

基于MEMS技术的 热梯度器件研究

Research on Thermal Gradient Devices
Based on MEMS Technology

聂金泉

著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于 MEMS 技术的热梯度 器件研究

聂金泉 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书提出了一种基于 MEMS 技术的热梯度器件,设计了一种新型梯度加热器,通过理论分析和数值模拟对器件的温度性能进行优化,并完成温度性能测试。

本书可供相关专业领域研究人员参考阅读,也可作为相关学院研究生以上师生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

基于MEMS技术的热梯度器件研究 / 聂金泉著. — 北京:中国水利水电出版社, 2018.12
ISBN 978-7-5170-7299-7

I. ①基… II. ①聂… III. ①微机电系统—工艺过程设计—研究 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第291862号

书 名	基于 MEMS 技术的热梯度器件研究 JIYU MEMS JISHU DE RE TIDU QIJIAN YANJIU
作 者	聂金泉 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	三河市元兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 12.5 印张 160 千字
版 次	2019 年 4 月第 1 版 2019 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	59.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书提出了一种基于 MEMS 技术的热梯度器件，设计了一种新型梯度加热器，通过理论分析和数值模拟对器件的温度性能进行优化，并完成温度性能测试。

本书主要讲述如下内容。

1. 结合各种常用材料的特性，可以选择热梯度器件的制作材料。通过理论分析提出了增加铝薄膜来增强温度梯度非线性的方法；分析了微通道内的流体流动对基体和流体的温度的影响，设计了微通道芯片的结构和尺寸；分析了加热器的功率与温度的关系，提出了一种新型梯度加热器的设计，由 6 个微加热芯片组成，每个微加热芯片包含一个梯度单元和一个补偿单元。

2. 采用数值模拟分析了铝薄膜的几何尺寸（宽度和厚度）对温度梯度和功耗的影响，为温度梯度的优化设计提供了参考，在综合考虑温度梯度和功耗的情况下，确定了铝薄膜的几何尺寸；分析了梯度加热器的热功率与温度的关系，设计了梯度单元和补偿单元的电阻，优化了微加热芯片的排列方式，并设计了温度控制系统，将梯度加热器作为一个整体进行控制。

3. 采用 MEMS 微加工技术加工和制作微加热芯片与玻璃-PDMS 微通道芯片，分别开发了微加热芯片和玻璃-PDMS 微通道芯片的工艺流程；分析了工艺流程中的关键工艺步骤，包括热氧化、薄膜沉积、金属溅射、PDMS

II ||| 基于 MEMS 技术的热梯度器件研究

模塑成型、SU-8 光刻、氧等离子体键合，确定了各步骤的关键工艺参数，完成了微加热芯片和玻璃-PDMS 微通道芯片的加工；通过微加热芯片的引线键合与微通道芯片进口、出口的密封连接完成了系统构建。

4. 采用红外热像仪测试了器件的温度性能，得到了梯度加热器的功率与温度特性，玻璃-PDMS 微通道芯片的温度梯度，以及高温区域的温度均匀性，与数值模拟分析的结果进行了对比，从温度性能的角度证明了设计的正确性及可行性。

本书在写作过程中参考了部分相关的文献，在此对原作者表示衷心的感谢并致以崇高的敬意。

本书观点均由本人经研究、核实后提出，供相关领域研究人员参考，期望起到抛砖引玉之效。由于作者水平有限，书中出现不当之处在所难免，恳请专家、同行们不吝提出宝贵的修改意见。

作者

2018 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 MEMS 技术	1
1.1.1 MEMS 的概念	1
1.1.2 MEMS 的制造工艺	2
1.1.3 MEMS 的本质特征	13
1.1.4 MEMS 的应用	14
1.2 微流控芯片	23
1.2.1 微流控芯片的概念	23
1.2.2 微流控芯片的应用	24
1.3 微流控芯片的研究现状	26
1.3.1 微流控芯片的衬底材料和加工技术	26
1.3.2 微流控芯片的加热和冷却技术	33
1.3.3 温度梯度与热梯度芯片	35
1.4 研究内容和结构	38
1.4.1 研究内容	39
1.4.2 结构	39
第 2 章 热梯度器件的设计	41

IV ||| 基于 MEMS 技术的热梯度器件研究

2.1 热梯度器件材料的选择	41
2.1.1 微通道芯片的材料	41
2.1.2 微加热芯片的材料	43
2.2 热梯度器件的结构设计	45
2.2.1 热梯度器件的总体结构	45
2.2.2 温度梯度的非线性	46
2.2.3 微通道的设计	53
2.2.4 梯度加热器的功率分析	58
2.2.5 温度传感器结构设计	61
2.3 本章小结	62
第3章 温度特性的数值模拟与优化	65
3.1 ANSYS 热分析与建模	65
3.1.1 热分析基础	65
3.1.2 稳态热分析	66
3.1.3 非线性热分析	67
3.1.4 边界与初始条件	68
3.1.5 热分析基本过程	68
3.1.6 建模与施加载荷	70
3.2 温度梯度的优化	71
3.2.1 铝薄膜尺寸对温度梯度的影响	71
3.2.2 铝薄膜尺寸对功耗的影响	80
3.2.3 铝薄膜尺寸优化	83
3.3 梯度加热器的优化	83
3.3.1 热功率与温度的关系	83
3.3.2 微加热芯片的电阻设计	84

3.3.3 微加热芯片的排列方式	86
3.3.4 温度控制偏差	89
3.4 本章小结	91
第4章 热梯度器件的加工与制作	93
4.1 微加热芯片的关键技术和工艺流程	93
4.1.1 氮化硅薄膜沉积技术	93
4.1.2 金薄膜沉积技术	95
4.1.3 微加热芯片的工艺流程	98
4.2 微通道芯片的关键技术和工艺流程	106
4.2.1 PDMS 模塑成型技术	106
4.2.2 SU-8 胶光刻技术	110
4.2.3 玻璃-PDMS 键合技术	111
4.2.4 微通道芯片的工艺流程	113
4.3 热梯度器件的构建	117
4.3.1 散热器的选择	117
4.3.2 微加热芯片的封装	119
4.3.3 接口连接密封	124
4.3.4 系统构建	125
4.4 本章小结	127
第5章 温度控制系统	129
5.1 温度控制系统的工作原理	129
5.2 温度控制系统的硬件设计	131
5.2.1 MSP430 微控制器简介	131
5.2.2 CPU 系统电路	133
5.2.3 温度采集与数据处理电路	135

VI ||| 基于 MEMS 技术的热梯度器件研究

5.2.4 PWM 功率控制电路	137
5.2.5 LCD 显示电路	138
5.2.6 按键控制电路	140
5.2.7 电源电路	140
5.2.8 串口通信电路	142
5.2.9 JTAG 仿真模块电路	143
5.3 温度控制系统的软件设计	144
5.4 本章小结	146
第 6 章 温度性能测试	147
6.1 温度传感器的标定	147
6.2 梯度加热器的电阻值	152
6.3 微通道芯片的温度梯度	157
6.4 梯度加热器的功率与梯度温度	164
6.5 本章小结	170
第 7 章 结论与展望	173
7.1 本节主要工作	173
7.2 主要创新点	175
7.3 下一步工作	176
参考文献	177

第 1 章 绪 论

1.1 MEMS 技术

1.1.1 MEMS 的概念

微机电系统 (micro electromechanical systems, MEMS), 是指可批量制作的, 集微机构、微传感器、微执行器及信号处理和控制电路, 乃至通信和电源等于一体的微型器件或机电系统。MEMS 是随着半导体集成电路技术、微细加工技术和超精密机械加工技术的发展而发展起来的^[1,2]。

MEMS 技术是一种典型的多学科交叉研究领域, 几乎涉及电子技术、机械技术、物理学、化学、生物医学、材料科学、能源科学等自然及工程科学的所有领域^[3]。MEMS 技术发展初期以半导体硅技术为主, MEMS 器件以硅基材料为主, 其加工制作技术以硅微加工技术为主导, 其系统的集成也基于硅微电子集成技术。目前, MEMS 器件涉及的技术和材料有了很大的扩展, 如技术上采用了 LIGA、电铸、激光技术等, 在材料方面, 扩展到了玻璃、各种有机聚合物等。MEMS 技术的目标是通过系统的微型化、集成化来探索具有新原理、新功能的器件和系统, 从而开辟一个新技术领域和产业。MEMS 既可以深入狭窄空间完成大尺寸机电系统所不能完成的任务,

2 ||| 基于 MEMS 技术的热梯度器件研究

又可以嵌入大尺寸系统中,把自动化、智能化和可靠性提高到一个全新的水平。

微机电系统具有微型化、集成化、智能化、成本低、性能高、可以大批量生产等优点,已经广泛应用于仪器测量、无线通信、能源环境、生物医学、国防军事、航空航天、汽车电子以及消费电子等多个领域,并将继续对人类的科学技术、工业生产、国防军事、能源化工等领域产生深远的影响^[4,5]。

1.1.2 MEMS 的制造工艺

MEMS 制造工艺 (MEMS fabrication process) 是下至纳米尺度、上自毫米尺度微结构加工工艺的通称。广义上的 MEMS 制造工艺,其方式十分丰富,几乎涉及各种现代加工技术,主要制造技术途径有以下三种。

(1) 以美国为代表的、以集成电路加工技术为基础的硅基微加工技术,主要由光刻、薄膜淀积、湿法腐蚀和干法刻蚀等半导体工艺组成。

(2) 以德国为代表发展起来的 LIGA 技术。LIGA 工艺包括 X 射线曝光、微电铸和微复制成型三个基本步骤,可以用于制备高深宽比 ($1\mu\text{m}$ 宽, $1000\mu\text{m}$ 深) 的微结构。

(3) 以日本为代表发展起来的精密加工技术。

1. 光刻

光刻是一种将掩膜版的图形转移到衬底表面的图形复制技术,即利用光源选择性照射光刻胶层使其化学性质发生改变,然后显影去除相应的光刻胶。光刻得到的图形一般作为后续工艺的掩膜。光刻胶是实现光刻图形转移的材料,分为正胶和负胶。正胶经过光照的部分高分子材料发生裂解,在显影液中溶解;负胶经过光照的部分发生交联,在显影液中不溶解。因此,正胶曝光显影后得到的图形与掩膜版上不透光的图形相同,而负胶曝光显影后

的图形与掩膜版上不透光的图形相反，即同样的掩膜版，用正胶和负胶得到的图形刚好相反，如图 1.1 所示。负胶感光速度高、黏附性好、抗蚀能力强，成本低，但分辨率较低；正胶分辨率高，但是黏附性差，成本高。光刻胶一般通过旋转匀胶的方式涂覆到衬底表面，首先衬底被固定到旋转的台面上，光刻胶被点在衬底的中心位置，然后衬底以很高的速度旋转，在离心力的作用下，光刻胶会向衬底的边缘运动，如图 1.2 所示，当衬底停止旋转的时候，厚度均匀的光刻胶便覆盖在衬底的表面。光刻胶的典型厚度通常是 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 。

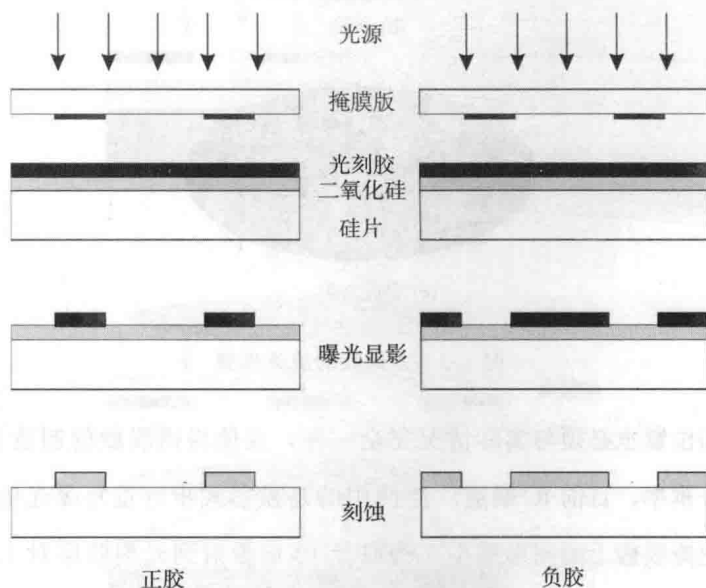


图 1.1 光刻原理示意图

曝光可分为投影式曝光和投射式曝光，投影式曝光是将掩膜版图形按照原尺寸直接曝光到光刻胶层，分为接触式曝光和接近式曝光，如图 1.3 所示。接触式曝光是在掩膜版上作用一定的压力使其接触到光刻胶层，接近式曝光是使掩膜版和光刻胶层有一个微小的距离。接近式曝光和接触式曝光用光学系统将此部分图形以 1:1 投射到硅片上，需要掩膜版的尺寸与硅片相同，掩膜版的

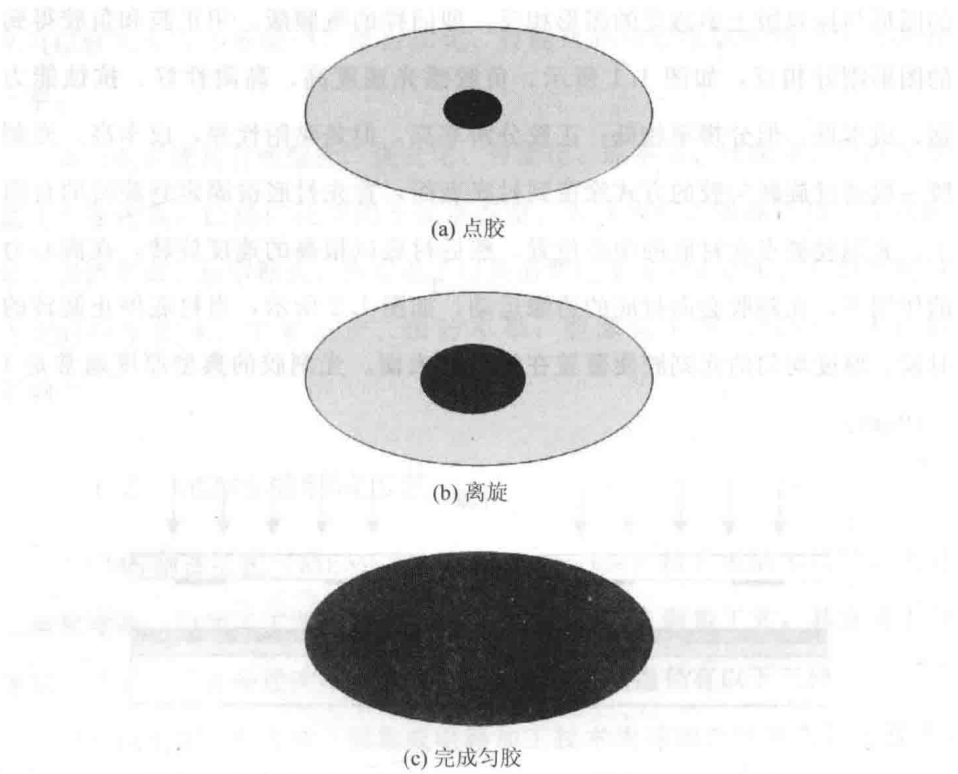
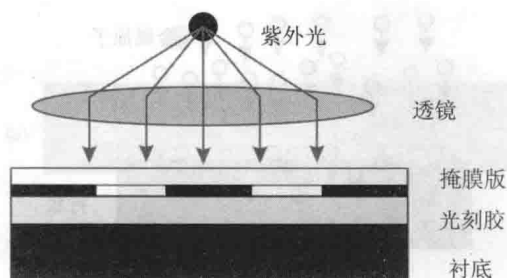


图 1.2 光刻胶的旋涂步骤

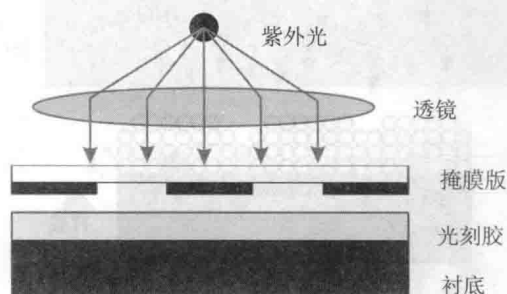
图形尺寸和位置也必须与实际情况完全一样，这使得掩膜版的制造非常困难。为了提高分辨率，目前 IC 制造广泛使用的是投射式步进重复曝光机，它利用光学系统把掩膜版上的图形缩小 5 倍或者 10 倍投射到光刻胶层对 1 个单元曝光（一般是 1 个芯片），然后硅片移动到下一个曝光位置，重复该过程对整个硅片进行步进式曝光。但步进重复曝光机价格昂贵。

2. 薄膜沉积

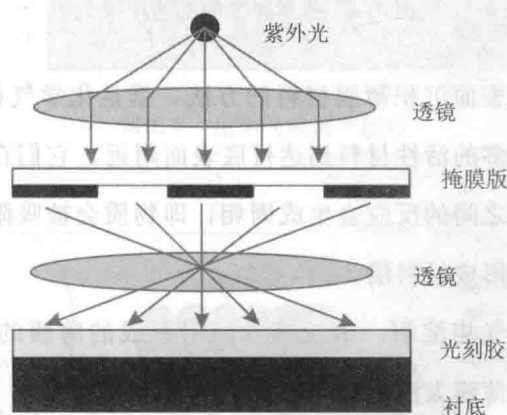
功能材料、半导体材料以及绝缘材料可以通过沉积过程沉积到圆片上。第一种实现这种沉积工艺的方法就是，直接将要沉积的材料以逐个原子或者逐层的方式从源材料沉积到衬底表面，如图 1.4 所示。这个过程通常是在低压环境下进行的，因此原子从源材料转移到圆片表面是没有空气分子



(a) 接触式曝光



(b) 接近式曝光



(c) 投射式曝光

图 1.3 接触式曝光、接近式曝光和投射式曝光

的，如金属蒸发和金属溅射。衬底和金属源被放置在一个真空腔中，金属可以通过加热（蒸发）或者高能粒子轰击（溅射）的方式实现转移。最后沉积的厚度取决于能量和时间。实际上，通常沉积的金属薄膜厚度范围是 $1\text{nm} \sim 2\mu\text{m}$ 。

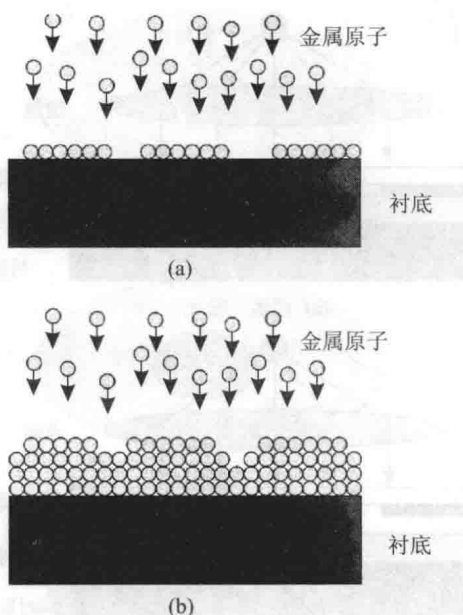


图 1.4 蒸发薄膜的工艺步骤

第二种在圆片表面沉积薄膜材料的方法，就是化学气相淀积，如图 1.5 所示。两种或者更多的活性材料到达衬底表面附近，它们在良好的环境下发生反应。这些物质之间的反应会生成固相，即物质会被吸附到衬底表面。连续反应会在衬底上形成材料层。

通常，由化学气相淀积、蒸发或者溅射形成的薄膜的平均厚度是 $1\mu\text{m}$ 以下，沉积更厚的薄膜太浪费时间而且不现实。

3. 硅热氧化

二氧化硅是微电子和 MEMS 中很重要的绝缘层材料，一种常用的最重要的形成高质量二氧化硅的方法就是在高温 ($800\sim 1200^\circ\text{C}$) 环境下让硅片和氧原子发生反应。圆片通常放置在石英管之中，如图 1.6 所示。在圆片表面会形成一层氧化层，这层氧化层将内部的硅原子和氧原子隔开，外部的原子只有以扩散方式通过氧化层，才能够与内部没发生反应却处于较

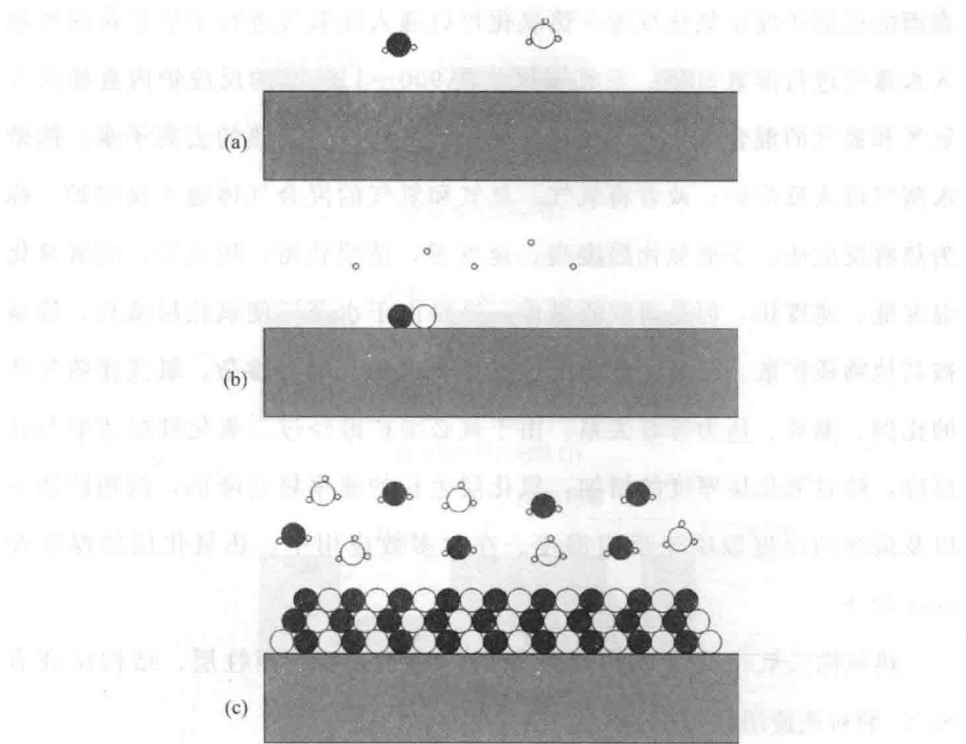


图 1.5 化学气相淀积过程

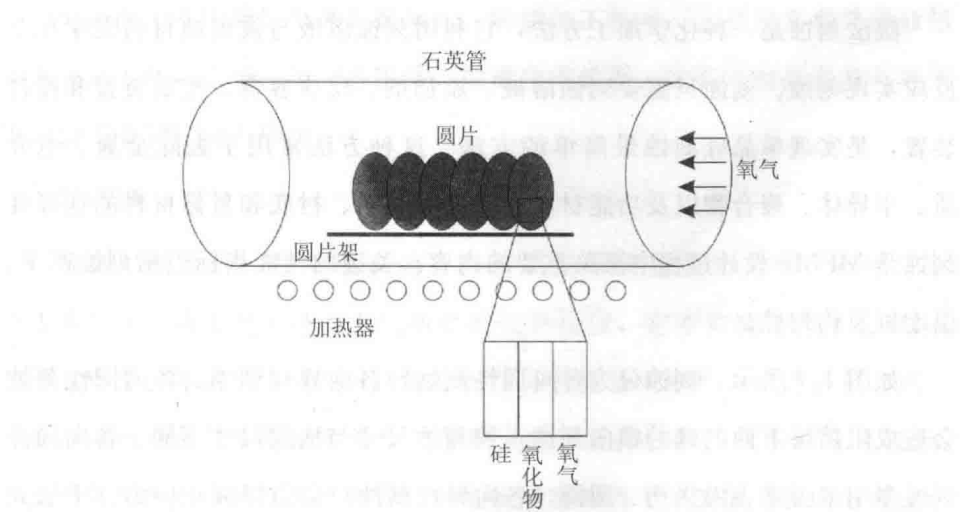


图 1.6 氧化设备和工艺原理

表面的硅原子发生氧化反应。热氧化可以通入纯氧气进行干氧化或者通入水蒸气进行湿氧化。干氧化是在 $900\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的反应炉内直接通入氧气和氮气的混合气体。湿氧化可以将氮气通过加热的去离子水,携带水蒸气进入反应炉;或者将氧气、氮气和氢气的混合气体通入反应炉,称为热解反应法。干氧化温度高、速度慢,薄膜致密,质量好;湿氧化温度低、速度快,但是薄膜质量差,这是由于水蒸气使氧化层疏松,容易被其他物质扩散。二氧化硅的生长速度与硅的晶向、掺杂、氧气伴随气体的比例、温度、压力等有关系。由于氧必须扩散经过二氧化硅层才能与硅反应,随着氧化层厚度的增加,氧化层生长的速率将会降低,沉积的速率以及最终的厚度取决于反应温度。在大多数应用中,热氧化层的厚度在 $2\mu\text{m}$ 以下。

热氧化二氧化硅可以作为绝缘层、刻蚀掩膜、牺牲层、结构层或者 Si_3N_4 的衬底使用。

4. 湿法刻蚀

湿法刻蚀是一种化学加工方法,它利用刻蚀溶液与被刻蚀材料发生化学反应实现刻蚀。刻蚀只需要刻蚀溶液、添加剂、反应容器、控温装置和搅拌装置,是实现单晶硅刻蚀最简单的方法。这种方法常用于去除金属、电介质、半导体、聚合物以及功能材料。对掩膜材料、衬底和目标材料的选择性刻蚀是 MEMS 设计过程中至关重要的内容。关键的性能指标包括刻蚀速率、温度以及均匀性。

如图 1.7 所示,刻蚀分为各向同性刻蚀与各向异性刻蚀。各向同性刻蚀会造成阻挡层下面的硅的横向刻蚀,使刻蚀尺寸与掩膜尺寸不同。各向同性刻蚀多用来去除表面损伤、圆滑(各向异性刻蚀)尖角以减小应力、干法或者各向异性刻蚀后光洁表面,以及在表面微加工中释放悬浮结构,刻蚀平面、薄膜或者结构减薄等。