

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 78 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2019 年 3 月 19 日

“MEMS/NEMS 与微纳传感器”论坛综述

一、国内外研究现状

微纳机电系统(Micro/Nano-Electro-Mechanical-Systems, MEMS/NEMS)技术是一个融合了多学科的交叉技术,是继集成电路技术之后,信息产业中又一个高新技术领域。该技术既是集成电路技术在器件功能上的扩展和延伸,也是微电子超越摩尔之路向前发展的主要技术途径之一。微纳机电系统技术首先是一种先进的微纳制造技术,其与很多微纳制造技术的区别在于它延续了晶圆级高可靠性重复制造的模式,目前成为微纳传感器、微纳机电系统器件和集成模块制造的主要手段。借助该技术所拥有的低成本规模制造优势,为传感器带来了应用领域的大幅扩展,在保留传感器于航天航空、工业自动化、汽车电子和医疗设备等领域的应用外,带来了传感器在物联网、智能装备、智能移动终端和智能消费类电子等新一代事业中的应用革命,成为诸多高科技产业中的核心器件之一。而采用该技术集成制造的复合传感器提供了多传感信息获取和融合的发展动力,使传感器成为云计算和大数据挖掘实时动态信息数据的一个主要来源。作为信息领域三大技术(即

信息获取、处理和传输) 中信息源头获取的主要手段(其他包括雷达和遥感等), 传感器技术正在微纳机电系统技术的支撑下, 获得最好的历史发展机遇。

严格地讲, 虽然传感器都是将现实世界各种被测量转换为电学可检测量的装置, 但由于被测量既可能是力、热、光、磁、电、运动等不同类型物理量, 也可能是湿度、气体、化学和生物量, 因此研发不同传感器需要不同学科的知识 and 手段。换言之, 传感器确实是一个跨学科的研究对象。

而微纳机电系统技术在继承了集成电路规模制造的优势模式后, 确实结合了多学科中精细加工和微纳制造的特点, 成为了多学科可以应用的有力技术工具, 该领域发展具备鲜明的跨学科特征, 因此也具备了与生俱来的强烈学科交叉的、丰富的创新竞争力。与传统电子机械系统相比, MEMS/NEMS 器件具有体积小、重量轻、功耗低、成本低、功能强大、性能优异等优点, 这些优点带来了不可限量的新增市场。MEMS/NEMS 技术也不可避免地对相关的传统技术形成了势不可挡的替代冲击, 而能够替代优势就在于海量低成本的制造和显著的微型化。例如, 工业自动化生产装置中使用的大量传感器, 每 5 年左右都要更换, 也就是每年起码有 20% 左右的更换量。用 MEMS 制作的集成微传感器更换传统的传感器, 可以在成本、体积和可靠性等方面有很大的益处。

然而, 微纳机电系统技术给传感器带来的好处不是主要体现在产品更新换代上的, 而是借由微型化和低成本规模制造的优势, 去开拓原来没有的应用市场。在低成本微型化过程中, 传感器可能丧失了原有的高精度, 但却可以找到崭新的应用市场。例如, 原来传统的庞大加速度计和陀螺等惯性器件的精度很高, 但也只能少量地用在航天航海等昂贵领域。在 MEMS 惯性器件问世以后, 虽然精度可能下降了, 但凭借其极为微型和极为廉价的优势却使器件海量地应用到智能手机

上。安卓系统软件中开发了平均步长估计法，并结合 Wifi 等通讯技术，可以避免精确的导航计算，仍然实现了对人员位置和运动轨迹的有效判断，使惯性传感器破天荒得到了广泛的应用。当然，由于 MEMS 微加工精度的提高，也使一部分传感器的性能超过了传统庞大传感器。例如最先进的 MEMS 气压传感器的敏感膜片厚度控制达到了几个微米，使廉价而微型的 MEMS 气压传感器实现了对 20~30 厘米高度变化的精确分辨，用大约二十几美分这样廉价的高度传感器竟然可以进行手机室内导航和玩具无人机的定高控制，这是很多传统的昂贵传感器都很难做到的。

当下正在全球范围内蓬勃发展的可穿戴装备、物联网和智能家居系统等领域，为传感器的海量应用提供了广阔的天地。而大数据和云计算等业务向各行各业不断的渗透，也需要各种传感器实时采集各种数据来支撑。考虑到智能化、微型化、高性能化、集成化是未来航天航空和武器装备发展的重要目标，而 MEMS 技术正是实现这一目标的重要手段。采用 MEMS 技术不仅可以使武器装备的性能提高、体积和重量进一步缩小，而且还可以稳定地批量制造和可靠地应用。而对于机器人、AI 系统乃至仿生和类脑智能系统的向前发展，作为五官和触觉的传感器是绝对不可或缺的。在上述先进应用领域的驱动下，近年来 MEMS/NEMS 传感器的市场容量迅猛扩张，2014 年市场规模已达到 130 亿美元，预计到 2019 年就将达到 240 亿美元，成为超越摩尔产业中发展最快的分支技术之一。《国家集成电路产业发展推进纲要》中已明确提出，以“大力发展模拟及数模混合电路、微机电系统(MEMS)等特色专用工艺生产线”作为加速发展集成电路制造业的主要措施。因此，MEMS 技术与微纳传感器已成为全世界非常关注的热点研究领域。

当今传感器一个重要的发展特征是，以往单个传感器作为产品的时代正在被集成的 Combo Sensor 和 Sensor Fusion 所代替。在安卓等

系统软件和算法的定义下，往往需要多个传感器协同工作来完成一个完整的应用功能，这在传感器设计方法学和系统芯片的集成制造方法方面提出了新的挑战。由于传统形式的分立传感器件在大多数新的应用领域不能直接获得应用，这也直接推动了 MEMS/NEMS 传感器在微型化、集成化、低成本等方面迅速发展，未来分立式 MEMS/NEMS 传感器的市场增长将放缓，具有多传感器融合（Sensor Fusion）的单片集成多功能复合传感器（Sensor Combo）在今后的应用中逐渐成为产品技术的主流。例如三轴磁强计、三轴加速度传感器、三轴陀螺所组成的运动姿态测量 9 轴 Combo 传感器如今已成为智能手机的标配，有些手机中还集成了压力传感器用于测量位置高度的变化，形成了 10 轴 Combo。而美国密歇根大学在 10 轴 Combo 的基础上，为无人机应用研发了包括高精度 MEMS 时钟振荡器在内的 11 轴集成复合传感器。

由于智能手机等应用系统对传感器的微型化和低功耗化提出了前所未有的高要求，对 Combo 传感器芯片的 MEMS 集成工艺提出了挑战，在单芯片上用标准统一的工艺来集成 Combo 传感器已经成为产品制造的基本诉求。在这方面，Robert Bosch、意法半导体、英飞凌和飞思卡尔纷纷推出各自的单芯片多用途标准制造工艺。在美国加州，斯坦福大学与 Bosch 公司常年合作，致力于推进一种叫 Epi-Seal 的单芯片集成工艺，不仅能集成 Combo 传感器，还能将高真空封装的微腔体直接用薄膜工艺技术制作在芯片内，提供给高性能谐振类传感器以高 Q 值工作。总之，基于新一代 MEMS 技术的单芯片集成的复合传感器将成为市场的主流。例如，意法半导体已发布集成了磁强计、加速度计、陀螺和压力计的 10 轴复合传感器。有些产品甚至要求将多轴传感器与接口处理电路乃至协处理器芯片以 SoC 或叠层高密度 SiP 的形式实现高密度集成，最终打造出高水平的 Sensor Fusion 产品。

我国改革开放 40 年，用这短短的时间跨越了西方大多数国家 100 多年走过的工业化进程，并于近期与国际先进国家同步进入到信息产

业阶段。这其中，我们也在工业化基础方面留下了很多不足和缺憾。在 MEMS 传感器方面，我们没有建立起像 Robert Bosch 和意法半导体这样的强大 IDM 企业（即自主设计并自己生产的企业）。我国前段时间在各部战略部署的支持下，建立了若干个 MEMS 生产线，有较大的生产能力。但这些依托于某个研发单位技术基础建立的生产线并没有很多在市场上有足够竞争力的产品技术积累，而用一两个产品的产量是很难支撑和维持一条花费巨大的净化制造车间的。在微电子产业方面，我国已经成为一个半导体的“世界制造工厂”，诸多半导体代加工厂（foundry）制造产能十分丰厚。另一方面，我国的 MEMS 传感器研发成果逐年增多，回国留学生也给国家带来了许多新的相关技术，大量的 MEMS 传感器初创企业纷纷成立。我国在该领域的主要研究机构，如中国科学院上海微系统与信息技术研究所、电子学研究所、技术物理研究所以及北京大学、上海交通大学等在过去几年进展迅速，在新型敏感材料、新器件和新方法的部分研究方面已经达到了国际先进水平。

微纳机电系统技术和微纳传感器已在国民经济和国防建设中发挥了不可或缺的支撑作用，并将进一步引领未来信息技术和人工智能的发展。

二、论坛概况

2018 年 7 月 3~4 日，以“MEMS/NEMS 与微纳传感器”为主题的第 78 次学部科学与技术前沿论坛在中国科学院上海微系统与信息技术研究所嘉定园区召开。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院技术科学部、学部学术与出版工作委员会承办，中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室和《中国科学》杂志社协办。

本次论坛的召集人（执行主席）为王曦院士，参加论坛的特邀嘉宾、主题报告人、讨论专家、学者以及学生等约 90 余人，他们来自浙

江大学、中国科学院上海分院、中国科学院上海技术物理研究所、加拿大工程院、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、中国科学院电子学研究所、北京大学、复旦大学、上海交通大学、东南大学、国家纳米科学中心等 20 余个高校与科研院所，涵盖了国内从事 MEMS/NEMS 与微纳传感器研究的主要单位。

三、论坛目的、重要性和重点关注的问题

传感器技术属于感知学科领域的信息获取技术,是 21 世纪关键技术之一。其中微纳传感器作为传感器技术的“后起之秀”,已经渗透到材料、能源、交通、信息、工业、农业、科技、环境、资源、医学、生物、国防、天文、食品、健康等几乎所有领域。特别是在汽车电子、智能手机、工业自动化、机器人、现代农业、环境监测、“互联网+”、位置服务、物联网、“智慧+”、侦查监视、精确制导等新兴领域的带动下,微纳传感器技术的发展方兴未艾。人类进入信息时代后,对微纳传感器的依赖已达到空前的程度,微纳传感器技术成为发达国家依赖的、具有战略意义的核心关键技术,微纳传感器行业成为支撑国家经济社会发展的基础产业。

在这样的大背景下,本次论坛的主题拟定为“MEMS/NEMS 与微纳传感器”。论坛分成若干专场进行,每场都邀请主题发言,佐以自由发言和充分的讨论。目的是讨论我国有关的实际需要,理清国内外发展的总脉络,寻找我国独立自主创新的可能途径,并就相关科学技术的发展提出目标与战略方向。

此次论坛重点关注两方面的问题,分别是“MEMS/NEMS 与微纳传感器发展战略及国际前沿”和“MEMS/NEMS 与先进传感技术”。

四、报告内容及讨论情况

(一) 议题一: MEMS/NEMS 与微纳传感器发展战略及国际前沿

1. 中国科学院上海技术物理研究所褚君浩院士：现代传感器技术研究若干进展

当前正处于第四次工业革命时代，信息时代特征深化发展，发现和发明多轨并行，交叉推动，信息技术和多领域技术融合发展。其发展态势为：智能化分布式能源系统的广泛应用，智能化复杂体系的发展和建设，智能化制造和新材料技术发展，机器人将进入各个领域，信息集约化是其领域的发展方向。

报告指出，智慧地球是互联网+物联网+智慧识别与控制，而物联网的核心是传感器。传感器是智能化的核心技术，智能化的信息获取包括动态感知、智慧识别和自动反应三部分。这就要求传感器获取基础信息，并建立物理模型对其智能识别，利用大数据和网络平台对其自动反应。传感器的发展趋势：（1）建立极致掌握材料器件技术和传感器技术基础上的高性能传感器；（2）应用新目标驱动的建立在交叉科学和技术集成基础之上的新型传感器；（3）构建异质材料新结构，发现多场耦合新效应，实现新型传感器。

报告列举多个多色、多波段传感器及其融合与集成的关键技术案例，生动形象地对发展趋势进行了阐述。报告最后指出，高性能多频谱传感器信息获取的智能化谱像识别是传感器未来的发展方向。

与会专家代表对褚院士的报告进行了热烈讨论，认为智能传感器大有可为，前景光明。

2. 中国科学院上海分院王建宇院士：光的极限探测在空间探测和通信中的应用

光子探测是光探测的极限形式，随着探测器技术的快速发展和性能的不不断提高，系统对少光子和单光子的探测能力也不断提升，应用的领域也不断扩大。如光子型激光雷达是空间激光雷达发展的一个主要方向，能够在很大范围内提高雷达的灵敏度，降低对激光器功率的要求；在空间量子通信中，单光子探测器是系统最核心的器件。

报告介绍了光子探测技术发展情况和在空间探测和通信中的应用，包括激光雷达、量子通信等的应用情况，以及一种新的应用——空间光子通信技术，该技术具有通信速率高，通信距离远，对卫星资源需求少的特点，是今后深空探测中数据传输的首选方案。报告还介绍了光子通信的基本原理及应用预期、光子通信对光子探测器的需求、深空光通信中常规体制的问题。还详细介绍了深空光子通信中的关键技术，包括单光子调制技术、高容错编码技术、高效单光子探测技术、深空光路对准技术等，分析讨论了其存在的背景光干扰抑制、探测速率及超远距离光链路的捕获、跟踪与瞄准等技术难点。

报告最后指出，单光子探测是未来量子通信、光子通信的核心器件及性能保障。在空间量子通信中，暗计数与探测效率是关键指标要求；将由可见光范围转向 1550 nm 波段。对于空间光子通信而言，光子分辨率及探测速率是关键指标要求，探测阵列、面阵列探测器是未来发展趋势。

3. 上海大学孙钰院士：操控和表征人类心肌细胞用于老药新用和个性化医疗

心脏能够完成一系列复杂的任务，包括有规律地产生或传播电信号（适当的心率和节奏），并且产生足够的收缩力。与此同时，间隙连接胞间通信是细胞活动的重要组成部分，是相邻心肌细胞间电传递和机械扩散的必要条件，间隙连接障碍是引起室性心律失常等心脏疾病的主要原因。为了探索心脏病的发病机制和定量化药物疗效，开发了一个能够在细胞培养箱中连续运行并进行长期测量的单层心肌细胞量化平台，用于自动测量间隙连接的扩散和传导功能，以及连续、长期测量 hiPS 心肌细胞的收缩性、跳动率和跳动节律。

此微器件由可变形膜和碳纳米管组成，在膜上分布 hiPS 心肌细胞后，其收缩引起碳纳米管的电阻变化，由此能够长时间（14 天）连续测定多组单层 hiPS 心肌细胞的收缩力、搏动率、搏动节律。该微器件

连续读取的信号显示，hiPS 心肌细胞从第 2 天开始搏动，第 5 天趋于平稳，单层 hiPS 心肌细胞产生的平均收缩应力为 2.34 ± 0.041 kPa，心率为 1.17 ± 0.068 Hz。该微器件阵列还对跳动速率、节奏和收缩性进行了综合测量，同时量化了细胞对不同浓度的兴奋剂和拮抗剂的反应。药物测试结果显示，此技术对于老药新用和个性化医疗有极大的应用潜力。

4. 东南大学 MEMS 教育部重点实验室黄庆安教授：面向《中国制造 2025》的 MEMS/NEMS 发展战略研究

统计结果显示，2017 年国际 MEMS 产业市场约为 420 亿美元，预计 2023 年达到 820 亿美元，年增长率 17.5%。到 2023 年 MEMS/NEMS 需求发展主要在智能汽车、智能手机、医疗与健康监护 MEMS、物联网传感器、机器人与无人机、军用 MEMS 等方面。

我国从 20 世纪 80 年代发展 MEMS/NEMS 技术产业起，国家自然科学基金、国家“973 计划”和“863 计划”均有大规模扶持和投入。中国 MEMS 产业快速崛起，涵盖了 MEMS 软件与专业电路、MEMS 产品设计，MEMS 封装与测试以及 MEMS 前端制造工艺线等方面。近年来我国智能传感器生态趋于完善，设计、制造、封装等重点环节均有骨干企业布局，现已初步形成了长三角、珠三角、环渤海以及中西部地区四大区域发展的产业空间格局，2017 年中国 MEMS 市场规模达到 421.4 亿元人民币。现在面临的问题与挑战在于：（1）基础研究薄弱，原始创新不足，MEMS 研究长期处于跟踪中有创新的状态；（2）产学研用结合不紧密，缺乏成套关键核心技术，严重制约了 MEMS 发展；（3）高端 MEMS 器件对外依存度高，受制于人的被动局面没有从根本上改变。

《中国制造 2025》对我国的 MEMS 产业提出了智能制造工程和工业强基工程，对 MEMS 的需求由渐进式技术创新转化为颠覆性技术创新。“十三五”国家重点研发计划的 64 个国家重点研发专项之一是

“制造基础技术与关键部件”，其中第三项为先进传感器，对此我们要顺应传感器微型化、集成化、网络化、智能化发展趋势，探索新型微纳传感器设计、制造工艺等前沿技术，引领未来发展；面向工业微纳传感器发展需求，解决涉及技术及设计工具、兼容制造工业及检测、封装、可靠性等关键共性技术，推动微纳传感器产业化进程；围绕智能制造对微纳传感器及相关微纳器件需求，研发一批微纳传感器产品，支撑我国智能制造发展。

（二）议题二：MEMS/NEMS 与先进传感技术

1. 上海理工大学詹其文教授：新型光学传感检测技术及其应用

光学检测传感技术和微纳加工技术在现代生产制造产业以及日常生活中有着广泛的应用，所以对传感器检测技术的要求也在不断提高。光学传感与检测技术包括光强、光谱、时间和偏正等各种信息，这些信息可以高通量平行处理，采用新型的荧光材料探针以及超衍射极限的荧光显微技术可以开发新型的荧光传感器件。

利用微纳加工技术可以加工出非常复杂的结构，另外通过加电、加热、加光场等方法改变一些相变材料在空间上的分布信息，而将光场的相位耦合到一起可以产生很多新的现象，利用这些现象可以尝试一些以前不太容易做到的探索性试验，由此建立起相关的试验平台，比如新材料和微纳结构组合，新光场和微纳结构组合，新材料加微纳结构加新光场等。

在新型材料方面，通过改进分子筛使其具有更好的稳定性、选择性和可重复性，在检测大气污染物成分中有重要作用。传统的方法是根据检测到的荧光强度判定成分，但是检测的荧光光源多少存在差异，导致结果的不确定性，而通过分子筛材料不仅可以检测到荧光强度的变化，还可以检测到荧光吸收峰的变化，从而准确检测大气污染成分。报告认为，将微纳加工和光场调控手段相结合的方法可以开发出更多的光学检测传感器。

2. 中国科学院电子学研究所夏善红研究员：微纳传感器与微系统技术发展及应用

报告以面向水环境监测的微传感器集成芯片以及无线网络传感器系统为例，介绍了微纳传感器与微系统技术发展及应用进展。面向环境监测和物联网发展国家重大需求，针对重金属和持久性有机污染物等痕量、高毒性污染物的超灵敏、高特异性检测，深入研究新型识别元件、高效换能器、样品分离富集预处理方法以及相关表面界面过程动力学行为。首次将辛基吡啶类离子液体用于汞的富集，获得了对汞的高选择性和高富集率；提出适合汞离子在线监测的盐控离子液体分散液相微萃取汞的方法；研制出基于离子液体的汞在线萃取分离系统，极大地简化了萃取和分离操作；提出“离子液体分离富集-有机溶剂稀释-有机相溶出伏安检测”的分离富集检测联用模式，实现了 I 类水中痕量汞离子的高灵敏检测。通过该研究有望获得显著提升微纳生物化学传感器系统灵敏度、选择性、重复性、稳定性以及长期自治检测能力的新的科学方法与技术途径。

报告指出，目前传感器领域还面临诸多的发展问题：传感器品种繁多，是一个多学科交叉的研究领域，基础科学问题与应用技术问题并存；研究目标分散，研究周期长，而国家项目立项注重短期高显示度成果，多年来难以得到国家项目的系统性支持；随着物联网的兴起，传感器技术受到关注，但我国物联网研发大部分投入在通信和网络方面，传感器研发投入严重不足；微纳传感器与微系统是具有重要战略意义的发展方向，有必要进行总体规划部署。

3. 北京大学李志宏教授：植入式脑电极阵列

报告概要介绍了世界范围内蓬勃发展的“脑计划”探索。美国、欧盟、日本以及我国都启动了旨在探索人类大脑工作机制、绘制脑活动全图，并最终开发出针对大脑疾病疗法的研究项目。脑科学在神经机制及相关神经修复、神经类疾病的诊疗机制，类脑计算机以及人工

智能开发，脑成像及神经活动的精细调控，以及人机接口的开发等方面都需要广泛深入的研究。

MEMS/NEMS 微纳传感器在脑计划中已经发挥重要作用。在猴子大脑植入电极，通过电极提取猴子大脑信号，解析信号并执行抓取香蕉的过程。对猴子进行神经阻断，通过电极实现神经控制功能，甚至实现了两只猴子的远程异体控制的实验。在疾病治疗方面，渐冻症患者通过电极控制光标移动的实验已取得成功。这些实验揭示了电极在脑神经研究中的重要作用，并为许多疾病治疗带来了曙光。

报告还介绍了 **MEMS** 领域植入式电极国内外制造及研究水平。介绍了经典的犹他电极、密歇根电极的制造和应用，以及采用新式的电化学电极、世界热点研究领域微光电极等对神经递质、多巴胺、光基因等进行的研究和应用。此外还介绍了用于体外神经细胞培养研究的微电极阵列情况，以及生物兼容性更好的可降解植入电极，与大脑皮层紧密贴合的柔性电极等新型电极的研究情况。目前各种电极主要依赖进口，价格昂贵，无法满足广大生物研究工作的需要。因此，国内急需开发低成本，自主研发的各种植入式电极以及体外电极。

4. 中国科学院上海技术物理研究所龚海梅研究员：短波红外 InGaAs 传感器的应用与发展

报告简要介绍了短波红外波的特点和需求、**InGaAs** 成像器件和高光谱器件的发展及其航天应用验证、**InGaAs** 传感器的工程化拓展研究以及 **InGaAs** 传感器的应用展望。

短波红外波段是重要的大气透过窗口，地物和大气在该波段表现出独特的光谱特性，在海洋、大气、国土资源及灾害监测等领域具有重要作用。面向航天遥感应用需求，中国科学院上海技术物理研究所联合中国科学院上海微系统与信息技术研究所，近 10 多年来共同开展了高性能短波红外 **InGaAs** 传感器的研究，取得了一系列重要进展。在 0.9~1.7 μm 成像用短波红外 **InGaAs** 传感器方面，解决了传感器组

件的量子效率、暗电流、响应均匀性、串音以及噪声等多项关键技术，室温暗电流密度小于 5 nA/cm^2 ，室温峰值探测率优于 $5 \times 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。在 $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 高光谱用短波红外 InGaAs 传感器方面，针对失配体系外延材料开展了暗电流机理研究，以及抑制失调电压的高帧频读出电路研究，暗电流密度小于 $10 \text{ nA/cm}^2 @ 200\text{K}$ ，探测率优于 $5 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。自主研发的 InGaAs 传感器，已成功实现了航天工程应用，已分别于 2016 年 9 月和 2016 年 12 月随 TXX-2 宽波段成像光谱仪、FY-4 多通道扫描成像辐射计发射，目前在轨应用正常。

在推进自研 InGaAs 传感器实现航天有效载荷应用的同时，还积极开展其在军民领域的工程化拓展应用，将航天用短波红外 InGaAs 传感器及光谱成像技术向产品化方面发展，实现了 320×256 、 640×512 、 256×1 等规模的传感器的批量生产，以及相应的微型短波红外相机、微型近红外光谱仪等，有望在单兵装备、物联网、智慧城市等领域实现应用。

5. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所李昕欣研究员：针对物理传感器与生化传感器各自具体发展阶段的思考与建议

报告简要介绍 MEMS 物理传感器、化学/生物传感器、MEMS 芯片式微纳集成传感器和物联网时代的传感器国际研究趋势、国内外研究现状和中国科学院上海微系统与信息技术研究所的研究进展、不同种类传感器各自发展阶段瓶颈的解决方法以及应用前景。

课题组针对不同种类传感器各自发展阶段的瓶颈采取不同的有效方法，通过实践得到极大解决。利用创新的“微创手术 (MIS)” MEMS 工艺，发明了微孔设计布局规则，实现了芯片加工体积更小、成本更低、成晶率更高、结构更复杂、功能更强大的海量工业化生产。以自主研发的谐振式纳克以上质量分辨率的微质量型传感器为工具，以 Langmuir 吸附理论、Freundlich 吸附理论、BET 吸附理论、克劳修斯-克拉伯龙方程等为指导，实现了对敏感材料灵敏度、选择性等特异性

的测量，对其焓变、活化能、吉布斯自由能等变化内因的精确计算，进而对敏感材料的选择优化提出改进方案。为适应物联网时代新兴高科技的发展，采用 E-to-I 解决思路，成功研发了预设阈值唤醒能量、采集和信息协同获取能量的传感器，可在石油管道西气东输、南水北调等重大工程中开展更为广泛和积极的应用，在小区商超千家万户安全防护中得到普及，为今后物理、化学/生物等各类传感器的发展奠定坚实基础。

五、共识和建议

针对国际整体研究形势，结合国内研究现状和进展，大家认为各单位既要发挥各自研究的特长，继续深入开展针对性的研究，同时，也应该相互合作、互通有无、相互支持，避免不必要的资源重复投入。

论坛形成如下建议：

1. 将超越摩尔与延续摩尔定律两条路径结合起来发展

MEMS 传感器属于超越摩尔的发展范畴，因此很多时候我国的科技发展规划中都把它与集成电路发展战略分离开来，而根据其先进制造和自动化检测仪表的传统属性，将其发展放到关键基础部件或自动化机器人部分，与微电子产业隔离起来。而在信息领域，很多发展战略中将传感器研究主要集中在传感器的应用研究方面，而对传感器本身的研制支持力度较小。

事实上，MEMS 传感器技术本身的发展从来都是受微电子技术发展影响最大的。虽然集成电路产业中很多技术是延续摩尔定律的部分，但在模拟器件、功率器件等方面的发展与 MEMS 传感器有很多相同点，属于超越摩尔方向的。即使 MEMS 传感器发展具有超越摩尔定律属性，但与集成电路一样，其海量市场应用的特点使其与 IC 一样追求廉价高可靠的规模制造，因此也需要在 MEMS 工艺百花齐放的基础上，实现制造工艺的相对标准化，即不总是一个器件一个工艺，而应该面对广泛应用的器件，力求采用相对一致的标准工艺来制造一大类

或几大类传感器产品。另外，往往 MEMS 传感器与信息处理的集成电路需要进行 SoC 或 SiP 方式的集成，他们之间是缺一不可的。事实上，往往传感信息处理的接口集成电路本身的造价比 MEMS 传感器芯片部分的还要高很多，但是这里 MEMS 传感器芯片部分是整个产品的主体功能部分，没有 MEMS 传感器部分，其接口电路部分将不会存在。因此，在制定发展战略时，不能单纯以分别的产值关系来衡量重要性，而要认识到，MEMS 传感器部分是产品存在的前提和基础，或者说 MEMS 传感器对微电子或信息产业具有提供崭新市场和带动尾部高附加值的作用。

2. 要特别重视产业链中测试技术这个短板效应

MEMS 传感器与集成电路之间最大的不同之处在于：集成电路是电信号输入电信号输出，但传感器是自然界的非电量输入，而执行器是非电量输出。对于集成电路，很多情况下在晶圆级就可以依靠自动测试机软件进行电信号输入和输出间关系的确认来完成 IC 功能的测试。然而传感器不行。物理传感器需要物理变化量的输入，生化传感器甚至需要生化反应变量的输入，这在探针台上是非常困难做到的。另一方面，将传感器芯片与接口电路芯片连接并封装好后进行测试，在传感被测量输入方面是更容易实现的，但此时判断传感器功能的好坏又显得为时已晚，因为一个传感芯片的不正常将导致整个封装好的传感微系统报废，成本上影响很大。一般对于一个国外企业来讲，MEMS 传感器和执行器的产品测试车间是不能随便参观的。自动测试补偿技术的高产能、高效率 and 低成本，是该企业产品能够进入市场的一个关键环节。这种测试技术，加上定制的测试装备，是一个企业的高度机密。我们国家在发展传感器产业时，往往主要关心制造设备和生产线的能力建设，而忽略了传感器在测试这个环节的特殊性和产品化短板效应。这一点尤其要引起有关部门在制定发展规划时高度关注。

3. 充分发挥我国产学研结合与多学科交叉的优势

由于传感器的种类繁多，因敏感对象的不同而必须涉及到很多学科，比如，生物传感器往往需要生命科学、纳米科学和信息科学交叉的 BNI 融合。所以，作为信息获取器件的传感器，其发展离不开与很多相关学科的交叉，特别是先进材料学科中的敏感材料，在传感器中是不可或缺的。此外，对于复杂对象的传感检测，仅仅研究材料和物理层面的科学与技术也是远远不够的，能使传感信息进一步提升和纯化的智能算法等科技手段必须充分运用进来。

在我国进行传感器的研发和产品化应用有着十分优越的多学科交叉融合基础，也有着优越的产、学、研、用合作机遇。当今的高科技，所谓前沿科技与实用化技术之间的鸿沟其实并不是那么宽，一个新想法或新发现的一个敏感效应，有可能在短短几年之后变成真正的实用传感器产品技术。当然，没有一个科技成果可以单纯在实验室中变成产品，关键是要通过学科间合作和产学研用间的反馈与验证，尽快地将敏感效应转化成新的传感器产品技术。相关项目实施战略中，要十分关注这一点。

4. 充分利用好我国的新一代应用平台，并在战略上持之以恒

为了改变我们在传感器研究方面大多跟踪和追随先进国家的现状，我们要特别关注传感器的应用平台。我国近期在电子商务、互联网+应用和高速铁路系统等领域，已经建立了在国际上具有一定业务领导力的平台。而我国的传感器研发事业，应特别注重结合这些具有发展话语权的平台的应用需求，这样在传感器的发展中，会逐步建立我们的发展路径。例如，目前中医药信息化和现代化已经上升为国家发展战略，这其中需要很多传感器的应用来支撑。由于我国在中医药发展方面的独特优势，以及使用中医技术追求健康的受众数量巨大，在我国率先实现传感器在中医药事业中的广泛应用，将是具有得天独厚的良好基础的。我们完全可以借助我国的中医药事业平台，引领中医用传感器实现蓬勃发展。

此外，传感效应的产品应用相对于其他微电子器件来说，寿命要长得多。运用基本相同的敏感原理和效应，只需根据应用的创新进行相应的变化，完全可以在很长时间内不断实现新的产品化应用。例如采用硅压阻效应的硅压力传感器，从 20 世纪 80 年代起就在工业自动化领域广泛应用。之后随着工艺技术的不断进步，传感器越来越小，越来越廉价，规模制造能力越来越强，使同样原理的压力传感器先后应用到航空、医疗、汽车电子等领域，近期又应用到智能手机和智能家居消费电子领域。因此，在制定发展战略时，要充分关注产品技术的持续改良和更新，尽量延长每种传感原理在崭新应用领域的适应能力，形成系列的产业化亮点。

六、与国外同领域研究相比较的优劣体现

总体上看，目前我国微纳机电技术和微纳传感器研究与产业仍存在如下问题：（1）核心技术和基础能力缺乏，新原理、新器件和新材料传感器的创新和产业化能力不足；（2）共性关键技术尚未完全突破，在设计、封装、装备等技术方面与国外相比都存在较大差距，国内没有自主知识产权的微纳传感器设计软件，未形成微纳传感器封装系列和标准，制造微纳传感器的工艺装备被国外垄断；（3）产业结构不合理，品种、规格、系列不全，技术指标不高，测量精度、温度特性、响应时间、稳定性等指标与国外有相当大的差距，国产微纳传感器可靠性比国外同类产品低 1~2 个数量级；（4）企业研发能力弱，科研与生产结合不紧密，从目前市场份额和市场竞争力指数来看，外资企业仍占据较大的优势，以 MEMS 传感器为例，仅苹果与三星两家公司在消费性电子微机电传感器市场中所占份额就达到 67%。特别是在高精度、高敏感度分析、成分分析和特殊应用的高端传感器方面与世界先进水平差距巨大，几乎 100% 中高端传感器靠进口，90% 的芯片依赖国外。而我国的优势在于我们有巨大的市场、独立自主且门类齐全的科技体系以及具有发展话语权的应用平台。目前我国微纳传感器研究迫

切需要提高综合竞争力，并逐步参与到国际竞争中去。

七、特色和创新

微纳机电系统技术和微纳传感器已在国民经济和国防建设中发挥了不可或缺的支撑作用，并将进一步引领未来信息技术和人工智能的发展。本论坛通过对目前微纳机电系统和微纳传感器领域发展现状和动态的深入研究，认真分析了我国与国际领先水平的差距，从学科发展规律、研究特点以及产业化应用需求出发，前瞻性地思考学科和产业技术的战略布局方略，就相关重要科学技术问题、前沿发展方向、推动发展的政策措施和人才培养模式等多个方面，提出重要的建议，为政府相关部门制定战略规划提供参考，同时也为我国大专院校、科研院所、企业的相关人员提供了借鉴。

（作者：王曦，中国科学院院士，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员；李昕欣，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员；于海涛，中国科学院上海微系统与信息技术研究所研究员）