

微系统研究展望

钟先信

(重庆大学, 重庆 400044)

[摘要] 微系统是在微米/纳米尺度上开展研究工作的, 涉及到多种科学和技术领域, 含微电子、微机械、微光学、化学、生物技术和材料等, 它是多种技术的综合和多学科交叉的前沿领域, 已显示出强大的生命力。微系统研究在传统理论和技术基础上起步和发展, 人们在硅片上制作微型机械、微马达和光路系统微型化的惊喜之余, 又引起了一些困惑和思考。人们必将冲破传统科学技术和思想, 通过科研有所创新和突破, 不断开拓进取, 真正成为高新技术的生长点和面向市场新的经济增长点, 开创21世纪新兴产业, 这是当前迫切需要研究的课题。

现在, 微系统研究的热点是: 微域的科学和技术基础; 新的信息获取、传输和处理技术; 超精密检测和操作; 微系统新材料和微制造技术。

[关键词] 微系统; 微域; 信息获取与处理; 纳米测量; 新材料; 微制造

引言

当今计算机芯片技术已发展到相当高的技术水平, 已渗透到人们生产、生活的许多方面, 人们已离不开计算机芯片。但是, 以计算机芯片为基础的高技术, 也存在一些不足, 受到一定的局限, 高技术领域正处于变化的边缘。目前, 很多高技术公司研究开发一些功能远远超过现有芯片的微型装置。就信息技术而言, 多媒体、网络化和智能化的发展, 微电子信息处理已向系统级芯片集成发展, 从微型化或性能价格比来看, 信息获取(传感)技术和信息执行(执行器)技术都已成为瓶颈。为此, 迫切需要研究把信息获取、处理和执行一体化地集成在一起, 特别是光机电一体化集成芯片。这种微型装置它是继微电子之后, 在微电子、微机械、微光学等基础上把传感器、驱动器、执行器和信号处理器等集成在一起的、具有一种或多种功能的微装置, 或称微系统。

微系统是在微电子工艺的基础上发展起来的多

学科交叉的前沿研究领域, 涉及电子工程、光学工程、机械工程、材料工程、信息工程、物理学、化学、生物学、医学等。微系统的发展将大大地促进许许多多产品的集成化、微型化、智能化, 成倍地提高器件和系统的功能密度、信息密度与互连密度, 大幅度的节能降耗。因此, 微系统有广阔的应用领域, 正如美国北卡罗纳州科研三角园主任克伦·马卡斯所说: “微系统将像塑料一样到处都用, 像细菌一样无孔不入”, 例如, 用于国防、航空航天、生物医学、制造业、通信、交通、农业、环保和家庭等。众所周知, 一些典型范例, 如喷墨打印头、用于汽车安全气囊的加速度计、数字微反射镜显示器、微光谱分析仪、微化学分析实验室等。展望21世纪, 微系统就会像当今微电子技术给世界带来的影响那样, 它的发展将会引发一场新的技术革命。因此, 有人把这种微系统技术称为下一次浪潮。这是一场高技术的挑战和机遇, 可能成为我国赶超世界先进水平的高技术跃进的一个突破口。

[收稿日期] 1999-07-05; **修回日期** 1999-08-20

[基金项目] 国家自然科学基金重点资助项目(69836050)

[作者简介] 钟先信(1935年), 男, 重庆市人, 重庆大学教授, 博士生导师

1 微域的科学和技术基础

微系统科学涉及微米/纳米尺寸领域,在大尺寸结构中可以忽略的问题在微系统中可能成为关键,也会出现新的问题。譬如惯性力、重力、弹性力、摩擦力、表面张力、粘性力、静电力、电磁力等力的尺寸效应,其主导力的作用、转化规律和理论研究,还有流体在微场的约束机理和毛细管、腔中的流体压力、热膨胀和流动理论,微传热和形变理论,微摩擦、微磨损与润滑理论,微能量转化与传输理论等。

微尺寸器件对材料特性特别敏感,在一般马达和传动系统中,一旦运动起来,就有惯性运动,而直径仅几百微米的马达则不然,尺寸减小惯性减弱,表面摩擦力增大而最终占主导地位。相比而言,高速旋转的微马达能耗大,磨损大,寿命短,所以一度是国内外的热门研究课题的旋转马达,不得不转向更适合于微域特性的梳状谐振马达。在两个零件之间增加或减少表面之间的作用力,可能有完全不同的性能,例如微电触点或微阀会粘住、电子插接件因此而改变操作,两个薄片表面之间的摩擦力和粘性需要很大的力量才能分开等。

微尺度光学趋向于多个光学元件和光路集成在一个基体上或芯片上,如激光光源、光波导、调制器、滤波器、开关和检测器等。在微系统中,许多微型化、高效率的光学与电子性能优良的器件集成在一起,光学元件与机械合二为一。微光学的传光特性、光的干涉和衍射、微光栅栅距小于光波波长的特性变异、微光电子学等都是研究的热点。

在微光机电系统中,围绕新器件和新设计观念的变化,在保证功能的情况下,功耗要小,能量要高,还要解决高能量密度的能源问题。化学能量是高能量的能源,微电化学能量理论,微能量转化和传输理论等都有不少研究课题。众所周知的微电子的量子效应,在纳米尺度的微系统中如何控制和解决是一个大问题。

微系统的构筑理论和 CAD 是微系统研究的重要内容之一。MEMS CAD/CAE 技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期,经过 10 多年的研究,已取得了长足的进步,逐步建立了一定的体系,并出现了一些专用功能的商用软件。这方面的研究方兴未艾,但要达到机械 CAD 和电子 CAD 的水准还有很长的路要走。微系统 CAD 技术研究主要针对由

光学、机械、电子等构成的复杂的集成系统,这项研究的难点在于设计上的协调性和制造手段的兼容性,研究三维 CAD,如何有效地进行系统级的建模,模拟与仿真。

2 新的信息获取、传输和处理技术

朗讯公司、西门子公司和 Tellabs 公司研究下一代电话机和数据网络完全集成在微系统上。这项研究称为波分复用的新高速光传输技术。朗讯公司下属的实验室已展示了如何用微系统上的微光学镜片取代目前的昂贵装置。把这种高速传输方式同卫星技术结合起来就能使长途通信费用十分便宜。

美国加州大学一个研究小组正在研制单芯片微机电系统无线电接收发射装置,用来取代目前无线网络使用的价值 500 美元的通信卡。而且所有个人计算机和掌上型计算机都可使用这种微机电系统。

当今采用微系统的微型检测分析专用集成仪器在技术上是一场革命。例如,美国新成立的 Affymetrix 公司用激光光刻技术在玻璃上制造 DNA 分析芯片,简称为基因芯片。将血液或细胞注入到芯片上,用少量采样就能快捷检测、判断 AIDS 病人、肝炎病毒携带者和分析精液细胞等。在临床应用方面其优点更为突出,它无需分析采样的预处理,可实时检测分析,甚至实时研究细胞的功能。因此,它可广泛应用于临床、医生办公室或家中。新发明的一种不是基于硅材料的细胞分析芯片,采用发射激光的半导体 GaAs 和许多列阵探针的玻璃片构成,称为生物逻辑分析芯片,或称为机敏芯片。与传统的激光血细胞分析仪不同,细胞无需染色,由芯片上发射的激光穿透细胞,即可获得特异的光电信息。

3 超精密检测和操作技术的突破

微系统的超精密检测和操作是微系统研究的关键之一。光电显微镜在常温、大气压力下,无需任何特殊要求就可见到微细物质。在这种情况下,用微操作器即可在显微镜下进行操作。由于观测和操作光点聚焦和光波波长的限制,分辨力难以提高。为此,许多专家学者作了许多研究,例如 1956 年 J. A. Okeefe 提出了一种扫描型近场显微镜,当光通过小孔射向物体表面时,显微镜的分辨力在原理上与光波波长无关,而取决于孔的大小。1972

年 Eric Ash 研究应用微波可望达到 $1/200$ 波长的分辨力。但是由于亚纳米级尺寸小孔的制造和纳米量级扫描机构未解决而无法实现。1982 年 IBM 的 G. Binnig 和 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (STM), 4 年后获得了诺贝尔奖金。用一个原子大小的测头尖, 当其与被测表面接近时, 使测头尖与被测表面之间保持一定的隧道电流值来扫描被测表面, 用三维压电晶体作微动机构实现把原子、分子一个个按排列的位置作观测和计量。这是纳米科学技术上的一次突破。以此为契机, 世界各国学者研究了表面扫描科学和技术理论, 对隧道电流、力、静电力、静压力、热敏、表面电容、光干涉、电化学……等机理的研究, 发展了一系列扫描探针显微镜 (SXM), 如原子力显微镜 (AFM)、磁力显微镜 (MFM)、光子扫描隧道显微镜 (PSTM)、扫描电容显微镜 (SCAM)、扫描近场光学显微镜 (SNOM)、扫描近场声显微镜、扫描近热显微镜、扫描电化学显微镜、扫描离子导电显微镜等。

这类技术既可用于纳米计量, 又可将测头换上微型机械手作微细运动, 实现分子量级的运动操作。

4 微系统新材料

微系统材料的研究是一个薄弱环节。随着微系统技术研究和应用的发展, 对现有的硅材料、陶瓷材料和薄膜材料必须进一步深入研究外, 由于对新材料的要求不断增长, 迫切要求研究新材料, 如像功能陶瓷、多向异性材料、叠层化材料、突然变异材料、多孔质材料, 溶胶-凝胶法的微复合材料和智能材料等。例如, 要求可变的折射率、足够的热稳定性和中等的或较低的散射系数, 要求具有更多的功能特性等。玻璃在光学中扮演了一个重要角色, 对于这种材料有专门的技术要求, 例如在制作波导元件或梯度折射率结构及光刻的离子交换过程需要用特殊种类的光敏感玻璃。采用聚合物可制造更复杂的元件和系统。例如组合的光学聚合物波导元件通过夹合三层透明的聚合物层就可以实现二维平面波导, 其中中间一层应具有稍高一点的折射率。系统应与耦合到聚合层上的光纤的数值孔径相匹配, 在聚合层上有抗蚀剂, 在光刻中可以装有一个栅形结构, 其刻线垂直于层面, 这种栅形结构起闪烁光栅作用, 当光线从安装在栅槽中的一条光纤射出, 传到核心层并照射到光栅上时, 即可将发散

光聚焦或形成光谱, 再传到光纤阵列或线性光电二极管阵列上。这就是德国研制的微光谱仪中用的微型分光元件的复合材料。用 LIGA 技术可以实现一种光子带隙材料, 通过采用一系列掩膜进行多次照射, 用单一的斜照射就会带来斜的侧壁, 或使用多次斜照射, 经过横向交联和高温分解, 这种材料转化成一种碳化硅结构, 由于具有结晶状结构及陶瓷材料与空气有较大的介电常数差别, 它可以作为远红外或微波波段的光带隙材料。因此可以用作带通滤波器。

微芯片激光器材料的研究也是十分重要的课题。

5 微制造技术

近期发展来看, 微系统制造技术研究主要集中在硅材料的加工技术、LIGA 技术、激光微机械加工技术、等离子体刻蚀技术、flip-chip (叩焊键合) 技术和 MCM (多芯片组件) 集成技术等方面。硅材料加工技术在外延生长、热氧化、掺杂、化学气相淀积、掩膜制造和光刻等方面有不少发展。当今, 半导体集成制造技术可把上百万个晶体管, 包括光电管集成在一块硅片上, 而使复杂的、质优价廉的电子芯片处处都在应用。同样的道理, 微光机电系统也可把上百万个元器件集成制造在一起。如美国德克萨斯仪器公司用 VLSI 技术和微机械加工技术制作了大规模集成的微系统, 称为数字化微镜器件就是一个成功范例。正在研究的一种微系统印制机 (MEMS “Printer”) 可大大地降低微机械成本, 可广泛应用于制造许多不同的结构型式, 如带微阀的流体回路、微型马达和微反射镜等, 它能很好地与 CMOS 半导体技术兼容。

在这个世界上, 一切物质无论生物或无生物, 或是机械都是由分子构成的。1959 年著名的原子物理学家、诺贝尔奖金获得者 R. P. Feynman 对基本粒子之间的作用表述为: “用精密机床制造更小的精密机床, 进而制做更小的机械, 如此类推, 机械越做越小, 就能制造像巨大分子那样的机械”。他幻想在原子和分子水平上操作和控制物质。他设想: ①将大英百科全书的内容记录在一个大头针头上; ②计算机微型化; ③重新排列原子。在原子水平上构筑的材料会出现新的相互作用力、新的特性以及千奇百怪的效应。如今在 STM 基础上, 将 STM 扫描测头换成微机械手, 就可实现分子尺寸

量级的操作,在原子和分子水平上的操作和控制已成了现实。

大自然具有无可比拟的创造力。从仿生学来看,可以研究在原子水平上设计和制造像贝壳和蜘蛛网那样坚固耐用而又用途广泛的材料,像萤火虫那样晶莹透亮的发光材料等。贝尔实验室物理研究室主任泽丽·默里说:“按原子逐个排列——这就是大自然设计和制造物质的方式。如果能在原子水平上进行设计,就能根据需要制造出任何材料。”模仿这种创造力,开创21世纪的新兴产业,这正是摆在我们面前艰巨而光荣的任务。

6 结语

综上所述,微系统研究在传统的理论和技术基础上起步和发展,有许多科学和技术问题值得深入研究。微系统科学和技术正面临创新与突破,若很好与工程紧密结合,面向市场,看准苗头,把当前

和长远结合起来,持续发展下去,一定会创造出奇迹。

参考文献

- [1] Amato I. Fomenting a revolution, in miniature [J]. *Science*, October 1998, 282: 402~405
- [2] Motamedi M E. Micro-opto-electro-mechanical systems [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33 (11): 3505~3517
- [3] Picallx T, Mowhorler P J. The broad sweep of integrated microsystems [J]. *IEEE Spectrum*, Dec. 1998, (12) 24~33
- [4] 藤正殿,中岛尚正,镇西恒雄. マイクロマシン開発メートブック [M]. 秀润社, 1991. 209
- [5] 钟先信. 向加工制造极限发展的纳米技术的现状及展望 [J]. *仪器仪表学报 (增刊)*, 1995, 16 (1): 14~17
- [6] 钟先信,李建蜀,肖沙里. 微系统集成技术研究的动向 [J]. *光学、精密工程*, 1998, 6 (4): 1~6

Prospects of Microsystems Research and Development

Zhong Xianxin

(*Microsystems R & D center of Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

[Abstract] The microsystems research and development extends into various fields including the micro electronic, micro machine, micro-optics, chemistry, biotechnology and materials, making it a multidisciplinary technology integrating various technologies and knowledges. When considering potential uses in future, microsystems technologies are still at the elementary stage. Research today is mainly centered on fundamental technologies common to various microsystems.

May be the focus of the microsystems research and development as followings: science and technology at the microdomain, new signal sensing, transmission and processing technique, nanometer measurement and operation, new microsystem materials, microfabrication technique.

[Key words] microsystems; microdomain; sensing and processing; nanometer measurement; new materials; microfabrication