

第 一 篇

第一章 光学总论

光学的研究对象 the study object of optics

光学研究光的辐射、传播、它和物质的相互作用以及光的性质和应用。光学不仅是物理学中一门基础学科，而且有十分广泛的重要应用。研究光学的目的之一，就是为了研制出各种高质量的光学仪器（包括显微镜、望远镜、照相、放映系统、测距仪等等），用于生产、科学研究、生活以及军事等实践活动。按历史发展的大致顺序，光学可概括地分为下述三大部分。第一部分，几何光学，引用光线概念，即发光能量沿直线传播的概念，并结合反射和折射定律等，来处理光在透明媒质中的传播、成像等问题。几何光学原理是光学仪器设计的基本依据。第二部分，物理光学（或波动光学），研究光的波动性规律和应用。应用物理光学原理制成多种非常精密的光学仪器，如干涉仪是标定长度标准的基本仪器，衍射光栅是十分重要的分光仪器。第三部分，量子光学，研究光和物质（分子或原子体系）相互作用的问题（如物质发光或对光的散射、吸收等）。这些场合下，把光当作微小的能量粒子（光子）束，一般需用量子理论（有时也可用经典理论）来处理。

光的波粒二象性 the wavicle nature of light

对光的本性，经过几百年认真的探讨，至19世纪末叶，人们普遍公认光是一种电磁现象，即波长较短的电磁波。那时研究的问题主要是光的传播，很少涉及光的发射和吸收。

光的发射和吸收，涉及光和物质(分子、原子体系)的相互作用，这类场合下按光所表现的性质和规律，光的行为像是“粒子”(参看“光子”词条)。

概括实验规律和光在各种实际场合的表现可见，光在某些方面像经典的“波动”，而在另一些方面的行为却像“粒子”。这就是所谓“光的波粒二象性”。

麦克斯韦方程 Maxwell's equations

光在空间和媒质中传播时，显示出电磁波动本性，它的行为可由下列麦克斯韦方程(MKS单位制)充分描述：

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中 $\mathbf{J}$ 是电流密度， ρ 是电荷密度。空间的电磁场由电矢量 $\mathbf{E}$ 和磁矢量 $\mathbf{H}$ 描写。为了包括场对物质的效应，需引用电位移 $\mathbf{D}$ 和磁感应 $\mathbf{B}$ 。这两组矢量由物质方程

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (6)$$

相联系。上二式中， ϵ 是介电常数(ϵ_0 是真空介电常数)， μ 是磁导率(μ_0 是真空磁导率)； $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{M}$ 分别是电的和磁的极化强度。当物质媒质(介质)为各向同性时， ϵ 和 μ 为标量，而一般情况下它们为2阶张量。通常光不甚强时， ϵ 和 μ 可视为与场强无关。如果

场足够强，比方说将激光束聚焦到或施加强直流电场于一块电—光晶体时，就必须考虑 ε 和 μ 对于 E 和 H 的依赖关系。

波动方程和单色平面波 wave equations and monochromatic plane waves

在光学的许多领域，常需研究在远离场源的区域（其中电荷密度 $\rho = 0$ ，电流密度 $J = 0$ ）电磁辐射的传播。光在均匀的、各向同性介质中的传播可由麦克斯韦方程（词条）中式（1）—（6）导出：

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

这就是标准的电磁波方程，它们的一个特解即单色平面波：

$$\psi = e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \quad (2)$$

ψ 代表 E 和 H 场矢量的任一笛卡尔分量，式中 ω 是单色波的角频率， k 是波矢，它的数值

$$k = |\kappa| = \omega \sqrt{\mu\varepsilon} \quad (3)$$

波方程（1）还有另一形式的解——高斯光束（详见第14章）。

由式（2）可见，等相面（相位相同各点的轨迹）的方程为：

$$\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = \text{常量} \quad (4)$$

等相面以相速度 v 沿波矢 k 的方向传播，相速度的值

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (5)$$

真空中电磁辐射的相速度

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = 2.997930 \times 10^8 \text{ m/s}$$

而在介质中

$$v = c/n,$$

这里 $n = \sqrt{\mu\varepsilon/\mu_0\varepsilon_0}$ 是介质的折射率。

真空中光速 c 理论值与实验测量结果(测量 c 的实验方法见第三篇第一章)惊人的符合,标志着光的电磁理论的伟大胜利。

光子 photon

当光和分子、原子等体系相互作用时表现出粒子性,光是被称为光子的粒子流。光子在真空中运动的速度恒等于 c ($2.9979 \times 10^8 \text{m/s}$);光子的静止质量等于零。对应于频率 ν 和真空中波长 λ 的电磁波,光子的能量 E 和动量 p 是:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

式中 h 是普朗克常量。

光谱学 spectroscopy

光谱学是光学中讨论光谱分析的一个分支,它在人类认识物质微观结构方面曾起过关键作用。

把光分解成光谱的工作,即把给定光束中各种波长分开,并测定波长及其强度,可以利用折射棱镜或衍射光栅来完成。棱镜法能够得到较强的光,而光栅法却能得到较高的分辨本领。光谱技术可用来鉴定待测发射中心的化学成分、研究其结构、确定光源应用于光化学、生物学(紫外线)和辐射学(X射线)的特性等。由光谱分析得出的各种原子的基本性质的数据,形成关于分子结构和元素的化学、物理性质的知识基础。通过分子光谱的研究,证明了存在着许多以前化学中不知道的或被认为不能自由存在的分子;可用来探测各种稀有同位素;可探测出恒星、行星、彗星、高层大气和星际空间中存在的各种分子,并且还可以通过分析,判定这些天体上的物理条件。

激光和物质相互作用产生的光谱即激光光谱。在光谱技术中用激光作光源,不仅使经典光谱(发射光谱、吸收光谱、散射光谱、荧光光谱)技术发生了巨大变革,并且使经典光谱学与激光技术相结合,产生了新的光谱学原理和技术,形成了激光光谱学,使光谱分辨本领由 10^5 和 10^6 提高到 10^{11} 数量级甚至更高。

现代应用光学 contemporary applied optics

本世纪60年代以来,人们利用电子计算机进行复杂光学系统的设计,如非球面透镜元件、大视场的衍射系统的设计等。增反射敷层、增透射敷层等单层、多层薄膜敷层已广泛使用。由于医疗内窥镜技术和光纤通讯等需要,促进了光纤光学的研究。对红外线和红外材料的研究成果,已应用于监视系统、导弹制导等领域。

近几十年来,由于数学、信息论和光的衍射原理的交叉结合,形成一门新兴学科——傅里叶光学(见第13章)。它已有广泛的研究成果,特别重要的是用空间频率的概念分析光信息,用改变空间频率的方法处理成像系统中的光信息,像质评价理论以及传递函数概念。

激光的发明,有了大功率的相干光源,导致许多新的非线性光学效应(谐波发生、混频等)的发现,由此研制出一系列奇妙的新器件,如倍频器、电—光调制器、声—光调制器等,波前重现技术(全息术)可产生非常生动的三维像,它还在全息散斑、无损检验、数据存储等方面有许多应用。

电光学 electro-optics

电光学是光学和电子学融合形成的新学科。电光学研究光辐射在有外加电场的晶体中的传播问题。在一定类型的晶体中,外加电场导致折射率椭球在尺度和取向上的改变,这就是所谓电光效

应。它已成功地用于控制光辐射的相位或强度。这种调制手段有越来越多的应用,包括将信息“印记”在光束上、光束偏转以及光谱可调谐滤光片。应用电—光调制,由于不涉及机械运动的部件,可以极高的速率(可达几千兆赫芝)来操纵一束激光或控制信号辐射。

在液晶中也能观察到电光效应(现已发现的有十几种),例如,动态散射就是一种光电效应。将厚度10微米左右的薄层向列型液晶,如甲亚胺化合物,夹在两片镀有透明导电电极的玻璃片之间,构成一个液晶盒。当液晶盒的电极间未加电压时,液晶的分子呈平行排列,这时它是透明的。在电极间加上电压,当电压超过某一值(约几十伏)时,液晶中发生湍流,液晶盒就变成混浊(不透明而散射光)。外电压一撤掉,液晶盒马上恢复透明。这种现象就称为动态散射,可用以制作各种显示器件,如仪器数码和图像显示等。

声光学 acousto-optics

声光学研究光波与介质中声波的相互作用。受到声扰动的介质对于光的衍射,是光和声波相互作用的最有意思的现象。当一声波在介质中传播时,伴随有一胁变场。对于平面声波,这胁变场是位置的周期性函数。介质的折射率受到周期性的扰动,于是引起布喇格耦合。声光相互作用便于用来探测固体中的声场以及控制激光辐射。通过声光相互作用实现的光调制有许多应用,包括光调制器、光束偏转器、信号处理器、可调谐滤光器和光谱分析器。用声光相互作用可以高速操纵一束激光或处理信号辐射,这种性质非常类似于电光调制,只是声光相互作用需用一RF(射频)场,来代替电光调制所用的dc(直流)场。

导波和集成光学 guided waves and integrated optics

导波和集成光学研究光模在薄膜和光导纤维之类介质结构中的传播问题。横截面尺寸有限的一束激光在均匀介质中传播时会

逐渐发散；可是在适当的条件下，在导波介质结构中不出现这种发散。

光模的正常能流受到某些因素干扰的情况，可用耦合-模理论来描述。这种学说可用来分析周期(波纹)光学波导和滤光片、分布-反馈激光器、电-光模耦合以及定向耦合器等。

非线性光学 nonlinear optics

研究激光光束和物质之间如何发生作用，发现了许多新现象，例如，在某些晶体中，红外线转变为可见光(倍频，第一个非线性光学实验是1961年进行的，其倍频装置见图1-1-1)；在一定条件下，不用透镜激光光束可以自行聚焦(光束自聚焦)；看来完全不透明的晶体可以变成透光的(光致透明)；还有光参量振荡、光的受激散射、多光子吸收和光子回波等。研究这些现象的光学分支叫做非线性光学，它利用原子和分子(体系)对于(强)光辐射场的非线性响应。非线性的光学相应产生出许多新鲜事物，有其重要应用(详见第16章)。

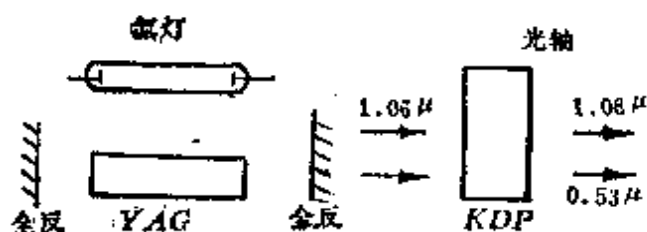


图 1-1-1

光学双稳态性能和光计算机 optical bistable behaviour and optical computers

有些非线性光学材料(例如用几百层厚度1000nm的砷化镓和砷铝化镓组成的量子阱材料),具有光学双稳态性能。当射入光的强度增加时,材料的光特性(如透射率、折射率等)突然变化,当光强减小时恢复原状态。利用量子阱结构可制成门电路,其开关功率只有 4×10^{-16} 焦耳/微米²仅为固态双稳态器件所需功率的1/6。

另外一种量子阱包络状态转换器件的开关速度可作到0.1微微秒。这些光学双稳态器件有可能为发展光计算机打下基础。

光计算机的运算速度可能高达每秒一万亿次（而目前世界上的超高速电子计算机运算速度一般不超过每秒十亿次），具有大信息量、平行处理方面潜在的新型应用前景，光计算机将会成为未来的超级计算机。

相位共轭光学 phase conjugate optics

相位共轭光学研究相位共轭光波的产生和应用。它是相干光学中最年轻的学科。利用强的相干光在某些非线性媒质（如CS₂、钛酸钡等）中的光学相位共轭效应，可以实现若干重要应用，包括：自动跟踪瞄准目标（如用于激光产生热核聚变技术），光纤传输信号的象差补偿，用于制备大规模集成电路的高分辨光刻技术中脉冲扩宽的补偿，滤波，时间、空间信息处理等。