



东南大学博士学位论文

表面加工多晶硅薄膜热导率的在线测试研究

国家“八六三”计划 MEMS 重大专项

“MEMS 设计加工与封装建模、模拟与 IP 库” (2003AA404010)

资助课题

研究生姓名: 许高斌

导师姓名: 黄庆安 教授

学科专业名称: 微电子学与固体电子学

中国 南京

东南大学 MEMS 教育部重点实验室

2004 年 10 月

摘要

多晶硅被广泛地应用于微电子机械系统(MEMS)和集成电路系统(ICS)中。许多微机械器件、IC电路和大功率晶体管的运行和可靠性,都依赖于多晶硅薄膜的热传导。薄膜热导率强烈依赖于多种参数,包括膜厚、膜及底材的温度、薄膜的沉积温度和方法等,制作薄膜的工艺流程、淀积方式以及薄膜的几何尺寸等,均会影响薄膜热导率的大小,其中所涉及的不确定性是很难准确估计的。

日前一些 MEMS 器件在实际制作时,产品的一致性往往无法保障。同样的工艺,在不同生产环境薄膜会表现出明显不同的热学参数,如热扩散系数、热导率、热容、电阻温度系数等,如果以上热学参数已知的话,则传感器、执行器部分的一些静态或瞬态热响应,就可以由已测得的热电参数估计出来。所以,在线监测薄膜结构的热学参数对于 MEMS 器件具有非常重要的意义。从在线监测本身的意义上来说,应有一个所谓的“测试单元”,其结构要能反映出热学性能的变化,在经历与 MEMS 器件同样的工艺后,获得与器件本身同样的热电性能;从而可以不需要测量 MEMS 器件本身,直接测“测试单元”即可。

迄今发展的稳态和瞬态法测试多晶硅薄膜热导率的方法,在测试条件方面,需要真空测试设备和其它专门的测量仪器。在建立热学模型时,需要忽略对流散热和向衬底传热散热的影响,有的测试方法在建立热学模型时还需要忽略辐射散热的影响。这些测试结构及其测试方法是不能用于表面加工多晶硅薄膜热导率的在线测试。在微执行器、微传感器等 MEMS 器件中,多晶硅薄膜电阻温度效应决定着能否有效分析这些器件的热电性能。对薄膜材料热学参数如热导率、热膨胀系数、热扩散系数等的测量中,电加热及热敏电阻测温法被广泛应用,但温度是不能直接测量的,因而如何根据多晶硅薄膜电阻温度效应来获取对应阻值的温度,就直接影响到对这些参数的提取。以往提取电阻温度系数的方法是把测试结构置放在硅油或真空环境中,通过在不同温度下测出对应的电阻值,通过线性拟合分析来确定电阻温度系数,显然这些测温方法也不适用于多晶硅薄膜热导率在线测试中对电阻温度系数的需求。

本文对多晶硅薄膜热导率在线测试结构进行了研究,设计了两种不同的热导率测试结构和测试方法,模型中综合考虑了对流散热、辐射散热,以及薄膜向衬底传热的影响。前一种测试结构是通过不同尺寸悬臂梁等效散热热路的相互抵消来解决其他未知参数如空气自然对流系数、辐射发射率、以及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等;后一种测试结构是通过间接测量的办法来得到这个未知的等效散热系数,两种方法都可以解决散热的边缘效应问题,都可以在自然环境下进行测试,从而实现多晶硅薄膜的热导率的在线测试和监控器件制造工艺。在热导率测试时,是利用直流加热和热敏电阻测温法,为此,本文设计分析了一种在线提取多晶硅电阻非线性温度系数的瞬态方法,通过分析多晶硅梁的静态电压—电流特性及其瞬态冷却特性,来提取得到多晶硅电阻的线性温度系数项和二次温度系数项。文中利用 Ansys 软件模拟验证了测试结构设计的合理性和模型建立的正确性,并在自然环境下,实验测得多晶硅电阻非线性温度系数和多晶硅薄膜的热导率。

本文对多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试进行了研究,提出了一种通过分析两个长度不同但宽度与厚度相同的双端固支架的瞬态冷却特性来提取热扩散系数的方法,模型中综合考虑了对流散热、辐射散热以及薄膜向衬底传热的影响。Ansys 软件模拟分析和实验表明,该方法简单可靠,能够实现表面加工多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试。

本文设计的测试结构可随表面微机械器件制作工艺加工制作,无需附加工艺。“测试单元”在经历与 MEMS 器件同样的工艺后,具有与表面微机械器件本身同样的热电性能。Ansys 软件模拟分析和实验表明,本文设计的测试结构及其测试方法能用于薄膜热学参数的在线测试,监控器件制造工艺,并能用于实际工艺线。

关键词:多晶硅薄膜,表面加工技术,电阻温度系数,热导率,热扩散系数,在线测试, MEMS

ABSTRACT

Polysilicon thin films are widely used in MEMS devices and ICs, which are important constituents of such micromechanical elements. The thermal parameters of the polysilicon thin films, such as thermal conductivity, thermal diffusivity, and temperature coefficient of resistance, depend strongly on the fabrication process, production environment, the concentration and type of dopant atoms and so on, which are dramatic difference from the bulk material since its heat-transfer mechanism differ substantially from those of bulk silicon. Static or dynamic thermoelectrical response of these MEMS devices can be estimated if the thermal parameters can be measured. Therefore, it is extremely important that on-line testing for the thermal parameters of the polysilicon thin films for these MEMS devices.

In practical applications, the thermoelectrical parameters of the MEMS devices can not be measure directly. To meet on-line monitoring, a so-called “accompanying element” fabricated with the MEMS devices must be placed on the same chip, that is the thermoelectrical characteristics of the “accompanying element” are same as the MEMS devices, and the thermoelectrical parameters of the MEMS devices can be obtained by testing the “accompanying element”. Therefore, a simple on-line monitoring structure element for measuring the thermoelectrical parameters has be designed, the measurement should be simple, and a detailed numerical analytic solution must be given.

Steady-state and transient state methods are also be used to measure the thermal parameters of polysilicon thin films. However, the previous methods are not suited for the characterization of the surface-micromachined polysilicon thin films since most measurements must be carried out in vacuum environment. The measurments and the analytic process are complicated, and require special micromachined structures or special test fixtures, which makes them difficult to use in routine wafer-level measurements.

We proposed, fabricated and tested novel characterization structures and measurement method for on-line testing the thermal conductivity of surface-micromachined polysilicon thin films in this paper. The features of the measurement structure are analyzed, the analytical model and measurement method are also given. The effects of all heat exchange by convection, radiation and the heat transfer through the air gap and into the substrate are considered in our electrothermal model, and all measurements can be carried out in free. The temperature coefficient of resistance must be known before extracting the thermal conductivity, and so the microbeams, arranged on the same on-line test chip, were designed, and using parameter fitting analysis of the experiment I - V curves of the beam and its transient state cooling characteristics, the linear temperature coefficient and the quadratic temperature coefficient can be obtained.

The thermal diffusivity of surface-micromachined polysilicon thin films is proposed also. Using two polysilicon microbeams, with same width and thickness but variant length, the thermal diffusivity can be extracted from the time dependence of the two thermal resistances cooling in free air.

All our measurements can be carried out in free air while vacuum testing circumstance are not required. The on-line test structures, fabricated with surface-micromached devices and no additional mask is required, are implemented as a MEMS test chip, called “M-Test”, and so it can meet the on-line monitoring for the MEMS devices design and its processing, so that it can be widely used in MEMS process testing and material property extraction.

Keywords: Polysilicon thin films, surface-micromachining process, thermal conductivity, temperature coefficient of resistance, thermal diffusivity, on-line testing, MEMS

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: 江高斌 日期: 2008.12.9

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: 江高斌 导师签名: 姜付 日期: 2008.12.9

第一章 绪论

1.1 MEMS 发展概况

近几十年来,微电子科学发展非常迅速。超大规模集成电路(VLSI),特大规模集成电路(ULSI)等相继问世,集成度几乎每年翻一番。随着集成度的提高,其加工尺寸越来越小,已进入亚微米级时期。微电子技术的进步促进了微机械技术的兴起和发展,微膜、微梁、微齿轮、微凸轮、微弹簧、微沟道、微喷嘴、微锥体、微轴承、微连杆等微型构件相继面世,微机械技术和微电子技术相结合,就形成了一代全新的微机电系统(Micro Electromechanical System, 简称 MEMS)^[1]。一般说来,微电子机械系统是微电子技术的拓宽和延伸,它将微电子技术和精密机械加工技术相互融合,实现了微电子与机械融为一体的系统。从广义上讲, MEMS 是指集微型传感器、微型执行器、信号处理和控制电路、接口电路、通信系统以及电源于一体的微机电系统^[2]。MEMS 技术是一种典型的多学科交叉的前沿性研究领域。微机电系统的目的在于通过微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新技术领域,形成批量化产业。它们可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务^[3]。

MEMS 技术起源于上个世纪五六十年代的硅半导体技术。六十年代半导体硅的工艺技术有了很大的发展,这段时间出现的用硅平面工艺技术制作的硅压力传感器,可以认为是最早的 MEMS 器件,其后也出现了利用硅的其他效应制作的各种传感器。七十、八十年代半导体技术朝着微电子集成方向迅猛发展,借助于微电子集成技术的发展, MEMS 有了很大的进步,各种传感器技术有了很大的发展,同时出现了集成传感器,这可以认为是真正的(带系统的) MEMS 器件。1987 年美国加州大学伯克利分校(UCBerkeley)研制成转子直径在 60~120 μm 的硅静电马达^[4],被认为是 MEMS 发展的又一个里程碑。与此同时也发展起一些与硅平面技术有很大差异的专门用于 MEMS 制作的立体(三维)加工技术,例如体硅腐蚀加工技术、牺牲层技术、高深宽比 RIE 技术、键合技术^[5]以及 LIGA^[6]技术等等。在利用光刻、CVD、外延等平面硅技术的基础上,再加上上述立体加工技术,基本上形成了一套较为完整的 MEMS 工艺技术体系。到了上世纪九十年代,已经出现了由多个子系统组成的相当复杂的 MEMS 器件,也就是说微机械已发展进入了系统级集成的水平。

MEMS 作为一门多学科交叉的新兴技术,它的出现与发展,可以说是半导体技术的又一次大飞跃,也是信息技术与制造技术的一次大变革,它的重要性不亚于晶体管与集成电路的发明与应用,必将深刻影响未来的科学技术、产业、经济,以及人们的日常生活。

MEMS 并不是传统机械电子系统的直接微型化,在制造工艺、工作原理和材料性质等方面远远超出传统机械电子的范围,它是微电子技术和许多别的学科的交叉,对它的研究与发展将会产生一系列新学科、新技术与新理论,这在科学上是有重要意义的。MEMS 技术涉及元器件及系统的设计、集成、制造、控制、测试、封装、连接等技术,以及电子学、物理学、化学、生物学、材料学、机械学、控制学等诸多学科,因此, MEMS 技术的发展必将大大带动这些学科与技术的发展。

作为一种面向新世纪的高新技术,它的应用将涉及航空航天、军事、生物医学工程、通信及家用电子等领域,在航空航天方面,可以制成微型高精度惯性测量系统、微小型卫星系统、全球卫星定位系统等等;在国防与军事方面,可以制成微型灵巧武器及用于侦察、干扰与通信的微型遥控装置与制导装置等等;在生物医学方面,有各种微型的可深入人体内部及器官中的探测及治疗器械、可随身携带的微型诊断与化验仪器、可对 DNA 进行分析与测定的生物芯片等等;在人们的日常生活方面,可以制造用数字微镜器件制作的高清晰度大屏幕彩色投影电视、高保真的微麦克风与音响系

统、可视电话等等^[7]。由于 MEMS 重要的应用前景,巨大的市场潜力。使得 MEMS 的研究在世界范围内受到高度的重视^[8], DARPA (Defence Advanced Research Projects Agency)、NEXUS (Network of Excellence in Multifunctional Microsystems)和日本的微机械中心等机构均对 MEMS 的研究提供了大量资助^[9]。据 In-sata 公司报道,世界 MEMS 市场在 2000 年~2005 年间将从 30 亿美元提升到 120 亿美元^[10],可以认为, MEMS 技术和微电子技术一样,将会给世界带来巨大的影响,甚至会引发一场产业革命。

目前, MEMS 作为 SOC (芯片系统)的重要分支,主要发展趋势是与 IC (集成电路)技术兼容,这样可以充分利用已经成熟、固定的微电子设计技术、工艺技术和测试技术。众所周知,微电子电路的在线监测技术对于保证产品的均匀一致性、重复性、可靠性等起了关键的作用,具体来说,是以相同设计指标的陪片或陪管随同芯片经历同样的工艺步骤,然后利用方便快捷的测试方法测出陪片或陪管的电学性能参数,如方块电阻等,以便在线监测工艺,并可及时调整工艺和采取补救措施。可以看出,在线监测工艺对于提高产品一致性、降低生产成本起着不可低估的作用^[11]。下面先简单介绍表面微机械加工技术,然后再进一步讨论表面加工器件参数的在线测试。

1.2 表面微机械加工技术

微型机械一般用硅、金属薄膜、高分子聚合物、陶瓷等材料制作。其制造工艺类似于半导体加工工艺,包括光刻、刻蚀、淀积、外延生长、扩散、离子注入、测试、监控及封装等。MEMS 制作技术常被称为之微米-纳米技术, MEMS 涉及的一般是由毫米到微米尺寸 ($10^1 \sim 10^{-3} \text{mm}$ 量级)的加工。MEMS 技术包括硅微加工技术, LIGA 技术,超精密加工技术和集成组装技术等方面。硅微机械加工技术起源于微电子制作技术(集成电路工艺技术),现在也是以微电子工艺技术作为其基础与主体,后来又发展出来硅微加工技术与表面微加工技术。

由于本论文设计的多晶硅薄膜热导率在线测试结构,是针对硅微机械表面加工技术制作的多晶硅薄膜,下面侧重介绍硅微机械表面加工技术。

表面微机械加工技术是硅微机械加工技术的一个重要组成部分,它是在硅衬底的表面上进行微加工制作,形成各种表面微结构^{[12][13][14][15][16][17]}。

1.2.1 表面微机械技术的特点

表面微机械技术是由硅的平面工艺发展而来的,两者虽有共同的地方,但差别也非常明显:

- 表面微机械技术制作的结构其纵向尺寸一般都在几微米,这比用平面工艺制作的微电子器件与电路的纵向尺寸要大几倍。但表面微机械结构的横向尺寸仍然比纵向尺寸要大很多倍,因此可以认为它是一个准平面(准二维)器件。
- 表面微机械结构一般是由多层薄膜组合而成,这些薄膜一般是多晶硅薄膜、氧化硅膜、氮化硅膜等介质膜以及铝、金等金属膜。
- 表面微机械加工一般都运用“牺牲层”技术来制作悬空的梁、膜或真空腔。
- 表面微机械结构的形成,一般不需要双面光刻对准工艺,这样既省去了昂贵的双面光刻设备,又简化了制作工艺过程。
- 表面微机械技术由于避免了纵向的体硅深加工,因此它与集成电路工艺有更好的兼容性,有利于结构型器件与控制电路和信号处理电路的集成。

1.2.2 牺牲层技术

牺牲层技术是制作表面微机械结构的关键与核心技术,所谓牺牲层技术就是利用不同材料在同一种腐蚀液(或腐蚀气)中腐蚀速率的巨大差异,选择性地腐蚀去掉结构层薄膜下面的一层材料(即

牺牲层材料), 从而形成空腔或各种需要的悬空结构。图 1.1 是牺牲层工艺制作过程示意图^[13]。

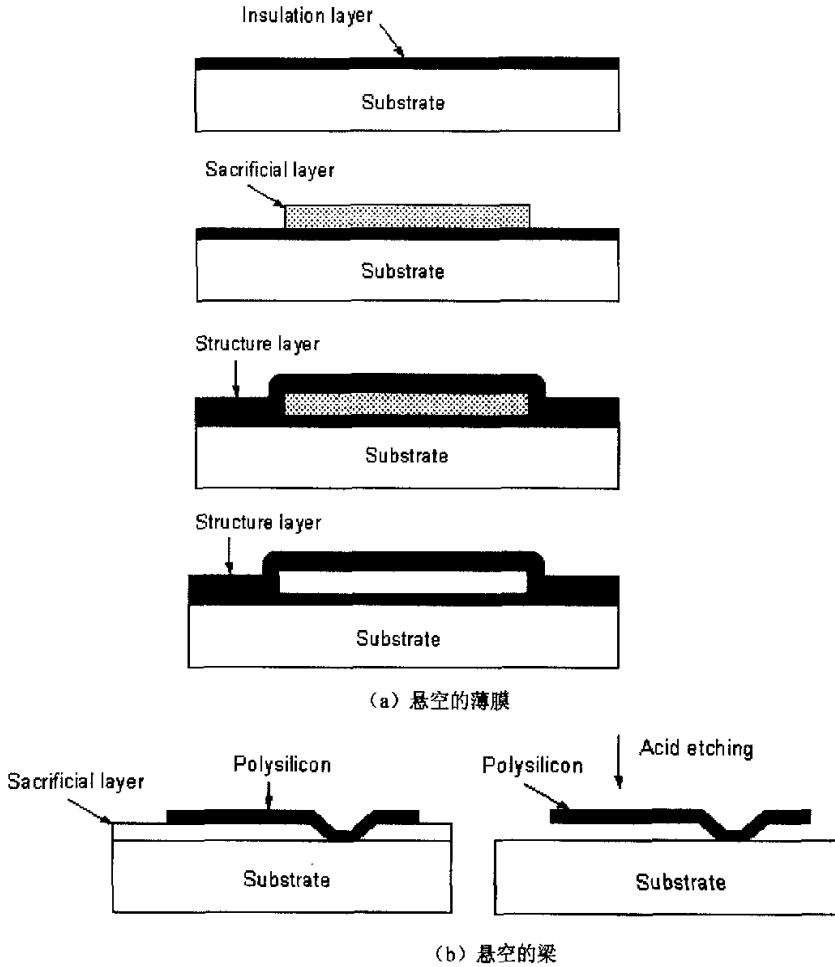


图 1.1 牺牲层技术

在单晶或绝缘层的硅衬底上生长或淀积一层牺牲层材料, 通过光刻将牺牲层材料加工成所需形状, 再淀积结构层薄膜, 并将结构层薄膜光刻成所需形状, 最后从结构层下面将牺牲层选择性地腐蚀掉 (这一步腐蚀牺牲层工艺一般称之为释放)。留下的结构层与衬底表面分开, 形成了表面距离等于牺牲层厚度的悬空的膜或梁结构。牺牲层技术的关键在于牺牲层材料及腐蚀液, 要使该腐蚀液对牺牲层腐蚀得很快而对牺牲层上、下方的结构膜材料腐蚀得很慢, 两者腐蚀速率之比越大, 结构膜层受影响就越小, 实现的结构就精确与理想。

1.2.3 薄膜应力控制技术

表面微机械结构主要是由各种薄膜组成的, 这些薄膜的性质尤其是薄膜的应力对表面微结构有着极大的影响。薄膜存在的应力往往是表面微机械结构制作失败的原因, 即便结构制作出来, 也还会因为存在的应力使微结构无法有效地动作和运转。因此薄膜应力的控制是表面微机械技术一个很重要的课题。

- 多晶硅薄膜的应力控制。多晶硅薄膜的应力大小与淀积温度有很大关系, 淀积温度越低应力越小, 若在略低于 600°C 淀积多晶硅, 能得到应力很低的薄膜。LPCVD 多晶硅薄膜一般具有压应力; 多晶硅薄膜淀积的速度对薄膜的应力影响不大, 但对膜表面颗粒度有影响; 磷掺杂对改善应力的均

匀性有好处,掺杂浓度越高,均匀性越好。但掺磷会使压应力有所增大,因此应适度;在高温下($>1000^{\circ}\text{C}$)退火,可以明显减小多晶硅膜的残余应力并改善应力的均匀性。而在 1000°C 以下退火效果不明显。

- 氮化硅膜的应力控制。常规 LPCVD Si_3N_4 膜一般张应力很大 ($\sim 10^9\text{Pa}$), 以及当膜厚 $>200\text{nm}$ 时很容易出现裂纹, 并且膜抗 HF 腐蚀性也比较差。

当氮化硅膜(Si_3N_4)中硅的含量较高,形成折射率大于 2.3 的富硅氮化硅膜(Si_xN_x),可使薄膜的应力降低一个数量级。富硅氮化硅可通过 LPCVD 淀积时改变反应气体流量比及反应室压力的方法制备。对氮化硅膜进行退火处理,不会明显减小膜的应力。

- 复合膜技术。将具有不同热膨胀性能的材料组成多层复合膜,可以大大降低整体薄膜的应力。例如用具有张应力的 LPCVD 氮化硅膜和具有压应力的多晶硅膜组成多层复合膜,并适当调整各层厚度,可得到应力很低的复合膜层。通常较多层数的复合膜比较少层数的复合膜在应力和性能方面要好些。

- 纹膜技术。膜在厚度与其它尺寸相比非常小的情况下,由于其结构的弯曲应力与薄膜应力(即中面应力)相比微乎其微,因此薄膜的初始应力就对膜的机械性能起到了决定性的作用。我们可以用一个有皱褶的梁结构来降低薄膜应力,以减小薄膜初始应力对结构机械灵敏度的影响,这就是纹膜技术产生的原因^[18]。

1.2.4 防粘连技术

粘连现象是导致表面微结构失效的主要原因之一。所谓粘连是指在腐蚀牺牲层释放表面微结构时应该悬空的梁、膜或者可动部件与牺牲层下面的衬底层发生牢固的直接接触,从而影响了微结构的正常工作与功能。

由于表面微结构纵向尺寸小(不超过几微米)、横向尺寸大(几百微米甚至毫米),使垂直方向刚性较小,再加上结构与衬底间距很小($1\sim 2\mu\text{m}$),因此很容易发生粘连。粘连现象大多数发生在腐蚀牺牲层释放结构的时候,也有很小部分已释放成功的微结构在潮湿的环境中再次发生粘连。

粘连现象产生的原因是微结构表面之间的吸引力不能被材料的刚性恢复力所平衡。当两个固体表面接近产生吸引作用的力有液体表面张力、静电力、范德瓦尔斯力以及重力等。在表面微结构中引起粘连的最主要的力是表面张力,其次是静电力。因此要防止粘连首先要克服表面张力的作用同时要防止静电力。

防止粘连的主要途径是设计制作一些防粘连的特殊结构、改进释放方法以及对释放后的微结构进行表面处理等。

- 防粘连侧墙的特殊结构。防粘连特殊结构一般做在被释放部件上,由于它的存在使粘连的可能性减小,例如支撑点结构就能起到这种作用。所谓支撑点就是在淀积结构层多晶硅之前,在牺牲层上腐蚀出一些坑,这样在多晶硅层上形成一个个小突起即支撑点。在释放时若微结构与衬底发生接触时,这些支撑点大大减少了接触面积,从而减小了粘连力,有效地防止了粘连的发生。此外,还可以用侧墙等特殊结构来防止粘连。由于这些特殊的结构都经过仔细设计,而且它们都较小,因此虽然附在被释放部件上,但它们并不影响这些部件的动作与功能。

- 改进的释放方法。以下几种改进的释放方法可以有效的防止释放时的粘连:

降低清洗液的表面张力。通过选择低表面张力的清洗液以调整接触角来达到降低粘连的目的。

防止释放后干燥过程中出现液体-气体相变,以消除表面张力。一种方法是二氧化碳超临界干燥法,将清洗液在超临界状态下转变成气体。另一种方法是冷冻升华干燥法,先将清洗液与芯片一起冷冻,再置于真空容器中升华,完成干燥过程。

高聚物支撑。用有机溶剂置换清洗液,然后将芯片浸入光刻胶丙酮混合液中,光刻胶固化后用氧气等离子体除去光刻胶得到释放结构。

干法腐蚀牺牲层。不用氢氟酸溶液,而用 HF 气体来腐蚀牺牲层,避免产生表面张力。缺点在于腐蚀速率很慢,而且需要特殊的腐蚀设备与原料。

- 表面防粘连处理。可通过下述方法进行表面防粘连处理：

表面粗糙化。将接触面粗糙化，使实际的接触面在粗糙化表面的尖端，从而减小接触面积。例如用等离子体刻蚀轰击使表面粗糙化。

表面厌水处理。用 NH_4F 溶液处理，获得完全由羟基覆盖的厌水性表面。同时利用 NH_4F 腐蚀（100）面速度快于（111）面的性质，在（100）面上形成许多金字塔形凸起，实现表面粗糙化。

表面覆盖层。防止粘连最有效的方法是淀积表面能厌水的覆盖层。最近的研究包括有机薄膜、等离子聚合物形成的碳氮化合物薄膜和类金刚石碳膜等。

1.2.5 典型表面加工工艺流程

典型的表面加工工艺流程如图 1.2 所示^[14]：

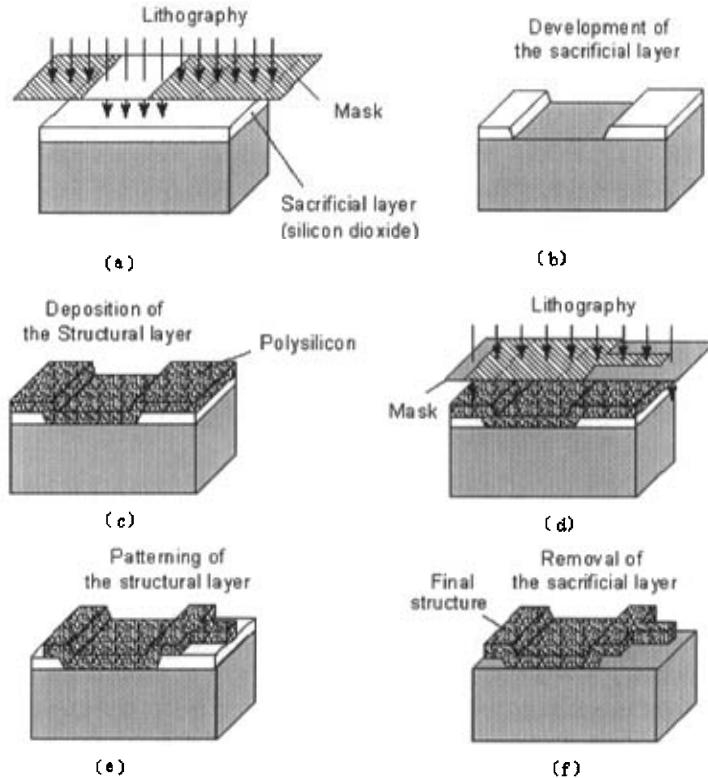


图 1.2 典型表面加工工艺流程

1.3 表面加工多晶硅薄膜参数测试的重要性

作为 MEMS 器件的构件，及时了解掌握 MEMS 领域内薄膜材料的热电参数是极其重要的。而对薄膜制造工艺、显微组织与各种性能参数之间关系的深入理解是预测、改善和充分发挥薄膜材料的包括热学特性在内的各类性能、优化 MEMS 器件设计、扩大选材范围和提高 MEMS 器件寿命与可靠性的关键，所以在 MEMS 领域，薄膜热学性能的研究和测试正在成为一个新的研究热点，引起了微电子学、传热学、物理、材料等领域研究者的兴趣。尽管人们对薄膜的热电行为和测试技术已经进行了大量而广泛的研究工作，对薄膜与大块材料在热学性能之间的差异已经有了一定程度的了解，但这些研究工作目前还只是刚刚开始，众多不清楚的问题有待于更加深入的研究。随着 MEMS 技术的迅速发展和各种新型薄膜材料的不断涌现，必将对薄膜材料的性能与测试技术提出更高的要

求。

目前一些 MEMS 器件在实际制作时,产品的一致性目前无法保障。同样的工艺,在不同生产环境表现出明显不同的热学参数,如热扩散系数、热导率、热容、电阻温度系数等,对于热传导部分,如果以上热学参数已知的话,则传感器、执行器部分的一些静态或瞬态热电响应,就可以由已测得的热电参数估计出来。所以,在线监测薄膜结构的热学参数对于 MEMS 器件具有非常重要的意义。而用非在线监测的测试手段获得的微机械材料的热学特性存在很多问题:数据是在各自不同的工艺条件、试样尺寸和测试仪器下获得的,缺乏通用性和权威性;另外已获得的数据从品种、项目上都很不完全,远远不能满足应用需要;而最主要的就是随着 MEMS 技术的发展,新材料、新工艺层出不穷,非在线监测的测试方法缺乏一种快速响应机制来收集、确认新数据。

从在线监测本身的意义来说,应有一个所谓的“测试单元”,其结构要能反映出热学性能的变化,在经历与 MEMS 器件同样的工艺后,获得与器件本身同样的热电性能;不需要测量 MEMS 器件本身,直接测“测试单元”即可^[19]。从以上所说在线监测的形式上看,如何设计监测单元的结构,使它一方面便于测量,另一方面结构简单,存在较详细的数值解析解。这样可以保证测试方便快捷,测试结果精确。

尤其重要的是,构成这类 MEMS 器件核心部分的梁(或桥)的热电学参数与工艺条件密切相关。薄膜热电参数强烈依赖于几种参数,包括膜厚、膜及底材的温度、薄膜的沉积温度和方法等。薄膜淀积时,往往会形成各种各样的缺陷,相对不同的淀积方法,缺陷的密度和微结构不一样。这些在不同测量和膜沉积方法下得到的测量结果彼此相差很大。因此,采用合适的测试方法及测试结构不仅可以检测出所需的物理参数供设计者使用,同时测试结构还可用来监控工艺。对于在线监测的要求,必须在测试环境下简单可行,重复性好,测试结构设计简单,便于数据获得和整理。

1.4 本论文的主要工作

本论文主要研究表面加工多晶硅薄膜热导率在线测试结构,以实现多晶硅薄膜热学参数在线测试和器件制造工艺监控。

第二章详细概述了目前国内外测试薄膜热导率的各种测试结构和测试方法。目前的导体薄膜或非导体薄膜热导率测试结构及其测试方法大都是需要真空测试条件,需要专门的测试装置,在测试和建立热学模型时不需考虑对流散热和向衬底传热散热的影响,有的测试方法在建立热学模型还需要忽略辐射散热的影响。在测试结构的制造工艺方面,目前的各种薄膜热导率测试结构基本上使用 CMOS 工艺或 CMOS MEMS 制造技术需要后处理硅腐蚀,且是多层复合膜结构。

第三章设计分析了两种不同的表面加工多晶硅薄膜热导率在线测试结构。前一种测试结构是通过不同尺寸悬臂梁等效散热热路的相互抵消来解决其他未知参数如空气自然对流系数、辐射发射率、以及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等;后一种测试结构是通过间接测量的办法来得到这个未知的等效散热系数,两种方法都可以解决散热的边缘效应问题,都可以在自然环境下进行测试。本章还通过 ANSYSTM 模拟验证了结构设计的合理性和模型建立的正确性。模拟分析表明本文设计的测试结构和测试方法能实现表面加工多晶硅薄膜热导率的在线测试。

第四章给出了在线提取多晶硅电阻非线性温度系数的拟合分析方法,并对多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试进行了分析研究。文中提出了一种通过分析两个长度不同但宽度与厚度相同的双端固支梁的瞬态冷却特性来提取热扩散系数的方法。模型中综合考虑了对流、辐射和向衬底传热的影响,测试简单可靠,能实现表面加工多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试。

第五章是测试结构实验与结果,在自然环境下实验测得了多晶硅薄膜热导率、热扩散系数和多晶硅电阻非线性温度系数。第六章是误差分析,简单分析了辐射散热线性化处理的模型误差和工艺造成的结构误差对热导率测试的影响。

第七章是对全文的总结,指出了本文的不足之处,并对今后的研究工作提出了一些建议和展望。

第二章 薄膜热导率测试技术

现在,人们普遍认为,随着尺度越来越小,器件中的热学特性将严重偏离传统传热学理论所描述的规律,即微尺度区域内的热流行为体现出强烈的尺寸效应,而那些广泛应用于连续介质体系中的物理量,如热导率、比热容、热扩散率等,在微尺度水平上均需重新认识和定义^[1]。

目前,薄膜材料已广泛应用于信息、微电子、航天技术等高科技领域。薄膜尤其是超薄薄膜在微机械和微电子器件中占有重要的地位。在设计、制造 MEMS 器件如微机械传感器和微执行器等器件时,薄膜是很重要的构件。这些器件大多利用薄膜材料的电热特性,因而薄膜材料热导率对这些器件的性能有很大的影响,有些器件如在 CMOS 技术中的红外传感器^[2],其性能就直接依赖于多晶硅薄膜的热导率;当传感器应用在极度温度条件下时,还需要知道薄膜材料在较大温度范围内热导率的精确值,因此,准确的对微/纳米薄膜传热进行定量分析对器件的研究和发展具有重要的意义。

迄今所测得的薄膜热导率值差别很大,大量的报导证实薄膜材料的热物性和其体材料相比有很大的差别,不少理论和实验研究都说明薄膜材料的热导率比其体材值要小 1 个数量级^{[3][4][5]},这是因为薄膜的一些独特性质,其传热机制与体材的传热机制有很大的不同。Majumdar (1993) 发展了一个基于 Boltzmann 理论的声音辐射输运方程,以分析单个薄膜中的导热。其研究表明,在微尺度区域内,晶格振动或声子的热传导表现为辐射传热的形式。制作薄膜的工艺流程、淀积方式、膜-底材温度以及薄膜的几何尺寸等,均会影响薄膜热导率的大小,其中所涉及的不确定性是很难准确估计的。

目前,对薄膜导热性能测试方法的研究非常活跃,并有大量报导,其中包括:以 SiO_2 为代表的氧化物薄膜^[6]、以 SiN_x 为代表的氮化物薄膜^[7]、金刚石薄膜^[8]、单晶硅/多晶硅薄膜^{[9][10]}、聚合物薄膜^[11]、超晶格薄膜^[12]、金属及陶瓷薄膜^[13]等。为了发展性能更好、可靠性更高的微电子器件,科研工作者做了大量的工作力争发展新的工艺过程和使用新型的材料。在此过程中的热物性测试技术必然要成为技术的关键和有利的工具。目前,已发展了多种薄膜热导率测试技术:稳态法^{[14][15]}、3 ω 方法^{[16][17]}、瞬态反射测量法^{[18][19]}、扫描热显微镜技术、光热偏转法、红外成像技术及全息干涉法等^[20]。在测量中获得热流的方式有两种:激光加热^[21]和电加热^[22]。温度测量可通过热电偶、热敏电阻或光反射等方法来获得。

本章根据测量方向不同,把薄膜热导率测量技术按纵向薄膜热导率和横向薄膜热导率进行分类。下面以电加热获得热流为重点,分别介绍以 SiO_2 薄膜为代表的绝缘薄膜和以多晶硅薄膜为代表的导体薄膜热导率的测试技术,在横向薄膜热导率测量中,重点介绍稳态测试方法。在每一类测试技术中按典型测试结构、测量方法、制作工艺以及热导率模型等方面进行系统的阐述。

2.1 薄膜纵向热导率测试技术

SiO_2 和 SiN_x 薄膜作为优良的绝缘材料,被广泛的应用于半导体器件中的表面钝化、氧化和扩散保护, DRAM, 半导体场效应晶体管(MISFET)的门绝缘层, 光学覆盖膜及红外探测器等器件中。另外, SiN_x 薄膜具有良好的硬度和弹性,还被用于微电子器件和微机械传感器中作为支撑结构、运动部件。随着器件向集成化、小型化方向发展,这些薄膜的热物性显得越来越重要,其传热特性决定着微电子器件工作的稳定性和可靠性,因此研究 SiO_2 和 SiN_x 绝缘薄膜的热学特性对发展多种微电子器件具有重要的意义。薄膜热导率和其体材料热学特性如热导率等存在较大的差异,资料表明 SiO_2 薄膜的热导率只是其体样品材料的 $1/3$ ^[23],目前,用于 SiO_2 和 SiN_x 薄膜热导率测量技术已发展成包

括稳态法、 3ω 方法、瞬态反射法及扫描热显微技术在内的多种方法。

在薄膜纵向热导率测试方法中，我们重点介绍对 SiO_2 薄膜热导率测量的几种方法。由于 SiO_2 薄膜是绝缘薄膜，相应的，对其它绝缘薄膜热导率的测量都可以参照这些方法。

2.1.1 稳态薄膜纵向热导率测试方法

稳态法测试技术是在试样达到热稳定后，通过测量流过试样的热量、温度梯度等来确定试样材料的热导率，常利用一维傅里叶传热方程求解热导率的稳态方法。这种测量薄膜热导率方法，要求薄膜厚度在微米量级。

最常见的稳态法测试结构如图 2.1(a)、(b)所示^[24]。图 2.1(c)、(d)是用于集成电路中 SiO_2 薄膜热导率测试结构及其热流模型示意图^[25]。其测试原理是，当有一加热电流 I_T 通过上电极板时，上电极板产生的热量通过介质层到达下电极板和硅衬底。由于热流的作用，在上、下电极板之间产生温度差，温度变化时电极电阻也会发生相应变化，电极电阻通过四探针法来测量，温度和电阻间的相互关系采用了下面的假选，即：① 忽略自加热；② 在预定的不同温度条件下测量电阻值，这样便很容易得到温度和电阻间的相互关系。假定热传递过程是一维的，则介质层的热阻是：

$$R_H = \frac{(T_T - T_B)}{I_T U_T} \quad (2-1)$$

式中： T_T 、 T_B 分别是上下电极板上的温度， I_T 是加热电流， U_T 是引线和上电极板间的电压降。

因此，介质层的热导率可以通过下式来计算：

$$k_{\text{medi}} = \frac{D I_T U_T}{L W (T_T - T_B)} \quad (2-2)$$

式中： D 是介质层的厚度； L 是电极引线间的距离； W 是电极的宽度。

为了增加热导率测量的精度，各层的厚度参数需要是通过 SEM（扫描电镜）来测量。这种测试结构的测量装置比较复杂，需要专门的测量装置：包含测试结构的 IC 芯片被放置在 DIP（双列直插式组件）中，同时需要附加的连接导线、温度传感器、热卡盘、铜基座、热隔离罩等。

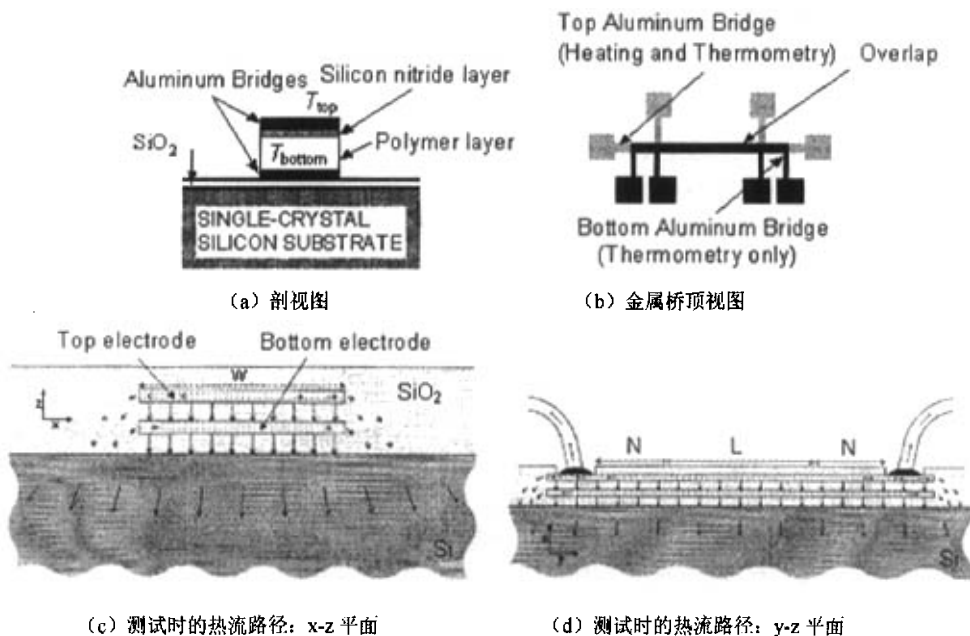


图 2.1 SiO_2 薄膜纵向热导率典型稳态测试结构示意图

在实际测量中, 由于上电极板上产生的热量并不是完全由上电极板通过介质层到达下电极板的, 这是因为在电极的末端和边缘存在寄生的热路, 而且热量也可以扩散到硅衬底。因此这种测试结构的测量误差较大。为了尽量减小误差, 可以通过增加电极板宽度的方法, 当电极板的宽度是 $20\mu\text{m}$ 时, 误差减小到 22%; 当电极板的宽度是 $100\mu\text{m}$ 时, 误差减小到 4.3%; 当电极板的宽度是 $400\mu\text{m}$ 时, 误差减小到 1.0%。

• Brotzen F.R. 等人在 1992 年提出了另一种稳态 SiO_2 薄膜纵向热导率的测试结构^[26], 如图 2.2 所示。该测试方法主要特点是考虑了:

- (1) 金属电阻随温度的变化;
- (2) 衬底随温度的变化;
- (3) 界面热阻对薄膜热导率的影响;
- (4) 在分析衬底温度分布时, 使用了二维传热模型。

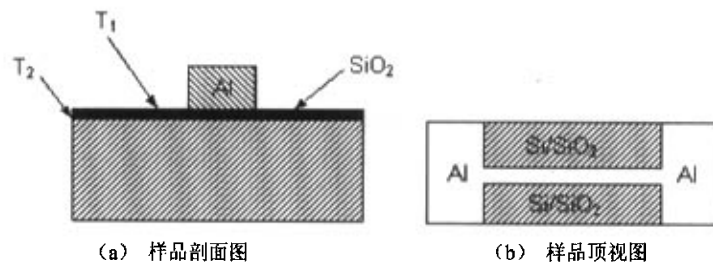


图 2.2 测试样品图形

其热导率模型是^[26]:

$$k_o = \frac{Q}{pT_1 - S} \frac{\rho_0 \xi d}{4w^2 h} \quad (2-3)$$

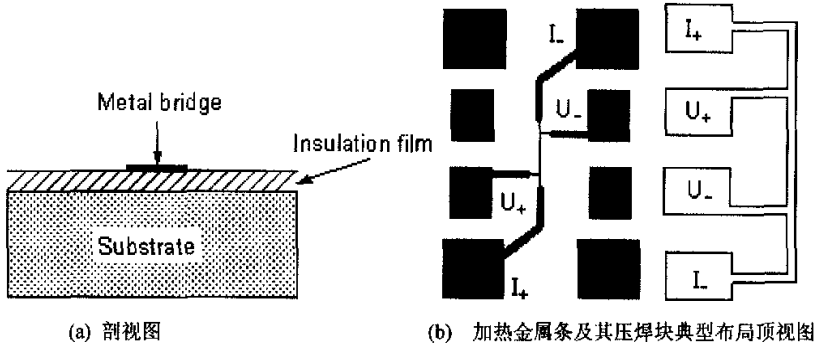
式中: Q 是电生成热, $\xi = 5.028 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 是电阻温度系数, ρ_0 是加热条的初始电阻率, d 是 SiO_2 薄膜的厚度, w 是加热条的宽度, h 是加热条的厚度。

本节给出了三种典型薄膜纵向热导率测试结构, 这些测试方法及其热学模型, 也可以推广到对其它绝缘薄膜纵向热导率的测量。

2.1.2 3ω 薄膜热导率测试方法

1989 年 Cahill D.G. 提出一种交流薄膜热导率测量方法, 即 3ω 方法^[27]。该方法最早用于测量各向同性低热导率绝缘体材料的热导率测量, 后来这种方法被成功的应用于淀积在良热导率衬底上的薄膜的测量^[28]。 3ω 方法也是测量 SiO_2 薄膜纵向热导率的方法之一, 其优点是不但能有效降低黑体辐射引起的误差, 而且测量时间短, 适用温度范围宽, 可在室温或更高的温度下进行测量。大连理工大学张立伟等人用该方法实现了对 SiO_2 薄膜热导率的测量^[29]。

3ω 方法的测试结构如图 2.3 所示。其测试结构特点是: 在良热导体衬底(如 Si)上生长一层厚度为 d 的绝缘待测薄膜(如 SiO_2 薄膜), 薄膜上面制成如图 2.3 所示形状的金属桥, 其宽度为 b 且满足 $b \gg d$, 长度为 l 。金属桥同时作加热源和测温装置。


 图 2.3 3ω 方法测试结构图

在 I_+ 、 I_- 两电极上通一频率为 ω 正弦交流电 $I = I_0 \cos \omega t$ 时，会产生频率为 2ω 的热量，导致样品温度上升。由于金属条的电阻值随温度变化而变化，所以在量热器两端 (V_+ , V_-) 产生一个包括 ω 和 3ω 成分的电压降，可用锁相放大器将 3ω 电压降提取出来，得到量热器上的平均温度变化：

$$\Delta T = \frac{4V_{3\omega}}{aV} \quad (2-4)$$

式中： $a = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ 是金属条的电阻温度系数， R 是金属条的平均电阻， V 加热条两端总电压的有效值， $V_{3\omega}$ 为测得的 3ω 电压的有效值。

在图 2.3 的 3ω 测试方法中，当薄膜厚度 d 远小于加热金属条的宽度 b 时，热流在其垂直方向上可视为一维热传导。硅衬底与薄膜接触面上的温度变化 ΔT_s 可由下式计算出^[30]：

$$\Delta T_s = \frac{P}{l\pi K_s} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{k_s}{c_s \left(\frac{b}{2}\right)^2} + \eta - \frac{1}{2} \ln(2\omega) \right] \quad (2-5)$$

式中 k_s 、 c_s 分别为硅衬底材料热导率和热容； P 为加热器功率； η 是与材料有关的常数，对于 Si 片为 1.05。

由于 SiO_2 薄膜热导率远小于硅衬底的热导率，可视为简单的热阻，其上传输的热流仅向硅衬底热响应 ΔT_s 增加一个与频率无关的温升 ΔT_f ^[30]：

$$\Delta T_f = \frac{Pd}{Klb} \quad (2-6)$$

由式 (2-4)、(2-5) 和 (2-6) 即可得出 SiO_2 薄膜的纵向热导率 K 。

作为交流测量技术的 3ω 方法是测量纵向热导率有效的方法之一，当被测膜厚小于 $10\mu\text{m}$ 时， 3ω 方法测量膜厚是很有用的方法；即使厚度为 $100\text{\AA}$ 数量级薄膜的热导率也能用这种方法来测量。

值得提出的是，该方法中要求待测绝缘薄膜的热导率远远小于硅衬底的热导率。

2.1.3 薄膜热导率瞬态发射测量法

在薄膜纵向热导率测试方法中，还有一种利用 ND:YAG 激光脉冲垂直加热的瞬态反射测量法^[31]。

图 2.4 是薄膜纵向热导率的瞬态热反射测量法, 图 2.4 (a) 是测试结构, 图 2.4 (b) 表示瞬态表面温度随时间变化曲线。

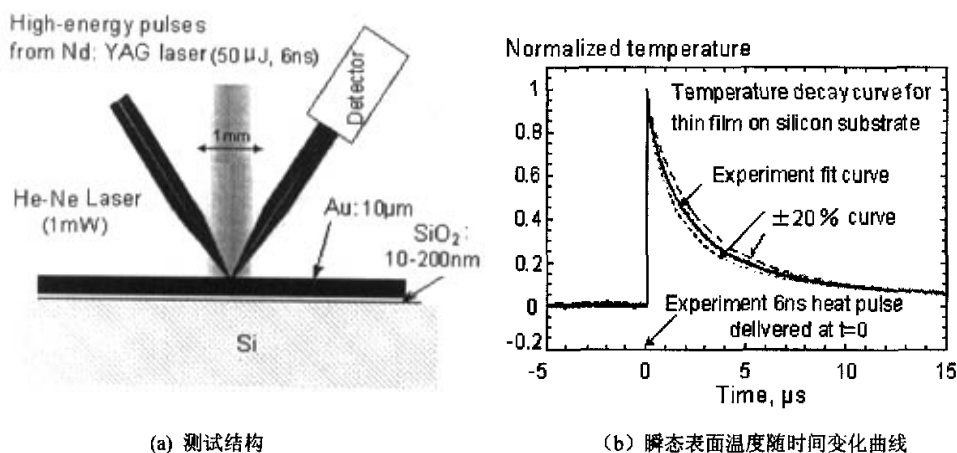


图 2.4 薄膜纵向热导率的瞬态热反射测试方法

测量时, 将待测薄膜置于一层具有高热导率的厚膜 (通常采用金或铝) 及基底之间。用 $\tau = 6\text{ns}$ 、 $E = 50\text{mJ}$ 的激光脉冲在金属表面产生一个瞬态垂直热流, 表面时间衰减由光反射率来确定。温度随时间的演化通过对一维热传导进行积分来获得, 从而可表示为一个简单的类似于低通滤波器的关系:

$$T(t) = T_0 + \Delta T \cdot \exp(-tG/hC) \quad (2-7)$$

式中: T_0 为样品被加热前的温度, ΔT 为样品被加热后的温升, $G (= 1/R)$ 为单位面积上的热导, h

为金属层的厚度, C 为金属层的体比热容。由温度衰减周期可以得到温度的衰减时间常数 (hC/G),

从而可以求出单位面积的热导 G , 便可得 SiO_2 层的热导率。

该测试方法克服了由于导线散热造成的误差, 不必准确测出温度值, 只需测出温度相对时间的变化即衰减周期, 发射率与温度之间的关系无需校正。

2.2 薄膜横向热导率测试技术

多晶硅薄膜被广泛的应用于微机械系统(MEMS)和集成电路系统(ICS)中。许多微装置(比如: 微尺度量热器、压力传感器、气体流量计、阀门热执行器等)、IC 电路和大功率晶体管的执行和可靠性, 都依赖于多晶硅薄膜的热传导。要设计并制作出高效器件必须考虑多晶硅层的热导率。

材料表明多晶硅薄膜的热导率只有其体材料热导率的 20%^[32]。因而体材料的热导率是不能直接用来表征薄膜材料的热导率, 同时体材料热导率的测试方法也往往不适用于对薄膜材料热导率的测量。在对多晶硅薄膜热导率的测量研究过程中, 先后出现了许多有效的测试方法: 悬臂梁结构稳态测试法^[33], 双端固支梁结构稳态测试法^[34], 微桥式结构稳态测试法^[35], 膜式结构稳态测试法^[36], 非接触光学测试方法^[37], 以及其它测试结构和测试方法等。单晶硅薄膜的热导率也早已经被广泛的研究^[38]。

在薄膜横向热导率测量中, 我们重点介绍具有代表性的导体薄膜—多晶硅薄膜热导率的测量。并从结构特点、工艺、测试方法、模型等方面进行系统的介绍, 由此得出了本课题研究的意义和目标。

2.2.1 悬臂梁薄膜热导率测试结构

典型的悬臂梁多晶硅薄膜热导率测试结构如图 2.5 所示^{[39][40]}。在图 2.5 (a)和(b)的测试结构中, 是使用单热敏电阻来测量温度的; 在图 2.5 (c)和(d)的测试结构中, 是使用多热阻来测量温度的。这种多晶硅薄膜热导率测试结构是利用 CMOS 工艺制作的, 需要后处理微机械体硅腐蚀形成测试结构, 该方法属稳态电阻加热法。

本节重点介绍图 2.5 (a)、(b) 中结构的测试基本原理及热导率模型。

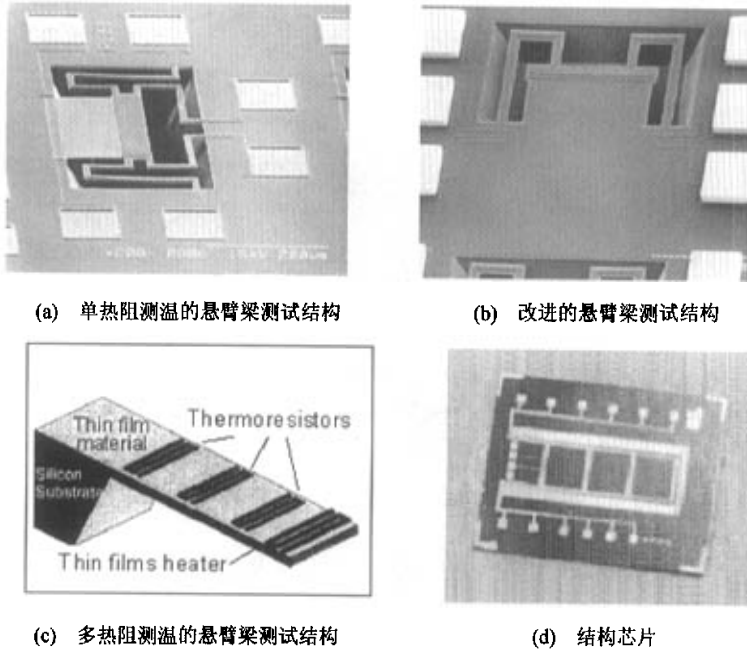


图 2.5 CMOS MEMS 工艺悬臂梁测试结构的几种典型结构

图 2.5 (a)中的测试结构具有以下特点: 铝金属层覆盖了整个加热器、测量条及多晶硅薄膜的边缘, 增加了热量流向多晶硅薄膜, 减少了加热条上的辐射散热量; 钝化层是防止金属层和加热条及测量条之间的短路; 多晶硅薄膜位于未腐蚀的场氧区域, 被 CVD 氧化物及钝化层覆盖; 未腐蚀的梁具有很好的热绝缘性能; 为了减小热传导散热, 加热器、测量条的导线做成很长的 U 形结构, 这样金属连接的热传导和多晶硅薄膜的热传导相比是很小的。这种设计结构使得热传导率可以通过一个简单的数学模型来计算; 由于测量是在真空环境中, 对流换热可以忽略不计; 在该测试方法中, 对辐射散热进行了线性处理。

图 2.6 是测试结构的剖视图、侧视图及其热平衡流量图。在测试结构中, 有热平衡公式:

$$N = G_r(T_1 - T_0) + G_c(T_1 - T_0) + G_b(T_1 - T_0) \quad (2-8)$$

式中: T_1 表示结构顶端铝覆盖层的温度, G_r 表示顶端的辐射散热, G_c 表示加热条及其引线的散热, G_b 包括了梁的辐射与对流散热。

在测试时, 需要建立如下条件 $(T_1 - T_0)/T_0 \ll 1$, 从而可以对辐射散热进行线性化处理, 即辐射散热项可以表示为 $G_r(T_1 - T_0)$ 。

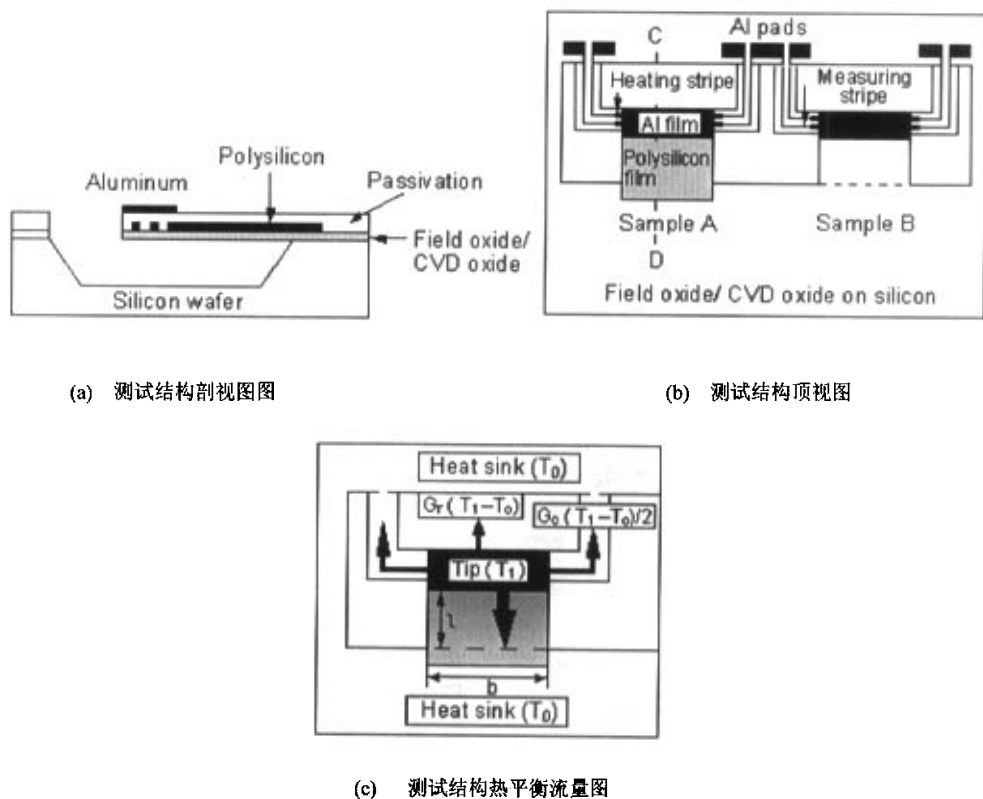


图 2.6 测试结构示意图及其热平衡流量图

在这种测试结构中，多晶硅薄膜热导率的模型是：

$$k_p = \left[\frac{N_A}{(T_{1A} - T_0)} - \frac{N_B}{(T_{1B} - T_0)} \right] \cdot \frac{l}{bd_p} \quad (2-9)$$

式中： N_A 、 N_B 分别表示样品 A、样品 B 的加热功率， T_{1A} 、 T_{1B} 分别表示样品 A、样品 B 中测量条的温度， T_0 是环境温度， l 、 b 、 d_p 分别表示悬臂梁中多晶硅薄膜的有效长度、宽度与厚度。

该测试结构是 Volkein F. 与 Balts H. 于 1996 年首次利用标准 IC 工艺制作的，并成功实现了对多晶硅薄膜热导率的测量^[41]。测量得到多晶硅薄膜热导率在 300K 时是 $29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.2.2 双端固支梁薄膜热导率测试结构

图 2.7(a) 是典型固支梁多晶硅薄膜热导率测试结构^[42]，该测试结构使用热敏电阻来测量薄膜温度；图 2.7 (c)、(d) 是典型固支梁 SiC 薄膜热导率测试结构^[43]，该测试结构使用热电偶来测量薄膜温度。

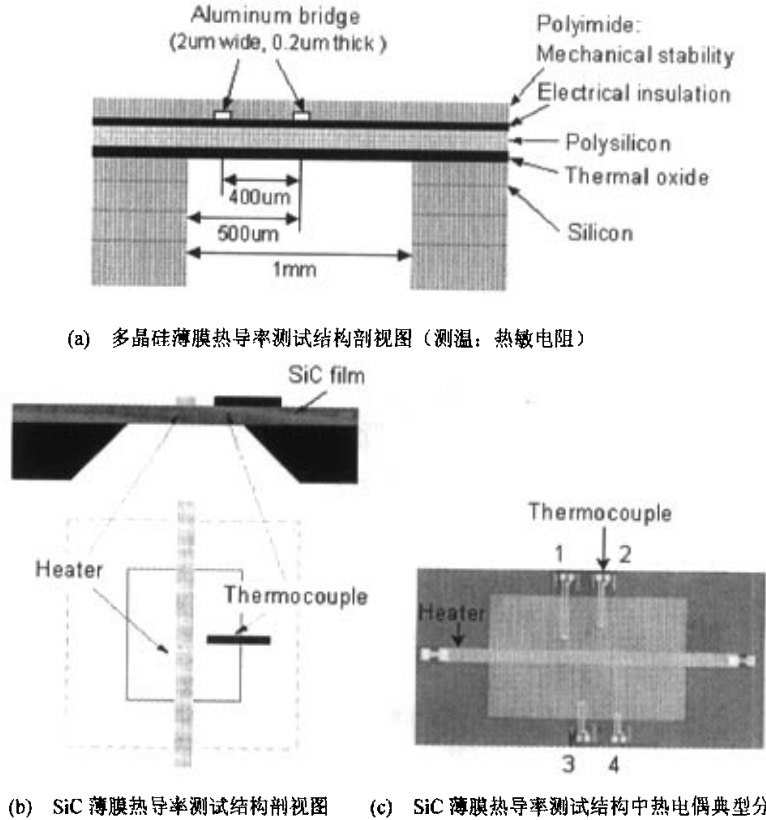


图 2.7 典型固支梁测试结构

图 2.7 (a) 中的固支梁测试结构利用深反应离子刻蚀技术, 淀积 SiO_2 作自停止腐蚀层, 金属铝桥使用化学湿法腐蚀, 聚酰亚胺层起到保护铝桥被腐蚀与支撑结构的作用。当电流通过中心铝电桥加热器时, 另一相距 $400\mu\text{m}$ 的铝桥作为温度测量条使用; 整个膜长是 13mm , 为了避免二维传热的影响, 仅仅使用位于结构中间宽是 1mm 的膜来测量; 在特定的测试环境中, 利用二极管温度传感器来控制测试环境的温度, 测温范围在 $20\text{K} \sim 320\text{K}$; 由于整个测试结构是置放在真空中, 可以不考虑对流散热的影响, 从而该测试结构的热传递只需考虑传导导热, 可以利用一维傅里叶热传导方程来求解多晶硅薄膜的热导率, 即有^[42]:

$$k_p = \frac{(Q/2) \cdot (X_{\text{thermometer}} - X_{\text{heater}})}{A_c \cdot (T_{\text{heater}} - T_{\text{thermometer}})} \quad (2-10)$$

式中: T_{heater} 、 $T_{\text{thermometer}}$ 分别是加热条和测量条的温度, A_c 为层的厚度和加热器长度的乘积; Q 是加热条铝线的电生成热。

在这种测试结构中, 有很多不确定因素, 主要是: ① 结构层尺寸的测量特别是多晶硅薄膜厚度的确定; ② 热辐射和传导导热在 SiO_2 层和聚酰亚胺层中的散热; ③ 结构层导热维数的确定(在该测试结构中利用一维热传导)。

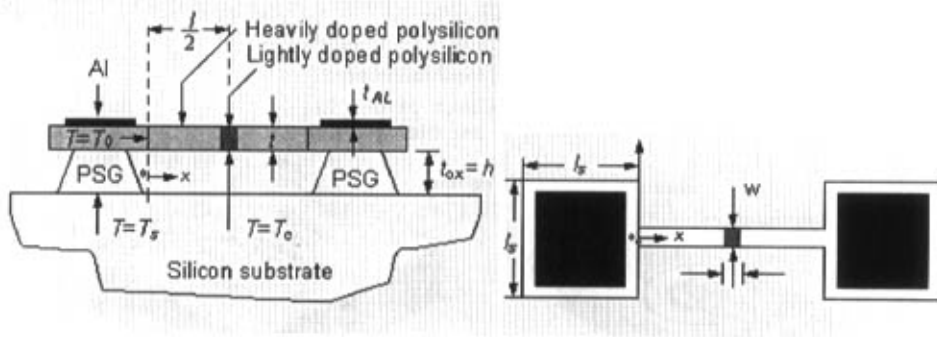
加热器上产生的热量在流向多晶硅薄膜同时, 还有其他的散热热路, 如在加热器铝引线上的散热、向周围环境的辐射散热及在其他结构层中的导热; 此外, 铝引线和 SiO_2 层、多晶硅层之间的界面热阻也提供了额外的散热热路, 所有这些因素造成的热量损失小于整个加热器热量的 15%。实际

上, 测量中产生误差的主要原因是辐射散热, 特别当温度在室温或更高温度时更是如此。为了尽量减小辐射散热的影响, 温度测量条与加热条之间的距离 ($X_{heater} - X_{thermometer}$) 必须小于加热器的加热长度, 在该测试结构中加热条的长度是 2.5mm, 大于温度计和加热器之间的距离 400 μ m。

该测试方法还可用于对多层薄膜热导率的测量。也可用交流加热方法来测得薄膜热导率。

2.2.3 微桥薄膜热导率测试结构

图 2.8 是典型微桥掺杂多晶硅薄膜热导率的测试结构示意图^[44]。该测试结构的工艺过程是: ① LPCVD 法在 4 英寸硅片上生长一层 3 μ m 厚的 PSG, PSG 既作为牺牲层又作为磷扩散源; ② 淀积一层 40nm 的 LPCVD SiN 层、光刻, 氮化物作为磷扩散源, 定义多晶硅桥中间的轻掺杂区。③ 淀积 1.5 μ m 厚的多晶硅薄膜、光刻; ④ 在 1000 $^{\circ}$ C 的高温下磷扩散 1 小时, 该步骤同时高温退火消除多晶硅层的应力; ⑤ 淀积金属铝、光刻; ⑥ 最后利用适当的 HF 酸溶液释放结构形成测试图形。



(a) 微桥薄膜热导率测试结构剖视图

(b) 微桥薄膜热导率测试结构顶视图

图 2.8 微桥掺杂多晶硅薄膜热导率测试结构

由于中间轻掺杂区多晶硅的电阻远远大于两端重掺杂区多晶硅的电阻值, 两端的电阻基本可以忽略不计, 因此假定电生成热仅由中间轻掺杂区的多晶硅电阻产生, 同时忽略对流散热与辐射散热的影响。图 2.9 是微桥多晶硅薄膜热导率的测试装置示意图。

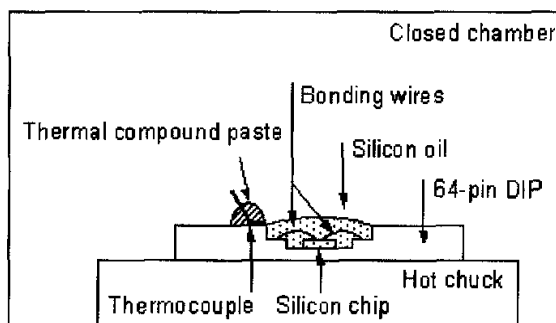


图 2.9 微桥掺杂多晶硅薄膜热导率的测试装置

根据一维稳态傅里叶传热分析, 该测试结构的热学模型是:

$$k_p = \frac{l}{4wt} \frac{dP}{dT_c} \quad (2-11)$$

式中： P 是中间区域的消散功率， T_c 是中间区域的温度， l 、 w 、 t 分别表示多晶硅桥的长度、宽度与厚度。通过一系列的实验得到 dP/dT_c 的值，便可以获取轻掺杂区多晶硅薄膜的热导率。

该测试结构的制作工艺是为了测量多晶硅薄膜热导率而专门设计的，其主要工艺步骤是需要两步掺杂即中间待测薄膜的轻掺杂与两端薄膜的重掺杂，因此其制造工艺与其它微机械表面器件的加工工艺不兼容。在建立热学模型时，没考虑两端重掺杂区的传热与电生成热，测试模型也只适用于真空环境。

2.2.4 膜式薄膜热导率测试结构

膜式热导率测试结构可分为圆形膜和矩形膜结构^[45]，其测试结构如图 2.10 所示。在图 2.10 (a) 圆形金刚石膜热导率测试结构中，在薄膜中间区域上制作微型加热器，作为热源，提供热流；以加热器为圆心，制作两个半径不同的同心环形热敏电阻用于测温。最后使用体硅各向异性背面腐蚀工艺形成测试结构，整个测试装置需置放在真空环境中进行测量。

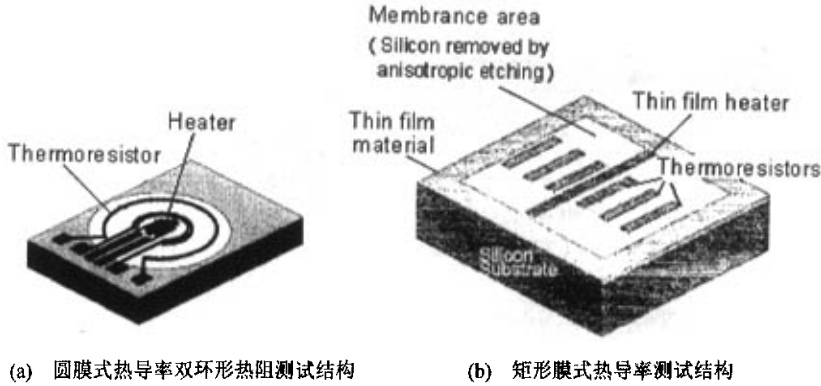


图 2.10 膜式热导率测试结构

图 2.10 (a) 圆形膜热导率模型是：

$$k_p = \frac{Q \ln(r_2/r_1)}{2\pi d(T_1 - T_2)} \quad (2-12)$$

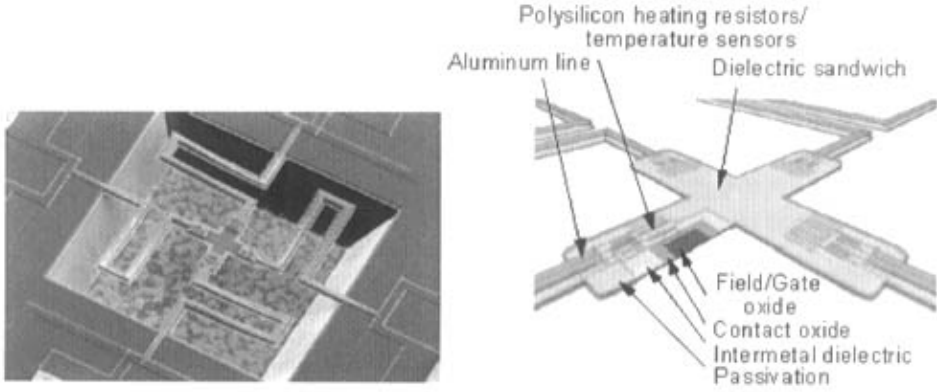
式中： Q 是加热器的加热功率， r_1 、 r_2 分别是内、外环形测温电阻的半径， T_1 、 T_2 分别是内、外环形测温电阻测得的温度， d 是薄膜厚度。该测试方法类似于双端固支梁薄膜热导率测试方法。

• 矩形膜热导率测试结构的制作工艺与测量方法与之类似。

2.2.5 其它结构类型薄膜热导率测试方法

1. Van der Pauw 薄膜热导率测试结构

热学范德堡结构如图 2.11 所示^{[46][47]}，核心部分是位于结构中心位置的十字型结构，四端为多晶硅电阻，用于电加热和温度测量。



(a) 范德堡多晶硅薄膜热导率测试结构 SEM 照片

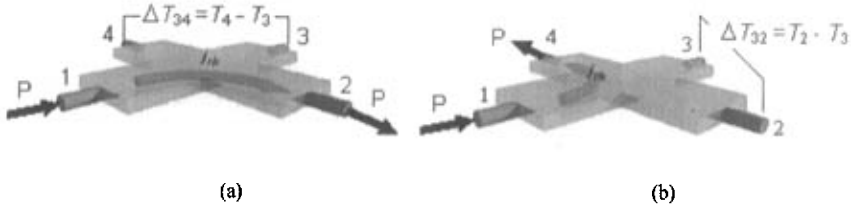
(b) 测试结构的十字中心

图 2.11 范德堡多晶硅薄膜热导率测试结构

热学范德堡测试结构的原理类比为测量电阻的电学范德堡测试结构，只是将电势场 Φ 转化为温度场 T ，电流密度 j_{el} 转化为热流密度 j_{th} ，电导率 σ 转化为热导率 k ，电阻转化为热阻，热功率的流入和流出类比为电流的流入和流出，电势探针被多晶硅热敏电阻所代替。

热学范德堡测试结构的热传导模型如图 2.12 所示。当热功率 P 从端口 1 输入从端口 2 流出时，测得端口 3、端口 4 之间的温度差 $\Delta T_{34} = T_4 - T_3$ ，同理，热功率 P 从端口 1 流入从端口 4 流出时，

测得端口 2、端口 3 之间的温差 $\Delta T_{32} = T_2 - T_3$ ，则可得到热阻 $R_{12,34}^{th} = \frac{\Delta T_{34}}{P}$ ， $R_{14,32}^{th} = \frac{\Delta T_{32}}{P}$ 。



(a)

(b)

图 2.12 热学范德堡测试结构的热传导模型

根据电学范德堡测试原理及类比关系，可得热阻 $R_{12,34}^{th}$ 、 $R_{14,32}^{th}$ 与薄膜方块热阻 R_S^{th} 的关系如下：

$$\exp(-\pi R_{12,34}^{th}/R_S^{th}) + \exp(-\pi R_{14,32}^{th}/R_S^{th}) = 1 \quad (2-13)$$

薄膜方块热阻 R_S^{th} 可用薄膜的平均热导率 k 与薄膜厚度 t 来定义，即有：

$$R_S^{th} = (kt)^{-1} \quad (2-14)$$

如果是多层复合薄膜结构，则薄膜方块热阻 R_S^{th} 是：

$$R_{S-multilayer}^{th} = (\sum_i k_i t_i)^{-1} \quad (2-15)$$

从而多层薄膜的平均热导率是：

$$k_{avg} = \frac{\sum_i k_i t_i}{\sum_i t_i} = (R_s^{th} \sum_i t_i)^{-1} \quad (2-16)$$

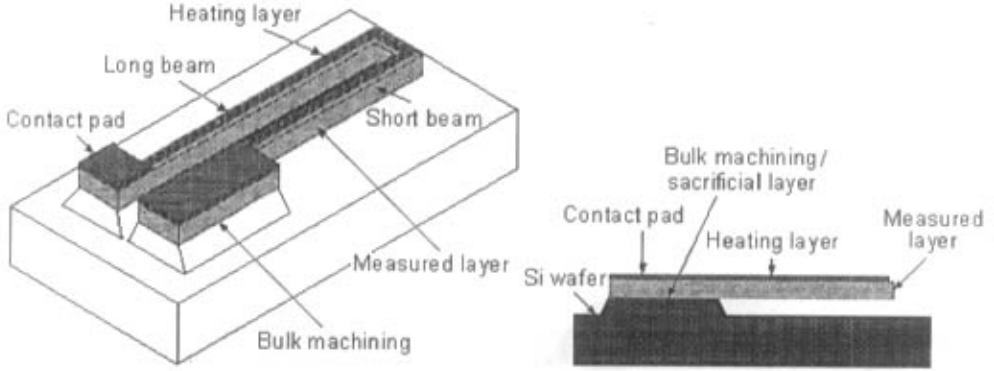
那么,各薄膜层的热导率都可以根据式(2-16)来提取。

通过结构设计,该测试方法可以分别测得绝缘薄膜和导体薄膜的热导率。测试需要在真空环境下进行,在建立热学模型没有考虑对流散热也忽略了辐射散热的影响。结构的制造工艺使用 ASIC CMOS 工艺,需要后处理硅腐蚀。

2. 热执行器法薄膜热导率测试结构

图 2.13 热执行器式 SiO₂ 薄膜热导率测试结构^[48],该测试结构的制造工艺简单,可使用牺牲层微机械表面加工工艺也可以使用腐蚀体硅工艺制作,其制造工艺和其他微机械器件的制造工艺能完全兼容。其待测薄膜可以是 SiO₂ 薄膜也可以是其它绝缘薄膜。该测试结构还需在待测的 SiO₂ 薄膜(或其它绝缘薄膜)上面需淀积一层导体薄膜,该导体薄膜作为加热部件。

其测试原理是:当在两固定端施加电流时,电加热使得整个悬臂梁受热膨胀。由于长臂比短臂的膨胀量大,使得整个悬臂向短臂一侧偏移,当通过光学显微镜观察到顶端侧向偏移量时,便可以通过根据建立的热电模型和热机械模型提取得到 SiO₂ 薄膜的热导率 k_o 。



(a) 热执行器式热导率测试结构三维视图

(b) 热执行器式热导率测试结构剖视图

图 2.13 热执行器式多晶硅薄膜热导率测试结构

由于该测试结构是在真空环境中测量的,无需考虑对流散热及向衬底的传导导热,同时由于辐射散热很小,辐射散热的影响也是可以忽略的。从而有:

$$T(x) = \frac{(T_p - T_0 + \frac{1}{\epsilon}) \cdot (\cos(\lambda \cdot x) + (1 - \cos(\lambda \cdot L)))}{\sin(\lambda \cdot L) \cdot \sin(\lambda \cdot x) + T_0 - \frac{1}{\epsilon}} \quad (2-17)$$

这里假定了边界条件: $T(0) = T(L) = T_p = T_0$, L 是梁的总长。

式(2-17)中

$$\lambda = \sqrt{\frac{J^2 w_{\text{导体}} h_{\text{导体}} \cdot \rho_0 \cdot \epsilon}{K_{\text{导体}} w_{\text{导体}} h_{\text{导体}} + K_{\text{绝缘体}} w_{\text{绝缘体}} h_{\text{绝缘体}}}} \quad (2-18)$$

式(2-18)中 $K_{\text{导体}}$ 、 $w_{\text{导体}}$ 、 $h_{\text{导体}}$ 和 $K_{\text{绝缘体}}$ 、 $w_{\text{绝缘体}}$ 、 $h_{\text{绝缘体}}$ 分别表示加热层和待测绝缘层的热导率、宽度与厚度。

梁的平均温度是:

$$\Delta T = \left(\frac{1}{L} \cdot \int_0^L T(x) dx \right) - T_0 \quad (2-19)$$

偏移量与温度的关系可以表示为:

$$\delta = a_e \gamma \Delta T \quad (2-20)$$

式中: a_e 是悬臂复合梁的等效热膨胀系数, γ 是换算系数:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix}}{L_1 L_2^2 \cdot \left[S \cdot \begin{vmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{vmatrix} - (L_1 - \frac{2}{3} \cdot L_2) \cdot \begin{vmatrix} a_2 & c_2 \\ a_3 & c_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} \right]} \quad (2-21)$$

式中: L_1 和 L_2 分别是长臂和短臂的长度, 其它参数也只与悬臂梁几何尺寸有关, 在这里不一一列出。

显然, 当观测到悬臂梁的偏移量与几何尺寸, 便可以获取待测薄膜的热导率。

通过适当改进, 该测试方法也可用于对导体薄膜热导率的测量。需要提出的是, 该测试结构及其测试模型只适用于真空环境, 其测试模型显然不适合对自然环境下薄膜热导率的测量。如果要使用该方法, 实现在自然环境下对绝缘薄膜或导体薄膜热导率的测量, 需要设计测试结构阵列、建立新的热电模型, 该思想还有待验证。

• 此外, 3ω 方法在横向薄膜热导率测量中也占有重要的地位。

2.3 本章小结

本章详细介绍了各类薄膜热导率测试技术, 分析了各种测试技术的结构特点、制作工艺、热导率模型、测试方法及其存在问题。

日前的导体薄膜或非导体薄膜热导率测试结构及其测试方法大都是需要真空测试条件, 因而在测试和建立热学模型时不需考虑对流散热和向衬底传热散热的影响, 有的测试方法在建立热学模型还需要忽略辐射散热的影响, 如 Paul O. 等研究的 van der Pauw 热导率测试方法。在测试结构的制造工艺方面, 日前的各种薄膜热导率测试结构基本上使用 CMOS 工艺或 CMOS MEMS 制造技术需要后处理体硅腐蚀, 且是多层复合膜结构。目前, 还没有对标准表面工艺制作的薄膜热导率进行研究。在测量方面大都需要真空设备和设计其它专门的测量仪器, 不能实现对薄膜热导率的在线检测。

由于多晶硅薄膜是各种表面器件的主要构件, 因此, 为了能及时掌握材料的热学特性, 需要研究新的测试结构及方法, 设计能与各种 MEMS 表面器件制造工艺完全兼容的结构合理、测试方法简单、对测试环境要求宽松、测试精确度较高的在线薄膜热导率测试结构具有较大的现实意义。

第三章 多晶硅薄膜热导率在线测试结构

要实现表面微加工多晶硅薄膜热导率的在线测试,首要的是所设计的热导率测试结构的制作能够随表面微机械器件制作工艺加工制作,不能有附加工艺;其次要能在自然环境下进行测试,且测试方法要简单可靠,不能为了测量来设计专门的测试装置,即只需利用实验室常用的仪器设备就能进行测试;再者热导率模型不能含有其它未知参数,即不能使用其它材料的已知参数值,譬如热传导过程中 SiO_2 薄膜、 Si_3N_4 薄膜以及空气层的热导率以及空气的自然对流系数、热辐射发射率等。研究的日标是通过简单的测量如测量电流、电压特性和结构的几何尺寸,便可以获取多晶硅薄膜的热导率,且其测试精度能够满足在线测试要求。

由于在线测试,要求能在自然环境下测量得到多晶硅薄膜的热导率,就必须考虑电加热过程中,由于自然对流散热、辐射散热以及向衬底传热等散热热路的存在对薄膜温度分布及热功率消耗的影响,当结构的厚度与表面宽度尺寸相比拟时,其侧面的自然对流散热与辐射散热也必须考虑。

本章提出了两种不同的表面加工多晶硅薄膜热导率在线测试结构。论文给出了测试原理,推导出热学模型,给出了测试方法,并用 ANSYSTM 有限元热电分析验证了热导率模型的正确性和测试结构设计的合理性。由于测试结构的巧妙设计,克服了其它测试方法存在的测试结构复杂、边缘效应及需要的真空测量环境等不足。因而该测试方法能实现表面加工多晶硅薄膜热导率的在线检测,并有望在工艺线应用。

下面,先简单介绍热传递的三种基本方式,即传导、对流和辐射。

3.1 热传递的基本方式^{[1][2][3]}

1. 导热

物体各部分之间不发生相对位移时,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为导热(或称热传导)。例如,固体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的固体把热量传递给与之接触的温度较低的另一固体都是导热现象。从微观角度来看,在半导体中,导热是通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。导热系数(即热导率)是表征材料导热性能优劣的参数,即一种物性参数。不同材料的热导率数值不同,即使是同一种材料,热导率还与温度等因素有关。导热现象的规律可用导热基本定律—傅里叶定律来说明^[1]:

$$q = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3-1)$$

式中: q 是单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度,单位是 W/m^2 ; Q 是单位时间内通过某一给定面积 $A(m^2)$ 的热量,单位是 W ; $\frac{dT}{dx}$ 表示温度 T 沿 x 方向的变化量; k 是比例系数,称为热导率。本论文用 k 表示材料的热导率,用下标来区别不同材料,其单位是 $W/(m \cdot K)$ 。

2. 对流

对流是指流体的宏观运动，从而流体各部分之间发生相对位移、冷流体相互掺混所引起的热量传递运动。流体流过一个物体表面时的热量传递过程称之为对流换热。表面和流体之间的对流散热可用热流量与温度差的线性关系来描述，也就是牛顿冷却定律^[2]：

$$q = h_c(T - T_0) \quad (3-2)$$

式中： T 、 T_0 分别为结构表面单元和流体的温度，单位是 K ；比例系数 h_c 称为表面对流传热系数，单位是 $W/(m^2 \cdot K)$ 。本论文涉及到的是空气自然对流换热，也用 h_c 表示结构层表面的空气自然对流传热系数。

3. 热辐射

物体因热的原因而发出辐射能的现象称为热辐射，热辐射可以在真空环境中传递，物体的辐射能力与温度有关。本论文涉及到的热辐射是一种简单的辐射换热情况，即表面积为 A 、表面温度为 T 、发射率为 ε 的一个物体被包容在温度为 T_0 的空气环境中。热辐射可用斯忒藩-波耳兹曼定律来说明，对于这种简单的辐射换热^[2]，有：

$$Q = \varepsilon A \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3-3)$$

式中 ε 表示发射率（一般取 0.9）， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 是斯忒藩-波耳兹曼常数。

实际工程技术问题中对流与辐射常常同时存在。这种对流与辐射同时存在的换热过程称为复合换热。对于复合换热，工程上为计算方便，常常采用把辐射换热量折合对流换热量的处理方法，将它表示成牛顿冷却公式的形式，即有^[4]：

$$Q = Ah_r \Delta T \quad (3-4)$$

式中 h_r 称为辐射换热表面传热系数（习惯上称为辐射换热系数）。有意思的是，当温度差是 10K 量级时，在吸收环境下的理想辐射体，辐射传热系数 h_r 近似等于其在空气中的自然对流传热系数。当自然对流是基本传热机理时，就包括有辐射传热的影响^[5]。

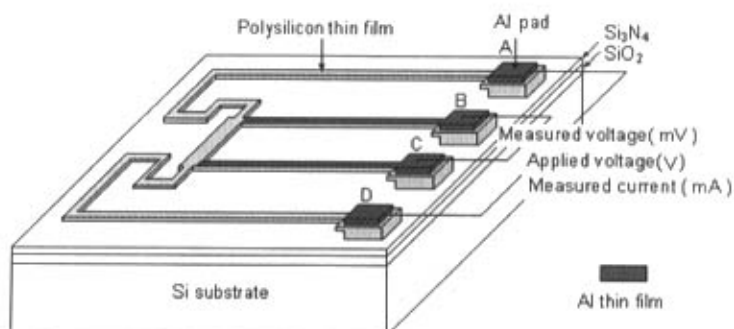
3.2 T 型多晶硅薄膜热导率在线测试结构

3.2.1 测试结构设计 with 测试方法

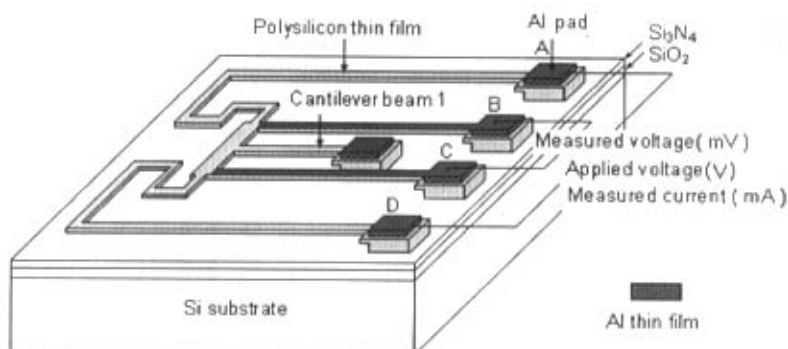
1. 结构特点：

图 3.1 是本文设计的表面加工多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构的三维视图，图 3.2 是测试结构的剖视图。其结构特点描述如下：

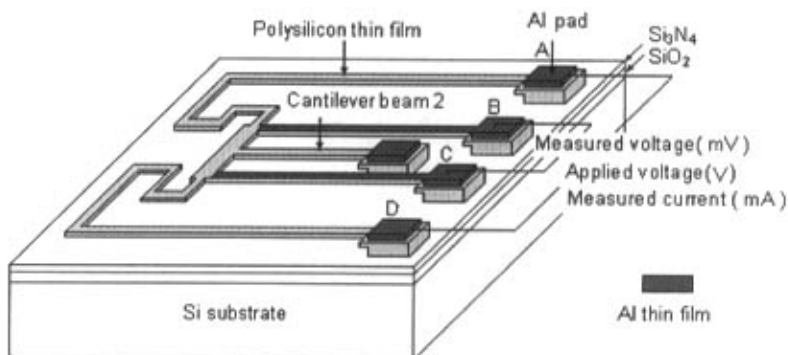
整个热导率测试结构由三个基本结构组成测试阵列：一个中间不含多晶硅悬臂梁的参考结构，如图 3.1(a)所示；两个含有长度不同、宽度与厚度完全相同多晶硅悬臂梁的测试结构，如图 3.1 (b)、(c) 所示。在测试结构 1 和 测试结构 2 中，其测量条、加热条及其引线部分与参考结构完全一样。也就是说除了结构中间的悬臂梁外，其他部分三个结构的尺寸完全一致。



(a) 参考结构



(b) 测试结构 1



(c) 测试结构 2

图 3.1 多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构阵列三维视图

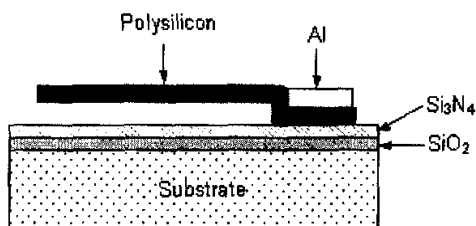


图 3.2 多晶硅薄膜热导率测试阵列结构剖视图

在图 3.1 的测试阵列中, A、B、C 和 D 分别表示锚区的铝压焊块, 用于施加电压、测量电流或电压, 即 A、D 端用于施加电压、测量电流, B、C 端用于测量加热条上的电压降。

在测试阵列三个结构的测量条上分别淀积有一层金属薄膜, 由于金属薄膜的电阻率远远小于多晶硅薄膜的电阻率, 使得测量条的电阻(称之为寄生热电阻)与加热条自身电阻相比可以忽略不计, 从而大大增加了加热条电压测量的精确度。

根据测试结构 1、2 中加热条与悬臂梁的构造形状, 也为了与后文设计的另一种测试结构区分, 把该测试结构命名为: 多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构。

2. 测试结构制作工艺

该测试结构的制作工艺步骤简述如下:

- ① 在硅衬底上热氧化一层二氧化硅;
- ② 淀积氮化硅;
- ③ 淀积牺牲层, 光刻形成锚区;
- ④ 淀积多晶硅薄膜、掺杂、光刻多晶硅层, 形成测试结构图形;
- ⑤ 淀积铝、反刻铝, 形成铝压焊块和测量条上的铝膜;
- ⑥ 牺牲层腐蚀, 结构释放。

各层的厚度及其他工艺条件由具体工艺线确定。从测试结构的制作工艺步骤可以看出, 该测试结构可随表面微机械器件制作工艺加工制作, 无需附加工艺, 且只需三块光刻掩模版。

3. 实验测试方法

测试时, 把测试结构芯片直接置放在实验室常用的探针台上, 便可以在自然环境下进行测量。需要获取的测量值有: 施加电压、电流, 加热条上的电压降以及测试结构中悬臂梁的几何尺寸。

测试提取多晶硅薄膜热导率的方法如下:

① 提取多晶硅电阻的温度系数, 从而可以通过测量加热条电阻变化量来获取对应电阻值变化量的加热条温度变化量。多晶硅电阻温度系数的提取方法将在第四章中给予详细的阐述。

② 对参考结构进行测量以获得需要的总传热系数

测试时, 在 A、D 两端施加电压, 会在整个结构中产生温度分布, 通过 A、D 两端测加热电流得到加热总功率, 通过 B、C 端测得加热条上的电压降以获取加热条上的电阻变化量, 根据电阻的温度效应得到加热条的温度变化量, 便可以得到参考结构也即测试结构 1、2 中测量条、加热条及其引线的总传热系数。

③ 同理, 在测试结构 1、2 的 A、D 两端施加电压, 在整个结构中产生温度分布。通过 A、D 两端测得加热电流得到结构的加热总功率; 通过 B、C 端测得加热条上的电压值, 利用电阻的温度效应获取加热条的温度变化量, 分别得到这两个测试结构的总传热系数。

④ 当得到所需的参考结构总传热系数和两个测试结构的总传热系数, 就可以分别得到测试结构 1、2 中中间悬臂梁的传热系数, 即测试结构 1、2 中的总传热系数分别与参考结构的总传热系数之差。然后便可以根据建立的数学模型, 提取出多晶硅薄膜的热导率。

3.2.2 热电分析和热导率模型

1. 测试结构总传热分析^[6]

在图 3.1 (a) 参考结构中有能量方程:

$$P_r = G_r \Delta T_r \quad (3-5)$$

式中: P_r 表示参考结构的加热功率, G_r 表示参考结构的总传热系数, $\Delta T_r = T_r - T_0$ 是参考结构中加热条的温度变化量, T_r 是热稳态时参考结构加热条的温度, T_0 是初始温度。

在图 3.1 (b) 测试结构 1 中, 总的热量传递示意图如图 3.3 所示。它包括参考结构部分 (也就是测试结构中加热条及其引线与测量条部分) 与中间悬臂梁部分传递的热量。

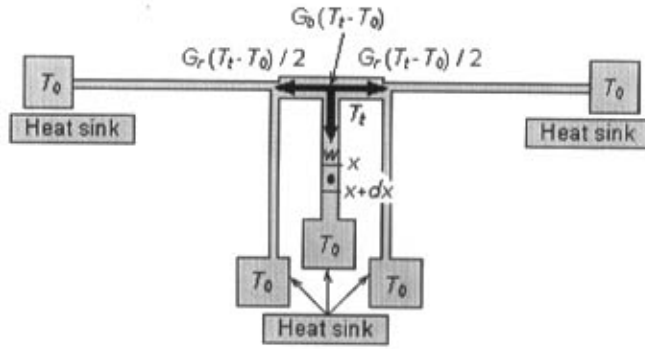


图 3.3. 测试结构 1 (或测试结构 2) 中总的热量传递示意图

因此, 测试结构 1 中有总的热量传递方程:

$$P_{t1} = G_{b1} \Delta T_{t1} + G_r \Delta T_{t1} \quad (3-6)$$

式中: P_{t1} 是测试结构 1 的加热功率, G_{b1} 表示结构中间悬臂梁的传热系数, $\Delta T_{t1} = T_{t1} - T_0$ 表示测试结构 1 中加热条的温度变化量, T_{t1} 是测试结构 1 中加热条的温度。

同理, 在图 3.1 (c) 测试结构 2 中, 总的热量传递方程:

$$P_{t2} = G_{b2} \Delta T_{t2} + G_r \Delta T_{t2} \quad (3-7)$$

式中: P_{t2} 是测试结构 2 的加热功率, G_{b2} 表示结构 2 中间悬臂梁的传热系数, $\Delta T_{t2} = T_{t2} - T_0$ 表示测试结构 2 中加热条的温度变化量, T_{t2} 是测试结构 2 中加热条的温度。

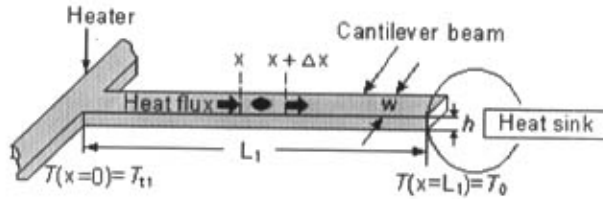
值得提出的是: 根据结构设计的基本原理, 式 (3-6)、(3-7) 和 (3-5) 中参数 G_r 的值及其物理意义都是一致的, 所以采用相同的符号来表示。事实上, 在这里, 是把测试结构 1、2 分解成加热条及其引线、测量条和中间悬臂梁两个部分, 显然, 前者与参考结构是完全一致的。

2. 悬臂梁区域的传热分析

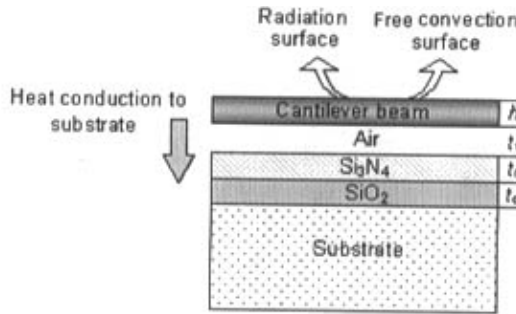
图 3.4 是测试结构 1 中中间悬臂梁的传热模型示意图。由于悬臂梁的长度远远大于其宽度和厚度，在其宽度和厚度方向上可以看作没有温度梯度，因此可以利用一维稳态传热来建立解析模型。

在建立热学模型时，需要建立了一个线性化的测试条件即 $T_i - T_0 \ll T_0$ (T_i 表示悬臂梁顶端加热条的温度)，目的是对辐射散热进行线性化处理^{[6][7][8]}。研究表明当温度在 $300\text{K} \sim 800\text{K}$ 范围内，辐射散热是可以忽略的^[9]，因此在测试和建立传热方程时，如果把加热条的温度控制在这个范围内，就完全可以对辐射散热进行线性化处理，甚至忽略不计。

实际上，根据传热学相关理论分析和其它相关实验研究表明^{[10][11][12]}，薄膜梁向衬底传热的等效热阻远远大于对流、辐射的传热热阻，一般大于 3~4 个数量级，因此后两项即对流、辐射散热对薄膜梁温度分布及功率消耗的影响基本可以忽略不计。



(a) 悬臂梁上的传导导热



(b) 自然对流、辐射及向衬底的传热

图 3.4 测试结构中间悬臂梁的传热模型示意图

考察悬臂梁上微元体单位时间内的热流控制项（需要提出的是：在悬臂梁上只有热流，而没有加热电流通过）：

(1) 流入微元体的热量：

$$Q_I = -k_p wh \left[\frac{dT}{dx} \right]_x \quad (3-8)$$

式中： k_p 表示多晶硅薄膜的热导率； w 、 h 分别是中间悬臂梁的宽度和厚度。

(2) 流出微元体的热量：

$$Q_O = -k_p wh \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+\Delta x} \quad (3-9)$$

(3) 微元体侧面和上表面由于辐射散失的热量：

$$Q_R = (2h + w) \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) dx \quad (3-10)$$

式中: ε 是梁的辐射发射率, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 是斯忒藩-波耳兹曼常数^[13]; T_0 是初始温度。

(4) 微元体底面向衬底传导的热量:

$$Q_C = \frac{S}{R_T} w(T - T_0) dx \quad (3-11)$$

式中: $S = \frac{h}{w} (\frac{2t_v}{h} + 1) + 1$ 是热传导形状系数, $R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o}$ 是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的等效热阻^[14], t_v 、 t_n 、 t_o 和 k_v 、 k_n 、 k_o 分别是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率。

(5) 微元体侧面和上表面由于空气自然对流散失的热量:

$$Q_V = (2h + w)h_c(T - T_0) dx \quad (3-12)$$

式中: h_c 是空气的自然对流系数。

根据能量守恒原理, 稳态时微元体的温度保持不变, 因此单位时间内流入微元体的热量等于流出微元体散失的热量, 即:

$$Q_I = Q_O + Q_R + Q_C + Q_V \quad (3-13)$$

由此得到悬臂梁上的传热方程是 (在这里, 对辐射散热进行了线性化处理):

$$k_p w h \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - (2h + w)h_c [T(x) - T_0] - 4(2h + w)\varepsilon \sigma T_0^3 [T(x) - T_0] - \frac{S}{R_T} w [T(x) - T_0] = 0 \quad (3-14)$$

令 $G_A = (2h + w)h_c + 4(2h + w)\varepsilon \sigma T_0^3 + \frac{S}{R_T} w$, $G_D = \frac{G_A}{k_p w h}$, 则式 (3-14) 可以改写为:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} - G_D [T(x) - T_0] = 0 \quad (3-15)$$

上式的边界条件是:

$$\begin{cases} T(0) = T_{t1} \\ T(L_1) = T_0 \end{cases} \quad (3-16)$$

式中: L_1 是测试结构 1 中中间悬臂梁的长度。在这里认为悬臂梁热沉锚区的温度与衬底温度 (即初始温度) 相同^{[15][16]}。

由边界条件, 解方程式 (3-15), 得到悬臂梁的温度分布是:

$$T(x) = T_0 - \frac{(T_{t1} - T_0) \cdot e^{-L_1 \sqrt{G_D}}}{e^{L_1 \sqrt{G_D}} - e^{-L_1 \sqrt{G_D}}} \cdot e^{x \sqrt{G_D}} + \frac{(T_{t1} - T_0) \cdot e^{L_1 \sqrt{G_D}}}{e^{L_1 \sqrt{G_D}} - e^{-L_1 \sqrt{G_D}}} \cdot e^{-x \sqrt{G_D}} \quad (3-17)$$

根据傅里叶定律^[13]:

$$P_B = -k_p wh \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (3-18)$$

式中: P_B 表示电加热时流入悬臂梁区域的能量。解方程式 (3-17), 并根据式 (3-5)、式 (3-6) 化简得到测试结构 1 中悬臂梁的传热系数是:

$$G_{b1} = \left(\frac{P_{t1}}{\Delta T_{t1}} - \frac{P_r}{\Delta T_r} \right) = k_p h \frac{w}{L_1} + h_c (2h + w) L_1 + 4(2h + w) \varepsilon \sigma L_1 T_0^3 + \frac{S}{R_r} w L_1 \quad (3-19)$$

由于测试结构 1、2 中中间的两个悬臂梁是相同的薄膜, 具有相同的宽度和厚度, 同理可得图 3.1 (c) 测试结构 2 中中间悬臂梁的传热系数是:

$$G_{b2} = \left(\frac{P_{t2}}{\Delta T_{t2}} - \frac{P_r}{\Delta T_r} \right) = k_p h \frac{w}{L_2} + h_c (2h + w) L_2 + 4(2h + w) \varepsilon \sigma L_2 T_0^3 + \frac{S}{R_r} w L_2 \quad (3-20)$$

式中: G_{b2} 是测试结构 2 中中间悬臂梁的传热系数, $\Delta T_{t2} = T_{t2} - T_0$ 是测试结构 2 中加热条的温度变化量, L_2 是测试结构 2 中悬臂梁的长度。

3. T 型在线测试结构多晶硅薄膜热导率模型

根据式 (3-19) 与式 (3-20), T 型在线测试结构多晶硅薄膜热导率可以表示为:

$$k_p = \left[\left(\frac{P_{t1}}{\Delta T_{t1}} - \frac{P_r}{\Delta T_r} \right) \frac{1}{L_1} - \left(\frac{P_{t2}}{\Delta T_{t2}} - \frac{P_r}{\Delta T_r} \right) \frac{1}{L_2} \right] \cdot \frac{1}{wh} \cdot \left(\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2} \right)^{-1} \quad (3-21)$$

测试结构 1、2 和参考结构中加热条的温度变化是通过多晶硅电阻的温度效应来提取的。

需要强调的是, 在上式中, 只含有多晶硅薄膜热导率一个未知参数, 其他未知参数如空气自然对流系数、辐射发射率、以及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等都已消除。

值得提出的是:

如果二个结构中加热条的电阻变化量相同, 也就会具有相同的温度变化量 ΔT , 此时的测试结构 1、2 与参考结构的加热功率之差便是分别流入其中间悬臂梁的热功率。从而式 (3-21) 等效为:

$$k_p = \left[\frac{(P_{t1} - P_r)}{\Delta T L_1} - \frac{(P_{t2} - P_r)}{\Delta T L_2} \right] \cdot \frac{1}{wh} \cdot \left(\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2} \right)^{-1} \quad (3-22)$$

这个结论的确立不仅简化了模型, 使得在实际测试时, 参考结构与测试结构之间存在的锚区散热及探针接触产生的影响能够相互抵消, 从而提高了测量精度, 大大减小了测量误差。

3.2.3 有限元模拟分析与模型验证

为了验证结构设计与理论模型的正确性, 我们利用 ANSYSTM 进行了三维有限元电热模拟分析。模拟时, 分别在三个测试结构的上表面施加空气自然对流系数和辐射散热系数 (在这里我们根据传热学理论把辐射散热系数转换成等效的对流系数^[17]), 结构的下表面施加向衬底传热的等效传热系数 (这个值与梁的宽度和厚度及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等因素有关)。模拟使用的典型参数值如表 3-1 所示, 表 3-2 是向衬底传热的等效传热系数换算。表 3-3 是模拟中使用的参考结构相关参数。

表 3-1 等效传热系数使用的典型参数

材料	热导率	厚度
Air	0.026 W/mK	1, 2 or 3 μm
Si_3N_4	2.25 W/mK	0.6 μm
SiO_2	1.4 W/mK	1.0 μm

表 3-2 向衬底传热的等效传热系数换算 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)

空气间隙	梁的宽度 (梁的厚度: $2\mu\text{m}$)		
	$5\mu\text{m}$	$10\mu\text{m}$	$15\mu\text{m}$
3μ	2.23434×10^4	1.54685×10^4	1.31769×10^4
2μ	2.82399×10^4	2.05381×10^4	1.79708×10^4
1μ	4.56361×10^4	3.54947×10^4	3.21143×10^4

图 3.5 是 ANSYSTM 三维有限元电热分析参考结构的网格划分示意图。图 3.6 是空气间隙为 $3\mu\text{m}$ 、施加电压为 5V 时参考结构的温度分布云图。

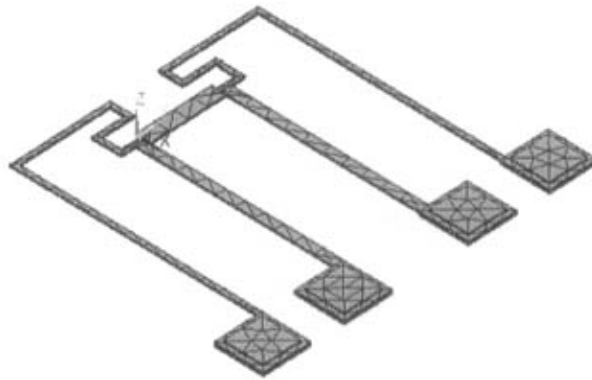


图 3.5 参考结构三维有限元电热分析网格划分

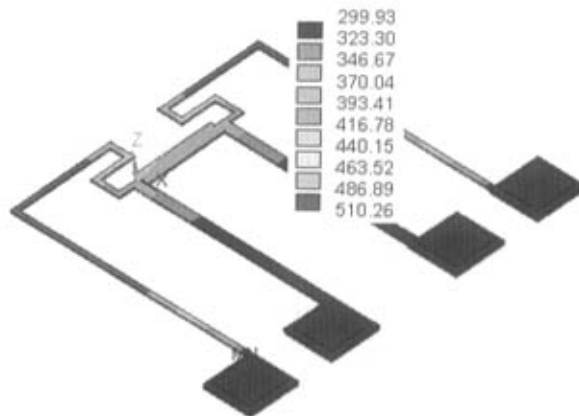


图 3.6 施加电压 5V 时参考结构的温度分布云图: 空气间隙 $3\mu\text{m}$

表 3-3 模拟使用的参考结构相关参数

单元 / 参数	长度	宽度	厚度
加热条引线	320 $\mu\text{m} \times 2$	5 μm	2 μm
加热条	80 μm	15 μm	2 μm
测量条	200 μm	10 μm	2 μm
热导率, k (设定值)	28.3 W/m·K		
初始电阻率, ρ_0	$1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$		

由于软件模拟，必须设定材料参数，在这里我们利用文献中的多晶硅薄膜温度系数^[8]。电阻温度系数具体数值的大小以及其他参数的设定并不影响对热导率模型的验证。

在模拟时，充分考虑了各种传热路径对薄膜梁温度分布的影响，因而这种模拟方法能反映实际测量的具体情况。模拟时，把加热电压控制在加热条最高温度小于 800K 且在有效测量灵敏度范围内。

从图 3.6 可以看出，当施加电压是 5V 时，梁的最高温度点是 510.26K，此时加热条上的温度变化量是 85.12K。在这个温度变化量下，电阻的变化量是其初始电阻的 12.5% (即有 $\Delta R / R_0 = 12.5\%$)，显然这个电阻变化量是能够测出的，因而在这个温度变化量甚至更小的温度变化量情况下，都是能够满足测试灵敏度的需求。这种模拟方法可用来指导实验测试。

在不同空气层厚度下，模拟分析得到参考结构中施加电压与电流的关系，如图 3.7 所示。图 3.8 是参考结构中加热条上的电压降与加热电流的关系。由此，可以得出加热功率与加热条温度变化量的关系，如图 3.9 所示，根据这个关系可以得到参考结构的总传热系数。

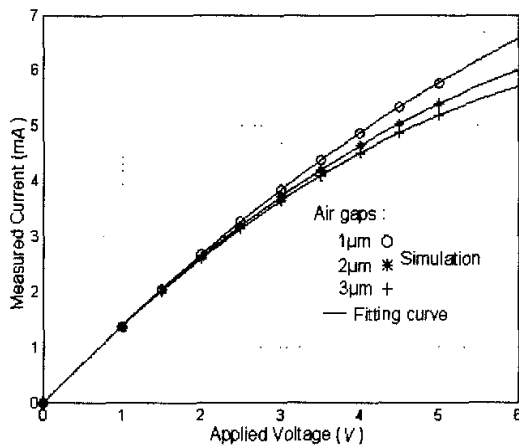


图 3.7 参考结构中不同空气层厚时，施加电压与测量电流的关系

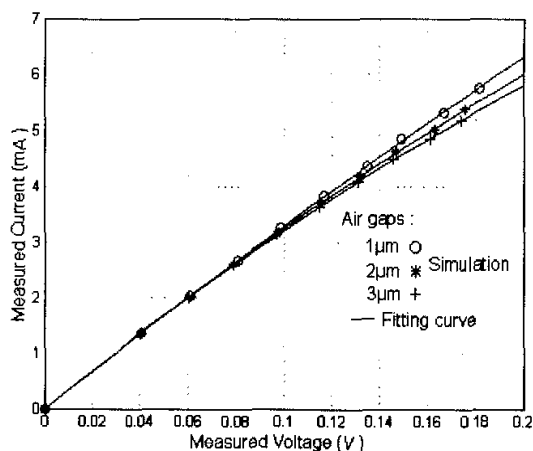


图 3.8 参考结构中不同空气层厚时，测量电压与测量电流的关系

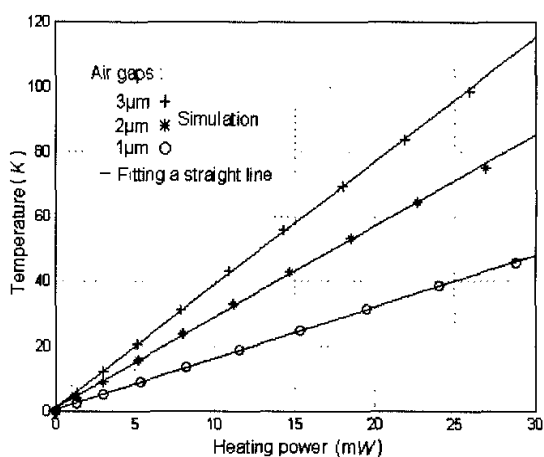


图 3.9 参考结构中加热功率与加热条温度变化量的关系

表 3-4 给出了模拟使用的测试结构 1、2 中结构的相关参数，从表中可以看出，测试结构 1、2 中的加热条及其引线与测量条有与参考结构相同的几何尺寸（参见表 3-3），这和结构设计的基本原理以及建立的热导率模型是相符的。

表 3-4 模拟使用的测试结构 1、2 相关参数

单元 / 参数	长度	宽度	厚度
加热条引线	320 μm ×2	5 μm	2 μm
加热条	80 μm	15 μm	2 μm
测量条	200 μm	10 μm	2 μm
测试结构 1 中的悬臂梁	150 μm	10 μm	2 μm
测试结构 2 中的悬臂梁	200 μm	10 μm	2 μm
初始电阻率, ρ_0	1.1 $\times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$		

图 3.10 是 ANSYSTM 三维有限元电热分析的测试结构 1 网格划分示意图。图 3.11 是模拟得到的一定加热功率下测试结构 1 的温度分布云图。在不同空气层厚度下，模拟得到的测试结构 1 中施加

电压与电流的关系,如图 3.12 所示;图 3.13 是测试结构 1 中加热条上电压降与加热电流的关系。根据上述分析,得到了测试结构 1 中加热功率与加热条温度变化量的关系,如图 3.14 所示,根据这个关系可以得到测试结构 1 的总传热系数。

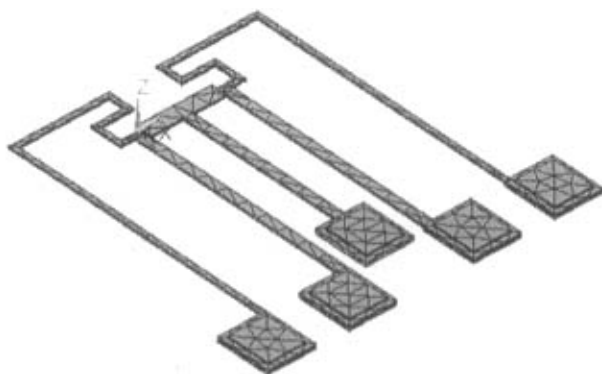


图 3.10 测试结构 1 三维有限元电热分析网格划分

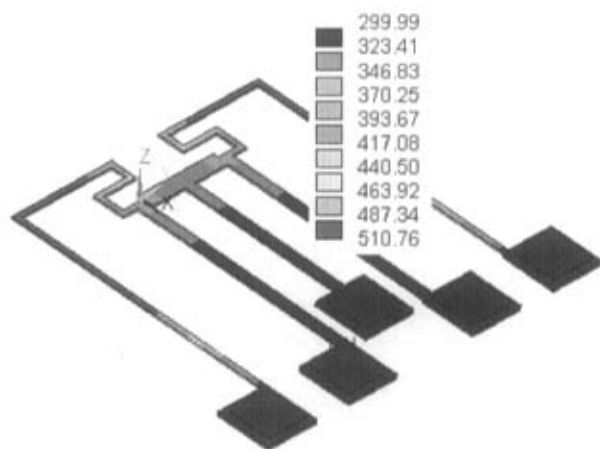


图 3.11 施加电压 5V 时测试结构 1 的温度分布云图: 空气间隙 $3\mu\text{m}$

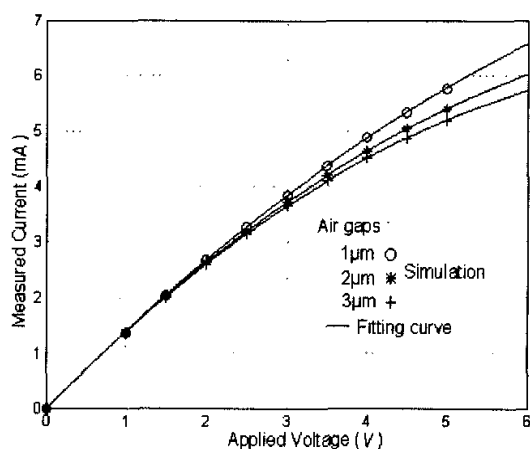


图 3.12 测试结构 1 中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系

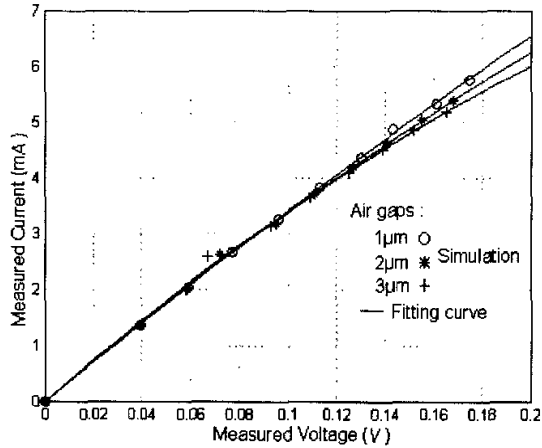


图 3.13 测试结构 1 中不同空气层厚时，测量电压与测量电流的关系

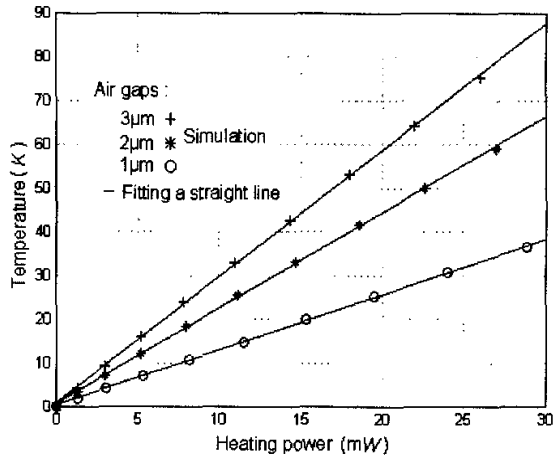


图 3.14 测试结构 1 中加热功率与加热条温度变化量的关系

从图 3.11 可以看出，当施加电压是 5V 时，测试结构 1 中梁的最高温度点为 510.76K，此时加热条上的温度变化量是 55.03K。可见在相同施加电压下，悬臂梁对加热条温度的影响是比较明显的。在实际测量时，这个温度差（即参考结构与测试结构 1 中加热条温度变化量的差）通过电阻变化量的不同反应出来。

图 3.15 是模拟使用的 ANSYSTM 三维有限元电热分析的测试结构 2 网格划分示意图。图 3.16 是一定加热功率下测试结构 2 的温度分布云图。在不同空气层厚度下，模拟得到的测试结构 2 中施加电压与电流的关系，如图 3.17 所示；图 3.18 是测试结构 2 中加热条上测得电压与电流的关系。

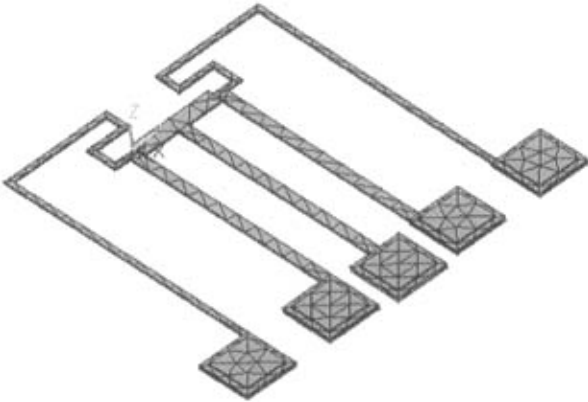


图 3.15 测试结构 2 三维有限元电热分析网格划分

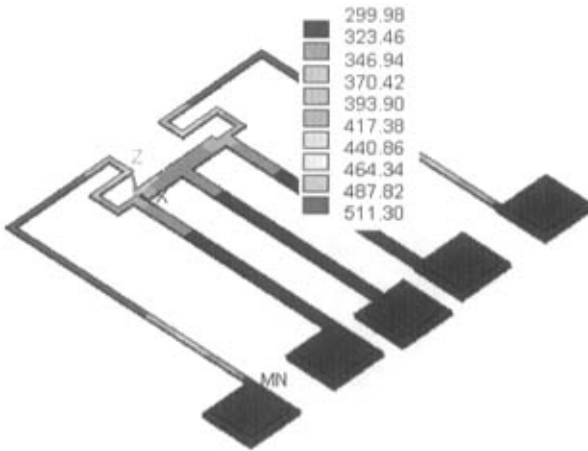


图 3.16 施加电压 4V 时测试结构 2 的温度分布云图: 空气间隙 $3\mu\text{m}$

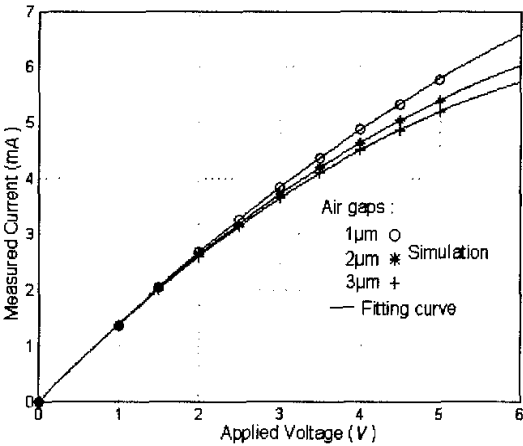


图 3.17 测试结构 2 中不同空气层厚时，施加电压与测量电流的关系

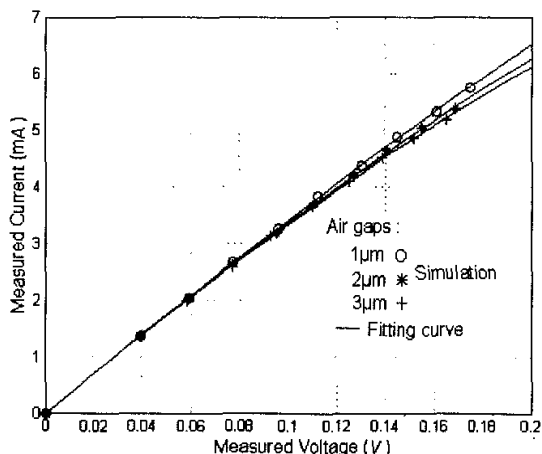


图 3.18 测试结构 2 中不同空气层厚时, 测量电压与测量电流的关系

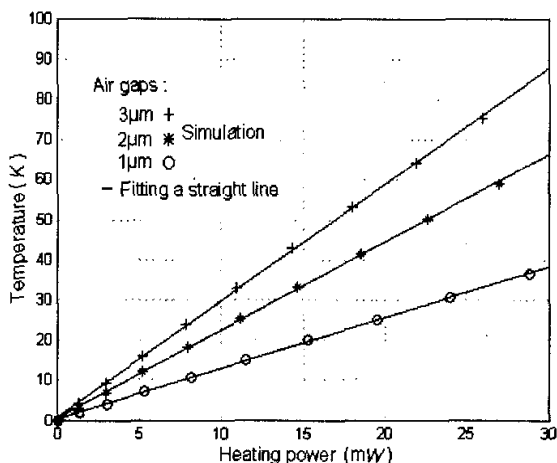


图 3.19 测试结构 2 中加热功率与加热条温度变化量的关系

根据模拟得到的电压电流之间的关系, 可以很容易获取测试结构 2 中加热功率与加热条温度变化量的关系, 如图 3.19 所示, 根据这个关系可以得到测试结构 2 的总传热系数。可以看出, 其与参考结构中加热功率与加热条温度变化量的关系有明显的差异, 反应了中间悬臂梁对加热条温度变化的影响。而测试结构 1、2 中加热功率与加热条温度变化量的关系也存在差异, 这个差异与两个悬臂梁几何尺寸是密切相关的。

对于结构的温度, 根据理论分析, 我们只需控制加热条的温度变化量在小于 $500K$ 的范围内, 就可以满足理论模型建立的条件。由于多晶硅薄膜梁到一定温度时会熔断, 所以加热条温度是不能无限增加的。在实际测量时, 加热条温度变化量在 $100K \sim 200K$ 之间是比较合适的。

根据上述对测试阵列中三个结构的热电模拟分析, 已经得到了热导率模型中所需的各个参量值, 把模拟得到的数据进一步代入式 (3-21) 或 (3-22) 中, 便可以提取出多晶硅薄膜的热导率。然后把计算得到的热导率与模拟分析的设定数值 (即文献实验值) 进行比较, 来验证模型建立的正确性。

模拟热电分析时, 设定的多晶硅薄膜热导率的值 $28.3W/m \cdot K$, 根据分析数据得到室温 $300K$ 时多晶硅薄膜的热导率在 $27.5956W/m \cdot K \sim 27.7689W/m \cdot K$ 之间 (由于不同空气层厚度, 导致模拟分析的差异), 模拟分析提取值与模拟设定值 (根据文献资料的提供实验值) 的误差在

1.9%~2.6%之间^[6]。误差的存在,可能是因为加热条上的温度不是完全均匀的,存在微小的差别。但这么小的误差是能满足在线检测的要求。

在实验测试中,同样能够得到上述的各个关系曲线和比例关系,然后根据测得的数据便可以提取得到多晶硅薄膜的热导率。

为了分析多晶硅热导率随温度变化的关系,把模拟数据带入到热导率模型中提取得到的热导率数值与设定值进一步进行比较,如图 3.20 所示。提取值与模拟设定值(根据文献资料的提供实验值)的误差在 5.28%之间^[6]。

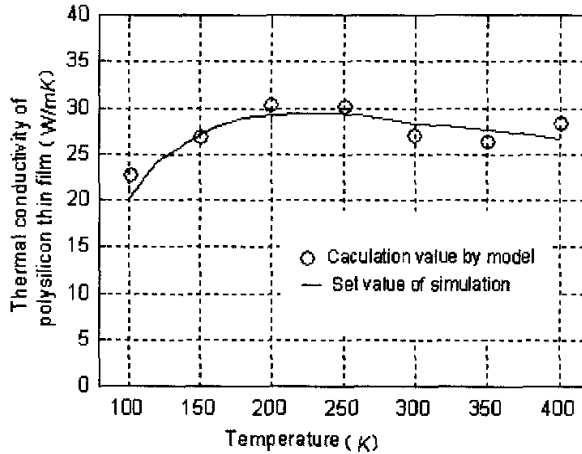


图 3.20 模拟分析得到的多晶硅薄膜热导率与模拟设定值的比较

3.3 Π 型多晶硅薄膜热导率在线测试结构

上文分析了利用两个不同长度悬臂梁散热路径的相互抵消,来提取多晶硅薄膜热导率。在这里,事实上是不能获知对流散热、辐射散热以及向衬底传热对薄膜温度分布和电加热功耗的影响。为了能进一步分析对流、辐射散热以及向衬底传热的影响,在前文研究的基础上,本文设计了另一种 Π 型在线测试结构。该测试方法能够获知对流散热、辐射散热以及向衬底传热的影响,也无需知道空气层、氮化硅层及二氧化硅层的热导率与厚度,这对分析其他表面器件的热电特性具有较大的实际意义。该测试方法能随表面微机械器件制作工艺加工制作,具有结构简单、测试方便、测试精度较高等特点。

3.3.1 测试结构设计与测试原理

图 3.21 和图 3.22 是本文设计的表面加工多晶硅薄膜热导率 Π 型在线测试结构的三维视图和剖视图。由于该测试结构主要是分析参考结构传热特性,根据参考结构的形状,也为了和前文测试结构区分和阐述方便,将其命名为 Π 型多晶硅薄膜热导率测试结构^{[8][19]}。

1. 结构特点

整个测试结构由两个结构组成:一个是中间不含多晶硅悬臂梁的参考结构和中间具有多晶硅悬臂梁的测试结构。参考结构和测试结构中测量条、加热条及其引线部分的尺寸完全一致,且加热条的宽度与测试结构中间悬臂梁的宽度相同。

在两个结构的测量条上淀积有一层铝膜。由于铝的电阻率远远小于多晶硅薄膜,因而加热条的电阻就远远大于测量条的电阻值,当通过测量条加热条两端的电压降时,由于测量条上寄生热电

阻产生的电压降就可以忽略不计，从而大大提高了加热条电压测量的精确度。

在图 3.21 的测试阵列中 A、B、C 和 D 分别表示锚区的铝压焊块，用于施加电压、测量电流或电压，即在结构的 A、D 端施加电压、测量加热电流，在结构的 B、C 端测量加热条上的电压降。

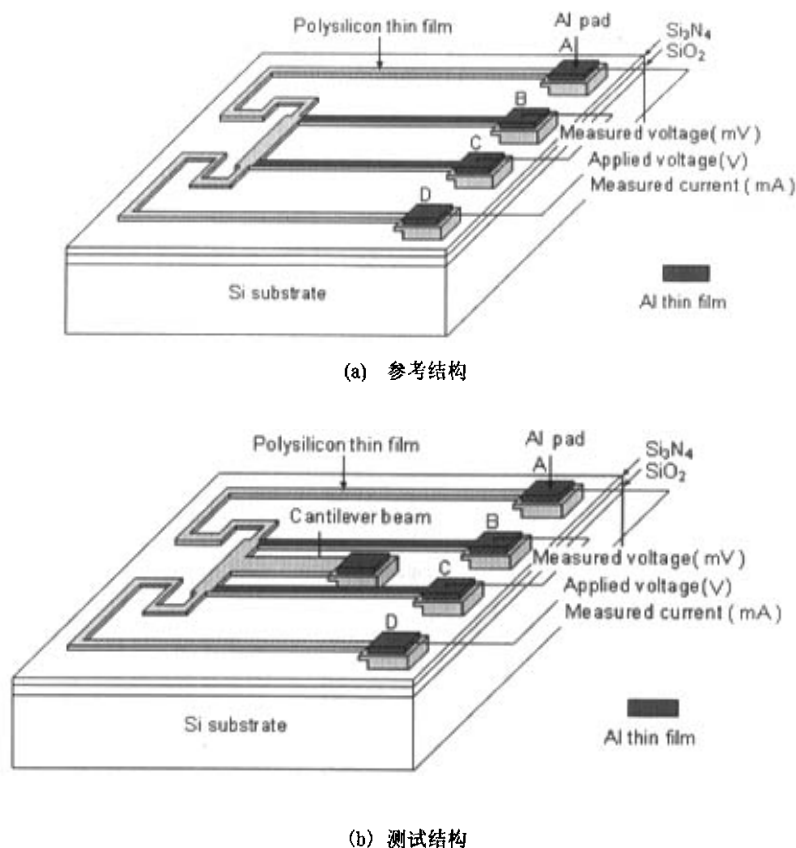


图 3.21 多晶硅薄膜热导率 Π 型在线测试结构三维视图

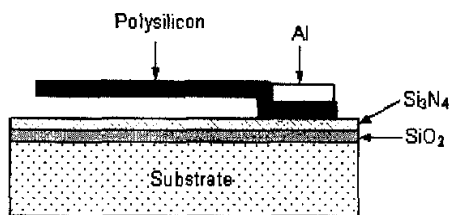


图 3.22 测试结构剖视图

2. 该测试结构与前文测试结构的区别

在测试结构和参考结构中，悬臂梁的宽度与加热条宽度必须相同，由于只需两个结构组成测试阵列，从而减小了测试工作量。该测试方法不是利用前文散热路径相互抵消的办法，而是通过分析加热条自身的传热特性，来获知对流散热、辐射散热以及向衬底传热对结构热电分析时的影响。

3. 测试结构的设计原理

(1) 设计尺寸一致的加热条及其引线 and 测量条，是为了使得测试结构和参考结构中测量条、加热条及其引线部分的总传热系数相同。因而可以通过分析参考结构中的总传热系数，来得到测试结构

中难以得到的加热条及其引线和测量条部分的传热系数,用 G_R 表示。而测试结构的总传热系数 G_t 与 G_R 的差,就是测试结构中悬臂梁的传热系数 G_B (理论分析见下文)。

(2) 设计加热条的宽度与悬臂梁的宽度相同,使得参考结构中加热条和测试结构中悬臂梁具有相同的等效散热系数,用 G_A 表示,它包含了对流、辐射散热和向衬底的传热,从而可以通过分析参考结构中加热条的传热特性,来得到测试结构中悬臂梁的等效散热系数 G_A 值。

• 该测试结构阵列的加工制作工艺与前文相同,在此不再赘述。

4. 测试方法与步骤

测试时也只需把测试结构芯片直接置放在实验室常用的探针台上,便可以在自然环境下进行测量。需要获取的测量值有:施加电压、加热电流,加热条上的电压降以及结构的几何尺寸。尽管提取多晶硅薄膜热导率的原理存在很大区别,但其测试方法和测试条件与前文相同。其测试步骤如下:

① 确定多晶硅电阻的温度系数,从而可以通过测量电阻变化量来获取加热条上的温度变化量。

② 在参考结构加热条引线的 A、D 两端施加电压,在整个结构中会产生温度分布。通过加热条引线两端测得加热电流,通过测量条 B、C 两端测得参考结构中加热条上的电压降。通过一系列的实验测量分别描述出参考结构中下列特性关系:加热条上的电压降与加热电流的特性关系,即 $V_{measured} - I_{measured}$ 关系曲线,施加电压与加热电流的特性关系,即 $V_{applied} - I_{measured}$ 关系曲线,并进一步描述出加热功率与加热条温度变化量之间的关系,以及加热条自身热功耗与加热条温度变化量的关系。从而能够得到参考结构中的总传热系数 G_R 的值和等效散热系数 G_A 的值。

③ 同理,在测试结构中的加热条两端施加电压,在整个结构中会产生温度分布。通过加热条引线两端测得加热电流,通过测量条两端测得加热条上的电压降。通过一系列的实验测量并描述出测试结构中施加电压与加热电流的特性关系,即 $V_{applied} - I_{measured}$ 特性关系,以及加热条上的电压降与加热电流的特性关系,即 $V_{measured} - I_{measured}$ 特性关系,从而得到测试结构中总传热系数 G_t 的值。得到了上述测量值,便可以根据建立的模型提取出多晶硅薄膜的热导率。

3.3.2 热电分析与热导率模型

在参考结构中,总传热方程是:

$$P_R = G_R \Delta T_R \quad (3-23)$$

则参考结构中的总传热系数可以表示为:

$$G_R = \frac{P_R}{\Delta T_R} \quad (3-24)$$

式中: P_R 表示参考结构的加热功率,即施加电压与电流的乘积; G_R 表示参考结构的总传热系数。由于测试结构中,除中间悬臂梁外其他部分的几何尺寸与参考结构完全一致,因此测试结构与参考结构相同部分的传热系数有与之相同的值; $\Delta T_R = T_R - T_0$, T_R 是参考结构加热条的温度, T_0 是环

境温度也就是初始温度。

在测试结构中，总的能量与传热方程可以表示为：

$$P_i = P_R' + P_B = G_R \Delta T_i + G_B \Delta T_i \quad (3-25)$$

从而得到测试结构中悬臂梁的传热系数是：

$$G_B = G_i - G_R = \frac{P_i}{\Delta T_i} - G_R \quad (3-26)$$

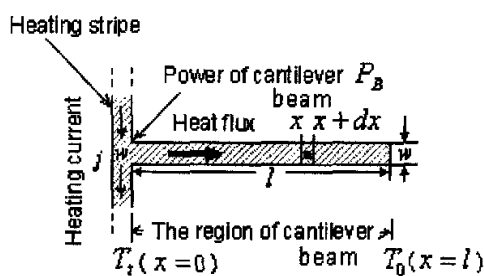
式中： P_i 是测试结构的加热功率，即施加电压与测量电流的乘积， P_B 是测试结构中流入中间悬臂梁

的热量， P_R' 是测试结构中加热条及其引线和测量条上消耗的热量， G_i 表示测试结构的总传热系数，

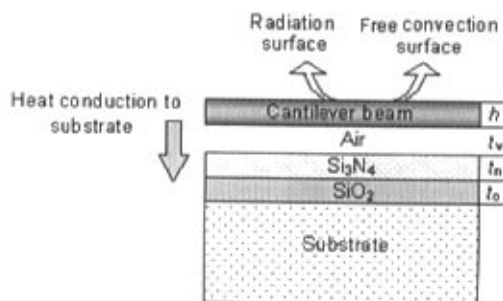
G_B 表示测试结构中悬臂梁的传热系数， $\Delta T_i = T_i - T_0$ ， T_i 是测试结构中加热条的温度。

1. 测试结构中悬臂梁区域的传热分析

图 3.23 是测试结构中悬臂梁的传热模型示意图。由于薄膜的长度远远大于薄膜的宽度和厚度，在薄膜宽度和厚度方向上可以看作没有温度梯度，因此可以利用一维稳态傅里叶导热定律来建立传热方程^[8]。在这里有与前文相似的基本热学分析。



(a) 悬臂梁上的传导导热



(b) 自然对流、辐射及向衬底的传热

图 3.23 测试结构中间悬臂梁的传热模型示意图

同上文相同，先考察悬臂梁上微元体单位时间内的热流控制项（同理，在悬臂梁上只有热流而没有加热电流通过）：

(1) 流入微元体的热量：

$$Q_i = -k_p w h \left[\frac{dT}{dx} \right]_x \quad (3-27)$$

式中： k_p 表示多晶硅薄膜的热导率； w 、 h 分别是中间悬臂梁的宽度和厚度。

(2) 流出微元体的热量：

$$Q_O = -k_p wh \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x+dx} \quad (3-28)$$

(3) 微元体侧面和上表面由于辐射散失的热量：

$$Q_R = (2h + w) \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) dx \quad (3-29)$$

式中： ε 是辐射发射率， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$ 是斯忒藩-波耳兹曼常数； T_0 是环境温度。

(4) 微元体底面向衬底传导的热量：

$$Q_C = \frac{S}{R_T} w (T - T_0) dx \quad (3-30)$$

式中： $S = \frac{h}{w} \left(\frac{2t_v}{h} + 1 \right) + 1$ 是热传导形状系数， $R_T = \frac{t_v}{k_v} + \frac{t_n}{k_n} + \frac{t_o}{k_o}$ 是空气层、氮化硅层和二氧化硅

层的等效热阻^[14]， t_v 、 t_n 、 t_o 和 k_v 、 k_n 、 k_o 分别是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率。

(5) 微元体侧面和上表面由于空气自然对流散失的热量：

$$Q_V = (2h + w) h_c (T - T_0) dx \quad (3-31)$$

式中： h_c 是空气的自然对流系数。

根据能量守恒原理，稳态时微元体的温度保持不变，因此单位时间内流入微元体的热量等于流出微元体散失的热量，即：

$$Q_I = Q_O + Q_R + Q_C + Q_V \quad (3-32)$$

由此得到悬臂梁上的传热方程是（在这里，对辐射散热进行了线性化处理）：

$$k_p wh \frac{d^2 T(x)}{dx^2} - (2h + w) h_c [T(x) - T_0] - 4(2h + w) \varepsilon \sigma T_0^3 [T(x) - T_0] - \frac{S}{R_T} w [T(x) - T_0] = 0 \quad (3-33)$$

上式有边界条件：

$$\begin{cases} T(0) = T_i \\ T(l) = T_0 \end{cases} \quad (3-34)$$

式中： l 是测试结构中悬臂梁的长度。

从而得到测试结构中间悬臂梁的温度分布是：

$$T(x) = T_0 - \frac{(T_i - T_0) \cdot e^{-l\sqrt{G_D}}}{e^{l\sqrt{G_D}} - e^{-l\sqrt{G_D}}} \cdot e^{x\sqrt{G_D}} + \frac{(T_i - T_0) \cdot e^{l\sqrt{G_D}}}{e^{l\sqrt{G_D}} - e^{-l\sqrt{G_D}}} \cdot e^{-x\sqrt{G_D}} \quad (3-35)$$

$$G_A = (2h + w)h_c + 4(2h + w)\varepsilon\sigma T_0^3 + \frac{S}{R_T}w \quad (3-36)$$

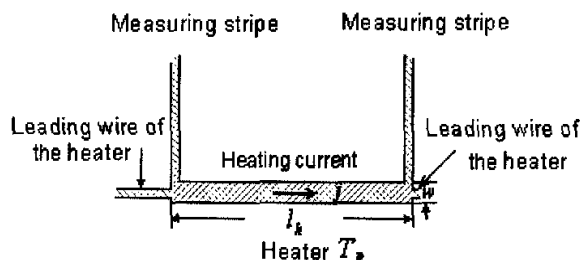
$$G_D = \frac{G_A}{k_p wh} \quad (3-37)$$

根据傅里叶定律 $P_B = -k_p wh \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0}$ ，解方程式 (3-35) 得：

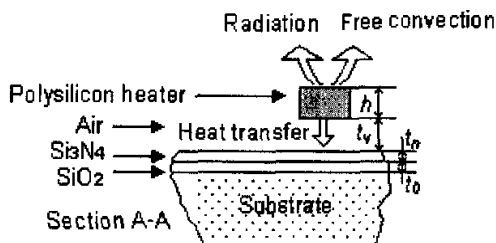
$$G_B = \frac{P_B}{\Delta T_t} = k_p wh \times \left(\frac{e^{\frac{l}{\sqrt{k_p wh}} \sqrt{\frac{G_A}{k_p wh}}} + e^{-\frac{l}{\sqrt{k_p wh}} \sqrt{\frac{G_A}{k_p wh}}}}{e^{\frac{l}{\sqrt{k_p wh}} \sqrt{\frac{G_A}{k_p wh}}} - e^{-\frac{l}{\sqrt{k_p wh}} \sqrt{\frac{G_A}{k_p wh}}}} \right) \times \sqrt{\frac{G_A}{k_p wh}} \quad (3-38)$$

2. 参考结构中加热条部分的传热分析

图 3.24 是参考结构中加热条的传热模型示意图。下面对加热条进行热学分析（需要说明的是，在测量条上是没有加热电流通过的）：



(a) 加热条电流产生热



(b) 自然对流、辐射及向衬底的传热

图 3.24 参考结构中加热条的传热模型示意图

由于在稳态时，加热条上的温度是一致均匀的。根据日前的各种测试方法、理论及本文的模拟分析，再进行结构上的合理设计，加热条上的温度变化是非常小的，因此可以认为加热条上的温度在加热功率不大系统处于热稳态时是均匀分布的。因此加热条上的热电特性可以描述如下：

(1) 加热条电流产生的焦耳热：

$$Q_J = j^2 \rho w h l_h \quad (3-39)$$

式中， ρ 加热条温度为 T_R 时的电阻率， l_h 是加热条的长度， w 、 h 分别是加热条的宽度和厚度，它和测试结构中间悬臂梁的宽度和厚度是相同的。

(2) 加热条侧面和上表面由于辐射散失的热量:

$$Q_R = (2h + w)\varepsilon\sigma_0(T_R^4 - T_0^4)l_h \quad (3-40)$$

(3) 加热条底面向衬底传导的热量:

$$Q_C = \frac{S}{R_T} w(T_R - T_0)l_h \quad (3-41)$$

(4) 加热条侧面和上表面由于空气自然对流散失的热量:

$$Q_V = (2h + w)h_c(T_R - T_0)l_h \quad (3-42)$$

根据能量守恒原理, 在稳态时加热条温度保持不变, 因此加热条产生的能量等于其散失的能量, 即有:

$$Q_J = Q_R + Q_C + Q_V \quad (3-43)$$

由此推导出加热条上的热方程是 (在这里对辐射散热进行了线性化处理^[20]):

$$j^2 \rho w h - (2h + w)h_c \Delta T_R - 4(2h + w)\varepsilon\sigma T_0^3 \Delta T_R - \frac{S}{R_T} w \Delta T_R = 0 \quad (3-44)$$

从而得到:

$$G_A = (2h + w)h_c + 4(2h + w)\varepsilon\sigma T_0^3 + \frac{S}{R_T} w = \frac{j^2 \rho w h}{\Delta T_R} \quad (3-45)$$

上式等效于:

$$G_A = \frac{V_R I_R}{\Delta T_R l_h} = \frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h} \quad (3-46)$$

式中, $P_{Rh} = V_{Rh} I_R$ 是参考结构中测量电压与加热电流的乘积即加热条的热功耗, I_R 是参考结构中的加热电流, V_{Rh} 是参考结构中的加热条的电压降。

3. Π 型在线测试结构多晶硅薄膜热导率模型

根据式 (3-24)、(3-26)、(3-38) 和式 (3-46), 可以得到多晶硅薄膜热导率的热学模型是^[18]:

$$k_p w h \times \left(\frac{e^{\frac{l \sqrt{\frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h k_p w h}}}{1}} + e^{-\frac{l \sqrt{\frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h k_p w h}}}{1}}}{e^{\frac{l \sqrt{\frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h k_p w h}}}{1}} - e^{-\frac{l \sqrt{\frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h k_p w h}}}{1}}} \right) \times \sqrt{\frac{P_{Rh}}{\Delta T_R l_h} \cdot \frac{1}{k_p w h}} = \frac{P_t}{\Delta T_t} - \frac{P_R}{\Delta T_R} \quad (3-47)$$

显然在式 (3-47) 中, 只有多晶硅薄膜热导率 k_p 这一个未知数, 其他参数都是可以通过测量得到的。因此根据此式, 可以提取多晶硅薄膜的热导率。

上式的简约模型是:

$$k_p = \left[\left(\frac{P_t}{\Delta T_t} - \frac{P_R}{\Delta T_R} \right) - \frac{P_{Rh}}{2\Delta T_R} \cdot \frac{l}{l_h} \right] \times \frac{l}{w h} \quad (3-48)$$

当两个结构中加热条的电阻相同时, 它们就具有相同的温度变化量, 从而式 (3-48) 还可以进一步简化。这个结论的确立不仅简化了模型, 也大大减小了测量误差。

3.3.3 有限元模拟分析与模型验证

为了验证结构设计与理论模型的正确性，利用 ANSYSTM 进行了三维有限元电热模拟分析。模拟时同样在两个测试结构的上表面施加空气自然对流系数和辐射散热系数，在这里根据传热学理论把辐射散热系数转换成等效的对流系数^[17]；在结构的下表面施加向衬底传热的等效传热系数。表 3-5 是模拟中使用的参考结构相关参数。

表 3-5 模拟使用的参考结构相关参数

单元 / 参数	长度	宽度	厚度
加热条引线	320 $\mu\text{m} \times 2$	5 μm	2 μm
加热条	80 μm	15 μm	2 μm
测量条	200 μm	10 μm	2 μm
热导率, k_p (设定值)	28.3 W/m·K		
初始电阻率, ρ_0	$1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$		

图 3.25 是 ANSYSTM 三维有限元电热分析参考结构的网格划分示意图。图 3.26 是空气间隙为 3 μm 、施加电压为 5V 时参考结构的温度分布云图。

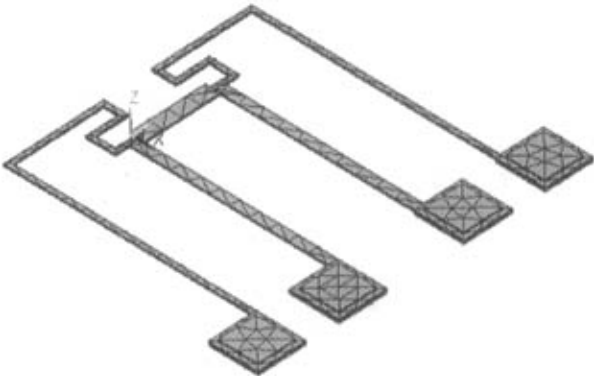


图 3.25 参考结构三维有限元电热分析网格划分

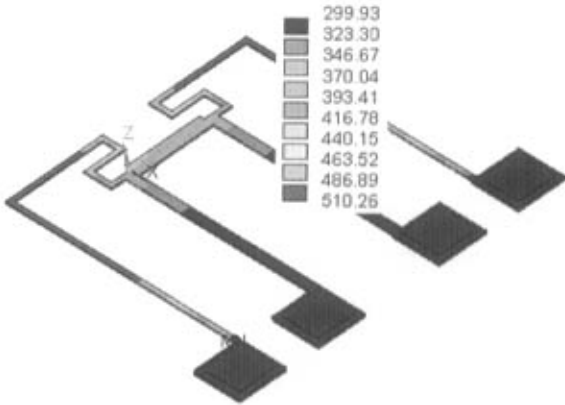


图 3.26 施加电压 5V 时参考结构的温度分布云图: 空气间隙 3 μm

在模拟时，充分考虑了各种传热路径对薄膜梁温度分布的影响，因而这种模拟方法能够反映实际测量的具体情况。模拟时，把加热电压控制在薄膜最高温度点小于 800K 的范围内，同时为了反映实际测量时可能遇到的问题，把加热条的温度变化量控制在有效测量灵敏度范围内。在此不再累述，可参阅前文相关论述。

图 3.27 是在不同空气厚度下模拟得到的参考结构中加热条及其引线的温度分布曲线，图示的中间部分是加热条上的温度分布。可见，加热条上的温度分布在不同的施加电压及不同空气层厚度时，基本是一条水平线，这说明了对于加热条建立的热电模型是合理的，同时也证明了 Π 型在线测试结构多晶硅薄膜热导率模型是正确合理的。

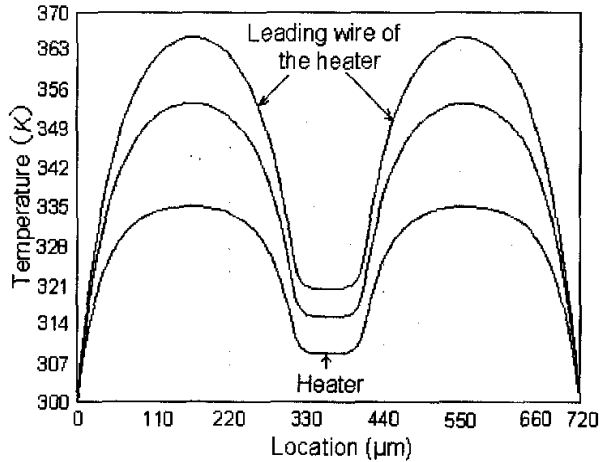


图 3.27 不同空气层厚时加热条及其引线的温度分布曲线
(图示的中间部分是加热条上的温度分布)

在不同空气层厚度下，模拟得到了参考结构中施加电压与测量电流的关系，如图 3.28 所示。图 3.29 是参考结构中加热条上测得电压与加热电流的关系。由此，可以得出加热功率与加热条温度变化量的关系，如图 3.30 所示。图 3.31 是模拟得到的参考结构中加热条热功耗与加热条温度变化量的关系。

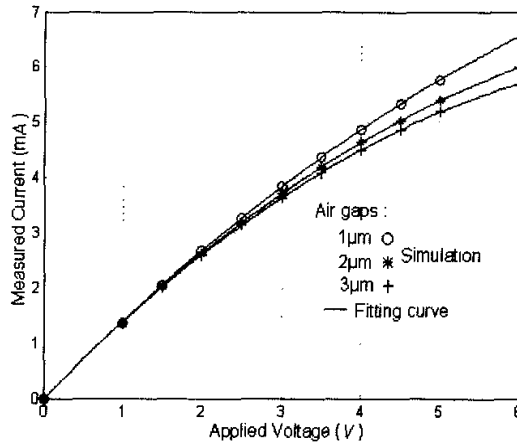


图 3.28 参考结构中不同空气层厚时，施加电压与测量电流的关系

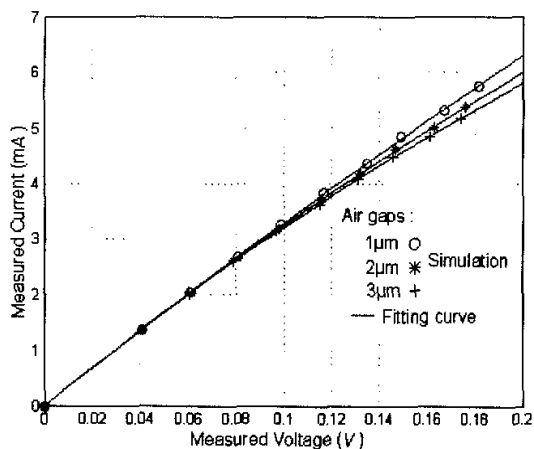


图 3.29 参考结构中不同空气层厚时, 测量电压与测量电流的关系

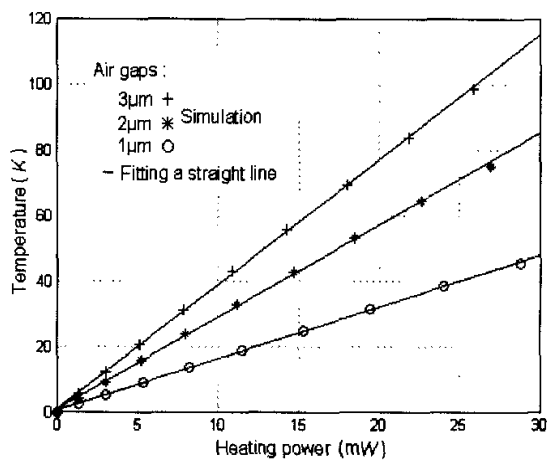


图 3.30 参考结构中加热功率与加热条温度变化量的关系

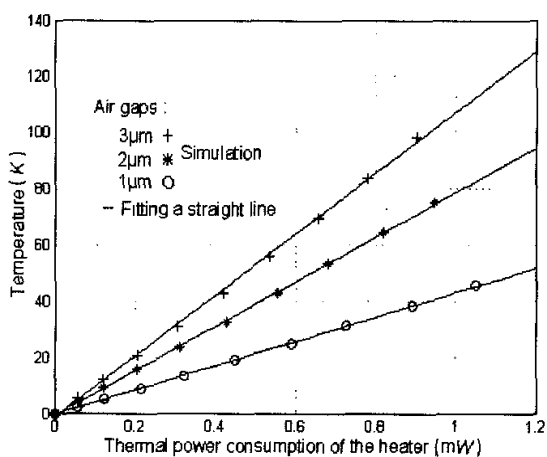


图 3.31 参考结构中加热条热功耗与加热条温度变化量的关系

我们把模拟分析得到的等效传热系数与模拟设定值进行比较，如表 3-6 所示，表中同时给出了模拟分析的误差。从表中可以看出，不同空气层厚度时，模拟得到的等效散热系数与模拟设定值（根据理论文献计算得到的数据^[14]）之间的误差分别是 3.47%、2.62%和 2.45%，因此模型式（3-46）建立是正确合理的。事实上，式（3-46）是正确的，也就说明了热导率模型式（3-47）或简约模型式（3-48）是正确合理的。

表 3-6 模拟分析得到的等效散热系数与模拟设定值的比较

空气间隙	加热条: 长度 80μm、宽度 15μm、厚度 2μm		
	设定值（施加的面负载）	模拟分析提取值	误差
3μm	$1.31769 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	$1.35 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	2.45%
2μm	$1.79708 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	$1.75 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	2.62%
1μm	$3.21143 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	$3.10 \times 10^4 \text{ W/m}^2 \cdot K$	3.47%

下面，再进一步来验证多晶硅薄膜热导率模型的正确性。表 3-7 是模拟使用的测试结构相关参数，从表中可以看出，测试结构中测量条、加热条及其引线部分的尺寸与参考结构完全一致，且加热条的宽度与测试结构中间悬臂梁的宽度相同。

表 3-7 模拟使用的测试结构相关参数

单元 / 参数	长度	宽度	厚度
加热条引线	320μm×2	5μm	2μm
加热条	80 μm	15μm	2μm
测量条	200 μm	10μm	2μm
测试结构中的悬臂梁	150 μm	15μm	2μm
热导率, k_p （模拟设定值）	28.3 W/m·K		
初始电阻率, ρ_0	$1.1 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$		

图 3.32 是 ANSYS™ 三维有限元电热分析测试结构的网格划分示意图。图 3.33 是模拟得到的一定加热功率下测试结构的温度分布云图。

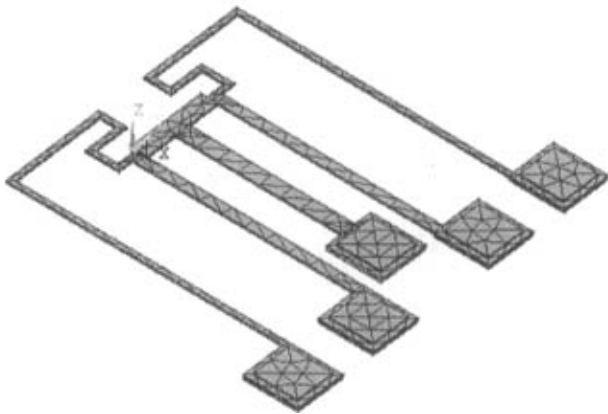


图 3.32 测试结构三维有限元电热分析网格划分

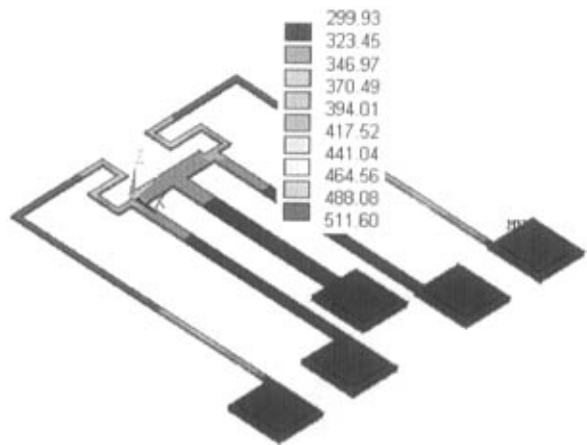


图 3.33 施加电压 5V 时测试结构的温度分布云图: 空气间隙 3 μ m

在不同空气层厚度下, 模拟得到的测试结构中施加电压与加热电流的关系, 如图 3.34 所示; 图 3.35 是测试结构中加热条上测量电压与加热电流的关系。根据上述分析, 我们得到了测试结构中加热功率与加热条温度变化量的关系, 如图 3.36 所示。

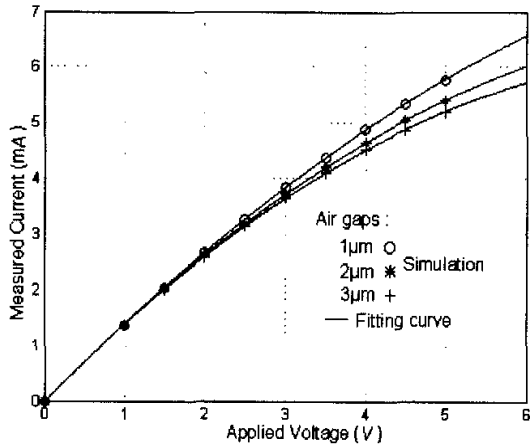


图 3.34 测试结构中不同空气层厚时, 施加电压与测量电流的关系

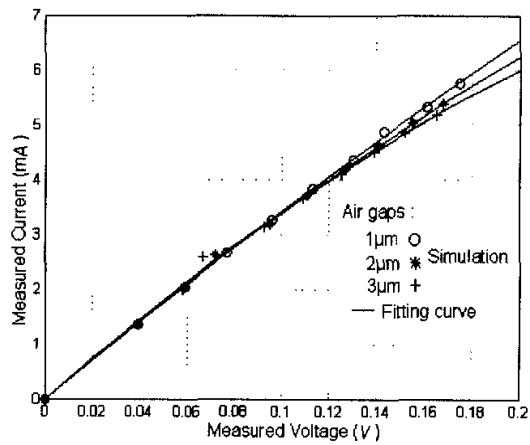


图 3.35 测试结构中不同空气层厚时, 测量电压与测量电流的关系

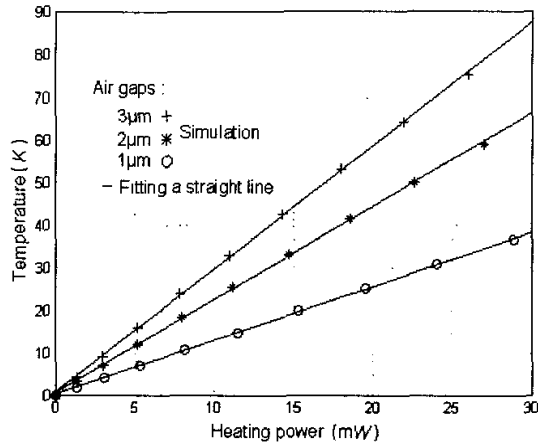


图 3.36 测试结构中加热功率与加热条温度变化量的关系

在模拟分析时，同样综合考虑了实际测量时各种可能因素如空气层间隙，对流、辐射散热以及向衬底传热等因素对温度分布、测量电压及测量电流的影响，因此这种模拟分析得到的结论和实际测量是相符的，可以反映实际测量的真实情况。

根据上述对测试阵列中参考结构与测试结构的热电模拟分析，我们可以得到了热导率模型中所需的各个参量值，把模拟数据进一步带入到式 (3-47) 或 (3-48) 进行计算，便可以提取得到多晶硅薄膜的热导率数值，然后把计算得到的值与模拟设定数值（根据文献资料的提供实验值）进行比较，来验证模型建立的正确性。显然，这种模拟验证的方法是合理的，因为在具体实际测试中我们同样能够得到上述的各个关系曲线和比例关系，然后根据测得的数据便可以提取得到多晶硅薄膜的热导率。模拟分析时，我们首先把热导率设定为常数，进行稳态传热分析。然后再把热导率设定为随温度变化的变量，进一步分析热导率随温度的变化关系。

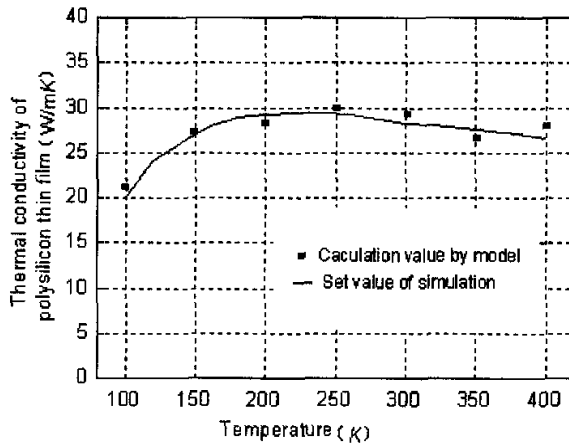


图 3.37 模拟分析得到的多晶硅薄膜热导率与模拟设定值的比较

把根据上述模拟分析和数据处理提取得到的多晶硅薄膜热导率与软件模拟时设定的热导率参数值（即文献中的实验值^[11]）进行了比较，如图 3.37 所示。可见，根据模拟分析提取得到的热导率值与模拟设定值（根据文献资料的提供实验值）同样能较好的吻合，误差在小于 4.75% 的范围内^{[18][19]}。

3.4 结论

在本文中提出了两种不同的多晶硅薄膜热导率的测试结构。论文给出热导率解析模型，给出了测试原理、结构制作工艺和测试方法，并利用 ANSYSTM 有限元热电分析模拟验证了热学模型和测试结构设计的是合理、正确的，说明了本文提出的测试方法是可行的。

模型中综合考虑了对流散热、辐射散热以及向衬底传热的影响，而无需知道空气层、氮化硅层及二氧化硅层的热导率与厚度等其他参数。一种采用散热热路的相互抵消，另一种是采用间接测量的方法来获取悬臂梁的等效散热系数。

本文中提出的多晶硅薄膜热导率的测试方法，对分析其它器件的热电特性具有较大的实际意义，解决了其它测试方法存在的测试结构复杂、边缘效应及需要的真空测量环境等不足。测试结构可随表面微机械器件制作工艺加工制作，无需附加工艺，测试简单可靠。因此，本文提出的测试结构及其测试方法能实现表面加工多晶硅薄膜热导率的在线测试和监控器件制作工艺，可以应用于实际工艺线。

第四章 多晶硅薄膜电阻温度系数及其他热学参数的在线提取

在微执行器、微传感器等 MEMS 器件中,多晶硅薄膜电阻温度效应决定着能否有效分析这些器件的热电性能^[11-13]。在薄膜材料热学参数如热导率、热膨胀系数、热扩散系数等的测量中^{[4]-[6]},电加热及热敏电阻测温法被广泛应用,但温度是不能直接测量的,因而如何根据多晶硅薄膜电阻温度效应来获取对应阻值的温度,就直接影响到对这些参数的提取。

在以往薄膜热导率测试中^{[7]-[10]},提取电阻温度系数的方法是把测试结构置放在硅油或在真空环境下,通过在不同温度点下测出对应的电阻值,来确定材料的电阻温度系数,根据提取的电阻温度系数来确定温度和电阻的变化关系。显然,这种测温方法不适用于多晶硅薄膜热导率在线测试中对电阻温度系数的需求。

前文设计和分析了两种不同的提取多晶硅薄膜热导率测试结构及其测试方法。文中给出了热导率模型,进行了有限元热电模拟分析,并验证了模型建立是正确的,说明了这两种在线提取多晶硅薄膜热导率方法都是可行适用的。在模拟分析时,多晶硅电阻温度系数是参考理论文献值,温度可以直接根据模拟分析得到,而温度系数的数值大小并不影响模拟分析验证热导率模型。但在实验测试时,要提取热导率就必须先知道多晶硅电阻的温度系数,然后才能利用电阻温度效应,通过测量加热条电阻变化量来获取对应的温度变化量。

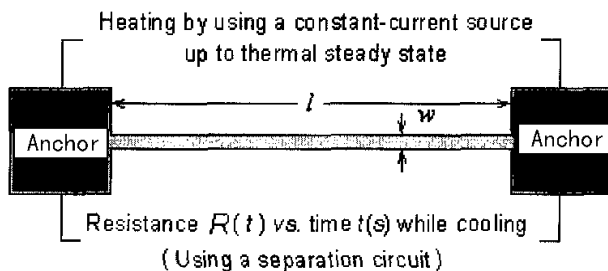
本章提出了一种在线提取表面加工多晶硅电阻温度系数的测量方法。模型及模拟分析表明该方法也能够用于多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试^[11]。

4.1 测试结构设计与测试原理

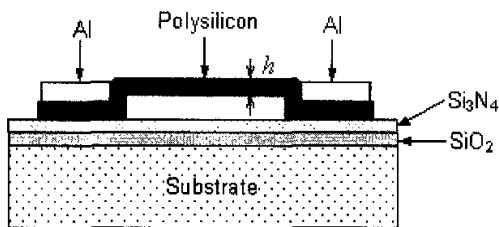
多晶硅薄膜电阻率随工艺条件如薄膜淀积方式、淀积温度、掺杂浓度及掺杂类型等的不同存在较大的区别。相应的,电阻随温度的变化关系也存在一定差异,呈现出不同的温度效应,有的早现正温度效应^{[12][13]},有的却呈现出负温度效应^[14],因而在分析任何器件的热电特性时,都必须首先分析电阻的热敏特性。

本课题研究的在线测试多晶硅薄膜热导率,使用热敏电阻测温法。由于多晶硅电阻温度效应的差异性,分析多晶硅热敏电阻的温度效应显得尤为重要,决定着能否有效提取多晶硅薄膜的热导率。

图 4.1 是本文提出的表面加工多晶硅薄膜电阻温度系数在线提取双端固支梁测试结构。该双端固支梁测试结构实质上是一个非常简单的表面加工多晶硅薄膜电阻条。可随前文的热导率测试结构或其他表面微机械器件制作工艺加工制作。



(a) 测试结构顶视图



(b) 测试结构剖面图

图 4.1 多晶硅电阻温度系数双端固支梁在线提取结构

4.1.1 基本测试原理及方法

提取电阻温度系数的基本原理及测试方法是：通过双端固支梁两端施加恒流至热稳态，即梁电阻不再变化、处于相对稳定时，然后断开电流源让加热条冷却，同时利用一个分离电路，通过固支梁两端测量薄膜梁冷却过程中电阻随时间的变化关系。然后通过 Matlab 指数拟合分析，便可以提取出电阻温度系数。

4.1.2 结构制作工艺

在线提取多晶硅电阻温度系数测试结构的制作工艺步骤简述如下：

- ① 在硅衬底上热氧化一层二氧化硅；
- ② 淀积氮化硅；
- ③ 淀积牺牲层（PSG），光刻形成锚区；
- ④ 淀积多晶硅薄膜、掺杂、光刻多晶硅层，形成测试结构图形；
- ⑤ 淀积铝、反刻铝，形成铝压焊块；
- ⑥ 牺牲层腐蚀，结构释放。

可见，其加工制作可随前章提出的热导率测试结构或其他表面微机械器件制作工艺加工制作。经过相同制作工艺过程，该双端固支梁多晶硅电阻温度系数在线提取结构的电学特性及热学特性与多晶硅薄膜热导率测试结构的多晶硅薄膜梁相同。因此可以通过分析其电阻温度效应，来提取前文热导率在线测试结构中的多晶硅薄膜电阻温度系数。

4.2 瞬态冷却传热分析

4.2.1 在线提取电阻温度系数的热电模型

通过双端固支梁两端施加恒流至热稳态，即梁的电阻不再变化而处于相对稳定时，然后断开电流源让加热条冷却，此时双端固支梁的瞬态冷却传热方程可以表示为：

$$\frac{1}{a_p} \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - G_D [T(x,t) - T_\infty] \quad (4-1)$$

$$\text{式中: } G_D = \frac{G_A}{k_p w h} = \frac{(2h+w)h_c + 4(2h+w)\varepsilon\sigma T_0^3 + \frac{S}{R_T} w}{k_p w h}, \quad G_A \text{ 表示双端固支梁的等效传热系数,}$$

它包括对流散热、辐射散热以及向衬底的传热, h_c 表示空气自然对流传热系数, ε 是梁的辐射发射率, σ 是斯忒藩-波耳兹曼常数, S 是热传导形状系数, R_f 是空气层、氮化硅层和二氧化硅层的等效热阻, 它与空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率有关^[15]; a_p 是多晶硅薄膜的热扩散系数; w 、 h 分别表示梁的宽度与厚度; k_p 是多晶硅薄膜的热导率; T_∞ 是环境温度。

冷却时, 瞬态传热的初始条件与边界条件是:

$$\begin{cases} T(x=0, t) = T_\infty \\ T(x=L, t) = T_\infty \\ T(x, 0) = \varphi(x) \end{cases} \quad (4-2)$$

式中: L 是梁的长度, $\varphi(x)$ 表示冷却前即热稳态时的温度分布, 它是一个与时间无关的量。值得提出的是, 从下文的分析中可知, 在实验测试时我们无需知道 $\varphi(x)$ 的具体形式。

令 $T(x, t) = u(x, t) + T_\infty$, 代入方程, 则偏微分方程 (4-1) 和其初始条件与边界条件式 (4-2) 变化为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = a_p \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} - a_p G_D u(x, t) \\ u(x=0, t) = 0 \\ u(x=L, t) = 0 \\ u(x, 0) = \varphi(x) - T_\infty \end{cases} \quad (4-3)$$

根据分离变量法解偏微分方程 (4-3), 得到梁的瞬态温度分布是:

$$T(x, t) = T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) e^{-[a_p G_D + a_p (n\pi/L)^2]t} \quad (4-4)$$

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L [\varphi(x) - T_\infty] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \quad (4-5)$$

在这里, B_n 是一个与时间、位置无关的常数。

则梁的平均温度随时间的变化关系可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{T}(t) &= \frac{1}{L} \int_0^L T(x, t) dx = T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n] B_n}{n\pi} e^{-[a_p G_D + a_p (n\pi/L)^2]t} \\ &= T_\infty + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{[1 - (-1)^n] B_n}{n\pi} e^{-\frac{t}{\tau_n}} \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$\tau_n = \frac{L^2}{a_p [G_D L^2 + n\pi^2]} \quad (4-7)$$

式中: τ_n 表示温度衰减时间常数。

同理，可以提取出未知参数 G_D ，用来验证忽略高阶项的误差分析，即：

$$G_D = \frac{\pi^2 \left(\frac{\tau_1}{L_2^2} - \frac{\tau_2}{L_1^2} \right)}{\tau_2 - \tau_1} \quad (4-8)$$

注意到在求和中，只有奇数项有效，当时间足够长时，求和中的高阶特性函数项可以忽略不计，即 n 可取 1，则悬臂梁的平均温度随时间的变化关系可以简化为：

$$\bar{T}(t) = \frac{1}{L} \int_0^L T(x, t) dx = T_\infty + ce^{-\frac{t}{\tau}}, \quad t > \tau_3 \quad (4-9)$$

$$\tau = \frac{L^2}{a_p [G_D L^2 + \pi^2]} \quad (4-10)$$

$$c = \frac{2B_1}{\pi} = \frac{4}{\pi L} \int_0^L [\varphi(x) - T_\infty] \sin\left(\frac{\pi}{L}x\right) dx \quad (4-11)$$

式中： τ 表示一阶温度衰减时间常数，在这里 c 是一个与时间、位置无关的常数项。式 (4-9) 与牛顿冷却定律相吻合^[16]。

因此，双端固支梁冷却过程中，其电阻随时间的变化关系可以表示为：

$$R(t) = R_\infty \left\{ 1 + a_1 [\bar{T}(t) - T_\infty] + a_2 [\bar{T}(t) - T_\infty]^2 \right\} = R_\infty \left[1 + a_1 ce^{-\frac{t}{\tau}} + a_2 c^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} \right] \quad (4-12)$$

式中： R_∞ 是对应初始温度 T_∞ 的电阻， $a_1 (K^{-1})$ 表示线性温度系数项， $a_2 (K^{-2})$ 表示二次温度系数项。

上式可以改写为：

$$R(t) = R_\infty [1 + c_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + c_2 e^{-\frac{2t}{\tau}}] \quad (4-13)$$

式中定义： $c_1 = a_1 c$ ， $c_2 = a_2 c^2$ 。

在热稳态即冷却时间 $t = 0$ 时，双端固支梁的电阻为：

$$R(0) = R_\infty [1 + a_1 c + a_2 c^2] \quad (4-14)$$

式中： $R(0)$ 表示冷却开始前即热稳态时的电阻。

实验测试时，通过测量得到双端固支梁冷却过程中电阻与时间的变化关系，然后利用理论公式 (4-13) 对实验数据进行拟合分析，便可以提取出 c_1 、 c_2 以及时间常数项 τ 的值，进而根据 c_1 、 c_2 的定义和式 (4-14) 计算得到多晶硅电阻的线性温度系数项 a_1 和二次温度系数项 a_2 的值。

4.2.2 电阻温度系数模型的误差分析

为了分析式 (4-6) 中忽略求和高阶项的合理性，用恒定加热功率加热悬臂梁来分析悬臂梁上的稳态时温度分布，把分析得到的温度分布 $\varphi(x)$ 代入式 (4-5) 中进行积分，从而可以得到下列比例

关系（在求和中只有奇数项有效，偶数项系数均为 0）：

$$\frac{C_n}{C_1} = \frac{\frac{[1-(-1)^n]B_n}{n\pi}}{\frac{[1-(-1)]B_1}{\pi}} = \frac{\frac{2}{n\pi} \times \left(\frac{1}{n\pi} - \frac{n\pi}{(n\pi)^2 + G_D L^2} \right)}{\frac{2}{\pi} \times \left(\frac{1}{\pi} - \frac{\pi}{\pi^2 + G_D L^2} \right)} \quad (4-15)$$

这个比例关系与加热功率的大小无关。把下文表 4-1 中的典型参数值带入式(4-15)，得到 C_3/C_1 的值是：

$$\left\{ \frac{C_3}{C_1} \right\}_{l=200\mu m, w=10\mu m, h=2\mu m} \approx 2.56\% \quad (4-16)$$

根据式（4-15），进一步分析有：

$$\frac{C_1}{\sum_{n=1}^{\infty} C_n} \approx 97.1\% \quad (4-17)$$

根据上述分析，同时注意到第三项及其之后各项的时间常数项也小于第一项的时间常数，因此忽略求和中高阶项的误差很小，说明式（4-9）对 n 取 1 是合理的。在这里，我们使用了 G_D 中各参数的典型值进行忽略高阶项的误差分析。在下文的 Matlab 拟合分析中，该结论可以进一步得到验证。

4.3 瞬态电热模拟分析与验证

为了验证模型建立的正确性和这种提取温度系数方法的可行性，利用 ANSYSTM 进行了三维有限元瞬态电热分析。

模拟时首先进行稳态分析，得到一定施加电压下双端固支梁的温度分布，然后再进行瞬态冷却分析，提取出电阻随时间的衰减关系，得到冷却过程中电阻随时间变化的一系列值，利用理论模型中电阻随时间变化的指数关系式进行拟合分析便能提取出 c_1 、 c_2 的值，然后根据其定义和式（4-14）

来计算得到多晶硅电阻的线性温度系数项 a_1 和二次温度系数项 a_2 的值。因而，这种模拟分析的方法能反映实验测试的真实情况。

4.3.1 瞬态冷却分析与电阻温度系数模型的验证

图 4.2 是电阻温度系数在线提取结构的热电分析网格划分示意图（分析时选用热电分析耦合场 Solid98 单元），首先进行稳态电热分析得到冷却时的初始温度分布和初始电阻（即热稳态时的电阻）。表 4-1 是模拟分析使用的双端固支梁结构参数，模拟使用的结构几何尺寸与后文实际制作的结构尺寸相同。表 4-2 是计算等效传热系数使用的典型参数^[12]。

表 4-1 模拟分析使用的双端固支梁结构参数

	长度	宽度	厚度
双端固支梁 1	200 μm	10 μm	2 μm
热导率, k (设定值)	28.3 W/m·K		
初始电阻率, ρ_0	$2.324 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$		
多晶硅薄膜密度, ρ	2.3 g cm $^{-3}$		
多晶硅薄膜热容 c_p	0.77 J g $^{-1}$ K $^{-1}$		

表 4-2 等效传热系数使用的典型参数

材料 \ 参数	热导率	厚度
Air	0.026 W/mK	3 μm
Si $_3$ N $_4$	2.24 W/mK	0.6 μm
SiO $_2$	1.4 W/mK	1.0 μm



图 4.2 电阻温度系数在线提取双端固支梁结构的热电分析网格划分 (提取结构 1)

图 4.3 是对应施加电压即冷却分析时双端固支梁稳态温度分布曲线, 该温度分布也是瞬态冷却分析时的初始温度分布。在模拟分析时, 是能够得到冷却瞬态分析的初始温度分布, 并可以求得其平均温度增量, 这在实际测量时是不能得到的。

注意到这个冷却初始温度分布函数经对位置 x 积分后归入了常数项 c , 见式 (4-5) 与式 (4-11)。这个常数项可以根据电阻随时间的变换关系曲线的拟合分析来提取, 因此, 具体的温度分布我们无需关心。也就是说, 无需进行稳态传热的理论分析来得到热稳态时梁的温度分布解析关系式, 从而简化了热电分析过程, 也避开了稳态传热分析二阶微分方程中的温度平方项。

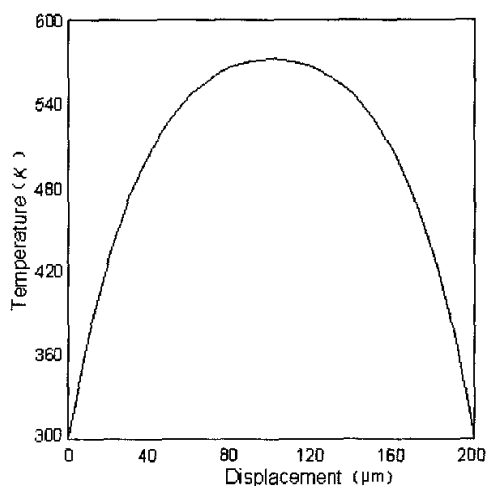


图 4.3 模拟分析得到的热稳态时双端固支梁的冷却初始温度分布

双端固支梁加热前的电阻，即对应初始温度 T_{∞} 的电阻是：

$$R_{\infty} = \rho_0 \frac{L}{wh} = 2.325 K \Omega \quad (4-18)$$

冷却前即热稳态时双端固支梁的电阻是：

$$R(0) = \frac{V_{\text{applied}}}{I_{\text{measured}}} = \frac{5V}{3.2244mA} \approx 1.5507 K \Omega \quad (4-19)$$

式中： V_{applied} 和 I_{measured} 分别表示冷却前即热稳态时所对应的施加电压和测量电流， $R(0)$ 表示对应冷却初始温度的稳态电阻值，即冷却分析开始时双端固支梁的电阻值。

比较双端固支梁稳态温度分布时即冷却初始电阻与对应初始温度 T_{∞} 的电阻，有：

$$R(0) < R_{\infty} \quad (4-20)$$

可以看出，多晶硅电阻表现出负温度效应。这和相关理论和模拟设定是相吻合的^{[11][12][13]}。

需要说明的是：

不管是正温度效应还是负温度效应，本文提出的这种提取温度系数的方法都是适用可行的，这点才是本文最关心的问题。如果模拟分析正温度效应，那么在设定薄膜参数时，电阻率就应该设置成随温度的增加而增加。而在实际测试中就不存在这个问题，因为在实验测试中，我们可以直接测得梁冷却时电阻随时间的变化关系，实验测试比模拟分析要简单。

在实验测试时，发现表面加工多晶硅薄膜其电阻随施加电压增大而减小，也就是说，多晶硅电阻随温度的增加而减小，电阻呈现负温度效应。因此，在模拟分析时，设定多晶硅薄膜电阻为负温度效应。显然，对于正温度效应，这种模拟分析方法仍然是适用的、可行的。模拟分析的目标是根据建立的理论模型能否提取出相关参数，且提取的参数与理论设定值之间是否能较好的吻合。

下面对双端固支梁进行瞬态冷却分析，来得到电阻随时间的变化关系。冷却分析时，首先要断开原施加电压，因此，在双端固支梁上没有加热电流，模拟分析的过程与实验测试一致。分析时，不考虑测试电流自加热对电阻变化的影响，在下文中再来分析测试电流自加热对电阻测量的影响。

图 4.4 是一定施加电压下双端固支梁的稳态温度分布即冷却初始温度分布云图。这个温度分布也就是进行梁冷却分析的初始温度分布。图 4.5 是利用 ANSYSTM 进行冷却分析得到的温度随时间的变化关系。

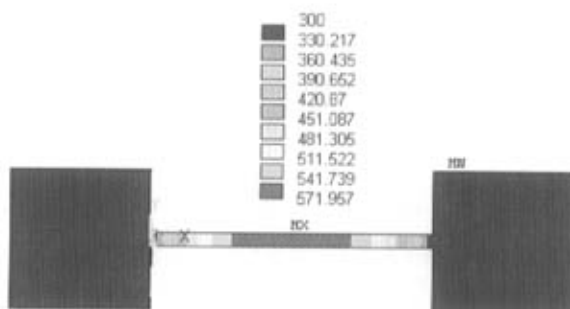


图 4.4 一定施加电压 (4.0V) 时的稳态温度分布即冷却初始温度分布: 空气间隙 $3\mu\text{m}$

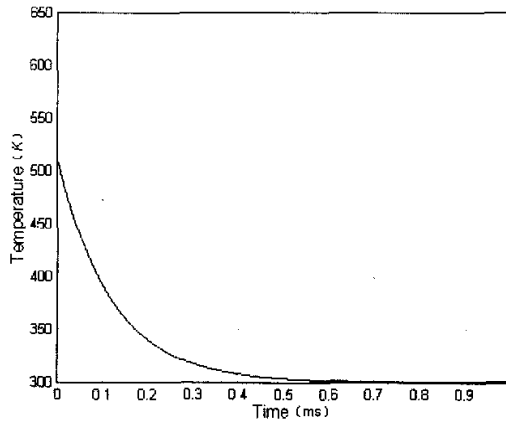


图 4.5 模拟分析得到的平均温度随时间的变化关系

得到了温度随时间的变化关系, 由于 ANSYS 热电模拟自身的特点, 还需要通过热电稳态分析来得到对应平均温度的电阻。冷却分析时, 任意时刻对应的温度分布通过模拟是可以知道的, 在稳态分析时, 找到这个温度分布, 便可以知道对应的时刻, 显然, 知道对应时刻的温度分布, 便可以提取出该时刻对应的电阻值, 从而可以描述出梁电阻随时间的变化关系, 如图 4.6 所示。

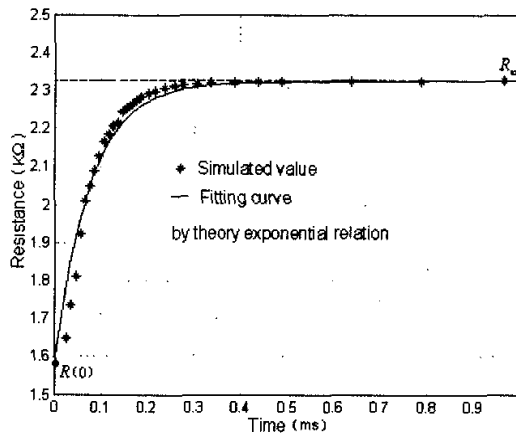


图 4.6 模拟和拟合分析得到的电阻随时间的变化关系

根据模拟得到了电阻随时间变化的一系列对应值, 然后利用 Matlab 二次指数关系进行拟合分析, 便可以提取出理论关系式 (4-13) 中的两个常数项, 进而得到多晶硅电阻的线性温度系数项 a_1 、二次温度系数项 a_2 , 如表 4-3 所示。图 4.7 是根据模拟分析提取得到的温度系数描述出的电阻和温度的关系。从图中可以看出, 在温度变化不大时, 电阻和温度基本是线性关系, 我们可以进一步拟合分析得到这个线性电阻温度系数, 从而简化测量和计算过程。在下文的热扩散系数测量中, 就利用了电阻和温度的线性关系。

表 4-3 模拟分析提取的参数

线性温度系数	二次温度系数
$a_1 (K^{-1})$	$a_2 (K^{-2})$
-4.4344×10^{-4}	-4.7312×10^{-6}

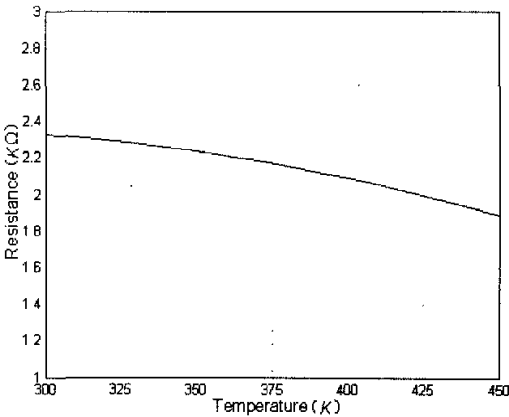


图 4.7 模拟分析得到的电阻和温度的关系

4.3.2 测试电流自加热对电阻测量的影响

要测量电阻随时间的变化关系，必须要施加一个测试电流，测试电流的存在会产生自加热现象。下面来分析自加热现象存在对电阻测量的影响。图 4.8 是测量电流为 0.1mA 时梁的温度分布云图。

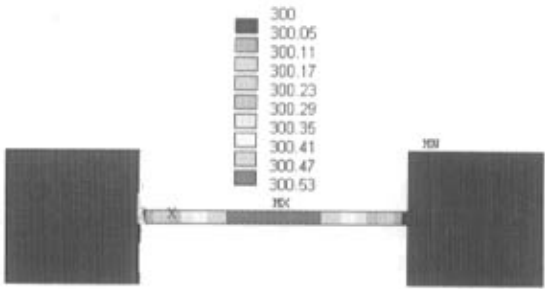


图 4.8 测试电流为 0.1mA 时的温度分布

自加热产生的电阻变化量与初始电阻的比是：

$$\frac{\Delta R_{sh}}{R_{\infty}} = 0.21\% \tag{4-21}$$

自加热产生的电阻变化量与冷却初始电阻变化量的比是：

$$\frac{\Delta R_{sh}}{R_{\infty} - R(0)} = 0.62\% \tag{4-22}$$

从上述分析可知，适当控制测试电流，则测试电流产生的自加热对电阻的影响就可以忽略不计。在实验测试时，可以先在梁两端施加一较小的恒流，如果此时梁电阻变化很小，几乎可以忽略不计，那么就可以把这个电流作为测量电阻变化时的测量恒流。实验测试可以通过串联一个大电阻来实现。

4.4 多晶硅薄膜热扩散系数的在线提取

从图 4.7 模拟分析得到的电阻和温度的关系可知, 当温度变化不大时, 电阻率与温度近似成线性变化关系, 则电阻率和温度的关系可以表示为^{[17][18][19][20]}:

$$\rho = \rho_{\infty} [1 + \xi(\bar{T} - T_{\infty})] \quad (4-23)$$

式中: ρ 、 ρ_{∞} 分别是平均温度 $\bar{T}$ 和环境温度 T_{∞} 时的电阻率, $\xi(K^{-1})$ 是线性电阻温度系数。

因此, 双端固支梁冷却过程中, 其电阻随时间的变化关系即式 (4-13) 可以简化为:

$$R(t) = R_{\infty} [1 + \xi C e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (4-24)$$

式中: R_{∞} 是初始温度 T_{∞} 时的电阻。

根据式 (4-10), 可以通过分析两个不同长度梁其电阻的瞬态冷却特性, 便可以提取出多晶硅薄膜的热扩散系数, 即有:

$$\alpha_p = \frac{\left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}\right)}{\pi^2 \left(\frac{1}{L_1^2} - \frac{1}{L_2^2}\right)} \quad (4-25)$$

式中: τ_1 、 τ_2 表示梁 1 和梁 2 冷却时的衰减时间常数, L_1 、 L_2 分别表示梁 1 和梁 2 的长度。

对式 (4-24) 两边进行对数变换, 可得:

$$F(t) = \ln \frac{R_{\infty} - R(t)}{R_{\infty}} = \ln(-\xi C) - \frac{1}{\tau} t \quad (4-26)$$

右式中第一项对数有一负号, 是因为该表面加工多晶硅电阻具有负温度效应, 即电阻随温度的减小而增加, 在冷却过程中电阻逐渐变大到加热前的电阻。

上文已经分析了长度、宽度和厚度分别为 200 μm 、10 μm 和 2 μm 梁的冷却特性。下面分析另一个不同尺寸梁的冷却特性 (长度是 250 μm 、宽度和厚度与前一个梁相同, 分别是 10 μm 和 2 μm), 便可以提取出多晶硅薄膜的热扩散系数。

模拟分析的过程和设定参数值与前文相同, 在此直接给出模拟结果。

图 4.9 是固支梁 2 的三维热电分析网格划分示意图, 图 4.10 是一定施加电压 (4.0V) 时的稳态温度分布即冷却初始温度分布云图。

图 4.11 是模拟分析得到电阻随时间的变化关系。图 4.12 是两个梁的电流—电压特性, 从图中可以看出, 梁电阻随施加电压的增加而减小, 也就说该表面加工多晶硅电阻具有负温度效应, 即其温度系数为负值, 这和模拟设定是相吻合的。

根据模拟分析得到的电阻随时间的变化关系, 再经过式 (4-26) 的对数变换, 便可以描述出的函数 $F(t)$ 与时间的函数关系, 如图 4.13 所示。

值得强调的是, 在对热扩散系数的在线测试时, 无需知道多晶硅电阻温度系数的大小。



图 4.9 三维热电分析网格划分示意图 (提取结构 2)

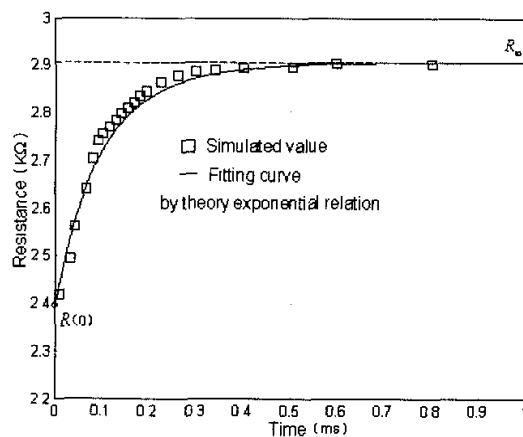
图 4.10 一定施加电压 (4.0V) 时的稳态温度分布即冷却初始温度分布: 空气间隙 $3\mu\text{m}$ 

图 4.11 模拟分析和拟合得到电阻随时间的变化关系 (提取结构 2)

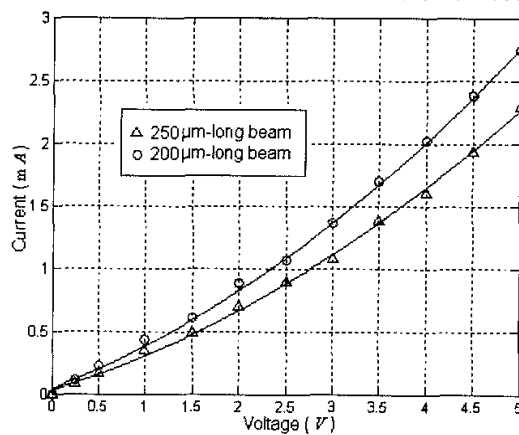


图 4.12 梁的电流—电压特性

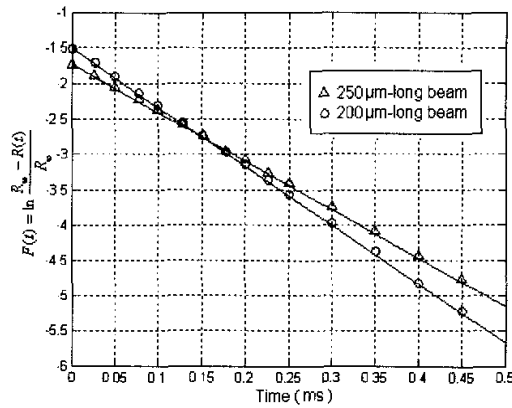


图 4.13 式 (4-26) 中函数 $F(t)$ 与时间的函数关系

两条直线的斜率分别是 $-\frac{1}{\tau_1}$ 、 $-\frac{1}{\tau_2}$ ，从而可以根据式 (4-26) 很容易的提取得出多晶硅薄膜的

热扩散系数。表 4-4 是模拟分析提取得到时间常数与根据模拟设定参数计算得到时间常数的比较。可见两者的误差很小。

表 4-4 模拟分析提取参数与模拟设定值的比较

	理论值	模拟提取值	误差
τ_1 (ms)	0.1202	0.1250	3.99%
τ_2 (ms)	0.1458	0.1516	3.98%

将上述模拟提取时间常数带入热扩散系数的模型中，可得：

$$a_p = \frac{(0.1516 \times 10^{-3})^{-1} - (0.1250 \times 10^{-3})^{-1}}{[(250 \times 10^{-4})^{-2} - (200 \times 10^{-4})^{-2}] \pi^2} = 0.1547 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \quad (4-27)$$

模拟分析提取得到热扩散系数与根据模拟设定参数(见表 4-1)计算得到的热扩散系数(即有

$a_p = \frac{k_p}{\rho c_p} = 0.1598 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$)之间的误差是 3.19%。可见，这种提取多晶硅薄膜热扩散系数得方法是

正确可行、简单可靠的。到此，已经分别给出提取多晶硅电阻温度系数、热导率和热扩散系数的方法，显然根据热容的定义，还可以进一步提取出多晶硅薄膜的热容。

4.4 结论

本章提出了一种在线提取多晶硅薄膜电阻温度系数的方法。论文给出了热电学模型和测试方法，并利用 ANSYSTM 和 Matlab 进行模拟和拟合分析，验证了该测试方法是正确适用的。

该测试方法还可用于提取多晶硅薄膜热扩散系数和热容。值得提出的是，在热扩散系数的提取中，无需知道薄膜的电阻温度系数，这对分析其它 MEMS 器件的瞬态热电特性和监控器件设计都具有实际应用价值和指导意义。

第五章 测试结构实验与结果

在论文前部分已经详细介绍了多晶硅薄膜热导率在线测试结构的设计原理及测试提取方法。给出多晶硅电阻温度系数的拟合分析提取方法，并利用 ANSYSTM 模拟分析，验证了其能实现多晶硅薄膜热学参数的在线测试。

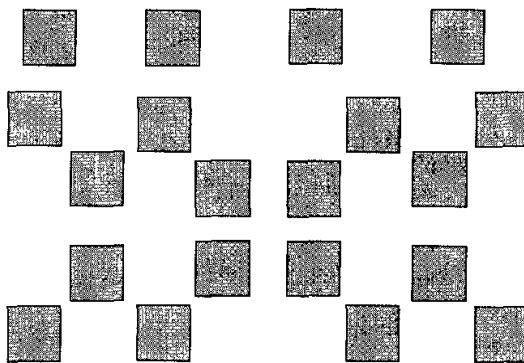
测试结构在北大微电子所表面加工工艺线上加工制作。利用本实验室的测试探针台和数字存储显示器以及其它一些常用的实验仪器进行了实验测量。实验验证该测试结构和测试方法是正确可行的。能实现对表面加工多晶硅薄膜热学参数的在线测试和监控器件制造工艺。

下面按版图设计、工艺加工、实验测试等进行详细阐述。

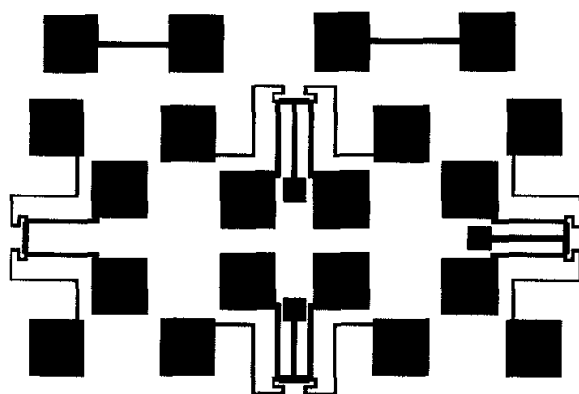
5.1 版图设计与加工制作

5.1.1 版图设计

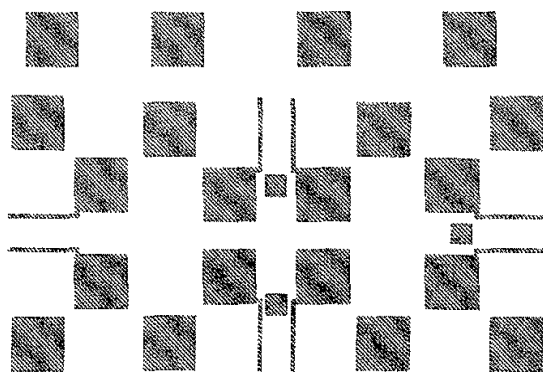
测试结构在北大微电子所的表面加工工艺线上进行加工制作，我们根据其设计规则来绘制测试结构制作版图，这种版图设计规则对其他表面微机械器件也是适用的。版图设计如图 5.1 所示，只需 3 块光刻掩模版。



(a) PSG 版 (1* 掩模版, 阴版)



(b) Poly 版 (2nd 掩模版, 阳版)

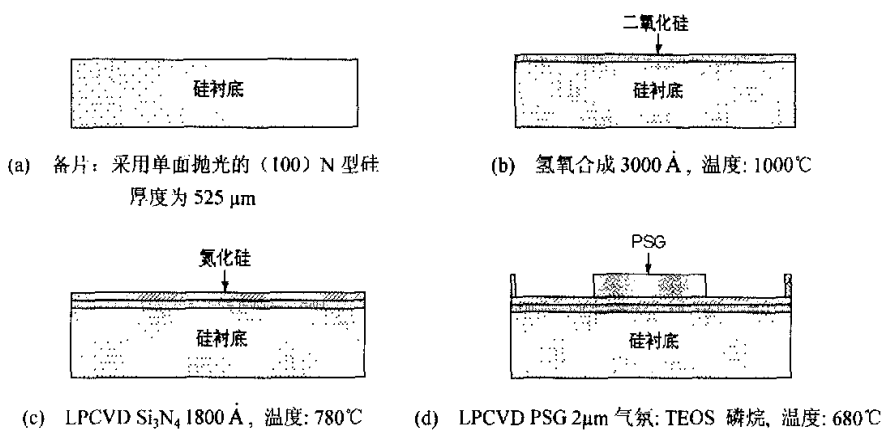


(c) Al 版 (3rd 掩模版, 阳版)

图 5.1 热学参数在线测试结构版图

5.1.2 测试结构加工制作

在线测试结构制作工艺如图 5.2 所示:



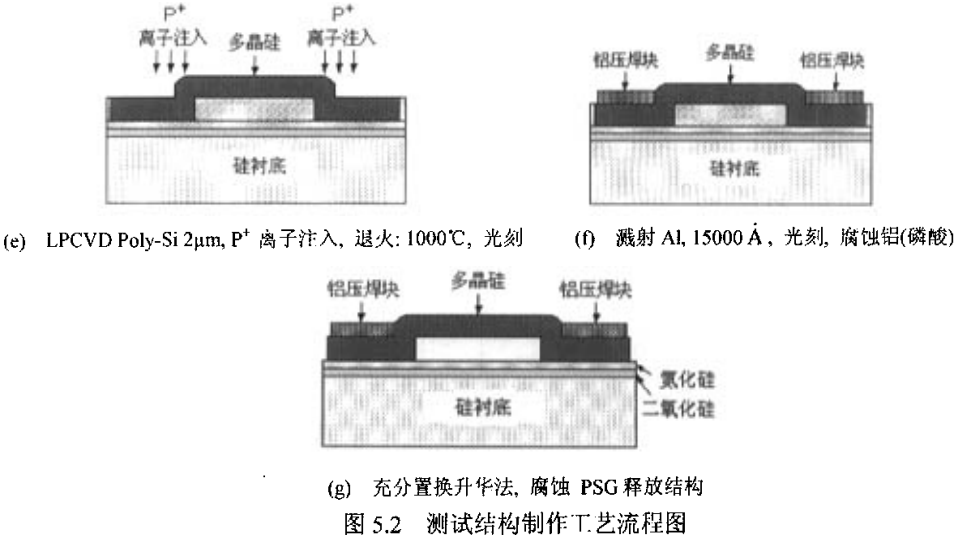


表 5-1 给出了所有测试结构制作加工工艺参数, 制作工艺中含有本实验室其他测试结构芯片的制作, 包括多晶硅薄膜断裂强度测试结构, 应力应变测试结构、杨氏模量测试结构等。制作加工在北大微电子所完成, 共制作了 4 英寸硅芯片 4 片。本论文设计研究的在线测试结构制作工艺简单, 只需 3 块掩模版, 即牺牲层版(阴版), 多晶硅版(阳版)和铝版(阳版), 可以随表面微机械器件制作工艺加工制作, 符合在线测试要求。图 5.3 是测试结构 SEM 图片。

表 5-1 测试结构制作加工工艺

工序名	工艺要求及实验说明	片号片数	工艺/实验条件记录
1 备片	采用单面抛光的(100) N 型硅 厚度为 525 μm, 2~4 OHM.cm	1~4	
2	氧氮合成 3000Å	1~4	气氛: 氢气加氧气温度: 1000℃
3 淀积	LPCVD Si ₃ N ₄ 1800Å	1~4	气氛: NH ₃ 加 DCS 温度: 780℃
4	LPCVD Poly-Si 3000Å	1~4	气氛: 硅烷 温度: 610℃
5 注入	P ⁺ , 5E15, 80Kev	1~4	
6 光刻	(零层 Poly-Si 的图形)	1~4	
7 刻蚀	RIE Poly-Si 3000Å	1~4	气氛: SF ₆ He
8 淀积	LPCVD PSG 2μm	1~4	气氛: TEOS 磷烷 温度: 680℃
9 光刻	(bump 图形转移)	1~4	
10 腐蚀	BHF PSG 5000Å	1~4	
11 光刻	(anchor 图形转移)	1~4	
12 刻蚀	RIE PSG (约 1μm)	1~4	气氛: SF ₆ CHF ₃ He

13	腐蚀	BHF PSG 约 1 μ m PSG (约 1 μ m) 至 poly-0 层	1~4	
14	光刻	Si ₃ N ₄ 图形转移	1~4	
15	刻蚀	RIE Si ₃ N ₄ (约 1500Å)+ SiO ₂ (约 3000Å) 至衬底	1~4	气氛: SF ₆ CHF ₃ He
16	淀积	LPCVD Poly-Si 2 μ m	1~4	条件同前
17	注入	P ⁺ , 5E15, 80Kev	1~4	
18	淀积	LPCVD PSG+ SiO ₂ , 2000Å +1000Å	1~4	条件同前
19	退火	退火 1000℃, 1H, N ₂	1~4	
20	光刻	BHF PSG+ SiO ₂ 至一层 Poly-Si	1~4	
21	光刻	一层 Poly-Si 图形转移	1~4	
22	刻蚀	ICP 一层 Poly-Si 2 μ m 至 PSG 过刻 3000 Å	1~4	气氛: SF ₆ C ₄ F ₈ He
23	溅射	Al, 15000 Å	1~4	
24	光刻	金属铝图形转移	1~4	
25	腐蚀	腐蚀铝	1~4	磷酸
26	释放	释放 充分置换升华法	1~4	BHF 腐蚀 PSG 释放结构 用水置换 BHF 用 IPA 置换水 用环己烷置换 IPA 使环己烷降温凝固 接着升温,环己烷升华

注: 场氧层和淀积的氮化硅层作为电加热的电绝缘层和热隔离层

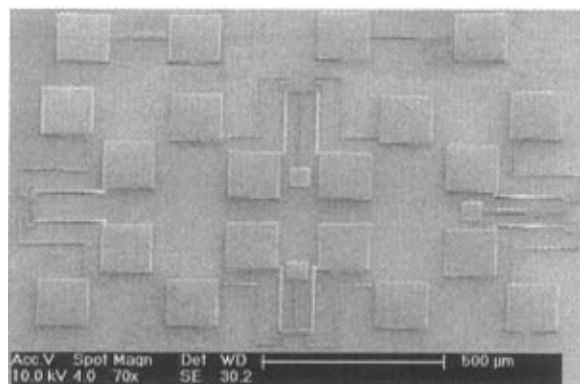


图 5.3 测试结构 SEM 图片

5.2 多晶硅电阻温度系数的在线测试

图 5.4 是提取多晶硅电阻温度系数测试结构的 SEM 图片, 为了能够很好的说明这种提取方法的可行性, 也为了能够相互比较, 选用了两个不同长度的固支梁 (长度分别是 $250\mu\text{m}$ 和 $200\mu\text{m}$, 其宽度和厚度分别是 $10\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$) 来进行实验测试分析。

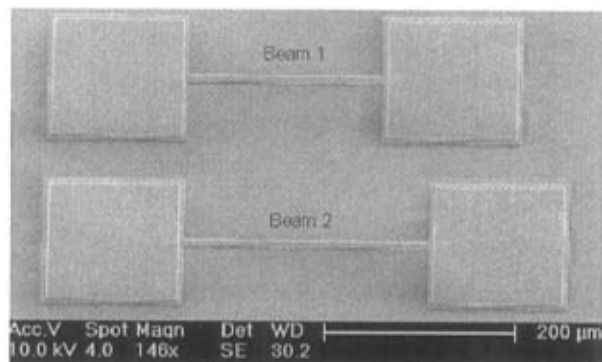


图 5.4 提取多晶硅电阻温度系数测试结构的 SEM 图片

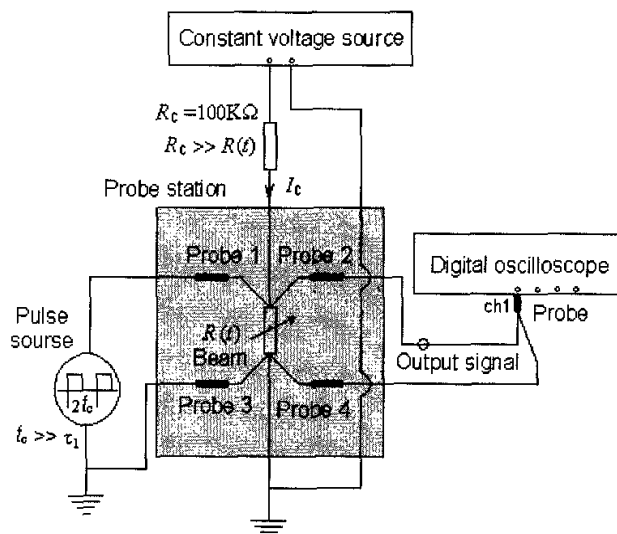


图 5.5 多晶硅电阻温度系数及热扩散系数测试电路连接示意简图

图 5.5 是多晶硅电阻温度系数及热扩散系数测试电路连接示意简图。这个电路使用周期为 $2t_c$ (且 $t_c \gg \tau_1$) 的方波信号作驱动电源 (其高电平是 V_g , 低电平为 0), 且测试电流 I_c 足够小, 使得在这个测试电流下, 梁由于自加热产生的电阻变化小到可以忽略不计^[1]。即:

$$I_c = \frac{V_c}{R_c + R(t)} \approx \frac{V_c}{R_c}, \quad R_c \gg R(t) \quad (5-1)$$

根据式 (4-13), 有:

$$V(t) = I_c R(t) = I_c R_\infty [1 + c_1 e^{-\frac{t}{\tau}} + c_2 e^{-\frac{2t}{\tau}}] \quad (5-2)$$

因此, $V(t)$ 与 $R(t)$ 具有相同的时间依赖关系。

实验测试时, 直接把待测芯片放置在探针台上, 按图 5.5 电路连接好, 利用脉冲电源的正半周加热至热稳态, 利用其负半周期测两个固支梁上电压随时间的变化关系(脉冲周期远大于时间常数), 如图 5.7、图 5.8 所示。图 5.6 是两个梁的电流—电压特性。从图中可以看出, 该多晶硅薄膜具有负电阻温度效应。

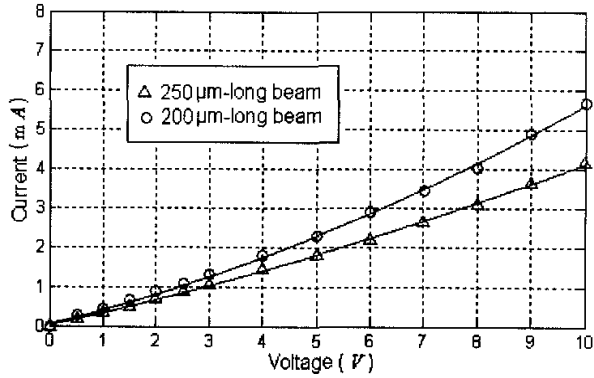


图 5.6 梁的电流—电压特性

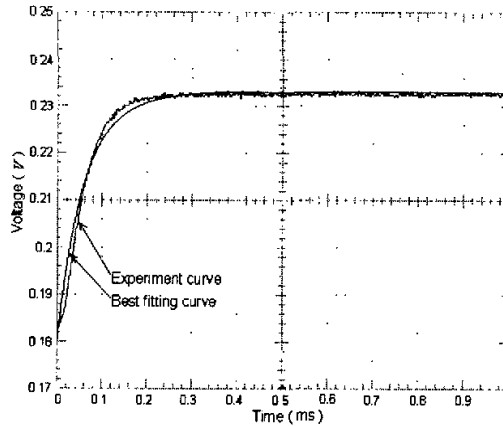


图 5.7 实验测得的输出电压随时间的变化关系与最佳拟合匹配分析: 梁 1

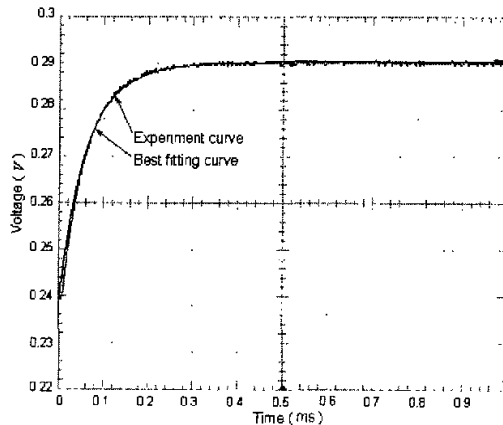


图 5.8 实验测得的输出电压随时间的变化关系与最佳拟合匹配分析: 梁 2

根据实验测得曲线与理论关系式的最佳匹配拟合分析, 得到表面加工多晶硅电阻的温度系数,

分别是: $a_1 = -5.4354 \times 10^{-4} K^{-1}$ (线性温度系数项), $a_2 = -4.7312 \times 10^{-6} K^{-2}$ (二次温度系数项)。由此可以描述出电阻随温度的变化关系, 实验结果如图 5.9 所示。

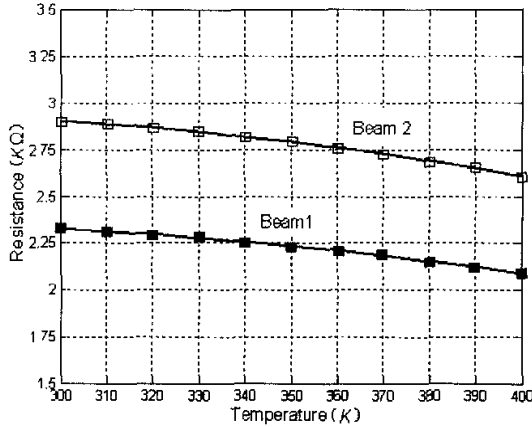


图 5.9 实验提取得到的电阻随温度的变化关系

5.3 多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试

从图 5.9 实验提取得到的电阻随温度的变化关系可知, 当温度变化不大时, 电阻与温度近似成线性变化关系。因此, 根据式 (4-24) 有^[1]:

$$V(t) = I_c R(t) = I_c R_\infty [1 + \xi C e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (5-3)$$

显然, 梁的电压与电阻有和时间相同的衰减变化关系。对式 (5-3) 进行对数转换有与式 (4-26) 相

同的表达式。根据上述测试结果描述出 $F(t) = \ln \frac{R_\infty - R(t)}{R_\infty} = \ln(-\xi C) - \frac{1}{\tau} t$ 曲线, 如图 5.10 所示。

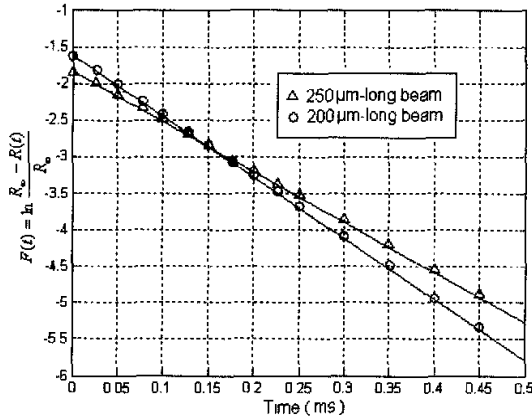


图 5.10 函数 $F(t)$ 与时间的函数关系

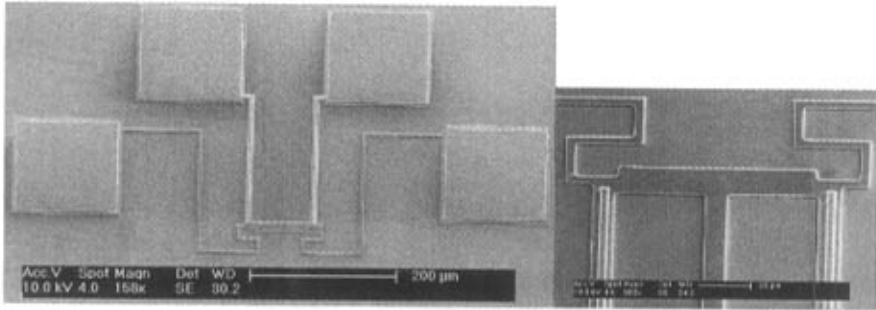
两条直线的斜率分别是 $-\frac{1}{\tau_1}$ 、 $-\frac{1}{\tau_2}$, 从而可以根据式 (4-25) 很容易的提取出多晶硅薄膜的热

扩散系数, 其实验测量值是 $0.165 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ 。

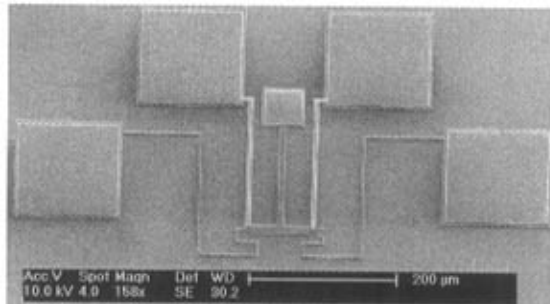
5.4 多晶硅薄膜热导率的在线测试

5.4.1 T型测试结构多晶硅薄膜热导率在线测试

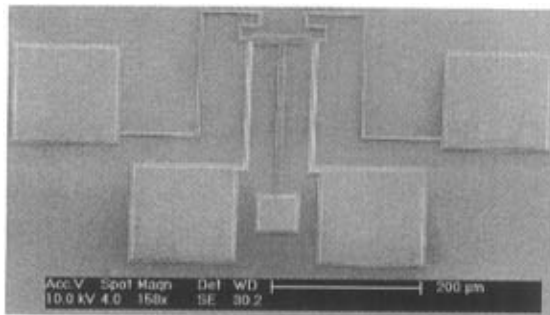
图 5.11 是多晶硅薄膜热导率 T 型测试结构阵列 SEM 图片。利用实验室常用的探针台、半导体参数分析仪和数字电压表就可以进行测量，并描述出施加电压、电流和加热条电压降之间的关系，实验结果分别如图 5.12~图 5.17 所示。然后便可以根据第三章建立的模型提取得到多晶硅薄膜的热导率。



(a) 参考结构的 SEM 图片、加热条局部



(b) 测试结构 1 的 SEM 图片



(c) 测试结构 2 的 SEM 图片

图 5.11 多晶硅薄膜热导率 T 型测试结构阵列 SEM 图片

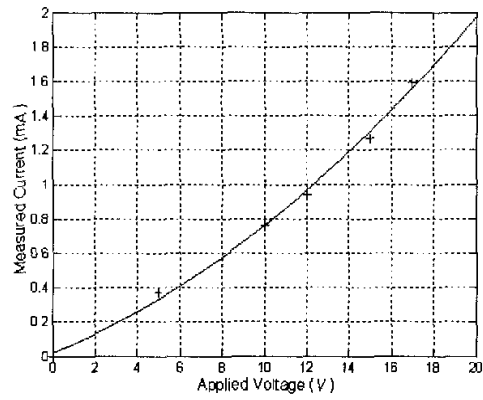


图 5.12 参考结构中施加电压与测量电流的关系

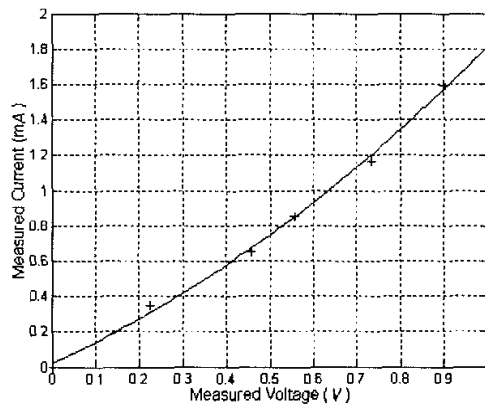


图 5.13 参考结构中测量电压与测量电流的关系

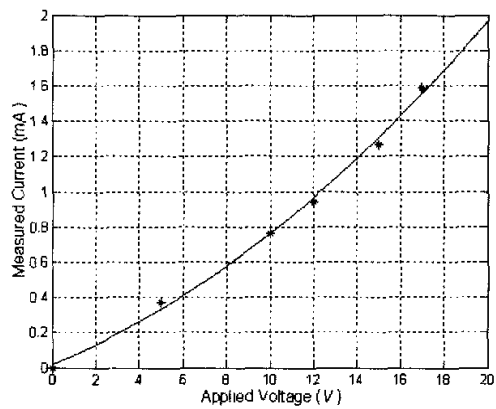


图 5.14 测试结构 1 中施加电压与测量电流的关系

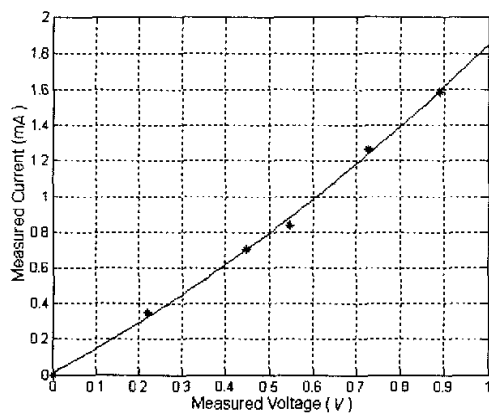


图 5.15 测试结构 1 中测量电压与测量电流的关系

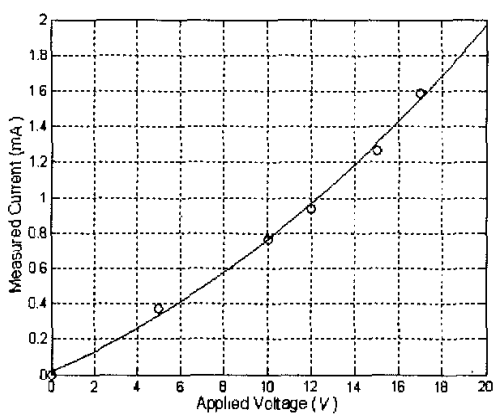


图 5.16 测试结构 2 中施加电压与测量电流的关系

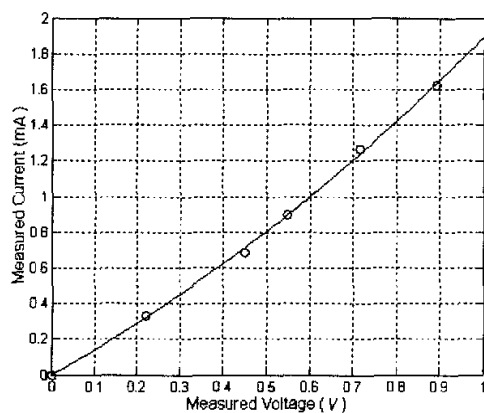


图 5.17 测试结构 2 中测量电压与测量电流的关系

从三个结构的电压电流关系曲线中,可以看出电阻呈现出负温度效应,这个前文对温度系数的测量是相吻合的。当二个结构中加热条的电阻变化量相同时,显然它们就具有相同的温度变化量 ΔT 。需要测得的量是二个结构中的加热功率, P_{t1} 、 P_{t2} 和 P_r 和加热条的温度变化量 ΔT_t 。通过上述实验

已经得到了模型中所需的各个参量，从而可以根据式 (3-22) 提取出多晶硅薄膜的热导率^{[2][3]}，如图 5.18 所示。

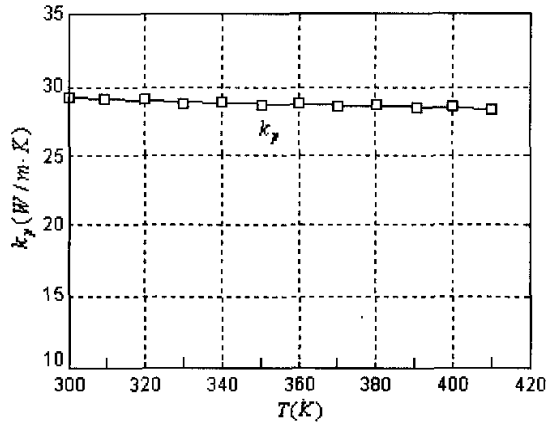
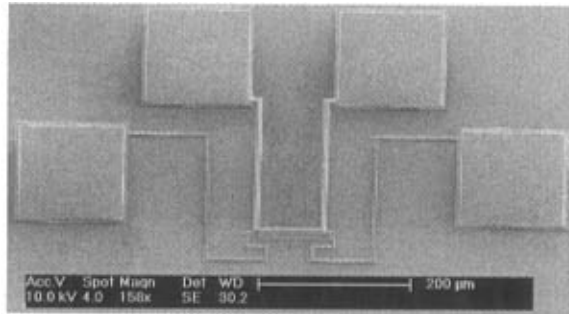


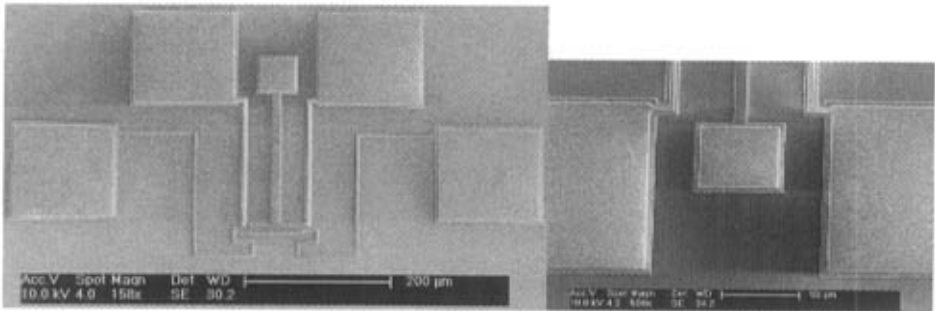
图 5.18 实验测得的热导率与温度关系曲线

5.4.2 Π 型测试结构多晶硅薄膜热导率在线测试

图 5.19 是多晶硅薄膜热导率 Π 型测试结构阵列 SEM 图片，测试结构中间悬臂梁的宽度与加热条的宽度相同。同理，我们利用实验室常用的探针台、半导体参数分析仪和数字电压表就可以进行测量，来描述出施加电压、电流和加热电压降之间的关系。实验结果分别如图 5.20~图 5.23 所示。



(a) 参考结构的 SEM 图片



(b) 测试结构的 SEM 图片

图 5.19 表面加工 Π 型多晶硅薄膜热导率在线提取测试结构 SEM 图片

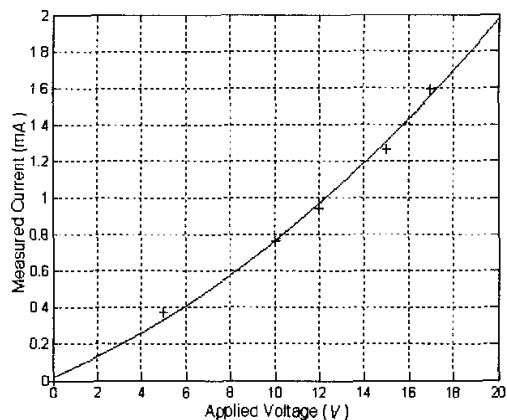


图 5.20 参考结构中施加电压与测量电流的关系

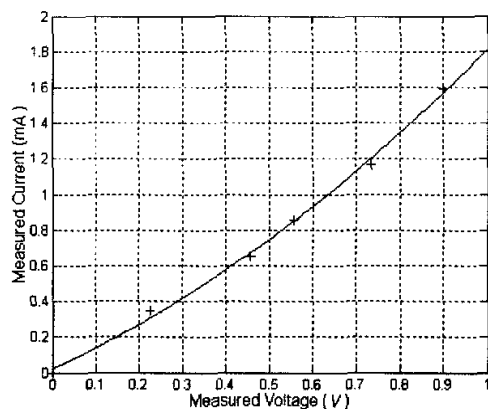


图 5.21 参考结构中测量电压与测量电流的关系

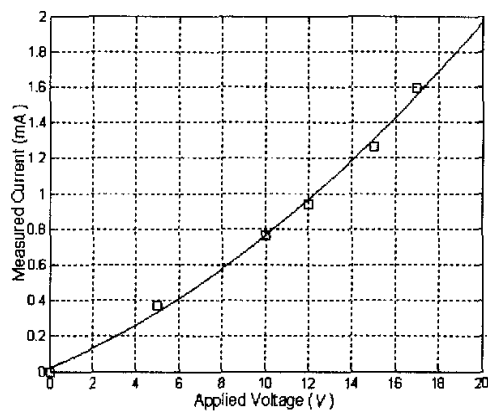


图 5.22 测试结构中施加电压与测量电流的关系

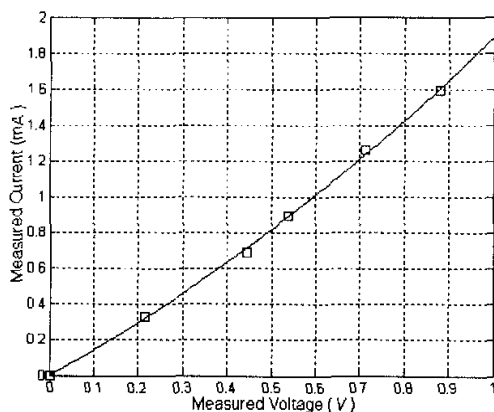


图 5.23 测试结构中测量电压与测量电流的关系

当两个结构中加热条的电阻变化量相同时，它们就具有相同的温度变化量 ΔT ，式 (3-48) 进一步简化为^{[4][5]}：

$$k_p = \left[\left(\frac{P_t}{\Delta T} - \frac{P_R}{\Delta T} \right) - \frac{P_{Rh}}{2\Delta T} \cdot \frac{l}{l_h} \right] \times \frac{l}{wh} \quad (5-4)$$

式中 P_t 和 P_R 分别是测试结构和参考结构的加热功率。根据简化了的模型式 (5-4)，提取出多晶硅薄膜的热导率，如图 5.24 所示。

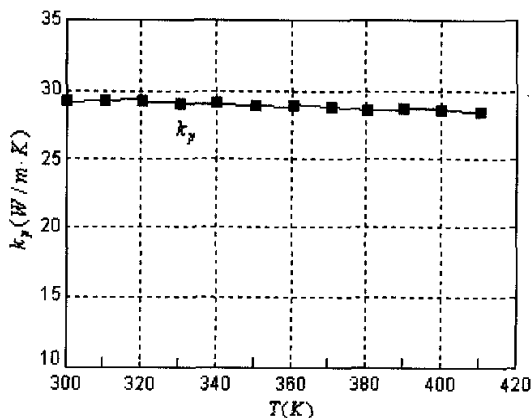


图 5.24 实验测得的热导率与温度关系曲线

5.4.3 讨论

比较图 5.18 和图 5.24 两种不同测试结构的实验结果。可见，两种不同测试结构提取得到的热导率与温度的变化关系基本相同，从室温到 410K 的范围内，热导率在 $28.2\text{W/m}\cdot\text{K} \sim 29.5\text{W/m}\cdot\text{K}$ 之间。说明在这个温度变化范围内，热导率变化不大，因而很多文献资料分析器件的传热特性时，使用常数热导率是有根据的。反之，也验证了本文的测试结构和测试方法是正确可行的。

论文中，前一种测试结构是通过不同尺寸悬臂梁等效散热热路的相互抵消来解决其他未知参数如空气自然对流系数、辐射发射率、以及空气层、氮化硅层和二氧化硅层的厚度和热导率等；后一种测试方法是通过间接测量的办法来得到这个未知等效散热系数，两种方法都可以解决边缘效应问题，都可以在自然环境下进行测试，从而实现多晶硅薄膜的热导率的在线测试和监控器件制造工艺。

需要进一步说明的是,在第三章的模拟分析时,设定的电阻温度系数是正值,即电阻随温度的增加而增加。在实验测试时,发现该表面加工多晶硅薄膜其电阻呈现负温度效应,即电阻随温度的增加而减小。实际上,对于半导体热敏电阻来说,通常表现出负温度效应,对于温度变化较大的情况,电阻是非线性的^[6],这一点在本文的实验测试中得到了验证。测试表明,本文制作的多晶硅薄膜具有较大的方块电阻,是 $116.25\Omega/\text{sq}$ 。对于一些重掺杂多晶硅薄膜来说(电阻率较小),不管是 CMOS 工艺制作或表面工艺制作的,往往表现出正温度效应^{[7][8][9]}。而对于相同制作工艺梁来说,悬空的梁与不悬空的梁却也表现出不同的电阻温度效应^[10]。

实际上,不管多晶硅薄膜表现出什么样的电阻温度特性,它都不影响对多晶硅热导率、多晶硅热扩散系数及对多晶硅本身电阻温度系数的提取,因为在模型建立时,已经充分考虑到这些问题,而电阻温度系数只影响对温度本身的提取,而不影响热导率模型的正确性,这一点才是至关重要的。

5.5 结论

本章通过实验测试出多晶硅电阻的温度系数、多晶硅薄膜热扩散系数和多晶硅薄膜的热导率。实验进一步验证了该测试方法和测试结构可以应用于实际工艺线,能够实现监控器件制造工艺和多晶硅薄膜热学参数在线测试。

第六章 误差分析

在建立热导率模型时，对辐射散热进行了线性化处理；在结构制作过程中，由于光刻、掩模版对准等工艺误差会使实际制作的结构尺寸与版图设计的结构尺寸产生偏差，这些因素的存在都有可能对实验测试结果产生影响。下面主要分析模型和结构误差对热导率测试的影响。

6.1 模型误差分析

6.1.1 理论分析

在建立热导率模型时，对辐射散热进行了线性化处理，因此热导率模型误差仅来源于对辐射散热的线性化处理。微元体侧面和上表面由于辐射散失的热量：

$$Q_R = (2h + w)\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4)dx \quad (6-1)$$

式中： w 、 h 分别是测试结构中间悬臂梁的宽度和厚度（参见前文）。

线性化处理后的辐射散热量是：

$$Q_R = 4(2h + w)\varepsilon\sigma T_0^3 \Delta T dx \quad (6-2)$$

式中： ε 是梁的辐射发射率（在这里取 1.0）， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 是斯忒藩-波耳兹曼常数，

T_0 是初始温度。

从而测试结构中间悬臂梁由于辐射散失的能量可以通过下式来估算：

$$Q_R < \int_0^L (2h + w)\varepsilon\sigma(T_h^4 - T_0^4)dx = (2h + w)L\sigma(T_h^4 - T_0^4) \quad (6-3)$$

辐射散热的线性化处理散失的能量：

$$Q_R < \int_0^L 4(2h + w)\varepsilon\sigma T_0^3 (T_h - T_0)dx = 4(2h + w)L\sigma T_0^3 (T_h - T_0) \quad (6-4)$$

式中： L 、 w 和 h 是悬臂梁的长度、宽度与厚度， T_h 是加热条的温度。上式显然是成立的，因为悬臂梁上任何一点的温度都是小于至多等于加热条的温度。

根据上式，在加热条温度变化在 $50K \sim 150K$ 范围变化时，对于实验制作的测试结构中的悬臂梁几何尺寸，即长度分别是 $200\mu m$ 和 $150\mu m$ ，宽度和厚度分别是 $10\mu m$ （或 $15\mu m$ ）和 $2\mu m$ ，不管是温度四次方还是对温度进行线性化处理，由于辐射散失的热量在 $10^{-6} \sim 10^{-7} W$ 量级，两者的散热量是非常接近的。而根据前文的模拟分析和实验测试，可知流入悬臂梁区域的加热量在 $10^{-3} W$ 量级，可见辐射散热散失的能量是远远小于悬臂梁的加热功率，因而由于辐射散热消耗的热量基本可以忽

略不计。显然，对辐射散热进行线性化处理是合理可行的。这与本文和文献中的理论分析及实验测试是相吻合的^[1-3]，且加热条在这个温度变化范围内也是能够满足测试灵敏度的要求。

6.1.2 模拟验证

为了验证对辐射散热线性化处理甚至忽略辐射散热的合理性，本文利用 ANSYSTM 进行了三维有限元热学分析。在这里，只分析辐射散热及线性化处理对悬臂梁温度分布的影响，并和忽略辐射散热进行比较。图 6.1 是模拟分析辐射散热影响的有限元模型。分析时，在悬臂梁前端（即与加热条接触的顶端）施加面负载—热流密度，锚区施加温度约束（衬底温度），在悬臂梁与环境接触的三个面（上表面和两个侧面）分别设定辐射边界条件或等效对流边界条件（即对辐射散热进行线性化处理）。其模拟程序分别如下描述，在这里给出了两次模拟分析程序的不同部分。模拟分析了两个不同热流密度时辐射散热的影响，模拟分析结果如图 6.2 所示，同时给出了在相同的施加负载时忽略辐射散热时的温度分布。

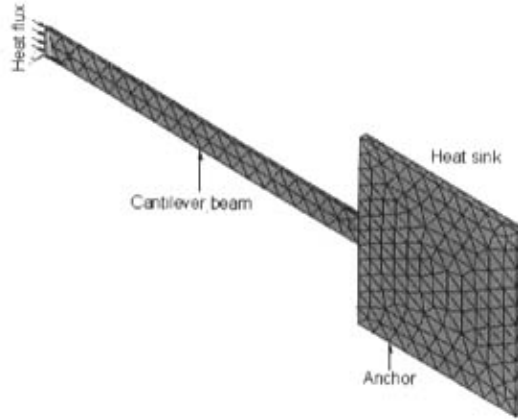


图 6.1 模拟分析辐射散热影响的有限元模型

• 辐射散热分析部分程序

```
ASEL,S,AREA,,2      ! 悬臂梁上表面
ASEL,A,AREA,,3      ! 悬臂梁侧面
ASEL,A,AREA,,4      ! 悬臂梁侧面
NSLA,S,1
SF,ALL,RDSF,1.0,1    ! 辐射边界条件,  $\varepsilon = 1.0$ 
ALLSEL
SPCTEMP,1,27.0       ! 定义空间温度
TOFFST,273.0         ! 设定绝对温度
STEF,5.6e-8          ! 设定 Stefan-Boltzmann 常数
```

• 辐射线性化处理散热分析部分程序

```
ASEL,S,AREA,,2      ! 悬臂梁上表面
ASEL,A,AREA,,3      ! 悬臂梁侧面
ASEL,A,AREA,,4      ! 悬臂梁侧面
NSLA,S,1
SF,ALL,CONV,5.512,27.0 ! 对流边界条件 (把辐射项线性化再转化成等效对流系数  $4\varepsilon\sigma T_0^3$ )
ALLSEL
```

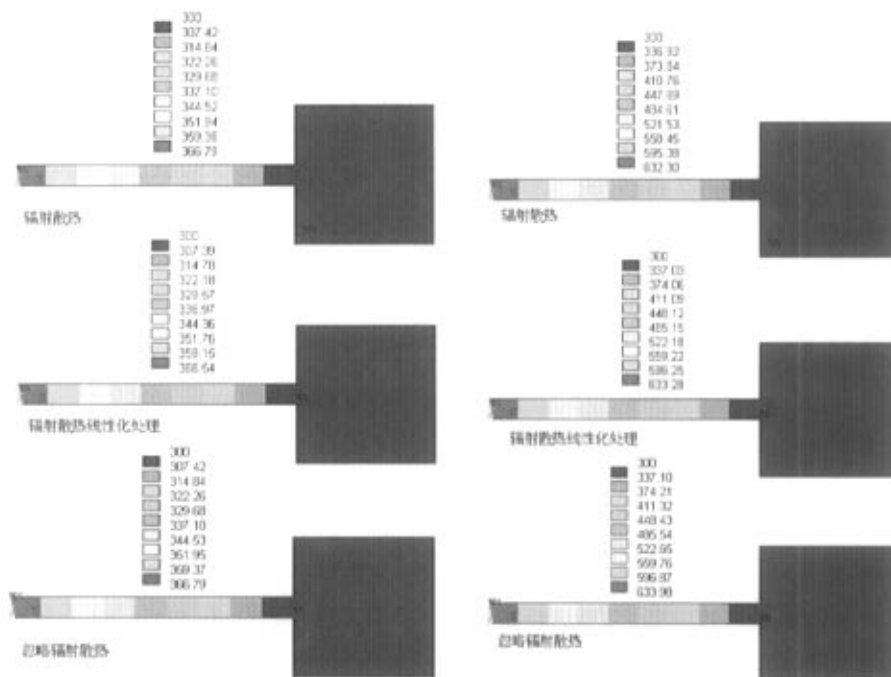



图 6.2 辐射散热、辐射线性化散热与忽略辐射散热的比较

模拟分析表明，辐射散热的影响在本文的测试温度下是非常小的，从而验证了模型建立时对辐射散热进行线性化处理是合理的，同时从模拟分析也说明，在本文的测试温度范围内，甚至可以忽略辐射散热的影响。因此辐射散热线性化处理对热导率在线测试的影响可以忽略不计。

6.2 结构误差分析

在结构制作过程中，由于光刻、掩模版对准等工艺误差都会使实际制作的结构尺寸与版图设计的结构尺寸产生偏差，因此在实验测试时，要对结构的几何尺寸主要是测试结构中悬臂梁的宽度、长度进行测量。下面来分析由结构几何尺寸的偏差对热导率测试的影响。

6.2.1 Π 型测试结构误差

根据式 (5-4)， Π 型测试结构中由于结构造成多晶硅薄膜热导率的误差 Δk_p 可以表示为：

$$\begin{aligned}
 \Delta k_p &= \frac{\partial f}{\partial l} \Delta l + \frac{\partial f}{\partial l_h} \Delta l_h + \frac{\partial f}{\partial w} \Delta w + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \\
 &= \left[\left(\frac{P_t}{\Delta T} - \frac{P_R}{\Delta T} \right) - \frac{P_{Rh}}{2\Delta T} \cdot \frac{l}{l_h} \right] \cdot \frac{l}{wh} \cdot \frac{\Delta l}{l} - \left[\left(\frac{P_t}{\Delta T} - \frac{P_R}{\Delta T} \right) - \frac{P_{Rh}}{2\Delta T} \cdot \frac{l}{l_h} \right] \cdot \frac{l}{wh} \cdot \frac{\Delta w}{w} \\
 &\quad + \frac{P_{Rh}}{\Delta T l_h} \left(\frac{l^2 \Delta l_h}{2whl_h} + \frac{l \Delta l}{wh} \right) - \left[\left(\frac{P_t}{\Delta T} - \frac{P_R}{\Delta T} \right) - \frac{P_{Rh}}{2\Delta T} \cdot \frac{l}{l_h} \right] \cdot \frac{l}{wh} \cdot \frac{\Delta h}{h}
 \end{aligned} \tag{6-5}$$

一般表面加工工艺光刻误差小于 $0.5\mu\text{m}$ ，结构尺寸也可在拍测试结构 SEM 图片时或用专门仪器测量测得，即结构中悬臂梁长度、宽度的绝对误差分别是：

$$\begin{cases} \Delta l = l_{x1} - l = \pm 0.5\mu\text{m} \\ \Delta l_h = l_{hx} - l_h = \pm 0.5\mu\text{m} \\ \Delta w = w_x - w = \pm 0.5\mu\text{m} \end{cases} \quad (6-6)$$

由此可以计算出尺寸的相对误差分别是：

$$\begin{cases} \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.5\mu\text{m}}{200\mu\text{m}} \times 100\% = 0.25\% \\ \Delta l_h = \frac{0.5\mu\text{m}}{80\mu\text{m}} \times 100\% = 0.625\% \\ \Delta w = \frac{0.5\mu\text{m}}{10\mu\text{m}} \times 100\% = 5\% \end{cases} \quad (6-7)$$

根据上述分析，由 (6-5) 可知，第一项反映了长度造成的误差，第二项反映了宽度造成的误差，第三项综合反映了加热条长度即等效散热系数测量的误差，第四项是厚度方向上的误差（在这里不考虑薄膜淀积工艺产生的误差，因此这项的尺寸误差视为 0）。可见，由于结构带来的热导率误差主要来自对悬臂梁宽度和加热条长度造成的误差，这是由于相同的制作、测试精度，宽度和加热条长度的相对误差比较大。同时注意到两者产生误差的符号相反，从而可以计算出该测试方法由于结构对热导率测试带来的误差约为：

$$\frac{\Delta k_p}{k_p} \approx 4.3\% \quad (6-8)$$

因此，要减小结构对热导率测试的影响，需要尽量减小悬臂梁宽度和加热条长度的相对误差。

6.2.2 T 型测试结构误差

根据式 (3-22)，T 型测试结构中由于结构造成多晶硅薄膜热导率的误差 Δk_p 可以表示为：

$$\begin{aligned} \Delta k_p &= \frac{\partial f}{\partial L_1} \Delta L_1 + \frac{\partial f}{\partial L_2} \Delta L_2 + \frac{\partial f}{\partial w} \Delta w + \frac{\partial f}{\partial h} \Delta h \\ &= \left[\left(\frac{P_{i1}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_2^2 (L_2^2 - L_1^2) + 2L_1^2 L_2^2}{(L_2^2 - L_1^2)^2} - \left(\frac{P_{i2}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{2L_1 L_2 (L_2^2 - L_1^2) + 2L_1^3 L_2}{(L_2^2 - L_1^2)^2} \right] \frac{\Delta L_1}{wh} \\ &\quad + \left[\left(\frac{P_{i1}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{2L_1 L_2 (L_2^2 - L_1^2) - 2L_1^3 L_2}{(L_2^2 - L_1^2)^2} - \left(\frac{P_{i2}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_1^2 (L_2^2 - L_1^2) - 2L_1^2 L_2^2}{(L_2^2 - L_1^2)^2} \right] \frac{\Delta L_2}{wh} \\ &\quad - \left[\left(\frac{P_{i1}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_1 L_2^2}{(L_2^2 - L_1^2)} - \left(\frac{P_{i2}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_1^2 L_2}{(L_2^2 - L_1^2)} \right] \frac{1}{wh} \cdot \frac{\Delta w}{w} \\ &\quad - \left[\left(\frac{P_{i1}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_1 L_2^2}{(L_2^2 - L_1^2)} - \left(\frac{P_{i2}}{\Delta T} - \frac{P_r}{\Delta T} \right) \frac{L_1^2 L_2}{(L_2^2 - L_1^2)} \right] \frac{\Delta h}{wh^2} \end{aligned} \quad (6-9)$$

同理，T 型测试结构中悬臂梁长度、宽度的绝对误差分别是：

$$\begin{cases} \Delta L_1 = L_{x1} - L_1 = \pm 0.5\mu\text{m} \\ \Delta L_2 = L_{x2} - L_2 = \pm 0.5\mu\text{m} \\ \Delta w = w_x - w = \pm 0.5\mu\text{m} \end{cases} \quad (6-10)$$

由此可以计算出尺寸的相对误差分别是：

$$\begin{cases} \frac{\Delta L_1}{L_1} = \frac{0.5\mu m}{200\mu m} \times 100\% = 0.25\% \\ \frac{\Delta L_2}{L_2} = \frac{0.5\mu m}{150\mu m} \times 100\% = 0.33\% \\ \frac{\Delta w}{w} = \frac{0.5\mu m}{10\mu m} \times 100\% = 5\% \end{cases} \quad (6-11)$$

根据上述分析，第一、二项反映了对悬臂梁 1、2 的长度误差，第二项反映了悬臂梁的宽度误差，第三项是厚度方向上的误差（在这里不考虑薄膜淀积工艺产生的误差，因此厚度误差视为 0）。可见结构带来的误差主要来自悬臂梁宽度的相对误差，这是由于相同的测试精度，宽度的相对误差较大。从式中可见长度与宽度产生的误差符号相反。由此，可以计算出该测试方法由于结构对热导率测试带来的误差是：

$$\frac{\Delta k_p}{k_p} \approx 4.12\% \quad (6-12)$$

因此，要减小结构对热导率测试的误差，主要是要减小悬臂梁宽度带来的相对误差。

6.3 本章小结

在实验测试时，发现悬臂梁的边缘往往不是规则的直梁。然而目前由于工艺造成的悬臂梁边缘毛刺还没办法解决，这些误差往往是难以消除的，也没有什么办法可以进行有效的分析，只能尽量提高工艺制作水平。热导率的误差是模型误差和结构误差之和，由于模型建立对辐射散热进行线性处理造成的误差基本可以忽略，因此误差主要来源于结构误差。根据上述分析，两种测试方法的结构误差都小于 5.0%，这么小的误差，是能够满足多晶硅薄膜热导率在线测试要求。

第七章 结束语

随着 MEMS 技术的发展,科研工作者会设计研究出越来越多的 MEMS 器件,因而能否及时掌握薄膜材料各种的参数,对于监控器件制造工艺、分析器件性能是至关重要的。对于在自然环境下使用的器件,这必然要求能在线提取器件的各种热电参数,这就需要设计所谓的“测试单元”。本文就表面加工多晶硅薄膜热导率的在线测试进行了研究。从结构设计、数学建模、软件模拟分析、加工制作、实验测试等进行系统的分析验证。本论文可以归纳如下:

1. 对表面加工多晶硅薄膜电阻温度的在线提取进行了研究。给出了电阻温度系数模型,进行了软件模拟分析、并实验提取出非线性电阻温度系数。

2. 对表面加工多晶硅薄膜热导率进行了在线测试研究,设计两种不同的在线测试结构,给出了热导率模型,并进行了模拟分析和实验验证。实验表明,该测试方法能够实现多晶硅薄膜热导率的在线测试,能在工艺线上应用。

3. 对多晶硅薄膜热扩散系数的在线测试进行了研究。给出了测试模型和测试方法,进行了软件模拟分析、实验提取出多晶硅薄膜热扩散系数。该测试方法能够实现多晶硅热扩散系数的在线测试,且简单可靠。

4. 在建立模型时,综合分析了对流、辐射和向衬底传热对模型的影响。在热导率测试中,由于使用了等效消减的方法,使得测试时能有效的消除了探针的接触电阻和锚区散热的影响,大大提高了测试精度,减小了测量误差。

需要说明的是,由于模拟分析时使用的电阻系数等参数是前人的实验理论数据,因此与本文实验测得数值必然存在差异。模拟分析是通过软件模拟来验证测试结构和测试方法的可行性和正确性。事实上,这个差异性的存在恰恰说明了本论文设计的测试结构和测试方法能够实现薄膜热学参数的在线测试,能够监控器件制造工艺,并能在实际工艺线上应用。

本文使用直流加热法,如果使用交流加热法来分析测试结构的瞬态热电特性,也是对提取薄膜热学参数的有益探讨。而对薄膜传热进行二维传热分析也是非常有意义的研究。

在 MEMS 领域对薄膜制造工艺、显微组织与其材料性能之间关系的深入理解是预测、改善和充分发挥薄膜材料的包括热电性能在内的各类性能、优化 MEMS 器件设计、扩大选材范围和提高 MEMS 器件寿命与可靠性的关键,所以,薄膜各种性能的研究和测试正在成为一个新的研究热点,引起了微电子学、力学、物理、材料等领域研究者的兴趣。尽管人们对薄膜的热电学行为和测试技术已经进行了大量而广泛的研究工作,对薄膜与大块材料在热学行为之间的差异已经有了一定程度的了解,但这些研究工作目前还只是刚刚开始,众多不清楚的问题有待于更加深入的研究。而对于薄膜材料参数的在线监测来说,应有一个所谓的“测试单元”,单元中应含有各种不同参数的在线测试结构,在经历与 MEMS 器件同样的工艺后,其结构要能相应的反映出材料参数的变化,获得与器件本身同样的热学、电学、力学、机械学等性能,然后利用方便快捷的测试方法测出陪片或陪管的各种性能参数,这对在线监测器件制作工艺,优化 MEMS 器件设计都具有重要的意义。随着 MEMS 技术的迅速发展和各种新型薄膜材料的不断涌现,必将对薄膜材料的性能与测试技术提出更高的要求,有待于设计制作出含有各种薄膜材料参数“测试单元”的在线“测试芯片”。

致 谢

本论文的完成离不开很多人的帮助与支持，没有他们，我就无法顺利完成学业。

首先我要深深感激我的导师黄庆安教授，是他把我引入 MEMS 研究领域。他对新知识、新科技孜孜不倦的学习毅力，严谨的治学态度深深影响着我。黄老师的知识面很广，对问题的认识非常深刻，总是能够很清楚的看到我研究工作中所出现的问题、偏差，及时、透彻的提醒和教诲让我少走了很多弯路，正是黄老师的严厉和鞭策，才使得我的论文和研究工作得以顺利进行、层层深入。我每提交的一篇论文，黄老师都以极大的耐心逐字逐句细致的给予审阅、批改。他的为人、治学、对科研和事业孜孜不倦的追求和勤奋努力的精神将会指导和影响我的一生。

在我的课题研究阶段，有很多老师给予我有益的帮助，他们是茅盘松教授、李伟华教授、秦明教授、陈德英教授、殷刚毅老师、樊路嘉老师等。不管是每周的学术讨论还是平时，他们对我的课题研究都给予很多的帮助和提点，从课题研究的细节到测试实验等都给予我很大的帮助。对我提出的各种问题总是给予耐心的解答，使我受益很多。

我要特别感谢南京 55 所二中心的朱健主任，感谢北大微电子所的张大成教授，他们为我的测试结构制作给予了有益的指点，提供了实验条件。

感谢我的同学、朋友和 MEMS 教育部重点实验室研究生们，正是在和他们的交流和探讨中，我得到很多灵感和收益，也伴我度过三年来寂寞孤独和枯燥乏味的生活。

感谢我原单位的领导和同事，是他们帮我解决了很多后顾之忧，给我很多鼓励和支持，使我不必为一些琐事而烦恼。

我要感激我的父母，在我读书的三年来，他们为我和我的家庭操心很多。

最后，我要感谢我的妻子汪家文女士，三年来她承担了家庭生活的所有重担和孩子的教育，才使得我能够安心学业。感谢我的儿子许俊韬，他带给我很多快乐。这几年我对她们的照顾太少。她们是我生活和事业的动力。

深深感谢关心、爱护、支持、鼓励我的亲人和朋友们。

参考文献

第一章

- [1] Senturia S D. *Microsystem design*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. 3~8.
- [2] 李志坚, 周润德. ULSI 器件电路与系统. 北京: 科学出版社, 2000. 536~541.
- [3] Nagel D J, Zaghloul M E. MEMS: micro technology, mega impact. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 2001, 17(2): 14~25.
- [4] Fan L S, Tai Y C, Muller R S. IC-Processed Electrostatic Micromotors. In: *Proc. of IEEE International Electron Devices Meeting*. San Francisco: IEEE, 1996: 198~203.
- [5] 黄庆安. 硅微机械加工技术. 北京: 科学出版社, 1996. 1~256.
- [6] Ferguson J P, Schoenfelder S. Micromoulded spectrometers produced by the LIGA process. In: *Proc. of Microengineering in Optics and Optoelectronics*. IEE, 1999. 11/1~11/10.
- [7] 王渭源. 小如蚂蚁——半导体传感器与微电子机械系统. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.
- [8] 王立鼎, 罗怡. 中国 MEMS 的研究与开发进程. *仪表技术与传感器*, 2003, (1): 1~3.
- [9] 朱健. MEMS 技术的发展与应用. *半导体技术*, 2003, 28(1): 29~32.
- [10] <http://www.instat.com>.
- [11] 姜岩峰, 黄庆安. MEMS 领域中微结构机械参数在线测量方法的研究和进展. *微纳电子技术*, 2003, (6): 34~39.
- [12] An introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)[M]. Published in 2002 by PRIME Faraday Partnership.
- [13] Bustillo J M, Howe R T, Muller R S. Surface micromachining for microelectromechanical systems. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86: 1552~1574.
- [14] Judy J W. Microelectromechanical systems(MEMS): fabrication, design and applications. *Smart Mater. Struct*, 2001, (10): 1115~1134.
- [15] 格雷戈里 T A 科瓦奇著, 张文栋等译. 微传感器与微执行器全书. 北京: 科学出版社, 2003.
- [16] http://www.wiley-vch.de/vch/journals/2081/books/2081_rel_title_varadan.pdf: MEMS
- [17] <http://www.photics.net/develop/article/list.asp?id=54>
- [18] 邹泉波. 微膜结构用于电容式硅微麦克风的研究. *半导体学报*, 1996, 17(12), 907.
- [19] Osterberg P M, Senturia S D. M-TEST: A test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1997, 6(2): 1574~1582.

第二章

- [1] 刘静编著. 微米/纳米尺度传热学. 北京: 科技出版社, 2002.
- [2] Hornsey R, Thomas P, Savchenko A, Pope T. Nonoptical characterization techniques for uncooled microbolometer infrared sensors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2000, 47(12): 2294~2300.
- [3] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360~369.

- [4] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1):136~144.
- [5] Geisberger A A, Sarkar N, Skidmore G D. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 513~523.
- [6] Kleiner M B, Kuhn S A, Weber W. Thermal conductivity measurements of thin silicon dioxide films in integrated circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(9): 1602~1609.
- [7] Friedemann V, Thomas S. Thermal conductivity of thin films experimental methods and theoretical interpretation. 16th International Conference on Thermoelectrics, 1997, 711~718.
- [8] Jansen E, Dorsch O, Obermeier E, Kulisch W. Thermal conductivity measurements on diamond films based on micromechanical devices. *Diamond and Related Materials*, 1996, 5: 644~648.
- [9] Volkein F, Balts H. A microstructure for measurement of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4): 193~196.
- [10] Hafizovic S, Paul O. Temperature dependent thermal conductivities of CMOS layers by micromachined thermal van der Pauw test structures. *Sensors and Actuators*, 2001, 3: 10~14.
- [11] Kurabayashi K, Asheghi M, Touzelbaev M, Goodson K E. Measurement of the thermal conductivity anisotropy in polyimide films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(2): 180~191.
- [12] Schumann J, Kleint C A, Vinzelberg H, Thomas J, Hecker M, Nurnus J, Boettner H, Lambrecht A, Kunzel C, Voelklein F. Micromachined thermoelectric test device based on silicon/germanium superlattices: Simulation, preparation and characterization of thermoelectric behavior. *Thermoelectrics, 2003 Twenty-Second International Conference on-ICT 2003*: 677~681.
- [13] Huang L M, El-Genk M S, Schuller M J. Measurements of thermal conductivities of alumina powders and Min-K in vacuum[AMTEC applications]. *Energy Conversion Engineering Conference, 1997. IECEC-97. Proceedings of the 32nd Intersociety 1997*, 2: 1190~1195.
- [14] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360~369.
- [15] Jansen E, Obermeier E. Thermal conductivity measurements on thin films based on micro-mechanical devices, *J. Micromech. Microeng.*, 1996, 6(3): 118~121.
- [16] Cahill D G. Thermal conductivity measurement from 30 to 750K: the ω method. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, 61(2): 802~808.
- [17] Brotzen F R, Loos P J, Brady D P. Thermal conductivity of thin SiO₂ films. *Thin Solid Films*, 1992, 207: 197~201.
- [18] Norwood D, Worobey W, Peterson D, Miller D. Diamond-a new high thermal conductivity substrate for multichip modules and hybrid circuits. *Electronic Components and Technology Conference, 1993. Proceedings*: 910~919.
- [19] Graf T, Glur H. Nd:YAG lasers without thermally induced lenses. *Lasers and Electro-Optics Europe, 2003. CLEO/Europe. 2003 Conference on, 2003*, 40: 22~27.
- [20] 宋青林, 夏善红, 陈绍凤, 张建国. 微尺度薄膜热导率测试技术. *物理学进展*, 2002, 22 (3) : 283~295.
- [21] Kowbel W, Woida R, Withers J C. High thermal conductivity composites for laser diode applications. *Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE*, 5: 2423~2428.
- [22] Lee S M, Cahill D G. Heat transport in thin dielectric films. *J. Appl. Phys.*, 1997, 81(6): 2590~2595.
- [23] Harry A S, John S S, Paul G A M. Thermal conductivity measurements of thin film silicon dioxide. *Pro. IEEE 1989 Int. Conference on Microelectronic Test Structure. 1989*, 2: 121~125.
- [24] Kurabayashi K, Asheghi M, Touzelbaev M. Measurement of the thermal conductivity anisotropy in polyimide films. *IEEE journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(2): 180~191.
- [25] Kleiner M B, Kuhn S A, Weber W. Thermal conductivity measurements of thin silicon dioxide films

- in integrated circuits. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1996, 43(9): 1602~1609.
- [26] Brotzen F B, Loos P J, Brady D P. Thermal conductivity of thin SiO₂ films. *Thin Solid Films*, 1992(207): 197~201.
- [27] Cahill D G. Thermal conductivity measurement from 30 to 750K: the 3 ω method. *Rev. Sci. Instrum.*, 1990, 61(2): 802~808.
- [28] Chen G, Zhou D Y, Kim C J, Zhen X Y, Liu Z L, Wang K L. Heat conduction in alloy-based superlattices. 17th International Conference on Thermoelectrics, 1998: 202~205.
- [29] 张立伟, 马灵芝, 唐祯安, 蒋国平. 一种用于测量 SiO₂ 薄膜热导率的测试方法. *测控技术*, 2001, 20(8): 25~27.
- [30] Lee S M, Cahill D G. Heat transport in thin dielectric films. *J. Appl. Phys.*, 1997, 81(6): 2590~2595.
- [31] Chu D, Touzelbaev M, Goodson K E, Babin S, Pease R F. Thermal conductivity measurements of thin-film resist. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 19(6): 2874~2877.
- [32] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360~369.
- [33] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 136~144.
- [34] Itrace A, Sarro P M. Measurement of thermal conductivity and diffusivity of single and multilayer membranes. *Sensors and Actuators*, 1999, 76: 323~328.
- [35] Tai Y C, Mastrangelo C H, Muller R S. Thermal conductivity of heavily doped low-pressure chemical vapor deposited polycrystalline silicon films. *J. Appl. Phys.*, 1988, 65(5): 1442~1447.
- [36] Jansen E, Obermeier E. Thermal conductivity measurements on thin films based on micromechanical devices. *J. Micromech. Microeng.*, 1996, 6: 118~121.
- [37] Barwolff A, Tömm J W. Non-invasive optical assessment of packaging-induced defects in high power laser diodes. *Electronic Components and Technology Conference*, 2000: 421~425.
- [38] Song D, Chen G. Thermal conductivity of periodically microporous silicon membranes. *Thermoelectrics*, 2002. Proceedings ICT'02. Twenty-First International Conference on 2002: 292~295.
- [39] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 136~144.
- [40] Jansen E, Obermeier E. Thermal conductivity measurements on thin films based on micromechanical devices. *J. Micromech. Microeng.*, 1996, 6: 118~121.
- [41] Volkein F, Balts H. A microstructure for measurement of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4): 193~196.
- [42] McConnell A D, Uma S, Goodson K E. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360~369.
- [43] Itrace A, Sarro P M. Measurement of thermal conductivity and diffusivity of single and multilayer membranes. *Sensors and Actuators*, 1999, 76: 323~328.
- [44] Tai Y C, Mastrangelo C H, Muller R S. Thermal conductivity of heavily doped low-pressure chemical vapor deposited polycrystalline silicon films. *J. Appl. Phys.*, 1988, 65(5): 1442~1447.
- [45] Volkein F, Balts H. A microstructure for measurement of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4): 193~196.
- [46] Paul O, Ruther P, Plattner L, Baltes H. A thermal van der pauw test structure. *IEEE Transaction on Semiconductor Manufacturing*, 2000, 13: 159~166.
- [47] Hafizovic S, Paul O. Temperature-dependent thermal conductivities of CMOS layers by micro-machined thermal van der pauw test structures. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97-98: 246~252.
- [48] Pan C H, Tung C L. A simple method for determination of thermal conductivity coefficient of dielectric films. 2001 International Symposium on Micromechatronics and Human Science, 2001:

第三章

- [1] 杨世铭, 陶文铨编著. 传热学. 高等教育出版社, 1998.
- [2] 皮茨 D, 西索姆 L 著, 葛新石等译. 传热学 (原第二版). 科学出版社, 2002.
- [3] 陶文铨编著. 数值传热学. 西安交通大学出版社, 2002.
- [4] Tummala R R. Fundamentals of Microsystems Packaging. The McGraw-Hill Companies, Inc. Printed in USA.
- [5] Senturia S D. Microsystem design. Kluwer academic Publishers, 2001.
- [6] 许高斌, 黄庆安. 在线检测多晶硅薄膜热导率测试结构的设计与模拟. 半导体学报, 2004, 25(4): 430~436.
- [7] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. Journal of Microelectromechanical Systems, 2001, 10(3): 360~369.
- [8] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. Journal of Microelectromechanical Systems, 2000, 9(1): 136~144.
- [9] Geisberger A A, Sarkar N, Skidmore G D. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators. Journal of Microelectromechanical Systems, 2003, 12(4): 513~523.
- [10] Hafizovic S, Paul O. Temperature dependent thermal conductivities of CMOS layers by micromachined thermal van der Pauw test structures. Sensors and Actuators, 2001, 3: 10~14.
- [11] Huang Q A, Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. J. Micromech. Microeng., 1999, 9: 64~70.
- [12] Kuang Y, Huang Q A, Lee N K S. Numerical simulation of a polysilicon thermal flexure actuator, Microsystem Technologie, 2002, 8: 17~21.
- [13] 戴锅生编. 传热学. 北京: 高等教育出版社, 1991, 5.
- [14] Lin L W, Chiao M. Electrothermal responses of lineshape microstructures. Sensors and Actuators A, 1996, 55: 35~41.
- [15] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors. Sensors and Actuators A, 1999, (75): 222~229.
- [16] Que L, Park J S, Gianchandani Y B. Bent-beam electrothermal actuators-part I: single beam and cascaded devices, 2001, 10: 247~254.
- [17] Coventor, Section4: MemETherm.
- [18] 许高斌, 黄庆安, 李伟华. 微加工多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构的设计与模拟. 仪器仪表学报 (已录用)
- [19] Xu G B, Huang Q A. On-line extraction for thermal conductivity of surface micro- machined polysilicon thin films. IEEE Sensors Conference, 2004, 430~435.

第四章

- [1] Kuang Y, Huang Q A, Lee N K S. Numerical simulation of a polysilicon thermal flexure actuator, Microsystem Technologie, 2002, 8: 17~21.
- [2] Baltes H, Paul O, Brand O. Micromachined thermally based CMOS microsensors. Proceedings of the IEEE, 1998, 86: 1660~1678.
- [3] Hosticka B J. CMOS sensor systems. Sensors and actuators A, 1998: 335~341.
- [4] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. Journal of Microelectro-mechanical Systems, 2001, 10(3): 360~369.

- [5] Jansen E, Obermeier E. Thermal conductivity measurements on thin films based on micromechanical devices. *J. Micromech. Microeng.*, 1996, 6(3): 118~121.
- [6] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-si using microgauge sensors. *Sensors and Actuators*, 1999, (75): 222~229.
- [7] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivities for thermal CMOS MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 3: 136~144.
- [8] Hafizovic S, Paul O. Temperature dependent thermal conductivities of CMOS layers by micromachined thermal van der Pauw test structures. *Sensors and Actuators*, 2001, 3: 10~14.
- [9] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(3): 360~369.
- [10] Volkein F, Balts H. A microstructure for measurement of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4): 193~196.
- [11] Huang Q A, Xu G B, Qi L N, Li W H. A Simple method for measuring the thermal diffusivity of surface-micromachined polysilicon thin films. *IEEE Electron Device Letters* (submitted).
- [12] Huang Q A, Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. *J. Micromech. Microeng.* 1999(9): 64~70.
- [13] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-si using microgauge sensors. *Sensors and Actuators A*, 1999(75): 222~229.
- [14] Geisberger A A, Sarkar N, Skidmore G D. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators. *Journal of MEMS*, 2003, 12(4): 513~523.
- [15] Lin L W, Chiao M. Electrothermal responses of lineshape microstructures. *Sensors and Actuators A*, 1996, 55: 35~41.
- [16] 皮茨 D, 西索姆 L 著, 葛新石等译. 传热学 (原第二版). 科学出版社, 2002.
- [17] Fedder G K, Howe R T. Thermal assemble of polysilicon microstructures. *Proceeding of 1991 IEEE MEMS*, Nara, Japan, 1991: 63~68.
- [18] Huang Q A, Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. *J. Micromech. Microeng.*, 1999, 9: 64~70.
- [19] Bulter J T, Bright V M, Cowan W D. Average power control and positioning of polysilicon thermal actuators. *Sensors and Actuators*, 1999, 72: 88~97.
- [20] Chae J H, Lee J Y, Kang S W. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-si using microgauge sensors. *Sensors and Actuators*, 1999, 75: 222~229.

第五章

- [1] Huang Q A, Xu G B, Qi L N, Li W H. A Simple method for measuring the thermal diffusivity of surface-micromachined polysilicon thin films. *IEEE Electron Device Letters* (submitted).
- [2] 许高斌, 黄庆安. 在线检测多晶硅薄膜热导率测试结构的设计与模拟. *半导体学报*, 2004, 25(4): 430~436.
- [3] Xu G B, Huang Q A, Li W H. On-line testing for thermal conductivity of surface-micromachined polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems* (submitted).
- [4] 许高斌, 黄庆安, 李伟华. 微加工多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构的设计与模拟. *仪器仪表学报*, 已录用.
- [5] Xu G B, Huang Q A. On-line extraction for thermal conductivity of surface micro-machined polysilicon thin films. *IEEE Sensors Conference*, 2004, 430~435.
- [6] 格雷戈里 T A 科瓦奇著, 张文栋等译. 微传感器与微执行器全书. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] McConnell D, Uma S. Thermal conductivity of doped polysilicon layers. *Journal of Microelectro-*

- mechanical Systems, 2001, 10(3): 360~369.
- [8] von Arx M, Paul O, Baltes H. Process dependent thin film thermal conductivitys for thermal CMOS MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, 9(1): 136~144.
- [9] Geisberger A A, Sarkar N, Skidmore G D. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 513~523.
- [10] Lin L W, Chiao M. Electrothermal responses of lineshape microstructures. *Sensors and Actuators A*, 1996, 55: 35~41.

第六章

- [1] Volkein F, Balts H. A microstructure for measurement of thermal conductivity of polysilicon thin films. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1992, 1(4):193~196.
- [2] Hafizovic S, Paul O. Temperature dependent thermal conductivities of CMOS layers by micro-machined thermal van der Pauw test structures. *Sensors and Actuators*, 2001, 3:10~14.
- [3] Huang Q A, Lee N K S. Analysis and design of polysilicon thermal flexure actuator. *J. Micromech. Microeng.*, 1999, 9: 64~70.
- [4] Hafizovic S, Paul O. Temperature dependent thermal conductivities of CMOS layers by micromachined thermal van der Pauw test structures. *Sensors and Actuators*, 2001, 3: 10~14.
- [5] Geisberger A A, Sarkar N, Skidmore G D. Electrothermal properties and modeling of polysilicon microthermal actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(4): 513~523.

图表索引

第一章

图 1.1 牺牲层技术	3
图 1.2 典型表面加工工艺流程	5

第二章

图 2.1 SiO_2 薄膜纵向热导率典型稳态测试结构图	8
图 2.2 测试样品图形	9
图 2.3 3ω 方法测试结构图	10
图 2.4 薄膜纵向热导率的瞬态热反射测试方法	11
图 2.5 CMOS MEMS 工艺悬臂梁测试结构的几种典型结构	12
图 2.6 测试结构示意图及其热平衡流量图	13
图 2.7 典型固支梁测试结构	14
图 2.8 微桥掺杂多晶硅薄膜热导率测试结构	15
图 2.9 微桥掺杂多晶硅薄膜热导率的测试装置	15
图 2.10 膜式热导率测试结构	16
图 2.11 范德堡多晶硅薄膜热导率测试结构	17
图 2.12 热学范德堡测试结构的热传导模型	17
图 2.13 热执行器式多晶硅薄膜热导率测试结构	18

第三章

图 3.1 多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构阵列三维视图	22
图 3.2 多晶硅薄膜热导率测试阵列结构剖视图	22
图 3.3 测试结构 1(或测试结构 2)中总的热量传递示意图	24
图 3.4 测试结构中间悬臂梁的传热模型示意图	25
图 3.5 参考结构三维有限元热电分析网格划分	28
图 3.6 施加电压 5V 时参考结构的温度分布云图	28
图 3.7 参考结构中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系	29
图 3.8 参考结构中不同空气层厚时,测量电压与测量电流的关系	30
图 3.9 参考结构中加热功率与加热条温度变化量的关系	30
图 3.10 测试结构 1 三维有限元电热分析网格划分	31
图 3.11 施加电压 5V 时测试结构 1 的温度分布云图	31
图 3.12 测试结构 1 中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系	31
图 3.13 测试结构 1 中不同空气层厚时,测量电压与测量电流的关系	32
图 3.14 测试结构 1 中加热功率与加热条温度变化量的关系	32
图 3.15 测试结构 2 三维有限元电热分析网格划分	33
图 3.16 施加电压 4V 时测试结构 2 的温度分布云图	33

图 3.17	测试结构 2 中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系	33
图 3.18	测试结构 2 中不同空气层厚时,测量电压与测量电流的关系	34
图 3.19	测试结构 2 中加热功率与加热条温度变化量的关系	34
图 3.20	模拟分析得到的多晶硅薄膜热导率与模拟设定值的比较	35
图 3.21	多晶硅薄膜热导率 II 型在线测试结构三维视图	36
图 3.22	测试结构剖视图	36
图 3.23	测试结构中间悬臂梁的传热模型示意图	38
图 3.24	参考结构中加热条的传热模型示意图	40
图 3.25	参考结构三维有限元热电分析网格划分	42
图 3.26	施加电压 5V 时参考结构的温度分布云图:空气间隙 $3\mu\text{m}$	42
图 3.27	不同空气层厚时加热条及其引线的温度分布曲线	43
图 3.28	参考结构中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系	43
图 3.29	参考结构中不同空气层厚时,测量电压与测量电流的关系	44
图 3.30	参考结构中加热功率与加热条温度变化量的关系	44
图 3.31	参考结构中加热条热功耗与加热条温度变化量的关系	44
图 3.32	测试结构三维有限元电热分析网格划分	45
图 3.33	施加电压 5V 时测试结构的温度分布云图:空气间隙 $3\mu\text{m}$	46
图 3.34	测试结构中不同空气层厚时,施加电压与测量电流的关系	46
图 3.35	测试结构中不同空气层厚时,测量电压与测量电流的关系	46
图 3.36	测试结构中加热功率与加热条温度变化量的关系	47
图 3.37	模拟分析得到的多晶硅薄膜热导率与模拟设定值的比较	47
表 3-1	等效传热系数使用的典型参数	28
表 3-2	向衬底传热的等效传热系数换算	28
表 3-3	模拟使用的参考结构相关参数	29
表 3-4	模拟使用的测试结构 1、2 相关参数	30
表 3-5	模拟使用的参考结构相关参数	42
表 3-6	模拟分析得到的等效散热系数与模拟设定值的比较	45
表 3-7	模拟使用的测试结构相关参数	45

第四章

图 4.1	多晶硅电阻温度系数双端固支梁在线提取结构	50
图 4.2	电阻温度系数在线提取双端固支梁结构的热电分析网格划分(提取结构 1)	54
图 4.3	模拟分析得到的热稳态时双端固支梁的冷却初始温度分布	54
图 4.4	一定施加电压(5.0V)时的稳态温度分布即冷却初始温度分布:空气间隙 $3\mu\text{m}$	55
图 4.5	模拟分析得到的平均温度随时间的变化关系	56
图 4.6	模拟和拟合分析得到电阻随时间的变化关系	56
图 4.7	模拟分析得到的电阻和温度的关系	57
图 4.8	测量电流为 0.1mA 时的温度分布	57
图 4.9	三维热电分析网格划分示意图(提取结构 2)	59
图 4.10	一定施加电压(4.0V)时的稳态温度分布即冷却初始温度分布:空气间隙 $3\mu\text{m}$	59
图 4.11	模拟分析和拟合得到电阻随时间的变化关系(提取结构 2)	59
图 4.12	梁的电流—电压特性	59
图 4.13	式(4-26)中函数 $F(t)$ 与时间的函数关系	60
表 4-1	模拟分析使用的双端固支梁结构参数	54
表 4-2	等效传热系数使用的典型参数	54

表 4-3 模拟分析提取的参数	57
表 4-4 模拟分析提取参数与模拟设定值的比较	60

第五章

图 5.1 热学参数在线测试结构版图	62
图 5.2 测试结构制作工艺流程图	63
图 5.3 测试结构 SEM 图片	64
图 5.4 提取多晶硅电阻温度系数测试结构的 SEM 图片	65
图 5.5 多晶硅电阻温度系数及热扩散系数测试电路连接示意简图	65
图 5.6 梁的电流—电压特性	66
图 5.7 实验测得的输出电压随时间的变化关系与最佳拟合匹配分析: 梁 1	66
图 5.8 实验测得的输出电压随时间的变化关系与最佳拟合匹配分析: 梁 2	66
图 5.9 实验提取得到的电阻随温度的变化关系	67
图 5.10 函数 $F(t)$ 与时间的函数关系	67
图 5.11 多晶硅薄膜热导率 T 型测试结构阵列 SEM 图片	68
图 5.12 参考结构中施加电压与测量电流的关系	69
图 5.13 参考结构中测量电压与测量电流的关系	69
图 5.14 测试结构 1 中施加电压与测量电流的关系	69
图 5.15 测试结构 1 中测量电压与测量电流的关系	70
图 5.16 测试结构 2 中施加电压与测量电流的关系	70
图 5.17 测试结构 2 中测量电压与测量电流的关系	70
图 5.18 实验测得的热导率与温度关系曲线	71
图 5.19 表面加工 Π 型多晶硅薄膜热导率在线提取测试结构 SEM 图片	71
图 5.20 参考结构中施加电压与测量电流的关系	72
图 5.21 参考结构中测量电压与测量电流的关系	72
图 5.22 测试结构中施加电压与测量电流的关系	72
图 5.23 测试结构中测量电压与测量电流的关系	73
图 5.24 实验测得的热导率与温度关系曲线	73
表 5-1 测试结构制作加工工艺	63

第六章

图 6.1 模拟分析辐射散热影响的有限元模型	76
图 6.2 辐射散热、辐射线性化散热与忽略辐射散热的比较	77

在学期间发表的论文

- 1 GaoBin Xu, Qing-An Huang, and WeiHua Li. On-line testing for thermal conductivity of surface-micromachined polysilicon thin films. Journal of Microelectromechanical Systems (submitted).
- 2 Qing-An Huang, Gaobin Xu, Lina Qi, and Weihua Li. A simple method for measuring the thermal diffusivity of surface -micromachined polysilicon thin films. IEEE Electron Device Letters (submitted).
- 3 Qing-An Huang, Ming Qin, Zhongping Zhang, Minxin Zhou, Lei Gu, Hao Zhu, Desheng Hu, Zhikun Hu, Gaobin Xu, Zutao Liu. Weather station on a chip. IEEE Sensors Conference, 2003, 106-1113.
- 4 Gaobin Xu, Qing-An Huang. On-line extraction for thermal conductivity of surface-Micromachined polysilicon thin films. IEEE Sensors Conference, 2004, 430-435.
- 5 Gaobin Xu, Qing-An Huang, and Yanfeng Jiang. A new test structure for measuring thermal conductivity of polysilicon thin films. SPIE 2002, 4928: 267-271.
- 6 许高斌, 黄庆安, 李伟华. 微加工多晶硅薄膜热导率 T 型在线测试结构的设计与模拟. 仪器仪表学报, 已录用.
- 7 许高斌, 黄庆安. 在线测试多晶硅薄膜热导率测试结构的设计与模拟. 半导体学报, 2004, 25(4): 430-436.
- 8 戚丽娜, 许高斌, 黄庆安. 范德堡多晶硅热导率的测试结构. 固体电子学研究进展, 已录用.
- 9 许高斌, 黄庆安. 表面加工多晶硅薄膜热导率测试结构. 微纳电子技术, 2003, 7/8: 224-227.
- 10 许高斌, 黄庆安, 姜岩峰. MEMS 薄膜热导率测试结构. 测控技术, 2002, 6: 22-25.
- 11 许高斌, 黄庆安. 表面加工多晶硅薄膜热导率测试结构. 第八届全国敏感元件与传感器学术会议 STC 2003, 221-225.

发明专利

- 1 发明名称: 导体薄膜热导率的测试装置 (第一发明人), 中请号: 03113386. X.
- 2 发明名称: 导体薄膜热扩散系数的测试装置 (第二发明人), 已申请.