

吴泽华 陈治中 黄正东 编著

(下册)

(第二版)

大学物理

浙江大學出版社

4

202

大学物理

(下册)

(第二版)

吴泽华 / 陈治中 * 葛正东 编著

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理. 下册 / 吴泽华等编著. —2 版. —杭州:
浙江大学出版社, 2001. 12
ISBN 7-308-02858-5

I. 大... II. 吴... III. 物理学—高等学校—教材
IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 085625 号

编 著: 吴泽华 陈治中 黄正东

责任编辑: 孙海荣

出版发行: 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

(E-mail: zupress@mail.hz.zj.cn)

排 版: 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷: 浙江大学印刷厂

开 本: 850mm×1168mm 1/32

印 张: 9.25

字 数: 249 千

版 次: 1998 年 5 月第 1 版 2001 年 12 月第 2 版

印 次: 2003 年 9 月第 6 次印刷

印 数: 26001—31000

书 号: ISBN 7-308-02858-5/O·270

定 价: 11.50 元

内容简介

本书是以教育部颁布的《高等工业学校物理课程教学基本要求》为依据编写的。全书共分三册,第一册力学、机械振动和机械波、热学,第二册电磁学,第三册光学、量子物理学。各章均配有思考题和习题。各篇还增加了适量的扩展性内容,编写成阅读材料供教学中选用。

本书可作为高等理工大学非物理专业教材或参考书,也可供其他类型学校的学生和教师使用或参考。

物理量名称、符号和单位

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
发光强度	I	坎[德拉]	cd
单色辐出度	M_λ	} 瓦[特] 每平方米	W/m ²
辐射出射度	M		
单色吸收系数	α_λ	—	—
单色反射系数	r_λ	—	—
逸出功	ϕ, A	焦[耳]	J
波函数	Ψ		
概率密度	$\Psi\Psi^*$	每立方米	1/m ³
透射率	T	—	—
主量子数	n	—	—
角量子数	l	—	—
磁量子数	m_l	—	—
自旋量子数	s	—	—
辐射亮度	L, L_e	瓦[特] 每球面度平方米	W/sr · m ²

目 录

第五篇 波动光学

第十六章 光的干涉	(3)
§ 16.1 相干光.....	(3)
§ 16.2 双缝干涉.....	(6)
§ 16.3 薄膜干涉.....	(12)
§ 16.4 干涉现象的应用.....	(22)
§ 16.5 迈克耳孙干涉仪.....	(27)
§ 16.6 时间相干性 空间相干性.....	(29)
思考题.....	(33)
习 题.....	(35)
第十七章 光的衍射	(39)
§ 17.1 衍射现象.....	(39)
§ 17.2 惠更斯—费涅耳原理.....	(41)
§ 17.3 单缝夫琅禾费衍射.....	(45)
§ 17.4 光栅衍射.....	(55)
§ 17.5 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领.....	(67)
§ 17.6 X 射线在晶体上的衍射.....	(70)
§ 17.7 全息照相.....	(74)
思考题.....	(79)
习 题.....	(80)
第十八章 光的偏振	(83)
§ 18.1 偏振光和自然光.....	(83)
§ 18.2 起偏和检偏 马吕斯定律.....	(86)
§ 18.3 反射和折射时的偏振现象 布儒斯特定律.....	(89)

§ 18.4	光的双折射	(92)
§ 18.5	椭圆偏振光	(102)
§ 18.6	偏振光的干涉及其应用	(105)
§ 18.7	人工双折射	(107)
§ 18.8	旋光现象	(110)
思考题		(111)
习 题		(112)
阅读材料 5.A	光盘	(115)
阅读材料 5.B	液晶显示	(121)
阅读材料 5.C	相控阵雷达	(126)

第六篇 量子物理学

第十九章	电磁辐射的量子性	(131)
§ 19.1	热辐射	(131)
§ 19.2	普朗克量子假设	(137)
§ 19.3	光电效应	(141)
§ 19.4	康普顿效应	(147)
§ 19.5	光的波粒二象性	(153)
思考题		(154)
习 题		(155)
第二十章	量子力学简介	(157)
§ 20.1	实物粒子的波动性	(157)
§ 20.2	不确定性关系	(162)
§ 20.3	波函数及其统计解释	(168)
§ 20.4	薛定谔方程	(171)
§ 20.5	一维无限深势阱中的粒子	(174)
§ 20.6	势垒 隧道效应	(178)
思考题		(185)

习 题	(186)
第二十一章 氢原子及原子结构初步	(189)
§ 21.1 玻尔氢原子理论	(189)
* § 21.2 弗兰克—赫兹实验	(197)
§ 21.3 量子力学对氢原子的描述	(199)
§ 21.4 电子的自旋	(206)
§ 21.5 原子的电子壳层结构	(208)
思考题	(215)
习 题	(215)
第二十二章 激光和固体能带基本知识	(217)
§ 22.1 激光产生的原理	(217)
§ 22.2 激光器	(225)
§ 22.3 激光的特性	(229)
§ 22.4 固体的能带	(231)
§ 22.5 n 型半导体和 p 型半导体	(237)
§ 22.6 p-n 结	(239)
思考题	(242)
阅读材料 6.A 基本粒子	(243)
阅读材料 6.B 介观物理和纳米科学技术	(253)
阅读材料 6.C 非线性光学简介	(259)
阅读材料 6.D 量子阱器件的原理和应用	(264)
阅读材料 6.E 核磁共振及其应用	(271)
习题答案	(277)

第五篇 波动光学

光学是一门具有悠久历史的学科。早在公元前 4 世纪,我国的墨子所著的《墨经》中就记载了许多光学现象,例如:光与影的关系,光的直线传播,针孔成像,光的反射,平面镜、凹凸面镜中物和像的关系等,可以称得上是世界光学知识的最早记录。一百多年后,约在公元前 3 世纪,希腊数学家欧几里德(Euclid)在《反射光学》的著作中研究了光的反射。此后在二千多年的漫长历程中,人们先后发明了透镜、望远镜、显微镜,建立了反射定律和折射定律,发现了许多光学现象。到了 17 世纪中叶,才奠定了几何光学基础,光学在理论和应用上开始有了真正的发展。

光学发展史,是人类对光本性的不断探索和认识的历史。在公元 17 世纪,有关光学理论正在传播和开创时,便有了关于光本性的两种观点:微粒学说和波动学说。以牛顿(I. Newton)为代表的“微粒说”认为,光是光源发射出来的一束速度极快的微粒流,微粒在均匀物质内按力学规律作等速直线运动。微粒学说能够解释光的直线传播特性,以及反射、折射定律,但是无法进一步对光的干涉、衍射等现象作出解释。另一方面,与牛顿同时代的惠更斯(C. Huygens),在前人研究的基础上发展了光的“波动说”,于 1690 年发表《光论》一书,阐述光的波动特性。波动学说认为光是一种波动,光的传播不是物质微粒子的迁移过程,而是运动能量以波动方式迁移的过程。惠更斯还引入了波和波阵面的概念,提出了著名的惠更斯原理,能定量解释反射和折射定律。在随后的百余年间,这两种截然不同的学说寻求各自的发展,并互相排斥。由于牛顿在科学界的权威性,以及早期的波动学说缺乏数学基础,还很不完善,占统治地位的仍然是光的微粒学说。直到 19 世纪初,以杨(T. Young)和菲涅耳(A. J. Fresnel)的研究

成果为代表,才初步形成了**波动光学**体系。波动理论能圆满地解释光的干涉、衍射和偏振等现象,从而在两种学说的抗衡中取得了决定性的胜利。在同一时期,电磁学得到了发展,19世纪下半叶,麦克斯韦电磁场理论和赫兹实验证明了可见光是波长在400~760nm波段的电磁波,为光的波动理论奠定了坚实的电磁理论的基础,使人类在认识光的本性方面又向前推进了一步。光的电磁理论在解决一系列光的传播问题上取得了极大的成功,以至于19世纪末的物理学家们普遍认为,人们已最终认识了光的本性,它是一种电磁波。然而,19世纪末至20世纪初人们又发现了一系列与电磁理论相矛盾的新现象,使光的波动理论受到新的挑战。为了解释黑体辐射、光电效应等这些用波动理论无法解释的现象,物理学家不得不再次考虑光具有“微粒”的性质。不过这种光微粒完全不同于牛顿所假设的机械微粒,而是有了新的更深刻的含义,它反映了人类对光本性的认识又进入了一个更高级的阶段。

20世纪以来,物理学发生了一系列革命,其中**量子理论**的建立将有关光的两个不同的属性统一了起来,使人们进一步认识到光既具有波动性又具有粒子性,即光具有波粒二象性。这是人类对物质世界认识的又一次飞跃。

随着人们对光的本性问题不断深入探索,光学在理论和实际应用上都有了重大突破。1948年诞生了全息术;1955年科学家首次提出“光学传递函数”的新概念,并用来评价象质,以及1960年第一台激光器问世,使光学开始了一个新的发展时期,出现了许多新的光学分支,如信息光学、激光物理、非线性光学等,使古老的光学发生了空前的变化,与其他学科一样,光学正在经历一场新的革命。

作为今后学习和研究的基础,本篇讨论波动光学中最基本的干涉、衍射、偏振等现象及其应用。

第十六章 光的干涉

本章以光的波动理论为基础,讨论产生干涉现象的光波应具有的条件,具体分析双缝干涉和薄膜干涉,并介绍干涉现象的一些应用。

§ 16.1 相干光

一、光源

能发射光波的物体称为光源。如太阳、白炽灯、火焰、气体放电管等都是最常见的光源。光源发光是由于其内部的原子、分子受到外界激发后进入高能量的激发态,在它们跃迁回低能量的激发态或最低能量的基态时将发射出一定波长的电磁波。按照激发方式的不同,可将光源分为热辐射源和冷光源两大类。

1. 热辐射源

热辐射源是一种将热能转化为辐射的光源。任何温度的物体都有热辐射,温度较低时,物体辐射红外线,温度较高时,辐射可见光、紫外线等。对物体加热,使维持一定的温度,物体就会持续地发射光波。从远古时代单纯依靠天然光源——太阳,直到白炽灯问世,人类利用的光源都是热辐射源。

2. 冷光源

除了热辐射以外,还有另外一种光的发射,它是物体在某种外界作用的激发下偏离热平衡态时产生的辐射,是一种非平衡辐射。由于发光物质与周围环境的温度几乎相同,并不需要加热,所以称之为冷光源,并称这种光发射现象为冷光。

根据发光物质吸收能量来源的不同,又可分为机械发光、物理发光、化学发光及生物发光等。如 ZnS 和 Mn 在振动时可以发光,结晶结构发生变化时也可以发光,都是机械发光的例子。采用物理手段进行激发所产生的发光现象称物理发光,例如稀薄气体在放电管内电场作用下发出辉光;日光灯内气体放电产生紫外线,照射到管壁上荧光物质发出可见光;高能粒子碰撞引起的北极光等。化学发光是利用化学反应产生的化学能转换成光能,如腐物中的磷在空气中缓慢氧化会发出光来。生物发光是一种很普遍的生物现象,如萤火虫发光和海洋水面的“磷光”等,它的激发能来自生物化学反应的化学能,是一种特殊形式的化学发光。自从 1960 年激光器问世以后,激光光源就成为光学技术中最重要的一种新颖光源,但它的发光机理与普通光源不同,我们将在后面进行专题讨论。

在一般光源中,大量受激原子(或分子)随机地从激发态返回正常态,各个原子(或分子)参差不齐地、独立地辐射出有限长的电磁波列,辐射持续的时间十分短暂,只有 $10^{-9} \sim 10^{-8}$ s,因此各波列之间的频率、振动方向和相位是毫无关联的。人眼所感受到的光波就是大量这类电磁波列积累作用的结果。实验表明,对人眼和各种测量仪器,引起视觉和光化学反应的主要因素是光波中的电场矢量,又因为磁场矢量和电场矢量具有确定的关系,因此讨论光波中的电场矢量的性质,就能代表光波的性质。

二、相干光波

干涉现象是波动的一个重要特征。在第六章中已经讨论过,所谓干涉现象是指两列波在空间相遇区域内,有些点的振动始终加强,而另一些点的振动始终减弱,形成振动有强有弱的稳定分布。对于可见光波,干涉现象则表现为叠加区域中有些点较亮,而另一些点较暗,出现一系列有规律的明暗条纹,称为干涉条纹。能够产生干涉现象的两束光波称为相干光波,它们必须满足频率相同、振动方向相同和相位差恒定三个条件,这三个条件称为相干条件。能发出相干光波的光

源,称之为**相干光源**,它们同样要满足相干条件。为了确保产生明显的干涉现象,还必须使两光波在相遇点所产生的振动的振幅相差不能悬殊,以及两光波在相遇点的光程差不能太大的补充条件。我们将在 § 16.2 和 § 16.6 中分别加以说明。

一般光源发出的光波是许多彼此毫无关联的波列的混合,因此任何两个独立的光源发出的光波即使有相同的频率和振动方向,但在相遇点的两波列之间的相位差仍然是瞬息万变的。相位差的值,会从 0 到 2π 之间随机地高速突变。当这样的两束光波相遇叠加时,不可能出现稳定的明暗分布,在叠加区域内的亮度分布均匀,强度是两列光波的光强之和,也就是说,不会出现干涉现象。

三、相干光波的获得

无论在自然界或实验室里,都无法用通常的光源得到满足上述相干条件的两个独立光源。但我们可以设法使一个点光源发出的光波分离为两部分(即两束光),然后使它们经过不同的路径后再相遇。这样的两束光波,因源于同一束光,必定满足相干条件,在叠加区域会出现干涉现象。

如何将一束光分离成两束呢?一般有两种方法,即分波阵面法和分振幅法。**分波阵面法**是在一个光源发射的同一波阵面的不同部分上分离出两束光。下面要讨论的杨氏双缝干涉就是利用分波阵面法获得相干光的典型例子。**分振幅法**是在透明介质表面上通过反射和透射分离出两束相干光,也可以说成是入射光波的振幅被“分割”了。这种利用反射和透射获得两束相干光的方法称为**分振幅法**。

§ 16.2 双缝干涉

1801年英国科学家杨(T. Young)^①成功地用分波阵面法获得相干光,并观察到光的干涉现象。现代的杨氏双缝实验的基本装置如图16.1所示。双缝 S_1 和 S_2 相距很近,且离细缝 S 等距并互相平行。因此,单色平行光通过细缝 S 后,从 S_1 和 S_2 透出的光波是从同一波阵面分离出来的相干光波,在观察屏 E 上将出现一系列平行于双缝的

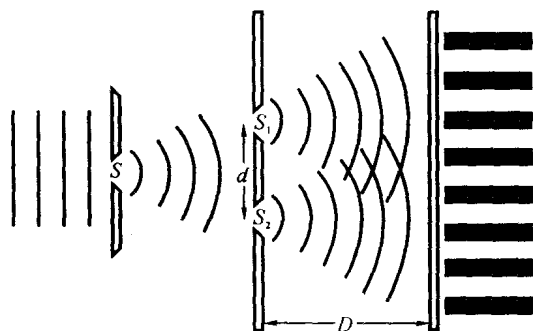


图 16.1 杨氏双缝实验

明暗相间的条纹。若挡住其中一条缝,干涉条纹会立即消失。这就是**双缝干涉现象**。这种干涉效应证实了光的波动本性。在历史上,杨氏

^① 托马斯·杨(Thomas Young, 公元 1773—1829 年)是英国医生,曾获医学博士。他兴趣广泛,勤奋好学,对物理学也有很深造诣。在学医时,研究过眼睛的构造和光学特性。就是在涉及眼睛接受不同颜色的光这一类问题时,对光的波动性有了进一步认识,导致他对牛顿做过的光学实验和有关学说进行深入的思考和审查。1801年,托马斯·杨发展了惠更斯的波动理论,成功地完成了光的干涉实验,即著名的杨氏双缝实验。他又第一个精确测定了光的波长。

双缝干涉实验^① 是确立光的波动学说的关键性实验之一。

一、干涉条纹的位置

在图 16.2 中, 设相干光源 S_1 和 S_2 相距为 d , 到屏的距离为 D (一般 D 的数量级为米)。屏上中央 O 附近的一点 P , 离 S_1 和 S_2 的

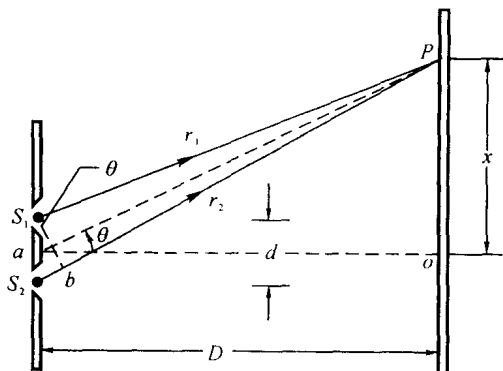


图 16.2 杨氏干涉实验条纹的计算

距离分别为 r_1 和 r_2 。我们作一直线 S_1b , 使 PS_1 和 Pb 两直线等长, 由于 $D \gg d$, 所以 S_1b 几乎与 PS_2 垂直, $\angle S_2S_1b$ 与 $\angle Pao$ 可视为相等, 均为 θ 。则从光源 S_1 和 S_2 发出的两束光波到达 P 点的波程差为

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin \theta$$

因为光源 S_1 和 S_2 具有相同相位, 两束光波到达 P 点的相位差为

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (r_2 - r_1) \approx \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

由 § 6.5 中对相干波叠加的讨论可知, P 点合振动振幅是极大或极小的条件为

极大:

^① 托马斯·杨当年所做的实验是让日光先通过一针孔 S , 再通过相隔一段距离的两孔 S_1 和 S_2 , 实现了两光束的干涉。后人重复此实验时将针孔改为狭缝, 称为杨氏双缝实验。

$$\delta = d \sin \theta = \pm k \lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (16.1)$$

极小:

$$\delta = d \sin \theta = \pm (2k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (16.2)$$

设 P 点到观察屏上对称中心 O 点距离为 x (图 16.2)。由于实际可观察到的干涉条纹与所对应的 θ 角都很小, 我们可以近似认为 $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \frac{x}{D}$, 因此由 (16.1) 式和 (16.2) 式得到条纹位置的分布, 明纹中心的位置为:

$$x = \pm \frac{D}{d} k \lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (16.3)$$

暗纹中心的位置为:

$$x = \pm \frac{D}{d} (2k-1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (16.4)$$

在中央位置处是明纹, 对应于 $k=0$, 称为**零级明纹**。两侧对称分布着较高级次的明纹, 对应于 $k=1, k=2, \dots$, 分别称为第一级, 第二级, \dots 明条纹。暗纹没有零级, 对应于 $k=1, k=2, \dots$ 称为第一级, 第二级, \dots 暗条纹。

屏上相邻两明纹中心(或暗纹中心)的距离 Δx 为条纹间距

$$\Delta x = \frac{D}{d} [(k+1) - k] \lambda = \frac{D}{d} \lambda \quad (16.5)$$

由此可见, 对于一定波长的单色光, 干涉条纹的间距与级次 k 无关, 屏上条纹是互相平行均匀排列的。

由式 (16.5) 可以看出, 若能精确地测量出条纹的间距, 以及 D 和 d 的值, 则由 (16.5) 式可以求得光波的波长。

如果用白光作为光源, 由 (16.3) 式可见, 各种波长的零级条纹在

屏上 $x=0$ 处重叠,形成中央白色明纹。在中央明纹两侧,各种波长的同一级次的明纹在屏上位置不同,略有分离,级数越高,分离越大,紫光离中央最近,红光最远,观察到的是有规则排列的彩色条纹。再远处,则由于不同级次各色光发生重叠,条纹逐渐模糊,最后形成一片白色。

例 16.1 在杨氏实验中双缝间距为 d ,若用白光作为光源,试求能观察到的清晰可见光谱的级次。

解 白光波长在 $400\text{nm} \sim 760\text{nm}$ 范围。形成明纹的条件为

$$d\sin\theta = \pm k\lambda$$

最先发生重叠的是某一级次的红光和高一级次的紫光。因此,能观察到的从紫到红清晰可见光谱的级次可由下式求得

$$k\lambda_{\text{红}} = (k+1)\lambda_{\text{紫}}$$

因而

$$k = \frac{\lambda_{\text{紫}}}{\lambda_{\text{红}} - \lambda_{\text{紫}}} = \frac{400}{760 - 400} = 1.1$$

k 取整数 1,只能观察到第一级可见光光谱。

二、干涉条纹的强度分布

干涉现象表示光波在空间各处的能量重新分配。设光源 S_1 和 S_2 的光振动传播到屏上 P 点时,两个光振动可以表示为

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

则在 P 点的合振动振幅 A 为

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

已知光波的强度和振幅平方成正比,故得 P 点的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

式中 I_1 、 I_2 是两束光单独在 P 点的光强。在通常的实验装置中,双缝宽度相等,故有相同的光强。且观察干涉现象的 θ 角范围比较小, r_1 与 r_2 十分接近,因此对屏中央附近各点,可以认为 $I_1 \approx I_2 = I_0$,我们