

基于MEMS的微机械射频开关的研究和设计

研究生 陈广文

指导老师 胡国清 教授

MEMS开关在结构上类似微型继电器,但具有速度快的优点。微机械开关没有使用PN结或金属结,消除了半导体开关PN结非线性问题和因扩散电阻等带来的高插入损耗问题,与传统的电子开关相比,具有隔离度电压高,可以实现开关回路与驱动回路完全隔离等优点。在自动测试、控制系统、通信系统的信号通路等领域有着广泛应用潜力,同时,MEMS开关是微机械技术中的一类有代表性的结构,是很多微机械器件的基础。

常见的开关结构有悬臂梁、空气桥和扭转摆三种,目前均采用静电驱动方式。前两种结构又分为串联(较低频率)和旁路(高频)两种形式。串联式悬臂梁开关类似于FET。有静电电压作用在梁和底面电极时,梁发生偏转,在源极和漏极之间实现导通,常用于自控和通信系统的信号通路空气桥旁路开关主要用于微波段信号的通路。

本文对悬臂梁式的微开关结构进行了设计、分析和讨论,计算了悬臂梁在电场力作用下的变形和受力特性,给出了一种悬臂梁式机构微开关的微机械工艺,并对驱动微开关的高压升压电路进行了分析和设计。全文共分四章:

第一章 系统综述。叙述了MEMS系统及其发展,介绍了常见微开关的几种结构,提出了课题的内容和主要任务。

第二章 详细计算了等截面悬臂梁微开关和变截面悬臂梁微开关的悬臂梁在电场力作用下的变形、触点间接触压力、梁上内应力的分布以及两种悬臂梁的无阻尼横向自由振动频率。对两种结构的特点进行了比较。

第三章 给出了等截面悬臂梁微开关的微机械加工工艺,设计了掩膜版及具体的工艺参数。

第四章 设计出了微开关驱动电压的升压电路,对倍压整流电路的输入特性和负载特性进行了分析,设计了实际电路图。此外还对可实现集成化的开关电容升压电路的原理和稳态特性进行了分析。

第五章 结束语。对整个论文进行了总结。

关键词: MEMS、微开关、悬臂梁、变形、接触、工艺、掩膜、倍压整流、开关电容、升压

Analysis and design of micro-switch based on MEMS

Applicant: Chen guangwen

Supervisor: Dr.Prof. Hu guoqing

MEMS switches based on metal-metal contact are useful in a variety of power management information processing and communication systems because their on resistance is lower than that of semiconductor switches and their off resistance and transmission frequency are higher than that of semiconductor switches.

Typically, there are three kinds of different structure of micro-switch: cantilever beam, fixed-fixed beam (air bridge) and torsion beam, all of these are actuated by electrostatic force.

The former two structures still have two different mode: series mode and bypass mode. usually series mode is used in low frequency circuit while bypass mode is used in high frequency circuit, series mode micro-switch with cantilever structure is similar to an FET, When voltage is applied on gate, The FET will be turned on between source and drain.

This paper gives an analysis of a kind of micro-switch with cantilever structure; Analyzes and calculates the deflection of cantilever in detail; Presents the fabrication process of micro-switch with cantilever beam. The performance of this thesis is as following:

Chapter one: Overviewed the MEMS technology and micro-switch. Analyzed different structure of micro-switch and Presented the main task of this thesis.

Chapter two: Analyzed deformation and calculates the deflection, internal forces, and touch force of uniform cantilever beam and non-uniform cantilever. And also calculated the basal frequency of this two kinds of cantilever beam. Analyzed the characters of this two micro-switch with different structure at the end.

Chapter three: Presents the fabrication process of micro-switch with cantilever beam and designed the masks.

Chapter four: Designed circuit to actuate the micro-switch, Analyzed the dynamic

and static property of voltage doubler circuit. In the end, This chapter also described and analyzed the features of switched-capacitor DC-DC converter.

Chapter five: Conclusion of this thesis.

Keywords: MEMS, micro-switch, cantilever beam, deformation, fabrication process, voltage doubler circuit, switched-capacitor DC-DC converter.

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第一章 MEMS 系统及微机械开关简介

1.1、概述：

微机电系统 (Micro Electro-Mechanical Systems , MEMS) 是指可批量制作的, 集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路、直至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。MEMS 是随着半导体集成电路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。

MEMS 的特点是：

- 1) 微型化：MEMS 器件体积小、重量轻、耗能低、惯性小、谐振频率高、响应时间短。
- 2) 以硅为主要材料，机械电器性能优良：硅的强度、硬度和杨氏模量与铁相当，密度类似铝，热传导率接近钼和钨。
- 3) 批量生产：用硅微加工工艺在一片硅片上可同时制造成百上千个微型机电装置或完整的 MEMS。批量生产可大大降低生产成本。
- 4) 集成化：可以把不同功能、不同敏感方向或致动方向的多个传感器或执行器集成于一体，或形成微传感器阵列、微执行器阵列，甚至把多种功能的器件集成在一起，形成复杂的微系统。微传感器、微执行器和微电子器件的集成可制造出可靠性、稳定性很高的 MEMS。
- 5) 多学科交叉：MEMS 涉及电子、机械、材料、制造、信息与自动控制、物理、化学和生物等多种学科，并集约了当今科学技术发展的许多尖端成果。

MEMS 发展的目标在于，通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统，开辟一个新技术领域和产业。MEMS 可以完成大尺寸机电系统所不能完成的任务，也可嵌入大尺寸系统中，把自动化、智能化和可靠性水平提高到一个新的水平。二十一世纪 MEMS 将逐步从实验室走向实用化，对工农业、信息、环境、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学发展产生重大影响。

1.2 基础性研究

当尺寸缩小到一定范围时，许多物理现象将与宏观世界有很大差别，一些常规理论将作修正。目前，MEMS 的研究主要还是依赖经验和反复试探，完整的微观尺度下的理论体系尚未健全，这已经严重地阻碍了 MEMS 技术的进一步发展。因此，微观尺度下的基础性理论研究显得尤为重要。

1、尺度效应和表面效应

尺度效应研究已有较长的时间。力的尺度效应和表面效应说明，在宏观领域作用微小的力和现象，在微观领域可能起着重要的作用。在微小尺寸领域，与特征尺寸 L 的高次方成比例的惯性力、电磁力 (L^3) 等的作用相对减小，而与尺寸的低次方成比例的粘性力、弹性力 (L^2)，表面张力 (L^1)、静电力 (L^0) 等的作用相对增大；随着尺寸的减小，表面积 (L^2) 与体积 (L^3) 之比相对增大，表面力学、表面物理效应将起主导作用。尺度效应的研究将有助于 MEMS 的创新。

2、微流体力学

微流体现象与宏观规律有相当的差别，有的规律需要进行较大的补充和修正。微小装置中流体驱动机制可用表面张力和粘性力，其阻力特性也有所不同、微小装置中流体的相变点（饱和压力和温度）不再是常数，而随尺度减小而降低；微细管道固液界面的微观物理化学特性所产生的化学效应，如电泳、电渗，对微流体的力学行为有重要影响。

3、力学和热力学基础

微观领域中的力学和热力学问题的基础研究可分为两大类，一当物体尺度缩小至与粒子运行的平均自由程同一量级时，则介质连续性等宏观假定不再成立；另一类，虽然连续介质等宏观假定仍然成立，但由于物体尺度的微小化，各种作用力的相对重要性产生了逆转，从而导致了宏观规律的变化。

在微型光机电系统研究中主要需考虑的是第二类情况，其具体特点有：材料的失效模式，不仅与材料的本征关系有关，而且与材料的微结构有关；很大，从而传热效率很高；界面、表面特征更加显著。

须发展介于宏观与微观之间的研究方法，例如宏微观力学、宏微观热力学等。此外还应注意电磁、机械、力学和热学相结合的交叉学科研究方法。

4.微机械特性和微摩擦学

微结构材料机构特性中的弹性模量、波松比、疲劳极限、强度，以及内应力和内部缺陷的研究和数据库的建立引起了人们的重视，有些力学量需要重新作出科学的表述。微观摩擦学包括纳米摩擦行为及其控制研究、薄膜润滑与超滑技术研究、微观表面形貌与表面力学、表面物理效应研究、微磨损和微观表面改性研究。

1.3 MEMS 典型器件及系统：

1、微型传感器

微型传感器是 MEMS 的一个重要组成部分。1962 年第一个硅微型威力传感器问世，开创了 MEMS 的先河。现在已经形成产品和正在研究中的微型传感器有：压力、力、力矩、加速度、速度、位置、流量、电量、磁场、温度、气体成分、湿度、pH 值、离子浓度和生物浓度、微陀螺、触觉传感器等等。微型传感器正朝着集成化和智能化的方向发展。

国外某公司大批量生产的硅微加速度计。中间是传感的机械部分，四周为包括电信号源、放大器、信号处理和自校正电路等的集成电路，集成在 $3\text{mm}\times 3\text{mm}$ 的芯片上，采用硅平面微细加工工艺制作，一块直径 10 厘米的硅片上可做出几百只微加速度计。已大量用于汽车的防碰撞气囊，每支只需几美元。有人预计微型传感器即将占邻 40% 的传感器的市场。

2、微型执行器

微型电机是一种典型的微型执行器，可分为旋转式和直线式两类，其他的微型执行器还有：微开关、微谐振器、微阀、微泵等。把微型执行器分布成阵列可以收到意想不到的效果，如：可用于物体的搬送、定位，用于飞机的灵巧蒙皮。微型执行器的驱动方式主要有：静电驱动、压电驱动、电磁驱动、形状记忆合金驱动、热双金属驱动、热气驱动等等。

微泵有进出口阀、利用双金属热致动的泵膜和泵腔，在一个 2 英寸硅片上制作了 16 个泵片。微电机由两层多晶硅组成转子、定子和轴承，在外围的定子和中间的转子间加交变电压，静电力拉动转子转动，转子直径只有头发丝粗细。

3、微型光电器件和系统

随着信息技术、光通信技术的发展，宽带的多波段光纤网络将成为信息时代的主流，光通信中光器件的微小型化和大批量生产成为迫切的需求。MEMS 技术与光器件的结合恰好能满足这一要求。由 MEMS 与光器件融合为一体的微型光机电系统 (MOEMS) 将成为 MEMS 领域中一个重要研究方向。

美国 Texas Instruments 公司研制的用于投影显示装置的数字驱动微阵列芯片 (DMD: Digital Micromirror Device) 样机，一个微镜的尺寸仅 $16\mu\text{m}\times 16\mu\text{m}$ 。反射镜下面的支撑机构中，微镜通过支撑柱和扭转梁悬于基片上，每个微镜下面都有驱动电极，在下电极与微镜间印加一定的电压，静电引力使微镜倾斜，入射光线被反射到镜头上投影到屏幕上，未加电压的微镜处的光线反射到镜头外，高速驱动微镜使每点产生明暗，投影出图像。

4、微型生物化学芯片

微型生物化学芯片是利用微细加工工艺，在一平方厘米的硅片或玻璃等材料上集成样品预处理、微反应器、微分离管道、微检测器等微型生化功能器件、电子器件和微流量器件的微型生物化学分析系统。与传统的分析仪器相比，微型生物化学分析系统除了体积小以外，还具有

分析时间短,样品消耗少,能耗低,效率高等优点。可广泛用于临床、环境临测、工业实时控制。芯片上的生物化学分析系统还使分析的并行处理成为可能,即同时分析数十种甚至上百种的样品,这将大大缩短基因测序过程,因而将成为人类基因组计划中重要的分析手段。

5、微型机器人

随着电子器件的不断缩小,组装时要求的精密度也在不断增加。现在,科学家正在研制微型机器人,能在桌面大小的地方组装象硬盘驱动器之类的精密设备,军队也对这种微型机器人表现了浓厚的兴趣。他们设想制造出大到鞋盒子,小到硬币大小的机器人,它们会爬行,跳跃,到达敌军后方,为不远处的部队或千里之外的总部收集情报。这些机器人是廉价的,可以大量部署,它们可以替代人进入难以进入或危险的地区,进行侦察、排雷和探测生化武器战争。

日本已制作出利用太阳电池的微小机器人,它只有钱币大小。太阳能电池产生的电力驱动马达使机器人向着光亮的地方前进。

6、微型飞行器

微型飞行器(MAV, Micro Air Vehicle)一般是指长、宽、高均小于15cm,重量不超过120克,并能以可接受的成本执行某一有价值的军事任务的飞行器。这种飞行器的设计目标是有16公里的巡航范围,并能以30~60公里/小时的速度连续飞行20~30分钟。美国陆军计划把这种微型飞行器装备到陆军排,它将被广泛地用于战场侦察、通信中继和反恐怖活动。

微型飞行器并不是传统飞机的简单缩小,尺寸的缩小带来了许多新的技术挑战。由于尺寸的缩小和速度的降低,现在常规飞机上使用的翼型设计产生足够的升力。而且,要在一个尺寸如此微小的飞行器上实现如此复杂的功能,靠常规的机电技术是难以实现的。微电子技术和微机电技术的发展,为微型飞行器的实现奠定了基础。例如,利用MEMS技术在机翼上制作微结构阵列,使其具有提供升力,控制飞行的功能,同时还能作为天线或探测器。

7、微型动力系统

微型动力系统以电、热、动能或机械能的输出为目的,以毫米到厘米级尺寸,产生瓦到十瓦级的功率。MIT从1996年开始了微型涡轮发动机的研究,该微型涡轮发动机利用MEMS加工技术制作,主要包括一个空气压缩机、燃烧室、燃料控制系统(包括泵、阀、传感器等)以及电启动马达/发电机。该校已在硅片上制作出涡轮机模型。其目标是1cm直径的发动机产生10~20W的电力或0.05~0.01N的推力,最终达到100W。

MIT正在研究一种微型双级火箭发动机。它由5到6片硅片叠在一起组成。硅片上制作有燃烧室、喷嘴、微泵、微阀及冷却管道。整个发动机约长15mm,宽12mm,厚2.5mm。使用液态氧和乙醇作燃料,预计能产生15N的推力,推力重量比是目前大型火箭的10~100倍。

美国 TRW 公司, 航空航天公司和加州理工学院 (CIT) 组成的研究小组提出了一个“数字推进概念”方案, 在这个方案中, 将有 $10^4 \sim 10^6$ 个微推进器被集成到一块直径为 10cm 的硅片上。并已研制出了 3×5 的微推进器阵列。

1.4 MEMS 的加工技术

MEMS 加工技术主要有从半导体加工工艺中发展起来的硅平面工艺和体硅工艺。八十年代中期以后利用 X 射线光刻、电铸、及注塑的 LIGA (德文 Lithograph Galvanformung und Abformung 简写) 技术诞生, 形成了 MEMS 加工的另一个体系。MEMS 的加工技术可包括硅表面加工和体加工的硅微细加工、LIGA 加工和利用紫外光刻的准 LIGA 加工、微细电火花加工、超声波加工、等离子体加工、激光加工、离子束加工、电子束加工、立体光刻成形等。MEMS 的封装技术也很重要。传统的精密机械加工技术在制造微小型机械方面仍有很大潜力。

1.5 MEMS 系统的发展状况与应用

目前, 国外已制成的 MEMS 微机械结构部件有阀门、弹簧、喷嘴、臂梁、齿轮、连接器、散热器、马达及各种传感器 (如加速度表、陀螺、微型惯性测量组合) 等。硅微压力传感器、微加速度计和微阀等已成为商品, 具有与传统产品竞争的能力。如利用电子隧穿技术制造的微加速度计重 6 克, 灵敏度 $10^{-7}g$, 完全能满足导航的要求; 最近研制出的振动式微陀螺重 100 毫克, 机械器件尺寸为 $1.2 \times 1.2 \times 1.2$ 厘米, 偏置稳定度为 $1 \sim 10$ 度/小时, 功耗不到 1 瓦。

美国和日本的 MEMS 技术处于领先地位, 并已开始获得市场效益。1996 年, MEMS 的市场份额为 120 亿美元, 美国占 60%, 日本占 27.5%, 西欧占 12.5%。预计到 2002 年, MEMS 的市场份额将增长到 340 亿美元, 并将带动 1 万亿美元的相关市场。

鉴于 MEMS 具有广阔的应用前景, 一些国家正加紧争夺 MEMS 的技术优势。日本继续执行为期 10 年、耗资 2.5 亿美元的“微机械计划”, 着重发展 6 个方面的技术: 延伸微纳米技术、微装置技术、器件高度集成技术、场能利用技术、多分布与协同管理技术和智能材料利用技术。美国国防部将 MEMS 技术列为国防部的关键技术。最近又制订了四项微系统计划, 即微系统工程、光学系统工程、灵巧结构和制造技术革新等。瑞士制订了“1996 ~ 1999 年微米/纳米系统计划”, 总经费达 1.2 亿瑞士法郎。从这些国家的发展计划看, 当前用于军事目的 MEMS 的研究热点是开发微陀螺和微惯性测量组合; 航空航天技术领域对 MEMS 的需求日益突出, 将成为 MEMS 技术发展的重要推动力。

目前, MEMS 在航空器、航天器、弹药、医疗器械、汽车和电子/信息设备等方面已有或将

有广泛应用，其应用方式主要有三大类：取代现有分系统、在设备上嵌入 MEMS 和利用 MEMS 技术发展新型系统。

1、利用 MEMS 取代现有分系统 有助于缩小体积，减轻重量，提高性能。比如： 惯性导航装置。把 MEMS 陀螺和加速度计等集成在一块芯片上，构成一个小巧、功耗低、价格便宜的惯性导航装置，可取代传统的惯性导航装置，用于弹药制导和武器系统/人员导航。现已制造出尺寸为 2.0×2.0×0.5 厘米的微惯性测量组合装置，重 5 克，功率小于 1 瓦。 汽车防撞气囊。 高分辨率喷墨打印机喷嘴。用 LIGA 工艺制造的喷墨打印机喷嘴，打印分辨率为每英寸 2400 点，是当今喷墨打印机的 4 倍。

2、在设备上嵌入 MEMS 可显著提高系统的性能。如： 改进弹药点火、安全、保险。美军正在采用微机电系统改进点火/安全/解除保险装置，利用这种装置可使弹药的可靠性、性能及服役时间提高 5~10 倍。 实现预测维修。利用嵌入设备中的 MEMS 器件可监测设备的温度、压力、流率、振动、表面磨损、流体污染和加速度等，在系统或部件损伤前适时作出预报，因此可做到预测维修，而不是定期或在部件损伤后维修。预测维修能力使武器系统的操作更安全、更有效，可节省大量维修费用和维修时间。 节省汽车燃油。将微压力传感器埋置在汽车轮胎中可保证轮胎充气适当，不会出现充气过量或不足的情况，可节省 10% 的汽油。

3、发展新型系统 是 MEMS 技术最有吸引力的应用，有可能引起一些革命性的变化，如：
新概念航空航天器。由 MEMS 构成航空航天器的“智能蒙皮”，可获得的附加的空气动力学性能，将导致飞机设计的根本变化，突破沿用 20 世纪的“带翼圆柱体”的气动布局。美国还在研究由纽扣大小的电动机推进的“掌上型飞机”，用于军事侦察。由 MEMS 组成的专用集成微型仪器有可能进一步发展成独特的空间系统结构，如“纳米卫星”就是一种几乎全部由专用集成微型仪器构成的微卫星。 分布式 MEMS 传感器网络。这种传感器能接收远处指挥员的指令，无人值守的 MEMS 传感器散布在战场的广阔地域，可形成分布式 MEMS 传感器网络，用于跟踪监视敌方的目标，对敌（特别是坦克和步兵）构成威胁。美国密西根大学研制的环境监测仪器只有手表大小，包括 25 个装配单元、测试单元和一个 GPS 接收机，可用于测量气压、温度、湿度及加速度，已在炮兵测量、火炮控制中心和海军联合演习中做过试验。 微型光学平台。微机械光学是利用 MEMS 技术制作光学元件及器件，现已研制出数字微显示器、微光扫描仪、微光阀、微光开关及光编码器等。微机械光学的发展有可能将微光学元件、微调整器、光源、探测器及处理电路集成在一块芯片上，实现光学平台微型化，用于敌我识别系统、显示装置和光纤开关。 海量数据存储系统。在硅基片上制造的原子分辨率数据存储系统与信号处理电路集成，将显著降低存储系统的尺寸、重量、功耗、存取等待时间、失效率和成本。先进的隧穿基单写多读（WORM）器件的

存储密度比目前的只读存储光盘 (CD-ROM) 高 10 万倍。

1.6 利用 MEMS 技术制作微机械开关

1.6.1 简介：

基于金属 - 金属接触的电磁机械式继电器 (开关), 与晶体管开关相比, 具有接触电阻小、隔离度高, 能通过高频信号等优点, 已经被广泛用于电源管理、信号处理以及通讯系统等领域。在要求接触电阻小于一欧、高的隔离度以及大的通过电流等场合, 电磁式继电器仍有着不可替代的优势。

利用发光二极管和开关晶体管的固态继电器 (SSR), 由于其可靠性和小型化, 在一定场合可替代传统的继电器。典型的商用 SSR 在隔离度方面已经可达到 1500V, 与传统的继电器相当, 但在接触电阻与电流通过能力方面仍比不过传统的电磁式继电器。因此在一些特殊需求的场合, 需要一种介于继电器与 SSR 的产品, 既要体积小要有接触电阻小, 利用 MEMS 技术制作的微机械开关应运而生。

最早形式的 MEMS 开关是 Pterson 于 1979 年研制的 0.35 μm 厚、金属包覆的静电式微机械开关。此后, 由于工艺的限制没有取得进展。直到 90 年代, MEMS 开关才获得巨大发展。1995 年出现了采用表面微机械加工技术制作的悬臂梁开关, 1996 年研制出了低阈值电压的膜式 MEMS 开关。

现今研究的微开关主要针对移动通信产业的发展对器件提出了更高的要求, MEMS 开关主要用于微波信号变换中, 和传统的二极管开关和 FET 开关相比, 具有更优越的高频特性。

1.6.2 微开关的驱动方式：

1、电磁驱动

传统的机械式电磁继电器采用电磁力驱动, 由于电磁力的大小与距离存在非线性, 当接近接触时, 电磁力呈指数增加, 最终实现稳定的接触, 因此非常适合用于驱动开关。同时由于电磁力的产生和磁场的建立之间不存在延迟, 因此这种驱动方式能提供较快的开关时间。然而, 在 MEMS 领域, 由于器件尺寸和材料的特殊性, 很难在硅片上制作足够圈数的三维线圈, 虽然可以加大驱动电流弥补, 但仍存在工艺复杂、制作成本高等缺点, 因此电磁式驱动在微开关领域并未广泛采用。

2、静电力驱动

静电力驱动是 MEMS 器件中最简单、最常用的驱动方式，在结构上采用两块分开一定距离的极板，当施加电压时，极板在电场力的作用下发生变形，实现开关的闭合。

电场力的大小是场强的平方的函数 ($F = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 A$)，驱动电压的大小与极板间的

间距成线性关系。静电驱动存在的主要困难是开关间距与驱动电压之间的矛盾，考虑到耐压和隔离度，极板的间距不能太小，但此时驱动电压又太高。

为了克服这一缺点，出现了变截面悬臂梁、应力预变形悬臂梁等多种结构，一定程度上解决了驱动电压高的问题。同时，由于结构尺寸的限制，电场力驱动的微开关的负载电流都很小，但在小电流应用场合，电场力驱动仍是最广泛采用的驱动方式。

3、电 - 热驱动

电 - 热驱动采用两种热膨胀系数不同的材料，通过通电发热产生变形实现开关的闭合。在 MEMS 领域，热驱动元件的体积都很小，热容量很小，因此能实现开关的快速动作。

1.6.3 微机械开关的结构类型：

常见的开关结构有悬臂梁、空气桥和扭转摆三种，目前均采用静电驱动方式。前两种结构又分为串联（较低频率）和旁路（高频）两种形式。

图 2 - 1 示出一种串联式悬臂梁开关结构。它类似于 FET。有静电电压作用在梁和底面电极时，梁发生偏转，在源极和漏极之间建立一个信号通路。

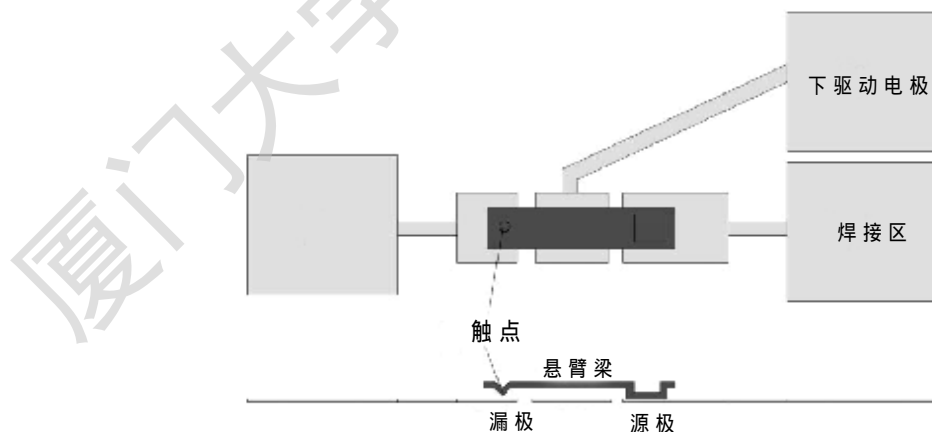


图 2 - 1 串联式悬臂梁开关的原理图

开关的绝缘衬底采用覆盖有 $1 \mu \text{M SiO}_2$ 的硅或玻璃。电极由溅射的 Au（下面有 20nm 的 Cr 以增加黏附性）构成。牺牲层材料为 Cu 或 Al。牺牲层作两次图形，通过腐蚀分别形成触点的凹

坑和铆接区。结构层由 Ni 电镀而成。

这种开关的平均寿命为 3×10^6 次循环。通过的电流越大，寿命越短。另外，当开关工作在氮气中时，寿命提高到 5×10^6 次，此后，开关的接触电阻大大增加（达到 100 Ω ）。

图 2-2 为空气桥旁路开关结构。金属薄膜形成双端固定的梁，与下方的共面波导线的距离为 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 。上下极板由电镀或蒸发的铝或金构成。对于毫米波来说，上下电极之间只要有足够的电容量即可实现导通，而不需要电极之间的接触。极板间的一个很大的变化就可以实现开关动作。因此，该开关在下电极板上留有 100nm 氮化硅以防止极板吸合时的粘附。

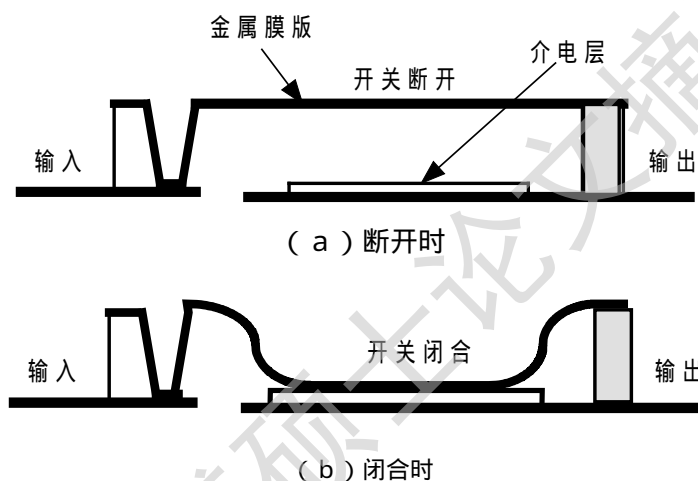


图 2-1 空气桥式微开关

这种开关也可以有串联和旁路两种形式。旁路开关在导通状态（电容很小）时的插入损耗为 0.1dB（10GHz），60Hz 时增大到 0.6dB。关断状态（电容很大，信号耦合到地）时，隔离度为 -20 ~ -25dB。金属-金属串联式开关的隔离很高（50 ~ 60dB），插入损耗为 0.1dB。

1.6.4 微开关应用前景和发展趋势

MEMS 加工技术实现了在微米尺度下将机械和电子的整合，借助于现有的集成电路工艺，能大规模生产，产品一致性好，成本低。因此从理论上讲，微机械开关同时具有了机械式继电器接触电阻小、SSR 体积小的优点。便于集成。其潜在用途包括：

- (1) 个人通信：移动电话、PDA、便携式计算机的数据交换
- (2) 车载 / 机载收发机和卫星通信终端，GPS 接收机等
- (3) 军事应用领域的通信系统、小型相控阵雷达、无线传感器网络等

1.7 本课题的内容和任务

本文主要对悬臂梁式的微开关结构进行分析和讨论，主要任务有：

- (1) 根据微开关的种类和特性确定微开关结构。
- (2) 计算两种不同结构悬臂梁（等截面悬臂梁和变截面悬臂梁）在电场力作用下的变形、触点间接触压力、梁上内应力的分布以及两种悬臂梁的无阻尼横向自由振动频率。对两种结构的特点进行比较。
- (3) 制定出等截面悬臂梁微开关的微机械加工工艺，设计掩膜版及确定具体的工艺参数。
- (4) 设计用于微开关驱动的升压电路，对倍压整流电路的输特性进行分析，设计实际电路图。还对可实现集成化的开关电容升压电路的原理和稳态特性进行分析。

第二章 微开关结构与计算

2.1 微开关的结构设计：

本设计中的微开关采用悬臂式电场力驱动的结构，如图 2 - 1 所示，其主要部件是一个硅悬臂梁，在梁的底面溅射有一层金属层作为上驱动电极，同样，在底板上对应有驱动下电极，当在上下驱动电极间施加以驱动电压时，由于电场力的作用，悬臂梁产生变形，当梁接触到下面的触点后，接通触点 A、B，实现开关的闭合。

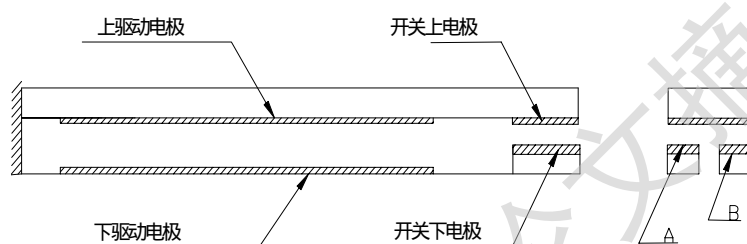


图 2-1 微开关结构示意图

2.2 硅悬臂梁的受力及变形分析：

2.2.1 受力分析

从微开关的工作原理可知，微开关是利用电场力使悬臂梁变形，实现触点的接触，亦即在对应的电极区域作用着连续分布的电场力。

在变形的初始时刻微开关的上下驱动电极可以看成是一个平板电容，如果在两电极间施加驱动电压 V ，则电容上的电荷为：

$$Q = CV \tag{2-1}$$

其中 C 为两电极间的电容，它取决于微开关的几何尺寸，于是，电容器所贮存的能量为：

$$U = \frac{1}{2} CV^2 \tag{2-2}$$

对于平板电容 $C = \epsilon A / d$ ， $V = Ed$ ，代入(2-1)式，则有：

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \cdot (Ad)$$

通过计算带电平板电容器两板发生移动时的能量变化，可以间接地算出电容器平板间的作用力，一个平行板电容器的两个极板带有符号相反的电荷，它们之间的引力设为 F ，那么，把两

板拉开亦个距离 dx 所花费的功就是 $F \cdot dx$, 而电势能的变化为:

$$dv = Fdx$$

如果平板的面积为 A , 间隔为 x , 那么有:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \cdot Ax$$

当两板间隔变化时 , 其中间的电场应保持不变 , 因为这个电场仅取决于平板上的电荷密度 , 因而 :

$$F = \frac{dU}{dx} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 A \quad (2-3)$$

那么单位面积受力为 : $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$, 此即为作用在上驱动电极上的均布载荷。于是在初始时刻 , 梁

上的载荷分布如图 2-2(a)所示 :

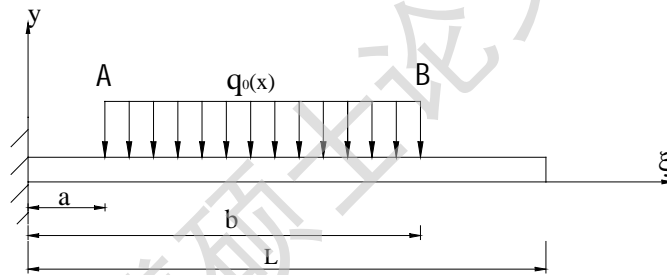


图 2-2(a) 初始时刻梁上的载荷

其中 , L 为悬臂梁的全长 , $q_0(x)$ 为作用在 AB 间的均布电场力。在电场力作用下 , 悬臂梁将产生变形。在纯弯曲的情况下 , 弯矩与曲率间的关系为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2-4a)$$

式中 ρ 为曲率半径 , M 为弯矩 , E 为杨氏弹性模量 , I 为梁的惯性矩 , 对于跨度远大于截面高度的梁 , 剪力对弯曲变形的影响可以忽略 , 式(2-4a)可作为横力弯曲变形的基本方程 , 在小变形的情况下挠曲变形 v 可采用近似方程 :

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (2-4b)$$

梁的变形分为两个过程 , 首先是悬臂梁一端固支 , 一端自由的变形过程 , 当硅悬臂梁变形到一定时候时上下触点开始接触 , 此时可近似看成是一端固支一端简支的梁 , 梁在电场力的作用下继续

变形，最终达到平衡。

必须考虑到的是，作用在悬臂梁上的载荷并不是保持不变的，随着梁的变形，上下两驱动电极的间距便随之变小，这将导致电场强度 E 在上下电极间的分布不均匀，电场力也因此不再是均布载荷，如图 2-2(b)：

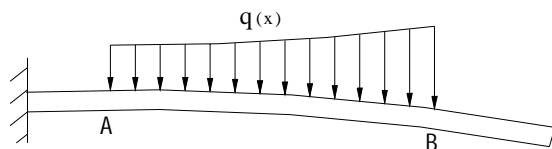


图 2-2(b) 任意时刻梁上的载荷

此时极板之间的电场力 $\frac{1}{2}\epsilon_0 E^2$ 将随上下两电极的间距和电场强度的改变而改变，因此，在任意时刻，AB 段的载荷分布为：

$$q(x) = \frac{1}{2}\epsilon_0 \frac{V^2}{(d - v(x))^2} \tag{2-5}$$

其中 V 为驱动电压， d 为上下电极的初始间距，也就是悬臂梁到下底板的初始间距， $v(x)$ 为梁上 x 点处的变形挠度，可见，分布力 $q(x)$ 不仅是 x 的函数，同时又是 $v(x)$ 的函数。

分段列出弯矩方程如下：

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = \int_a^b x \cdot q(x) dx - x \int_a^b q(x) dx \quad 0 < x \leq a$$

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = \int_x^b q(x) dx \quad a \leq x \leq b$$

可以看出，在加载的过程中，载荷随着挠度发生变化，要解此微分方程组存在相当困难。

2.2.2 利用能量法计算悬臂梁的变形

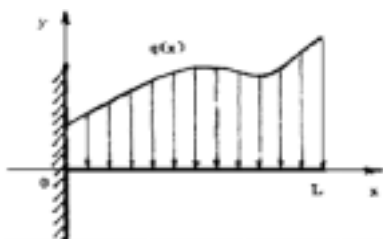


图 2-3

利用以能量法为基础的瑞利-李兹法，可以避免解微分方程组带来的困难，只需解一组线性方程组即可，如图 2-3 所示，一端固支一端自由的悬臂梁，在梁上作用有连续的分布载荷 $q(x)$ ，假设 $f_i(x)$ 满足边界

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

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

厦门大学博硕士学位论文摘要库