第一章　绪论

本章提要：指明“光学”的内容和它在学术上、应用上的重要性.扼要介绍光学学科的发展简史，包括我国古代在光学方面的贡献以及人类对于光的本性的认识的深化过程，特别是20世纪以来光学所取得的巨大成就.指明“光”是一种频率极高的电磁波，具有一定的能量和动量；但是，它具有一般的无线电波所不具有的特殊性，例如它的产生和检测，以及与其他物质相互作用等过程中显现出粒子性的特征.这类特殊性使“光学”成为一门独立的学科，并使人们产生了对其进行深入研究的兴趣.近年来由于激光的出现，光学呈现出蓬勃发展的崭新局面，对物理学和其他基本学科以及整个国民经济都产生了巨大的影响，因而使光学成为一门极为重要的学科.

§1.1　光学是一门重要的学科

光学是物理学中的一门重要的分支学科，它具有渊远的历史和丰富的积累，并正在迅速发展.人类认识世界是从感性到理性，而感性认识是客观世界通过眼、耳、鼻、舌、身这五个感官反映到人的头脑中形成的.位于这五官之首的是眼，据统计，人们的信息有90%是通过视觉来获取的，而视觉的产生必须借助于发自物体的光.因此，人类对于光的研究开始得很早.从原始时代起，人们就注意观察自然界中各种变幻无常的光学现象，并不断地总结蕴藏在其中的物理规律.随着生产力的发展和科学技术的进步，光学科学与技术也获得相应的进展，人们创造出了许多巧妙的光学仪器和光学工具，扩大了自己的视野并实现了比较精确的定量计量.今天，光学在应用技术方面的发展已成为一个国家国民经济建设和军事国防建设中的重要环节，成为衡量这个国家先进程度的主要指标之一.有些科学家还预言，21世纪的科学技术将以“光电子学”或称“光子学”为主要支柱，可见光学在今后发展中所占有的重要地位.

从历史的发展过程可以看到，光学的进展是与物理学其他分支学科的进展相互交织在一起并相互促进的，这在近代物理学的发展中更是如此.在20世纪初的一场从经典物理学发展到近代物理学的重大变革中，光学现象及其规律的研究起了关键性的作用.例如关于黑体辐射能量的光谱分布、光电效应、光的干涉现象中光强分布可采用概率观点来分析等等，都是通过对一些基础的光学现象作深入而精辟的分析，发现其与一些当时公认的物理学原理不相容，从而导致

了物理概念上的巨大突破.产生这种现象的原因之一，正在于当时人们对于光的物理本性的认识不够全面和完善.当然，到目前为止，我们仍然不能认为对于光的本性的认识已经达到了臻尽彻底的境地.在 20 世纪 60 年代，激光出现以后，人们观察到众多以前未能观察到的崭新的光学现象与过程，其中尤以激光与物质的相互作用等过程最为突出并引人瞩目.由于激光本身发展的需要以及它在其他学科中应用的进一步开拓，必然会促使人们要求进一步深化对光的本性的认识.这方面的研究属于所谓“量子光学”的范畴，虽然它属于基础性的理论研究，但却是光学发展的主导方向，备受人们的重视.

随着人们对光学现象本质认识的不断深化，光学的研究成果在工业、军事及其他高技术方面的应用也不断发展.除了经典的光学仪器例如望远镜、显微镜、光谱仪、干涉仪等在国民经济中的应用越来越广泛以外，光学技术，特别是激光技术的应用近年来也有极大的发展.最为人们熟知的就是利用光波作为信息载体的光纤通信.由于光波频率远比无线电波（包括长波直到微波）高，因而可以载容更多的电视、电话通道；而光纤材料（主要是二氧化硅）在地球上的含量又远比电缆（主要是铜）多，因而不必担心资源的枯竭.光纤通信已在我国大部分地区正式投入运行.利用激光的高能量可以使氘和氚核产生聚变，这是通过受控核聚变以获得新能源的一个很有希望的方法，目前世界上只有少数几个先进国家在进行这一研究工作，我国就是其中之一.利用激光优良的方向性，可以在造船业、建筑业上进行准直和丈量；在军事上则可以进行测距和制导.由于激光可以拥有极强的电磁场，物质的非线性光学现象就会十分容易地显现，这些非线性现象有极为重要的应用，例如利用所谓光学双稳现象，可以制作光开关，这类光开关的启动功率极微而启动时间极短，因而可以在光计算机中作为主要的组件，而光计算机则是目前十分引人注意的发展方向，因为以光作为信号进行运转可以使计算机的耗能更低、速度更快并减少交叉干扰.此外，利用光波频率稳定的特性，可以把光的频率作为时间的计量基准，从而可以把长度计量和时间计量这两个以前独立的计量基准统一在一个基本的物理常量上，也就是统一在真空中的光速 c 上（公认光速具有无误差的准确值为 299 792 458 m/s）.由于原子发光的频率只与原子所处的能态有关，因而对光波频率的测量可以达到极高的精度而且容易重现，所以上述定义已在 1983 年为国际度量衡委员会所确认（详见附录五）.

总之，光学不仅作为基础性的学科而有其本身的学术性，而且它还具有极强的应用性；它的进展和成就已经和必将在科学进步和国民经济的发展中发挥越来越大的作用.

§1.2 我国古代光学方面的成就

我国古代对于光学现象的观察和总结有十分辉煌的成就，较为系统的论著可见北宋时代我国科学家沈括（1031—1095）的名著《梦溪笔谈》.当代英国科学家李约瑟（Joseph Needham,1900—）在他所编著的《中国的科学与文化》中，也详尽地介绍了我国古代在光学方面的成就，并指出有些成果比西方国家所记载的早数百年之多.

《梦溪笔谈》中记载了战国时代的哲学家墨翟所著的《墨经》中,有关于"针孔成象"现象的叙述.墨翟记载了他所观察到的一个有趣的光学现象：如果有一只野雁自东向西飞越他的茅屋上空，则通过茅屋顶上的漏光小孔，可以在较暗的屋内地面上看到这野雁的影象（图 1-1），并且这影象的运动是自西向东移动的.墨翟的描述中实际上包含着对光的直线传播这一表观事实的认识.可以看到在2 500多年前的我国古代学者是何等仔细地观察了这些光学现象，并经过分析而获得了正确的基本光学原理，这确是值得骄傲的辉煌成就.

与墨翟同时代的另一哲学家淮南子成功地发明了用以取火的器皿"阳燧",这在《梦溪笔谈》的第 44节中有详细的介绍.阳燧的表面呈微凹，当它在适当的距离下，面向某一物体时，就会产生该物体的倒象；当它面向太阳时，则由于使太阳光汇聚成一个小点而可以取火.所以"阳燧"实际上是古代的一块凹面反射镜，阳光汇聚的那一小点，就是这反射镜的焦点.关于我国古代反射镜的成就,在《梦溪笔谈》的第 327节中还有进一步的描述.他指出我国在 11 世纪时对铜镜的铸造工艺和技巧已经十分熟练，发现了大面积的铜镜在浇铸后的冷却过程中呈微凹面，而小面积的铜镜则在冷却后镜面呈微凸面.凸面镜会形成缩小的象而凹面镜则会形成放大的象.为了适合古代仕女们的妆饰需要，古代匠人可以铸造不同尺寸和适当凸度的镜子，以迎合使用方便以及成象合适的需要.从这一记载中可以看到，我国古代对于反射镜的成象性能已有了较深入的了解，并且已经初步掌握了其中蕴含的光学规律.

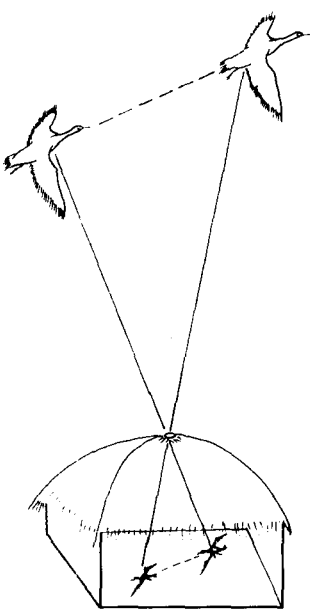

图 1-1 "茅屋雁影"示意图

除了上述在光学原理和成象技术方面所获得的令人信服的卓越成就以外，

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

其他成就如日、月食的起因和预报等等，也都是十分重要的贡献.这些都是在我国古代书籍中有详细记载而为国际所公认的.但是由于我国历代封建王朝的数千年统治，把科学与幻术混为一谈，认科学为邪术，从而抑制了它的持续发展，所以虽然我国在古代已经对若干光学现象作出了合乎逻辑的正确解释，却未能形成系统的研究，以至近代反而远远落后于西方世界.

§1.3 20世纪前的光学发展简史

根据记载，古希腊时代的哲学家在公元前300年也已经认识到光的直线传播特性.但是，光学学科的形成及其系统化的建立，则是从17世纪以后才开始的.在这一时期中创立了关于认识光的本性的学说，其中以光的微粒说和光的波动说这两种学说最为重要，而它们之间的争论一直持续到20世纪初.

光的微粒说的代表是英国科学家牛顿（Issac Newton,1642—1727),他认为光是发光体所射出的微小粒子，所以是沿着直线行进的.这种学说只要假定光在水中的速度比空气中大，就可以很容易地解释光的反射和折射现象.光的波动说以荷兰科学家惠更斯(Christian Huygens,1629—1695）为代表，他认为光是一种称为“以太”的介质的快速振动.当以太受到光照而振动时，每一个以太点可以作为新的振动中心而向四周传播球面次波，这些次波组合后所形成的包络面是下一瞬间的新的波前，这就是著名的“惠更斯原理”.按照这个原理，波动说也顺利地解释了光的反射和折射定律，但却得出光在水中的速度应小于它在空气中的速度的推论.由于当时无法测定光的速度，也由于牛顿在力学研究方面的卓越成就和权威，光的微粒说在17世纪始终占有上风的地位.从17世纪末到19世纪初期，发现了一些光的微粒说不能很好解释的光学现象，例如薄膜的彩色图案、方解石晶体产生的双重象等等；相反，光的波动说却有了一些新的进展.1802年，英国科学家杨(Thomas Young,1773—1829)利用波动说确切而完善地阐明了光的干涉现象，并对薄膜产生的彩色图案作出了解释，使光的波动说又前进了一步.1818年，法国科学家菲涅耳(Augustin J.Fresnel,1788—1827）参加了巴黎科学院征求关于阐明光的衍射现象这一有奖问题的辩论并获得胜利，使光的波动说开始为大多数学者所接受.菲涅耳以光的波动说为基础，把杨氏干涉的思想与惠更斯原理相结合，解释了在圆孔、直边、狭缝等物体边缘存在的光的衍射现象.菲涅耳的理论还完满地解释了光波的直线传播的性质.并且，最为奇妙的是根据菲涅耳的理论进行计算，可以预见在一块不透明圆板的阴影中心仍然有个亮点，实验证实了这一似乎不可理解的结论，从而使光的波动说获得最终的确认.

菲涅耳进一步研究了光通过方解石晶体后所产生的两束光（即双重象）之间不能产生通常的干涉现象的实验事实，因而认识到光波不是像声波一样的纵波

而必然是一种横波；并且确认由方解石所产生的两束光具有不同的（正交的）偏振态.菲涅耳由此又进一步建立了一整套以“以太”振动维持横波性传递的理论，推导出两种不同偏振态的光波在界面上反射、折射的光强与入射角之间的关系式，即著名的菲涅耳反射、折射公式.这一理论解决了光波在一些非均匀晶体中传播的问题，并在以后被许多学者进一步完善而称为光的“弹性以太理论”.该理论虽然在19世纪的中期曾经获得过相当的成功，但是作为光波传播介质的以太，还是存在着一些令人困惑的疑点.例如该理论假定以太必须充满整个宇宙，而且物质中的每一点都被以太所占有；由于巨大的光速，以太应该有极大的切变模量，但是任何物体，包括宇宙中高速运动的星系，却可以在以太中毫无阻力地运动而不受影响等等.

对于光的本性的进一步认识，即光是一种电磁波的认识，是在19世纪末才建立的.当时，物理学中的另一分支学科——电磁学已发展得十分成熟，建立了一些正确的定律和定理，例如安培定律、毕奥－萨伐尔定律、法拉第定律等等，以描述电场和磁场的规律.英国的科学家麦克斯韦（James C. Maxwell，1831—1887）总结了这些规律，并考虑到电场和磁场之间具有一定的相似性，从而导出了一组关于电场和磁场的时空变化方程式，这就是著名的麦克斯韦方程式.这组方程式表明，变化的电场和磁场将以波的形式向周围传播，它在介质（包括真空）中的传播速度可以由该介质的电学和磁学常量予以确定，通过计算，电磁波在真空中的传播速度恰恰与光波的传播速度一样，因而麦克斯韦设想光波应该就是电磁波，而电磁波是横波.经过多次间接和直接的实验验证，确实肯定了这一判定，人们才终于认识了光是电磁波中的一种.根据实验确定的光波波长以及光的传播速度（在真空中约为 3×10^{8} m/s），计算出光波的频率应在 10^{15} Hz 的量级，这比一般的无线电波的频率要高很多很多.总之，到19世纪末，人们认识到光是一种具有极高频率的电磁波，以极快的速度传播，在其传播过程中所产生的各种现象，如干涉、衍射、偏振等，都可以按照光的电磁理论获得正确的解释.然而，电磁理论仍然假定了“电磁以太”的存在，有关以太的许多疑点还是没有得到解决.

§1.4　20世纪若干重大进展摘要

20世纪初期是物理学取得划时代进展的年代，这种进展的标志是相对论和量子论的建立，而在这两个理论的诞生过程中，光学仍然扮演着极其重要的角色.

用光学方法来测量地球相对于“以太”的运动速度的迈克耳孙－莫雷实验得到的零结果，对爱因斯坦（Albert Einstein，1879—1955）建立相对论起了重要的佐证作用.按照相对论，“以太”的引入是不必要的，电磁场本身就是物质存在的一

种形式，它可以在真空中以波的形式传播.对于原子光谱结构的研究，以及对于黑体辐射能量的光谱分布的研究结果，都与传统的物理概念发生了冲突，从而导至能量“量子化”概念的产生，也就是说，必须考虑一个物理系统的能量状态不是连续地变化而是以某一最小能量为单位作跳跃式的变化，这一最小的能量单位称为“量子”，这一概念是由德国科学家普朗克(Max Planck,1858—1947)首先提出的.由此可以看出，当时对于一些光学现象中发现的矛盾所进行的仔细的分析，对突破传统的概念而创立相对论和量子论起到了重要的作用.

关于光子的概念是由爱因斯坦进一步明确和完善的.1905年，爱因斯坦研究了金属表面受到光照而发射电子的现象，发现所发射电子的数目不依赖于光照的强度而只依赖于入射光的频率.即使入射光强很弱，但只要光的频率足够高(例如紫光),光电子仍然会瞬即产生.若光的频率比较低(例如红光),则不论光有多强，仍然不会有光电子逸出.这种现象暗示，光波的能量似乎集中在一些小粒子中，而这些小粒子的能量只与光的频率有关，与强度无关.爱因斯坦把这种小粒子称为“光子”，并指出光在光电效应中，是以光子的形式作用在金属表面上的，与它在传播过程中所表现的波动形式不同.这类反映光的粒子性的现象，还可以在光化学反应等光与其他物质相互作用的过程中出现.由此认识到,光除了具有波动性以外，还具有粒子性，即光具有波粒二象性的特征.科学的进一步发展证明，波粒二象性是一切微观粒子所共有的属性，这种对微观粒子的认识构成了量子力学的基础.

所以，对于光的本性的正确和全面的认识应该是：光既有波动性又有粒子性；光在传播过程中所产生的各种现象，可以用波动理论予以阐明；光与其他物质相互作用而涉及到能量交换的过程，必须考虑光的粒子性，而应该用量子力学的理论来处理.

在量子力学以及量子电动力学的基础上，光学学科的理论结构显得更为坚实.但是在20世纪30年代左右，光学仍与其他的物理学分支学科一样，并没有发掘出具有深远影响的新的现象和相应的理论.不过仍然有一些值得一提的有趣的成果，它们是美国科学家迈克耳孙（Albert A.Michelson,1852—1931)创建了天体干涉仪，并用以测量了宇宙中双星的张角；瑞典科学家采尼克（F.Zernike,1888—1966）发明了相衬显微镜，得以观察不染色而仍存活的细胞及透明的细胞质.从表面上看，上述两种创造发明似乎都是属于光学技术方面的成就，但是实质上，它们蕴藏着对于光的波动性的深刻理解，因为这两位科学家都是利用了光波中的相位关系才获得了成功，而相位关系正是表征光的波动特性的一个重要参数，只有充分地理解它才能很巧妙地利用它.

关于光波相位的重要性还可以从1950年英国科学家伽博（Daniel Gabor,1900—1979）发明全息照相技术中得到佐　.伽博考虑到光波在物体上经反射和

散射后，改变了它的振幅和相位，携带了该物体的信息，组成了一个新的波面而被接收或检测.所以，如能把这个新的波面（包括振幅和相位）设法在照相感光乳胶上记录下来，并在以后用特定的光照使之再现，那么便可以接收或检测到构成这个波面的物体的全部信息.因此,即使这物体被移去,如用眼睛观察,仍然可以看到位于原来位置上的这个物体的立体图象.这种方法又称为‘波前重建”,伽博进行了十分仔细而巧妙的实验研究，成功地摄制了包括光波强度与相位信息的全息照片.但是由于当时实验条件的限制，在应用方面不太容易开发；直到60年代初期，激光的出现使制作优质的全息图变得很容易，从而使其得到迅猛的发展并为大家所共知.

20世纪50年代末到60年代初期，光学取得了突破性的进展，这就是激光的研究获得了令人振奋的成功.激光的出现不但引起了光学革命性的发展，冲击了整个物理学，并且对其他的学科如化学、生物学和技术学科以及应用学科如电子和电机工程学、材料科学、医学等等都产生了巨大的影响.

激光是‘受激辐射光放大’的简称.物质的发光过程有两种，一种称为自发辐射，另一种称为受激辐射.1917年爱因斯坦根据物质发光与吸收必须符合能量守恒的基本原则，预言除了大量自发辐射以外还必然存在着少量的受激辐射，并且这种受激辐射还会进一步引发同类的受激辐射，因而可以获得受激辐射被增强的效应.从那个时候开始，科学家们多次企图在原子发光的实验中验证受激辐射的存在，但是要从大量的自发辐射中区分出只含万分之几的受激辐射确实是十分困难的，所以始终未能获得成功.

在第二次世界大战时期，由于军事上的需要而开展了低噪声信号放大器的研究.这项研究在战后仍然受到重视，并且在50年代末制成了“微波量子放大器”(俗称脉泽,Maser).它把在微波波段比较容易产生的受激辐射，反馈到一个尺寸与微波波长相当的闭合的谐振腔内，从而获得了低噪声的放大信号.因为这是由无线电电子学的研究人员，利用量子力学概念进行的创造性工作，所以取名为‘量子电子学”,而这一名称后来也被沿用到激光上.

微波量子放大器的成功，促使科学家们考虑把这种方案推进到可见光波段的可能性.1958年美国科学家通斯（Charles Townes,1915—）及苏联科学家巴索夫(Nikolai G.Basov,1922—)、普洛赫洛夫(Aleksandr M.Prokhorov,1916—)相继发表了实现这种可能性的设想.通斯提出，在可见光波段的谐振腔大小并不一定要与光的波长尺寸相当，因为这样小的谐振腔是难于制造的，但是可以允许一个驻波在较大的腔内谐振.此外，对于光的反馈系统，可采用具有高反射率的光学反射镜来实现.经过几年的探索，终于在1960年首次实现了在红宝石晶体中的脉冲式深红色激光的输出（图1-2);在1962年又成功地研制了具有连续红色光束输出的氦氖气体激光器.此后，在可见光波段产生受激辐射的研究迅速发展，对于

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

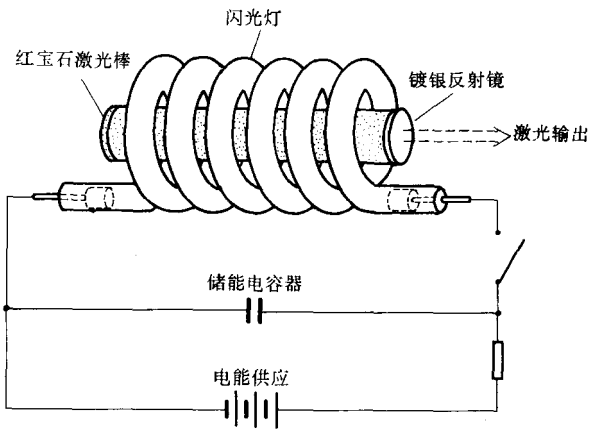

图 1－2　原型红宝石激光器的结构

激光的机理以及实验条件方面的认识也逐步全面和深化，并且开拓了激光在各方面的应用，为光学开创了一个蓬勃发展的新局面．有趣的是，当人们熟悉了怎样产生在可见光波段的激光以后，竟然发现满足激光产生的实验条件早在 20 世纪 40 年代已经达到，只是当时并未考虑到利用反馈以增强信号的输出，而反馈的概念在无线电电子学中是早已被广泛利用了的．可见各个学科之间的交流与合作对于科学技术的发展是多么重要．

激光虽然也同样是光波，但由于它是受激辐射，其产生的方式与自发辐射不一样，所以必然有它的特殊性．激光的特殊性表现在它具有极为优良的单色性与方向性以及具有极高的亮度，这是一般光束无法与之比拟的．所谓单色性好是指光的色泽极纯，也就是光束中各光子的能量几乎相等，这一优点使激光与其他物质相互作用时，能量交换的过程单一化，从而使结果更容易处理和分析．所谓方向性好是指光束的发散角小，因而可以传播很远而仍保持光能量不被耗散掉激光单色性及方向性的极为突出的优点保证了光束具有高亮度．亮度是指发光光源在单位立体角、单位能量间隔中所包含的光能量，高的亮度表示可以使具有巨大的单一能量的光束作用在很小的范围内，例如可以使上亿瓦特的单色光功率作用在平方微米量级的面积内，这在激光实现以前是不能想象的．

激光问世已经有 30 多年的历史．目前，可以获得的激光波长分布在从远红外到真空紫外的广阔范围内，并正在向 X 射线波段推进，某些激光器的输出波长还可以进行微量的调节以适应各种实际需要；输出的功率可以从 10^{-6} W 到 10^{14} W 产生激光的物质，除了气体、固体以外，还有液体、半导体材料，甚至还可以在自由电子束的运动中发生；激励激光的能量可以是电能、化学能、核能等等．当前，新的技术还可以使激光的脉冲压缩到只有飞秒（10^{-15} s）的量级，因而可以

研究各种超快速演变的瞬态过程，例如在化学反应过程中，可以检测到寿命极短的中间产物的生成与消亡的整个过程，所以这种研究必将带来对事物演变全过程的崭新的认识.

正如前面所提到的，由于激光具有优良的单色性以及可以获得超短的光脉冲，所以人们利用激光对经典的原子、分子光谱学的数据进行了重新测量而获得更高的精度，此外还发展了一些新的光谱学方法，形成了光学中新的子学科，即“激光光谱学”.激光光谱学的特点是高精度、高频域分辨与高时域分辨.它是当前研究原子和分子物理的重要的手段.另一方面，由于激光具有相当高的单色亮度，也即既有极纯的频率又有极高的电磁场强度，所以当它与物质相互作用时，会产生一些非线性的现象，例如光的倍频效应，光的双稳态开关效应等等.这方面的研究形成了另一门子学科，即“非线性光学”.非线性光学是当前发展着的许多光学新技术的基础，是极为重要的研究前沿.

激光出现以后也带来了许多光学新技术的开拓，例如光纤通信、光计算机、集成光学以及光电子学等等.所有这些新技术目前都在迅速发展，并且在各种通俗的科学报导上都可以获得它们前进的信息.

激光光束的优异性能，引起了对光的本性研究的进一步深入.当然并不是否定光的波粒二象性的本质，而是研究激光与一般光波不同的光子统计分布的规律，研究光束中的光子存在聚簇性现象的原因，研究量子力学描述光束的所谓“相干态”,以及激光所特有的‘压缩态’等等,这些研究都对光的本性的认识提供了更为丰富的内容，并且随着激光和光学的发展，人们对于光的本性的认识还会不断提高.

最后应该指出，在激光的研究和应用开发中，有大量的华裔科学家作出了杰出的贡献；我国国内，在激光与光学理论和技术的研究上，也已经接近并部分达到了国际先进水平.可以肯定，我国激光与光学工作者一定会进一步努力，作出应有的贡献而无愧于古人的.

§1.5 光是电磁波的一部分

我们已经知道光是具有极高频率的电磁波，纵观一下整个电磁波所包含的频率范围，对于光波在电磁波中的地位以及它可能具有的特殊性就会有所了解，这也将会有助于我们的学习.

把各个波动按其波长或频率的顺序排列起来称为波谱，电磁波的波谱如图1－3所示.从电磁波谱中可以看到，人们的眼睛所能感应的只是称为可见光的极小的一部分，而光学所包含的研究范围则从远红外线到真空紫外线并延伸到软X射线.这是由于在这一波段中的电磁波的表观行为可以用同一种理论和同

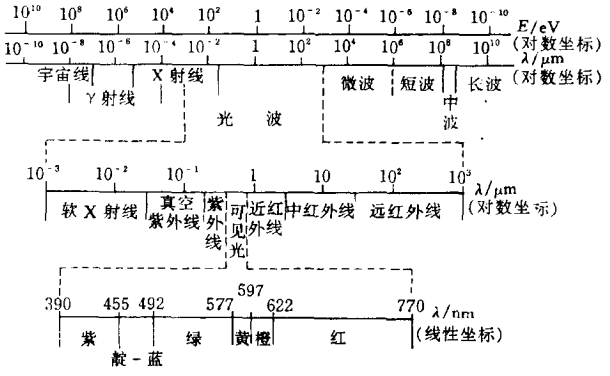

图 1－3　电磁波谱

类的实验方法进行研究；其特点是它们的波长比周围的物体小得多，而又比组成物体的原子的尺寸大得多，从而可以采取一些合理的近似处理.

电磁波在长波端表现出显著的波动性，而在短波端则表现出极强的粒子性.对于波动性显著的电磁波，其检测方法是利用电磁振荡耦合，得到输入信号的振幅及其随时间变化的相位（例如一般无线电技术中的各类天线）；对于粒子性强的电磁波，其检测方法是利用它与其他物质的相互作用，得到粒子流的强度而无需相位关系（例如一般核物理技术中的各类计数器）.对于光波来说，其波粒二象性的特征表现得更为突出，由于光的频率太高，而每个光子的能量又太小，因而目前无线电技术的响应速度达不到这么快，核物理技术的灵敏度达不到这么高，所以一般只能用光敏探测器检测光辐射的平均强度（有人曾用金属二极管检波法检测了远红外辐射并获得了十分微弱的信号；此外，近代还发展了快速而灵敏的探测器，可以进行光子计数）.

与波长较长的电磁波一样，光波也可以作为信息的载体而远距离传输信息，即光通信.如前所述，光通信的优点是传输的信息量极大而噪声极低.最近又有人提出，可以利用“光的压缩态”，把噪声降低到量子极限以下，从而可大大提高光通信的效率，并有可能检测到引力波的信号，这在物理学界是十分引人注目的设想.

光波作为信息的载体有其特殊的灵活性它不仅可以进行强度调制，也可以进行偏振态调制和相位调制；而且，除了可以按时间为序地传递外，还可以进行二维的空间调制，从而直接传递整幅图象的信息.基于激光的“光信息处理”研究，近年来已取得很大的进展，并在航天技术和军事上获得较重要的应用.光波的强度、偏振态、相位、频率的变化虽然都反映了一定的信息，但对于光波中所包含信息的检测目前只能通过对光强的测量来实现.例如，光波中相位的变化，将

在光的干涉现象中反映为光强在空间位置上的变化；偏振态的改变将使光强在空间方向上的分配产生变更；光波频率的改变则会使光强在谱图上的分布改变；而光波的瞬态变化则可以利用傅里叶变换使之转换成频率域中的变化而测量之.总之，光波中的各种信息都是利用光强的变化来测量的，这是目前进行光学研究和光学测量中的最具有特殊性的特点.

§1.6 光子与电子之间的相似性

物理世界是由种类众多的微观粒子所组成的，而其中的电子和光子则是人们经常会涉及到的两种.它们虽然是截然不同的实体，例如它们分别服从不同的统计分布规律，电子具有质量并带有电荷，而光子的静质量为零并且是电中性的等等，但是它们都是具有能量和动量的“粒子”，都可以与其他物质相互作用而交换其能量和动量，所以它们之间存在着一定的相似性.

人们早已认识到电子可以像光子一样衍射、偏折、成象，从而制成许多电子光学仪器，如电子显微镜等；近年来人们还认识到光子可以像电子一样与物质相互作用，成为探测物质内部微观信息的一种极为灵敏的“探针”.描述光波的各个参量，即光的振幅、相位、偏振态及其波长或频率都会在光与其他物质相互作用的过程中产生变化，而这种变化恰恰反映了物质中的许多重要信息.除了传统的偏光分析仪、X光衍射仪等以外，近年来发展的拉曼谱仪、X光荧光谱仪等都是这类以光为探针来研究物质性质的仪器，它们与以电子为探针的仪器，如高能或低能的电子衍射仪、俄歇电子能谱仪等相辅相成，都是人类研究微观世界的重要工具.与电子“探针”的技术相比，光子作为“探针”在某些方面具有独特的优点，例如，利用超短光脉冲可以探测物理、化学或生物学中的超快演变过程，又如光子“探针”所研究的对象不必放置在真空的容器中，所以具有更普遍的应用性.总之，光子作为一种探测物质内部信息的手段，与电子“探针”是互相补充的，目前已被广泛利用并获得了显著的成效.

近年来，对于光子和电子与物质相互作用的功能具有相似性的观点又有了进一步的共识，因而也促进了学科之间的密切联系和发展.例如,在1982年扫描隧穿电子显微镜(STM)的研究获得成功以后，科学家们立刻触类旁通地想到光学的全反射现象中也存在着光子的隧道效应，并借助于光学纤维及弱光检测等先进的技术研制成了光子扫描隧穿显微镜(PSTM).这种崭新的显微镜的分辨能力冲破了光学成象系统的分辨率理论极限，可以达到12 nm.

更为引人注目的进展，是所谓“光子能隙结构”这一新概念的提出.人们知道，电子在晶体的周期性晶格结构中运动时会受到固体能带结构的约束，从而联想到如果光子在周期性结构的介质中传播时，也会类似地受到介质的能带结构

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

的影响，这就意味着光子的运动将会受到约束，光子的能量大于介质的禁带宽度时，光可以自由地通过该介质材料，如果小于介质的禁带宽度则光子将受阻而不能通过，当把发光的原子置放在该介质的内部时，此种原子的发光就会被抑制．理论的研究已经证实介质中确实可以存在这种能隙结构，并已经在微波波段进行了实验并获得证实．所以一旦能够在光波波段制备这种具有三维周期性结构的材料，人们就可以按照预定的要求设计所需要的各种新型的光学材料，产生各种新的光学现象和光学效应，这是十分令人鼓舞的．

实际上，一门与电子学相并行的学科——光子学正在兴起，虽然在技术的成熟性方面光子还远不如电子，但在承载信息的速度和容量方面，光子明显优于电子．光子技术和光子工业的发展必将与电子技术、电子工业一样为人类社会创造巨大的财富．

以上，我们简单阐述了光学发展的历史以及它的重要性，以后我们将逐步深入讨论光的本性以及光学在应用技术开发中的潜力，光学测量方法的灵敏与奥妙，从而进一步开拓我们的视野，促进和培养我们思维和研究的灵活性．

习题与思考题

1．怎样理解“光学是一门既古老而又年轻的学科”？

2．为什么说墨翟关于雁影的描述中实际上包含着对光的直线传播性的认识？由此可以推论我国对此问题的认识比西方国家早了多少年？

3．试用惠更斯原理解释光的反射和折射定律．

4．人类关于光的本性的认识经历了哪几个主要阶段？试指明各阶段的大致历史时期及导致认识进步的重要实验依据

5．最早发现光的直线传播现象并作了记载的，是什么时代、什么国家的什么人？最早科学的阐明光的波动学说并为大多学者所接受的，是什么时代、什么国家的什么人？最早提出光是一种电磁波的，是什么时代、什么国家的什么人？最早明确提出“光子”概念的，是什么时代、什么国家的什么人？

6 从什么时候开始，长度单位“米”不再是基本单位，而成为一个由无误差光速确定的导出单位？

7．简述迈克耳孙－莫雷实验结果和黑体辐射实验结果对 20 世纪物理学发展的重要意义

8．简述“光学”在学术上和应用上的重要意义，举出几个在高科技中有重要应用的光学仪器、光学元件及光学现象．

9．近代光学获得迅猛发展并在国民经济中发挥重大作用的关键是什么？

10．“受激辐射”是由谁在哪一年预言的？最早制成的激光器是什么激光器？是在哪一年制成的？

11．激光有哪些特点？为什么说“激光的出现是划时代的成就”？举例说明激光在工、农、兵、学、商各方面的应用．

12 单位立体角在单位光束截面积上的辐射功率称为辐射亮度.已知太阳的辐射亮度约为 3×10^6 W/(sr·m^2)，一个普通氦氖激光器的发散角约 2′，光束截面积约 1 mm^2，功率约 10 mW.试估算它比太阳亮多少倍？

13. 指出以下各波长的电磁波分别属于什么光：10 nm，100 nm，300 nm，400 nm，500 nm，600 nm，700 nm，1 μm，10 μm，100 μm.

14. 试比较光波与无线电波，光子与电子的异同.

15. 试比较光子学与电子学的异同并讨论光子学的发展前景.

第二章　光波的数学表述及叠加原理

本章提要：建立光波的数学表述，用简谐振荡的单色平面波作为基本的光波模型，并以指数复函数的形式表示之；介绍球面波和高斯波的数学表示式；指出光波的横波性及光波必然具有偏振特征；从介质中的电磁波方程得出折射率与光程；给出光的能量和动量的表示式，指出光与其他物质相互作用时必须服从能量守恒和动量守恒的原则.提出光的线性叠加原理，并用以处理空间同时存在着多个光波的情况：利用叠加原理以及矢量图解方法定性地分析光波的反射、折射现象以及光波传播的直线性近似，从而定义了所谓“光线”的概念；将叠加原理应用于叠加两个正交方向上振动的偏振光，从而产生椭圆偏振态，给出了各种椭圆偏振态与正交方向上振动的相位差之间的联系；将叠加原理应用于不同频率的单色平面波的叠加，从而合成在时间上有限的波列，这种有限的波列更接近于对实际光波的描写.

§2.1　光波及其数学表述，单色平面波

如绪论所述，“光”是一种振荡频率极高的电磁波，可以在真空中传播，其速度约为 $3\times10^{8}\ \mathrm{m/s}$；电磁波是横波，即波的振动方向与传播方向相垂直.

最简单的波动，即由简谐运动产生的简谐波，可以用三角函数来描述：

$$y(z,t)=A\cos[(kz-\omega t)+\alpha]. \tag{2-1}$$

这是有两个参变量的公式，表示在时间为 t 时、空间位置为 z 处，振动着的物理量的值为 y，它可以达到的最大值为 A，称为振幅；余弦函数描述了该波动的振动状态，其中$[(kz-\omega t)+\alpha]$称为相位.在初始状态下（即 $z=0,t=0$)所对应的相位 α 称为初相位.式(2-1)中的 $k=2\pi/\lambda$，λ 为该波动的波长，即具有同一振动相位的空间两相邻点之间的距离，例如两相邻波峰或相邻波谷之间的距离（图2-1)，k 称为角波数，即 2π 长度内所含的波长数目.式(2-1) 中的 $\omega=2\pi/T=2\pi\nu$，称为角频率，其中 T 为周期，即振动一次所需的时间，ν 为频率，即单位时间内振动的次数.从频率 ν 及波长 λ 可以获得该波动的传播速度 v.

$$v=\nu\lambda=(\omega/2\pi)\lambda=\omega/k. \tag{2-2}$$

式(2-1)中的负号，表示这是一个沿 z 方向前进的波，即对于同一个相位状态而言（例如对于某一波峰，$kz-\omega t+\alpha=\pi/2$)，空间位置 z 值随时间 t 的增加而增加.若把式(2-1)中的负号改为正号，则表示一个沿 z 方向后退的波.

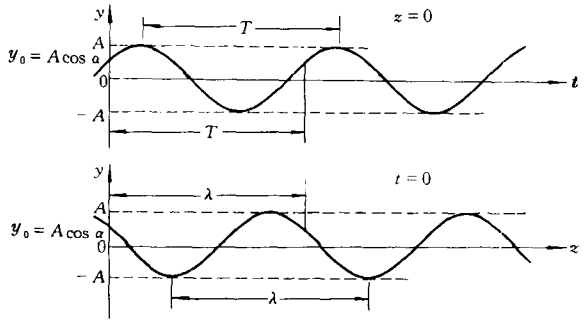

图 2-1 初相角为 α、周期为 T、波长为 λ 的简谐波

上面给出的波动表式，不论是由机械运动所产生的波动，或是由电磁振荡所产生的波动，都是适用的，只是所代表的物理量不同而已．机械波的物理量是指介质中的某一空间位置 z 处的质点在 t 时刻的位移量，而电磁波中的物理量是指电场强度 $\boldsymbol{E}$ 或磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 在 (z,t) 处的数值．电磁场的时空变化规律是服从麦克斯韦方程组的．在真空中，该方程组为：

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \partial \boldsymbol{E} / \partial t, \tag{2-3}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\partial \boldsymbol{B} / \partial t, \tag{2-4}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \tag{2-5}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{E} = 0, \tag{2-6}$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m，$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m 分别是真空的磁导率和介电常数

从这组方程式可以推导出 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 单独满足的微分方程式．对于 $\boldsymbol{E}$，此微分方程式为

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t^2}. \tag{2-7}$$

式中 $c = 1/\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} = 299\ 792\ 458$ m/s．对于 $\boldsymbol{B}$，也有类似的方程式．从麦克斯韦方程组可见，$\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 满足类似的方程式，因而一般只需讨论其中之一就可以类推．实际上，由于光对物质的作用主要是电场的作用（其原因将在以后说明），故在光学中的大多数情况下只研究 $\boldsymbol{E}$ 的规律，并把 $\boldsymbol{E}$ 矢量称为光矢量．

由微分方程的理论可知，方程式(2-7）的解代表了一种传播速度为 c 的波动．其最简单的形式为简谐波．设这个波的波长为 λ，传播方向为 z，则式(2-7)的解可写为

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_0 \cos\{[2\pi(z - ct)/\lambda] + \alpha\} = \boldsymbol{E}_0 \cos[(kz - \omega t) + \alpha]. \tag{2-8}$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$，$\omega = kc$ 可以看到，式(2-8)与式(2-1)是一致的．

若定义一个矢量 k,其大小等于 k，而方向为波的传播方向，则上式可以推广到沿任意方向传播的波，

$$E = E_0\cos[(k\cdot r - \omega t) + \alpha]. \tag{2-9}$$

式中 $r = xe_x + ye_y + ze_z$ 是空间任一点的位置矢量，e_x、e_y、e_z 是 x、y、z 轴上的单位矢量.

式(2-9)代表一个沿 k 方向传播的单色平面波.所谓“单色”，指的是这个波只有单一频率 ω 所谓‘平面’指的是在 $k\cdot r=$ 常量的空间各点所组成的平面上的相位都相等，即其等相面为一个平面.一般称等相面为波面，波面为平面的波就叫做平面波.图 2-2 画出了式(2-9)所代表的单色平面波在传播过程中的

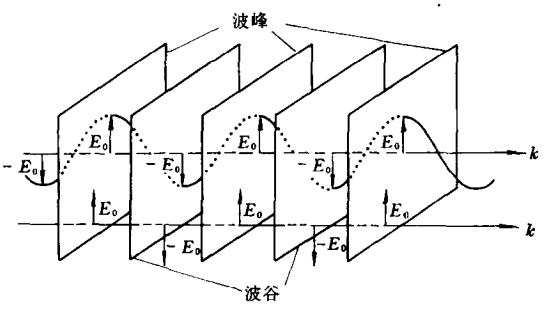

图 2-2 单色平面波

时空变化规律.在空间某点 r 处，随着时间的推移，振动的相位将发生变化；同样,在某一时刻 t，在传播方向上的不同点之间也存在着相位的差异，这是由于两点之间的距离 s 所引起的相位差 φ.此相位差与距离 s 之间的关系为

$$\varphi = (2\pi/\lambda)s. \tag{2-10}$$

为了运算方便，常用指数复函数来表示简谐波，即把式(2-9)改写为

$$\begin{aligned} E &= E_0\exp\{j[(k\cdot r - \omega t) + \alpha]\} \\ &= E_0\exp[j(k\cdot r + \alpha)]\exp(-j\omega t) \\ &= U(k\cdot r)\exp(-j\omega t). \end{aligned} \tag{2-11}$$

其中 $j=\sqrt{-1}$.$U(k\cdot r) = E_0\exp[j(k\cdot r + \alpha)]$ 称为复振幅，包含了由于不同位置 r 带来的相位变化也即相位因子 $\exp[j(k\cdot r + \alpha)]$ 的贡献.用复函数来表示波动，在运算中会带来许多方便，但是应该注意只有复函数 E 中的实数部分才代表真正的物理量.

将式(2-11)代回麦克斯韦方程(2-5)、(2-6)中,可得

$$k\cdot E = 0, \qquad k\cdot B = 0; \tag{2-12}$$

代回方程(2-3)、(2-4)中,可得

$$\boldsymbol{E}_0 = -c\boldsymbol{e}_k \times \boldsymbol{B}_0,$$
$$\boldsymbol{B}_0 = (1/c)\boldsymbol{e}_k \times \boldsymbol{E}_0. \tag{2-13}$$

其中，$\boldsymbol{e}_k$ 是 $\boldsymbol{k}$ 方向的单位矢量，即

$$\boldsymbol{e}_k = \boldsymbol{k}/k.$$

由式(2-12)及式(2-13)可知，$\boldsymbol{E}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{k}$ 这三个矢量相互垂直，构成右手螺旋，$\boldsymbol{E}$ 与 $\boldsymbol{B}$ 的大小成正比：$E = cB$. 由于 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 都与传播方向 $\boldsymbol{k}$ 垂直，故光波是横波. 令光的传播方向为 z 轴，而 $\boldsymbol{E}$ 矢量沿 x 方向，则其对应的 $\boldsymbol{B}$ 矢量必然在 y 方向. 若 $\boldsymbol{E}$ 和 $\boldsymbol{B}$ 具有最简单的如式(2-11)所示的简谐波运动形式，则可写为

$$\begin{aligned} E_x(z,t) &= A\exp\{\mathrm{j}[(kz+\alpha)-\omega t]\}, \quad E_y(z,t) = 0, \\ B_y(z,t) &= (A/c)\exp\{\mathrm{j}[(kz+\alpha)-\omega t]\}, \quad B_z(z,t) = 0. \end{aligned} \tag{2-14}$$

显然，这是一个沿 z 轴传播的单色平面波，其电矢量在 Oxz 平面内振荡，而磁矢量则在 Oyz 平面内振荡. 如前所述，一般用电矢量代表光矢量，由此，上述单色平面波相对于传播轴 z 来说，光矢量不是对称地分布而是有一定的取向的. 这种具有偏向性的振动状态称为偏振，是横波所特有的一个属性. 该波动的电矢量是沿 x 方向偏振，故常称为沿 x 方向的线偏振光，也可以称为是在 Oxz 平面内偏振的平面偏振光（请注意，这里的“平面”是指光振动的偏振面而不是平面波的波面）. 图 2-3 是偏振面为 Oxz 平面的平面偏振光的示意图.

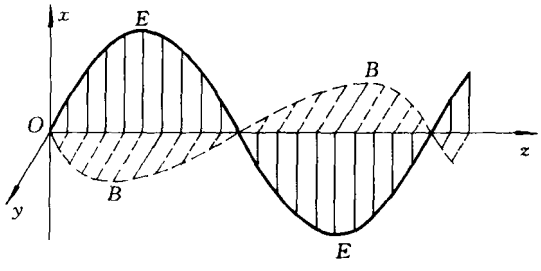

图 2-3 偏振面为 Oxz 平面的偏振光

光作为一种电磁场，电场和磁场必然是同时存在的. 但是，根据目前研究所了解到的物质对于光所产生的效应，包括人类通过眼睛所产生的视觉效应，都是由电磁场中的电场强度所引起的. 这是因为物质中的带电粒子（电子或原子核）受到电场的作用而引起的运动远比受磁场的影响大. 设带电粒子的电荷为 q，运动速度为 $\boldsymbol{v}$，则它在电磁场中运动受到的力为

$$\boldsymbol{F} = q(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}),$$

而 $B = E/c$. 因为带电粒子的运动速度 v 远比光速 c 小，所以电荷产生的机械运动主要是来自于电场的作用，即使物体是在静止的状态下，电场还是会产生作

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com