

光 学

章志鸣 沈元华 陈惠芬 编著

高等教育出版社

光 学

章志鸣 沈元华 陈惠芬 编著

高等教育出版社

(京)112 号

封面说明

本书封面是一幅用计算机绘制的黑白二元立体图象,将此图片放在眼前方 25cm 处,放松眼神,就会看到一具石膏头象凸出在纸面之外,立体感十分明显.此图由复旦大学激光物理研究室绘制.

光 学

章志鸣 沈元华 陈惠芬 编著

*

高等教育出版社出版
新华书店总店北京发行所发行
化学工业出版社印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 430 000

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数 001—1 422

ISBN 7-04-005178-8/O · 1397

定价 9.75 元

编著者的话

我们有感于当今的科学技术是如此迅猛地发展,50年代曾经独占世界科技先进领域的半导体科研与工业,经过数十年的演变,从80年代末期到当今时代已经被飞猛成长的激光及其技术,并与半导体微电子学相结合而形成的光电子学技术一起挤入到历史发展的舞台上,可以预见下一世纪将是微光电子学的世界.应该起到先导作用的教学事业及其工作者,必需为此而作好培育人才的准备.为此我们深感有责任和义务编写一本迎合这种发展形势的光学教材.对于这一本教材,我们认为不应该只适用于物理类的专业,还希望也适用于电子工程学、材料科学以及化学、生物学等专业.

这本教材是作为两年制普通物理学课程中的光学部分,所编排的内容适合于一学期的课时,后继于电磁学.在本教材中,为了介绍有关激光及光电子学中的一些内容,就不可避免地要涉及到原子、分子、以及固体理论中的一些微观结构的概念,例如能级、能带、导带、禁带、跃迁等等.我们认为能够及早正确但定性地向学生介绍这些十分重要的概念是有益的.科学的进展并不就范于人们对学科的分类之中,所以我们不必在知识的获得过程中把自己限制在人为的学科界限之内.

在多年的光学课程教学的实践中我们还意识到:作为普通物理的一个组成部分的光学课程,其内容并不注重于介绍光在运动过程中的能量和动量守恒这一重要的基本物理概念,因而与其前期所讲授的力学、热学、电磁学以及后继的原子物理学等课程中的物理思想未能保持密切的连贯,在普通物理的其它课程中却都是十分强调能量及动量守恒这一原则的重要性的.在光学课程中对这一原则的贯彻始终不能得到体现的原因,是过去的光学课程往往只讨论光在传播过程中的问题,而不涉及光与其它物质之间的相互作用的问题.光在传播过程中,其能量和动量总是守恒的,所以这一重要的原则实际上是隐含着的.但是忽视在光学中对这一基本概念仍然具有其重要性的阐明是不可取的.在本教材中,由于增加了有关光与物质相互作用的内容,所以原来在教学中的一些不足就很自然地获得了弥补.当然这仅仅是我们的一种教学尝试,考虑得不够周到之处也必然是存在的,我们愿意在教学实践中不断地改进,我们也热诚地希望同行们能对这本教材在内容的选择及编排上提出宝贵的意见.

在编写这本教材的过程中,我们自始至终得到我系领导的支持,不断地获得同事们的有益讨论、指正和帮助,在此表示我们的真挚感谢.此书的顺利出版获得了高等教育出版社的大力的支持,特别是该社曹建庭先生不懈的促进和大力协助,在此也表示我们的感谢并致以敬意.本书中原图的绘制及初稿的打印、编辑等等的工作都是我室邢中青同志辛勤劳动的结果,我们也借此机会向她致以感谢.

编 著 者

1994年于上海复旦大学激光物理研究室

常用常量表

名 称	符 号	数 值
光速	c	$2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
真空介电常量	ϵ_0	$8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
普朗克常量	h	$6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
		$4.1356676 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$
	$h/2\pi$	$1.05457266 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
		$6.5821220 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$
电子电荷	e	$1.60217733 \times 10^{-19} \text{ C}$
电子质量	m	$9.109389 \times 10^{-31} \text{ kg}$
玻耳兹曼常量	k	$1.380658 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

常量换算表

能量 E (J):

$$1 \text{ eV} \Leftrightarrow 8,065.4 \text{ cm}^{-1} \Leftrightarrow 1.23985 \mu\text{m} \Leftrightarrow 23.063 \text{ kcal/mol}$$

波长 λ (nm):

$$10,000 \text{ \AA} = 1.0 \mu\text{m} = 1000 \text{ nm} \Leftrightarrow 10^4 \text{ cm}^{-1} \Leftrightarrow 1.239 \text{ eV}$$

目 录

第一章 绪论

§ 1.1 光学是一门重要的学科	1
§ 1.2 我国古代的成就	2
§ 1.3 20 世纪前的学科发展简史	3
§ 1.4 20 世纪若干重大进展摘要	4
§ 1.5 光是电磁波中的一部分	7
§ 1.6 光子与电子之间的相似性	8
习题与思考题	9

第二章 光波的数学表述及叠加原理

§ 2.1 光波及其数学表述, 单色平面波	11
§ 2.2 球面波及高斯波	14
§ 2.3 光在均匀介质中的传播, 折射率与光程	17
§ 2.4 光波的能量和动量	18
§ 2.5 光波的叠加及叠加原理	19
§ 2.6 振动方向相互垂直的光波的叠加, 椭圆偏振光	24
§ 2.7 不同频率的光波的叠加	26
习题与思考题	29

第三章 几何光学

§ 3.1 几何光学的基本概念	30
§ 3.2 光在单球面上的近轴成象	32
§ 3.3 薄透镜成象及其作图法	37
§ 3.4 共轴球面系统成象	40
§ 3.5 光学转换矩阵	44
§ 3.6 几何光学仪器	51
§ 3.7 棱镜和光纤	55
习题与思考题	59

第四章 光的衍射与干涉

§ 4.1 菲涅耳衍射, 波带板	62
§ 4.2 夫琅禾费衍射, 光学仪器的分辨本领	66
§ 4.3 单缝衍射、双缝衍射与光栅	71
§ 4.4 光场的时空相干性	77
§ 4.5 干涉仪及其应用	85
习题与思考题	95

第五章 菲涅耳公式与薄膜光学

5.1 从光的电磁理论导出菲涅耳公式	100
§ 5.2 菲涅耳公式的讨论	102
§ 5.3 薄膜光学的基本概念	109
§ 5.4 几种典型的光学薄膜	114

§ 5.5 多层膜 X 光光学的进展	123
习题与思考题	126
第六章 光学信息处理与全息照相	
§ 6.1 光学图象的傅里叶频谱分析	129
§ 6.2 光学图象处理	134
§ 6.3 全息照相	137
习题与思考题	142
第七章 光在各向异性介质中的传播	
§ 7.1 双折射、各向异性介质中的波面	144
§ 7.2 偏振器件	149
§ 7.3 偏光分析与椭偏仪	153
§ 7.4 偏光干涉及其应用	157
§ 7.5 旋光	159
习题与思考题	161
第八章 光源与激光	
§ 8.1 物体的发光机制概述	165
§ 8.2 若干典型光源的特性	169
§ 8.3 黑体辐射表达式的物理意义与受激辐射	176
§ 8.4 激光原理简要	180
§ 8.5 若干常用激光器及其特性	185
§ 8.6 激光光束的特性与传播	190
§ 8.7 激光技术的应用	194
习题与思考题	200
第九章 介质的色散及非线性光学概要	
§ 9.1 光与物质的相互作用和电偶极子的振荡	203
§ 9.2 金属材料中的自由电子振荡	204
§ 9.3 光在介质材料中的色散	205
§ 9.4 光散射	207
§ 9.5 光学中的非线性现象	209
§ 9.6 介质的非线性光学响应	210
§ 9.7 光波在非线性介质中的传播	213
§ 9.8 二阶光学非线性现象	215
§ 9.9 三阶非线性效应	220
习题与思考题	223
第十章 光电子学器件原理	
§ 10.1 光电探测器	224
§ 10.2 光调制器、光开关及光扫描器	233
§ 10.3 光学双稳态及其应用	240
习题与思考题	243

附录 若干近代光学进展的阅读资料

附录一 单个光子是否会产生干涉·····	246
附录二 原子光学及原子干涉·····	248
附录三 光子扫描隧道显微镜·····	250
附录四 天文望远镜的进展——激光灯标天文望远镜及 哈勃(HUBBLE)天文望远镜 ·····	253
附录五 光速的测定及长度单位“米”的新定义·····	258
附录六 激光唱片放音机中的光学系统及光学存储器·····	262
索引·····	265

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,它还具有一般的无线电电磁波所不具有的特殊性,例如它的产生和检测,以及与其它物质相互作用等过程中所显现出粒子性的特征.这类特殊性构成了对“光学”作为一门独立学科进行深入研究的可能性和必要性.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及整个国民经济产生了巨大的影响,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,它具有悠久的历史和丰富的积累,并正在继续迅速发展.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,而视觉的产生必需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,光学学科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,可见光学学科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,这在近代的物理学发展中更是如此.在本世纪初的一场从经典物理学发展到现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、关于光电效应、关于光的干涉现象中的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.在本世纪60年代初,取得了激光这一划时代的成就以后,人们观察到众多前所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,却是光学学科发展的主导方向而备受人们的重视.

随着人们对光学现象本质的认识不断深化,光学学科的研究成果在工业、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有极大发展.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.光纤通信已在我国部分地区正式投入运行.利用激光的高能量可以使氘核产生聚变,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,可以在造船工业、建筑工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,物质的光学非线性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,可以制作光的开关,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及时间计量这两个以前是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 $299,792,458\text{m/s}$).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演,所以在 1983 年已为国际度量衡委员会所确认.

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(1033—1097A.D.)我国科学家沈括的名著《梦溪笔谈》.当代英国科学家李约瑟(Joseph Needham,生于 1900 年)在他所编著的《中国的科学与文化》这部考证巨著中,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(770—221B.C.)的哲学家墨翟所著的《墨经》中,有关于“针孔成像”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.墨翟的描述中实际上还内含着对光的直线性传播这一表观事实的认识.可以看到在 2500 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”,这在沈括著作

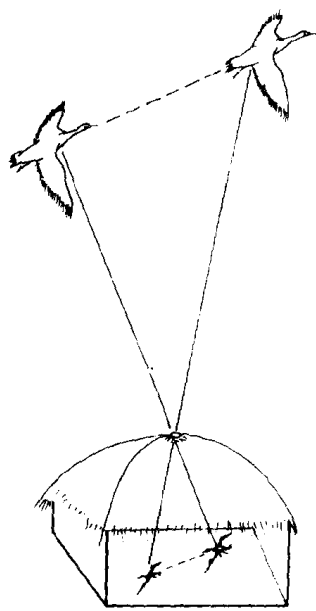


图 1-1 “茅屋雁影”示意图

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, 在沈括著作的第327节中还有进一步的描述. 他指出我国在11世纪时已经十分熟练于铜镜的铸造工艺和技巧, 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内蕴的光学规律.

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, 其它成就如日、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 世纪前的学科发展简史

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世纪以后的年代才开始的. 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, 而它们之间的相互争议一直持续到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, 就很容易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世纪末叶到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, 英国科学家杨氏(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性. 并且, 最为奇妙的是根据菲涅耳的理论计算, 可以预见在一块不透明圆板的阴影中心仍然有个亮点. 实验确实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象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.这一理论解决了一些光波在非均匀晶体中的传播问题,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,但是作为光波传播的介质以太,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世纪末叶才建立的.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理和定律,例如安培定理、比奥-萨伐定理、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,其在物质(包括真空)中的传播速度可以由该物质的电学和磁学常量予以确定.通过计算,电磁波在真空或空气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(在真空中约为每秒三十万千米),计算出光波的频率应在 10^{15} 次/秒的量级,这比一般的无线电电磁波要高很多很多.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真正解决.

§ 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.

用光学方法测量地球对于“以太”运动速度的迈克耳孙-莫雷实验得到的否定结果,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规律性研究,以及对于黑体辐射能量的光谱分布研究等结果,都表明与传统的物理概念发生冲突,而引导到能量的“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更而是以某一最小能量单位断续地改变的,这一最小的能量单位称为“量子”,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所发现的矛盾进行仔细的分析,在突破传统的概念而创立相对论和量子论中所起的重要作用.

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,发现所发射的电子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,波粒二象性是一切基本粒子所共有的属性,这种对基本粒子的认识构成了量子力学的基础.

所以,对于光本性的正确和全面的认识应该是:光既有波性又有粒子性;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 30 年代左右,光学仍与其它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 年英国科学家伽柏(Daniel Gabor, 1900—1979)发明全息照相技术中得到佐证.伽柏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而使之再现,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”,伽柏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,由于激光的出现才很容易制作优质的全息图,并使之得到迅猛的发展并为大家所共知.

50 年代末期到 60 年代初期,光学取得了突破性进展,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学科的革命性发展,冲击了整个物理学科,并且对其它的学科如化学、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“受激辐射的光放大”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.1930 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,科学家们多次企图从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 年代末期制成了“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。

由于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, 生于 1915 年)及苏联科学家巴索夫(Nikolai G. Basov, 生于 1922 年)、普洛赫洛夫(Aleksandr M. Prokhorov, 生于 1916 年)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. 这一方案经过几年的探索,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

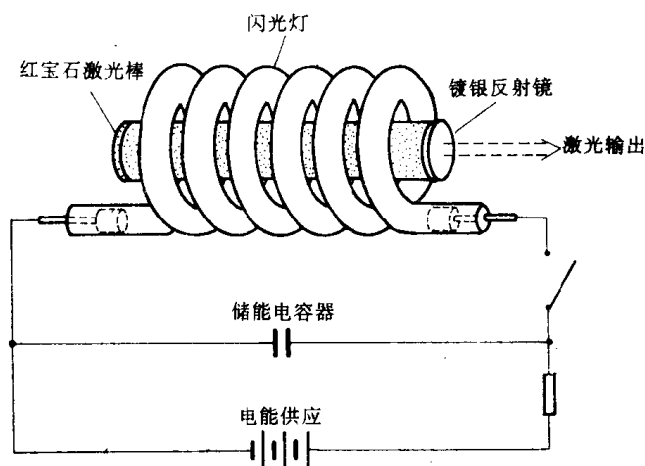


图 1-2 原型红宝石激光器的结构

迅速扩大,对于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,为光学学科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 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它物质相互作用时,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的亮度. 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,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,形成了光学学科中的新的子学科,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。

由于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着聚簇性现象的原因,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学科的前进,人们对于光的本性的认识还会不断有所提高。

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,在激光与光学学科和光学技术的研究上,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。

§ 1.5 光是电磁波中的一部分

我们已经知道光是具有极高频率的电磁波,如果再综观一下整个电磁波所包含的频率范围,那么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一部分,而光学学科所包含的研究范围则从远红外光到真空紫外光并延伸到软 X 射线。这是由于在这一波段中的电磁波的表现行为可以用同一种理论和同类的实验方法进行研究;其特点是它们的波长比

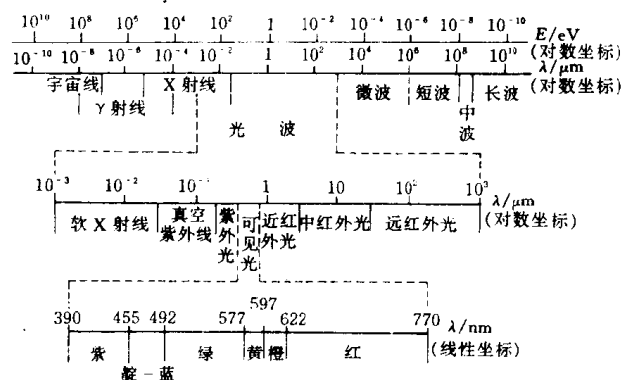


图 1-3 电磁波谱

周围的物体小得多,而又比组成物体的原子尺寸大得多,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性,而在短波端则表现出极强的粒子性.对于波性显著的电磁波,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,则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,近年来已取得很大进展,并在航天技术和军事上获得较重要的应用.但是光波的强度、偏振态、相位、频率的变化虽然都反映了一定的信息.然而对于光波中所包含的信息的检测目前只能通过光强的测量来实现.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

物理世界是由众多种类的基本粒子所组成的,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, 而光子的静止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”, 都可以与其它物质相互作用而交换其能量和改变其动量, 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象光子一样衍射、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象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所作用的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 年扫描隧道电子显微镜 (STEM) 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而研制成了光子扫描隧道显微镜 (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 12nm.

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具有能隙结构的特性, 并已经在微波波段进行了实验而获得证实. 所以一旦能够在光频波段制备这种具有三维周期性结构的材料时, 人们就可以按照预定的要求设计所需求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.

以上简单阐述了光学学科发展的简单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能力的灵活性.

习题与思考题

1. 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