

光 学

张卓权 孙荣山 唐伟国 编

北 京 师 范 大 学 出 版 社

光 学

张阜权 孙荣山 唐伟国 编

北京师范大学出版社出版
新华书店北京发行所发行
河北大厂印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 13.875 字数: 337千
1985年5月第一版 1985年5月第1次印刷

印数: 1-13,700

统一书号: 13243·51 定价: 3.40元

前 言

光学是一门古老的学科，它经历过缓慢曲折的发展阶段，自本世纪六十年代激光问世后，光学才迅速地成为科学技术方面多门学科的基础。

光学是一门基础课。因受课时的限制，在光学教材中难以罗列大量材料（无论是理论方面还是实验方面），只应根据实际需要，选取最基本的知识，为初学者打好基础。

本书内容分为波动光学、光线光学、光和物质的相互作用、辐射、光的二象性等五编，共十五章，包括了经典光学的主要原理和应用，并适当介绍了光学在近代的发展。书中还配有例题和习题，书末附有习题答案。书中少部分内容超出大纲范围，这些内容均在章、节、段的前面用“*”号标明，可供教师选用。必学内容的讲授需 70 学时左右

本书的编写既不拘泥于光学发展的各个阶段，也不沿袭常用的编写程序。举例来说，把光线光学作为波动光学的极限情况来处理；认为衍射是波动特征的基本表现，而干涉则是在衍射基础上加以推广的分析方法都是有别于传统教材的尝试

光学是一门实验性很强的学科，本书的讲述都是从实验出发，继而着重阐述每个物理概念的意义，然后进行定量的计算。

在第一编的开始，就出现了在第十一章里才能讲到的几个概念（如光通量、光照度和光功率密度等），教师既可在碰到某一概念时给以简略地介绍，也可将第十一章挪到前面来讲。

本书的前身《光学讲义》是由张阜权在 1980 年初完成的。后经孙荣山和唐伟国参照部颁教学大纲并结合几年来的教学实践情

况，做了较详细的修改和补充。孙荣山负责第一章至第八章，唐伟国负责第九章至第十四章。张阜权负责统稿，并改编了第十五章。

1980年夏，竺庆娥和黄婉云二位老师曾对《光学讲义》作过部分修改工作，梁绍荣先生对本书的出版给予了热情的支持。我们在此一并表示感谢。

由于我们学识水平有限，编写程序、见解谬误在所难免，恳切希望教师和读者多提批评意见。

编 者

一九八三年十二月于北京师范大学

目 录

第一编 波动光学

第一章 波方程	(2)
§ 1.1 平面波方程	(2)
§ 1.2 光照度 波阵面	(5)
§ 1.3 波方程的复数表示	(6)
§ 1.4 球面波方程和柱面波方程	(11)
例题	(12)
习题	(12)
第二章 光的衍射	(15)
§ 2.1 实验事实	(15)
§ 2.2 Huygens-Fresnel 原理	(16)
§ 2.3 平面波的传播	(19)
§ 2.4 球面波的传播	(23)
§ 2.5 振动曲线	(28)
§ 2.6 圆形孔的衍射	(30)
§ 2.7 圆形阻挡物的衍射	(30)
§ 2.8 Fresnel 波带片	(32)
§ 2.9 Cornu 螺线	(35)
§ 2.10 Fresnel 直边衍射	(38)
§ 2.11 Fresnel 单缝衍射	(39)
§ 2.12 Fraunhofer 衍射的初步讨论	(41)
§ 2.13 辅助光源	(43)
§ 2.14 Fraunhofer 单缝衍射	(44)
§ 2.15 Fraunhofer 圆孔衍射	(51)
§ 2.16 Fraunhofer 双缝衍射	(59)

§ 2.17	缝数增多的作用	(64)
§ 2.18	光栅的衍射	(67)
§ 2.19	光栅形成的光谱	(71)
* § 2.20	光栅的类型	(74)
* § 2.21	光栅的装置	(79)
§ 2.22	X 射线衍射	(80)
* § 2.23	波纹条纹	(82)
* § 2.24	衍射理论概述	(84)
例题		(86)
习题		(88)
第三章	光的干涉	(92)
§ 3.1	线性叠加原理	(92)
* § 3.2	驻波和拍	(93)
§ 3.3	Young 的实验	(98)
§ 3.4	相干光源	(102)
§ 3.5	时间相干性	(104)
§ 3.6	空间相干性	(106)
§ 3.7	相干度和可见度	(109)
* § 3.8	Fresnel 公式	(110)
* § 3.9	周相的突变	(112)
§ 3.10	薄膜产生的干涉	(115)
§ 3.11	等倾条纹	(121)
§ 3.12	等厚条纹	(124)
§ 3.13	增透膜	(128)
§ 3.14	Michelson 干涉仪	(131)
* § 3.15	Twyman-Green 干涉仪	(135)
§ 3.16	Fabry-Perot 干涉仪	(137)
例题		(140)
习题		(143)
*第四章	Fourier 光学简介	(149)

§ 4.1	引言	(149)
§ 4.2	Fourier 级数和空间频谱	(149)
§ 4.3	Fourier 积分和 Fourier 变换	(154)
§ 4.4	孔径函数的 Fourier 变换产生 Fraunhofer 衍射图样	(156)
§ 4.5	Abbe 成像理论及相干光学系统	(159)
§ 4.6	空间滤波方法	(161)
§ 4.7	衬比方法	(163)
§ 4.8	全息照相术	(165)

第二编 光线光学

第五章	基本原理和棱镜	(170)
§ 5.1	光线概念	(170)
§ 5.2	Snell 定律	(171)
§ 5.3	Fermat 原理	(173)
§ 5.4	全内反射	(175)
§ 5.5	棱镜的折射	(178)
§ 5.6	棱镜的色散	(181)
§ 5.7	棱镜摄谱仪	(188)
	例题	(189)
	习题	(192)
第六章	Gauss 光学	(195)
§ 6.1	几个概念	(195)
§ 6.2	理想系统和 Gauss 光学	(196)
§ 6.3	球面折射	(196)
§ 6.4	傍轴物因球面折射造成的像	(202)
§ 6.5	球面反射镜	(205)
§ 6.6	透镜	(207)
§ 6.7	图解示出物和像的关系	(213)
§ 6.8	光线跟踪	(214)

§ 6.9	光组 基点和基面	(216)
§ 6.10	因光组所造成的像	(218)
§ 6.11	基点的确定	(222)
* § 6.12	矩阵方法	(224)
* § 6.13	Gauss 常数	(227)
§ 6.14	厚透镜 二薄透镜合成的光组	(231)
§ 6.15	变焦距透镜	(232)
例题		(235)
习题		(241)
第七章	光阑和像差	(248)
§ 7.1	光阑	(248)
§ 7.2	像差概述	(251)
§ 7.3	球差	(253)
§ 7.4	彗形像差	(254)
§ 7.5	像散性	(257)
§ 7.6	视场弯曲	(258)
§ 7.7	畸变	(259)
§ 7.8	色差	(261)
习题		(262)
第八章	光学仪器	(263)
§ 8.1	眼睛	(263)
§ 8.2	光学仪器放大率 放大镜	(268)
§ 8.3	显微镜	(270)
§ 8.4	望远镜	(272)
§ 8.5	复物镜和复目镜	(278)
§ 8.6	孔径	(281)
§ 8.7	分辨限度	(284)
§ 8.8	照相机 幻灯机	(290)
例题		(292)
习题		(294)

第三编 光和物质的相互作用

第九章 光的吸收、色散和散射	(298)
§ 9.1 吸收现象	(298)
§ 9.2 吸收定律	(300)
§ 9.3 色散现象	(302)
§ 9.4 色散的经典理论	(305)
§ 9.5 光的散射	(309)
习题	(312)
第十章 光的偏振	(314)
§ 10.1 偏振光与自然光	(314)
§ 10.2 偏振片 起偏和检偏 Malus 定律	(316)
§ 10.3 从反射和折射获得偏振光	(318)
§ 10.4 从散射获得偏振光	(321)
§ 10.5 双折射	(323)
§ 10.6 光线面 光线方向 波面 波方向	(327)
§ 10.7 双折射现象的解释	(330)
§ 10.8 Nicol 棱镜 偏振光镜	(331)
§ 10.9 偏振光方程	(335)
§ 10.10 Jones 矢量 Jones 矩阵	(339)
§ 10.11 波片 偏振光的检验	(342)
§ 10.12 补偿器	(346)
§ 10.13 偏振光的干涉	(347)
§ 10.14 会聚光下的干涉	(350)
§ 10.15 人为双折射现象	(351)
§ 10.16 旋光性	(354)
§ 10.17 Fresnel 对旋光性的解释	(356)
例题	(361)
习题	(362)

第四编 辐射

第十一章 光度学.....	(366)
§ 11.1 辐射通量 视见函数 光通量.....	(366)
§ 11.2 发光强度 光照度.....	(369)
§ 11.3 光出射度 光亮度.....	(373)
§ 11.4 辐射度学.....	(375)
例题.....	(378)
习题.....	(378)
第十二章 温度辐射.....	(379)
§ 12.1 Kirchhoff 定律.....	(380)
§ 12.2 黑体辐射及其实验定律.....	(381)
* § 12.3 黑体辐射的理论分析.....	(383)
例题.....	(387)
习题.....	(388)
*第十三章 激光.....	(389)
§ 13.1 Einstein 系数.....	(389)
§ 13.2 受激原子的寿命.....	(392)
§ 13.3 受激发射的讨论.....	(393)
§ 13.4 氦氖激光器.....	(395)
§ 13.5 激光器简介.....	(397)
§ 13.6 激光的横模和纵模.....	(400)
§ 13.7 激光的特点和应用.....	(403)
§ 13.8 非线性光学.....	(404)

第五编 光的二象性

第十四章 光子光学.....	(408)
§ 14.1 光电效应.....	(408)
§ 14.2 Einstein 的光子理论.....	(410)

§ 14.3	光子的动量	(412)
§ 14.4	Compton 效应	(413)
§ 14.5	光子的折射和反射	(416)
§ 14.6	光子的衍射和干涉	(418)
§ 14.7	光子的探测	(418)
	习题	(419)
第十五章	二象性的意义	(421)
§ 15.1	光子与光波	(421)
§ 15.2	二象性的解释	(421)
§ 15.3	光子和光波的适用范围	(424)
* § 15.4	波方程的外延——Schrödinger 方程	(424)

第一编 波动光学

光的波动学说最早是由 Huygens (1629—1695) 在前人 Grimaldi (1618—1663) 所观察到的直边衍射和 Hooke (1635—1703) 研究过的薄膜出现彩色干涉条纹等现象的基础上首先创建的。接着 Thomas Young (1773—1829) 从 1801 年 11 月 12 日到 1803 年 11 月 24 日期间在英国皇家学会连续宣读了三篇论文，根据波动说对薄膜呈现颜色的现象作了解释，并介绍了产生干涉的方法。此后，Fraunhofer (1787—1826) 和 Fresnel (1788—1827) 又用令人信服的实验事实深刻地揭示了光的波动本性。

为了从理论上解释光的波动的基本特征——衍射，Fresnel 在 Huygens 次级子波学说的基础上，引进子波叠加和倾斜因子的假设，使衍射现象得到了理论的解释。到 1883 年 Kirchhoff (1824—1887) 又用数学推导证明了 Fresnel 的假设正是光的波动本性的必然结果。

本编首章先讲波方程及有关的数学基础，以后各章介绍衍射和干涉的主要实验、基本理论及其主要应用的定量计算。

第一章 波 方 程

§ 1.1 平面波方程

波动是振动的传播过程，也是传递能量的基本形式之一。因此，研究波动必然涉及到两个具体方面的内容，即振源的振动方式和振动的具体传播过程。这里我们首先分析正弦式和余弦式的简谐振动 (simple harmonic vibration, 简称为 S.H.V.)。

设有一质点 P 做等速圆周运动，则质点 P 在圆周平面内二垂直方向 QQ' 和 P_0P' 上的射影是分别沿着 QQ' 和 P_0P' 作来回振动 (即简谐振动的)。若质点的角速度为 ω ，圆周半径为 a ，当 $t=0$ 时质点 P 在 P_0 处，则在 P_0P' 和 QQ' 二垂直方向上的简谐振动可以分别写成数学表示式 (图 1-1)

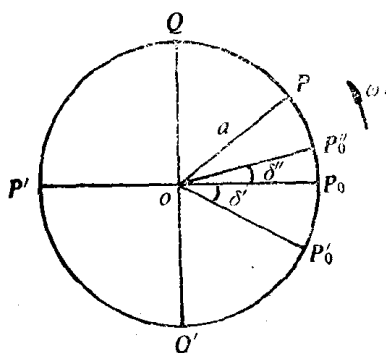


图 1-1

为

$$x = a \cos \omega t$$

$$y = a \sin \omega t$$

这里 t 表示时间， x 和 y 分别是沿这二垂直方向的简谐振动的位移，半径 a 是简谐振动的振幅。

若 $t=0$ 时质点 P 在 P_0' 点，则沿 QQ' 方向上的简谐振动数学表示式是

$$y = a \sin (\omega t - \delta')$$

这里 δ' 是 OP_0' 和 OP_0 的夹角。同理，若 $t=0$ 时，质点 P 是在

P'' 处, 则简谐振动的数学表示式应是

$$y = a \sin(\omega t + \delta'')$$

式中 δ'' 是 OP_0'' 和 OP_0 的夹角, 上面三式可概括成

$$y = a \sin(\omega t + \delta) \quad (1.1)$$

这里的 δ 可以是零, 也可以是正的或负的任何值。式 (1.1) 是简谐振动的一般表示式。

下面我们在振动方程的基础上, 进一步求出描述振动传播的波方程。

在光学里, 常需要研究从光源发出的光波到达空间任意一点的效果。因此, 当任一观察点 P 与光源 S 的距离 z 确定后 (图 1-2) 写出 P 点的振动方程是必要的。设所研究的光源是发射单一波长光波的单色光源, 光波的传播速度为 v 。(注意, 只有在真空中不同波长的光波才有共同的传播速度, 这里没有明确指出是真空, 所以 v 指的是单色光的传播速度。) 光源 S 在任何时刻 t 的振动情况可以用式 (1.1) 来表示。但由于 v 是有限值, 所以当

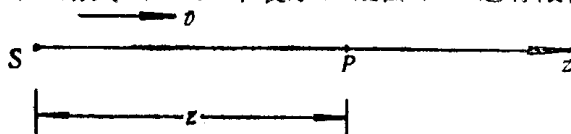


图 1-2

光源 S 在 t 时刻的振动沿着 z 方向传播时, 需要经过 z/v 的时间才能传到 P 点, 即 P 点的振动方程应表示为

$$y = a \sin \left[\omega \left(t - \frac{z}{v} \right) + \delta \right] \quad (1.2)$$

由于 P 点的任意性, 式 (1.2) 既描述了光波路程上任何一点在某一时刻 t 的位移, 又描述了所有各点在不同时刻的振动情况。因此, 它所代表的是沿着 z 方向传播的波的波方程 (wave equation)。式中 $\omega \left(t - \frac{z}{v} \right) + \delta$ 叫作周相, δ 是初相。在周期性的运动中, 每经过一个周期, 周相将变化 2π 弧度, 运动又恢复到

原来状态。因此，用周相代替时间是非常方便的。

用 T 表示周期运动的周期， ν 表示单位时间内运动重复的次数即时间频率，则有 $\nu = \frac{1}{T}$ ， ν 和角速度 ω 的联系是 $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$ 。通常把 ω 叫作时间圆频率。

用 $\tilde{\nu}$ 表示单位长度内的波长数即波数，也称空间频率，对应于 ω 可以引进 k ， $\tilde{\nu}$ 和 k 之间的联系为： $k = 2\pi\tilde{\nu} = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。 k 是一定距离内的波长重复数，可称为空间圆频率。也常把 k 称为波数。

在光学里，空间圆频率 k 是一个非常重要的物理量。

由 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 和 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 得

$$\frac{\omega}{k} = v$$

可见 k 还与波的传播速度 v 有关，所以 k 也称为传播常数 (propagation constant)。

用 ω 和 k 写出式 (1.2) 则

$$y = a \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (1.2')$$

这式表明 y 是 z 和 t 的函数。我们定义对于一切 z 和 t ， a 、 ω 和 k 都是常数，初相 δ 也是常数的波为简谐平面波，因为这样的波在传播过程中任意一个同周相面都是平面。

同理，可以写出在 x 方向的振动而沿着 z 方向传播的波方程为：

$$x = a \cos(\omega t - kz + \delta) \quad (1.2'')$$

对于已知的 z ，式 (1.2') 和式 (1.2'') 表示时间圆频率为 ω 的简谐振动。图 1-3(a) 示出它的振动曲线。

对于已知的时刻 t ，式 (1.2') 和式 (1.2'') 表示空间圆频率为 k 的简谐振动。图 1-3(b) 为它的振动曲线。

两图的形式完全一样，都是正弦曲线，但是它们的意义却截

然不同。

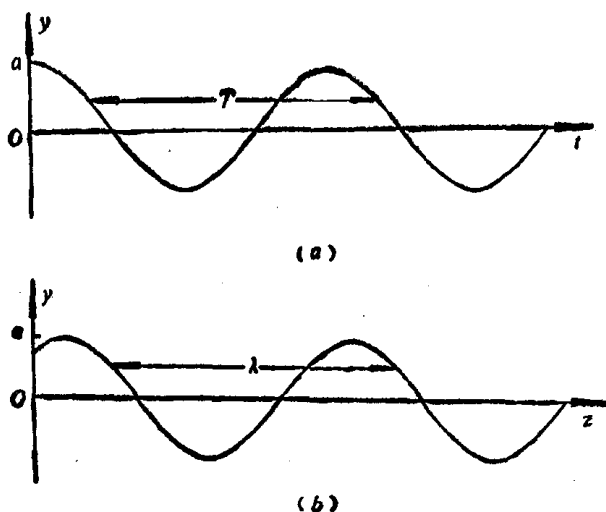


图 1-3

以后我们经常用的是以式 (1.2'') 所表示的余弦形式的简谐波方程。它所代表的是 x 方向的振动沿着 z 方向传播的平面波。

§ 1.2 光照度 波阵面

波动的产生需要一定的能量，这能量通过波动方式从波源向外传播。为了对光传播的能量进行量度，可以从接收光的功率密度 (power density) 着手。观察光的功率密度的方法很多：光能在眼睛的网膜上给出视觉的效果，光能使光电池产生电流，光能在照像底片的乳胶上产生潜像 (latent image) 以及光照射到吸收面上产生热等等。很明显，所有这些效应都是由于伴随着光波传播的能量传递所引起的。

能量的传递是用光的平均功率密度来描述的。对光源来讲平均功率密度称为发光度 (luminance)，对被照面而言又称光照度

(illuminance), 有时候又把它们统称为通量密度(flux density). 光波是电磁波, 电磁波的功率密度正比于电矢量振幅 a 的平方, 于是光照度 I 与振幅 a 之间关系应是

$$I \propto a^2$$

在研究光照度分布时, 我们总是讨论相对光照度, 因此上述关系中的常数是不重要的, 可把上述比例关系直接写成等式:

$$I = a^2 \quad (1.3)$$

须说明, 上述一些光度学名词在第五编中将给出明确的定义。

光波(即电磁波)是怎样传播出去的, 或者说, 是什么东西在传送光波呢? 这可做如下简要的解释。我们知道每一个电荷是一个电场的源, 它的周围空间处于张力状态(在场中另一电荷受力的状态)。对于运动电荷的周围不仅存在电场而且有磁场。根据 Maxwell 电磁理论, 变化的电场在其周围产生一个变化的磁场, 而变化的磁场又会在其周围产生一个变化的电场, 如此继续下去, 就得到一个不断向空间扩展的变化的电磁场, 形成了电磁波的发射。它不需要借助任何媒质, 本身就是以波动形式运动的特殊物质。

为了形象地看到波动过程, 我们投小圆石于平静池塘的水内, 就能看到在水面上激起同心圆的波纹。这些波纹就是在某一时刻扰动所到达的各点(即同周相点)的轨迹, 称为波阵面(wave front), 随着时间的推移, 波阵面在不断地扩大, 而且前些时刻的波阵面的位置将逐渐地被后来的波阵面所代替。

§ 1.3 波方程的复数表示

在光学和电子学里, 普遍采用复数作为计算问题的一种有效工具。在数学里又经常使用推广的手段来扩展数学的概念, 以便