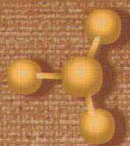


“十二五”国家重点图书出版规划项目



国防科技图书出版基金

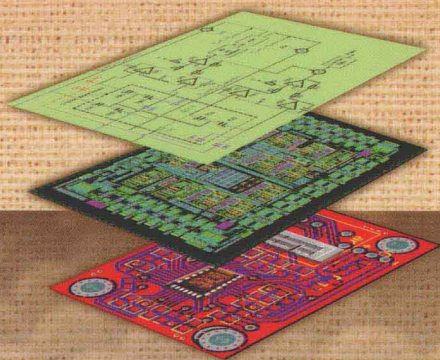


微米纳米技术丛书
MEMS与微系统系列

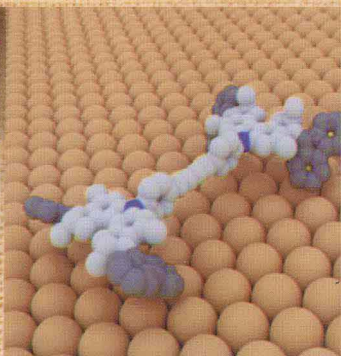
MEMS传感器接口 ASIC集成技术

ASIC Technology of
MEMS Sensor Interface

■ 刘晓为 陈伟平 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



微米纳米技术丛书·MEMS与微

MEMS 传感器接口 ASIC 集成技术

ASIC Technology of MEMS Sensor Interface

刘晓为 陈伟平 著



国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 传感器接口 ASIC 集成技术/刘晓为,陈伟平著.
—北京:国防工业出版社,2013.2
(微米纳米技术丛书·MEMS 与微系统系列)
ISBN 978-7-118-08515-0

I. ①M... II. ①刘... ②陈... III. ①纳米技术—
应用—集成传感器—接口 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 031566 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15½ 字数 268 千字

2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 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)

丁桂甫 邓中亮 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。中国微米纳米学术年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相关计划的支持下,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

本书是论述几种重要 MEMS 传感器接口电路集成技术的专著。MEMS 传感器是信息系统的前端,是信息领域支柱产业之一。MEMS 传感器的集成化使得系统尺寸更小、成本更低、功耗更低、性能更好,易于实现数字化、智能化、网络化。这对国防、航天、民用消费尤为重要,因此是各国竞相发展的技术。国际上 MEMS 传感器研究与产业化发展迅速,大多数 MEMS 传感器产品都已实现了单片集成化或芯片级集成,而我国的 MEMS 传感器产品由于缺乏相应的接口集成电路,基本处于分立元件或混合集成的状态,与国外差距很大,严重阻碍我国 MEMS 传感器技术的发展与实用化进程。

国内外已出版的传感器方面的书比较多,但 MEMS 传感器的书比较少,并且还是偏重于敏感结构、原理、材料与工艺等。如 M. Elwenpoek 著的 Mechanical Microsensors (《硅微机械传感器》,陶家渠等翻译),D. S. Stephen 著的 Microsystem Design (《微系统设计》,刘泽文等翻译)等只在个别章节讲述了 MOSFET 放大器、运算放大器、阻抗电桥电路、振荡器等基本电子电路与反馈系统,缺乏具体 MEMS 传感器的接口电路及其集成技术的论述。赵负图主编的《新型传感器集成电路应用手册》一书对国外现有传感器接口集成电路进行了汇编,但缺乏接口集成电路的设计与技术原理的叙述。MEMS 集成传感器或 MEMS 传感器专用接口集成电路设计与技术原理在国内外所出版的专业书籍中均未涉及,而这些知识正是从事接口专用集成电路芯片研究者所急需的,本书正是为满足此需求而编写的。

本书主要编著内容是作者多年创新性科研成果的总结和凝聚,同时参阅了国际上最新科研成果,既有系统性又有深度。本书首先介绍了以微纳米惯性器件芯片级集成为代表的 MEMS 集成传感器的起源、技术特点、国内外的发展状况;然后叙述了 MEMS 集成压力传感器, MEMS 加速度计接口 ASIC 芯片及其集成化技术, MEMS 陀螺接口 ASIC 芯片及其芯片级集成技术, MEMS 磁传感器、微传声器(麦克风)、热红外传感器等的接口 ASIC 芯片设计及其芯片级集成技术;重点介绍了 MEMS 传感器的系统建模与仿真,信号调理电路,接口电路中的补偿、自检测技术, ASIC 芯片设计技术等;最后对目前国际上 MEMS 集成传感器的典型产品与应用进行了介绍。本书非常适合高等院校相关专业的师生和从事 MEMS 集成传感器研

究的工程技术人员阅读,同时对从事 MEMS 传感器应用开发与生产的工程技术人员和管理决策者都有重要参考价值。与大多数专业书籍不同,本书省略了诸如微电子、MEMS 与传感器等方面的基础知识内容,这些内容在许多高等学校教材或相关专著中都有系统、深入的论述,这里不再赘述。

本书重点介绍 MEMS 传感器接口 ASIC 芯片技术,主要章节安排如下:第 1 章 MEMS 集成传感器概述,由陈伟平教授、尹亮教师等完成;第 2 章 MEMS 加速度计接口 ASIC 集成技术,由刘晓为教授、刘云涛、吕炳均、付强等教师完成;第 3 章 MEMS 陀螺接口 ASIC 集成技术,由陈伟平教授、王冠石、王庆一等博士完成;第 4 章 MEMS 磁传感器及接口 ASIC 集成技术,由刘晓为教授、董长春博士完成;第 5 章 MEMS 压力传感器、微麦克风(传声器)等接口 ASIC 集成技术,由陈伟平教授、施长治、李强等博士完成。最后由刘晓为教授审阅了全书。

衷心感谢对本书编写中给予不同形式支持和帮助的专家学者和同仁们。感谢丁衡高院士及总装备部微纳米技术专家组诸位专家对 MEMS 传感器接口集成电路芯片研究工作的一贯支持。

由于作者水平有限,加之写作时间较仓促,书中难免有一些不妥和错误之处,恳请读者指教。

著者

2012 年 10 月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 MEMS 集成传感器	1
1.2 MEMS 传感器接口电路集成技术特点及发展现状	2
1.2.1 主要技术特点	2
1.2.2 国内外发展趋势	7
参考文献	9
第 2 章 微加速度计接口 ASIC 集成技术	11
2.1 电容式加速度计接口电路	12
2.1.1 电容式微加速度计的工作原理	12
2.1.2 电容式加速度计接口电路	17
2.1.3 哈尔滨工业大学设计的闭环电容式加速度计接口电路	43
2.2 集成压阻式加速度计接口电路	44
2.2.1 压阻式加速度计的工作原理	46
2.2.2 压阻式加速度计接口 ASIC	49
2.3 集成压电式加速度计接口电路	54
2.3.1 压电式加速度计工作原理	54
2.3.2 压电式加速度计接口电路	58
2.4 集成谐振式加速度计接口电路	62
2.4.1 谐振式加速度计工作原理	62
2.4.2 谐振式加速度计接口电路	69
2.5 集成热对流式加速度计接口电路	74
2.5.1 热对流加速度计的工作原理	74
2.5.2 热对流加速度计接口电路	77
2.6 集成多轴加速度计接口电路	82
参考文献	86

第3章 微机械陀螺接口 ASIC 集成技术	89
3.1 硅微机械陀螺	89
3.1.1 微机械陀螺等效电学模型	89
3.1.2 接口电路原理	94
3.1.3 PCB 混合集成电路	94
3.1.4 ASIC 集成技术	97
3.2 石英微机械陀螺接口 ASIC	134
3.2.1 石英微机械陀螺基本原理	134
3.2.2 石英微机械陀螺接口电路	141
3.3 典型集成微陀螺产品及应用	143
3.3.1 ADXRS300	147
3.3.2 ADXRS614	147
参考文献	149
第4章 磁传感器接口 ASIC 集成技术	152
4.1 各向异性磁阻传感器	152
4.1.1 各向异性磁阻传感器原理	152
4.1.2 各向异性磁阻接口 ASIC 电路	154
4.2 巨磁阻传感器	154
4.2.1 巨磁阻传感器原理	155
4.2.2 巨磁阻传感器接口 ASIC	155
4.3 巨磁阻抗传感器	156
4.3.1 巨磁阻抗传感器原理	156
4.3.2 巨磁阻抗传感器接口 ASIC	157
4.4 磁通门传感器	160
4.4.1 磁通门传感器原理	160
4.4.2 等效电学模型	163
4.4.3 磁通门传感器接口 ASIC	165
参考文献	170
第5章 MEMS 压力传感器等接口 ASIC 集成技术	171
5.1 集成压力传感器	171
5.1.1 集成压力传感器分类	171

5.1.2	集成压力传感器结构及工作原理	172
5.1.3	压力传感器接口电路	180
5.1.4	典型集成压力传感器产品及应用	200
5.1.5	国外各大公司集成压力传感器部分产品一览	205
5.2	微(型)麦克风	206
5.2.1	常见麦克风的种类	206
5.2.2	MEMS 微麦克风	207
5.2.3	电容式麦克风的工作原理	207
5.2.4	微麦克风接口电路	209
5.2.5	典型产品及应用	217
5.3	MEMS 红外传感器及接口电路	219
5.3.1	MEMS 红外传感器工作原理	220
5.3.2	接口电路及单片集成	221
	参考文献	222

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 MEMS Integrated Sensor	1
1.2 Integrated Technical Characteristics and Developing Status of MEMS Sensor Interface Circuit	2
1.2.1 Main Technical Characteristics	2
1.2.2 The Domestic and Foreign Development Trend	7
References	9
Chapter 2 Micro – accelerometer Interface ASIC Technology	11
2.1 Capacitive Accelerometer Interface Circuit	12
2.1.1 Principle of Capacitive Micro – accelerometer	12
2.1.2 Interface Circuit for Capacitive Accelerometer	17
2.1.3 Interface Circuit for Closed Loop Capacitive Accelerometer Designed by HIT	43
2.2 Integrated Piezoresistive Accelerometer Interface Circuit	44
2.2.1 Principle of Piezoresistive Accelerometer	46
2.2.2 Piezoresistive Accelerometer Interface ASIC	49
2.3 Integrated Piezoelectric Accelerometer Interface Circuit	54
2.3.1 Principle of Piezoelectric Accelerometer	54
2.3.2 Piezoelectric Accelerometer Interface Circuit	58
2.4 Integrated Resonant Accelerometer Interface Circuit	62
2.4.1 Principle of Resonant Accelerometer	62
2.4.2 Resonant Accelerometer Interface Circuit	69
2.5 Integrated Convective Accelerometer Interface Circuit	74
2.5.1 Principle of Convective Accelerometer	74
2.5.2 Convective Accelerometer Interface Circuit	77
2.6 Integrated Multi – Axial Accelerometer Interface Circuit	82

References	86
Chapter 3 MEMS Micromechanical Gyroscopes Interface ASIC	
Technology	89
3.1 Silicon Micromechanical Gyroscope	89
3.1.1 Equivalent Electrical Model of Micromechanical Gyroscope	89
3.1.2 Principle of Interface Circuit	94
3.1.3 PCB Hybrid Integrated Circuit	94
3.1.4 ASIC Circuit	97
3.2 Quartz Micro – machined Gyroscope and its Interface Circuit	134
3.2.1 Basic Principle of Quartz Micro – machined Gyroscope	134
3.2.2 Quartz Micro – machined Gyroscope Interface Circuit	141
3.3 Typical Integrated Products and Application of Micro – machined Gyroscope	143
3.3.1 ADXRS300	147
3.3.2 ADXRS614	147
References	149
Chapter 4 Magnetic Sensor Interface ASIC Technology	152
4.1 Anisotropic Magneto – resistance (AMR) Sensor	152
4.1.1 Principle of AMR Sensor	152
4.1.2 AMR Sensor Interface ASIC	154
4.2 Giant Magneto – resistance (GMR) Sensor	154
4.2.1 Principle of GMR Sensor	155
4.2.2 GMR Sensor Interface ASIC	155
4.3 Giant Magneto – impedance (GMI) Sensor	156
4.3.1 Principle of GMI Sensor	156
4.3.2 GMI Sensor Interface ASIC	157
4.4 Fluxgate Sensor	160
4.4.1 Principle of Fluxgate Sensor	160
4.4.2 Equivalent Electrical Model	163
4.4.3 Fluxgate Sensor Interface ASIC	165
References	170
Chapter 5 MEMS Pressure Sensor Interface ASIC Technology	171
5.1 Integrated Pressure Sensor	171
5.1.1 Integrated Pressure Sensor Classification	171

5.1.2	Structure and Principle of Integrated Pressure Sensor	172
5.1.3	Pressure Sensor Interface Circuit	180
5.1.4	Typical Integrated Products and Application of Pressure Sensor	200
5.1.5	The Overview of Pressure Sensor Product of Foreign Corporations	205
5.2	Miniature Microphone	206
5.2.1	Common Microphone Types	206
5.2.2	MEMS Microphone	207
5.2.3	Principle of Condenser Microphone	207
5.2.4	Microphone Interface Circuit	209
5.2.5	Typical Product and Application	217
5.3	MEMS Infrared Sensor and its Interface Circuit	219
5.3.1	Principle of Infrared Sensor	220
5.3.2	Interface Circuit and Monolithic Integration	221
	References	222