

分类号\_\_\_\_\_

学号 M201072043\_\_\_\_\_

学校代码 10487\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

# 华中科技大学 硕士学位论文

压阻式硅 MEMS 谐振器的结构设计  
及工艺仿真

学位申请人： 李祖艳

学科专业： 集成电路工程

指导教师： 周文利教授

答辩日期： 2012 年 5 月 25 日

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering

**Structure Design and Processing Simulation of  
Piezoresistive Silicon MEMS Resonator**

**Candidate: Li Zuyan**

**Major: Integrated Circuit Engineering**

**Supervisor: Prof. Zhou Wenli**

Huazhong University of Science & Technology

Wuhan 430074, P.R.China

May, 2012

## 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，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于 ☐ 保密，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。  
☐ 不保密。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

## 摘要

与传统石英晶体谐振器相比，MEMS 谐振器具有高  $Q$ 、低温度漂移、低功耗、低相位噪声及长期高稳定性等优点，特别是由于其制备工艺与 CMOS 工艺兼容性好，使得 MEMS 谐振器在集成电子系统中替代石英晶体谐振器已成为必然的趋势。

压阻式硅 MEMS 谐振器是一种采用静电激励方式，利用硅材料的压阻特性检测谐振信号的谐振器。相比电磁、压电等激励方式，压阻式硅 MEMS 谐振器无需特殊材料，仅需 IC 基本材料硅即可，制备工艺简单；相比电容式谐振器，压阻式硅 MEMS 谐振器具有输出电阻低、集成度高等优点。

本文利用 COMSOL Multiphysics 进行了百兆赫兹压阻式硅 MEMS 谐振器的有限元模拟，通过对其特征频率和频率响应的计算，分析了四种结构的谐振器主要尺寸对谐振频率、品质因数、输出电压等谐振特性的影响。考虑其在 CMOS 电路系统中的应用，具体分析了  $1\mu\text{m}$ 、500nm、350nm、180nm、100nm 和 50nm 特征尺寸的谐振器的特性。通过结构的优化设计，获得特征尺寸为 500nm、品质因数为 4352 的 906.4MHz 谐振器及特征尺寸为 350nm、品质因数为 2817 的 1.3GHz 谐振器，显示出很强的应用潜力。本文还利用 SILVACO TCAD 对压阻式硅 MEMS 谐振器的制备工艺进行了仿真，分析了关键工艺步骤——光刻和反应离子刻蚀的主要影响因素。

**关键词：**压阻硅    MEMS 谐振器    有限元分析    工艺仿真

## **Abstract**

Compared with quartz resonators , MEMS resonator has advantages of high quality factor , low temperature drift, excellent phase noise performance, low power consumption, and especially the compatibility with the CMOS fabrication process which makes MEMS resonator promisingly to replace quartz resonator in the future integrated circuit systems.

Piezoresistive silicon MEMS resonator is electrostatic actuated and the motion is detected by the piezoresistive effect of silicon. Different from other resonators such as electromagnetic and piezoelectric, it only needs silicon, the basic IC material, without needing other special materials. Compared with the capacitive MEMS resonator, it has low output resistance and can be highly integrated in the circuit.

In this thesis, we analysed the piezoresistive silicon MEMS resonator with resonant frequency over hundreds of MHz by COMSOL Multiphysics simulation software. Frequency responses of the resonators with four geometrical structures were studied. The relationships between the critical dimension and the resonant characteristics such as resonator frequency, quality factor and output voltage were calibrated when scaled down with feature size of 5 $\mu$ m, 1 $\mu$ m, 500nm, 350nm, 180nm, 100nm and 50nm, respectively. By optimizing the structure, a 906.4MHz resonator with the quality factor of 4352 under the critical dimension of 500nm and a 1.3GHz resonator with the quality factor of 2817 under the critical dimension of 350nm were obtained with great application potential. The fabrication process of the resonator was simulated by SILVACO TCAD focusing on the photolithographic and RIE etch process.

**Keywords:** Piezoresistive    Silicon MEMS resonator    Finite Element Analysis  
Processing Simulation

# 目 录

<b>摘要</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>1 绪论</b>	
1.1 MEMS 谐振器.....	(1)
1.2 压阻式硅 MEMS 谐振器及其发展现状.....	(3)
1.3 本文的研究内容.....	(6)
<b>2 压阻式硅 MEMS 谐振器的工作原理</b>	
2.1 压阻式硅 MEMS 谐振器工作原理.....	(7)
2.2 压阻式硅 MEMS 谐振器的机电耦合小信号模型.....	(11)
2.3 压阻式硅 MEMS 谐振器的关键参数.....	(12)
2.4 本章小结.....	(13)
<b>3 压阻式硅 MEMS 谐振器的有限元模拟</b>	
3.1 多物理场耦合软件 COMSOL MULTIPHYSICS 简介.....	(14)
3.2 压阻式硅 MEMS 谐振器模型.....	(14)
3.3 压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性.....	(18)
3.4 压阻式硅 MEMS 谐振器的优化.....	(28)
3.5 考虑工艺误差的仿真.....	(30)
3.6 本章小结.....	(32)
<b>4 压阻式硅 MEMS 谐振器的工艺仿真</b>	
4.1 二维工艺模拟器 ATHENA 简介.....	(33)
4.2 SOI 衬底制备压阻式硅 MEMS 谐振器的工艺仿真.....	(34)

4.3 工艺模拟优化.....	(44)
4.4 本章小结.....	(51)
<b>5 总结.....</b>	<b>(52)</b>
<b>致谢.....</b>	<b>(53)</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>(54)</b>

## 1 绪论

### 1.1 MEMS 谐振器

#### 1.1.1 MEMS 谐振器的发展现状

MEMS 谐振器是微机电系统中非常重要的元件,其作用是将微机械振动转换为电信号,或者使用电信号对微结构进行激励,实现对频率信号的调制<sup>[1]</sup>。其应用主要包括两个方面<sup>[2]</sup>: (1)在振荡电路中进行频率控制,改变材料和结构,使振荡器工作在所需的工作频率,产生电路系统所需时钟信号<sup>[3]</sup>。(2)作为谐振式微传感器的敏感元件,对加速度、振动、热量等物理量进行监测。

谐振器的基本特性由特征尺寸、有效质量、谐振频率、品质因数  $Q$  和功耗等描述。相比石英晶体谐振器, MEMS 谐振器具有更小的尺寸、能更好的与 IC 工艺兼容等特点。研究表明 MEMS 谐振器具有高  $Q$ 、低温度漂移、低功耗、低相位噪声及高长期稳定性等优点<sup>[4]</sup>,在未来电子系统发展应用中, MEMS 谐振器正逐步替代成为石英晶体谐振器。

目前,制造 MEMS 谐振器的主要厂商有 SiTime、Discera、Silicon Clocks、NXP 半导体、意法半导体等。其中 SiTime 是一家专注于提供全球硅 MEMS 时钟方案以取代传统石英产品的模拟半导体芯片设计公司,是 MEMS 硅晶振的世界领导厂商。其产品发展分为三个阶段:第一代以 SiT8002 可编程振荡器和 SiT11xx 固定频率振荡器为代表,开启了硅 MEMS 谐振器的新纪元,采用 MEMS FirstTM and EpiSealTM 工艺制造,可完全取代 EPSPN 的 SG-8002 系列产品;第二代以 SiT8102 高性能可编程振荡器为代表,在第一代的基础上,同时提供业界其他标准封装尺寸;第三代以 SiT912X 系列差分谐振器为代表,采用 SiTime 模拟 CMOS 技术和全硅 MEMS 技术,在频率稳定性及相位抖动方面有了突破性进展,支持业界标准管脚配置,无需修改设计或布板方式即可直接替换现有的石英差分振荡器。目前 SiTime 已推出包括普通振荡器、差分振荡器、低功耗振荡器等八种类型的时钟产品。其产品广泛应用于消费电子、高清音视频、汽车工业、通信、高速存储、电信/计算机网络、时钟同步及复原、超薄器件



# 华中科技大学硕士学位论文

等领域。表 1.1 列举出 SiTime 公司开发的八种类型谐振器的特性及应用情况<sup>[5]</sup>。

表 1.1 SiTime 公司开发的硅 MEMS 谐振器

分类	代表性芯片	工作频率 (MHz)	频率稳定性 (ppm)	消耗电流 (mA)	一年老化率	特点	主要应用领域
普通谐振器	SiT8209	80 ~ 220	±10	34 ~ 36	±1.0	支持达六位小数精度的任意频点 抖动性能极佳	SATA、SAS、以太网、外部控制器接口
差分谐振器	SiT9120	25 ~ 212.5	±25	63	±1.0	25MHz~212.5MHz 频率范围 21 个标准频率	电信网络、计算机网络、宽频带、仪器仪表、同步光纤网、同步以太网、SATA、10GB 以太网
低功耗振荡器	SiT8003	1 ~ 110	±20	3.5	±1.0	目前最低功耗的可编程谐振器	便携式设备(包括便携式媒体播放器)、高速串行协议
压控振荡器	SiT3807	1.54 ~ 49.2	±25	31	±5	1.54MHz~49.152MHz 范围内 30 个标准频率	电信时钟同步、仪器仪表、低带宽模拟锁相环、抖动清洁、时钟复原、音频、FPGA、通讯
温度补偿振荡器	SiT5002	80 ~ 200	±1.0	33	±1.0	支持达六位小数精度的任意频点，超低相位抖动，电压控制/标准/输出使能模式	电信网络、智能仪表、GPS、无线应用
三级时钟	SiT5302	60 ~ 220	±0.1	—	±0.46 (20 年)	市场中唯一兼具三级钟稳定性，小尺寸，低电压运行和可编程	无线基站、同步以太网、IP 时钟、智能输电网、仪器仪表
扩展频谱振荡器	SiT9002	1 ~ 220	±25/ ±50	75		市场第一个差分扩展频谱谐振器	串行总线、USB3.0、全缓冲内存、伺服器、路由器、系统时钟、计算机网络、汽车工业
时钟生成器	SiT9103	1 ~ 800	±25/ ±50	68		超低的相位抖动均方根 (<1ps)	服务器、路由器、RAID 控制器、以太网、光纤通道、SATA、PCI 通道、系统时钟

## 1.1.2 MEMS 谐振器的分类

MEMS 谐振器按激励方式、拾振方式、振动方向及结构等可分为多种类型。

MEMS 谐振器的振动需要激励源激励使其发生特定模态的振动，MEMS 谐振器的激励方式有静电激励<sup>[6]</sup>、电磁激励<sup>[7]</sup>、压电激励<sup>[8]</sup>、电热激励<sup>[9]</sup>和光热激励<sup>[10]</sup>等。其中电磁、压电、电热、光热激励的谐振器需采用特殊材料，材料脆性、与 CMOS 工艺兼容性及成本等因素限制了它们在生产中的应用。静电驱动利用谐振结构与电极间的静电力来激励振动，对材料无特殊要求，采用 IC 工艺基本材料硅即可。因激励方法简单、精确度较高，静电驱动成为 MEMS 微驱动方式发展的重要趋势<sup>[11]</sup>。

MEMS 谐振器振动产生相应的振幅、相位和频率信号，需设计相应的结构或电路以拾取振动信号。目前主要的拾振方法有电磁拾振<sup>[12]</sup>、电容拾振<sup>[13]</sup>、压电拾振<sup>[14]</sup>、压阻拾振<sup>[15,16]</sup>和光信号拾振<sup>[10]</sup>等。对应于静电激励 MEMS 谐振器，多采用电容拾振和压阻拾振。压阻拾振利用材料的压阻特性，振动时产生的应力使电阻率发生相应变化来检测输出信号。与电容拾振相比，压阻拾振表现出更低的输出电阻，这意味着谐振器功耗更低<sup>[17]</sup>，具有更广阔的应用前景。

MEMS 谐振器主要有两种结构<sup>[18]</sup>：一种是梁结构，利用横向振动模式；另一种是具有一定深宽比的体结构，利用径向振动模式。梁结构制备工艺相对简单，但工作频率较低，一般在 100MHz 以下；体结构谐振频率可超过 1GHz，但制备工艺较复杂<sup>[19,20]</sup>。

## 1.2 压阻式硅 MEMS 谐振器及其发展现状

### 1.2.1 压阻式硅 MEMS 谐振器

压阻式硅 MEMS 谐振器利用静电力或焦耳热激振，当外界激励频率等于或接近谐振器固有频率时，谐振器将发生谐振。本文对如图 1.1 所示的压阻式硅 MEMS 谐振器进行了相关研究，并在此基础上进行结构上的优化。

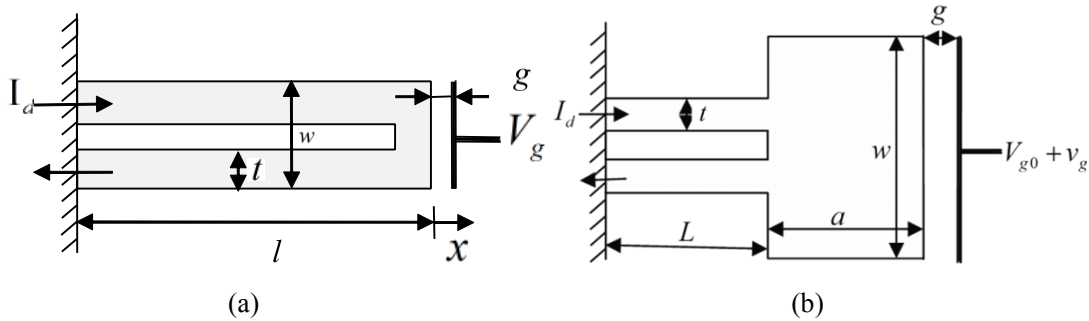


图 1.1 压阻式硅 MEMS 谐振器结构

### 1.2.2 压阻式硅 MEMS 谐振器的发展现状

目前采用压阻拾振的悬臂梁式谐振器被广泛重视。现已有很多研究小组采用不同的激励方法如热、静电等来制作压阻式 MEMS 谐振器。国内外从事这项研究的主要研究组有 Philips Research、NXP-TSMC Research Center, Eindhoven University of Technology, Netherlands、Department of Electrical and Computer Engineering, University of Denver 等,使用的材料主要是 SOI (Silicon-On-Insulator), 采用的几何结构有长条形、如图 1.3(a)所示的 U 形和如图 1.3(b)所示的狗骨形, 得到了一些关于谐振结构的结论: (1)谐振器的谐振频率随着几何尺寸的缩小而逐渐增大。(2)平衡结构比非平衡结构具有更高的品质因数  $Q^{[21]}$ 。

Van Beek J. T. M.团队在 2006 年 6 月制作了尺寸为  $207\mu\text{m} \times 19.8\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$  的平衡 U 形结构的静电驱动 P 型硅压阻谐振器, 得到的谐振频率为 10.55MHz, 开启了对压阻式硅 MEMS 谐振器研究的先河<sup>[22]</sup>; 次年 12 月, 该研究小组又在 N 型掺杂的 SOI 衬底上制作  $3.15\mu\text{m} \times 0.65\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m}$  的谐振频率达 1.07GHz 的平衡静电驱动 U 形压阻谐振器<sup>[23]</sup>; 2008 年 12 月, 该研究小组又提出了狗骨形结构的压阻式微谐振器, 对比分析了平衡结构和非平衡结构的输出特性, 并将谐振器应用于信号放大<sup>[21]</sup>; 同年, Jing L.等人将多晶碳淀积在二氧化硅牺牲层上, 制造出以多晶碳为振动源的压阻式谐振器<sup>[24]</sup>; 2009 年, Bontemps J. J. M.研究小组制备了更小尺寸的狗骨形结构谐振器, 谐振频率达 56.1MHz<sup>[4]</sup>; 2011 年, Hajjam A.研究小组和 Rahafrooz A.研究小组利用电热激励分别制备出 61MHz 和 24MHz 的压阻式谐振器, 使谐振器功耗减小到 mW 以下水平<sup>[9,25]</sup>。关于近年来国内外对压阻式硅 MEMS 谐振器的研究状况如表 1.2 所示。

# 华中科技大学硕士学位论文

表 1.2 压阻式硅 MEMS 谐振器的研究状况

研究团队	年份	材料	谐振器形状	谐振频率 (MHz)	$Q$	尺寸	功率 (mW)	制造工艺
Van Beek J. T. M., Steeneken P. G., Giesbers B. <sup>[22]</sup>	2006	SOI P 型掺杂 <110>	平衡 U 形	10.55	125000	$L=207\mu\text{m}$ $W=19.8\mu\text{m}$ $h=20\mu\text{m}$	17.4	DRIE
Van Beek J. T. M., Verheiden G. J. A., Koops G. E. J., et al. <sup>[23]</sup>	2007	SOI N 型掺杂 <100>	平衡 U 形	18.5	17400	$L=198\mu\text{m}$ $W=10\mu\text{m}$	1.9	反应离子刻蚀
				74.3	8000	$L=49.4\mu\text{m}$ $W=2.5\mu\text{m}$	2.1	
				290	2600	$L=12.4\mu\text{m}$ $W=0.9\mu\text{m}$	2.4	
				1094	550	$L=3.15\mu\text{m}$ $W=0.65\mu\text{m}$	10.8	
VanBeek J. T. M., Verheiden G. J. A., et al. <sup>[21]</sup>	2008	SOI N 型掺杂 <100>	非平衡狗骨形	13.1	561	$b/w_1=13$ ,	-	反应离子刻蚀
			平衡狗骨形	15.3	66600	$b/w_1=25$ , $b/w_1=49$ , $b/w_1=91$		
Jing L., Zongliang C., Aslam D. M., et al. <sup>[24]</sup>	2008	poly-C	长条形	0.318	116409	$L=400\sim 2000\mu\text{m}$ $W=50\sim 200\mu\text{m}$ $h:2\mu\text{m}$	-	反应离子刻蚀
Bontemps J. J. M. Murron A., VanBeek J. T. M., et al. <sup>[4]</sup>	2009	SOI N 型掺杂 <100>	平衡狗骨形	56.1	30000	$L=20\mu\text{m}$ $W=13.4\mu\text{m}$ $a=6.0\mu\text{m}$ $b=3.0\mu\text{m}$	6.1	反应离子刻蚀
Phan K. L., VanBeek J. T. M., Koops G. E. J. <sup>[26]</sup>	2009	SOI N 型掺杂	环形	11.8	45800	$R=11.9\mu\text{m}$ $g=0.279\mu\text{m}$	-	DRIE
Rahafrooz A., Pourkamali S. <sup>[25]</sup>	2011	SOI P 型掺杂 <110> SOI N 型掺杂 <100>	平衡狗骨形	7.9/41/61	35900/24400/9200	61MHz: $L=22\mu\text{m}$ $W=15\mu\text{m}$ $a=18\mu\text{m}$ $b=5\mu\text{m}$	3.63e-3/1.01/14.7	DRIE
Hajjam A., Pandiyan J., Logan A., et al. <sup>[9]</sup>	2011	SOI	平衡狗骨形	24	——		小于毫瓦级	DRIE

注：表中  $L$  为 U 形结构中的总长度和狗骨形结构中平行梁的长度， $W$  为 U 形结构中的总宽度和狗骨形结构中平行梁的宽度， $a, b$  分别为狗骨形结构中质量块的宽度和长度， $w_1$  为狗骨形结构中两支撑梁中轴线间的距离。

从表 2 可以看出，目前研究重点是分析谐振器的形状和尺寸，根据不同应用需求采用不同形状和尺寸以改善谐振器性能。谐振器的尺寸一般在微米级，随着尺寸逐渐减小，谐振频率可以高达 1.1GHz，但品质因数急剧下降，这样在实际应用中对后续选频电路的精度要求更高，增加了电路复杂性，因此需通过调整结构以提高品质因数。平衡狗骨形结构增加了谐振结构与电极的作用面积，从而增加了静电力，具有更好的应用前景，但目前研究的平衡狗骨形结构的谐振频率只有几十兆赫兹，其谐振频率还有很大的提升空间。

## 1.3 本文的研究内容

本文拟设计一种百兆赫兹以上高性能的压阻式硅 MEMS 谐振器，并对该谐振器的结构和性能进行优化。研究内容主要包括以下两个方面：

①谐振特性仿真。压阻式硅 MEMS 谐振器谐振特性的仿真主要利用有限元方法分析 MEMS 谐振器的谐振频率、品质因数  $Q$  及谐振时的输出信号强度等谐振特性，利用多物理场耦合仿真软件 COMSOL Multiphysics 对压阻式硅 MEMS 谐振器进行特征频率分析和频率响应分析。

②制备工艺仿真。通过微电子工艺模拟仿真软件 SILVACO TCAD 对 MEMS 谐振器进行制备工艺的模拟。

## 2 压阻式硅 MEMS 谐振器的工作原理

本章主要对压阻式硅 MEMS 谐振器的工作原理进行分析，包括三方面：（1）静电驱动原理，（2）振动方程及特点，（3）压阻检测方法，并简要介绍在谐振器设计过程中需要考虑的重要参数。

### 2.1 压阻式硅 MEMS 谐振器工作原理

压阻式硅 MEMS 谐振器的工作原理是：谐振器在静电力、焦耳热等外界信号的激励下发生振动，当外界信号的频率接近或等于谐振器的谐振频率时，谐振器的振幅会突然增大。由于硅的压阻效应，其电阻率会随振动发生变化，通入检测电流后可检测到反映谐振器振动情况的输出电压。

#### 2.1.1 谐振器静电激励原理

本文设计的压阻式硅 MEMS 谐振器以如图 2.1 所示的 U 型悬臂梁结构谐振器为基础进行设计和优化，这里以 U 形结构为例分析谐振器工作原理。

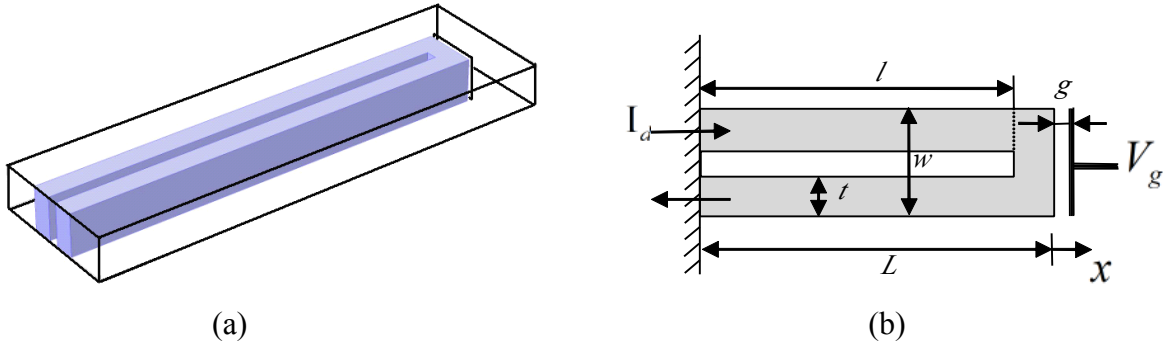


图 2.1 (a)U 形 MEMS 谐振器结构 (b)工作原理示意图

如图 2.1 所示悬臂梁总长度为  $L$ ，总宽度为  $w$ ，厚为  $h$ ，单臂梁长为  $l$ ，梁宽为  $t$ 。悬臂梁左端固定，距右端端面距离  $g$  处为电极，与悬臂梁右端形成平行板电容器。

向电极加载  $V_g$  的电压，悬臂梁所受静电力  $F = -\frac{\partial W}{\partial X_i}$  为三个方向作用力的合力，其中  $x$

方向上的静电力为：

$$F_x = \frac{\partial W}{\partial g} = -\frac{\varepsilon whV_g^2}{2g^2} \quad (2.1)$$

沿 Y 和 Z 方向的静电力分别为  $F_y = \frac{\partial W}{\partial w} = \frac{\varepsilon hV_g^2}{2g}$  和  $F_z = \frac{\partial W}{\partial h} = \frac{\varepsilon wV_g^2}{2g}$ 。  $g \ll h, w$ ，因此  $F_x \gg F_y, F_z$  悬臂梁在静电力作用下的振动模态为沿长轴方向的伸缩振动模态。

加在电极上的电压  $V_g = V_{g0} + v_g e^{j\omega t}$  由直流电压  $V_{g0}$  和交流电压  $v_g$  叠加而成，将其代入式(2.1)中得沿 X 方向的静电力为：

$$F_x = \frac{\varepsilon whV_{g0}^2}{2g^2} + v_g V_{g0} \frac{\varepsilon wh}{g^2} e^{j\omega t} + \frac{\varepsilon whv_g^2}{2g^2} e^{j2\omega t} \quad (2.2)$$

其中第一项为直流部分，第二、三项为交流部分，因第三项幅值远小于第二项，可忽略不计，静电力的交流部分为：

$$F_{el} = v_g V_{g0} \frac{\varepsilon wh}{g^2} e^{j\omega t} \quad (2.3)$$

可看出静电力大小只与相对的两平板的尺寸和板间距离有关，而与平板厚度无关，因此静电激励谐振器能很好地实现微型化。其缺点是要求平行板平整且光滑，若表面出现毛刺，则易发生电击穿<sup>[27]</sup>。这对刻蚀工艺的要求较高，随着刻蚀技术的不断发展，平行板的平整度会不断地提高。

### 2.1.2 谐振器的振动特性

谐振器可等效为如图 2.2 所示的弹簧-质量块系统，其中  $k_{eff}$  为谐振器的等效弹性系数， $m_{eff}$  为谐振器的等效质量。

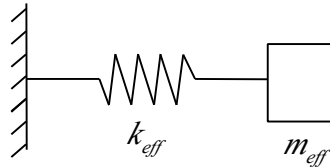


图 2.2 谐振器的机械等效模型

对于体声波模型谐振器，等效质量、等效弹性系数分别为：

$$m_{eff} = \rho thL \quad (2.4)$$

$$k_{eff} = \frac{\pi^2}{4} \frac{Eth}{L} \quad (2.5)$$

则谐振器固有频率为：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m_{eff}}} = \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.6)$$

其中  $\rho$  和  $E$  分别为悬臂梁材料的质量密度和杨氏模量。

忽略系统阻尼，则该振动系统运动方程为

$$m_{eff} \ddot{x} + k_{eff} x = v_g V_{g0} \frac{\varepsilon w h}{g^2} e^{j\omega t} \quad (2.7)$$

求解方程，得到悬臂梁任意一点的位移为

$$X(x, t) = X_0(w) e^{j\omega t} \sin \frac{\pi x}{2L}$$

$$\text{其中, } X_0(w) = v_g V_{g0} \frac{\varepsilon}{g^2} \frac{4L}{\pi^2 E} \frac{w}{t} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{Q\omega_0}} \quad (2.8)$$

这里  $Q$  为谐振器品质因数。在静电力作用下，谐振器沿长轴方向做伸缩振动。从式(2.6)可看出，提高谐振频率可从提高等效弹性系数和降低质量两个方面着手。

### 2.1.3 谐振器的压阻检测

在应力作用下，半导体材料载流子浓度和迁移率发生变化，导致电阻率发生相应变化，这种现象称为压阻效应<sup>[28]</sup>。目前压阻效应主要运用在传感器和谐振器拾振中。

半导体材料电阻率变化和应力间的关系由压阻系数  $\pi$  表示。 $\pi$  定义为半导体电阻率相对变化率与所受应力之比<sup>[29]</sup>，为四阶张量以表征压阻效应的各向异性。由于结构对称性，硅材料的压阻系数如式(2.9)表示<sup>[30]</sup>：



$$\pi = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

其中常温下  $\pi_{11}$ 、 $\pi_{12}$ 、 $\pi_{44}$  的值由表 2.1 给出。

表 2.1 Si 的压阻系数 ( $\times 10^{-11} Pa^{-1}$ , 室温)

类型	$\rho_0 (\Omega \cdot \text{cm})$	$\pi_{11}$	$\pi_{12}$	$\pi_{44}$
P	7.8	6.6	-1.1	138.1
N	11.7	-102.2	53.7	-13.6

P 型硅  $\pi_{44}$  远大于  $\pi_{11}$  和  $\pi_{12}$ ，故在实际应用中将谐振器悬臂梁沿<110>晶向制备。

影响压阻系数的主要因素有杂质浓度和环境温度等<sup>[31]</sup>，其对应关系如图 2.3 所示。

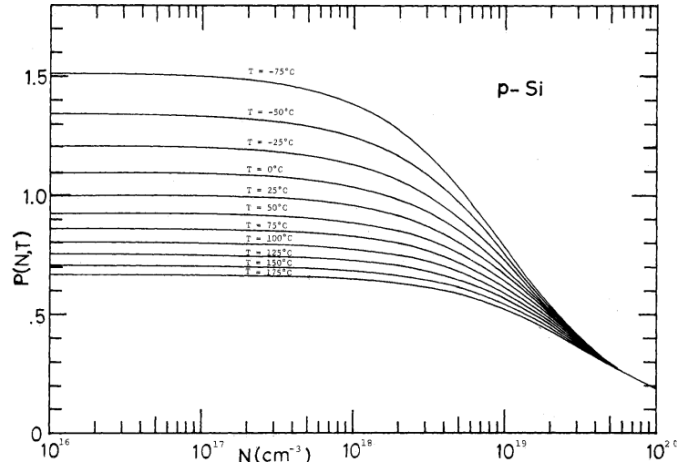


图 2.3 杂质浓度和环境温度对 P 型硅  $\pi_{44}$  的影响<sup>[31]</sup>

注：图中纵坐标表示某掺杂浓度的硅在某温度下的  $\pi_{44}$  与  $138.1 \times 10^{-11} Pa^{-1}$  的比值。

设材料不受应力作用时电阻率为  $\rho_0$ ，受应力  $T$  后电阻率为  $\rho$ ，则电阻率相对变化

率  $\Delta = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$  为应力与压阻系数的函数<sup>[32]</sup>：

$$\Delta = \pi \cdot T = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

其中  $\sigma_1 = T_{xx}$ 、 $\sigma_2 = T_{yy}$ 、 $\sigma_3 = T_{zz}$  为正应力， $\tau_1 = T_{yz}$ 、 $\tau_2 = T_{xz}$ 、 $\tau_3 = T_{xy}$  为切应力。

在本文中压阻式硅 MEMS 谐振器沿<110>方向，为直观分析谐振信号检测原理，将压阻系数简化为  $K$ 。向谐振器加载电流  $I_d$ ，测量悬臂梁两端电势差  $V_d$  即检测到谐振信号。谐振器相对变化率  $\Delta R / R$  取决于应变  $\varepsilon = dX / dx$ ，两者关系为：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \frac{K}{L} \int_0^L \varepsilon dx = \frac{K}{L} X_0(\omega) e^{j\omega t} \\ \frac{\Delta R}{R} &= \frac{4\varepsilon_0}{\pi^2} \frac{K}{E} \frac{V_{g0}}{g^2} \frac{w}{t} \frac{v_g e^{j\omega t}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{Q\omega_0}} \end{aligned} \quad (2.11)$$

从式(2.11)可看出，电阻相对变化率与谐振器长度和厚度无关，而只与悬臂梁总宽度和单臂宽度的比例  $w/t$  有关。

在悬臂梁两端加载电压  $V_d$ ，则检测到输出电流为：

$$I_d = \frac{V_d}{R(1 + \frac{\Delta R}{R})} \approx \frac{V_d}{R} (1 - \frac{\Delta R}{R}) \quad (2.12)$$

## 2.2 压阻式硅 MEMS 谐振器的机电耦合小信号模型

悬臂梁与电极间的电势差  $V_g$  和悬臂梁两端加载的电压  $V_d$  均由直流部分和小幅值的交流部分组成，则悬臂梁中电流  $i_d$  可写成：

$$i_d = \left( \frac{\partial I_d}{\partial V_d} \right) \cdot v_d + \left( \frac{\partial I_d}{\partial V_g} \right) \cdot v_g = g_d v_d + g_m v_m \quad (2.13)$$

这里  $g_m$  是随频率变化的等效跨导,  $g_d$  为等效漏极电导。谐振器的机电耦合小信号模型如图 2.4 所示。

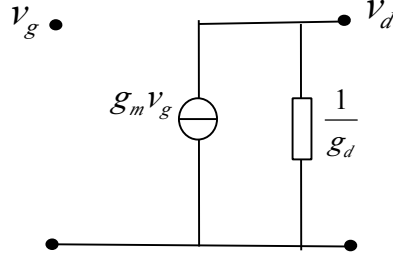


图 2.4 压阻式硅 MEMS 谐振器的小信号模型

联立式(2.11), (2.12), (2.13)可得:

$$g_m(\omega) = -V_{g0} I_{d0} \frac{4\varepsilon_0}{\pi^2} \frac{K}{E} \frac{w}{g^2 t} \frac{1}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j \frac{\omega}{Q\omega_0}} \quad (2.14)$$

$$g_d = \frac{1}{R} \quad (2.15)$$

与电容式硅 MEMS 谐振器相比, 在以下三种情况下信号检测性能更优<sup>[22]</sup>: (1)谐振器厚度  $h$  和宽度  $w$  很小, (2)悬臂梁与电极间间隙较大, (3)  $V_{g0}$  很小而  $I_{d0}$  较大。

## 2.3 压阻式硅 MEMS 谐振器的关键参数

表征 MEMS 谐振器谐振特性的参数有很多, 如谐振频率、品质因数、输出电压相对变化率、频率稳定性、噪声、阻尼、功耗等, 本文从谐振频率  $f_0$ 、品质因数  $Q$  和输出电压相对变化率  $\Delta V_2 / V_2$  三方面对压阻式硅 MEMS 谐振器进行结构设计和优化。

### 2.3.1 谐振频率

对谐振器而言, 谐振频率是首要考虑的参数, 关于谐振频率的分析已在 2.1.2 节中讨论。一般而言, 谐振结构尺寸越小, 谐振频率越高, 但在深亚微米工艺中, 特征尺寸的减小会带来很多附加效应如尺寸效应、表面效应、微观摩擦效应等。故在实际应用中不能只是一味的减小尺寸, 需与其他因素一起综合考虑。

## 2.3.2 品质因数 $Q$

谐振器件中储存的总能量与在一个振动周期内损失的能量之比  $2\pi W / \Delta W$  称为品质因数<sup>[33]</sup>,  $Q$  表征了谐振器的选频特性及能量损耗, 其表达式为

$$Q = \frac{f_0}{|f_1 - f_2|} \quad (2.19)$$

其中  $f_0$  为谐振频率,  $f_1$  和  $f_2$  为频率响应曲线中的半功率点处的频率。

MEMS 谐振器的品质因数与很多因素有关, 有环境因素的影响如空气阻尼、压强和温度等<sup>[34,35]</sup>, 有机械结构自身的影响如固支损失, 还有材料内部变化的影响如热弹性摩擦和表面粗糙度等。

## 2.3.3 输出电压相对变化率

输出电压相对变化率定义为:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_r - V}{V} \quad (2.20)$$

其中  $V_r$  为谐振时谐振器的输出电压,  $V$  为激励电压为直流电压时的输出电压。输入一定检测电流, 输出电压相对变化率正比于电阻率相对变化率。输出电压相对变化率直接关系到信号检测的难易程度, 输出电压相对变化率越大, 谐振信号越容易提取。

## 2.4 本章小结

本章从理论上分析了压阻式硅 MEMS 谐振器的静电激励原理、振动特性、压阻检测原理, 简述了压阻式硅 MEMS 谐振器的机电耦合小信号模型, 最后对压阻式硅 MEMS 谐振器谐振特性的重要参数进行了简单的分析, 为后面有限元仿真提供理论依据。

### 3 压阻式硅 MEMS 谐振器的有限元模拟

本章利用多物理场耦合仿真软件 COMSOL Multiphysics 对压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性进行模拟。通过建立多物理场耦合模型，对压阻式硅 MEMS 谐振器进行特征频率仿真和频率响应仿真，分析压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性与几何参数间的关系。

#### 3.1 多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 简介

COMSOL Multiphysics 软件利用求解反映物理过程的偏微分方程组进行多物理场耦合与仿真计算，以高效的计算性能和杰出的多物理场直接耦合分析能力实现高度精确的数值仿真。

和多数有限元仿真软件一样，COMSOL Multiphysics 包含模型设定、求解、后处理及二次开发四部分<sup>[36]</sup>。用户可根据自己的需要对几何结构，材料特性和网格划分等做相关的设定，即建立一系列反应研究目标的偏微分方程及边界条件以供计算。然后选用合适的求解器对研究问题进行求解，求解结果通过后处理工具观察分析。

#### 3.2 压阻式硅 MEMS 谐振器模型

##### 3.2.1 谐振特性仿真需要的物理模块

本文研究压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性，需要用到 COMSOL Multiphysics 的静电场、固体力场和电流场。其中静电场用于仿真加载在悬臂梁结构上的静电力，固体力场用于将静电力加载在悬臂梁上并研究悬臂梁的振动特性，电流场用于检测悬臂梁由于硅的压阻效应而产生的随频率变化的信号输出。

##### 3.2.2 压阻式硅 MEMS 谐振器的结构

根据近年来压阻式硅 MEMS 谐振器的发展趋势，本文主要针对如图 3.1 所示的非平衡 U 形、平衡 U 形、非平衡狗骨形和平衡狗骨形结构的谐振器进行建模。并在此

基础上对狗骨形结构进行优化，设计如图 3.2 所示质量块为圆形的谐振器结构。每种结构设置不同几何尺寸，对建模后的网格文件进行求解，得到谐振频率、品质因数、输出信号幅值等谐振特性，对求解结果进行对比分析，找出各参数变化规律。

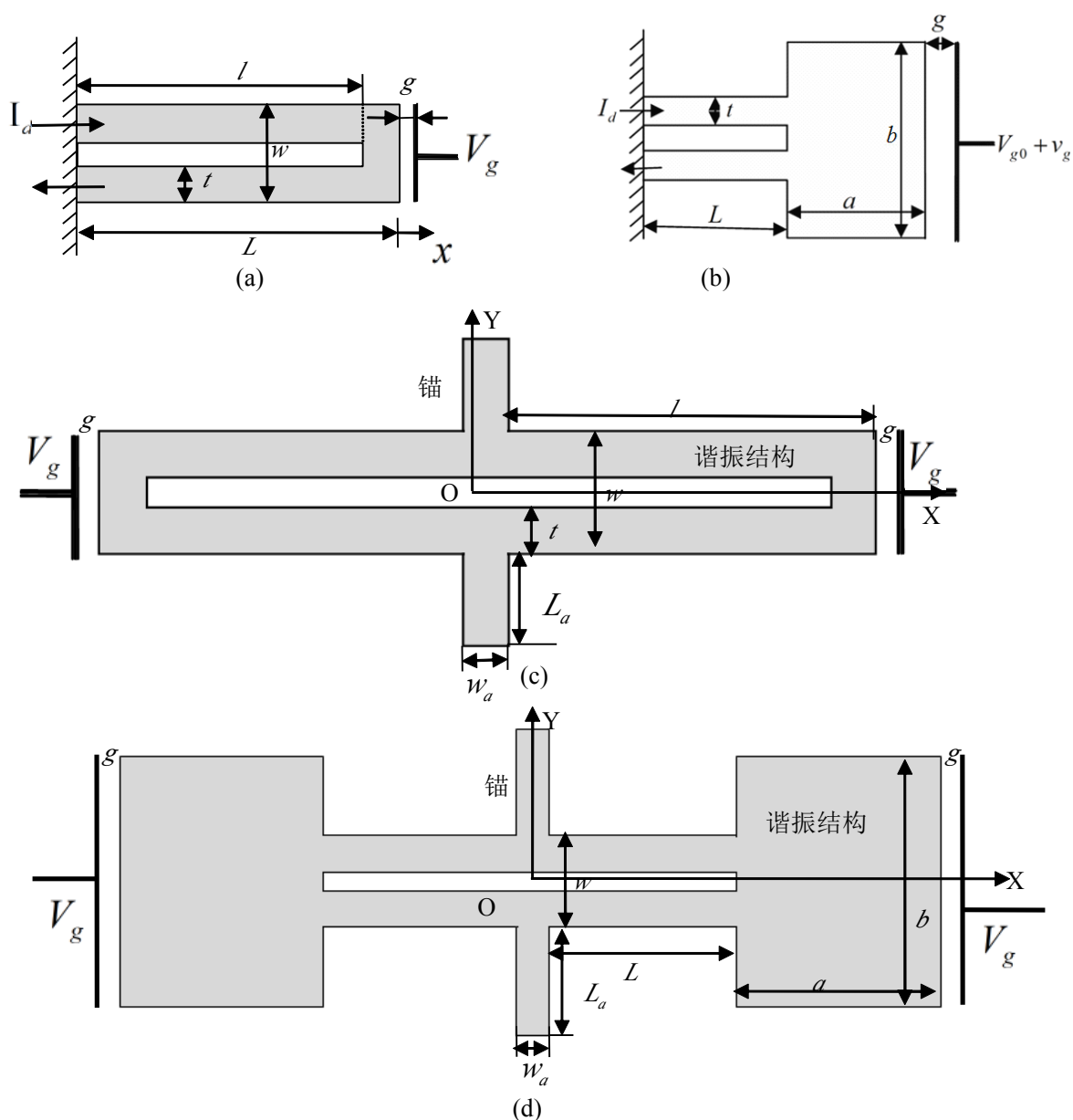


图 3.1 压阻式硅 MEMS 谐振器结构：(a)非平衡 U 形，(b)非平衡狗骨形，  
(c)平衡 U 形，(d)平衡狗骨形

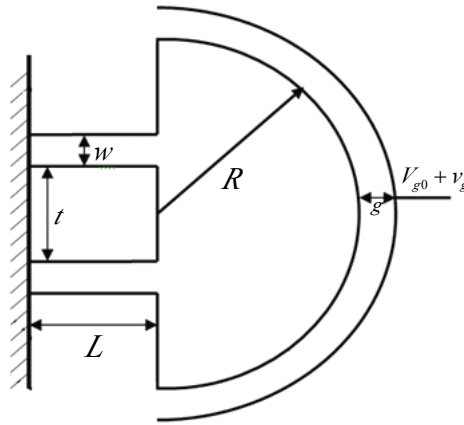


图 3.2 质量块为半圆形的狗骨形结构

### 3.2.3 压阻式硅 MEMS 谐振器的有限元模型

因压阻式硅 MEMS 谐振器中硅材料在无应力作用时的电阻率  $\rho_0$  和压阻系数随温度、掺杂浓度及应力大小的变化而变化<sup>[31]</sup>，在进行多物理场耦合仿真时将所有因素全部考虑是不可能的，这里作如下假设以简化模型：

- (1) 压阻式硅 MEMS 谐振器处于无限大的空气环境中，不考虑其他外部环境的影响。
- (2) 当掺杂浓度在  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  到  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  之间时，P 型硅材料的  $\pi_{44}$  变化很小，故本文假定硅材料的压阻系数为常数  $138.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ 。
- (3) 假定谐振器工作在室温环境下。

### 3.2.4 压阻式硅 MEMS 谐振器中的材料参数

简化后的压阻式硅 MEMS 谐振器包含两种材料：硅和空气。其中空气用在静电模块中，定义其相对介电常数 1 即可。硅材料用在固体力场和电流场中，需定义杨氏模量、泊松比、密度、相对介电常数和电导率，其中前四项可直接定义，如表 3.1 所示，电导率需利用压阻系数结合坐标系变换来设定。

表 3.1 硅材料的物理特性参数

杨氏模量(Pa)	泊松比	密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	相对介电常数
$169 \times 10^9$	0.278	2330	11.9

本文中 P 型硅材料制作的谐振器沿<110>晶向，因此需建立局部坐标系，建立的

局部坐标系到全局坐标系的坐标变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

硅材料电导率的设定方法是：首先计算局部坐标系下硅的相对电阻率，然后利用坐标变换计算全局坐标系下相对电阻率，对行列式求导得到全局坐标系下的电导率。

### 3.2.5 压阻式硅 MEMS 谐振器的边界条件

本文采用逐步加载物理场，先稳态分析，特征频率分析再频率响应分析的方式对悬臂梁进行仿真。首先只加载结构力学场，对悬臂梁不加载边界载荷进行特征频率分析，得到 MEMS 悬臂梁振动模态及对应的谐振频率。然后引入静电场，计算出 Maxwell 电表面应力张量后，将其作为静电力载荷边界条件加载到悬臂梁右端边界，分析在静电力作用下谐振器的振动模态。最后引入电流场并加载检测信号，在悬臂梁左端两个端面分别加载接地边界条件和电流边界条件。

以如图 3.1(a)为例说明压阻式硅 MEMS 谐振器边界条件的设定。

(1)静电模式下，悬臂梁右端端面设置为接地边界条件，电极加载激励电压  $V_g$ ，设置输出为悬臂梁右端端面所受的 Maxwell 电表面应力张量。

(2)固体力学模式下，悬臂梁选择局部坐标系，悬臂梁左端两端面为固定边界条件，右端端面加载(1)中求解出的 Maxwell 电表面应力张量作为边界载荷。

(3)电流模式下，悬臂梁选择局部坐标系，悬臂梁左端的两个端面中一个端面设置为接地边界条件，另一个端面通入  $I_d$  电流。

完成网格划分后，就可以用 COMSOL Multiphysics 对 MEMS 谐振器进行计算了。

### 3.2.6 压阻式硅 MEMS 谐振器的网格划分

设置合理的网格划分有助于模型的分析计算，在网格划分时，通常需要在网格单元数、疏密程度、单元阶次等参数间进行折中<sup>[37,38]</sup>。扫掠网格定义为将 3D 几何结构其中一个表面上的网格沿一个方向进行扫掠，可得到规整的六面体或棱柱扫掠网格。扫掠网格适用于由平面几何结构拉伸或旋转得到的几何结构。本文中谐振器的结构为



平面几何结构拉伸体，非常适合采用扫掠网格。如图 3.3 所示为在网格疏密级别同为“法向”时自由剖分网格和扫掠网格在单元数和网格质量方面的比较。通过对比发现，扫掠网格的单元数为自由剖分网格单元数的 1/7，平均单元质量优于自由剖分网格，故在本文中采用扫掠网格。

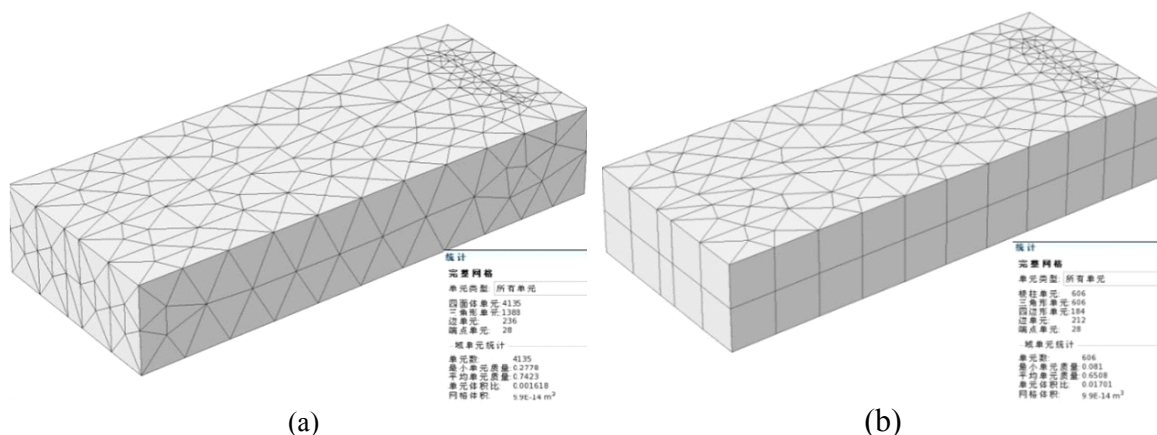


图 3.3 (a)自由剖分网格, (b)扫掠网格

网格剖分的原则是在数据变化较快、应力集中和需要重点研究的地方采用较密集的网格，而在数据分布较均匀的地方选用比较稀疏的网格<sup>[39]</sup>。在本文中，悬臂梁结构是重点研究的部分，且应力比较集中，故选用较密集的网格；周围的空气域中，悬臂梁与电极间带隙的静电场是研究谐振器受力的关键，因此也需要较密的网格，空气域其他区域则选用比较稀疏的网格即能满足计算需求。

综上所述，本文中采用的网格划分方法是首先对如图 3.3(b)所示结构的底面进行划分，对应悬臂梁的部分划分较密的网格，对应空气域的部分划分较疏的网格，然后以底面为源面，顶面为目标面进行扫掠网格剖分。这样划分网格既能保证空气域悬臂梁与电极间的区域网格较密，又能保证空气域其他部分的网格较稀疏，在保证计算精确度的同时兼顾计算时间。

## 3.3 压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性

### 3.3.1 非平衡 U 形谐振器分析

#### (1) 驱动电压对 Maxwell 电表面应力张量和位移的影响

图 3.4 表示了非平衡 U 形结构的 Maxwell 电表面应力张量与驱动电压的关系，

Maxwell 电表面应力张量直接反应静电力的大小。模型中悬臂梁总宽度  $W=25\mu\text{m}$ ，厚度  $h=20\mu\text{m}$ ，单臂梁长  $L=0.9L$ ，单臂梁宽  $w=10\mu\text{m}$ ，悬臂梁与电极间间距  $g=1\mu\text{m}$ 。从图中可以看出，随着驱动电压的增强，Maxwell 电表面应力张量迅速增加。驱动电压设置过低，则悬臂梁的变形小，输出信号难以识别；设置过高，悬臂梁所受应力太大，易导致悬臂梁断裂。本文设置驱动电压  $V_g=40\text{V}$ 。

图 3.5 表示了悬臂梁右端总位移与驱动电压的关系，在一定的应力作用下时，悬臂梁越长，则形变越大，但相对形变会减小。

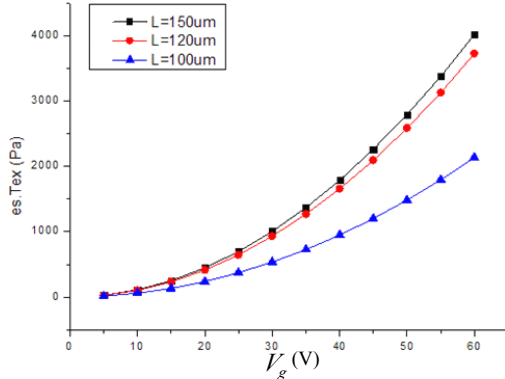


图 3.4 Maxwell 电表面应力张量与驱动电压的关系

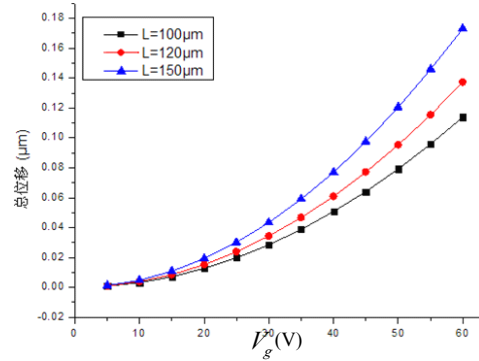


图 3.5 悬臂梁位移与驱动电压的关系

## (2) 谐振器的频率响应

对结构进行频率响应分析，得到在静电力驱动下压阻式硅 MEMS 谐振器的频率响应，如图 3.6 所示。由图 3.6(a)可以看出，在静电力的激励下，谐振器做沿悬臂梁长轴方向的伸缩振动。图 3.6(b)为谐振器的位移频率响应曲线，显示了在静电力驱动下的基频信号和前五阶谐频信号，本文主要研究一阶谐振频率。

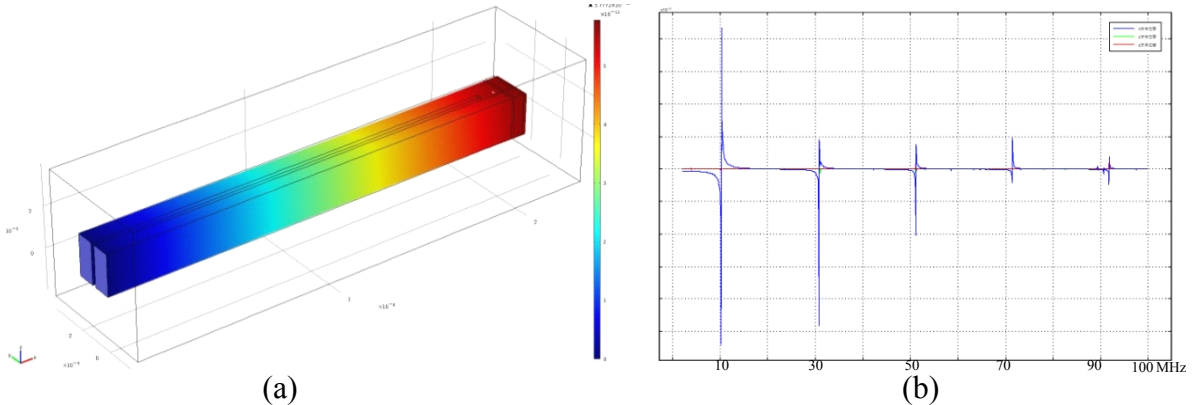


图 3.6 压阻式硅 MEMS 谐振器的位移频率响应: (a)静电力作用下的振动模式, (b)频率响应曲线

在利用 COMSOL Multiphysics 进行频率响应分析时，网格划分疏密程度、频率扫

描步长等参数对频率响应仿真结果有较大影响。网格划分疏密程度会影响系统的收敛性和内存消耗问题，网格划分过于稀疏，则计算易发散且计算结果不准确；而网格划分太密则会导致组装矩阵时内存不足的问题，因此本文在进行频率响应分析时，采取保证系统内存的情况下尽量细化网格的原则。

### (3) 无应力电阻值对谐振特性的影响

由图 2.3 可以看出：掺杂浓度在  $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  时硅的压阻系数基本保持不变，此时掺杂浓度主要影响无应力电阻率  $\rho_0$ 。谐振器尺寸保持不变，模拟  $\rho_0$  为  $10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$ 、 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  和  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  时的频率响应，得到各自的频率响应曲线如图 3.7 所示，可以看出：①掺杂浓度较高时，随着频率的增高，频率响应曲线有下降的趋势，这是由于两单臂梁间形成寄生电容，随着频率升高，寄生电容上消耗的电压增大。②输出电压随  $\rho_0$  减小而减小，输出电压太小不利于信号检测。本文  $\rho_0 = 1.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

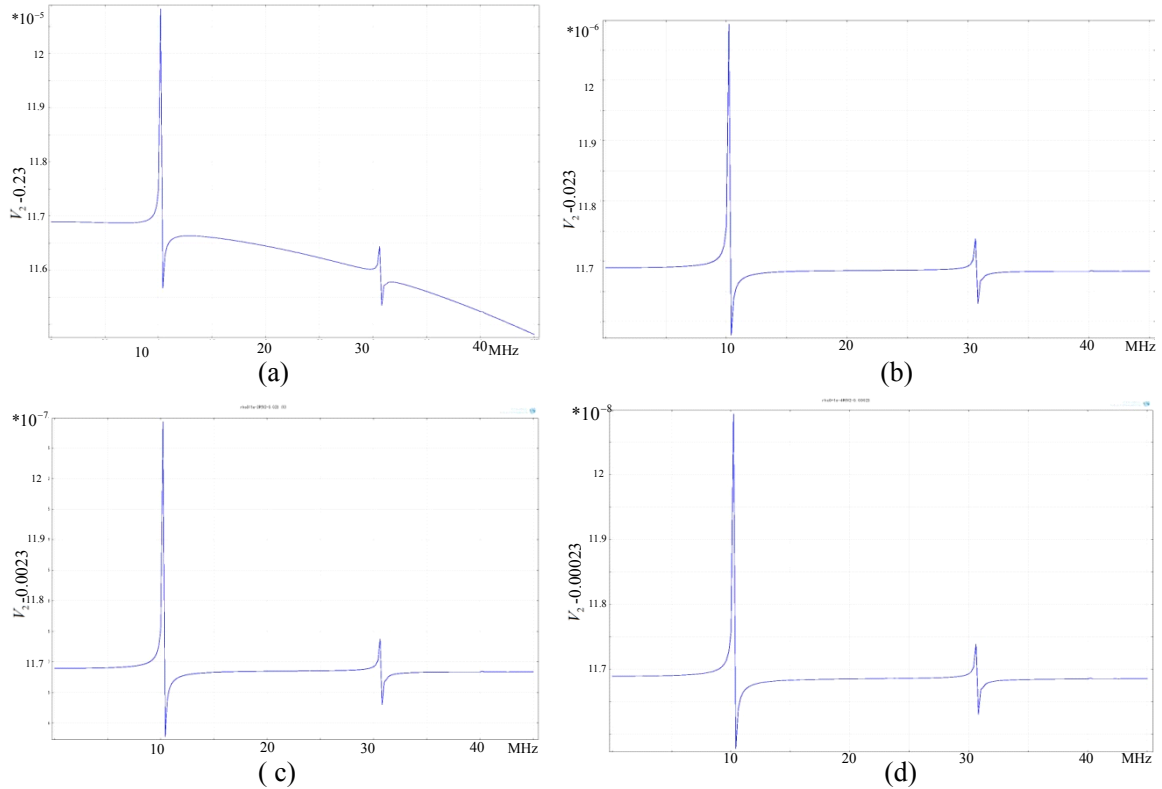


图 3.7 谐振器在(a)  $\rho_0 = 10^{-1}$ 、(b)  $\rho_0 = 10^{-2}$ 、(c)  $\rho_0 = 10^{-3}$  和(d)  $\rho_0 = 10^{-4}$  下的频率响应曲线

## (4) $L$ 与 $l$ 对谐振特性的影响

其他参数不变，仅改变悬臂梁总长度  $L$  和单臂梁长  $l$ ，得到这两个参数对谐振频率及稳态情况下输出电压的影响如图 3.8 所示，其中稳态情况下输出电压等于谐振时电压输出信号  $V_2$  的直流部分。总的来说，①谐振器长度尺寸越小即  $L$  越小，谐振频率越高，输出电压越低；②在悬臂梁总长度  $L$  一定的情况下，单臂梁越长，则谐振频率越大，悬臂梁电阻越大，输出电压越高。

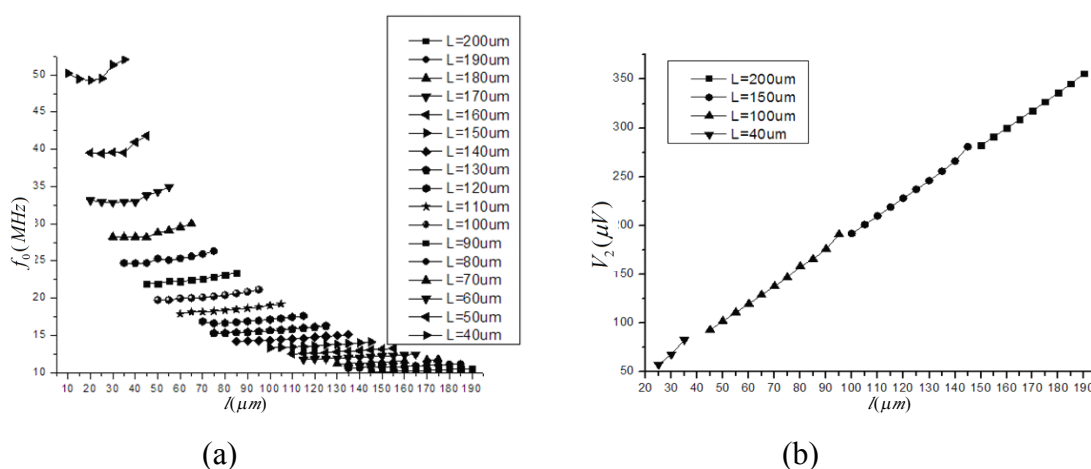


图 3.8  $L$  与  $l$  对谐振频率(a)及稳态电压(b)的影响

注：图中谐振器的其他尺寸参数为： $W=25\mu\text{m}$ ， $u=10\mu\text{m}$ ， $t=5\mu\text{m}$ ， $g=1\mu\text{m}$ ， $h=15\mu\text{m}$ 。

为研究  $L$  与  $l$  对谐振特性的影响，将  $L$  设置为  $200\mu\text{m}$ ，将  $l$  分别设置为  $150\mu\text{m}$ 、 $160\mu\text{m}$ 、 $170\mu\text{m}$  和  $180\mu\text{m}$ ，进行特征频率分析和频率响应分析，其中频率响应分析中扫描步长设置为  $500\text{Hz}$ 。得到的谐振特性如表 3.2 所示。

表 3.2  $L$  一定时  $l$  对谐振特性的影响

$l$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2 / V_2 \%$	$Q$
180	10.41	336	2.3	0.684524	22307
170	10.30	318	3.3	1.037736	20590
160	10.20	300	2.3	0.684524	29743
150	10.11	282	2.4	0.851064	17837

由表 3.2 可以看出，① $l$  越小，则谐振频率越小，导致这一现象的原因是由于单臂梁的梁长减小，谐振器的有效弹性系数减小。② $l$  太大或太小都会导致品质因数的下降， $l$  值取  $L$  值的  $0.8\sim 0.9$  倍比较合适。

## (5) 其他几何参数对谐振特性的影响

为综合研究谐振器宽度  $W$ 、单臂梁梁宽  $w$ 、谐振器总长度  $L$ 、谐振器厚度  $h$  对谐振特性的影响, 选取两组谐振器, 第一组谐振器尺寸  $L \times W \times h$  为  $20\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m} \times 2\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m} \times 2.5\mu\text{m}$ , 第二组谐振器尺寸  $L \times W \times h$  为  $150\mu\text{m} \times 15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m} \times 15\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m} \times 25\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$ ,  $150\mu\text{m} \times 25\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ , 对两组不同尺寸的谐振器分别进行谐振频率分析和频率响应分析, 计算  $Q$  值和输出电压相对变化率  $\Delta V_2 / V_2$ , 得到的特征频率分析下的谐振频率  $f_0$ 、稳态输出电压  $V_{20}$ 、频率响应分析下的谐振频率、输出电压直流部分  $V_2$ 、谐振时输出电压交流部分  $\Delta V_2$ 、输出电压相对变化率  $\Delta V_2 / V_2$  等参数如表 3.3 所示。其中  $L=20\mu\text{m}$  对应的单悬臂梁梁长  $l=18\mu\text{m}$ , 厚度  $h=1.5\mu\text{m}$ , 悬臂梁与电极间间隙  $g=0.5\mu\text{m}$ ;  $L=150\mu\text{m}$  对应的  $l=140\mu\text{m}$ ,  $h=15\mu\text{m}$ ,  $g=1\mu\text{m}$ 。

表 3.3 不同尺寸谐振器的谐振特性

尺寸 $L \times W \times h$ ( $\mu\text{m}$ )	$w$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_0$ (MHz)	$V_{20}$ ( $\mu\text{V}$ )	中心 频率 (MHz)	$V_2$ 直 流部分 ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$Q$	步长 (10K Hz)	$\Delta V_2 / V_2$ (%)
$20 \times 1.5 \times 1.5$	0.4	98.25	11000	98.245	11040	292	982	1	2.6449
	0.6	104.04	7361.7	104.04	7361	182	1041	1	2.4725
$20 \times 1.5 \times 2$	0.4	98.28	8273.4	98.28	8270.6	174	983	1	2.1038
	0.6	104.07	5521.1	104.07	5522	90	1040	1	1.6299
$20 \times 1.5 \times 2.5$	0.4	98.3	6618.8	98.31	6611	146	1092	1	2.2084
	0.6	104.1	4426.6	104.1	4412	70	1157	1	1.5865
$20 \times 2 \times 1.5$	0.6	100.1	7413	100.1	7400	226	1055	1	3.0540
	0.8	104.04	5562.6	104.04	5562	80	1040	1	1.4383
$20 \times 2 \times 2$	0.4	93.08	8308.4	93.085	8290	188	1098	1	2.2678
	0.6	100.11	5560	100.12	5550	183	1058	1	3.2973
	0.8	104.07	4171.7	104.07	4172	78	1041	1	1.8697
$20 \times 2 \times 2.5$	0.4	93.12	6647.2	93.12	6640	170	981	1	2.5602
	0.6	100.13	4449.1	100.13	4450	96	1050	1	2.1573
	0.8	104.1	3337.3	104.95	3340	50	1106	1	1.497
$20 \times 2.5 \times 1.5$	0.6	96.45	7453.2	96.445	7453	155	9650	1	2.0797
	0.8	101.03	5608	101.03	5605	124	1013	1	2.2123
	1	104.07	4484.6	104.07	4480	160	1041	1	3.5714
$20 \times 2.5 \times 2$	0.6	96.48	5590.3	96.45	5595	115	965	1	2.0554
	0.8	101.05	4205.8	101.04	4205.8	30.7	505	1	0.7299
$20 \times 2.5 \times 2.5$	0.6	96.5	4472.7	96.49	4472.7	49	4826	2	1.0955
	0.8	101.07	3364.5	101.07	3363	83	1025	1	2.4680
	1	104.12	2690.1	104.1	2690	7.8	196	5	0.29
$150 \times 15 \times 15$	4	13.44	863.79	13.44	864	2.4	669	2	0.2778
	5	13.77	691.8	13.76	691.9	0.24	675	2	0.0347
$150 \times 15 \times 20$	4	13.45	647.58	13.44	647.92	0.37	679	2	0.0571
	5	13.77	518.84	13.76	519.14	0.13	706	2	0.0250
	6	14	432.33	14	432.33	0.13	753	2	0.0289
$150 \times 20 \times 15$	6	13.64	583.16	13.62	583.29	0.15	717	2	0.0254
	8	13.99	437.36	14	437.47	0.09	778	2	0.0206
$150 \times 20 \times 20$	6	13.65	437.35	13.64	437.51	0.12	707	2	0.0274
	8	14	328.05	13.82	375.35	0.09	768	2	0.0226
$150 \times 25 \times 15$	6	13.3	589.65	13.08	589.65	0.56	1312	1	0.095
	8	13.71	443.94	13.71	443.94	0.27	1371	1	0.0608
	10	13.99	354.8	14	354.8	0.1	718	2	0.0282
$150 \times 25 \times 20$	6	13.24	441.93	13.11	442.16	0.47	1338	1	0.1058
	8	13.77	332.89	13.71	332.89	0.42	1371	1	0.1262
	10	14	265.92	14	266	0.42	700	2	0.1579

对该表数据进行分析,可得出以下结论:①在谐振器总长度和总宽度一定时,单臂梁宽度越大,谐振频率和品质因数越高,但 $\Delta V_2/V_2$ 越小,因此在谐振器设计时,不能一味的增加单臂梁宽度而以 $\Delta V_2/V_2$ 为代价,导致信号检测难度增加。②谐振频率对谐振器的厚度不敏感,即在其他参数一定时,改变谐振器的厚度,谐振频率基本保持不变。③谐振器厚度对 $Q$ 值影响不大,谐振器厚度对谐振特性的影响体现在应力和输出电压幅值上,以 $n=1\mu\text{m}$ 的 $20\mu\text{m}\times 2.5\mu\text{m}\times 2.5\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}\times 2.5\mu\text{m}\times 1.5\mu\text{m}$ 为例,两者所受的最大应力分别为 $1.663\times 10^8\text{Pa}$ 和 $3.49\times 10^7\text{Pa}$ ,即更薄的谐振器承受更大的应力,因此输出电压也会增大。④尺寸等比例缩小时,输出信号增大。

### 3.3.2 平衡 U 形谐振器分析

谐振器设计的目标是提高谐振频率和品质因数。对于硅 MEMS 谐振器,通过减小阻尼损耗来提高 $Q$ 值,一方面,降低周围环境气压以降低空气阻尼;另一方面,设计平衡结构,形成对称平衡的谐振模态,平衡结构通过补偿作用可以抵消来自外界的作用力,减小在谐振器锚上损耗的能量从而提高 $Q$ 值。

针对 3.3.1 中尺寸为 $L\times W\times h=20\mu\text{m}\times 2.5\mu\text{m}\times 1.5\mu\text{m}$ , $n=1\mu\text{m}$ 的非平衡 U 形结构设计对应的平衡结构,锚的长度 $L_a=2\mu\text{m}$ ,宽度 $w_a=1\mu\text{m}$ ,频率响应分析中频率扫描步长均为 10kHz。表 3.4 列出了模拟的谐振特性与非平衡 U 形结构谐振特性的对比。

表 3.4 平衡结构与非平衡结构 U 形谐振器谐振特性对比

结构	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$Q$
非平衡 U	104.07	4484.6	160	1041
平衡 U	101.99	4840	74	34823

可以看出,与非平衡结构相比,平衡结构的谐振频率及输出电压基本保持不变,而 $Q$ 值提高了 33 倍。事实上, $Q$ 值增加倍数可达几十甚至上百<sup>[21]</sup>,因此,在进行压阻式硅 MEMS 谐振器设计时常采用平衡结构来提高 $Q$ 值。

### 3.3.3 非平衡狗骨形谐振器分析

文献<sup>[21]</sup>中首先提出了狗骨形结构,该结构中两个质量块通过两对平行的悬臂梁连接起来,每个梁通过锚来固定,如图 3.1(b)所示。谐振器可等效为弹簧—质量块模型,

其中两平行梁相当于弹簧。与 U 形结构相比其优势在于谐振结构与电极间作用的面积更大，在相同的驱动电压下，受到更大的静电力，同时谐振结构所受应力集中在平行梁上，因此在相同的激励电压下可获得更大的输出电压。

### (1) 平行梁尺寸对谐振特性的影响

为研究平行梁尺寸对谐振特性的影响，保持质量块尺寸不变（ $13.4\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ ）进行模拟。图 3.9 为平行梁长度对谐振特性的影响，这里平行梁的宽度  $w=3\mu\text{m}$ ，两平行梁之间间隔  $t=7\mu\text{m}$ ，驱动电压  $V_g=40\text{V}$ ，检测电流  $I_d=1\mu\text{A}$ 。从图中可以看出，谐振频率随平行梁长度增加而减小；输出电压直流分量随平行梁长度增加而增加；品质因数  $Q$ 、输出电压交流分量和输出电压相对变化率随着平行梁长度有后减小的趋势，当  $L=5\mu\text{m}$  时达到最大。



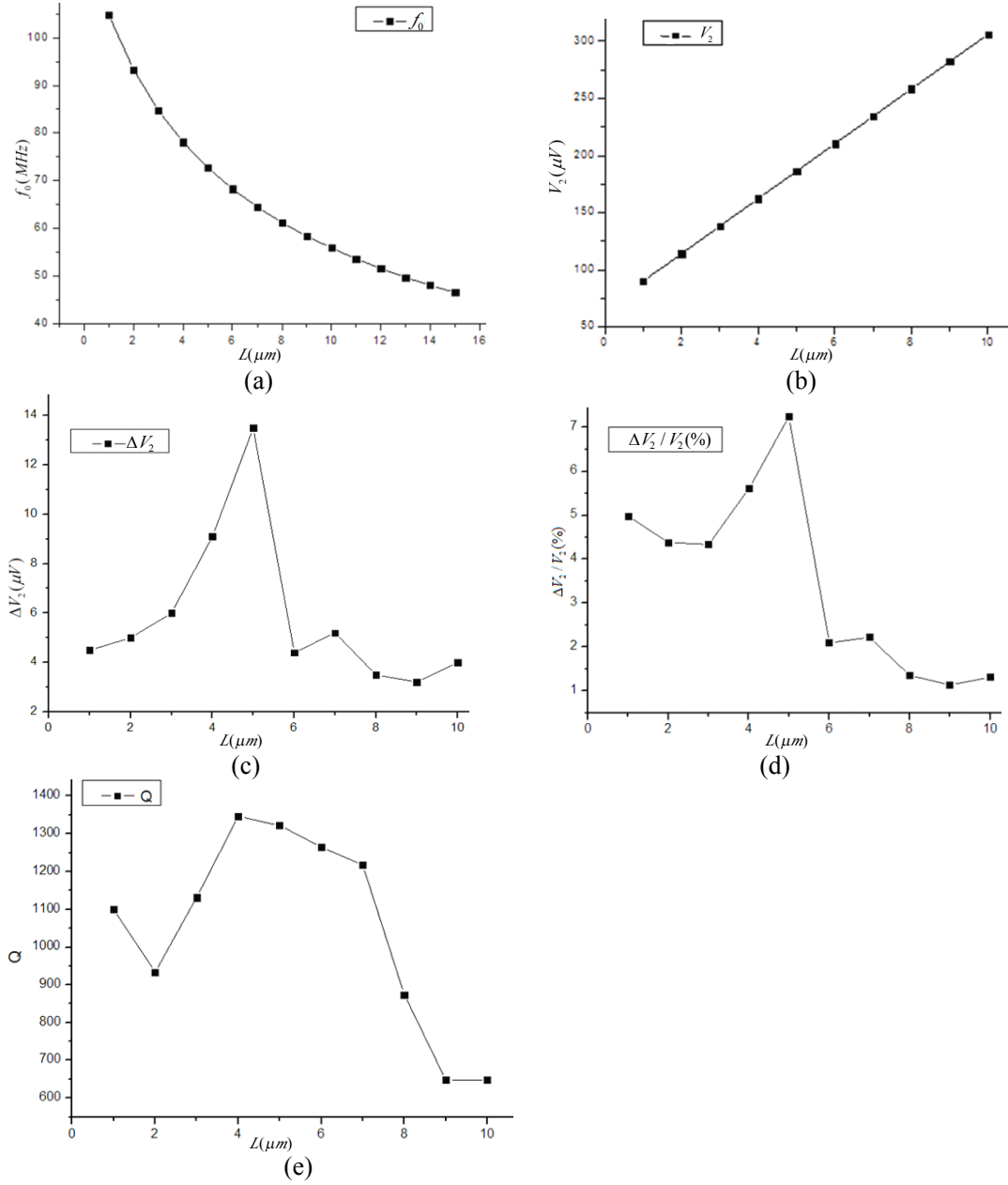


图 3.9 平行梁的长度对谐振特性的影响: (a)对谐振频率的影响, (b)对输出电压直流分量的影响, (c)对输出电压交流分量的影响, (d)对输出电压相对变化率的影响, (e)对品质因数的影响。

图 3.10 为平行梁宽度  $w$  及两平行梁间间隔  $t$  对谐振频率和稳态输出电压的影响, 从图中可以看出: ①平行梁越宽, 谐振频率越大。②当平行梁间间隔  $t=(b-2w)/2$  时, 谐振频率最大。③平行梁越窄, 平行梁间间隔越宽, 稳态输出电压越大。

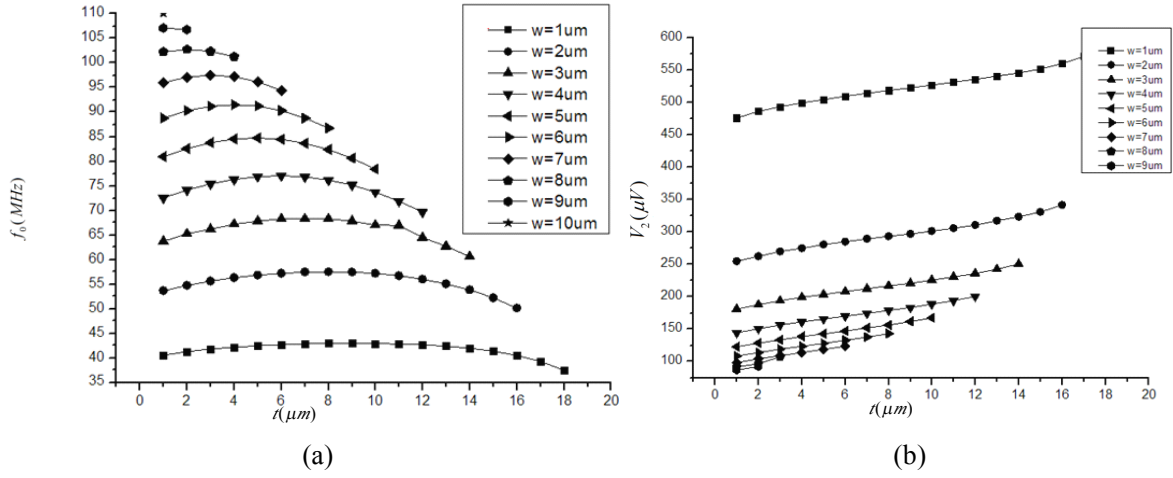


图 3.10 平行梁的宽度及间隙对谐振频率(a)和稳态输出电压(b)的影响

图 3.11 为  $w=1\mu m$  时改变平行梁间间隔宽度  $l$  对应的品质因数, 由图中可以看出,  $Q$  值随着  $l$  的增加而增加, 因此在设计谐振器时, 可适当增加梁平行梁间的间隔。

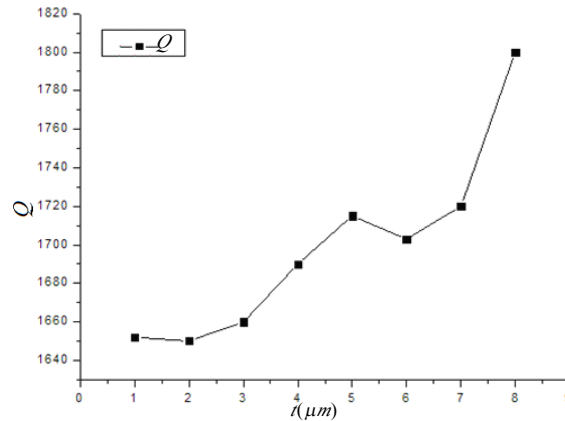


图 3.11 平行梁间隙宽度对品质因数的影响

## (2) 质量块尺寸对谐振特性的影响

图 3.12 为在平行梁尺寸一定的情况下质量块尺寸对谐振频率和稳态输出电压的影响, 这里将平行梁间隙设置为  $l=(b-2w)/2$ 。可以看出, 总的趋势为质量块尺寸越小, 谐振频率越大; 对于相同的宽度  $a$ , 质量块越长, 输出电压越大; 对于相同的长度  $b$ , 质量块越宽, 输出电压越小。

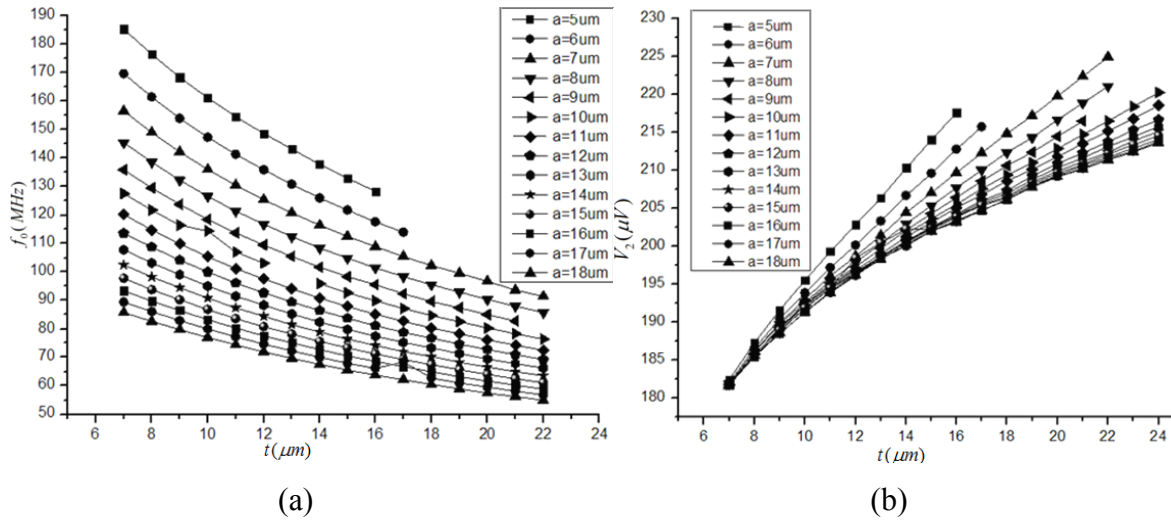


图 3.12 质量块尺寸对谐振频率(a)和稳态输出电压(b)的影响

### (3) 谐振器厚度对谐振特性的影响

谐振器谐振平面结构不变, 改变厚度进行模拟, 得到厚度对于谐振特性的影响如表 3.10 所示, 可以看出: ①谐振频率与厚度无关。②随着厚度的增加,  $Q$  值上下波动, 但波动幅值不大, 可认为厚度对谐振器  $Q$  值影响较小。③厚度对谐振特性的影响主要体现在输出电压上: 随着  $h$  的增大, 输出电压直流分量减小; 当  $h$  较小时,  $\Delta V_2$  维持较高的值, 当  $h$  增加到  $7\mu\text{m}$  时,  $\Delta V_2$  显著减小并保持相对稳定的值。

表 3.10 谐振器厚度对谐振特性的影响

$h$ ( $\mu\text{m}$ )	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2$ ( $\mu\text{V}$ )	$\Delta V_2 / V_2$	$Q$
2	66	482	16.6	3.444	1320
3	66.08	321.7	11.2	3.482	759
4	65.98	242	6.2	2.562	1116
5	66.16	192.5	13.2	6.857	1141
6	66.08	161.1	10	6.207	1652
7	66.15	138.3	3.4	2.458	1161
8	66.3	120.7	2.5	2.071	698
9	66.4	107.2	2.3	2.146	1107

#### 3.3.4 平衡狗骨形谐振器分析

选取几何尺寸为:  $L=6\mu\text{m}$ ,  $w=3\mu\text{m}$ ,  $t=7\mu\text{m}$ ,  $a=10\mu\text{m}$ ,  $b=20\mu\text{m}$ ,  $g=0.27\mu\text{m}$ ,  $h=5\mu\text{m}$  的谐振器对应的平衡结构进行频率响应分析, 频率扫描步长均为  $10\text{KHz}$ 。表 3.11 列出了模拟的谐振特性与非平衡狗骨形结构谐振特性的对比。可以看出, 该平衡结构的品质因数较对应非平衡结构提高了 15 倍。

表 3.11 平衡狗骨形与非平衡狗骨形结构谐振特性对比

结构	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu$ V)	$Q$
非平衡狗骨形	76.342	194.12	4357
平衡狗骨形	75.157	199.41	65358

### 3.4 压阻式硅 MEMS 谐振器的优化

#### 3.4.1 谐振器结构优化

狗骨形结构设计思想是增加悬臂梁与电极间电容的截面积以增大静电力，在该思路启发下设计了如图 3.2 所示的质量块为半圆形的圆形狗骨形结构。将平行梁尺寸相同 ( $6\mu\text{m} \times 3\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ )、质量块尺寸分别为  $R=R$ ,  $a \times b = R \times 2R$  的圆形狗骨形结构和狗骨形结构进行对比，得到如图 3.13 所示的谐振频率和  $Q$  值的对比图。从图中可以看出，在同等尺寸下，圆形狗骨形结构的谐振频率比狗骨形结构提高了 10.7MHz~15.1MHz,  $Q$  提高了 15%~204%。

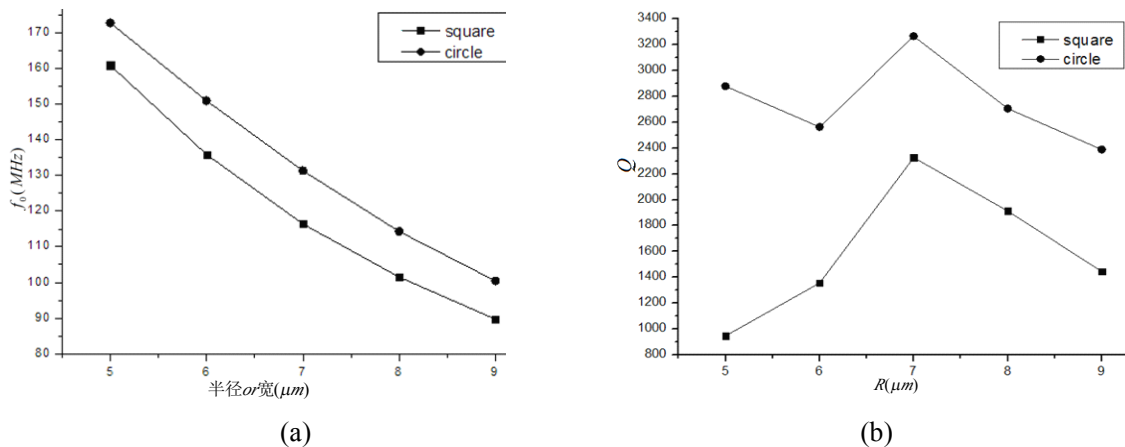


图 3.13 圆形狗骨形结构与狗骨形结构的(a)谐振频率和(b) $Q$ 值对比:

#### 3.4.2 特征尺寸对谐振器的影响分析

MEMS 工艺随集成电路工艺发展而发展，目前集成电路工艺特征尺寸已发展到 45nm，特征尺寸指集成电路中半导体器件的最小线宽。由前面分析可得 MEMS 谐振器尺寸越小，谐振频率越高，本节按照集成电路工艺特征尺寸对谐振结构进行等比例缩小，对不同特征尺寸的圆形狗骨形结构进行频率响应分析。结构中各边对应尺寸的比例关系如表 3.12 所示，其中  $a$  为结构中除  $g$  外的最小尺寸。

表 3.12 结构中各边长的关系

边	$L(\mu\text{m})$	$R(\mu\text{m})$	$w(\mu\text{m})$	$l(\mu\text{m})$	$g(\mu\text{m})$	$h(\mu\text{m})$
尺寸	$2a$	$2a$	$a$	$a$	0.25	$2a$

对  $a$  分别取  $5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $500\text{nm}$ 、 $350\text{nm}$ 、 $180\text{nm}$ 、 $100\text{nm}$  和  $50\text{nm}$ ，对应的品质因数如表 3.13 所示。

表 3.13 不同特征尺寸下谐振频率及品质因数

特征尺寸	$5\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$500\text{nm}$	$350\text{nm}$	$180\text{nm}$	$100\text{nm}$	$50\text{nm}$
谐振频率 (MHz)	90.77	454.12	906.4	1297.5	2513.7	4552	9062
$Q$	4113	3770	4352	2817	1034	402	139

将表格数据用 Origin 标出，得到的趋势图如图 3.14 所示：

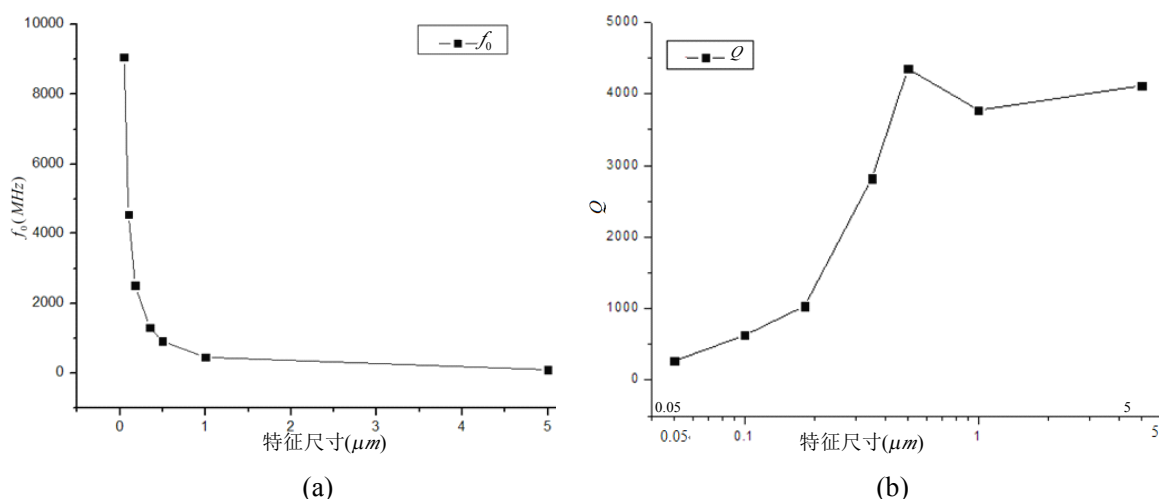


图 3.14 不同特征尺寸下的谐振频率(a)与品质因数(b)

由图 3.13 可以看出，①压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振频率随特征尺寸的减小而逐渐升高，当特征尺寸为  $50\text{nm}$  时，谐振频率达  $9.06\text{GHz}$ 。②随着特征尺寸由  $5\mu\text{m}$  逐渐减小，品质因数呈逐渐减小的趋势。

将特征尺寸  $a=500\text{nm}$  和  $a=50\text{nm}$  对应的平衡结构进行频率响应分析，将得到的谐振频率及品质因数与非平衡结构对比如表 3.14 所示。可以看出，在谐振频率方面，因为加入了锚，谐振频率分别减小了  $8.7\%$  和  $8.5\%$ ，幅度较小；但在品质因数方面却有着非常大的优化，分别提高了  $38$  倍和  $22$  倍。

表 3.14 特征尺寸为 500nm 非平衡结构域平衡谐振特性对比

结构	$f_0$	$Q$
非平衡 ( $a=500\text{nm}$ )	906.4 MHz	4352
平衡 ( $a=500\text{nm}$ )	827.7 MHz	165540
非平衡( $a=50\text{nm}$ )	9.062 GHz	139
平衡( $a=50\text{nm}$ )	8.29GHz	3081

## 3.5 考虑工艺误差的仿真

压阻式硅 MEMS 谐振器在实际工艺制备时会出现多种不理想情况，如平行梁形状在版图定义不准确而为梯形的情况、两平行梁分布不对称等。本节对这两种情况进行了仿真。

### (1) 平行梁为梯形

如图 3.15 为平行梁为梯形的结构。压阻式硅 MEMS 谐振器结构中，相比于质量块，平行梁尺寸相对较小，其制备更易出现变形。

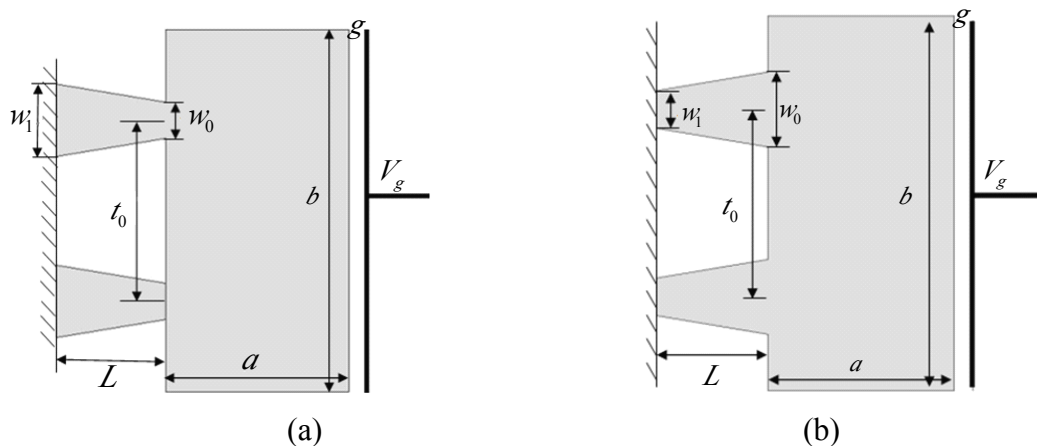


图 3.15 平行梁为梯形结构

注：  $w_0=2\mu\text{m}$ ，  $w_1=4\mu\text{m}$ ，  $t_0=7\mu\text{m}$ ，  $L=6\mu\text{m}$ ，  $a=10\mu\text{m}$ ，  $b=20\mu\text{m}$ ，  $g=0.27\mu\text{m}$

将图 3.15 中两个模型与尺寸为  $w=3\mu\text{m}$ ，  $L=6\mu\text{m}$ ，  $a=10\mu\text{m}$ ，  $b=20\mu\text{m}$  的狗骨形结构频率响应进行对比，如表 3.14 所示。

表 3.15 平行梁结构变形对谐振特性的影响

结构	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu$ V)	$\Delta V_2$ ( $\mu$ V)	$\Delta V_2 / V_2$ (%)	$Q$
狗骨形结构	76.342	194.12	6.4	3.3	4357
(a)结构	76.22	228.75	0.95	0.4153	4012
(b)结构	80.02	213.8	1.05	0.49	4001

由表可以看出，平行梁的变形对谐振特性的影响主要表现在输出电压交流部分上，谐振器平行梁为梯形时，输出电压交流部分大幅减小，导致抗干扰能力差，不利于输出信号的处理。因此，在实际制备工艺对平行梁准确度要求较高。

## (2) 平行梁分布不对称

如图 3.16 和图 3.17 所示为圆形狗骨形结构中两平行梁分布不对称的情况，设置  $L=6\mu\text{m}$ ， $u=3\mu\text{m}$ ， $t=3\mu\text{m}$ ， $R=6\mu\text{m}$ ，平行梁相对于中轴线偏离  $\Delta t=100\text{nm}$ ，得到纵向伸缩振动模式下的变形如图 3.18 所示，可以看出，悬臂梁在与电极间隙较小的一侧部位变形较大，而在与电极间隙较大的一侧部位变形较小。

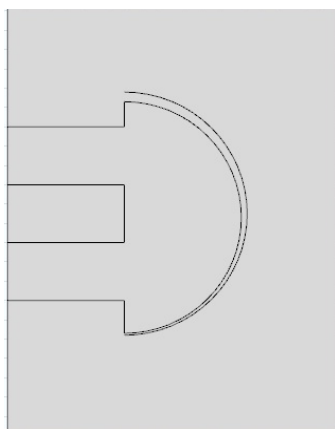


图 3.16 平行梁分布不对称结构图

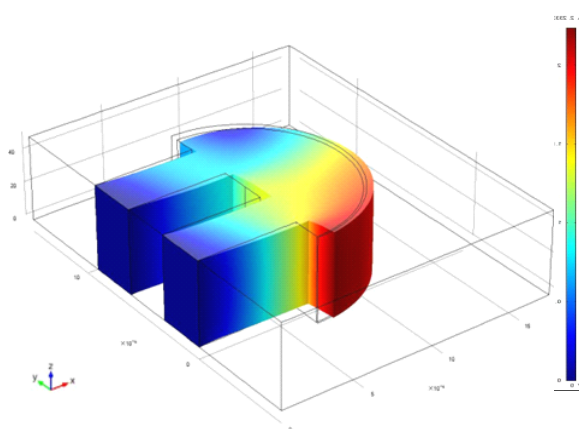


图 3.17 平行梁分布不对称时的谐振特性

进行频率响应分析得到的频率响应与对称分布的频率响应对比如表 3.16 所示。由表中数据可以看出，两平行梁在分布不对称时对谐振特性的影响不大。

表 3.16 平行梁分布不对称与对称分布

结构	$f_0$ (MHz)	$V_2$ ( $\mu$ V)	$\Delta V_2$ ( $\mu$ V)	$Q$
对称	150.75	202.3	4.4	1713
不对称	150.35	202.4	6.1	1736

## 3.6 本章小结

本章利用 COMSOL Multiphysics 对不同结构的压阻式硅 MEMS 谐振器进行了特征频率分析和频率响应分析, 分析了谐振器尺寸及特征尺寸对特征频率、输出电压和品质因数的影响, 主要结论如下:

①等比例缩小可提高谐振频率。

②谐振器厚度对  $Q$  值无影响, 厚度主要影响谐振器所受应力及输出电压幅值。谐振器越薄, 则所受应力越大, 输出电压越高。

③平行梁尺寸为  $6\mu\text{m} \times 3\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$  下, 质量块尺寸为  $R=R$  的圆形狗骨形结构谐振器与质量块尺寸为  $a \times b = R \times 2R$  的狗骨形结构相比, 谐振频率提高了 7.4%~12.8%, 品质因数提高了 15%~204%, 表明圆形狗骨形结构在谐振频率和品质因数方面均得到了优化。

④平衡结构与对应的非平衡结构相比, 虽然谐振频率减小了 2%~8%, 但是品质因数提高了 15~38 倍, 优化了谐振性能。

⑤特征尺寸从  $5\mu\text{m}$  缩小到 50nm 过程中, 谐振频率逐渐升高, 品质因数呈逐渐减小的趋势。



## 4 压阻式硅 MEMS 谐振器的工艺仿真

本章利用半导体工艺仿真工具 Silvaco 中的二维工艺模拟器 ATHENA 对压阻式硅 MEMS 谐振器的制备工艺进行模拟,分析关键工艺步骤——光刻和反应离子刻蚀的主要影响因素。

### 4.1 二维工艺模拟器 ATHENA 简介

工艺仿真的意义在于通过仿真取代成本很高的硅片实验,在仿真中对工艺步骤进行优化,从而缩短开发周期并提高成品率<sup>[40]</sup>。目前市场主流的工艺仿真工具有 SILVACO TCAD、ISE TCAD、ME DICI、MINIMOS 等,其中 Silvaco 中的 ATHENA 工艺模拟器基于一系列物理模型及其方程,可迅速模拟半导体工艺中所有关键工艺步骤如离子注入、扩散、氧化、刻蚀、淀积、光刻等。图 4.1 为 ATHENA 的输入输出关系图。

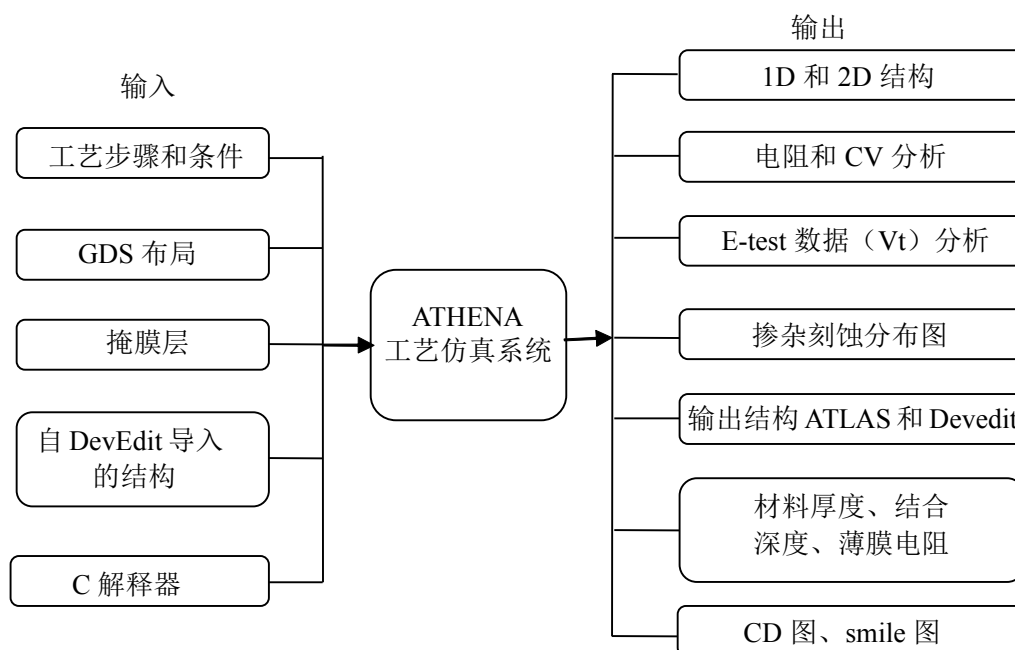


图 4.1 ATHENA 工艺仿真器的输入/输出

本文选取 1 $\mu$ m、500nm 和 350nm 工艺尺度下的谐振器结构利用 ATHENA 进行工

艺仿真，分析仿真中出现的问题并重点研究制备工艺中的两个关键步骤：光刻和反应离子刻蚀，分析光刻过程中曝光剂量和显影时间对图形转移的影响，分析反应离子刻蚀过程中影响侧壁形状的因素。

## 4.2 SOI 衬底制备压阻式硅 MEMS 谐振器的工艺仿真

### 4.2.1 工艺流程

图 4.2 为压阻式硅 MEMS 谐振器的制备工艺流程图。得到具有压阻效应的 P 型硅后，在模型中的电极区域淀积 Al。在将谐振结构图像利用光刻转移到 SOI 衬底上后，利用反应离子刻蚀工艺将谐振器结构刻蚀在 SOI 顶层硅上，使谐振器的弹性梁沿  $\langle 110 \rangle$  晶向。最后通过 HF 酸各向同性刻蚀掩膜层并去除光刻胶。

在压阻式硅 MEMS 谐振器的制备中，最关键的工艺步骤为光刻和反应离子刻蚀。光刻的准确度反映了图形转移的准确度。悬臂梁与电极间间隙的刻蚀需要得到垂直光滑的侧壁，且由于间隙很窄，需要非常精确的刻蚀，因此本文选用反应离子刻蚀。

ATHENA 的定位为二维工艺仿真器，而本文中的谐振器为三维结构，解决办法为选取反映谐振器结构特点的不同截面进行工艺仿真。二维截面的工艺仿真可以直观地反映三维的情况。

### 4.2.2 SOI 衬底制备模拟

SOI(Silicon on Insulator)是绝缘体上硅的缩写，是指在顶层硅和背衬底之间引入一层绝缘层的技术。在集成电路应用中，SOI 材料制备的 CMOS 电路具有寄生电容小、无闩锁效应、抗单粒子能力强、功耗低、集成度高等特点<sup>[41]</sup>。在 MEMS 应用方面，SOI 材料的顶层硅具有良好的单晶性质，另外埋氧层可用于精确的刻蚀终止，利用 SOI 材料制备 MEMS 与现有硅工艺兼容，可减小 13~20%的工序<sup>[42]</sup>。利用 SOI 衬底制备压阻式硅 MEMS 谐振器，可精确控制谐振器的厚度。

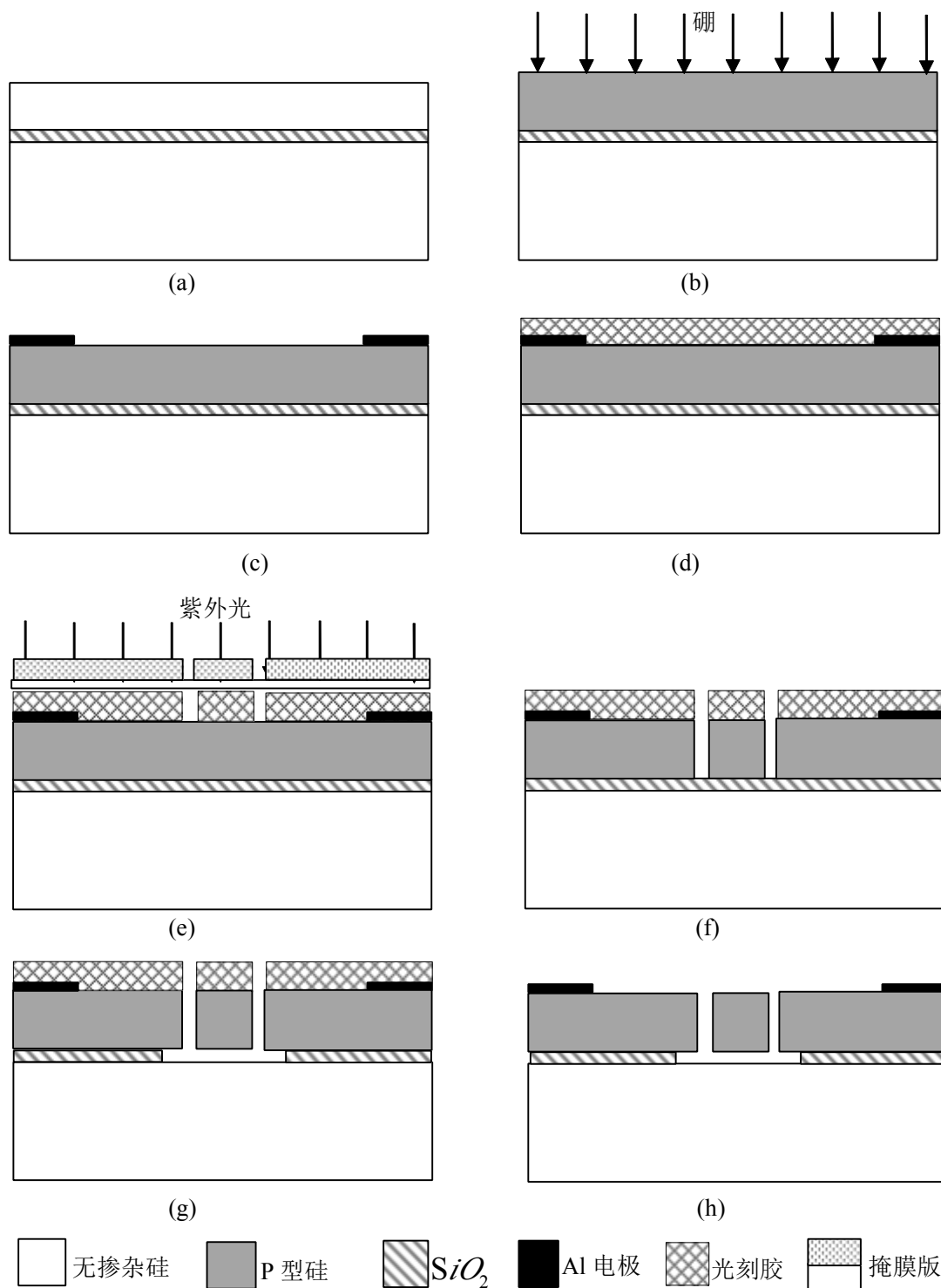


图 4.2 制备压阻式硅 MEMS 谐振器的工艺流程图：(a)清洗后的 SOI 衬底；(b)顶层硅掺硼；(c)淀积 Al 电极；(d)匀胶；(e)光刻图形转移并显影；(f)反应离子刻蚀；(g)HF 湿法刻蚀释放谐振结构；(h)去除光刻胶

形成 SOI 的方法很多，目前工业应用较多的有注氧隔离（SIMOX）技术、键合技术和智能切割（Smart-Cut）技术。因为键合技术和智能切割技术都要用到键合工艺，这在 Silvaco 软件不支持，离子注入和退火可在 Silvaco 中实现，故选用 SIMOX 工艺作为制备 SOI 的方案一，氧化-外延淀积法作为方案二。

图 4.4 为 SIMOX 工艺形成埋氧层机理图<sup>[44]</sup>，其基本工艺步骤包括：

①氧离子注入，典型注入剂量为  $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ，离子束能量通常为 50KeV~200KeV，氧离子浓度在硅中的分布为高斯分布，衬底温度为 500-600℃ 以防止顶层硅非晶化

②高温退火，退火温度  $\geq 1100^\circ\text{C}$ ，氧离子在硅中再分布并形成垂直的 Si/SiO<sub>2</sub> 界面，并消除晶格损伤。

③硅片清洗，去除表面微粒和沾污。

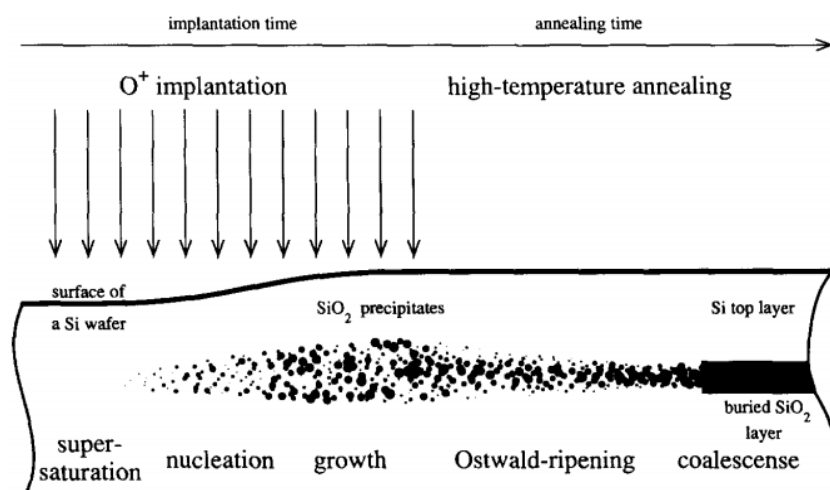


图 4.3 SIMOX 工艺制备 SOI 衬底及形成埋氧层机理<sup>[43]</sup>

## 方案一：SIMOX 法制备 SOI

采用 Monte Carlo 注入法注入氧离子，分别进行能量为 50KeV、100KeV、200KeV，注入剂量分别为  $1.0 \times 10^{17}$  和  $2.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ，观察得到硅中氧离子分布情况如图 4.4 所示。

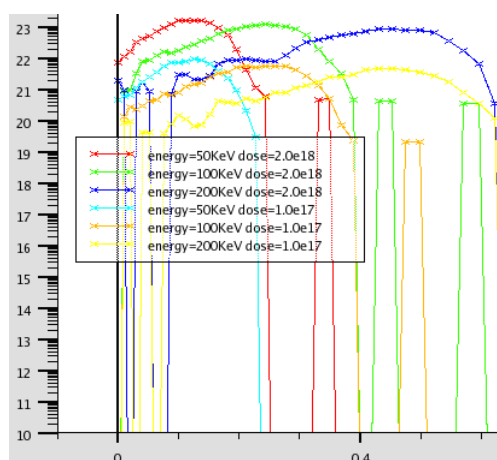


图 4.4 不同注入能量和剂量对氧离子分布的影响

从图 4.4 可以看出，对于相同的能量，注入剂量越大，在硅中分布的氧离子浓度越大，而浓度峰值相同；对于相同的注入剂量，能量越大，浓度分布表现为峰值越深，同时厚度越大。因此可以看出，注入剂量主要影响氧离子浓度的峰值大小，表现为影响形成  $\text{SiO}_2$  层的边界位置，注入能量主要影响形成  $\text{SiO}_2$  层的厚度和深度。

对注入离子后的硅片在  $1320^\circ\text{C}$  下退火，理论上讲，注入硅中的氧离子浓度达到特定浓度时会形成过饱和的状态而发生成核现象，在后续的退火中，沉淀物发生 Ostwald Ripening 熟化现象，沉淀物不断长大，最终多个沉淀物在硅片中合并为一层埋氧层<sup>[58]</sup>。但由于 ATHENA 中对于 Ostwald Ripening 的模型方面还不是很成熟，经过各种努力，并请教了 Silvaco 在中国的代理商万德成国际有限公司的专业人士后，暂时还没有找到 ATHENA 描述注入的氧离子在硅中形成埋氧层的模型的方法，该方案还有待摸索。

## 方案二：氧化-外延淀积法制备 SOI

如图 4.5 为氧化-外延淀积法制备 SOI 衬底的流程图，首先利用干-湿-干法氧化得到厚度为  $300\sim 400\text{nm}$  的埋氧层，然后利用外延法淀积厚度为  $0.5\mu\text{m}$  的顶层硅器件层，注入硼离子对顶层硅进行 P 掺杂，最后将得到的 SOI 衬底进行抛光处理。

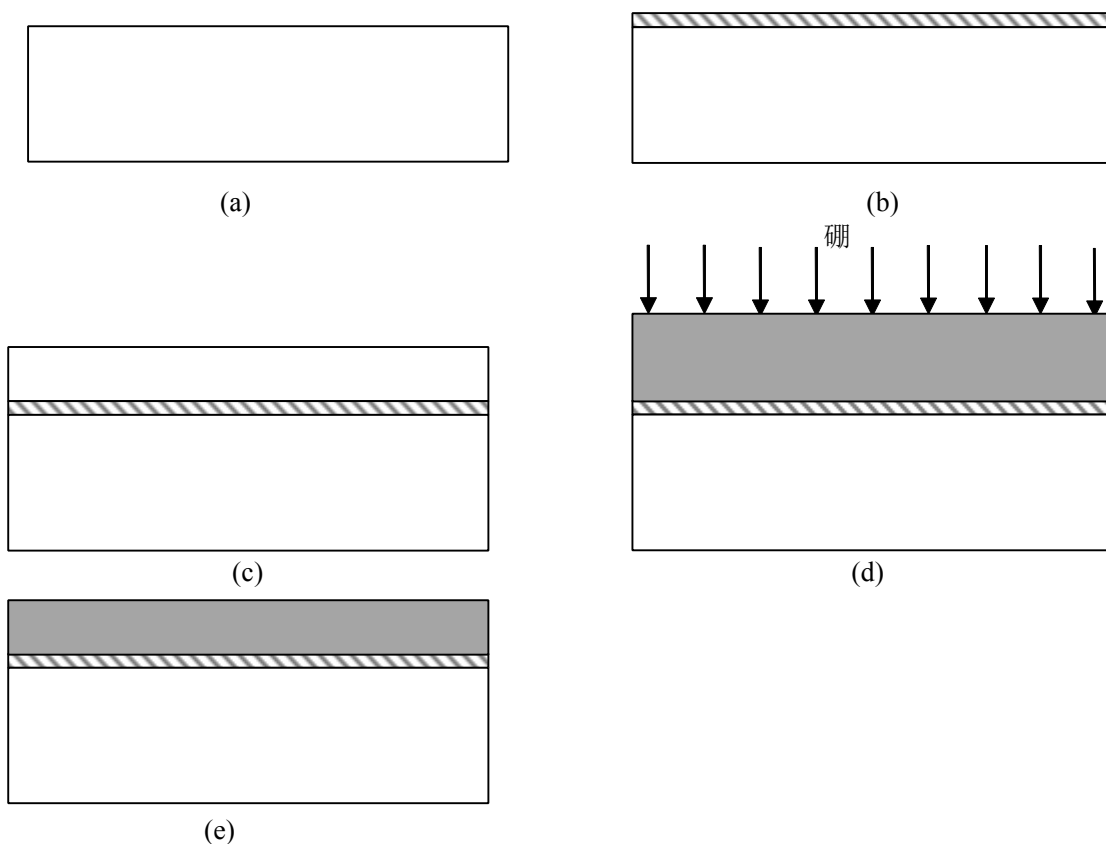


图 4.5 氧化-外延电极法制备 SOI 衬底流程图：(a)清洗后的硅衬底；(b)干-湿-干氧化形成 BOX 埋层；(c)外延淀积硅形成 SOI 结构；(d)顶层 P 型掺杂；(e)抛光

本文中干-湿-干氧化温度均设置为  $1000^{\circ}\text{C}$ ，氧化时间分别为：10min，45.9min，10min，得到氧化层厚度为 407.1nm，其中致密氧化层厚度为 23.975nm。在外延的同时进行硼离子掺杂，掺杂浓度为  $3.78\text{e}18\text{ cm}^{-3}$ 。得到 SOI 衬底结构如图 4.6 所示。图中红线表示硼离子浓度分布，可以看出，在顶层硅中硼离子浓度分布均匀。

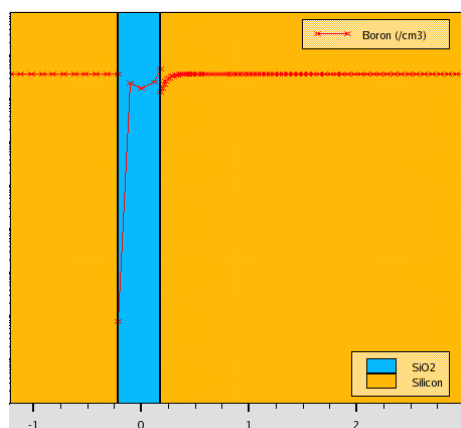


图 4.6 氧化-外延淀积法得到的 SOI 衬底结构

## 4.2.3 光刻工艺模拟

ATHENA 模拟光刻的过程为：首先设定光刻机及光刻胶的各种参数，然后定义版图及掩膜参数；定义掩膜后设定成像窗口，并在成像窗口区域进行曝光、前烘和显影。

光刻机参数包括包括光刻机照明参数、照明系统滤波参数、投影的数值孔径、发射孔滤波参数等。本文中光刻机的定义为：

```
illumination g.line x.tilt=0 z.tilt=0  
illum.filter clear.fil circle sigma=0.3  
projection na=0.85  
pupil.filter clear.fil circle
```

光刻胶参数包括光刻胶波长、光刻胶曝光模型参数、光刻胶显影模型参数等。本文光刻胶选用的是材料库中的适用于 g.line(波长  $0.436\mu\text{m}$ )、h.line(波长  $0.407\mu\text{m}$ )、i.line(波长  $0.365\mu\text{m}$ )光的正性光刻胶 AZ1350J。

实际光刻工艺中光刻胶的旋涂包括硅片清洗、涂底、旋涂光刻胶、软烘等，ATHENA 对这一过程进行了简化，直接描述为淀积一定厚度的光刻胶：

```
depositname.resist=AZ1350J thick=0.2 divisions=20
```

ATHENA 提供两种光刻版图定义方法，一种是利用脚本语言 layout 语句画矩形来定义，另一种是在版图工具 Mask Views 中画好版图，导出.lay 版图文件在 layout 语句引入。对于简单的版图，可采用第一种方法，但复杂的版图需要采用第二种方法。本文定义的版图如图 4.7 所示。中间的结构部分即为谐振器的悬臂梁结构，在后续工艺中该区域下面的埋氧层需要刻蚀掉以形成悬臂梁结构。上下区域为固定区域，在该区域中埋氧层不被刻蚀，并通过锚来支撑悬臂梁结构。左右为电极部分，在旋涂光刻胶前需要在该区域预先淀积一层 Al 电极。

ATHENA 为二维工艺模拟器，不能直接模拟三维结构的工艺步骤，本文的解决办法是选取 6 条反映谐振器结构特点的不同矩形区域作为成像区域，然后进行后续工艺。

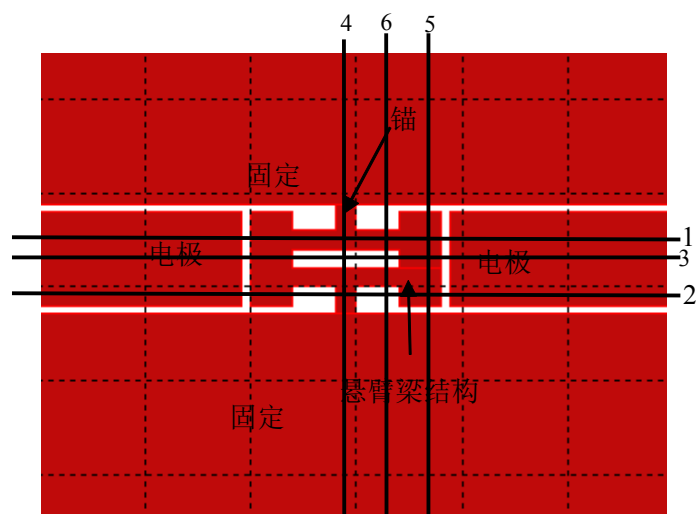


图 4.7 压阻式硅 MEMS 谐振器的 Mask Views 版图及成像区域选取

以如图 4.8(a)所示的 1 号线成像区域为例，谐振器制成后在一号线处的截面结构如图 4.8(b)所示，图 4.8(c)为成像区域的局部放大及光强分布，悬臂梁与电极间的间隙为需要刻蚀的区域，在该区域中光强比其他地方的要大，曝光显影后该区域的刻胶将被显影液去除。

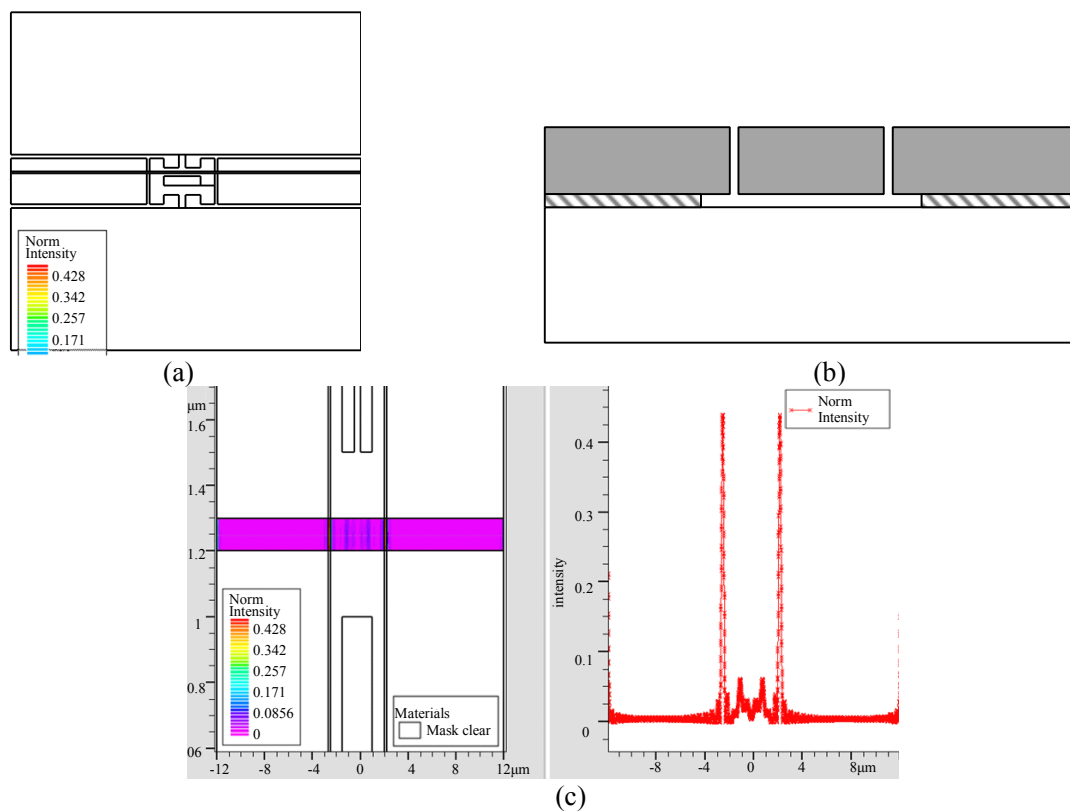


图 4.8 1 号线成像区域光强分布及对应截面图



图 4.9~图 4.13 分别为 2~6 号线成像区域截面图及成像后的光强分布。可以看出，对于像悬臂梁与电极间间隙这样比较窄的区域，成像时接收到的光线较少，因此成像后光强强度较小；而较宽的区域，成像后光强强度则比较大。为了能让较窄区域能充分曝光并显影，可通过增加曝光能量、增加显影时间或多次曝光等办法来解决，这一点将在 4.3 节中讨论。

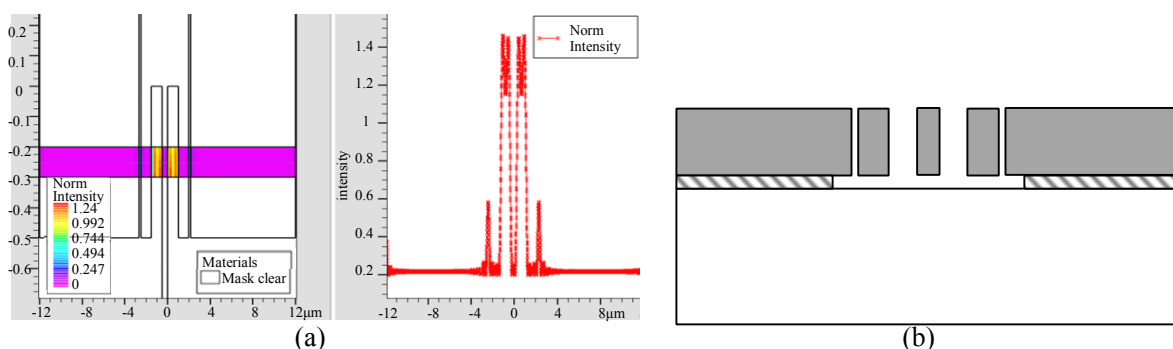


图 4.9 2 号线成像区域光强分布及对应截面图

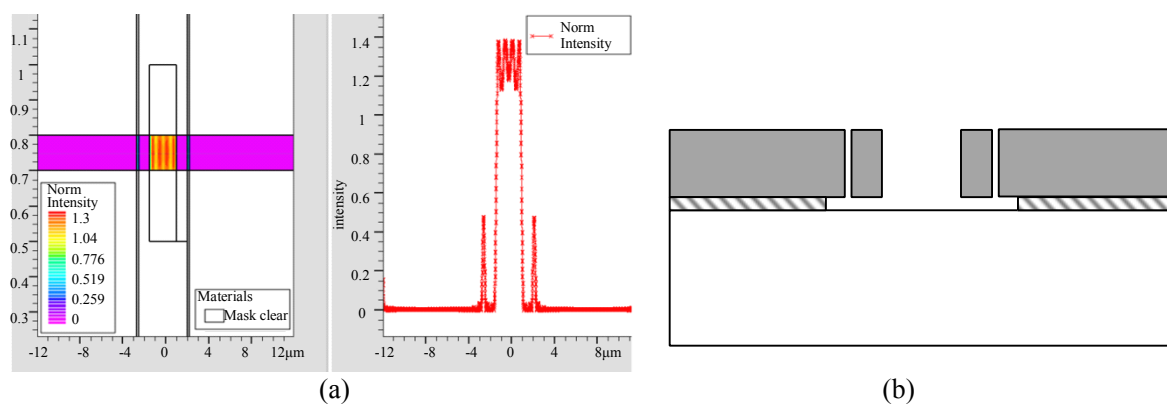


图 4.10 3 号线成像区域光强分布及对应截面图

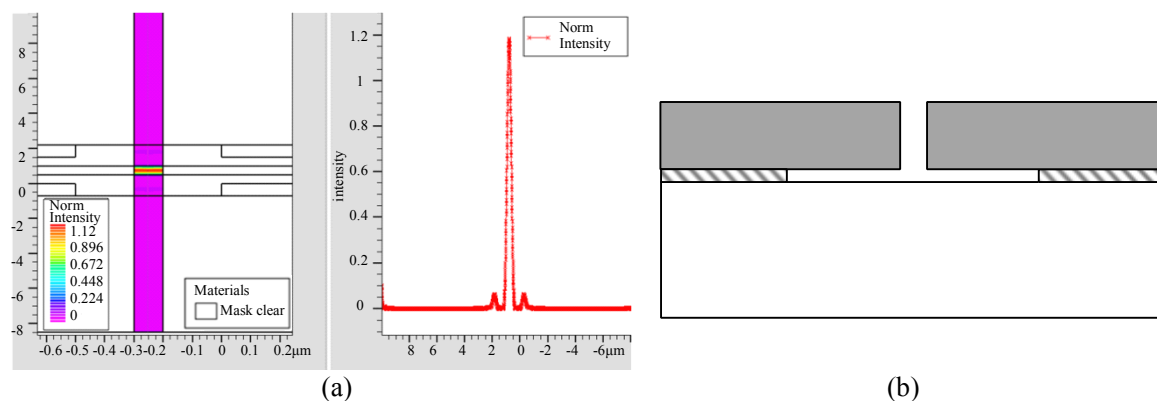


图 4.11 4 号线成像区域光强分布及对应截面图

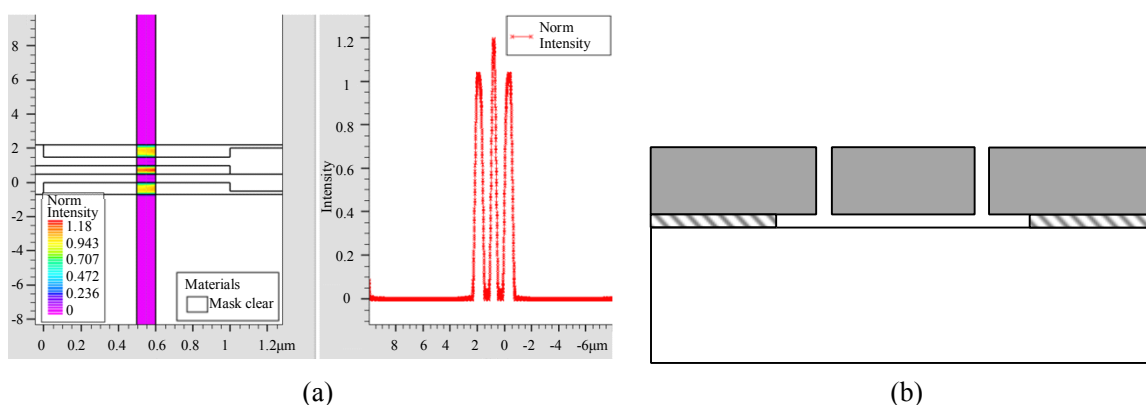


图 4.12 5 号线成像区域光强分布及对应截面图

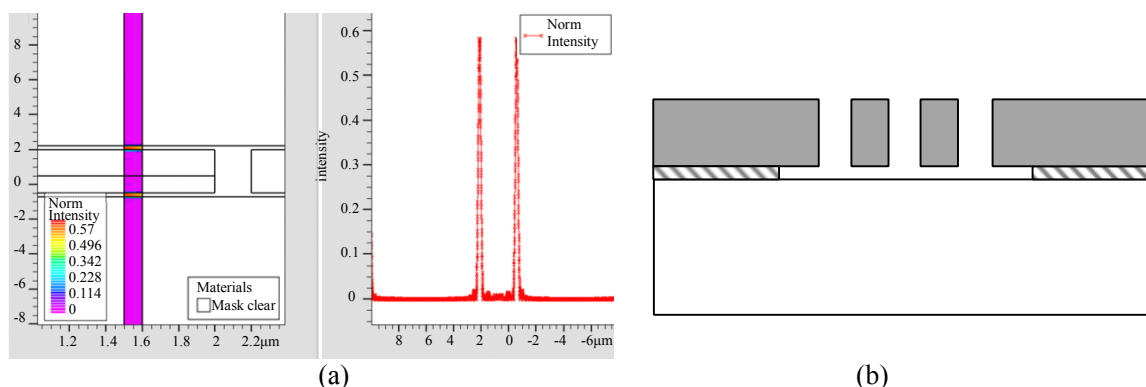


图 4.13 6 号线成像区域光强分布及对应截面图

成像后进行曝光处理，对于 AZ1350J 正性光刻胶，曝光区域内光刻胶易溶于显影液<sup>[44]</sup>，控制曝光的主要参数有曝光剂量、表面角度、曝光次数等。前烘一般是在温度为 100~130℃ 的热板上放置 1 分钟左右的时间，随后进行光刻胶的显影，将曝光区域内的光刻胶去除，只留下未曝光区域的光刻胶。经显影后的光刻胶结构如图 4.14 所示。

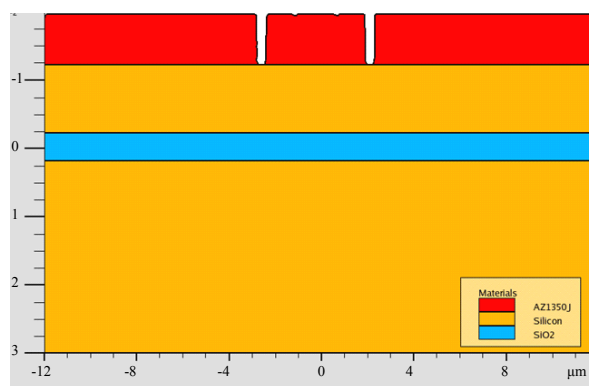


图 4.14 显影后光刻胶曝光区域被去除

## 4.2.4 谐振结构的刻蚀及释放

压阻式硅 MEMS 谐振器的制备对刻蚀工艺要求较高,需要很高的各向异性以形成垂直的侧壁。反应离子刻蚀是一种物理化学同时作用的刻蚀方法,其原理如图 4.15 所示,一方面辉光放电产生的游离基和自由电子与表面发生化学反应,另一方面高能粒子攻击硅片表面<sup>[45]</sup>,可获得垂直的侧壁。

反应离子刻蚀模拟中,主要设置刻蚀材料、刻蚀的方向(各向异性参数)、各向同性刻蚀速率、离子束发散和刻蚀速率等参数,得到的结构如图 4.16 所示。

```
rate.etch machine=RIE_etch silicon n.s rie isotropic=0 direc=10
```

```
etch machine=RIE_etch time=600 seconds
```

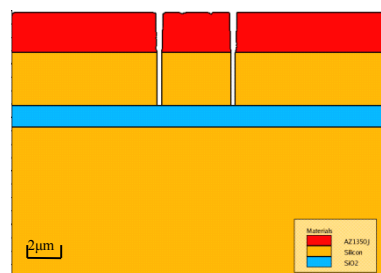
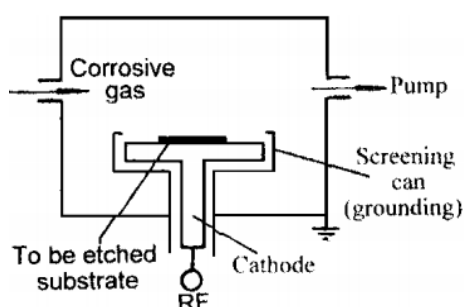


图 4.15 反应离子刻蚀原理图

4.16 反应离子刻蚀得到的器件结构

谐振器结构的释放通过 HF 酸湿法刻蚀埋氧层来完成, HF 酸湿法刻蚀为各项同性刻蚀,对  $SiO_2$  和 Si 的刻蚀速率分别为 20~200nm/min, 和 0.3Å/min。湿法刻蚀模拟中主要设置的参数有刻蚀材料、刻蚀速率和各向同性参数等。得到的结构如图 4.17 所示。

```
rate.etch machine=wet_etch oxide u.m wet.etch isotropic=100
```

```
etch machine=wet_etch time=10 minutes
```

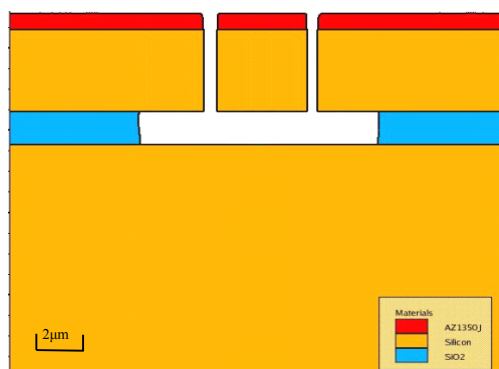


图 4.17 湿法刻蚀后得到的悬臂梁结构截面图

## 4.3 工艺模拟优化

### 4.3.1 光刻工艺优化

光刻的精确程度直接影响着谐振结构是否能准确定义，若曝光剂量或显影时间设置不合理，很容易产生显影不足或过显影的问题。如图 4.18 所示为特征尺寸为 350nm 的谐振器中 2 号线曝光区域显影不足、正常显影和过显影的情况，(a)中曝光剂量为  $50 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 10s，曝光剂量和显影时间均设置过小，以至于显影后曝光区域内的光刻胶只溶解了一小部分；(b)中曝光剂量为  $50 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 60s，因为曝光剂量不足，光刻胶未完全反应，以至不断增加显影时间都不能彻底将曝光区域内的光刻胶溶解；(c)中曝光剂量为  $75 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 10s 的显影情况，因为显影时间太短，导致来不及将光刻胶完全溶解；(d)中曝光剂量为  $75 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 15s，可以看出，需要曝光的区域光刻胶均溶解，溶解的区域对应的尺寸与版图设计中的尺寸吻合；(e)中曝光剂量为  $75 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 60s，可以看出，由于显影时间过长，导致非曝光区域也有一部分光刻胶被溶解了，对后续工艺的影响是反应离子刻蚀后得到锚的宽度不足及质量块变窄；(f)中曝光剂量为  $100 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 10s，因为曝光量太大，导致非曝光区域中靠近曝光区的部分光刻胶也吸收了光波，从而导致过显影；(g)中曝光剂量为  $100 \text{ mJ/cm}^2$ ，显影时间为 60s，可以看出因为曝光量太大且显影时间过长，锚对应区域内的光刻胶已经溶解很多，以至于支撑悬臂梁的锚宽度很小，这样容易导致锚断裂。

为系统了解曝光剂量和显影时间对光刻的影响，对特征尺寸为  $1\mu\text{m}$ ，500nm，350nm 的谐振器版图分别进行不同曝光剂量和不同显影时间的光刻，并分析得到的显影区域尺寸，从而选取合适的曝光剂量和曝光时间进行光刻。

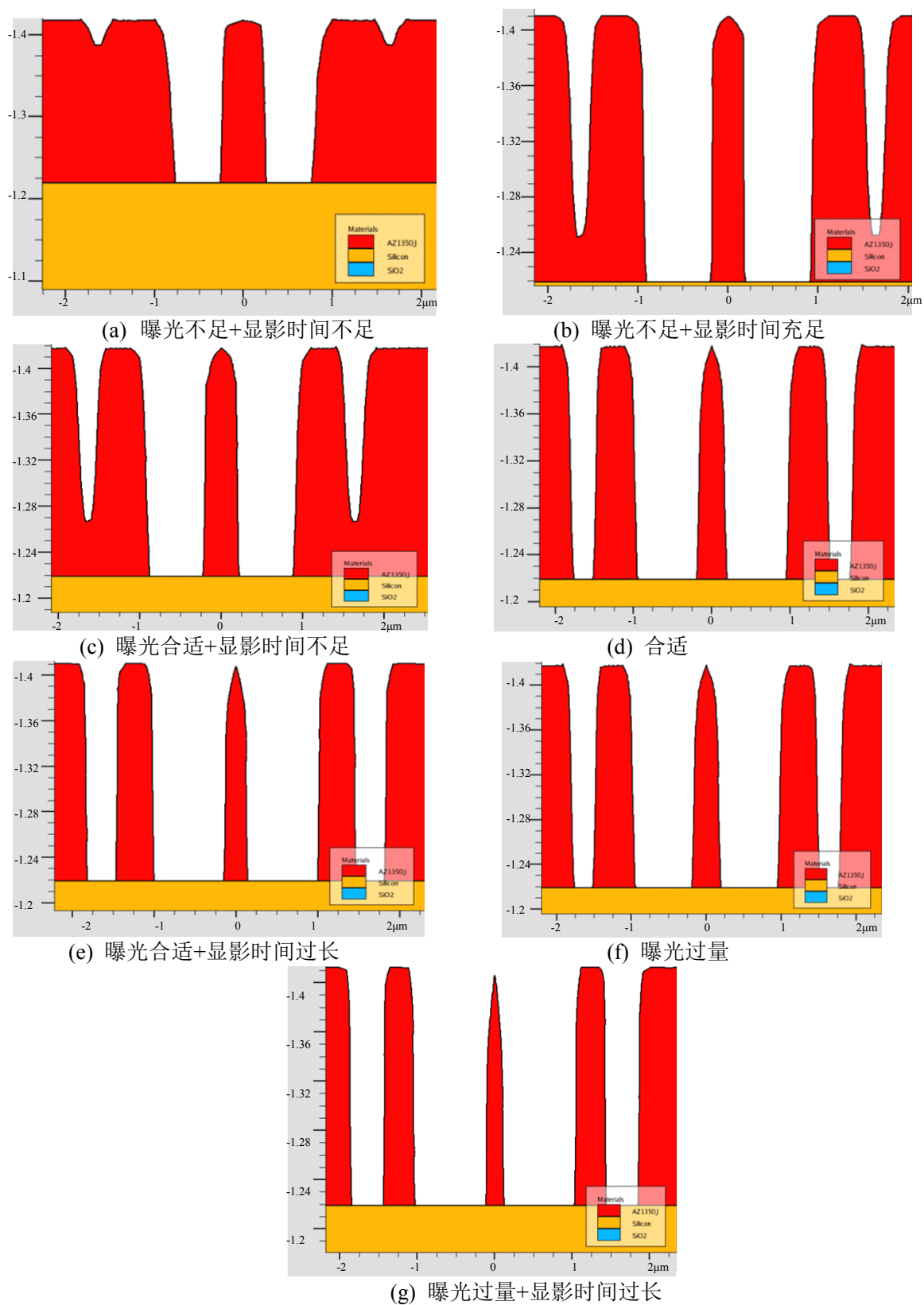


图 4.18 显影不足、正常显影和过显影的对比

(1)  $1\mu\text{m}$  特征尺寸谐振器的光刻

对 2 号线成像区域而言，其截面图如图 4.19(a)所示，在曝光剂量  $50\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、 $75\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、 $100\text{ mJ}/\text{cm}^2$  和显影时间 10s、20s、30s、40s、50s、60s 条件下分别进行光刻，得到各自显影区域的宽度  $L$  和  $g'$ ，统计  $L$  和  $g$  的数值，得到它们的分布规律如图 4.19(c)所示，图 4.19(c)中  $L$  对应版图中锚与质量块间的间隔部分，其分布规律如图 4.19(c)中的上一组曲线， $g$  对应质量块与电极间的间隙，其分布规律如图 4.19(c)中的下一组曲线。可以看出，①曝光剂量越大，被显影区域越宽；②随着显影时间的增加，被显影区域宽度逐渐增加，当显影时间增加到一定数值时，被显影区域宽度不再增加；③曝光剂量  $75\text{ mJ}/\text{cm}^2$ ，显影时间 20s 得到的被显影区域与版图最吻合，其模拟结果如图 4.19(b)所示。

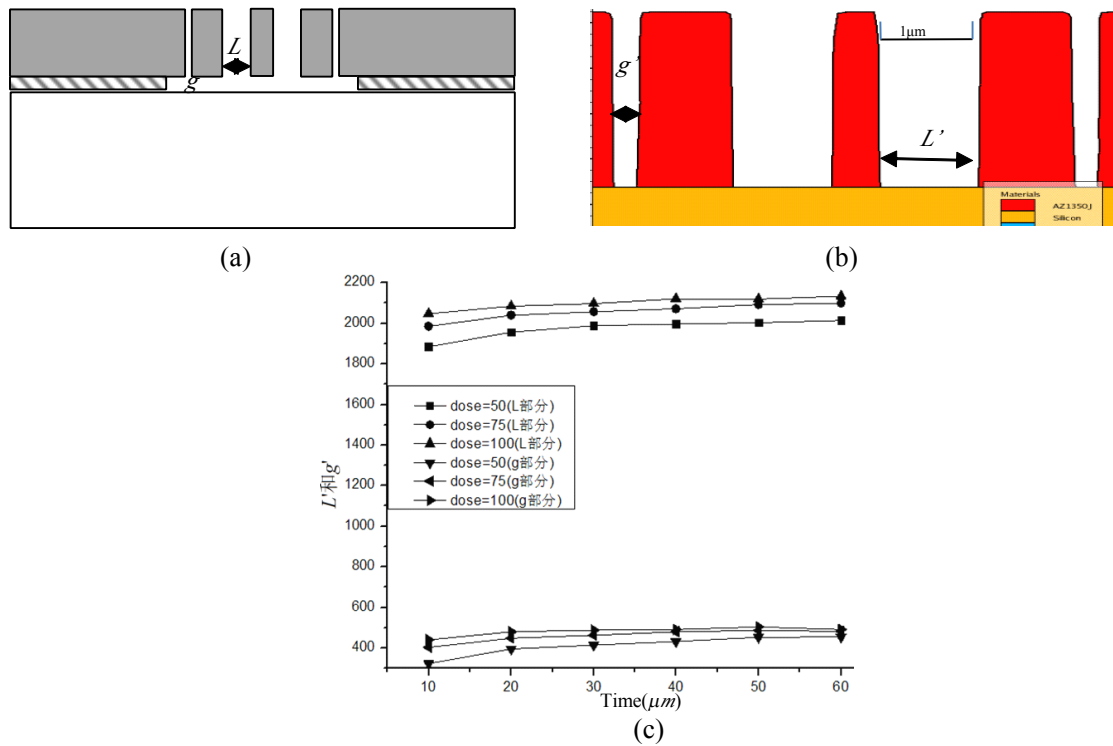


图 4.19 (a)2 号线的剖面图，(b) 曝光剂量  $75\text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、显影时间 20s 情况下的模拟结果，(c) 曝光剂量和显影时间对  $1\mu\text{m}$  谐振器被显影区域尺寸  $L$  和  $g$  的影响

对 4、5 号线成像区域分别做同样的处理，将在不同曝光剂量和显影时间下得到的被显影区域尺寸进行统计，得到的仿真结果如图 4.20 和图 4.21 所示，其中  $a=1\mu\text{m}$ ，对应版图中两平行梁间的间隔， $D=500\text{nm}$ ，对应版图中质量块与固定区域间的间隙。

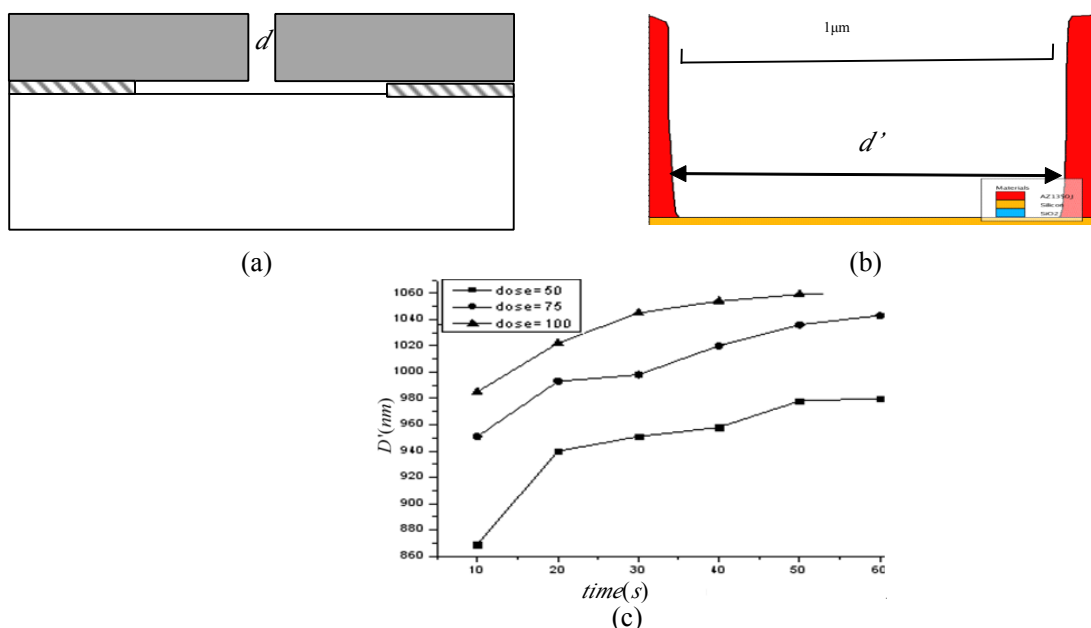


图 4.20 (a)4 号线的剖面图, (b) 曝光剂量  $75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、显影时间 30s 情况下的模拟结果, (c) 曝光剂量和显影时间对 500nm 谐振器显影区域  $d'$  的影响

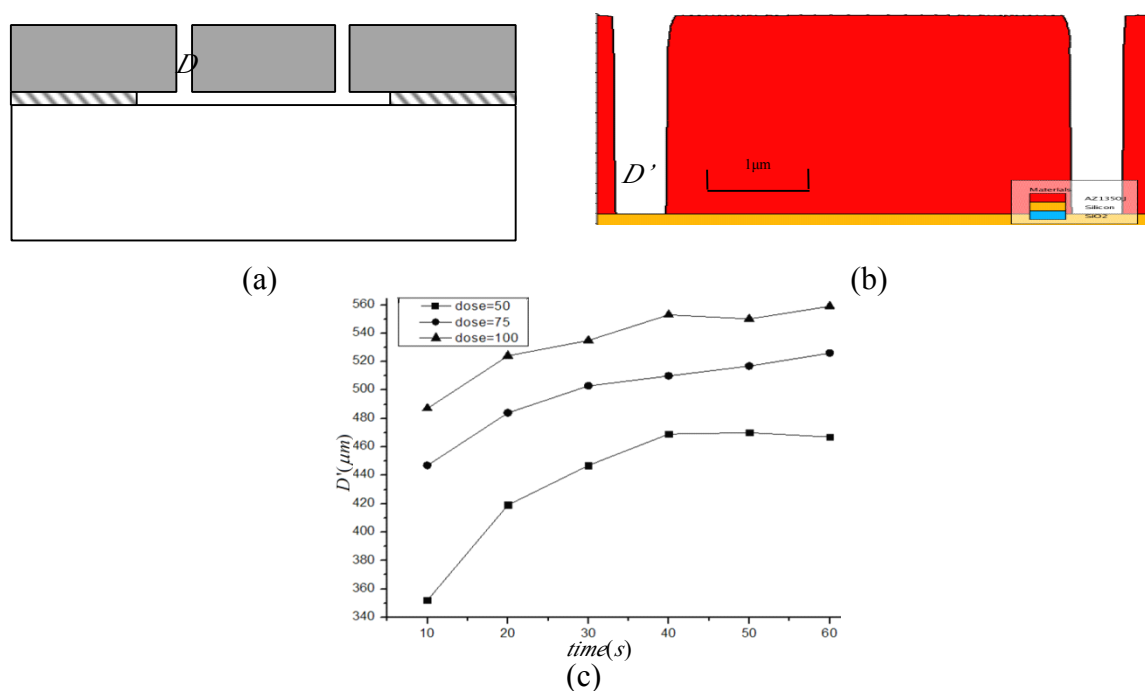


图 4.21 (a)5 号线的剖面图, (b) 曝光剂量  $75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 、显影时间 30s 情况下的模拟结果, (c) 曝光剂量和显影时间对 350nm 谐振器显影区域  $D$  的影响

从图 4.19~21 综合得出当曝光剂量为  $75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ，显影时间为 30s 的情况下，各条线对应的显影区域都比较符合版图中的尺寸。

## (2) 500nm 特征尺寸谐振器的光刻

与  $1\mu\text{m}$  特征尺寸谐振器光刻采用的方法一样，对于 500nm 特征尺寸谐振器， $L=1\mu\text{m}$ ,  $g=200\text{nm}$ ,  $d=500\text{nm}$ ,  $D=250\text{nm}$ ，得到 2、4、5 号线的显影区域宽度与曝光剂量、显影时间的关系如图 4.22 所示。图中  $L=0$  和  $D=0$  表示对应的区域光刻胶不能完全刻蚀。

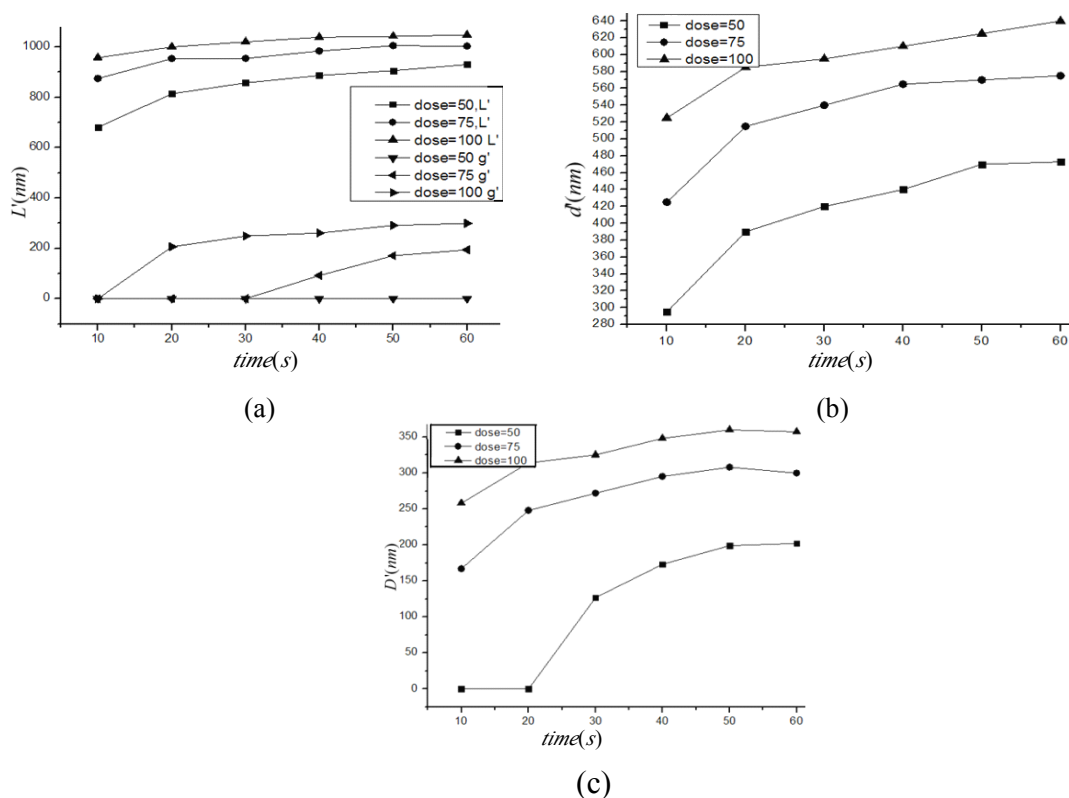


图 4.22 500nm 特征尺寸谐振器版图中 2(a)、4(b)、5(c)号线处显影区域宽度对比

从图 4.22 可以看出，当曝光剂量为  $75 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ，显影时间为 20s 时，得到的显影区域宽度和版图最为吻合。

## (3) 350nm 特征尺寸谐振器的光刻

同样地，对特征尺寸为 350nm 的谐振器分析显影区域宽度与版图中对应宽度，得到如图 4.23 所示的对比，这里  $L=700\text{nm}$ ,  $g=200\text{nm}$ ,  $d=350\text{nm}$ ,  $D=200\text{nm}$ 。



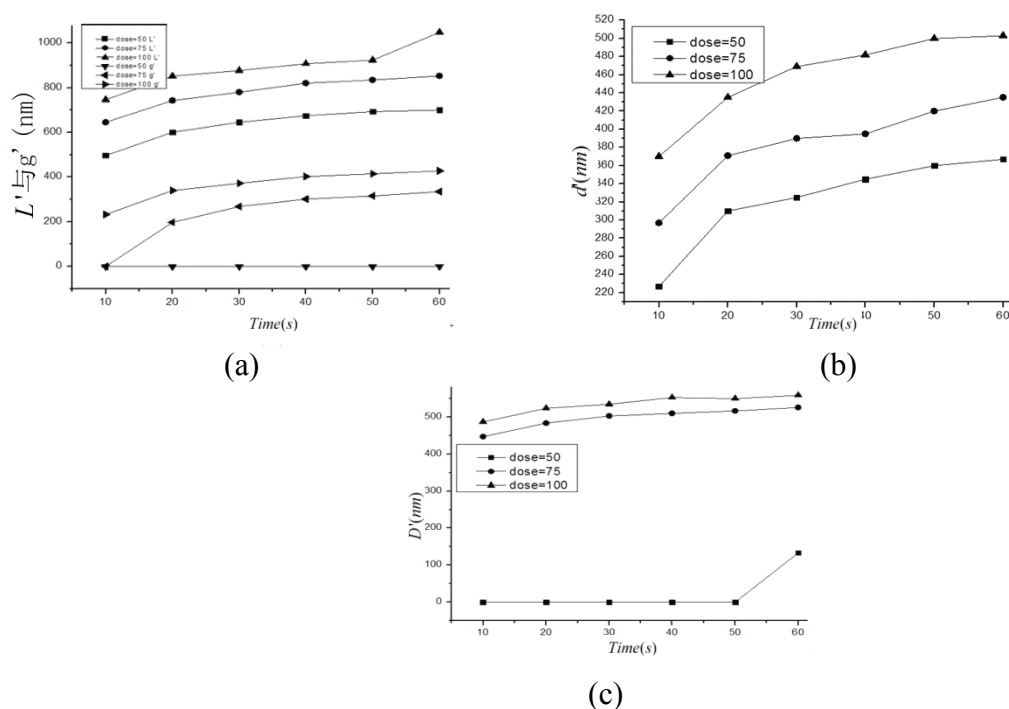
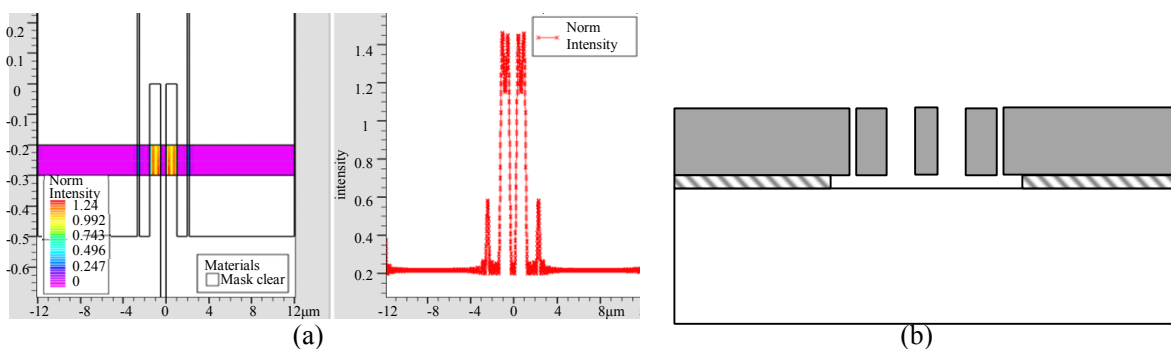


图 4.23 350nm 特征尺寸谐振器版图中 2(a)、4(b)、5(c)号线处显影区域宽度对比

由于悬臂梁与电极间的距离较小，因此在形成掩膜时悬臂梁与电极间间隙处光的透射率较低，如图 4.24 所示为 2 号线成像区域的光强透射率的分布情况，在谐振器质量块与锚间有长度为  $L$  的空隙，而质量块与电极间的间隙仅为  $g$ ，可以看出，光在悬臂梁与电极间间隙处的透射率仅为 0.4 左右，这样会导致曝光时该区域光刻胶吸收的光少，则在显影时会出现该区域内大部分光刻胶都不能被显影掉。



4.24 2 号线成像区域光强分布及截面图

为使悬臂梁与电极间间隙被充分显影，增加曝光剂量及显影时间，但这又导致质量块与锚间的空隙区域过显影而使锚的宽度减小，这一点在图 4.22 中已经得到了证明。为了解决这个问题，可以采用多次曝光的办法，即选用较小的曝光剂量进行多次

曝光。图 4.25 中分别为单次曝光剂量  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  显影时间 20s、单次曝光剂量  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  显影时间 40s、两次曝光剂量均为  $40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  显影时间 20s、三次曝光剂量均为  $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  显影时间 20s 的情况下在显影后得到的光刻胶的显影情况。

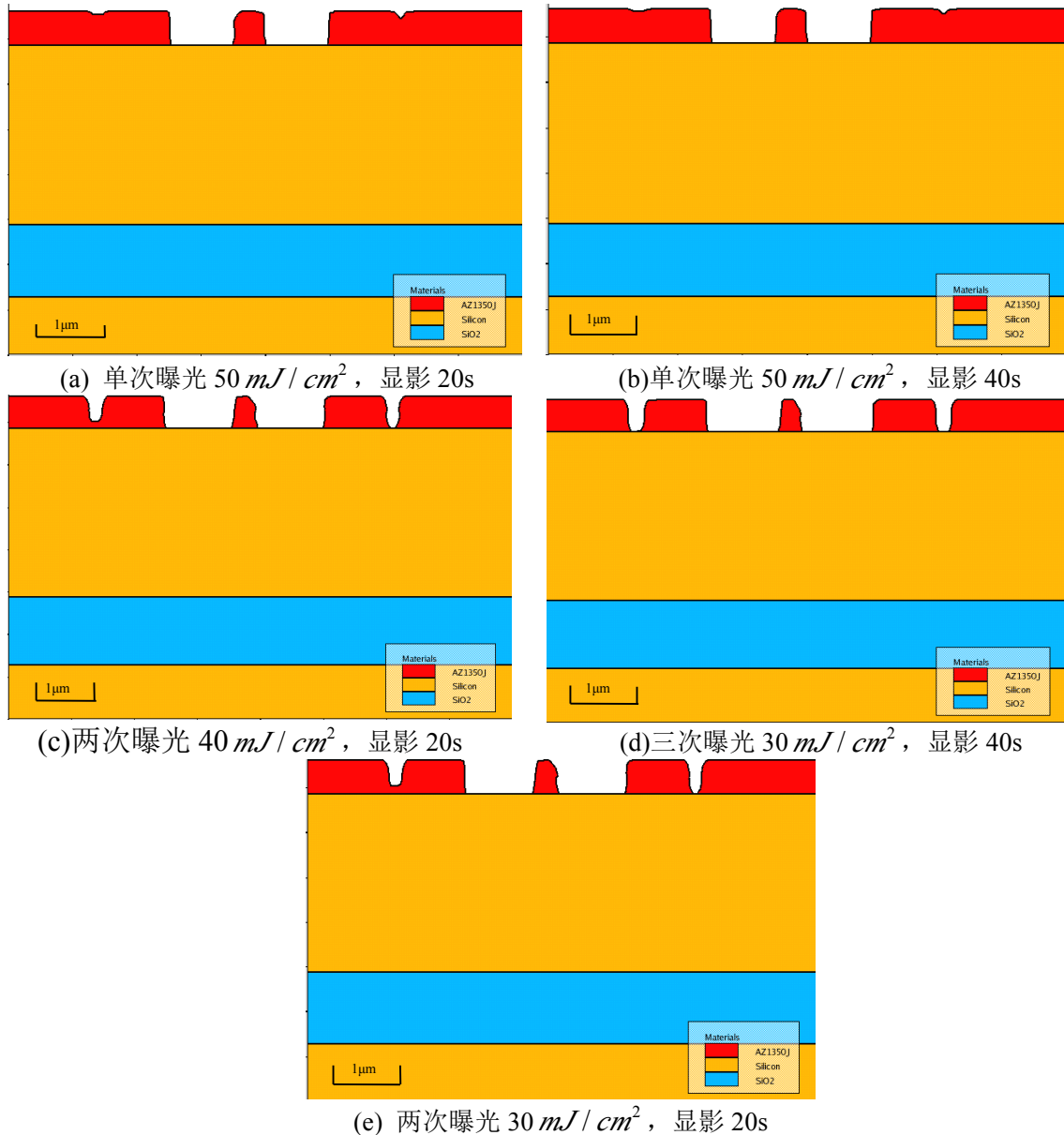


图 4.25 曝光区域较窄时多次曝光与单次曝光对光刻的影响

对比(a)和(b)可看出，即使增加显影时间，单次曝光剂量为  $50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$  情况下不能将对应谐振器与电极间间隙区域的光刻胶完全显影。从(c)和(d)看出进行多次小剂量曝光后进行同样时间(20s)的显影，可以将悬臂梁与电极间很窄的间隙的光刻胶显影掉，而没有影响质量块与锚间光刻胶的显影情况。因此，对于较窄或面积较小的成像

区域，可以采用多次小剂量曝光的方法使光刻胶充分反应且使光强分布在整个硅片上更均匀，小剂量曝光对尺寸较大的区域的影响较小。

## 4.3.2 刻蚀工艺优化

压阻式硅 MEMS 谐振器的刻蚀关键在于要刻蚀出垂直且光滑的侧壁以保证电极提供稳定的静电力驱动。在进行反应离子刻蚀的模拟时，主要的控制参数有刻蚀材料、刻蚀速率和各向同性参数等，其中对侧壁形状影响最大的参数为各向同性参数，图 4.29 为 isotropic 分别为 0 和 1 时侧壁的形状，可看出当 isotropic=1 时，反应离子刻蚀会刻蚀掉掩膜下的结构，且侧壁平整度不如 isotropic=0 的情况。因此，在进行反应离子刻蚀时，需使其保持良好的各向异性。

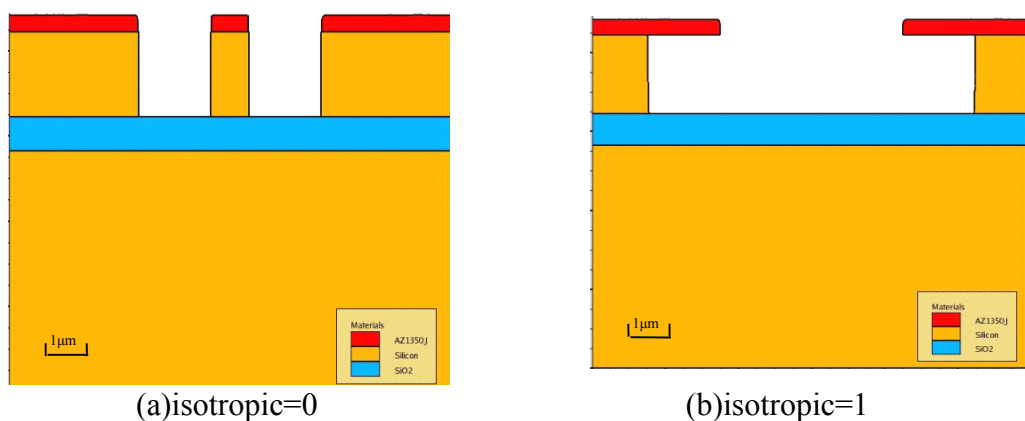


图 4.26 各向同性参数对刻蚀形状的影响

## 4.4 本章小结

在本章中对压阻式硅 MEMS 谐振器的制备工艺进行模拟，详细分析了工艺制备过程中两个关键步骤：光刻和反应离子刻蚀。分析了曝光剂量和显影时间对光刻胶溶解情况的影响，针对光刻过程中出现的谐振器与电极间光强不足导致无法将该区域光刻胶完全溶解的问题，提出了小剂量多次曝光的解决办法。分析了反应离子刻蚀过程中各项同性参数对谐振结构侧壁形状的影响。

## 5 总结

本文利用 COMSOL Multiphysics 对不同结构的压阻式硅 MEMS 谐振器的谐振特性进行了特征频率分析和频率响应分析，分析了尺寸对特征频率、输出电压和品质因数的影响。利用工艺仿真软件 Silvaco 对  $5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $500\text{nm}$ 、 $350\text{nm}$  和  $180\text{nm}$  等工艺尺度下的谐振器进行了工艺仿真，分析了光刻和反应离子刻蚀过程中出现的问题，探讨了相应的解决方法，从而优化工艺。

论文主要结论如下：

- ①等比例缩小谐振器可提高谐振频率。
- ②相同特征尺寸的圆形狗骨形结构与狗骨形结构相比，在谐振频率和品质因数方面均得到了优化。
- ③平衡结构与对应的非平衡结构相比，虽然谐振频率减小了 2%~8%，但是品质因数提高了 15~38 倍，优化了谐振性能。
- ④特征尺寸从  $5\mu\text{m}$  缩小到  $50\text{nm}$  过程中，谐振频率逐渐升高，品质因数呈逐渐减小的趋势。
- ⑤在掩膜版图形密集和图形特征尺寸较小的区域内易产生光强不足的问题。小剂量多次曝光可使光刻时光强分布均匀，也避免了由于高曝光剂量引起的过显影问题。

## 致 谢

本论文是在导师周文利教授的指导下完成的。从选题到完成每一步都离不开老师的帮助，老师在工作上认真负责的态度以及在学术上敏锐的洞察力给我留下了深刻的印象，并将在我以后的工作、生活产生深远的影响。老师对实验室每位同学在学习、生活上的关心让我们都对老师心存感激，除了在学习上指导我们，老师还在待人处事、做事方法等方面教会我们很多。在老师身边的日子虽然不算长，但老师渊博的知识、果断的决策等都将使我终身受益。在此，我向恩师表示由衷的感谢和诚挚的敬意！

感谢华中科技大学电子科学与技术系于军教授、徐静平教授、王耘波副教授及高俊雄讲师在学习和生活上的指导和帮助。感谢电子科学与技术系主任邹雪城教授、副主任江建军教授、杨晓非教授和袁建春书记、张丽娜书记及电子系其他领导和老师在学习和生活各方面的关心与帮助。尤其要感谢电子系刘芳辅导员像姐姐一样对我生活上无微不至的关心和帮助。

感谢中仿科技有限公司彭露经理、鲍伟工程师、单博士等专业人员在我初次接触 COMSOL Multiphysics 时对我的指导和帮助，在他们的帮助下，我才能很快解决仿真过程中出现的种种问题。感谢万德成国际有限公司朱磊工程师在我使用 SILVACO 过程中对我的指导。

感谢电子系微电子所的杨刚实验员、赵文皓硕士生、潘望硕士生、段彬彬硕士生等其他同学对我的关心和帮助。感谢已经毕业的万三平师兄、郑宇师兄、吴倩师姐及徐川师兄对我的指导和帮助。感谢高泽时本科生在工艺仿真方面对我的帮助。

感谢我的舍友郭捷同学、李小双同学、陈芳同学，有她们的陪伴我的生活充满了乐趣和欢笑。感谢我的亲戚朋友们给我的鼓励和帮助，感谢所有帮助过我的人。

最后我要特别感谢全力支持我的父母和我的哥哥姐姐们，他们的恩情我会永远铭记在心。

## 参考文献

- [1] 田文超. 微机电系统(MEMS)原理、设计和分析. 西安: 西安电子科技大学出版社 2009.6-8
- [2] 刘珍. 热激励微机械谐振器闭环自激/检测电路研制: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学图书馆, 2011
- [3] Alastalo A. T., Kaajakari V.. Intermodulation in capacitively coupled microelectromechanical filters. Electron device letters, 2005, 26(5): 289~291
- [4] Bontemps J. J. M, Murroni A., van Beek J. T. M., et al. 56 MHZ piezoresistive micromechanical oscillator. in: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009: 1433-1436
- [5] <http://www.sitime.com/products/oscillators>
- [6] 沈雪瑾. 不同型式支撑的静电硅微谐振器的性能比较. 机械设计与研究, 2009, 25(3): 40~43,45
- [7] Bau M., Ferrari V., Marioli D.. Time-Gated Technique for Contactless Electromagnetic Interrogation of MEMS Resonators. Sensors, 2010 IEEE 2010: 1759-1764
- [8] Zuo C., Vander J., Spiegel J., et al. 1.05 GHz MEMS Oscillator Based On Lateral-Field-Excited Piezoelectric AlN Resonators. in: Frequency Control Symposium, Joint with the 22<sup>nd</sup> European Frequency and Time forum, IEEE International. 2009: 381-384
- [9] Hajjam A., Logan A., Pandiyan J., et al. High Frequency Thermal-Piezoresistive MEMS Resonators for Detection of Organic Gases. in: frequency and Time Forum, 2011 Joint Conference of the IEEE International, 2011: 1~5
- [10] Lammerink T. S. J., Elwenspoek M., Fluitman J. H. J.. Optical excitation of micro-mechanical resonators. Micro Electro Mechanical Systems, 1991: 160~165
- [11] 王洪喜. 微结构的静电驱动特性研究: [博士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学图书馆, 2006
- [12] Yun H. J., Llamas G. I., Jung M. K.. Novel frequency agile electromagnetic decoupling MEMS device. in: Solid-State Sensors, Actuators and Microsystem Conference, 2011:

2794~2797

- [13] Matilla T., Kiihamaki J., Lamminmaki T., et al. A 12 MHz micromechanical bulk acoustic mode oscillator. *Sensor and Actuators A*, 2002:1~9
- [14] 胡长德, 赵美蓉, 刘颖伟等. 压电微悬臂梁共振频率的检测系统. *压电与声光*, 2009, 31(6): 935~938
- [15] Bendida S., Koning J. J., Bontemps J. T. M., et al. Temperature stability of a piezoresistive MEMS resonator including self-heating. *Microelectronics Reliability*, 2008: 1227~1231
- [16] 赵全斌, 焦继伟, 杨恒等. 基于压阻检测的双端固支硅纳米梁谐振特性研究. *传感技术学报*, 2006, 19(5): 1705-1708
- [17] Kuo Y. L., Jung T. H., Hou J. H., et al. CMOS-MEMS piezoresistive force sensor with scanning signal process circuit for vertical probe card. *Sensors and Actuators*, 2010: 22~28
- [18] 金仲和, 王跃林, 徐义刚等. 静电驱动硅一体化微机械谐振器. *电子学报*, 1995, 23(28): 20~22
- [19] Wan T. H., Minfan P., The New Heart Beat of Electronics-Silicon MEMS Oscillators. in: *Electronic Components and Technology Conference*, 2007: 1895~1899
- [20] Wan T. H., Discera Inc.. Reliability of Silicon Resonator Oscillators. in: *International Frequency Control Symposium and Exposition*, IEEE. 2006: 389-392
- [21] Van Beek J. T. M., Phan K. L., Verheijden G. J. A. M., et al. A piezo-resistive resonator MEMS amplifier. in: *Electron Devices Meeting*, 2008: 1~7, 15~17
- [22] Van Beek J. T. M., Steeneken P. G., Giesbers B.. A 10 MHz piezoresistive MEMS resonator with high Q. in: *International Frequency Control Symposium and Exposition*, 2006: 475-480
- [23] Van Beek J. T. M., Verheijden G. J. A., Koops G. E. J., et al. Scalable 1.1 GHz fundamental mode piezo-resistive silicon MEMS resonators. in: *Electron Devices Meeting*, 2007: 411-414
- [24] Jing L., Zongliang C., Aslam D. M., et al. Diamond micro and nano resonators using laser, capacitive or piezoresistive detection. in: *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, 3<sup>rd</sup> IEEE International Conference, 2008: 873-876

- [25] Rahafrouz A., Pourkamali S.. High-frequency thermally actuated electromechanical resonators with piezoresistive readout. *Electron Devices*, 2011, 58(4): 1205-1214
- [26] Phan K. L., Van Beek J. T. M., Koops G. E. J.. Piezoresistive Ring-Shaped MEMS Resonator. in: *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2009: 1413-1416
- [27] 孟光, 张文明. 微机电系统动力学. 北京: 科学出版社, 2008.175-184
- [28] 刘恩科, 朱秉升, 罗晋生. 半导体物理学. 西安: 西安交通大学出版社, 2006(6).332-337
- [29] 尤彩红. 硅压阻微压传感器的设计: [硕士学位论文]. 太原: 中北大学图书馆, 2009
- [30] Charles S.. Piezoresistance effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, 1954, 94(5): 42~49
- [31] Kanda Y.. A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon. *Electron Devices, IEEE Transactions*, 1982: 64-70
- [32] Lenci S., Nannini A., Pieri F.. A model for piezoresistance in torsional MEMS springs. *Research in Microelectronics and Electronics*, 2008: 73-76
- [33] 朱龙洋. MEMS 谐振器件的品质因数研究: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学图书馆, 2006
- [34] Paul K. C, Takemura T., Hiramoto T., et al. Theoretical and experimental investigation of an hid lamp. in: *Plasma Science, ICOPS* , 2006: 129,4-8
- [35] Bongsang K., Hopcroft M. A., Candler R. N., et al. Temperature dependence of quality factor in MEMS resonators. *Microelectromechanical Systems*, 2008:755-766
- [36] 张玉宝, 李强. 基于 COMSOL Multiphysics 的 MEMS 建模及应用. 北京: 冶金工业出版社. 2007: 1~7
- [37] 古城中, 吴新跃. 有限元网格划分及发展趋势. *计算机科学与探索*, 2008, 2(3): 248-259
- [38] 曲利岩, 吴建华, 陈永校等. 有限元网络的自动生成及快速实现. *电机与控制学报*, 2002, 6(1): 34-38
- [39] 杜平安. 有限元网格划分的基本原则. *机械设计与制造*, 2000:34-36



- [40] 阮刚. 集成电路工艺和器件的计算机模拟-IC TCAD 技术概论. 上海: 复旦大学出版社. 2007
- [41] 滕浙乾. SOI/CMOS 器件建模研究与模型参数提取:[硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学图书馆, 2010
- [42] 夏庆峰. EPi-SOI 硅片制备及表征:[硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学图书馆, 2007
- [43] Reiss S., Heinig K. H.. Computer simulation of mechanisms of the SIMOX process, Nuclear Instruments and Methods in physics Research B, 1995: 102-256
- [44] Gupta T. K.. Correlation of the chemical and electrical properties of AZ1350J photoresist solution. Journal of Applied Physics, 1984, 65(4): 1145~1148
- [45] 来五星, 廖广兰, 史铁林等. 反应离子刻蚀加工工艺技术的研究. 半导体技术, 2006, 31(6): 414~417