

文章编号 1004-924X(2001)06-0493-06

关于微尺度理论

唐祯安, 王立鼎

(大连理工大学, 辽宁 大连 116023)

摘要: 随着纳米材料、微器件、微结构和微系统研究的深入发展及其应用, 与微尺度效应有关的理论和工程技术成为当前的研究热点, 推动着微尺度理论的形成和发展。从微尺度及其判据出发, 对微尺度理论的几个主要学科做了简要介绍, 指出了需要解决的关键问题和研究方法。

关键词: 微尺度; 纳米材料; 纳米电子学; 介观物理学; 细观力学; 微尺度传热学

中图分类号: TB383 文献标识码: A

- 微米- 亚微米- 纳米- 团簇- 原子-

1 引言

20世纪80年代以后, 由于人工超晶格、纳米材料、微电子机械系统(MEMS)、生物芯片等技术的诞生和深入发展, 人类对于介于宏观和微观之间领域的物质世界的认识迅速丰富起来。形成了“介观物理学”、“细观力学”、“纳米材料科学”、“微尺度传热学”、以及“纳米电子学”等等一系列崭新的科学体系。这些不同称谓的学科的共同特点是其研究对象都表现出微细尺度下的一些“超常”现象。或者说都是以“微尺度效应”为出发点的。尽管这些学科还处于刚刚建立阶段, 许多现象还需要长期深入的研究探索, 但已经展现出良好的理论发展前景和孕育高新技术产品的巨大潜力, 引起了广泛的关注和极大的研究热情。需要指出的是, 并不是所有的微尺度特性都是有益处的, 很多微尺度效应在给传统学科带来严峻挑战的同时, 也给人类的科技进步造成了很大的困难。因此, 全面认识微尺度效应, 架构科学的微尺度理论是十分重要的。

2 微尺度及微尺度判据

所谓“微尺度”并没有严格的界定, 只是一个相对大小的概念。随着研究对象的不同, 出现微尺度效应的时空尺度范围也不相同。通常所指的空间微尺度是跨越微米到原子尺度的宽广范围:

其中微米范围的上限是在 $100\mu\text{m}$ 以下, 而亚微米通常定义为 $0.1\mu\text{m}$ 以下至 nm 之间。目前集成电路的特征线条尺寸已进入亚微米至深亚微米范围。在这个尺度, 非线性导电机制已十分明显。譬如当 1V 电位降落在 $0.1\mu\text{m}$ 的结构上时, 电场强度已高达 $10^5\text{V}/\text{cm}$, 如此强的电场下电路的非线性是不可忽略的。

团簇一般定义为尺度为 1nm 以下的原子聚集体, 由几个到几百个原子构成。在亚微米和团簇之间的 $1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 范围是纳米体系所在处。自1990年7月在美国巴尔的摩召开了首次国际纳米科技会议并随之出版了《Nanotechnology》和《Nanobiology》等国际刊物以后, 纳米材料和纳米技术研究进入了迅速发展的时期, 其影响和应用波及各个领域。

通常所说的时间微尺度的范围是:

- $\text{ns}(10^{-9}\text{s})$ - $\text{ps}(10^{-12}\text{s})$ - $\text{fs}(10^{-15}\text{s})$ -

其中 ns 是目前数字系统如计算机的时钟脉冲宽度的量级。由于电路中的电磁波速度一般比光速低一至两个数量级, 因此在 1ns 时间里, 即使在介电常数为1的传播媒质中电磁波的传播距离只有 $0.3\text{cm}\sim 3\text{cm}$, 而实际传播媒质的介电常数一般大于1(如硅的介电常数约为12), 因此传输

收稿日期: 2001-08-20; 修订日期: 2001-10-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(59995550-5), 教育部骨干教师计划(2000-65)和973项目“微系统的多学科交叉问题研究”的资助

线上信号的延迟已成为超级计算机设计中需要特别考虑的因素。 p_s 和 f_s 是很多化学反应过程所需要的时间^[1-2],也是目前固体激光器所能发出的超短脉冲的宽度。在这样短的时间里,即使激光器发出的单个脉冲的能量只有毫焦耳量级,其光功率也大的惊人,在激光加工和激光测试技术中发挥着独到的功效。

严格的微尺度范围是通过一些判据来决定的。这些判据是由所研究的体系的尺度与其中的物理学特征参数相比较而确定的。在微尺度效应中,除表面效应和界面效应以外,小尺度效应和量子尺度效应都是和电子、声子、光子等微观粒子的输运特性有关的。在输运过程中,微观粒子通过弹性散射和非弹性散射改变运动状态和与系统交换能量。因此最常用的物理学特征参数是平均自由程和平均自由时间及相位弛豫时间。微观粒子经历两次弹性散射期间所通过的平均距离为平均自由程: $l_m = v\tau_m$, 其中 v 为粒子的平均速度, τ_m 为平均自由时间,或称动量弛豫时间。粒子经历破坏其相位的非弹性散射前所经历的时间称为相位弛豫时间: τ_ϕ ,其所对应的平均距离为 $l_\phi = v\tau_\phi$, 其中 v 是费米速度。

由于散射与温度的关系密切,时空微尺度范围的确定还与温度有关。在极低温度下,甚至相当大的时空尺度范围内都可以出现微尺度效应,这给微尺度效应的实验研究带来了很大方便。

除时间、空间、温度等通用物理量以外,各个学科还有自己的特征微尺度参数如磁学长度、热学长度、电磁穿透深度等等可用作判据^[3-4]。可以相信,随着各种新的微尺度效应的不断发现,还会有更多的微尺度判据出现。揭示各种微尺度判据也是微尺度理论研究的基本任务之一。

3 微尺度理论的体系框架

微尺度理论是以微尺度效应的产生机理、影响、控制和应用为主要研究对象的学科。那些研究对象的时空尺度虽然也在通常所说的微尺度范围内,但并不存在或很少涉及微尺度效应的研究体系不属于微尺度理论的范畴。目前微尺度理论的研究主要是面向材料、微器件和微系统,其基本框架含盖了材料、物理、热学、力学、电子等多个学科,其中研究的比较深入的有以下几个学科。

3.1 纳米材料学

纳米材料广义上是指材料的三维尺寸中至少有一维处于纳米量级。分为零维材料(即纳米微粒);一维材料(即纳米纤维);二维材料(即纳米薄膜);和三维材料(即纳米材料构成的固体)。狭义上纳米材料只分为两个层次^[5]:一是纳米微粒,二是纳米固体(包括薄膜)。在小尺度效应、表面效应、量子效应和宏观隧道效应的影响下,纳米材料在力、热、声、光、电、磁等方面的性质分别表现出很多异常性能,部分优异性能已在一些高新技术产品中得到应用。纳米材料科学研究的主要内容也包括两个方面:一是系统的研究纳米材料的性能、微结构和谱学表征。通过与常规材料的对比,找出纳米材料的特殊规律,建立描述和表征纳米材料的新概念和新理论。二是发展新型的纳米材料。其中,继 1991 年发现多壁碳纳米管和 1993 年合成单壁碳纳米管以后,2001 年 3 月由中国科学家发现并合成的半导体氧化物带状结构是一维纳米材料合成领域里的又一重大突破^[6]。

鉴于已有不少关于纳米材料和纳米技术方面的很好的著作^[5,7,8],本文对纳米材料学便不再赘述。

3.2 介观物理

介观的概念最早是由 Van Kampen 在 1981 年使用的^[5]。广义上讲,凡是出现量子干涉现象的体系称为介观系统。在空间尺度上它包括了团簇、纳米体系和微米体系。但目前介观系统多特指电现象研究,把团簇和纳米体系分离出去,形成“狭义”的即介观物理学的概念。

介观物理学中,把非弹性散射平均自由程 l_ϕ 称为相位相干长度。用系统尺度与 l_ϕ 的比较判断系统是否是属于介观体系。介观物理中最活跃的研究领域是半导体低维结构。低维结构的维度是根据系统空间三维尺度与德波罗意波长的相对大小来决定的。设系统的空间三维尺度分别为 L_x, L_y, L_z , 德波罗意波长为 λ_e , 则系统的维度分别为:

- (1) $\lambda_e \ll L_x < L_y < L_z$: 3D(体)
- (2) $\lambda_e \sim L_x < L_y < L_z$: 准 2D(薄膜)
- (3) $L_x < \lambda_e \ll L_y < L_z$: 2D(MOSFETs, 异质结构)
- (4) $L_x < L_y \sim \lambda_e \ll L_z$: 准 1D(量子线)
- (5) $L_x < L_y < \lambda_e \ll L_z$: 1D
- (6) $L_x < L_y < L_z < \lambda_e$: 0D(量子点)

在低维结构中, 电子波函数的相位成为影响输运过程的重要参数, 因此当微电子器件中电子波函数之间存在一定相干性时, 用分立元件模型分析整块集成电路的方法就完全不适用了。

低维量子结构的发展, 给纳米器件和纳米电子学提供了物理基础。目前已研制出电子波器件、单电子器件、微型光学微腔等一些新型器件。但总的来说, 这些研究还处于基础研究阶段, 在达到实用化的水平之前还有较长的路要走, 详情可参见文献^[3, 10, 11, 12]。

3.3 微尺度传热学

从微观的角度看, 决定热传输过程的机制在金属膜中是电子与声子之间的相互作用, 在介质膜、绝缘体和半导体中则完全取决于声子的散射。因此当空间尺度不断细化时, 微器件中使用的各种薄膜的厚度可与其中电子和声子的平均自由程处于相同或更小的数量级上。在薄膜厚度方向上, 由于传输能量的电子和声子的数目和输运速度的有限性, 温度场将不再是连续的, 温度梯度概念的失效使得传统理论中根据傅立叶定律确定的热流矢量的定义变得模糊不清。温度梯度和热流矢量这两个概念的模糊化, 是微尺度传热现象对宏观传热理论提出的第一个挑战。

当时间尺度不断细化时, 对于热传输的瞬态行为研究, 必须考虑声子间的相互作用和声子散射两者各自的影响; 还必须注意到温度梯度与热流矢量两者间在时间上的分离现象, 这是微尺度传热现象对宏观传热学提出的第二个挑战。

声子的输运速度与温度和介质有关。平均说来, 在室温下, 声子的速度即声速是在 $10^4 \text{ m/s} \sim 10^5 \text{ m/s}$ 的水平, 因此在皮秒 (10^{-12} s) 级的平均自由时间内, 声子的迁移路程即热量传播深度是在 $10^{-8} \text{ m} \sim 10^{-7} \text{ m}$ 的水平, 这恰好是亚微米和深亚微米量级。因此, 微细空间尺度效应和微细时间尺度效应是不可分开的, 必须统一在一个理论框架中。目前人们对这一理论研究已提出不少模型^[13, 14, 37]。如“两步模型”(即声子电子相互作用模型); “声子散射模型”; “声子辐射传输模型”; 以及“热波模型”等等, 为深入微尺度传热研究打下了良好的基础。但这些模型分别侧重于空间微尺度或时间微尺度效应, 要建立完整的理论体系和研究方法还有大量的工作要做。

微尺度传热有三个基本判据^[15]:

$$1) [h/\lambda < 0(1) \cup d_t/\lambda < 0(1)] \cap h/\lambda > 0(1)$$

$$2) h/\lambda < 0(1)$$

$$3) h/L < 0(1)$$

其中 h 为物体的最小三维尺度如薄膜的厚度, λ 为平均自由程, d_t 为热量穿透深度, λ_c 为德波罗意波长, L 为入射光的相干波长。 \cup 和 \cap 分别表示逻辑“或”和“与”关系。 $0(1)$ 是数量级比较符号。

第一个判据也称作经典判据。在这个判据范围内, 定域化、温度的概念还可以使用; 求解玻尔兹曼方程并与统计物理相结合是微传热分析的主要方法。第二个判据也称量子判据, 在这个判据范围, 玻尔兹曼方程的有效性需要检验, 蒙特卡罗方法、分子动力学方法等成为主要分析手段。第三个判据仅适用于受辐射光源作用时的情况。其中 $L = 0.3\pi c\hbar/kT$ (式中 c 为光速, \hbar 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数) 为辐射光源在真空中的相干长度。由于 L 随温度的降低而增大, 因此通常只能在低温下才能观测到辐射相干效应。

从应用的角度看, 目前最迫切的微传热研究任务有: 建立各种超薄薄膜及其复合结构中的导热机制并给出其热物理性质及其标准的测试条件和方法; 提高微米亚微米级微电子器件和微机电系统中的电(光)热耦合效率和电(光)热响应速度的方法和实验技术, 给出电(光)热耦合设计与热设计和热管理的理论和方法; 揭示超快过程中的非线性非平衡态传热现象的本质。这当中, 建立薄膜热物性的测试方法和给出常用薄膜的热物性参数是最基本的。

3.4 细观力学

进入微尺度以后, 各种力的作用效果随着尺寸的减少而发生显著变化。如当部件的长度从 1 mm 减少到 $1 \mu\text{m}$ 时, 面积减少因子为 10^6 倍, 而体积减少因子为 10^9 倍。此时, 正比于面积的力如摩擦力, 粘性拖拉力, 表面张力等与正比于体积的力如惯性力, 电磁力等相比, 增大了数千倍。制约微尺度体系的本构关系与宏观系统显著不同。细观力学的任务之一就是建立微尺度下体系的本构关系。

另一方面, 宏观力学体系是以材料的连续性为前提条件的。连续力学把系统内任一点的微小邻域看成是理想材料组成的, 即假定在该微小邻域内的材料、应力、应变等均是连续且均匀一致

的。但是从微观上看,微小邻域也是由各种不同成分和形状的物质组成的复杂体。应力应变场在微观尺度上是无法均匀一致的。细观力学的主要任务之二就是要系统而准确的使用基于表征微观结构和成分的参数来表示与这些微小邻域相联系的“连续力学量”,因此细观力学有时就称为微观力学。从这一点上说,“介观”与“细观”二词虽然英文对应于同一个词“mesoscopic”,但中文的一字之差却将细观力学的内涵和研究方法的特点表现的更加清晰。

在细观力学中,用一个“代表体积元^[16]”(RVE-representative volume element)来代替宏观连续力学中关于微域的理想材料假定。形象地可以用混凝土结构来表示RVE。宏观上看混凝土是连续体,但从微观上看,混凝土内部是非均质、多包容物、多孔、多相、并存在大量微裂纹和界面区的物体。

严格的表出RVE要使用宏观和微观两个尺度。宏观尺度用于处理微域上的连续量,微观尺度用于揭示与宏观连续量直接相关的最小物质组分,该组分的性质和形状确定了该微域上连续量的主体。

细观力学的典型应用领域是微电子机械系统(MEMS)。在MEMS中,微流体力学^[17]和纳米摩擦学^[18-19]是急需深入研究的领域。

微流体力学主要研究微机械加工技术形成的微型管道中流体的运动规律。实验上已经发现,由于尺度效应,微型管道内的流体不再遵守经典流体力学的Navier-Stokes方程。但在什么尺度下偏离经典流体力学究竟多少目前还不清楚。实验测定微沟槽内流体的雷若数也相当困难。但是由微泵、微阀、微沟道、和微传感器组成的微流体系统对于开发生物芯片、医疗仪器、以及集成电路的强制散热等方面有着非常重要的作用。

在MEMS中,面上阻力的增大导致摩擦和磨损并制约MEMS运动结构的性能。需要指出的是,不仅是MEMS的运动部件间存在摩擦现象。静止不动的构件也受静摩擦力的影响。特别是在MEMS的制造过程中,静摩擦现象的影响是很严重的。例如在表面微机械加工一些悬空的静止结构时,这些微结构经常因静摩擦力的作用而牢固地黏附在其下衬底表面上,造成器件的失效。

大部分表面效应都是和温度有关的。在原子尺度下,机械,力学,化学,和电现象都依赖于热能

或被热能所加强。在滑动摩擦的情况下,载荷和滑移速度除影响摩擦和磨损以外,通常都伴随着界面温升现象,输入的摩擦能除用于产生材料的塑性变形还在摩擦界面处转化为热能。

还须注意,虽然弹性变形几乎不损失能量(典型值小于1%),但塑性变形会导致晶格振动能的增加即热能的增加。在弹塑性变形的情况,弹性迟滞也导致热能的增加。而许多材料的机械性能(如弹性模量和硬度)和润滑性能随着摩擦界面的温度的升高而蜕化,进而影响其摩擦性能。因此,估计界面的摩擦温升对于合理设计MEMS的摩擦界面是非常重要的。

3.5 纳米电子学

由于微电子学曾引起人类社会的巨大变革,在微尺度理论和技术研究中,纳米电子学是最引人注目的。纳米电子学的物质基础之一是低维量子结构,在器件物理的研究方面与介观物理的研究是一致的。在电路方面,目前数字集成电路已进入“吉”规模(GSI),其开关时间已接近或突破纳秒级。此时平均到每位二进制逻辑的功率已接近甚至超过硅片的传热限。对于低温工作的高速约瑟夫逊器件,其开关时间甚至已达到数十皮秒的量级。此时量子限和热涨落限的影响也逐渐明显。因此集成电路的发展已逼近其各个物理极限。另一方面,随着集成度的增加、工作速度的提高和特征尺寸的减少以及系统功能的复杂化,纳米电磁兼容的问题也是束缚纳米电子学发展的瓶颈。因此说,纳米电子学还有赖于介观物理、纳米材料和纳米结构的突破性发展。这也是目前光学器件和神经元器件等虽然低速但远离各种物理极限的新型器件的研究颇具吸引力的原因之一。

4 微尺度理论的研究方法

同传统学科一样,微尺度理论的研究方法也包括理论建模、实验技术和计算机模拟三种。理论建模研究中,从微观角度出发,讨论电子、声子、光子等能量载流子在低维量子器件、薄膜复合结构和纳米材料中的运输特性,通过微观粒子的运输规律来解释微尺度效应进而给出设计和控制微器件性能的方法是当前的研究重点和热点^[20-26]。

实验技术主要用来测试材料的微尺度物性参数和微器件的性能参数。发展微样测试^[27]和超

快测试^[28]技术及其仪器是当务之急。同时, 开展微尺度物性的反课题方法研究对于弥补实验技术的不足无疑是非常有益的。

计算机模拟作为“数值实验”在微尺度理论研究中有着特别重要的作用。目前主要的计算方法有分子动力学^[29]、量子分子动力学^[30]、蒙特卡罗模拟^[31]和从头计算^[32-37]等。但由于很难获得准确的分子间相互作用势函数, 计算机模拟必须和理论建模及实验技术紧密结合起来才有意义。当然, 建立准确的分子间势函数更具理论意义。

参考文献:

- [1] Garcia M E. Theoretical description of ultrafast phenomena in clusters[J]. Appl. Phys., 2001, A72: 261- 271.
- [2] Hess C, Funk S, Bonn M, et al. Femtosecond dynamics of chemical reactions at surfaces[J]. Appl. Phys, 2000, A71: 477- 483.
- [3] Ando T, Arakawa A, Furuya K, et al. Mesoscopic physics and electronics[M]. Berlin, Germany: Springer, 1998.
- [4] Wen L S, Huang R F, Liu D C, et al. Microscopic fundamentals of electromagnetic functional metal/dielectric nanocomposite multilayer films[J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 130: 100- 109.
- [5] 严东生, 冯端. 材料新星[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998.
- [6] 国家自然科学基金委员会办公室简报[J]. 北京: 国家自然科学基金委员会, 2001(7): 45.
- [7] 郑厚植. 人工物性剪裁[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1997.
- [8] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [9] Van Kampen. Stochastic processes in physics and chemistry[M]. North Holland, Amsterdam, 1981.
- [10] 阎守胜, 甘子钊. 介观物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1995.
- [11] 吴德馨, 王守武. 微小世界[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1998.
- [12] Imry Yoseph. Introduction to mesoscopic physics[M], New York: Oxford University Press, 1997.
- [13] Tzou D Y. Macro to micro scale heat transfer- the lagging behavior[M]. New York: Taylor & Francis, 1996.
- [14] 刘静. 微米/纳米尺度传热学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [15] Tien C L, Chen G. Challenges in microscale conductive and radiative heat transfer[J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1994, 166(11): 799- 807.
- [16] Nemat- Nasser S, Hori M. Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Publishers B. V., 1993.
- [17] Ho Chih- Ming. Fluidics- the link between micro and nano science and technologies[A]. Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Interlaken, Switzerland[C], IEEE Robotics and Automation Society, 2001, 375- 384.
- [18] Dedkov G V. Experimental and theoretical aspects of the modern nanotribology[J]. Phys. Stat. Sol, 2000, (A) 179(3): 3- 75.
- [19] Rymuza Z. Control tribological and mechanical properties of MEMS surfaces, Part 1: Critical review[J]. Microsystem Technology, 1999, 5: 173- 180.
- [20] David K. Ferry, Semiconductor transport[M]. London, Taylor & Francis, 2000.
- [21] Kersch Alfred, Morokoff William J. Transport simulation in microelectronics[M]. Switzerland, Birkhauser Verlag, 1995.
- [22] Srivastava G P. Microscopic studies of electrons and phonons[M]. Singapore: World Scientific, 1999.
- [23] David K. Fery, Transport in nanostructures[M]. USA: Cambridge University Press, 1997.
- [24] Dwayne Miller R J, Mclendon George L, Nozik Arthur J. et al. Surface electron transfer processes[M]. USA: VCH, 1995.
- [25] Datta Supriyo. Electronic transport in mesoscopic system[M]. Britain: Cambridge University Press, 1995.

5 结 束 语

微尺度理论和技术是低维结构和器件、MEMS、BIOCHIP 等领域的研究基础。深入开展微尺度理论和技术研究不仅会对材料和器件及其相关领域的发展产生巨大的推动作用, 作为一门宏观和微观世界之间的桥梁的介观领域的科学, 它还将深化和丰富人们对客观世界整体规律性的认识。

- [26] Ridley B K. Electrons and phonons in semiconductor multilayers[M]. USA: Cambridge University Press, 1997.
- [27] Tien C L, Majumder Arunava, Gerner Frank M. Microscale energy transport[M]. Washington USA: Taylor & Francis, 1998.
- [28] Shah Jadgdeep. Ultrafast spectroscopy of semiconductors and semiconductor nanostructures[M], USA: Springer, 1999.
- [29] Lukes J R, Li D Y, Liang X - G et al. Molecular dynamics study of solid thin- film thermal conductivity[J], ASME Journal of Heat Transfer, 2000. 122: 536- 543.
- [30] Marx Dominik, Tucherman Mark E, Martyna Glenn J. Quantum dynamics via adiabatic ab initio centroid molecular dynamics[J]. Computer Physics Communications, 1999, 118(2) : 166- 184.
- [31] Helin W, Zuli L, Kailun Y. Monte Carlo simulation of thin film growth on a surface with a triangular lattice[J], Vacuum, 1999, 52: 435- 440.
- [32] Marx Dominik, Tucherman Mark E, Martyna Glenn J. Quantum dynamics via adiabatic ab initio centroid molecular dynamics[J]. Computer Physics Communications, 1999, 118(2) : 166- 184.
- [33] 赵宇军, 姜明, 曹培林. 从头计算分子动力学[J]. 物理学进展, 1998. 3, 18(1): 48- 69.
- [34] Grob Axel. Reactions at surfaces studied by ab initio dynamics calculations[J]. Surface Science Reports, 1998, 32: 291- 340.
- [35] 邵培革, 王立鼎, 任延同. 微机械元件和仪器新进展[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(1) : 10- 15.
- [36] 周兆英, 叶雄英, 崔天宏, 等. 微米纳米技术及微型机电系统[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(1) : 1- 7.
- [37] 潘武, 钟先信, 巫正中. 无线通信系统中的微尺度射频元件[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(4): 304- 309.

On Microscale Theory

TANG Zheran, WANG Liding

(*Dalian University of Technology, Dalian 116023, China*)

Abstract: Along with the development and applications of nanomaterials, microdevices, microstructures and microsystems, the theoretical and technological study of microscale effects has formed a hot point of current scientific research and a drive-force of the microscale theory progress. The paper, based on the microscale dimension and the microscale regimes, gives a brief introduction to the microscale theory.

Key words: microscale; nanomaterials; mesoscopic physics; mesomechanics; microscale heat transfer

作者简介: 唐祯安(1955-), 男, 辽宁省大连市人, 博士, 教授, 博士生导师。现在大连理工大学电子与信息工程学院工作并任大连理工大学机电系统研究中心副主任。主要研究方向为微传感器、机电系统(MEMS)和微尺度输运理论。

E-mail: edwdz@dlut.edu.cn

王立鼎(1935-), 男, 辽宁省辽阳市人, 中科院院士, 教授, 博士生导师。现在大连理工大学机械工程学院工作并任大连理工大学机电系统研究中心主任。主要研究方向为精密机械、机电系统(MEMS)和微操作系统。