

# 微纳技术及微纳机电系统(上)

鲍海飞

## 1. 前言

今天,在一个所谓“云计算”与“大数据”到来的时代,人们面对着大量的数据信息,不仅需要获取的数据进行传递,而且需要进行处理和分析。之所以如此,是因为人们已经能够将信息的获取从分散、断续、孤立的点扩展到整体、连续、相关的面或体上,即从“点式”扩展到“网式”,从宏观延伸到微观,并能够以更精细的分辨、更快的速率和在更大的尺度上来获取数据。在这个过程中,信息获取的前端传感器做得越来越小,人们能够在微米、纳米的尺度上来获取大量且多样化的信息(如力、热、声、光、电、磁等)。因此今天,人们把器件做小的意义已经不言而喻了,体积减小后的器件不仅质量轻、便于携带,而且具有更高的灵敏度、精度以及更大的应用范围。第二次世界大战结束后,在1946年,美国制造的第一代电子计算机——ENIAC,是个庞然大物,长约30 m,宽约1 m,高约2.5 m,重达28 t,由18800只电子管组成,功耗为200 kW,每秒钟只能进行5000次运算。如果不把这些电子管换成今天的晶体管和集成电路的话,就没有今天人手一部的手机和iPad之类的便携式电子设备。从电子管的计算机到今天以晶体管为主的计算机,从固定电话到移动通讯,再到因特网,

微纳技术经历了漫长的发展过程,全世界无数科学家和工程技术人员为之付出了聪明才智和艰辛的劳动。

微纳技术是今天影响人类思想、认识和社会发展的一项重要技术,因为它不仅仅是简单传统技术的延续和改良,也不是经典物理原理或者概念的简单扩展和应用,同样它不只局限于某个领域和学科,而是弥散到整个社会的各个领域之中,并且是以多种技术融合为标志的新型综合技术。微纳技术以经典力学、量子力学、分子动力学等理论为理论基础,以全新的材料研究、观察、制备手段为出发点,如原位分子膜层的生长和控制;以全新大批量可重复的加工制造进行大规模生产,如集成电路和微机电系统的加工制造等。微纳技术的研究,开始了人类对自然一个新的研究和认识的过程,也是自我认识和再认识的重要过程,引导了新的物理原理和模型的构建,而一些经典的物理原理和模型需要修正或改进以适应微纳米尺度下的现象和效应。微纳技术为人类提供了先进的研究工具和手段,为人类探索、观察和揭示以前没有观察、认识到的现象和规律创造了条件,也进一步拓展了人类认识世界的深度和广度。它所形成的生产力直接改变了加工制造和生产模式,导致了人们研究、认

识、思维方式乃至生活和工作方式上的巨大变化,由此带来的影响弥散到整个社会的各个领域,因此,人们将我们这个时代称为继“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”之后的一个崭新的时代——“硅器时代”。

当一种器件或技术应用到一定程度,并面临着社会的迫切需求时,考虑到器件的制造、更换、成本、寿命,以及综合性能等因素时,就需要对器件和技术进行相应的创新。在这个过程中,一种是延续已有的技术,进行简单的结构上缩小,在缩小尺寸的过程中,受到技术、原理和经济本身的限制,往往会遇到难以逾越的鸿沟。这时,探索新路可能会有意想不到的重大突破。晶体管和集成电路(IC)的研制就是在这样一种背景和理念下被提出来的,从基础研究入手,在研究固体中的电子控制行为以取代电子管的研究过程中被发明创造的;微纳机电系统(MEMS/NEMS, Micro/nano electromechanical system)也是在这一过程中,在研究固体中的应变、腐蚀等行为的基础之上开辟的一种全新的微纳机械加工制造的方法。针对微纳领域,在全新的研究方式、制造方式和工作模式下,在器件的尺度不断缩小的过程中,尤其是到了微米纳米尺度,人们不但发现了微纳尺度下很多有趣的问

题和现象，并且发现了相当广泛的应用和前景。当器件结构或系统做小了，做到了微米、纳米尺度，性能会有什么变化？做小意味着更经济和更可靠吗？微纳技术到底有什么用？为什么要开展微纳技术的研究？即使今天人们也经常发出这样的疑问。微纳技术、集成电路和微机电系统等技术发展的历程让我们清楚地看到这些问题的答案。

## 2. 微纳技术的定义及多领域下的微纳技术

1959年，著名科学家费曼（Richard Phillips Feynman）在美国物理学会作了一次展望报告：There is plenty of room at the bottom, 翻译为：《于细微处天地宽》

或者《底层淘金》。其大致内容是：在微观世界有很多待挖掘的东西，主要包括信息存储、微机械、高分辨放大显示，如将大英百科全书雕刻在针尖上、制造微机器人和微马达等。国际学术界普遍认为以该文为标志，人们开始了微纳技术的研究。图1是一些典型的微纳对象的图片和尺度。

微纳技术涉猎面很广，涉及很多学科和领域，目前似乎还没有十分确切的定义。在2000年，美国建立了第一个正式的国家纳米技术的启动计划（The U.S. National Nanotechnology Initiative NNI），其中将纳米技术定义为：包含科学、工程和技术在内的对尺度大约在1到100 nm之间物质的理解与控制。

纳米技术包含了与材料、器件和系统相关的由于具有纳米尺度结构和部件的新特性和新功能的研究和发展，并与信息技术、生物工程和认知科学等一起将会发生深刻的变革和进步，涉及众多领域，纳米技术的研究与开展对世界的经济、国家与领土的安全和发展具有重大的意义。但大致可以划分为：涉及微纳尺度信息的产生与处理（如信息存储），微纳尺度物质特性的观察与研究，微纳尺度响应、传感机制与对象控制（如扫描隧道显微镜），微纳尺度加工、制造等（如微纳机电系统），又涉及物理、化学、光学、医学、生物医疗、生态环保等诸多领域。

从生物体的角度来讲，构成人

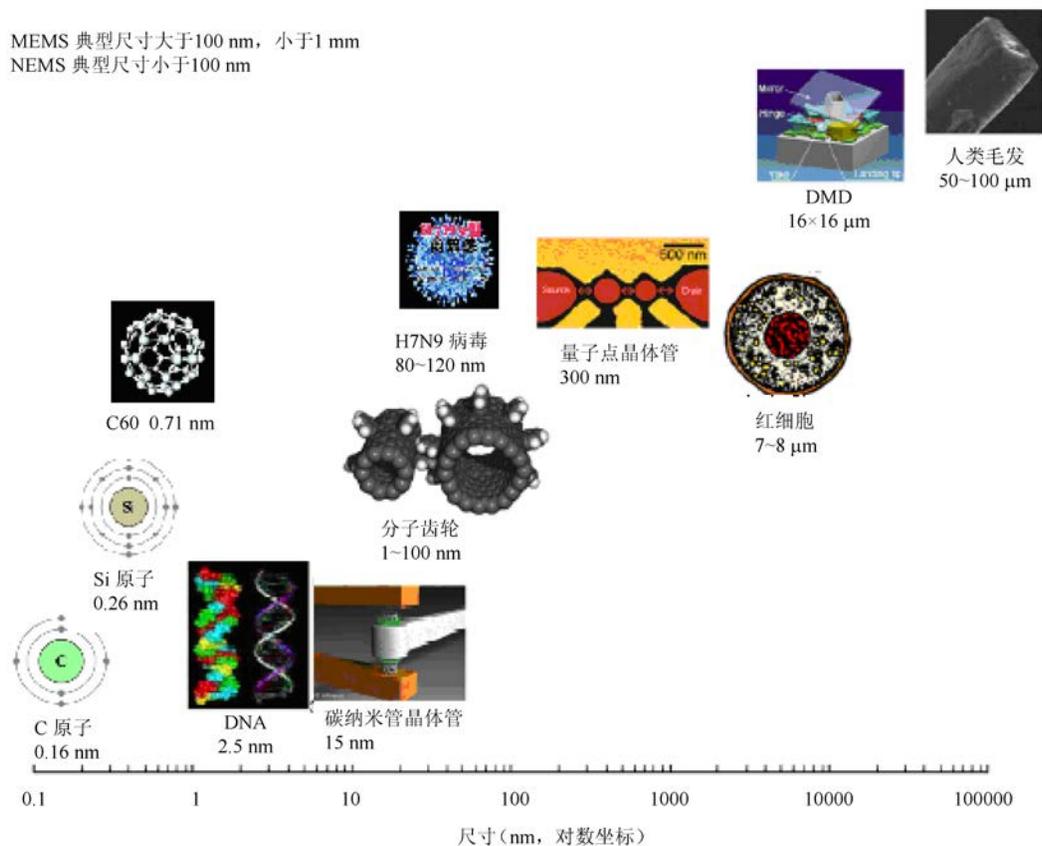


图1 一些典型微纳对象及其尺度

类一些结构单元的尺度都在微米、纳米尺度，比如（图1），人的头发直径一般在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ ，红细胞的直径大致为 $8 \mu\text{m}$ ，DNA的直径为 $2.5 \text{ nm}$ ；而H7N9病毒的直径在 $80 \sim 120 \text{ nm}$ 。元素中，碳原子的直径为 $0.16 \text{ nm}$ ，硅原子的直径为 $0.26 \text{ nm}$ 。因此，在微纳尺度下的科学研究就非常有价值，能够由此获得物性的相关共性和个性。

从材料学科上讲，微纳技术包括微米纳米尺度材料的制备和物性的研究，如碳纳米管、纳米球、纳米带、硅微孔的制备，以及该尺度下微硬度、弹性、粘性、电导等特性的研究。1985年，英国化学家克罗托（Harold Kroto）在利用激光气化蒸发石墨的实验中，首次制备出由60个碳原子组成的直径为 $0.71 \text{ nm}$ 的C60团簇结构，为碳的家族金刚石、石墨同素异形体又增添了一个新的成员；1991年日本NEC公司基础研究部在高分辨电镜下发现下了碳纳米管等。

从观察与操作上来讲，包括基于高分辨电镜（TEM, Transmission Electron Microscopy）、扫描隧道显微镜（STM, Scanning Tunneling Microscopy）、原子力显微镜（AFM, atomic force microscopy）等设备被用于微纳尺度观察和进行微纳米操作的研究。在这些仪器中，扫描隧道显微技术无疑是近几十年最重要的一种用于表面微纳尺度观察和操纵的仪器。STM是在1982年由IBM苏黎世研究室的宾尼

（Gerd Binnig）和罗拉尔（Heinrich Rohrer）发明的。其工作原理是：利用金属针尖与样品表面之间的隧道电流（隧道效应）的变化作为空间分辨敏感检测和反馈。宾尼等人用STM对原子实现了操纵，用35个氙（Xe）原子在金属镍（Ni(110)）表面上写下了第一个由原子拼写的“IBM”图案，1986年他们获得了诺贝尔物理学奖。随后，他们又发明了AFM，AFM与STM最大的差别是能够在非导体的表面进行观察和研究，这极大地拓展了设备的使用范围，扩展了表面研究领域。其中，所使用的带有针尖的悬臂梁是用硅或者氮化硅采用微机械加工的方式来制备的。AFM和STM微纳运动控制的核心器件是一种叫作压电陶瓷扫描管的器件，这种器件也是一种执行器。当在压电材料如钛酸锆酸铅PZT（ $\text{PbZrTiO}_3$ ）上施加负电压时，压电材料会收缩；反之，当施加正电压时，压电材料伸展。由此根据施加在压电陶瓷管上不同分区电极上的电压，从而可以控制压电扫描管在横向和纵向的运动。

从微纳加工制造技术和应用的层面上来讲，微纳技术是指能够稳定地、可重复、可控制地进行微米、纳米尺度结构的制造，如利用分子束外延（MBE），金属有机化学气相沉积（MOCVD）、自组装（SAM）等方法进行微纳尺度薄膜的制备，这样将会节省材料、时间和花费，而且生长薄膜的厚度均匀。

MEMS典型尺寸一般在 $100 \text{ nm}$ 到 $1 \text{ mm}$ 之间，而小于 $100 \text{ nm}$ 的尺寸则被视作纳机电系统。微纳机电系统（MEMS）的加工制造主要是指在硅上、聚合物或其他材料上，利用化学的湿法腐蚀、干法刻蚀等方法来加工，加工制造器件的线条尺度在微米、纳米量级，所制造的器件包括可动的结构和不可动的结构，包括传感器、执行器和一些微沟道等。由此，形成了自下而上和自上而下的加工方法。比如，利用多晶硅的多层沉积技术实现自下而上的加工方法，而在体硅材料上进行腐蚀、刻蚀的自上而下的加工方法。在所有这些微纳技术的研究中，以MEMS的加工和制造最为重要。

微纳技术和MEMS技术离我们并不遥远，不妨举几个具体例子看一看。

在信息存储领域，光盘是高密度信息的载体，是在一种有机聚合物如PC（聚碳酸酯）基底上涂一层有机染料，用激光可以将其烧蚀成微小的凹坑，从而实现信息的记录。如果激光烧蚀的“坑”越细小，那么就会存储更多的信息。光盘上信息的记录是用一个个“凹坑”和相对的“平地”作为“0”和“1”来进行信息记录和编码的。可以计算一下，在 $1 \text{ mm}$ 的长度上，如果每 $1 \mu\text{m}$ 间隔雕刻出一个“点”，那么，就可以雕刻出1000个“点”；如果每 $1 \mu\text{m}$ 上再能够雕刻出100个“点”，那么，在这 $1 \text{ mm}$ 上就

扩大了 100 倍的信息。因此，一个光盘上标记着 CD700MB（字节）的容量等。比如，某种光盘的径向音轨密度为 650 条/mm，激光头中发出的激光束相对光盘的转速是 1.3 m/s，若以这样的速度进行读取，就表明每 1 s 激光就要读过 1.3 M 个信息记录点。一般的 CD 机由激光头、机械结构和伺服系统 3 个部分组成。激光头是数字视听设备中的核心组件，由半导体激光器、透镜组件、光束传播系统和光敏二极管检测单元构成，最后检测到的光信号经过光电转换变成电信号用于读出、控制和分析。由此可见，该系统就是一个微（纳）机电系统。

图 2 总结了微纳光机电系统和微纳科学所涉及的 4 个重要紧密相关的组成部分或要素。第一是微纳信息和微纳结构制造的载体与对象；第二是涉及微纳尺度下物质相互作用的效应、机制与制造；第三是如何通过物理、机械、电学和光学等手段实现可靠的、连续的、微纳制造与运动控制；以及第四点，即对微纳信息、微纳结构客体的观察、敏感检测、信息提取和转换等。从以上描述来看，CD（VCD，DVD）机等设备同 AFM 的工作原理有着很大的相似性。

微纳技术在涂层表面科学领域有广泛的应用，如对飞机表面的涂层研究。涂层主要起到对机身壳体保护、抗辐射、抗霉化腐蚀、抗摩擦、耐热、使之能够经久耐用等作用。表面改性是一种有效的方法。

比如，通过添加纳米尺度的  $\text{TiO}_2$  颗粒于涂层的基体材料中，涂层就能够很好的吸收紫外线；在涂层材料中添加某种纳米尺度的氧化铝粉末就能够提高涂层的耐摩擦性能。还有一些超薄的涂层能够减少飞机表面冰和残渣等吸附物，使飞机表面能够减少空气的拖曳作用，起到了润滑减小阻尼的效果。这些纳米“添加剂”是一种功能性材料，能够很好地提高涂层表面整体性能，而并不影响其他特性。

同样，在研制飞机飞行动力学过程中，需要对机身感受到的压力、温度、加速度、速度和表面的剪切应力等物理量进行测量分析。传统的传感器体积大，不能完成大尺度上的集成和较精细的空间分辨。硅基压力传感器具有体积小、质量轻和可集成的特点，这样就能在机身的“皮肤”上布置很多个传感器，在不对飞机重量产生影响的情况下，就可以获得表面二维和空间三维气流的动态信息。这种小巧的传感器就需要 MEMS 加工技术来完成。比如，2000 年前后，美国加州理工学院的研究人员在小于  $1\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  的空间上制备了一个能够测量表面剪切应力的传感器。

如果说微纳技术在信息科学和工程中有重大应用的话，那么在其他领域同样有着不可忽视的作用

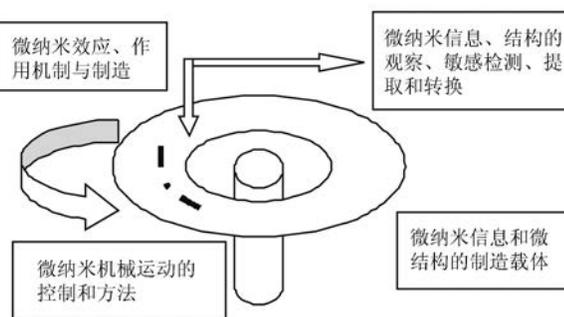


图 2 微纳光机电系统的 4 个重要组成部分

和应用前景。痕量分析就是今天研究的一个热点和重点，如机场中的安全检查，所制造的某些传感器能够对携带者的身上或衣物中释放的痕量易燃易爆化学物质进行检测。在生物医学中进行病理、案例分析，只需要从现场获得很少量的一点试样或血液、毛发就可以完成芯片上的检测分析。微纳尺度下的研究具有丰富的多样性、广泛性和实用性。因此，微纳技术成为今天各领域研究的热点。

### 3. 60 年微纳科学发展的起源和传奇

#### 3.1 集成电路

抛开材料学的一些重要发现和制造技术之外，能够一步一步深入微纳米技术，并保持着可持续发展动力的还是在微电子和微机电系统两个领域方面。

现代工业产业有两次重大革命，均发生在美国，一次是 20 世纪初的汽车革命；一次是 20 世纪中后期的半导体革命。1945 年，第二次世界大战结束后，在欧洲和美国等国家，对通讯和电子设备的技术要求越来越高，当时考虑到越洋电缆的架设，需要有 20 年的使用寿命。贝尔实验室的凯利(Mervin

Kelly)敏锐地意识到当时电报电话系统技术的不足,虽然电子管已经能够满足其中绝大部分的要求,但其个头大、耗电大、速度慢、容易碎,还需要手工安装和更换,成为限制大批量快速生产制造的一个主要矛盾,同时对其长时间使用的可靠性提出苛刻的要求。于是,一些学院和研究部门开始寻找体积更小、功耗低、无噪声、频率响应快、不容易破碎、容易制造安装、寿命长的器件来代替。

在这个划时代的半导体工业制造研发过程中,美国贝尔电话实验室(BTL)成为主要研究者之一,开展了固体上电控器件的研究,即晶体管的研究和制造。这项研究工作不仅仅用晶体管器件替代了电子管器件,而且由此开启了一项全新

的人类生产和制造模式,在硅等半导体晶圆片上开发了氧化、腐蚀、扩散、隔离、光刻、金属沉积等一系列创新型集成加工工艺。该工艺流程摆脱了手工加工制造,具有大批量生产的特点,从而使价格相当低,而器件的稳定性和可靠性又非常高。这项研究工作的原理性模型和概念是在20世纪30年代提出的,40年代末在实验上获得突破,50年代中期以前科学问题得到了较为全面的认识和掌握,50年代后期开始了产业性工程化的研发;其中,以BTL的巴丁(John Bardeen)、布莱顿(Walter Brattain)发明的三金属电极点接触型晶体管为起点,点接触型晶体管的发明过程既具有必然性,又具有偶然性。当初,贝尔实验室一开始就试图在半导

体锗(Ge)上研究和制造场效应管(FETMOS),结果布莱顿的一次实验发生了意外,由于氧化层在器件表面上粘附不牢而被洗掉,从而在随后的实验中阴差阳错地发现了点接触晶体管的放大效应。图3(a)是世界上第一个点接触型锗晶体管的照片,图3(b)是其简化电路结构示意图。在该实验中,两个金属电极之间的距离大约只有50 μm。当时,对于晶体管放大作用的物理机制是什么,一直不是很清楚,究竟是表面效应还是体效应也没有很好的实验证据。后来在一次小组会上,贝尔实验室的一位研究人员夏隆(John N.Shive)汇报了他的实验结果,其实验结果证明了空穴可以穿越锗体材料的内部,而非以前所认为的只是在表面的扩

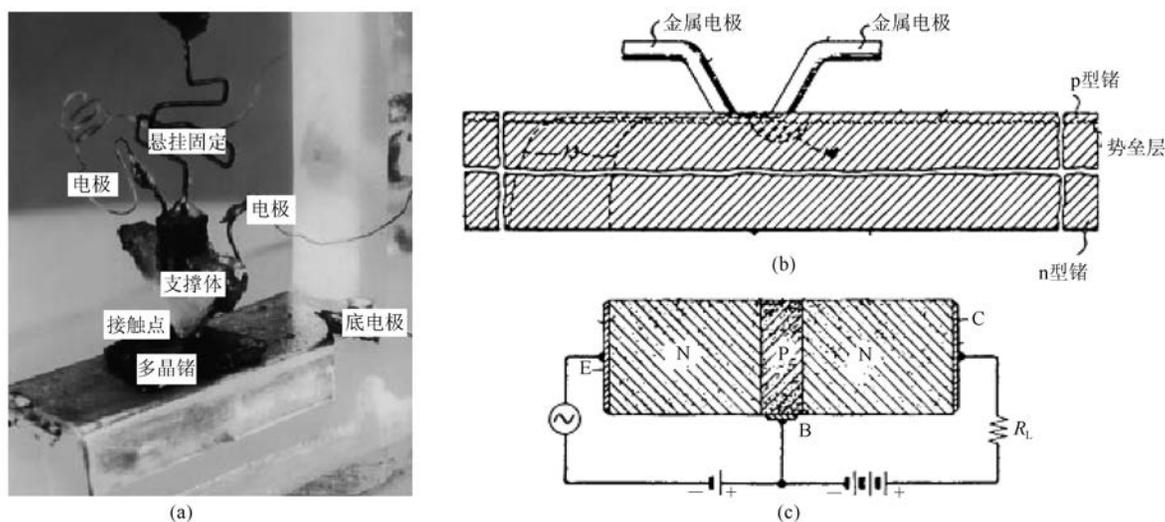


图3 (a)世界上第一个点接触型锗晶体管,其两个电极采用金箔侧贴于三角形绝缘聚合物支撑体上,两个金属电极的下接触点与p型Ge表面相接触,p型Ge表面下是n型锗块基底,基底与另一个金属电极相连构成基极(图片来源:William Shockley, The Path to the Conception of the Junction Transistor, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, NO7.VOL.ED-23, JULY 1976,pp597-620);

(b)是其简化电路结构示意图,(c)是结型晶体管电路原理图,其中,N、P、N是结型锗晶体管的三个区,左侧字母E代表了晶体管的发射极,C是集电极,而B是基极;当EB构成的回路有微小电流发生变化时,CB构成的回路就有相应的电流变化,即EB回路能够对CB回路进行电流控制,构成晶体管的放大效应(图片来源:Probir K. Bondyopadhyay, In the beginning, Proceedings of the IEEE, VOL.86,NO.1,JAN,1998,pp63-77)

散行为，即证明了晶体管的放大作用是来源于材料的体效应。随后，肖克莱（William Shockley）做出了准确的模型构建和阐述，画出了晶体管中的能带图，写出了载流子的输运方程，给出了载流子的传输和放大机制的解释。并提出了结型晶体管的专利申请（图3（c）），提出了空穴这个概念在半导体导电中的重要性（以前人们认为只有电子是能够导电的），提出了少数载流子在晶体管中的注入效应和作用，并建立了载流子传输方程，为半导体的理论建立打下了坚实的理论基础。1956年，巴丁、布莱顿和肖克莱3人由于晶体管的发明共同获得了诺贝尔物理学奖。

半导体产业性标志时期是在1960年。最初的仙童半导体公司是在1957年成立的，由8个不到30岁的小伙子组建而成，其中就包括了今天著名英特尔公司的创建者戈登·摩尔（Gordon Moore）和罗伯特·诺伊斯（Robert Noyce）。他们当初投奔诺贝尔获奖者肖克莱在加州“硅谷”的半导体实验室（Shockley Semiconductor Laboratory），后因公司的管理等问题，而集体辞职成为“叛逆八”（Traitorous Eight）。随后，这8个人在仙童公司的帮助下成立了仙童半导体公司。仙童半导体公司主要制造了第一个商用的台面型晶体管，发明了平面制造晶体管的工艺过程，实现了硅上的铝互联技术以及利用SiO<sub>2</sub>与衬底绝缘隔离技术。

该公司是晶体管和集成电路研究、制造及应用的先驱和开拓者，第一个市场化的硅集成电路在1961年由仙童半导体公司研制成功。

即使在半导体最初的发展时期，各公司就处于激烈的竞争之中。1958年，德州仪器公司的基尔比（J.S.Kilby）发明了第一块锗（Ge）集成电路，它是包括1个电阻、3个晶体管和1个电容共只有5个元件的相移振荡器！随后的1959年仙童公司的诺伊斯（Robert Noyce）发明了第一个在硅上用金属铝互连而成的集成电路。图4（a）和（b）就是二人最

初研发的集成电路照片。在2000年，基尔比（J.S.Kilby）作为集成电路的发明人之一，获得了诺贝尔物理学奖。集成电路技术从小规模（1960～1965，元件数少于100只），发展到中规模、大规模（20世纪70年代末，元件数约10万只），再到今天的超大规模集成电路（大于10万只），不仅在单个芯片上集成的晶体管等元件的数目从几个、几百个、几十万个，到今天的达到以亿计的量级，而且其主要性能参数，如中央处理器（CPU）的运行速度，按照摩尔定律的预言每隔大约两年就要翻一番，即我们常

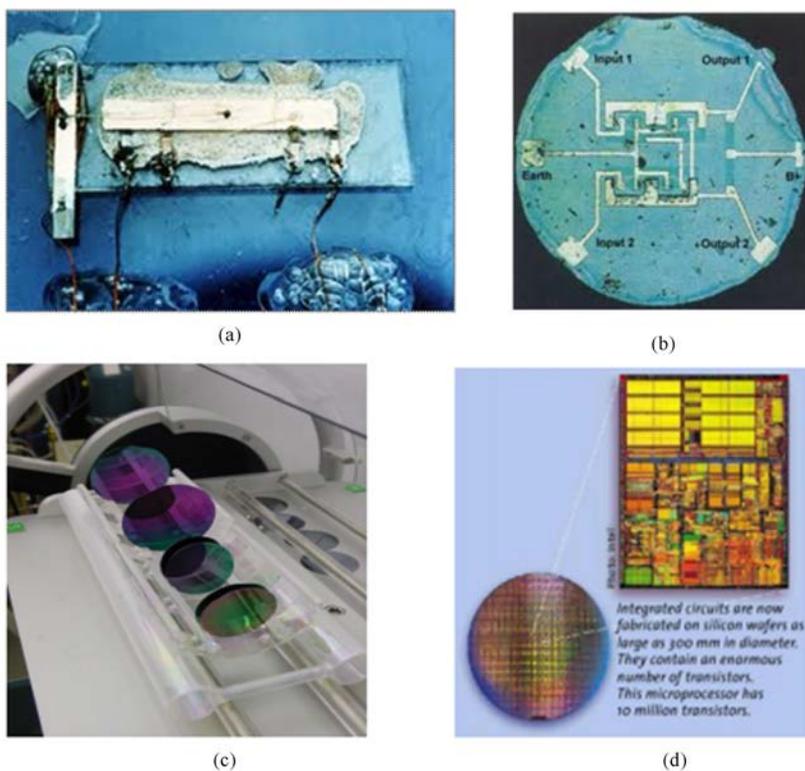


图4（a）德州仪器公司的基尔比发明的第一个在锗上的集成电路，裸露的导线（当时称为飞线）粘在玻璃和硅之间，（b）仙童公司诺伊斯发明的第一个在硅上沉积的以金属铝作为互连导线，用氧化硅作绝缘层隔离的集成电路，（c）准备放入氧化炉中的晶圆硅片，（d）制造好的晶圆集成电路和其中的1个芯片。（图片来源：Lecture 2, Introduction to MEMS, Welcome to the fascinating and wide world of MEMS,ECE/ME/IE 485,University of Illinois）

说的 286、386、486、奔腾等每一代产品，每隔一段时间就要有更快、性能更好的计算机问世，可见其发展速度之快。以 1957 年成立仙童半导体公司为代表，美国加州的圣何塞地区诞生了一批半导体制造公司，也就是后来闻名世界的“硅谷”。20 世纪 60 年代末，仙童公司的八大天才创始人解散，分别成立了英特尔、AMD 和 NS 国家半导体等集成电路行业内的巨舰，他们不仅是其间诸多重要的发明、发现和应用的发明人，也是全球建立半导体规则的主要推手，带动整个行业前进。集成电路的芯片做得越来越小，而功能越来越强，尤其是光刻加工线条越来越细，从微米尺度减小到纳米尺度。如从 1971 年英特尔第一代微处理器 4004，由 2300 个晶体管组成，主频为 108 kHz，芯片面积 3.5 mm<sup>2</sup>，采用的是 10 μm PMOS 工艺，即光刻版图中最小线条分辨尺寸为 10 μm。1972 年 HP 第一款科学口袋计算器由

4000 个晶体管组成，也是 10 μm 工艺。1979 年摩托罗拉 68000 微处理器采用了 3 μm 工艺技术，由 68000 个晶体管组成；1982 年英特尔 80286 的微处理器采用了 1.5 μm 的工艺，计算机的主频为 10 MHz，芯片面积 68.7 mm<sup>2</sup>；2000 年，奔腾 4 由 4200 万个晶体管组成，芯片面积 224 mm<sup>2</sup>，采用 0.18 μm 工艺。一般来说，工艺中最小线条每 3 年其尺度要缩小 0.7 倍！从 350 nm 以下，每一代产品中该数值的表示只是名义标称数值了，表明场效应管的物理门长越来越小了。因此，有 0.18 μm、0.13 μm、90 nm、65 nm、45 nm 等工艺节点，该数值一般是指最小门长，或金属线宽度，而 CMOS 结构中多晶硅的门长度要比这还要小。跨入到 21 世纪，微电子已经从微米步入到纳米电子的水平，2006 年 Itanium2-Montecito 采用了 90 nm 工艺，由 17.2 亿个晶体管构成，目前正朝向 32 nm、22 nm 甚至更

小加工线条迈进。微电子集成电路的发展极大地推动了现代信息革命，人类从电子管时代步入到半导体的晶体管时代，从计算器时代步入到计算机时代，又从固定电话步入到今天的无线网络信息时代，基于硅的半导体微纳米电子技术是真正引领今天时代的进步源泉。

集成电路让我们看到硅上固体电子的一个崭新世界，随着技术的不断发展，集成电路工艺中的加工线条的尺寸不断在缩小，而 CPU 的速度和功耗等性能却不断提高，计算机、通讯和网络将每个人紧密地联系在一起。那么，下面所要说的微（光）机电系统就让我们看到一个更加缤纷多彩、奇异美妙的微纳世界是与我们多么地密不可分，科研人员用他们的智慧和汗水是如何实现微纳器件的设计、制造和应用的。

（中国科学院上海微系统与信息技术研究所 200050）



#### 封面照片说明：

##### 世界上最大的太阳能船

这艘外形似飞机的船，是目前世界上最大的一艘利用太阳能驱动的船，它长 35 m，宽 23 m，由轻质的碳结构制造，最高平均航速约每小时 9 km，是由一名新西兰设计师和他的团队设计的。其所有动力全部由其自身的太阳能电池板提供，船的顶部安装有

面积达 516 m<sup>2</sup> 的太阳能电池板，这些太阳能电池板可以自由转动角度，使太阳能板在航行时始终能朝着太阳的方向，它能提供的最大电力达 120 kW。另外这艘船还有一项功能，那就是在航行途中利用特殊的滤网清除海上的污染物，是一艘名符其实的安静、清洁的环保船。

（李之\供稿）

#### 封底照片说明：纳米之花

透过扫描电子显微镜看到这束美丽的康乃馨花，它只有大约几十微米左右，是研究人员利用简单的初始材料氯化钡和硅酸钠，组装生成晶体完成的。材料在溶液中会随着环境条件，生长成不同形状的晶体，于是美丽的花儿就诞生了。

（红霞 / 供稿）