

微米/纳米尺度热科学与工程学中的若干重要问题及进展*

刘 静¹⁾

(中国科学院理化技术研究所低温中心 北京 100080)

摘 要 文章阐述了当代最新的前沿学科之一——微米/纳米尺度热科学与工程学的研究意义、内容、进展及其相应的基本理论与实验研究方法,分析了由于微米/纳米器件尺度效应引起的一系列挑战性热问题,讨论了相应出现的一些新现象和新概念,指出了微米/纳米热科学方面新近发展的几类理论与实验技术的成功和不足之处,并归纳了该领域内若干可供探索的途径和新方向,特别就一些典型微米/纳米热器件及微尺度生物传热中的一些重要科学问题及其工程应用作了介绍。

关键词 热科学, MEMS, 纳米科技, 器件, 生物技术

SOME IMPORTANT ISSUES OF MICRO-/NANO SCALE THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING

LIU Jing

(Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The significance, theory and experimental techniques of micro-/nano scale thermal science and engineering—one of the latest scientific frontiers, are comprehensively reviewed. A series of challenging thermal problems due to scale effects in micro-/nanometer devices are analyzed. Both the successes and deficiencies of the latest theories and experimental techniques are pointed out. Some recent new phenomena as well as new approaches and directions worthy of investigation are summarized. Several typical micro-/nanometer thermal devices including microscale bioheat transfer objects are used to illustrate future engineering applications and the important scientific issues involved.

Key words thermal science, MEMS, nano-technology, devices, bio-technology

1 微米/纳米尺度热科学与工程学的发展

自然界的物质如图 1^[1]所示,其尺寸覆盖了从纳米(10^{-9} m)到光年这样一个十分广阔的范围。以往研究得最多的是人类感官所及的对象,近几年来科学和技术进步的一个重要趋势是朝微型化发展,人们的注意力逐渐从宏观物体转向那些发生在小尺度和(或)快速过程中的现象及其相应器件上(见图 2)^[2,3],其中,微电子机械系统(microelectromechanical system——MEMS)尤其取得了巨大成功并被迅速拓展到各种工业过程,这类系统集成电子及机械元件于一身,一般采用集成电路加工方法制成。由图 1 可见,微电子机械系统的尺寸比氢原子直径大 4 个量级,但又比传统人造器械尺寸小 4 个量级^[1],纳米器件则进一步推进了微电子机械系统的小型化。由于现代制造与应用技术的持续进展,“微机械”或“纳机械”的尺寸正以超乎寻常的速度降低,

而同时其性能却得到了保持甚至更好,各种令人惊讶的成就比肩接踵。至今,一些真正分子水平上的机器如转子、齿轮、开关、闸门、转栅、马达等的制作甚至已经成为可能^[4]。正因如此,几乎所有从事该领域研究的人们都相信,一场革命正悄然来临^[5]。在过去二三十年间,为寻找能够制造充分复杂而精细的电子系统的优良方法,人们投入了大量的时间和经费。MEMS 的影响遍及如仪器、医疗、生物系统、机器人、设计、导航及计算机应用等几乎所有现代科技领域。世界范围内的许多著名大学均将 MEMS 及其学科基础纳入其教学和科研项目中,不少发达国家和地区如美国、日本、瑞典、德国、新加坡及中国台湾地区等的一些重要项目均对微电子机械系统的发展及其相关研究给予了大力支持。比如在美国,早期支持微电

* 中国科学院“百人计划”资助项目

2000-07-06 收到初稿,2000-11-13 修回

1) E-mail: jliu@cl.cryo.ac.cn

子机械系统研究的经费主要来自国家基金会,每年约1百万美元左右,之后美国国防部也加入了支持的行列,其资助水平每年及每一项目甚至可达5千万美元以上^[5].我国也较早地投入了大量的人力物力开展这一学科的研究,并在纳米科学的某些领域如定向碳纳米管阵列、一维纳米线等还取得了引人注目的成就.所有这些都说明微米/纳米电子机械系统本身所具有的独特魅力和意义.

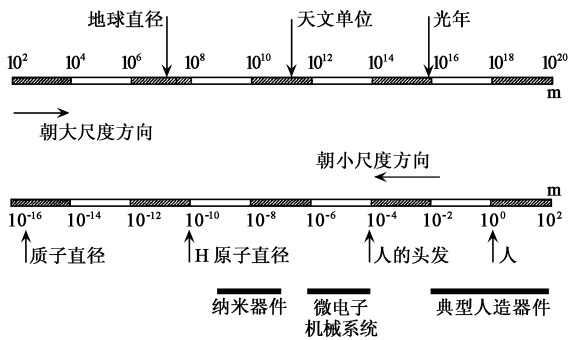


图1 自然界各种物体的尺寸

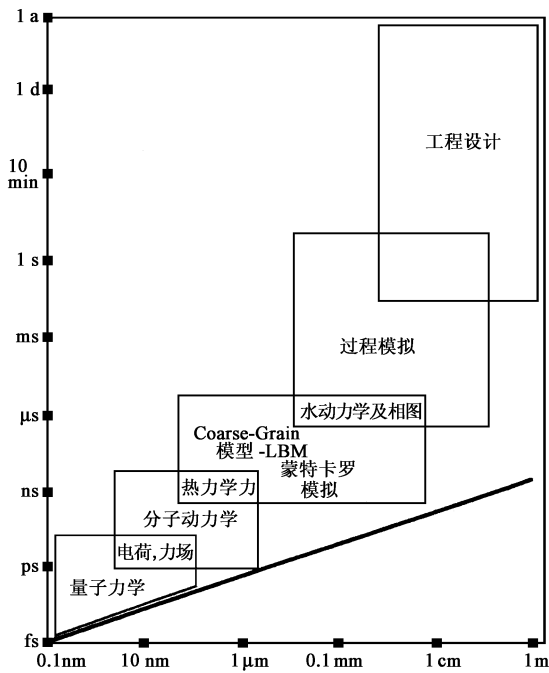


图2 对应于各种空间和时间尺度的分子及微运输模型

人们通常将 MEMS 及纳米技术的起源归功于诺贝尔物理学奖金获得者费恩曼(Richard Feynman)于1959年在美国物理学会西海岸会议上宣读的一篇经典论文“*There's plenty of room at the bottom*”,该文在时隔33年后又被重新予以全文刊登^[6],稍后,费恩曼博士的另一篇早期论文“*Infinitesimal machinery*”也被重刊于同一刊物^[7],这两篇文章科学地预

见到了微米/纳米机械的许多重要特征.“纳米技术”(nano-technology)的含义是指利用一些新技术如激光束、离子束及电子束研磨来完成的超精细材料加工技术,其定义可为“0.1—100nm(从原子尺寸到光波波长)尺度起关键作用的技术”.这种含义当然是十分广泛的,它可包括如超精细粉末加工、电子及X射线蚀刻及薄膜制作等^[8].微机械加工也是由上述定义界定的新工程领域,它是所谓“利用标准半导体加工技术对硅材料进行三维雕刻的技术”,借助于这类技术,人们制造了许多极微小的机械器件,如尺寸远小于1mm的压力、流动传感器和加速计,包括具有类似尺寸的换热器、空气透平、微型燃烧室和电子马达,以及制作在一个硅片上的一整套气体胶版复制器等.微电子学及分子生物学是另外两个强调微型化的领域^[3],此方面一些近期的杰出典范如生物芯片、生物反应器、微电子存储器等的设计和加工已经进入全球竞赛的阶段.不难理解,所有微尺度科学中的一个共同特征是物质和能量的运输均发生在一个受限的微小结构内,而物质的运输和相互作用必然涉及到流动和(或)能量的转换.此外,化学反应或相变过程中的任意分子重构也必然涉及到与周围环境的能量交换问题.因此,对于所有微系统的设计及应用来说,全面了解系统在特定尺度内的微机电性质及材料的热物性、热行为等已经成为迫在眉睫的任务.然而,目前的科学和工程水平尚无法做到这一步^[3,5],于是,现代热科学中的一个崭新分支——微米/纳米尺度热科学应运而生.与其他领域内微尺度工程的蓬勃发展一样,微米/纳米尺度传热工程学正成为热科学中最为激动人心的学科前沿之一.Kotake^[9]曾建议引入一门新学科“分子机械工程”,以便在微观分子科学及宏观连续介质工程(机械工程)之间搭起一个桥梁.

早期的微尺度传热学研究主要集中在导热问题上,之后则扩展到辐射和对流问题.关于微尺度下热导率依赖于材料厚度的认识可追溯到20世纪30年代,且最早是由物理学家认识到的.20世纪60年代后期,热物理学家(其中尤以美国加州大学伯克利分校的田长霖教授为代表)开始注意到一系列工程器件中的传热问题的尺度效应,于是微尺度传热学悄然兴起,特别到了80年代后期进展更为迅速.这一切都是与实际应用密切相关的,比如,由于低温技术的迅速发展及薄金属膜和金属线应用增长的需要,Tien等^[10]对薄金属膜和金属线进行了计算,发现其电导率及热导率均低于宏观情况下的相应值,原因

之一是靠近表面的电子的平均自由程由于界面的散射会缩短,且电子平均自由程随温度的降低而增加,在低温下尤为显著,当能量载体(如电子)的平均自由程与给定样品的最小尺寸在量级上相当时,这些载体的输运过程会体现出对样品尺寸的依赖性^[11],致使传统理论所预测出的样品物性与其真实值存在显著偏差,正是这些理论与实验观察上的矛盾促成了微尺度热科学的发展.微尺度传热和流体科学覆盖了一个十分广阔的领域^[12-20],如固液薄膜、半导体器件、光学器件、超导器件、芯片冷却装置、微电子机械系统、生物芯片、微传感器、激光加工、热医学工程、生命热科学等,蕴含了许多极富挑战性的课题.

为了使读者对微米/纳米尺度热科学与工程学的研究对象有一个具体认识,下面扼要地介绍一些典型例子,并分析和归纳其中的重要科学问题.

2 一些典型的微尺度传热工程问题

2.1 薄膜中的热传导

1987年,瑞士科学家发现 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 陶瓷在 35 K 以上具有超导电性即高温超导性.这一发现顿时激起全球范围内空前的研究热潮.人们第一次认识到,自然界存在一个超导体及半导体均可工作的温度范围,于是一种集超导体-半导体于一身的功能强大的复合器件应运而生.这类器件的基本单元是一种沉积在硅或镓砷化物基底上的高温超导薄膜^[21],其内外的传热问题与超导的研究和应用密切相关,因而对薄膜热物性及其热输运规律进行研究自然就成为提高仪器性能的关键所在.一系列的研究^[21-23]表明,对于一定温度和厚度范围内的高温超导薄膜或介电薄膜,由界面散射所引起的能量载体平均自由程的改变,会导致薄膜内的热传导规律偏离傅里叶定理所预示的情况.在这方面,玻尔兹曼方程被公认为是一种极具普适性和有效性的工具. Majumdar^[22]由此发展了一个声子辐射输运方程以分析单个薄膜中的导热,其研究表明,在微尺度区域内,晶格振动或声子的热传导表现为辐射传热的形式.由玻尔兹曼理论出发所开展的大量研究加深了对薄膜传热规律的认识.

2.2 颗粒和点结构中的热传导

这方面的两个典型例子是单晶及多晶^[24].当晶体的单位元胞在三维空间内重复生成,并形成一种无任何周期间断或界面的宏观物体时,即称为单晶.然而,固体通常是以多晶形式出现的,它由被称为颗

粒的多个单晶组成,而各单晶簇又由被称作颗粒边界的界面分隔开,界面对固体的机械、化学、电学及热学性质起着非常重要的影响.除颗粒边界外,晶体缺陷(如点缺陷、位错等)也强烈地影响固体的性质.除了晶形固体,也有被称为无定型态或玻璃态的固体,尽管其在短程即数个晶格间距内确实体现出有序性,但却不具有长程有序性.显然,与薄膜内传热问题类似的是,当颗粒和点结构的尺寸小到一定程度时,适用于宏观物体的经典热科学理论不再有效.对颗粒和点结构材料热物性的测量及其传热研究近年来得到广泛关注.

2.3 窄线及量子阱中的热传导

对建立在砷化镓基础上的量子阱结构的研究近年来进展十分迅速^[25].量子阱结构通常由嵌入高能隙介质中的一层或多层超薄($\sim 200 \text{ \AA}$ 或更小)低能隙半导体层组成.研究发现,其热导率与所对应的宏观体材值相比甚至在室温下也要小一个量级^[25].相当窄的金属线(如纳米线)是另一个热物性依赖于尺寸(即直径)的例子.另外,应该指出,微米/纳米尺度内的产热问题在纳米科技中的重要性正日益显现,如 Schwab 等^[26]的研究发现,要试图制造在数个分子厚度尺寸内的量子线或器件时,尚需克服其热限制问题.这是因为在极小尺度的结构中,该类器件中的热量只能通过有限的通道传输走,所以它们常常会在顷刻之间即因过热而化为灰烬.目前,对这类问题的研究和应用刚刚起步,但已吸引了众多领域内学者们的关注^[27].

2.4 计算机元器件及其传热问题

近年来,微电子工业发展的一个显著特点是个人计算机和工作站呈爆炸般增长,在这些小型或中型尺寸的系统,无一例外地要用到受迫对流空气来冷却发热器件.图 3 示出了系统水平上的热耗散与系统体积之间的关系图^[28],从中可见,所有数据均落入两条平行线之间的带内.由此带的斜率可以看出,气冷系统中的体积热耗散密度几乎独立于系统尺寸,其范围大约在 $3000-7000 \text{ W/m}^3$ 之间,其中,笔记本电脑中的体积热耗散密度最高,达 7000 W/m^3 ,如此高密度的热量输运是一个富有挑战性的课题.冷却微小系统的困难在于^[28]:首先,冷却空气速率不能太高,以尽可能减小噪音;其次,仅允许保留很小的冷却流体空间;第三,不允许在模块上安装大容量热沉(扩展表面);第四,低造价则要求尽可能地采用塑料封装芯片,这会增大芯片与模块表面之间的导热热阻,于是热量将主要聚集在基底上.

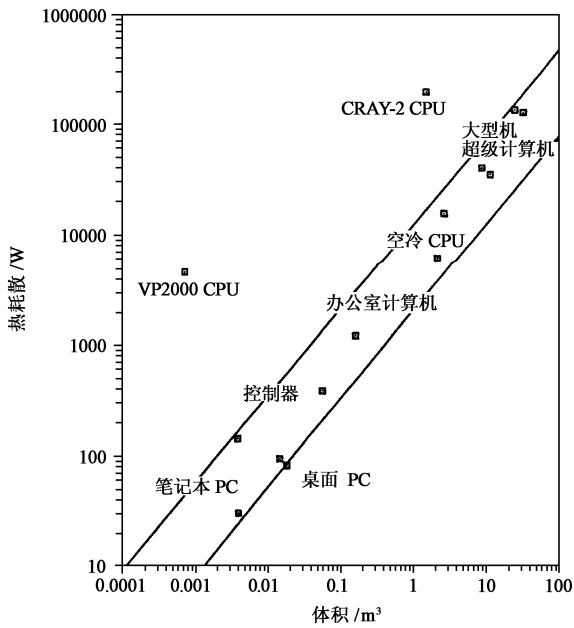


图3 计算机体系内热耗散与系统体积的关系

所以,寻找具有高效热输运效能的传热方法至今一直是人们探索的主题。

2.5 微型换热器及其传热问题

微型换热器涉及相当广泛的领域,在电子器件、微/纳电子机械系统、一些现代最先进的生物技术和微医疗仪器等方面都得到了充分的应用。随着当前微系统与纳米技术的飞速发展,各种令人耳目一新的微型换热器仍层出不穷。现代微制造技术的进展已经使得加工由多个水力学直径在 $10-10^3 \mu\text{m}$ 之间的微型管道组成的换热器成为可能^[29]。这类流动槽道或交错肋片通常制作在硅、金属或其他合适材料的薄片上,每一薄片既可单独组成一个平板换热器,也可堆叠和焊接在一起,以形成平行的顺流或逆流换热器(如图4)。槽道和肋片可采用光刻技术或利用微型工具通过精密切割而制作在薄片上。除微槽

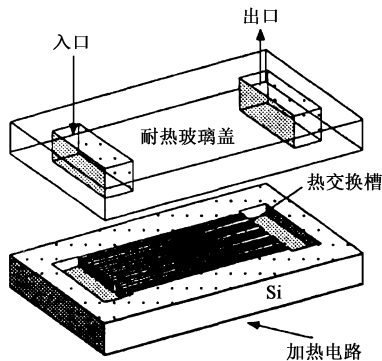


图4 微型换热器示意图

(晶片上加工有流道,其表面覆盖有耐热平板玻璃)

型换热器外,微热管是另一类具有高效热输运能力的微型换热器^[30],其内存在着诸多复杂的微尺度流动、传热及相变机理有待揭示。

2.6 微型燃气透平燃烧技术

微制造技术中极富挑战性的尝试之一是制作微型透平机械,尽管尺寸极小,这类器件仍包括有微电动压缩机、微透平发电机、微燃气透平、微型制冷机及微型火箭发动机等。Waitz 等^[31]新近发展了一个针对微燃气透平的燃烧室(如图5)。研制该类微小机械的动机是有道理的,比如,若能成功设计出一种能产生 $10-100 \text{ W}$ 电能而体积仅在 1 cm^3 以下,且每小时消耗的喷气燃料仅约 7 g 的微燃气透平发电机,则其将拥有 10 倍于现行最好的电池所能提供的能量密度。微型和常规器件在设计上的差别大多是由于尺寸缩小引起的,但它也受燃烧室与发动机的相对尺寸、周期压比、材料温度极限等影响。微型燃烧室的一些特别之处在于^[31]:(1)具有更短的用于混合和燃烧的停留时间;(2)附加的能量损失主要由较高的比表面积决定;(3)采用了难熔的结构陶瓷。微机电技术只在一些难熔结构陶瓷如氮化硅(Si_3N_4)及碳化硅(SiC)等的微加工成为可能后才得以实现,这些材料具有适应恶劣环境的优异的机械、热学及化学性质。微型燃气透平内所发生的燃烧过程涉及相当复杂的化学反应、微传热、传质和多相流动问题,而且还包括了几乎一切大尺度燃烧器中出现的问题,如高温冷却、火焰稳定、点火、燃料输送和堵塞等,而由于微型燃烧器本身尺寸大大减小,这些规律又明显不同于宏观燃烧器。

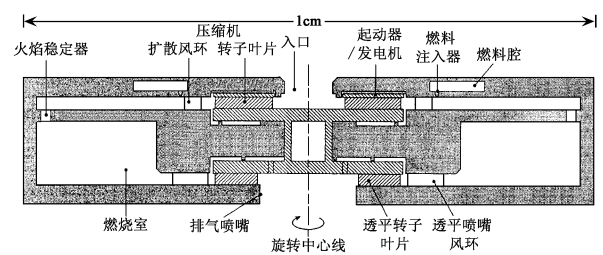


图5 微型燃气透平发电机

2.7 微尺度热驱动技术

在某些环境下,热信号被认为是控制一些“微小”机器的最合适的工具之一^[4],图6所示为 Lin 等^[32]设计的利用微汽泡作为驱动部件的装置。与热驱动相比,一些传统微致动技术如堆型压电驱动器若要实现较大的力输出,则其位移相对较小($<10 \mu\text{m}$);而双压电晶片虽可获得大的位移,但输出力又相对较小;此外,电力驱动则对颗粒和潮湿环

境非常敏感;而磁致动又不易加工到亚毫米尺度.据报道,采用热相变驱动的效应器可以获得相对较大的力,且可实现数十微米的位移^[33].不过,也由于微热控制器对温度较敏感,它们不能在温度变动很大的状况下使用.最近发现,除电场之外,温度或温度梯度可对一定成型表面上的微小流体流动起到导向作用^[34],这可能具有重要的应用前景.

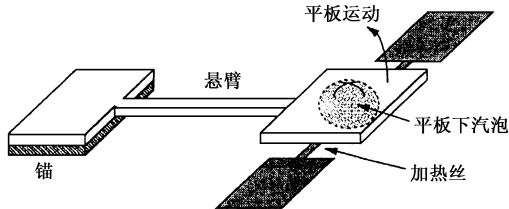


图6 汽泡驱动的微型热效应器
(悬臂末端的平板可随微小汽泡的形成而朝上移动)

另一个微尺度热控制的例子可在打印机工业中找到.在微机电系统的发展中,热喷墨打印头按其销售单价及总数来说均算是比较成功的商业典范之一.热喷墨打印头(或笔)封装在一种体积为 $9-50\text{cm}^3$ 内的可替换性液滴发射腔内,它们通常由一个墨水池及制做在硅基底上的与喷墨阀门阵列相对应的微型加热电阻阵列构成^[5].图7为一个带有集成化运动电子装置的热喷墨头的横截面.由于打印图像的质量强烈地依赖于墨滴重量,实现微小液滴发射的控制技术一度成为人们追求的目标.图8反映的是一类喷墨打印机中墨滴重量随年代降低的情况,图中水平线代表人眼所能感知的最小液滴重量,低于这一临界值时,可以获得高精度打印图像.

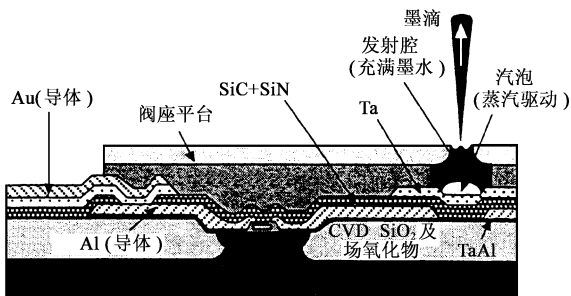


图7 集成化热喷墨芯片的横截面
(该图显示出由加热电阻产生的“驱动汽泡”迫使墨滴从发射腔喷出的情形,每一发射腔对应于一个N通道金属氧化物半导体晶体管)

2.8 微尺度生物传热

生命过程发生在三类空间尺度内^[35],即对应于有机分子行为的纳米尺度、与组织内单个细胞行为

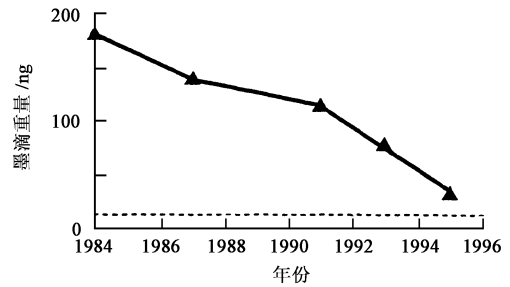


图8 喷墨液滴重量随年代的演化情况
(采用图中虚线以下的液滴重量可以获得高质量的打印图像)

相关的微米尺度以及与整个生物机体行为相关的宏观尺度.温度对生命系统的影响同时体现在纳米(分子)及微米(细胞)尺度.各种细胞尺寸大致分布在数个微米(如精子及血红细胞)到数百微米(如卵母细胞)之间,大多数为数十微米.一个细胞即是一个有机体,其外部由脂双层膜组成,内部为溶液——细胞质,细胞质内又包含若干细胞器.对细胞尺度范围内的传热传质问题的研究近年来逐渐成为生物学研究中的一个重心,其工程背景可在大量的生物材料保存、冷冻干燥、冷冻外科、高温肿瘤热疗中找到.

微尺度下的生物传热过程实际上形形色色.如在生命个体中,一些生物体与生俱来的天然结构就包含着独特的微质量和能量运输机理.在一项近期研究中,Miaoulis等^[36]认识到,昆虫、植物、蜥蜴及鸟类等的生物薄膜具有重要的生命意义.其体表上每层薄膜的厚度可在 $1\mu\text{m}$ 以下,生物体可具有多达10层的由生物膜及空气隙交替组成的层状膜,这些多层膜结构演化至今,能对 $0.5-2.0\mu\text{m}$ 波长内的太阳光发生干涉作用.由于微尺度辐射效应,膜厚度的微小变动会引起其反射和吸收阳光的性能发生大的改变.借助于膜厚及结构的选择性演变,自然界为这些多层结构找到了极好的应用场合,其中之一即涉及到生物传热.比如蝴蝶,其独特的薄膜结构会导致出现鲜艳的彩虹色,这有助于其信号的发送、求爱、伪装及展示等(如图9所示),而那些未被反射的光线则用于其自身的热调节.改变膜厚会诱发不同的光谱和反射特性.

微尺度传热在一些最先进的生物技术中也得到了应用,如利用生物组织中化学反应速率对温度的高度敏感性,人们设计了独特的具有高效热控性能的硅微结构,从而使得过去需长达3h的多聚酶链式反应(一种用于扩增DNA片段的著名的生化反应方式,该思想的提出者Mullis因此获得1993年诺贝尔化学奖)现在仅需20min左右即可完成^[37],这是因为

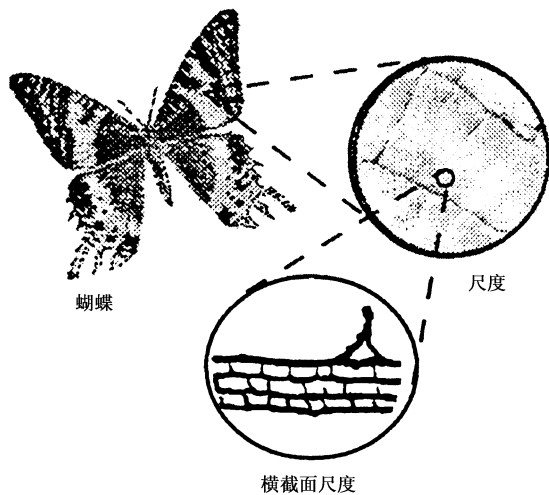


图9 蝴蝶翅膀发光尺度示意图

在硅微结构中采用了具有合适高宽比和大表面的反应容积,从而能在一个低热质交换器中得到快的加热和冷却速率.除具备速度快的显著优点外,由于生化反应通常对专一性要求很高,快速加热和冷却对此也提供了额外的优越性.与此类生化反应器件类似,关于生物芯片的制造方法及其内微传热传质、微控制、微信号的采集等也必将成为新一轮的研究热点.

2.9 分子机器

科学的原动力总是促使人们去发现那些未知的现象及自然规律,而工程的原则又驱动着人们不断挑战更新、更难、更高效的系统与装置的制造方法,二者总是交相辉映和协同发展的.对分子水平上的机械装置进行加工的执着追求导致了一系列相应器件的产生,如:转子、齿轮、开关、闸门、转栅、马达、棘齿等,其中分子马达在生物系统中比较普遍,其制作最近在实验室中也成为现实^[41].Koumura等^[41]发现,采用紫外光或通过改变系统温度来激发4个相互分离的异构化步骤,可以实现重复性的、单方向绕360°转动的运动方式.与微观粒子受热扰动而体现出的无规布朗运动类似的是,分子尺度的机器必然相当敏感于其所处的热环境,显然,对这类器件热控问题的研究已不再是一个遥远的梦想.

3 微器件传热问题中出现的尺度效应及挑战性课题

微器件中热科学与工程学问题的研究引发了一系列始料未及的挑战性课题,也给传统的思维观念带来了新的冲击.现在,人们逐渐认识到,随着尺度

越来越小,器件中的热和流体行为将严重偏离于经典传热学和流体力学理论所描述的规律,即微米/纳米尺度区域内的热流体行为将体现出强烈的尺度效应,而那些广泛应用于连续介质体系中的物理量如温度、压力、内能、熵、焓乃至热物性如热导率、比热、粘度等在微尺度水平上均需要重新理解并赋予新的涵义,对这些科学问题的深入认识已经成为发展新材料和提高新型微器件性能的关键.对于微工程系统,需要通过微观和介观途径,建立起对材料传热规律的基本认识和描述.虽然物理学过去已经对各种能量输运进行过探索,但其应用于微尺度工程系统时需要一个全新的视野,这也正是微尺度热科学之所以兴起的原因.

目前,研究者们试图建立一些判断传热尺度效应的某些准则,例如对于导热问题,Flik等^[38]给出的区域图指出,对于平均自由程对热载体起决定作用的情况,若平板层厚比在其层厚方向的导热平均自由程小约7倍,或者层厚比沿层面方向的导热平均自由程小4倍半,则认为该层内的热传导存在尺度效应.类似地,在热辐射及热对流问题中也提出了相应的尺度准则.然而,新理论本身是很不完善的,而材料尺度极小时其热物理规律取决于多种因素的事实也增大了解释实验结果的困难.迄今所测得的薄膜热导率值差别很大^[39],这是因为薄膜的一些独特性质(如膜厚、膜-底材温度、薄膜的沉积方式等)均会影响热导率的大小,且其中所涉及的不确定性很难准确估计.例如,尽管不少理论和实验研究都断定薄膜材料的热导率比其体材值要小1个以上的数量级,但也有人发现,镍被覆材料中的热导率仅略小于其体材值.另外,Volklein和Kessler^[40]发现铍金属膜(20—400nm厚度)的热导率在低于250K的情况下随温度的增加而减小,而在温度大于300K时,则随温度的增加而增加.事实上,特别薄的膜材料的物理和化学性质强烈地影响其热物性与对应体材值之间的偏离度,因为即使薄膜的化学性质相似,其微结构也可因沉积方式的不同而相差很大.在光学元件中,终端材料的微结构、空穴、裂缝会严重影响器件的使用寿命,它们决定着可控激光诱发破损的参数.分析这些问题需要了解材料在分子及原子水平上的结构对其输运特性的影响.若要在宏观层面上解释这些问题,全面而综合的薄膜热导率模型应考虑到材料的各向异性、非均匀性及膜材料的温度依赖特性等因素^[41].针对许多实验中出现的结果差异,Tien及Chen^[20]提出了一个很有价值的思想,即主张从事薄

膜热导率测量的不同实验室应对由同一供货商提供的同一批样品进行测定,以评估各自所用方法的准确性和可靠性,并能对薄膜热导率的真实特性有一个完整的了解.对应地,对于流动和辐射问题也有必要采用类似的研究策略.

4 微米/纳米尺度传热学研究的一些基本理论与实验研究方法

对传热和流体输运特性的研究可从宏观或微观途径着手^[24],宏观途径主要依赖于唯象模型,不确定知能量输运的机制及材料的微结构,其主要用于分析宏观尺度下的热现象,只需知道本构关系或简单的输运定律即可,因而显得相对简单些,但这种方法在认识和解决微工程系统所涉及的问题方面并不能提供足够的信息,因为这些系统往往需要了解传热的微观机制.迄今,在理论和计算研究方面,按照从连续介质现象到量子现象的特征尺寸,研究者们提出了一系列从量子分子动力学到连续介质模型的方法^[2,9].对于宏观连续介质现象,利用传统的连续、动量及能量方程即可求得系统所涉及到的宏观变量.此外,对一些传统流体力学、传热学理论及其相应的基本方程和界面条件、物性等作适度的修正,也可达到分析某些微系统热问题的目的.分子动力学方程则用于揭示那些量子力学效应不明显的物理现象的分子特征,它们也为分子统计理论如玻尔兹曼(Boltzmann)方程及直接蒙特卡罗模拟法提供分子碰撞动力学方面的知识.对于具有量子效应的物理过程如光与物质的相互作用、金属材料中的热传导问题等,应采用量子分子动力学方法并通过同时求解分子动力学方程及薛定谔(Schrödinger)方程来加以分析.然而,在发展微米/纳米尺度传热学理论的过程中,必然涉及到两个基本问题.首先,任何计算均只适用于一定的长度和时间尺度范围,在其他范围则会失效或带来困难.例如,分子动力学模拟主要用于研究发生在1—100nm以内的现象,但对于更大或更长的范围,该法在计算上至少在当前是不很现实的.不过,幸运的是,许多物理现象和工程问题虽然是在宏观或“人”的层面上体现的,但其归根结底却是从分子尺度开始的.目前,在建立跨越一定长度和时间范围的模型时会引入一些困难,晶格玻尔兹曼方法正试图连接这一间隙,但尚需进一步的努力,因为工程系统常常由于一些介观现象的存在而显得较为复杂.第二个问题是对计算方法,尤其是分子水平

上的计算结果如何验证.例如,分子团簇结构如 C_{60} 可通过分子动力学模拟,但困难在于如何实际考察分子尺度上的动力学输运现象.所有这些均成为摆在人们面前的难题.

另一个非常重要的领域是发展研究微尺度传热的实验方法^[19].现已提出数个新的实验技术和测量方法.其中一些方法可用以获得微尺度能量输运现象的物理图景,而另一些方法则朝各自的空间、时间或能量分辨率极限推进.在这方面,光束反射测量技术已取得一定的成功,但其实验过程极易受到各种扰动的影响.利用原子力显微镜对电子系统及器件进行热成像是另一个非常有前景的技术,改进这一特殊方法的机制之一在于采用更精确的温度测量装置替换热偶探针,在这方面,半导体二极管、电阻温度计或石英晶体等也可能提供更准确的温度信息.图2显示的长度范围从1—100nm,而相应的时间尺度从1fs—1ns,这些纳米长度是扫描探针显微镜所能刻划的范围,因而扫描探针显微镜已被用于研究电荷、光子和热量的传输,但目前它尚不具备足够的时间响应能力;另一方面,纳秒时间尺度与超短激光脉冲相当,所以皮秒及飞秒激光可用于研究光子相互作用中的超快速动力学过程,但超短脉冲激光又不具备足够的空间分辨率.也许能结合这些极端空间和时间极限尺度的仪器是近场扫描光学显微镜^[2].这些方法几乎是惟一的可隔离固体中电子和声子之间相互作用的方法.现在超快激光已被广泛地应用于物理和化学,其新的工程应用正不断拓展.人们已经可以获得微机械结构在1fm范围内的偏斜,这使得物理和化学感知水平得到空前的提高.注意到,1fm比一个化学键长度小1%,这种探测能力可获得对材料行为的根本认识.历史上这样的例子屡见不鲜,即一旦某种测量方法的极限被打破,则新的科学发现和工程革命也即将来临.

5 小结与展望

微米、纳米科学已经成为当前最为备受关注的热门学科之一,21世纪世界经济的基石将在很大程度上建立在微小器件的基础之上,而微米/纳米尺度热科学正是微尺度科学中最新和重要的学科分支之一,它具有广阔的工程应用背景并备受众多领域专家的关注,是交叉于热科学(如热物理、热力学、流体力学、热测试技术等)、物理(凝聚态物理、介观物理等)、电子(计算机、微电子、微/纳电子机械系统等)、

物理

器件、机械(微加工等)、材料(新材料制备、测量、热评价)、化工(微流体、微反应)、生物医学工程(微泵、微传感器、微医疗仪器等)、仪表、生物信息与控制(生物芯片、培养皿)等诸多领域的一个新增长点。尽管本文仅相当简略地介绍了热科学在微米/纳米系统技术中的一些重要应用情况,但这已经足够清楚地表明,同其他学科一道,热科学方法的角色也是无可替代的,正是在各种微米/纳米分支学科的相互配合和协同发展下,微米/纳米科技才得以迅猛发展。现在,微流体和传热器件的商业化进程正处于其发展初期,目前可得到的仅有少数有限的器件,微尺度器件体积和重量的减少正在促成一些新的工程应用,其有可能(或者已经)开辟新的市场,并为有关基础研究探索提供了崭新的研究手段。

在过去数十年间,对微系统中新传热现象的发现要求采用一系列新的研究手段^[19],而半导体工业的发展则会进一步将应用推进到低温区域,此时,微尺度效应会越来越变得显著。正如前面所阐述的那样,在各种理论和实验结果中,仍然存在着相互不吻合甚至矛盾的结果。所以,除了要对已有理论进行修正外(如考虑热传导中的各向异性、非均匀对流问题中的流体压缩性、介质物性的变化、外场影响、边界效应、材料结构的特殊性等),尤其要力图发展新的理论与测试技术,并全力开拓制造新型的高性能、低价位的微米/纳米热器件,以及拓展 MEMS 的热科学应用领域。与基础研究并列的是需要获得更好的设计工具,以使微流体及热系统的完整模拟成为可行,这类系统应包括设计和过程建模以及对器件流体力学、热行为、结构变形及其性能等的数值模拟。人们不仅要问,由于凝聚态物理学家在过去几十年间已经研究过微尺度能量输运的问题,那么微尺度热科学领域的重点何在呢?已有的一个共识是核心问题应集中在复杂的材料和工程系统中^[21],这时,低温和理想晶体假设不再成立。在这样的系统中,微尺度内的能量输运可与其周围复杂的环境发生相互作用,并导致出现在过去所研究过的理想可控系统内不易出现的独特行为。毋庸置疑,微米/纳米尺度热科学的研究范畴正不断得到拓展,其在生命科学方面的作为也初露端倪,正是满怀这种希望,微米/纳米尺度科学领域内的研究者们正在努力(有时甚至是十分艰难)地将各种极限不断推进,而最为激动人心的领域将出现在各种器件、计算及实验的交叉层面上。

致谢 作者感谢审稿人的建设性意见和修改。

参 考 文 献

- [1] Gad-el-Hak M. ASME Journal of Fluids ,1999 ,121 :5
- [2] Tien C L *et al.* Microscale Thermophysical Engineering ,1997 ,1 :71
- [3] Tien C L, Majumdar A, Gerner F M. Microscale Energy Transport . New York :Taylor & Francis ,1998
- [4] Koumura N, Zijlstra R W J, van Delden R A *et al.* Nature ,1999 ,401 :152
- [5] National Materials Advisory Board. Microelectromechanical Systems-advanced Materials and Fabrication Methods . Washington D C :National Academy Press ,1997
- [6] Feynman R. Journal of Microelectromechanical Systems ,1992 ,1 :60
- [7] Feynman R. Journal of Microelectromechanical Systems ,1993 ,2 :4
- [8] Cifalo M, Collins M W, Hennessy T R. Med. Eng. Phys. ,1996 ,18 :437
- [9] Kotake S. JSME International Journal Series B: Fluids and Thermal Engineering , 1995 ,38 :1
- [10] Tien C L, Armaly B F, Jagannathan P S. Proc. 8th Thermal Conductivity Conference . New York :Plenum Press ,1969 .13 - 19
- [11] Ziman J M. Electrons and Phonons —the Theory of Transport Phenomena in Solids . Oxford :Oxford Press ,1963
- [12] Bankoff S G. ASME J. of Heat Transfer ,1994 ,116 :10
- [13] Jr. Wayner P C. In :Tien C L, Majumdar A, Gerner F M eds. Microscale Energy Transport . New York :Taylor & Francis ,1998 .187 - 227
- [14] Goodson K E, Ju Y S, Asheghi M. In :Tien C L, Majumdar A, Gerner F M eds. Microscale Energy Transport . New York :Taylor & Francis ,1998 .229 - 294
- [15] Ho C M, Tai Y C. ASME J. of Fluids Engineering ,1996 ,118 :437
- [16] Gravesen P, Branebjerg J, Jensen O S. J. Micromech. Microeng. , 1993 ,3 :168
- [17] Elwenspoek M, Lammerink T S, Miyake R *et al.* J. Micromech. Microeng. ,1994 ,4 :227
- [18] Shoji S, Esashi M. J. Micromech. Microeng. ,1994 ,4 :157
- [19] Duncan A B, Peterson G P. Appl. Mech. Rev. ,1994 ,47 :397
- [20] Tien C L, Chen G. ASME J. of Heat Transfer ,1994 ,116 :799
- [21] Hlik M I, Tien C L. ASME J. of Heat Transfer ,1990 ,112 :872
- [22] Majumdar A. ASME J. of Heat Transfer ,1993 ,115 :7
- [23] Jen C P, Chieng C C. Journal of Thermophysics and Heat Transfer ,1998 ,12 :146
- [24] Majumdar A. In :Tien C L, Majumdar A, Gerner F M eds. Microscale Energy Transport . New York :Taylor & Francis ,1998 .3 - 94
- [25] Chen G, Tien C L. Journal of Thermophysics and Heat Transfer , 1993 ,7 :311
- [26] Schwab K, Henriksen E A, Worlock J M *et al.* Nature ,2000 ,404 :974
- [27] Cho A. Science ,2000 ,288 :591
- [28] Nakayama W. In :Tien C L ed. Annual Review of Heat Transfer , 1997 .8 :1
- [29] Weisberg A, Bau H H, Zemel J N. Int. J. Heat Mass Transfer , 1992 ,35 :2465

- [30] Peterson G P, Swanson L W, Gerner F M. In: Tien C L, Majumdar A, Gerner F M eds. *Microscale Energy Transport*. New York: Taylor & Francis, 1998. 295 - 338
- [31] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y S. *ASME J. of Fluid Engineering*, 1998, 120: 109
- [32] Lin L, Pisano A P, Lee A P. 6th International Conference on Solid State Sensors and Actuators, *Digest of Technical Papers*. San Francisco, 1991. 1041
- [33] Bergstrom P L, Ji J, Liu Y N *et al.* *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1995, 4: 10
- [34] Kataoka D E, Troian S M. *Nature*, 1999, 402: 794
- [35] Rubinsky B. In: Tien C L, Majumdar A, Gerner F M eds. *Microscale Energy Transport*. New York: Taylor & Francis, 1998. 339 - 368
- [36] Miaoulis I N, Tada H, Mann S *et al.* *Advances in Heat and Mass Transfer in Biotechnology*, ASME, 1997, HTD Vol. 355/ BED Vol. 37: 33
- [37] Christel L A, Petersen K, McMillan W *et al.* *ASME Journal of Biomechanical Engineering*, 1999, 121: 22
- [38] Flik M, Choi B I, Goodson K E. *ASME J. of Heat Transfer*, 1992, 114: 666
- [39] Mirmira S R, Fletcher L S. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1998, 12: 121
- [40] Volklein F, Kessler E. *Thin Solid Films*, 1986, 142: 169
- [41] Guehther A H, McIver H K. *Thin Solid Films*, 1988, 163: 203

• 物理新闻 •

聚变崩坍 (fusion avalanches)

一个类似于儿童玩具的沙堆崩坍模型是一种可用于研究如何使核聚变装置托卡马克 (Tokamak) 达到最佳条件的工具, 托卡马克是一种利用核聚变反应来获取能量的装置. 为了能够实现获取能量这个目的, 第一步是要在托卡马克装置中得到高温、高密度的等离子体, 特别是一种称为 H- 模的最好位形. 但到现在为止, 我们还不很清楚如何能使等离子体达到这种状态.

沙堆模型为这方面的研究提出了一些有益的启示. 美国沃里克大学 (Warwick University) 的 S. Chapman 教授设计了一个模拟沙堆崩坍的计算机模型, 他是利用调节沙粒在沙堆中的分布来观察沙堆崩坍的出现与发展. 而在各种尺度上出现沙堆崩坍是自组织临界性 (简称 SOC) 的一个特征. 从 1990 年开



作者简介

刘静, 男, 1969 年 4 月出生, 博士, 研究员. 1992 年 7 月毕业于清华大学热能系、物理系, 同时获得动力工程与控制专业工学学士学位及现代应用物理专业理学学士学位. 1996 年 2 月获清华大学工程热物理专业硕士、博士学位. 1996 年 3 月至 1997 年 10 月任教于清华大学. 1997 年 11 月至 1999 年 6 月为美国 Purdue 大学机械工程学院博士后副研究员. 1999 年 6 月应中国科学院百人计划之聘回国, 任中国科学院理化技术研究所低温中心研究员. 为美国机械工程师学会 (ASME)、电气与电子工程师学会 (IEEE) 会员, 并担任中国制冷学会理事. 当前的主要研究兴趣为: 微米/纳米热器件中的基础与应用问题、生物热物理及高低温生物医学技术与仪器等. 出版有两本学术著作, 已在国内外重要刊物发表论文 70 余篇, 并申报 14 项专利.

始, 就有许多的科学家已经发现, 在托卡马克装置中的等离子体中存在着自组织临界现象, 其中粒子数与能量在各种尺度下进行着快速的重分配过程, 这类“运输”过程要比正常条件下可允许的扩散快很多.

但这里有一点波折, 自组织临界行为本身是倾向于产生一种对粒子没有什么约束的等离子体. 在达到自组织临界的条件下, 这个模型认为在等离子体内会出现一部分 (不可能全部) 符合要求的 H- 模, 但科学家们希望能控制等离子体中 H- 模的产生, 也就是说, 他们希望“快运输过程”产生在较短的长度尺度内.

(云中客摘自 *Physical Review Letters*, 26 Mar., 2001)