1.2 Typical Micro-machined Silicon Vibratory Gyroscope Structures	20
2.1.3 Dynamics Equations of Micro-machined Silicon Vibratory Gyroscope	22
2.1.4 Dynamic Output Feature of Linear Vibratory Gyroscope	28
2.1.5 Summary	30
2.2 Design of Sensing Structure	30
2.2.1 Material Properties	30
2.2.2 Overall Design	31
2.2.3 Key Structure Design	35
2.3 Signal Detection, Processing and Motion Control	42
2.3.1 Micro Capacitance Detecting Technology	43
2.3.2 Signal Processing and Acquiring	46
2.3.3 Motion Control of Micro-machined Gyroscope	49
2.4 Testing Technology	52
2.4.1 Main Specifications of Micro-machined Silicon Vibratory Gyroscope	52
2.4.2 Testing Method	53
2.4.3 Data Processing	55
References	58
3 Micromachined Silicon Accelerometer	60

3.1	Flexible Micromachined Silicon Accelerometer	61
3.1.1	Finger-shaped Micromachined Silicon Accelerometer	61
3.1.2	Pendulous Micromachined Silicon Accelerometer	72
3.1.3	Cantilever beam Micromachined Silicon Accelerometer	76
3.2	Silicon Oscillating Accelerometer	80
3.2.1	Principle of Operation	80
3.2.2	Structural Characteristics	82
3.2.3	Composition of System	85
3.3	Electrostatically Levitated MEMS Accelerometer	86
3.3.1	Principle of Operation	86
3.3.2	Structural Characteristics	88
3.3.3	Composition of System	89
	References	96
4	Micromachined Gas Gyroscope	97
4.1	Principle and Technology	98
4.1.1	Convection Heat Transfer	98
4.1.2	Test method for Thermoelectric Elements	100
4.1.3	Detection Circuit of System	103
4.2	Micromachined Heat Convection Gyroscope	106
4.2.1	Configuration and Working Principle	106
4.2.2	Modeling and Numerical Simulation	108
4.2.3	Fabrication Technology	112
4.2.4	Cross-axis Coupling and Compensation	114
4.3	Micromachined Jet Gyroscope	117
4.3.1	Configuration and Working Principle	117
4.3.2	Numerical Simulation	120
4.3.3	Fabrication Technology	124
4.4	Conclusion	126
	References	126
5	Micromachined Convective Accelerometer	128
5.1	Working Principle of Convective Accelerometer	129
5.2	Computer Simulation and Analysis	130
5.2.1	Linearity Analysis	131
5.2.2	Sensitivity Analysis	132

5.3	Design and Fabrication	136
5.4	Three-axes Micromachined Convective Accelerometer	139
5.4.1	Working Principle of Three Axes Convective Accelerometer	139
5.4.2	Design of Three Axes Convective Accelerometer	140
5.4.3	Computer Simulation of 3D Fluid Field	141
5.4.4	3D Micromaching of Three Axes Convective Accelerometer	143
5.4.5	Packaging of 3D Micromaching Three Axes Convective Accelerometer	145
5.5	Readout Circuit	147
5.5.1	Model of the Heater Temperature Control and the Circuit	147
5.5.2	Acceleration Detection Circuit	148
	References	149
6	Micro Inertial System Technologies	151
6.1	Concepts and Composing of Micro Inertial Measurement Unit (MIMU) ...	151
6.1.1	Development of MIMU	151
6.1.2	Composing of MIMU	154
6.2	Basic Types and Principles of MIMU	154
6.2.1	MEMS Attitude Heading Reference System	154
6.2.2	Micro Inertial Navigation System	156
6.2.3	Micro Inertial and Satellite Integrated Navigation	159
6.2.4	Gyroscope Free Strapdown Inertial System	161
6.2.5	Multi-Sensor Fusion System	163
6.2.6	Multi-axis Single-chip Integrated System	167
6.3	Applications and Developments of MIMU	172
6.3.1	Weapons	173
6.3.2	Aviation and Aerospace	176
6.3.3	Vehicles	177
6.3.4	Vessels	179
6.3.5	Oil Exploration	179
6.3.6	Robots	180
6.3.7	Medical Health	181
6.3.8	Consumer Electronics	182
	References	182

第1章 绪论

1.1 微惯性器件发展历史及技术现状

传统的惯性传感器成本高、体积大,主要应用在军事和航空领域。随着微惯性传感器技术的发展,利用微机电系统(Microelectromechanical System, MEMS)技术,使得惯性传感器成本大幅下降,体积、重量和功耗也显著减小。微惯性器件是采用硅、石英或金属材料、利用微机械加工工艺制作而成的可以用来测量运动载体加速度或角速度的传感器。微惯性器件包括加速度计和角速度传感器(陀螺)以及它们的单、双、三轴组合 MIMU(微惯性测量单元)。微惯性器件技术研究开始于 20 世纪 90 年代初,它的出现使得惯性技术产生了一次新的飞跃。与传统惯性器件相比,微惯性器件具有可大批量生产、可靠性高、电路可单片集成等优点。随着应用领域不断扩大,出现了大批不同类型的微惯性器件,其性能也在不断提高。

微加速度计是利用微机械加工工艺制作而成的、可以测量加速度的传感器,一般由悬挂系统及一个固体质量块和检测电路组成,通过检测质量块的位移获得加速度信息。根据传感原理不同,主要有压阻式、电容式、压电式、隧道电流式、谐振式、热电耦合式和电磁式等。其中最为成功的检测方式为电容式,所需检测结构简单、功耗低、稳定性较好,虽然电容式加速度计存在非线性问题,但通过反馈控制可以大幅降低非线性度。一种典型的微加速度传感器结构^[1]如图 1.1 所示,包括一

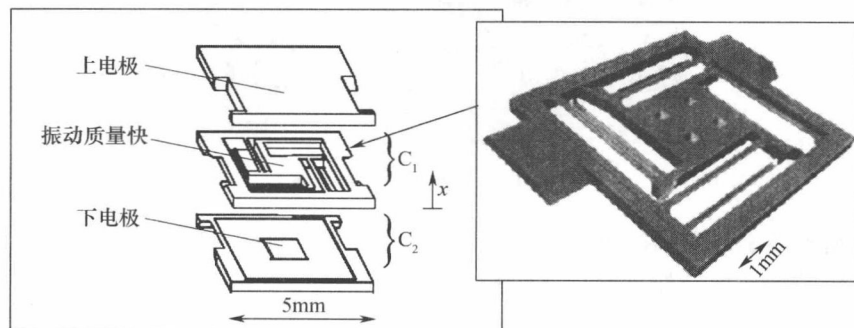


图 1.1 一种体硅加工的三明治结构