

简明基础物理学

第三卷 光学与近代物理学

全书主编 刘宏清 赵有伦 尹邦勇

本卷主编 徐斌富 马 莉



第二版

武汉大学出版社

WUHAN UNIVERSITY PRESS

简明基础物理学

第三卷 光学与近代物理学
(第二版)

全书主编

刘宏清 赵有伦 尹邦勇

全书主审

刘觉平

本卷主编

~~徐斌富马莉~~

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

简明基础物理学. 第3卷, 光学与近代物理学/徐斌富, 马莉主编. —2版. —武汉: 武汉大学出版社, 2000. 6

ISBN 7-307-02933-2

I. 简… II. ①徐… ②马… III. ①物理学—高等学校—教材
②光学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 15894 号

责任编辑: 史新奎 责任校对: 张 昕 版式设计: 支 笛

出版: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

发行: 新华书店湖北发行所

印刷: 湖北省毕昇印刷总厂

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.625 字数: 271 千字

版次: 1993 年 7 月第 1 版 2000 年 6 月第 2 版

2000 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

ISBN 7-307-02933-2/O · 222 定价: 12.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题者, 请与当地图书销售部门联系调换。

第二版 编者的话

本书在第一版基础上作了较大幅度的修改,加强理论物理、近代物理、物理前沿、高新技术在普通物理学中的渗透,目的在于反映物理学的发展。本书为适应综合性大学非物理专业普通物理学教学需要,仍以简明为主,以便于使用此教材的数学、计算机科学、化学、环境科学、分析测试科学、生物学、医学、图书情报等学科的教师和学生有较普遍的适应性。对于本教材与各学科结合不到之处,敬请各位教师结合各专业学科实际情况,予以补充讲授。

本书仍然保持原来四卷不变,各卷自成体系,以便分卷单独使用。

担任全书各卷编写与审稿的有关人员如下:

全书主编:刘宏清 赵有伦 尹邦勇

全书主审:刘觉平

第一卷主编:杨宣东 余祖兴 邹 勇

第二卷主编:张少平

第三卷主编:徐斌富 马 莉

第四卷主编:王承彦 周殿清 黄兴鼎

全书各章(实验)的编者分别为:

刘觉平 绪论

杨宣东 第一卷 第1~5章

邹 勇 第一卷 第6~7章

余祖兴 第一卷 第8~10章

刘宏清 第二卷 第1~2章

赵有伦 第二卷 第3,6~8章
张少平 第二卷 第4~5章
马 莉 第三卷 第1~3章
徐斌富 第三卷 第4~8章
王承彦 第四卷 实验1,3~7,10~11,13~15
尹邦勇 第四卷 绪论 实验16~29
黄兴鼎 第四卷 实验2,8~9,12,30~32
周殿清 第四卷 实验33~44

本书再版过程中得到武汉大学教务处、理学院、出版社的关心和大力支持,编者在此表示衷心感谢!

全书有不当之处,敬请批评指正。

编 者
于武昌珞珈山
1998年11月

第一版 编者的话

本书是武汉大学物理系第二基础物理教研室的教师根据多年的教学经验,参考教学大纲的要求,集体编写而成的。此书可作为综合性大学、师范院校、工科院校非物理专业的普通物理学教材。全书共分四卷,各卷自成体系,内容分别为:

第一卷 力学与热学

第二卷 电磁学

第三卷 光学与近代物理学

第四卷 实验物理学

在编写过程中,我们力求做到以下几点:首先,在高中物理和大学物理间跨一个较大的台阶,能引起读者对学习大学物理学的兴趣。其次,在系统编写经典物理的基础上,适当增加近代物理和现代物理的内容,使本书能反映时代性,其中,特别注意我国目前在物理学方面的发展和应用。同时,为了把大学物理的讲授和实验结合起来,特编辑实验物理卷,使本书能有较完善的体系。最后,为使一部分读者在学习普通物理学的基本内容时,还有兴趣深入学习,我们编辑了部分较难的内容,在书中用“*”号表示,以供参考与选用。

担任全书各卷的编写人员有:

全书主编 刘宏清 胡修愚 周武光

第一卷主编 杨宣东

第二卷主编 赵有伦 张少平

第三卷主编 徐斌富 马 莉

第四卷主编 尹邦勇 黄兴鼎 李守源

全卷各章的编者分别是：

杨宣东

(第一卷 第1~7章)

胡修愚

周武光 (第一卷 第8~10章)

刘宏清 (第二卷 第1~2章)

张少平 (第二卷 第4~5章)

赵有伦 (第二卷 第3,6~7章)

马 莉 (第三卷 第1~3章)

徐斌富 (第三卷 第4~8章)

黄兴鼎 (第四卷 实验1~10,26~27)

李守源 (第四卷 实验11~19,28)

尹邦勇 (第四卷 实验20~25,29~34)

全书各卷特请有关教师审阅：石展之教授(第一卷)，李琪副教授(第二卷)，刘福庆教授(第三卷)，周孝安副教授(第四卷)，本书出版过程中，得到武汉大学教务处、物理系和武汉大学出版社领导的关心和支持，我们在此表示衷心的感谢。

全书由于编写时间较紧，有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

于武昌珞珈山

1992.4.

目 录

第一章 光的干涉	1
§ 1-1 光的电磁理论	2
§ 1-2 分波前干涉	8
§ 1-3 光波场的空间相干性和时间相干性	15
§ 1-4 分振幅干涉	21
§ 1-5 迈克尔逊干涉仪	37
习题	39
第二章 光的衍射	43
§ 2-1 惠更斯-菲涅耳原理	43
§ 2-2 单缝的夫琅和费衍射	47
§ 2-3 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	53
§ 2-4 光栅	59
§ 2-5 晶体对 X 射线的衍射	67
习题	72
第三章 光的偏振	76
§ 3-1 自然光与偏振光	76
§ 3-2 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	80
§ 3-3 反射和折射时光的偏振	84
§ 3-4 晶体的双折射和偏振棱镜	87
§ 3-5 椭圆偏振光和圆偏振光	96

§ 3-6 偏振光的干涉	99
§ 3-7 人为双折射 旋光现象	104
习题	111
第四章 相对论简介	115
§ 4-1 伽利略变换和力学的相对性原理	115
§ 4-2 狭义相对论的实验基础和基本假设	122
§ 4-3 洛伦兹(Lorentz)变换	129
§ 4-4 相对论运动学	133
§ 4-5 相对论动力学	145
* § 4-6 广义相对论简介	155
习题	166
第五章 初期量子论	168
§ 5-1 能量子概念	168
§ 5-2 光量子概念	177
§ 5-3 原子的初期量子理论(一)	189
§ 5-4 弗兰克-赫兹实验	201
* § 5-5 原子的初期量子理论(二)	203
§ 5-6 对玻尔原子理论的评价	210
习题	212
第六章 量子力学基础	215
§ 6-1 量子力学的实验基础	216
§ 6-2 测不准关系	221
§ 6-3 波函数	225
§ 6-4 薛定谔方程	229
* § 6-5 力学量和算符	242
§ 6-6 量子力学的体系和发展	251

习题.....	255
第七章 原子、分子与固体	258
§ 7-1 氢原子	258
§ 7-2 电子自旋	267
§ 7-3 多电子原子中的电子分布	274
§ 7-4 双原子分子	279
§ 7-5 固体的能带	288
习题.....	297
第八章 宏观量子效应简介.....	299
§ 8-1 超流宏观量子效应	300
§ 8-2 超导宏观量子效应	305
§ 8-3 量子霍尔效应	318
附录 普适物理常数.....	321
习题答案.....	324

第一章 光的干涉

光学是物理学中发展较早的一个分支，是物理学的一个重要组成部分。最初，人们从物体成像的研究中形成了光线的概念，并以光的直线传播性质为基础，总结出了光在透明介质中的反射和折射的规律，由此逐步形成了几何光学。到 17 世纪，人们提出了两种关于光的本性的学说：一方面是以牛顿为代表的一些人提出的微粒说，认为光是按照惯性定律沿直线飞行的微粒流；另一方面是惠更斯所提出的波动说，认为光是机械振动在“以太”这种特殊介质中的传播。由于牛顿的权威性，光的微粒说差不多统治了 17 和 18 两个世纪。

19 世纪以来，随着实验技术水平的提高，光的干涉、衍射和偏振等实验结果表明，光具有波动性，并且光是横波，使光的波动说获得了普遍的承认。19 世纪后半叶，麦克斯韦提出了电磁波理论，并为赫兹的实验所证实，人们才认识到光不是机械波，而是一定波段的电磁波，从而形成了以电磁波理论为基础的波动光学。19 世纪末到 20 世纪初，光学的研究深入到了光的产生以及光与物质相互作用的微观机制问题。光学已发展成为研究从微波、红外线、可见光、紫外线直到 γ 射线和宽广波段范围内的电磁辐射的发生、传播、接收和显示，以及与物质相互作用的学科。值得提出的是，光也具有粒子性，它的粒子性是在光电效应这类微观现象中才表现出来的。在宏观理论中，一般将光看成是电磁波而忽略其粒子性，就足够准确了。

本章我们主要通过光的干涉现象讨论光的波动性。

§ 1-1 光的电磁理论

一、光的电磁理论

在 19 世纪 70 年代, 英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831~1879) 创立了电磁场理论, 这个理论预言了电磁波的存在。德国物理学家赫兹 (Heinrich Rudolph Hertz, 1857~1894) 进行了一系列的实验, 导致了电磁波的发现, 从而证实了麦克斯韦理论的正确性。根据当时已有的知识, 光波也具有完全相似的现象, 那么它们之间有什么联系呢? 按照麦克斯韦理论, 电磁波在真空中的传播速度 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, c 只和真空中的介电系数 ϵ_0 及磁导率 μ_0 有关, 是一个普适常数, 在实验误差范围内, 这个常数 c 与已测得的光速相等。这个结果使麦克斯韦得到这样一个结论: 光是某一波段的电磁波, c 就是光在真空中的传播速度。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.1)$$

式中: ϵ_0 是真空电容率, μ_0 是真空磁导率。在介质中, 光的传播速度为

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1.2)$$

式中: ϵ_r 是介质的相对电容率, μ_r 是介质的相对磁导率。光在透明介质里的传播速度 u 小于真空中的速度 c 。 c 与 u 的比值是该透明介质的折射率, 即

$$n = \frac{c}{u} \quad (1.3)$$

将式 (1.2) 和式 (1.3) 相比较可得

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (1.4)$$

此式把光学和电磁学这两个不同领域中的物理量联系起来了。当光波穿过不同的介质时，其频率 ν 、角频率 ω 保持不变，但光的传播速度 u 和波长 λ 却随着介质的不同而改变。

在真空中，电磁波的电场强度 E 和磁场强度 H 的方向互相垂直，并且都垂直于电磁波的传播方向。光是一种电磁波，因此光就是电磁场中电场强度 E 和磁场强度 H 周期性变化在空间的传播。如图 1-1，由实验证明，对人的眼睛或感光仪器起作用的是电场强度 E 。 E 的振动称为光振动， E 称为光矢量。

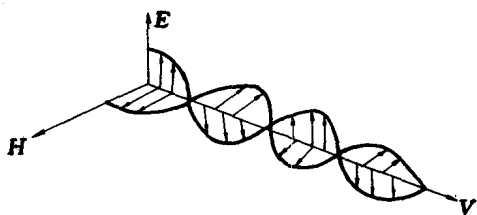


图 1-1 电磁波的传播

在电磁波传播时，会产生能量的传递（流动）。在定量地研究电磁能的传输时我们引入能流密度矢量 S ， S 也叫做坡印廷矢量，它表示单位时间通过以观察点为中心、垂直于传播方向的单位面积上的电磁辐射通量。它与光波中的电矢量 E 和磁矢量 H 的关系为

$$S = E \times H \quad (1.5)$$

在光学中，通常把平均能流密度 $\bar{S}$ 称为光强，用 I 表示。因此，光强表示单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的光的能量在一个周期内的平均值，即单位面积上的平均光功率。人的眼睛所观测到的是光强 I 而不是光振动 E 。对于平面简谐电磁波，利用电磁学中式

$$\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0} E_0 = \sqrt{\mu_r \mu_0} H_0$$

$$\overline{S} = \frac{1}{2} E_0 H_0$$

可以得到

$$I = \overline{S} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} E_0^2 \propto E_0^2$$

式中： E_0 是光振动的振幅。对人的眼睛或感光仪器起作用的是电场强度 E ，所以我们说光波中的振动矢量是电场强度 E 。

在波动光学中，主要讨论的是波所到之处的相对光强，这时上述比例关系中的系数可以认为等于 1，因此在同一种介质中往往就把光强定义为

$$I = E_0^2 \quad (1.6)$$

人眼能感受到的电磁波波长范围大约在 3900 ~ 7600 Å 的狭窄范围之内，这个波段内的电磁波叫做可见光。在可见光的范围内，不同的波长引起不同的颜色感觉。

图 1-2 给出了平均的正常人眼视觉的相对灵敏度曲线。由图可见，人眼对波长约为 555nm 的黄绿光最敏感。

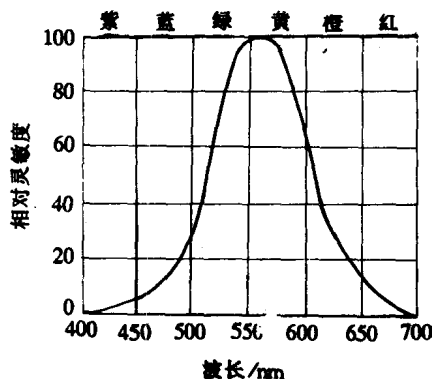


图 1-2 视觉的相对灵敏度

二、光波的叠加及相干条件

在通常情况下，光波和其他波动一样，在空间传播时都遵从波的独立传播原理。当两列光波在空间交叠时，它们的传播是互不干扰的，亦即每列波如何传播，就像另一列波完全不存在一

样，各自独立地进行着，这称为光的独立传播原理。一列光波在空间传播时，将在空间每一点引起振动。当两列或多列光波在空间同一区域中传播时，其中每一点都参与由每一列光波在该点所引起的光振动。

设在真空中有 S_1 和 S_2 两个单色光源发出频率相同、振动方向相同的两列光波， t 时刻在 P 点处引起的光振动分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{10} \cos(\omega t + \alpha_1 - \frac{2\pi}{\lambda} r_1) \\ &= E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{20} \cos(\omega t + \alpha_2 - \frac{2\pi}{\lambda} r_2) \\ &= E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中： α_1 和 α_2 为光源的初位相； E_{10} 和 E_{20} 为分振动振幅； φ_1 和 φ_2 则是两光波在 P 点所产生振动的初位相； n_1 和 n_2 为媒质的折射率； r_1 和 r_2 为光波的路径。

P 点处的光振动，是两列光波单独在该点产生的光振动的合成，即

$$E = E_1 + E_2$$

叠加后 P 处的相对光强应由合振动的振幅平方 E_0^2 决定，并且

$$E_0^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

但实际观察到的总是在较长时间内的平均强度。在某一时间间隔 τ 内（其值远大于光振动的周期），合振动的平均相对强度（习惯上亦用符号 I 表示）为

$$\begin{aligned} I = \overline{E_0^2} &= \frac{1}{\tau} \int_0^\tau [E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)] dt \\ &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt \end{aligned} \quad (1.9)$$

式中：分光强 I_1 、 I_2 是不随时间变化的定值，第三项 $2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^\tau \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt$ 称为干涉项，它由 P 处两分振动的位相

差 $\delta = \varphi_1 - \varphi_2$ 决定。假定在观察时间内，它们的初位相各自独立地作不规则的改变，几率均等地在观察时间内多次重复取 $0 \sim 2\pi$ 范围内的一切可能值，则

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt = 0$$

因而两光波叠加后有 $I = I_1 + I_2$

这表明两光波叠加所产生的总强度等于各分强度之和。光强并没有发生重新分布，这样的叠加是非相干叠加。参与叠加的光波为非相干光波，其光源称为非相干光源。

如果两振动位相差始终保持不变，式 (1.9) 中被积的余弦函数可以从积分号中提出，就有

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1.10)$$

在某些位置上， $\cos \delta > 0$ ， $I > I_1 + I_2$ ，这些点振动始终加强；在另一些位置上， $\cos \delta < 0$ ， $I < I_1 + I_2$ ，这些点的振动状态始终减弱。

如果 $I_1 = I_2$ ，那么合成后的光强为

$$I = 2I_1(1 + \cos \delta) = 4I_1 \cos^2 \frac{\delta}{2} \quad (1.11)$$

当 $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi \cdots$ 时，在这些位置光强最大， $I = 4I_1$ 。当 $\delta = \pm \pi, \pm 3\pi \cdots$ 时，光强最小， $I = 0$ 。光强 I 随位相差 δ 变化。我们把干涉项时间平均值不为零的叠加，称为相干叠加，所形成的光强随空间的不均匀分布现象，称为干涉现象。参与相干叠加的光波为相干光波，其光源称为相干光源。

在日常生活中观察机械波或无线电波的干涉现象比较容易，因为它们的波源可以连续地振动，发出连续不断的正弦波。相干条件比较容易满足。

但观察光波的干涉现象就不那么容易了，并非任意两光波相遇都能产生干涉现象。两个完全独立的光源（如两只烛灯、电灯或油灯），它们的频率或波长完全相同，发生的光波即使相遇，

也观察不到光波相互加强或减弱的现象，它们所产生的光强分布等于各单独光强之和。

两个独立光源所发生的光波不相干的原因是由光源发光本质的复杂性所决定的。光的辐射是由光源中原子或分子的运动状态发生变化而产生的，我们所研究的是两个独立光源的一些互不相关的原子的辐射。它们各自互相独立地发出一个波列，彼此间无联系，同一时

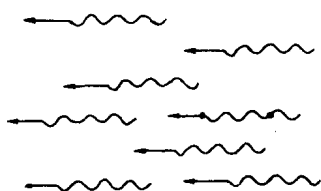


图 1-3 普通光源各原子和分子所发出的光波

刻，所发出光的相位和振动方向是不相同的。另外，在每一个这样的原子或分子里，由于辐射而造成的能量损失，或由于周围原子或分子的妨碍以及它们之间的相互作用，辐射过程常常中断，辐射延续时间很短。图 1-3 表明即使在最良好的情况下，辐射延续时间也不会超过 10^{-8} 秒。下次再发出的波列又有新的相位和振动方向，这样的光源是不相干的。我们观察到的只是均匀的光强度分布，在整个叠加区内只看到光强的简单相加。

上述讨论说明，要产生相干叠加形成稳定的干涉图样，相叠加的光波必须满足的条件是：(1) 两光波频率相同；(2) 光振动方向相同或有相同方向的振动分量；(3) 位相差恒定。这些条件称为光的相干条件，满足相干条件的光便是相干光。

为了从普通光源得到满足相干条件的两列光波，得到具有固定位相差的相干光源 S_1 和 S_2 ，通常是将一个普通光源所发出的每一束光，采用分波前、分振幅的办法，使其通过不同的光路变成两束光，再让它们实现相干叠加。由于激光光源中所有发光原子或分子动作的步调都是一致的，因此激光光源所发出的光具有高度的相干性。