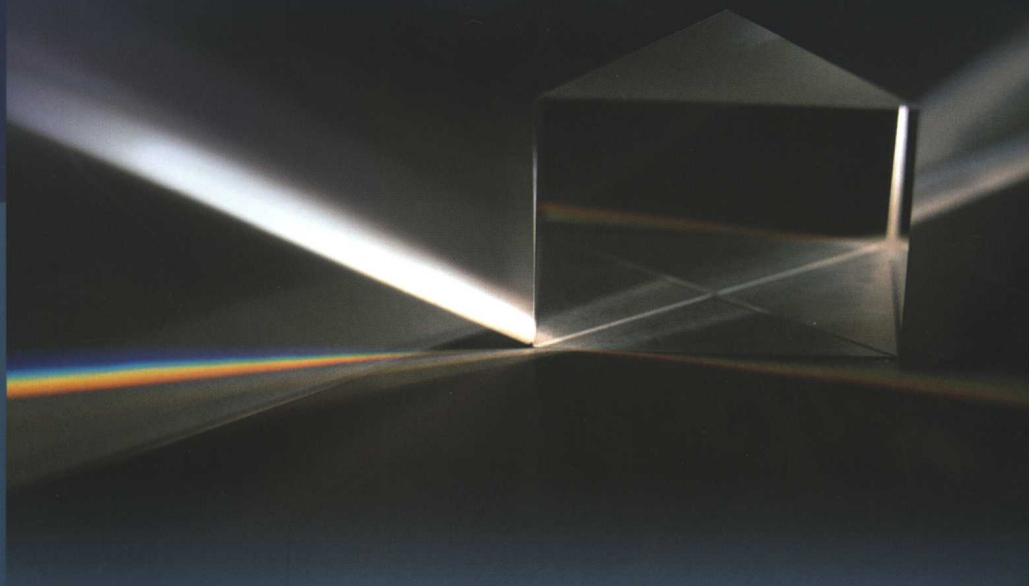




普通高等教育“十五”国家级规划教材

光 学 OPTICS

郭永康 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

普通高等教育“十五”国家级规划教材

光 学

郭永康 主编

郭永康 朱建华 王 磊 张怡霄 编著

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,是在原编写的《光学教程》基础上改写而成的。全书主要涉及几何光学和波动光学的内容,系统透彻地介绍了光学的基本概念和理论、规律、分析方法及其重要应用,在各章末皆编有精选的思考题和习题。在精选传统内容的基础上,本书还适度增加了一些与传统内容结合密切的反映现代光学新概念、新面貌的内容。

本书概念准确、物理图像清晰、取材新颖、逻辑体系严谨、数学运算简洁,可作为高等学校物理类专业的教材,也可供其它专业作为参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光学/郭永康主编. —北京:高等教育出版社,
2005.12

ISBN 7-04-017391-3

I. 光… II. 郭… III. 光学—高等学校—教材

IV. O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 117521 号

策划编辑 刘 伟 责任编辑 刘 伟 封面设计 王凌波 责任绘图 尹 莉
版式设计 马静如 责任校对 康晓燕 责任印制 孔 源

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landaco.com
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landaco.com.cn
印 刷	北京市卫顺印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2005 年 12 月第 1 版
印 张	26.25	印 次	2005 年 12 月第 1 次印刷
字 数	490 000	定 价	27.70 元
插 页	1		

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 17391-00



(a) (b)

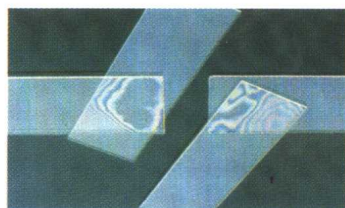
▲图1 (a)彩虹;(b)白光经棱镜的色散



◀图2 光栅产生的 H、He、Hg 的光谱



►图3 (a)玻璃片间的空气薄膜产生的彩色干涉条纹;(b)彩色牛顿环

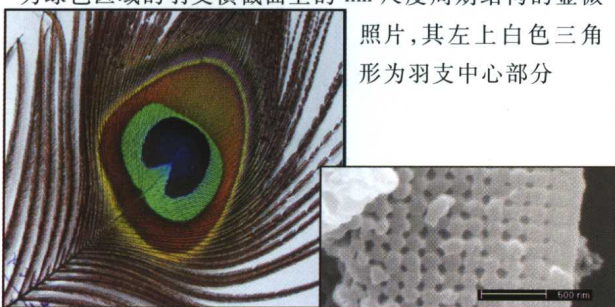


(a)

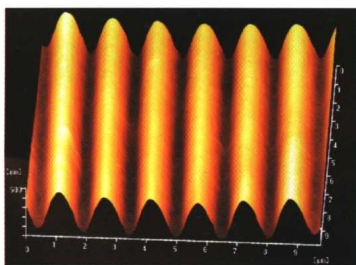


(b)

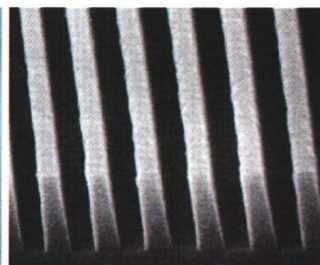
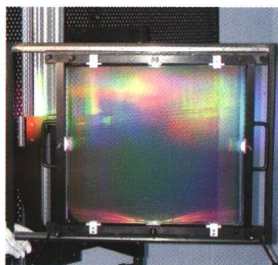
▼图4 孔雀羽毛的黄、褐、绿、蓝四色形成“眼”。右下为绿色区域的羽支横截面上的 nm 尺度周期结构的显微照片,其左上白色三角形为羽支中心部分

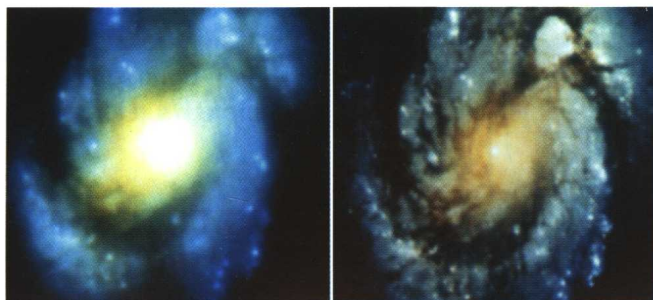


▼图5 用原子力显微镜获得的正弦相位光栅的浮雕轮廓



▼图6 大口径全息光栅及其沟槽的部分显微照片





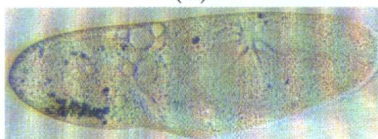
(a)

(b)

◀图7 地面望远镜所拍摄的星系照片[图(a)]和哈勃太空望远镜拍摄的同一星系的照片[图(b)],后者具有更多的细节



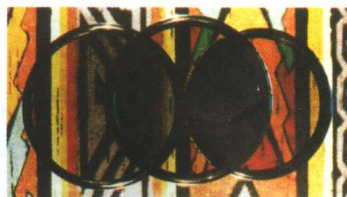
(a)



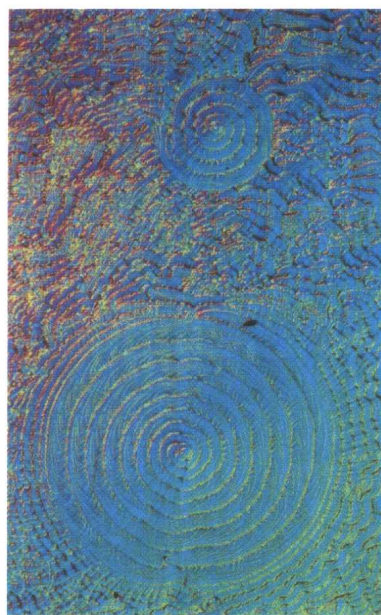
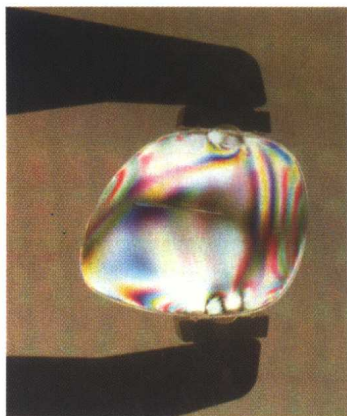
(b)

▲图8 (a)在普通显微镜下看到的没有染色的草履虫的像;(b)用相衬显微镜观察同样的物体可得到更高的对比度

►图9 一个偏振片放在另两个偏振片上,居中者的透振轴分别与左右二者的正交和平行

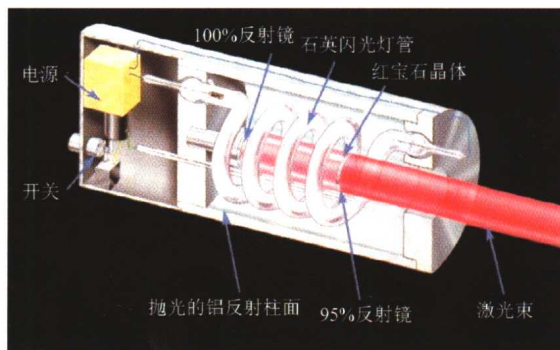


►图10 塑料透镜在压力作用下产生的光弹效应



◀图11 旋光物质在偏光显微镜下可产生绚丽的色彩和高对比度。图中显示的是超导陶瓷的照片

▼图12 第一台红宝石激光器



郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

前 言

本书的前身《光学教程》(四川大学出版社)自1989年出版以来,为多所高校和科研单位选作教材或研究生入学考试的指定参考书,已累计重印上万册.多年来使用该书的老师和学生提出了许多十分宝贵的意见,本书就是根据这些意见,并汲取近十多年来光学的最新发展和教学研究的新成果,学习和参考了国内外近期出版的光学教材,对原书作了较大的增删和修改而成的.

光学是物理类及相关专业的一门重要基础课.本书以介绍几何光学和波动光学内容为主,力图系统、透彻地讲解光学的基本概念、规律和分析方法及其重要应用,为学生进一步学习和开展研究工作打下坚实的基础.本书在修订过程中保留了原书的基本构架及物理概念准确、图像清晰、取材新颖、逻辑体系严谨、数学运算简洁等风格.

自从上个世纪40年代开始,特别是1960年激光的发明,使光学产生了革命性变化,出现了许多新的学科分支,光电子学和光子学的发展使光学已成为现代高新技术的基础,对20世纪人类文明作出了巨大贡献.教学内容的更新是教学改革永恒主题,本书在精选传统内容的基础上,力图适度反映现代光学特别是近十多年来的某些新成就、新面貌,用现代光学的新观点去重新审视和发展传统内容.为此,本书中增加了以下新内容:偏振梯度场、光学相干层析术、负折射率介质、哈勃空间望远镜、计算全息和数字全息、达曼光栅、热像差、二元光学、分数傅里叶光学、光调制器、液晶、光的吸收和散射在环境监测中的应用、激光冷却原子、激光核聚变等,它们都是和传统内容密切结合的一些新概念、新现象、新技术.本书作为一本专业基础课教材只能讲授和它们相关的光学基础,而不能涉及更深的理论和技术.作者希望通过这些内容的引入,使读者能从一个新的视角去认识传统内容,并将它们作为了解光学和物理学发展新面貌的“窗口”和进一步学习与研究它们的“接口”.

为了适应不同专业和不同学时数的要求,反映现代光学中某些新概念、新面貌的内容的安排和编写有相对的独立性,并标以“*”号,以小字排印,便于任课教师灵活选用.各章末都编有精选的思考题和习题.为了从低年级开始培养学生使用计算机解题的能力,在一些章末增加了少量用计算机进行模拟和计算的习题,可供有条件者选用.

本书由郭永康负责全书的策划和统稿,并编写绪论、第1、2、3、4章;第5、6、

8 章由朱建华编写;第 7、9 章由王磊编写;张怡霄选编了全部模拟计算习题,并指导几位学生进行了书稿录入和插图绘制工作。

本书的部分彩图选自 College Physics, Paul Pater Urone, Lnd ed., 2001。复旦大学资剑教授提供了彩图 4。深圳泛彩溢公司范诚博士为本书赠送了专门设计、制作的精美模压全息图(封三)。在本书的编写过程中,电子科技大学王仕璠教授与编者进行了多次讨论,提出了许多宝贵的意见。高等教育出版社的胡凯飞、刘伟同志为本书的出版付出了大量心血,编者谨深致谢忱。由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,祈请读者批评和指正。

编著者 于四川大学

目 录

绪论	1
第一章 几何光学的基本原理	6
§ 1.1 几何光学的基本定律	6
§ 1.2 费马原理	13
§ 1.3 成像的基本概念	17
§ 1.4 光在平面上的反射和折射	20
§ 1.5 光导纤维	24
§ 1.6 棱镜	26
§ 1.7 光在单球面上的折射和反射	30
§ 1.8 薄透镜	40
§ 1.9 共轴球面系统的逐次成像法	45
§ 1.10 共轴球面系统傍轴成像的矩阵方法	48
思考题	55
习题	56
模拟计算习题	59
第二章 光阑、像差和成像光学仪器	60
§ 2.1 光阑	60
§ 2.2 像差	64
§ 2.3 人眼的光学系统	70
§ 2.4 放大镜和目镜	73
§ 2.5 显微镜	77
§ 2.6 望远镜	78
思考题	82
习题	83
第三章 光波及其在各向同性介质界面的反射和折射	85
§ 3.1 光波	85
§ 3.2 光波场的数学描述	88
§ 3.3 波函数的复数表示 复振幅	96
§ 3.4 光波的偏振态	99

§ 3.5 光在各向同性介质界面的反射和折射	105
* § 3.6 负折射率介质	117
思考题	120
习题	121
第四章 光的干涉	124
§ 4.1 波的叠加和干涉	124
§ 4.2 光波相干的条件和产生方法	126
§ 4.3 杨氏实验	128
§ 4.4 其它几种两光束分波前干涉装置	134
§ 4.5 两束平行光的干涉	137
§ 4.6 光源的光谱展宽对干涉条纹可见度的影响 光场的 时间相干性	140
§ 4.7 光源的空间展宽对干涉条纹可见度的影响 光场的空间 相干性 部分相干性	145
§ 4.8 薄膜干涉(一):等倾干涉	151
§ 4.9 薄膜干涉(二):等厚干涉	158
§ 4.10 薄膜干涉(三):应用举例	164
§ 4.11 迈克耳孙干涉仪	168
* § 4.12 傅里叶变换光谱仪 光学相干层析术	171
§ 4.13 多光束干涉	174
§ 4.14 法布里-珀罗干涉仪	180
思考题	186
习题	187
模拟计算习题	192
第五章 光的衍射	197
§ 5.1 光的衍射现象	197
§ 5.2 惠更斯-菲涅耳原理	200
§ 5.3 狭缝和矩孔的夫琅禾费衍射	204
§ 5.4 圆孔、圆环和多边形孔的夫琅禾费衍射	210
§ 5.5 互补屏 巴比涅原理	212
§ 5.6 成像仪器的像分辨本领	213
§ 5.7 振幅型平面透射光栅	220
§ 5.8 光栅光谱仪的特性	225
§ 5.9 正弦型振幅光栅	228
§ 5.10 闪耀光栅	231

* § 5.11 达曼光栅	233
§ 5.12 菲涅耳衍射	235
* § 5.13 塔尔博特效应	243
§ 5.14 波带片	244
思考题	250
习题	252
模拟计算习题	254
第六章 光信息处理及全息术	258
§ 6.1 傅里叶变换	258
§ 6.2 衍射理论中的傅里叶方法	262
§ 6.3 理想薄透镜的傅里叶变换作用	268
§ 6.4 阿贝成像原理	273
§ 6.5 空间频率滤波	275
§ 6.6 光全息术	280
* § 6.7 计算全息和数字全息	286
* § 6.8 分数傅里叶变换	291
* § 6.9 二元光学	294
思考题	297
习题	298
模拟计算习题	299
第七章 光在晶体和液晶中的传播	301
§ 7.1 晶体的双折射和双反射	301
§ 7.2 产生线偏振光的元件	309
§ 7.3 相位延迟器	313
§ 7.4 偏振光通过波晶片后偏振态的变化	317
§ 7.5 偏振光的干涉	322
§ 7.6 旋光及圆二色性	330
* § 7.7 液晶	335
§ 7.8 光调制器	341
* § 7.9 偏振态及其变换的矩阵描述	346
思考题	352
习题	353
第八章 光的吸收、色散和散射	357
§ 8.1 光的吸收	357
§ 8.2 光的色散	361

§ 8.3 光的相速和群速	367
§ 8.4 光的散射	369
* § 8.5 光的吸收及散射在环境监测中的应用	375
思考题	380
习题	380
模拟计算习题	381
第九章 激光与非线性光学	383
§ 9.1 光与原子系统的相互作用	383
§ 9.2 激光的原理	387
§ 9.3 激光器	393
§ 9.4 激光的应用	396
§ 9.5 光学倍频和混频效应	399
§ 9.6 光学相位共轭	402
思考题	405
习题	405
习题参考答案	406
全息图说明	

绪 论

一、光学研究的内容

光学是物理学的组成部分,它研究的对象是光,研究的内容包括光的本性,光的发射、传播、接收以及光和物质的相互作用等。

麦克斯韦电磁理论认为,光是一种电磁波.在真空中,可见光的波长范围约在 390~760 nm 之间.各种色视觉对应的波长和频率范围见下表:

色 视 觉	频率/Hz	真空中波长/nm
红	$(3.9 \sim 4.8) \times 10^{14}$	760~630
橙	$(4.8 \sim 5.0) \times 10^{14}$	630~600
黄	$(5.0 \sim 5.3) \times 10^{14}$	600~570
绿	$(5.3 \sim 6.0) \times 10^{14}$	570~500
青	$(6.0 \sim 6.7) \times 10^{14}$	500~450
蓝	$(6.7 \sim 7.0) \times 10^{14}$	450~430
紫	$(7.0 \sim 7.7) \times 10^{14}$	430~390

从量子观点看,光场是由一个个光子组成的.光子是光的最小单位,每个光子的能量 ϵ 和它的频率 ν 之间的关系为

$$\epsilon = h\nu$$

式中 h 是普朗克常量,其数值为

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

光子也具有动量 p ,它的方向为光子的运动方向(即光的传播方向),其值为

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

式中 c 为真空中的光速,1983 年第十七届国际计量大会通过其值为

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

光既有波动性也有粒子性,即具有波粒二象性.普朗克常量非常小,一个光子的能量也非常小.一般情况下我们遇到的都是极大数量的光子,明显表现出波动性.只有在光极其弱的情况下,以及光和物质相互作用的某些特殊情况下,其量子特性才会明显地表现出来.所以光的波动性和粒子性分别都只是光的本性

的近似描述和模型.

在基础光学中,通常对不同的现象采用不同的模型去描述.根据所采用模型的不同,光学一般分为几何光学和物理光学两部分,后者又分为波动光学和量子光学.几何光学以光的直线传播性质为基础,根据实验总结的几个基本定律研究光线在透明介质中的传播问题.波动光学以光的波动性为基础,研究光的传播、光和物质相互作用的规律.但是,光的发射以及光和物质相互作用的某些问题,必须用量子理论才能较圆满地解释.光的严格理论是量子电动力学.

二、光学发展史简述

光是自然界的一种基本现象,它为人类带来热和光明,是人类赖以生存的重要条件.光不仅是能量的载体,而且也是信息的载体.携带有物体信息的光波进入人眼后,为视网膜上的视神经细胞所接收,对信息作初步处理后,再传给大脑作进一步处理,我们才能感觉到周围世界的五彩缤纷和斑驳陆离.由于光和人们的各种生活、生产活动息息相关,因此光学和力学一样是物理学中发展最早的一部分.关于光的几何性质较为系统的最早记载,见于公元前四百多年先秦时代的《墨经》^①中.古希腊数学家欧几里得(约公元前 330—275)也曾注意到光的传播的直线性,在其著作中记录了反射角等于入射角,但比《墨经》晚 100 多年.由于光的物理本性不容易被认识,古代对光的研究基本上停留在现象的描述与简单规律的总结.人们对光的本性的认识经历了漫长的过程,直到 17 世纪中叶才开始了对它的认真探讨,当时存在着以牛顿为代表的微粒说和以惠更斯为代表的波动说的争论.

笛卡儿(1596—1690)最早对光的微粒模型作了研究,他把光比作小球来解释光的反射定律和折射定律.牛顿(1642—1727)不仅对力学、数学、天文学的发展作出了巨大贡献,在光学领域也取得了重要成就.他发展了笛卡儿的模型,提出了光是微粒流的理论,但是,正是牛顿做了一些光具有波动性的著名实验(如著名的三棱镜色散实验,1666 年),仔细研究了后来称为牛顿环的薄膜干涉、衍射(当时称为拐折)、偏振现象.他的这些工作总结在《光学》(1704 年)^②一书中.牛顿的研究工作既涉及到光的微粒性又涉及到波动性,他在光的本性问题上犹豫了很久.微粒说可以解释光的直线传播、反射和折射定律,而波动说当时还不能解释光的直线传播及光的偏振现象,所以牛顿最后倾向于微粒说.

大约与牛顿倡导微粒说的同时,惠更斯(1629—1695)等人则主张波动说.惠更斯认为光是“以太”中传播的波.利用惠更斯原理可以解释光的反射和折射定律、双折射现象.然而惠更斯的波动说很不完善,他错误地把光看作像声波一样

① 钱临照.论墨经中关于形学、力学和光学的知识,物理通报,1951(3).

② 参阅中译文,周岳明等译,中国科学技术出版社,1987.

的纵波,又由于牛顿在力学上伟大成就的影响,所以当时虽然存在着两种学说的争论,但在相当长的一段时间内微粒说占着统治地位,这使得整个 18 世纪人们对光的本性的认识几乎未取得进展。

19 世纪是波动说的全盛时期.1801 年杨氏演示了著名的双孔干涉实验,并用波动理论做了很好的解释,初步测定了光波波长,使光的波动说重新兴起.菲涅耳(1788—1827)等人的大量实验和理论工作合理地解释了光的干涉、衍射、偏振现象,为波动光学奠定了基础.根据波动说,光在光疏介质中的速度应大于光密介质中的速度,而根据微粒说则得出相反的结果^①.1850 年傅科测得光在水中的速度比在空气中小,证明了波动说所得出的结论的正确性.遗憾的是,这只是一个迟到的判决.但无论惠更斯还是菲涅耳,他们都把光波看成弹性介质中的机械波。

1845 年法拉第(1791—1867)发现了光波振动面的磁致旋转,建立了光与电磁现象之间的联系.1865 年麦克斯韦(1831—1879)在总结安培、韦伯、法拉第等人对电磁现象研究成果的基础上,建立了电磁理论.根据麦克斯韦的理论,电磁波在真空中的传播速度为 $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$,式中 ϵ_0 、 μ_0 为真空中的介电常量和磁导率.为了得出 c 的值,麦克斯韦利用韦伯和柯耳劳斯等在 1856 年通过实验所测得的结果 $\epsilon_0\mu_0 \approx 11.12 \times 10^{-18} \text{ s}^2/\text{m}^2$,得出 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.这个值与菲索 1849 年用旋转齿轮法测得的光速值 $c = 3.133 \times 10^8 \text{ m/s}$ 相当符合,由此麦克斯韦指出光是一种电磁波.1888 年赫兹用一系列实验证实了麦克斯韦的假设,于是产生了光的电磁理论.19 世纪末以光的电磁理论为基础建立了经典光学,并推动了整个物理学的发展.尽管在 20 世纪光学已经有了很大发展,但是电磁理论仍然是处理经典光学及近代光学中大量问题的理论基础。

光波既然是横波,似乎必须承认一种传播横波的介质——“以太”的存在.为了解释光波的传播速度很大,还必须赋予以太一些不可思议的矛盾的属性:密度极小而弹性模量极大.光的电磁理论的建立,用“电磁以太”代替了“机械以太”.1887 年迈克耳孙和莫雷利用迈克耳孙干涉仪试图探测地球在“以太”中的绝对运动,然而他们却得到了零结果,从而动摇了作为光波载体的“以太”假说,以静止以太为背景的绝对时空观遇到了根本困难.1905 年爱因斯坦建立了狭义相对论,在这个理论中,他也独立地否定了以太的假说.这些结果表明电磁波能够通过自由空间传播,电磁场本身就是一种物理实在。

20 世纪是光学大发展的一百年.19 世纪末至 20 世纪初,光学已深入到研究光的发射、光和物质相互作用的微观机理.为了解释光和物质相互作用的某些现

^① 钟锡华.现代光学基础.北京:北京大学出版社,2003,2~3.

象,光的电磁理论遇到了困难.为了解释黑体辐射能量按波长的分布公式,1900年普朗克(1858—1947)提出了量子论.1905年爱因斯坦(1879—1955)发展了普朗克的量子论,提出了光量子的假说,对光电效应的规律作了解释和预言.1927年康普顿散射实验进一步证明了爱因斯坦理论的正确性.量子论和光子学说的提出是人们对光的本性认识的又一次飞跃,它标志着近代光学的诞生.

光的干涉、衍射、偏振表明光的波动性,光电效应等表明光的粒子性,即光具有波粒二象性.1924年德布罗意指出波粒二象性是微观粒子的普遍属性.20世纪30年代发展起来的量子电动力学认为光子是电磁波能量和动量的量子化,电磁波振幅的平方表示光子出现的几率,即电磁波是光子的概率波,从而将光的波粒二象性很好地统一起来.

自20世纪中叶开始,光学研究的观念、方法、技术和设备条件等方面都产生了一系列重大突破,1935年泽尼克提出了相衬原理,1948年伽柏发明全息术,50年代通讯理论和光学的结合,产生了傅里叶光学,为光学信息处理的理论和技术奠定了基础.90年代迅速发展的分数傅里叶光学是傅里叶光学的发展和延拓,为光学信息处理开辟了更广的领域.

1960年第一台红宝石激光器的发明是光学发展史的一个新里程碑,它是20世纪继原子能、半导体、计算机之后的又一重大发明.计算机延伸了人的大脑,而激光延伸了人的感官,成为探索大自然奥秘的“超级探针”.激光的发明及其应用使沉睡多时的光学产生了革命性变化,使光学面貌焕然一新,它标志着从20世纪中叶开始萌芽的现代光学的兴起.

激光是相干性好、方向性强、亮度高的新型光源,特别是相干性,是其区别于普通光源的重要特性.激光打破了普通光源的局限,已广泛应用于激光通信、激光分离同位素、激光核聚变、激光冷却、激光加工、激光医疗、激光育种、激光照排和打印等领域.

在激光作用下,人们观察到许多新现象,加深了对物质及其运动规律的认识,推动了物理学、化学、生物学及光学自身的发展,一些分支学科和交叉学科如雨后春笋般诞生,例如非线性光学、导波光学、集成光学、激光光谱学、二元光学、瞬态光学、量子光学、原子光学、激光物理、激光化学、激光生物学等.大量分支和交叉学科的涌现是20世纪现代光学发展的重要标志.

电子学和光学以及材料科学的结合产生了光电子学这个具有深远意义的交叉学科.多种类型的高灵敏度、高性能的光电子器件如光电二极管、半导体激光器、电荷耦合器件、光电传感器、红外探测器等的研制成功,使光电子器件和光电子技术已成为高新技术的基础,并推动着传统光学仪器的光机电一体化、智能化,使其产生划时代变化.

20世纪70年代以后,由于半导体激光器和光纤技术的重大突破,促进了以

光纤通信为代表的光信息技术的蓬勃发展,并形成光子学这门新的分支学科.光子学的研究内容是作为信息载体和能量载体的光子的产生、传输、控制和探测以及光子和光子、光子和电子相互作用的规律.20 世纪 90 年代光纤通信和计算机技术的结合发展了互联网,它是信息技术发展过程中的“革命性”转折,比起历史上铁路、电力、汽车的发明,其影响更加空前,使人类从此开始进入信息时代.

光学作为一门学科诞生已有 340 年.现代光学和光子学的应用已涵盖工业、农业、科技、国防和人民生活的各个领域.光学的发展史是人类对光的本性不断探索、不断深入认识的过程中闪烁着非凡智慧和创造力的历史,也是对物理学及其它学科的发展、社会进步和人类文明作出巨大贡献的历史.20 世纪光学和光子学的巨大成就,孕育着在新的世纪将会发出更加灿烂的光辉.