

北京大学

---

硕士学位论文

---

无应力悬臂梁的制备及MEMS推进器工艺研究

---

姓名：刘强

---

申请学位级别：硕士

---

专业：嵌入式系统及IP

---

指导教师：于敦山;李志宏

---

20090601

## 摘要

本论文介绍了我研究生期间针对 MEMS 研究的主要工作,包括无应力悬臂梁的制备和 MEMS 微推进器工艺,从工艺的角度看,二者分属 MEMS 加工技术的体硅和表面工艺。

无应力悬臂梁的制备是 RF 开关工艺中的很重要一环,对保证开关的工作速度,稳定的吸合电压,重复工作的可靠性。在其制备过程中,锚区的腐蚀,悬臂梁的形成,合理的释放方案是关键环节。不同的牺牲层要用不同的腐蚀方案,由于是整个悬臂梁电流和机械结构的敏感区,横钻特性、中间产物、速率都是锚区腐蚀的重要方面。对铜做牺牲层的悬臂梁,深入研究冰醋酸、氨水、氯化高铁几种方案的物理、化学性能。最终找到速率稳定,无中间产物(影响电导率),垂直度好的锚区腐蚀方案。

在以较厚铜层既做牺牲层又做电镀种子层的工艺设计下,电镀金时出现了异常的起皱现象,排查各种可能引起这种致命缺陷的各种原因,结合对敏感条件的仿真,整理出由温度引发离子电迁移率降低、水解析氢等连锁反应的逻辑链。进而有针对性的抑制这种起皱。同时以电镀作为一个系统工程的视角出发,研究这种超出标准条件的抑制方法引发的潜在问题,尤其是残余应力的增大。深入摸索脉冲周期反向电镀的机理和对特定镀液的匹配,全面的补偿抑制起皱时引起的潜在问题。同时对这种异常机制的处理做了扩展应用。

同时对 RF 开关的接触特性做了热电仿真,通过精确定义接触点及其周围的电流及材料,寻找温度最高、最易失效的位置,指导版图设计。

液体燃料微推进器在天机驱动领域有很好的应用前景,体积小、可整列化、推力组合易于调整。加工过程中涉及到了多曲线、多嵌套关系版图的处理;高深宽比散热流道的刻蚀;密集燃料隔离壁的刻蚀;嵌套的小孔刻蚀时 lag 效应的克服;盖板玻璃上散热剂、燃料加注孔、测压孔的激光打孔;大图形区超厚硅-硅键合;超厚带图形玻璃与硅的三名治键合;KOVA 管与推进器的封装;芯片与测试平台的可重复使用密封链接等一系列问题。

最终实现了无应力悬臂梁的制备和可耐 13 个大气压、散热流畅的微推进器的制备。

## ABSTRACT

The fabrication of stress-free cantilever is the key process in RF switch fabrication, and it is also very important to ensure the performance of the work speed, stable pull-in voltage and reliability. Anchor opening, formation of the cantilever beam, the appropriate release method are all vital to the whole process. Different sacrificial layers require different etch and release approaches. As the area around the anchor is one of critical positions to the electric and physical characteristics of the switch. Horizontal undercut, the intermediate product, the etch rate are all important aspects to the anchor opening. It is necessary to compare the different etchants such as HAC,  $\text{NH}_4\text{OH}$  plan, and  $\text{FeCl}_3$ . Finally, the optimal etchant was checked out, which can ensure the stable etch, avoid intermediate product and keep the verticality of the side wall of the anchor area.

There are unexpected wrinkles in the electroplating process when using the Cu layer as both sacrificial layer and seed layer. Separated experiments exclude the possible causes of the problem, such as PH value, stir rate, current density. The logical chain of the wrinkle formation was finally deduced out, which include the reduction of the ion mobility and increase of the hydrolyzation. Investigation of the potential influences of the wrinkle restrain raises the problem such as severe residual stress.

Solution of those potential problems was approached by using the appropriate parameters in electroplating using periodic pulse reverse power. Meanwhile some extended applications were successfully carried out using the same plan.

The electric and thermal performances of the contact in the RF switch was simulated. The highest temperature point, also the most possible failure point, was located via accurate definition of the contact material and current density distribution. This simulation can guide the layout design.

As the characteristic of small size and easiness to assemble, the MEMS thruster has the good prospect in the application for the aerospace area. There are many challenges in the fabrication process, for instance, the complex layout design, the high respect ratio cooling channel etching, the high density fuel separated wall etching, the solution of the lag effect in nested micro hole etching, the laser drilling in HOYA glass to form the cooling hole, fuel inject hole and pressure measure hole, Si-Si bonding with large graphic area, glass-si-si-glass multi-layer bonding, the package of the thruster with the connection of KOVA tube the sealing plan between the packaged thruster and test bench etc.

Finally the stress-free cantilever and MEMS thruster which can resist 13 standard atmosphere pressure have successfully fabricated.

## 北京大学学位论文原创性声明和使用授权说明

### 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

论文作者签名：刘子强 日期：2009年5月26日

### 学位论文使用授权说明

本人完全了解北京大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，即：  
按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；  
学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并提供目录检索与阅览服务；  
学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；  
在不以赢利为目的的前提下，学校可以公布论文的部分或全部内容。

(保密论文在解密后遵守此规定)

论文作者签名：刘子强 导师签名：于强  
日期：2009年5月26日

---

## 版权声明

任何收存和保管本论文各种版本的单位和个人，未经本论文作者同意，不得将本论文转借他人，亦不得随意复制、抄录、拍照或以任何方式传播。否则，引起有碍作者著作权之问题，将可能承担法律责任。

## 第一部分：无应力悬臂梁加工工艺

### 第一章 引言

#### 1.1 MEMS 及 RF MEMS 技术

在过去的几十年里,随着微电子技术和微加工技术的不断发展,微电子机械系统(MEMS, micro-electro-mechanical system)受到国际上越来越多研究者的关注<sup>[1]</sup>。MEMS 主要采用微加工技术将微型传感器、微型执行器、微型机构以及信号处理和控制电路、通信接口和电源部件等集成于一体。它不仅可以感受自然界中的运动、光、声、热、磁等信号,并且还可以通过电子系统控制这些信号。

由于传统的硅基集成电路加工工艺已经发展得比较完善,因此大部分 MEMS 器件仍选择硅及其化合物作为基本材料,以体硅加工<sup>[2]</sup>、表面加工工艺<sup>[3]</sup>为主。同时非硅加工技术如 LIGA 技术<sup>[4]</sup>及基于激光加工<sup>[5]</sup>等细微加工工艺的研究也不断取得进展。MEMS 技术涉及到电子技术、机械技术、物理、化学、生物医学、能源科学、材料科学等几乎整个自然及工程科学领域,因此其种类十分庞杂,包括微加速度计<sup>[6]</sup>、微陀螺<sup>[7]</sup>等微传感器、微马达<sup>[8]</sup>、微开关<sup>[9]</sup>等微执行器、微型光机电系统(MOEMS)<sup>[10]</sup>以及微流控系统<sup>[11-13]</sup>等,其中以压力传感器、惯性传感器等为代表的一些传感器产品已经形成较为成熟的产业。

由于 MEMS 器件具有微型化和集成化等优点,它能够提高大型电子机械系统的性能,甚至代替其全部功能,从而极大地提高系统的自动化、智能化和可靠性水平,因此在军事、航天、航空、信息通讯、汽车工业、生物医学、环境监控及日常用品等领域都有非常广阔的应用前景。

射频微机电系统(Radio Frequency Micro-electronic-mechanical system, 简称 RF MEMS)是 MEMS 技术的重要应用领域之一,也是二十世纪九十年代以来 MEMS 领域的研究热点。RF MEMS 用于射频和微波频率电路中的信号处理,是一项将能对现有雷达和通讯中射频结构产生重大影响的技术。随着信息时代的来临,在无线通信领域,特别是在移动通信和卫星通信领域,正迫切需要一些低功耗、超小型化且能与信号处理电路集成的平面结构的新型器件,并希望能覆盖包括微波、毫米波和亚毫米波在内的宽频波段。而目前的通讯系统中仍有大量不

可或缺的片外分立元件,例如电感、可变电容、滤波器、耦合(?)器、移相器、开关阵列等,成为限制系统尺寸进一步缩小的瓶颈。RF MEMS 技术的出现有望解决这个难题。采用 RF MEMS 技术制造的无源器件能够直接和有源电路集成在同一芯片内,实现射频系统的片内高集成,消除由分立元件带来的寄生损耗,真正做到系统的高内聚、低耦合,能显著提高系统的性能<sup>[2]</sup>。

## 1.2 RF MEMS 开关的研究意义

RF MEMS 器件中目前最受关注的是 RFMEMS 开关,是 RF MEMS 器件中的核心器件。RF MEMS 开关是工作在射频到毫米波频率的微机械开关,依靠机械移动实现对传输线的通/断控制。表 1.1 是 FET、PIN 二极管与 RF MEMS 开关的性能上的比较,从表中可以看出 RFMEMS 开关与传统的半导体开关相比,有以下优点[3]:

1) 几乎是零损耗:静电驱动需要 20~80 伏的电压,但是开关中电流很小,几乎为零,这就造成了很低的能量损耗(每个开关周期中消耗 10-100nJ 的能量)。

2) 非常高的隔离度:RF MEMS 串联开关由于在电极与传输线间存在实质性的空气间隔,从而有很低的关态电容(2~4 fF),在 0.1-40GHz 范围内有很高的隔离度。

3) 低的插入损耗:消除了半导体中扩散电阻,极大地减少了器件的电阻损耗,从而具有很小的插入损耗(0.1dB 在 40GHz)。

4) 低的互调分量:由于没有半导体的 pn 结,开关的 I-V 呈现非常好的线性,具有很低的互相调制分量。

5) 低成本:MEMS 开关是利用表面微机械技术制作的,可以制作在石英玻璃、高阻硅、GaAs 基底等材料上。采用 MEMS 中高度可重复的超微细生产技术,利用生产硅片控制电路中的现有技术,可进行批量生产,降低成本。

表 1.1 FET、PIN 二极管与 RFMEMS 开关的比较[1]

参数/单位	RF MEMS	PIN	FET
插入损失(1~100GHz) (dB)	0.05~0.2	0.3~1.2	0.4~2.5
隔离度(1~10GHz) (dB)	很高	高	中
隔离度(10~40GHz) (dB)	很高	中	低

隔离度(40~100GHz) (dB)	高	中	无
截止频率 (THZ)	40~500	1~4	0.5~2
功耗 (mw)	0.05~0.1	5~100	0.05~0.1
开关时间	1~300us	1~100ns	1~100ns
第三截距点 (dBm)	66~80	27~45	27~45

RF MEMS 开关功能强、用途广泛，不仅在射频电路、机械结构或传导器件中应用广泛，另还在相控阵天线、x 波段的移相器、微波功率计、基于 MEMS 的自适应重构天线、基于 MEMS 的频率跳变天线中也有应用。开关在通信系统中用途相当广泛，射频开关是雷达、电子对抗、通信等领域的重要控制元件。正因为有了射频开关，整机才能完成收发、切换、闭塞、优选以及更复杂的功能。

### 1.3 研究现状

MEMS 开关的研究开始于 1979 年 IBM 的 K. E. Peterson<sup>[4]</sup>，是一种静电驱动悬臂梁开关，这个开关虽然不是为射频应用设计的，但是为射频开关设计的起点。随着 MEMS 技术的进步，在 20 世纪 90 年代初期，美国 Larson 博士研制出微波控制的 MEMS 开关<sup>[5]</sup>。由于 RFMEMS 开关在军民两方面应用的巨大潜力，近十年的研究惊人增加，Motorola、Roekwell、Raytheon、A D I、T I、HRL、O Mtrnon、Samsung、NEC、Northrup GRUMMAN ST-Microelectronics 等国际知名公司都开展了相关的研发工作。（注意英文的全角和半角）

RF MEMS 开关由两个不同的部分组成：机械部分和电学部分。可以用静电、电磁、压电或热原理等为机械部分提供驱动力。到目前为止，静电型开关和静磁驱动开关可以用圆片级制造技术加工，在 0.1—100GHz 范围内有高的可靠性。开关的电学部分，可以采用串联或并联的方式排列，可以是金属—金属接触或电容式接触<sup>[1]</sup>。开关的机械部分结构主要有悬臂梁、桥膜和扭转摆三种。以下按照这三种结构对开关的研究现状进行介绍，并对于三种结构开关的优缺点进行总结。

### 1.3.1 悬臂梁结构开关的研究现状

图 1.1 是 1979 年 IBM 的 K. E. Peterson 研制的一种静电驱动串联型接触式开关[4]，是最早的悬臂梁结构开关。这种开关性能与制作工艺有较大的关系，各项性能参数并不稳定。

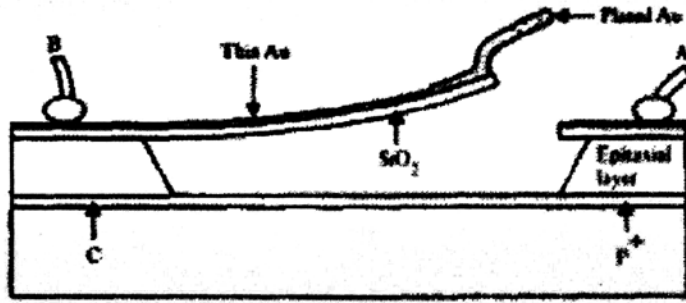


图 1.1 早期的悬臂梁接触式开关

图 1.2 是 1995 年报道的一种静电驱动单刀单掷串联型接触式开关[6]。

开关采用 GaAs 衬底，用金制作微波传输线和接触电极，采用 PECVD 的氧化硅作为悬臂梁材料，以聚酰亚胺作为牺牲层材料，整个工艺过程的温度不超过 250℃，可以和常规的 GaAs 电路工艺相兼容，该开关在 4GHz 频段以下，插入损耗优于-0.12dB，隔离度优于-50dB，开启电压 28~40V，开关寿命大于  $6.5 \times 10^{10}$  次。

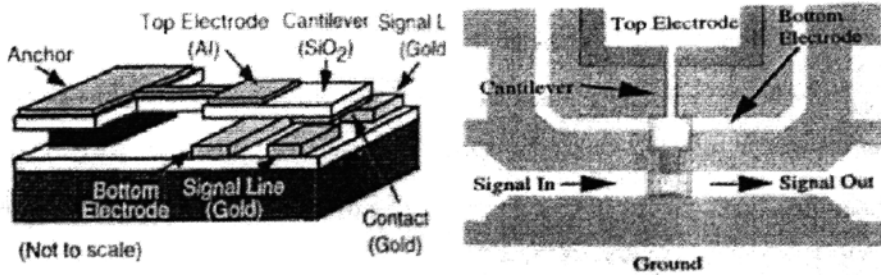


图 1.2 一种单刀单掷串联型接触式开关

图 1.3 是 HRL (休斯实验室) 在 1999 年报道的在 GaAs 衬底上制作的静电驱动串联型接触式开关[7]。悬臂梁结构是一种“三明治”结构，用绝缘介质(氮化硅)

将金属(金)包裹起来, 有利于降低悬梁的应力和保护器件。牺牲层采用氧化硅, 采用 HF 溶液腐蚀, 在超临界干燥系统中释放结构。该开关接触电阻为  $1\sim 1.5$ , 插入损耗为  $-0.1\sim -0.15\text{dB}@1\sim 40\text{GHz}$ , 隔离度为  $-45\text{dB}@4\text{GHz}$ ,  $-25\text{dB}@40\text{GHz}$ 。开启电压为  $30\sim 40\text{V}$ 。

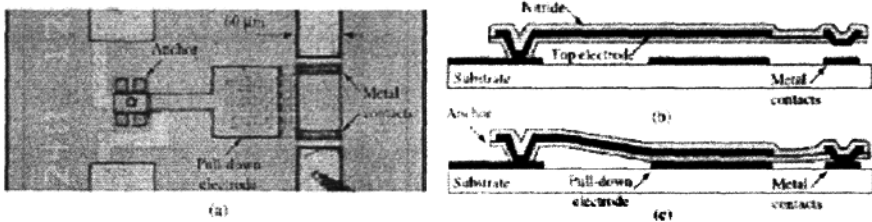


图 1.3 HRL 的静电驱动串联型接触式开关

图 1.4 是 AD(AnalogDevices)公司于 1999 年研制的一种静电驱动串联型接触式开关[8]。开关悬臂梁采用电镀工艺制作, 厚度达  $7\sim 9\mu\text{m}$ , 这就得到大的刚性结构和比较高的机械谐振频率, 悬臂梁与衬底之间的空气隙仅为  $0.6\sim 1\mu\text{m}$ 。牺牲层采用铜, 湿法腐蚀工艺释放。这种开关开启电压较高 ( $60\sim 80\text{V}$ ), 但开关的速度很快, 吸合时间约  $1\sim 2\mu\text{s}$ , 释放时间约  $2\sim 3\mu\text{s}$ 。开关的接触电阻为  $1\sim 1.5$  欧姆, 插入损耗约  $-0.15\text{dB}@DC\sim 40\text{GHz}$ , 隔离度为  $-40\text{dB}@40\text{Hz}$ ,  $-27\text{dB}@40\text{GHz}$ 。

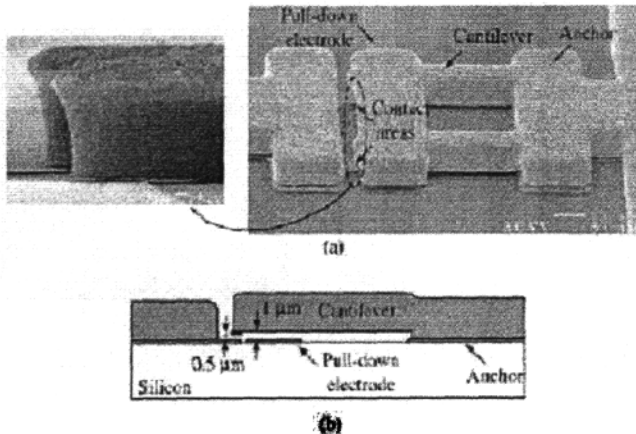


图 1.4 AD 公司研制的一种静电驱动串联型接触式开关

图 1.5 为台湾大学的 Chang 等人在 2000 年研制的一种紧凑的静电驱动 DC 接触式 MEMS 并联开关[9]。开关制作在 GaAs 衬底上, 悬臂梁采用双层金属制作,

分别是  $0.5\mu\text{m}$  厚的 Al 和  $0.1\mu\text{m}$  厚的 Cr，由于 Al 和 Cr 金属层间的残余应力差，悬臂梁向上翘曲，改变着两层金属的厚度比例以及 Cr 金属层的位置可以改变上翘的程度。采用非晶硅作为开关的牺牲层。开关采用 CPW 微波传输线。开关的开启电压约  $26\sim 30\text{V}$ ，切换时间约  $10\text{ms}$ ，插入损耗为  $-0.5\text{dB}@10\text{GHz}$ ，隔离度为  $-17\text{dB}@10\text{GHz}$ 。

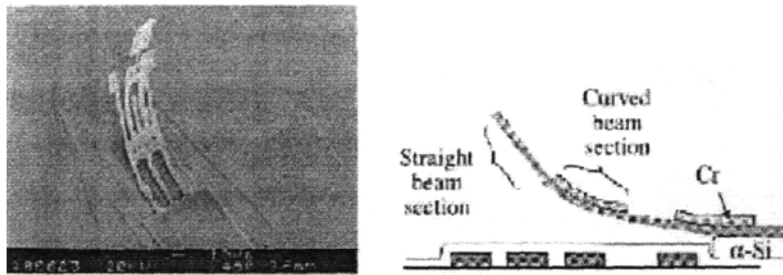


图 1.5 台湾大学研制的一种 DC 接触式 MEMS 并联开关

#### 1.4 无应力悬臂梁加工难点

电镀金悬臂梁已经在射频大功率开关中取得了广泛的应用，它有工作频率高、低功耗、插入损耗低、线性度好的特点，因此高质量的金悬臂梁的制备工艺已经被广泛的研究，主要的要素就是牺牲层的材料、锚区的腐蚀、梁体的形成。光刻胶做牺牲层简单易行，但支撑性不好，容易引起残余应力，铜、镍等金属做牺牲层支撑性好，但有一系列潜在的问题，比如锚区刻蚀时的横钻；锚区刻蚀时副产物对悬臂梁关键部位的影响；金铜的互相渗透问题；铜上镀金时起皱的问题；以及在释放牺牲层的过程中不同的铜腐蚀方案对悬臂梁形貌的影响——比如用双氧水类腐蚀液时气泡对给梁施加的外力。微观层面最大的问题就是由于金和铜的晶格不匹配造成的残余应力。基于以上潜在的问题，我们对铜牺牲层上电镀金悬臂梁的工艺进行了有针对性的质量控制。

#### 1.5 本部分论文主要内容：

论文第一部分针对铜直接做牺牲层又做种子层的悬臂梁加工中的锚区腐蚀方案做了全面的分析对比，得出最佳的腐蚀方案。

同时对电镀金悬臂梁时的起皱现象深入研究，排查各种可能因素，整理出由

温度出发结合水解而引发起皱的逻辑链；抑制起皱的主要因素后，同时会诱发残余应力过大的问题，通过改进周期脉冲反向脉冲抑制残余应力、“狗骨”现象等副作用。

对起皱敏感区做出仿真，合理的验证起皱逻辑链的合理性，预测影响悬臂梁性能的敏感部位。

对悬臂梁开关的接触点的电-热性能进行仿真，找到最容易导致失效的热点位置。

## 第二章 整体设计及关键工艺突破

### 2.1 最简化的流程：

与光刻胶做牺牲层的悬臂梁工艺不同，用铜既做牺牲层又做电镀的种子层，既可以发挥铜做牺牲层良好的支撑性，又可以省去溅射电镀种子层的步骤，使整个工艺简化。流程简图如图 2.1 所示，首先在 400 $\mu\text{m}$  硅片上溅射 0.1 $\mu\text{m}$ (?) 的金作为锚区电镀的种子层，然后在溅射 1 $\mu\text{m}$  的铜作为牺牲层，均匀旋涂 2 $\mu\text{m}$  的光刻胶作为锚区刻蚀的掩膜，锚区曝光和显影完成后，直接用合适的电流方案电镀 4 $\mu\text{m}$  的金一次性形成包括锚区和梁体——这层连续的电镀金层一部分生长在金种子层上，一部分生长在铜牺牲层上，后续要解决的主要问题就在这一环节。最终用合适的铜腐蚀方案释放掉铜牺牲层，形成无应力长直的梁体。

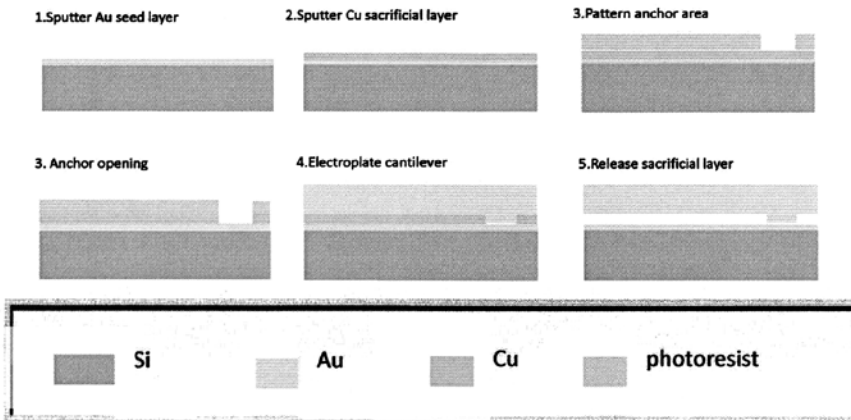


图 2.1 工艺流程

### 2.2 版图设计

为了验证不同悬臂梁长度，不同锚区面积的梁的性能，用初缩版版图设计出

不同尺寸的梁阵列，其中有长宽比达 70:1 的细长梁用来观察残余应力及释放的彻底性，也有长宽比为 1:5 的短粗梁，以观察电镀电场不均匀对锚区形貌的影响（其中短粗梁上开有均匀的小孔以改善梁的谐振性能，抑制残余应力，并且节省对金的消耗）。如图 2.2 为悬臂梁阵列的版图设计。

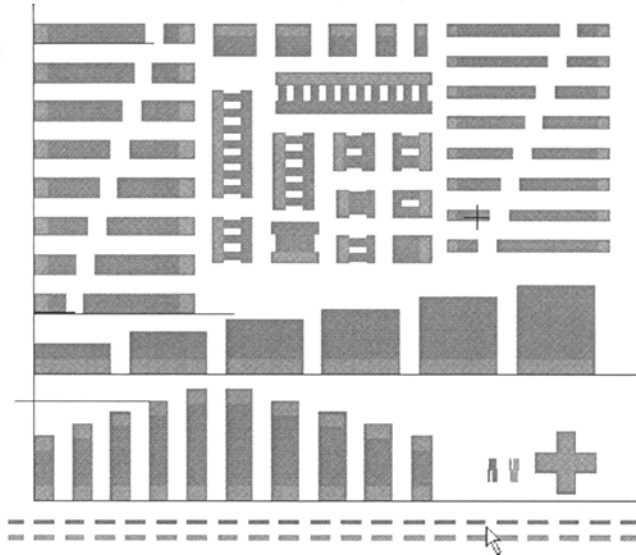


图 2.2 悬臂梁阵列版图

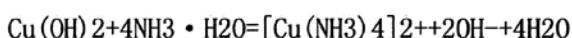
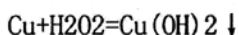
## 2.3 锚区刻蚀方案的优化

### 2.3.1 引言

锚区刻蚀的方案主要是对溅射铜层的腐蚀，优秀的方案应该具备速度易于控制，横钻尽可能小，没有中间产物；腐蚀区洁净的特点。由于此步腐蚀会给铜牺牲层释放提供很重要的参考，因此选择了三种不同的铜腐蚀方案从速率、横钻、中间产物几方面做详细的研究。分别是工业腐蚀 PCB 电路板常用的三氯化铁加盐酸方案、常规的冰醋酸加双氧水方案、氨水加双氧水方案。

### 2.3.2 氨水加双氧水方案

氨水加双氧水方案是分步式反应，的反应方程式为：



由此可见铜的腐蚀关键是由于第二个反应，形成可溶于水的络合物，推进第一个反应平衡向右进行。但是也同时带来了腐蚀方案中的中间产物问题，氢氧化

铜是电绝缘的蓝色沉淀，刚好会在锚区的边缘产生，如图 2.3 图 2.4 所示，可见这对悬臂梁的根部电镀会照成无法加载电流，而此部位正是悬臂梁最容易失效的敏感部位。

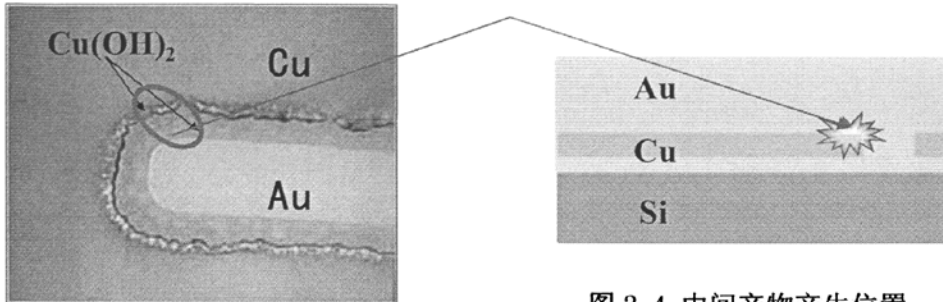


图 2.4 中间产物产生位置

图 2.3 锚区未腐蚀到底时的中间产物

工业上常用的配比为水：氨水：双氧水=10：2：1，基于对中间产物的抑制，加大了氨水的比例为标准配方一倍，但反应速率有所下降，而且仍能看到锚区边缘的蓝色沉淀。

横钻的性能方面，垂直方向腐蚀到  $1\mu\text{m}$  时，横钻达到了  $0.8\text{--}1\mu\text{m}$ ，如图 2.5 所示，为未去胶时垂直腐蚀见到金种子层时的横钻情况，边缘红色部分为光刻胶下方铜被腐蚀掉后悬空的部分。

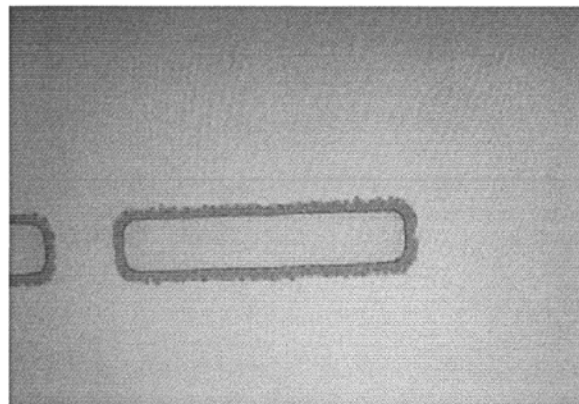
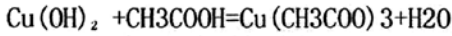
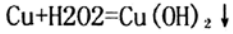


图 2.5 腐蚀到底时横钻情况

因此，氨水加双氧水的腐蚀方案，速率适中，易于控制，但是横钻较为明显，对锚区形貌控制不利。最大的问题在于在梁体的关键部位产生了绝缘的中间产物，会直接影响到下一步的电镀工艺。

### 2.3.3 冰醋酸加双氧水方案

此方案也是分步反应：



在此分步反应中醋酸与氢氧化铜之间的酸碱速率反应要远远大于氢氧化铜与氨根离子形成络合物的速率。因此从图 2.6 中可看出,当锚区腐蚀到金种子层时,锚区边缘没有出现未被反应掉的氢氧化铜沉淀。

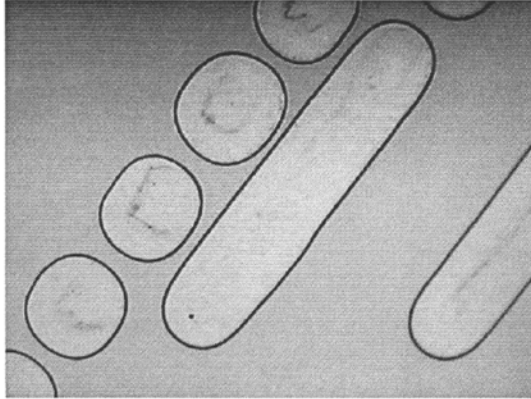


图 2.6 钢暴露金种子层时锚区边缘没有中间产物

冰醋酸双氧水方案中的横钻如图 2.7,与图 2.6 比较,用 HAC:H<sub>2</sub>O:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=1:20:1 的腐蚀液垂直方向腐蚀到 1 $\mu\text{m}$  时,水平腐蚀达到了 0.6–0.9 $\mu\text{m}$ ,略小于氨水加双氧水方案。

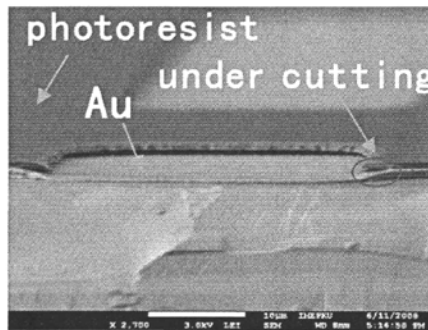
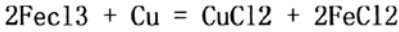


图 2.7 水平腐蚀严重

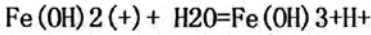
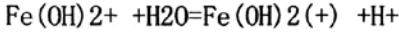
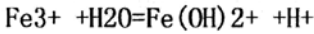
此方案用 HAC:H<sub>2</sub>O:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=1:20:1 的比例,沿着垂直于硅片表面的方向均匀搅拌时,速率为每分钟 2000 $\text{\AA}$ ,易于控制。

### 2.3.4 氯化高铁加盐酸方案

此方案的反应原理为:



但是三价铁离子不稳定，很容易与水发生水解反应：



其中以第一步的水解反应为主，为抑制此水解反应，在溶液中加入 HCL，使反应平衡向左移动，保证三价铁离子的稳定性。

由于此方案为直接的氧化还原反应，没有中间产物，所以能够保证锚区边缘的洁净，如图 2.8 所示，这为下一步的梁体电镀的电场敏感区打下很好的基础。

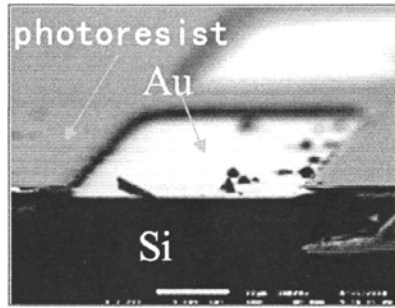


图 2.8 锚区底面光滑

腐蚀速率的角度， $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  晶体与水的质量百分比是 5% 时，不加搅拌，10 秒钟就可观察到暴露的金种子层。15 秒时锚区周围光刻胶出现红晕如图 2.9，说明已经有明显的横钻。

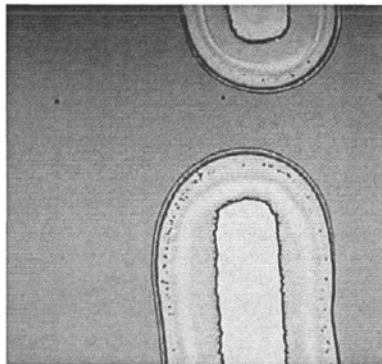


图 2.9 短时间光刻胶下已有明显的横钻

由此可见，三氯化铁加盐酸方案的最大问题在于速率不好控制，在需要精确控制腐蚀深度的锚区腐蚀中较难控制锚区形状与光刻胶掩膜的一致性。同时氯化

高铁对环境的污染要较氨水和冰醋酸都严重，所以在锚区腐蚀方案中，虽然氯化高铁方案没有中间产物对后续电镀的干扰，但是并不选择它做为最佳方案，最终选用冰醋酸加双氧水这一方案。

## 2.4 电镀梁体及异常现象处理

### 2.4.1 引言

电镀梁体是整个悬臂梁开关制备过程中的核心，和工业电镀不同，悬臂梁开关的电镀难点有以下几方面：

1. 被镀面积小，要保证稳定的电场必须要有很高电流精度和稳定性的电流源。

2. 镀层直接用做机械结构，除了镀层表面的光泽，要求关注到镀层的应力特性，所以常规电镀的光亮剂和整平剂要慎重使用，防止引入过多的有机杂质。

3. 相同的种子层上电镀不同的金属，要考虑晶格的失配，不同材质的互渗，闪镀粘附层等工艺。

4. 锚区及悬臂梁边缘的形貌要求平整，以保证梁的电学性能，即使精度很高的直流电流源也无法胜任，必须用高精度周期反向脉冲电源来控制镀液的浓度极化和反向整平突起部位。

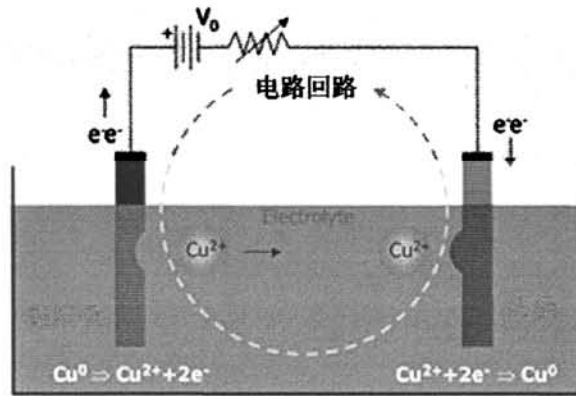
5. 镀液的温度不能按照标准执行时，如何通过调整电源参数来补偿由此引发的水解等问题。

6. 曲率变化较大的部位和接触点等易失效部位需要进行仿真来指导设计。

### 2.4.2 电镀的原理及要点：

#### 2.4.2.1 原理简述

电镀技术基于电化学和电极过程动力学理论，其基本原理是物体表面受外加电源提供的电作用在电解池中发生氧化/还原反应。如图 2.10 所示为电镀原理图（以铜为例）。在电镀容器中装入含有铜离子的电镀液，将阴极（就是待镀样品）与阳极（高纯度铜）要发生电化学反应的部分浸入镀液，再将阳极阴极分别连接到电源正极和负极上，通电后，铜阳极失去电子而被氧化成铜离子进入镀液，阴极的表面上吸附的铜离子则得到电子而被还原成为铜原子淀积到阴极表面上。



电镀铜原理图

图 2.10 电镀基本原理

2.4.2.2 电镀系统搭建要素:

如图 2.11 为实际搭建的电镀系统:

阴极和阳极的底板分别为聚四氟乙烯 (teflon) 材质图 2.12, 由于其化学性质极其稳定, 而且耐高温, 对不同温度的电镀液中长时间工作都不会带入污染。

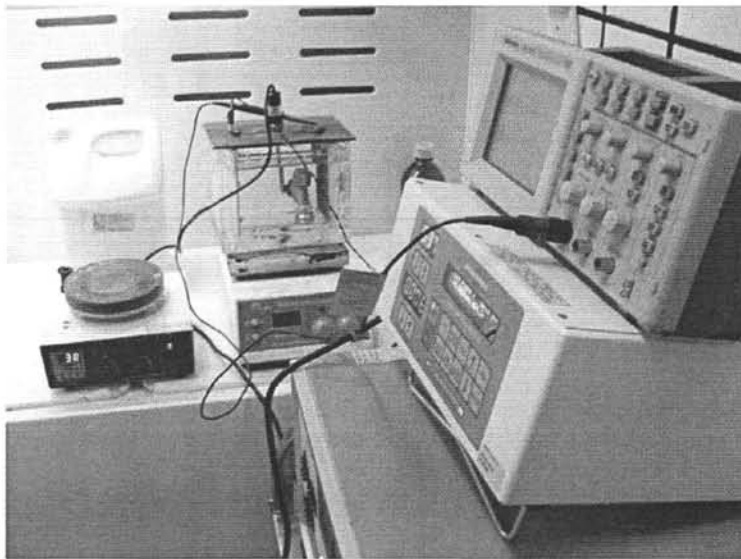


图 2.11 包括温度反馈、脉冲波形监测的电镀系统



图 2.12 阴、阳极板

对于铜、镍等的电镀，阴极使用与镀层同种材料，有利于在短时间内补偿镀液中离子损耗。对于金的电镀，使用稳定性强的铂电极做为阴极，此时要不断监控或者估计镀液中的离子损耗，用补充液补偿。

搅拌的方式需要结合电镀结构的要求，当要求电镀平面结构时最好沿着垂直电场方向水平搅拌，对克服浓度极化有好处，但这需要整个夹持被镀芯片的底板在镀槽中移动，对驱动结构和镀槽体积都要求较高。普通的磁力搅拌液也能模仿被镀芯片表面的镀液水平流动，但要避免旋转磁子离镀件太近，涡流的垂直分量太多。同时磁力搅拌是双向搅拌很重要，单向的搅拌对防止浓度极化有好处，但是会在微结构的边缘沿搅拌方向形成突起，如图 2.13 为用于膜做电镀模具时，单向搅拌造成的金在涡流方向侧壁上的堆积。

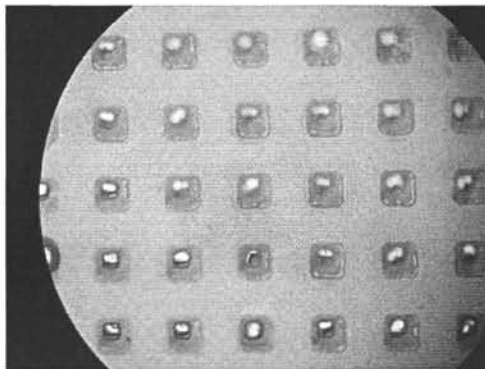


图 2.13 搅拌对镀层的方位影响

为保证稳定的电镀速率，使用高精度的调整能力强的电流源做为电镀电源，针对不同的电镀液摸索出最佳的电流密度，如果电流太小，离子补偿能力强，不

受浓度极化的影响, 电镀层的结晶速率会慢, 晶粒会大, 导致表面粗糙。电流的增大会导致浓度极化成为主要制约电镀层质量的因素, 当电流超过极限电流时, 电解水很明显, 出现疏松状灰状镀层。另一方面, 由于光刻胶作电镀模具, 模具边缘会先在物理作用下堆积镀层, 在电场作用下会增大凸起部位的电场强度, 进而放大了这种不平整。用脉冲电源时可以通过两个途径克服这种表面的不平整—脉冲的间歇可以让耗尽区离子浓度得到补充, 抑制水解; 反向脉冲对表面微小的凸起有很好的反向削平作用。

#### 2.4.3 电镀梁体典型问题及解决:

##### 2.4.3.1 起皱现象的定位及原因:

在无应力悬臂梁电镀过程中, 使用接近于极限电流密度的  $0.9\text{asd}$  电流能在金种子层上得到最理想的致密表面, 但是在铜直接做种子层时会出现意想不到的问题。最明显的问题是镀层起皱, 此时的电镀条件是  $65$  摄氏度温度, 强搅拌, 电流密度  $0.9\text{asd}$ ,  $5\text{min}$ , 如图 2.14 为悬臂梁电镀到  $4.3\mu\text{m}$  是起皱的显微镜照片。并且由起皱位置的剖面 SEM 图 (图 2.15) 可知, 起皱的部位在电镀的金层上, 而不是铜种子层上。

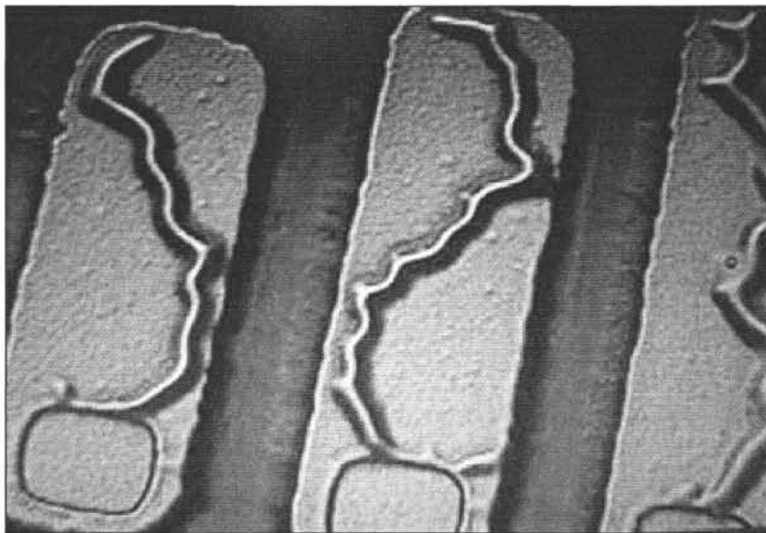


图 2.14 可重复的起皱现象

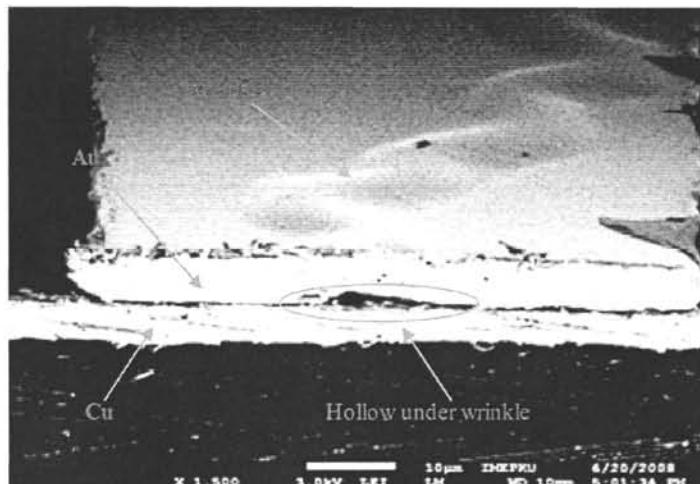


图 2.15 用于定位起皱位置的 SEM 剖面图

由于影响电镀的因素很多，并且互相耦合作用，需要做大量重复性排除试验，从添加剂、温度、搅拌、电流密度、被镀种子层全局考虑。排查得到，改变添加剂、搅拌速率、电流密度、清洗种子层都对起皱现象没有改善，当温度降低到 25 摄氏度时，起皱消失如图 2.16（但会引起后续的一系列问题）。再结合对整片 wafer 的观察得到，在 65 摄氏度电镀时，靠近镀液表面的电镀结构很少有起皱现象，所以初步确定电镀温度是起皱的原因所在。

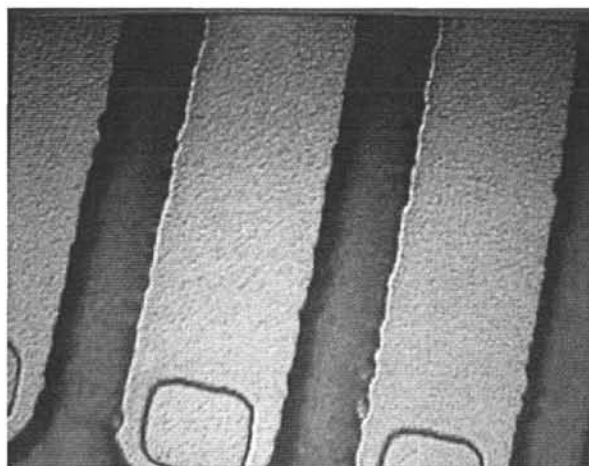


图 2.16 常温时表面皱纹消失

### 2.4.3.2 降温抑制起皱的原理探究

首先排除物理原因，金的热膨胀系数为  $14.2 \times 10^{-6} \text{m/K}$ ，铜的热膨胀系数为  $17.5 \times 10^{-6} \text{m/K}$ ，当镀液温度从 65 摄氏度降到 25 摄氏度时，在 50um 宽度的悬臂梁上，由热不匹配造成的两种材料的位移差为  $132 \times 10^{-6} \times L$ ，L 为悬臂梁宽度，而此明显与显微镜下观察到的微米级的皱不相符。

首先是镀液本身的成分，参考《贵金属电镀电镀理论》镀液中的光亮剂一般都是有机聚合物，能起到增加电镀凝结核、减小电镀晶粒的作用，但是此类光亮剂对温度敏感，若光亮剂的活性不够，会造成镀层晶粒粗大，宏观上表现为镀层会有明显的压应力残留，这也可能造成起皱。KFC88 金电镀液的添加剂是无机的，对温度不是很敏感，最佳使用温度是 60 摄氏度到 65 摄氏度，是为了保证镀液中金离子的活性，镀液良好的流动性，有效抑制浓度极化，而不是主要影响光亮剂活性。

排除热不匹配和光亮剂失效这两种可能性后，最大的可能就是基材析氢，以下详细分析并验证基材析氢引起镀层皱纹的全过程：

第一步，铜层内驻氢。

在电镀的开始阶段，镀层还没有覆盖满电镀基材（溅射的铜层），由于溅射的铜层相对电镀金层要粗糙的多（图 2.17），表面有较多的微孔和间隙，电镀的过程中始终伴随着水的电解，氢离子得到电子变成氢原子，氢原子渗透性很强，进入到溅射铜层的间隙中，其中有一部分辗转又到表面变成氢分子，一部分在铜层内与别的氢原子结合形成氢分子或分子团，这些分子或分子团不能扩散，积累在铜层内形成巨大的内压。

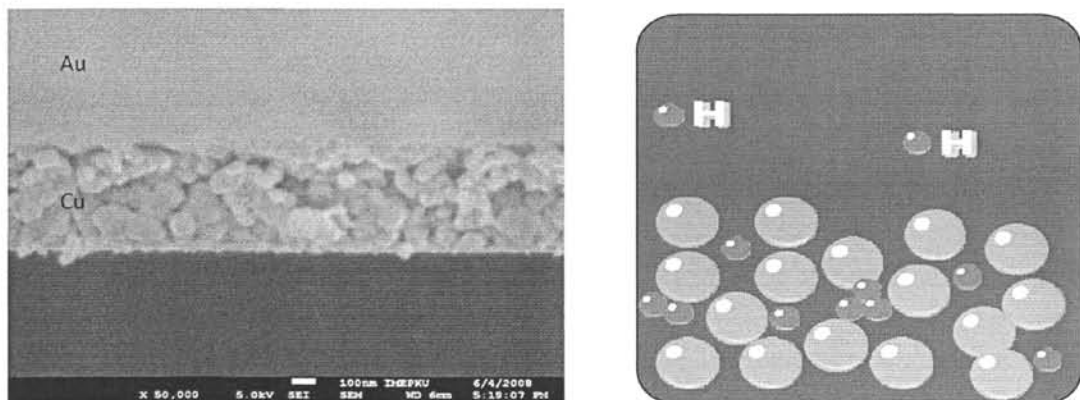


图 2.17 铜层内驻氢

第二步，表面隆起。

由於鍍液溫度比較高，加上電鍍離子得到電子本身的放熱，使得夾雜在銅層中的氫氣分團膨脹逸出，此時電鍍層還較薄，容易被氫氣頂起成泡（圖 2.18）。

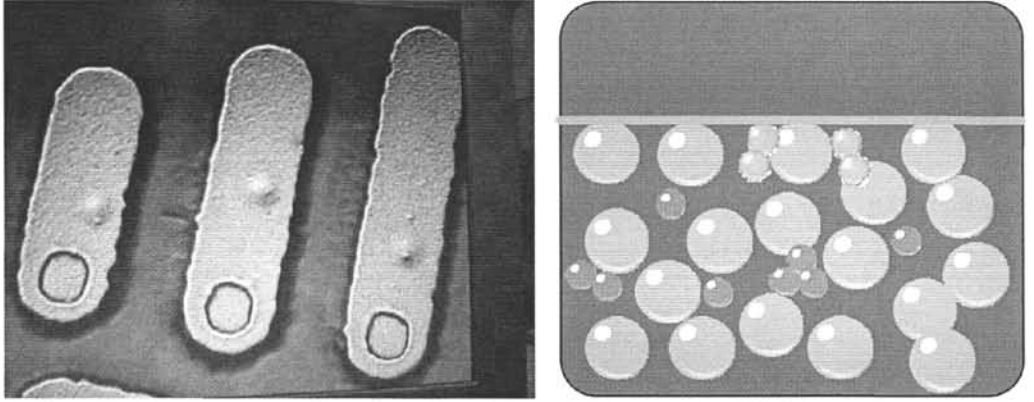


圖 2.18 表面隆起

第三步，皺紋生長。

氫分子團繼續逸出，鍍層上起泡區周圍的電鍍層與基底附着力較小，氫氣沿者氣泡周圍的路徑撕開鍍層與基底，形成線狀連續隆起（圖 2.19）。

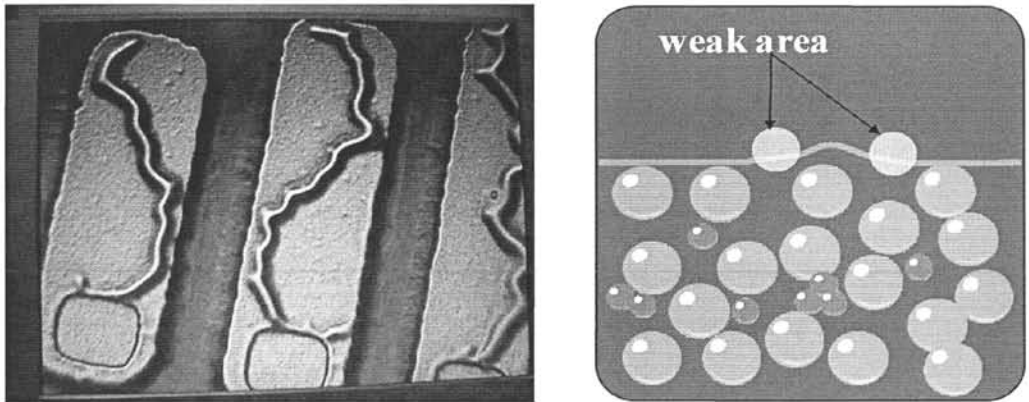


圖 2.19 皺紋生長

第四步，隆起放大。

基底銅層中的殘余氫分子團被釋放完，此時的析氫主要從鍍層本身產生，隆起不再因氫氣而生長，由於鍍層已經比較牢靠的長在基底上，析氫的影響不再表現在表面形貌上，而是影響鍍層內應力，表現在釋放後的翹曲上。由於用得是直流電源，對隆起沒有整平作用，反而會因為隆起部位電流密度大而電鍍速率更快，使隆起繼續生長，導致鍍層外表面起伏程度大於鍍層內部氫氣導致的隆起（如圖

2.20)。

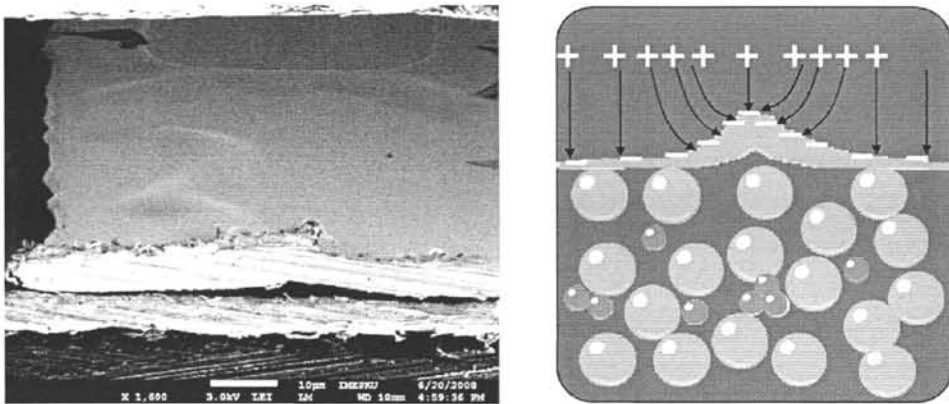


图 2.20 隆起放大

### 2.4.3.3 起皱敏感区的仿真

以基材析氢为基础的分析，起皱现象最核心的环节在于水解后氢分子在铜种子层积累的巨压引起的，所以电镀初始阶段的电流分布对起皱部位的影响很大。电流密度大的部位，离子消耗严重，电流效率低，电解水明显，析氢严重，是起皱的敏感区，对电镀区域的电流密度分布进行仿真，图 2.21 是对版图上典型结构的建模，加载的边界条件为：金种子层电压为零；初始条件：电流从金种子层流入，从锚区内金层和铜牺牲层流出，图 2.22 是最终得到的电流密度分布，可以看出腐蚀铜后锚区周围靠梁体侧电流密度最大。

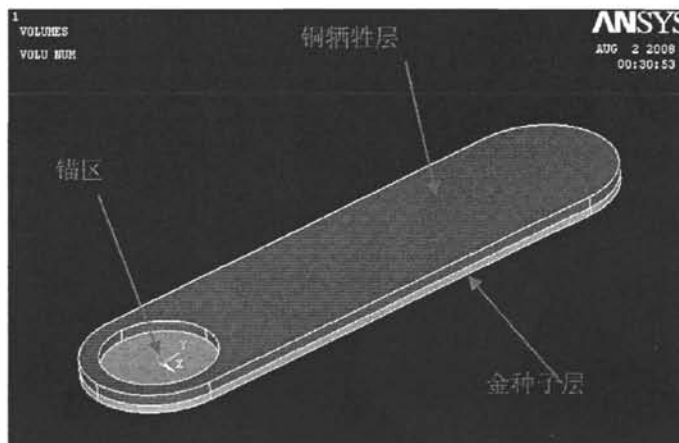


图 2.21 仿真模型

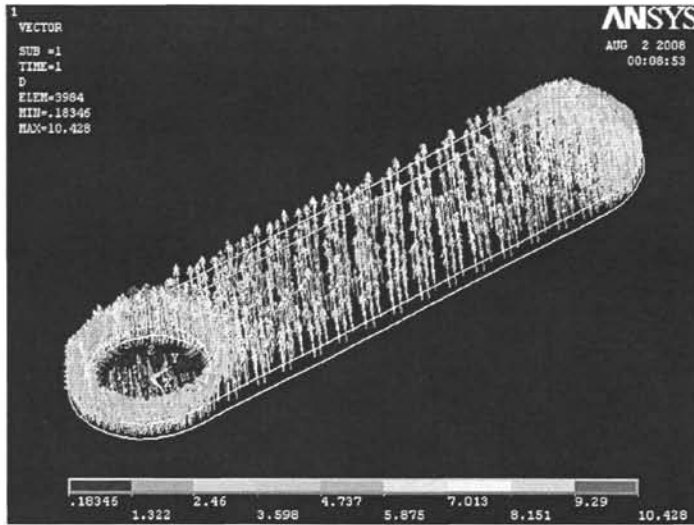


图 2.22 典型结构上电流密度分布

与此现象对应，实际电镀的芯片几乎每个结构的此部位都起皱（图 2.23 所示）；梁体上电流密度次之，起皱的概率随机。由于梁体横向边缘有光刻胶模具提供压力，皱纹很少蔓延到，镀层中部相对容易与基底分离，皱分布较多；梁纵向边缘电流密度最小，加上光刻胶压力，几乎没有皱。

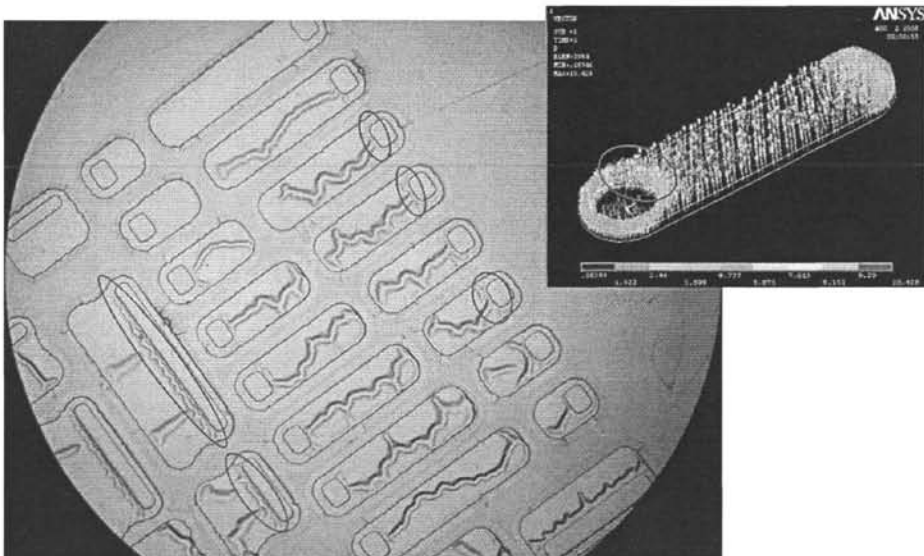


图 2.23 实际起皱部位与仿真敏感区的对应

#### 2.4.3.4 起皱的抑制及其引起的潜在问题:

以上分析得出初始温度较高导致的氢分子团溢出是导致薄镀层起皱的根本原因,因此降温对抑制起皱有最显著的效果,如图 2.24 不同温度下同样位置镀层的表面和剖面对比图。

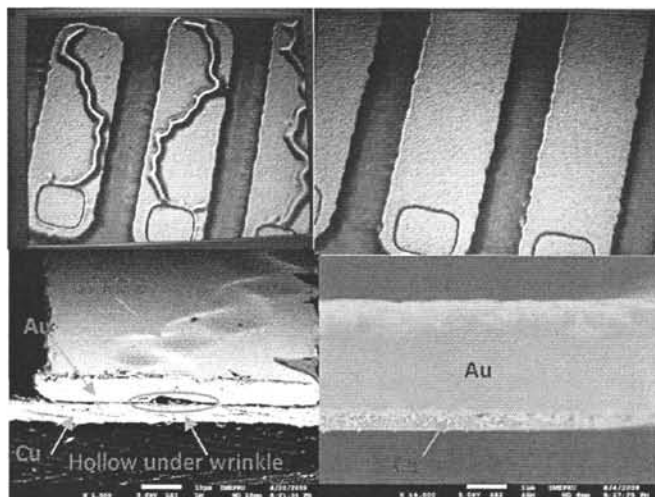


图 2.24 降温后对起皱的抑制

但是 65 摄氏度是 KFC88 电镀液的推荐温度,这对镀液的流动性,光亮剂的活性,离子的电迁移率都是最理想的温度。人为的把温度降到 25 摄氏度后会有一系列潜在的问题:

##### 1. 镀液粘稠度上升。

这会导致电镀离子迁移速率降低,电流效率降低,这会导致发生明显水解析氢,出现灰状镀层的电流阈值变小,也就是镀液允许的极限电流密度下降。为了时实际电流不超过此极限电流的限制,此时相应调小了 0.1asd 的电流密度,但为了保证成核速率,减小电镀晶粒体积,电流密度又不能太小,电解水仍然相对严重,析氢明显。这种析氢产生的氢分子团在基底上由于降温后膨胀率减小而被抑制,不会轻易从铜种子层上析出。在镀层上则表现在附氢-析氢后镀层拉应力变得很明显,此过程如图 2.25 所示。

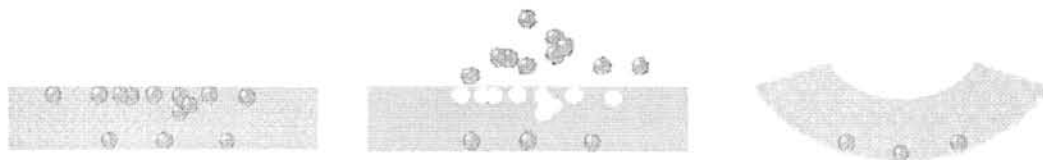


图 2.25 镀层上过度析氢导致的拉应力