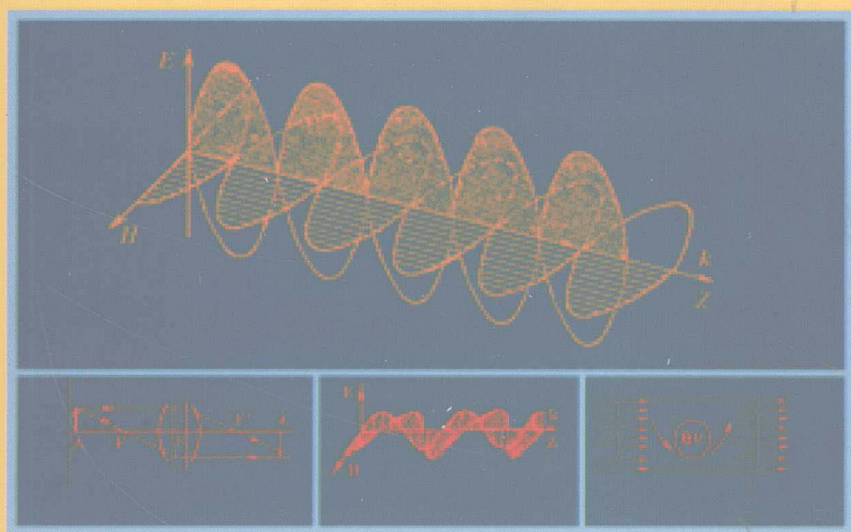


光波光学

Wave Optics

普朝光 李桂春 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

光 波 光 学

Wave Optics

普朝光 李桂春 主编

普朝光 李桂春 叶明 万洋 李永晖 吕励 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以光波原理为基础,系统论述了光的反射、光的折射、光的偏振、光的衍射和光的干涉等光在传输过程中的有关现象。最后介绍了应用于光学系统中的典型光波光学元器件。本书是一部学科基础理论专著,也是一部研究与光学相关的许多交叉学科发展的基础理论参考书。

本书可供从事光学以及相关交叉学科研究的科技工作者和教师阅读参考,也可作为高等院校相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

光波光学/普朝光,李桂春主编. —北京:国防工业出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-118-08588-4

I. ①光... II. ①普... ②李... III. ①光学 - 研究 IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 311625 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 32½ 字数 588 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 85.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

光是一种电磁波,以光子波动说为基础,将光的直线传输理论归结为波长(λ)为零的极限状态;而光波传输的光子能量($h\nu$)中包含了光波的频率(ν),体现光子传输的波动特性。从牛顿的微粒说到惠更斯的波动说,再从菲涅耳和麦克斯韦的电磁波动说发展到普朗克光子能量波动原理,光学的波动说原理有一波三折的波浪式发展历程,符合事物发展过程的哲学基本原理。因此,在光学学科发展的漫长过程中,描述光本质的光学原理就极为复杂而又十分丰富。从数百年前伽利略的望远镜到当代的光储存和全球光通信,光学以前所未有的速度向其深度和广度发展,给人类文明社会带来巨大的进步。

从常见的光学现象出发,在线性光学范围内,光学原理基本上可分为光线光学、光波光学和光子光学三大部分。光子光学的光量子理论精辟地阐述了光的辐射、吸收和光的发射等光的产生和光的湮灭现象;光线光学的光线理论较完善地论述了光在介质中传输所发生的折射或反射等有关过程以及光学系统的成像原理;光波光学的电磁波理论较满意地描述了光在各种介质中的传输所表现的光的偏振、光的衍射和光的干涉等有关光学现象。光学基本原理是现代光学测量技术发展的理论基础。

光波光学研究的对象是光在介质中传播的基本现象。本书以第1章的光波原理为基础,在后四章中系统完整地论述光的折射和反射、光的偏振、光的衍射以及光的干涉等有关现象;第6章介绍应用于光学系统中典型的光波光学元件,有利于光学测量实验工作者方便地扩展知识面,创造新的方法,设计和使用各种各样的光学仪器系统。

本书的重点是对基本光学现象的分析,同时又注重基本原理的应用研究的需要;避免复杂数学公式的推导,既有基本现象的深入分析,又放眼于光波光学的新发展。总结了数十年工作的经验和新的认识,汇集了很多新内容,方便科技工作者学习和参考。

目 录

绪论	1
第 1 章 光波原理	17
1.1 光的电磁波理论	17
1.1.1 麦克斯韦方程组	17
1.1.2 物质方程和边界条件	18
1.2 光的波动方程	20
1.2.1 光的电磁波传播	20
1.2.2 光矢量的波动方程	24
1.2.3 单色光波的叠加	32
1.3 平面光波的传输性质	42
1.3.1 电场与磁场的耦合关系	42
1.3.2 平面波电场与磁场的性质	44
1.3.3 简谐平面波的基元函数	45
1.4 光波的振幅函数和位相函数	48
1.4.1 时间频率和空间频率	49
1.4.2 线性系统的脉冲响应	62
1.4.3 光学传递函数	67
第 2 章 光的反射和折射	72
2.1 波矢量 k 的斯涅耳定律	73
2.1.1 平行平板的折射	74
2.1.2 单个球面的折射	75
2.2 电矢量 E 的菲涅耳公式	78
2.2.1 菲涅耳公式的推导	79
2.2.2 平面界面的反射率 R 和透射率 T	82
2.2.3 菲涅耳公式的其他表示形式	91
2.3 复波数和复折射率	92
2.3.1 光波在导体中的传输	92

2.3.2	金属表面上光的反射和折射	95
2.3.3	透明介质中光的色散	99
2.4	分层介质上光的反射和折射	104
2.4.1	单层膜	106
2.4.2	双层消反射膜	111
2.4.3	多层增反射膜	113
2.5	光在波导中的传输	114
2.5.1	光波导	115
2.5.2	光导纤维	119
第3章	光的偏振	127
3.1	光波的偏振态	128
3.1.1	偏振态的波动方程	128
3.1.2	典型的椭圆偏振态	130
3.1.3	偏振光的矢量表示	133
3.2	双折射光的偏振	137
3.2.1	晶体双折射	138
3.2.2	应力双折射	141
3.3	反射光和折射光的偏振	146
3.3.1	界面引起的偏振	146
3.3.2	反射光和折射光的偏振状态	148
3.3.3	全反射光的偏振	150
3.3.4	金属表面反射光的偏振	151
3.4	偏振光在晶体中的旋转	154
3.4.1	旋光的特性	154
3.4.2	偏振光旋转的原理	155
第4章	光的衍射	158
4.1	光衍射的基本原理	160
4.1.1	惠更斯—菲涅耳原理	160
4.1.2	基尔霍夫衍射公式	162
4.1.3	光衍射的基本类型	168
4.2	衍射光学系统	172
4.2.1	衍射屏与衍射屏函数	172
4.2.2	夫琅和费衍射光学系统	178
4.2.3	菲涅耳衍射	183

4.3	夫琅和费衍射	192
4.3.1	单个衍射孔径的衍射	192
4.3.2	多个衍射孔径的衍射	201
4.3.3	光栅衍射	208
4.4	光的衍射与傅里叶变换	218
4.4.1	傅里叶变换	218
4.4.2	光学衍射的数学描述	224
4.4.3	屏函数与光学系统成像质量	234
第5章	光的干涉	249
5.1	光干涉的基本概念	250
5.1.1	光波发生干涉的条件	251
5.1.2	干涉光束的分束方法	253
5.1.3	光的相干性	255
5.2	基元光波的干涉	257
5.2.1	单色平面波干涉	257
5.2.2	单色球面波干涉	261
5.2.3	多色光(白光)干涉	267
5.2.4	偏振光干涉	270
5.2.5	全息干涉	279
5.3	干涉图形的性质和特征	285
5.3.1	干涉条纹的可见度	285
5.3.2	干涉条纹的性质	293
5.3.3	无限宽条纹和有限宽条纹的调整	298
5.3.4	干涉条纹的形状和分析	300
5.4	干涉仪的典型光学系统	307
5.4.1	双光束干涉系统	308
5.4.2	共光路(单光束)干涉系统	323
5.4.3	多光束干涉系统	348
第6章	光波光学元器件	370
6.1	折射光学元件	370
6.1.1	透镜	370
6.1.2	点像差和波像差	381
6.1.3	平晶	387
6.1.4	棱镜	391

6.2	反射光学元件	399
6.2.1	平面反射镜	399
6.2.2	球面反射镜	404
6.2.3	非球面反射镜	406
6.2.4	反射式光学系统	409
6.3	偏振光学元件	418
6.3.1	偏振镜	419
6.3.2	偏振棱镜	420
6.3.3	波片	424
6.3.4	旋光棱镜	429
6.4	衍射光学元件	429
6.4.1	菲涅耳波带片	429
6.4.2	衍射光栅	431
6.4.3	共面照明衍射光栅	444
6.4.4	光栅单色器	445
6.5	干涉光学元件	448
6.5.1	分束镜	448
6.5.2	多层介质膜	453
6.5.3	滤光镜	457
6.5.4	法布里—珀罗标准具	468
6.6	光波导和光纤器件	473
6.6.1	光波导器件	475
6.6.2	光纤器件	479
6.6.3	光波导和光纤传感器	486
附录 A	电磁波及其物理量在物质方程中的关系	494
附录 B	光波的基本参数及相互关系	496
附录 C	光波光学中常用的数学函数	498
附录 D	傅里叶变换的性质和定理	506
参考文献		510

绪 论

1. 历史的回顾

光波从光源发射到探测器的接收可以分为三步:发射、传输和接收。对于光的传输过程中光的衍射和干涉等现象,用光波原理论述;对于光的发射(辐射)和接收(吸收)等现象,直到 20 世纪初才提出光子概念,用光子原理来解释。

在一个很长的历史时期里,人类对光的本质的认识只限于某些现象和简单的规律描述,例如,中国春秋战国时代的《墨经》中记载了投影、小孔成像等光学现象,古希腊学者欧几里德的“反射光学”论述了光在传输过程中的直线传播原理和光的反射定理。

事实上,对光本性的探讨是从 17 世纪开始的,意大利的格里马耳迪(F. M. Grimaldi, 1618—1663)发现几何阴影处并不具有明锐的边界,而是有明暗过渡的条纹。遗憾的是首次观察到衍射现象的结果是在他去世后两年(1665 年)才发表的。后来,英国的胡克(R. Hooke, 1635—1703)研究了薄膜干涉;接着,牛顿(I. Newton, 1642—1727)发现了光干涉的“牛顿环”。

在 17 世纪 60 年代末,丹麦的巴塞林发现了光经过方解石传输时发生双折射现象;随即荷兰的惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)做了进一步研究,发现了光的偏振特性。1678 年,惠更斯用波动原理解释衍射现象时提出了波面概念,并且用图解方法说明波面传输为其子波面的包络,后被称为惠更斯原理。

直到 19 世纪初,在惠更斯原理提出 100 多年后的 1802 年,英国的杨氏(T. Young, 1773—1829)完成了著名的“杨氏干涉实验”,提出了光的干涉原理,并成功地解释了牛顿环的彩色,确定了颜色光的波长。1808 年,马吕斯(E. L. Malus, 1775—1812)发现了光在两种介质界面上反射时的偏振现象,而后,法国的菲涅耳(A. J. Fresnel, 1788—1827)和阿喇果(D. Arago, 1786—1853)对光的偏振现象和偏振光的干涉做了进一步深入研究。1817 年,英国的杨氏提出了光是一种横波的理论,更充分地揭示了光的波动性质。

菲涅耳将惠更斯的波面概念和杨氏的干涉原理相结合,用光波原理解释了光的反射与折射。在此基础上,1818 年菲涅耳对惠更斯原理做了重大补充,引进了子波相干的概念,从而构成了惠更斯—菲涅耳原理,并成功地解释了衍射现象。这在光学发展史上起了重要的推动作用。

后来,由法国的傅科(J. B. L. Foucault, 1819—1868)进行测量光速的实验,1850年公布实验结果,确认光在折射率较大的水中的传输速度小于在真空或(折射率较小的)空气中的传输速度,从而使波动理论被人们广为认同。

光的波动说与微粒说的争论一直持续了二百多年,直至1873年,由英国的麦克斯韦(Maxwell, 1831—1879)从研究电磁感应出发,对英国的法拉第(M. Faraday, 1791—1867)在1845年提出的“光与电磁之间存在着某种直接的联系”的想法做进一步深入研究后,发表了“电磁论”,提出了后人所称的“麦克斯韦电磁方程组”。同时,麦克斯韦预言,电磁场可以向外发射、传播,从而形成电磁波,并根据实验数据计算出电磁波的传播速度,发现电磁波的传播速度与实测的光速相同,随即认为光波是一种电磁波,因此形成了光的电磁波理论。

1875年,荷兰的洛伦兹(H. A. Lorentz, 1853—1928)在发表的“光的反射、折射理论”学位论文中认为光是电磁振动,并指出介质界面上电磁矢量的法向分量(D, B)和切向分量(E, H)保持连续,成功地证实了光在各种界面上的光波特性。

1882年,法国的基尔霍夫(G. Kirchhoff, 1824—1887)对惠更斯—菲涅耳原理做了周密的数学推导,得到了十分接近的结果,并且与实验的现状惊人地符合,从而进一步巩固了惠更斯—菲涅耳原理的地位。

1887年,德国的赫兹(H. R. Hertz, 1857—1894)用小型振荡电路产生了微波,证明具有光波的特性;1888年,发现了射频范围内的电磁波(波长约10m),测量到的传播速度与光速相同,并证明它和光一样,能产生反射、折射、偏振、衍射和干涉等现象。这样,麦克斯韦的理论由于得到实验的有力支撑而被广泛接受。

1892年,洛伦兹发表“麦克斯韦理论及其在运动物体上的应用”,全面地肯定了麦克斯韦理论,把已获得的光的电磁理论的核心结果公式化,最终形成了光的经典电磁理论。麦克斯韦方程所描述的电磁场是矢量场,电磁波是横波,存在偏振现象,但是,光学中有相当一部分基本内容可以不必考虑偏振问题。因此麦氏方程可用标量波动方程表述,只有涉及偏振现象时才用矢量场分析。

经典的电磁理论奠定了光是一种电磁波的波动理论,标志着光学科学的发展进入一个新阶段,麦克斯韦的电磁理论得到广泛应用,波动说战胜了微粒说。

光的电磁波理论是人们对光本性认识的一次重大飞跃,相当精确地描述了光的传输(如光的衍射、光的干涉等),较完美地论述了光所表现出的波动原理。到19世纪末,电磁理论已经发展到相当完善的地步,在各方面的应用研究中,光波光学始终成为最基本、最有效的应用原理。

自从1900年以来,人类已经开始用照相记录和保存人眼所接收到的信息。

普通照相的过程只是用底片探测和记录了物体发出的光波的强度,而放弃了具有重要价值的光波位相的信息。这是普通照片不具有三维立体感的主要原因。

1948年,英国科学家盖博(D. Gabor)提出了一种同时记录物体光波的振幅和位相的方法,称为全息照相(Holography)。这种方法不是普通照相中像与物的点对点的对应,而是记录了物体光波本身,保存了物光波的振幅与位相的全部信息。直到1962年,美国科学家理思(E. Leith)和乌帕德尼克斯(J. Upatnieks)采用了最新发明的激光,发展了空间载波法——离轴全息,获得了高质量的全息像,从而使沉睡了十几年的全息术获得了新生。此方法开辟了光波光学中的一个崭新领域,因此,盖博获得了1971年的诺贝尔物理奖。

在19世纪末20世纪初,物理的理论体系囊括了物理现象的基本规律,但是,当人们用电磁理论进一步解释光与物质相互作用时,却遇到了本质上新的困难,如黑体辐射以及光电效应等现象。面对这些现象,人们不得不再次考虑光的“微粒”特性。

正当科学旅程步履维艰之时,普朗克(Plank, 1858—1947)量子假设和爱因斯坦相对论与量子论的产生,为光学的发展带来了新的希望。1905年,爱因斯坦(Einstein, 1879—1955)发展了普朗克的量子化假设,提出了光量子学说,以一种全新的物理意义确认光辐射就是能量为 $h\nu$ 的光量子流。根据光量子理论,爱因斯坦成功地解释了光电效应,认为光照射到金属表面可以使电子逸出,逸出的电子仅与光的频率有关,与光的强度无关,从而圆满地解释了光的吸收现象。

1913年,玻尔(Bohr, 1885—1962)综合了普朗克的量子化理论、爱因斯坦的光量子学说以及卢瑟福的原子模型,建立了氢原子光谱理论。玻尔理论认为原子中的电子是依照壳层结构形式分布的,为光量子理论的建立做出了重大贡献。

1917年,爱因斯坦又根据光子概念和玻尔理论,深入研究黑体辐射,不仅得到了普朗克公式,同时在原子系统中又引入了自发发射和受激发射的概念(爱因斯坦系数 A 和 B),为研究光与物质相互作用建立了正确的物理模型,用光子概念解释了光的吸收和辐射现象。

在20世纪前的20年内,以普朗克、爱因斯坦和玻尔等人开创新的光学理论——电磁波能量的量子化概念,使光学原理又生机勃勃地向前发展,光子学原理诞生了。从1958年开始提出光辐射场受激发射应用的可能性,到1960年6月美国科学家梅曼(Maiman)研制出第一台红宝石激光器,短短三年时间,在光频段实现了受激发射放大。激光器的发明,使光子原理从理论上和应用上达到新的高度,赋予崭新的内容,开创了激光研究的新时代。

以波动说为基础,将光线直线传输的理论归结为波长(λ)为零的极限状态;而光波传输的光子能量($h\nu$)中包含了光波的频率(ν),体现光子传输的波动特

性。光的波动说的发展符合事物波浪式前进的规律,用一波三折来形容恰如其分,一点也不为过。

自从 20 世纪 60 年代激光问世后,受控制的极短的光脉冲使光波传输信息成为可能,且传送信息量远比电波和微波大,因此就产生了光学纤维用于传输光波的设想。其中杰出的代表就是高锟,1965 年,32 岁的高锟提出在电话网络中以光波代替电流,以玻璃纤维代替电线的设想,预计光学纤维的损耗率下降到 20dB/km 时,光纤通信即可成功。1966 年,高锟发表“光频率介质纤维表面波导”论文,提出用介质光波导或光导纤维来取代传统的电缆,用导波光来传输信息。直至 1970 年发明了第一支低损耗通信光导纤维以后,1977 年美国开通了第一条商用光导纤维通信系统。1980 年初,世界各地开通了上千条光纤通信线路。近年来,随着光纤技术的迅速发展,全球进入了光通信、互联网计算机时代,至今有 10 亿千米的光缆以闪电般速度通过宽带互联网连通全球各地。

在这场科学潮流中,高锟出于对光纤通信潜在应用的强烈的坚定信念,发展创立波导光学,成为光纤通信领域的先驱,最终促成超低损耗光纤的问世,掀起光通信技术的革命性发展,实现了早在 1880 年著名的电话发明家贝尔提出的“光电话”的想法。因此,被称为“光纤之父”的高锟以发明创造光纤通信而荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。

2. 光是直线行进还是“绕弯”传输

当光波以等振幅传播且其位相以光程(几何路程 l 乘介质折射率 n)乘以圆波数 k 计算($n l k$)时,可用光线光学原理处理,并认为作为波面法线的光线是直线行进的;当光波波面无论是否受到屏的限制,在同一波面上各处的振幅若是不均匀的,则用光波光学原理分析,认为在某种情况下光的传输是“绕弯”传输的。

1) 光束传输的基本观点

通常,用光束以及波面的几何性质来处理光的传输和成像问题,其基本观点如下:

(1) 光束的波面法线定义为光线。即一个单色波为 $W(\mathbf{r}) = U(\mathbf{r}) \exp(-i\omega t)$, 其中的空间位置变化部分可写成 $U(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}) \exp(-ik\varphi(\mathbf{r}))$ 。其中:振幅 $A(\mathbf{r})$ 和相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 均为实数,圆波数 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。以 $\mathbf{R}$ 代表某条光线上各点的矢径,则矢径沿光线的增量 $d\mathbf{R}$ 的方向与位相 $\varphi(\mathbf{r})$ 的梯度方向是一致的,如图 0-1 所示。

(2) 波面相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 从 φ_1 到 $\varphi_2 (= \varphi_1 + d\varphi)$ 之间的光线传输的单元路径长度 $d\mathbf{R}$, 满足与折射率 $n(\mathbf{r})$ 的空间分布关系,即 $kn(\mathbf{r})d\mathbf{R} = d\varphi$ 。由于 $nd\mathbf{R}$ 为单元

光程,所以 $knd\mathbf{R}$ 是位相增量 $d\varphi$ 。因此,沿光线对光程积分可以计算波面位相差。综上所述,光线的传输可用一个矢量式表示,即

$$n(\mathbf{r}) \left(\frac{d\mathbf{R}}{dR} \right) = \nabla \varphi(\mathbf{r}) \quad (0-1)$$

(3) 光束的能流密度(w)的方向与光线传输方向 s 一致。 $\langle \mathbf{S} \rangle = u \langle w \rangle \mathbf{s}$, $\mathbf{S}$ 为坡印廷矢量, u 为在介质中光的传输速度。光束的波面法线定义为光线光强度定义为坡印廷矢量 $\mathbf{S}$ 的时间平均的绝对值。

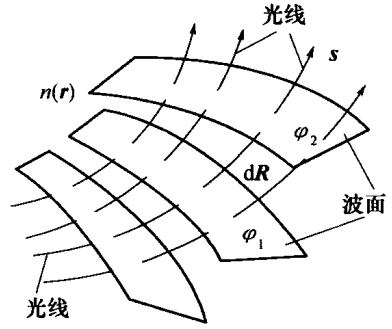


图 0-1 光束的波面法线定义为光线

(4) 光线是波长趋于零($k \rightarrow \infty$)的光波场。在 $k \rightarrow \infty$ 的极限情况下,光线的程函方程为

$$n^2(\mathbf{r}) = [\nabla \varphi(\mathbf{r})]^2 = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \quad (0-2)$$

2) 不均匀介质中光线(作为曲线)的微分方程

由矢量式 $n(\mathbf{r}) (d\mathbf{R}/dR) = \nabla \varphi(\mathbf{r})$ 可知,光线的矢径增量 $d\mathbf{R}$ 代表沿着光线的单元弧长 $dR = |d\mathbf{R}|$, 如图 0-2 所示, 所以, d/dR 表示沿着光线的以弧长为自变量的微商。将式(0-2)作微商,得

$$\frac{d}{dR} \left(n \frac{d\mathbf{R}}{dR} \right) = \frac{d}{dR} [\nabla \varphi] \quad (0-3)$$

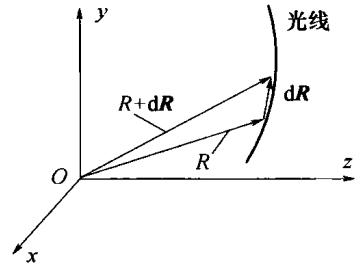


图 0-2 光线的矢径增量 $d\mathbf{R}$

由于标量场 $\varphi(\mathbf{r})$ 沿 $d\mathbf{R}$ 的微商等于 $\nabla \varphi$ 在 $d\mathbf{R}$ 方向上的投影,有

$$\frac{d}{dR} \varphi = \frac{d\mathbf{R}}{dR} \cdot [\nabla \varphi] \quad (0-4)$$

所以,有等效算符:

$$\frac{d}{dR} \equiv \frac{d\mathbf{R}}{dR} \cdot \nabla \quad (0-5)$$

于是,式(0-3)的右端成为

$$\frac{d}{dR} [\nabla \varphi] = \frac{d\mathbf{R}}{dR} \cdot \nabla [\nabla \varphi] \quad (0-6)$$

由式(0-1)可知

$$\frac{d\mathbf{R}}{dR} = \frac{1}{n} [\nabla \varphi] \quad (0-7)$$

于是,式(0-3) 成为

$$\frac{d}{dR} \left(n \frac{d\mathbf{R}}{dR} \right) = \frac{1}{n} \nabla \varphi \cdot \nabla (\nabla \varphi) = \frac{1}{2n} \nabla [(\nabla \varphi)^2] \quad (0-8)$$

将程函方程式(0-2)代入式(0-8),得矢量形式的光线微分方程,即

$$\frac{d}{dR} \left(n(\mathbf{r}) \frac{d\mathbf{R}}{dR} \right) = \nabla n(\mathbf{r}) \quad (0-9)$$

式(0-9)表明,在 $k \rightarrow \infty$ 的极限情况下,光线的微分方程形式只与折射率 $n(\mathbf{r})$ 相关,而不包含相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 。光线方程是二阶微分方程,因而其通解含有两个待定常数。

3) 均匀介质中的光线才是直线

在均匀介质中,折射率 $n(\mathbf{r})$ 为常量,从而相位 $\varphi(\mathbf{r})$ 为零。这时,式(0-9) 成为

$$d^2 \mathbf{R} / dR^2 = 0 \quad (0-10)$$

其通解为

$$\mathbf{R} = R\mathbf{a} + \mathbf{b} \quad (0-11)$$

式中: $\mathbf{a}$ 和 $\mathbf{b}$ 为两个待定的常矢量。式(0-11)是直线方程的矢量表达式,该直线通过 $\mathbf{R} = \mathbf{b}$ 点,且方向与 $\mathbf{a}$ 一致。即仅当 $k \rightarrow \infty$ 时,均匀介质中的光线才是直线。

4) 光的“绕弯”传输

(1) 遇到障碍时光的衍射。光线光学表明,在均匀介质中光线遵循直线传播定律;在两种介质的分界面上,光线按反射定律和折射定律传播。由此推断,一束光通过一个小孔时,投射到某个距离处的接收屏上,应当是一个有明锐边界的明亮点。然而,由于光是一种电磁波,遇到障碍物时,光波会或多或少地偏离光线光学的传播途径而绕行,这就是光的衍射。几种典型障碍物的远场衍射图样如图 0-3 所示。

衍射使得光的传输可以波及到按光线光学传播特性所规定的几何投影区域之外,也使得照明区域范围呈现若干暗斑或暗条纹。总之,衍射效应使得在障碍物之后的空间光强分布有别于光线光学给出的光强分布,也有别于光波自由传播时的光强分布,使边界失去了明锐的边缘。衍射是一切波动所共有的传播现

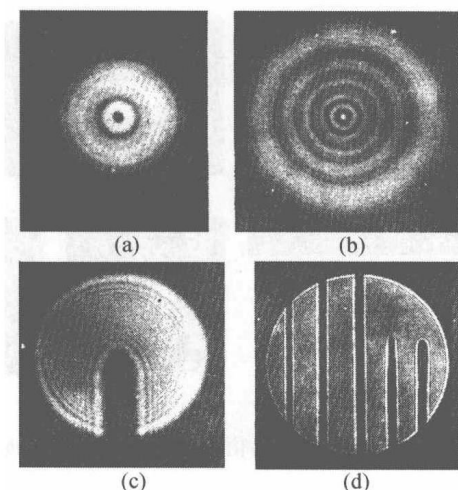


图 0-3 几种障碍物的衍射图样

(a) 圆孔；(b) 圆屏；(c) 圆孔带钉；(d) 直边。

象,在日常生活中,声波的衍射、水波的衍射和电波的衍射等,随时随地在发生。如图 0-4 所示的是水波衍射的照片。

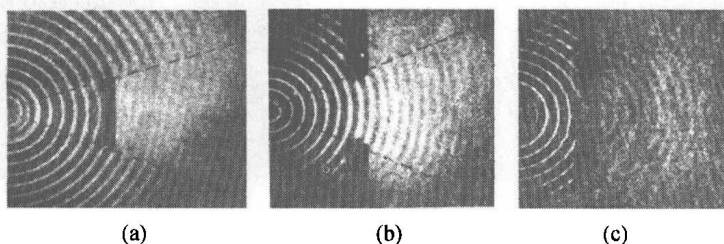


图 0-4 水波衍射的照片

(a) 水波受到圆屏阻挡的衍射；(b) 水波受圆孔作用的衍射；(c) 水波受微小孔作用的衍射。

光波衍射现象不容易为人眼所看到,那是因为可见光波的波长很短,既要足够小的点光源,又要求离障碍屏足够远的接收屏上有足够强的光亮度。由于激光的单色性、相干性特点,因此其作为衍射光源极大地改善了衍射现象的研究和应用。如图 0-5 所示的是几种典型的孔形衍射屏产生的夫琅和费衍射图形的光强分布照片。

(2) 光在波导中的全反射。受微波波导的启发,考虑能否实现光波波导,即像电波在电缆中传送一样,光波能否在光的“导体”中传输。波导光学的发展实现了光波导传输和光纤传输。

光通过波导进行传播的最早实验可以追溯到 1870 年,约翰·丁铎尔做了一个简单而具有开创性的实验。一束阳光射入盛满清水的容器中,当清水从流出

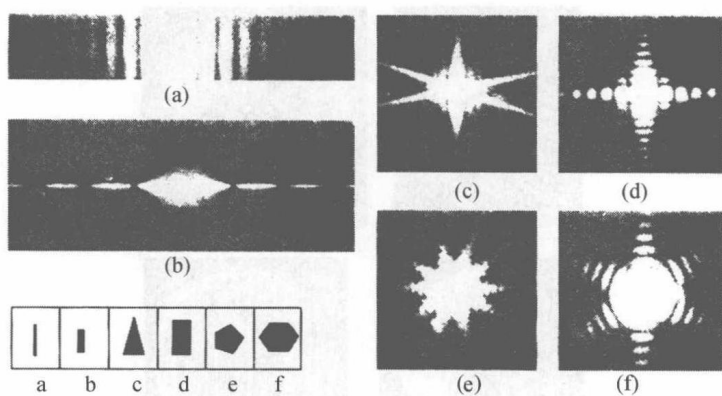


图 0-5 几种典型的孔形衍射屏的夫琅和费衍射图形

孔喷流而出时,可以观察到阳光沿着水柱传输。这是由于光束在水柱中发生全内反射,引起阳光导入水流而形成光波传输的特定路径。实验示意图如图 0-6 (a) 所示。激光问世后的实验装置如图 0-6 (b) 所示。

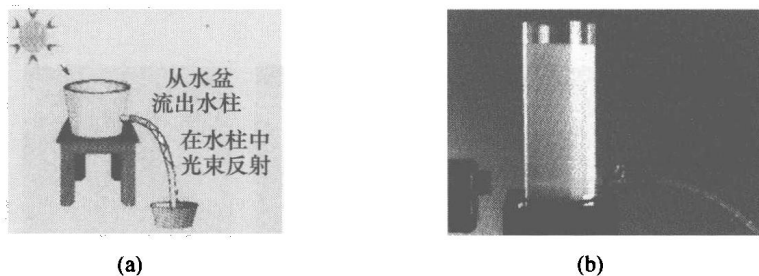


图 0-6 光沿水流传输的实验示意图

从 20 世纪 30 年代开始,虽然已经利用简单的光纤传输照明光源,但发展缓慢,也很少有人对光纤通信真正感兴趣。当时正处于电子时代高峰,是无线电技术的天下。何况第一条跨大西洋的海底电缆也是在 1956 年才建成的。

自从 1960 年激光问世后,产生了以光波代替电流,以玻璃纤维代替电线的设想,并提出用介质光波导或光导纤维来取代传统的电缆,用导波光来传输信息。频率范围很广的电磁波的传输技术的发展过程虽然十分漫长,但是这种发展趋势很有启发、令人深思。至 1980 年代初,世界各地相继开通了上千条光纤通信线路。1988 年,有了第一条总长 6000km 的跨大西洋的海底光缆,最终取代 32 年前的第一条跨大西洋的海底电缆,在全球形成了现代光纤网络。

3. 光波光学的新发展

1) 衍射光学

三维多阶衍射光学元件是衍射光学发展的一个重要方向,是研究波面变化

的有效途径。因此,其应用日趋广泛。为了获得新型特殊功能的衍射光学元件,对于三维衍射光栅,其波带结构不局限于周期性的槽和环,还可以设计各种复杂结构形状的波带。

当然,对于包含不同波带特性变化的波带片,设计制造的难度显而易见,至使波带片出现后很长一个时期未能真正实现。只有计算机的应用,使衍射光学元件(Diffractive Optical Elements, DOE)的设计和制造工艺发生了彻底变革,将复函数写入物理介质,并制作出相应的振幅,或位相透明片的关键性问题得以解决。

20 世纪 80 年代后期,随着微电子和激光技术的发展,出现了精密激光绘图机和电子束刻蚀技术,使具有复杂波带形状(DOEs)的制作成为可能。这个实质性的进展引起了各方面的专家和技术人员的广泛重视。

三维多阶衍射光学元件是种多台阶浮雕或连续浮雕结构的平面型衍射光学元件,如图 0-7 所示。这是三种不同类型的二阶或多阶衍射光栅示意图,称为三维体积光栅。它是利用计算优化设计,并借助大规模集成电路制作工艺制成的平面光学结构元件,具有高衍射效率的纯位相变化的光学元件,包括微透镜阵列、波带板、扫描器、分束器和波面变换元件等。其中,图 0-7(a)为二阶元件(二值型),只包含 0 和 π 两个位相级;图 0-7(b)为多阶衍射元件,包含 $N = 2^n$ 个位相级(该图中 $n = 2$);图 0-7(c)为混合型多阶衍射元件,是制作在普通折射光学元件表面上的二阶光学元件。二值型元件制作方便,但衍射效率不是很高;混合型元件结合了折射和衍射元件的优点,既能产生大的光焦度,又能灵活地完成波面变换。

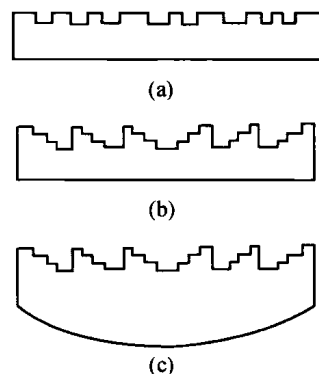


图 0-7 二阶或多阶衍射元件

多阶衍射光学元件是利用计算优化设计,并借助大规模集成电路制作工艺制成的平面光学结构元件。此类光学元件工艺复杂,但衍射效率可接近 100%,并能实现复杂的波面变换;是具有高衍射效率的纯位相变化的光学元件,包括微透镜阵列、波带板、扫描器、分束器、干涉光束相位补偿器和波面变换元件等。这类光学元件在光通信、光存储、光计算等现代高科技领域中极具重要意义。

衍射光学元件功能多、质量轻、体积小,是一个快速发展的光学领域,其应用日趋广泛。例如,用于激光聚焦和激光模式的选择。用于聚焦激光束的衍射光学元件是最引入关注的,能把激光束聚焦成细线或其他微小空间图形,常称为聚焦 DEO。在高功率远红外激光的发展中,DEO 的应用显现更大的潜力,它能在