

在过去的 30 年中,微电子器件尺寸的缩小和性能的提高已经成为科学和经济进步的主要推动力。半导体加工和表面科学的发展,允许对固体器件在关键尺寸下进行精确控制而使其具有理想的特性。在过去的 20 年里,微/纳机电系统(MEMS 和 NEMS)、微流体和纳米流体、量子结构和器件、光子学和光电子学、用于分子传感和生物医学诊断的纳米材料,以及在分子和原子水平下进行测量和操作处理的扫描探针显微技术都有了巨大的发展。

纳米技术的研究已经不仅仅只是科学和工程的一个新领域,它已经成为几乎所有自然科学和工程学科的一个组成部分。根据佐治亚理工学院网站(www.gatech.edu)的信息,该校超过 10% 的教师参与了与纳米科学和纳米技术相关的科研项目。同样的情况也出现在美国 and 很多其他国家的主要研究性大学里。此外,纳米科学和纳米工程的研究,需要并且已经导致了許多跨越传统学科界限的紧密结合。分子和原子水平物理特性的相关知识,在我们理解发生在宏观世界里的基本过程中已经发挥,并将继续发挥着重要的作用。这将使得我们能够设计和开发更新颖的设备和机器,从几个纳米到汽车和飞机这样的大尺寸。我们已经享受到了拍照手机和 iPod 的乐趣,它能储存数以千计的相片和歌曲。在接下来的几十年里,微纳尺度科学和工程的进步将从根本上重组当前应用于制造业、能源生产和利用、通信、交通、空间探索和医疗等领域的技术^[1,2]。

与微型化相关的一个关键问题是单位体积热耗散的极大增加。微纳结构能使具有独特热特性的工程材料的热流量显著增大或减小。因此,从微米尺度到纳米尺度的热传输知识和微纳结构的热特性对未来技术的进步至关重要。解决小设备和系统内越来越多的问题,需要在减少的尺寸和(或)短时间尺度内对热(或更普遍地说,能量)传递机制有一个深刻的理解,因为传统的平衡和连续性假设已不再适用。例如,对微纳器件、快速激光与材料的相互作用、微型热传感器和执行器、纳米结构热电、光子晶体、微尺度热光电器件等的热分析和模拟^[3,4]。

1.1 宏观公式的局限

中国古代的一位哲学家曾提出:假设你取一根一尺长的木棍并且每天截去它的一半,那么即使几千年以后,你仍然截不完它,如图 1.1 所示。现代科学告诉我们,在某些阶段,物体将会达到分子甚至原子水平,物体在这一水平下的物理和化学特性与原来物体的特性完全不同。木棍或木片最终将变成一些与大气中其他成分没有任何区别的物质。从根本上说,非常小尺度下材料的特性与那些相应的体材料的特性可能大不一样。注意到 1nm(纳

米)为 1m 的十亿分之一。一个氢原子(H)的直径是 0.1nm 量级,而一个氢气分子(H₂)的直径大约为 0.3nm。使用公式 $l_n = 0.30482/2^{n-1}$ m,其中 n 代表天数,我们发现,仅仅一个月后, $l_{30} = 5.7 \times 10^{-10}$ m(或 0.57nm),它已经接近一个氢原子的直径。

虽然利用大型和先进的设备,原子仍然能够被继续划分,但我们观察、操作和利用它们的能力却非常有限。另一方面,绝大多数生物过程发生在分子水平。许多新奇的物理现象发生在几纳米的尺度上,并且可以被集成到大尺度系统中。这就是为什么纳米会成为我们对重要的新材料、结构以及现象进行认识的一个关键尺度范围。例如,直径 0.4~50nm 的碳纳米管之间有着迥异的特性。一些研究者指出,这些碳纳米管有望成为纳米电子学的基石;而另一些研究者发现,室温条件下单壁碳纳米管的热导率比铜高一个数量级。因此,碳纳米管已经被认为是应用在高热通量需求方面的一个候选材料。

在传统流体力学和传热学中,我们认为介质都是连续体,即可无限分割而不会改变其物理特性。所有的强度量都可以被定义为局部的和连续的。例如,局部密度被定义为

$$\rho = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{\delta m}{\delta V} \quad (1.1)$$

其中, δm 是一个体积元 δV 内的质量。当特征长度可比于或者小于机械长度时,如分子平均自由程,它是分子在两次碰撞之间运动的平均距离,连续性假设将不再适用。式(1.1)中定义的密度取决于体积 δV 的大小,并且即使在宏观平衡时也随着时间而变化。需要注意的是,在标准大气条件下空气的平均自由程约为 70nm。对于大多数工程应用来说,连续性假设都是合理的,直到亚微米或纳米尺度时才不适用。不过,如果压力很低,如在一个真空容器或者高海拔区域,平均自由程可能变得非常大;这时,即使在相对较大的长度尺度下,连续性假设也可能不再适用。

在宏观框架内,我们通过假设所考虑的介质不仅是连续体而且到处都处于热平衡状态,计算某一液体或固体内部的温度分布。后一个假设通常被称为局部平衡假设,之所以这样假设是因为温度只有在稳态平衡时才能被定义。当极高的温度梯度出现在足够小的长度尺度和(或)非常短的时间段时,局部平衡假设可能是不适当的。短激光脉冲与材料间的相互作用就是一个例子。根据激光的类型不同,脉冲持续时间或者宽度能够从几十纳秒减少到几个飞秒(1fs=10⁻¹⁵s)。在超快激光脉冲与金属相互作用的情况下,金属的自由电子能够迅速获取能量以达到对应于几千开尔文有效温度的激发态,而同时晶格仍保持在室温状态。经过一个以电子弛豫时间为代表的时间推移之后,电子的过剩能量将被传递给声子,它是晶格振动产生的能量子,从而产生一种辐射条件下升高物质温度或者带来物质相变的热效应。

当物理尺寸缩小时,或者当激发和探测时间减少时,其他的机制也可能影响系统的特性。从宏观观测中发展而来的按比例缩小的理论,往往被证明是不适合应用于涉及微纳尺度的现象的。例如,由于边界散射(尺寸效应)而使得薄膜或细导线的导电性降低、微流体中不连续的速度和温度边界、薄膜中波的干涉、电子和光子穿过狭窄能隙时的隧穿等。在量子

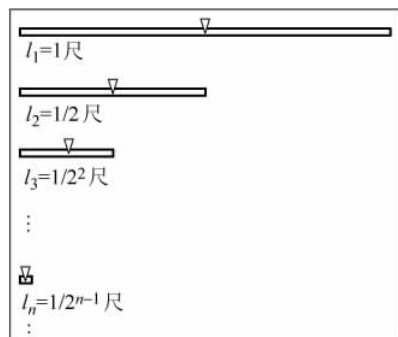


图 1.1 木棍的长度: 第一天 $l_1 = 1$ 尺, 第二天 $l_2 = 1/2$ 尺, ..., 第 n 天 $l_n = 1/2^{n-1}$ 尺

极限中,纳米线的热传导性将达到一个与材料构成无关的极限值。在纳米尺度内,两表面间的辐射换热量可能会超过由斯特藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律计算所得结果的好几个数量级。微型化的另一个效应是表面力(如剪切力)将随着 L^2 的减小而减小,而体积力(如浮力)则随着 L^3 的减小而减小,其中 L 为特征长度。这将使得在微尺度下表面力比体积力占主导地位。

1.2 长度尺度

比较不同现象和结构的长度尺度,尤其是相对于电磁波谱的波长,是非常有用的。图 1.2 对一些特征尺度与波长范围进行了比较。从图中可以看出,MEMS 通常产生从几毫米到几微米的微加工能力。目前,集成电路的最小尺寸远低于 100nm。薄膜的层厚范围从几纳米大到几微米。可见光的波长范围为 380~760nm。另外,热辐射的波长范围覆盖一部分紫外区域,整个可见光区和红外线区,以及一部分微波区域。人类头发的厚度为 50~100 μm ,而红细胞的直径为 6~8 μm 。一个典型的光学显微镜能够放大 100 倍,但受限于光的衍射,其分辨率为 200~300nm,大约是可见光波长的一半。因此,一般光学显微镜常用来研究微米尺寸大小的物体。另一方面,原子和分子都处在 1nm 的数量级,处于 X 射线和电子束的波长范围内。因此,X 射线和电子显微镜通常被用来确定晶体结构和缺陷,以及纳米结构成像。随着 20 世纪 80 年代扫描探针显微镜(SPM)和近场扫描光学显微镜(NSOM)的发展,对纳米结构的可视化和操作处理具有了前所未有的能力,如在 1.3.4 节中讨论的纳米线、纳米管、纳米晶体、单个分子和单个原子等。图 1.2 也说明热载流子(如气体中的分子、金属中的自由电子、电介质固体中的声子或晶格振动)的平均自由程一般在微米到纳米尺度范围内,其取决于材料、温度和载流子的类型。

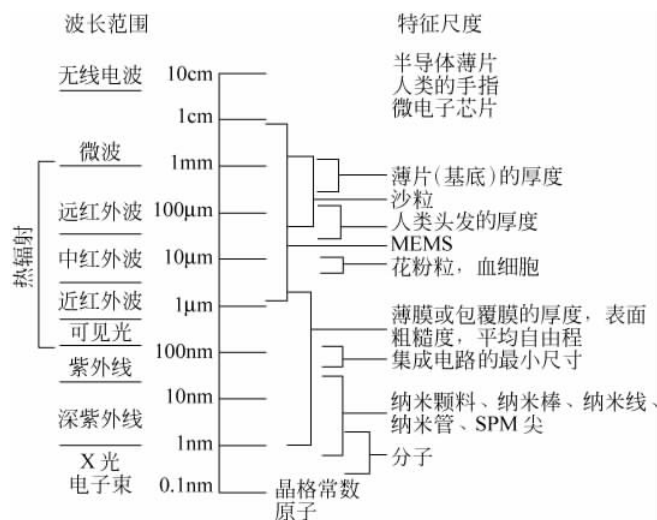


图 1.2 电磁波谱内不同波长范围相应的一些特征长度尺度比较

本书的目的是满足理解发生在微纳系统中非常短的时间尺度内的热现象和传热过程的需求,以解决现在和未来技术中出现的问题。下一节中将给出现代科学和技术发展的简要

历史回顾,特别是专注于导致纳米技术的最近的技术进步。并对热能工程在整个技术进步中的作用进行了概述。

1.3 从古代哲学到现代技术

尝试了解宇宙万物的基本组成,万物在时间和空间中的运动以及彼此之间的相互作用,是人类的好奇心和内在推动力,这使得人类有别于地球上的其他生物。古代中国人认为世间万物都是由五种基本元素组成的:金、木、水、火、土,这五种元素按照一定的规则和时序相生相克。这些简单的信念不单单只是用来占卜,而且促进了传统中医、音乐、军事战略、天文以及历法等的发展。在古希腊,人们认为世间万物都存在于四种元素(火、土、空气和水)之中,世间万物组成了这四种元素。这些古典的元素理论在一些不同的国家以不同的说法盛行了 2000 多年,直到 200 年前约翰·道尔顿(John Dalton)关于气体实验的现代原子理论的建立。1811 年,意大利化学家阿伏伽德罗(Amedeo Avogadro)引入了分子的概念,分子由原子的稳定系统或束缚态组成。分子是保持一个纯物质的化学特性和其组成的最小粒子。俄国化学家门捷列夫(Dmitri Mendeleev)于 1869 年提出了第一张元素周期表。虽然“原子”在希腊语中最原始的意思是“不可分割的”,但此后亚原子粒子已经被发现。约瑟夫·约翰·汤姆森(J. J. Thomson)在 1897 年发现了亚原子粒子的电子,他获得了 1906 年诺贝尔物理学奖。原子是迄今为止已知的 116 种元素中的最小单位。

第一次工业革命开始于 18 世纪后期,通过机床和纺织制造业的引入,促进了西方国家的经济从手工劳动跨入机器时代的巨大发展。19 世纪中期,随着蒸汽机的发明,通过蒸汽动力轮船和火车的发展,以及内燃机和电力的生产,第二次工业革命对人类社会产生了更大的影响。牛顿力学和经典热力学在工业革命中发挥了不可或缺的作用。机械的发展和人们对于物质组成的认识,使得对物理现象的实验研究达到了前所未有的精度,从而促成了 20 世纪初期现代物理学的建立。

光的本质一直备受争议。18 世纪之交,艾萨克·牛顿(Isaac Newton)提出了光的微粒说,并用他的棱镜观察到了太阳光是由不同的颜色组成的。19 世纪初,红外和紫外辐射的发现及杨氏(Young)双缝实验证实了惠更斯(Huygens)的波动理论,而波动论被牛顿的粒子论遮蔽了 100 多年。19 世纪末,随着全面描述电磁波的麦克斯韦(Maxwell)方程的建立和迈克尔逊(Michelson)干涉实验的进行,辐射的波动理论已被广泛接受。虽然光的波动理论能够很好地解释大多数观察到的现象,但是它不能解释宽频谱范围的热发射,也不能解释光电效应。1901 年,马克斯·普朗克(Max Planck)基于光或辐射量子或振子的假说,成功推导出黑体光谱分布函数。1905 年,阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)在辐射量子概念的基础上成功解释了光电效应。为了从金属表面激发出电子,每束入射辐射量子的能量($h\nu$)必须足够地大,因为一个电子只能吸收一个量子。这就解释了为什么在频率低于临界值时,无论入射光的强度有多大,光电效应都不会发生。这说明光不是无限可分的,而必须以被称为光子的最小的无质量的量子的倍数而存在。1924 年,德布罗意(Louis de Broglie)猜测粒子也可能表现出波的特性。电子衍射实验的结果表明:电子确实能够表现出波动性,其波长与动量成反比。电子显微镜就是基于电子衍射的原理。波粒二象性对于 20 世纪初期量子力学的建立不可或缺。量子力学描述发生在细微颗粒、结构及其与辐射相互作用

的现象,而经典的力学和电动力学对这些现象并不适用。在 20 世纪上半叶这些对基础科学的认识促进了现代技术的发展,使工业经济向知识型经济转变,从机器时代向信息时代转变。20 世纪后半叶主要的技术进步将在接下来的章节中进行介绍。

1.3.1 微电子与信息技术

克劳德·香农(Claude Shannon,1916—2001)在 1940 年麻省理工学院发表的硕士论文中使用了布尔运算,并演示了如何用“真”与“假”表示电子电路中的开关功能。20 世纪 40 年代,一些国家发明了数字计算机,其中包括高 2.4m、长 16m 的 IBM Mark I。1948 年,供职于贝尔实验室的香农发表了《通信的数学理论》一文,这标志着现代通信和信息技术的开始^[5]。在该文中,他提出了使用两个符号“1”和“0”作为信息底层通信的基本原则,并创造了二进制码的“位”。他的这一理论使得数字存储和图片、声音等的传输成为可能。

1947 年 12 月,威廉·肖克利(William Shockley),约翰·巴丁(John Bardeen)和沃尔特·布拉顿(Walter Brattain)三位科学家在贝尔实验室用锗发明了半导体点接触晶体管。早期的计算机和收音机都是使用会产生大量热量的笨重真空管。这三位科学家由于发明了这种晶体管而共同获得了 1956 年的诺贝尔物理学奖。为了使晶体管的制作成为可能,人们用原子理论和点接触机理对半导体物理学进行了深入的研究。晶体管的发明开创了一个拥有全新工业的信息时代。

1954 年,德州仪器厂(Texas Instruments)的戈登·蒂尔(Gordon Teal)建造了第一个硅晶体管。硅的自然氧化物表现出特别适合作电绝缘体。1958 年,德州仪器厂的杰克·基尔比(Jack Kilby,1923—2005)把分散的器件都嵌入到一个硅基座上,然后装到一个锗片上。第二年他提出了“微型电子电路”的专利申请,在专利中他描述了如何制作集成电路并用金线连接无源器件。与此同时,加利福尼亚的仙童电子公司(Fairchild Electronics)的罗伯特·诺伊斯(Robert Noyce)独立地发现了铝能够很好地粘附硅和硅的氧化物,并于 1959 年提出了“半导体器件和引脚结构”的专利申请。基尔比和诺伊斯被认为是集成电路的共同发明者。诺伊斯是英特尔(Intel)的联合创始人之一,逝世于 1990 年。基尔比因其“对集成电路发明的贡献”获得了 2000 年诺贝尔物理学奖的一半(见 http://nobelprize.org/nobel_prizes/)。由于若列斯·伊万诺维奇·阿尔费罗夫(Zhores Alferov)和赫伯特·克勒默(Herbert Kroemer)发展了用于光电子学的半导体异质结构,他们分享了当年另一半的诺贝尔物理学奖,下一节将对此进行讨论。

1965 年,大约 60 个晶体管可以组装到一个单一的硅芯片中。观察到集成电路的快速发展和未来潜力,英特尔的联合创始人之一戈登·摩尔(Gordon Moore)做出了一个著名的预测:半导体器件的数量和复杂性每年将增加一倍^[6]。这就是在微电子工业中著名的摩尔定律。19 世纪 70 年代中期,一个芯片上的晶体管数目从 60 个增加至 5000 个。到 1985 年,英特尔 386 处理器的一个芯片上有 25 万个晶体管。2001 年,奔腾(Pentium)4 处理器达到 4200 万个晶体管。到 2006 年,在每个芯片上的这个数字已经超过了 10 亿。将器件密度绘制在一个以时间为横轴的对数坐标系中时,其增长几乎是一条直线,这表明封装密度大约每 18 个月增加一倍^[6]。减小器件的大小和提高封装密度有很多优势。例如,通过减小晶体管间的距离可以增加处理器的速度。此外,新的性能特性可以加入到芯片中以提高其性能。达到相同性能的成本也随之降低。先进的超级计算机系统已经在微纳尺度现象的模拟和认

识中起到了决定性的作用。

这个过程首先是生成高品质的硅晶体,然后切割和抛光成晶片。器件通常制作在二氧化硅(SiO_2)层上,在能控制氧分压的炉中,通过加热晶片到足够高的温度使得二氧化硅层生长。然后用光刻和蚀刻相结合的技术使晶片成型。通过离子的注入和在热环境中退火,将施主和受主添加到晶片中以形成 n 型和 p 型区域。镀以适当的覆盖层和光刻图案后,金属或重掺杂多晶硅常用作栅极。一个金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)如图 1.3

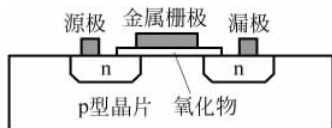


图 1.3 金属氧化物半导体场效应晶体管示意图

所示。通过最小特征长度小于 100nm 的超大规模集成电路(VLSI),可将数以百万计的晶体管以多层形式封装到 1mm^2 的区域内。如前所述,控制热耗散是一个巨大的挑战,尤其是当器件尺寸不断缩小时。10nm 大小的局部受热或热点可能会导致器件故障。在纳米尺度下控制传热的原理与在大尺度下有很大的不同。器件尺寸级别的热分析需要对声子传输有一个基本的了解。此外,还需要了解微流

体的传热特性,以确保在微纳尺度下器件的可靠冷却。进一步的讨论将在本书的后续章节给出。

如果没有材料科学技术的推动,如半导体制造中的晶体生长和热加工,以及沉积和光刻技术等,就不可能会有微电子技术的进步。在退火和氧化过程中,为了阻止离子深度扩散到晶片中,快速热处理(RTP)是必不可少的。快速热处理的热模拟必须综合考虑传导、对流和辐射传热模式。通常用光导管温度计来监测晶片温度。在快速热处理炉中,由晶片发射的热辐射经光导管收集,然后再传递给辐射计以推算出表面温度^[7]。在一些情况下,晶片表面是粗糙的并且呈现各向异性特性。因此,对各向异性的粗糙表面的光散射有一个更深入的了解是必要的。

根据半导体国际技术路线图,对一个用在高性能互补金属氧化物半导体(CMOS)技术中的 65nm 的器件,其栅长和结深分别为 25nm 和 13.8nm^[8]。随着离子注入到超浅结加工技术的发展,发出毫秒光脉冲的高强度氩(Ar)或氙(Xe)弧光灯被认为是适合的退火工具。因为光能在几毫秒内被吸收,热扩散不能将热量均匀地分布在晶片表面。因此,纳米图案晶片上温度的均匀性是一个关键问题。为了进一步减小特征尺寸,已经开发出深紫外光刻技术和 X 射线光刻技术。据预测,摩尔定律将在 2017 年达到它的极限,届时临界尺寸将会小于 10nm。由于栅极电介质和制造难度等问题,进一步缩减尺寸将面临严重障碍。除了量子计算的发展,采用自组装的分子纳米电子学被寻求作为一种替代方法。因此,纳米电子学和量子计算预计将会照亮电子和计算机科学的未来。

1.3.2 激光、光电子和纳米光子学

很难想象没有激光的现代技术将会是什么样子。不同类型的激光器被广泛应用于计量、微电子制造、制造业、医药和通信等行业。如激光打印机、激光条码阅读器、激光多普勒测速仪、激光加工及激光角膜手术对视力的矫正等。20 世纪 50 年代后期,冷战时期的美国和苏联分别独立提出了激光的概念。1964 年的诺贝尔物理学奖授予了在量子电子学领域做出重大贡献的查尔斯·汤斯(Charles Townes)、尼古拉·巴索夫(Nicolay Basov)和亚历山大·普罗霍罗夫(Aleksandr Prokhorov)。第一个投入应用的激光器是 1960 年休斯航空

公司的西奥多·梅曼(Theodore Maiman)制作的红宝石激光器。激光的原理可追溯到1917年,爱因斯坦完美地描述了原子受激辐射的构想。不同于热辐射和等离子发射,激光是相干光源,并且在光腔的辅助下,激光可以发射近乎单色光并且指向同一方向而且没有发散。激光使非线性光学成为一个分支学科,它对于理解光与物质的相互作用关系、通信以及光学计算非常重要。1981年,尼古拉斯·布隆伯根(Nicolaas Bloembergen)和阿瑟·肖洛(Arthur Schawlow)由于其在激光光谱研究方面的突出贡献而获得了诺贝尔物理学奖。非线性光谱技术多种多样,其中就包括Fan和Longtin综述过的拉曼光谱^[9]。双光子光谱学已经成为分子检测的一个重要工具^[10]。此外,用于微细加工的双光子三维光刻技术也已经得到了发展^[11]。

由于其极窄的线宽,气体激光器如氦-氖(He-Ne)(红色)和氩(Ar)(绿色)气体激光器已被广泛应用于精密定位、尺寸测量和激光多普勒测速等。另一方面,高功率钕:钇铝石榴石激光器(Nd:YAG)和二氧化碳激光器被用于热制造,其中的传热过程包括辐射、相变和传导^[12]。受激准分子激光器能够发射紫外波段纳秒脉冲,已广泛应用于材料加工、切除、眼外科手术、皮肤医学以及微电子和微加工中的光刻技术中。一般来说,采用一个固体激光器,如波长靠近 $1\mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光器,就能通过Q开关产生高能纳秒脉冲。在另一方面,锁模技术使脉冲宽度从皮秒降到几个飞秒。1985年就已经实现持续时间小于10飞秒的脉冲。超快激光使得反应动力学的研究成为可能,并形成了化学的一个分支:飞秒化学。加州理工学院(Caltech)的艾哈迈德·泽维尔(Ahmed Zewail)由于在该领域的开创性研究而获得了1999年的诺贝尔化学奖。2005年,约翰·霍尔(John Hall)和特奥多尔·亨施(Theodor Hänsch)由于提出了基于激光的精密光谱学,尤其是频梳技术而荣获了诺贝尔物理学奖。短脉冲激光能够促进制造业、非平衡过程中电子-声子相互作用研究、包含界面热阻的热特性测量、材料的无损检测等^[13-16]。

1970年5月,俄罗斯约费技术物理研究所(Ioffe Physical-Technical Institute)的若列斯·阿尔费罗夫(Zhores Alferov)及其同事实现了半导体激光器的室温连续工作。一个月后,贝尔实验室(Bell Lab)的Morton Panish和Izuo Hayashi也独立地实现了这一创举。阿尔费罗夫(Alferov)和赫伯特·克勒默(Herbert Kroemer)一起获得了2000年的诺贝尔物理学奖,后者在1963年就构思了双异质结激光器的想法,并且是分子束外延(MBE)的早期先驱之一。分子束外延技术是一个高真空沉积技术,能够以原子精度控制高纯度半导体薄膜的生长过程,该技术由贝尔实验室的Alfred Cho和John Arthur在1968年发明,并在20世纪70年代得到发展。异质结指的是两层具有不同带隙的半导体材料,如GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结。在双异质结结构中,一个较低带隙层夹在两个较高带隙层之间^[17]。当中间层足够薄,薄到几纳米的数量级时,由于分立的能级和态密度的增强,这种结构被称为量子阱。若施以较小的驱动电流,量子阱激光器会有更好的性能。由周期性的结构组成的多量子阱(MQW),也称为超晶格,也能被用来进一步提高性能。在一个激光装置中,需要有一个光腔来限定激光带宽,同时在需要的波长以较窄的线宽增加强度。分布式布拉格反射器(DBR)用在量子阱的两端(活动区)。DBR是由不同折射率的周期性电介质层制成的最简单的光子晶体;其每一层的厚度都等于该介质内波长的 $1/4(\lambda/n)$ 。除了共振波长 λ 的光最终从光腔中逃逸外,DBR是反射率接近100%的介质镜。图1.4显示了垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的原理,其中激光通过衬底(结构的底部)发射。能量通过声子波和电子波传

递的机理已经得到了广泛的研究^[18]。量子线和量子点(QD)的使用已经使得激光的效率和波长的控制得到进一步的提高^[17]。

半导体激光器是最受欢迎的激光器(从数量方面来说),每年都有数百万套售出。其应用包括CD/DVD读取/写入、光学通信、激光教鞭、激光打印机、条形码阅读器等。一种较简单的器件是发光二极管(LED),它用一个两层pn结发射非相干光,不含分布式布拉格反射器。发光二极管已被用于照明,包括效率明显提高的交通信号灯和装饰灯。宽带隙材料的发展,如通过有机金属化学气相沉积(MOCVD)外延生长出的氮化镓(GaN)和氮化铝(AlN),使得LED和半导体激光器波长可以拓展到蓝光和紫外区。基于电致发光的有机发光二极管(OLED)有望成为下一代计算机和电视显示器候选器件。

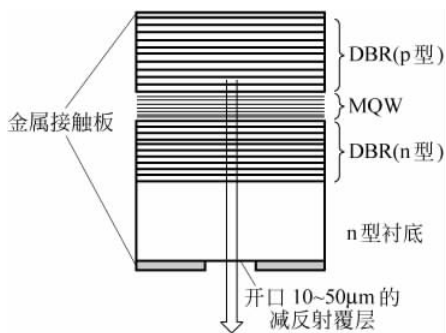


图 1.4 一个由量子阱异质结构制成的 VCSEL 激光器原理图。较小的层厚为 3nm, 像这样的结构层可达数百层

随着光源的发展,光电探测器得到了持续不断的发展和提高,主要是在焦平面阵列、电荷耦合器(CCD)、量子阱探测器、读出电子学、数据传输和处理、紧凑型制冷和温度控制等方面。另一方面,光纤正在成为电信和计算机网络中一个至关重要和快速增长的技术。随着半导体激光器的发展,20世纪70年代发展了用于通信的光纤技术。1978年,日本电报电话公司(NTT)展示了一种以32Mbps(百万比特每秒)的速率传输53km的波长为 $1.3\mu\text{m}$ 的梯度折射率光纤。到2001年为止,全世界已安装了 $3\times 10^{11}\text{m}$ 的光纤电缆,相当于从地球到太阳一个来回的长度。2006年3月,NEC公司宣布将建造一个40Gbps的光纤传输系统。光纤也被广泛应用于生物探测传感器以及温度和压力测量传感器。光纤拉丝过程涉及在不同尺度和温度下的复杂的传热和流体动力学问题^[19]。

纳米光子学是一个光子学与物理、化学、生物学、材料科学、制造和纳米技术集成的新兴前沿学科。纳米光子学的基础是研究光与物质之间的相互作用,探索利用光能的纳米结构的独特特性,并开发新的纳米加工技术和传感技术。最近的研究主要集中于光子晶体、纳米晶体、等离子体波导、纳米加工和纳米光刻技术、光与有机材料的相互作用、生物光子学、生物传感器、量子电动力学、纳米腔、量子点和量子线激光器、太阳能电池等。读者可参考Prasad^[20]综述最新进展的进一步探讨。在热辐射领域,纳米尺度的辐射传递和特性已经成为一个活跃的研究领域,而且《Journal of Heat Transfer》的一期特刊专门讨论了这一令人激动的领域^[21]。

1.3.3 微加工和纳米加工

作为那个时代最好的理论物理学家之一,诺贝尔物理学奖获得者理查德·费曼(Richard Feynman)于1959年12月在加州理工学院发表了一个题为《底部有充足的空间》的富有远见的演讲。当时激光还没有出现,集成电路也才刚刚被发明且尚未得到实际应用,单个计算机也还没有现在的手持计算器的计算速度快,但却占据整个教室,并产生大量的热。费曼设想未来人们能够在很小尺度下控制和操作事物,如在一个针头上书写(用电子

束)全部 24 册的《大英百科全书》,以及对原子依次进行重新排列^[22]。费曼预言的许多事物都曾被认为科幻小说或者笑话,但现在都得到了实现,尤其是从 20 世纪 80 年代开始。1983 年,费曼再次做了一个关于微型游泳机器作为医疗器件的讲座:你能吞下的外科医生及量子计算^[22]。在 20 世纪 90 年代,微机械和 MEMS 成为一个活跃的研究领域,并随着汽车安全气囊中的微机械加速计的商业化而取得了巨大的成功。利用蚀刻和光刻技术,工程师们能够制造出带有运动部件的微型机械,图 1.5 为一个比人的头发横截面还小的齿轮。

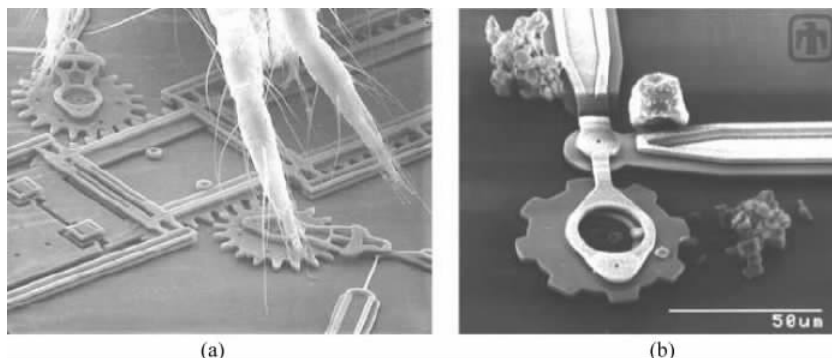


图 1.5 MEMS 结构

(a) 一个在微加工反射组件上的尘螨,图中的齿轮小于人类头发的厚度;(b) 联动驱动齿轮,其中血红细胞凝结在左上角和右下角,花粉粒在右上角(来自桑迪亚国家实验室, SUMMIT Technologies, www.mems.sandia.gov)

Madou 的书中对微细加工中使用的技术进行了广泛的讨论^[23]。这些 MEMS 器件后来发展为生物和医学诊断的工具,比如所谓的芯片上的实验室,带泵、阀和 $10\sim 100\mu\text{m}$ 尺度范围的分析单元。在航空航天工程中,一个应用是建造微型飞行器或微型飞行物,其尺寸范围从一只手掌到一只大黄蜂的大小,用于极端条件下的监视和侦察。微通道和微型热管也得到了发展,并进行了应用于电子冷却的测试。微流体的研究也成为机械工程中一个活跃的研究领域。SPM 和 MEMS 技术的发展,再加上材料自组装和其他技术的发展,使得更小结构和自下而上方法的纳米技术得到进一步发展。以激光为基础的制造业、聚焦离子束(FIB)以及电子束光刻技术的发展也促进了纳米制造的发展。在 NEMS 中,量子行为变得极为重要,并且量子力学在理解其行为方面的作用是不可或缺的。

罗伯特·柯尔(Robert Curl)、哈罗德·克罗托(Harold Kroto)和理查德·斯莫利(Richard Smalley)因 1985 年在莱斯大学(Rice University)发现了富勒烯而共同获得了 1996 年的诺贝尔化学奖,在此期间,萨塞克斯大学(University of Sussex)的克罗托在莱斯大学进行了访问。该小组用脉冲激光照射方法气化石墨,并在加压氦气流中形成碳等离子体。经飞行时间质谱仪的确认,表明形成了自组装的 C_{60} 分子,像一个足球那样,由 60 个由碳原子构成;详见 Kroto et al., *Nature*, 318, 162 (1985)。后来进一步证实, C_{60} 分子的直径实际上在 1nm 的数量级,并具有波粒二象性。这种碳的同素异形体被称为巴克敏斯特·富勒烯、富勒烯或布基球,以设计测量圆顶屋的著名建筑师巴克敏斯特·富勒(Buckminster Fuller, 1895—1983)的名字命名。1991 年, NEC 公司的饭岛澄男(Sumio Iijima)用电弧放电合成碳纳米管(CNT)。不久后,他的团队和 IBM 的一个团队都能够生产直径在 1nm 数

量级的单壁碳纳米管(SWNT)。关于与氢储存、纳米晶体管、场发射、光的发射和吸收、量子电导、纳米复合材料、高导热性相关的碳纳米管技术都已有深入的研究。图 1.6(a)显示的是室温环境下 CNT 在一个大约 $5\mu\text{m}$ 尺寸的加热悬臂梁针尖上通过化学气相沉积生长的情形^[24]。图 1.6(b)显示的是封装了钐(Gd)的金属富勒烯的合成单壁碳纳米管: C_{82} (即一个钐原子位于一个富勒烯分子内)。高分辨率透射电子显微镜(TEM)的影像表明: SWNT 的直径是 $1.4\sim 1.5\text{nm}$ ^[25]。需要指出的是: 电子显微镜, 包括扫描电镜(SEM)和透射电镜等, 已经成为微纳尺度下物体成像的强有力工具, 它们的放大倍数高达 200 万倍。第一台电子显微镜由德国的恩斯特·鲁斯卡(Ernst Ruska)和马克斯·克诺尔(Max Knoll)在 20 世纪 30 年代初发明, 正是由于对光电子学和显微镜的贡献, 鲁斯卡和克诺尔分享了 1986 年的诺贝尔物理学奖。

目前已经合成出各种各样的纳米结构材料, 如硅纳米线、砷化铟/砷化镓(InAs/GaAs)量子点和银(Ag)纳米棒。图 1.6(c)显示的是用气固法由氧化锌(ZnO)纳米带制成的纳米螺旋或纳米弹簧的图像^[26]。这些在受控条件下自组装的结构可能是研究作为传感器和执行器使用的电磁耦合纳米器件, 以及纳米尺度下生长动力学的基础。

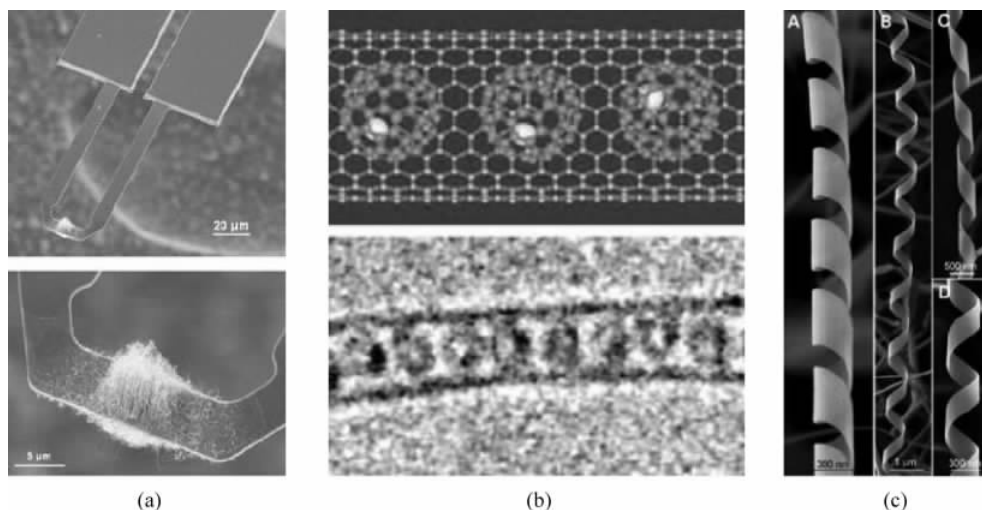


图 1.6 纳米结构的例子

(a) 碳纳米管在加热的悬臂梁针尖上生长的扫描隧道电镜(SEM)图像(转载经 Sunden 等^[24]允许, 美国物理研究所 2006 版权所有); (b) 在单壁碳纳米管内的布基球(下部的是 TEM 图像, 其中碳纳米管直径是 $1.4\sim 1.5\text{nm}$)(转载经 Hirahara 等^[25]允许, 美国物理学会 2000 版权所有); (c) 氧化锌纳米带卷成纳米螺旋结构或纳米弹簧的 TEM 图像[转载经 Gao 等^[26]允许, 美国科学促进会 2005 版权所有(图片来源: Z. L. Wang 教授, 佐治亚理工学院)]

在量子力学领域成功运用的技术之一是巨阻磁头(GMR)和硬盘驱动器。GMR 磁头是基于铁磁性层被一层极薄(大约 1nm)的非磁性层间隔的原理, 如 Fe/Cr/Fe 和 Co/Cu/Co。MBE 能使金属薄膜按照所需精度和质量要求生长。GMR 材料的电阻主要取决于外加磁场, 它可以影响电子的自旋状态。大约在原始研究结果发表仅十年之后, IBM 在 1996 年首次推出这项技术; 详见 Grünberg et al., Phys. Rev. Lett., 57, 2442 (1986); Baibich et al., Phys. Rev. Lett., 61, 2472 (1988)。GMR 材料已被广泛应用于计算机硬盘驱动器和