

学校编码: 10384  
学号: 19920101152747

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_  
UDC \_\_\_\_\_

廈門大學

硕士学位论文

谐振式压力传感器闭环驱动/检测接口电路研究

Study on the Closed-Loop Driving & Detecting  
Interface Circuit for Resonant Pressure Sensor

张驰

指导教师姓名: 孙道恒 教授

王凌云 助理教授

专业名称: 机械工程

论文提交日期: 2013年5月

论文答辩时间: 2013年6月

学位授予日期: 2013年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2013年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文(包括纸质版和电子版)，允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

(        )1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于  
年    月    日解密，解密后适用上述授权。

(        )2.不保密，适用上述授权。

(请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人(签名)：

年    月    日

## 摘 要

谐振式微机械压力传感器具有尺寸小、精度高、稳定性好、易与数字电路接口等优点，在压力检测领域有着广阔的应用前景。精确测量是谐振式微机械压力传感器研究的目标，驱动检测电路的性能优劣直接影响整体器件测量效果，本论文主要针对谐振式微机械压力传感器驱动检测电路展开研究。

论文首先简单回顾了 MEMS 技术及压力传感器的分类，对谐振式压力传感器的激励方式及接口电路做了简要介绍；其次分析了微机械谐振式压力传感器的结构和工作原理，比较了不同的变电容检测方式，并讨论了各自的优缺点；在此基础上，理论分析了谐振式压力传感器基于 AGC 控制技术和基于 PLL 控制技术的两种闭环驱动方式的基本原理和运行特性，通过建立传感器与驱动电路的 Simulink 仿真模型，分别对基于直流自动增益和交流自动增益控制技术的两种 AGC 闭环驱动回路进行了对比研究，确定了本课题的交流 AGC 技术方案。然后基于交流 AGC 控制回路，仿真了不同谐振子参数及接口电路参数下系统的振荡特性。利用 Multisim 软件对驱动检测模块电路（包括 C/V 转换电路、相位补偿电路、交流 AGC 自动增益控制电路、带通滤波电路、电压比较器和计数器等）进行了仿真分析，并最终将电路制成电路板进行测试。实验结果与软件仿真结果相吻合，各模块能够正常工作。频率检测模块可检测出 9KHz~49KHz 范围的谐振频率；闭环激励模块可以实现恒幅振荡，在不同频率下，其输出电压能够稳定在 2.4V 左右。

**关键词：**谐振式；闭环驱动；自动增益

## Abstract

Resonant micro-mechanical pressure sensor has many advantages such as the small size, high precision, good stability and compatibility to digital circuit, so it has a broad application prospect in the field of pressure testing. Accurate measurement is the goal of the study to the resonant micro mechanical pressure sensor. The performance of the driving and detecting circuit has a direct influence on the measuring result. Therefore, the main work of this paper is to investigate the driving and detecting circuit of the resonant micro mechanical pressure sensor.

First a review was done in this paper about the MEMS technology and the category of pressure sensor, in which the incentive methods and interface circuit of resonant pressure sensor were briefly introduced. Secondly, the structure and mechanism of the micro mechanical pressure sensor were analyzed. Comparison among different variable capacitance detection methods was done, as well as the discussion of their advantages and disadvantages. With the aforementioned work, the principles and operating characteristics of resonant pressure sensor based on two closed loop drive modes of AGC and PLL techniques were analyzed in theory. The Simulink simulation mode of the sensor and driving circuit was established. The implementation of this investigation was determined by discussing the advantages and disadvantages of different AGC modes. Then the system features under different resonator and interface circuit parameters were simulated based on AC AGC gain control loop. C/V conversion circuit, phase compensation circuit, AC AGC automatic control circuit, band-pass filter circuit, voltage comparator and counter were analyzed in simulation with Multisim software. Finally, a circuit board was fabricated and tested. The experimental result is coincided with the simulation, and every module works properly. The frequency detection module is able to detect the resonant frequency from 9 kHz to 49 kHz. Constant amplitude can be realized by the closed loop incentive module and the output voltage can be stabilized around 2.4V under different frequency.

**Key Words:** Resonant; Closed-loop drive; Automatic gain control

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
<b>第一章 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.2 MEMS 压力传感器 .....	1
1.2.1 压力传感器分类 .....	1
1.2.2 谐振式压力传感器激励方式 .....	4
1.3 谐振式压力传感器接口电路.....	10
1.4 论文的主要研究内容.....	11
<b>第二章 谐振式压力传感器理论分析 .....</b>	<b>13</b>
2.1 谐振式压力传感器基本工作原理.....	13
2.2 谐振子驱动及检测原理.....	14
2.2.1 静电驱动原理 .....	14
2.2.2 电容检测原理 .....	16
2.3 传感器动力学分析.....	19
2.3.1 谐振子驱动响应分析 .....	19
2.3.2 传感器带宽 .....	21
2.3.3 驱动与非线性 .....	23
2.3.4 噪声分析 .....	24
2.4 本章小结.....	25
<b>第三章 谐振式压力传感器驱动系统.....</b>	<b>27</b>
3.1 传感器的自激控制原理.....	28
3.2 传感器自激驱动 Simulink 仿真分析 .....	29
3.2.1 锁相环闭环驱动与 AGC 闭环驱动的比较.....	29
3.2.2 自动增益控制的闭环驱动比较 .....	30
3.3 系统参数影响.....	35

3.4 本章小结.....	39
<b>第四章 谐振式压力传感器接口电路.....</b>	<b>41</b>
4.1 闭环自激驱动电路.....	41
4.1.1 前置转换电路.....	41
4.1.2 相位补偿.....	43
4.1.3 AGC 交流自动增益控制电路.....	44
4.2 检测电路.....	50
4.2.1 带通滤波器.....	50
4.2.2 电压比较器.....	53
4.2.3 计数器.....	54
4.2.4 偏置电压.....	54
4.2.5 温度检测电路.....	55
4.3 本章小结.....	56
<b>第五章 接口电路性能测试.....</b>	<b>57</b>
5.1 PCB 板的设计和制作.....	57
5.2 偏置电压的测试.....	59
5.3 前置转换电路和相位补偿模块.....	59
5.4 AGC 电路.....	61
5.5 检测电路.....	62
5.6 本章小结.....	63
<b>第六章 总 结.....</b>	<b>65</b>
参考文献.....	67
致 谢.....	71
硕士期间科研成果.....	72



## Contents

<b>Abstract.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>II</b>
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 MEMS Pressure Sensor .....</b>	<b>1</b>
1.2.1 Category of Pressure Sensors .....	1
1.2.2 Inciting Methods for Resonant Pressure Sensors .....	4
<b>1.3 Interface Circuit for Resonant Pressure Sensor.....</b>	<b>10</b>
<b>1.4 Main Work.....</b>	<b>11</b>
<b>Chapter 2 Theoretical Analysis of Resonant Pressure Sensor .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Basic Working Principle for Resonant Pressure Sensor .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Principles for Driving and Inspecting Resonator.....</b>	<b>14</b>
2.2.1 Principle of Electrostatically Actuating.....	14
2.2.2 Principle of Capacitor Inspection .....	16
<b>2.3 Dynamic Analysis of Sensor .....</b>	<b>19</b>
2.3.1 Driving Response Analysis of Harmonic Oscillator .....	19
2.3.2 Bandwidth of Sensor .....	21
2.3.3 Driving and Nonlinearity.....	23
2.3.4 Noise Analysis.....	24
<b>2.4 Concluding Remarks .....</b>	<b>25</b>
<b>Chapter 3 Driving System of Resonant Pressure Sensor.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 The Principle of Self Excitation Control of Sensor .....</b>	<b>28</b>
<b>3.2 Simulink Simulating Analysis of Self Driving of Sensor .....</b>	<b>29</b>
3.2.1 Comparison Between Phase-Lock and AGC Closed Loop Driving.....	29
3.2.2 Comparison of Automatic Gain Closed Loop Driving.....	30
<b>3.3 Influence of System Parameters.....</b>	<b>35</b>

3.4	Concluding Remarks .....	39
<b>Chapter 4 Interface Circuit for Resonant Pressure Sensor.....41</b>		
4.1	Closed-Loop Self Excitation Driving Circuit.....	41
4.1.1	Conversion Circuit.....	41
4.1.2	Phase Compensation Circuit.....	43
4.1.3	AGC AC Gain Control Circuit AGC.....	44
4.2	Detecting Circuit .....	50
4.2.1	Band-pass Filter Circuit.....	50
4.2.2	Voltage Comparator .....	53
4.2.3	Counter .....	54
4.2.4	Bias Voltage .....	54
4.2.5	Summary.....	55
4.3	Summary .....	56
<b>Chapter 5 Test on the Interface Circuit .....57</b>		
5.1	Design and Fabrication of PCB .....	57
5.2	Test on the Bias Voltage.....	59
5.3	Test on C/V Conversion Circuit and Phase Compensation Circuit .....	59
5.4	Test on AGC Circuit .....	61
5.5	Detection Module .....	62
5.6	Summary.....	63
<b>Chapter 6 Summary .....</b>		
<b>References.....</b>		<b>67</b>
<b>Acknowledgements .....</b>		<b>71</b>
<b>Publications .....</b>		<b>72</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 引言

MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems), 即微电子机械系统, 是微电子平面加工工艺和硅微机械加工技术结合的产物, 通常是指特征尺寸大于  $1\ \mu\text{m}$  小于  $1\ \text{mm}$ , 运用微机械制造技术在一块普通的硅片集体上制造出集机械零件、传感器执行元件及电子元件于一体的系统。MEMS 具有微型化、集成化、体积小、重量轻、功耗低等特点, 可以把不同功能、不同敏感方向的多个传感器或执行器集成于一体, 形成微传感器阵列或微执行器阵列。MEMS 技术的应用几乎涉及到自然及工程科学的所有领域, 如生物医学、航空航天、仪器检测、信息等各个应用领域。正如集成电路技术把我们带入信息时代一样, 很多科学家都认为, MEMS 将会给人类社会带来另一次技术革命。

目前, MEMS 的研究主要集中在三个方向: 微型传感器(micro sensors), 微型执行器(micro actuators)和微系统(micro systems)。

## 1.2 MEMS 压力传感器

### 1.2.1 压力传感器分类

MEMS 压力传感器是一种重要的力学量传感器<sup>[1]</sup>, 是最早收到研究的微机械传感器之一。压力(压强)是在科学技术、工业控制、航空航天、生物医学工程等领域中最广泛使用的物理参数之一, 因此压力传感器也是使用最为广泛的一种传感器。压力传感器即将压力或压强信号转换为电信号的装置, 由感受压力的敏感元件及信号转换器件构成。根据敏感元件种类和转换的形式, 可以将压力传感器分为压阻式、电容式、压电式、谐振式等不同种类:

#### (1) 压阻式

压阻式压力微传感器是目前得到广泛应用的压力微传感器<sup>[2]</sup>。这种传感器的制作方法相对比较简单, 基本上是将硅片腐蚀成厚  $10\text{-}25\ \mu\text{m}$  的膜, 膜在压力作

用下发生变形,通过变形大小的变化来敏感压力的变化。若在膜的一面用扩散法或者是淀积法制作出电阻器,则当膜的两面有压力差时,膜即发生形变,从而导致电阻变化。用微电路检测出这种电阻变化,即可测出压力变化,这类传感器就称为压阻式压力微传感器。主要的压阻材料有单晶硅、扩散掺杂硅和多晶硅。

典型的压阻式压力传感器如图 1-1 所示,它通常由外壳、硅膜片和引线组成,核心部分是一个周边固支的硅膜片(硅杯),在膜片上,利用集成电路的工艺设置 4 个阻值相等的 P 型电阻,将这四个电阻连成惠斯通电桥。当压力作用在硅膜上时,硅膜变形引起电阻阻值的变化,电桥失去平衡,产生的电压输出正比与硅膜所受的压力<sup>[3]</sup>。

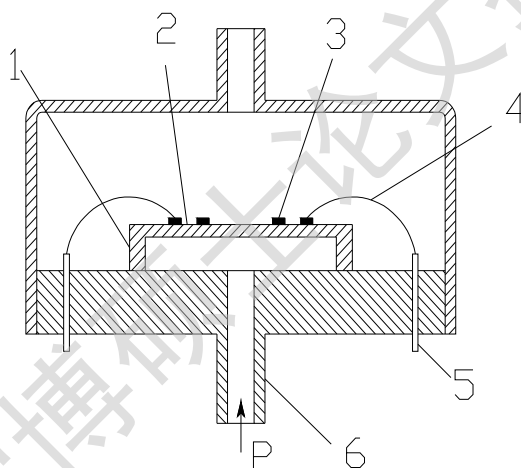


图 1-1 压阻式压力传感器结构图

1-硅杯；2-膜片；3-扩散电阻；4-内部引线；5-引线端；6-压力接管

## (2) 压电式

压电效应(Piezoelectric effect)实际上是一种机电耦合效应,即电介质受外界机械压应力的作用,在其表面产生电荷的现象。具有压电效应的材料很多,姚守拙院士将其分为四类,即压电晶体、压电陶瓷、高分子压电材料和半导体压电材料,并对每一类压电材料进行了详细说明和性能对照<sup>[4]</sup>。高分子压电材料包括某些天然的高分子化合物和经过延展、拉伸和电场极化的合成高分子材料,如 PVF<sub>2</sub>、PVF、PVC、PMC、PC 等等。这类材料的优点是柔韧性和加工性能好,但是机电耦合系数比较小。其他三类压电材料多为硅、锗、铋等过渡单元的单晶

体以及他们形成的化合物的多晶体或者混合晶体。这些晶体材料各有优缺点，但普遍有较大的硬度、密度和良好的力学性能。

压电式压力传感器是利用压电材料的压电效应将被测压力转换为电信号的。当压电元件受到外力  $F$  作用时，在相应的表面上产生表面电荷  $Q$ ，其关系为  $Q=d \cdot F$ ； $d$  为压电系数，用来描述压电效应的物理量，对方向一定和表面数一定的元件，是一个常数。典型的压电式压力传感器如图 1-2 所示，压电元件夹于两个弹性膜片之间，压电元件的一个侧面与膜片接触并接地，另一侧通过引线将产生的电荷引出。被测压力均匀作用在膜片上，使压电元件受力而产生电荷。电荷量一般用电荷放大器或者电压放大器放大，转换为电压或电流输出。

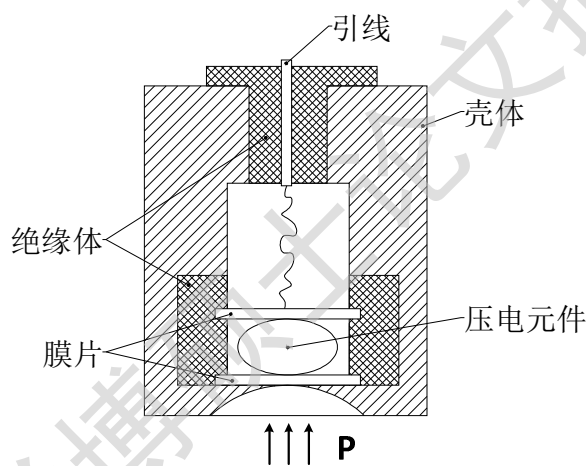


图 1-2 典型的压电式压力传感器

### (3) 电容式

压力传感器的基本原理就是将要测试的压力加到一个压力敏感膜上，引起膜发生形变，从而通过对膜变形程度的测量实现压力的测量，在电容式微传感器中，压力测量是通过检测由于膜受压变形所导致的压力敏感膜与固定基片上敏感电极之间的间隙变化实现的。与压阻式压力传感器相比电容式压力传感器有高输出阻抗、良好的动态特性和温度稳定性；但同时也存在一些缺陷，如温度改变引起的附加电容变化，极板可能与周围物体包括仪器甚至人体间产生寄生电容等。

图 1-3 所示为电容式压力微传感器的典型结构。由于硅加工工艺中的各向异性，压力敏感膜做成矩形形状。图中电容器的两个极板，一个置在玻璃上，为固定极板，另一个置在硅膜片的表面上，为活动极板。当硅片和玻璃键合在一起之

后, 就形成有一定间隙的空气(或真空)电容器。电容器的大小由电容电极的面积和两个电极间的距离决定。当硅膜片受压力变形时, 电容器两电极间的距离便发生变化, 导致电容的变化。电容的变化量与压力有关, 因此可利用这样的电容器作为检测压力的元件。通过微机电系统的工艺, 可以将测量电路和压敏电容做在同一硅片上, 使整个传感的尺寸大大减小。

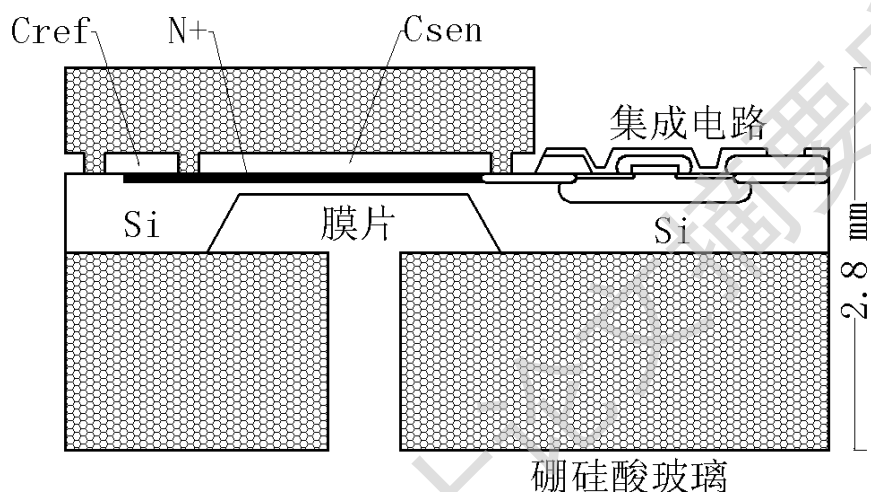


图 1-3 电容式压力微传感器

#### (4) 谐振式

谐振式传感器是直接将所测压力变化转换为物体谐振频率变化的一类传感器<sup>[5]</sup>, 当谐振子被激励而发生谐振时, 谐振频率为  $f_0$ , 当压力施加到敏感膜片上后, 谐振子的刚度发生变化, 从而导致谐振子谐振频率变化为  $f_0 + \Delta f$ , 检测电路通过对频率改变的测量, 即可得到所测压力值。因其输出为频率信号, 故具有高精度、高分辨率、高抗干扰能力、适于长距离传输、能直接与数字设备相连接的优点, 又因无活动部件而具有高稳定性和高可靠性, 并可能制造出精度极高的传感器(目前可以做到精度超过万分之一)。但是由于对材料质量的要求较高, 加工工艺复杂, 所以生产周期长, 成本较高。

#### 1.2.2 谐振式压力传感器激励方式

由于体积小、灵敏度高、响应快等特点, 谐振式压力传感器在国际上得到了广泛的重视, 尤其在空间飞行、医疗等对压力测量要求精确的领域, 具有广阔的应用前景。随着近年来微电子技术和微机械加工技术的迅猛发展和相互渗透, 作

为谐振传感器重要组成部分的振动元件已从早期的宏观尺寸发展至现今的微观尺寸，目前的谐振传感器内大量采用的是基于硅微机械的谐振器，也称谐振子。这是微谐振传感器的核心部件，它是利用硅材料的各向异性刻蚀技术对硅片进行微机械加工而成，其几何尺寸很小通常在 1 mm 以下，硅微机械结构谐振子的结构形式多种多样，但可归纳为三种基本结构形式，即悬臂梁式、双端固支梁桥式、薄膜式。悬臂式谐振子的主要特点是一端与硅基片固接而另一端悬空为自由振动端；桥式谐振子的特点为两端固定；薄膜式谐振子的结构特点为周边固支。

要实现一个硅微机械谐振传感器需采用某种激励方式使谐振器发生谐振，通过某种转换机制将待测物理量的变化转化为振动元件内应力的变化，而改变元件的谐振频率，然后利用光学电学方法拾取谐振频率。光学方法有光强度调制检测方法<sup>[6]</sup>和光干涉调制检测方法<sup>[7]</sup>这两种方法；电学方法主要是把谐振器的机械振动转化成电学量，有电磁感应法、电容检测、压电拾振以及压阻拾振等。现今用于激励谐振的有电磁激励、静电激励、光激励、电热激励以及压电激励等方式。电磁激励利用电流导体在磁场中受洛伦兹力作用而受迫振动，工作稳定可靠但必须利用磁场难于实现微型化；静电激励利用电容两个电极之间的静电引力，需要两个电极而且对电极间距控制相对要求较高；压电激励利用逆压电效应原理简单振动稳定易于检测容易形成闭环自激，但加工工艺与集成电路工艺不兼容不利于集成化和智能化；电热激励利用温度差导致的热应力激励，工艺制作相对容易但抗干扰能力、温度特性稍差。对硅微机械谐振子的主要材料是单晶硅，除此外还有其它一些材料比如多晶硅<sup>[8, 9]</sup>二氧化硅石英<sup>[10]</sup>以及氮化硅<sup>[11]</sup>等硅基材料。

### (1) 光激励

1984 年，英国 Strathclyde 大学的 B. Culshaw 等人首先成功的进行了光激励硅桥振动的实验。最初的实验系统比较复杂，含有较多的分立元件。在随后的几十年中，他们不断改进实验系统，由最初的光它激励到后来的光自激励，并实现了光路系统的光纤化。在由实验室向实用研究的转化过程中取得了很大进展。但是光学自激励要求光纤输出端和硅桥表面形成 Fabry-Perot 腔，即在腔中光纤的出射光线和硅桥表面的反射信号形成干涉，从而可以进行出射光线的调制。实验表明，要得到这样的 F-P 腔相当困难，光纤端与硅桥表面的距离需精确调整到 10  $\mu\text{m}$  量级。如此高的精度要求，给制作和应用带来了很大困难。

## (2) 压电激励

压电激励方式<sup>[12]</sup>一般是将压电材料制备在待测微构件上，根据逆压电效应，对压电材料施加交变电压使压电材料的尺寸发生变化，从而使待测微构件振动的激励方式。

S.C.Minne 等人介绍了一种利用氧化锌压电薄膜激励微悬臂梁的方法。通过将不同频率的交变电压加载到氧化锌薄膜上，使梁发生周期性的弯曲振动而实现激励<sup>[13]</sup>。压电激励能实现对微构件较高频率的激励，且外围电路简单，很适合于压电型微构件。对于非压电型微结构，实现压电激励需要在结构上制备压电材料，才能实现激励，同样附加的压电层会影响微构件动态特性。

压电激励相对于采用微细加工技术制作的微型谐振器来说，体积通常比较大，但是制作工艺成熟，工作性能稳定，目前已经在许多传感器中得到应用。

## (3) 静电激励

静电激励是在两电极上施加电压，两电极之间存在静电力的作用，利用静电力驱动谐振元件发生振动，引起两电极极间电容的变化，通过配置合适的测量电路，将电容容值的变化转换为电量输出，实现对振动的电容检测。

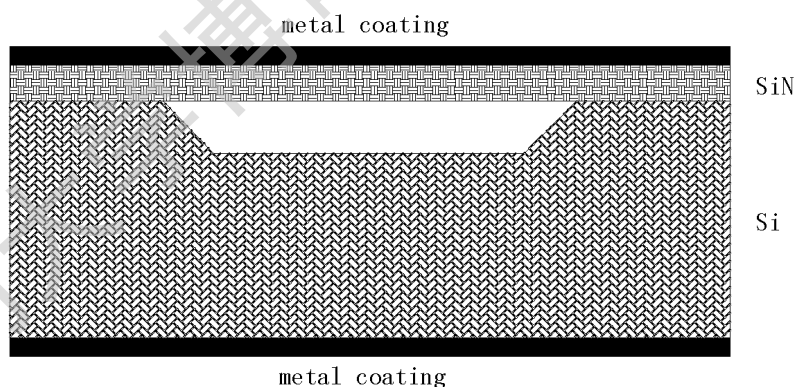


图 1-4 静电激励，光学检测传感器结构

英国 UCL 的 R.M.A.Fatah 于 1991 年首先阐述了静电激励微型硅谐振器的原理，并进行了静电激励的探索性实验<sup>[14]</sup>。他在实验中所用的静电激励硅谐振器如图 1-4 所示。其主要特点是谐振器的上下两面的金属镀层构成一个平板电容，其中硅衬底是固定电极，二氧化硅梁的镀层是活动电极，它可以随梁一起运动；当我们在极板间施加电压产生电场时，就会在两端极板上产生极性相反的电荷，



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库