

文章编号: 2095-4980(2016)05-0793-07

原子制造与原子微系统: A2P 与强约束 集成微系统技术的结合

李沫^{a,b}, 李倩^{a,b}, 张健^{a,b*}

(中国工程物理研究院 a.微系统与太赫兹研究中心, 四川 成都 610200; b.电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 介绍了国外从原子到产品(A2P)研究, 阐述了强约束集成微系统技术的微观架构及其两“微”内涵。在此基础上, 将 A2P 与强约束集成微系统理念相结合, 提出了原子制造和原子微系统概念, 并初步分析了其科学技术框架体系。我们认为, 原子制造和原子微系统技术是从“材料到系统”的集成微系统技术向原子层次的进一步延伸和发展, 主要包含如下内涵: a) 研究如何开发先进工艺, 跨越原子尺度到宏观尺度的制造鸿沟, 使得从原子出发集成定制的宏观尺度产品或系统能够保持优良的“原子级”特性; b) 研究原子层级微观特性在向宏观产品传递过程中的变化的物理过程, 讨论如何实现原子层次优良特性的选择性保留以及新特性开发, 进而实现系统更强功能及更高性能。原子制造和原子微系统技术具有很强的前沿性、颠覆性, 有望为后摩尔定律时代提供一条全新的技术途径, 引发一场新的重大技术革命。

关键词: 从原子到产品; 强约束集成微系统; 微观架构; 原子制造; 原子微系统

中图分类号: TN05

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201605.0793

Atom assembly and atom microsystem: a blend of A2P and strongly constrained integrated microsystem

LI Mo^{a,b}, LI Qian^{a,b}, ZHANG Jian^{a,b*}

(a. Microsystem & Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Chengdu Sichuan 610200, China;

b. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Researches about Atoms to Product(A2P) are firstly introduced. Then the connotation of Strongly Constrained Integrated Microsystem(SCIMS) and its micro architecture are demonstrated. A new concept named atom assembly and atom microsystem is proposed based on these ideals, by blending the technological ideas of A2P and SCIMS. Its science & technology framework are analyzed preliminarily. It is believed that, atom assembly and atom microsystem is a further development and expansion deep into atom scale of SCIMS. It contains following principles and goals: first, to develop the technologies and processes to assemble nanoscale(atom scale) constituents into materials, components and systems that preserve distinctive nanoscale properties; second, to study the vanishing physical process of nanoscale properties when nanoscale constituents are manufactured at larger “product-scale” dimensions, and to exploit unique nanoscale characteristics which may benefit for “product-scale” systems with higher performance. The concept of atom assembly and atom microsystem is very frontier, challenging and subversive, which may provide a feasible approach for post Moore’s Law era and trigger a technological revolution.

Key words: Atoms to Product; Strongly Constrained Integrated Microsystem; micro architecture; atom assembly; atom microsystem

很多材料处于纳米尺度时, 会表现出许多独特的“原子级”物理特性, 如量子伏安特性^[1]、显著下降的熔点^[2]、

更高的比热、更大的比表面积、更高的表面活性、更高的化学催化性、独特的光谱特性以及电学磁学特性等。但当前制备材料以及将材料制备为产品或系统时(毫米以上的宏观尺度),上述很多“原子级”物理特性就会消失。如纳米金属微粒在低温由于量子尺寸效应会呈现电绝缘性,但宏观金属材料却是导体;金属的纳米粒子由于小尺寸和表面效应,对光的反射能力显著降低(通常低于 1%),而宏观金属块材却具有很强的光反射现象。

针对于此,美国 DARPA 于 2014 年底公布、2015 年底启动了从原子到产品(A2P)研究计划^[3],资助了 10 余家大学和研究机构对此进行技术研发,发展超越现有水平的材料、器件和系统组装制造技术,使得基于纳米级的构成单元能制造出在任何尺度下均具有原子级特性的材料、组件乃至系统,并具备大规模应用的潜力。A2P 理念一经提出,就被美国 DARPA 称为“惊喜的萌芽技术”^[4],得到了学术界的广泛关注。科学家纷纷探讨 A2P 的概念与内涵,其与量子技术、纳米技术、集成微系统技术的关联与区别,以及其具有的应用前景,对于这项研究蕴含的理念给予了积极的评价。另外,针对电子产品与所处环境(温湿度、气氛、辐射、应力等)长期相互作用引起的可靠性问题,欧洲、美国等学者开展了“从原子到产品的可靠性”(from atoms to product reliability)的研究^[5],旨在从原子级层次研究减弱这种相互作用对系统可靠性的影响。

1 A2P 项目及其相关研究

美国 DARPA 公布的 A2P 项目旨在寻求将纳米尺度材料和器件的特性保持并应用到宏观尺度产品中的技术途径,其主要目标是开发新技术、新工艺,填补从纳米尺度到毫米尺度组装的技术鸿沟(assembly gap),把纳米尺度的原子、分子或纳米器件加工成至少为毫米级尺寸的系统、组件,并保持原子/纳米尺度独特特性不变^[3],如图 1 所示。基于 A2P 制造理念获得的产品(包括组件、系统)将在宏观尺度上展现纳米级原子尺度的优良物理特性,使得宏观产品的性能得到极大提升。此外,A2P 理念的先进性还体现在不再一味追求“特征尺寸的减小”,而是按需出发进行功能的定制和选择开发,在更小尺寸上更灵活地制造出三维产品和系统。这一理念,也非常符合后摩尔定律时代的发展趋势^[6]。

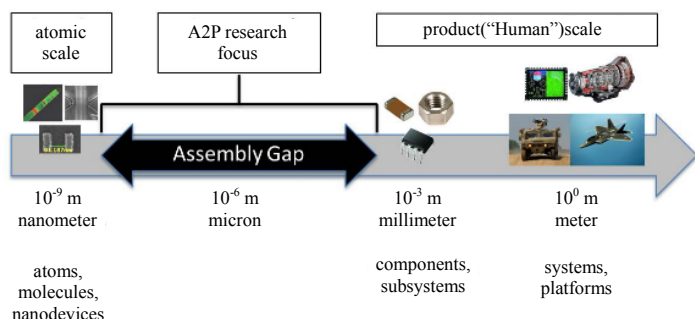


Fig.1 Concept of A2P project of DARPA
图 1 美国 DARPA 的 A2P 概念图

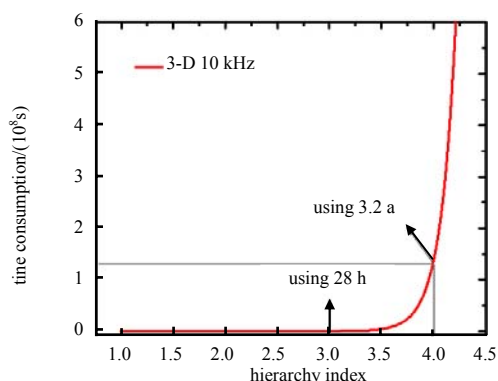


Fig.2 Assembly consuming time changing with hierarchy index
图 2 组装消耗时间随分层指数的变化规律

把纳米尺度的构成单元组装成毫米尺度的产品,需要跨越 6 个数量级,也就是说,产品的体积是“原子”构成单元的 100 万倍。在组装过程中,如果直接将“原子”构成单元一个个移动到所需要的位置将耗费大量的时间。以基准装配速率为 10 kHz 为例,组装一个包含 $10^3 \times 10^3 \times 10^3$ 单元的三维阵列,需要耗时 28 h;而组装一个 $10^4 \times 10^4 \times 10^4$ 单元的三维阵列,则需要耗时 3.2 a(如图 2 所示)。显然,对于跨越如此大尺度的直接三维组装,在时间上来说是无法接受的,这就成了 A2P 必须解决的技术挑战。

在长时期的进化过程中,生物组织形成了分层并行的组装机制,并且在组装速度不超过 10 kHz 时,采取 2 到 3 层次的并行方法。A2P 技术也借鉴了这一思路,提出“两步走”的途径,如图 3 所示^[3]。第一阶段为 TA1,即“原子到微米组装(Atoms to micron assembly)”,主要聚焦于将纳米级的原子、分子、团簇、结构等组装成微米级的模块(feedstock);第二阶段为 TA2,即“微米到毫米组装(Micron to millimeter assembly)”,旨在将 TA1 阶段形成的微米尺度模块组装成毫米尺度的材料、器件或系统。从毫米尺度到更大尺度的产品或系统组装则可采取当前已有的技术途径。针对这一并行过程,可以如此理解:TA1 阶段是将原子等构成可用于大规模组装集成的中间模块,类似将细小的沙石组装成为砖;TA2 阶段则是将中间模块,根据实际需求灵活地组装集成为所需要的产品(器件或系统),类似将砖根据设计师的设计需求,拼装搭建成不同形状、结构、功能的大楼。这一分层并行的技术理念,不但节约了时间成本,而且具备非常高的灵活性,可以按需定制,有望在大规模的工业生产中得以应用。

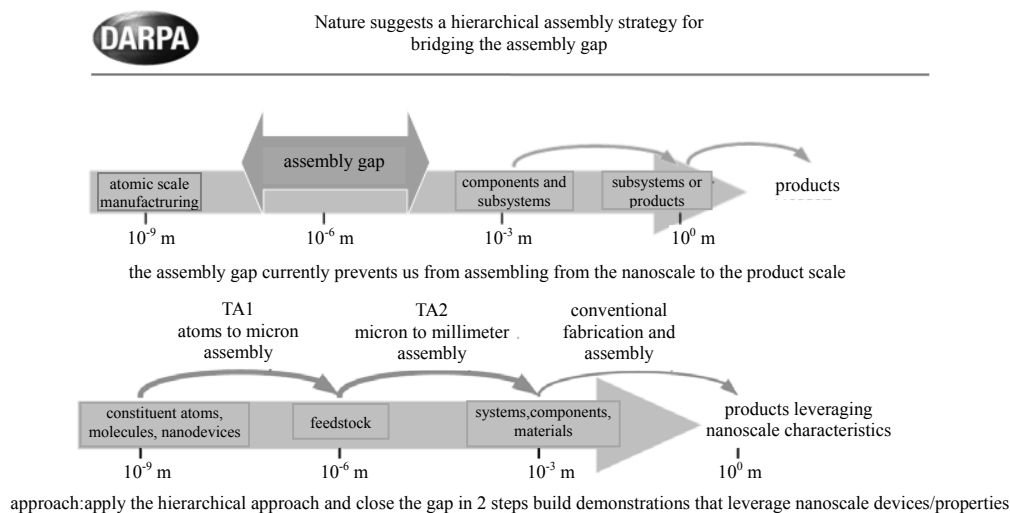


Fig.3 A2P "two-step" hierarchy parallel assembly method

图3 A2P的“两步走”分层并行组装

这样的初衷下, DARPA 的 A2P 项目布局了电子技术、光子技术、仿生技术三大领域, 首批资助了 10 余家单位开展研究, 主要包括^[7]:

- 1) 单系统中纳米尺寸到毫米尺寸产品, 包括 Embody 公司、Voxel 公司和德雷珀实验室;
- 2) 光学超材料组装(Optical Metamaterial Assembly), 包括波士顿大学、圣母大学、HRL 实验室和帕洛阿尔托研究中心(Palo Alto Research Center, PARC);
- 3) 柔性、通用性组装(Flexible, General Purpose Assembly), 包括赛威实验室(Zyvex labs)、斯坦福研究院(Stanford Research Institute, SRI)和哈佛大学。

典型项目包括波士顿大学的“原子书写技术”^[8], 旨在实现单个原子的精确沉积, 用于实现大规模制造的纳米级集成电路; Draper 实验室的“纳米 Litz 线自组织与编织研究”^[9], 使得信号传输频率达到 10 GHz 以上, 可用于高频无线电信号传输以及纳米机器人中; Zyvex 与 SRI 共同承担的“原子尺度纳米颗粒操控技术”, 通过精确控制单个原子, 实现比当前技术缺陷率低几个数量级的材料及结构制备, 从而极大提升材料的质量及结构的可靠性; HRL 和加州理工学院的“微结构可控材料”, 开发出了世界上最轻的材料, 密度仅 0.9 mg/cm^3 , 其关键是制造比头发还细 1 000 倍的中空管(nm 量级)并组装成 μm 量级的 micro-lattice 结构, 可用于隔热装置、电池电极、声音/振动/冲击、汽车制造、航空航天等领域^[10]。主要进展成果如图 4 所示。

此外, 欧洲、美国近年来还提出了“From atoms to product reliability”研究,

主要从原子层级出发, 研究原子的电子结构、化学键等微观性质变化对器件、系统可靠性等性能的影响^[5]。其研究初衷是因为环境与系统相互作用始于原子层次, 如电离效应或者位移效应产生额外的电子空穴对, 改变原子间的悬挂键, 或者产生大量的离位原子等。如果能对原子层级的过程进行有效调控, 减少初始离位原子和电子空穴对的产生, 削弱缺陷形成与演化、载流子和杂质扩散及缺陷-载流子-杂质之间反应等, 那么就可以对材料层级发生的物理过程进行相应的调控, 进而设计适应于环境的结构、器件乃至微系统, 降低系统层面遭受的环境影响。

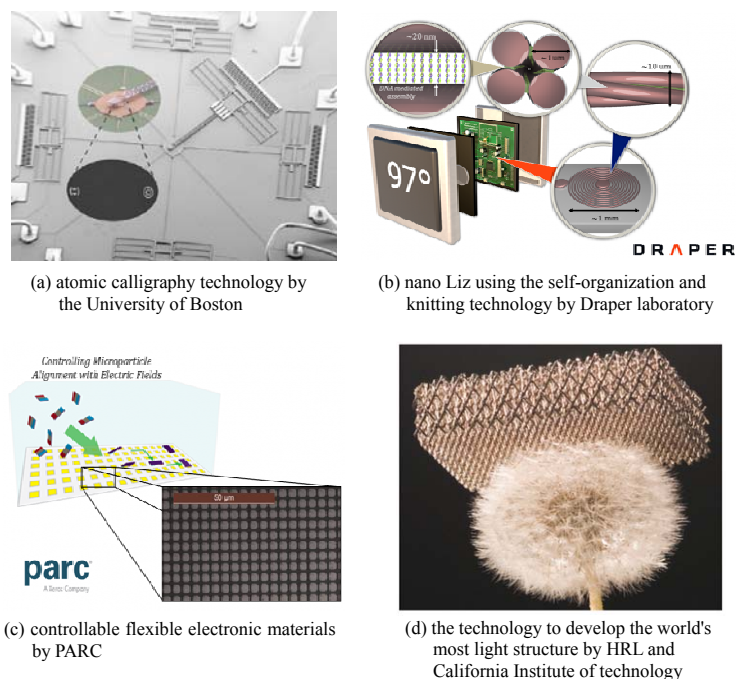


Fig.4 Typical research progresses of the projects supported by A2P project

图4 A2P 资助的部分支持项目及研究进展

他们认为这种研究思想,是从本质上提升器件、系统可靠性等性能的根本解决途径。

2 强约束集成微系统的微观架构与两“微”内涵

“集成微系统”(Integrated Microsystems, IMS)是从“微系统”概念发展而来(如 SoC、光子学微系统、MEMS/NEMS、SIP/SOP 等),早期由美国圣地亚国家实验室(SNL)提出^[11]。2005 年,时任 DARPA MTO 主任 John C. Zopler 定义了 IMS,认为其核心理念是“基于微电子和微纳科学技术,直接从材料和物理层次出发,实现电子学、光子学、MEMS/NEMS、架构、算法的深度融合与异构集成,构成具备传感、处理、执行、通信和能源功能的微系统”,并称其为“下一代技术革命”^[12]。

很多人将微系统的“微”的特性理解为形容词,即微型化的系统,认为其目的就是追求体积尺寸的缩小。因此,当前微系统技术的研究重点在于通过固态化技术、微纳技术等实现组件及系统的小型化,通过小型化来将更多功能的模块集成在一起实现系统更复杂的功能,并不关注系统中材料、微结构等微观尺度中的物理特性和物理规律。实际上,在保证一定小型化前提下,电子产品综合性能从本质上得到保障与提升这一终极目标,仅仅通过追求固态化、小型化和集成化是很难实现的。

究其原因,是由于电子产品必然与所处环境(温湿度、气氛、辐射、应力等复合因素)长期相互作用,这些相互作用从材料层次起就产生缓慢的变化,并且逐级传递,影响微结构、晶体管、器件的性质性能,最终引起系统宏观性能的质变,如图 5 所示。换句话说,微观层次的特性和物理过程不但不可忽略,而且极大影响宏观产品的可靠性等特性,在电子产品的研究、设计和制备中必须仔细考虑。但一般的电子产品设计,没有根据系统宏观性能的要求对微观结构进行专门定制,也很少考虑微观性质如何逐步

传递到宏观,更没有研究微观的优良物理特性如何进行有针对性的保持和开发。而微观特性层次(如材料特性)的研究又没有与宏观产品的需求相关联,即当前电子学产品微观层次研究与宏观层次的研究还是分散的、相对独立的,没有根据实际产品功能和性能需求形成微观层面与宏观层面的“强约束”。如果能建立电子产品与环境相互作用的微观物理模型及其同宏观性能的多尺度关联模型,对微观的材料、晶体管模型与微纳结构等进行专门定制,把需要的微观物理特性保持到宏观产品甚至开发新的物理特性,将会带来电子产品性能的革命性提高。我们把这种微观与宏观具有强约束关系的集成微系统简称为“强约束集成微系统”(SCIMS)。这种微观的材料、晶体管模型与微纳结构、微纳工艺及其物理特性向宏观传递的方式,称为集成微系统的“微观架构”(Micro Architecture of IMS)^[13]。

探究“强约束集成微系统”科学内涵,包含两“微”理念,即不仅仅追求微型化小型化,更重要的是注重“微观”特性和规律的研究和开发,见图 6。

一“微”:从“微观”出发进行系统定制。通过研究系统中的材料层级同环境相互作用的微观物理过程,建立材料及界面电子结构变化、器件参数漂移、电路响应改变的多尺度物理模型(微观性能向宏观产品逐级传递的多尺度物理模型),结合数值模拟和精密测试,揭示微观与宏观相互强约束的物理规律,有针对性地首先进行材料改性、不同结构的晶体管等器件设计以及微纳工艺设计,形成定制集成微系统“微观架构”,在此基础上进一步定制集成具备高可靠性和新颖先进性的微系统产品,即“从材料到系统”,或“从材料直接定制系统”。

二“微”:通过固态高压高频技术、微纳光机电融合技术、三维异构集成技术等实现高可靠和先进的“微型化集成化”复杂系统,即实现“电子学+光子学+MEMS+架构+算法”五大技术与“传感+处理+通信+执行+能源”五大功能融为一体的异构集成微系统,进而为解决摩尔定律失效提供技术途径。

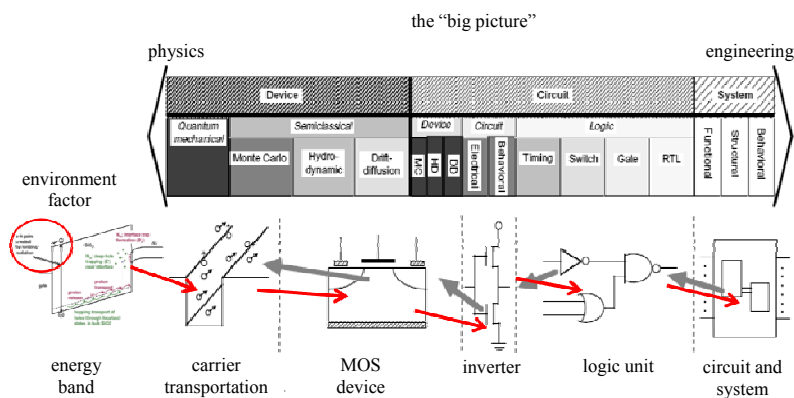


Fig.5 Microcosmic physical process and the change to the macro process map
图 5 微观物理过程及其改变向宏观传递的过程示意图

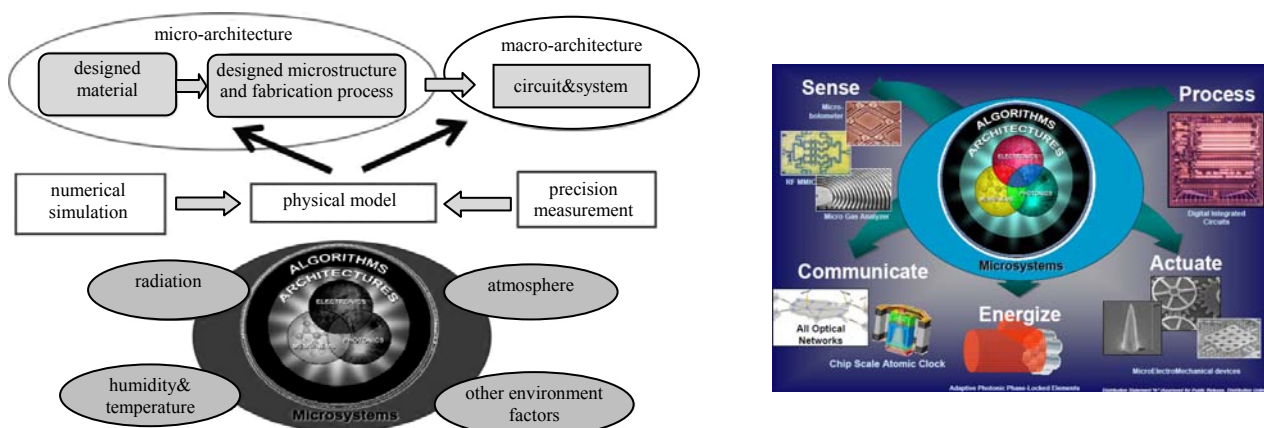


Fig.6 The micro architecture and connotation of SCIMS
图 6 强约束集成微系统的微观架构及两“微”内涵

3 原子制造与原子微系统

A2P 理念的提出并非空中楼阁,而是历经了人造原子、元原子、超材料等一系列理念的研究。理解 A2P 的概念,就应当了解人造原子、超材料等的发展历程。

人造原子概念最先由美国麻省理工学院的 Marc A. Kastner 在 1993 年提出^[14]。1996 年,麻省理工学院的 R. C. Ashoori 在 *Nature* 上发表文章^[15],指出所谓人造原子是由一定数量的实际原子组成的聚集体,它们的尺寸小于 100 nm。因此,半导体量子点、纳米团簇、纳米晶体等也被称为人造原子。1997 年美国加州大学伯克利分校的 Paul L. McEuen 在 *Science* 上发表文章^[16],把人造原子的内涵在维数上从零维量子点扩大到一维和二维,甚至把 100 nm 左右的量子器件也看成是人造原子。

人造原子和真正原子有许多相似之处,如有离散的能级、电荷不连续等。电子在人造原子中的运行方式和填充规律也与真正原子相似。二者的不同之处在于,一是人造原子并不是真正的原子,而是一定数量的真正原子的集合;二是真正原子可用简单的球形和立方形来描述,而人造原子的形状和对称性是多种多样的,除了高对称性的量子点外,尺寸 100 nm 及以下的低对称复杂形状的微小体系都可以称为人造原子。

近年来随着超材料(Meta-Materials, MM)研究的深入,人们提出了 Meta-Atoms 概念,被译为“元原子”、“人造原子”。科学家将 Meta-Materials 与 Meta-Atoms 联系起来,认为 Meta-Atoms 是 Meta-Materials 的组成基元^[17]。近几年在 *Nature*、*Science* 等刊物上报道了很多这方面的研究成果^[18-19],研究了多种基于局域表面等离子体共振特性的金属纳米线组成的 Meta-Atoms,以及利用其来组成超材料或者模拟原子的量子行为。

另外,也有学者提出了隔离的单原子(Isolated Single Atom, ISA),与 A2P 的部分理念也十分相关^[20-21]。

在理解上述理念和思想的基础上,把 A2P 同强约束集成微系统结合起来,提出“原子制造”与“原子微系统”,如图 7 所示。“原子制造”(atom assembly)是指从微观的原子(或人造原子,如 artificial atoms、meta atoms 等)或纳米尺度的单元出发,实现原子层级优良物理特性的选择保持和开发,组装与制造成为宏观产品的过程(可包括中间阶段)。“原子微系统”(atom microsystem)是指通过“原子制造”得到的毫米级以上的微系统(宏观产品),并且保持或利用了纳米尺度的微观原子层级优良物理特性。

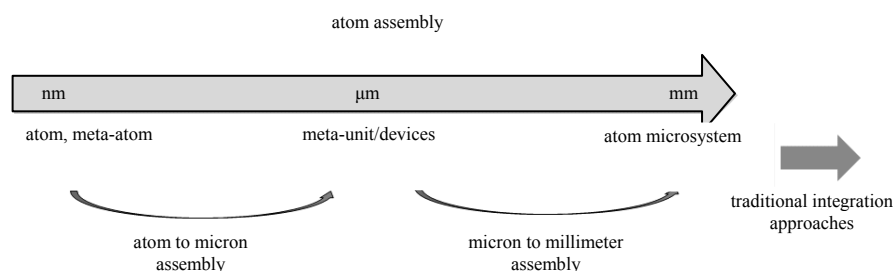


Fig.7 Concept of atom assembly and atom microsystem
图 7 原子制造和原子微系统概念关系图

需要阐明的是,原子制造不是去制造真实的原子,而是去制造一个可以保持原子尺度独特性质的宏观产品(即原子微系统),其关键是要把原子层级的优良物理特性传递到宏观产品中,或者要从原子层级去解决从微观自然过渡到宏观不能解决的问题。原子制造不排斥传统的微电子、MEMS/NEMS 等技术,但又不仅仅是 top-down 技术或者是 bottom up(如自组装、原子分子操控等)技术的简单加和,而是上述两种技术的提升与超越,研究逐层传递原子级优良物理特性的并行层次组装架构,发展更新的技术,实现从原子到产品(系统级)的巨大跨越。原子制造应具备对微观尺度单元的精确操作和控制的能力,并且在制造、集成、组装过程中可以选择、保持、定制开发微观特性,且具有可模块化、快速、成本可降低的潜力。

原子微系统也并非指微系统中所有组件都必须通过原子制造方法而来,只需要核心功能组件是保持了原子尺度的独特性质,或者是系统的综合功能等是利用了微观特性即可。研究原子制造与原子微系统的意义在于,研究如何将优良的、可利用的微观特性带到宏观产品中来,因此解决宏观产品当前存在的性能限制和瓶颈问题;或者通过开发新的微观特性,使宏观产品具备自然界中不存在的奇异特性;或者利用宏观的产品、系统等去模拟、复现微观尺度的量子特性,或者研究原子与环境相互作用的调控方法,根据实际环境等需求设计相互作用强度来使得宏观系统满足性能需求。而这一切的出发点,都是根据宏观产品的性能、功能需求,对微观层次的研究、开发、设计进行约束,即微观研究从宏观需求出发,又将研究成果反馈给宏观,使之具备特定的功能和相应的性能。

因此,可认为原子制造与原子微系统的关键是从“物理模型、数值模拟、先进微纳工艺、精密测试”四方面构造微观(纳米层次的原子)到宏观(毫米级以上的产品与系统)相互约束的多层次可控定制架构。这一理念代表着材料、器件和系统的“定制化时代”(designer age)到来,并且定制化深入到了纳米级原子尺度,是集成微系统技术“从材料到系统”向原子层次的进一步拓展和延伸,符合后摩尔定律时代的发展需求和发展趋势。

原子制造与原子微系统与量子技术和纳米技术有紧密的关系,但又不仅仅局限于量子技术和纳米技术。它是原子分子物理、量子物理、材料科学、化学、纳米技术、微系统等多层次、跨学科的高度融合与跨越,挑战性极大。其科学技术框架体系包括以下三大方面:

1) 科学问题:原子级有哪些物理特性在变为宏观产品的物理过程中逐步消失?如何通过原子制造的方式减缓或阻止微观物理特性的消失或者开发新的微观特性?如何从理论上对微观物理过程的保持、开发、传递进行物理建模、数值模拟和精密测试?如何研究原子结构的改变对原子微系统可靠性的影响?如何开发原子性质的调控方法?

2) 技术问题:原子制造如何结合 top-down 技术以及 bottom-up 技术,并且进行提升和发展,形成逐层传递原子级优良物理特性的并行层次组装架构,实现从原子到产品的巨大跨越?

3) 应用问题:如何根据实际需求,有针对性地选择或者开发原子尺度的微观特性,使原子微系统可以应用于传感、计算、通信、隐身等需求中,并且具备从物理本质上确保的耐环境特性及可靠性。

4 结束语

A2P 是 DARPA 2015 年正式启动的研究计划,意图使纳米尺度的组成可用来灵活定制微米、毫米乃至更高尺度组件及系统,同时每个尺度都保持原子级的物理特性。在分析美国 A2P 概念内涵,以及了解 artificial atom, meta-atom, meta material 等概念的基础上,结合我们已经提出并开展研究的强约束集成微系统技术,我们提出了“原子制造与原子微系统”理念。其与 A2P 有着紧密关联,但又不同于 A2P,它是原子分子组装技术与微纳工艺技术的结合与超越,是“从材料到系统”的强约束集成微系统向原子层次的进一步微观化,是立足于物理本质和宏观性能需求而从微观定制开发材料、结构、微系统的技术,是解决摩尔定律失效的可行技术途径。

中国工程物理研究院近年来一直从事强约束集成微系统技术研究,并从 2015 年开始对原子制造与原子微系统进行概念和相关技术的先期研究,包括:原子制造与原子微系统中微观过程的理论与数值模拟研究、原子制造先进工艺研究、人工原子和混合量子系统研究、单光子原子微系统研究、冷原子微系统研究、耐环境效应原子微系统研究、基于半导体和金属复合微纳结构的新功能材料/器件/微系统研究等,目前正同国内相关单位的专家学者开展概念的进一步深化论证和相关技术研究工作。

在研究过程中,我们认为, A2P 是一个具有极大吸引力的革命性思想,但目前还缺乏真正的科学技术内涵。因此,我们把 A2P 同强约束集成微系统概念结合起来,将其看作是从“材料到系统”的集成微系统技术向原子层次的进一步延伸和发展,提出了原子制造与原子微系统概念,丰富了 A2P 思想。但我们提出的这些概念还很初步,有些理解和解释甚至有一定错误和纰漏,欢迎批评指正。

参考文献:

- [1] CUI X D, LINDSAY S M. Reproducible measurement of single-molecule conductivity[J]. Science, 2001, 294(5542): 571–574.
- [2] LAI S L, GUO J Y, PETROVA V V, et al. Size-dependent melting properties of small tin particles: nanocalorimetric Measurements[J]. Physical Review Letters, 1996, 77(1): 99–102.
- [3] Atoms to Product(A2P), DARPA-BAA-14-56[Z]. 2014.
- [4] Darpa demo day[EB/OL]. [2016-05]. <http://www.darpa.mil/demoday>.
- [5] GERRER L, LING S, AMOROSO S M, et al. From atoms to product reliability: toward a generalized multiscale simulation approach[J]. Journal of Computational Electronics, 2013, 12(4): 638–650.
- [6] WALDROP M M. The chips are down for Moore's law[J]. Nature, 2016, 530(7589).
- [7] A2P performers[EB/OL]. (2015-12-29)[2016-05]. <http://www.darpa.mil/work-with-us/a2p-performers>, 2015.
- [8] IMBODEN M, HAN H, CHANG J, et al. Atomic calligraphy: the direct writing of nanoscale structures using a microelectromechanical system[J]. Nano Letters, 2013, 13(7): 3379–3384.
- [9] Nanolitz could free up frequency spectrum needed to connect devices[EB/OL]. [2016-02-10]. <http://phys.org/news/2016-01-nanolitz-free-frequency-spectrum-devices.html>.
- [10] KOLODZIEJSKA J A, ROPER C S, YANG S S, et al. Research update: enabling ultra-thin lightweight structures: microsandwich structures with microlattice cores[J]. APL Materials, 2015, 3(5): 73180L.
- [11] SHUL R J, KRAVITZ S H, CHRISTENSON T R, et al. Post-processed integrated microsystems[R]. Digital Printing Partners, SANDIA Report, SAND2011-0227.
- [12] ZOLPER J C. Integrated microsystems: a revolution on five frontiers [C]// Proceed 24th DARPA-Tech Conf. Anaheim, CA, USA: [s.n.], 2005: 118–123.
- [13] 代刚, 张健. 集成微系统概念和内涵的形成及其架构技术[J]. 微电子学, 2016(1): 101–106. (DAI Gang, ZHANG Jian. Concept and architecture technology of integrated microsystems[J]. Microelectronics, 2016(1): 101–106.)
- [14] KASTNER M A. Artificial atoms[J]. Physics Today, 1993, 46(1): 24–31.
- [15] ASHOORI R C. Electrons in artificial atoms[J]. Nature, 1996, 379(6564): 413–419.
- [16] MCEUEN P L. Artificial atoms: new boxes for electrons[J]. Science, 1997, 278(5344): 1729–1730.
- [17] MEINZER N, BARNES W L, HOOPER I R. Plasmonic meta-atoms and metasurfaces[J]. Nature Photonics, 2014, 8(12): 889–898.
- [18] CHIPOULINE A, SUGAVANAM S, PETSCHULAT J, et al. Metamaterials with interacting metaatoms[J]. Physics, 2012.
- [19] ROZIN M J, ROSEN D A, DILL T J, et al. Colloidal metasurfaces displaying near-ideal and tunable light absorbance in the infrared[J]. Nature Communications, 2014, 6.
- [20] KYRIAKOU G, BOUCHER M B, JEWELL A D, et al. Isolated metal atom geometries as a strategy for selective heterogeneous hydrogenations[J]. Science, 2012, 335(6073): 1209–1212.
- [21] FUECHSLE M, MIWA J A, MAHAPATRA S, et al. A single-atom transistor[J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(4): 242–246.

作者简介:



李 沫(1982–), 女, 哈尔滨市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光子学、光电融合技术和集成微系统技术等。email: limo@mtc.ac.cn.

李 倩(1987–), 女, 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为光电探测技术、量子与微纳光电融合技术等。

张 健(1968–), 男, 四川省大竹县人, 博士, 研究员, 主要研究方向为电子学、光机电异构集成微系统技术、太赫兹技术、无线电测控通信技术。