



基于MEMS技术的 硅脉象传感 与检测系统的研究

王璐◇著

 黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS



基于MEMS技术的 硅脉象传感 与检测系统的研究

王璐◇著

 黑龙江大学出版社
HEILONGJIANG UNIVERSITY PRESS



图书在版编目(CIP)数据

基于 MEMS 技术的硅脉象传感与检测系统的研究 / 王璐著. -- 哈尔滨 : 黑龙江大学出版社, 2013.5

ISBN 978 - 7 - 81129 - 500 - 9

I. ①基… II. ①王… III. ①脉象仪 - 研究 IV. ①TH789

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 137127 号

基于 MEMS 技术的硅脉象传感与检测系统的研究

JIYU MEMS JISHU DE GUIMAIXIANG CHUANGAN YU JIANCE XITONG DE YANJIU

王璐 著

责任编辑 李丽 肖嘉慧
出版发行 黑龙江大学出版社
地 址 哈尔滨市南岗区学府路 74 号
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 880 × 1230 1/32
印 张 9.25
字 数 200 千
版 次 2013 年 5 月第 1 版
印 次 2013 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 81129 - 500 - 9
定 价 23.00 元

本书如有印装错误请与本社联系更换。

版权所有 侵权必究

前 言

脉诊是中医学中最具特色的诊断方法,具有简便、可靠、无创伤等优点。随着现代科学技术的飞速发展,用科学的方法采集、处理脉象信息,已成为脉诊为患者提供疾病的客观信息的重要手段,而脉象传感器的设计和制作是脉诊客观化研究的基础。

本书采用 MEMS 技术、CMOS 工艺和激光加工技术,设计并制作了硅杯和悬臂梁两种结构的以纳米硅/单晶硅异质结为源极(S)和漏极(D)的 MOSFETs 脉象传感器,该脉象传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高、温度特性好等优点,能够实现对微小脉象信号的准确检测。对于脉象传感器的应用,本书研制了一种纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测系统,并阐述了采用人工神经网络处理(Artificial Neural Network, ANN)脉象检测结果的方法。

在理论分析的基础上,本书设计了纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的力敏结构,确定了衬底材料、硅膜厚度、MOSFET 沟道电阻在硅膜和悬臂梁上的位置。在硅杯的长方形硅膜和悬臂梁上分别设计四个纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFETs,以 p - MOSFET 的沟道电阻作为力敏电阻,并将四个 p - MOSFETs 沟道电阻构成惠斯通电桥结构。当硅膜和悬臂梁受

到脉搏压力作用时,其内部 MOSFET 沟道电阻的改变使惠斯通电桥的输出电压发生变化,可以实现对脉搏压力的检测。

本书在 n 型 <100> 晶向双面抛光单晶硅片上,分别制作了硅杯和悬臂梁结构的纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器芯片,给出了制作工艺和 MOSFETs 脉象传感器的芯片照片。为了解决现有硅悬臂梁刻蚀工艺中存在的刻蚀速度和刻蚀质量等问题,本书研究了激光加工技术与 MEMS 技术相结合的制作硅悬臂梁的方法,使硅悬臂梁的制备更加简洁、快速、精准,有效克服了传统悬臂梁释放时存在的削角问题,也为其他微结构的制备提供了高质量的激光刻蚀方法。

本书对制备的纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFET 的特性、硅杯式纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的静态特性、悬臂梁式纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的特性,以及硅杯式纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的温度特性等四个方面,给出实验结果如下。

(1) 纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFET 的沟道电流 I_{DS} 随温度变化很小,而且随着温度的升高沟道电流 I_{DS} 的变化量减小。四个纳米硅/单晶硅异质结 p - MOSFETs 的沟道电阻都随着温度的增加而略有变小。

(2) 采用恒压源供电时,纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的灵敏度随着供电电压的增加而增加,当供电电压为 -5.0 V 时,灵敏度为 $0.6517\text{ mV} \cdot \text{kPa}^{-1}$,准确度为 2.343% F.S;采用恒流源供电时,纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的灵敏度随着供电电流的增加而增加,当供电电流为 1.000 mA 时,灵敏度为 $0.6381\text{ mV} \cdot \text{kPa}^{-1}$,准确度为 2.281% F.S。

(3) 在一定的振动频率下,悬臂梁的加速度越大,传感器的输出电压越大;在一定的加速度下,振动频率越高,传感器的输出电压也越大。

(4) 在恒压和恒流两种供电方式下,纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的灵敏度都随着温度的降低而升高。

本书给出纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的应用实例,介绍了纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测系统的总体设计方案和各功能模块的设计方法,并给出 MOSFETs 脉象检测系统的实测结果。本书还阐述了利用人工神经网络中的误差反向传播神经网络和概率神经网络对脉象检测结果进行分析,判别妇女是否怀孕的方法。这种方法有别于单纯对脉形进行分类的分析方法,其优势在于只凭借妇女的脉形特征参量,就能够准确判断该妇女是否怀孕,为今后采用科学的方法分析人体脉象信息的研究奠定了基础。

综上所述,基于 MEMS 技术研制硅脉象传感和检测系统的方案有很好的应用前景,同时具有集成化和大批量生产的特点,对脉诊客观化研究具有重要意义。由于作者水平有限,本书难免有不足之处,诚望各位读者批评指导。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 脉象传感器的分类和研究现状	3
1.3 MOSFET 压力传感器的研究现状	23
1.4 纳米硅/单晶硅异质结研究现状	36
1.5 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感与 检测系统的研究目的和意义	41
1.6 主要研究内容	45
第 2 章 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的 理论分析与结构设计	47
2.1 MOSFETs 硅脉象传感器的理论模型	48
2.2 MOSFETs 硅脉象传感器的理论分析	49
2.3 半导体材料压阻效应基本理论	54
2.4 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器力敏 结构设计	65
2.5 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器结构 模型	108
2.6 本章小结	110

第 3 章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器制作工艺	112
3.1	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器制作工艺	112
3.2	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器管芯性能检测封装结构	123
3.3	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器电源激励方式	127
3.4	本章小结	131
第 4 章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的实验结果与讨论	132
4.1	纳米硅/单晶硅异质结 p-MOSFET 特性	132
4.2	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的静态特性研究	153
4.3	悬臂梁式纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的测试	177
4.4	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象传感器的温度特性	178
4.5	本章小结	187
第 5 章	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测的系统设计与实测结果分析	190
5.1	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测系统的概述	191
5.2	纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测系统各功能模块的设计	192

5.3 纳米硅/单晶硅异质结 MOSFETs 脉象检测系统的 脉象检测结果	203
5.4 采用人工神经网络处理脉象检测结果	210
5.5 本章小结	251
结 论	253
参考文献	258
后 记	272

第1章 概述

1.1 引言

随着生活水平的不断提高,人们在关注健康的同时,也对医学提出了更高的要求:不仅要救死扶伤、治病救人,而且更要以预防为主维护健康。现代医学和祖国医学都认为人体脉象可以客观地反映人体循环系统、内分泌系统和植物神经系统的健康状况,蕴含丰富的生理和病理特征,可以对人体的健康状况、疾病的诊断与发展趋势提供重要信息。

脉诊在我国已有几千年的历史,在《黄帝内经》、《难经》、《脉经》等著作中记载了历代医家的脉诊研究成果,经过不断的医疗实践、研究整理和总结提高,现已发展成为中医诊断的重要手段。但正如西晋王叔和在《脉经》中所述:“脉理精微,其体难辨……在心易了,指下难明。”由于科技水平所限,长期以来,医生主要凭借手指在患者桡动脉感知脉搏信息,用例如滑脉“如盘走珠”、浮脉“如水漂木”、沉脉“如石沉水”等取象比类的方法

来描述脉象,导致脉象概念不清、脉类判别标准模糊,这大大影响了脉诊的交流与发展。

中国工程院院士、973 项目首席科学家张伯礼为使学生能在感觉脉象的同时观察到脉象图形,制作了一款可以模拟 28 种脉象的脉象仪,他指出:“中医应该立足于传统的理论和方法,揭示它现代的科学内涵,引进现代的技术。”因此,用科学的方法采集、处理脉象信息,成为脉诊为患者提供疾病客观信息的必然手段,而脉象传感器的设计和制作则是脉诊客观化的基础。

2006 年,*Science* 上发表了一篇非常重要的高水平文章——MOSFET – Embedded microcantilevers for measuring deflection in biomolecular sensors(在生物传感器中将 MOSFET 制作在微悬臂梁内部以测量偏转)。^[1] 文章指出,采用微电子机械系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)和 CMOS 工艺将金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal – Oxide – Semiconductor Field – Effect Transistor, MOSFET)制作在微悬臂梁的高应力区,可以对生物分子间相互作用力进行高灵敏度测量。在生物传感器中,将一个 MOSFET 制作在氮化硅微悬臂梁的根部,并在微悬臂梁表面涂覆一层金用以固定探针分子。当外界的靶分子与微悬臂梁上的探针分子发生作用时,微悬臂梁受到应力作用而发生偏转,这使微悬臂梁内部 MOSFET 的沟道产生变化,从而导致输出的漏电流发生变化,由此可以确定微悬臂梁上探针分子和靶分子的相互作用情况。它的主要创新点在于,在世界上首次提出将一个 MOSFET 制作在悬臂梁的高应力区,可以实现对力的高灵敏度测量,这得到了科学界的广泛关注。

本章从脉象传感器、MOSFET 压力传感器、纳米硅/单晶硅

异质结三个方面对与本书研究问题相关的国内外研究现状进行介绍。

1.2 脉象传感器的分类和研究现状

从1860年法国的Vierordt制造了世界上第一台杠杆式脉搏描记仪起,国内外的专家学者对脉诊客观化的研究一直未间断过,直到21世纪初,这一领域的研究才逐渐形成高潮,并得出许多研究成果。

1.2.1 脉象传感器的分类

目前,国内外报道的脉象传感器种类很多,其结构和性能多种多样。根据工作原理,可将脉象传感器分为四种:压力传感器、光电传感器、传声器和应用超声多普勒技术的脉象传感器。^[2]

1.2.1.1 压力传感器

压力传感器一般分为压阻式、压电式和压磁式三种类型。

压阻式传感器是利用电阻率随应力变化的性质制成的传感器。根据压力的不同传导方式,可以将压阻式传感器分为固态压阻式传感器、液压传感器和气导式传感器。固态压阻式传感器是利用硅等半导体材料的压阻效应,并采用半导体工艺和集成电路工艺制成的传感器。液压传感器是利用薄膜制成的感压面受压变形后,容器内导电液柱的升降导致电阻产生变化的性

质制成的传感器,它可将脉搏压力信号转换为电信号输出。气导式传感器是利用气压传导脉搏波动的传感器。^[3,4]

压电式传感器是利用压电材料将脉搏的压力信号转换为电信号制成的传感器。根据压电材料的不同,可将压电式传感器分为压电聚合物传感器、压电晶体式传感器、复合压电材料传感器以及压电陶瓷式传感器等。^[5]

压磁式传感器是利用磁弹性效应将脉搏压力变化变换为传感器导磁率的变化,使输出的电信号发生改变的原理制成的新型传感器。

1.2.1.2 光电传感器

血液波动式的流动使血管内血容量发生变化,而血容量的变化导致了当照明光线投照到人体组织时,光线被血液吸收量改变。光电传感器就是利用这一原理将接收到的反映脉象变化情况的光信号转换为电信号,以此制成的传感器。

1.2.1.3 传声器

有学者认为脉象信号是沿动脉传播的振动信号,而传声器就是利用声学原理拾取脉搏振动信号的传感器。^[6]

1.2.1.4 应用超声多普勒技术的脉象传感器

脉搏信号中除了压力搏动信息外,还包含血流速度、管腔容积和脉管的三维运动等多种信息。随着超声显像技术的不断发展,超声多普勒技术被应用到脉象客观化研究中,为研究脉象的形成机理、显示血管运动的规律等提供了可靠的新方法。^[7]

1.2.2 脉象传感器国内研究现状

脉象传感器的研究在国内起步较晚。我国脉诊客观化的研究始于20世纪50年代,朱颜引入了杠杆式脉搏描记器,可描记人体桡动脉的多种脉图。由于当时的科技水平所限,未能取得较大的进展。尽管当时制作的脉象仪描记出的脉图不是很清晰,但其研究表明,可以采用仪器来采集和记录人体的脉象信息,也可以通过脉图来区分各种不同的脉象。

20世纪70年代中期,国内相继成立了几个跨学科的脉象研究协作组,并且研制出了一批性能和质量较好的脉象仪,从此这一领域的研究在国内逐渐形成高潮,一批高校和科研院所开始广泛地从事这一领域的研究工作,出现了一大批研究成果。

由于脉象传感器的研制是多学科、多领域所共同关心的、有益于维护人民健康的课题,所以,近20年来已发展成为一个十分活跃的热门研究领域。

1.2.2.1 高精度阵列脉搏传感器

2008年,《半导体学报》报道中国科学院微电子研究所研制了一种可以把人体脉搏压力信号直接转换为电流信号输出的高精度阵列脉搏传感器。^[8]图1-1给出了该脉搏传感器的原理图。在脉搏压力作用下,MOSFET的栅极将向下移动,这使MOSFET的栅极电容(简称栅电容)和输出电流发生变化,从而将脉搏信号直接转换为电流信号。

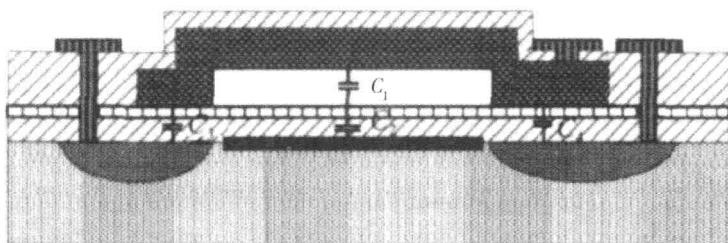


图 1-1 脉搏传感器的原理图

图 1-2 给出该高精度 8×8 阵列脉搏压力传感器的陈列图。采用牺牲层法加工晶体管的栅极与 CMOS 工艺具有良好的兼容性。对传感器栅电容和输出电流进行测试,在 $1.5 \sim 9.5 \text{ kPa}$ 的动态范围内,传感器电容的灵敏度约为 $0.5 \text{ fF} \cdot (\text{hPa})^{-1}$,传感器输出电流与脉搏压力之间呈现较好的线性和指数特性。实验结果表明, MOS 栅面积的改变对压力-电流响应曲线的线性度有一定影响。

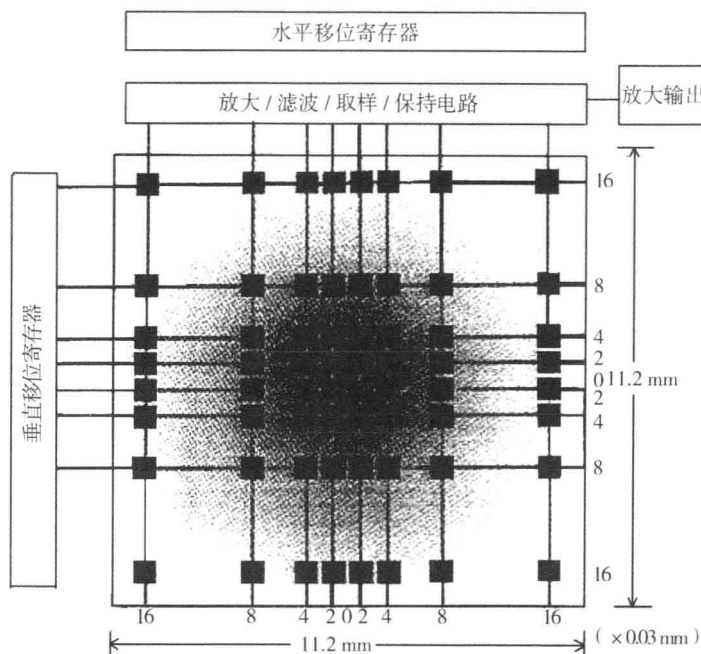


图 1-2 高精度 8×8 阵列脉搏压力传感器的陈列图

1.2.2.2 精细静脉脉象传感器

2009年,浙江大学信息科学与工程学院的张珣等人研制出了一种采用激光进行非接触式精细检测静脉脉搏信息的脉象传感器。^[9]该脉象传感器以右中心静脉处的右三脉球(右颈内静脉、右颈外静脉和右锁骨下静脉汇合形成的膨大球囊状管)作为静脉信号激光的采样点,三脉球体表采样点几何定位图如图 1-3 所示。

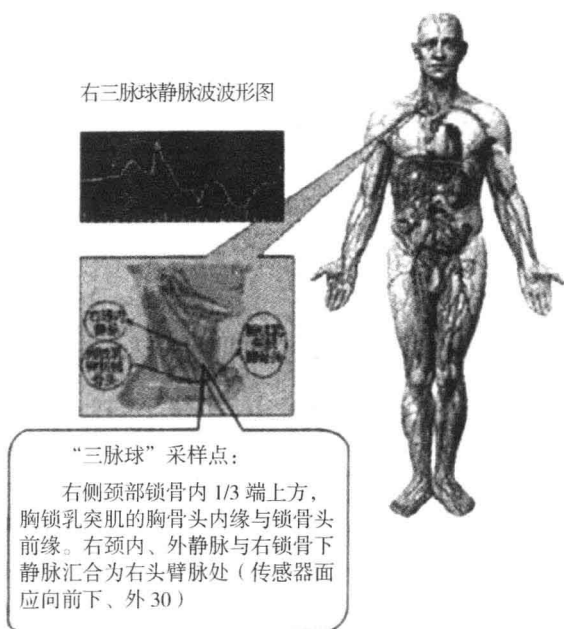


图 1-3 三脉球体表采样点几何定位图

图 1-4 给出了非接触激光测量法的示意图。