

第 1 章 绪论

【概述】

本章主要介绍纳米技术的起源和发展,纳米技术的基本概念,量子物理的起源和发展,量子物理研究的基本内容,以及纳米电子学的诞生背景和纳米电子学的基本概念。使读者了解纳米技术的发展历史,掌握纳米技术的基本概念,了解量子物理研究的基本内容,掌握纳米电子学的基本概念。

【重点与难点】

重点:掌握纳米尺度的概念和范围,理解波粒二象性的概念。

难点:量子物理研究的基本内容和基本原理。

【知识正文】

1.1 知识点详解

在历史的长河中,人类对于微观世界的探索从来都没有停息。从最初的希腊哲学家德谟克利特提出原子论的思想,到波尔的原子轨道模型;从精细微小的微雕技术,到集成电路的光刻工艺,都展示了人类对于微观世界的理论思考和技术应用在不断地更新和发展,而这样的探索还远远没有结束。量子物理学的发展推翻了经典物理学的统治地位,但经过了百余年的发展,在物质本源的问题上却越发“迷茫”,对于物质基本微粒的实验性探索和弦理论的提出,能够横跨宏观和微观世界的统一理论还未见踪影。而在工程技术方面,10nm 以下关键尺寸极限的突破,需要下一代的光刻技术的成熟。因此,纳米理论技术的发展还有很长的路要走。

纳米世界距离我们并不遥远,它一直存在于我们身边的大自然之中。

壁虎神奇的爬墙功自古以来就吸引了人们的注意,与蟑螂、蚂蚁等昆虫不同,后者的爬行机制是用脚毛卡进有微小凹凸不平的表面,如同细针卡进小缝一般,从而支撑身体的重量,一旦遇到光滑无缝的表面,这种方法就无能为力了。壁虎却可以在光滑的垂直表面,甚至是水中或真空中等任何特殊表面爬行,这是因为它的脚底存在一种特殊的纳米结构,使它轻而易举地做到“飞檐走壁”。

壁虎的脚趾头表面是由细小的刚毛构成薄片状的结构,每一支刚毛约 130 微米长,直径为 20~200 微米,每平方米约有 5000 支刚毛。而每支刚毛的末端都会分岔出约 1000 支纳米等级甚至更细小的细柄,直径在 200~500 纳米之间,而每一个细柄的末端都有一个圆盘一样的结构。因为这些细柄和圆盘是如此之小,因此可以非常地贴近物体的表面,贴近到两者的分子之间可以产生弱相互作用的地步,这种弱相互作用被称为“范德华力”。尽管每个壁虎脚上刚毛分子和墙面物质分子之间的范德华力十分微弱,但数以千万计的分子之间将产生足够大的吸引力来支撑壁虎的重量,实际上这个数值远远不止于此。科学家的研究显示,一只 150 克重的大壁虎(英文俗称 Tokay Gecko)所能产生的黏着力高达 40 千克,是其体重的 200 多倍。这也说明了壁虎为何只要轻松地将脚掌触碰墙面就能提供快速敏捷运动所需的支撑力,因为壁虎只需要有 1% 的细柄触碰墙面即足以支撑本体产生适当的运动。至于超强的黏着力为什么没有将壁虎“粘住”,是因为这种黏着力是具有“指向性”的,就好比一段粘在墙上的胶带,如果直接将胶带以平行于墙面的力量拉动将会非常不容易,但是如果拉起一端,沿着分离面撕下胶带就会非常轻松。壁虎的刚毛也具有这种非对称的指向性黏着,使它能够而在墙面上自如地行动。

荷叶不沾水,因为荷叶上有纳米尺度的绒毛。通过电子显微镜,人们观察到荷叶表面覆盖着无数尺寸约 10 微米的突包,而每个突包的表面又布满了直径约为几百纳米的更细的绒毛。这种特殊的纳米结构,使得荷叶表面不沾水滴。当荷叶上有水珠时,风吹动水珠在叶面上滚动,水珠可以粘起叶面上的灰尘,并从上面高速滑落,从而使得荷叶能够更好地进行光合作用。

除此之外,与荷叶类似,一些有翅昆虫(如蜻蜓、蜜蜂、蛾、蝴蝶、蝉、甲虫、蚊、蝇等)的翅膀表面也具有自清洁性,在它们的翅膀上分布有形状不同的微观结构,如蝉翼上均匀分布着纳米柱状结构,使其具有超疏水性,而达到自清洁目的,避免了空气中的水和灰尘等污染物的附着而影响飞行。

研究人员从自然界中荷叶的疏水表面获得灵感,在织物表面附着一层纳米材料,这些纳米粗糙表面形成一层永久性的空气层,从而实现了疏水的目的。同传统衣物相比,这种疏水衣物不沾水且易于清洗,但是纳米防水衣物如果出现磨损,会导致防水功能下降。比如市场上前几年就推出过一款纳米防水领带,但是并没有推广。

纳米科学是一门年轻的科学,近年来在各个领域都得到了迅速的发展,并衍生出很多分支科学,纳米电子学便是其中主要的一个分支。本章主要介绍纳米技术的起源和发展,量子物理理论的发展历史,并介绍纳米电子学产生的背景和原因。

1.1.1 纳米技术起源和发展

蝴蝶的翅膀为什么如此鲜艳?壁虎为什么可以在墙上行走?荷花为什么会“出淤泥而不染”?这些问题困扰了人类很长时间,却无法找到答案。我们身边的世界是一个奇异的世界,这些奇异现象的答案,隐藏于纳米世界之中。

纳米(nm),又称毫微米,是长度的度量单位,国际单位制符号为 nm。1 纳米=10⁻⁹米。1 纳米相当于 4 倍原子大小,比单个细菌的长度还要小得多。国际通用名称为 nanometer,简称为 nm。纳米是微观尺度的度量单位,通常所说的纳米尺度是指 1~100 纳米区间。而

这样微小的尺度与我们生活的宏观世界相去甚远,是人眼所无法分辨的。人类的头发丝直径约为 100 微米(μm),几乎是人类的视觉极限。而 1 微米仅为头发丝直径的百分之一,我们血液中的红细胞直径约为 7 微米。而 1 纳米只有 1 微米的千分之一,病毒细胞的直径约为 150 纳米,人类 DNA 链的宽度约为 2 纳米。这样的—个尺度空间时时刻刻都存在于我们身边,我们却无法触碰,但是随着纳米观测技术的发展,利用现代显微技术,人们已经可以观测到亚纳米级(原子级)的尺寸空间。

纳米技术是用单个原子、分子制造物质的科学技术。纳米科学技术是以许多现代先进科学技术为基础的科学,它是现代科学(混沌物理、量子力学、介观物理、分子生物学)和现代技术(计算机技术、微电子和扫描隧道显微镜技术、核分析技术)结合的产物,纳米科学技术又将引发一系列新的科学技术,例如纳米电子学、纳米材料学、纳米机械学等。

人类改变客观世界的探索往往存在于两个极端:极大和极小。一方面追求建造长城、金字塔等世界最大的建筑;另一方面却追求最精细的加工技术。微雕艺术是中国传统工艺美术中最为精细微小的一种工艺品,是集中国文化精华的袖珍艺术品。古文《核舟记》里描述了一艘用桃核雕刻的舟,窗子可以开合,上面居然还写着“山高月小,水落石出”八个字,令人叹为观止。这艘船的最小部件只有 0.1 mm(毫米),即 100 μm (微米)。这代表了明代微雕加工的最高技术水平。而现代象牙微雕,据说小如米粒,竟能刻下《唐诗三百首》全文,粗略估算一下,在 1 mm \times 2 mm 的面积上刻两万字,每个字的面积只有 10 $\mu\text{m}\times$ 10 μm 。这可能是人类手工雕刻极限。

然而,人类对于制造极小产品的追求不会因为人体条件的制约而停止,手工无法做到的工作,可以由机器帮助完成。随着半导体技术的兴起,半导体制造中光刻技术的发展,将人类的“雕刻”尺寸极限扩展到了纳米领域。机器“光刀”的雕刻水平已经远远超过了现代微雕,通过光刻技术,可以将一整座图书馆里所有图书里面的文字全部都刻在一根针的针尖上。每一个字的大小只有几个纳米。这使象牙微雕技术看起来像一个老古董。

纳米技术的起源目前公认来自诺贝尔奖得主理查德·费恩曼于 1959 年在美国物理学年会上所做的一次题为《在底部还有很大空间》的演讲。他提出了一个令世人震惊的想法:从人类石器时代开始,人类所进行的物质加工技术,无论是铁杵磨成针还是高科技的芯片加工技术,都是自顶向下的加工方式,即:去除多余的材料,留下需要的结构。为什么我们不能从另外一个方向出发,从单个分子甚至原子出发,用大量的分子或原子组装成我们需要的结构,这便是著名的自底向上的制造思想,这可以说是最早的纳米科学技术的思想来源,是纳米技术的起源。这个想法颠覆了人类千年的制造思维,这种制造方法无疑将更加精确,更加有效,虽然在当时的技术条件下无法实现,但它却指明了纳米制造技术的发展方向,在接下来的几十年间,纳米技术取得了巨大的进展。

1959 年之后,对于纳米理论的研究取得了一些成果,日本科学家 Kubo 提出了久保理论,即量子限制理论,解释了金属纳米粒子能量不连续的现象;Tsu 和 Esaki 开始了半导体量子器件输运理论的研究,提出了有限超晶格中的隧穿效应。这些理论方面的开拓为纳米技术的发展提供了基础,但在纳米制造技术方面始终停滞不前,在近 20 年的时间里没有发生革命性的进展。根本性的原因是没有任何工具可以对纳米尺度空间进行探索,因此更谈不上操纵原子分子来组装成我们需要的结构。然而这一切在 1981 年迎来了革命性的

突破。

1981年,IBM公司的G. Binnig和H. Rohrer发明了扫描隧道电子显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM),人类首次“看”到了纳米尺度的空间,这是到目前为止,表面分析最精密的仪器,分辨率可以达到 0.01nm ,使人类首次在大气及常温下观测到了原子。其发明者获得了1984年的诺贝尔物理学奖。

扫描隧道电子显微镜不仅仅是一双观察纳米世界的“眼睛”,同时它还是可以操纵纳米级微粒的“双手”。它能够实现原子级的搬运,1989年,IBM公司利用扫描隧道电子显微镜在镍材料表面移动36个氙原子排列出世界上最小的商标“IBM”。这张照片被刊登在《时代》周刊上,被称为最了不起的公司广告。其中每个字母高5纳米,氙原子间最短距离约为1纳米。扫描隧道电子显微镜移动原子的原理是使用显微镜探针针尖对准选中的氙原子,使针尖接近氙原子,当针尖和氙原子间的作用力达到能够使原子移动,即可以用这种方法排列密集的氙原子链形成图形。中国在扫描隧道电子显微技术方面紧随其后,技术水平较高。1993年中科院北京真空物理实验室操纵原子成功写出了“中国”两个字,开辟了中国原子操纵的先河。

扫描隧道电子显微镜搬运原子的功能实际上已经实现了理查德·费恩曼于1959年提出的设想,人类已经可以操纵原子组成微观的纳米结构,自底向上的制造思想已经实现。扫描隧道电子显微镜在原子及纳米尺度的观察和加工领域显示了巨大的威力,它是纳米技术发展中里程碑式的突破。

1996年,IBM公司瑞士苏黎世的研究所研制出世界上最小的算盘。算盘框架是刻蚀而成的铜槽和铜脊,算珠是60个碳原子构成的球状分子 C_{60} ,也就是巴基球。这样的算盘十分的微小,一个算珠的大小只有不到1纳米。整个算盘的长度也只有10纳米左右。如此之小的算珠只能使用扫描隧道显微镜来进行移动。

这样微小的算盘有什么用处呢?它可能带来的是存储和计算方面的革命。试想这样一个算盘可以存储的数据量和其所占据空间的比例,对比目前我们计算机中存储器存储数据容量与存储器空间的比例。就会发现如果纳米算盘的原理用于存储器的话,相同大小存储器容量的提升是天翻地覆的,理论上是常规存储器容量的10亿倍。另外随着生物技术、脑科学的发展,在算盘驱动方面寻找其他的量子驱动方式,可以试想未来将纳米算盘植入大脑,与脑神经联通,用思维控制拨珠运动进行运算。这样的应用无疑更加带有科幻色彩。

1.1.2 量子物理发展

量子力学是近代物理学的重要组成部分,它是研究微观粒子(分子、原子、原子核、基本粒子等)运动规律的一种基础理论。它是20世纪20年代在总结大量实验事实和旧量子论的基础上建立起来的。它的发展曾经引起物理思想上的巨大变革,它产生的影响,绝不局限于物理学和化学这两门学科,而且还涉及人类认识本身的种种基本问题。因此对它的发展史进行研究有着特别重要的意义。

由于人们在16、17世纪对机械运动的基本规律已有了比较系统、完整的了解,经过伽利略、牛顿等科学家进行科学实验和推理,从而产生了物理学。到了18世纪,物理学迅速地向前发展,以牛顿力学为基础,先后形成了热学和分子运动论、电磁学理论。到了19世纪中

期,形成了完整的、系统的经典物理学理论体系。运用这种经典理论,人们成功地解释了许多物理现象,解决了不少生产实际问题。由于经典物理学在发展过程中几乎没有遇到什么重大难题,因而当时有许多物理学家错误地认为经典物理学理论是物理学的“最终理论”,往后没有什么重大的工作可做了,只是解一下微分方程和对具体问题解释。但是,也就是在物理学家举杯庆贺经典物理学取得辉煌成就的时候,在经典物理学晴朗的天空中,不断出现了几朵“乌云”——经典理论无法解释的实验事实。其中最著名的是开尔文称之为“第一号乌云”的迈克尔逊-莫雷实验与“第二号乌云”的黑体辐射实验,此外还有光电效应实验和原子光谱的实验规律等。当时大多数物理学家都希望并且相信,能用经典物理学理论驱散这些“乌云”。结果发现上述的实验事实,用经典物理学理论无法解释,号称“完美无缺”的经典物理学开始破产,人们在对“第一号乌云”的研究中,引出了狭义相对论,而在对“第二号乌云”的研究中,引出了量子理论。

光的本质到底是粒子还是波?这个问题困扰了物理学家相当长的一段时期。最早关于光的较完备的理论是由惠更斯提出的,他认为光是一种波。由他的理论可以推出光的折射定律和反射定律。但是对于为什么光遇到孔隙后会改变方向(即衍射性质)的问题他并不能解释。此后,牛顿提出微粒说,认为光是一种粒子,遵循运动定律,这可以合理解释光的直线移动和反射性质。但是,对于光的折射与衍射性质,牛顿的解释并不很令人满意。但是由于牛顿无与伦比的学术地位,他的粒子理论在一个多世纪内无人敢于挑战,而惠更斯的理论则渐渐为人淡忘。直到19世纪初衍射现象被发现,光的波动理论才重新得到承认。而光的波动性与粒子性的争论从未平息。

19世纪早期,托马斯·杨和奥古斯丁·菲涅耳分别做出重大贡献。托马斯·杨完成的双缝实验显示,衍射光波遵守叠加原理,这是牛顿的光微粒说无法预测的一种波动行为。这个实验确切地证实了光的波动性质。奥古斯丁·菲涅耳提出惠更斯-菲涅耳原理,在惠更斯原理的基础上假定次波与次波之间会彼此发生干涉,又假定次波的波幅与方向有关。惠更斯-菲涅耳原理能够解释光波的朝前方传播与衍射现象。光波动说并没有立刻取代光微粒说。但是,到了19世纪中期,光波动说开始主导科学思潮,因为它能够说明偏振现象的机制,这是光微粒说所不能够的。

19世纪后期,詹姆斯·麦克斯韦将电磁学的理论加以整合,提出麦克斯韦方程组。这个方程组能够分析电磁学的种种现象。从这个方程组,他推导出电磁波方程。应用电磁波方程计算获得的电磁波波速等于在实验中测量到的光波速度。麦克斯韦于是猜测光波就是电磁波。电磁学和光学因此联结成统一理论。1888年,海因里希·赫兹做实验发射并接收到麦克斯韦预言的电磁波,证实麦克斯韦的猜测正确无误。从这时起,光波动说开始被广泛认可。然而又经过普朗克的黑体辐射问题,和爱因斯坦的光电效应问题后,粒子性与波动性之争又再次出现了反转。最终,物理学家不得不承认光同时具有波和粒子的性质。

黑体辐射问题可以认为是量子物理学的开端,普朗克对黑体辐射的研究引出了普朗克常量这一量子物理学中最重要的常量。人们从日常经验知道,一个物体(固体或液体)温度升高时,会向四周放射热量,这种现象叫做“热辐射”。在19世纪后半期,由于热机广泛使用,电照明的需要和冶金技术的变革,引起了热辐射的研究,发现了绝对黑体(置于温度恒定的热槽中的开有一个小孔的金属封闭空腔)辐射能量随波长而变化的实验曲线(图1.1)。在

这个实验曲线面前,为了解答辐射能量分布随不同的波长而异,许多物理学家都力图从经典物理学理论出发推导出黑体辐射的具体能谱分布公式,维恩、瑞利、金斯等就是其中的几个。1893年,德国物理学家维恩应用经典物理学的热学理论创立了一种黑体辐射能量的理论,他所提出的公式可以较准确地描述辐射能量在光谱紫端的分布情况,但不适用于波长较大的红端。另一方面,英国物理学家瑞利和金斯根据经典电磁理论和经典统计理论的能量均分定理,研究出了能够描述光谱红端的辐射能量分布的方程,但却完全不适用于紫端。总之,当时根据经典物理学创立的最好理论只能解释光谱的这一半或那一半的能量分布情况,而无法同时适用于整个光谱。这些理论在解释黑体辐射能谱问题上的失败,便开始动摇了人们对经典物理学的迷信,迫使人们不得不提出一些新的假设。

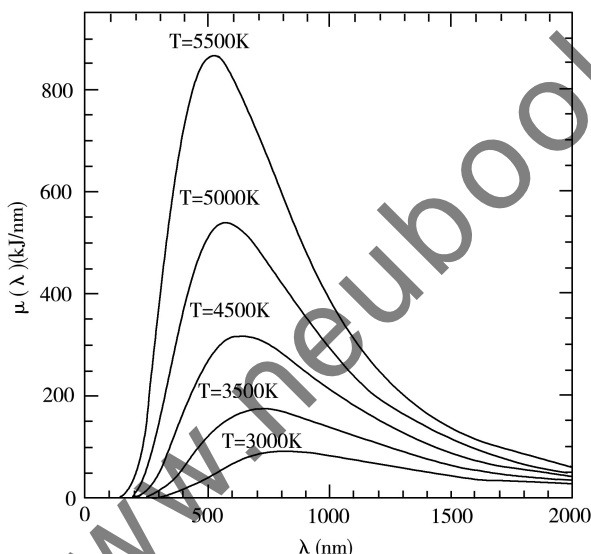


图 1.1 不同温度下黑体辐射的电磁波谱

德国物理学家普朗克在 1900 年解决了这个问题。他首先改进维恩公式,整合实验数据,得出了一个关于黑体辐射能量分布的公式,这个公式与实验曲线符合得非常好,人们称它为普朗克公式。为了给他的公式找出理论根据,普朗克认为空腔壁是由许多带电的谐振子所组成,并认为频率为 ν 的辐射(即电磁波),是由频率为 ν 的谐振子吸收和发射的。他还抛弃了经典物理学关于物质运动绝对连续的观念,做出了一个大胆而有决定意义的假设。提出振子发射或吸收辐射的过程是不连续的,所辐射出来的能量是一份份的,而不是连续的。每一个辐射对应于一份能量,并用 $E=h\nu$ 来表示($h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$,是普朗克常数),他把辐射的能量单位 $h\nu$ 称为量子。普朗克“量子”的假设的深远意义不仅是解决了黑体辐射问题,更重要的是,它第一次揭示了微观物体与宏观物体有着根本不同的性质。

经典物理认为能量分布是连续的,这种想法理所当然的存在了上千年。而在黑体辐射公式的推导上遇到了巨大难题。维恩的公式在波长比较短、温度比较低的时候才与实验数据相符,而瑞利-金斯公式则恰恰相反,在短波区域内出现极大的偏差,当时被称作紫外灾难。这种情况催生了普朗克的量子理论,而普朗克最初的解决办法却是运用纯数学公式上的技巧,得到了两全其美的解决公式,而对于公式的物理意义,在很长时间内,普朗克本人也

并不清楚。而基于这个公式进一步思考,却得出了令普朗克本人都犹豫不决、不敢相信的革命性的结果:能量的分布并不是连续的而是一份一份的。这个结果颠覆了经典物理学的根基,催生出了量子物理。

把量子概念完全解释清楚的是爱因斯坦。在19世纪80年代发现了“光电效应”,所谓光电效应,就是用紫外光照射金属时,会有电子从金属表面逸出。逸出的电子称为“光电子”。在这个效应中,人们发现光电子的能量与光的强度无关,而与光的频率有关。光的强度只影响光电子数目的多少。当时,根据经典电磁理论,认为光是一种电磁波,当用这种观点去解释光电效应时,却产生了严重的困难。按照光的波动观点,当光波照射到金属上时,会引起金属中电子的强迫振动,随着光波振幅的增大,电子振动的振幅也会逐渐增大。增大到一定程度后,就会使一些有足够能量的电子脱离金属,成为光电子。由于波动强度与振幅的平方成正比,于是必然有:照射光的强度愈大,光电子的能量也愈大。这样,经典物理学的理论与实验事实又发生了矛盾。为了从理论上正确地解释光电效应,1905年,爱因斯坦在普朗克量子假设的启示下,产生了一个崭新的想法:提出了能量的不连续性表明电磁辐射有粒子结构。他认为光不仅是一种波动,而且是一种粒子流。这些粒子称为“光量子”或“光子”,在频率为 ν 的光子流中,每一个光子的能量都与频率成正比,亦即每个光子的能量都是 ν 。应用爱因斯坦的光子假说就能圆满地解释光电效应。因为频率越高,光子的能量越大,从金属中打出的电子能量也大;频率越低,光子的能量小,就打不出电子来。增加光的强度,就是增加光子的数目,其结果只能增加光电子的数目。

爱因斯坦的光量子假设,第一次揭示了光的微粒性。但真正证实光的微粒性的实验是康普顿在1922年所做的X射线散射实验。康普顿发现,被原子中电子散射后的射线的波长大于入射时的波长。而光的波动观点不能解释波长改变的现象。只有把X射线看作是具有一定能量 E 、动量 P 的光子和静止的电子发生弹性碰撞,才能解释散射后波长的改变。这就十分鲜明地揭示了光的粒子性。尽管黑体辐射、光电效应和康普顿效应揭示了光的微粒性,但不能因此否定光的波动性。因此,最终人们不得不接受光具有波动和粒子的双重性质。人们称为光的“波粒二象性”。正是这种光的波粒二象性,对后来量子力学的建立起到了重要的作用。

直到今天,物理学家们对于光的粒子性和波动性的探索还在继续,最近,刊于《科学》杂志上的两组独立研究,利用不同的方法对光从波形态向粒子态的转变进行了测定,以揭示光的本质面貌。两组研究都来源于理论物理学家约翰·惠勒于20世纪80年代进行的经典实验。惠勒的实验提出,观察光子时应用的方法,将最终决定光子的行为是像粒子还是像波。

布里斯托大学量子光子学中心的研究员阿尔贝托·佩鲁佐带领下的一个由物理学家和量子理论物理学家组成的团队,根据惠勒的实验设计了新的方法,以同时观测光的粒子性和波动性。他们利用光分离器使一个光子纠缠另一个光子。通过对第二个光子的测定,来决定对第一个光子的测定方法。这一过程使研究者得以探索光从波的形式向粒子态转变的过程。

这种测量装置检测到强烈的非定域性,证实了实验中光子同时表现得既像一种波又像粒子,这对光或者是波形态,或者是粒子态的模型是非常有力的反驳。

尼斯大学国家科学研究中心的弗洛里安·凯瑟利用纠缠光子对实现了惠勒的实验。一个光子通过干涉仪被探测到,使研究者能够测定第二个光子的状态,是像波的形式还是粒子形式,或者是二者之间。他们的实验也实现了光子从波的形式向粒子状态的连续转变。

另一方面,物理学家还对原子的结构进行了一系列的探索。1897年,英国物理学家汤姆逊发现了比原子更小的粒子——电子。为建立原子结构做出了重大的贡献。1910年,卢瑟福和他的学生利用 α 粒子进行原子散射实验,根据实验结果的分析,提出了原子的有核模型。卢瑟福原子模型认为原子像一个小太阳系一样,原子的中心有一个小而重的带正电的原子核,核外有若干电子绕核运动。虽然这是一个错误的模型,但对物质组成的探索起到了重要的作用。

卢瑟福原子模型建立后,人们使用经典力学和经典电磁学理论去解释一些原子现象时,遇到了很大的困难。例如,对于在原子核的电场力作用下作圆周运动的电子来说,经典物理学理论要求它辐射出电磁波来,而且要求这样辐射出来的电磁波的频率是连续变化的。按照经典物理学理论的要求,随着电子不断地辐射能量,它将愈来愈接近原子核,以致最后落在原子核上。这使原子变成一个不稳定的体系。但实际上自然界中的原子是十分稳定的。同时原子发射的光谱,即电磁波不是频率连续变化的连续光谱,而是分立的线状光谱。这些问题说明经典物理学在原子尺度空间已经不再适用。

为了克服这两个矛盾问题,丹麦物理学家玻尔于1913年提出了一个新的原子理论,他把普朗克和爱因斯坦的量子论应用到原子有核模型上,他从原子只发出特定频率的光这一事实,推测电子不能任意地改变轨道,只能处于某些特定的轨道上。同时和经典电磁理论相反,电子在这些轨道上即使做加速运动也不辐射能量。每个轨道具有相应的能量。玻尔把电子的这种被允许存在的轨道称为“定态”。玻尔计算出氢原子内电子的定态能量是不连续的。电子只能从一个轨道向另一个轨道运动,同时伴随能量的吸收和辐射,能量数值等同于轨道能量的差值。

玻尔的原子模型经过物理学家的证实和发展,由此,量子物理进入了高速发展的时期。为了解释原子的分立的线状光谱,需要假定原子具有分立的能级,即假设原子内电子运动的某种不连续性。可是电子作为一种粒子,本身不能提供运动能量不连续性的根据,要进一步发展理论,必须从电子运动本性的探索入手。1923年法国青年物理学家德布罗意第一个提出了这个想法,他大胆假定物质粒子也有波动性。

德布罗意是一名天才,他通过对量子问题的思考,在他的博士论文中大胆地提出了微观粒子也具有波动性的假设。1923年他向法国科学院首次提出这个假设。玻尔理论中的定态假设和量子化条件中出现的整数,还启示他考虑到原子内部实物物体的力学与某些波动现象之间的联系,因为在波动现象(如干涉、驻波)中都出现过整数数字,因此他设想原子内部是一稳定的驻波系统。在1923—1924年的论文中,德布罗意将他的这个设想应用到玻尔的原子的理论中去,并用位相波在闭合轨道上的驻波形式解释了玻尔的量子化条件。并提出应该用波函数来描述微观粒子的运动状态。

当时由于没有实验证据,德布罗意的思想未被认为有任何物理真实性。法国物理学家郎之万把德布罗意的工作告诉了爱因斯坦,引起了爱因斯坦的重视,他说:“德布罗意的工作给我留下了深刻的印象,一幅巨大帷幕的一角卷起来了。”爱因斯坦马上把这个新概念应用

到他对气体理论的研究上去(1925年),从而创建了从那时起就以玻色-爱因斯坦命名的统计理论,这样德布罗意的工作就广为传开,引起人们的注意。但是德布罗意假设正确与否,必须由实践来检验。1926年,爱尔兰索指出物质的波动性可像第一次测验X射线的波动性那样,就是让一束适当能量的电子投射到一块结晶固体上来测验。这种思想为美国的戴维逊与革末及英国的G. P. 汤姆逊所肯定。1927年戴维逊和革末所做的电子衍射实验(让电子束入射到镍单晶上,观察散射电子束的强度和散射角之间的关系)和G. P. 汤姆逊做的电子衍射实验(让电子束穿过多晶体粉末,观察衍射电子束的环状分布),都出乎意料地证实了德布罗意物质波的存在。所有实验结果都定性和定量地与德布罗意的预言符合得很好。

20世纪30年代以后,由实验进一步发现,不但电子,而且其他一切微观粒子,如中子、质子、中性原子等等都有衍射现象,也就是都有波动性,而且对实验数据的分析,都肯定了德布罗意假设的正确性。由此人们得出结论:自然界的一切微观粒子,不管它们的静止质量是否为零,都具有“波粒二象性”。这构成了新量子理论的基础。

1925年海森堡首先在旧量子论的基础上,凭借一己之力创建了矩阵力学,使用矩阵方程式来描述量子力学。接着在1925年,泡利用海森堡的矩阵力学解决了三方面的问题:(1)氢原子的能级;(2)用矩阵推导了斯塔克效应;(3)氢原子在既有电场又有磁场的情况下能级的移动。这就表明矩阵力学不仅解决了旧量子论的问题,而且解决了旧量子论不能解决的问题。与玻恩、海森堡研究的同时,1925年1月,狄拉克发表了另一种方法,将量子力学写成代数形式,也直接给出了矩阵力学方程式。通过这样的过程,矩阵力学就完全建立起来了。

1927年海森堡发现了著名的不确定性原理,又称“测不准原理”。今天它已经变成了量子力学的一个基本原理。基本内容为一对共轭物理量不可能同时都具有确定的数值,当其中一个越确定时,另一个必然越混沌。例如电子的位置和动量是一对共轭量,当你把电子的位置测得十分精确的时候,那么你就无法得到它的动量,反之亦然。原因是用将光照到一个粒子上的方式来测量一个粒子的位置和速度,一部分光波被此粒子散射开来,由此指明其位置。但人们不可能将粒子的位置确定到比光的两个波峰之间的距离更小的程度,所以为了精确测定粒子的位置,必须用短波长的光。但普朗克的量子假设,人们不能用任意小量的光:人们至少要用一个光子。这光子会扰动粒子,并以一种不能预见的方式改变粒子的速度。所以,位置要测得越准确,所需波长就要越短,单个光子的能量就越大,这样粒子的速度就被扰动得更厉害。测不准原理似乎将人类探索微观领域的途径封锁,似乎有某种规则限制了人类的探索行为。这给量子物理增添了一抹哲学色彩。

与此同时,在1926年,奥地利物理学家薛定谔根据德布罗意关于物质波假设的关系式,并以经典波为线索,完全独立地推导出了一个著名的物质微粒波的波动方程——薛定谔方程,亦即波动力学的基本方程式。薛定谔利用他的波动方程式,首先对氢原子、后来又对谐振子、固定轴转动等问题进行理论上的计算,发现由计算得到的能级与实验结果精确地符合,并使人们清楚看出,微观粒子的能级不连续这一事实原来是波动方程式得解的必要条件,而对研究对象在原则上不存在任何限制。以后人们还把薛定谔方程式用于其他微观体系,也得到了好的结果。无数的实验事实证明薛定谔方程是正确的。在1926年,薛定谔还发现矩阵力学在数学上与波动力学是等价的(波动力学是从内容上对经典物理进行革命,提

出了微粒具有波粒二象性,以及用波函数来描述微粒的状态这一新的概念,并用波动方程式描写微粒的运动规律,采用的是具体的和形象的表达法。而矩阵力学是从形式上对经典力学进行改造,把在经典力学中用数表示的物理量改用矩阵来表示并规定某些对易关系与运算法则,采用的是抽象的和形式的表达法)。这样就统一了量子力学。在薛定谔的工作发表不久,玻恩根据电子散射的理想实验,提出了量子体系波函数的概率解释:波函数的方程在某一点的数值能确定粒子在这一点出现的概率。这种解释在历史上第一次指出了物质的波粒二重性间的真实联系。这样量子力学的基础就完备了,量子力学正式诞生了。量子力学诞生之后,经过越来越多的实践证明,它是比旧量子论更深刻而精确地反映了微观粒子运动规律的理论。

量子力学诞生之后,在工程实践中得到了极大的发展和应用,在今天,量子物理的影响遍布我们身边各个领域。但是却没有谁懂得量子的本质,正如玻尔本人所说的那样,如果你对量子物理不感觉到困惑的话,那就说明你根本不懂量子物理。从量子力学产生至今的 100 多年来,对它的理论的物理解释和哲学意义,在物理学界一直存在着严重的分歧和激烈的争论。问题不在于目前量子力学理论是否正确,因为量子力学的正确性已经被大量实验事实所验证。争论的主要问题是:现行的量子力学理论能否完备地描述微观世界?或者说,波函数是精确地描写了单个体系的状态呢?还是只描写由许多相同体系组成的统计系综合的状态?是概率波还是物质波?统计性和决定论是什么关系?以及由测不准关系提出的测量问题、宏观仪器和微观现象、主观和客观的关系,等等。不同学派围绕这些根本性问题,进行了长达半个世纪的辩论,许多著名的物理学家、哲学家和数学家都卷入了这场争论,出现了百家争鸣的局面。说明目前量子力学的基本理论,既不是最终理论,也不会停留在现有的水平上,它一定会继续深入发展下去。至于沿着哪个方向发展,如何发展,还要通过不同学派的继续热烈争论,在辩证唯物主义的指导下,通过科学实践加以解决。

1.1.3 纳米电子学的发展

在 1965 年那篇著名的论文发表之前,戈登·摩尔是位于加州圣何塞的仙童半导体公司的研发总监,他已经预测了家用计算机、电子手表、自动驾驶汽车,以及“个人可移动沟通设备”——手机的诞生。但 1965 年那篇关于后来被称为“摩尔定律”的预测的论文真正使他名声大噪,这篇论文的核心是关于未来计算机行业发展的时间表,基于对仙童及其他半导体企业的了解,摩尔预计每年每芯片的晶体管和其他电子元件的数量都将加倍。

摩尔随后在加州圣克拉拉创办了英特尔,不过,在上述论文里,他显然高估了芯片更新换代的速度,1975 年,他将这个预测修改为现实的两年加倍,随后,20 世纪 70 年代和 80 年代,随着惠普个人电脑、Apple II 计算机和 IBM PC 等个人消费产品的诞生,行业对芯片的处理能力要求越来越高,体积要求越来越小,摩尔的预言开始成真,图 1.2 为摩尔定律。

摩尔定律可以说是整个计算机行业最重要的定律,它其实是一个预言:每两年微处理器的晶体管数量都将加倍——意味着芯片的处理能力也加倍。这种指数级的增长,促使 20 世纪 70 年代的大型家庭计算机转化成 80、90 年代更先进的机器,然后又孕育出了高速度的互联网、智能手机和现在的车联网、智能冰箱和自动调温器等。

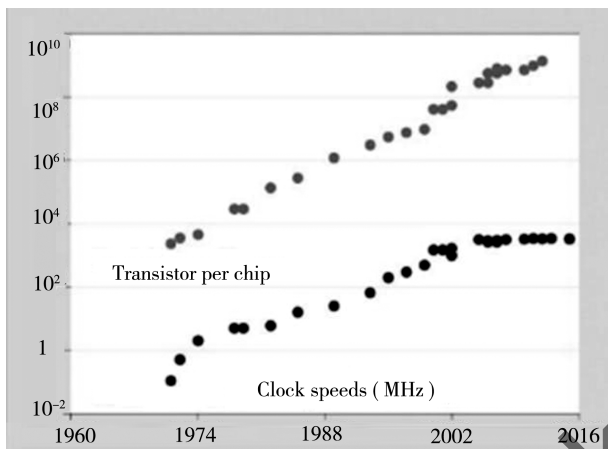


图 1.2 摩尔定律

这个看起来自然而然的进程,实际上很大程度也是人类有意控制的结果,芯片制造商有意按照摩尔定律预测的轨迹发展:软件开发商新的软件产品日益挑战现有设备的芯片处理能力,消费者需要更新为配置更高的设备,设备制造商赶忙去生产可以满足处理要求的下一代芯片。20世纪90年代以来,半导体行业每两年就会发布一份行业研发规划蓝图,协调成百上千家芯片制造商、供应商跟着摩尔定律走,这样的战略,有时也被称之为“更多摩尔”(More Moore),由于这份规划蓝图的存在,整个计算机行业才跟着摩尔定律按部就班地发展。

但现在,这种发展轨迹要告一段落了。由于同样小的空间里集成越来越多的硅电路,产生的热量也越来越大,这种原本两年处理能力加倍的速度已经慢慢下滑。此外,还有更多更大的问题也慢慢显现,如今顶级的芯片制造商的电路精度已经达到14纳米,比大多数病毒还要小。但是,全球半导体行业研发规划蓝图协会主席保罗·加尔吉尼表示:“到2020年,以最快的发展速度来看,我们的芯片线路可以达到2~3纳米级别,然而在这个级别上只能容纳10个原子,这样的设备,还能叫做一个‘设备’吗?”

恐怕不能。到了那样的级别,电子的行为将受限于量子的不确定性,晶体管将变得不可靠。在这样的前景下,尽管这方面已经有无数研究,但目前人们仍然无法找到可以替代如今的硅片技术的新的材料或技术。

2016年发布的半导体行业研究规划蓝图将史无前例地不以摩尔定律为中心,相反,新的战略可能是“超越摩尔”(More than Moore):与以往首先改善芯片、软件随后跟上的发展趋势不同,以后半导体行业的发展将首先看软件,从手机到超级电脑再到云端的数据中心,然后反过来看要支持软件和应用的运行需要什么处理能力的芯片来支持,由于新的计算设备变得越来越移动化,新的芯片中,可能会有新一代的传感器、电源管理电路和其他的硅设备。

这种局势的转变,也改变了半导体行业围绕摩尔定律不再团结一致。“大家都不确定新的研究规划蓝图意味着什么。”爱荷华大学计算机科学家丹尼尔·里德表示。位于华盛顿DC的半导体行业协会(The Semiconductor Industry Association, SIA)代表所有美国半导体企业,已经表示不再参与全球半导体行业研究规划蓝图的章程,而是自行决定研发进度。

尽管摩尔定律已经走向黄昏,但这并不意味着半导体行业停止了发展。丹尼尔·里德将之与飞机制造行业进行比较:“现在的波音 787 并不比 20 世纪 50 年代的波音 707 快多少,但这两个型号的飞机可差太多了,波音 787 的创新体现在其他地方,比如全电子控制、碳纤维机身等,计算机行业也是如此,创新将会继续,但是会体现在更细小和更复杂的地方。”

摩尔定律走向黄昏的原因从表面看来是按尺寸缩小原则遇到了“热死亡”,而更深层次的原因是制造技术的极限和物理理论的极限。

1989 年加尔吉尼曾经提出警告:芯片变得太小,“热死亡”无法避免。

曾经只要我们可以将所有的东西都缩小,问题就会自动解决,芯片会变得更快,耗能更少,成本会更低。但是到了 21 世纪初,微电路缩小到 90 纳米以下的时候,上述“自动解决”的方式开始不再灵光,随着越来越小的硅电路里的电子移动越来越快,芯片开始变得过热。这是一个很严重的问题,处理器运行产生的热量很难消除,所以,芯片制造商选择了他们仅有的解决办法,不再追求绝对的计算次数,也就是处理器执行指令的速度。这样等于给芯片的电子运行速度加了上限,同时限制了产生的热量,2004 年以来,这个运行速度的上限从没变过。

虽然速度无法再提升,但为了将芯片性能按照摩尔定律进行提升,制造商对芯片内部电路重新进行了设计,每个芯片不再仅有一个处理器(或“内核”),而是两个、四个甚至更多(现在的电脑和手机的芯片很多都是四核或者八核处理器)。总的来说,原本一个千兆赫的内核现在可以分为四个 250 兆赫的内核。不过,在现实中,要使用八个处理器,意味着一个问题需要被分成八个部分,很多算法很难甚至无法做到这一点,如果有部分没被利用,那么其实产生了性能浪费。

另一方面,光刻特征尺寸达到 4nm 以下后遇到了瓶颈。极紫外光源也无法满足更细线条的制作,寻找替代光源一方面在技术上需要投入,另一方面无疑是对现有设备的否定,厂商无疑需要核算成本,这都将是摩尔定律继续延续的阻力。

然而冥冥之中的物理定律决定了微电子器件必将“寿终正寝”。当器件尺寸进一步降低到 1~2nm 量级时,现有微电子器件结构将无法工作。例如 MOSFET 的沟道层会缩小到只有几层原子构成,在这样少的原子构成的系统下,基于大量原子统计学的半导体物理的定律将不再适用,电子的运动将“失控”,这样的器件已经失灵。因此,即使我们找到可以光刻更细线条的光源,更新我们的设备生产出 1 纳米,甚至亚纳米的 MOSFET,这些器件也无法按照我们期望的形式工作。在如此微小的尺寸下,要想确定电子的运动规则,半导体物理学无法胜任,只能求助于量子物理学。因此,量子物理学的限制宣告了微电子器件的死亡。同时,利用现有的量子物理学原理,我们可以设计出满足量子物理规律的电子器件。这些量子器件标志着纳米电子学的诞生。

纳米电子学是指以纳米尺度材料为基础的器件制备、研究和应用的电子学。由于量子尺寸效应等量子力学机制,纳米材料和器件中电子的形态具有许多新的特征。纳米电子学是当前科学界极为重视的研究领域,被广泛认为未来数十年将取代微电子学成为信息技术的主体,将对人类的工作和生活产生革命性影响。

纳米电子学是讨论纳米电子元件、电路、集成器件和信息加工的理论和技术的新学科。

它代表了微电子学的发展趋势并将成为下一代电子科学与技术的基础。最先实用化的三种器件和技术分别是纳米 MOS 器件,共振隧穿器件和单电子存储器。

纳米电子学是纳米电子器件的理论和技術基础。纳米电子学的发展,将基于纳米尺寸显著的物理特性。目前人们已经认识到,其特性除材料固有的特性外,还与维数和尺寸有密切的关系。在纳米物理长度内,出现的主要新效应有:量子相干效应(Quantum interference effect);A-B 效应(Aharonov-Bohm effect),即弹性散射不破坏电子相干性;量子霍尔效应(Quantum Hall effect),普适电导涨落(Universal conductance fluctuations)特性;库仑阻塞(Coulomb blockade)效应;海森堡不确定(Heisenberg uncertainty)效应等。

在纳米系统中失去了宏观体系的统计平均性,其量子效应和统计涨落为主要特性,纳米电子学本质就是讨论这些特性的规律,以及利用其规律研制功能器件的学科。目前人们正在争论的一个问题是:量子计算能否实现?其基础是与信息加工有关的量子系统的基本特性,主要有:(1)叠加性(Superposition),量子计算可以存在经典 Boolean 态的任意复杂的结合;(2)相干性(Interference),在叠加中的并行计算路径,类似粒子通过干涉仪可能彼此加强或削弱,与它们的相位有关;(3)牵连性(Entanglement),一个完全量子系统的某个定义态与它的部分态不相对应;(4)不确定性(Uncertainty),即使没有干扰,也不能精确地知道一个量子态是否被占据。这样,量子信息加工系统显示了某些与传统情况惊人的不同。

量子计算思想先由 IBM 的 C. H. Bennett 提出,引起理论和实验科学家的兴趣,做了很多工作。1996 年 3 月又报道了量子计算的逻辑门实验结果,对此也有人怀疑。法国巴黎第六大学的 S. Haroche 等人认为一些观点是可取的。但是,由于还有许多问题有待解决,实验证明还难以做到,实现量子计算还只是梦想。

纳米电子器件指利用纳米级加工和制备技术,如光刻、外延、微细加工、自组装生长及分子合成技术等,设计制备而成的具有纳米级尺度和特定功能的电子器件。目前,人们利用纳米电子材料和纳米光刻技术,已研制出许多纳米电子器件,如电子共振隧穿器件共振二极管、共振隧穿晶体管、单电子晶体管、单电子静电计、单电子存储器、单电子逻辑电路、金属基单电子晶体管存储器、半导体存储器、硅纳米晶体制造的存储器、纳米浮栅存储器、纳米硅微晶薄膜器件和聚合物电子器件等。

纳米电子技术是指在纳米尺寸范围内构筑纳米和量子器件,集成纳米电路,从而实现量子计算机和量子通信系统的信息计算、传输与处理的相关技术,其中,纳米电子器件是目前纳米电子技术发展的关键与核心。现在,纳米电子技术正处在蓬勃发展时期,其最终目标在于立足最新的物理理论和最先进的工艺手段,突破传统的物理尺寸与技术极限,开发物质潜在的信息和结构潜力,按照全新的概念设计制造纳米器件、构造电子系统,使电子系统的储存和处理信息能力实现革命性的飞跃。目前,研究纳米电子器件有两条途径:一是微电子器件逐渐小下去的方法,称为自上而下路线;二是利用有机/无机分子组装功能器件,称为自下而上路线。目前的研究侧重于后者。考虑到计算机主要机构分为动态随机处理器和永久存储器,因此一般研究包含两个方面:一是单电子现象和单电子功能器件结构;二是超高密度数字存储。近几年来,在这方面进步很快,取得了很多可喜成果。

基于目前的发展和对未来的预测,如果将主要纳米电子器件进一步分类,纳米 CMOS 器件主要有:绝缘层上硅 MOSFET、硅锗异质 MOSFET、低温 MOSFET、双极 MOSFET、

本征硅沟道隧道型 MOSFET 等;量子效应器件包括:量子干涉器件、量子点器件和谐振隧道器件;而谐振隧道器件又包括:横向谐振隧道器件、谐振隧道晶体管、谐振隧道场效应晶体管(RTEET)、双极量子谐振隧道晶体管、谐振隧道热电子晶体管、纵向谐振隧道器件和隧道势垒调制晶体管等;单电子器件主要包括:单电子箱、电容耦合和电阻耦合单电子晶体管、单电子神经网络晶体管、单电子结阵列、单电子陷阱和单电子旋转门等;单原子器件和单分子器件包括:单电子开关、单原子点接触器件、单分子开关、分子线、量子效应分子电子器件、电化学生子器件等。

纳米传感器将包括:量子隧道传感器和纳米生物传感器;纳米集成电路包括:纳米电子集成电路和纳米光电集成电路;纳米存储器包括:超高容量纳米存储器、超高密度数据存储器件、隧道型静态随机存储器、单电子硅基 MOS 存储器、单电子存储器、单电子量子存储器;纳米 CMOS 混合电路包括:纳米 CMOS 电路和半导体共振隧道效应电路,纳米 CMOS 电路和单电子纳米开关电路,纳米 CMOS 电路和超导单磁通量子电路,纳米 CMOS 电路和碳纳米管电路,纳米 CMOS 电路和人造原子电路与人造分子电路,纳米 CMOS 电路和 DNA 电路,纳米 CMOS 电路和纳米金属基自旋电路等主流电路的联姻,为纳米电子学开创了全新的发展。纳米化合物半导体器件和电路是指谐振隧道二极管和谐振隧道晶体管与电路,它在高速、高频和光电子领域有强大的潜力。科学家预测,21 世纪纳米电子器件、纳米光电子器件、纳米集成电路、纳米光电子集成电路是最有发展前途的领域。

目前利用纳米电子学采用纳米电子材料和纳米光刻技术已研制出了许多纳米电子器件,如:电子共振隧穿器件、电子谐振隧穿器件、共振二极管(RTD)、三端的共振隧穿晶体管(RTT)、单电子晶体管(SET)、单岛单电子晶体管(SET)、金属基 SET、半导体 SET、纳米粒子 SET、多岛 SET、单电子静电计、单电子存储器(SEM)、单电子逻辑电路、单电子 CMOS 电路、金属基单电子晶体管(SET)存储器、半导体 SET 存储器、硅纳米晶体制造的存储器、纳米浮栅存储器、单电子数字集成电路、单电子晶体管(SET)逻辑集成电路、纳米硅微晶薄膜器件[如谐振隧穿二极管(RTD)]和聚合体电子器件等。

电子波器件包括电子波干涉器件、短线波导型干涉器件、Mach-Zender 干涉计(静电干涉器件)、定向耦合器件、衍射器件、量子线沟道场效应晶体管(FET)、平面超晶格 FET、电子速度调制 FET 谐振隧穿器件等。量子波器件这类器件中的电子处于相位相干结构中,其行为以波动性为主,这类器件包括量子线晶体管、量子干涉器件、谐振隧穿二极管晶体管等。

21 世纪各国都重视和大力开展纳米器件,尤其是纳米电子器件和纳米光电子器件的研究工作。白春礼院士曾经指出“纳米器件的研制水平和应用程度是我们是否进入纳米时代的重要标志”,并指出“中国必须重视纳米器件研制和纳米尺度的检测和表征的研究工作”。根据目前我国纳米技术发展的现状,必将大力倡导开展纳米器件,尤其是纳米电子器件和纳米光电子器件的研究、开发和应用方面的工作。因为纳米电子器件和纳米光电子器件的研究是纳米技术和信息(电子信息和光电子信息)技术两大技术的支点,对经济和整个科学技术起着至关重要的作用。

在纳米电子器件和纳米光电子器件研究和开发方面,除了加强 RTD 和 SET 等纳米电子器件,以及纳米激光器、纳米红外光电探测器、纳米光电集成电路等纳米光电子器件的研

究外,还必须及时地大力开展关于分子电子器件的研究工作。在国际上,美国和日本非常重视分子电子学的研究。世界十大科技进展就报道了美国研制出分子晶体管的消息,即贝尔实验室用单一的有机分子制造出了世界上最小的晶体管,这就是分子电子器件。这类用化学有机合成的方法制造电子器件,相比用传统的光刻,刻蚀等技术制造 RTD、SET 可大幅度降低成本,且适宜大规模生产。

我国十分注重培养纳米技术人才,谁具有顶尖管理和纳米人才,谁就掌握了未来纳米高科技的制高点。新时代的大学生应该打下坚实的基础,将来为国家的科技腾飞注入活力。

1.2 本章小结

本章主要介绍了纳米技术的起源和发展、量子物理的发展、纳米电子学的发展等背景知识,使读者对于纳米技术和纳米电子学的发展历程有一个宏观的了解。微电子技术走到今天已经遇到理论上的瓶颈,量子物理的发展将引领微电子技术继续向纳米领域发展,在不远的将来,纳米电子技术将成为新时代的主角。

1.3 课后习题

1. 填空题

(1)最早明确提出纳米尺度上科学和技术问题的是美国著名物理学家,诺贝尔物理学奖获得者 _____,1959年12月29日,他在一次著名的“在底部还有很大空间(There is plenty of Room at the Bottom)”的演讲中提出:如果人类能够在原子/分子的尺度上来加工材料、制备装置,我们将有许多激动人心的新发现。

(2)纳米科学技术(NST)的最终目标就是根据人类的意愿,直接操纵和排布原子、分子以创制出新的材料和器件,其 NST 的英文全称为 _____。

(3)当纳米粒子尺寸下降到某一值时,金属费米能级附近的电子能级由准连续变为离散(或分立)能级的现象,以及纳米半导体粒子能隙的调制现象,均被称为 _____ 效应。

(4)为制造具有特定功能的纳米产品,其技术路线可分为“自上而下”(top-down)和“自下而上”(bottom-up)两种方案。其中“自下而上”是指 _____。

(5)纳米结构自组装体系的英文全称为 _____。其含义是分子间通过非键合力自发组织的超分子稳定聚集体,从一般原则来讲,自组装过程的关键是表面分子识别内禀驱动力,包括 _____、_____、_____、_____、官能团的立方体效应和长程作用等。

2. 选择题

(1)纳米(nm)是一个长度单位,它等于()。

(A) 10^{-3} 米

(B) 10^{-6} 米

(C) 10^{-9} 米

(D) 10^{-12} 米

(2)一般而言,光学显微镜由于受到光学衍射的限制,其分辨率约为()。

- (A)200 纳米 (B)1 毫米
(C)10 微米 (D)3~5 纳米

(3)准一维纳米材料是指在两个维度上为纳米尺度,长度约为微米级、毫米级的新型纳米材料。下列各选项中,属于准一维纳米材料的是()。

- (A)纳米粒子 (B)纳米结构薄膜
(C)碳纳米管 (D)储氢合金粉末

(4)1981 年美国 IBM 公司的科学家们发明了扫描隧道显微镜和原子力显微镜,极大地推动了纳米科技的发展。这两种微观表征和操纵技术的英文缩写为()。

- (A)SEM 和 STM (B)SPM 和 AFM
(C)SEM 和 SPM (D)STM 和 AFM

(5)原子的直径在 0.1~0.3nm 之间,原子核的大小约为几个费米($1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$)。人类的遗传物质 DNA 是纳米科学技术的重要研究对象,DNA 螺旋结构的横向尺寸约为()。

- (A)1~3 纳米 (B)3~5 微米
(C)100 微米 (D)200 微米

3. 名词解释

- (1)纳米科学技术
- (2)小尺寸效应(亦称体积效应)
- (3)纳米材料
- (4)纳米器件
- (5)纳米生物材料工程

4. 简答题

- (1)为什么晶体管特征尺寸进入 100nm 仍属于微电子学范畴,而不是纳米电子学范畴?
- (2)纳米的概念是什么,1nm 代表多大的尺寸空间?
- (3)宏观尺度、介观尺度、微观尺度的概念是什么?它们有什么区别?
- (4)纳米尺度的精确定义是什么?

5. 论述题

(1)既然纳米材料有如此优异的性能,而且费曼又在 20 世纪 60 年代就提出了纳米技术的构想,为什么直到今天,纳米技术才真正轰轰烈烈地发展起来呢?是什么因素制约了它的发展?

(2)微电子器件进一步缩小到亚 100 纳米尺度后遇到了什么样的物理极限?为什么经典的微电子学理论已经不能适用?

(3)什么样的材料是纳米电子材料?纳米电子材料分哪几类?什么是纳米结构?列举几种典型的纳米电子器件。

1.4 拓展学习

查阅相关微纳电子器件期刊论文资料,列举至少五种典型的微纳电子器件,并对比其特点(至少包括器件结构特点,器件电学特性,制造工艺特点等内容)。

1.5 学习资料

- (1)刘长利,沈雪石,张学骞,等. 纳米电子技术的发展与展望[J]. 微纳电子技术,2011,48(10):617-622.
- (2)张轩硕. 纳米科技的神奇畅想[J]. 科技风,2019,372(04):250.
- (3)陈文. 纳米电子技术:电子工业的技术革命[J]. 航空维修与工程,2006(4):31-33.
- (4)李垚. 纳米电子器件与纳米电子技术分析[J]. 中国新通信,2019,21(02):34.
- (5)柳传强,陈文杰. 电子信息技术在生活中的应用与发展[J]. 环球市场,2018,000(035):386.
- (6)《纳米世界的奥秘》编写组. 纳米世界的奥秘[M]. 2010.

第2章 纳米量子效应

【概述】

本章主要介绍纳米效应的基本概念。包括表面效应和小尺寸效应,弹道输运,相位干涉,普适电导涨落,弱局域化,载流子热化,隧穿效应,单电子效应与库伦阻塞。使读者了解纳米效应的基本内容和范围,掌握纳米效应的基本概念,并能够运用量子物理基本概念解释简单的纳米效应现象。

【重点与难点】

重点:小尺寸效应的基本原理和应用,弹道输运基本原理和应用,载流子热化效应的基本原理和危害,隧穿效应基本原理和应用,单电子效应与库伦阻塞的概念和应用。

难点:隧穿效应基本原理和在器件中的应用,单电子效应与库伦阻塞效应基本原理和在器件中的应用。

【知识正文】

2.1 知识点详解

纳米世界是一个奇异的世界,当我们进入这个世界的时候,会发现很多奇异的现象。比如一块金子是金黄色的,而当你把金块的尺寸降低到几个纳米甚至更小时,它的颜色便会发生变化,于是金子不再是金色,铁也不再具有金属光泽,可以说我们看到的一切物体都将与宏观尺度中不同。而在这样的世界中,宏观的经典物理不再适用,当你把一个电子抛向空中,你将无法通过牛顿三定律确定它将落在何处。

各种元素的原子具有特定的光谱线,如钠原子具有黄色的光谱线。原子模型与量子力学已用能级的概念进行了合理的解释,由无数的原子构成固体时,单独原子的能级就并合成能带,由于电子数目很多,能带中能级的间距很小,因此可以看作是连续的。从能带理论出发成功地解释了大块金属、半导体、绝缘体之间的联系与区别,对介于原子、分子与大块固体之间的超微颗粒而言,大块材料中连续的能带将分裂为分立的能级;能级间的间距随颗粒尺寸减小而增大。当热能、电场能或者磁场能比平均的能级间距还小时,就会呈现一系列与宏观物体截然不同的反常特性,称之为量子尺寸效应。例如,导电的金属在超微颗粒时可以变

成绝缘体,磁矩的大小和颗粒中电子是奇数还是偶数有关,比热亦会反常变化,光谱线会产生向短波长方向的移动,这就是量子尺寸效应的宏观表现。因此,对超微颗粒在低温条件下必须考虑量子效应,原有宏观规律已不再成立。电子具有粒子性又具有波动性,因此存在隧道效应。人们发现一些宏观物理量,如微颗粒的磁化强度、量子相干器件中的磁通量等亦显示出隧道效应,称之为宏观的量子隧道效应。量子尺寸效应、宏观量子隧道效应将会是未来微电子、光电子器件的基础,或者它确立了现存微电子器件进一步微型化的极限,当微电子器件进一步微型化时必须要考虑上述的量子效应。例如,在制造半导体集成电路时,当电路的尺寸接近电子波长时,电子就通过隧道效应而溢出器件,使器件无法正常工作,经典电路的极限尺寸大概在0.25微米。研制的量子共振隧道晶体管就是利用量子效应制成的新一代器件。

当物质微粒尺度小到一定程度,由10微米降至10纳米时,其粒径虽改变为1000倍,但换算成体积时则将有 10^9 倍之巨,如此巨大的差距导致纳米尺度的物质性质与宏观大尺度时表现截然不同。在10~100nm的纳米尺度是一个过渡区域,传统的半导体理论依然有效,但是已经出现一些无法忽略的量子效应,两种理论同时存在,因此在10nm的CMOS工艺器件中,我们看到了许多应对量子效应的结构;而当尺寸进一步缩小到10nm以下时,量子效应开始明显,并逐渐超过传统半导体物理成为主宰纳米世界运行的唯一理论。在这一尺度下,一切粒子的行为都遵守量子物理规律。因而抛向空中的电子将落在何处,可以由量子物理给出答案。

当物质的尺寸进入纳米尺寸后,可以认为它们都是纳米颗粒,称为纳米粒子。纳米粒子异于大块物质的理由是在其表面积相对增大,也就是超微粒子的表面布满了阶梯状结构,此结构代表具有高表面能的不安定原子。这类原子极易与外来原子吸附键结,同时因粒径缩小而提供了大表面的活性原子。因而其性质与宏观大尺度时完全不同,下面介绍一些具有代表性的纳米效应。

2.1.1 表面效应

大量的原子世界的分子、原子、离子聚集成各种固体、液体、气体物质,成为宏观世界构成的基础。当某种物质形成了一个相时,一般说来,这些物质的各部分有均匀的物理化学性质。然而,这只是对物质内部来说是对的。在物质表面的那些组元,所处的环境和所受的相互作用情况都和物质内部的那些组元有所不同,这就造成表面部分和内部部分的性质有所不同。对于气体来说,组元之间并不密集,表面效应不大。对于液体和固体,就会表现出表面效应。表面效应表现在处于物质表面的一层组元上,对于一般的宏观物体,表面一层的组元在组元总数中只占很小的比例,表面效应常常是完全可以忽略的。如图2.1所示,对于体积很小的凝聚态微粒,表面效应有时就相当重要,可以用处于表面的组元数和组元总数之比作为描述表面效应程度的系数。当微粒很大时,系数接近于零;当微粒不断减小时,系数不断加大;当微粒小到纳米范围时,系数明显增大。

球形颗粒的表面积与直径的平方成正比,其体积与直径的立方成正比,故其比表面积(表面积/体积)与直径成反比。随着颗粒直径的变小,比表面积将会显著地增加。例如粒径为10nm时,比表面积为 $90\text{m}^2/\text{g}$;粒径为5nm时,比表面积为 $180\text{m}^2/\text{g}$;粒径下降到2nm

时,比表面积猛增到 $450\text{m}^2/\text{g}$ 。粒子直径减小到纳米级,不仅引起表面原子数的迅速增加,而且纳米粒子的表面积、表面能都会迅速增加。这主要是因为处于表面的原子数较多,表面原子的晶场环境和结合能与内部原子不同所引起的。表面原子周围缺少相邻的原子,有许多悬空键,具有不饱和性质,易与其他原子相结合而稳定下来,故具有很大的化学活性,晶体微粒化伴有这种活性表面原子的增多,其表面能大大增加。这种表面原子的活性不但引起纳米粒子表面原子输运和构型变化,同时也引起表面电子自旋构象和电子能谱的变化。

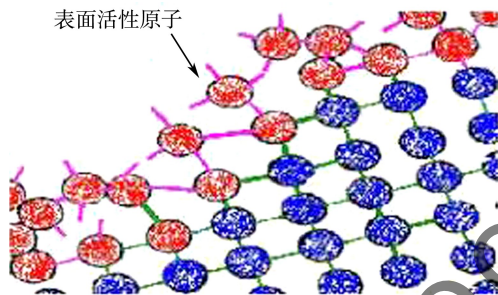


图 2.1 表面效应

对直径大于 0.1 微米的颗粒表面效应可忽略不计,当尺寸小于 0.1 微米时,其表面原子百分数急剧增长,甚至 1 克超微颗粒表面积的总和可高达 100 平方米,这时的表面效应将不容忽视。超微颗粒的表面与大块物体的表面是十分不同的,若用高倍率电子显微镜对金属超微颗粒(直径为 2×10^{-3} 微米)进行电视摄像,实时观察发现这些颗粒没有固定的形态,随着时间的变化会自动形成各种形状(如立方八面体,十面体,二十面体多孪晶等),它既不同于一般固体,又不同于液体,是一种准固体。在电子显微镜的电子束照射下,表面原子仿佛进入了“沸腾”状态,尺寸大于 10 纳米后才看不到这种颗粒结构的不稳定性,这时微颗粒具有稳定的结构状态。超微颗粒的表面具有很高的活性,在空气中金属颗粒会迅速氧化而燃烧。如要防止自燃,可采用表面包覆或有意识地控制氧化速率,使其缓慢氧化生成一层极薄而致密的氧化层,确保表面稳定化。利用表面活性,金属超微颗粒可望成为新一代的高效催化剂和贮气材料,以及低熔点材料。

纳米颗粒的表面效应可以应用在很多方面。例如人工降雨。在一个由许多相组成的系统中,有时表面相的存在会变得十分重要,它会影响到各个相之间的平衡条件。我们平时能够遇到的与表面效应有关的一个典型的例子就是水滴的形成。在饱和或过饱和蒸汽中的水滴,如果它的半径足够大,那么周围的水蒸气就会逐渐凝聚到这个水滴上,于是水滴也就逐渐地变大。若是水滴本来就很小,那么,由于表面效应的影响,要想维持水滴的存在,外界就必须有很高的蒸汽压,这样,在一般的蒸汽压条件下,水滴便不会增大,而会逐渐地蒸发掉。天空中飘着的云就是由许许多多这样的微型水滴构成的。在雨即将到来的前夕,外界的蒸汽压力增高,这些微型水滴通过互相碰撞逐渐结合成越来越大的水滴,最后,当空气的浮力和运动的阻力再也承受不了它们的重量时,它们就向地面掉下来,成了雨滴。由此也可以看出,如果在过饱和蒸汽中掺入一些杂质颗粒如尘埃等,将有助于水滴的形成。如果天上已经有了很厚的云,这时用飞机在云层中散布一些杂质微粒就会加快雨滴的形成,从而达到降雨的目的,这就是人工降雨。

纳米固体燃料也是利用表面效应原理,纳米铝粉应用在航天飞机燃料中作为催化剂,可