

半导体敏感器件及其应用丛书

力学量敏感器件 及其应用

牛德芳等 编著

科学出版社

73.737
148

半导体敏感器件及其应用丛书

力学量敏感器件及其应用

牛德芳等 编著



科学出版社

1987

8710581

内 容 简 介

本书是半导体敏感器件及其应用丛书之一。这套丛书系统地介绍了各类半导体敏感器件的原理、设计、工艺、测试等方面的内容,并阐述了半导体敏感器件与传感器在信息摄取、检测和控制处理等方面的实际应用。

本书专门讨论力学量敏感器件原理及其应用。内容包括半导体压阻效应的基本理论,各种力学量引起的应力变化,力敏器件的设计、制造、测量和漂移补偿,以及各种传感器原理(包括集成压力传感器)、结构及其在各方面的应用,给出多种应用实例。书中内容相当一部分是作者们多年在该技术领域从事研究工作的总结。

本书可供从事力敏器件工作的工程技术人员参考,也可用作大专院校有关专业的教学参考书。

半导体敏感器件及其应用丛书 力学量敏感器件及其应用

牛德芳等 编著

责任编辑 刘兴民 樊友民

科学出版社出版

北京朝阳门内大街257号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1987年8月第一次印刷 印张:11 1/8

印数:0001—2,800 字数:248,000

统一书号:15031·835

本社书号:5303·15-7

定价: 2.65 元

半导体敏感器件及其应用丛书

序 言

半导体敏感技术是一门新兴技术，近几年发展较快。各种半导体敏感器件及其传感器日新月异，在国防、国民经济各部门以及人们的日常生活中得到越来越广泛的应用。

半导体敏感器件及其传感器能够把力、热、光、磁、气、湿度、射线、离子等物理、化学和生物等非电量转换成电信息。它具有体积小、精度高、灵敏度高、成本低、便于集成化、多功能化、易与微机接口等特点，从而被广泛用于国防建设、工农业生产、交通监控、灾害报警、医疗监护、自动控制和机器人、生命与宇宙科学研究，以及家用电器等各个领域。特别是作为摄取信息的功能部件，它已成为计算机检测与控制系统中不可缺少的重要组成部分，越来越受到人们的普遍重视。许多国家都把它列为八十年代的关键技术之一。

为了促进这门新兴技术的发展，电子工业部中国电子器件工业总公司于一九八三年八月召开了“全国半导体敏感器件工作会议”，会议商定集中全国部分高等院校、研究所和工厂中多年从事半导体敏感器件与传感器研究、生产和应用的专家、学者共同编写一套半导体敏感器件及其应用丛书。

为了加快编写进度，使这套丛书尽快与读者见面，在中国电子器件工业总公司领导下成立了该丛书编审组，由半导体敏感器件技术攻关组赵志刚、张博新、吕家骧、周立等人具体负责丛书编审的组织工作。编写工作是在广泛收集国内外先

进技术资料的基础上，并结合作者们多年来积累的实践经验进行的。在编写过程中，始终贯彻百花齐放、百家争鸣的方针，力求使该丛书具有科学性、系统性、先进性和实用性。从编写大纲的确定、编写、修改、直至终审定稿，始终采用个人撰写和集体会审、专家学者终审相结合的方法，从而进一步保证这套丛书的质量。

半导体敏感器件及其应用丛书共有九册：

《力学量敏感器件及其应用》；

《光敏感器件及其应用》；

《磁敏感器件及其应用》；

《气、湿敏感器件及其应用》；

《离子敏感器件及其应用》；

《温度敏感器件及其应用》；

《传感器与微型机》；

《半导体致冷器件及其应用》；

《太阳能电池及其应用》。

半导体敏感器件及其应用丛书编审组成员为：

陈文华、赵志刚、张博新、吕家骝、周立、刘恩科、
黄得星、刘振茂、钟广学、程道喜、张澄、牛德芳、
马英仁、齐丕智、康昌鹤、唐省吾、黄德培、方培生、
张联铎、虞惇、陆瑞良、马德和、寇云起。

半导体敏感器件及其应用丛书

编 审 组

前 言

振兴我国电子工业必须加速电子计算机的发展。而在计算机已被广泛应用的今天，又面临着敏感器件品种少且体积和重量都过大等一系列问题，直接影响到计算机推广应用工作。近年来，国内外从事敏感器件工作的科学工作者，都在寻求一种体积小、灵敏度高、稳定可靠的力学量敏感器件。半导体力学量敏感器件的问世，可视为是敏感器件的一次革命。我国半导体力学量敏感器件起步不算太晚，但与世界先进水平相比，在数量、品种、水平上都还有一定差距。为适应我国力学量敏感器件科研和生产的需要，作者搜集了国内外大量资料并结合作者多年从事半导体力学量敏感器件科研、教学、生产的实践，编写了《力学量敏感器件及其应用》一书，供广大科技工作者、工程技术人员和高等学校师生参考。

半导体力学量敏感器件涉及到的学科较多。由于篇幅所限，本书重点讲述半导体物理和力学的有关基础知识，对设计方法、工艺参数的选择和力学量敏感器件特有的硅弹性膜片制作、敏感器件的标定和温度补偿作了详细阐述，而对大家所熟悉的常规平面工艺则不再赘述。对力学量敏感器件的结构和正在兴起的集成敏感器件，作者选取了比较先进的典型产品作了简明扼要的介绍。力学量敏感器件发展较早、较快，已进入推广应用阶段。推广应用工作开展得好坏，直接关系到敏感器件的发展。从这一点出发，对敏感器件应用中常用的供电、放大、显示、以及敏感器件与微机结合使用等内容作了详细介绍。

全书共十一章,分为五个部分。第一部分即第一章、第二章较系统地讲述了力学量敏感器件的物理、力学理论基础;第二部分即第三章、第四章论述了力学量敏感器件的设计方法和工艺参数的选择原则;第三部分即第五章、第六章和第七章阐述了力学量敏感器件制造过程中的特殊工艺、标定方法和温度漂移补偿措施;第四部分即第八章、第九章和第十章介绍了各种力学量敏感器件的结构,并对具有发展前途的集成压力敏感器件也作了详细阐述;最后第十一章,介绍了几种比较典型的应用实例。

本书由牛德芳同志任主编,并编写绪论、第三章、第六章和第九章,胡静山同志编写第一章、第七章,程耿东同志编写第二章,周丽芳同志编写第四章,赵培文同志编写第五章,鲍敏杭同志编写第八章、第十章,张裕民、陈乐生同志编写第十一章。另外参加本书工作的还有朱松盛、高鑫、李桂芳等同志,附录由周丽芳、胡静山、牛德芳提供。

全书除由编审组全体成员集体审定外,还邀请安徽电子研究所施锡昌等同志参加汇审工作。最后由刘恩科、黄德星同志主审并提出许多宝贵意见,在此一并表示感谢。

书中内容涉及到半导体物理、力学、化学、工艺、机械等学科知识,由于编者水平有限,加之时间仓促,难免有不妥和错误之处,殷切希望广大读者批评指正。

目 录

绪 论	1
第一章 半导体压阻效应	5
1.1 晶面和晶向	5
1.1.1 硅晶体结构	5
1.1.2 晶面和晶面指数	7
1.1.3 晶向	9
1.2 外力作用下半导体能带结构和载流子运动	10
1.2.1 应力、应变的基本概念及半导体的受力基本方式	10
1.2.2 液体静压强作用下的半导体能带结构	13
1.2.3 单轴应力下的能带结构	16
1.2.4 在应力大于 10^{10}dyn/cm^2 情况时的能带结构	19
1.3 压阻系数	22
1.3.1 在晶轴坐标系中压阻系数及计算方法	22
1.3.2 硅在各种应力情况下的压阻系数	27
第二章 弹性元件的力学分析	34
2.1 梁式弹性元件和受扭圆筒的力学分析	34
2.1.1 梁式弹性元件	34
2.1.2 受到扭矩的薄壁圆筒	37
2.2 圆板形弹性元件的力学分析	38
2.2.1 圆板的小挠度分析	39
2.2.2 受均布压力的等厚圆板	44
2.2.3 受均布压力的厚度阶梯形变化	47
2.3 矩形板和方板的力学分析	50
2.3.1 基本微分方程和求解方法	50

2.3.2	里兹法	52
2.4	各向异性和大挠度的影响	53
2.4.1	各向异性板的分析	53
2.4.2	板的大挠度分析	55
第三章	半导体力学量敏感器件的设计	58
3.1	力敏电阻连接方式的选择	58
3.1.1	恒压源供电	59
3.1.2	恒流源供电	61
3.2	晶向的选择	62
3.2.1	计算法	62
3.2.2	图表法	67
3.3	扩散电阻位置的确定	73
3.3.1	C 形硅弹性膜片电阻位置的典型设计方法	73
3.3.2	力敏电阻为任意晶向	76
3.4	高精度传感器的设计	78
3.4.1	非线性产生的原因	79
3.4.2	设计实例	81
3.5	硅弹性膜片形状及几何尺寸的设计	83
3.5.1	硅弹性膜片形状的选择	83
3.5.2	硅圆形弹性膜片的几何尺寸	86
3.5.3	力敏元件的设计	88
3.6	晶向所在晶面的验证	94
3.6.1	两晶向互相垂直的验证	94
3.6.2	晶向所在晶面的验证	95
第四章	工艺参数的选择	96
4.1	衬底材料的选择	96
4.1.1	导电类型和电阻率	96
4.1.2	位错密度	97
4.1.3	晶面和晶向	98
4.1.4	衬底切割的质量要求	98
4.2	表面掺杂浓度	99

4.2.1	力敏电阻的温度效应	99
4.2.2	掺杂浓度的选择	101
4.3	扩散结深	103
4.3.1	结深与击穿电压的关系	103
4.3.2	结深与电阻温度效应	105
4.4	钝化方式的选择	105
4.4.1	二氧化硅钝化	106
4.4.2	氮化硅 (Si_3N_4) 钝化	108
4.4.3	低压化学汽相淀积多晶硅 (LPCVD) 及掺氧半绝缘多晶硅 (SIPOS) 钝化	111
第五章	特殊工艺	113
5.1	N 型单晶硅弹性膜片的制备工艺	113
5.1.1	磨杯工艺	113
5.1.2	化学腐蚀	117
5.2	新型硅弹性膜片的制备工艺	120
5.2.1	外延层弹性膜片的制备	120
5.2.2	多晶硅弹性膜片的制备	122
5.2.3	硅-尖晶石、硅-蓝宝石半导体弹性膜片的制备	123
5.3	封接工艺	124
5.3.1	化学粘结法	124
5.3.2	金属化封接	126
5.3.3	橡胶圈封接	127
5.3.4	静电封接	127
5.3.5	低温玻璃封接	129
第六章	参数测试	130
6.1	测量误差	130
6.1.1	绝对误差	130
6.1.2	相对误差	130
6.2	传感器的特性	131
6.2.1	传感器静态特性	132

6.2.2	传感器动态特性	136
6.3	传感器的其它特性	143
6.3.1	温度特性	143
6.3.2	时漂特性	144
6.3.3	电气特性	145
6.3.4	传感器的综合精度	145
6.4	测试条件及测试设备	146
6.4.1	测试条件	146
6.4.2	压力测量设备简介	147
6.5	力学量传感器的主要参数的测量方法	151
6.5.1	量程范围及压力灵敏度的测量方法	152
6.5.2	温度漂移系数及环境温度的测量	153
6.5.3	长时间漂移	155
6.5.4	传感器非线性及综合精度测量	156
6.6	测量结果的数据处理	158
6.6.1	有效数字的处理	158
6.6.2	对多余有效数字的处理	159
6.6.3	等精度测量结果的数据处理	159
第七章	温度漂移的分析及补偿方法	163
7.1	零点温度漂移系数和灵敏度温度漂移系数的分析	163
7.1.1	零点温度漂移系数的分析	163
7.1.2	灵敏度温度漂移系数的分析	164
7.2	产生温度漂移的工艺原因	165
7.3	力敏电阻的等效电路	169
7.4	零点温度漂移补偿方法	170
7.4.1	半桥电路零点温度漂移补偿	171
7.4.2	全桥电路零点温度漂移补偿	172
7.5	灵敏度温度漂移补偿方法	176
7.5.1	恒压源供电的灵敏度温度漂移补偿法	177
7.5.2	恒流源供电的灵敏度温度漂移补偿法	178

第八章	压阻式集成压力敏感器件	186
8.1	硅压阻式力敏器件的集成化	186
8.1.1	硅压阻式力敏器件的集成化	186
8.1.2	力敏器件集成化引起的新矛盾	189
8.2	集成压力敏感器件全桥的设计	191
8.3	单块集成压力敏感器件	195
8.3.1	带温度补偿的集成压力敏感器件	195
8.3.2	带放大器的单块集成压力敏感器件	197
8.3.3	频率输出型的单块集成压力传感器	200
8.3.4	单块集成压力敏感器件的版图设计	202
8.4	混合集成压力敏感器件	205
第九章	力学量传感器原理及结构	208
9.1	加速度传感器	208
9.1.1	工作原理	208
9.1.2	设计方法与典型结构	211
9.1.3	生物工程用微型加速度传感器	214
9.2	扭矩传感器	216
9.2.1	扭矩传感器工作原理	216
9.2.2	扭矩传感器的典型结构	217
9.3	荷载传感器	219
9.3.1	原理	219
9.3.2	结构	221
9.3.3	设计中应注意的问题	222
9.4	压力传感器	223
9.4.1	工作原理	223
9.4.2	典型结构	224
9.4.3	绝对压力传感器	226
9.4.4	半导体应变片式压力传感器	228
9.5	流体传感器	235
9.5.1	工作原理	235
9.5.2	典型结构	235

9.5.3 高静压低差压传感器	239
9.6 集成压力传感器	243
第十章 电容式集成压力敏感器件	246
10.1 压力敏感电容器	246
10.1.1 压力敏感电容器的结构	246
10.1.2 用压力敏感电容器构成电容式压力敏感器件的 基本方法	247
10.2 力敏电容的设计	251
10.2.1 圆形膜的压敏电容	251
10.2.2 环形力敏电容的设计	256
10.2.3 方膜上的压敏电容	259
10.3 电容式集成压力敏感器件	260
10.3.1 电压输出型的电容式集成压力敏感器件	260
10.3.2 带驱动源和放大器的集成电容式压力敏感器件	264
10.3.3 频率输出型电容式集成压力敏感器件	266
第十一章 各种力学量传感器的应用	269
11.1 力学量传感器应用系统	269
11.1.1 桥路供电电源	270
11.1.2 放大器	275
11.1.3 模拟/数字转换(ADC)	280
11.1.4 显示器与记录器	286
11.2 力学量传感器应用举例	291
11.2.1 压力传感器	291
11.2.2 流量传感器	295
11.2.3 加速度传感器	301
11.3 提高力学量传感器应用效果的措施	303
11.3.1 信号串联	303
11.3.2 引压	304
11.4 力学量传感器与微型计算机	306

参考文献.....	314
附 录.....	317
1. t 分布表	317
2. 串并联电阻的补偿电路公式推导	317
3. 二极管补偿电路公式的推导	321
附表.....	324
表 1 力的单位换算表.....	324
表 2 压力单位换算表.....	326
表 3 力矩(或扭矩)单位换算表.....	332
表 4 线性加速度单位换算表.....	334
表 5 质量流量单位换算表.....	334
表 6 体积流量单位换算表.....	338

绪 论

半导体力学量敏感器件,主要用于测量力、加速度、扭矩、压力、流量等物理量。这些物理量的测量都与机械应力有关,所以把这类器件通称为力学量敏感器件。为简便起见,习惯把它们叫做力敏器件,并常把由力敏器件构成的检测各种力学量的装置叫做力学量传感器。

力敏器件出现较早,应用得也比较广泛。就金属应变计来说,距今已有四十多年的历史。但发展比较迅速的还是半导体力敏器件。1954年美国贝尔实验室查理·史密斯(Charley Smith)发现硅和锗半导体具有压阻效应。1956年梅森·瑟斯顿(Mason Thurston)使用压阻材料对力、位移、扭矩进行测量。1958年制成的半导体电阻应变计,其灵敏度是金属应变计的几十倍。六十年代末、七十年代初,一些工业发达的国家都先后开展了对扩散压阻式力学量传感器的研究工作。如美国、法国、日本、苏联等国都先后生产出半导体压阻式加速度、载荷、扭矩、压力、差压等传感器。

半导体力敏器件之所以发展如此迅速,是因为人们在日常生活和科研生产中,经常会遇到各种形式的力学量,随之就产生了如何检测这些量并将检测来的信息输入给计算机,解决自动控制的问题。特别是大规模集成电路的飞速发展和微处理机的问世,原有的力敏元件已远远满足不了需要,人们都在寻求高灵敏度、高精度、体积小、重量轻、稳定可靠的新型力敏器件。

半导体力敏器件的问世,被视为力敏器件的一次革命。它

不仅满足了现代控制系统向着小型化、集成化、数字化方向发展的要求,反过来又促进了计算机的广泛应用,因此得到人们的高度重视,成为最有前途的一种敏感器件。

我国六十年代初开始研制半导体应变片,1972年开始研究半导体压力传感器,1974年制成产品,最近十多年来又取得了很大进展,有的产品已经达到世界水平。它们现已广泛应用于宇航、军工、医疗、环保、交通、水利、石油化工等国民经济和人民生活的各个领域。但是从总体来看,品种数量、成品率、长期稳定性、微型化等方面与国外先进水平相比还存在一定差距。

现在半导体力敏器件正向着微型化、功能化、智能化的方向发展。在工艺方面,不断采用新技术、新工艺(如离子注入、分子束外延、激光焊接、红外光刻等),努力开发新型力敏效应材料,向着材料、功能、显示三位一体的方向发展,在应用方面,大力开展力学量传感器和计算机结合使用的工作。计算机的使用又会给传感器带来巨大变化。

半导体力学量敏感器件,按原理可分为压阻式和压结式两大类。由于压结式力敏器件所受应力接近硅的破碎应力,所以目前此类力敏器件发展不大。

压阻式压力传感器是近十几年来世界各国都很注意发展的一种器件,它一般分为两大类:体型和扩散型。扩散型力敏器件是继体型之后发展起来的,它的最大特点是力敏电阻与弹性膜片是同一硅片,取消了体型中的粘贴工艺,从而消除了蠕变,改进了滞后。由于体型半导体应变片和扩散型力敏元件在原理、设计方法、应用电路有共同点仅在结构上有所区别,因此,扩散型力敏器件是本书的重点。

半导体力学量敏感器件是一门实践性强、涉及面广(书中内容包括半导体物理、力学、化学、工艺、机械等方面知识)的

新兴学科。为了便于读者能深入研究和掌握这门技术，本书结合作者的科研、生产实践进行编著，较为系统地讲述了各种半导体力学量敏感器件的原理、设计方法、制造工艺、应用等，记述中适当加强理论和基本原理的阐述，给读者一个较为系统完整的概念，希望本书在广大读者的科研、教学、生产实践中起一点抛砖引玉的作用，以促进我国敏感器件的发展。