

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目：MEMS 热对流加速度传感器的研究

研究生 刘晓阳

专 业 电子与通信工程

指导教师 杨 旻 教授

 汶 飞 讲师

完成日期 2018 年 4 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

MEMS 热对流加速度传感器的研究

研究生：刘晓阳

指导教师：杨旻 教授

汶飞 讲师

2018 年 4 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Research on MEMS Thermal Convection
Accelerometer**

Candidate: Xiaoyang Liu
Supervisor: Professor Yang Yang
Dr. Fei Wen

April, 2018

摘要

MEMS热对流加速度传感器是一种通过密闭空腔内流体的自然对流传热来对外界加速度信号进行检测的微纳器件,相比于其他种类的加速度计,它的最大特点是没有实体的质量块,用腔体内加热的空气团作为可动质量块,这大大提高了加速度计的抗撞击性能,在一些大加速度应用中发挥更好作用。本文设计了一款高性能、工艺简单的热对流加速度传感器,使用热稳定性好、精度高的铂热电阻作为敏感元件,使用热绝缘性能较好的柔性材料聚酰亚胺(Polyimide)作为衬底,实现了无悬空梁的平面结构设计。

首先对热对流加速度传感器的国内外研究现状以及MEMS微加工工艺进行了调研和综述,然后分析了热对流加速度计的基本工作原理,接着对密闭腔体内流体在自然对流条件下的温度场变化情况进行了建模仿真分析,仿真结果验证了温度差与加速度的线性关系,也显示出在传感电阻与加热电阻的距离为 $30\sim 70\mu\text{m}$ 的范围内加速度计的灵敏度最高,并据此设计出不同结构的加速度计进行实验验证。在经过了光刻、蒸镀、剥离、溅射、电镀、沉积、刻蚀等硅表面微加工工艺步骤后,完成了加速度计芯片的制作,并对得到的芯片进行了晶圆级电性能测试,得到铂的方块电阻为 0.746Ω ,各部分铂电阻值与设计值相符。在此基础上,设计出了热对流加速度传感器的接口电路,并对芯片进行了划片、键合和实验室封装。最后进行了加速度计的测试,通过对比不同结构的加速度计性能,验证了理论和仿真结果的正确性。

关键字: MEMS 传感器、加速度计、有限元仿真、微机械加工工艺、接口电路

ABSTRACT

MEMS thermal convection accelerometer is a kind of micro-nano device that detects the external acceleration signal by the natural convection heat of the fluid in a closed cavity. Compared with other types of accelerometer, the most prominent feature of thermal accelerometer is that there is no physical mass, using the air bubble heated in the cavity as a sensitive mass, which greatly improves the accelerometer impact resistance and make it to play a better role in big acceleration applications. In this paper, a thermal convection acceleration sensor with high performance and simple process is designed. The platinum thermal resistance with good thermal stability and high precision is used as the sensing element, and the flexible material polyimide with good thermal insulation performance is used as a substrate to realize the planar structure design without a suspended beam.

Firstly, the domestic and foreign research status of thermal convection acceleration sensors and MEMS micromachining technology are investigated and summarized, and the basic working principle of the thermal convection accelerometer is analyzed. Then, the modeling and simulation of the temperature field of the fluid in the sealed cavity under natural convection conditions is performed. The simulation results verify the linear relationship between temperature difference and acceleration, and also show that the sensitivity of the accelerometer is highest in the range of 30-70 μm between the sensing resistor and the heating resistor. Based on this, accelerometers with different structures are designed for experimental. After the photolithography, evaporation, stripping, sputtering, electroplating, deposition, etching and other silicon surface micromachining process steps, the production of an accelerometer chip is completed, and the obtained chip is subjected to a wafer level electrical performance test. The sheet resistance of platinum is 0.746 Ω , and the platinum thermal resistance values of all parts are in accordance with the design values. On this basis, the interface circuit of the thermal convection accelerometer is designed, and the chip is diced, bonded and laboratory packaged. Finally, the accelerometer is test. By comparing the performance of accelerometers with different structures, the correctness of the theoretical and simulation results has been verified.

Keywords: MEMS sensor, accelerometer, finite element simulation, micromachining process, interface circuit

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
目录	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 热对流式加速度传感器的国内外研究现状.....	5
1.2.1 国外研究现状.....	5
1.2.2 国内研究现状.....	8
1.3 MEMS 微机械加工技术	9
1.3.1 硅表面微加工工艺.....	10
1.3.2 体硅微机械加工技术.....	12
1.4 论文主要内容.....	14
第 2 章 MEMS 热对流加速度传感器的原理和模型分析	16
2.1 热对流加速度计原理.....	16
2.2 热对流加速度计自然对流传热模型.....	17
2.3 铂薄膜材料特性.....	18
2.4 本章小结.....	21
第 3 章 MEMS 热对流加速度传感器的仿真分析及结构设计	22
3.1 有限元耦合仿真.....	22
3.1.1 建模和仿真.....	22
3.1.2 仿真结果分析.....	28
3.2 热对流加速度计结构设计.....	30
3.2.1 加速度计结构及布局.....	30
3.2.2 方块电阻的测量结构.....	33
3.2.3 加速度计各部分材料选取.....	34
3.3 本章小结.....	35
第 4 章 MEMS 热对流加速度传感器版图设计及工艺加工	36
4.1 引言	36
4.2 MEMS 热对流加速度传感器工艺流程设计	36

4.3 版图设计.....	38
4.3.1 L-Edit 版图绘制.....	38
4.3.2 对准标记设计.....	40
4.4 MEMS 热对流加速度传感器工艺实施.....	42
4.4.1 PI 薄膜的实验.....	42
4.4.2 后续工艺流程.....	45
4.5 本章小结.....	49
第 5 章 外接电路的设计和加速度计的测试.....	50
5.1 MEMS 热对流加速度传感器的接口电路.....	50
5.1.1 加热器温度控制电路.....	50
5.1.2 加速度检测电路.....	51
5.1.3 完整接口电路.....	53
5.2 MEMS 热对流加速度传感器的测试.....	53
5.3 本章小结.....	57
第 6 章 总结.....	58
6.1 论文总结.....	58
6.2 论文中的不足和展望.....	59
致谢.....	60
参考文献.....	61
附录.....	66

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

自 20 世纪 80 年代以来,世界各国都将传感器技术列为重点发展的高科技技术,现如今信息技术正在推动着人类社会高速发展,而作为信息技术源头和基础的传感器技术自然具有举足轻重的地位。传感器起源于仿生研究,正如同生物通过一些特定的感觉器官和系统来与周围环境发生信息交换一样,机器也需要通过一些“电器官”来感知外界的信息,这个“电器官”就是指传感器。MEMS 传感器是在微机械加工技术发展的基础上发展起来的微纳米尺寸的传感器件,现代科技发达的一大标志就是尺寸更小、集成度更高,因此 MEMS 技术的发展就显得更为重要。

MEMS 传感器最开始主要应用于一些高端领域,比如航空航天、军事、汽车等,随着科技的发展和社会的进步,现如今消费电子领域已成为了 MEMS 传感器的第一大应用市场,比如智能手机、智能手表等可穿戴设备^{[1][2]},包括时下最热门的增强现实 (AR)、虚拟现实 (VR)、无人机、自动驾驶/无人驾驶等智能系统,未来在医疗领域也将有更多应用,可以说未来智能系统最关键的组成部分就是基于半导体技术的微传感器和微执行器。麦姆斯咨询的调查数据显示,2015 年 MEMS 和传感器市场在 330 亿美元左右,预计到 2021 年将翻两倍达到 660 亿美元的规模,出货量将达到 1308 亿颗。具体市场规模情况如图 1.1 所示。

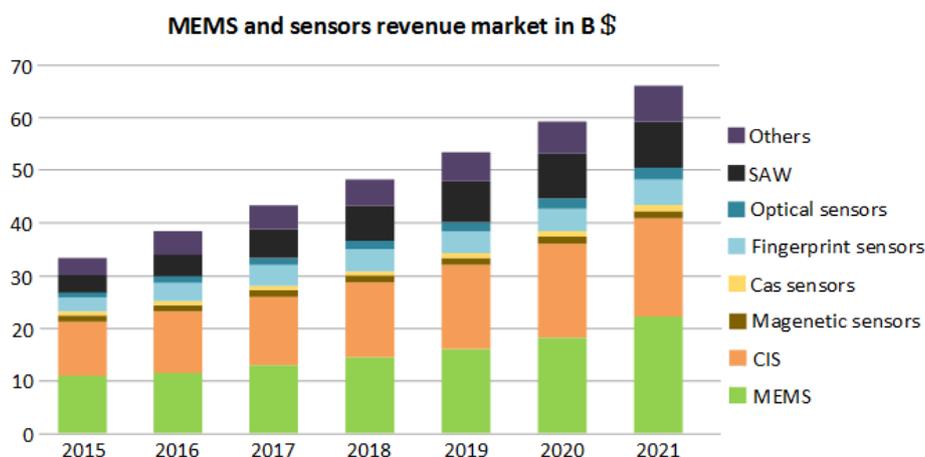


图 1.1 2015~2021 年 MEMS 和传感器市场规模

从上图中也可以看出MEMS技术在未来几年发展中所处的重要地位，MEMS加速度传感器是MEMS器件中比较常见的一种器件，它是一种能够用来测量加速力的微纳器件，加速力是施加在物体上使之进行加速运动状态的力。当物体在加速力的作用下做加速运动时，通过安装在物体上的MEMS加速度传感器即可采集到这个加速度信号，并通过信号处理电路来测得此加速度的大小。加速度分为角加速度和线加速度，测量角加速度的器件一般称为陀螺仪，测量线加速度的器件就叫做加速度计^[3]。在一些应用中，例如无人机，通过陀螺仪和加速度计组合成为惯性测量单元（IMU）来监测无人机的飞行姿态和加速度等信息。

MEMS加速度传感器类型多种多样，按不同的标准可进行不同划分。根据工作原理不同，常见的加速度传感器可分成电容式、压阻效应式、压电效应式以及热对流式等类型^{[4][5]}，不同种类的加速度传感器性能有差别，用途也不同。

电容式加速度计根据两极板间的电容变化来测量加速度信号，它有两种电容改变方式：变间距式和变面积式。图 1.2 是两种不同电容改变方式的电容式加速度计的结构俯视图，其中(a)的阴影部分是制作在衬底上的固定电极，空白部分悬空，通过两端的锚点固定起来，形成可动电极；(b)的栅形硅电极是固定电极，铝电极是可动电极。两种结构都是通过固定电极和可动电极组成相应电极板对来进行加速度检测的。在没有加速度的情况下，电极板间的电容保持恒定不变，差分电容为 0，外部接口电路不会有信号输出。当有加速度时，由于敏感质量块的存在，两种结构的可动电极都在质量块惯性力的带动下与固定电极发生相对位移，从而改变电极板间距或正对面积，这样两极板间电容大小就会发生变化，外接的信号检测电路就可测得一个差分信号，不同的加速度大小测得的差分信号大小也不同，而且加速度与差分信号具有线性特性，这样就可测得外界的加速度及其大小。

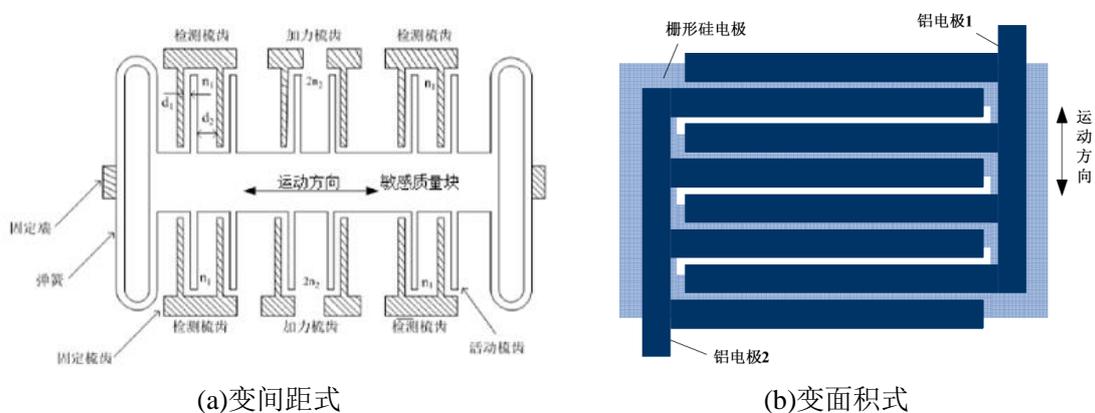


图 1.2 电容式加速度计示意图

压阻式加速度计是利用半导体的压阻效应来工作的，它主要由质量块、悬臂梁和通过特殊工艺布置在悬臂梁上的压阻元件组成的^[6]，其结构如图 1.3 所示，质量块是悬空的，通过悬臂梁与衬底相连接，悬臂梁上铺设压敏半导体材料的压阻元件^[7]。图 1.3 所示压阻式加速度计为单轴加速度计，Z 轴方向是敏感方向。当传感器受到外界施加的敏感方向上的加速度时，可动质量块由于惯性作用与衬底发生相对位移，悬臂梁在质量块的带动下发生形变产生应力，从而导致悬臂梁上的压阻薄膜也随之产生形变，由于压阻效应，压阻元件的电阻值发生变化，通过外接电路即可测得此加速度信号。

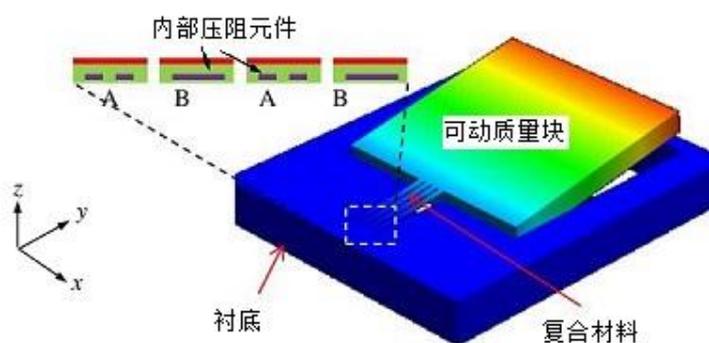


图 1.3 压阻式加速度计结构示意图

压电式加速度计的工作原理类似于压阻式，需要借助外部施加在悬臂梁上的应力，但它采用的是压电材料，比如石英、钛酸钡、PVDF、氧化锌等，这些压电材料在外部应力的作用下会产生与应力成比例的电荷，这样通过测量电压变化就能测得加速度^[8]。压电式加速度计结构与压阻式相似，如图 1.4 所示是一个压电式加速度计的结构^[9]，它由衬底、质量块、悬臂梁、整层覆盖的压电材料以及压电材料的上下两个电极组成，其中底部电极与压电材料都覆盖一整层，顶部电极分别设置在四个悬臂梁的端点处，压电材料夹在上下两个电极之间。此加速度计有两种工作模式，对于水平方向的加速度（x 方向或 y 方向），质量块在惯性作用下发生扭转运动，沿着加速度方向的两条悬臂梁发生反对称偏转，产生的力使压电材料产生电荷，外界有信号输出，与此同时，与加速度方向垂直的两条悬臂梁发生不会有信号输出的偏转；而对于 Z 轴方向上的加速度，四条悬臂梁会同时发生对称偏转，带来的应力导致端点处的压电材料产生电荷，再通过外部电路测得此加速度信号。另外，由于水平方向上有两条悬臂梁产生信号而竖直方向有四条，所以通过外接电路是可以区分出三部分信号的，也就实现了此压电式加速度计的三轴性能。

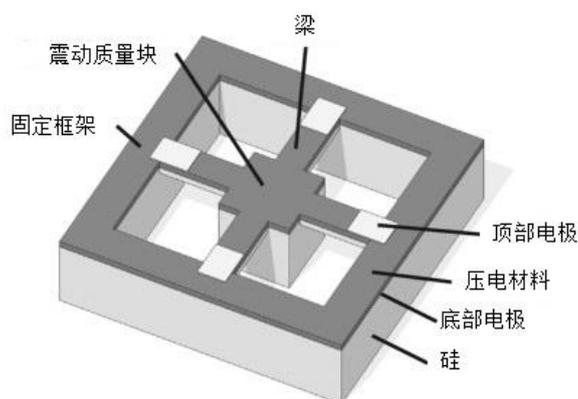


图 1.4 压电式加速度计结构示意图

MEMS热对流加速度计是基于密闭空腔中空气的自然对流原理来工作的，其基本的结构如图 1.5 所示，它主要包括一个加热电阻、两个完全相同的传感电阻以及由硅衬底和顶部封装盖（图中未画出）组成的密闭空腔^{[10][11]}，其中加热电阻放置于密闭空腔的中央，两个传感电阻对称放置在加热电阻的两边，到加热电阻的距离相等。这三部分电阻均为与温度具有线性或近似线性特性的热电阻。

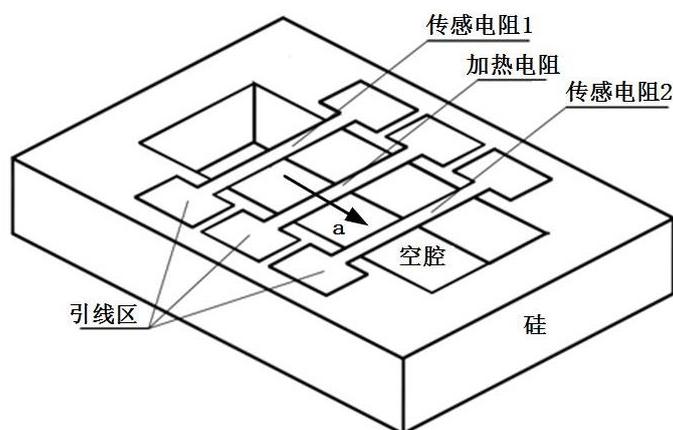


图 1.5 热对流式加速度计基本结构示意图

当加热电阻通电开始工作后，密闭空腔内的空气被加热形成一个可以充当敏感质量块的热气团，当没有外界加速度时，热气团处于恒定位置，空腔内的温度场稳定，两个传感电阻感知到的温度相同，电阻大小也相同，通过引线区外接的检测电路就检测不到信号输出；当对传感器施加一个敏感方向（如图 1.5 中的 a 方向）上的加速度时，热气团相对于几个热电阻的位置将发生改变，两个传感电阻所感知到的温度发生变化，其电阻值会发生改变。这样，通过外接检测电路就

能检测到一个差分信号，经过处理后最终将会输出一个直流电压信号，也就是所检测到的加速度信号。

以上不同原理的MEMS加速度传感器整体性能优缺点可总结为表 1.1。通过表中的总结也可以看出，任何一种加速度计都有自身的一些优缺点，从工艺上来说，前三种都用的体加工工艺，工艺复杂度高导致良品率低、成本高，而热对流式的加速度计可以用基于标准CMOS工艺的硅表面微加工工艺来制作，可同时把接口电路制作在芯片上，提高集成化程度，因此此类传感器具有很好的发展前景。

表 1.1 不同种类加速度计的优缺点

分类特点	电容式加速度计	压阻式加速度计	压电式加速度计	热对流式加速度计
优点	①灵敏度高 ②精度高 ③温度系数低	①量程大 ②工艺简单 ③功耗低	①灵敏度高 ②线性度好 ③结构简单	①精度高 ②可靠性好 ③良品率高 ④易于与 IC 兼容
缺点	①信号处理电路复杂 ②易寄生电容干扰 ③量程小	①易受温度干扰 ②体积较大	①低压特性差 ②不能测量静态加速度	①三轴测量较难实现 ②气密性要求高

1.2 热对流式加速度传感器的国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

2003 年法国蒙彼利埃大学的 F.Mailly 等人^[12]报道了一款热式的加速度计，他们利用流体动力学方程组的数值分析方法研究了加热器-检测器间的距离对温度分布的影响，以及与传感器灵敏度的关系，并使用硅的微加工的技术制作出了具有 3 对检测器的热对流加速度计，如图 1.6，这 3 对检测器与加热器间的距离分别为 100 μm 、300 μm 和 500 μm 。对制作好的加速度计进行测试分析，测试结果与模拟结果具有很好的一致性：检测器与加热器的最佳距离为 400 μm ，在这个距离处加速度计的灵敏度最高，在加热器功率为 54mW 时，加热器提高的温度为 238 $^{\circ}\text{C}$ ，此时在 1g 的加速度下检测器间的温差为 3 $^{\circ}\text{C}$ ，电学灵敏度为 2.5mV/g，在 0-3g 的范围内具有良好的线性。但也存在一些问题，比如实际加热器的温升比预计的要低，这是由于实际中气体特性和热变化等情况达不到模拟中的理想状态。此外测量带宽也太小，该团队也在随后的工作中对增加传感器带宽进行了相关研究。

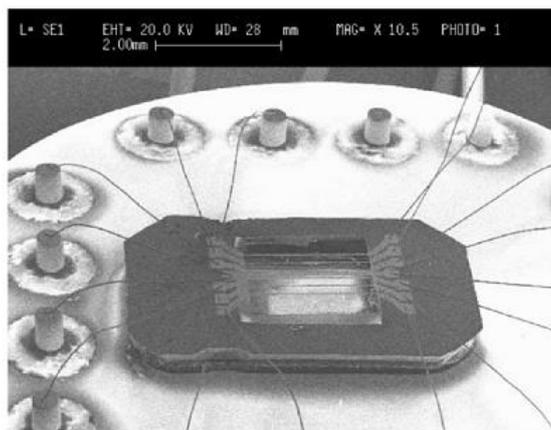


图 1.6 三对检测器的热对流加速度计

2007 年Dimitris Goustouridis等人^[13]设计并制作出了一款多孔硅热式加速度计，结构如图 1.7 所示，它由一个多晶硅加热器和对称放置于加热器两侧的多晶硅热电偶组成，互连线和引线区的材料是金属铝，传感器结构制作在 $60\mu\text{m}$ 厚的多孔硅介质层上，以确保有源元件与硅基底有足够的热绝缘。输入 $2\sim 18\text{V}$ 的电源电压，加热器对应产生 $3.5\sim 225\text{mW}$ 的功率，整个芯片的尺寸是 $1.4\text{mm}\times 0.9\text{mm}$ 。使用 FEA 软件包 Ansys/Flotran 对所设计的器件结构进行仿真分析，仿真中密闭空腔长宽高分别为 $2\text{mm}\times 2\text{mm}\times 2\text{cm}$ ，仿真结果表明，加热器和热电偶的最佳距离为 $30\sim 40\mu\text{m}$ 。对加工好的传感器分别在未封装的空气中、未封装的油中和封装好的油中三种不同封装结构进行测试，结果表明，未封装的油中具有最高的相应，达到 1300nA/g ，封装好的油中具有比较好的线性度，三种封装结构的都在低频 10Hz 时显示出比较好的特性，截止频率分别为 12 、 30 、 70Hz ，但是第三种封装结构在 100Hz 以上的频率依然有较高的灵敏度。

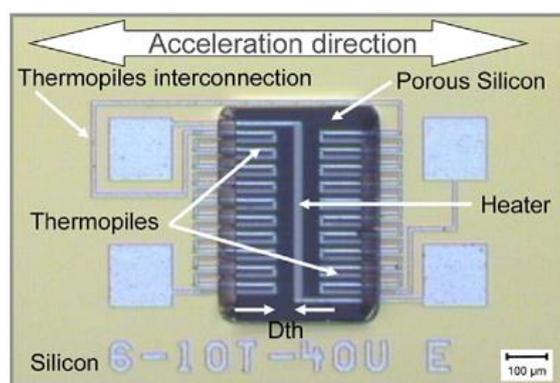


图 1.7 多孔硅热式加速度计

2011 年C.S.Silva等人^[14]开发了一种使用聚合物和硅平面显微技术组合工艺，用来制作完全集成的三轴热式加速度计。具有低导热率的聚合物材料（聚苯乙烯

和聚酰亚胺)的使用改进了热加速度计的整体功耗,并且实现了简单且低成本的制造工艺。该三轴加速度计的结构如图 1.8 所示,主要包括 4 个微注射聚合物部分和 3 个连接的聚合物膜,这些微注射部件为放置在其膜片上的传感器结构提供机械支撑及确定腔体尺寸。制作完成后主要对加热器的加热温度以及功率进行测试,结果与预期一致,58mW 的功率能使加热器产生 580K 的温度。

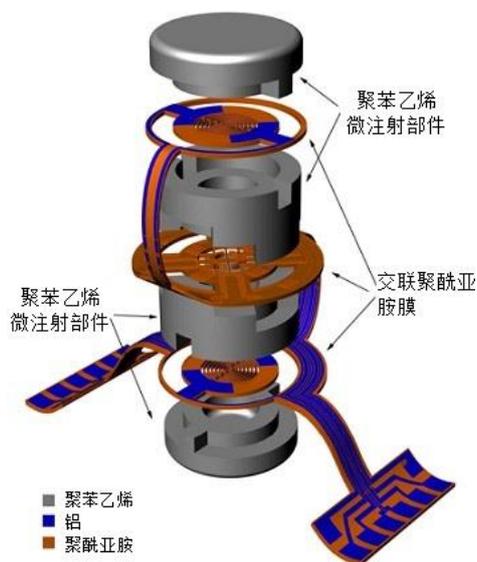


图 1.8 三轴热式加速度计的各部分主要部件示意图

2015 年,印度理工学院的 R.Mukherjee 等人^[15]对双轴热式加速度计的加热器不同结构进行了研究,通过使用 Comsol 和 Cadence 软件对不同形状的加热器进行仿真分析,得出不同形状的加热器有不同的加热效果,具体三种形状如图 1.9 所示,分别为(a)曲折形,(b)十字形,(c)方环形,尺寸都为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,臂宽 $10\mu\text{m}$,厚度 $2\mu\text{m}$,外部密闭空腔和空腔中的空气都相同,通过仿真来对三个不同加热器的加热温度进行分析。仿真结果显示(c)方环形的加热器附近温度梯度是缓慢降低,而其他两种下降斜率很大,说明方环形的加热器能使检测器感测到更精确的温度梯度,传感器精度也就更高。

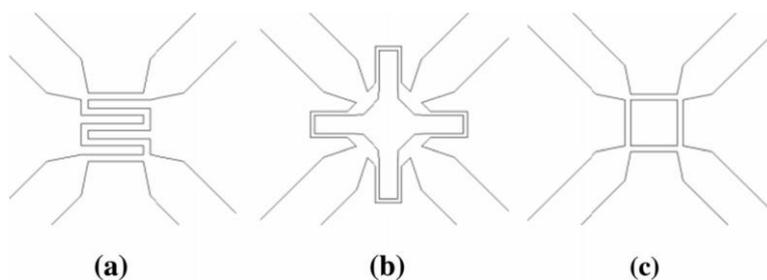


图 1.9 三种不同形状的加热器 (a)曲折形 (b)十字形 (c)方环形

1.2.2 国内研究现状

国内对热对流式加速度计的研究最早开始于 2001 年，清华大学的罗小兵博士^{[16][17]}对基本结构的热对流加速度计进行优化分析，研究了加热器和检测器间位置、密闭腔体中的不同流体、加热器的温度等对加速度计性能的影响，并最终制作出加速度计进行实际测试，制作出的结构如图 1.10 所示。测试结果显示出加速度计具有符合预期的线性度，线性误差小于 0.35%，该器件在 45Hz 时 0~10g 的加速度范围内具有良好的线性度，在 87mW 的工作功率下灵敏度达到了 600 μ V/g。

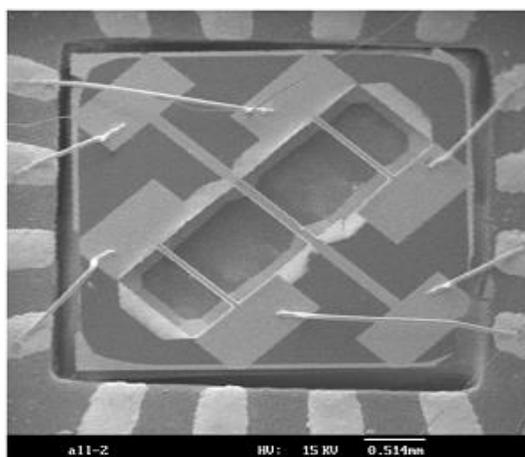


图 1.10 热对流加速度计基本结构

2008 年，中国电子科技集团公司第十三研究所的吕树海等人报道了一种的三轴热对流加速度计^[18]，密闭腔体中，在加热器的 x、y、z 三轴向上放置六对温度传感器来检测三个方向上的加速度，经过模拟仿真和工艺加工最终将其制作成功，器件模型和最终成品如图 1.11 所示。测量结果表明该加速度计实现了三个方向上加速度信号的检测，并且具有 $\pm 2g$ 的量程和 1mg 的分辨率，抗冲击力达到了 10000g。

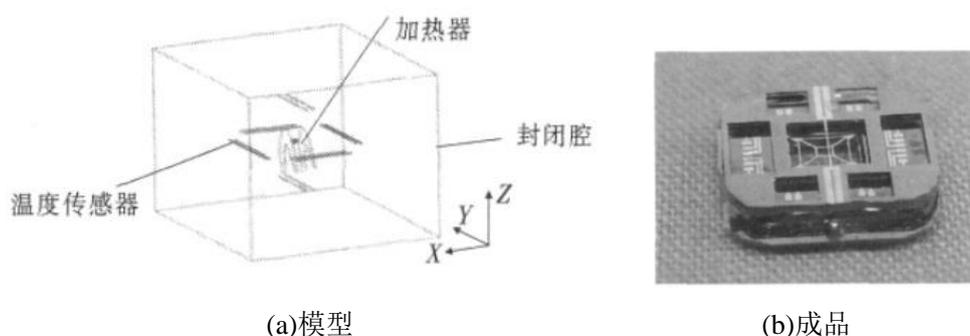


图 1.11 三轴热对流加速度计

除了以上国内外各高校和研究所的研究，热对流式加速度传感器已投入商用，现在此类传感器市场由美新半导体有限公司（MEMSIC）主导，其加速度计产品在汽车、手机、数码相机、液晶电视、玩具等都有应用，其他各类型的传感器也都占据着一定的市场份额，最新的加速度计产品有MXC6255XC/U DTOS完全集成的热式加速度计、MXR9500MZ三轴加速度计等。图 1.12 是美新半导体公司的加速度计产品，可以看出没有可动结构、易于与CMOS集成是热式加速度传感器的最大特点。

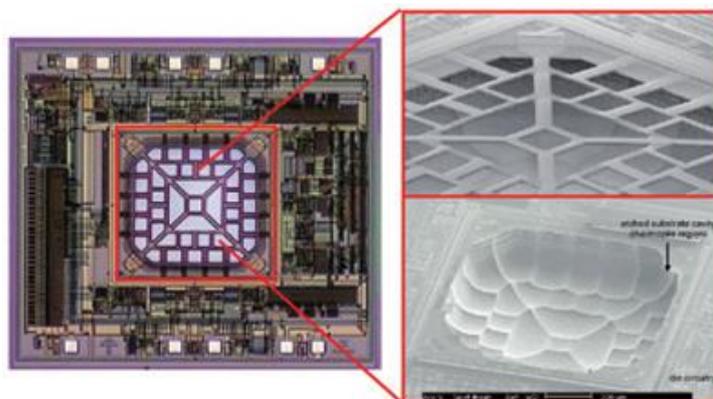


图 1.12 美新两轴热对流加速度传感器芯片产品

通过国内外MEMS热对流加速度传感器研究现状可以看出，国内对于MEMS热对流加速度传感器的研究在理论研究和计算仿真等方面并不比国外落后，但在性能的优化、工艺加工方面还存在一定差距，也是国内研究人员的努力方向。现有的热对流加速度传感器均需背部刻穿来形成腔体结构，这样就导致了器件仍然有悬空梁结构的存在，这一方面使加速度计抗撞击性能变差，另一方面也增加了工艺难度，大大降低良品率。本文针对此方面缺陷进行优化设计，提出了无需背部刻蚀深槽的平面衬底设计方案，并成功制作出了所设计的加速度计芯片。

1.3 MEMS 微机械加工技术

MEMS微加工技术总体上可分为三大类：第一类是传统的机械加工技术^[19]，是日本最先研究出的MEMS加工技术，利用大型的机械设备制造出小型设备，再用小型设备制造出微型机械设备，从而加工出微型器件或装置；第二类是硅微机械加工技术^{[20][21]}，是美国最先研究的硅基底MEMS微加工技术，它是在传统的IC工艺技术的基础上发展起来的，主要包括硅表面微机械加工和体硅微机械加工，前者原理与IC工艺相似，都是在硅基底上做多层薄膜材料来制作出微结构，后者是对硅基底进行刻蚀，对硅直接进行结构化、图形化加工；第三类是德

国首先研究出的LIGA（光刻、电铸和注塑）微加工技术^{[22][23]}，它主要包括三部分，深度X射线刻蚀、电铸成型和塑料铸膜，先对光刻胶进行图案化，再利用光刻胶下的金属衬底作为电极实施电镀，剥离后形成模具，最后塑铸成型，即可得到高深宽比的微结构。

目前来说比较主流的MEMS技术是硅微机械加工技术，本文所设计的也是硅基底的MEMS结构，因此主要研究硅微机械加工技术。

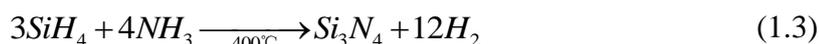
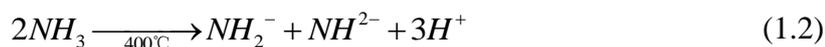
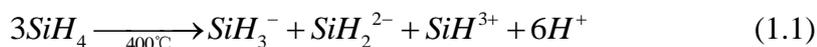
1.3.1 硅表面微加工工艺

硅表面微加工工艺是在硅衬底的正面进行薄膜沉积^[24]，通过沉积不同材料的薄膜来制作出立体微结构。薄膜沉积技术总体上可分为两类：一类是PVD（物理气相沉积）技术，另一类是CVD（化学气相沉积）技术。

PVD技术是利用物理原理，通过设备给靶材料施加能量使其从固态变为气态，然后释放能量，从气态再变回固态最终沉积在样品上，是一个物理过程。PVD技术主要包括电子束蒸发、热蒸发和磁控溅射等，主要用来制作金属或一些化合物薄膜。电子束蒸发和热蒸发技术的原理基本相似，可统称为蒸镀。蒸镀的原理是给真空腔体中的材料靶加热使其蒸发后，再沉积在硅片表面。蒸镀中沉积材料粒子的方向性较强，大多数粒子按同一方向生长，所以对台阶侧壁的沉积性较差，最终制作的薄膜覆盖率不好^[25]，溅射镀膜也是在真空条件下进行的，一般是在充Ar（氩）气的真空环境，对Ar进行辉光放电形成Ar⁺离子，在真空腔中施加电场，Ar⁺将高速轰击靶材料，靶材料会溅射出来沉积到样品上完成薄膜制作。由于蒸镀和溅射的作用机理不十分相同，因此镀膜效果也不同。一般磁控溅射镀膜的效果好于蒸发镀膜，而且磁控溅射不需要太高的温度，对一些对温度控制有要求的工艺步骤是个有利条件。PVD技术可用来制作Pt、Au、Al、Ti、Cr等金属薄膜，也可制作SiC、Al₂O₃等化合物薄膜^[26]。

CVD技术利用的是化学原理，给反应腔内通入用于反应的气体，施加一定的反应条件，放置在反应腔内的硅片就会与该气体发生化学反应形成固体物质并沉积在硅片表面^[27]。常用的有APCVD（常压化学气相沉积）技术、LPCVD（低压化学气相沉积）技术和PECVD（等离子体增强化学气相沉积）技术，一般用来沉积Si₃N₄、SiO₂、 α -Si等介质膜。APCVD是最原始的一种化学气相沉积方式，在常压下进行，但是反应温度一般需要控制在700℃~1000℃，而且镀膜的均匀性比较差，现在已比较少用。LPCVD是在较低气压下进行化学气相沉积，通常控制反应腔体内的压强为10~1000Pa，原料气体通入的同时对样品进行加热使其与原料气体发生热分解或化学反应，然后沉积到样品表面形成薄膜。PECVD同样也要在真空条件下进行，要借助微波或射频等高频设备来使得反应气体电离

形成等离子体，等离子体形式的气体原子活性较强，很易与衬底表面发生化学反应来形成所需薄膜。由于利用了辉光放电代替热分解，因此PECVD可以不需要在很高温度的下来进行薄膜沉积，该工艺通常在 $300^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$ 的温度下进行，如沉积 Si_3N_4 的工艺的反应式如下：



除此之外，还有一种电镀工艺，也可用来制作金属薄膜结构。电镀属于电化学技术，简单来说，就是利用了电解的原理，在一些金属或合金的表面镀上一层薄膜金属层^[28]。这种方法所制作的金属薄膜均匀、致密性好、结合力强。具体原理就是把待镀样品（需导电）放入特定的电镀液中作为阴极，靶材料（金属板）作为阳极，通电后，溶液中不停发生电解反应和氧化还原反应，阳极的金属板靶材料被电解，在阴极上待镀金属离子得到电子不断沉积在待镀样品表面，形成金属层。图 1.13 为电镀Ni（镍）的原理示意图，其中发生的化学反应如式(1.4)~(1.7)。

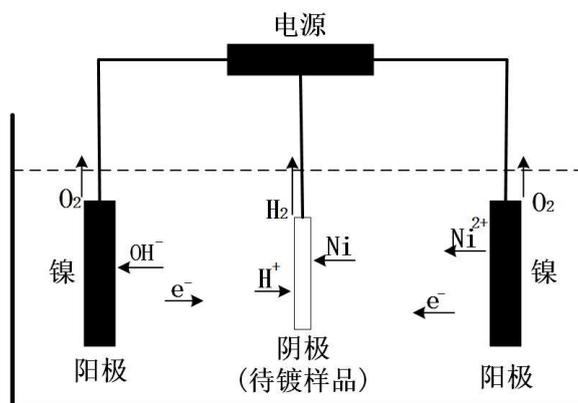
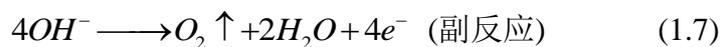
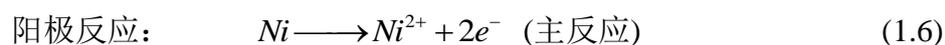
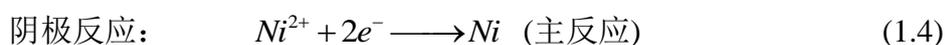


图 1.13 Ni 的电镀原理



阳极一般有可溶性和不可溶性之分，大多数金属都是可溶性阳极，如Zn

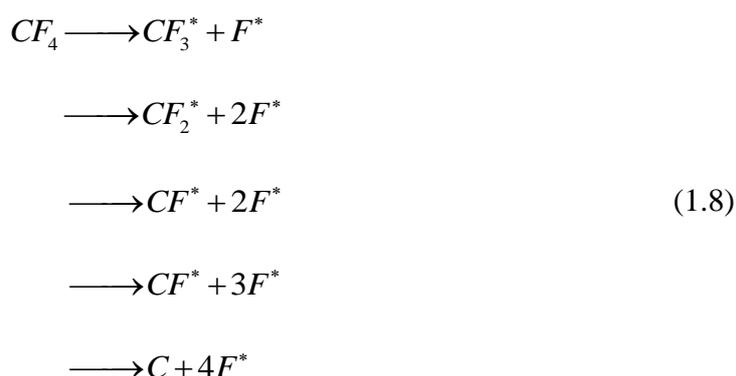
(锌)、Ag (银)、Zn-Pb (锌-铅) 合金等；少数一些金属属于不溶性阳极，如 Au (金)，因此镀金工艺一般需要用特殊的电镀液来实现，就是在电镀液中加入标准含金溶液来补充金离子，而其阳极通常使用Pt (铂) 或者Ti (钛) 金属板。

1.3.2 体硅微机械加工工艺

体硅微加工工艺是直接对硅基底进行加工来形成三维微结构的技术，通常利用化学腐蚀的原理来对硅进行微加工。刻蚀分为干法和湿法两种，干法刻蚀主要是各向异刻蚀，对侧壁的刻蚀程度较小，可以形成比较好的台阶和侧壁形貌；湿法刻蚀根据不同的腐蚀液可进行各向同性和各向异性刻蚀。

干法刻蚀技术按原理可分为物理刻蚀和化学刻蚀，物理刻蚀也可称为溅射刻蚀，是指对通入真空腔体中的惰性气体如Ar (氩) 气放电使之发生电离形成能量很高的等离子体 Ar^+ ，再让等离子体高速轰击被刻蚀材料表面，即可完成刻蚀，这是一个纯物理过程，可用来刻蚀所有材料，通常刻蚀化学性质比较稳定的材料，如Pt (铂)、Au (金) 等，常用的设备如IBE (离子束刻蚀) 刻蚀机；化学刻蚀一般是指等离子体刻蚀，把刻蚀气体通入真空腔体，经过辉光放电形成化学活性较强的正离子和自由基，这些等离子体和被刻蚀材料发生化学反应，生成气体挥发掉，从而实现刻蚀。纯物理干法刻蚀的优势是各向异性好，缺点是选择性差，而纯化学干法刻蚀的各向异性比较差，选择性好，因此可以结合两种方法，同时使用物理和化学方法，就能避免缺点，发挥两者优势，这种方法就是反应离子刻蚀 (RIE) [29]。常用的刻蚀气体有 SF_6 、 CF_4 、 CHF_3 等，用 CF_4 进行RIE刻蚀Si的反应式如(1.8)(1.9)，图 1.14 给出了干法刻蚀各向异性示意图。

CF_4 气体在电场中电离形成自由基：



激发态的氟基与Si发生如下化学反应：



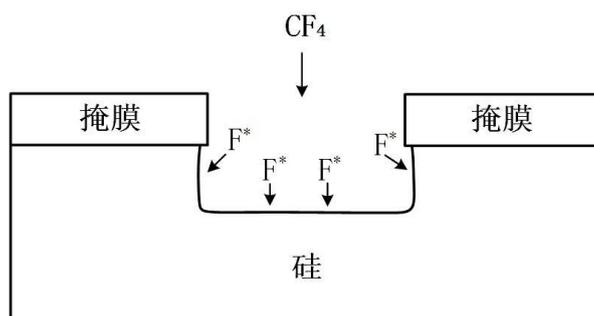


图 1.14 干法刻蚀各向异性

通常可以在刻蚀气体中混入一定体积比例的 O_2 或 H_2 来控制刻蚀速率，这样就可以使刻蚀出的结构具有更好的各向异性。如 CF_4 气体中混入体积比5~12%的 O_2 可以使Si和 SiO_2 的选择比达到10:1，而混入同样体积的 H_2 会使它们的选择比大于10:1。

湿法刻蚀是用有机或无机溶液对硅基底进行化学腐蚀，可以制作出深宽比较大的结构，通常选用腐蚀性很强的腐蚀液，并且腐蚀后产生的副产品要为气体或能溶于腐蚀液的物质，否则产生的沉淀物附着于样品表面将影响后续的刻蚀。湿法刻蚀可以刻蚀所有材料，一般常用材料湿法刻蚀的腐蚀液的选取如表1.2所示，

表 1.2 常用材料的腐蚀液及配比

腐蚀液	被腐蚀材料
$H_3PO_4(85\%):HNO_3(65\%):CH_3COOH(100\%):H_2O:NH_4F(40\%)=76:3:15:5:0.01$	Al
$NH_4(40\%):HF(40\%)=7:1$	SiO_2 , PSG
$H_3PO_4(85\%)$	Si_3N_4
$HF(49\%):HNO_3(65\%):CH_3COOH(100\%)=2:15:5$ (各向同性)	Si
$KOH(3\% \sim 50\%)$ (各向异性)	Si
$NH_4OH:H_2O_2(30\%):H_2O=1:1:5$ $HF(49\%):H_2O=1:100$	Ti, Co
$HF(49\%):NH_4F(40\%)=1:10$	$TiSi_2$

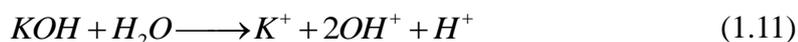
从表1.2可以看出，硅的湿法刻蚀一般有两种不同腐蚀液，刻蚀的效果也不同，各向同性一般用酸法腐蚀，各向异性用碱法^[30]。硅的各向同性刻蚀的化学反应式为：



通常会加入一定比例的 CH_3COOH （醋酸），来抑制 HNO_3 的分解，保持稳定

的刻蚀效率。反应生成物都是可溶或可挥发的，因此不会有阻碍化学反应的沉淀物。

表 1.2 给出的硅各向异性腐蚀用的是 3%~50% 的 KOH 溶液，它通常要与 H₂O、(CH₃)₂CHOH（异丙醇）组成碱湿法刻蚀系统，首先 KOH 和 H₂O 中的 OH⁻ 离子与 Si 发生化学反应形成硅化物，化学反应式为：



然后 Si(OH)₆²⁻ 与异丙醇发生络合反应生成可溶的络合物，化学反应式如下：



这样就可以完成硅的湿法刻蚀。除此之外，还可以用一些其他的有机或无机溶液进行湿法刻蚀，比如有机物 TMAH（四甲基氢氧化铵）、EWP（乙二胺，邻苯二酚，水）等，强碱性的无机溶液 NaOH、NH₄OH 等。湿法刻蚀各向异性和各向同性腐蚀效果的示意图如图 1.15 所示。

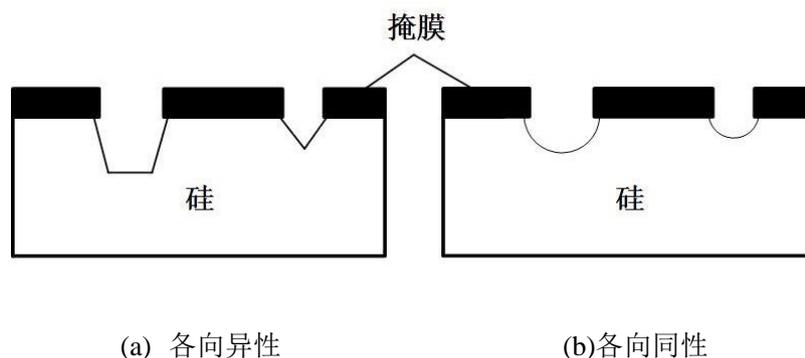


图 1.15 硅的湿法刻蚀效果示意图

1.4 论文主要内容

本论文主要针对 MEMS 热对流式的加速度传感器及其加工工艺进行研究。通过理论分析、建模仿真等结果设计器件的结构，包括对各部分材料的优化设计，然后详细介绍了对所设计 MEMS 热对流加速度计的加工工艺流程，最后设计加速度计的接口电路并进行初步测试。以下是本论文的章节安排：

第一章 绪论。介绍了不同工作原理的加速度计并对优缺点进行了总结，分析了热对流加速度计的发展现状，研究了 MEMS 微机械加工工艺主要是硅基体加工工艺和表面加工工艺。

第二章 MEMS热对流加速度传感器的原理和模型分析。研究了热对流加速度计的基本工作原理和检测原理,对加速度计进行了基于自然对流传热的模型分析,建立起加速度和传感电阻温度差的线性关系,并对铂薄膜材料的温度敏感特性进行了研究。

第三章 MEMS热对流加速度传感器的仿真分析和结构设计。对密闭腔体内流体在自然对流条件下的温度场变化情况进行了建模仿真分析,根据仿真结果对加速度计的具体结构进行设计,并对各部分所用材料进行了选取。

第四章 MEMS热对流加速度传感器版图设计及工艺加工。根据所设计的加速度计结构,进行了版图的绘制,工艺流程的设计,详细介绍了工艺加工过程,并对过程中遇到的问题进行分析和工艺的优化,最终初步完成芯片的加工制作。

第五章 外接电路的设计和加速度计测试分析。对外部电路进行了设计,主要包括两部分:加热器控制电路和信号测试电路,制作出电路板之后对加速度计进行基本电性能测试和器件性能测试。

第六章 总结和展望。对于本论文进行总结,分析不足之处和未来的改进方向。

第 2 章 MEMS 热对流加速度传感器的原理和模型分析

通过对加速度计工作方式和检测原理的分析来设计器件结构,对自然对流传热的相关理论研究及铂薄膜材料特性的分析建立热对流式加速度计的理论基础。

2.1 热对流加速度计原理

热对流加速度计的基本结构在第一章已经简单介绍过,主要结构是三部分热敏感电阻,其中两个传感电阻完全相同且关于加热器对称放置。本节结合图 2.1 对热对流加速度计的工作原理进行分析,当加速度计开始工作时,首先加热电阻对密闭空腔内的空气加热形成热气团(虚拟质量块),在外界没有加速度的情况下,腔体内的温度场恒定,两个传感器所感知到的温度相同^[31],如图 2.1 中实线所示,此时两个传感电阻的大小相同;当对传感器施加一个敏感方向上的加速度,惯性作用下,热气团与传感器将发生一个相对位移,即温度场发生改变,此时两个传感电阻感知到的温度如图 2.1 中虚线所示,会产生一个 ΔT 的温度差,由于传感电阻材料对温度敏感的特性,导致两个传感电阻大小产生差异,这个差异可由惠斯通电桥(Wheatstone bridge)原理来测得。

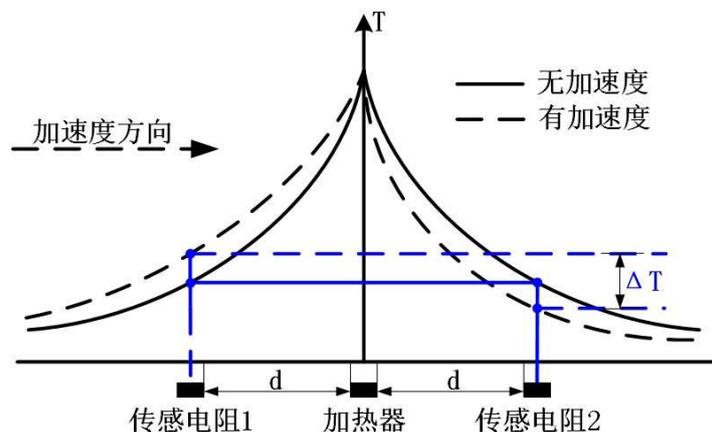


图 2.1 热对流加速度计工作原理

利用惠斯通电桥测电阻变化的原理如图 2.2 所示,其中 R_{S1} 和 R_{S2} 就是两个传感电阻,初始值相同, R_3 和 R_4 是外接的恒定电阻,大小始终相同。

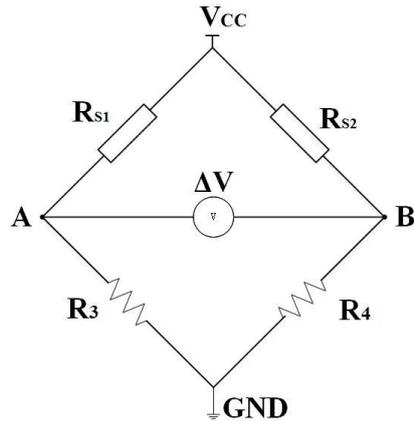


图 2.2 惠斯通电桥测电阻原理

A、B 两点电压 v_1 、 v_2 如式 (2.1) 和 (2.2)，在没有加速度的情况下，由于 $R_{S1}=R_{S2}$ ， $R_3=R_4$ ，故 $v_1=v_2$ ， $\Delta V=0$ ，外接电路没有信号输出；当有加速度时 $\Delta V \neq 0$ ，即有差分电压输出，经过外部电路放大处理后即可测得此差分电压信号。

$$v_1 = \frac{R_3}{R_{S1} + R_3} \cdot V_{CC} \quad (2.1)$$

$$v_2 = \frac{R_4}{R_{S2} + R_4} \cdot V_{CC} \quad (2.2)$$

$$\Delta V = v_1 - v_2 \quad (2.3)$$

根据以上原理即可测得外界所施加的加速度大小，具体的检测原理将在第 5 章接口电路的设计部分进行详细讨论。

2.2 热对流加速度计自然对流传热模型

由于热对流加速度传感器利用的是密闭空腔内流体的传热特性，因此需进行流体的传热分析，来找到加速度和温度场之间的联系。自然界有热传导、热对流和热辐射三种传热方式^[32]，而对于密闭空间，假设边界恒温，空间中的传热就可看作典型的层流自然对流传热，也就是流体在重力的作用下，由于内部的温度差导致各部分密度不同而发生的对流换热运动。流体的自然对流传热情况主要与两个无量纲参数有关，即格拉晓夫数 Gr (Grashof Number) 和普朗特数 Pr (Prandtl Number)^{[33][34]}，而普朗特数反映的是流体的物理性质对对流传热过程的影响，因此对于确定的流体，其物理性质也是确定的，因此流动传热情况主要跟格拉晓夫数有关：

$$Gr = \frac{g\beta\delta TL^3}{\nu^2} \quad (2.4)$$

其中 g 表示重力加速度， β 表示流体的体积膨胀系数， δT 是加热电阻所加热的温度与传感器外部环境的温差， L 是加热电阻的宽度， ν 表示流体的运动粘度。实际上，格拉晓夫数的物理意义就是流体浮升力与粘附力之比。

对于我们所要研究的MEMS热对流加速度计，密闭空腔中的自然对流传热可利用此参数，将式(2.4)中 g 换成敏感方向上任意一个加速度 a ，对于一个确定的加速度计，格拉晓夫数中的 β 、 δT 、 L 、 ν 等都为定值，即 Gr 与 a 成正比^[35]。而对于加速度计来说，两个传感电阻所感知到的温度差 ΔT 与格拉晓夫数 Gr 通过数值分析的方法可得到如图 2.3 所示的关系^[34]，从图中可看出，在 $10^{-2} \leq Gr \leq 10^3$ 的范围内，两个传感电阻间的温度差 ΔT 与 Gr 存在线性关系，该线性关系为：

$$\Delta T = 10^{-1} Gr \quad (10^{-2} \leq Gr \leq 10^3) \quad (2.5)$$

式(2.4)与式(2.5)合并为：

$$\Delta T = \frac{\beta\delta TL^3}{10\nu^2} \cdot a \quad (2.6)$$

即在 $10^{-2} \leq Gr \leq 10^3$ 的范围内，传感电阻间温差 ΔT 与外界的加速度 a 成线性关系，若传感电阻材料的电阻温度系数是线性的，那么加速度计就是线性的。

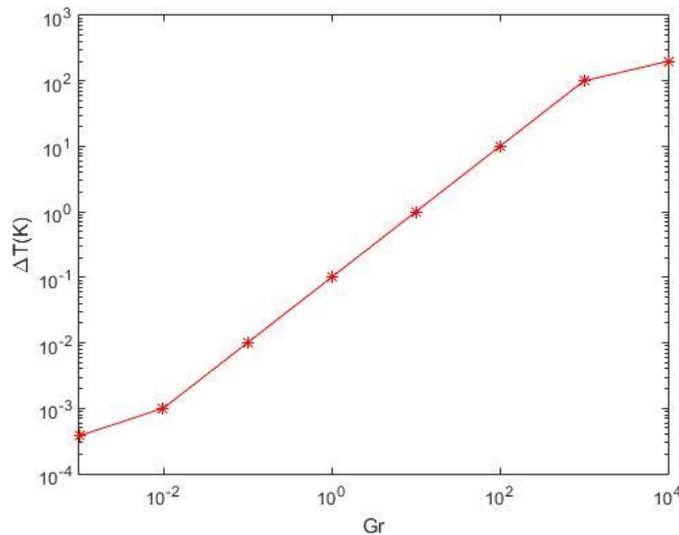


图 2.3 传感电阻温度差 ΔT 与格拉晓夫数 Gr 的关系

2.3 铂薄膜材料特性

铂（Platinum）材料在氧化性介质中，甚至在高温下的物理、化学性能非常

稳定，电阻率大，精确度高，且电阻温度特性接近线性，这使它成为MEMS热对流加速度传感器温度敏感电阻的首选材料。Pt材料的电阻温度特性可以通过卡伦德公式（Callendar-Van Dusen equation）来进行建模分析^[36]：

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3 + CT^4) \quad (2.7)$$

其中 R_0 是温度为 0°C 时的阻值， R_T 是温度为 $T^\circ\text{C}$ 时的阻值，A、B、C是卡伦德常数，其常用值是分别在 0 、 100 、 260°C 温度下的电阻测量结果，如表 2.1 所示。

表 2.1 卡伦德-范道森常数

Alpha, $\alpha(^{\circ}\text{C}^{-1})$	0.003750 ± 0.00003	0.003850 ± 0.0001
Delta, $\delta(^{\circ}\text{C})$	1.605 ± 0.009	1.4999 ± 0.007
Beta, $\beta(^{\circ}\text{C})$	0.16	0.10863
A($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	3.81×10^{-3}	3.908×10^{-3}
B($^{\circ}\text{C}^{-2}$)	-6.02×10^{-7}	-5.775×10^{-7}
C($^{\circ}\text{C}^{-4}$)*	-6.0×10^{-12}	-4.183×10^{-12}

* $T > 0^\circ\text{C}$ 时， β 和C都等于 0

卡伦德-范道森常数A、B、C由 α （与Pt的TCR有关的项）、 β 和 δ 来定义，它们是从实际电阻测量中获得的，方程如下：

$$A = \alpha + \frac{\alpha\delta}{100} \quad (2.8)$$

$$B = \frac{-\alpha\delta}{100^2} \quad (2.9)$$

$$C_{T<0} = \frac{-\alpha\beta}{100^4} \quad (T < 0^\circ\text{C} \text{ 的情况下 } \beta \text{ 为常数}) \quad (2.10)$$

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (2.11)$$

$$\delta = \frac{R_0(1 + 260\alpha) - R_{260}}{4.16\alpha R_0} \quad (2.12)$$

其中 R_{100} 和 R_{260} 的值分别是在 100°C 和 260°C 的温度下测得的， β 在低于 0°C 的温度下是恒定的，在温度高于 0°C 时为0，此时C也为0，因此，在不同温度范围内，卡伦德-范道森方程如下：

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2 - 100CT^3) \quad (-200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}) \quad (2.13)$$

$$R_T = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (0^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C}) \quad (2.14)$$

典型的Pt薄膜电阻温度检测器（RTD）的相对电阻和温度的曲线如图 2.4 所

示^[37]，从图中可以看出Pt薄膜电阻的电阻大小与温度近似成线性。

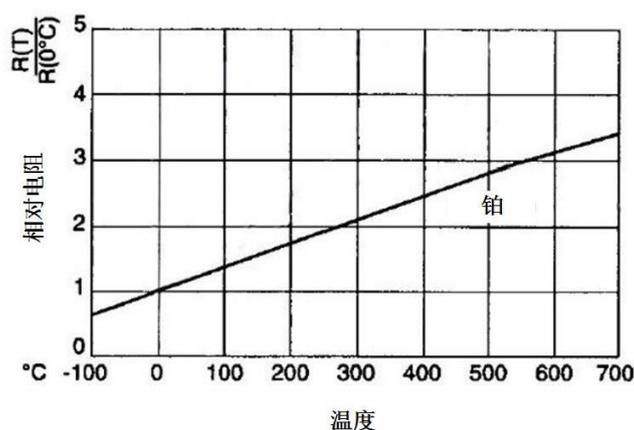


图 2.4 Pt 薄膜电阻温度检测器 (RTD) 的相对电阻和温度曲线

电阻温度系数 (TCR) 描述的是当温度改变 1°C 时，电阻值的相对变化，即温度每升高 1°C，导体电阻的变化值与原来电阻的比值，其由下式定义：

$$TCR = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T} \quad (2.15)$$

假设 Pt 电阻温度系数为 α ，它是材料本身的物理性质，且随着温度的变化而变化，在某一固定温度下其大小是固定的，不同温度下的电阻大小有如下关系式：

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (2.16)$$

式中 $R(T_0)$ 是温度在初始状态 T_0 时的电阻值， $R(T)$ 是温度为 T 时的电阻值。从上式也可以看出，Pt 电阻温度系数 α 值大小对传感器灵敏度等性能有很大影响，因此接下来讨论影响 Pt 薄膜材料的 TCR 的因素。

Pt 薄膜材料的电阻温度系数与块状材料存在差别^[38]，Pt 薄层电阻的温度系数范围大约从 0.00375 到 0.00387 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ ，而纯 Pt 块材料的温度系数理论最大值为 0.0039289 $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ 。另外，纯金属的电阻温度系数对于杂质、缺陷和应力非常敏感，较高浓度的杂质和缺陷会降低金属的电阻温度系数，这也是薄层电阻本身的特性。影响薄层电阻整体结构的因素也可能会影响它的电阻温度系数，比如杂质的存在或微结构的缺陷、沉积粒度、晶界结构、晶界氧化、晶粒形状规律性、边界之间的小洞、多晶粒内的位错（空隙网络结构）、溅镀气体原子沉积在晶格中、残留菌株、塑性变形（由拉伸或压力梯度引起）、膜不连续、膜厚度和表面粗糙度等^[39]，此外沉积 Pt 薄膜的表面形态受到衬底的初始表面状态的影响又很大。这些是 Pt 薄层电阻的 TCR 远远低于块状纯铂的主要因素。对于减小影响 TCR 因素的控制是很难的，因此，很少有技术可以做到沉积具有受控 TCR 值的金属膜。

Pt 薄膜的厚度也能显著影响其 TCR 特性，Pt 在薄膜状态下想要达到最大 TCR

值，它的厚度至少要在 $0.35\mu\text{m}$ 以上，图 2.5 中的曲线就是典型 Pt 电阻温度检测器的 TCR 与膜厚度的关系^[39]。由图中可以看出，随着膜厚的减小，TCR 也在减小，膜厚从 $10\mu\text{m}$ 减小到 $1\mu\text{m}$ 的过程中 TCR 减小幅度很小，当膜厚小于 $1\mu\text{m}$ 时，Pt 薄膜电阻的 TCR 随着厚度急剧减小，几乎成线性。在膜厚为 $0.2\mu\text{m}$ 时，膜厚减小 50% 将使 TCR 减小 2.2%，然而在厚度为 $4\mu\text{m}$ 时，膜厚减小 50% 使 TCR 减小的幅度仅低于 0.1%。

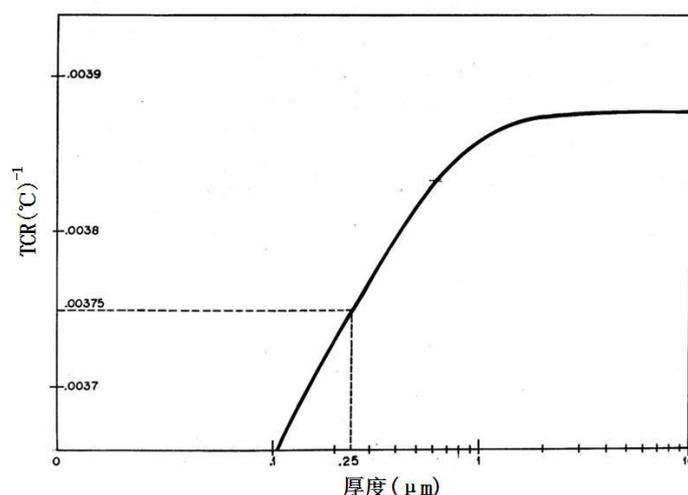


图 2.5 铂电阻温度检测器的 TCR 与膜厚度的关系

由此可以知道，在 $0\sim 10\mu\text{m}$ 的范围内，Pt 薄膜电阻的厚度越大，温度系数就越大，当厚度控制在大于 $1\mu\text{m}$ 时，Pt 薄膜电阻的 TCR 可以维持在比较高的水平，且处于比较稳定的状态，制作出的传感器性能将更好，此时，(2.10) 中 α 值约为 0.00386，在厚度为 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 之间温度系数关于厚度成线性， α 值在 0.00365~0.00385 之间。

因此，要制作出性能最好的加速度计，需要设计好 Pt 薄层电阻的厚度，在工艺过程中尽量选择更好的设备条件，如避免杂质污染、避免微结构损伤、保证衬底表面平整度较好等。

2.4 本章小结

本章首先介绍了 MEMS 热对流加速度传感器的基本工作原理，接着详细分析了该加速度计所用到的最重要的关于流体自然对流的理论，通过无量纲参数格拉晓夫数 Gr 建立起两个传感电阻的温差与加速度之间的线性关系；然后讨论了该传感器所选材料——铂的电阻温度特性，其近似于线性的特性可满足加速度计线性的需求；最后得到控制铂薄膜厚度在 $1\mu\text{m}$ 以上、注意工艺过程中的一些问题可提高加速度计性能的结论。

第3章 MEMS 热对流加速度传感器的仿真分析及结构设计

通过上一章原理部分的分析,本章对MEMS热对流加速度计的理论进行建模仿真验证,并对传感器结构进行设计,包括各部分结构、尺寸、测量方块电阻所使用的范德堡结构以及传感器各部分所使用的材料等。

3.1 有限元耦合仿真

MEMS热对流加速度计的工作原理涉及到电学、热学和流体力学,具体关系如图3.1所示。本文所设计的热对流加速度计主要有两部分:加热控制模块和加速度检测模块,加热控制模块是电场和固体传热场的耦合,通过接口电路的设计可控制加热器有一个稳定的加热温度;加速度检测模块涉及到流体场和热场。本文主要对加速度检测模块仿真计算来进行理论验证和优化结构设计,因此主要是进行流体场和热场的耦合仿真。使用有限元分析软件COMSOL来进行多物理场耦合建模分析,对于器件施加不同的载荷进行仿真计算,然后对结果进行后处理即可得到影响器件性能的因素并进行优化设计。

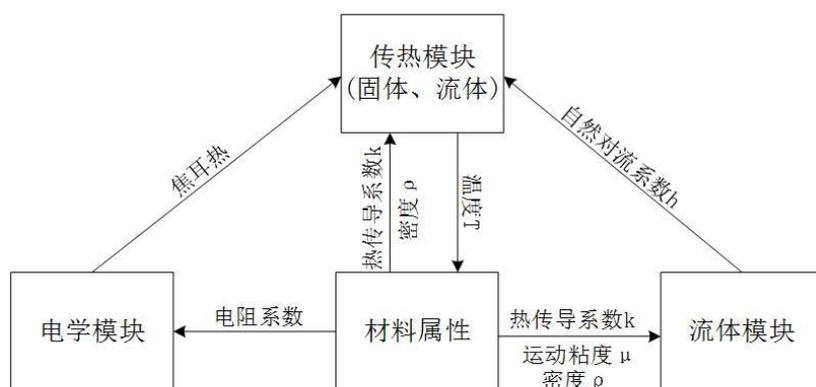


图 3.1 热对流加速度计的多物理场耦合

3.1.1 建模和仿真

根据第二章的分析可知道MEMS热对流加速度传感器所涉及到的流体场是在微米尺度下的密闭腔体中,用层流自然对流来进行分析。该模型是腔体内流体的非等温流模型,使用到的是COMSOL Multiphysics中的层流(sp)和流体传热(ht)耦合模块,对于加速度的施加,应用到层流(sp)中的体积力(volume force)载荷。由于加速度计腔体内温差与外界温差没有超过 800K (设计加热温差为

80~150℃)，因此可采用Boussinesq近似^[40]，在误差不大的情况下可加快收敛速度，减小计算量。密闭空腔内流体的层流自然对流的控制方程组如式(3.1)~(3.5)所示：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.1)$$

其中 ρ 是密度， \mathbf{v} 是流速矢量场；

Navier-Stokes动量方程为：

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{I} + \mathbf{f} \quad (3.2)$$

其中 p 是压力， \mathbf{I} 是总应力张量， \mathbf{f} 是作用于流体上的体积力，上式又可写为：

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{I} + \mathbf{f} \quad (3.3)$$

式(3.3)左边描述的是由于加速度产生的力，可能是瞬时的或对流加速度，等式右边是体积力（如重力）和应力发散（压力和剪切应力）的总和。对流加速度是流体相对于空间的加速度， $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ 表示对流加速度，即速度随位置变化而不是随时间变化；

能量方程为：

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T \quad (3.4)$$

其中 c_p 是定压比热容， k 是流体的热传导系数。能量方程表明，流体通过对流传递出的体积能量等于其通过热传导传入的能量；

状态方程：

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (3.5)$$

其中 R 为理想气体常数， p 是压力， T 是温度。

首先对密闭空腔中的温度场进行简化的二维建模分析，如图3.2所示，空腔尺寸 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ ，底部热源假设为 $20\mu\text{m} \times 0.3\mu\text{m}$ 的矩形，位于空腔底部中央位置。由于只需计算出空腔中温度场的变化，可以在仿真结果中寻找不同位置处的温度，因此没有把对称放置的两个传感电阻加入模型中。

空腔中的流体是空气，加热电阻的材料设置为铂金。边界条件为：底面是绝

热面，其余面是封装盖的外壳，假定为恒温面，温度设置为环境温度 20°C 。设定该物理模型中的流体包含重力项。

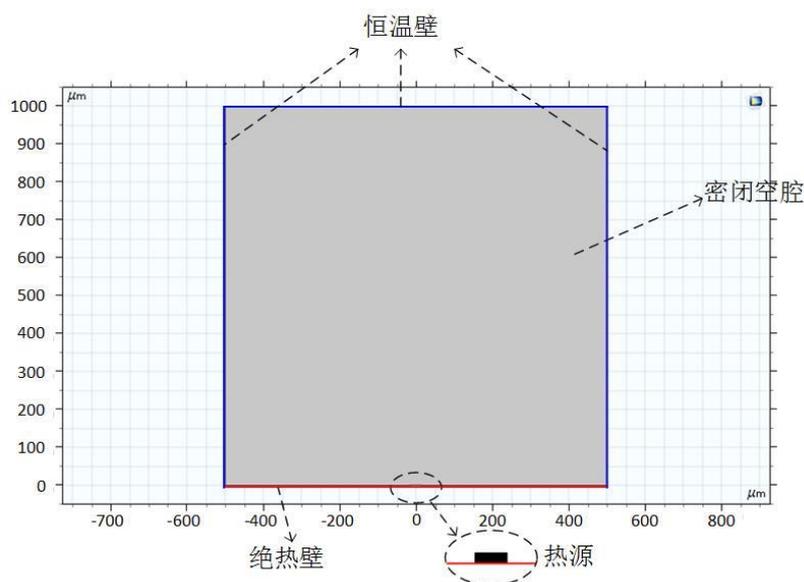
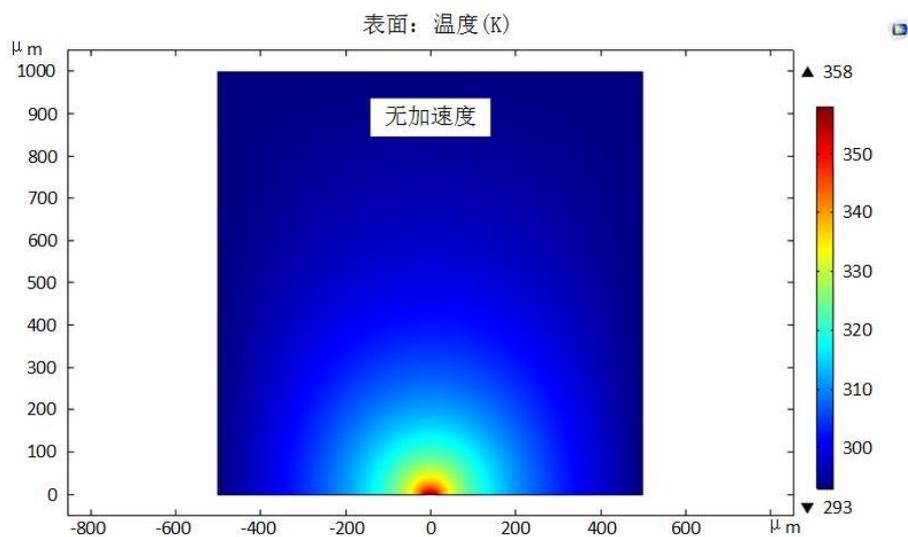
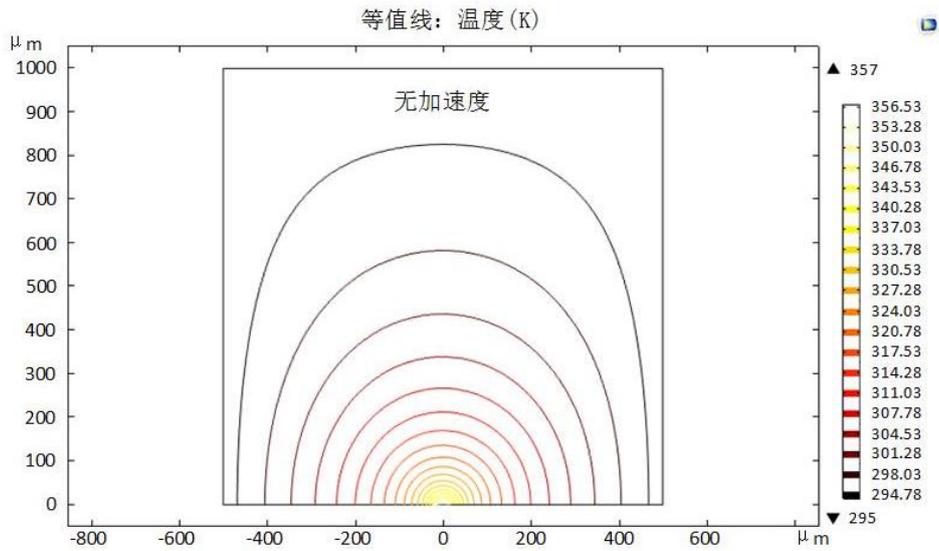


图 3.2 热对流加速度计的简化二维模型

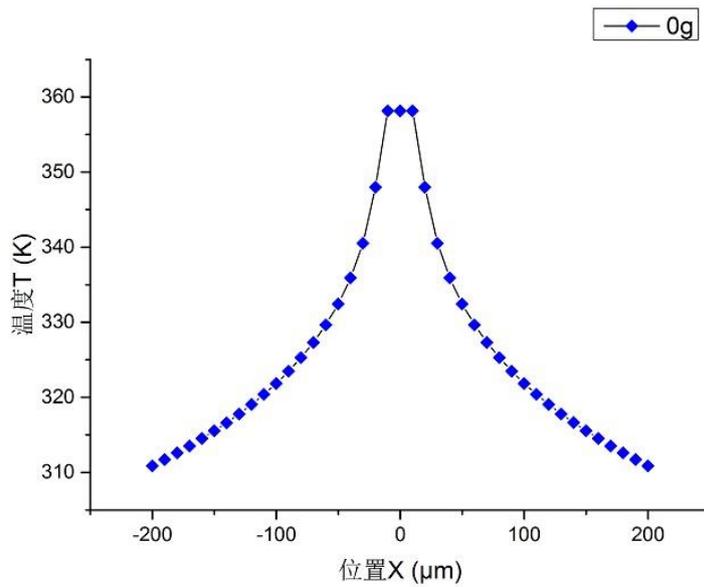
在加热电阻温度为 85°C (358.15K)、敏感方向没有加速度的情况下进行仿真计算，腔体内加热器附近的温度场分布云图如图 3.3(a)所示，腔体内等温线如图 3.3(b)所示，底面的温度分布情况如图 3.3(c)所示（选取了 $-200\sim 200\mu\text{m}$ 位置区间），由图可见热源两侧温度分布是严格对称的，因此两个传感电阻此时检测到温度相同，温差是 0。



(a) 敏感方向无加速度时腔体内的温度场云图



(b) 敏感方向无加速度时腔体内等温线



(c) 敏感方向无加速度时底面温度分布

图 3.3 敏感方向无加速度时腔体内的温度场分布

此时腔体内的空气由于存在温度差导致密度不均匀，从而进行流动来传递热量，腔体内空气的流动速度云图如图 3.4 所示，图中小箭头代表空气流动方向。从图中可以看出，在没有施加体积力（即加速度）的情况下，腔体内的空气进行自然对流，在加热器上方向两侧流动，在加热器上方 200~400 μm 处流速最大，加热器两侧空气的流速相同，流动方向对称，两侧的温度场必然处于相同状态。

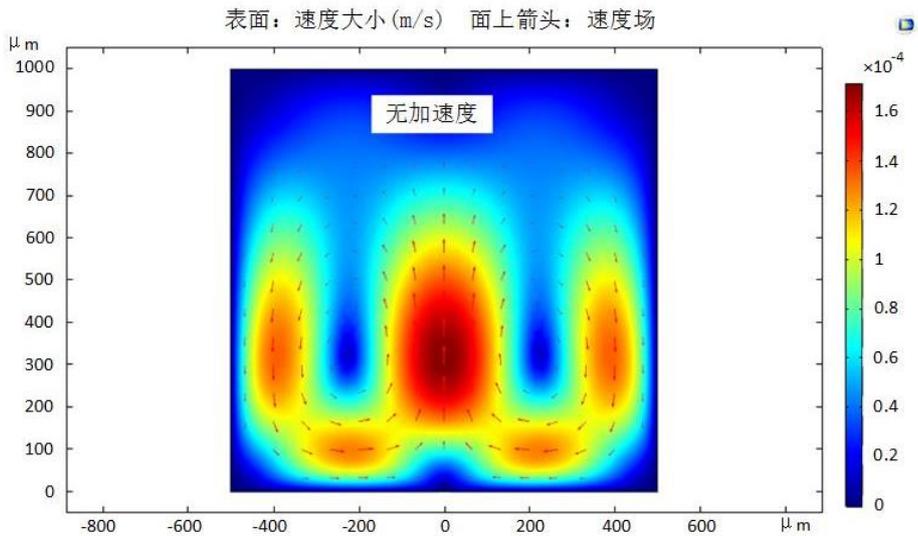
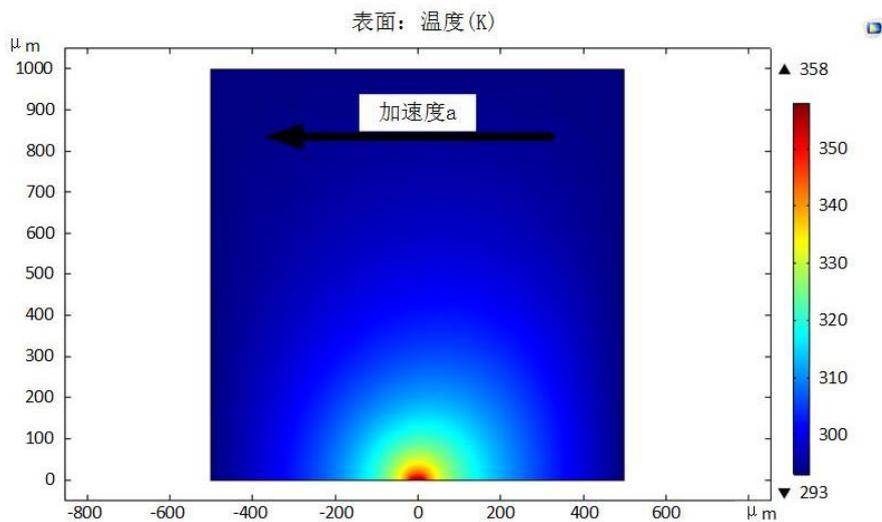
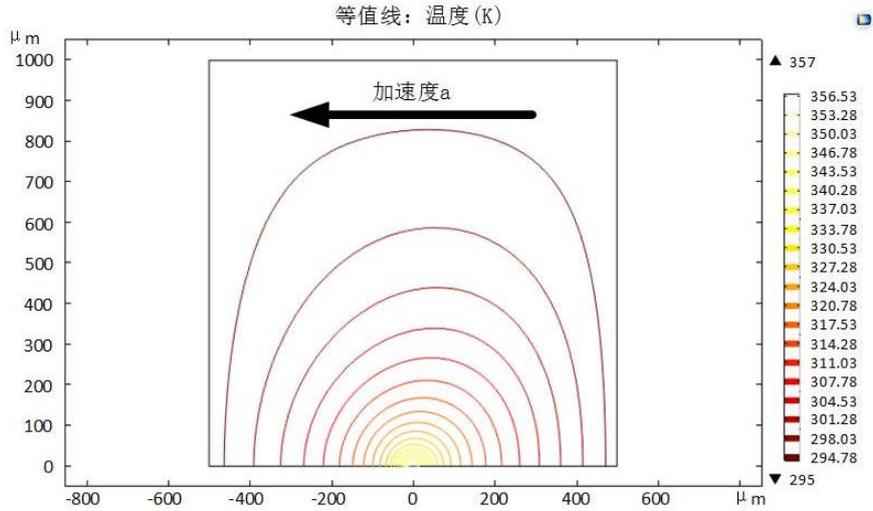


图 3.4 敏感方向无加速度时腔体内的速度场云图

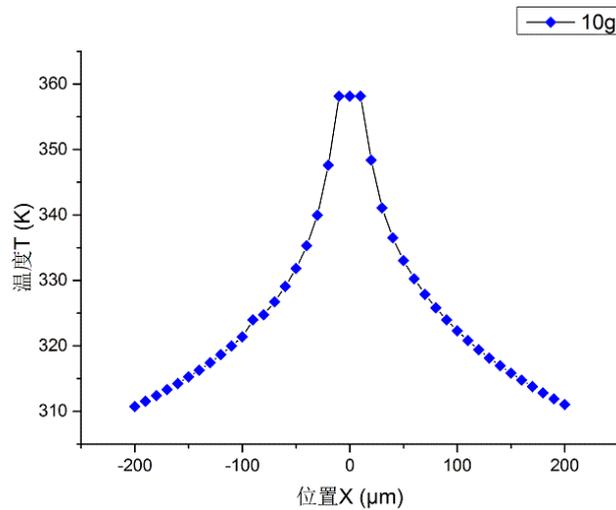
当对腔体内流体施加敏感方向上的体积力（即加速度 a ）时，密闭空腔内空气的流动发生改变，这会导致空腔内温度场发生变化。当施加 x 轴负方向的加速度 $a=10g$ 时，温度场分布云图如图 3.5(a)，与图 3.3(a)比较后可发现，加热器附近原本对称的温度场向 x 轴正方向发生偏移，腔体内的等温线如图 3.4(b)所示，将计算结果进行处理，提取出底面 $-200\sim 200\mu\text{m}$ 范围内的温度数据（此范围外的温度改变较小），其分布如图 3.4(c)所示，从图中可看出 $x=0$ 两侧对称位置处产生温度差，因此对称放置于热源两边的传感电阻将检测到此差异，并通过电阻的改变反映出来。



(a) 敏感方向施加 10g 加速度时腔体内温度场云图



(b) 敏感方向施加 10g 加速度时腔体内温度场等值线



(c) 敏感方向施加 10g 加速度时底面温度分布

图 3.5 敏感方向施加 10g 加速度时腔体内的温度场分布

此加速度下腔体内空气流动的速度云图如图 3.6 所示，对比图 3.4 可看出空腔内的速度场发生了较大变化，此时空气的流动速度比无加速度时提高 2 个数量级，沿着腔体四壁做逆时针环形流动，最大流动速度在加热器上方 100~200 微米范围内，也就是说此范围内的温度场变化最明显，如果将传感电阻设置在此高度理论上具有最大灵敏度，但是本文设计的加速度计考虑将其设置在绝热的衬底上，因此考察底面附近的温度分布变化。

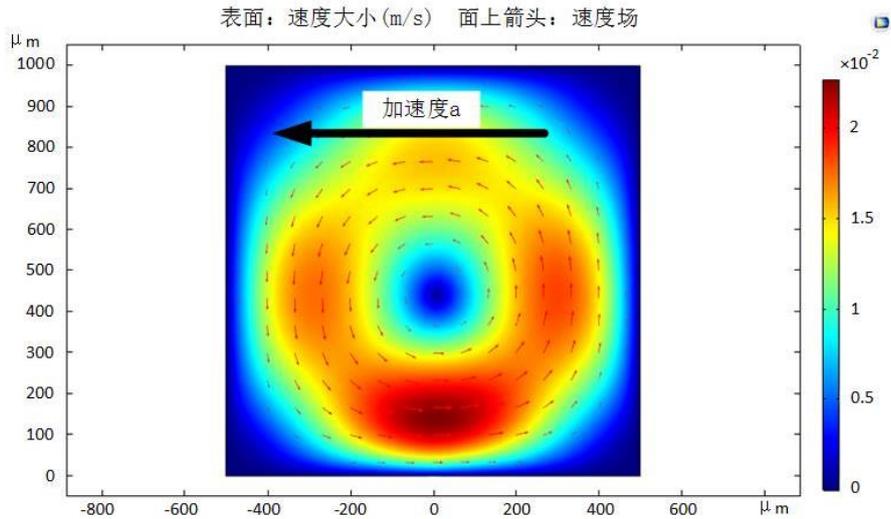


图 3.6 敏感方向施加 10g 加速度时腔体内的速度场云图

在敏感方向上分别施加不同大小的加速度，进行仿真计算，可以得到流体场相关的一系列数据，导出后筛选出温度场的数据进行后处理和分析。

3.1.2 仿真结果分析

在敏感方向上分别施加 0g, 1g, 2g, 5g, 10g 的加速度得到底面上的温度分布如图 3.7 所示，从图中可以看出在不同加速度下，底面温度分布存在差异，但是变化量非常小，0~10g 的加速度下 $x=0$ 左右对称位置温差范围仅为 0~1.218K。

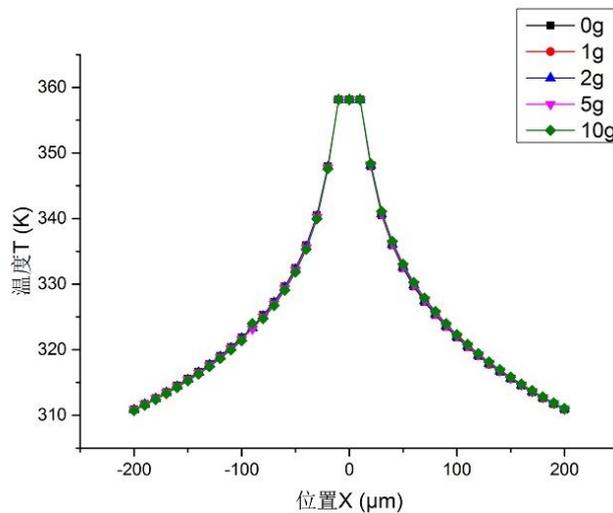


图 3.7 敏感方向施加不同加速度时的底面温度分布

根据第二章的分析，加速度 a 与传感电阻所感知到的温差 ΔT 的关系反映的是加速度计的线性度， ΔT 的大小直接影响加速度计的灵敏度，因此应该考察热源两侧对称位置处的温度差 ΔT 。不同加热电阻和传感电阻间距处温差与加速度的关系如图 3.8 所示。

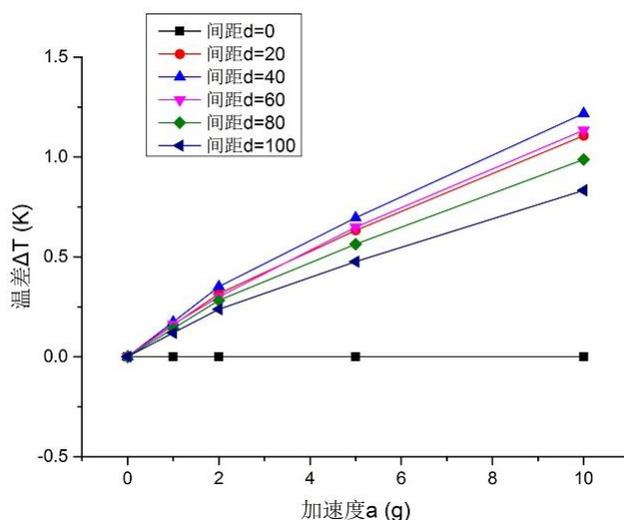


图 3.8 不同间距处温差与加速度的关系

从图 3.8 中可以看出，在加热电阻两边相同距离 d 的位置处，温差 ΔT 随加速度 a 的增大而成线性地增大，该仿真模型的线性度与理论上基本吻合，也就是说，该加速度计是近似线性的。另外从该图中也可看到，在 $0\sim 2g$ 的加速度范围内线性度较好。

此外，在不同位置处，相同加速度下造成的温差 ΔT 也是不同的，通过数据分析可找到传感电阻的最佳位置。在不同加速度下，温度差 ΔT 与加热电阻和传感电阻间距 d 的关系如图 3.9 所示，从该曲线图中可以看出， $0\sim 10g$ 加速度范围内，某一个确定加速度下，随着加热电阻和传感电阻间距 d 的增大，加热电阻两侧对称位置处的温度差 ΔT 呈现出先增大后减小的趋势，在间距为 $30\sim 70\mu\text{m}$ 的范围内， ΔT 达到最大值， $1g$ 加速度下的最大 ΔT 在 $40\mu\text{m}$ 处，最大温差 ΔT 为 0.174K ，此范围内的平均灵敏度为 0.156K/g 。

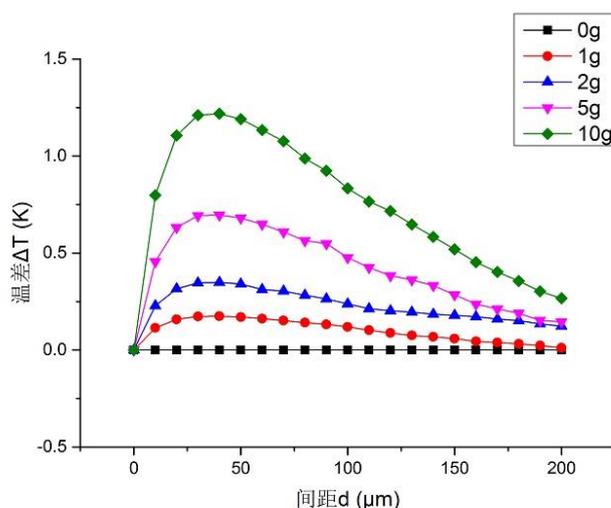


图 3.9 不同加速度下温差与间距的关系

根据本节仿真结果，可以对MEMS热对流加速度传感器的结构进行优化设计，比如令传感电阻对称放置于加热电阻两侧 $30\sim 70\mu\text{m}$ 处，可设计出灵敏度较高的加速度计。

3.2 热对流加速度计结构设计

3.2.1 加速度计结构及布局

本文设计的热对流加速度计主要包括四部分结构：一个加热电阻、一个参考电阻和两个完全相同的传感电阻，在传统的熱对流加速度计结构中添加了一个参考电阻，放置在密闭空腔外，它的作用是控制加热电阻的加热温度，通过与接口电路的配合可实现随时检测并调节加热电阻的功率，来使密闭腔体内加热器与外界环境温度差 δT 保持稳定。

热对流加速度计的整体结构布局如图 3.10 所示，蓝色部分就是四个温度敏感电阻，两个完全相同的传感电阻对称放置于加热电阻两边形成敏感轴（如图中箭头 a 为敏感方向），参考电阻放置于非敏感轴的位置，以尽量避免加热电阻所提升的温度对参考电阻形成干扰。灰色部分是信号传输所用的互连线，其端点处为引线区，外接电路通过此引线区来实现对传感器的控制和信号传递。图中阴影部分是盖板，其与衬底进行键合形成密闭空腔。

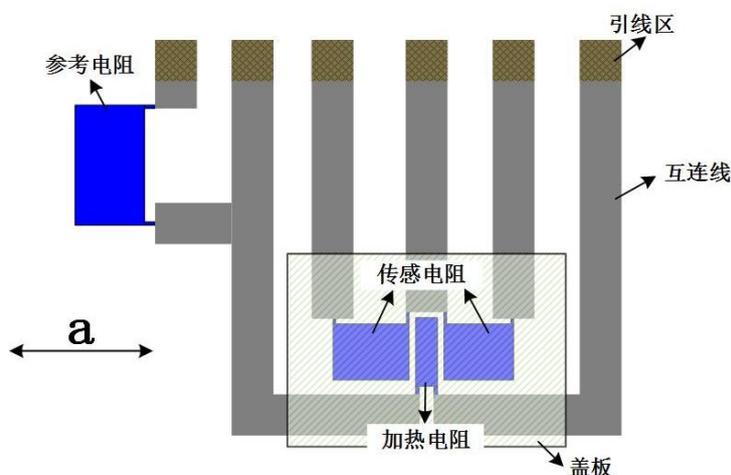


图 3.10 热对流加速度计整体结构设计图（俯视图）

此传感器的核心作用结构是四部分高温敏感性电阻，具体形式如图 3.11 所示，均为“S”形布置（或叫蛇形结构），通过这样的布置，一方面可以增加传感电阻与温度场的接触面积，第二也可以制作出较大的、更加合理大小的电阻值，这两方面均对提高传感器精确度、灵敏度等性能有帮助。

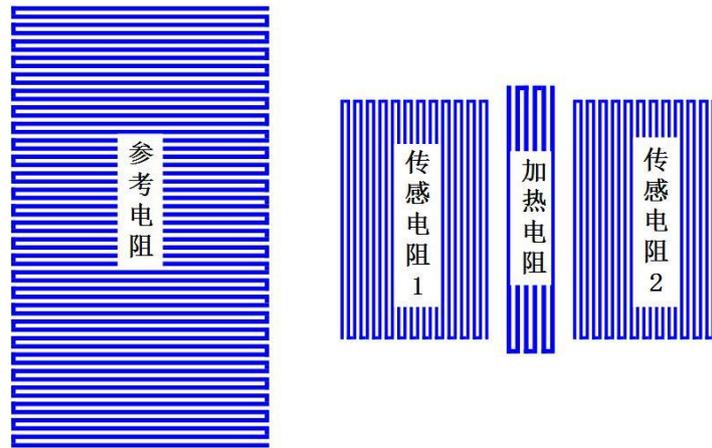


图 3.11 热对流加速度传感器核心结构（俯视图）

各部分电阻大小的设计跟接口电路的设计是配套的，此部分内容在第 5 章电路设计部分进行详细探讨，最终设计的传感器上各部分电阻大小为： $R_h=600\Omega$ 或 $1.2k\Omega$ ， $R_r=6k\Omega$ ， $R_{S1}=R_{S2}=1.5k\Omega$ 。

本文通过金属的溅射工艺来制作Pt薄层电阻，根据设备条件选择制作Pt薄层电阻厚度为 300nm，那么由图 2.5 可知，理想情况下其TCR约为 0.00376。薄层电阻大小可根据方块电阻来计算及设计，方块电阻又叫膜电阻，是标称厚度均匀的薄膜电阻的量度，它通常用于表征由半导体、金属沉积、电阻印刷和玻璃涂层支撑的材料。方块电阻 $R_s=\rho/t$ （ ρ 是块状材料电阻率， t 是块状材料厚度），单位是 Ω/\square （欧姆/方块），那么对于长、宽、厚度分别为L、W、t的均匀长方体金属，其电阻大小 $R_{metal}=R_s \times (L/W)$ ，就是说如果知道 R_s 大小，通过设计不同长宽比，就可设计出所需要阻值的Pt薄层电阻。

常温下纯Pt的电阻率约为 $1.07 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ ，TCR为 0.00376，那么在 20~120℃范围内，Pt电阻率 ρ 在 $1.07 \times 10^{-7} \Omega \cdot m \sim 1.446 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 之间，据此可设计出各部分敏感电阻的尺寸。作为对比，本文根据加热器电阻大小设计了六种不同梳齿长度的结构，规格分别如表 3.1 所示。

表 3.1 热对流加速度传感器尺寸设计

	加热电阻 (μm)	传感电阻 (μm)	参考电阻 (μm)	梳齿长度 (μm)	加热电阻 (Ω)	传感电阻 (Ω)	参考电阻 (Ω)
A1	W=3, L=1215	W=2, L=4368	W=3, L=12179	200/180	600	1500	6000
A2	W=3, L=2433	W=2, L=4368	W=3, L=12179	200/180	1200	1500	6000

B1	W=3, L=5100	W=2, L=8500	W=3, L=50991	500/460	600	1500	6000
B2	W=3, L=10200	W=2, L=8500	W=3, L=50991	500/460	1200	1500	6000
C1	W=3, L=2667	W=2, L=4444	W=3, L=26667	300/260	600	1500	6000
C2	W=3, L=5334	W=3, L=4444	W=3, L=26667	300/260	1200	1500	6000

如果把这几部分热敏电阻看作梳齿，则共有两种规格的梳齿，表 3.1 中A结构的梳齿如图 3.12: a型长度 200 μm ，宽度 3 μm ，梳齿间距也为 3 μm ；b型长度 180 μm ，宽度 2 μm ，间距也为 2 μm 。参考电阻和加热电阻所用梳齿为a型，两个传感电阻用b型。

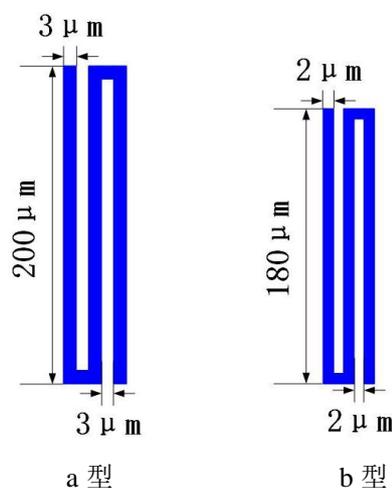


图 3.12 两种不同规格的“梳齿”状电阻（俯视图）

根据 3.1 节的仿真结果，又分别设计出间距为 10 μm 、30 μm 、50 μm 和 100 μm 的不同结构来作为对比验证，表 3.1 中A结构具体如图 3.13 所示。

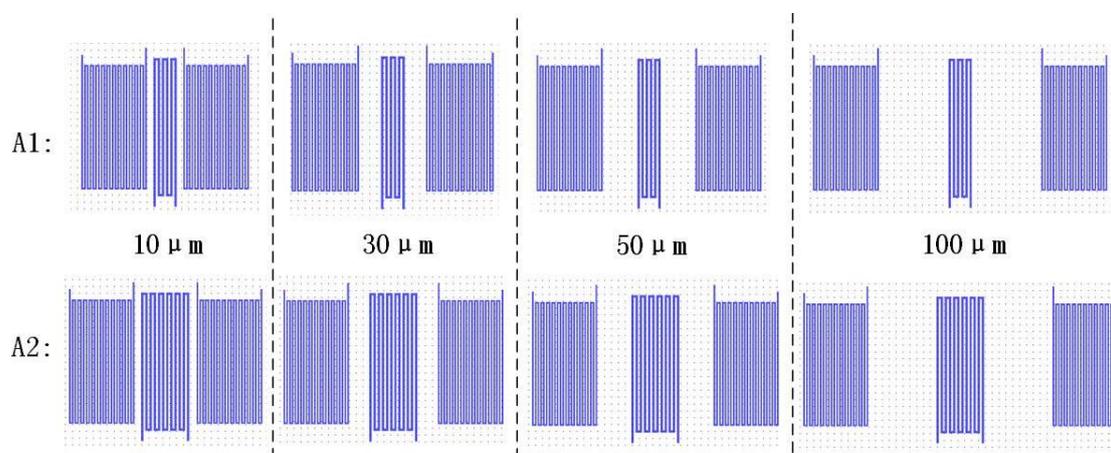


图 3.13 不同间距的加速度计结构设计

另外，互连线的宽度为 $150\mu\text{m}$ ，引线区为 $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 的正方形区域，外部空腔尺寸设计为 $1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 。

3.2.2 方块电阻的测量结构

方块电阻的测量通常需要应用范德堡（Van der Pauw）方法来进行^[41]，如图 3.14 所示是两种不同的测量结构，左边是希腊十字，右边是偏置方形交叉，它们都具有四个端子，这是典型的方块电阻范德堡测量结构。

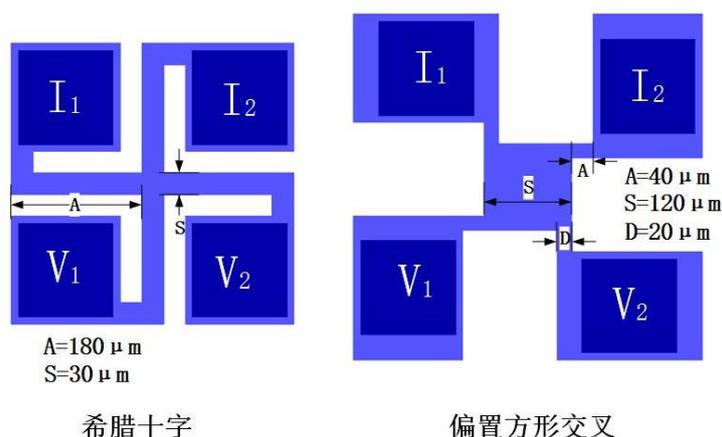


图 3.14 范德堡测方块电阻结构

使用探针台、恒流源和电压表将已知电流 I_2 注入端子 I_1 和 I_2 ，然后在范德堡结构的端子 V_1 和 V_2 之间测量相应的电压降 V_{12} ，计算范德堡结构方块电阻的公式为：

$$R_s = \frac{\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{V_{12}}{I_{12}}\right)}{1 - E} \quad (\Omega/\square) \quad (3.6)$$

式中 E 是由希腊十字的接触臂长度或偏置方形交叉的接触臂宽度和长度引起的归一化方块电阻误差， V_{12} 是端子 V_1 和 V_2 两端的电压， I_{12} 是通过端子 I_1 和 I_2 的电流。对于希腊十字结构来说，误差 E 最大为 3.8×10^{-17} ，对于偏置方形交叉结构来说， $E \ll 0.001$ ，因此可以假定 E 为 0，范德堡方程可简化为：

$$R_s = \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) \left(\frac{V_{12}}{I_{12}}\right) = \frac{\rho_r}{t} \quad (\Omega/\square) \quad (3.7)$$

其中 ρ_r 是薄膜电阻率， t 是薄膜厚度。此公式可用来测量方块电阻。

3.2.3 加速度计各部分材料选取

由于热对流式的加速度计是基于温度敏感电阻的原理，因此在选择材料时，热性能是主要考虑的方面。核心部分材料的电阻温度特性对于加速度计的灵敏度、响应时间等有很大影响，所以根据前面第二章对于铂材料的性能分析可知，铂是制作热对流加速度计的核心部件最适合的材料。

聚酰亚胺（Polyimide）是一种具有良好物理、化学特性的有机高分子材料，其耐高温低温、良好的介电性和绝缘性、高机械强度等性能已使其广泛应用于航空航天、微电子等高科技行业^[42]。对于本文所设计的加速度计而言，由于没有在底部刻蚀空腔，使用聚酰亚胺作为衬底作为绝热层，没有了悬臂梁结构可大大增加传感器抗撞击性能。因此本文选择PI作为柔性衬底，传感器结构都制作在聚酰亚胺上。

由于参考电阻需要尽量准确地测量外界环境的温度，因此要将自身产生热量以及受到加热器的影响降低到最小，所以选择将参考电阻底部的聚酰亚胺衬底刻蚀掉，制作一层导热且绝缘的氧化铝介质材料^{[43][44]}，这样就能通过此介质层减小温度干扰。

苯并环丁烯（Benzocyclobutene），一般简称为BCB，是一种具有较小脱气性、低吸湿性和优异的电学性能的高粘性键合材料，一些型号的BCB还可直接进行光刻图案化，工艺简单，它已被用于一些晶圆级封装工艺^{[45][46]}，可通过它实现已腐蚀出腔体的Pyrex玻璃与硅基底的封装。

其他部分所用的材料分别为：互连线用电性能优良、物理化学性质稳定的金制作，盖板使用硅或玻璃。图 3.15 是本文所设计的热对流加速度计剖面图，各部分所用材料在图中已给出。

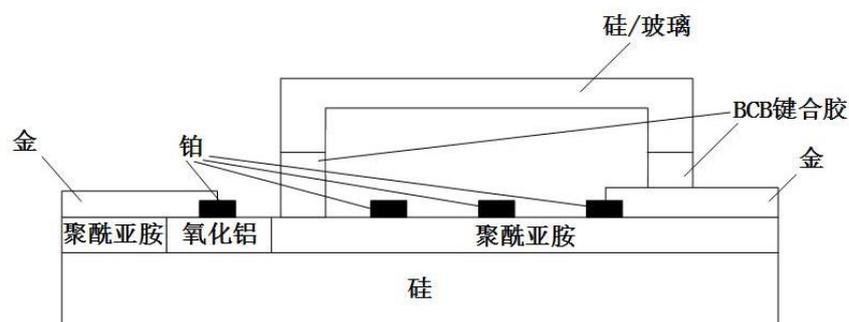


图 3.15 热对流加速度计各部分所用材料示意图

3.3 本章小结

本章首先对MEMS热对流加速度计的原理进行建模仿真分析,使用有限元耦合仿真软件Comsol建立了简化的二维模型来分析密闭腔体内空气的自然对流传热情况,通过给腔体内的空气施加体积力(volume force)来模拟加速度计受到外界加速力的情况,分别施加0g、1g、2g、5g、10g的加速度来分析腔体底面温度场变化,仿真结果显示,在0~10g范围内,加速度计是近似线性的,且在0~2g内线性度最好;相同加速度下,不同位置处的温度差也不同,在距离热源30~70 μm 处的温差达到最大值,据此可优化加速度计结构设计,提高加速度计灵敏度。然后对加速度计进行具体的结构设计,一共设计出6种规格的加速度计,每种规格又根据间距不同设计出4种不同结构;又设计了便于后期测试的范德堡方块电阻测试结构;最后选取合适的各部分制作材料。

第 4 章 MEMS 热对流加速度传感器版图设计及工艺加工

4.1 引言

本文的前半部分主要对MEMS热对流加速度传感器进行理论分析、结构设计以及性能仿真等，从本章开始就是对理论的实践验证部分，主要包括了工艺流程和版图设计、实际流片以及第五章的接口电路的设计和测试。

MEMS器件的设计制作流程一般如图 4.1 所示，本文所研究的加速度计的器件结构设计在第三章已经基本完成，本章进行工艺相关设计及实施。

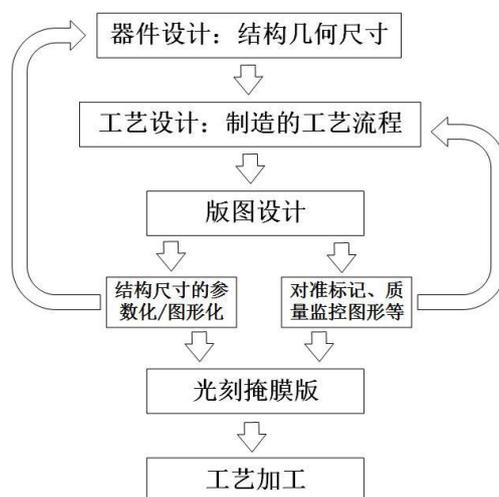


图 4.1 MEMS 器件设计制作流程图

4.2 MEMS 热对流加速度传感器工艺流程设计

通过前边对MEMS微加工工艺的一些研究分析，以及第三章对本文所研究传感器的结构设计，本节主要研究MEMS热对流加速度计的加工工艺，选择制作各部分结构所需的工艺并制定加工流程。

本文所设计的MEMS热对流加速度传感器为了更好的与IC工艺兼容、增加器件耐冲撞强度，选用硅表面微加工工艺，在衬底上制作不同材料的薄膜结构，来完成加速度计的制作和实现其功能。

首先第一层要做PI薄膜，并且在PI上刻蚀出参考区。根据前面的分析，可选用光敏性或非光敏性两种PI。如果选用光敏性的PI，制作工艺过程为：配PAA胶体——旋涂——曝光——显影——亚胺化；如果选用非光敏性的PI，制作过程为：

配PAA胶体——旋涂——亚胺化——涂光刻胶——曝光——显影——刻蚀——去胶。由于光敏性的PI一旦厚度过大，将影响光刻质量，对于图形的质量有影响^{[47][48]}，因此本文选用非光敏性的PI来进行工艺加工。PI的刻蚀选择常用的RIE干法刻蚀，用O²⁻离子进行刻蚀。

Al₂O₃薄膜的制备可选择真空蒸镀、溅射、离子成膜、脉冲激光及化学气相沉积等多种技术，本文根据厚度、沉积速率等因素，选择最原始、最简单的真空蒸发镀膜配合剥离（lift-off）^{[49][50]}工艺来制作Al₂O₃薄膜。

Pt薄膜层的制作选择磁控溅射来完成，具体图形化的制作可选择IBE刻蚀工艺或lift-off工艺。IBE刻蚀的工艺步骤为：溅射——涂光刻胶——曝光——显影——刻蚀——去胶；lift-off工艺步骤为：涂光刻胶——曝光——显影——溅射——剥离。

Au薄膜可用电镀工艺来进行制作，首先使用磁控溅射FHR来制作一层薄的导电用的Au薄层，电镀完成后进行IBE刻蚀来完成图案化制作。具体步骤为：(1)整片溅射一层薄的Au层，(2)涂光刻胶并曝光，(3)进行显影，(4)电镀液中通电进行电镀，(5)达到需要的厚度后去胶，(6)使用IBE刻蚀对整片进行刻蚀，Au层结构完成。此工艺步骤如图4.2所示：

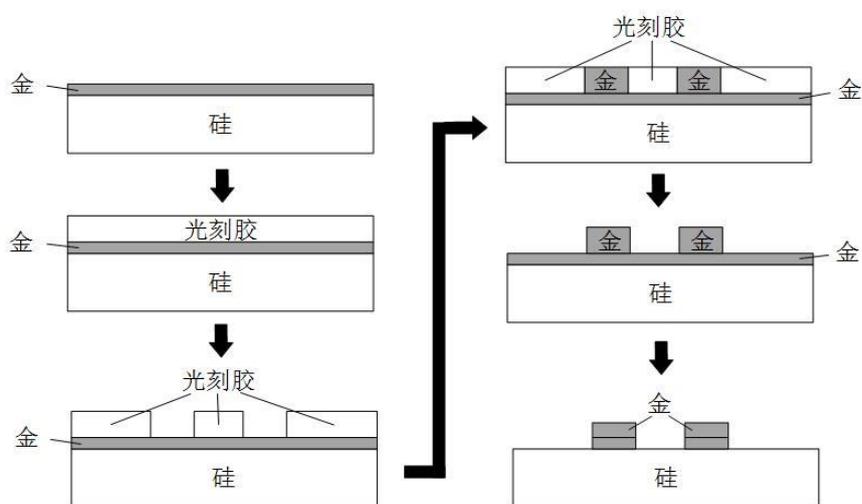


图 4.2 Au 层结构的制作工艺流程

为了防止传感器被外界灰尘颗粒或其他污染物玷污失效，通常要在器件表面生长一层SiO₂或Si₃N₄钝化层来作为保护。本文选用Si₃N₄钝化层，用最常用的PECVD来生长。刻蚀用标准RIE刻蚀工艺即可完成。

BCB键合胶通常是光敏性的，使用标准光刻工艺即可。

石英玻璃（Quartz glass）需要进行两次刻蚀，第一次刻出凹槽，第二次在键

合之后刻穿分离成为每个结构上的正方形盖板，可以用氢氟酸进行湿法刻蚀。

石英玻璃盖板和衬底的键合可以用光刻机的对准系统进行对准，然后施加外力，对胶加热固化完成键合。或者使用纳米压印技术来制作盖板。

所设计的MEMS热对流加速度传感器整体工艺流程图如图 4.3 所示。

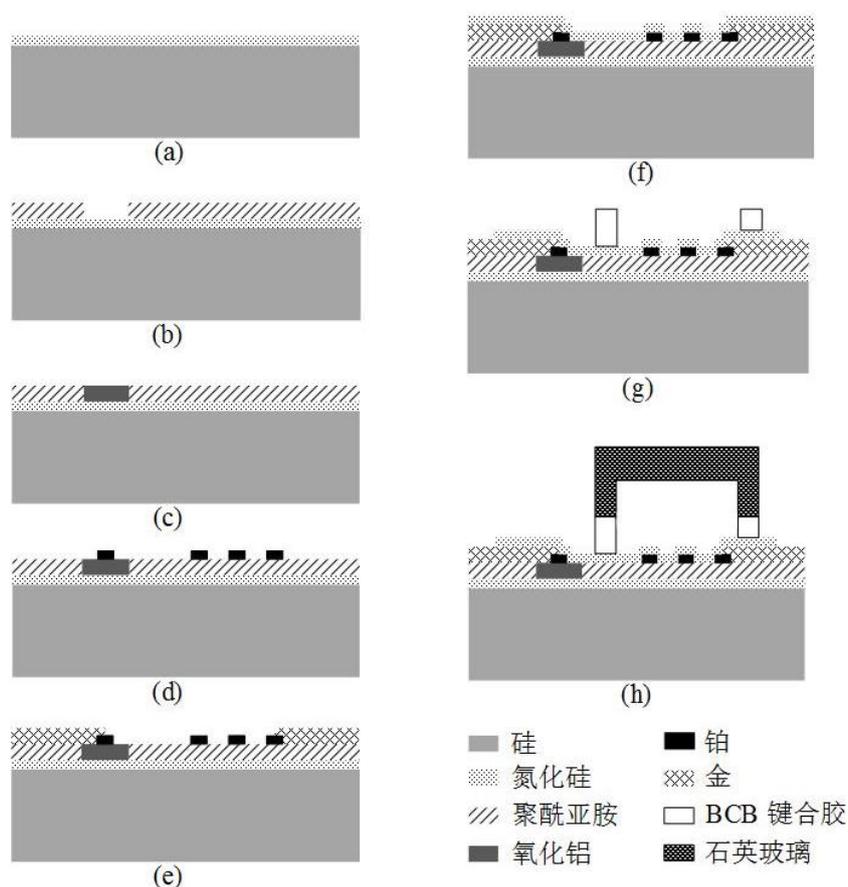


图 4.3 MEMS 热对流加速度传感器工艺流程

4.3 版图设计

4.3.1 L-Edit 版图绘制

热对流式加速度计的版图设计使用的是由Tanner Research公司开发的一款版图编辑软件L-Edit，根据第三章所设计的结构来进行绘制。该加速度计一共有七层结构，第一层跟第二层可以共用一块掩膜版，盖板需要两块掩膜版，因此，一共需要七块掩膜版，因此版图也需要绘制七层。绘图时，为了区分各个图层，通常用不同的颜色来进行绘制，如图 4.4 所示为单个MEMS热对流加速度传感器的整体版图，各颜色代表的图层和颜色也已给出，其中字母“M”代表“Mask”，下同。（外围黑色方框只用来作单个器件的标识，不是结构层）

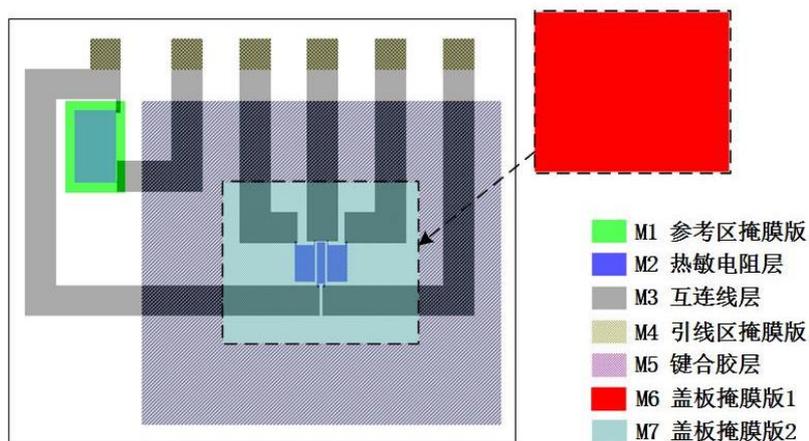


图 4.4 单个加速度计整体版图

七块掩膜版分开的版图如图 4.5 所示：（外围黑色方框只用来作单个器件的标识，不是结构层）。

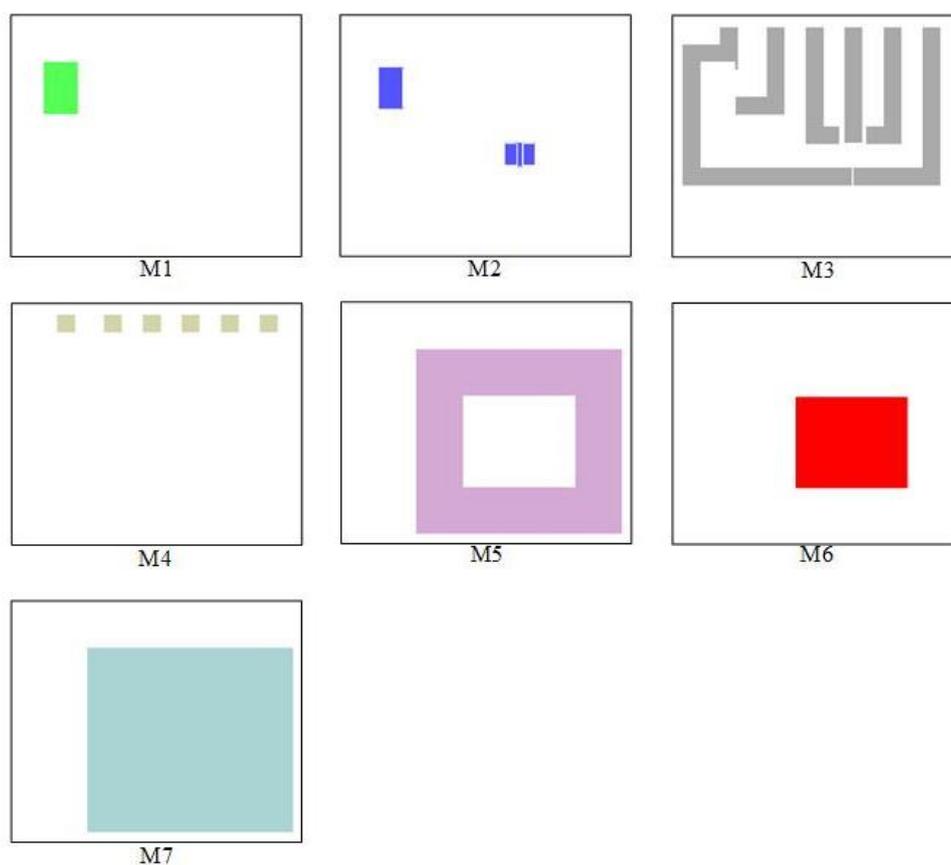


图 4.5 (M1)参考区掩膜版 (M2)热敏电阻层 (M3)互连线层 (M4)引线区掩膜版 (M5)键合区掩膜版 (M6)盖板掩膜版 1 (M7)盖板掩膜版 2

图 4.5 中 M1 是参考区掩膜版，用来完成 PI 膜的刻蚀和参考区衬底 Al_2O_3 薄膜

的制作；M2是Pt电阻掩膜版，用其配合IBE刻蚀来制作核心结构——参考电阻、加热电阻和传感电阻；M3是互连线掩膜版，配合电镀工艺来完成互连线的制作，其端点处是做引线键合的pad；M4是引线区掩膜版，在芯片制作完成后要整片沉积一层Si₃N₄来保护器件免受外界灰尘颗粒的污染，因此需刻蚀掉pad区的Si₃N₄而使下层的Au裸露出来以便进行引线键合；M5、M6、M7都是用来制作封装盖的掩膜版，通过键合胶掩膜版来对BCB键合胶进行制作，通过盖板掩膜版1、2先对封装盖进行挖槽再进行单个分离。

4.3.2 对准标记设计

由于微机械加工工艺过程中需要多次用到光刻，光刻质量会影响每一步工艺所制作出的结构的质量，最终影响整个器件的质量，而光刻对准问题是影响光刻质量的首要问题，因此光刻对准对于能否成功制作出所设计的器件至关重要。

光刻对准一般有正面光刻对准和背面套刻对准^{[51][52]}，正面光刻对准原理如图4.6所示，首先将掩膜版放入光刻机，在顶部显微镜视野中寻找对准标记后固定好位置，然后放入载有样品的载片台，掩膜版的位置是在样品和顶视显微镜之间，也就是在显微镜视野中透过掩膜版的标记能看到样品上的标记来进行对准。调整载片台x、y和 θ (角度)位置来对准。

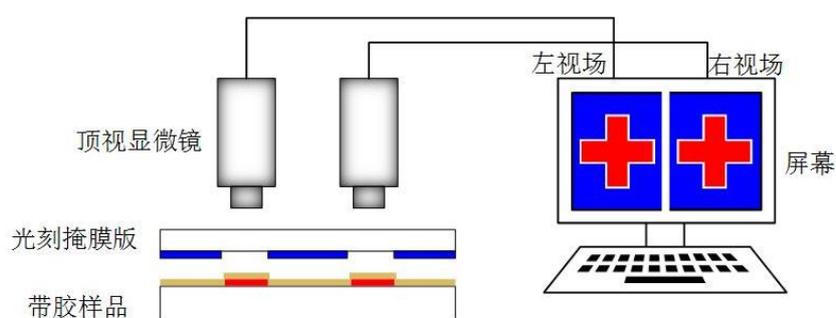
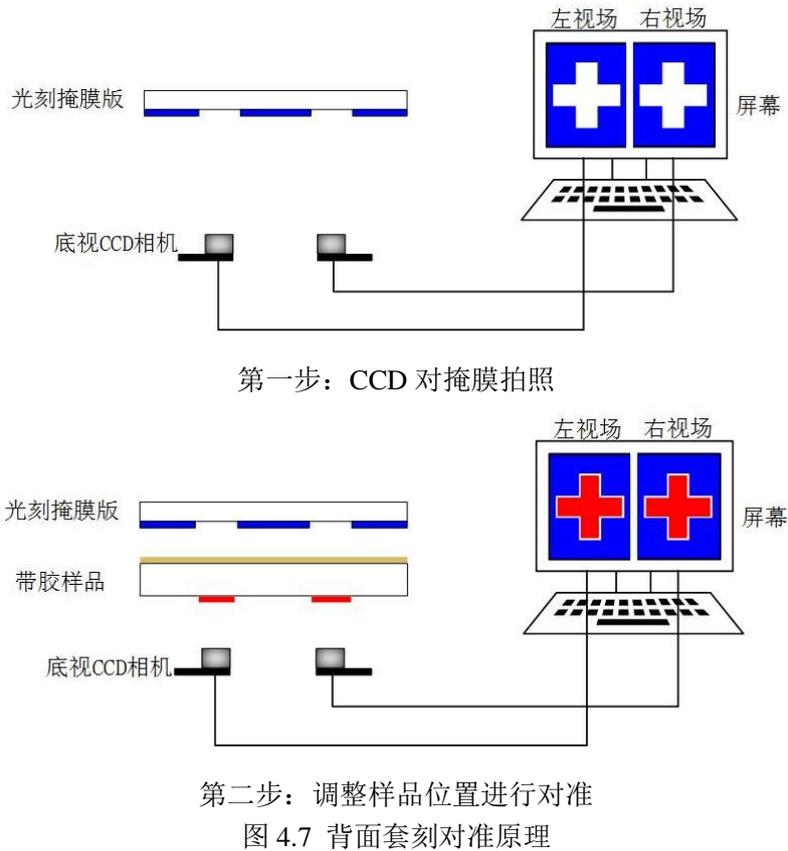
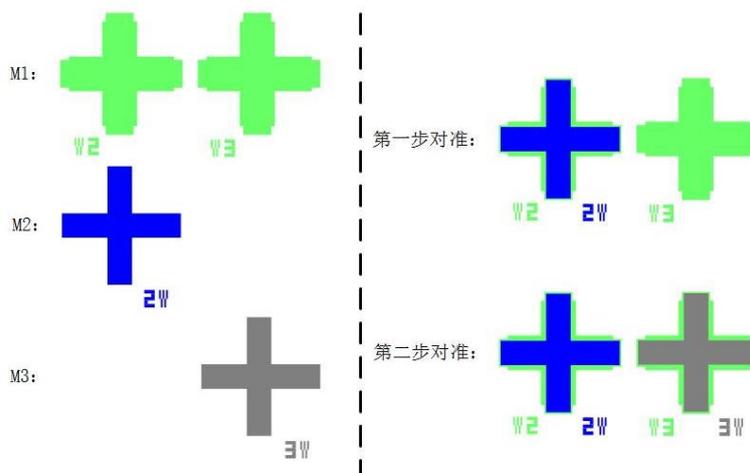


图 4.6 正面光刻对准原理

背面套刻对准需要调用底部的CCD相机，首先对放入掩膜版并对掩膜版上的标记进行拍照记录位置然后显示在屏幕上，再把载片台放入底部CCD相机和掩膜版之间，样品的光刻面向上，从CCD相机的视野中找到样品非光刻面上的标记并与屏幕中所记录的掩膜版上的标记进行对准。同样，调整样品的x、y、 θ 方向来对准。光刻对准需要在硅片两边各有至少一个对准标记，否则会有偏差，具体两种对准方法原理图如图4.7所示。



本文根据光刻对准原理，结合自己的器件及工艺，绘制出如图 4.8 所示的十字形带胖瘦标记的对准标记，十字形标记在x轴和y轴方向上都对称，既可以正面光刻又方便背面套刻，胖瘦标记可以检查对准情况，提高对准精度。此外，由于有阳版和阴版之分，对准标记的设计也要根据不同的版来设计，因此本文设计了两种标记，前一层都用大标，后一层用小标。图 4.8 所示左边是M1、M2、M3 三层光刻版上所做的对准标记，右边是两次光刻对准结果。



4.4 MEMS 热对流加速度传感器工艺实施

本文所设计的MEMS热对流加速度传感器的工艺加工全部是在中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所纳米加工平台完成,光刻掩膜版是由苏州制版加工制作,工艺过程由本人操作完成。

4.4.1 PI 薄膜的实验

作为热对流加速度计的衬底,聚酰亚胺薄膜的质量好坏直接关系到加速度计的制作质量和性能,因此工艺部分第一步需要做的是对聚酰亚胺工艺参数的研究以及实验。

PI材料一般有进口的和国产的,进口的性能好但价格高,而且购买周期比较长,本文选择了舟山维特新材料科技有限公司生产的PIS-T型聚酰亚胺,是一款非光敏性的PI。由于不同公司所生产的不同型号的PI都各不相同,而且厂家没有给出具体的参数,因此对于本文所用PI,第一步是进行重复试验来测量PI的一些加工参数,比如PI溶液浓度与最终PI膜厚度的关系曲线、匀胶机转速与最终PI膜厚度的关系曲线等。

首先对原溶液进行稀释。稀释PI可用NMP(N-甲基吡咯烷酮)、DMF(二甲基甲酰胺)或DMAC(二甲基乙酰胺)溶液^{[53][54]},本文选择最常用的NMP溶液,按体积比PI:NMP=1:1、3:1、6:1、8:1来进行配比稀释。

衬底使用清洗干净的2寸单抛硅片,先对硅片的抛光面进行HMDS预处理,提升硅片涂胶性能,预处理完成后进行涂胶。PI也是一种胶体,涂胶方法与普通光刻胶类似,使用匀胶机设置不同转速进行旋涂。由于PI的收缩性很强,因此在旋涂完成后要立即放在热板上进行前烘处理,否则刚涂好的PI会在一分钟内收缩至硅片中心处。匀胶机转速对涂胶厚度也有影响,因此对于每一种浓度的PI溶液设置不同的转速来进行涂胶。分别设置2000、3000、4000、5000rad/min,旋涂时间均为60s,来进行实验。

体积比1:1的PI溶液以最小转速旋涂完成后发现硅片上没有胶体,可能由于浓度太低导致粘度过小,不足以黏附到硅片上。而8:1的PI溶液以最大转速涂完并且前烘后发现胶体出现不均匀现象,尤其是边缘部分,如图4.9所示,可能是由于浓度太高导致胶体很难完全旋涂均匀。这样的涂胶效果表面平整度比较差,对后续工艺会有不利影响。因此,主要用3:1和6:1的体积比来进行实验。涂完胶后立即放置在140℃(130℃~160℃范围内均可)热板上进行前烘,时间为30min。经过前烘后用台阶仪来测量PI膜的厚度。测量结果曲线如图4.10所示。

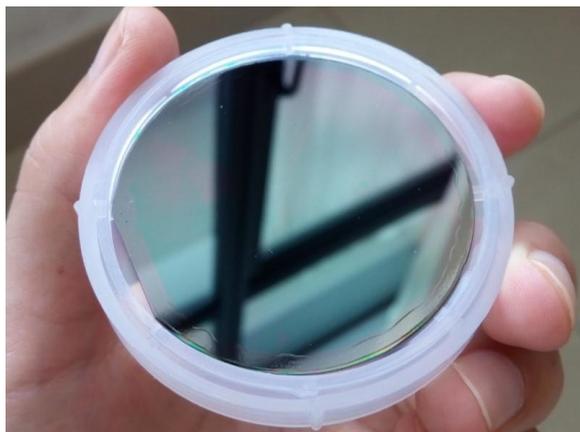


图 4.9 PI 不均匀

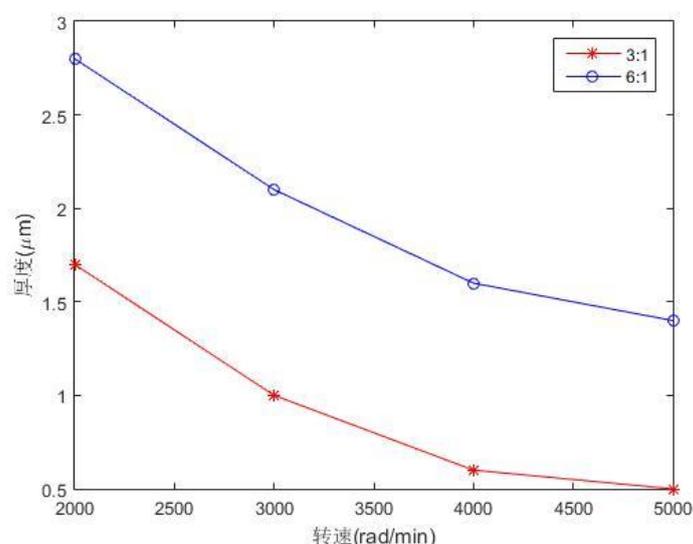


图 4.10 浓度与匀胶机转速对 PI 厚度的影响

体积比为 6 : 1 的 PI 溶液在 2000rad/min 的转速下旋涂 60s 后效果与图 4.10 相似，增加旋涂时间为 120s 后，旋涂的效果并无太多提升。这些较差效果的出现可能与胶体本身质量有关，也可能与贮存不当（比如贮存温度、时间等）有关。最初设计的 PI 厚度是 $3\mu\text{m}$ ，考虑到这些不利因素，最终决定使用效果比较好的 $2\mu\text{m}$ 的厚度来进行后续工艺。参数为体积比 6 : 1，转速 3000rad/min，旋涂时间 60s。

涂胶完成后要进行固化（也叫亚胺化），固化分两步，分别是低温固化和高温固化，固化处理对 PI 膜的表面平整度和均匀性有很大影响^{[55][56]}，由于 PI 是作为第一层衬底，因此它的表面形貌对后续工艺有至关重要的影响。PI 的固化需要在无氧环境中，因此使用氮气烘箱来进行，经过多次实验，得到了如图 4.11 的温度曲线，在此条件下固化处理的 PI 膜效果较好。固化处理后用台阶仪测得 PI 膜的厚度减小为 $1.87\mu\text{m}$ 。

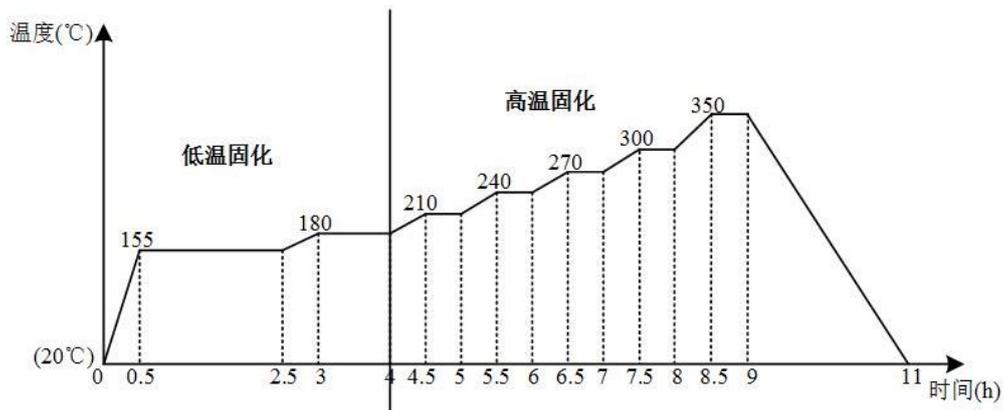


图 4.11 PI 的亚胺化温度曲线

接下来进行PI的刻蚀实验，第一是要得到PI的刻蚀条件和刻蚀速率，第二是得到PI与普通光刻胶的选择比。选择比是在同样的条件下，刻蚀相同时间，两种不同材料刻蚀掉的厚度的比值，这样有利于对掩膜层厚度的控制。光刻胶和PI的刻蚀原理相同，都可用氧的等离子体进行刻蚀，因此可选择RIE或ICP进行PI的刻蚀，本文选择的是RIE干法刻蚀，同时放入做好PI和光刻胶AZ5214 的样品，使用的设备名称是Oxford 80+，参数条件是Si₃N₄ 刻蚀标准工艺的参数，只是把刻蚀Si₃N₄ 所用的气体换为只通入O₂，RF功率为 60W，真空度 25mTorr，衬底温度 100℃，通入不同流量的O₂ 气体，刻蚀时间都为 1min，结果如图 4.12 所示。

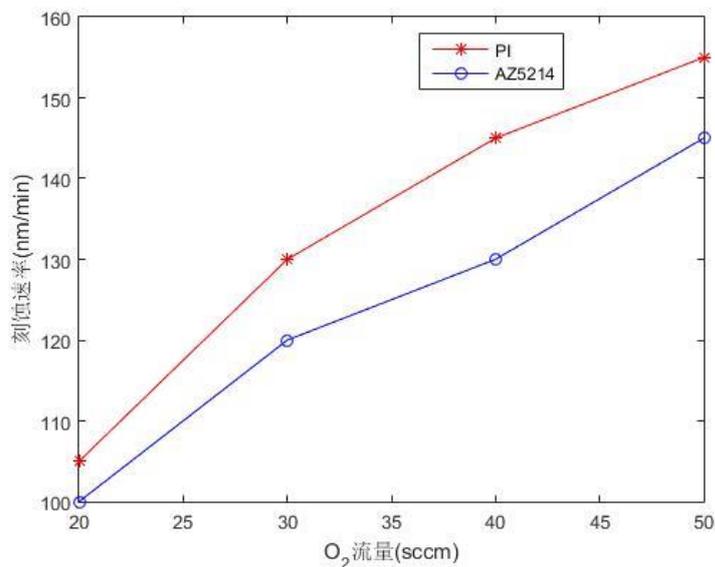


图 4.12 O₂ 流量对 PI 和 AZ5214 的刻蚀速率的影响

由图中对PI和AZ5214 的刻蚀曲线可知，两种材料的刻蚀选择比近似于 1:1，

刻蚀完在高倍显微镜下观察样品表面发现，随着通入 O_2 的流量变大，表面的不均匀性也在增加，因此，本文最终选择了 30 sccm 的参数。

4.4.2 后续工艺流程

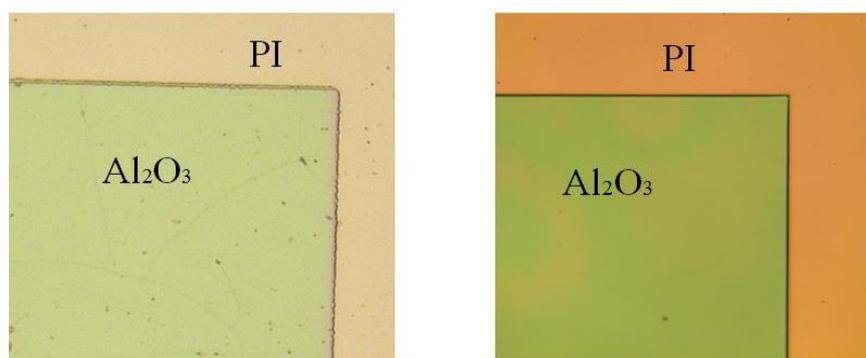
根据所设计的工艺流程，进行后续加工工艺的实施。首先准备所用材料，选取了 $1\sim 10\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的 2 inch 单抛硅片，由舟山维特新材料有限公司生产的 PIS-T 型聚酰亚胺溶液，用于稀释 PI 的 NMP 溶液，AZ5214 可反转型光刻胶，7 块制作好的光刻掩模版，2 inch 的片盒以及小片片盒若干。

1、对硅片进行标准清洗。选择合适的花篮和方缸，加入适量丙酮溶液并放入超声清洗机中清洗 5 min，然后把装有硅片的花篮拿出放入盛有异丙醇溶液的容器中超声清洗 5 min，再用去离子水清洗硅片并用氮气风枪进行吹干、放入片盒，对废液进行处理。

2、第一层在硅衬底上淀积 Si_3N_4 介质层来防止器件漏电，使用的设备是 PECVD (SYSTEM 100)，工艺条件是 Si_3N_4 标准工艺，温度 350°C ，RF 功率 67W，厚度为 300nm。

3、在 Si_3N_4 膜上进行 PI 的制作。PI 的涂覆和高温亚胺化在前面一节已经讲过，此处不再赘述，PI 的最终厚度为 $1.87\ \mu\text{m}$ 。根据的现有设备条件，后续的 Al_2O_3 最多只能做到 500nm 的厚度，因此决定在 PI 上刻蚀出 500nm 的凹槽，然后进行 Al_2O_3 的生长。先在 PI 上涂 $1.4\ \mu\text{m}$ 厚度的正性光刻胶，进行光刻（光刻版 M1），显影完毕再后烘，然后用 RIE 进行刻蚀，完成后进行标准清洗步骤来清理残胶。

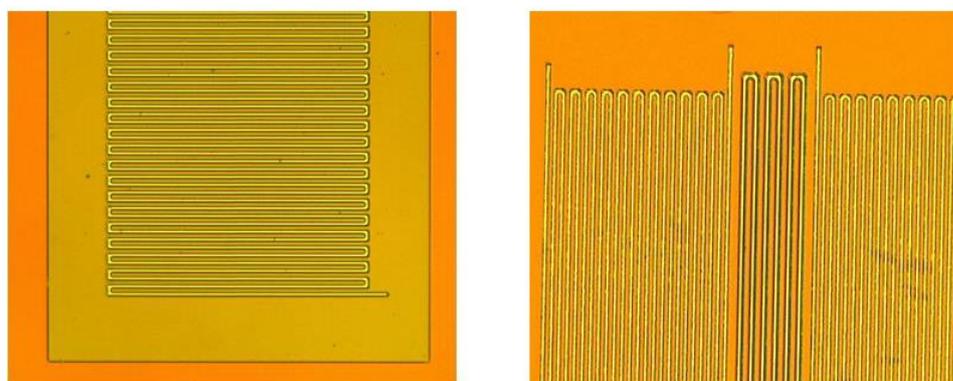
4、涂正性光刻胶并光刻（光刻版 M1），把需要镀膜的地方的胶去除，后烘完成后进行 Al_2O_3 的蒸镀，使用的设备是光学镀膜机 OTFC-900，由于是带光刻胶镀膜，温度不宜过高，因此选用了 100°C 的工艺温度，蒸发功率 10%，工作真空 -4Pa ，为了得到更好的蒸镀效果，蒸发速率控制在 $18\text{nm}/\text{min}$ ，淀积完成进行剥离，在丙酮中浸泡 20min 后，超声清洗 5min，剥离干净。清洗完成后经台阶仪测量，最终厚度为 580nm，与 PI 面有 80nm 的高度差，在高倍 CCD 相机下观察，发现边缘部分效果很差，而且表面有裂纹和缺陷现象，如图 4.13(a) 所示。分析原因：1) 温度不够高导致 Al_2O_3 的蒸镀效果不好；2) 衬底 PI 刻蚀后，表面均匀性不好，导致 Al_2O_3 出现应力问题而产生裂纹；3) 光刻时显影不完全；4) 设备问题，500nm 厚度超过了设备的加工能力。对这些可能存在的问题进行一些工艺的修改，PI 的刻蚀减小进气量增加刻蚀时间、光刻时确保显影完全、设置镀膜厚度为 350nm 等，重新蒸镀后的 Al_2O_3 膜表面无裂纹，但均匀性存在一定问题，如图 4.13(b)。



(a)厚度 580nm 的 Al_2O_3 表面裂纹和缺陷 (b)厚度为 350nm 的表面形貌较好

图 4.13 Al_2O_3 的蒸镀结果

5、使用磁控溅射-LAB 18 和离子束刻蚀IBE-A-150 进行Pt的制作。LAB 18 标准工艺溅射金属的参数反溅射功率 50W，溅射功率 300W，温度 20°C ，溅射速率为 $12\text{nm}/\text{min}$ 。由于Pt的粘附性不好，因此需要在溅射Pt之前先做一层 20nm 厚度的Ti来作为“黏附层”，然后溅射第二层金属Pt，厚度为 300nm。溅射完成后进行IBE刻蚀，首先涂胶光刻（光刻版M2），然后进行刻蚀，最终完成Pt的工艺，在CCD相机下可看到Pt的效果较好，如图 4.14。



(a)参考电阻

(b)加热电阻和传感电阻

图 4.14 Pt 热敏电阻的制作

6、Au的制作需要两步镀膜工艺和一步刻蚀工艺，首先在整个硅片上使用FHR设备溅射一层 50nm厚度的Au，同样需要 20nm的Cr或Ti作为Au和衬底的“黏附层”，此外要将下一步需要用到的光刻对准标记涂上融化的蜡再贴上小的碎片作为保护。溅射完成后进行涂胶、光刻（光刻版M3），由于电镀Au厚度为 $2\mu\text{m}$ ，因此光刻胶要涂大于 $2\mu\text{m}$ 的厚度。电镀Au所用电流密度为 $0.2\text{A}/\text{dm}^2$ ，沉积速率

为 150nm/min。去胶后进行刻蚀工艺，刻蚀设备选用离子束刻蚀IBE-A-150，工艺条件是温度 20℃，离子能量 300eV，整片刻蚀掉 70nm的厚度，需过刻 1~2min 确保把不需要的金属层刻蚀干净。最终测得Au的厚度为 1.8 μm ，CDD高倍镜头下可看到Pt和Au的接口处连接完好，如图 4.15。方块电阻测量结构希腊十字和偏置交叉结构如图 4.16 所示，同样在Pad区制作 2 μm 厚度的Au电极。

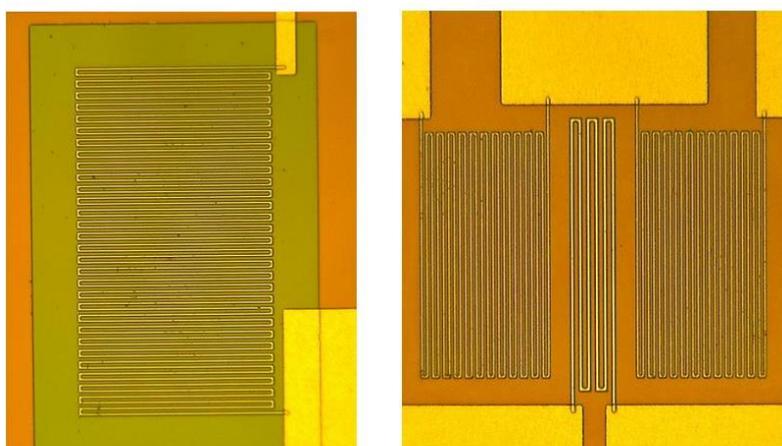
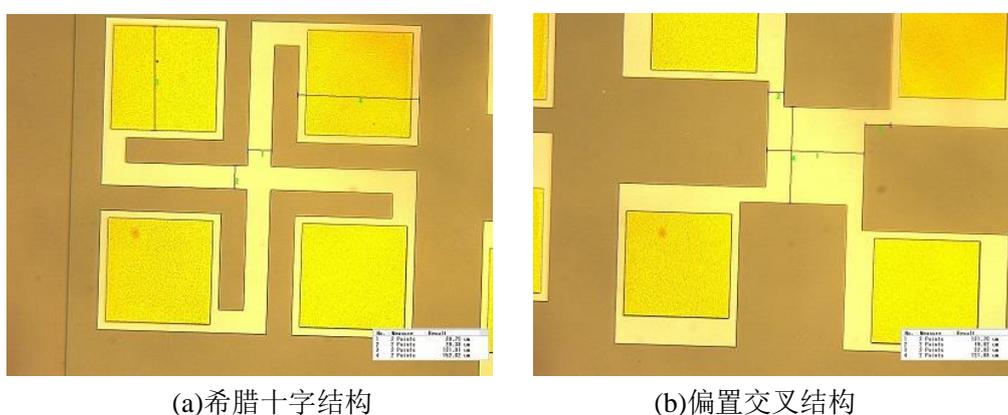


图 4.15 Pt 热敏电阻与 Au 互连线的接口



(a)希腊十字结构

(b)偏置交叉结构

图 4.16 方块电阻测量结构

7、上一步完成后，MEMS热对流加速度计的核心部分已基本完成，需要在表面生长一层 Si_3N_4 钝化层来进行保护，并在互连线的端点处开孔形成引线区，因此本步骤需要先镀膜再刻蚀。镀膜仍然使用PECVD(SYSTEM 100)，工艺参数相同，厚度仍为 300nm。进行光刻（光刻版M4），再使用RIE1(Tegal 903e)进行刻蚀，刻蚀气体为 SF_6+CHF_3 ，RF功率 200W，真空度 1500mtorr。

8、至此核心部分已完成，接下来是盖板部分的制作，由于实验条件的限制，

后续盖板的制作遇到问题，于是先对芯片进行划片和引线，完成后制作简易盖板进行芯片测试。图 4.17 为制作好的 3 个 2 inch 晶圆。

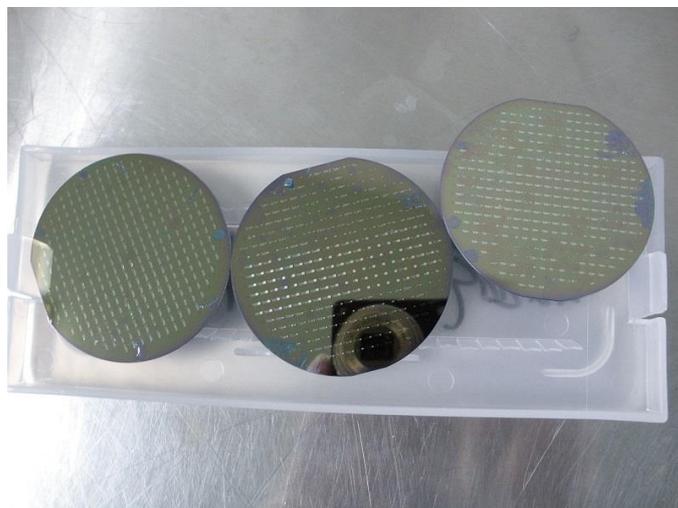


图 4.17 制作好的 2 inch 晶圆

9、对制作好的晶圆使用探针台进行初步测试，主要测方块电阻、Pt 的电阻率，然后挑选出结构完整电性能良好的芯片；

10、划片可选用普通划片和激光划片，由于PI的粘附性不是特别好，在水中更差，而普通划片机需要冲水进行降温，水的冲力容易把PI冲掉，因此选择激光划片。

11、最后使用West Bond引线机把挑选出的芯片通过球焊的方式焊接在预先制作好的管脚上，然后可接入后续测试电路来进行芯片的测试。引线键合完成后的芯片如图 4.18 所示。



图 4.18 划片和引线键合后的芯片

4.5 本章小结

本章是MEMS热对流加速度传感器的工艺部分，使用的是硅表面微加工工艺。首先是对工艺流程的设计，包括每层结构所使用的材料、工艺，绘制出了工艺流程图；然后根据第三章所设计的加速度传感器结构来绘制光刻掩膜版版图，包括传感器结构、范德堡方块电阻测量结构以及光刻对准标记的设计；最后是工艺流程的实施，首先对PI进行试参，使用体积比PI : NMP=6 : 1、转速 3000rad/min、旋涂时间 60s可得到效果较好的PI膜，最终得到 1.87 μm 厚度的PI膜，后续工艺使用了包括光刻、蒸镀、溅射、剥离、刻蚀、电镀等微加工工艺，最终初步制作出加速度计芯片并完成了引线键合。

第5章 外接电路的设计和加速度计的测试

由第二章的分析知道，MEMS加速度传感器的原理就是感知到外界的加速度信号，然后通过器件本身与接口电路的组合把加速度信号转换为电信号（通常为电压信号）的器件，因此外接电路是整个加速度计系统中很重要的一部分。

5.1 MEMS 热对流加速度传感器的接口电路

本文所设计的热对流加速度计一共包括两部分电路：加热器控制电路和加速度检测电路。两部分电路的基本原理都是惠斯通电桥原理，最终可制作在同一块PCB电路板上，组成完整的接口电路。

5.1.1 加热器温度控制电路

加热器温度的控制是通过传感器上的参考电阻、加热电阻和外部元器件所组成的惠斯通电桥来实现的，具体原理图如图5.1所示。通过此电路可使加热器与外界的温度差 δT 保持稳定，以最大限度的减小由于 δT 波动引起的误差和非线性。

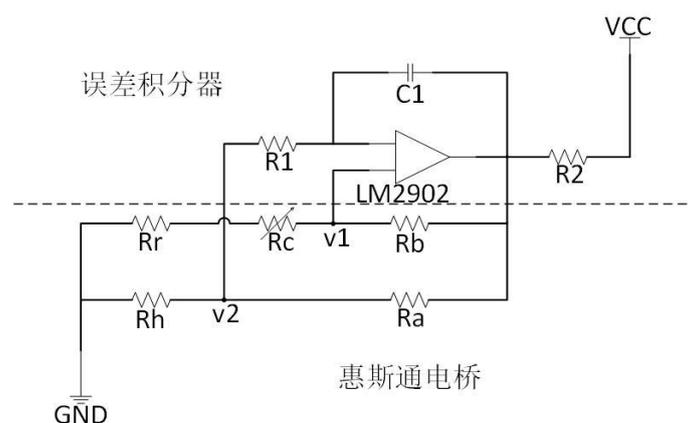


图 5.1 加热器控制电路原理示意图

如图所示，上半部分是误差积分器，下半部分是一个直流惠斯通电桥，加热电阻 R_h 和外部固定电阻 R_a 在电桥的一条臂上，参考电阻 R_r 和外部固定电阻 R_b 、可调电阻 R_c 组成另外一条电桥臂，可实现温度补偿和感知外界环境温度的功能。假设在一个温度固定的环境下， R_r 是保持不变的，当加热电阻 R_h 附近温度降低时，由于对温度敏感的特性，其电阻值也会变小，导致电桥失去平衡产生一个差分电压信号，这个电压信号会加载在一个具有高增益反馈的误差积分器输入端，这样

能通过输出端来增加加热电阻 R_h 两端的电压，使加热电阻 R_h 以更大的功率来工作，产生更高温度。相反，当加热电阻 R_h 温度高于预设温度时，误差积分器会通过调节加载在 R_h 两端的电压使其变小，来让加热电阻 R_h 减小功率，保持在一个稳定状态。误差积分器能够随时监测到电桥的失衡，并进行相应的调整，从而使加热温度保持稳定。

在环境温度 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的范围内，通过选择合适的 R_a 、 R_b 和 R_c ，加热器的温度误差可以保持低于环境温度改变量的1%，电阻值的选取可以通过以下推导公式来进行：

根据惠斯通电桥相关理论可知，

$$\frac{R_c + R_r}{R_h} = \frac{R_b}{R_a} \quad (5.1)$$

上式中理想状态下只有 R_h 是变化的，由于铂的特性，在一定温度范围内， R_h 的变化是线性的。设开始的温度（也是环境温度）为 T_0 ，最终温度为 T_1 ，加热器初始电阻值为 R_{h0} ，温度 T_1 时的加热器阻值为 R_{h1} ，铂电阻的TCR为 α ，则有如下关系式：

$$R_{h1} = R_{h0}[1 + \alpha(T_1 - T_0)] \quad (5.2)$$

该加热器与外界温差 $\delta T = T_1 - T_0$ ，式(5.2)可写作：

$$R_{h1} = R_{h0}(1 + \alpha\delta T) \quad (5.3)$$

如果初始状态下令式(5.1)中 $R_r/R_{h0} = R_b/R_a = k$ (k 为常数)，则有：

$$\delta T = \frac{R_c}{k\alpha R_{h0}} \quad (5.4)$$

电路中 R_a 、 R_b 是固定电阻， R_c 为可调电阻，可以设置合理的阻值大小来实现对加热器加热温度的控制。为了使 R_r 产生较小的温度和电阻改变量，可使该电桥臂通过的电流处于较小的水平，即设计 k 为较大值，本文设计 $k=10$ 和 $k=5$ 两种作为对比，传感器参考电阻和加热电阻的值为：传感器上电阻 $R_{h0}=600\ \Omega$ 或 $1.2\text{k}\Omega$ ， $R_r=6\text{k}\Omega$ ，接口电路的电阻 $R_a=500\ \Omega$ ， $R_b=5\text{k}\Omega$ ， $R_c=1.5\text{k}\Omega$ ，此外通过第二章的分析知道 α 的值为 0.00376 ，那么设计的加热器的加热温度 δT 就可以稳定在 65°C 左右，此时加热器的功率为 6.8mW 。对于一个确定的传感器以及接口电路中其他条件不变，调节可变电阻 R_c 值的大小就可调节温升 δT 的大小。

5.1.2 加速度检测电路

加速度的检测是通过两个传感电阻来进行的，其原理也是惠斯通电桥。由传

传感器上的两个传感电阻和外部电路中两个高阻抗的固定电阻来组成一个惠斯通电桥，两个传感电阻位于不同的桥臂上。通常由于工艺误差等因素，制作出的两个传感电阻阻值会有误差，将导致在初始状态下两个电桥不平衡，因此在电桥中设置一个可变电阻来作为零点电位计，当没有加速度的情况下，调节电桥达到平衡状态。具体的电路图如图 5.2 所示。

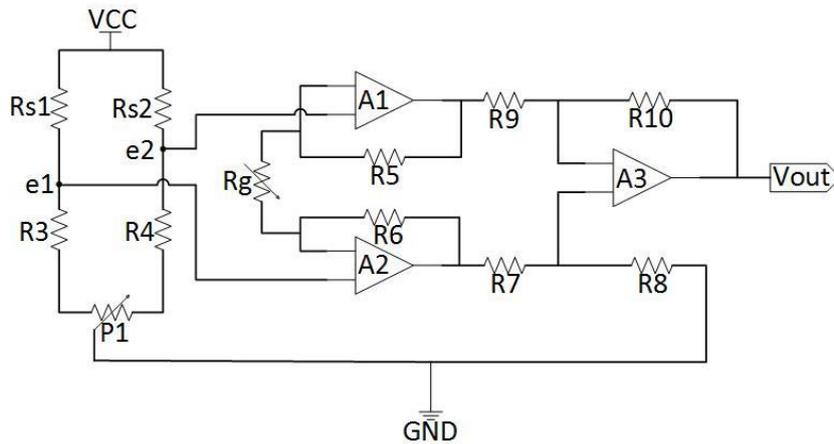


图 5.2 加速度检测电路

R_{S1} 和 R_{S2} 是传感电阻 1 和传感电阻 2， R_3 和 R_4 是外部电路中的固定电阻， P_1 是零点电位计，外部的三个运算放大器组成差分输入仪表放大器，对电桥输出的差分电压信号进行放大并通过信号输出端被测试仪器检测到。

先忽略 P_1 的存在，假设电桥本身是平衡的，则电桥的差分输出电压为：

$$\Delta U = e_1 - e_2 = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_{S1}} - \frac{R_4}{R_4 + R_{S2}} \right) \cdot V_{CC} \quad (5.5)$$

固定电阻 $R_3=R_4=R$ ，在没有加速度的情况下，两个传感电阻所感知到的温度相同，电阻值也相同，即 $R_{S1}=R_{S2}=R'$ ，此时 $\Delta U=0$ ，输出端没有信号；当有加速度时，传感电阻大小发生线性变化，改变量 $\Delta R=\alpha(1/2\Delta T)R'$ ，其中 α 为铂电阻随温度变化的系数， ΔT 为传感电阻两边的温差，传感电阻变为： $R_{S1}=R'-\Delta R$ ， $R_{S2}=R'+\Delta R$ ，式(5.5)变为：

$$\Delta U = \left(\frac{R}{R + R' - \Delta R} - \frac{R}{R + R' + \Delta R} \right) \cdot V_{CC} = \left[\frac{2R\Delta R}{(R + R')^2 - (\Delta R)^2} \right] \cdot V_{CC} \quad (5.6)$$

当 $\Delta R \ll R$ 时，(5.6) 中的 $(\Delta R)^2$ 项可忽略不计，即：

$$\Delta U = \frac{\alpha R R' V_{CC}}{(R + R')^2} \Delta T \quad (5.7)$$

此差分信号经过后端差分放大电路即可被检测仪器接收到。因此理论上 ΔU 与 ΔT 是近似线性关系，又由前文可知，两个传感电阻间温差 ΔT 与加速度 a 是线性关系，因此，最终输出电压 U 与加速度 a 也成近似线性关系。

此外，应设置 R_3 和 R_4 为高阻抗电阻，来提高传感器的线性度和灵敏度，同时 R_3 、 R_4 越大，支路电流越小，传感电阻由于焦耳热引起的误差就会越小。

最终设计 $R_{S1}=R_{S2}=1.5k\Omega$ ， $R_3=R_4=25k\Omega$ ， $P1$ 是阻值为 500Ω 的可调电阻。

5.1.3 完整接口电路

本文所设计的MEMS热对流加速度传感器共有6个引脚，把它作为一个电路元器件来设计到接口电路中。加热器控制电路和加速度检测电路可以共用同一电压源和接地端，制作在同一块PCB电路板上组成完整的传感器接口电路来进行测试，图5.3是完整接口电路示意图。

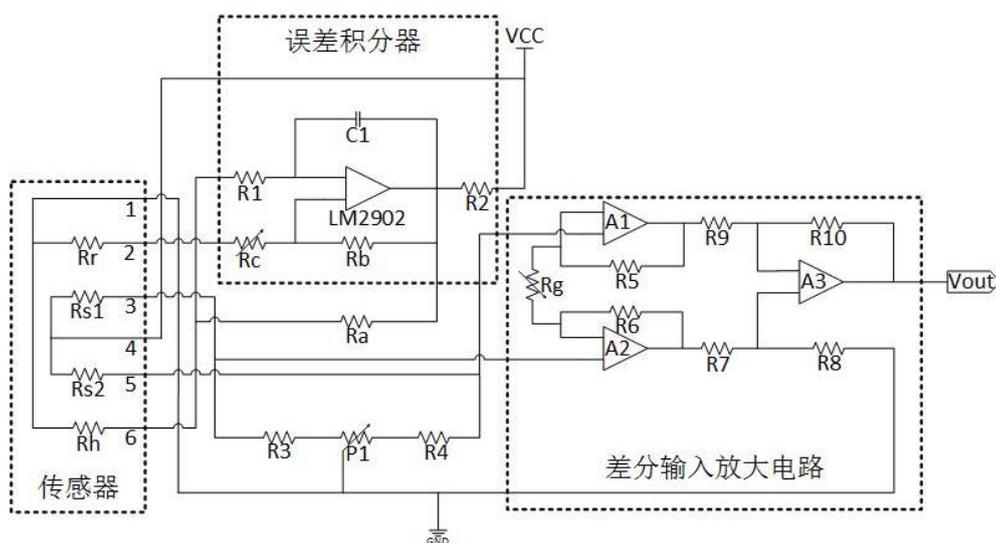


图 5.3 传感器接口电路

其中，加热控制电路中组成误差积分器的运算放大器是Fairchild公司的生产的LM2902，它具有四个独立、高增益和内部频率补偿的放大器，供电电压范围从 $3V\sim 32V$ ，可在单电源供电的电路中使用，本电路只用到了其中一个。加速度检测电路中的差分输入仪表放大器是由Texas Instruments公司生产的型号为INA128的放大器，通过调节可变电阻 R_g 的大小来调整对输出信号的放大倍数。根据器件的datasheet，放大倍数 $G=(1+50k\Omega)/R_g$ 。

5.2 MEMS 热对流加速度传感器的测试

本文所设计的加速度传感器本质上就是四部分温度敏感电阻，芯片加工完成

后首先测试各部分电性能。使用如图 5.4 所示探针台测量方块电阻，最终测得方块电阻大小约为 $R_s=0.746\Omega$ ，Pt电阻率约为 $\rho_r=2.4\times 10^{-7}\Omega\cdot m$ ，根据方块电阻可计算得到各部分电阻的大小，再与实测值进行比较。测完后发现所设计的三大类结构中C结构与设计值最接近，表 5.1 为C结构各部分电阻的设计值、计算值和测量值：

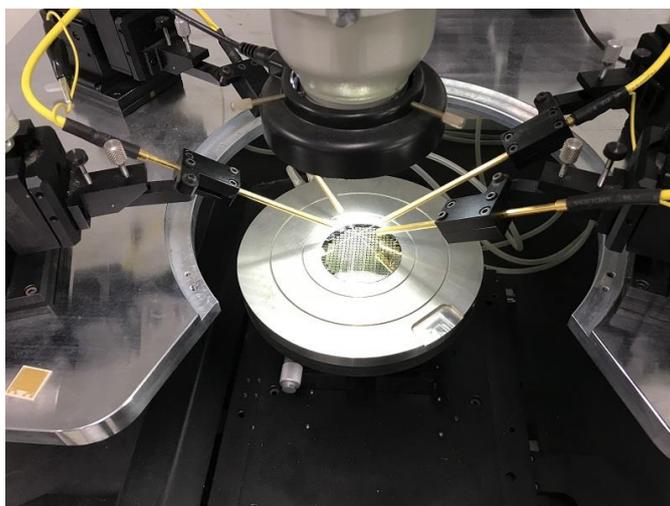


图 5.4 探针台测芯片方块电阻

表 5.1 C 结构各部分电阻设计值、计算值和测量值（单位： Ω ）

	各部分电阻	设计值	计算值	测量值
C	R_{h1}	600	663.2	705.8
	R_{h2}	1200	1326.4	1668.1
	R_r	6000	6631.194	8026.6
	R_{s1}	1500	1657.6	2011.3
	R_{s2}	1500	1657.6	2004.5

从上表可以看出，由于工艺误差的存在，实际电阻的大小与设计值和计算值均存在误差，不过在可接受范围内。通过这些测量值来调整外部接口电路中的元器件从而达到所设计的温度，如利用式（5.4），想让加热电阻产生高于环境温度 65°C 左右的温度，此时 $R_h=705.8\Omega$ ， $R_r=8026.6\Omega$ ，设置 $R_a=500\Omega$ ， $R_b=5650\Omega$ ， $R_c=1950\Omega$ 即可。

根据上一节所设计的接口电路制作出PCB测试电路板，焊接完成后如图 5.5 所示。为了防止外界气流对加速度计的测试造成影响，制作了简易盖板如图 5.6 所示，准备好振动台、电源、示波器等设备后可进行测试。



图 5.5 加速度计测试电路



图 5.6 带简易盖板的加速度计

使用如图 5.7 所示实验设备对加速度计的性能进行初步测试。分别对间距 $10\mu\text{m}$ 、 $30\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 的加速度计进行测试。



图 5.7 加速度计性能测试设备

输入端接入 5V 直流电后调节零点电位计 P1 使输出为 0，由于电阻改变量很小，差分电压信号也很小，因此设置 $R_g=50\ \Omega$ ，即对传感器差分输出信号放大 1000 倍后接入示波器。在敏感方向上分别施加 -5~5g 的加速度信号，测得的输出电压信号如表 5.2，将表中数据整理后绘制于图 5.8 中并拟合出曲线。

表 5.2 不同结构的加速度计在不同加速度下的输出电压

加速度 (g)	输出电压(V)			
	10 μm	30 μm	50 μm	100 μm
5	1.15	1.24	1.22	1.16
4	1.03	1.32	0.93	1.01
3	0.72	1.01	1.13	0.87
2	0.88	0.79	0.87	0.85
1	0.48	0.66	0.68	0.57
0	0	0	0	0
-1	-0.38	-0.52	-0.51	-0.45
-2	-0.76	-0.91	-0.88	-0.66
-3	-0.65	-0.85	-0.95	-0.8
-4	-0.91	-0.97	-1.02	-0.89
-5	-1.02	-1.12	-0.99	-0.93

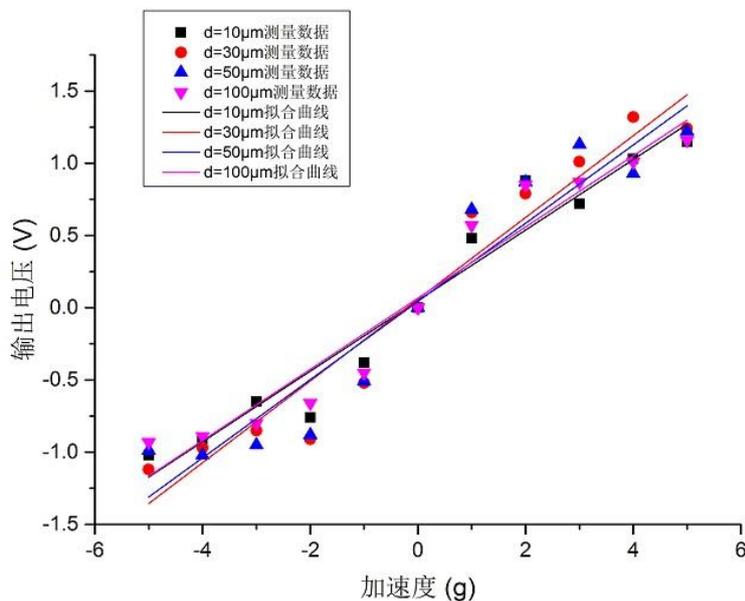


图 5.8 不同结构的加速度计输出电压与加速度的关系

测试结果表明，在 -5~5g 的加速度范围内，加速度计具有线性关系，但是线性度较差，与理论上相比存在误差，误差来源可能是：（1）传感器设计存在误差，如式 (5.5) ~ 式 (5.6) 做了近似处理；（2）简易封装盖板并不能代替器件真正的

封装；(3) 测量误差，测试设备和测试电路存在噪声。另外从测试结果可以看出，在相同加速度下，间距 $d=30\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 的两种结构的输出信号比另外两种略大，说明在此位置处加速度计具有更高的灵敏度，这与理论上相符。

5.3 本章小结

本章设计了热对流加速度计的接口电路，加热控制电路利用了误差积分器与惠斯通电桥的组合，信号检测电路利用了惠斯通电桥和差分放大的原理。然后对加速度计进行初步测试，测试结果显示，在 $-5\sim 5\text{g}$ 的加速度范围内加速度计近似呈线性，但存在误差，与理论上基本吻合；加热电阻和传感电阻间距为 30 和 50 微米处具有比其他位置更高灵敏度也验证了仿真结果的正确性。

第6章 总结

6.1 论文总结

MEMS热对流式加速度传感器是一种新型的拥有众多优点的一种加速度计，它使用热气团作为虚拟的可动质量块来替代传统的实体质量块，这使得它具有更好的抗冲击性能，其基于CMOS工艺的加工工艺也使其更易与COMS集成，从而实现芯片的微型化，因此这种加速度计会有很大的发展空间。

本文设计了一款没有悬臂梁结构的热对流加速度传感器，应用了电学和流体传热学等相关知识对加速度计的原理进行分析和建模仿真，然后研究了微机械加工的相关工艺并进行工艺加工，最终对器件进行信号检测，与仿真结果进行对比验证：

(1) 对MEMS技术以及MEMS传感器的发展背景做了简单介绍，对MEMS加速度计按原理进行简单分类和主要性能参数的对比，然后重点介绍了MEMS热对流式加速度计的国内外研究情况，并对微机械加工技术进行研究。

(2) 对热对流加速度计的基本原理进行分析，对所涉及到的电学、流体场、温度场的原理部分进行研究，探讨出热对流加速度计在 $10^{-2} \leq Gr \leq 10^3$ 的范围内是线性的，灵敏度主要与特定位置处的温度变化量和热敏电阻的电阻温度系数有关，然后讨论了Pt薄膜电阻温度系数的相关影响因素。

(3) 使用有限元仿真软件COMSOL进行了密闭腔体内流体的温度场分布的仿真，结果表明在0~10g加速度下，加速度和特定位置处传感电阻温度差之间存在线性关系，这与理论相吻合，同时也得出了加热电阻与传感电阻的最佳间距在30~70 μm 范围内，此范围内加速度计性能最好，平均灵敏度达到了0.156K/g。设计了加速度计的结构及布局，各部分Pt电阻使用“S”形布置第一可增加传感电阻与温度场的接触面积，第二也可以制作出更加合理大小的Pt电阻，有助于提高加速度计性能；设计了封装盖并把参考电阻布置在封装盖外，以更加准确的测量环境温度实现控制加热电阻的加热温度的目的。选择PI作为柔性衬底来代替悬空的梁结构，可大大增强加速度计抗撞击性能；选择好各部件所使用的材料来提高加速度计性能。

(4) 根据设计的结构，对加工工艺流程进行设计以及实施。首先设计出具体工艺流程，包括每一步得到的结构效果；然后绘制版图，包括一些对准标记、光刻掩模版制作等细节问题；接着详细介绍了工艺加工过程，在做第一层PI衬底

时进行了一系列的参数的调试, 最终完成 $1.87\mu\text{m}$ 厚度PI膜的制作; 第二步 Al_2O_3 薄膜工艺出现了裂纹等问题, 在经过相关参数和工艺步骤的调整优化, 比如PI刻蚀后进行等离子去胶使表面更平整、将厚度改为 350nm 等优化后得到解决, 接着经过了光刻、蒸镀、剥离、溅射、刻蚀、电镀等工艺步骤后最终完成了对加速度计核心部分的制作, 进行加速度计基本电性能的测试后, 完成了划片和引线键合工作。

(5) 设计了加速度计的两部分接口电路——加热控制电路和信号检测电路, 加热控制电路应用误差积分器和惠斯通电桥, 通过参考电阻来控制加热器的加热温度, 信号检测电路应用惠斯通电桥和差分仪表放大器来对外界加速度信号进行收集并转化为电信号。使用振动台在 $-5\sim 5\text{g}$ 的加速度下对加速度计进行性能测试, 测试结果显示该加速度计具有近似线性的性能, 且间距为 $30\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 的结构比另外两种具有更高的灵敏度, 均验证了该加速度计理论上的正确性。

6.2 论文中的不足和展望

本论文虽然完成了一整套加速度计设计制作测试流程, 但由于时间有限, 任务量大, 因此在一些方面仍有很大提升空间, 不足之处和后续工作如下:

(1) 由于流体本身的复杂性及其与电场、温度场耦合后复杂程度大大增加, 因此本文在理论部分进行了一些简化近似分析, 比如仿真部分只建立了简化的自然对流传热二维模型, 对密闭腔体内的温度场在加速力作用下的改变进行了分析, 整个器件结合电场的具体性能未能做出仿真计算; 对于影响流体动力学和流体传热学的相关因素和理论尚待进行深入全面的研究, 才能使得热对流式加速度传感器具有更加准确和更具说服力的理论支撑。

(2) 加工工艺过程中尚待解决的问题就是芯片级封装, 也就是密闭腔体的实现, 本文对于BCB键合胶只进行了初步研究, 具体的使用方法或者其他更好的封装方法仍需进行更深度的研究和探讨, 也对一些相关设备具有更高的要求。此外, 工艺过程中的一些小的问题或误差都可能导致最终器件性能受到比较大的影响, 因此在这方面有待进一步优化。

(3) 本文对于所设计的接口电路加热控制部分的实际测试有所欠缺, 需要在后期工作中设备条件满足的情况下进行全面测试分析。

(4) 加速度计的测试部分仅做了 $-5\sim 5\text{g}$ 加速度范围内的测试, 对更大加速度及传感器动态性能以及各方面纵向横向测试分析对比和实验验证有待深入研究。

(5) 本文所设计的热对流式的加速度传感器完全基于IC工艺, 在进行全面测试分析后, 若性能方面表现优异, 后期可考虑实现器件与接口电路的集成化。

致谢

不知不觉间，两年半的研究生时光已悄悄溜走，回首这短暂而难忘的一段科研学习经历让我感觉收获颇丰，不仅学到了丰富的专业知识，也学会了很多做人的道理。感谢杭电，给我提供优越的学习、生活条件，在未来的人生道路中不管身在何方，每当提起杭电，就一定会有一段美好而深刻的回忆涌上心头。在这段意义非凡的人生旅途中结识了许多良师益友，给我的生活和学习、科研等方面提供了很多帮助，在此想对所有我的老师和朋友们表达最真挚的感谢和最衷心的祝福。

首先我要感谢我的导师王高峰教授。王老师是我有生以来最敬佩的人之一，精彩的人生阅历、严谨的科研态度、和蔼的性格等都对我产生了很大影响，也是我未来人生道路上的榜样，在此谨向王老师致以最诚挚的感谢和最崇高的敬意。

感谢指导老师汶飞老师和师母李丽丽老师。初次见到汶老师和李老师就让我印象深刻，待我如同家人一般的热情和关心让远离家乡来杭州求学的我感觉到了家的温暖。本论文的研究工作也都是在汶老师的悉心指导下完成的，研究生阶段所取得的每一点成绩都离不开汶老师的指导和帮助。在此衷心地祝愿汶老师和李老师一家人能每一天都幸福美满。

感谢实验室的同门师兄弟。感谢李阜骄师兄对我研究生复试以及入学时的许多帮助，感谢朱彬彬师兄在课题中为我提供的一些经验和指导，感谢张霞、徐倩倩、乔鹏飞、刘华振、郑杰、王文哲等师兄师姐在生活和科研中对我的关心和帮助。感谢同窗兼好友苏翔、宣冬冬、孙荣荣、孟雨，不管在学习、科研还是生活上都对我有很多帮助，很幸运能一同走过这珍贵的两年半时光。感谢叶剑飞、钱高荣、陈国雄、黄勇、袁召霞、郑鹏荣、郑梦萍等师弟师妹们让实验室总是充满活力，这两年半中最难忘的就是在 105 实验室度过的时光。

最后，最应该感谢的是我的父母和家人，如果没有父母一直以来对我无条件的支持和毫无保留的爱，我不可能走到今天，祝愿我的父母家人能身体健康，每天都开心。

参考文献

- [1] Tseng S H, Lu M S C, Wu P C, et al. Implementation of a monolithic capacitive accelerometer in a wafer—level 0.18 μm CMOS MEMS process[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(5): 055010.
- [2] 高彦梅. 信息技术的发展及应用分析[J]. 速读旬刊, 2015(4).
- [3] 单光宝, 阮晓明, 姚军,等. 悬臂梁式硅微加速度计的研制[J]. 电子元件与材料, 2005, 24(5):17-20.
- [4] 张霞. 微机械加速度计的研究现状综述 [J]. 功能材料与器件学报, 2013(6):275-283.
- [5] 赵玉龙, 刘岩, 孙禄. 机械故障信息监测 MEMS 高频加速度传感器[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(6):875-882.
- [6] Barlian A A, Park W T, Jr J R M, et al. Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems[J]. Proceedings of the IEEE Institute of Electrical & Electronics Engineers, 2009, 97(3):513.
- [7] Khir MH, Qu P, Qu H. A low-cost CMOS-MEMS piezoresistive accelerometer with large proof mass[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2011, 11(8):7892-907.
- [8] Trolrier-Mckinstry S, Muralt P. Thin Film Piezoelectrics for MEMS[J]. Journal of Electroceramics, 2004, 12(1-2):7-17.
- [9] Hindrichsen C C, Almind N S, Brodersen S H, et al. Analytical Model of a PZT Thick-Film Triaxial Accelerometer for Optimum Design[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4):419-429.
- [10] Leung A M, Jones J, Czyzewska E, et al. Micromachined accelerometer based on convection heat transfer[C]// The Eleventh International Workshop on MICRO Electro Mechanical Systems, 1998. Mems 98. Proceedings. IEEE, 1998:627-630.
- [11] Leung A M, Jones J, Czyzewska E, et al. Micromachined accelerometer with no proof mass[J]. Electron Devices Meeting. iedm.technical Digest.international, 1997:899-902.
- [12] Mailly F, Martinez A, Giani A, et al. Design of a micromachined thermal accelerometer: thermal simulation and experimental results[J]. Microelectronics Journal, 2003, 34(4):275-280.
- [13] Goustouridis D, Kaltsas G, Nassiopoulou A G. A Silicon Thermal Accelerometer

- Without Solid Proof Mass Using Porous Silicon Thermal Isolation[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(7):983-989.
- [14] Silva C S, Pontes J, Viana J C, et al. A fully integrated three-axis thermal accelerometer[C]// Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE, 2013:963-966.
- [15] Mukherjee R, Guha P K, Mandal P. Sensitivity improvement using optimized heater design for dual axis thermal accelerometers[J]. Microsystem Technologies, 2015:1-11.
- [16] Luo X B, Yang Y J, Zheng F, et al. An optimized micromachined convective accelerometer with no proof mass[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2001, 11(5):504.
- [17] Luo X B, Li Z X, Guo Z Y, et al. Thermal optimization on micromachined convective accelerometer[J]. Heat & Mass Transfer, 2002, 38(7-8):705-712.
- [18] 吕树海, 杨拥军, 徐淑静,等. 新型三轴 MEMS 热对流加速度传感器的研究[J]. 微纳电子技术, 2008, 45(4):219-221.
- [19] 袁明权. 硅微机械加工技术[M]. 科学出版社, 1996.
- [20] Madni A M, Wan L A. Microelectromechanical systems (MEMS): an overview of current state-of-the-art[C]// Aerospace Conference. IEEE, 1998:421-427 vol.1.
- [21] Petersen K E. Silicon as a mechanical material[J]. Mrs Proceedings, 1986, 76(5):420-457.
- [22] 黄新龙. 若干微电子机械系统研制及相关 LIGA 工艺研究[D]. 中国科学技术大学, 2009.
- [23] 王冬生, 王春明, 胡桂珍. MEMS 技术概述 [J]. 机械设计与制造, 2006(4):106-108.
- [24] Manova D, Gerlach J W, Mändl S. Thin Film Deposition Using Energetic Ions[J]. Materials, 2010, 3(8):4109.
- [25] 付思齐. MEMS 工艺优化及其应用[D]. 长春理工大学, 2010.
- [26] M. Soković, J. Mikuła, L.A. Dobrzański, et al. Cutting properties of the Al₂O₃ + SiC (w), based tool ceramic reinforced with the PVD and CVD wear resistant coatings[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2005, s 164–165(20):924-929.
- [27] Howe R T. Surface micromachining for microsensors and microactuators[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B Microelectronics & Nanometer

- Structures, 1988, 6(6):1809-1813.
- [28] Xie D. SUBSTRATE AND SURFACE MICROMACHINED NICKEL STRUCTURES BY ELECTROLESS PLATING PROCESS[J]. Wit Transactions on the Built Environment, 1993, 145:427-434.
- [29] Wang Y Y, Guo ying W U, Hao Y L, et al. Study of Silicon-Based MEMS Technology and Its Standard Process[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(11):1577-1584.
- [30] Laermer F, Schilp A. Method of anisotropically etching silicon: US, US 5501893 A[P]. 1996.
- [31] Thien D X, Yoshifumi O. Design and analysis of a triple-axis thermal accelerometer[C]// International Conference on Sensing Technology. IEEE, 2014:295-300. Yang C R, Chen P Y, Yang C H, et al. Effects of various ion-typed surfactants on silicon anisotropic etching properties in KOH and TMAH solutions[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2005, 119(1):271-281.
- [32] Bejan A. Convection Heat Transfer, 3rd Edition[J]. 2004.
- [33] Chapmanwrited A. Heat Transfer.3rd ed[M]. Macmillan Publishing Co. Inc, 1974.
- [34] 罗小兵. 微惯性流体器件中的流动和传热及其工程应用[D]. 清华大学, 2002.
- [35] 杨拥军. 体硅微机械加工技术与新型微机械加速度传感器研究[D]. 东南大学, 2005.
- [36] Toenshoff D A. Thick film resistance thermometer: US, US 4146957 A[P]. 1979.
- [37] Hurko B, Dills R L. Method of manufacture for a resistance heater and temperature sensor: US, US4286377[P]. 1981.
- [38] Miyakawa N, Legner W, Ziemann T, et al. MEMS-based microthruster with integrated platinum thin film resistance temperature detector (RTD), heater meander and thermal insulation for operation up to 1,000°C[J]. Microsystem Technologies, 2012, 18(7-8):1077-1087.
- [39] Baxter R D, Freud P J. Thin film resistance thermometer with a predetermined temperature coefficient of resistance and its method of manufacture: US, US4469717[P]. 1984.
- [40] 宋姗姗, 郭雪岩. Boussinesq 近似与封闭腔体内自然对流的数值模拟[J]. 力学季刊, 2012, 33(1):60-67.
- [41] Paul O, Ruther P, Plattner L, et al. A thermal van der Pauw test structure[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2000, 13(2):159-166.

- [42] 杨士勇. 聚酰亚胺材料在微电子工业中的应用[J]. 微纳电子技术, 1998(2):51-54.
- [43] Mcgrath L M, Parnas R S, King S H, et al. Investigation of the thermal, mechanical, and fracture properties of alumina-epoxy composites[J]. Polymer, 2008, 49(4):999-1014.
- [44] Yao Y, Zeng X, Guo K, et al. The effect of interfacial state on the thermal conductivity of functionalized Al_2O_3 , filled glass fibers reinforced polymer composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2015, 69:49-55.
- [45] Ding X, Geng F, Luo L. Process development in metal/BCB multilayer interconnections of MMCM with embedded chip in Si substrate[J]. Microelectronic Engineering, 2009, 86(3):335-339.
- [46] 何洪涛. 一种基于 BCB 键合技术的新型 MEMS 圆片级封装工艺[J]. 微纳电子技术, 2010, 47(10):629-633.
- [47] Knudsen P D, Walsh D P. Process for forming polyimide-metal laminates: US, US 5322976 A[P]. 1994.
- [48] Lo Y L, Fan I C, Chiu C Y. Electroless nickel deposition on the hybrid polyimide[C]// Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference. IEEE, 2013:267-270.
- [49] Chen Y J, Hsu J H, Lin H N. Fabrication of metal nanowires by atomic force microscopy nanoscratching and lift-off process[J]. Nanotechnology, 2005, 16(8):1112-1115.
- [50] Hatakeyama H, Omori T, Hashimoto K, et al. Fabrication of SAW devices using SEM-based electron beam lithography and lift-off technique for lab use[C]// Ultrasonics Symposium. IEEE, 2004:1896-1900 Vol.3.
- [51] Cooper K A. Video-based alignment system for x-ray lithography[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1991, 1465:100-110.
- [52] 梁友生, 曹益平, 邢廷文. 光刻对准技术研究进展[J]. 电子工业专用设备, 2004, 33(10):30-34.
- [53] 崔永丽, 张仲华, 江利, 等. 聚酰亚胺的性能及应用[J]. 塑料科技, 2005(3):50-53.
- [54] Rousche P J, Pellinen D S, Pivin D P J, et al. Flexible polyimide-based intracortical electrode arrays with bioactive capability[J]. IEEE Trans Biomed

Eng, 2001, 48(3):361.

- [55] Salem J R, Sequeda F O, Duran J, et al. Solventless polyimide films by vapor deposition[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1986, 4(3):369-374.
- [56] Tenhaeff W E, Gleason K K. Initiated and Oxidative Chemical Vapor Deposition of Polymeric Thin Films: iCVD and oCVD[J]. Advanced Functional Materials, 2010, 18(7):979-992.

附录

作者在读期间发表的学术论文、专利及参加的科研项目

发表的学术论文与专利：

- [1] Fei Wen, **Xiaoyang Liu**, and Gaofeng Wang, “Low loss and high permittivity composites based on poly(vinylidene fluoride-chlorotrifluoroethylene) and lead lanthanum zirconate titanate”, *Ceramics International*.
- [2] 汶飞, **刘晓阳**, 李丽丽, 王高峰, 叶剑飞, 王路文, 吴薇, “一种基于热对流原理的微机械加速度传感器的设计及其制作方法”, 中国: ZL 201710435499.2[P] 2017.06.11发明专利, 已公开.
- [3] 汶飞, **刘晓阳**, 李丽丽, 王高峰, 叶剑飞, 王路文, 吴薇, “一种基于柔性材料的MEMS加速度传感器的设计及其制作方法”, 中国: ZL 201710435498.8[P] 2017.06.11发明专利, 已公开.
- [4] 叶剑飞, **刘晓阳***, “基于MEMS的热对流加速度计的现状和发展综述”, 传感器与微系统.

参加的科研项目：

1. 基于物联网的多尺度胎动监测与孕妇健康状态评价的关键核心技术研究. 国家自然科学基金国际[中-法]合作与交流项目, 批准号: 61411136003, 2015.01~2018.01.