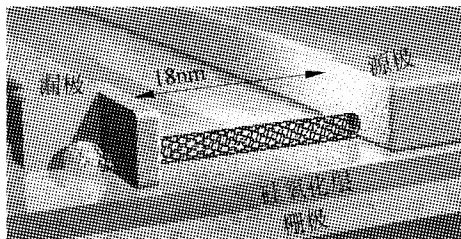


第1章 纳电子学简介



碳纳管三极管示意图

在详述纳米尺度现象之前,我们首先来认识一下“纳米”尺度的大小。表 1.1 列出了常用的典型长度单位。

在表 1.1 中没有列入长度单位埃($\text{\AA}$), $1\text{\AA}=10^{-10}\text{ m}$, 或者说是 1 纳米的十分之一。1 埃是一个典型的原子尺度,所以,粗略地说,大约 10 个原子就对应于 1 纳米。

表 1.1 纳米技术中常用的典型长度单位

名称	符号	大小	名称	符号	大小
米	m	1	皮米	pm	10^{-12} m
毫米	mm	10^{-3} m	飞米	fm	10^{-15} m
微米	μm	10^{-6} m	阿米	am	10^{-18} m
纳米	nm	10^{-9} m			

表 1.2 列出了一些微小物体和它们的典型尺寸。可以看出原子、DNA、蛋白质、病毒和晶体管都属于我们广义上定义的纳米尺度物体的范畴(大概在 1 纳米的 100 倍范围之内),而作为对比来讲,生物细胞则比 1 纳米大出 1 万倍。

表 1.2 常见微小物体和它们的典型尺度

物 体	典 型 尺 寸
原子	$1\text{ \AA}=0.1\text{ nm}$
DNA(直径)	1nm
蛋白质	10nm
晶体管氧化层厚度	1.2nm
晶体管栅极长度	35nm
病毒	100nm
血红细胞	$10\mu\text{m}=10\,000\text{ nm}$
人类头发直径	$150\mu\text{m}=150\,000\text{ nm}$
沙粒	$1\text{ mm}=1\,000\,000\text{ nm}$

Chart of the Electromagnetic Spectrum

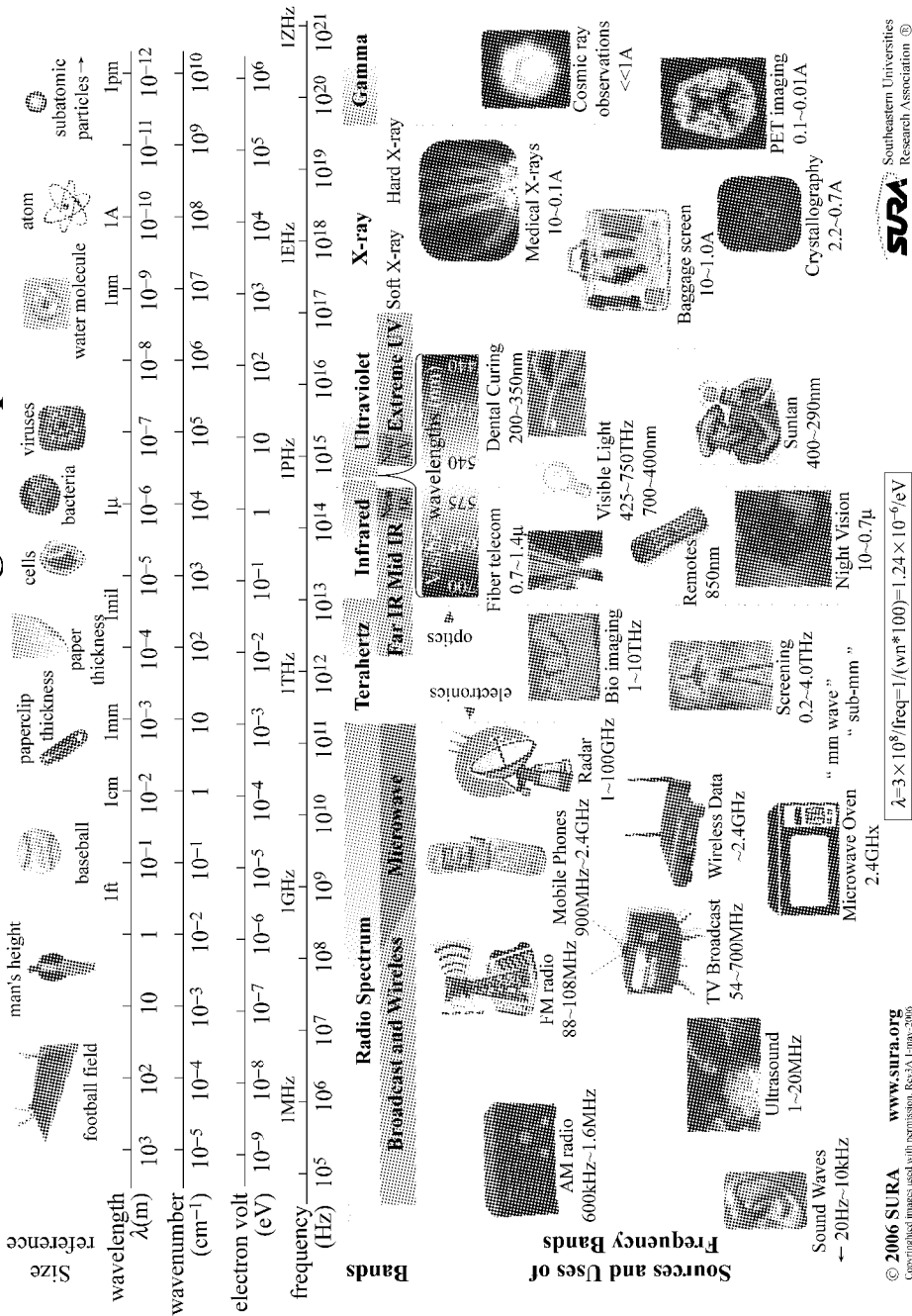


图 1.1 电磁波谱示意图

为了更进一步认清纳米技术所涉及的尺寸概念,表 1.3 中给出了电磁波谱中的一些点,并且显示在图 1.1 中,可以看出由紫外线(UV)到 X 射线的波长区间是在纳米量级。

表 1.3 电磁波谱

通用名称	λ (m)	λ (nm)	f (GHz)
调幅无线电波	10^4	10^{13}	0.00003
调频无线电波	1	10^9	0.3
微波	10^{-2}	10^7	30
红外线	10^{-4}	10^5	3000
可见光-红色	7×10^{-7}	700	428 571
可见光-紫色	4×10^{-7}	400	750 000
紫外线	10^{-8}	10	30 000 000
X-射线	10^{-10} (1 Å)	0.1	3 000 000 000
γ -射线	10^{-12}	0.001	300 000 000 000

说明:通用名称表示的是一个频率范围;表中给出的是典型的数值。

1.1 “自上而下”路线

微电子工业也许是纳电子学发展的最大单一推动力,而微电子的名字也正在快速地变为过时。微电子工业诞生的标志是 Bell 实验室的 William Shockley、Walter Brattain 和 John Bardeen 在 1947 到 1948 年发明的晶体管以及 1958 年美国德州仪器(Texas Instrument)的 Jack Kilby 和美国仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor Corporation)的 Robert Noyce(创始人之一)发明的集成电路(IC)。在谈到 IC 的发明时 Kilby 通常是最经常被提到的人,不过实际上 Noyce 和 Kilby 的工作是各自独立完成的而且互相并不知道另一个人的努力,他们都在 1959 年申请了和 IC 相关的专利。

1965 年,摩尔(Gordon Moore, Intel 公司的创始人之一)注意到每平方英寸 IC 芯片上的晶体管的数目每 12 个月就大约翻一番。这一经验法则现在被称为摩尔定律,直到目前为止这一定律都是近似成立的,不过现在翻一番的时间是 18~24 个月。当然,电子工业和普通公众都希望这一不断小型化的过程可以持续下去。然而最近,科学工作者(即使是那些工作在 Intel 公司的)预言到 2015~2018 年摩尔定律将要走到终点,人们预期到那时制造特征尺寸为 16 纳米的晶体管将成为可能。

图 1.2 展示了历史上的第一个晶体管,这是一个双极型器件,包括两个和锗基底接触的尖金属线(发射极和集电极),而锗又与基极相连。到 1960 年,晶体管的最小特征尺寸已经下降到 $100\mu\text{m}$ 。这个数值在 1980 年已经接近



图 1.2 于 1947 年在贝尔实验室发明的第一个晶体管

1 μm ,而在2001年则达到130纳米的量级。接着在2003年和2005年分别实现了90纳米和65纳米的制造。45纳米技术预定在2007年完成^①,而32纳米技术也计划在不远的将来实现^②。

鉴于晶体管和其他元件特征尺寸的缩小,有人会说电子工业已经在“做”纳米技术。然而,根本的转变看起来还在酝酿中。100纳米量级的晶体管仍然在一定程度上遵循由量子理论修正的经典物理。随着特征尺寸向1纳米逐渐缩小,越来越多的纯量子效应开始出现。例如,当金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)中的栅极氧化物厚度降低到1~2 nm时,就会发生显著的穿过栅极的隧穿,这是一种纯粹的量子现象^③。另外,当三极管的沟道长度接近几个纳米时,相当一部分电子会以弹道方式穿过沟道,即没有发生通常传导中标志性的碰撞。最后,随着沟道长度的持续缩短,源-漏之间的直接隧穿将发生。所有这些效应的作用将显著改变器件的性能。

在缩小特征尺寸方面另一个非常重要的实际问题是必须改变制造工艺过程,这需要很高的成本。建造一个新的集成电路制造厂的费用可能高达数十亿美元,并且随着特征尺寸的缩小而增加。而且,目前采用的各种各样的光学曝光技术大概只能满足小到几十纳米的应用,要进一步缩小尺寸则需要发展其他技术(也许不是基于光刻的技术)。

1.1.1 光刻(曝光)

很容易理解利用光学曝光技术所制造的器件在缩小尺寸时所遇到的问题。在这里,我们可以广义地定义“光刻”或者“曝光”是为了加工电路而利用电磁能将图形从掩模板转移到基底(我们将称之为晶片)表面上沉积的抗蚀剂层的过程。下面我们对这一基本的工艺过程作一个简化的描述(图1.3描绘了步骤1~步骤3)。

1. 把感光乳剂(称为光刻胶)涂在晶片(绝大多数情况是硅)上。

2. 光能(光^④)照在含有透明和不透明区域(对应于所需图形)的光学掩模板上。透过光学掩模板的光到达晶片,把所需图形照在光刻胶上。在半导体工业最常用的投影式曝光术中,在光学掩模板前后都使用透镜对光进行聚焦。

3. 光刻胶被透过光学掩模板的光曝光的部分发生化学反应。

(a) 对于**负型光刻胶**,抗蚀剂材料初始时对用在显影中的特定溶剂是可溶的,而通过曝光时的化学反应则变为不可溶。当晶片稍后在溶剂中清洗时,没有曝光的区域(也就是被光学掩模板阻挡了照明的区域)被溶解,而对应于掩模板透明部分的曝光区域则保留下来。

(b) 对于**正型光刻胶**,抗蚀剂材料初始时是不可溶的,而通过曝光发生的化学反应变成可溶。当晶片经溶剂清洗时,被光照过的区域被溶解,没有曝光的区域则保留下来。

① 美国Intel公司已于2007年11月11日正式发布了45nm制程高端处理器。

② 90nm、65nm、45nm、32nm等对应于半导体工艺路线图中的“技术节点”。这里指的是“国际半导体技术发展路线图”(ITRS),它是工业制造商和供应商、政府组织和大学提供的对半导体工业技术需求的评估,是非常有影响力的合作产物。

③ 虽然对三极管的运行起到核心作用的能带理论和有效质量的概念等都是量子效应,不过在某种意义上它们的作用是对半导体中电子的经典行为进行修正。

④ 这里我们用“光”的广义含义,不必仅指可见光。

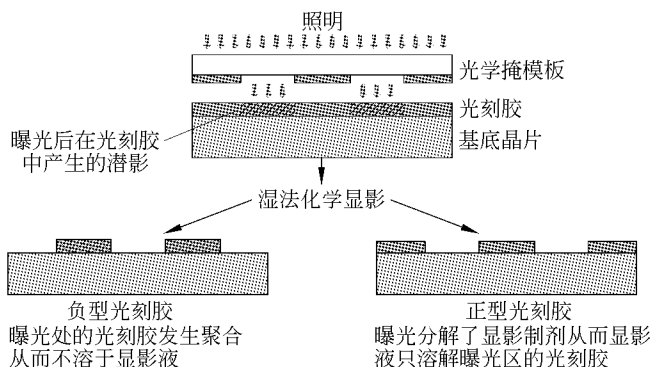


图 1.3 光刻过程中步骤 1~步骤 3 的示意图

4. 然后采用不同的步骤可以把图形从光刻胶转移到晶片上。例如

(a) 可以通过刻蚀来去掉基底材料。(关于刻蚀和材料沉积可以参考 9.4 节中的简要介绍)光刻胶作为抗蚀剂可以阻挡刻蚀并保护被胶覆盖的晶片部分。刻蚀后去掉光刻胶就得到所需要的结构。

(b) 可以在晶片上沉积材料,例如,表面金属化。然后去掉光刻胶(沉积在光刻胶上的材料也随之被去掉,这称为剥离),这样沉积的材料就留在没有覆盖光刻胶的区域。

(c) 还可以掺杂。例如,掺杂离子束被加速射向晶片,光刻胶阻挡离子到达其覆盖的晶片区域,这样就在没有光刻胶覆盖的区域引入掺杂。这被称为离子注入。

我们将在 9.4 节进一步讨论光刻和其他形成纳米结构的方法。

光学曝光工艺的分辨率 R 描述成像系统分辨空间中两个临近物体的本领,实际上并不是指刻印物体的最小特征尺寸。我们可以通过考虑光(实际上可以是任何电磁能)透过光学掩模板上的透明区域形成的图形来理解得到好的分辨率所面临的一般性问题。由于衍射(基本上是指光在边角处弯曲的能力)过程,光通过模板的小孔时会倾向于模糊化。如图 1.4 所示。

当光从模板左侧入射时,在紧靠模板的右侧,照明生成的图形将具有相对清晰的边界,而离模板更远一些,图形就成为图 1.4 中显示的那样^①。在小孔尺寸 $2w$ 、波长 λ 和位置 z 之间有相互影响,不过一般来说,对于固定的位置 z ,小孔相对于波长越小,光束展宽越大。固定小孔的尺寸,我们可以使用更短的波长来得到更清晰的图形。当然,这里忽略了用于聚焦照明光的透镜的存在,不过这可以使我们对通过曝光形成图形技术中波长的作用有一个了解。

在包含透镜的光学曝光工艺中,其分辨率可近似表示为

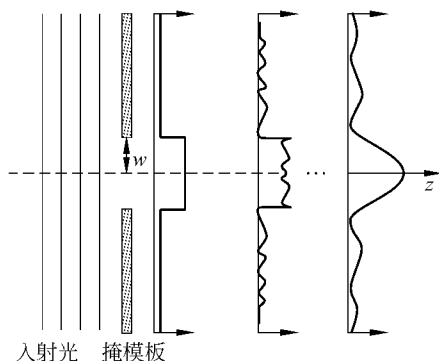


图 1.4 通过不透明挡板上一个小孔的光衍射示意图

^① 接触式曝光法就是把光刻胶紧靠在掩模板的后面从而改善分辨率,不过这种方法本身也有一些技术困难。

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA} \tag{1.1}$$

其中 k_1 是常数, λ 是光源的波长, 而 NA 称为**数值孔径**。常数 k_1 依赖于曝光过程中的很多因素, 不过 k_1 大约在 0.5~0.8 之间是比较常见的, $k_1=0.25$ 被认为是极限值。数值孔径取决于用于聚焦入射能量的透镜的性质, 典型值在 0.5~0.9 之间。当透镜和晶片之间是空气时, NA 的物理极限是 1。举例来说, 如果一个光学曝光系统具有 $\lambda=193\text{nm}$ ^①、 $k_1=0.25$ 和 $NA=0.9$, 其分辨率为 $R=53.6\text{nm}$ 。

尽管可以通过缩小 λ 来改善 R , 但这并不一定能够简单地实现, 例如当波长短于 193nm 时, 光很容易被标准曝光工艺中使用的熔凝石英透镜吸收。而新的曝光技术例如利用相移掩模板可以显著地提高分辨率, 可能使光学曝光的应用扩展至数十纳米的低端范围。

目前正在考虑的一种相对较新的方法涉及在透镜和晶片中间插入一层水膜或者其他介电媒介的薄膜, 称为**浸没式光刻技术**。在这种情况下, 分辨率可以表示为

$$R = k_1 \frac{\lambda}{(NA)_n} \tag{1.2}$$

其中 n 是薄膜的折射率。因为水对应于光学频率的折射率约为 1.44, 所以浸没式光刻技术可以显著地提高分辨率。例如 193nm 的浸没式光刻技术等价于空气中 $193/1.44=134\text{ nm}$ 的光刻。考虑前面的例子, 这将使普通曝光法 $R=53.6\text{nm}$ 的分辨率提高到 $R=37\text{nm}$ 的量级。当然, 每种技术都同时有优缺点, 并有技术障碍需要克服。浸没式光刻技术的一个技术问题是在选取晶片的不同点时如何在透镜和晶片之间保持一个均匀并且没有气泡的介质层。浸没式光刻技术正在被考虑应用于 32nm 的芯片生产, 计划将于 2009 年实现。

其他技术, 例如**深紫外(EUV)**和**X 射线光刻技术**, 现在仍然处于研究阶段, 其中 EUV 将有可能在不远的将来被应用。此外, 还有**电子束曝光术**, 它使用电子束取代电磁照明。在这种情况下, 实现 1~10nm 量级的分辨率将成为可能, 不过目前这仍然是一种非常低成本同时低产出(慢)的技术。但是, 在纳米技术研究中电子束曝光是一种重要的工具。

另外, 一种利用**负折射率材料**来打破衍射极限的方法正在研究中^②, 负折射率材料对光的聚焦可以比普通(正折射率)材料好得多。由负折射率材料制成的透镜称为**超级透镜**。在不久前的实验中, 使用 365nm 波长的光在有机聚合物上写下 NANO 的字样达到了约 60nm 的分辨率。因为这仍然是一种光学曝光方法, 速度很快, 因此可能成为将光学曝光方法延伸到几十纳米工艺的途径之一。一般来说, 获得越来越好的分辨率从而缩小特征尺寸的方法, 被称为“**自上而下**”的路线。

1.2 “自上而下”路线

1959 年, 颇具影响力的物理学家(同时也是量子理论发展的贡献人)Richard Feynman(理查德·费曼)在美国加州理工大学作了“在底部还有很大空间”的报告, 期间讨论了非常小的器

① 193nm 是氟化氩(ArF)激光的波长, 在工业界被广泛应用。
② 很多金属在光学波长范围具有负介电常数, 但是负折射率材料通常必须同时具有负的介电常数和磁导率。

件的技术前景,这被认为可能标志了纳米科技的诞生。在这个报告中,他问道:“如果我们能够一个一个地移动原子,并把它们按我们的需要排列起来,那将发生什么?”最近仪器设备的发展已经允许科学工作者们做上面提到的事情——观察和操纵纳米甚至于原子尺度的物体。这些仪器包括扫描电子显微镜(SEM)、扫描隧道显微镜(STM)、透射电子显微镜(TEM)和原子力显微镜(AFM)。作为当时的一个非凡的壮举,1989年IBM的科学家们利用分辨率约为0.1nm的STM移动单个的氩原子写下了字母IBM,不过这局限于扫描导电的表面。

与“自上而下”的路线不同,这些纳米尺度结构的建造方法被称为“自下而上”路线,这代表着更为彻底的技术方向的改变,现在正在研究实验室中被探索。当然一个接一个地移动单个原子是一个非常耗时的过程,研究人员正在着眼于更为高效的方法来建造纳米尺度的结构。在这一点上,很多途径都在研究之中,包括器件的化学或生物方法的自组装,或者利用其他的小器件(称为**装配器**)来机械式地装配器件。由于我们讨论的物体非常小,通常电泳力^①、介电泳力^②和毛细力都可以有有益的应用。Eric Drexler,在他的1986年出版的《创造引擎:即将来临的纳米技术时代》一书中,勾画了已经引起广泛关注的纳米科技和“自下而上”方法的可能的未来。

1.3 为什么学习纳电子学

在过去的50年中,消费者已经习惯了电子产品同时变得更小和更便宜,而且还更强大(通常是具备更多的特色和功能等)。这一趋势的驱动力在很大程度上来源于生产厂商想要具有竞争力,也反映了消费者需要更小、更快、更便宜同时更好的电子产品的普遍愿望。产品尺寸的减小是由于单个电子器件尺寸的缩小,例如晶体管。这种减小也理所当然地导致功能性的增强,因为在相同的面积就可以装入更多的器件^③。同时小的器件尺寸还产生直接的经济效益,因为集成电路芯片的成本是和单个硅晶片能够制造的芯片数量相关的。因此更高的器件密度将导致每个晶片上更多的芯片从而降低成本。从20世纪60年代微米尺寸的晶体管开始,电子工业的发展一直是在这种单一趋势的驱动下发展,在某个时刻我们一定会去面对纳米尺度的器件。在写这本书的时候,这个时刻已经来临,目前MOSFET的尺寸已经大大低于100nm。

纳米尺度器件的发展包括了超小和低功耗电子产品的可能性,例如通信和计算器件以及嵌入式的传感器。此外,随着电子器件的尺寸缩小,进一步把电子器件和生物系统结合的可能性就快速地扩展了^④。因此很多因素在推动电子器件的小型化。这样看来对于“为什么学习纳电子学”这一问题的答案是很显然的。

① 作用在带电物体上的力,力等于电荷乘以电场。

② 由于非均匀电场引起的作用于介电物体上的力。

③ 举个例子,一个主要的芯片制造商估计从65nm节点到45nm节点将使晶体管的密度提高两倍,这或者使芯片尺寸缩小,或者增加单个芯片上的晶体管数目(从而具有更高的功能性)。

④ 起搏器可以被认为是一个传统的实例同时仍然有比较大的意义。而其他正在使用或者预期在近期投入使用的小电子器件则可被植入人体来辅助听力、视力和作为其他医疗手段的宿主。

然而,在更小尺寸晶体管带来的好处之外,把传统的器件缩小到纳米尺度也会遇到很多显著的问题。例如,

- 器件制备:前面已经讨论过把光学曝光方法扩展到几十纳米的尺度可能是困难的,而使用其他制备方法(例如自下而上的路线)来生产高产出、商业化水平的产品还不成熟。而且,对于这样极端小的器件,随机的加工差异可能导致器件特性的不可预见性,并且具有统计性质,这将使电路设计复杂化。
- 器件操作:随着器件尺寸的缩小,电压电平也需要相应地降低。这会降低 MOSFET 器件的阈值电压,使得完全关闭器件变得困难,而且增加功耗。此外,当尺寸缩小到纳米量级,由于量子物理的法则,传统 MOSFET 的运转性能将有不同,也许是有根本性的不同(而且常常不是朝着有益的方向)。隧穿和弹道输运是两个显著的量子效应,我们将在本书中讨论。
- 热耗散:随着器件密度的增加,热耗散将成为一个主要的问题,它降低了电路的可靠性并且缩短了器件的寿命,或者导致器件的失效。以目前的技术水平,如果器件密度增加的速度要继续,微处理器单位面积将产生比太阳表面还要高的热量^①。

考虑到前面这些困难,可以看出在某个时刻,电子工业需要超越缩小传统电子器件的尺寸的方法。需要发展新的器件和系统架构,很可能是基于只有在纳米尺度才能遇到的物理效应。未来取代目前硅基互补金属-氧化物-半导体(CMOS)技术的新电子技术需要在经济性和技术角度(它们往往是紧密纠缠在一起的)更具吸引力。新技术将必须在性能上胜过 CMOS,制造相对容易并且价格低廉,具备高的可重复性、高产量和低成本,并且具有好的热学特性。在这一点上,CMOS 在目前和将来的一段时间仍将是电子工业的主导技术。然而一些新器件将最后取代 CMOS 或者起到与 CMOS 互补的作用,我们将在本书中对这些新器件加以介绍。

1.4 纳米技术的潜力

纳米技术的前景和潜力并没有被政府部门所忽视。在美国,自 2000 年起,美国国家纳米技术创新计划就开始资助纳米技术的研究和发展。2001 年资助金额为 4.65 亿美元,2002 年增加到 6.97 亿美元,2003 年 8.63 亿美元,2004 年 9.89 亿美元,2005 年 12 亿美元,2006 年 13 亿美元。在日本,资助金额的水平与此相当。欧洲以及其他地区也都在纳米技术发展上投入大量资金。世界范围内政府在纳米技术上的资助据估计达到 70 亿美元。

目前纳米技术有很多潜在的应用,包括

- 纳米颗粒——纳米尺度的颗粒可以用于涂层,在化学过程中作催化剂,以及用于指定器官的药物传输等;
- 纳米材料——具有改良的强度和重量,也许将与碳纳米管结合;

^① 目前的集成电路具有 $100\text{W}/\text{cm}^2$ 的功率密度,而 10 年前是 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 。一个典型的加热板的功率密度是 $10\text{W}/\text{cm}^2$,而太阳表面是 $7000\text{W}/\text{cm}^2$ 。

- 纳电子学——超小尺寸、低功耗的电子器件,例如三极管;
- 纳米光学——在纳米尺度形成光路,通常利用等离子体结构;
- 纳米磁学——把纳米尺度的磁性材料和器件用于磁性存储技术、逻辑器件等;
- 纳米流控技术——基于纳米尺度流体性能的器件(产生所谓的芯片上的化学和生物实验室);
- 纳米生物电子学——综合纳米器件和生物结构,例如可用于化学/生物武器的探测。

本书侧重于纳电子学特别是量子效应固体电子学,不过分子电子学领域也有所涉及。就目前来讲,固体纳电子器件的主要范畴基本是基于量子点、量子阱、量子线和碳纳米管。纳电子器件最基本的原理之一是隧穿,这是纯粹的量子效应。在量子点和共振隧穿器件中,一个半导体或者金属材料的小“岛”和电路中的其他部分是隔绝的,从而把电子稍微限制在空间中一个很小的区域内(在几个纳米的量级上)。因为隧穿和相关的现象,这种限域不是绝对的,产生了很多有趣的效应,可能应用于电子学和光子学。

最后,应该提到很多原型纳电子器件已经被研制出来,在有些情况下,这些器件的特性已经被比较好地理解了。在某种意义上,有些器件是传统电子器件的纳米类似物,而有些则代表了完全崭新的依赖于纯粹量子现象的技术。后一类中的一些例子包括某些量子逻辑器件、基于量子自旋的电子器件、单电子器件以及基于分子和生物的器件。一般来讲,大规模制造生产方面还有大量的挑战,这在极大程度上还有待克服。然而,已经有相当数量的公司成立并希望把纳米科技的概念市场化,而且已经出现了基于纳米技术的商业产品。例如,除了电子方面的应用,包含镶嵌在基体媒介中的纳米尺寸颗粒的涂层已经投入应用很长时间了。现在,利用现代技术,可以对这些涂层进行设计从而提供所需的效果(如增强强度、颜色持久性等)。另一个例子是,人们可以购买用碳纳米管制成的网球球拍,据说它比标准的碳素球拍的刚度好5倍,而用纳米颗粒制成的滑雪板则可以提供很好的滑行能力。量子点在医药和生物方面的应用也在被快速开发。在电子技术的竞技场,人们普遍认为纳电子器件将允许实现快速低功耗的芯片,而单个芯片上可以有数百亿甚至数万亿的器件,特征尺寸将达到纳米量级。然而,现在还非常难预测第一个非CMOS的纳电子器件会是什么样的。

1.5 本章要点

在本章中,我们介绍了关于纳电子学领域的一些基本概念。具体来讲,在读过这章之后,读者应该掌握以下内容:

- 理解各种尺寸单位,对微米和纳米结构的尺寸有大概的认识;
- 知道一点关于微电子学和集成电路的历史,包括摩尔定律和所谓的自上而下的方法;
- 理解为什么光学曝光方法在当前的技术水平上为电子元器件的缩小设置了一个极限,以及将来可能采用的曝光方法的优缺点;
- 理解什么是自下而上的方法;

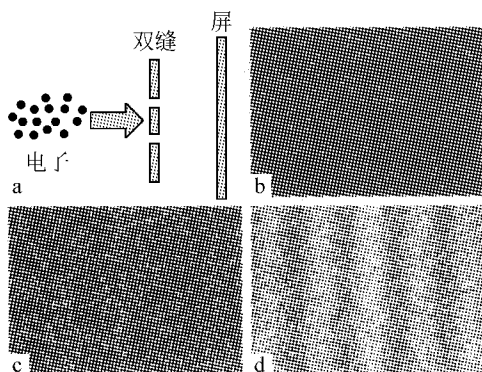
- 对缩小目前电子器件和利用目前的系统构架面临的问题有一些理解；
- 对目前可用的纳米技术相关产品的数量和未来纳米技术产品的潜力有一个大概的了解。

1.6 练习题

注意：你需要参考本书之外的资料来回答下列问题中的大多数。

1. 确定目前利用曝光技术得到的晶体管特征尺寸的最高水平并简要介绍曝光技术(可见光、紫外等及其使用的波长)。
2. 找到一个你可以理解的“量子点”的定义,并简要解释(用一个段落)量子点的一个应用。
3. 根据(1.1 节),好像为了提高分辨率和允许曝光技术形成越来越小的结构图形,我们只需要简单地持续降低光源的波长(即提高频率)。描述这种方法的技术难点。
4. 查找关于浸没式光刻技术的信息,用几个段落来描述其基本概念和优缺点。
5. 对于电子束和 X 射线曝光技术,重作习题 1.4。
6. 查找一个纳米技术领域的公司,简要介绍它在做什么。
7. 找到并描述三个目前可获得的基于纳米技术概念的商业产品。
8. 对于发展纳米技术同时有很多拥护者和反对者。总结一下反对纳米技术发展的一些理由。

第 2 章 经典粒子、经典波和量子粒子



应用于电子的经典双缝实验产生的衍射图像

这一章简要总结一下经典(牛顿)物理中的一些概念,并介绍对于理解纳电子学很重要的一些量子现象。我们会讨论几个实验,它们显示了经典物理无法圆满解释光和物质的一些现象。然而,这些实验并非仅仅具有历史意义。它们表明了被称为量子粒子(涵盖光和电子的名称)的一些基本性质,实际上,这些实验中有些为新器件和新技术指明了方向。

2.1 经典系统和量子系统的比较

一个经典粒子是指我们认为是普通质点或物体,例如撞球、汽车或者子弹。显然,一个具有质量 m 的经典粒子在某一时刻 t 在空间中占据一个确定的位置, $\mathbf{r}(t)$ (这个位置指的多半是物体的质心)。例如,在直角坐标系中,一个粒子的位置可以写成:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{a}_x x(t) + \mathbf{a}_y y(t) + \mathbf{a}_z z(t) \quad (2.1)$$

这里 $\mathbf{a}_x$ 、 $\mathbf{a}_y$ 和 $\mathbf{a}_z$ 分别是沿 x 、 y 和 z 轴的单位矢量。如果这个粒子沿轨迹 T 运动,它具有确定的速度, $\mathbf{v} = d\mathbf{r}(t)/dt$, 如图 2.1 所示;而且这个粒子具有确定的动量 $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, 和确定的加速度 $\mathbf{a} = d^2\mathbf{r}(t)/d^2t$ 。注意在本书中,矢量用黑体字表示。

经典粒子遵循牛顿力学,

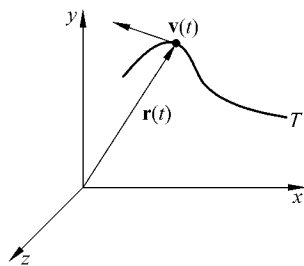


图 2.1 一个经典粒子的运动轨迹 T ;
粒子的位置是 $\mathbf{r}(t)$, 具有速度 $\mathbf{v}(t)$

$$\mathbf{F} = m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (2.2)$$

其中 $\mathbf{F}$ 是所受外力, 机械的或者是电的。在经典物理中, 原则上物理量如位置和动量能够被绝对确定地测量。利用(2.2)式, 理论上我们可以根据一组初始条件确定地求出粒子在未来所有时刻的轨迹。对于包含数百或者可能是数十亿个粒子的系统, 所有粒子通过碰撞和相互吸引与排斥而相互作用, 在理论上我们仍然可以求出每个粒子在空间和时间上如何运动。

对于在前面段落中“理论上”和“确定”的(过度)使用我们需要解释一下。其含义是指基于牛顿定律的计算在理论上是可以实现的, 但是这样做是非常困难的。举个例子, 考虑一个看起来简单的问题——在空气中抛一个球。对这一过程建模实际上是非常困难的, 原因在于(2.2)式中的力具有复杂并且经常是未知的形式。空气分子、污染、风、雨等都可以对球产生作用力, 使得实际上如果不采用简化的假设无法确定球的轨迹。比如说, 也许我们可以假设球和空气分子的摩擦忽略不计, 而且没有风和雨。这样, 也许就只有重力的作用。利用这些简化的假设而得到的方程就可以被容易地解答, 然而这样来简化问题是否模拟了物理的真实情况将是一个重要的考虑因素。

实际上, 很多刚刚被作为外力提到的因素可以被认为是其他粒子(例如空气分子和雨滴), 其结果是简化了牛顿定律中的外力一项, 不过代价是要追踪也许是数百万或者数十亿粒子之间的相互作用。然而, 如果有足够的计算能力, 问题是可以被求解的。一方面, 对于包含非常大量粒子的系统(如气体或者液体), 我们可以利用统计方法得到可测量的量如压强和能量的信息, 这些方法用容易处理的方式对粒子物理进行近似。

在这一节的第一段中, “确定的”这个词也被用了不少次, 也许用得太多以至于分散了大家的注意力。然而, 这实际上是这里的要点。经典物理的特征是能够精确地指出在某一瞬间一个粒子会在哪里, 会走多快^①。然而实际的运算也许是困难的或者实际上不可能完成的。

另一方面, 量子力学显示了非常不同的状况。简单地说, 量子力学宣称人们只能知道一个粒子在某一时间出现在某一位置的概率。它也告诉我们精确测量一个粒子的位置和动量是不可能的——不是操作起来非常难, 而是理论上就是不可能的! 例如位置测量得越精确, 速度就知道得越少。也许最烦扰人们的是量子力学认为根本就没有传统意义上的粒子。所有这些物体(撞球、子弹、电子等)通常都表现出和波动相关的性质和通常与粒子相关的性质, 即所谓的波粒二象性。在数学上, 这使得量子理论中的粒子具有一个相位成分, 下一章将予以介绍。

量子理论还有很多违背我们直观感觉的方面, 我们会在本书中讨论其中的一些内容。我们应该一开始就理解的量子理论的一个方面是量子理论是真正的概率理论。这与我们通常认为的大部分概率系统又有不同。我们以骰子的滚动为例。如果我们知道骰子的初始位置和动量, 骰子通过区域的空气性质和与之接触的平面的性质等等, 理论上我们可以确定在

^① 使用这个定义, 我们或多或少地掩盖了类似混沌效应这样的事情, 那样的系统经常是对初始条件太敏感以至于无法在实际的情况下给出答案。

骰子停止时哪一面将朝上。然而,人们会用统计方法(比如,六面骰子的任一面朝上的概率都是 $1/6$)来模拟这一非常复杂然而却是确定性的问题^①。

与此不同,量子力学产生的是真正概率性的量。这可能显示了一个真正概率性的现实,或者仅仅是确定性事实的一个概率化模型。当我们迎来量子理论诞生一个世纪的时候,关于这一点仍然有争论;不过,可以肯定地说量子力学是物理学史上最成功的理论之一。不考虑哲学的话,量子力学是目前模拟非常小(原子和纳米尺度)物体和器件的唯一途径。

2.2 量子力学的起源

关于量子理论的发展过程已经有很多精细的记述,这要部分感谢量子理论实际上是在距今比较近的 20 世纪初期形成的。简要地说,量子力学的形成源于 19 世纪末和 20 世纪初的一些无法用经典物理解释的实验。在这一章里,我们不会详细地论述量子理论的发展过程,不过我们将叙述几个导致量子理论形成的基本实验,特别是那些表明光和电子(实际上是所有物体)具有波粒二象性的实验。理解电子的波动性,即电子不是微小、坚硬和带电的小球,而是(也许不严格)局域化的能量束,对于理解纳电子学的基本原理是绝对必要的。

量子理论形成的关键在于 19 世纪 90 年代的一些实验,它们表明金属的比热和热的黑体辐射不能用经典热力学来解释。另外,在 1887 年赫兹(Heinrich Hertz)观测到后来被称为光电效应的现象。简要地说,如果光照到金属上,光携带的一部分能量可以传递给金属表面的电子,后者可能会具有足够的能量从金属中逃逸出来。经典电磁理论(在当时是一个相对比较新的学科)认为光是电磁波,而电磁波携带的能量只取决于它的振幅(或者说强度),与频率无关。因此,如果光确实是一种波动现象,实验应该显示光照激发的电子的能量随着光强的增强而变大。然而菲利普·雷纳德(Philipp Lenard)1902 年的实验表明情况不是这样。尽管随着光强的增强更多的电子发射出来,但是每个发射电子的动能并没有改变。而当光的频率增加(也就是波长变短)时,能量更高的电子从金属表面发射出来。因此,发射电子的能量正比于入射光的频率而不是光的振幅。

此外,如果光是波,在金属开始被照射到开始有电子发射之间会有一个时间间隔,因为波是连续地传递能量给电子,应该需要一定的时间来积累足够的能量从而允许电子的逃逸。然而情况并非如此,有时金属刚刚被光照射就有电子的发射。显然经典物理在处理这一相互作用时存在一些问题。

2.3 光的波动性和光的粒子性

上面提到,在包括光电效应在内的一些实验出现的年代,光普遍被认为是一种波动现象。在这里花些时间先简单地讨论一下这一认识状态的形成是很有意义的。

^① 当然实际上骰子本身也是一个量子物体,但是我们可以忽略这一点,因为它的质量相对较大。

2.3.1 早期的认识：光是粒子或者可能是波

毫不奇怪,对光的本质的研究已有很长的历史。最早关于光的叙述之一来自公元前 300 年左右的欧几里德(Euclid),在他的著作《光学》中,他提到光是沿直线传播的,并且描述了反射定律。在那之后很久的 17 世纪可以说在光学发展史上有特殊的重要性,当时对这一领域贡献突出的人物包括如 René Descartes、Pierre de Fermat 和 Robert Hooke 等人。在 1678 年,惠更斯(Christiaan Huygens)发展了相当完整的光的波动理论,非常成功地解释了当时所知的很多光学现象。然后,1704 年牛顿(Isaac Newton)在他的著作《光学》中,提出光是微粒子的观点,这主要是基于光表现为沿直线传播(而波可以在一定程度上绕物体弯曲),尽管他也讨论了一种光的波动理论。光的微粒说和波动理论二者看起来都可以用来解释当时知道的大部分光的现象,例如反射和折射。

2.3.2 稍后的认识：光是波

1801 年,杨(Thomas Young)完成了著名的双缝实验,通过演示干涉现象从而为光的波动理论提供了证据。这一实验是在他早期有关声波工作的启发下完成的,声波的相互干涉是广为人知的。为了领会杨氏实验的重要性,必须先理解干涉的概念。

干涉

显而易见干涉描述的是两个或更多实体之间的相互作用。先考虑我们熟悉的单位振幅平面波,可以表示成

$$\psi(z) = e^{ikz} \quad (2.3)$$

其中 k 是常数,称为波数(稍后会讨论); $i = \sqrt{-1}$ 是虚数单位; z 是位置坐标,在这里是波传播的距离。我们用符号 ψ 表示波,这是量子力学中的常用的标记法。

假设有两个平面波共存,如图 2.2 所示,用 ψ_1 表示的波自原点出发,而波 ψ_2 起源于 $z = -L$ 。波 ψ_1 到达测量平面的传播距离为 d ,而波 ψ_2 到达同一点则要经过距离 $L + d$ 。在测量平面所在位置,总的场 ψ_T (也就是两支波的加和)为

$$\psi_T = \psi_1 + \psi_2 = e^{ikd} + e^{ik(L+d)} = e^{ikd}(1 + e^{ikL}) \quad (2.4)$$

如果

$$kL = 0, 2\pi, 4\pi, \dots, \quad \text{则有} \quad |\psi_T| = 2 \quad (2.5)$$

而如果

$$kL = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots, \quad \text{则有} \quad |\psi_T| = 0 \quad (2.6)$$

也就是说,在那些两支波完全反相(即它们的相位差是 180° 的奇数倍)的点,两支波将互相抵消,这称为相消干涉。而在相位差是 180° 偶数倍的点,二者相加,其值加倍,这称为相长干涉。因此,依赖于距离 L ,两支波在测量平面可以有相消或者相长干涉,或者是介于二者之间。也可以通过向前和向后传播的波之间的组合来得到相长和相消干涉,例如吉他弦产生的振动波,

$$\psi_T = e^{ikz} + e^{-ikz} = 2\cos(kz) \quad (2.7)$$

或者

$$\psi_T = e^{ikz} - e^{-ikz} = 2i \sin(kz) \quad (2.8)$$

上式中利用了欧拉恒等式($e^{\pm i\alpha} = \cos\alpha \pm i\sin\alpha$)。

另外,多于两支的平面波或者其他形式的波也可以相互作用产生相长和相消干涉,一个常见的例子是肥皂泡产生的光干涉。

典型的肥皂泡薄膜的壁厚为几个微米。光从薄膜的上、下表面反射所经距离的差等同于图 2.2 中的距离差 L 。这样从肥皂泡上下表面反射的光就可以发生相长或者相消干涉。因为白光包含非常多的波长,在肥皂泡的任一点如果某些波长(也就是颜色)相长干涉,这些颜色就会加强。而在对应于一些波长相消干涉的位置,这些颜色就会被抑制。壁厚的改变和薄膜表面的其他不规则性会引起有趣的图案产生。

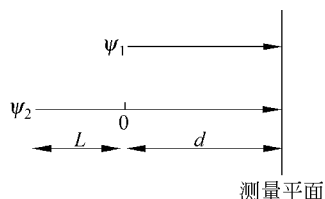


图 2.2 平面波传播不同的距离，导致相长/相消干涉

杨氏实验——波动说告诉我们什么

现在回到杨氏实验,想象在一个不透明材料(例如金属)的薄片上刻两个狭缝。单一频率(单色)的平面光波 ψ 垂直入射照在双缝上,如图 2.3 所示。

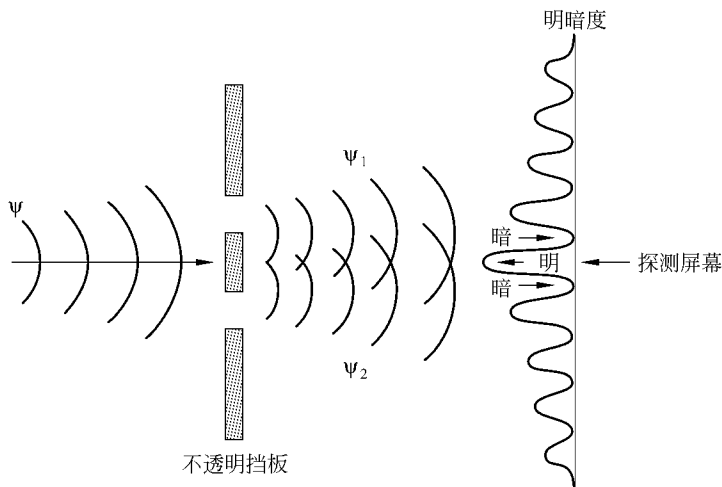


图 2.3 杨氏双缝实验。入射波 ψ 引发两个向探测屏幕方向传播的球面波 ψ_1 和 ψ_2 。产生的强度图案显示了干涉效应,这是波动行为的特征

根据惠更斯原理,每个狭缝将作为再辐射球面波的中心,球面波的频率和初始平面波相同。从狭缝 1(上狭缝)和狭缝 2(下狭缝)出射的球面波将分别用 ψ_1 和 ψ_2 标记,

$$\psi_j = A_j \frac{e^{ikr_j}}{r_j} \quad (2.9)$$

这里 A_j , $j=1, 2$, 是波的振幅(如果两个狭缝的尺寸相同, $A_1=A_2=A$), r_j 是从第 j 个狭缝到探测屏上给定点的距离。球面波 ψ_1 和 ψ_2 叠加,于是在探测屏上的任意一点有

$$\psi_T = A \left(\frac{e^{ikr_1}}{r_1} + \frac{e^{ikr_2}}{r_2} \right) \quad (2.10)$$

于是在狭缝后的屏幕(探测器)上形成干涉花样。也就是说,在探测屏幕的一些点上波 ψ_1 和 ψ_2 倾向于互相抵消,导致相消干涉,表现为平面上的暗斑。另一方面,如果波的叠加产生相

长干涉,屏幕上就出现亮斑。

屏幕上正对着两个狭缝中点的位置将表现为亮点,因为两支波到达这一点需要经过的距离是相同的。因此它们在这一点是同相位的。屏幕上特定的一点是明是暗取决于两支波传播到这一点的距离差。如果已知光的波长,就可以计算出明暗斑点的位置,不过这里我们略去这些细节。图 2.3 中示意的屏幕上的明暗条纹显示了干涉效应,这在当时似乎已经给出了光是一种波动现象的决定性的证据。1816 年, Augustin Jean Fresnel 给出了光的衍射和干涉的严格数学论述,表明这些现象能够用光的波动理论在数学上进行解释。不久之后的 1849 年,实验显示光在水中的传播速度慢于在空气中,这(在表面上看来)宣判了光的粒子说的死刑。当时光的粒子理论只有在假设光在稠密的介质(如水)中比稀薄的介质(如空气)中传播更快才能解释光的折射。所以,到 19 世纪中期,似乎光是波已经很清楚了。

大约在同一时期,电磁学理论的先驱们,例如 André Marie Ampère, Michael Faraday 和 Carl Gauss 正在建立电和磁的知识领域,这随着 James Clerk Maxwell(麦克斯韦)在 19 世纪 60 年代建立麦克斯韦方程组而达到顶峰。人们发现电磁波的速度和光速是相同的,说明光是电磁波。麦克斯韦方程组显示当系统的特征尺度和光的波长相当或者更小时光的波动本质就显现出来。当情况相反,即系统的尺度相对于波长来讲比较大时,光就表现为射线状的性质。这解释了为什么关于粒子说和波动说的争论在光学发展过程中持续了这样长的时间——在某些情况下,光确实表现得像粒子,至少像线状,沿着直线的轨迹传播;而在其他情况下,光却表现出波动性,显示出衍射。

这样,到 19 世纪末期,这个问题似乎解决了。一套完整的数学理论已经建立起来(电磁学),告诉我们光是波,而且解释了在高频时显示出的射线状行为。电磁理论继续发展,在 19 世纪 90 年代和 20 世纪初期, Heinrich Hertz, Guglielmo Marconi 和其他人开发了电磁波的通讯用途,产生了今天的广播、电话、电视和雷达,以及作为其他一系列的应用。然而就在人们认为关于光(和所有电磁能)本质的争论已经平息的同时,一场科学上的革命马上就将发生。

2.3.3 最终,光是量子粒子

在介绍光波动理论的问题之前,我们需要更为详细地考虑一下双缝实验,以及利用粒子进行的类似实验。

杨氏实验——单缝的情况

与前一节相同,假设单一频率的平面光波 ψ , 入射到刻有双狭缝的薄片上,如图 2.4 所示。不过,这一次我们考虑只有一个狭缝打开的情况。

如果开始时只有狭缝 1 打开,强度的图形 $I_1 = |\psi_1|^2$ 将显现在屏幕上,如图 2.4 中所示。类似地,如果只有狭缝 2 打开,则屏上显示 $I_2 = |\psi_2|^2$ 。然而如果两个狭缝都打开,我们会得到前面图 2.3 所示的(干涉)强度花样 $I = |\psi_1 + \psi_2|^2$, 这和 $I_1 + I_2$ 不同。注意,一般来说,

$$|\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 \neq |\psi_1 + \psi_2|^2 = |\psi_1|^2 + |\psi_2|^2 + 2\text{Re}(\psi_1^* \psi_2) \quad (2.11)$$

其中 ψ^* 是 ψ 的复共轭, $\text{Re}(z)$ 表示取复数 z 的实部。这样当取波函数的绝对值时,其相位信息就丢掉了。从而,由于干涉效应是所涉及的两个波的相位差引起的,因此 ψ_1 和 ψ_2 需要

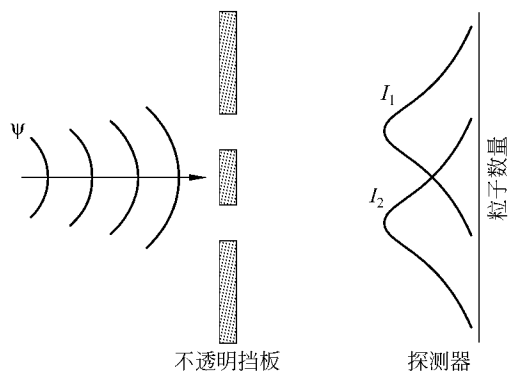


图 2.4 杨氏双缝实验的改进, 只有一个狭缝打开。强度的空间分布图 I_1 是在狭缝 1(上狭缝) 打开而狭缝 2(下狭缝) 关闭情况下得到的; 强度分布 I_2 则对应于狭缝 1 关闭而狭缝 2 打开

先加和然后再取绝对值才能得到正确的结果^①。到目前为止一切都还是正常的。

杨氏实验——经典粒子的情况

现在考虑同样的实验, 不过使用的是经典粒子。在远离双狭缝的左侧, 一个发射源以不同角度但是相同的能量向狭缝发射粒子。探测屏幕现在是由密排的粒子探测器组成的阵列, 屏幕上任一点粒子束的强度将是每秒到达那一点的粒子的数目。图 2.5 显示了这一情况。

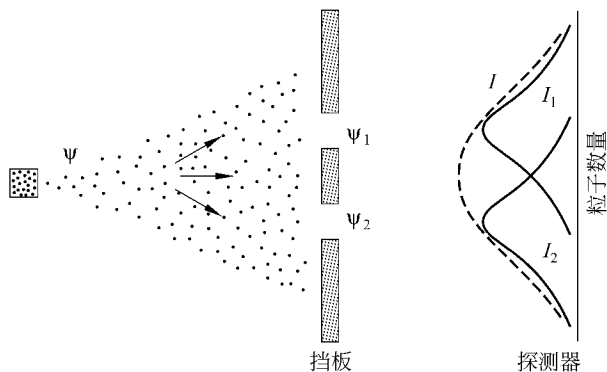


图 2.5 经典粒子的杨氏双缝实验, 当只有一个狭缝打开时, 我们得到强度分布 I_1 或 I_2 , 当两个狭缝同时打开的, 我们得到了图中虚线所示的强度分布 $I = I_1 + I_2$

当只有一个狭缝打开时, 我们得到强度分布 I_1 或 I_2 , 这重现了图 2.4 所示的相似的波动实验的结果。而当两个狭缝同时打开时, 对于经典粒子, 我们预期的强度分布将仅仅是 $I_1 + I_2$, 如图 2.5 中的虚线所示, 因为每个粒子沿一定的轨迹运动, 将会穿过两个狭缝中的一个(或者当它们不是射向狭缝将被弹回去)。到底一个还是两个狭缝打开对于任一给定粒子来说并不会有任何不同。

粒子束可以是足够的稀疏, 这样在任一时刻就只有一个粒子穿过狭缝, 所以粒子之间不

^① 举个简单的例子, 考虑两个平面波 $\psi_1 = e^{ikz}$ 和 $\psi_2 = e^{-ikz}$ 。于是, $|\psi_1 + \psi_2| = 2|\cos(kz)|$, 表明在一定位置 z 有相长和相消的干涉。然而, $|\psi_1| + |\psi_2| = 1 + 1 = 2$, 这与位置无关。

会互相干扰(碰撞)。同样,到目前为止,一切都还是正常的。

杨氏实验和光子的概念——再一次来看光,但这一次考虑缓慢的情况

有了以上的准备,现在我们再重新考虑光的双缝实验。这次我们不再只是简单地观看放在狭缝后面的屏幕上的明暗斑点,我们用光学探测器对到达的光能记数。当只有狭缝 1 打开时,我们降低入射光的强度。如果光强降得足够低,那么可以使任一时刻都只有一个探测器被激活,我们将发现能量并非是连续地到达,而是以离散脉冲的形式,这显示了光的粒子态的本质。(我们一般不能注意到它们的离散特性只是因为这些能束通常是以非常快的速率到达的)

在 Lenard 光发射电子能量实验的前几年,Max Planck(普朗克)已经成功解释了黑体辐射,他假设黑体发射出的能量是量子化的(即能量是以离散的单位发生的)

$$E = hf = \hbar\omega \tag{2.12}$$

其中 f 是频率(ω 是角频率, $\omega = 2\pi f$), h 是一个常数(现在称为普朗克常数)

$$\hbar = h/2\pi \tag{2.13}$$

$$h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$\hbar = 1.0546 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

1905 年,Albert Einstein(爱因斯坦)解释了光电效应,他把普朗克的量子化理论应用于所有的电磁波,并且第一次描述了我们现在所说的光子。有意思的是,爱因斯坦是因为对光电效应的解释获得了 1921 年的诺贝尔物理学奖,而不是因为他同样在 1905 年提出的相对论。

于是光的离散特性现在被认为是量子化的电磁波,称为光子。对于采用非常低强度光(非常稀薄的光子流)的光子的单缝实验,随时间的持续如图 2.4 中所示的强度分布会显现出来。这样我们又回到了光的粒子理论。

杨氏实验——一个涉及干涉的非常奇怪的结果

现在让两个狭缝都打开,并且用非常弱的光强,即在给定的任一时刻只有一个光子出现(和经典粒子实验的情况相同)。我们来记录探测器的输出随时间的累积,如果光子表现出经典粒子的属性,产生的强度分布应该是简单的 $I_1 + I_2$,就像图 2.5 所示的经典粒子的结果。不同的是,我们发现产生的强度分布显示了如图 2.3 所示的干涉效应,即观察的强度分布对应于基于波动理论的图形! 这一观察表明光子不是经典粒子。光子一个一个地通过狭缝,但是却以某种方式在这一过程中与其自身发生了干涉。对于以日常经验来理解光现象来说,这无疑是一种相当坏的情况。

也许最令人费解的是,考虑某一点由于干涉而具有最小值,那么如果只打开一个狭缝将会有比两个狭缝同时都打开时更多的光子到达这一点。因为光的强度弱到每次只有一个光子通过狭缝,如果光子真的是粒子,那么多打开一个通往探测器的通道是不可能减少到达某一点的光子数目的。所以我们最后得到的结论是光表现出类似波和类似粒子的行为,但是它显然既不是经典的波也不是经典的粒子——我们称之为量子粒子。在某种意义上,人们必须接受光是独一无二的;光只具有属于“光”本身的性质。也就是说,光^①并不能被类比于某个我们日常生活中熟悉的事物,这使得关于它的阐述总是有些困难和不圆满。不过,

^① 这里光代表所有的电磁能(无线电波、可见光、X 射线等),它们都是同一类现象,只是振动的频率不同。

在通常情况下,知道了前面讨论中介绍的一部分光的性质,就足够来解释实验和预测结果了。

2.4 电子的粒子性与波动性

2.4.1 早期的认识:电子是粒子

尽管电荷的概念在有历史记录开始不久就已经出现了,但是直到19世纪初原子的存在才被确认。开始时人们普遍认为原子是不可再分的粒子。作为原子组成部分的电子的概念,最早是在19世纪末由John Joseph Thomson(汤姆森)实验建立起来的。之后不久,在20世纪初,Robert Millikan(密立根)测量了电子的电荷。因此当光电效应令科学家们感到迷惑的时候,电子的概念实际上还是相当新的。

在电子和原子结构的概念出现的时候,电子自然而然被简单地认为是非常小的带电粒子。利用这一模型取得的早期成功例子之一是预测金属的电导率,即所谓的自由电子气模型^①。实际上,稍后这一经典模型在本书中也会有一定程度的应用。不过,光的量子化也引发了其他现象量子化的可能性。

2.4.2 晚一些时候:电子(和其他所有东西)是量子粒子

光是由光子组成这一事实引导Louis de Broglie(德布罗意)在1923年提出了根本性的假说:所有具有能量 E 和动量 p 的“粒子”也应具有类似波的性质。他提出与每个具有动量 p 的粒子相对应的波具有波长(现在称为德布罗意波长)

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (2.14)$$

于是

$$p = \hbar \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \quad (2.15)$$

其中 k 是波数。当应用于物质时,例如电子,这类波被称为物质波。德布罗意的预言在1926到1927年被Clinton Davission和Lester Germer关于电子的实验(有些意外)所证实,他们使用了晶体衍射(不是双缝)技术。实际上,尽管利用电子来进行类似双缝实验被讨论了很久,但真正成功的实践,即单一时刻只有一个电子,直到20世纪70年代才实现。这些实验在20世纪80年代又以更高的精度重复出来。图2.6中的实验演示了利用非常稀薄的电子流得到的电子衍射干涉效应。图2.6中的(a)~(d)显示了记录电子随时间增加的变化。开始时,探测到的电子图案看起来是没有规则的。随着时间的延长,看起来随机分布的电子开始形成清晰的衍射图案,这和前面讨论的光子的情况是完全相同的。由于在实验中电子是每次一个地通过双缝,显然电子一定和它自身发生了干涉。

^① 欧姆定律指出,对于很多材料通过材料的电流正比于外加的电压,即 $I=V/R$,其中 $1/R$ 是比例常数。这一定律是在很早以前大约1827年前后发现的。

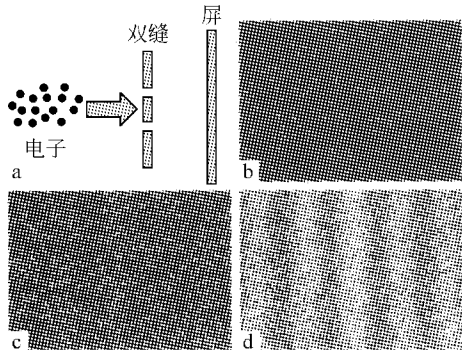


图 2.6 电子衍射中干涉效应的实验演示。(a)~(d)显示随着时间的延长,开始时随机分布的电子逐渐形成了一幅衍射图案

注意能量的量子化,即 $E = \hbar\omega$ (其中 E 是总能量,动能加上势能),同时适用于物质波和光子。由于动量实际上是一个矢量,一般的表示为

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k} \tag{2.16}$$

我们之所以无法看到日常事物表现出波动性是因为普朗克常数是一个小量,见(2.13)式。对于质量为 m 的物体,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \tag{2.17}$$

可以看出,由于 h 极小, m 必须非常小才能获得一个足够大的波长从而使我们观察到它和我们感兴趣的物理系统发生的波状相互作用。例如,为了观察到纳米尺度的波动效应,我们需要 $\lambda \sim \text{nm}$, 这对于电子或者其他极端轻的亚原子粒子可以发生,但是一般来说对重的粒子不适用。实际上,要观察到重于电子的粒子的波动性通常都是困难的。例如,考虑一个质量为 1kg 并以 1m/s 速度运动的物体,其德布罗意波长为

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{Js}}{(1\text{kg})(1\text{m/s})} = 6.6 \times 10^{-34} \frac{\text{Js}^2}{\text{kg m}} = 6.6 \times 10^{-34} \text{m} \tag{2.18}$$

这与可观察的波动现象要求的波长相比实在是太小了^①。特别是,当 λ 和势能发生改变的距离相比很小时,量子粒子表现出经典的行为(量子效应太小了无法被观测到)。实际上,经典物理的很多方面可以通过在量子理论得到的各种表达式中设定 $\hbar = 0$ 来得到(注意: $\hbar = 0$ 把能量和频率分离开来)。于是, 1kg 质量的物体实在太重了从而无法观察到它的波动效应,所以它表现为经典粒子。然而,如果质量是 10^{-31}kg , 则可得 $\lambda = 6.6 \times 10^{-3} \text{m}$, 其波动效应在毫米尺度的体系中将是可观测的。到目前为止,已经观测到波动效应的物体从亚原子粒子(例如电子)到比较重的 2nm 的分子。

作为比较,能量为 1eV 的光子的波长是^②

$$\lambda_p = \frac{hc}{E} = 1.24 \mu\text{m} \tag{2.19}$$

① 前面提到,波动效应(例如衍射)在波长和所讨论的系统的特征尺寸在同一量级或更大时是最容易观察到的。
② eV 即电子伏特。一电子伏特是一个电子通过 1 伏特电势差所获得的能量。因此, $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$ 。