

微纳技术及微纳机电系统 (下)

鲍海飞

3.2 微纳机电系统

(1) 压力传感器与加速度传感器

几乎在集成电路起步发展的同时,在1950年,巴丁(John Bardeen)和肖克利(W. Shockley)预言了单晶半导体在外力作用下形变,并会有相当大的电导变化。1954年,来自美国凯斯西储大学(Case Western Reserve University)的史密斯(C. S. Smith)到贝尔实验室进行访问工作,报道了“掺杂硅和锗中,在剪切应力作用下具有相当大的压阻剪切系数”,由此,标志着在微尺度上硅的传感性能研究的开始,如应变计、压力传感器、加速度计、力/位移传感器等。伴随着硅中应变特性的研究,人们发现半导

体中压阻效应,即掺杂的半导体受到应力作用时其电阻要发生变化,其灵敏度是金属的几十倍,由此可以用做应变计来检测物体的形变。到1960年,已经至少有两家半导体公司 Kulite-Bytrex 和 Microsystem 能够提供体硅应变计了。1961年,贝尔实验室的范恩(William G. Pfann)和瑟斯顿(R. N. Thurston)提出了扩散压阻元与硅力敏感元的集成方式。基于此,在1962年,第一个硅压力传感器得以实现,压力传感器是用来检测压力的一种传感器,如血压计等。图1是一种体硅压力传感器的工艺制造过程。其工艺过程简单描述如下:在p型硅上首先沉积绝缘材料,如氧化层,作为钝化和下一步加工工

艺的保护膜,然后通过涂胶、光刻、显影和腐蚀氧化硅等工艺,在氧化硅上形成扩散窗口进行n型杂质扩散,制作出敏感的压阻;然后再用类似的工艺进行金属铝的沉积,使之与扩散电阻形成良好的电接触,并构成惠斯通全桥敏感结构。接下来对器件正面保护,在硅的背面利用碱液对硅进行各向异性腐蚀,至预定位置,形成所谓的“硅杯”,然后利用带孔的Pyrex玻璃与之键合形成较大的腔体结构,从而完成压力传感器敏感腔体结构的制造。当外界的气压作用到微结构的正面时,由于微结构两侧压力差的存在,微结构将发生形变,从而使其上的电阻将发生变化,导致加在其上的电压输出的变化,信号经过放大而输出至仪表显示。

硅上另一个主要敏感效应是利用硅悬臂梁或板结构之间的间隙,构成电容式的敏感或驱动结构。1970年研制出了第一个硅微加速度传感器。图2是一种电容式加速度传感器的原理。图2(a)是结构在没有外力作用时的状态,中间的质量块是敏感结构,连接质量块的是柔性可动的微梁,微梁固定在锚点上;质量块上可以有多个微梁(梳指)与固定梁之间存在间隙,构成电容。当敏感结构受到一个如图2(b)所示的瞬时外力冲击作用时,整个敏感可动的质量块将要

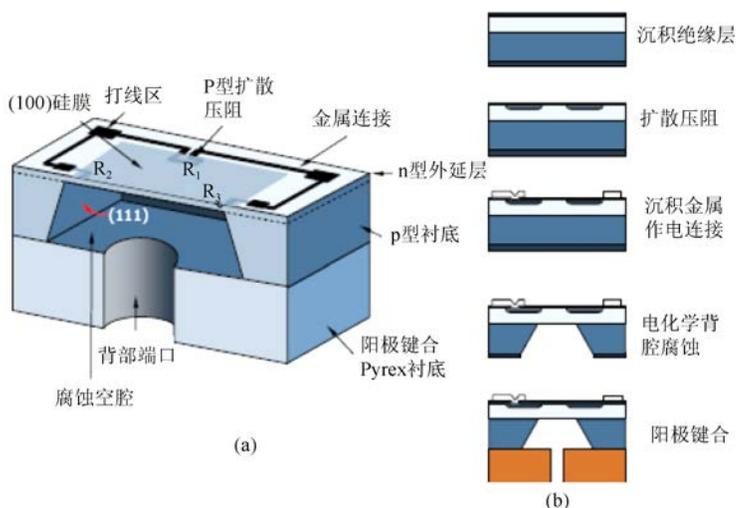


图1 一种在体硅上扩散压阻型压力传感器的制造过程,左侧是表面上有扩散电阻的整体结构图,其中采用的是(100)晶向的硅片,由于采用的是各向异性腐蚀,腐蚀后腔体留下了腐蚀的慢面(111)面,即图中所表示的;右侧是其制造工艺过程

(图片来源: <http://sem.org/PDF/s01p01.pdf>)

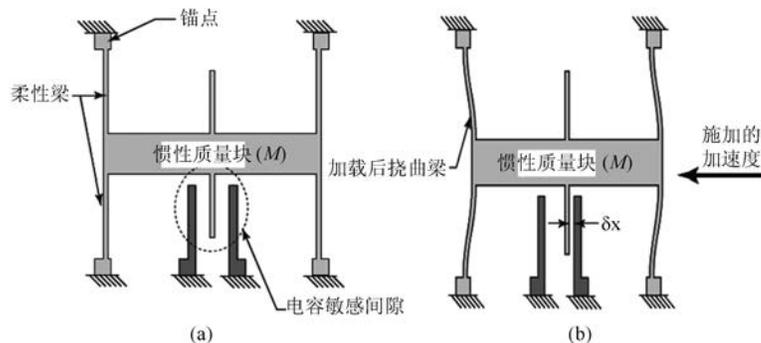


图2 一种电容式加速度传感器的结构示意图和受到外力冲击作用前和作用后微结构的变化状态 (图片来源: N.Dechev, MECH466, Microelectromechanical system, University of Victoria, Dept.of Mechanical Engineering)

同固定的硅梁之间发生相对位移, 这导致梳指之间的电容发生变化, 当在适当解调电路下, 将产生一定的信号输出, 从而完成加速度的检测过程。

日本的一些公司, 如 Fujitsu 都采用压阻敏感模式来制造加速度传感器, 而美国和欧洲的一些公司, 如 STmicroelectronics、Bosch、Analog Devices, 则多采用电容敏感模式来制造加速度传感器。加速度传感器采用 CMOS 接口电路用于放大和补偿, 或是单片集成, 或者是多芯片组合而成。此研究阶段涉及在硅上利用腐蚀形成腔体, 或一些悬浮的薄膜、悬臂梁等微结构,

这些结构能够对压力等物理量有响应, 因而成为传感器。但该研究阶段属于对硅腐蚀加工特性和力学特性的认识阶段, 属于酝酿期。此后, 1982 年, 科特·彼得森 (K. E. Petersen) 一篇总结标志性的文章《作为机械材料的硅》(silicon as a mechanical material) 引领了硅中微机电系统的创新和设计, 硅上微机电系统逐渐走向成熟期。

(2) 喷墨打印头

1979 年, 佳能 (Canon) 和惠普 (HP) 公司成功制造出了微机械的喷墨打印头。图 3 (a) 是一种基于 MEMS 的“顶喷式”(roofshooter) 热喷墨打印机的原理示意图, 其喷

嘴直径 $70\ \mu\text{m}$, 在靠近喷嘴附近有一个小加热器, 加热时把墨水汽化, 产生一个极细小的液滴气泡, 将微小墨滴 (通常只有几皮升 (pL), $1\ \text{pL}$ 等于 10^{-12}L) 喷射出去, 加热器的频率在几千赫兹, 可以高速打印。这种顶喷式结构, 其液滴具有飞行距离短的优点, 因而墨迹的重复性较高; 此外, 墨水供应区就在加热电阻的下面, 可以有效地防止加热器过热, HP 和 Lexmark 两个公司采用的是这种方式。此外, 还有一种侧喷式的液滴喷墨结构 (edgeshooter), 如图 3 (b) 所示。侧喷式结构所喷出的液滴具有较长的飞行距离, 相对来说, 其墨迹的重复性不是太好, 但是其设计结构简单, 容易加工制造, 成本较低, 目前较为普遍地使用, 佳能和 Xerox 两个公司采用的是这种工作模式。这是 MEMS 技术在微流体中应用的一个例子。

(3) 微马达

MEMS 研究的突破年终于在 1987 年到来, 这一年是 MEMS 发展史上的一个重要里程碑。美国

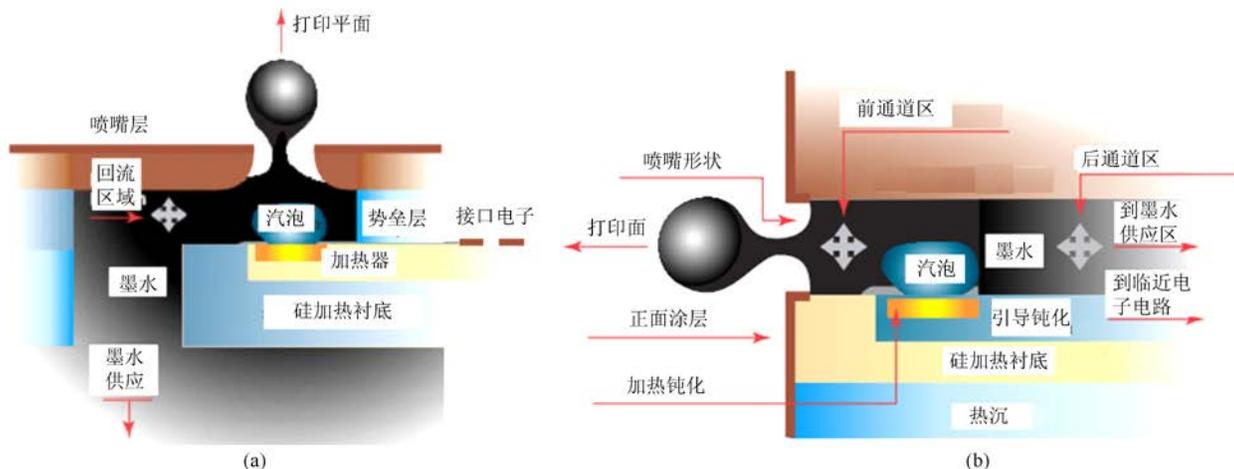


图3 (a) 顶喷式热喷墨式打印机的原理和 (b) 侧喷式热喷墨打印机的原理

(图片来源: Robert Baydo, Kimberly Clark, beyond recharger, 2001, May 10, pp10 ~ 14.)

AT&T 贝尔实验室特里默 (W. S. N. Trimmer) 等人提出和设计了硅基的静电马达, 不久就利用 IC 工艺制造出硅的第一个可动的齿轮和涡轮微结构, 涡轮的转速达到 24000 rpm, 具有执行器动力输出的特性; 而以前的压力传感器等器件都是基于微结构本身在受到外力作用下产生微小形变的原理获得信号输出, 相对来说都属于“不可动”的敏感检测结构。随后的 1988 年, 一种集成可动的“旋转静电侧驱动马达 (Rotary electrostatic side drive motors)”由加州大学伯克利传感器和执行器中心的范 (L. Fan)、邰 (Y. Tai)、缪勒 (R. Muller) 等几人研制出来, 图 4 (a) 是示意图的旋转侧边驱动的微马达 (顶视图), 图 4 (b) 是静电驱动微马达的加工和结构示意图, 其中包括驱动电极、定子、转子和轴的三层多晶硅生长。利用表面多晶硅沉积和磷硅玻璃腐蚀技术制造出轴、转子、定子、弹簧、连杆、曲柄、滑块和齿轮等结构, 这些结构在静电驱动下能够旋转, 带动传动装置, 产生动力, 即静电驱动的微马达。其中, 转子的直径在 60 μm 到 120

μm 之间, 所施加的电压在 60 V 到 120 V 之间; 由于微结构之间的摩擦, 当时测试这些马达的转速在每分钟 500 rpm。微马达器件的研制成功让人们看到了这些“微结构”构成的装置真的像“微机械”了! 这向人们展示出表面微机械加工技术的强大潜力和未来, 极大地激发了研究人员的热情, 随后又衍生出多种原理的微马达制造方法和技术。1990 年到 2000 年之间, 美国 Sandial 实验室利用沉积多层多晶硅和腐蚀技术制造出静电驱动的微机械引擎 (microengine), 将微机械制造技术发挥得淋漓尽致, 微马达可以达到几百万转的转速。图 4 (c) 是 Sandial 实验室利用多晶硅制造的微机械和一只小尘螨的合影。

(4) 用于汽车安全气囊的加速度传感器

20 世纪 90 年代逐渐衍生出了微纳机电系统的三个主要名词, 实际上是三种不同的微加工方法。在美国被称之为微机电系统 (MEMS), 在欧洲称为微系统技术 (Microsystem technology), 而在日本被称为微机械 (micromachines)。90 年代

后是 MEMS 的丰收期, 出现了一系列标志性的产品和器件。1991 年 AD (Analog Devices) 公司完成首个完全集成的 MEMS 电容式加速度传感器, 用于汽车中作为启动安全气囊的开关。该器件量程为 50g ($1g=9.8\text{m/s}^2$), 封装在管座上的芯片面积小于 1cm^2 , 敏感微结构梳齿的深度为 60 μm , 如图 5 (a) 所示, 而 (b) 是包含调制解调放大电路在内的集成一体化整体芯片结构。1993 年该公司推出市场第一个利用表面微机械加工制造的加速度传感器——ADXL50, 该加速度传感器是利用器件中梳齿结构间的电容变化来作为敏感检测的, 用于汽车中安全气囊的开关。其工作原理是: 汽车在行驶过程中, 当突然遭遇猛烈碰撞并超过一定的加速度时, 加速度传感器作为触发信号的开关将检测到该过程, 并启动车厢内的安全气囊以保护驾驶员和乘客。

(5) 微机械陀螺

随着惯性加速度传感器的成功研制和使用, 人们开始有意识地利用硅工艺来制造微机械陀螺以代替石英陀螺, 这主要因为石英材料

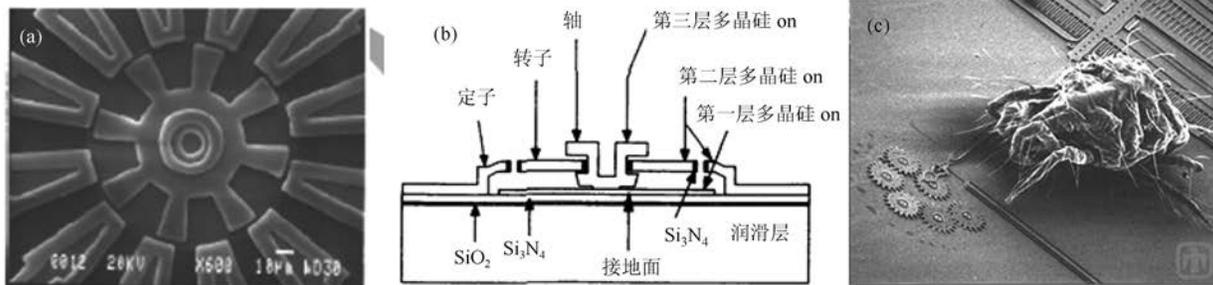


图 4 (a) 范, 邰, 缪勒等人研制的旋转侧边驱动的微马达 (顶视图), (b) 微马达多层多晶硅制造技术的示意图, 中间的空隙是腐蚀掉磷硅玻璃后产生的 (图片来源: Yu-Chong Tai, Long-Sheng Fan, and Richard S. Muller, IC-processed micro-motors: design, technology, and testing, 1989, IEEE, pp1-6), (c) 利用多晶硅技术制造出的微马达和一只小尘螨的合影 (图片来源: <http://www.slideserve.com/anais/how-small-can-we-take-this-art-of-miniaturization>)

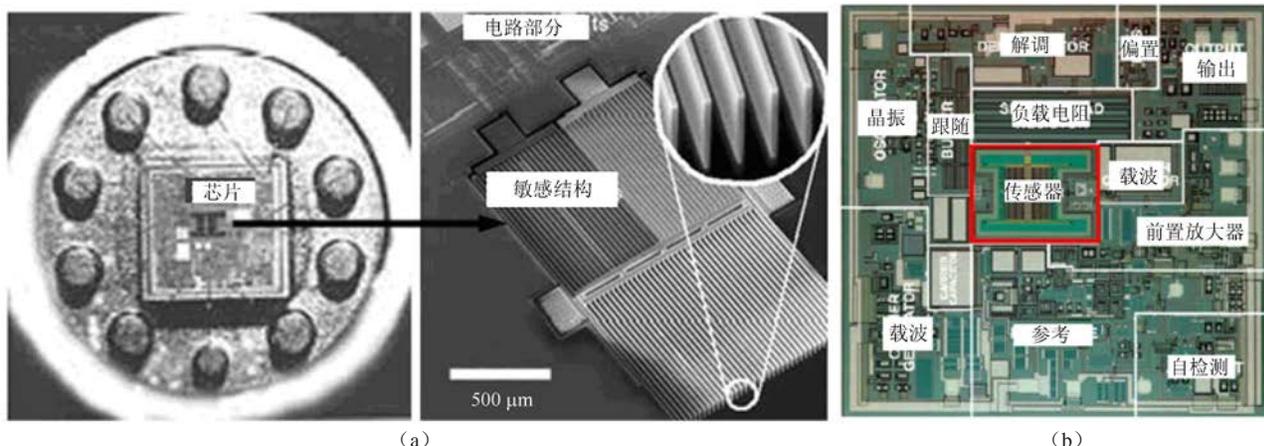


图5 (a) AD公司的安装在管座中的加速度传感器和显微结构(图片来源: Prime Faraday Technology Watch, An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems), ISBN 1-84402-020-7, 2002), (b)包含调制解调放大电路集成一体化的加速度传感器芯片结构(图片来源: <http://sem.org/PDF/s01p01.pdf>)

与 IC 工艺不兼容而难以批量生产制造。陀螺是一种对角度或角度率变化敏感的器件,能够用于检测物体旋转角度或转动速率的变化,能够用于车辆的导航、相机中的防抖动等功能。当一个物体以速度 V 做直线运动时,在受到一个旋转的物理量(角速度 Ω)作用时,在物体上将产生角加速度 α_{cor} ,也叫科里奥利加速度,即 $\alpha_{\text{cor}}=2V \times \Omega$ 。常规的机械陀螺有转动部件,而在微机械陀螺中没有转动的部分。微机械陀螺利用振动的质量块来对旋转进行敏感检测。因此,微机械陀螺就是在科里奥利加速度作用下,将其旋转的能量 Ω 从微结构振动质量块的一个驱动模态 V 传递到另一个检测模态 α_{cor} 。1991年, Charles Stark Draper 实验室展示了第一个硅微机械音叉式陀螺,用于敏感角速率变化,如图 6 (a) 和 (b) 所示。该陀螺的敏感结构是由两个质量块组成,质量块两端由梳指结构与固定的梳指之间构成电容,质量块由悬浮的微梁支撑,可以在水平方向振动,微梁由固定的

锚点支撑;同时,通过适当的电连接施加静电于梳指上用于驱动质量块振动,另一方面在衬底上制作检测电极用于检测信号输出。该陀螺的工作原理如下:在梳指的静电驱动下,两个振动质量块在平行与衬底方向(x 方向)沿着相反方向振动,构成驱动轴。其中,锚点是固定不动的支撑结构。当平行于悬浮微梁方向(如图 6 (b) 中垂直于纸面),绕着这个轴有一个角速度输入时,科里奥利力将使振动质量块在垂直衬底方向产生位移(图中 y 方向),一个向上运动,一个向下运动,成为敏感轴,通过测量质量块和质量块下金属电极间的电容变化,就可以测量出转动的角速度。在机动车辆中一般要求满量程输出在 $(50 \sim 300) \% / \text{s}$,而分辨率为 $(0.5 \sim 0.05) \% / \text{s}$ 。微机械陀螺的研制要远比加速度传感器和压力传感器困难很多。这主要是因为它相当于有两个器件集成在一起成为一个器件在工作。在驱动轴上相当于一个自调制的谐振子,在敏感轴方向上是一个微 g 加速度传感器,而

敏感检测到的绝对科里奥利力的大小要远比所有制造的 MEMS 加速度传感器的灵敏度要小很多;并且其输出信号受到加工工艺导致的结构变化、封装过程、温度和加速度等的影响都很敏感,因此,陀螺曾经一度被称为“杀手”。目前,随着许多问题的解决,人们研制了多种类型的微机械陀螺并成功应用在许多领域。图 6 (c) 是 AD 公司集成一体化的 ADXRS 角速率陀螺,中间的是微机械陀螺,而周边是集成电路,完成信号的解调和放大等功能。综上,从加速度传感器到陀螺传感器的成功研发和使用,标志着 MEMS 惯性传感器的成熟。

(6) 微流控芯片

MEMS 微流控的加工制造方法和理念为化学、生物医药带来了新的生机活力。比如,在硅片上集成为一个微小的半导体激光器,辐射一束激光,经过一个微分析室,里面有某种微流体、血液等,接收端有微分析谱仪用于微分析等, MEMS 微流控具有重要的应用前景。1990年由曼茨(A. Manz)等

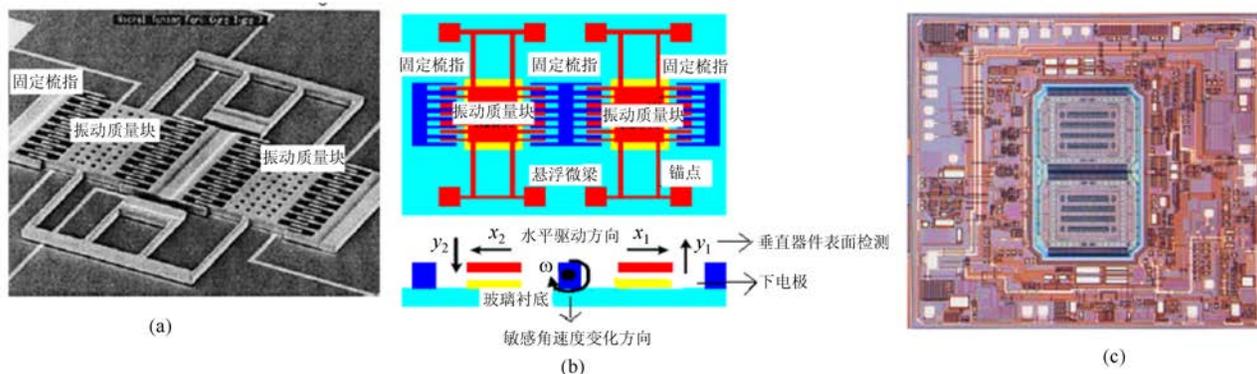


图6 (a) Charles Stark Draper 实验室制造的硅微机械音叉式陀螺；(b) 微陀螺的结构和工作原理示意图，上半部分是顶视图，下半部是器件端面的截面图（图片来源：<http://sem.org/PDF/s01p01.pdf>）；(c) 集成一体化 AD 公司的 iMEMS ADXRS 角速率陀螺，中间的是微机械陀螺，而周边是集成电路，完成信号的解调和放大等功能

（图片来源：<http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/whitepapers/MEMSGyroComp.pdf>）

人建立起“微全分析系统（ μ TAS, miniaturized total chemical analysis systems）”，也叫作“片上实验室（lab on a chip, LOC）”，或称为“微流控芯片（microfluidic chip）”等。微流控学（microfluidics）是对尺度在 nL（1 nL=10⁻⁹L）以下，对在数百微米到十几微米、甚至纳米尺度管道内液体的操纵和分析技术。在微流体中有明显的尺度效应，被检测物质颗粒度在微米、纳米量级，与管道有相互作用；流体只有平流流动，而没有紊流；液体表面张力变得显著，重力和惯性效应变得微乎其微，而黏附变得显著。微流控技术利用较细小的管道对微流体中不同特性的微粒能够快速地进行分离和筛选，取样量非常少，具有高效分离和分析的能力，这种方法是一种经济、有效和快速的检测方法（比如在 ms 量级），能够同时对微量样品中的多种成分进行分析，将来可用于化学合成、医药和生物分析等重要系统中。在微流控系统的构架中，包含了微量流体样品的注入功能，微流体在管道中迁移的

控制，微流体在反应室中的反应过程，以及样品的分析过程和回收过程。因此，需要微泵、微阀、微喷等微结构和器件完成样品的注入，利用静电或气动等方式来驱动液体迁移，通过加热等过程使微流体在反应室混合反应，在光学等测试下完成分析。因此，系统具有不动的结构如微管道、微反应室，又具有可动的微泵、微阀、微喷，具有选择性功能的过滤器等微结构。整个系统具有机、电、化学或生物、流体和光等集成一体化特性，是个相当复杂的系统。微流体的各结构组成部分可以利用硅、玻璃、钢等材料来制备，或者在有机材料上，如利用 PDMS（polydimethylsiloxane, 聚二甲基硅氧烷）来进行加工制造。比较而言，硅虽然具有很好的力学等特性，但还是比较昂贵，并且对可见光和紫外光是不透明的，对活体哺乳动物细胞透气性不好，这就限制了在硅材料上利用光学检测的方法。而 PDMS 是一种很好的弹性体，透气性好、性能稳定、无毒、不容易燃烧等特点，非常适合于微

流控系统的使用，如加工微泵和微阀等；但 PDMS 有一个缺点，它会被其他有机材料溶解。现在发展的趋势是有有机塑料等制品来代替硅和玻璃来制造微分析系统。第一个成功的基于芯片分析的应用展示是在 20 世纪 90 年代初。1999 年，世界上第一台生物分析仪 Agilent 2100 Bioanalyzer 得到商用，该设备用于核酸、蛋白质和细胞等分析中，仪器结构如图 7（a）所示，而毛细管电泳的工作原理如图 7（b）所示。电泳是指在溶液中（如聚合物胶体）带电粒子在电场作用下迁移的现象。在电泳介质中，带电粒子的速度 V 与电荷 q 、电场强度 E ，以及颗粒与分离介质的摩擦系数 f 的关系为： $V = \frac{qE}{f}$ 。由此可以看出，如果带电粒子的尺寸较大，受到溶液介质的摩擦系数较大，则其移动速度就慢，因此，可以将不同粒径的粒子分离开，从而可以进行逐段分析。如，利用毛细管电泳（electrophoresis）技术可以将蛋白质和核酸分离开，蛋白质和核酸中

的某些部分在溶液中会吸附或释放氢离子,从而带电荷。2002年,《科学》杂志上报到了“微流控大规模集成芯片”,其中包含了在一个芯片上集成制造了上千个微阀和几百个反应室。图7(c)是一个更加具体的用于毛细电泳微流控分析的原理示意图,包括了利用微泵注入进样室的流体、注入用于稀释的流体和反应化学试剂,在反应室反应后进行分离和采样以及回收等过程;图7(d)是对应一种基于不同微粒尺寸的粒子分离技术,其中,包含了3个连续的具有不同直径的微通道。当溶液通过微泵注入时,不同尺寸的微粒便被限制在不同的管

道中。在分离研究中,一般多采用对管道施加电场,带电微流体颗粒在电场作用下迁移率不同,利用毛细管电泳原理从而对荧光染料进行快速分离,以及对荧光标记的氨基酸进行分离等。其他一些研究还有很多,如利用微流控系统对DNA和基因测序分析,长链结构能够沿着微管道方向伸展开,这样便可以逐段分析其电特性等。总而言之,微流控技术是在微分析、生化、分子生物等领域的迫切需要下,以及微电子和微机电系统成熟发展趋势下孕育起来的。微流控技术尚在初期的研究阶段,在分析化学、生物和医学上具有广阔的应用前景。

(7) 数字微镜器件

1996年,德州仪器(TI,Texas Instruments)公司研制的数字投影微镜器件(DMD, Digital Micromirror Device)进入市场,也叫数字光处理(digital light processing),即今天广泛使用的投影仪中的核心反射微镜阵列器件。该器件于1977年开始研发,其雏形是一种可形变式的微镜器件(DMD, Deformable Micromirror Device),后来演化成1987年发明的双稳态数字微镜器。该器件结构的底层是CMOS静态存储器(CMOSRAM)结构单元,每个结构单元由6个晶体管组成;在每一

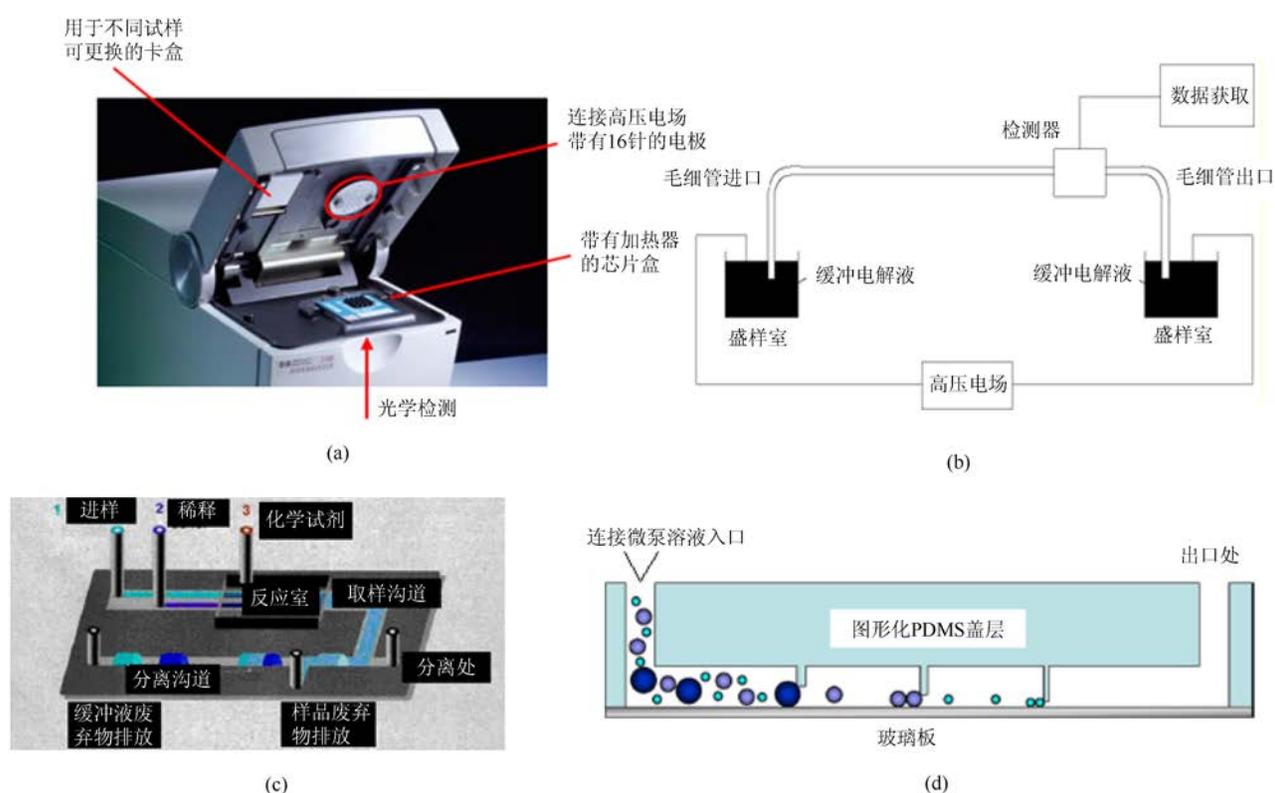


图7 (a) Agilent公司制造的Agilent 2100生物分析仪,只需将装载试样的芯片插入到分析仪中,芯片与有16针的电极连接,在荧光下,就可以进行试样分析;(b)仪器的工作原理图,利用毛细管电泳现象,在高电场强度下,将待分析的物质分离开,当通过检测器时进行分析(图片来源: <http://brunell.org/advbitech/01-23%20Electrophoresis%20and%20Bioanalyzer.pdf>);(c)一种微流控分析的基本原理图(图片来源: Bruce K.Gale, Microfluidics, the University of UtaH);(d)基于不同微粒尺寸的分选技术截面图(图片来源: Ki-Hwan Nam, size-based separation of microparticles in a multilayered microfluidic device, Journal of microelectromechanical systems, V19, N2,2010,pp375 ~ 383)

个 CMOSRAM 上都制作了一个 Al 合金微镜，包含有 50 ~ 200 万个微镜不等，每个微镜像素尺寸一般为 $16\ \mu\text{m} \times 16\ \mu\text{m}$ ，间距 $13\ \mu\text{m}$ ，工作频率在 5000 ~ 7000 Hz，利用静电驱动工作（也是一种执行器），最大转动角度为 12 度，如图 8 (a) 所示。图 8 (b) 是其简单的工作原理图示意，当电压施加到硅衬底上的电极时，将吸引铝合金微镜发生偏转，入射到微镜上的光将随之发生偏转，投射到屏幕上，偏转角度与驱动电压相关。该结构存在转动过程中微镜与衬底接触黏附的问题，通过适当的工艺改进，如使用抗黏附的涂层可以避免黏附。据说，该产品在研发过程中，有数百名科研人员参加了研究工作，其间因为经费问题，项目几乎半途而废，经过十年的不懈努力。DMD 的发明和商业化是 MEMS 中最成功的案例，DMD 融合了机械的电控制、集成电路处理、光学处理和化学处理等众多复杂技术，构筑了精巧的电控可动微小机械结构的大面积光阵列投影系统，是一个具有划时代意义的微光机电系统 (MOEMS)！

(8) 射频开关

十几年来，人们一直希望能够把 MEMS 技术应用到射频研究领

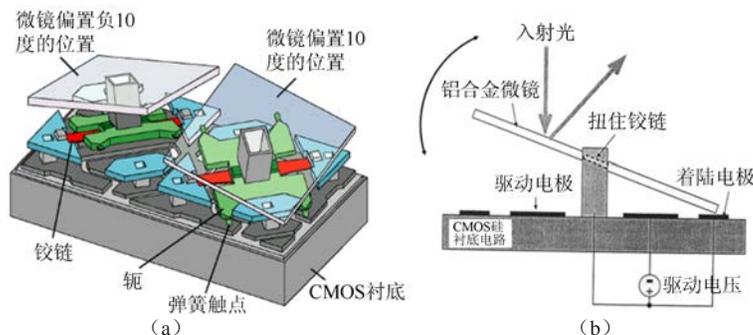


图 8 (a) TI 公司的数字投影微镜结构原理样机, (b) DMD 工作原理图示
 (图片来源: A MEMS-based projection display, Van Kessel, P. F.; Hornbeck, L. J.; Meier, R. E.; Douglass, M. R., Proc. IEEE, Vol. 86 pp.1687 ~ 1704 1998)

域中 (Radio Frequency MEMS)。射频是指频率在 3 kHz ~ 300 GHz，波长在 1000 km 到 1 mm 之间振荡的电磁波，在通信领域中是指无线通讯模式，比如手机通讯。在一些重要的通讯控制指挥终端，有较多的信号发送器和接受器及信道转换，而这些发送器和接受器又都处在空间位置很近的距离上，大量信号要同时发送、接受和信道转换，其间会有较大的功率损耗，并产生很强的电磁干扰。因此，要求信号之间要有很好的隔离和滤波，避免电磁干扰，这就需要对发送器和接收器进行窄带滤波。常规采用 GaAsFET 场效应管、p-i-n (PIN) 二极管，以及变容二极管等固体器件来获得开关转换、滤波和调制等功能，但这些器件往往存在着较大的功耗、较低的可靠性和较高的制造成本，在不同的通道转换时具有较大的插入损耗，并且不具有灵活的频带选择等缺点。RF MEMS 将利用 MEMS 加工制造技术，通过制造 MEMS 开关 (switch) 等来替代常规的 FET 和 PIN 等固体器件实现低损耗、低功耗、高隔离和抗干扰；通过制造 MEMS 可调谐电

容 (tunable capacitor) 来替代固体硅或 GaAs 的 p-n 结或 Schottky 变容二极管以实现低噪声参数放大器、谐波频率产生器等；通过制造 MEMS 电感、机械谐振器和滤波器等器件以实现滤波、振荡器、低功耗转换器和 RF 收发前端等。由此可以看出，可动的微结构能够根据需要进行参数调节 (调谐) 是一个很大的特点。如，2004 年 IBM 公司以及 2006 年 NTT 公司成功展示了 RF MEMS-CMOS 开关，NTT 研制的开关驱动电压为 3.3 V，超过十亿次开关而无失效；2012 年，由 IBM 代工生产的 Wispry RF MEMS 制造的天线调谐器是由 64 个可变电容器组成的网络，该器件已经用在三星智能手机 (Samsung's Focus Flash Windows smartphone) 中以改善天线质量。目前研究较多的是 MEMS 开关，MEMS 开关可以用在信号路由上，用于阻抗匹配网络，以及可调谐增益放大器上，最突出的特点是其零静态电流的特性，这样就具有极低的驱动功耗；其开关的插入损耗要明显地比场效应管小很多，由于良好的欧姆接触使其能够在较宽的频带下使用，而其制造还可与 IC 集成兼容。比如，图 9、图 10 是目前流行的两种 MEMS 开关。图 9 是一种悬臂梁结构的串联直接接触型开关，上图是顶视图，下图是侧视图。当下拉电极上没有施加电压时，悬臂梁与衬底上的金属点之间为断路状态；当在下电极施加电压时，将悬臂梁往下吸合与下面的金属点相连接，成为短路的导通状态，信号

可以传输。图 10 是一种电容耦合型薄膜 MEMS 开关，其可动的薄膜表面和底电极都镀有金属薄膜，底电极上有一层隔离介质，中间是空气间隙。当微结构薄膜和底电极之间的电压改变时，所构成的电容发生变化。当没有静电驱动时，薄膜和底电极之间的间隙最大，电容最小，此时为开关的“开态”，不对传输线产生影响；而当施加静电驱动时，薄膜被下拉靠近底电极，电容最大，为开关的“关态”，对传输线形成信号短路，即完成了信号的传输控制。虽然 RF MEMS 开关有很多优点，但是也存在一些缺点，比如，开关需要的驱动电压太大，达到几十伏；机械开关的时间动作响应速度在 μs （微秒）量级，比固体器件 FET 和 PIN 等要慢很多；开关的长期可靠性、开关的频次还尚待解决之中，器件对封装的要求较为严格，需要在湿度很低以及近似密封的环境下进行等。总之，将 MEMS 应用到射频系统是一个富有挑战并有潜力的领域，在雷达探测（5 ~ 94 GHz）、车

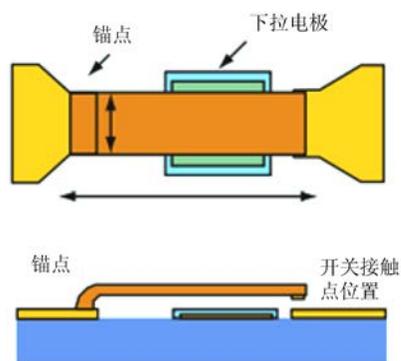


图 9 串联直接接触型 MEMS 开关
（图片来源：Gabriel M. Rebeiz, Jermy B. Muldavin, RF MEMS switches and switch circuits, IEEE, Microwave magazine, December, 2001, pp59 ~ 71）

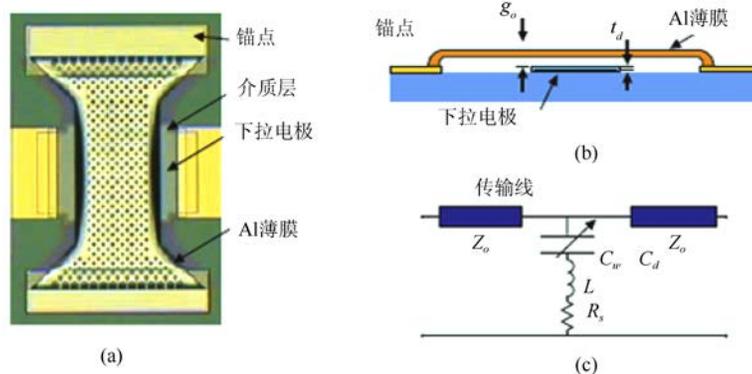


图 10 并联电容耦合型的 MEMS 开关，（a）顶视图，（b）侧视图，（c）电路模型
（图片来源：Gabriel M. Rebeiz, Jermy B. Muldavin, RF MEMS switches and switch circuits, IEEE, Microwave magazine, December, 2001, pp59 ~ 71）

辆用雷达（24 GHz, 60 GHz, 77 GHz）、卫星通讯系统（12 ~ 35 GHz）、无线通讯系统（0.8 ~ 6 GHz）以及智能手机中将发挥重要作用。

（9）手机中的传感器

2010 年，意法半导体（STMicroelectronics）公司为苹果公司的手机 iPhone4 开发了九自由度运动感知传感器，俗称 9 轴运动感知传感器（9 Degree-of-Freedom），包括一个多晶硅沉积的电容式敏感检测三轴陀螺和一个三轴加速度传感器（范围 $\pm 2g$ ），以及一个三轴电子罗盘，这些功能有利于对旋转和运动的感知，用于 GPS 的航位推算、游戏、增强图像稳定和姿态识别等功能，如图 11（a）所示。也许人们还没有意识到，一个 iPhone4 手机就已经是一个真正的微光机电系统了（MOEMS）。它不仅具有收发通信功能，还包括 9 轴运动感知传感器，有三个麦克风，两个图像传感器，环境光学和近场光学传感器，以及触摸屏等，能够进行精确定位，图像显示等功能。

最新的智能手机中还包括了压力传感器的显示功能，这意味着，当某一天你攀登山峰的时候，不仅能够知道你的地理位置和方向，还能知道你的高度！图 11（b）是一个包含各种 MEMS 传感器的智能手机。所谓“麻雀虽小，五脏俱全”。

（10）微执行器

同集成电路（IC）制造技术相比，MEMS 也采用与集成电路相类似的工艺流程。在集成电路中进行的腐蚀主要是对硅上氧化硅的腐蚀形成扩散窗口，进而在硅上利用扩散和溅射等工艺形成电阻、电容和晶体管等结构，集成电路的加工制造主要属于二维的表面平面式的制造方式；相对来说，在硅上的微加工技术属于对硅进行正、反面的三维立体加工方式，属于深刻蚀加工，或者利用多晶硅的自下而上逐层生长后再腐蚀的工艺制造过程。从应用方面来说，IC 主要是在硅上开展电路方面的工作。而 MEMS 在 IC 的基础上，具有鲜明的特点，既可以制造传感器，又可以制造出可动的微结构。

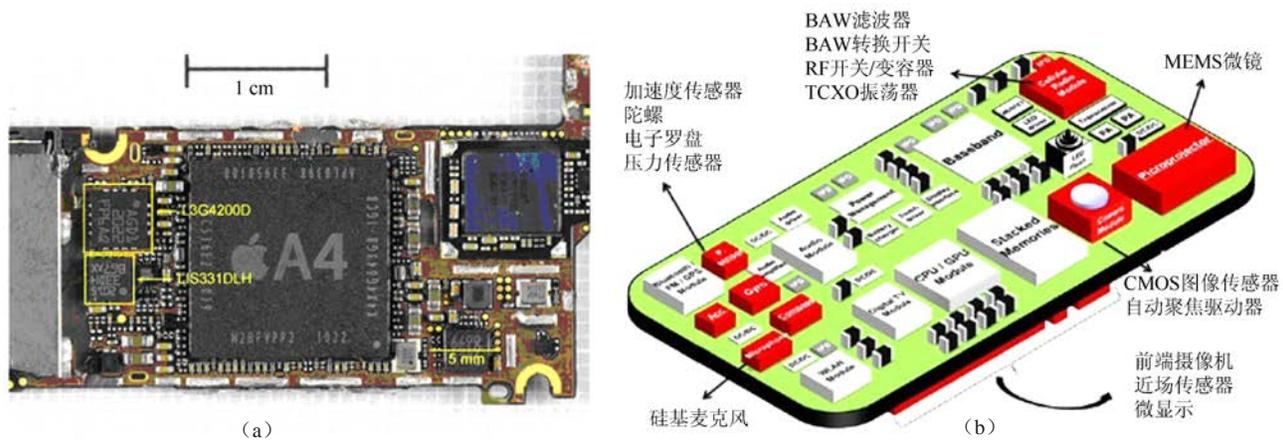


图 11 (a) 包含有微机械陀螺 (L3G4200)、加速度传感器 (LIS331DCM) 和中央处理器 A4 的 iPhone 4 主板结构;
(b) 智能手机中用的 MEMS 传感器 (图片来源: http://www.mems.me/Overview_201109/13.html)

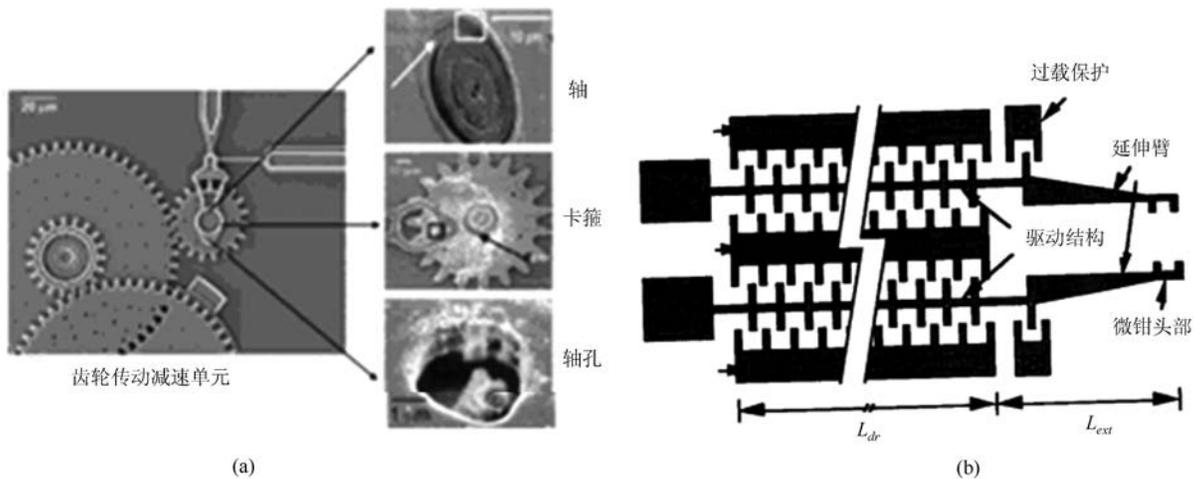


图 12 (a) 桑迪亚实验室用于验证微机械齿轮磨损的扫描电镜图 (图片来源: D.M. Tanner, N.F. Smith, L.W. Irwin, et al., MEMS Reliability: Technical Digest-11th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators Infrastructure, Test Structures, Experiments, and Failure Modes, SAND2000-0091, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico), (b) 最早利用多晶硅制造的一种微镊 (微镊)
(图片来源: Chang-jin Kim, Polysilicon microgripper, IEEE, 1990, pp48 ~ 51)

由于 MEMS 技术具有三维加工的特点, 所加工的薄膜、悬臂梁和梳齿结构等微结构, 能够在静电、磁力、压电甚至热等激励模式下驱动, 使微结构产生一定的形变和位移, 产生动作。因此, 在所制造的 MEMS 器件中, 有相当一部分是用来研究和制造微纳执行器, 包括微纳操作、定位等。比如, 前面讲到的数字微镜 DMD 就是一种微执行器, 能够对光传播的方向进行控制; 美国桑迪亚 (Sandial) 国家

实验室制造的传动微齿轮是一种执行器, 可以推动齿轮的转动, 如图 12 (a) 所示; RF MEMS 中的开关也是一种执行器, 通过静电吸合使开关“导通”和“断开”等。其他还有如制造的尖端直径为 $5 \mu\text{m}$, 能夹起一个红细胞的微型镊子等工作。最早利用多晶硅制造的一种微镊如图 12 (b) 所示, 它是利用静电驱动控制微镊头部的开与合。

从上述展示我们可以看出, 基于各种原理和方法加工制造的

MEMS 器件具有丰富的多样性、广泛性和实用性, 已进入到各个领域; MEMS 不仅仅是一种加工技术、方法和功能的体现, 更是一种艺术和智慧淋漓尽致的体现!

4. 微纳机电系统的应用与影响:

微纳机电系统除了具有小巧、成本低、批量制造、精确定位、微分析等优势外, 还具有隐秘性、安全性和高效率性等特点。硅的集成电路和微纳制造技术同其他技

术融合将继续引领人类技术向前大步发展，有多种潜在的应用市场待开发和完善。

仅以惯性传感器为例，基于MEMS的加速度传感器在手机等电子产品中已经广泛使用，中、低量程的加速度传感器在计量学、地震波的检测和分析、石油探矿、机车和车辆碰撞、医疗健康健身中等得到应用。陀螺是另一种重要的对角度和旋转变量敏感的惯性传感器。MEMS陀螺是20世纪90年代发展起来的，具有体积小、质量轻、结构简单和使用方便等一系列优点，在自动控制、车辆运输、导航中广泛使用，最大的市场是用于机动车辆中GPS定位和稳定的控制；在消费电子市场中主要用于照相机的防抖稳定系统等。基于加速度传感器和陀螺的组合敏感结构将在机器人、交通车辆和航天器的导航中作为重要的姿态和动作控制传感器。基于加速度传感器、压力传感器和温度传感器的集成一体化胎压传感器（TPMS，Tire pressure monitoring system）将在汽车行业中拥有更广阔的市场。目前，我国在高速公路上发生的交通事故有50%是由于轮胎爆裂引起的。因此，当轮胎气压和温度发生异常变化时传感器将提醒驾驶人员，以提高汽车的安全行驶性能。

随着微加工技术的成熟和系统集成能力的极大提高，微/纳光机电系统将在许多领域发挥重要作用。图13是一个三维的具有多信号处理功能的智能车辆微光机电概念性的集成系统。包含了光波导、

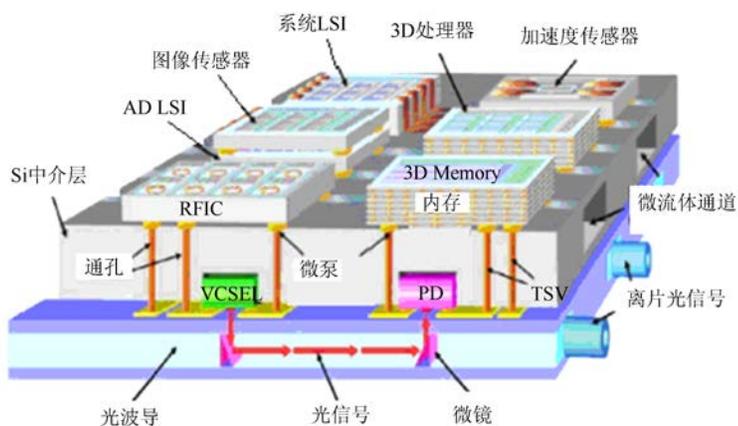


图13 具有多信号处理功能的智能车辆微光机电概念性的集成系统
（图片来源：K.-W. Lee, et al, 3D heterogeneous opto-electronic integration technology for system-on-silicon (SOS), in Proc.IEEE Int. Electron. Devices Meet., 2009, pp22.2.1 ~ 22.2.9)

射频IC、模/数LSI、图像传感器、微处理器、加速度传感器、微流体通道、微泵、微镜等，这体现了MEMS/NEMS的复杂性、功能性、多样性和集成性。

在其他方面，微纳机电系统能够提供小巧的传感器、执行器、微流体沟道等，同集成电路一起为微纳米生物学、医学、微纳流体力学等领域提供多种多样的研究平台。在生物芯片、射频通信、医疗、环境、微流体、微分析等方面具有广阔的应用前景。在基于因特网的物联网系统中，需要对每一个节点的“物品或设备”进行标记和感知，MEMS所制造的传感器可以作为信息获取的第一个结点，因为利用MEMS的技术，可以在同一芯片上集成多种传感器，如将温度、压力、风速等各种物理的和化学的传感器集成在同一个芯片上，用于环境、气象监测等多个方面的应用。

微纳技术的研究有利于发现该尺度下新现象、新原理，制造出新的器件；反过来，微纳器件的研

制又推动了基础研究的认识和发展。微纳机电系统可以从更微观的角度来观察和认识微纳米尺度的化学反应过程、物理过程、流体过程、机械过程和电过程等。有一些研究今天或许看不到有什么应用前景，但是将来某一天，这些看似微不足道的研究和发现或许就突然成为人们竞相研究和开发的对象。伯克利加州大学何（Rongrui He）、杨（Peidong Yang）等人首度于2006年在尺寸为几十纳米到几百纳米间的硅纳米线（Si nanowire）中，发现了巨压阻效应，其压阻系数比体硅有数量级上的提高，如果按照这样的方式来制造传感器的话，那么传感器的灵敏度将要有几个量级上的提高，这将是纳机电系统中又一个突破。图14（a）是利用SOI制造的直径在50~350nm的p型纳米线，及其力学、电学特性测试方法图示。其中，纳米线器件的两端有电极引线引出用于测量电导等参数，纳米线固定在一个可以弯曲的钢板上，钢板又固定在几个固定

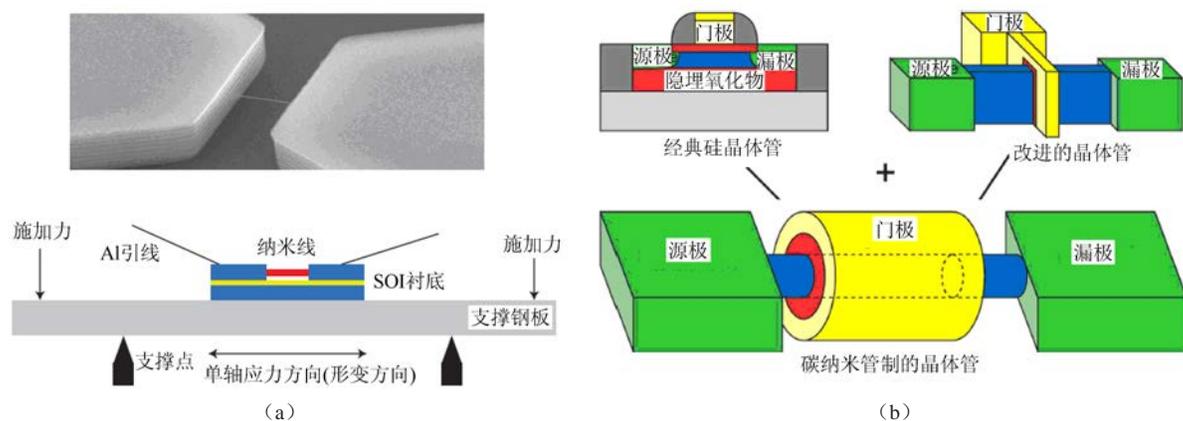


图 14 (a) 一根硅纳米线及其机电压阻性能的测试示意图 (图片来源: Rongrui He, Peidong Yang, Giant piezoresistance effect in silicon nanowires, Nature nanotechnology, V1, October, 2006, pp42 ~ 46); (b) 三种晶体管的比较: 一个传统的增强型场效应管 (MOSFET)、改进的鱼鳍式场效应管 (FinFET) 以及用碳纳米管制造的场效应管 (CNFET) 示意 (图片来源: J.Appenzeller; Carbon nanotubes for high-performance electronics-progress and prospect, IEEE, V96, N2, 2008, pp201 ~ 211)

力学支撑点上, 通过施加外力于钢板上将导致钢板形变, 钢板的形变又导致纳米线的伸长或缩短, 同时测试纳米线电学等特性, 即压阻效应的测试。

从 20 世纪 90 年代开始, 美国国家桑迪亚实验室针对 MEMS 的可靠性进行了研究工作。微机电系统的特点是结构质量小, 但表面积大, 因此, 表面黏附是阻碍微纳器件正常工作的一个最主要制约因素。一些微结构在加工释放过程中会由于腐蚀液体的毛细现象而黏附在一起, 有一些是在使用过程中受到冲击、或静电作用而黏附在一起, 从而器件不能够继续工作, 这就是由于器件结构的尺度效应所致。由于微结构的体积和质量很小, 容易受到表面作用力的影响, 如范德瓦尔斯力和液体的毛细力, 以及静电力等。该实验室利用多晶硅制造的微机械齿轮, 用来研究微结构表面黏附、摩擦、磨损、断裂、抗冲击等力学实验, 并采用自组装薄膜等来提高表面的抗黏附、抗摩擦等特性的研究。图 12 (a) 是一个利用多晶硅制造的 MEMS 齿轮转动

系统, 包括其中的一个轴被磨损的 SEM 照片。而微结构间的黏附, 比如, 图 5 (a) 中的加速度传感器和图 6 (a) 中的陀螺传感器芯片, 其梳齿结构在静电或者在加工释放过程中会黏附在一起, 一旦黏附在一起, 就导致器件无法正常工作。在数字微镜中, 其铰链也是失效的一个因素, 由于铰链在静电作用下要经受上百万次甚至更高次数的扭转运动, 机械疲劳是其中的一个主要问题, 同时由于微镜会与衬底底部接触产生黏附, 导致失效。微机电系统中还存在其他形式的失效机制, 如热喷墨打印头结构, 由于是在液体和一定温度的环境中, 液体的成分将影响到喷墨头, 其颗粒度和酸碱度等成分将会造成喷嘴的堵塞或腐蚀。其他可靠性研究包括使用中的疲劳现象、制造和使用中的污染、使用中电荷累积等。针对不同用途和工艺要求, 通过设计和工艺优化, 扬长避短, 可以设计和制造出合理的结构器件。到目前已得到基本的验证, 微机电系统的加工制造具有非常高的可靠性, 微器件和微结构也具有很高的使用稳

定性。根据以往的经验, 器件和设备的可靠性, 不是从测试中得到的, 而是从设计中得到的。

从目前的理论和实际应用看, 针对 MEMS/NEMS 来说, 一般情况下, 器件做到了微米、纳米尺度, 其质量轻、形变大, 器件的灵敏度会有很大的提升, 机械共振频率会有极大的提高; 而且由于器件小, 其响应速度更快, 功耗更低; 由于单位尺度内缺陷数目的降低, 器件的晶体完整性和机械整体性就高, 这样器件的抗冲击性能就好, 可靠性就非常高; 由于器件的单位面积小, 而微加工制造是在一个大面积的晶圆上进行的, 由此单位制造成本和周期明显降低, 因此, 器件做小意味着更经济和更可靠。MEMS/NEMS 技术很重要, 但不是万能的。对于一种技术或产品的选择, 不在于它是不是由 MEMS 来制造的, 关键的是它能否以极具竞争的价格提供了所需要的功能。

5. 微纳技术展望

未来的发展激动人心, 比如今天火热的 3D 打印技术, 只要你有创意, 每个人都能成为设计大师和

制造大师！未来微纳技术的实现就在你的想象中。

在科技迅速发展的这一历史过程中，微电子和微机电系统将一直引领各学科快速地向发展。在微电子时代，是将氧化工艺、扩散、离子注入、光刻、绝缘隔离、金属互联，以及封装等问题一一解决之后，才打造出今天不朽的辉煌。人们预言，也许再有 20 年或者 30 年摩尔定律将失效，因为你不能再将光刻的线条制造得更细了。但摩尔定律告诉我们，计算机的性能每隔大约两年的时间将翻一番。这意味着新的技术和方法将得以发明和创造，一系列加工制造技术的突破和许多新技术的融合将会打造未来的集成电路。比如，今天所提出的应变硅（用于 10 nm 以下硅器件）概念、石墨烯和碳纳米管等，将来有一天，集成电路将利用这些纳米尺度的金属、半导体颗粒，利用合成的纳米管、纳米线，来打造一个全新的纳电子集成电路。图 14 (b) 是三种晶体管的示意图，包括一个传统的硅增强型场效应管 (MOSFET)、改进的鱼鳍式场效应

管 (FinFET) 以及用碳纳米管制造的一个原理性场效应管 (CNFET)。这些改进和创新将使计算机的运算速度更快、功耗更小。从长远的眼光来看，器件尺度不断缩小，会带来严重的问题。针对未来纳电子集成电路，理论估计场效应管门长临界极限尺度在 5 nm，在这一尺度下，器件的漏电流已经很大了，因为绝缘层的厚度已经非常的薄了。纳电子集成电路将要面临着诸多难以想象的理论极限挑战、工程技术难题，以及经济成本代价，比如，如何进行纳米尺度下复杂系统的电子设计，如何将数量庞大的碳纳米管或新型晶体管安装或制作到相应的电路中，如何解决纳米尺度下功耗问题、金属互联问题以及器件可靠性等问题，还要面临着设备和制造的加工成本费用经济条件的制约。

微纳机电系统，它体现了一种可重复、高产出、稳定的微纳米加工制造的能力；它体现了多种技术融合的能力，如 IC 与 MEMS 的集成封装；它体现了多种功能兼容的能力，包括如物理、化学等传感、执行和信息发送、它为其他技术的

应用提供了宏观和微观连接的桥梁、平台和工具。2004 年，美国 Business2.0 在九月份的封面文章上将“芯片上的实验室”称其“改变未来的七种技术之一”。

从集成电路、微机电系统、无线网络，再到今天的 3D 打印技术，标志着现代制造业的进步和变革，这标志着一系列的制造业模式性质的变化和生产模式的变化，也标志着从大规模的工业制造发展到个体的创意和制造变化的开始。在各个领域，尤其是信息领域以及交叉学科等前沿，人们将在微纳机电系统和微纳技术中继续实现一个又一个梦想。从系统出发，从器件着手，既要看到树木，又要看到森林。

纳米时代以后会是皮米时代的到来吗？也许那个时候，你看到的是真正的分子技术、电子技术，人们也许正在操纵着一个一个原子和分子创造着一个又一个的新天地。

致谢：感谢北京大学微电子学研究院张海霞教授的推荐和修改意见。

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 200050)

(上接 40 页) 在生命发展前毁灭掉它们。这两位科学家认为，智能生物只在地球上存在，是独一无二的。有一些与上述观点相反的人们认为，外星人其实就在文明身边，只不过他们刻意与文明保持距离罢了；还有人认为，外星人对宇宙的殖民扩张还未波及地球，因此忧心忡忡的人类只得苦苦寻找。

事实表明，作为世纪之谜——

“外星人”这个话题，无疑将会长期争论下去，这也是一种人类文化现象。笔者重申，宇宙是物质的，也是平等的（或者说是平权的），自然规律应适用于宇宙的每一个角落；我们必须相信科学，要本着实事求是的原则确立坚定的科学信念。在我们这的宇宙里，一切事物均处在纷繁不停的变化之中，没有什么所谓“超自然”的东西。因此，

科学研究必须建立在观测事实的基础上。关于“外星人”，我们只有也必须采取实事求是的科学态度。正如恩格斯在 100 多年前所说的，“从历史的观点来看，这件事也许有某种意义：我们只能在我们时代的条件下进行认识，而且这些条件达到什么程度，我们便认识到什么程度。(恩格斯：《自然辩证法》)”

(北京天文馆 100044)