

光学新教程



◎ 主编 冯杰 胡志娟 冯勋立

高等教育出版社

光学新教程

GUANGXUE XIN JIAOCHENG



◎ 主编 冯杰 胡志娟 冯勋立

高等教育出版社·北京

内容简介

本书是物理学类专业本科光学课程的教材,基本内容包括几何光学、波动光学(物理光学)、量子光学和现代光学基础四个部分,全书分三篇共八章,重点在前两篇。本书注重光学基本理论的基础性和光电子应用的前瞻性,突出光学对各专业基础理论知识的普适性。每章除了复习思考题和习题之外,还包含实践与拓展,其内容是与该章有关的前沿知识、小实验、新成果、新应用以及相关的物理学史和物理学家介绍等。

本书可作为综合性大学理工科和高等师范院校的物理学类专业的本科生教材,也可以供物理课程论专业研究生和光学工程技术人员参考。本书适用于54学时左右的光学课程教学需求,书中带“*”内容为选学内容。

图书在版编目(CIP)数据

光学新教程 / 冯杰,胡志娟,冯勋立主编.--北京:高等教育出版社,2017.8

ISBN 978-7-04-046043-8

I. ①光… II. ①冯… ②胡… ③冯… III. ①光学-高等学校-教材 IV. ①O43

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第173496号

策划编辑 缪可可 责任编辑 缪可可 封面设计 李小璐 版式设计 范晓红
插图绘制 杜晓丹 责任校对 刁丽丽 责任印制 尤 静

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京明月印务有限责任公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	20.25	版 次	2017年8月第1版
字 数	480千字	印 次	2017年8月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	37.80元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46043-00

前 言

面对大学的扩招、基础教育课程体系的全面改革、光学相关专业的蓬勃兴起、光子学的迅猛发展以及我国高等院校教学改革的深入,上述发展和变革对光学教学提出了新的需求,作为一种探索,编者通过学习、借鉴国内外光学教材的长处,并注意到与光学前沿内容的衔接,避免繁琐和过深的论述,编写了这本教材,为物理学类(物理教育)专业和光学相关专业提供一本简洁的基础课教材。因此本书具有基础性、实用性、前瞻性和通用性等特色,现具体说明如下。

1. 基础性:本书一方面慎重地考虑到由于近几年大学的扩招,学生的基础知识相对薄弱的现实教学环境,另一方面考虑到对光学新成果等不要介绍过多,以免与大学低年级学生原有的基础知识、背景知识差距太大;与此同时,对于新兴的光学相关专业,由于很多深入的知识在后续专业课里还要学,所以本书在此方面没有花太多的笔墨。基础课的教材特点之一在于其基础性,体现在其必须展示学科的基本知识、基本结构、基本实验技术和基本的研究方法,过多的理论化深化和升华不是基础课的任务,而是专业课的任务。

2. 实用性:本书的特点是知识的浓缩、简洁和传承,其功能就是实用性,其具体表现形式就是高效、实用和深入浅出,即具备较好的教学功能。当然,本书注重相对完整的系统性,注重基本概念和基本原理论述的清晰性,注重光学理论逻辑结构的层次分明,即注重教材的教学实用性功能和教材的传承性功能。当然,本书在明确教学目标的同时,会汲取同类优秀教材的积极要素。

3. 前瞻性:本书另一个特点是紧跟光学学科的新成果及新应用,即教材的现代化气息强。对比而言,国内有一些比较经典的《光学》教材,显然在此方面还有很大的空间。本书既注重了与光学前沿的新成果、新进展相衔接,又避免了繁琐深入的讨论。在这一点上试图做到:给学生的学起抛砖引玉的功效,使教师的教更加游刃有余。

4. 通用性:本书坚持强化基础,淡化专业的原则,充分考虑相近专业本来具有共同基础课的特点,以波动光学为主干,简洁但完备地呈现了几何光学的基本原理和几何光学仪器的基本要求,现代光学原理以导论的形式简洁地介绍了激光原理、光电子技术、光通信技术以及非线性光学领域的若干现象等,为物理学类(物理教育)专业、光学相关专业提供了一个通用的基础课教材,以适应当前我国高等院校光学学科的迅速发展的教学需求。这一条也是该《光学新教程》的最大特色,更是我们编写本书的初衷。

本书从酝酿到付梓,历经了近10年,是集体劳动的成果。首先要感谢华南师范大学的徐文成教授、郭旗教授、李铭教授、陶力沛副教授、梁国礼副教授(已故)和官海珍老师以及普通物理教研室的全体同仁,他们对本书的初稿提出了宝贵的编写建议;其次,要感谢上海师

II 前言

范大学数理学院物理系以及大学物理教学团队的帮助,特别是该团队负责人冯勋立教授,他不仅无私地支持了本书的出版,而且提出了建设性的修改建议;特别感谢该团队光学主讲教师胡志娟副教授,她仔细地阅读了全书,进行了认真地修订和校对,反复多次,付出了艰辛的劳动;同时还要感谢我的历届研究生,他们不止一遍细心地校对了书稿,细致地演算了习题,提高了本书习题答案的正确率;最后,要衷心感谢高等教育出版社编辑的大力帮助,为本书的出版做了大量辛勤的工作。以上诸君的厚爱,使得拙著得以面世,但是,由于编者水平所限,错漏和不妥之处在所难免,恳请同行斧正、不吝赐教。

上海师范大学数理学院物理系 冯杰

2006年12月初稿成于广州、2008年12月修订于广州、

2015年9月定稿于上海

目 录

绪 论	1	§ 0.3 光学的发展简史	3
§ 0.1 光学研究的对象和方法	1	§ 0.4 光子学与电子学的比较	8
§ 0.2 中国古代的光学成就	2		

第一篇 波动光学

第一章 光的干涉	13	§ 2.5 夫琅禾费圆孔衍射	78
§ 1.1 光波的描述与原子发光机制	13	§ 2.6 夫琅禾费多缝衍射 衍射光栅	81
§ 1.2 光波的叠加和干涉 相干 光的必要条件	19	§ 2.7 空间光栅 布拉格方程	90
§ 1.3 分波阵面双光束干涉 空间 相干性	21	复习思考题二	92
§ 1.4 分振幅双光束干涉 时间 相干性	28	习题二	93
§ 1.5 迈克耳孙干涉仪与频谱测量	37	实践与拓展二	95
§ 1.6 法布里-珀罗干涉仪与选模	42	第三章 光的偏振	100
§ 1.7 薄膜光学基础与干涉膜型 滤光器	51	§ 3.1 光波的偏振性	100
复习思考题一	55	§ 3.2 偏振光波的数学描述	103
习题一	56	§ 3.3 偏振光的强度与马吕斯定律	108
实践与拓展一	58	§ 3.4 菲涅耳公式与布儒斯特定律	110
第二章 光的衍射	62	§ 3.5 晶体的双折射现象	116
§ 2.1 光的衍射现象与泊松实验	62	§ 3.6 偏振器件与偏振光的获得和 检验	122
§ 2.2 惠更斯-菲涅耳原理与衍射 光波的叠加	65	§ 3.7 偏振光的干涉	129
§ 2.3 菲涅耳衍射与半波带法	67	§ 3.8 旋光性与晶体结构	131
§ 2.4 夫琅禾费单缝衍射	74	§ 3.9 感应光效应现象及其应用	134
		复习思考题三	138
		习题三	139
		实践与拓展三	142

第二篇 应用光学——几何光学

第四章 几何光学的基本原理	149	§ 4.3 球面折射的三种放大率与 薄透镜	162
§ 4.1 几何光学的基本定律	149	§ 4.4 共轴球面系统成像的基点 和基面	166
§ 4.2 单个球面的折射及反射成像与 符号法则	155		

§ 4.5 光度学基础与发光强度	176	* § 5.3 光阑与成像质量	207
* § 4.6 色度学基础与三原色	183	§ 5.4 光学仪器的分辨本领	211
复习思考题四	187	§ 5.5 光谱分析仪器的分辨本领	215
习题四	189	* § 5.6 像差及其矫正	219
实践与拓展四	190	复习思考题五	223
第五章 几何光学仪器的基本原理 ...	197	习题五	225
§ 5.1 眼睛与放大镜	197	实践与拓展五	226
§ 5.2 光学仪器的放大本领	200		

第三篇 现代光学基础

第六章 光与物质的宏观相互作用 ...	233	德布罗意波	269
§ 6.1 光的吸收与光纤通信	233	复习思考题七	272
§ 6.2 光的色散与光孤子传输	236	习题七	273
§ 6.3 光的散射与受激散射	242	实践与拓展七	274
§ 6.4 光速与光脉冲	246	第八章 现代光子学基础	282
复习思考题六	250	§ 8.1 受激辐射与激光	282
习题六	251	§ 8.2 激光衍射与全息照相	292
实践与拓展六	252	§ 8.3 波前变换与光信息处理	297
第七章 光的量子性	256	§ 8.4 强光波场与非线性光学	302
§ 7.1 热辐射与普朗克公式	256	复习思考题八	307
§ 7.2 光电效应与爱因斯坦方程	263	习题八	307
§ 7.3 X射线与康普顿效应	266	实践与拓展八	308
§ 7.4 光的波粒二象性与			
参考文献			317

绪 论

近代物理学的建立起源于几个典型光学实验事实与经典物理学理论的严重矛盾,可以毫不夸张地说,光学的发展史就是物理学的发展史.这不仅仅是指光学的概念和光学中的成果对物理学和物理学家的种种影响,也不只是光学仪器在物理实验研究中占有的重要地位,更重要的是人们在研究光学的几千年历程中,始终在追寻一个古老、现实而仍然困惑人们的一些基本问题:“光究竟是什么?”“光速是最快的吗?”这些问题是带有方法论意义和哲学思维本质的根本性问题.在学习光学起始阶段了解这些,对于想了解五颜六色的光学世界的奥秘、或立志将来成为光学专家或物理学家的学生来说,是必要的.

§ 0.1 光学研究的对象和方法

同几何学、天文学和力学一样,光学也是一门历史悠久的学科,它包含着人类自古以来对光的研究的丰硕果实,它的发展史典型而又鲜明地反映了人类认识客观世界逐渐接近真理的过程.

光学内容,一般可以分为几何光学、波动光学(物理光学)、量子光学和现代光学,其研究对象是光的发射、传播和接收的规律.光学是进一步研究原子物理学、相对论、量子力学和光电子技术的基础.普通物理光学的重点是几何光学和波动光学,对量子光学和现代光学只作一般性介绍,具体深入的内容是相关专业继续学习的内容.

几何光学研究的是几何光学的基本规律和几何光学仪器成像的基本原理.

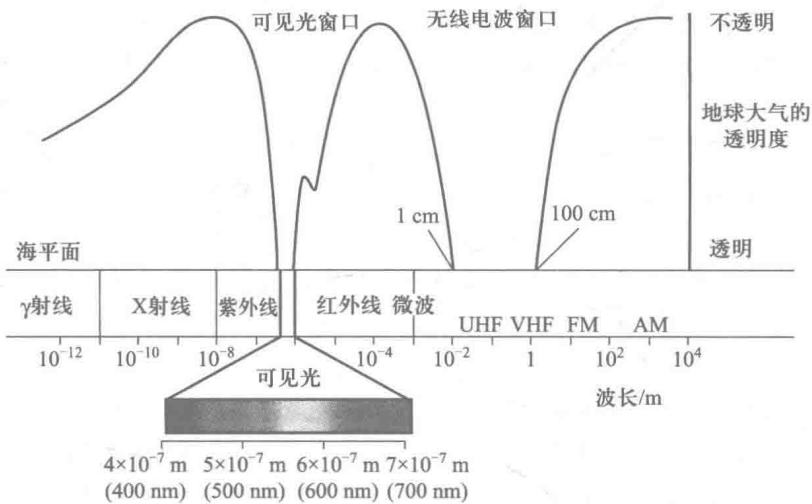


图 0-1-1 光的电磁本质——电磁波谱

波动光学中把光看成电磁波,其不同于无线电波的是:光的波长非常短(频率很高).在自然界中,已经知道了具有各种不同波长的电磁波.对所有电磁波,可以按其波长列成一波谱表,如图 0-1-1 所示.在电磁波谱中,可见光只占很小的波段,大约由 390 nm 到 770 nm [$1 \text{ nm}(\text{纳米})=10^{-9} \text{ m}$],对应的频率范围是 $7.7 \times 10^{14} \sim 3.9 \times 10^{14} \text{ Hz}$.波动光学中的许多概念和研究方法同样适用于电磁波谱的其他波段.

量子光学研究光的粒子特性;现代光学基础是以激光技术为基础的光子学各分支学科及其应用,其深入的知识是各专业课程的学习内容.

因为光是电磁波的一部分,所以,研究光学的理论基础是电磁学的麦克斯韦方程组,具体要用到线性叠加原理和惠更斯-菲涅耳原理.

§ 0.2 中国古代的光学成就

在我们的祖国,几千年前建造的烽火台,就是利用光来传递信息的光辉范例.

成书于约公元前 388 年的《墨经》,是反映我国对光学现象研究的最早文字记载,说明了我国古代早已开始了光学的研究.《墨经》的光学部分,论阴影、论反射、论光之直线传播性质、论平面镜,秩然成章.就系统而言,俨然是一部几何光学;就内容而言,是一部实验记录.《墨经》中有八条是关于光学方面的,第一条叙述影的定义与生成;第二条说明光与影的关系;第三条说明光传播的直线性,并且用针孔成像的实验来说明它;第四条说明光有反射的性能;第五条论光和光源的关系而定影的大小;第六、第七和第八条分别叙述了在平面镜、凹球面镜和凸球面镜中物和像的关系.文虽只有前后八条,寥寥数百字,但却以严谨的文字表述了几何光学的基础.所以,无论就时间的先后还是就科学性来说,《墨经》都称得起是世界光学知识的最早记录.只要比较一下《墨经》和欧几里得书中对光的直线传播的记载,即可确认这一点.

《墨经》的梁本第二十条,经云“景倒,在午有端.”经又云:“景,光之人,煦若射;下者之人也高,高者之人也下.足蔽下光,故成景于上,首蔽上光,故成景于下.”这段文字是以描写一个针孔成像实验来说明光的直线传播.午,是一纵一横相交之点,可作针孔照相匣上的小孔讲,而端,就是光线经小孔所成的光束.所以“景倒,在午有端”,就是自人发出的光线交于针孔而成光束,足蔽下光成景于上,首蔽上光成景于下,故得头在下,足在上的倒像.这里毫无主观臆测,完全是由观察得到的结果,所以,可以肯定,关于光的直线传播的伟大发现,《墨经》上所说的要比欧几里得的既早又好.

成书于春秋末年,出于齐国人之手的《考工记》,记载了我国周代的工业技术和制度,当时已经会用凹面镜取火,称之为燧.其中对制造镜所用的材料的成分也作了记载:“金锡半谓之鉴燧之齐”,金就是指铜,齐就是指合金,鉴是照人用的镜子,可见那时鉴燧两物都是用铜锡各半的合金制成的.

到 9 世纪,我国宋代沈括,在《梦溪笔谈》一书中对凹面镜和凸面镜的成像以及凹面镜焦点都作了相当详细的记录,如“古人铸鉴,鉴大则平,鉴小则凸……收人面令小,则鉴虽小而能全纳人面,仍复量鉴之大小,增损高下,常令人面与鉴大小相若.”对凹面镜的焦点写道:“阳燧面洼,向日照之,光皆聚向内,离镜一二寸,光聚为一点,大如麻菽,著物即火发.”从这段文字可以看到,沈括所说的凹面镜的曲率半径应在两寸到四寸之间,而镜的球面和光滑程

度推想起来应当是相当好的.因为这个镜的焦点只有芝麻粒儿那么大,把东西放在焦点就着火!而英国人在此后四百年(即13世纪),才相传有培根花三年功夫在他53岁那年磨成一个凹面镜,用它在太阳光下取火.可见我国古代在光学上的贡献并不逊于世界上任何其他民族,有极光辉的历史.

§ 0.3 光学的发展简史

人类对光的研究,一直是围绕着最基本的问题“光是什么”,即光的本质这一问题展开的.从很古远的时代起,人类对于光的现象就已积累了许多知识,使光学成为最古老的学科之一.而光学的发展历史几乎和人类的历史一样悠久,人们从远古时代起就知道把光作为能源和传递信息的工具而加以利用.

1. 几何光学的萌芽时期

如前所述,在比欧几里得早约百年的我国《墨经》(约公元前388年)中,对光的几何性质已有了较完全的记载.目前科学史上,大多以古希腊欧几里得(Euclid,约公元前325—前275)对“人为什么能看见周围的物体”问题的回答作为世界光学知识的最早记录.在欧几里得的书中写道:“我们假想光沿直线传播的,在线与线间还留出一些空隙来,光线自物体到人眼成为一锥体,锥顶在人眼,锥底在物体,只有被光线碰上的东西,才被我们看见,没有碰见的东西就看不见了.”这种描述,一方面反映了当时人们对光的直线传播性的正确认识,但同时也反映了对光的错误认识——从人眼向被看见的物体伸展着触须似的东西.

对于光的本质,显然这一时期人们无法理解,这样把光理解为眼睛发出的某种“触须感觉”是不正确的.

2. 几何光学的成熟时期

自我国墨子开始,有关光的科学存在的两千多年的长时期中,在1100年,阿拉伯人阿尔-海兹恩发明第一个透镜;1590年琼森和李普赛发明第一架显微镜;到17世纪上半叶才由斯涅耳(Snell)和笛卡儿(Descartes)将对光的反射和折射的观察结果归结为今天所用的反射定律和折射定律.与他们差不多同时,费马(Fermat)根据效率原理得到了确定光在介质中传播所走路径的光程极值的最小作用原理,运用该原理可以对光的直线传播、反射定律和折射定律进行严格的证明.

经过漫长的时期,到17世纪上半叶,人们基本弄清楚了光的几何性质,但是对视觉中的两个基本特征——亮度和颜色的观念还很模糊,对于光的本质,更是一无所知.

到了17世纪后半叶,牛顿(Isaac Newton)和惠更斯(Christiaan Huygens)等对光的研究才真正地把光学引上发展的道路.

1665年牛顿进行太阳光的实验.在这个实验中,太阳光通过小圆孔照射在玻璃的三棱镜上,光束在棱镜中折射后,投射在光屏上形成一个颜色按一定顺序排列的长条,牛顿称它为光谱.这个现象在牛顿之前已有人知道,并且有这样的解释:玻璃会影响太阳光使它变成彩色.但牛顿从他自己的实验确定这一个解释是不正确的.他认为白光(太阳光)是复杂的,是无数种不同的光线的混合,各种光线在玻璃中受到不同程度的折射.棱镜没有改变白光,而只是把它分解成彩色.在实验中还看到,把从第一棱镜中分出的某种颜色(例如黄色)的光从光谱中分离出来,令它再通过第二棱镜,结果没有新的成分.因此,在第一次棱镜分解中,事

实上是分出了某种不变的东西.但色彩本身没有说明光的性质,它是一个靠视觉得到的印象.例如,倘若我们把单纯的红色和绿色混合起来,也能得到太阳中的黄色.而单纯的颜色光在空间上的分离却是与光的本性联系着的,它使人们第一次接触到光客观的和定量的特征,因为这种特征可根据棱镜折射率和棱镜的形状算出.换言之,牛顿的太阳光实验,使颜色学说脱离了主观印象而走上了与客观量相联系的科学的发展道路.

牛顿还发现了另一惊人现象:把曲率半径很大(几米)的凸透镜放在平玻璃板上,当用白光照射它的时候,则可在透镜与玻璃板接触点处出现一组彩色的同心环,当用单纯的某一种色光(如红色)照射时,则可在接触点处出现一组明暗(如红与黑)相间的同心环,均匀的照射却得到了不均匀的光强分布!这种环称为牛顿环.在这个实验中,每一单纯的光与牛顿环的第一黑环所在处的透镜与玻璃板之间的空气厚度联系着,不同的单色光所对应的这种空气厚度不同,所以单色光可以定量地用第一空气隙的厚度来表征.

牛顿在发现这些重要现象的同时,根据光的直线传播性,认为光是一种微粒流,微粒从光源飞出,在均匀物质内以力学定律做等速直线运动,并且以这种观点对折射和反射定律作了解释.微粒流学说很自然地解释了光的直线传播性,然而在解释牛顿环现象时,却遇到了困难,他不得不假定,在牛顿环实验中能“发生容易的反射和容易的折射”.

惠更斯是光的微粒说的反对者,他创立了波动说,1690年他在《论光》一书中写道:“光同声一样,是以球形波面传播的,这种波同把石子投在平静的水面上时看到的波相似.”他从声现象和光现象的许多类似特性出发,认为必须把光振动看作在一种特殊的介质——“以太”中传播的弹性脉动,而这种特殊的介质充满宇宙的全部空间.然而惠更斯的关于光波的概念是很不完全的,例如,他始终没有提到光波在空间上的周期性,在《论光》中他甚至写道:“……不需要认为光波是以相同的间隔一个跟着一个.”惠更斯也没有注意到当时已经有格里马尔迪(F.Grimaldi)和胡克(R.Hooke)指出的光的衍射现象,却认为光通过无论多小的孔都是能直线传播的,他写道:“这孔永远是足够大,以致能包含为数很多的小到不可思议的以太微粒.”特别是惠更斯更没有提到牛顿环,而牛顿本人却把这一现象看作光的周期性的表现.

惠更斯的波动说只是相当粗略地指出光的波动性,这学说最有意义的部分是作为寻求光振动的传播方向的惠更斯原理:光振动所达到的每一点都可视为次波的振动中心,次波的包络面为传播着的波的波阵面(波前).运用惠更斯原理也可以对光的直线传播、反射定律和折射定律进行严格的证明.

对于光的本质,在17世纪,在微粒说占优势的同时,波动说也被粗略地提了出来,两种截然不同的学说自产生之日起一方面沿着各自的道路发展,另一方面互有斗争.在整个18世纪中,光的微粒说理论在光学中仍占优势,但光的波动理论却从没有停止对微粒说理论的斗争.例如欧勒(Leonhard Euler)就是为了捍卫以太的波动理论,而成为微粒说的反对者.

3. 波动光学时期

19世纪初,逐步发展起来的波动光学体系已初步形成,其中以托马斯·杨(T.Young)和菲涅耳(Fresnel)的著作为代表.托马斯·杨双狭缝实验显示了光的干涉现象;菲涅耳认为光振动是一种连续介质——以太的机械弹性振动,他于1835年用杨氏干涉原理补充了惠更斯原理,由此产生了今天为人们所熟知的惠更斯-菲涅耳原理.用这个原理能圆满地解释光的直线传播,特别是能够对衍射现象进行定量的讨论,该原理成为波动光学中的重要原理.

马吕斯对光的偏振现象进行了一系列的研究.他通过实验证明了光是横波.一切看起来好像是相当圆满了,因为光的弹性波动理论既能说明光的直线传播,也能解释衍射,而加上横波的限制后又可解释光的偏振现象.但是,由于机械的弹性横波只能产生在固体中,所以不得不把弹性固体的特性强加于以太.弹性横波在无限大的固体中的传播速度 v 同固体的切变模量 G 和密度 ρ 有下列关系:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (0-3-1)$$

因为以太不妨碍各种物体的运动,所以以太的 ρ 必定是非常小的,同时为了说明光的巨大的传播速度,又必须给 G 以相当大的数值.并且为了解释光在各种不同介质中的不同速度,又必须认为以太的特性在不同的物质中是不同的,在各向异性介质中还需要有更复杂的假设.此外,还必须给以太以更特殊的性质,才能解释光波中没有纵振动的现象.这种密度无限小、切变模量远大于钢、并且还有许多附加性质的以太是令人难以想象的,于是就暴露了光的弹性理论的许多重大困难.此外,机械的弹性理论既没有指出光学现象和其他物理现象间的任何联系,也没有能把表征介质性质的光学常量和介质的其他参量联系起来.显然,光的弹性波动理论仅仅是人类逐渐认识客观真理过程中相对进步的一种理论.

1846年,法拉第(Faraday)发现了光的振动面在磁场中发生旋转,这表明光学与磁学现象间存在内在的联系;1856年韦伯(Weber)发现,光在真空中的速度等于电场矢量与磁场矢量的比值 3×10^{10} cm/s,这表明光现象和电磁现象有一定的关系.从这些发现中,人们获得了新的启发,即必须把光学现象和其他物理现象联系起来考虑,而不能孤立地来研究光的本性.

1860年麦克斯韦(J.C.Maxwell)的理论研究指出,电场和磁场的改变,不局限在空间的某一部分,而是以电场矢量与磁场矢量的比值的速度传播着,光的传播就是这样的一种电磁现象.这个结论在1892年被赫兹(Hertz)的实验证实.按着麦克斯韦的理论,若以 c 代表光在真空中的速度, v 代表光在介电常量为 ϵ 和磁导率为 μ 的介质中的速度,则有

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (0-3-2)$$

因为 $\frac{c}{v} = n$ (介质的折射率),所以

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (0-3-3)$$

这个式子给出了物质的光学常量即折射率 n 同电学常量 ϵ_r 和磁学常量 μ_r 间的关系.在认识光的本性方面,麦克斯韦电磁理论较弹性固体理论向前迈了一大步.然而麦克斯韦电磁理论像弹性固体理论一样,还需要有以太,只不过是以电磁的以太代替了机械的以太,在电磁以太中有位移电流和磁场.然而,这样的理论并没有进一步说明以太的性质.

麦克斯韦的理论和赫兹的实验证明了光是电磁波,于是就有必要研究产生频率高达光的频率的电振子的性质.另一方面,从已得到的(0-3-3)式看不出折射率 n 会随着光的频率变化而变化,而实验上已确证, n 会随光的频率变化而变化.这样,就有必要根据物质结构的概念,研究物质是怎样发光和物质与光相互作用的各种过程.到了1896年洛伦兹(H.A.Lorentz)创立了电子论,他认为原子和分子内含有带负电的电子,在无外力作用时电子处于平衡位置;在外力作用下,电子做阻尼振动而产生光的辐射.当光通过介质时,若介质中电子

的自然频率与外场的频率相同,则束缚电子成为吸收体.这样,利用洛伦兹电子论不仅解释了物质发光和吸光的现象,也解释了光在物质中传播的各种特点.特别是,对折射率 n 和随光波频率而变化产生的色散现象也得到了较合理的解释.因为从电子论观点来看,介电常量 ϵ 是与电场改变的频率有关的物理量.在洛伦兹的理论中,以太乃是广袤无限的、不动的介质,其唯一特点是,在这种介质中光振动具有一定的传播速度.

对于光的本质,像炽热的黑体辐射能量按波长分布这样重要的问题,麦克斯韦的经典理论和洛伦兹电子论理论都不能给出令人满意的解释.并且,如果洛伦兹以太的概念是正确的话,则可将不动的以太选为参考系,以使人们能区别出绝对运动.而事实上,于1887年迈克耳孙用干涉仪测“以太风”却得到了否定结果,即洛伦兹设想的以太的存在与迈克耳孙实验结果不符.这表明即使到了洛伦兹电子论时期,人们对光的本性的认识也仍然是片面的.特别重要的是,1907年,赫兹发现的光电效应现象、单质原子的线状光谱以及原子发出电磁辐射后还能够保持稳定性问题等,都是惠更斯的机械波动说和麦克斯韦的电磁波动理论不能解释的.

4. 量子光学时期

1900年,普朗克(Max Planck)从物质的分子结构理论中借用了驻波不连续的概念,提出了辐射的量子论.他认为各种频率的电磁波,包括光,只能以一定分量的能量自振子射出,这种能量微粒称为量子,光的量子称为光子.用量子论不但很自然地解释了灼热体辐射能量按波长分布的规律性问题,并且以全新的方式提出了光与物质相互作用的整个问题,而如果没有量子论,要理解这些问题是不可能的.量子论不但给光学,也给整个物理学提供了新的概念,故通常把量子论的诞生视为近代物理学的起点.1905年,爱因斯坦将这个在物理学中具有革命意义的量子论用于光电效应中,他把光子作为最小单位进行处理.此外,在19世纪末和20世纪初的许多实验,比如原子的线状光谱、康普顿效应等都直观地证明了光的量子性.这样一来,光的微粒性(量子性)又提到了首位.

1905年9月,德国《物理学年鉴》发表了爱因斯坦的一篇论文《论动体的电动力学》,其中第一次提出了狭义相对论的基本原理.论文中指出,从伽利略和牛顿时代以来占统治地位的经典物理学,其应用范围只限于速度远远比光速小的情况,而他的新理论则可解释与很大运动速度有关的过程的特征,从根本上抛弃了以太的概念,圆满地解释了运动物体的光学现象.

这样,在20世纪初,一方面从光的干涉、衍射、偏振以及运动物体的光学现象中确证了光是电磁波,而另一方面又从热辐射、光电效应、原子的线状光谱、康普顿效应、光压现象以及光的化学作用等不容置疑的实验事实中证明了光的量子性——微粒性.并且,光的波动理论和光的量子理论各自统治着自己的领域,波动理论不能解释光的量子行为,而光的量子理论亦不能说明光的波动现象,似乎没有方法使两者统一起来.这种情况与17世纪末牛顿的光的微粒说与惠更斯的光的波动说的对峙相似.然而,对于光的本质,现代科学到底如何回答“光是什么”这一问题?是微粒还是波动?

原来,光既具有微粒性,又具有波动性(所谓波粒二象性).当光与物质相互作用时,光的微粒性表现得非常明显,比如光电效应、原子的线状光谱、康普顿效应等;而光在传播过程中,波动性又表现得非常明显,比如衍射、干涉现象.怎样才能把互不调和的微粒概念和波动概念加到同一“光”上?如果有人一定要问“光到底是什么?”那么,这是不能简单地回答的.因为

在我们周围还找不到一种宏观模型可以用来比拟.但是对事物的理解并不一定都要借助于比拟的方法.现在对于全部光学现象的理论解释是由麦克斯韦电磁场理论和量子理论联合得出的.麦克斯韦理论处理光的传播问题,而量子理论则描述光与物质的相互作用,也就是描述光的吸收与发射过程.这种联合的理论称为量子电动力学.

对于宏观世界中连续的波动和不连续的量子,在经典物理学的机械概念中,是互相排斥的,而在客观实际的自然现象中,它们是统一的、共处的.四十多年前,德布罗意(de Broglie)大胆地创立了物质波学说.他设想每一种物质的粒子运动都和一定的波动相联系.这一假设被后来许多实验所证实.例如,电子束在通过金属薄膜时产生的衍射现象,确定了电子束的波长,令人信服地证明了电子的波动性.实际上,具有波动性的不仅仅有电子、质子、原子和分子,其他物质微粒也都有与它自己的质量和速度相联系的波动性特征.这实际上表示了不仅光有波动性和微粒性,一切习惯概念上的实物也同样具有这两种性质,它们是客观物质所共有的属性.在由德布罗意和后来薛定谔创立的量子力学原理中,玻恩对波动性和微粒性的对立进行了完满的统一解释——概率波,即光或电子通过圆孔的衍射图样,可以这样来解释:通过圆孔的光子或电子落在屏上某些区域多些,而另一些区域少些,甚至没有.换言之,衍射图样可由屏上一定点或一定时间发现光子或电子的概率值来确定.

然而,我们并不能简单地把“实物波”和光波看作同样的东西,光波有电磁性,而“物质波”没有这种性质;“物质波”与实物本身有机地相符合,而光波却是由实物发出来的,具有完全不同的性质.

对于光的本性,如今是这样认识的:光和实物一样,是物质的一种,它同时具有波的性质和微粒(量子)的性质,而从整体来说,它既不是波,亦不是微粒,亦不是这样或那样的混合物.对这种辩证关系,现在人们还缺乏一目了然的形象.这反映出即使在今天人们对光的本性的认识也还远远没有达到最后的境地,甚至在某些新发现的现象前,人们还没有从惊奇中苏醒过来.例如,近代实验已发现波长不大于千分之一纳米(nm)的光子(γ 射线)在强电场中可变成两个带相反电荷的质点——电子和正电子的现象.这一现象无疑地显示了光子与实物之间的深刻联系.如今人们在这现象面前很像17世纪末人们在牛顿环面前一样,在惊奇中不知其所以.研究光的本性的工作尚需人们持久的努力.

5. 现代光学时期

自1960年做成第一个红宝石激光器以来,激光科学技术的发展已使光学成为现代科学技术最活跃的领域.激光的出现,标志着人们掌握和利用光进入了一个新阶段,它的发展有力地促进了物理学、化学和生物学的发展.激光在材料加工、精密测量、远距离测距、全息检测、军事、通信、医疗以及农作物育种等方面获得了广泛的应用.同时其在同位素分离、催化、信息处理等方面也有着广阔的发展前景,以激光引发核聚变是探索实现受控热核反应有关技术的重要途径之一.

激光的出现和发展,促进了光学和电子学的密切结合、渗透以及工艺水平的提高,特别是激光引发了光学新的迅速发展,先后出现了许多新的领域.例如在强的激光照射下,可以观察到许多新的非线性光学现象.过去,由于光束的电磁场很弱,仅能产生线性效应.而现在有了非常强的大功率激光,从而产生了许多非线性效应,由此而出现了光学的新分支——非线性光学.利用这些新发现,使人们对材料的研究可以进一步深入.其他如全息、纤维光学、光通信、集成光学、光计算等领域,也取得了很大的成就,形成了新的光学分支.但就激光光学

本身而言,如光的波长短、信息容量大、光传递信息和变换处理信息的二维特性等还具有很大的潜力,它的发展远远没有达到人们预期的水平。

高速数字计算机技术为复杂的光学系统的设计和光学设计质量的提高创造了条件,从而产生了一系列的高质量的性能卓越的光学系统,如应用于现代电视、电影摄像用的变焦距物镜及应用于半导体工业中的衍射限额精密微缩镜头。光学工艺中,不仅有多层介质膜显著提高了光学系统的效能,而且薄膜光学为解决各种分光和光谱滤波提供了理论基础。

纤维光学近十多年来,特别是近几年来得到了突飞猛进的发展,它不仅为一般内窥光学系统提供了纤维传像和传光束,而且成功地应用于通信系统,现在已经用光学纤维来代替传统上沿用的金属电缆。

近二十年来,红外光技术的研究一直受到各国军工的普遍重视,已经成功地应用于各种探测系统、导弹制导、资源考察以及遥感遥控技术之中,红外材料以及各种有机化合物的红外光谱的研究都得到了巨大的发展。

在光学领域本身,由强激光产生的非线性光学效应正为越来越多的人所注意,激光光谱学,包括激光拉曼光谱学,高分辨率光谱和飞秒(10^{-15} s)超脉冲以及可调谐激光技术等已使传统的光谱学发生了革命性的变化,成为深入研究物质微观结构、运动规律和转换机制的重要手段,它将对凝聚态物理学、分子生物学和化学的动态过程的研究提供前所未有的方法。

相干光学计算机与电子计算机的联合,为计算机科学开拓一个新的技术领域。全息照相技术的应用不仅可能为人们提供立体电影或电视,尤其是,全息存贮的研究还有可能为研究人脑的记忆机理提供有益的线索。由于现代光学技术在空间上既能延伸到上亿光年的距离,又能深入联系到微观的原子世界;并且在波段上它包含波长极短的 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线、远红外线直到微波,所以,光信息的研究——信息光学方兴未艾,有着巨大的发展前景。

§ 0.4 光子学与电子学的比较

可以说,我们的物理世界是由种类众多的微观粒子组成的,而其中的光子和电子则是人们经常会涉及的两类。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,但是它们都是具有动量和能量的“粒子”,都可以和别的物质相互作用而交换动量和能量,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、偏振和成像,从而制成了许多电子光学仪器,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敏感的“探针”。描述光波的各个参量,即光的偏振、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、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容器中,所以其具有更普遍的应用性.总之,光子作为探测物质内部信息的手段,与电子探针是相互补充的,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,这也促进了学科间的密切联系和发展.例如,在1982年扫描隧穿显微镜(STM)的研究获得成功以后,科学家立刻触类旁通地想到了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像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”这一崭新概念的提出.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,也会类似的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,如果光子的能量大于介质的禁带宽度,光子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了证实.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,这是令人备受鼓舞的.

实际上,一门与电子学相并行的学科——光子学正在兴起,虽然在技术的成就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微电子技术、电子工业的发展一样为人类社会创造巨大财富.

在光学课程的正式学习之前,我们简要地阐述了光学发展的历史及其意义,接下来我们将逐步深入讨论光的基本原理及其应用技术,为后续的专业课程学习打下必要的基础,从而开拓我们的视野,拓展我们的思维和培养我们的创造能力.

