潜力巨大的微技术世界

20 世纪 80 年代，在集成电路技术的基础上诞生了世界首套微机电和微流体系统。从那时起，微技术领域的发展可谓日新月异。如今，微技术已在环境条件极为复杂的油田领域得到广泛应用。

Dan E. Angelescu
Christopher Harrison
Ronald van Hal
Joyce Wong
美国马萨诸塞州 Cambridge

Eric Donzier
Olivier Vancauwenberghe
法国 Elancourt

Anthony R. H. Goodwin
美国得克萨斯州 Sugar Land

Maria Manrique
英国剑桥

Yu-Chong Tai
加利福尼亚理工学院
美国加利福尼亚州 Pasadena

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：英国剑桥的 Andrew Meredith；美国马萨诸塞州 Cambridge 的 Vincent Loccisano 和 Ram Shenoy。同时感谢马萨诸塞州 Cambridge 的 Philip Dryden，Gale Gustavson，Bhavani Raghuraman，Robert Schroeder 和 Jagdish Shah 在 Diver 仪器开发过程中所做的贡献。这些仪器用于地下水和地表水水质参数的长期监测。还要感谢得克萨斯州Plano得克萨斯仪器公司的 Mike Douglass。

Axia，Diver，LFA（MDT仪器的实时流体分析仪）及 MDT（模块式地层动态测试器）等是斯伦贝谢公司的商标。Digital Light Processing 及其缩写 DLP 是得克萨斯仪器公司的商标。

在将来，只要您稍加留意就会注意到将电子和机械元件融为一体的诸如传感器和执行器等小型装置器件随处可见。今天，这些产品已成为汽车、医疗及消费电子等领域不可缺少的一部分。

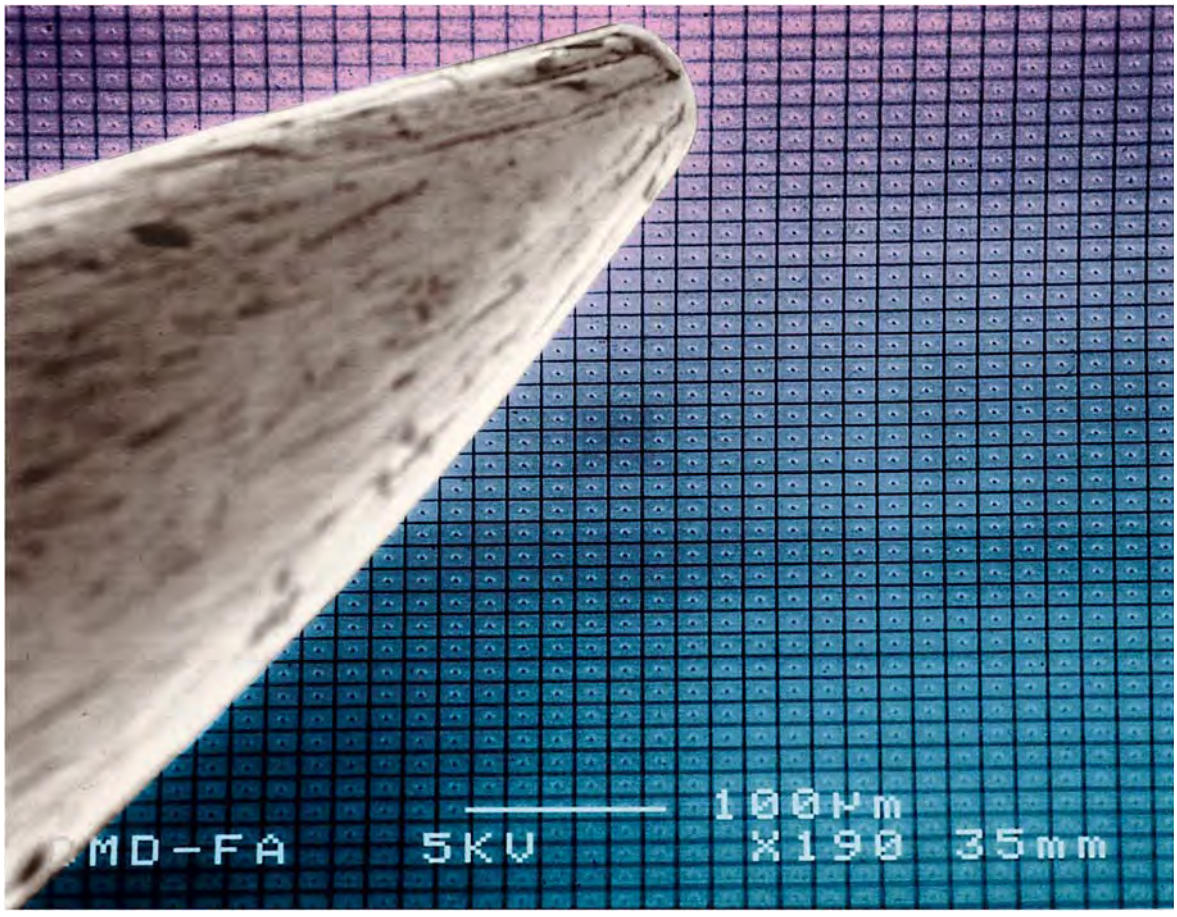
电子技术的发展历程向人们展示了产品小型化的诸多优点。20 世纪初的真空管到了 20 世纪 50 年代被晶体管取代，而到了 60 年代晶体管又被集成电路取代。目前人们广泛使用的微处理器诞生于1971年，它们能够以极高的速度进行运算。今天，随着价格的下降，具有超大内存的个人计算机已进入普通消费者家庭。科研人员和制造业者目前也期盼着微机电系统（MEMS）和微流体技术领域能取得同样巨大惊人的进步[1]。

那么到底多小才算微小呢？美国国家科学基金会对制造尺寸等级定义如下："微"级的尺寸范围为 1 微米到 1 毫米（0.00004 英寸到 0.04 英寸）；"纳"级的尺寸范围小于 1 微米[2]。比较起来，人的头发的直径一般为 50 到 100 微米（0.002 到 0.004 英寸），而一个碳原子的直径约为 0.1 纳米（4×10^{-9} 英寸）。微米级的制造加工要求实现机器设备的微型化。在很多情况下，利用机械效应（如材料薄层的振动）就可以实现这一制造加工。而纳米级制造加工是在分子层面上进行的，涉及到分子效应。这些内容超出了本文讨论的范围。在纳米和微米领域之间是介观器件的世界，在这里，量子效应和经典效应共同发挥着举足轻重的作用。

多数 MEMS 器件由硅基微电子装置和微电机组成，硅基微电子装置的功能相当于系统大脑，而微电机则相当于系统的眼睛和四肢。这些器件以多种方式对周围环境进行探测和控制。传感器能够探测热量、机械、化学及光学变化，而执行器能够运动至目标位置，对其周围环境中的各种元件进行测量和调节。

一般情况下，微流体装置能够对体积极其微小（微升或纳升）的流体进行控制以精确引导流体流动方向，并测量流体性质和执行其它众多任务。微流体装置的开发始于 20 世纪 90 年代初。它们被置于硅、玻璃、金属、塑料或合成橡胶内，其许多元件和泵、阀、混合器、过滤器及分离器等宏流体装置的元件相同[3]。近来，人们开始越来越多地使用基于印刷和铸模弹性器件的软光刻制造工艺来制造微流体系统。这一趋势在医学和生物医学界的应用研究尤其明显。这些方法将微流体系统从洁净室带到普通实验室并为微流体装置用户提供了更大的灵活性[4]。

许多人可能还不知道 MEMS 已经在我们的日常生活中发挥了重要的作用。例如，汽车气囊系统就使用 MEMS 加速计作为触发传感器。另外，微流体装置还具有精确处理流体的功能，如喷墨打印机头。



^ 数以百万计的微镜。此照片显示的是得克萨斯仪器公司生产的DLP芯片的一部分。该芯片用于生产数码视频类消费产品。照片左侧的“巨大”物体为日常用大头针的针尖，用其作为参照物来显示微镜的尺寸。这一特殊的MEMS器件含有多达200万个规则排列相互铰接的微镜。（照片由得克萨斯仪器公司提供）。

目前人们已经开始利用MEMS来监测关键元器件(比如像飞机那样造价高昂的结构体构件）的结构疲劳情况。另外，MEMS在油田中的应用也具有很大潜力[5]。微光学系统被广泛应用于光纤通讯中。在消费电子领域，得克萨斯仪器公司开发出了Digital Light Processing (DLP) 技术及用于大屏幕数字电视、投影仪和数码相机产品的DLP芯片[6]。DLP技术含有高达200万个规则排列相互铰接的独立微镜。每一微镜的宽度约为15微米（0.0006英寸）并产生一个输出图像像素（上图）。

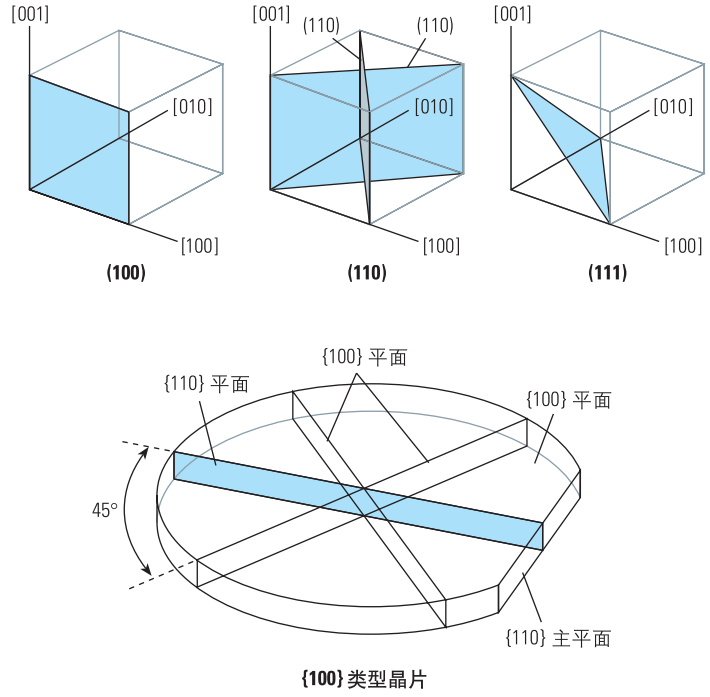
科研人员正逐渐加大MEMS和微流体技术的开发力度以实现“芯片实验室”微型技术在医疗领域的应用。例如，人们正在开发微技术来分离互补DNA链并通过对DNA进行周期性热处理来生成多个同样的DNA链。人们还利用类似技术来确定病毒类型[7]。据报道，2005年，MEMS仅在医疗领域的应用就创造了将近10亿美元的收入[8]。

致力于推动勘探开发工业向前发展的工程技术和科研人员已将目光投向微技术领域。尽管存在一些缺点，微技术的开发仍在继续。在某些领域这一开发步伐非常迅速，而在一些领域开发则在谨慎进行。本文介绍微机电系统的基本概念，包括它们在应用过程中体现出来的优点及出现的问题等。我们还将探讨微机电系统的制造方法及其在油田中的应用等。

1. 本文中，微机电系统的单数和复数形式均采用缩写“MEMS”表示。
2. http://www.nsf.gov/mps/dmr/nanotech.pdf（2007年3月15日浏览）。
3. Ouellette J：“A New Wave of Microfluidic Devices”，*The Industrial Physicist*，9卷，第4期（2003年）：14-17。

   Stone HA，Stroock AD和Ajdari A：“Engineering Flows in Small Devices：Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip”，*Annual Review of Fluid Mechanics* 36（2004年1月）：381-411。
4. 洁净室是指用于进行加工制造和科学研究的设施，在此类设施中，对灰尘、空气微生物、悬浮微粒及化学蒸汽等环境污染物水平进行控制。根据每单位体积内一定微粒尺寸的微粒数目，可将洁净室划分为若干个等级系统。洁净室需要使用多种精密过滤、空气循环和空气密封系统并执行严格的人员管理步骤来保证其洁净度。洁净室经常使用颗粒计数器来监测防污染措施的效果。
5. Morse J，Laskowski B和Wilson AR：“MEMS-Based Corrosion and Stress Sensors for Non-Destructive Structural Evaluation”，SPE 71464，发表在SPE技术年会暨展览会上，新奥尔良，2001年9月30日-10月3日。
6. http://www.dlp.com/dlp_technology/dlp_technology_overview.asp#1（2007年2月28日浏览）。
7. http://www.memsinvestorjournal.com/2006/08/biomems_has_bee.html（2007年3月16日浏览）。

   http://www.wtec.org/mems1/report/09-Chapter_7.pdf（2007年3月16日浏览）。
8. http://www.researchandmarkets.com/reports/c39504（2007年3月12日浏览）。



^ 半导体晶面。上图为米勒指数示意图，是以数学的方法通过使用“0”或“1”组成的三位数字指代平面和方位来描述晶体的一种方法。平面用“()”来表示，方位用“[]”来表示，“{}”表示一组等晶面。下图为典型的{100}硅晶片，显示了各晶面的取向。这一信息对开发微机电微机械加工流程至关重要。材料生产商一般从硅锭上切割晶片。最上面的平面被称为剖面。扁平面决定晶体结构的取向，并且在很多情况下能够为生产商提供有关电特性取向方面的信息。

基本原理

有关MEMS技术在油气勘探与生产领域应用的核心问题是微技术产品大小尺寸的问题。体积小有体积小的优势。微机电产品适于在狭小空间（如井眼或井下仪器）内工作，占用空间很小。在空间非常宝贵的情况下，这一点显得尤为重要。这些产品的能量消耗和硅基微电子产品的能量消耗相当，而比用来执行类似任务的宏观器件的能量消耗要低。另外，一旦能够设计出有效的微机电系统制造方法，微机电系统的规模化生产便可以节省成本。在工业领域，微机电系统业已向人们展示了其可靠及易于和目标系统相融合集成的特性。

集成电路工业使得硅这种材料众所周知。硅为金钢石晶体结构，由立方体基本单元构成。这些特点都决定了硅是一个理想的微米级加工制造材料。就其机械性能而言，硅适合用作MEMS的制造材料。进行掺杂处理后（集成电路加工制造中普遍采取的做法），硅能够任意定制以满足不同的电子设计要求。

了解硅的晶状结构对微机械制造来说至关重要（上图）。硅的三个主轴的对称性及三个晶体平面之间的关系将决定蚀刻形状并最终决定MEMS的功能。MEMS的基本构件－晶状结构－能够以较低的成本在晶片中生产完成。多晶硅和非晶硅通常沉淀为薄膜，广泛应用于MEMS生产。多晶硅目前已成为制作微机械结构，实现MEMS设备内部电气互联所需的一种非常重要的材料[9]。

从最初的概念设计到器件的加工制作，计算机辅助设计（CAD）工具在高性能微机电系统器件的设计、分析及制造中均发挥关键作用。目前市场上有多种CAD商业软件，其中包括COMSOL、SoftMEMS、Conventor、CFDRC及Intellisense软件公司的产品。在设计的初期阶段，CAD工具会为用户提供一个涵盖二维设计草图、材料性质及流程的数据库，并使用户具备生成三维模型的能力。在分析功能方面，除了材料和流程相关性，多数CAD工具还集成了用于解释机械、热、静电、磁及流体参数的多重物理模型，以便在制造MEMS设备前能更加精确地预测其性能。上述所有特性都将有助于优化MEMS设备的性能，从而缩短整个开发周期。

在制造流程中，包括氧化硅、氮化物、碳化物及各种金属（如铝、钛、钨、金、铂和铜）在内的构造材料在沉积后会形成薄膜。之后经过一系列微机械加工流程（包括层沉积、光刻、蚀刻及键合等步骤），能够批量制造出小型机械或电动机械等装置。

由于硅是半导体，所以高温对MEMS电子产品设计有很大的不利影响。例如，广泛应用于微机电技术中用于测量压力、张力和加速度的压敏电阻器受温度的影响极大。为了确保设备在规定工作范围内能够稳定输出数据，必须对这些温度效应进行分析和补偿[10]。

另外，悬挂、移动式的MEMS设备非常容易受损，必须对其进行特殊的保护封装。由于腐蚀性液体会损坏未受保护的MEMS，在选择MEMS材料时流体相容性经常成为一个需要考虑的重要因素。在MEMS设备中用于传输电流的金属丝其宽度仅约为30微米（0.0012英寸），必须通过极其精细的引线结合法连接到标准接线上去，很容易出现故障。而且，MEMS设备一旦损坏很难维修。由于尺寸的缘故，如果流体中含有微小颗粒，直接接触流体的MEMS和微流体装置就可能被堵塞，导致装置无法正常工作。

微流体装置已经在微粒很少的洁净流体中得到了成功应用。但油田中的流体微粒含量通常较多。微米级流体的物理性质和其在正常状态下的性质没有什么区别。然而，较高的剪切速率和较大的表面积-体积比会导致表面张力及粘滞力在微米级流体的各作用力中占主导地位，从而可能使作用于流体的力的平衡状态发生变化[11]。微米级的电力同样也发挥着重要作用。例如，可以利用外加电压来控制微流体系统中的流体流，而在微米以上级别的系统中，外加电压不会产生任何效果。

在某些情况下，经济方面的问题就在于初期设计和制造费用以及某些固定成本（如维护昂贵的洁净室和装配设施所需的费用）过于昂贵。这样，即使批量生产能够降低单位生产成本，但如果制造的数量不多，MEMS的批量生产优势也还是会迅速化为乌有。

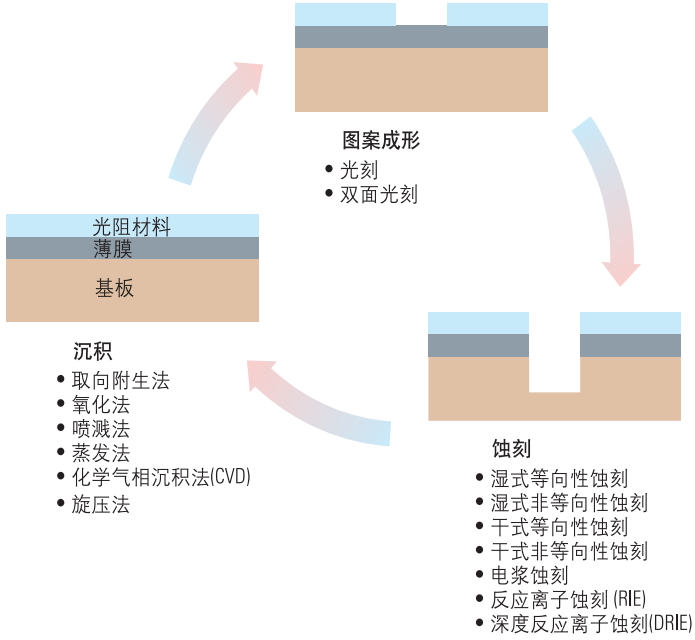
发展中的微技术

制造加工 MEMS 和微流体装置不仅要考虑其经济可行性，还要考虑其制造方法，制造方法决定了它们的功能。MEMS技术的很多优势都源于制造中所采用的材料。与半导体集成电路的制作一样，硅因为多种原因已成为制造 MEMS 的首选材料。除了成本较低外，硅的晶体结构为微加工提供了近乎理想的电力和机械性能。

MEMS微机械加工中所使用的许多技术最初是为集成电路工业所开发的。但是，MEMS 制造还需要许多新技术，主要用于制作三维结构。这些新技术往往无法与集成电路制造技术兼容，迫使MEMS制造商们不得不去建立起自己的实验室和加工厂。

一般情况下，MEMS器件的制造过程分三步进行（请参见下一页“MEMS的制造”）。首先在一块适当的基板上（通常使用硅，有时也使用蓝宝石）完成薄膜的生成或者沉积。接下来通过光刻工艺确定图案，然后再通过蚀刻工艺建立起一个三维结构（右上图）。重复以上步骤就能够制造出更加复杂的结构。有时候可以省去沉积和蚀刻步骤，用光阻材料（通常为光敏乳胶或聚合物层）作为牺牲层来制造自由悬挂结构，或者用光阻材料作为图案来选择性地生成新材料。MEMS 制造的第四个可能的步骤是将两个或多个晶片键合在一起。所有这些工序都应该在极其洁净的环境下完成。这是因为，在这一级别上，即使是极其微小的颗粒也会导致产品缺陷，影响装置的性能（右下图）。

（下接第 66 页）



^ MEMS微机械加工的典型步骤。加工人员首先在一块基板底板上（通常为硅质）进行薄层或薄膜的沉积。然后使用光刻掩膜来确定哪些材料需要去除哪些需要保留。接下来是蚀刻步骤，根据光刻掩膜来选择性地对材料进行去除或保护。此处列出了实现上述每一步骤的各种方法。上述步骤可多次重复直至达到设计要求。

^ 制造MEMS传感器的洁净室设施。洁净室用来控制环境污染物（如尘埃、空气微生物、气溶胶颗粒及化学蒸汽）的水平。这些污染物如不加控制可能会影响MEMS的制造。洁净室需要使用多种精密过滤、空气循环和空气密封系统并执行严格的人员管理步骤来尽可能降低污染水平。

9. Maluf N：“The Sandbox：Materials for MEMS”，*An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*（Maluf N 和 Williams K 合著）。马萨诸塞州波士顿：Artech 出版公司（2000 年）：20-34。

10. Siva Prasad MSY，Kumar S 和 Ravi G：“Modelling and Experimental Verification of Temperature Effects of a Piezo-Resistor and Design of Compensation Electronics”，ISSS-2005/SE-08，发表在国际智能材料、结构及系统大会上，印度班加罗尔，2005 年 7 月 28-30 日。

11. Ouellette，参考文献 3。

MEMS 的制造

MEMS制造过程中的薄膜沉积既可以通过化学方法也可以通过物理方法实现[1]。化学方法就是利用气体和液体的成分与基板发生反应形成薄的致密材料层。以下是几种常见的化学方法：

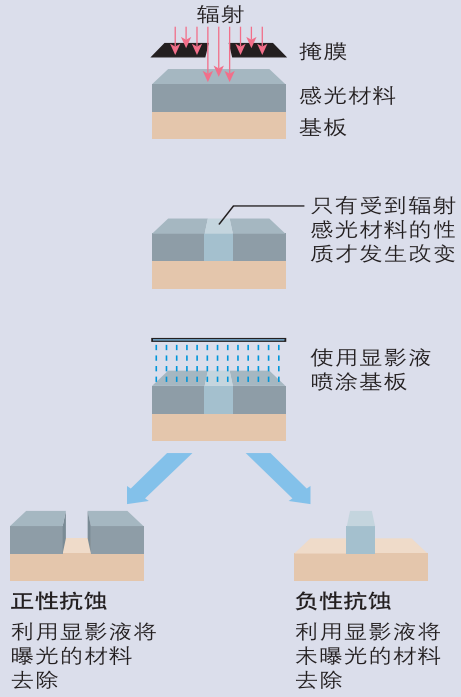
化学气相沉积法（CVD）—通过利用高温－通常超过300°C（572°F）－在可控的环境下进行表面反应来沉积生成高质量的薄介电层或金属层。

电解沉积（电镀）法—是一种利用电解液中的基板和电极之间形成的电势来沉积铜、金或镍金属层的方法。

取向附生法—利用此方法能够生成1－100微米厚、具有相同晶向的结晶层作为结晶基板，或在非晶基板上生成多晶层。

热氧化法—这一相对简单的方法是通过对材料进行氧化生成薄绝缘层或牺牲层，而牺牲层随后会被去除。MEMS制造中生成的氧化层通常是二氧化硅（SiO_2）层。

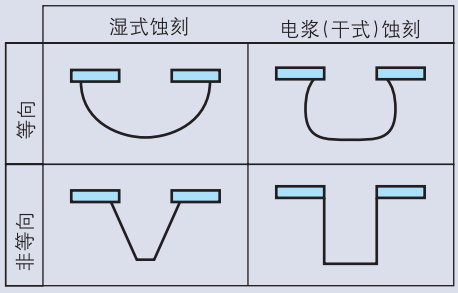
物理沉积法直接将成层材料置于基板之上而无需利用化学反应。常见的物理法包括物理气相沉积法和铸塑法。物理气相沉积法是在真空状态下，通过蒸发来气化镀膜材料，然后使其冷凝到基板上的一种膜层制取方法，或者在真空状态下通过溅射工艺利用等离子气体（如氩）的高能离子轰击原材料，使原材料的原子释放出来并沉积到基板表面。铸塑法工艺简单，多用于聚合物沉积。该方法首先将原材料溶入溶剂，然后喷涂在基板晶片材料上。



^ 光刻工艺。使用带有所需图案的掩膜可以选择性地对光辐射进行阻挡。在掩膜下面曝光过的感光材料（光阻材料）在显影过程中要么具有易蚀性要么具有抗蚀性。

MEMS制造的第二个步骤一般是利用辐射光源（如紫外光）将精细图案转移到光阻材料上。当受到一定波长的光线的辐射时，光阻材料层的物理性质会发生变化。光阻材料的材质决定光阻材料层的曝光部分会溶于显影剂（即正性抗蚀）还是会发生聚合而不溶于显影剂（即负性抗蚀）（上图）。

在MEMS微机械制造中，要确定一个MEMS装置的图案通常需要经过10到20个光刻掩膜工序。确定该图案的一个极其重要的目的是为了确保在微机械制造过程中所有步骤都能保持一致。为实现这一目标，在曝光过程中，基板晶片上的对准标记必须和光刻掩膜所确定的对准图案对齐。新出现的对准标记会被印到顶层上，以便原来的对准标记消失后供校准之用。



^ 湿式蚀刻的等向性、非等向性蚀刻截面与干式蚀刻的等向性、非等向性蚀刻截面轮廓对比。湿式蚀刻会导致侧蚀现象的发生。由于侧蚀会影响器件的性能和结构的完整性，在某些MEMS制造中要求避免侧蚀的出现。当需要获得垂直壁时，尤其是在那些横向尺寸小的结构中，最好采用干式蚀刻技术。

为了成功实现图案的转移进而按要求的数量去除材料，必须正确选择辐射量和辐射波长。决定单位体积光阻材料辐射剂量的因素包括目标材料的类型、厚度以及光阻材料层下面的材料层是反光材料还是吸光材料。散射和衍射光会导致不希望曝光的区域在显影的过程中出现蚀刻（在正性抗蚀情况下），或保留下来（在负性抗蚀情况下）。曝光过度和曝光不足会因为材料剩余过多或过少而影响最后的蚀刻质量，进而影响装置的功能。

微机械制造中的第三步是蚀刻，即选择性地去除由光阻材料层所确定的图案中的某些材料。常见的蚀刻方法有两种－湿式蚀刻和干式蚀刻。选用哪一种蚀刻方法取决于多种因素，如蚀刻材料的材质、掩膜材料材质、MEMS设计中所要求的蚀刻形状以及微机械制造中可允许的成本开支等。

1. http://www.memsnet.org/mems/processes/deposition.html（2007年3月16日浏览）。

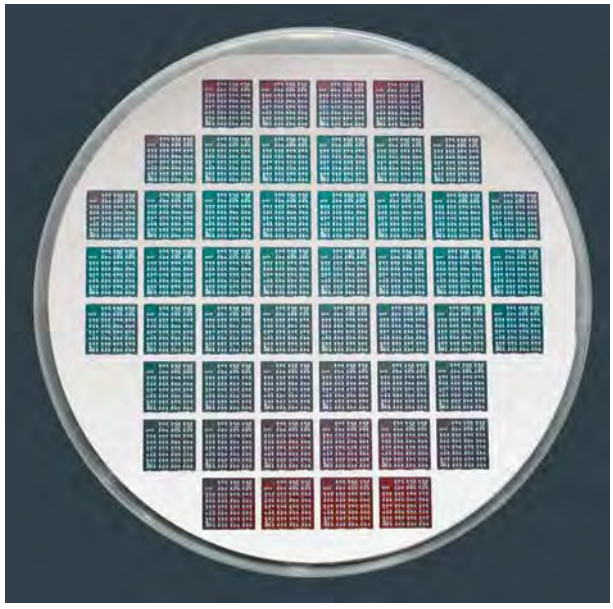
湿式蚀刻是两种蚀刻技术中相对简单的一种，它利用溶液将目标材料上设计好的图案中的某些部分溶解。该方法的详细工艺要复杂得多，其关键在于控制好光刻掩膜模板和蚀刻材料的平衡。光刻掩膜模板不会发生溶解或者只以相对低得多的速度溶解。蚀刻一般分为两种：等向性蚀刻和非等向性蚀刻。等向性蚀刻在各个方向上的蚀刻速度均一致，而非等向性蚀刻在某个方向上的蚀刻速度大于其它方向上的蚀刻速度。

单晶和多晶硅湿式蚀刻中经常采用的蚀刻剂为氢氟酸（HF）、硝酸（HNO_3）和醋酸（CH_3COOH）的混合物。氮化硅及金属（如铝）的湿式蚀刻经常采用含有磷酸的混合物。当需要在硅中获得非等向性蚀刻轮廓时，一般采用定向蚀刻剂，如氢氧化钾（KOH）和四甲基氢氧化铵（TMAH）。关于为何在某些硅晶体平面上会形成择优蚀刻，一种普遍的观点是该现象的发生是由某些平面的键合强度减弱导致的。另外一种观点认为可能是由于某些平面的表面氧化速度较快，导致它们更难进行蚀刻。

当图形的横向尺寸小，同时要求图形具有清晰的垂向蚀刻轮廓时，最好采用另外一种工艺－干式蚀刻。反应离子蚀刻（RIE）是一种干式蚀刻技术，它利用反应器内的等离子气体混合物和物理及化学工艺来精确地去除材料。反应器内的气体接触到电场后会产生电浆和离子体。受电场作用，电浆离子会加速向基板材料转移，轰击到基板表面。而在基板表面发生的化学反应能够辅助物理轰击有效地对材料进行蚀刻。要想制造出预期效果的表面，如垂直侧壁，加工人员必须很好地平衡物理和化学作用，即平衡用于等向性蚀刻的化学反应和非等向性蚀刻的物理轰击（左上图）。

深度反应离子蚀刻（DRIE）是一种更加复杂的反应离子蚀刻技术。该技术诞生于20世纪90年代中期，用于实现硅基板的快速、深度蚀刻。蚀刻深度可达500微米（0.02英寸）以上。

没有物理性蚀刻步骤的反应离子蚀刻工艺被称为电浆蚀刻。另外，有一种更加简单的干式蚀刻技术－气相蚀刻法。它利用氢氟酸（HF）在反应室内对二氧化硅或利用二氟化氙（XeF_2）对硅进行溶解来蚀刻基板。一般说来，干式蚀刻要比湿式蚀刻技术成本高，但其精度也更高，更加符合工艺越来越精细的MEMS设计要求。



^ 扩大制造规模。该照片显示的是一个制造完成的晶片。它包含800个器件，其中50个是不具任何功能的试验结构。该晶片内的芯片将用于制造由斯伦贝谢和Caltech联合设计的MEMS压力传感器。晶片的直径为100毫米（4英寸），每个传感器芯片的尺寸为2毫米×2毫米（0.08英寸×0.08英寸）。

在多数情况下，在一片晶片上要加工许多个器件。随后，晶片要进行精密切割，形成批量的MEMS（上图）。

斯伦贝谢的大多数MEMS设计和测试项目都是由其位于美国马萨诸塞州Cambridge的斯伦贝谢道尔研究中心（SDR）和位于法国Elancourt的斯伦贝谢MEMS技术中心（MEMS TC）来承担的。斯伦贝谢已经联合美国加利福尼亚理工学院（Caltech）以及法国巴黎的高等电子学与电子技术工程师学院（ESIEE）开始生产斯伦贝谢MEMS装置样机。目前日本长野的Olympus加工厂已完成了几轮加工。

微技术在油田上的应用

鉴于井眼的内部空间狭小，MEMS和微流体装置似乎应该毫无疑问地能够在各种勘探开发技术中得到应用。这些装置占用空间小，流量小及能耗低，是井下作业的理想工具。原则上，如果能够制造出一种能够装载多个分别执行不同功能的MEMS传感器的设备仪器，那将是非常具有吸引力的装置。

在大多数情况下，加工完成的MEMS和微流体装置是以芯片的形式离开工厂的，非常容易破碎。因此，MEMS封装对装置的完好性及其性能有着极其重要的影响。对那些环境条件恶劣的油田来说这一点尤其重要。

斯伦贝谢的MEMS专业封装技术是由斯伦贝谢道尔研究中心、位于法国Elancourt的斯伦贝谢MEMS技术中心和位于日本神奈川县相模原的SKK技术中心设计和测试的。该技术用于达到以下几个目的：首先，通过封装，MEMS设备才能够被机械连接到工作系统中；其次，通过封装，MEMS设备才能够与系统电子装置进行电气互联；另外，封装的作用还在于实现MEMS电气互联的绝缘，同时保护装置不受腐蚀、侵蚀、冲击及振动等影响。包装通常能够吸收巨大作业压力所引起的应力，从而使MEMS和微流体芯片能够在无应力的环境下工作，令芯片的内部和外部压力达到平衡。

油田的压力测量工作已经开始受益于MEMS技术。斯伦贝谢与Caltech合作开发了一系列MEMS压力传感器。这些传感器的精度与宏观传感器相当，线性响应高达25000 psi（172.37 MPa），在150°C（302°F）温度下的稳定度小于2 psi（13.8 kPa）/月。压力传感器是基于仅有几微米厚的低应力氮化硅膜而设计的，它利用多晶硅压敏电阻和惠斯通电桥原理来测量应变诱导的电阻变化情况（下一页，上图）。利用反应方程来记录装置的输出电压，进而换算出绝对压力值。

MEMS压力传感器封装采用凝胶和环氧树脂来保护中、短期使用寿命型的装置。长期使用寿命型的MEMS压力传感器则需要更加坚固的封装。利用填充了少量非腐蚀性可压缩油的薄膜或真空膜盒可以对传感器提供隔离保护，使其免受外界环境的影响。然而，这种封装会影响装置的灵敏度并可能对装置的测量精度，重复性以及尺寸造成影响。尽管如此，实践证明，采用真空膜盒仍是防止压力传感器受到腐蚀和侵蚀最有效的方法。

压力测量（包括其它多种参数的测量）要受到温度的影响。在开发装置响应算法时，温度是必须考虑的一个因素。幸运的是，几乎所有MEMS传感器都能够通过测量金属或非金属压敏电阻器（如多晶硅）的电阻来测得温度。材料的电阻会随温度的变化而变化，而变化幅度取决于材料的温度系数。该系数为一已知的常数。

电潜泵（ESP）是应用MEMS压力传感器的一个例子。MEMS压力传感器是斯伦贝谢Axia ESP举升系统的重要构成部分。该系统提供实时监测、监控及诊断分析。

除了压力测量之外，传感器小型化

12. Vancauwenberghe O，Goodwin ARH，Donzier E，Manrique M和Marty F："Resonant MEMS Microsensor for the Measurement of Fluid Density and Viscosity"，发表在第17届欧洲传感器会议上，葡萄牙Guimaraes，2003年9月21-24日。

13. Span R和Wagner W："Equations of State for Technical Applications.II.Results for Nonpolar Fluids"，*International Journal of Thermophysics*，24卷，第1期（2003年1月）：41-109。

14. Huber ML，Laesecke A和Xiang HW："Viscosity Correlations for Minor Constituent Fluids in Natural Gas：*n*-Octane，*n*-Nonane and *n*-Decane"，*Fluid Phase Equilibria*，224卷，第2期（2004年）：263-270。

15. Goodwin ARH，Donzier EP，Vancauwenberghe O，Fitt AD，Ronaldson KA，Wakeham WA，Manrique de Lara M，Marty F和Mercier B："A Vibrating Edge Supported Plate，Fabricated by the Methods of Micro Electro Mechanical System for the Simultaneous Measurement of Density and Viscosity：Results for Methylbenzene and Octane at Temperature between（323 and 423）K and Pressures in the Range（0.1 to 68）MPa"，*Journal of Chemical & Engineering Data*，51卷，第1期（2006年）：190-208。

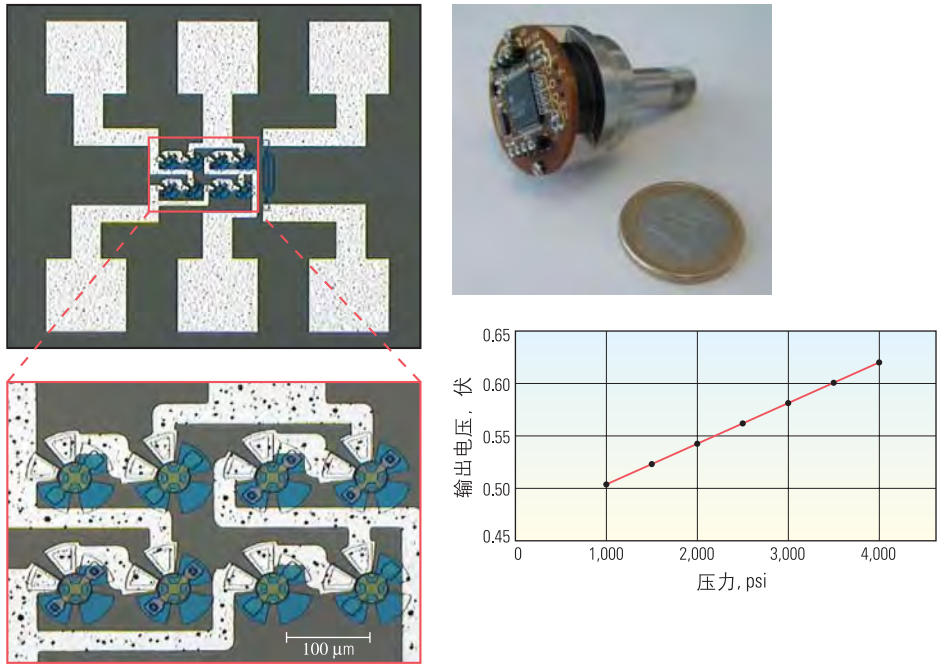
对于测量流体性质（即流体密度和粘度）可能有着极其重大的意义。DV MEMS是一款颇具潜力的设计，它利用由熔结的硅绝缘体（SOI）晶片顶层制成的薄振动片进行工作[12]。

振动片的振动是通过将传感器放入磁场，同时让振荡电流通过板上线圈来实现的。振动力的大小与垂直于磁场的导体长度、磁场强度和电流强度的乘积成正比（右下图）。

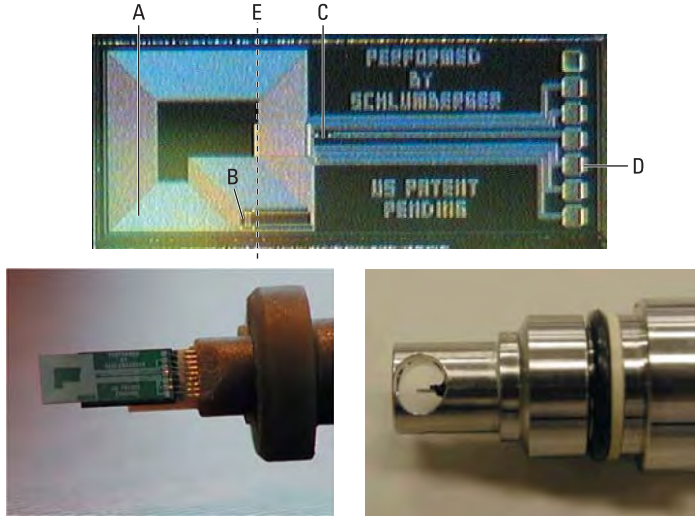
和其它振动元件技术一样，DV MEMS 传感器利用应变仪—而在此处，利用惠斯通电桥配置的压敏电阻器靠近振动片的固定端—来测量谐振频率和质量因子。环绕振动片的流体会降低真空装置所记录的参考值的谐振频率和质量因子。振动片与流体的相互作用使用户得以确定流体的密度和粘度。具体来说，由于作用于振动片的流体质量的增加，频率会随着流体密度的增加而下降。随着流体粘度的增加和振动片振动幅度的不断衰减，质量因子将下降。

科研人员首先根据已被业界认可了的某一温度下的甲苯密度和粘度值对DV MEMS 设备进行了调校，然后将其用于确定温度范围在323K 至 423K（122至302°F）时的辛烷密度和粘度。辛烷密度的测量结果与通过公认的密度计算公式计算出来的结果相比，误差不到（±）0.5%[13]。同时，科研人员将使用DV MEMS设备确定的辛烷粘度与文献中记载的粘度值也进行了比较[14]。当温度在423K以下时，粘度值与文献值相差（±）5%。当温度为423K时，DV MEMS 辛烷粘度测量结果与文献值相差不到（±）13%。然而，在考虑了DV MEMS粘度测量结果的最大不确定性以后，该结果与使用振动丝粘度仪（一种常见的用于测量粘度的实验室设备）测得的粘度值是基本吻合的，即误差不超过（±）6%。

此DV MEMS 设备已经过斯伦贝谢道尔研究中心、Sugar Land 产品技术中心（SPC）以及位于加拿大阿尔伯塔省埃得蒙顿的斯伦贝谢储层流体中心（SRFC）的全面测试。DV MEMS 传感器研究的近期目标是开发出一个综合模型，然后利用其对适合油气田作业的流体密度和粘度范围展开研究[15]。然而，



^ Caltech和斯伦贝谢道尔研究中心所开发的以铝进行互连、带有引线键合焊盘的压力计芯片。芯片是一个边长为2毫米（0.08英寸）的正方形（*左上*）。通过传感原件的放大图（*左下*）可以看到用来防止在过压时绝缘击穿的氮化硅薄膜（绿色）、多晶硅电阻器（蓝色）和铝质互连装置（白色）。该MEMS装置经封装后可应用于条件恶劣的井下泵送作业，斯伦贝谢Axia与Axia-XT ESP举升服务系统用它来对泵进行监控（*右上*）。图中的一欧元硬币用来作为尺寸参照。测试表明此压力传感器的响应呈线性（*右下*）。



^ 用于测量流体密度和粘度的振动片。最上面的一幅照片显示的是DV MEMS装置的顶部：A为铝线圈，B为惠斯通电桥，C为含硼的多晶硅电阻器，用来充当温度计，而D为引线键合焊盘。虚线E左侧部分的振动片厚度为20微米（0.0008英寸），在虚线的右侧，传感器还有350微米（0.014英寸）厚的单晶硅。下面的照片为位于法国Elancourt的斯伦贝谢MEMS技术中心所开发的低成本封装样机，包括复杂的引线键合设计（*左下*）。右下图是来自SKK的更加坚固的封装设计，是对Kyocera设计改进的结果。它不但适于日常应用还能够在极端的温度和压力环境下使用。振动片安装在流体流经的圆形开孔的中心。

该器件在使用中需要不断地校准，而即使是这样，也常常很难得出进行测试的流体的综合性质。例如，在这一尺寸级别上，要想建立起移动固体与可压缩流体之间相互作用的数学表达式是非常困难的。

另外一组用来研究流体性质的微技术采用微流体装置。在微流体装置制造

中使用越来越多的软光刻、塑料成型制造技术适用于普通的温度和压力环境，用来测试相对洁净的水体。目前该技术已被斯伦贝谢水资源服务部门所采用，并应用于 Diver 仪器用来长期监测地下水和地表水的水质参数。

例如，为了实现在水资源服务市场上的应用，斯伦贝谢对其模块式地层动态测试器（MDT）的实时流体分析仪（LFA）所采用的 pH 值测量方法进了微型化和自动化处理[16]。由此开发出来的聚合物芯片尺寸仅有 1 × 3 英寸，其构成组件包括一个入水口、一个染料容器、若干流体电阻器、一个被动式混合器、一个光识别区、一个泵及一个出口过滤装置。所有这些组件均由微流体通道相互连接。由于不采用真空管进行互连，连接不易损坏，并且所有元件都安装或使用激光焊接在芯片上（右上图）。

每次测量时，该系统采用光谱检测法在50微升试样（此剂量足够对芯片内的通道完成五次清洗）和1微升的试剂中测量 pH 值。整个系统集成在 Diver 仪器上。它能够以仅相当于两节半 AA 电池的能量消耗完成 600 次测量，连续六个月独立完成包括数据处理和数据存储等各项任务。微流体装置占用空间小是该装置一个很重要的优势。

斯伦贝谢还开发了许多微流体装置来执行各类流体控制功能（如微流体通道内部的相分离及流量监测）。虽然每一种装置只执行某一特定功能，但若将几种装置结合起来，他们就成了“芯片实验室”－流体工厂的基本构成单元。

^ 用于洁净水分析的集成微流体装置。用于长期监测地下水和地表水水量及水质参数的斯伦贝谢Diver仪器能够测量出很少量的相对洁净水样的 pH 值。该仪器由一个入水口、一个染料容器、若干流体电阻器、一个被动式混合器、一个光识别区、一个泵及一个出口过滤装置构成。所有组件均由微流体通道相互连接。该装置能够连续六个月独立完成数据处理和数据存储等各项任务。照片中的 25 美分硬币用来提供尺寸参照。

微技术潜力巨大

回顾技术发展的历史，每一项新集成技术的应用都会带来成本的大幅下降以及效率和性能的显著提升。随着油气工业 MEMS 的不断发展，传感器、执行器和计算单元有朝一日可能会被集成在一块芯片上。目前还没有哪一项技术能够将所有这些功能都完美地融入到现场作业系统中。倘若能够为油田开发出一种能够对环境进行远程监控、解释和控制的装置，将会对整个勘探开发行业带来巨大影响。

分子间的作用力对化学工艺有着决定性的影响。如果掌握了这些力的相关知识，那么就可以准确地预测油气藏的物理化学性质。从微观的分子间相互作用到宏观的流体综合性质，从事这些研究所需要的理论知识多数来自于统计力学方法。然而，对于那些联系着微观世界和宏观世界的复杂的非球形分子，人们却知之不多。人们在微机电系统（MEMS）和纳机电系统（NEMS）器件研究领域的最新进展可能会使这一状况得到改观。

利用 MEMS 和 NEMS 器件可能开发出识别分子间力的实验室方法。而利用这些方法原理，人们就能够建立起微观世界和宏观世界之间的“桥梁”。今天，人们利用悬臂板（一种类似于斯伦贝谢 DV MEMS 器件的装置，但尺寸要小约 1000 倍）来研究聚合物与金属之间的粘合力。MEMS 和 NEMS 器件在基础科学领域的应用已经开始起步。

例如，人们开发出了一种带有集成电子位移换能器的纳米级悬臂传感器。该传感器在环境压力下接近分子的平均自由程[17]。这使得该传感器能够进行质量分辨率在 1 阿克（10^{-18} 克）以下的吸附特性测量。

针对 MEMS 和微流体装置在油田应用中出现的问题，斯伦贝谢及其合作大学的科学家们正在研究解决方案。目前，微技术正快速拓展到各个勘探开发领域的应用中。例如，人们正在研究将微技术投入到油藏监测、随钻测井、随钻测量和电缆测井、智能完井以及地震数据采集等实际应用中。在油气行业，MEMS 和微流体装置的应用领域正在不断拓展，这一点是显而易见的。 —MG

16. Betancourt S，Fujisawa G，Mullins OC，Carnegie A，Dong C，Kurkjian A，Eriksen KO，Haggag M，Jaramillo AR 和 Terabayashi H：“井下油气分析”，《油田新技术》，15 卷，第 3 期（2003 年秋季刊）：54-61。

Andrews RJ，Beck G，Castelijns K，Chen A，Cribbs ME，Fadnes FH，Irvine-Fortescue J，Williams S，Jamaluddin A，Kurkjian A，Sass B，Mullins OC，Rylander E 和 Van Dusen A：“利用原油和凝析油的颜色定量测定污染程度”，《油田新技术》，13 卷，第 3 期（2001 年秋季刊）：24-43。

17. Li M，Tang HX 和 Roukes ML：“Ultra-Sensitive NEMS-Based Cantilevers for Sensing，Scanned Probe and Very High-frequency Applications”，*Nature Nanotechnology* 2（2007 年 2 月）：114-120。

分子的平均自由程是指分子与其它分子相继两次碰撞之间通过的路径的平均值。