

# 大学物理学 与 实验物理学

第三卷  
光学与  
近代物理学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

徐斌富 马莉

武汉大学出版社

# 大学物理学与实验物理学

## 第三卷 光学与近代物理学

全书主编

刘宏清 胡修愚 周武光

本卷主编

徐斌富 马莉

武汉大学出版社

(鄂)新登字 09 号

**大学物理学与实验物理学**

第三卷

全书主编

刘宏清 胡修恩 周武光

本卷主编

© 徐斌富 马莉

\*

武汉大学出版社出版发行

(430072 武昌 珞珈山)

湖北省安陆市印刷厂印刷

\*

850×1168 1/32 8.875 印张 223 千字

1993 年 7 月第 1 版 1993 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1—3000

ISBN 7-307-01550-1/O·132

定价: 5.10 元

## 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 | (第一卷 第8—10章)        |
| 周武光 | (第二卷 第1、2章)         |
| 刘宏清 | (第二卷 第4、5章)         |
| 张少平 | (第二卷 第3、6、7章)       |
| 赵有伦 | (第三卷 第1—3章)         |
| 马莉  | (第三卷 第4—8章)         |
| 徐斌富 | (第四卷 实验1—10、26、27)  |
| 黄兴鼎 | (第四卷 实验11—19、28)    |
| 李守源 | (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.



## 前 言

本书为《大学物理学与实验物理学》第三卷，本卷共分八章。主要内容包括波动光学（第一章至第三章）与近代物理学（第四章至第八章）两大部分。本书约需讲授 54 个学时，其中有 6 个学时的选讲内容（书中以“\*”号标出），以供不同学科和专业根据学习时间或条件酌情选用。

光学是物理学的一个分科。它主要研究光的本性，光的发射、传播和吸收的规律，光和其它物质的相互作用及其应用。通常将光学分为几何光学和物理光学两部分，物理光学又可分为波动光学和量子光学两个分支。以光的直线传播性质及光的反射、折射定律为基础的光学称为几何光学。以光的波动性质为基础的光学称为波动光学。根据光的量子性，运用量子理论来研究光与物质之间相互作用的光学称为量子光学。本卷前三章仅讨论波动光学，主要内容有光的干涉、光的衍射和光的偏振。有关光的量子性问题将在近代物理学的部分介绍。至于几何光学的内容，由于篇幅所限，本书从略。

光的波动性早在 17 世纪就已发现，光的干涉和衍射现象以及光的电磁理论从实验和理论两方面都充分肯定了光的波动性，然而在本世纪初所发现的黑体辐射、光电效应等现象，使人们发现了光的波粒二象性。光的波动性和粒子性所反映的基本规律，不但在科学研究和工程技术的各个领域中有广泛的应用，而且在基础理论方面启示人们认识到微观粒子也具有波粒二象性，从而开辟了建立量子论的途径。

近代物理学是以相对论和量子论为理论支柱的物理理论，它是当经典物理学（习惯上人们称牛顿力学、热力学及经典统计物理、麦克斯韦电磁理论等为经典物理学）在解释实验事实遇到越来越大的困难而在本世纪初建立和发展起来的。

近代物理学的内容极其丰富，它包括新的时空观和原子、分子、原子核、基本粒子以及固体物理等方面。目前，它无论在实验还是理论方面都仍在不断发展。本卷在第四章至第八章介绍近代物理学的一些基本知识，主要包括相对论和量子论（即初期量子论和量子力学）的基本概念及其在原子、分子和固体中的简单应用。在最后一章里，我们对宏观量子效应也作了简单的介绍。

编者

1992年4月

# 目 录

第一章 光的干涉	1
§ 1-1 光的电磁理论	1
§ 1-2 典型的干涉实验装置	6
§ 1-3 干涉条纹的空间相干性和时间相干性	11
§ 1-4 薄膜干涉	13
§ 1-5 迈克尔逊干涉仪	25
习题	26
第二章 光的衍射	29
§ 2-1 惠更斯-菲涅尔原理	29
§ 2-2 单缝衍射 菲涅尔半波带	33
§ 2-3 衍射光栅	37
§ 2-4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	41
§ 2-5 晶体对 X 射线的衍射	45
习题	48
第三章 光的偏振	50
§ 3-1 自然光 偏振光	50
§ 3-2 马吕斯定律	53
§ 3-3 反射和折射时光的偏振	54
§ 3-4 光的双折射偏振棱镜	56
§ 3-5 椭圆偏振光和圆偏振光	65



§ 3-6	偏振光的干涉	67
*§ 3-7	旋光现象	70
	习题	71
<b>第四章 相对论简介</b>		73
§ 4-1	伽利略变换和力学的相对性原理	73
§ 4-2	狭义相对论的实验基础和基本假设	79
§ 4-3	洛仑兹 (Lorentz) 变换	86
§ 4-4	相对论运动学	90
§ 4-5	相对论动力学	101
*§ 4-6	广义相对论简介	110
	习题	120
<b>第五章 初期量子论</b>		122
§ 5-1	能量子概念	122
§ 5-2	光量子概念	131
§ 5-3	原子的初期量子理论 (一)	141
§ 5-4	弗兰克-赫兹实验	153
*§ 5-5	原子的初期量子理论 (二)	155
§ 5-6	对玻尔原子理论的评价	162
	习题	163
<b>第六章 量子力学基础</b>		166
§ 6-1	量子力学的实验基础	167
§ 6-2	测不准关系	172
§ 6-3	波函数	175
§ 6-4	薛定谔方程	180
*§ 6-5	力学量和算符	191
§ 6-6	量子力学的体系和发展	200

习题	203
<b>第七章 原子、分子与固体</b>	<b>205</b>
§ 7-1 氢原子	205
§ 7-2 电子自旋	214
§ 7-3 多电子原子中的电子分布	220
§ 7-4 双原子分子	225
§ 7-5 固体的能带	234
习题	242
<b>第八章 宏观量子效应简介</b>	<b>245</b>
§ 8-1 超流宏观量子效应	246
§ 8-2 超导宏观量子效应	250
§ 8-3 量子霍尔效应	262
<b>附录 普适物理常数</b>	<b>264</b>
<b>习题答案</b>	<b>268</b>

### 一、光的电磁理论

在19世纪30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,德国物理学家赫兹(Herrich Rudolph Herz, 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,而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,电磁波在真空中传播的速度为  $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ , 只和真空中的介电系数 $\epsilon_0$ 和磁导率 $\mu_0$ 有关,是一个普适常数,在实验误差范围内,这个常数与已测得的光速相等,这个

# 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。在几何光学中，我们以光的直线传播性质为基础，研究了光在透明介质中的传播问题。为了解光的各种现象的实质，洞悉光的属性以及有效地利用它，我们还必须研究光的波动性和粒子性，光学的这部分内容称为物理光学。以光的波动性为基础的物理光学，称为波动光学。以光的粒子性为基础的物理光学，称为量子光学。

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，德国物理学家赫兹 (Heinrich Rudolf 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。而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  $\epsilon_0$  和磁导率  $\mu_0$  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。

在介质中电磁波的速度为

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (1-1)$$

式中  $\epsilon_r$ 、 $\mu_r$  分别为介质的相对介电常数及相对磁导率。光在透明介质里的传播速度  $v$  小于真空中的速度  $c$ 。 $c$  与  $v$  的比值是该透明介质的折射率，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-2)$$

将式(1-1)和式(1-2)相比较可得

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

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。

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，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。

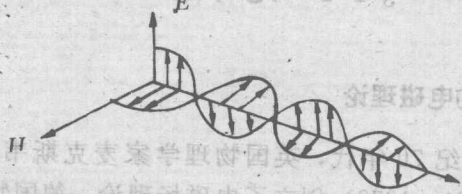


图 1-1 电磁波的传播

人眼能感受到的电磁波波长范围大约在  $3900 \sim 7600 \text{ \AA}$  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。

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

$$S = E \times H \quad (1-3)$$

按矢量  $E$  与  $H$  的依赖关系，能流密度的平均值可写成

$$\bar{S} = \frac{1}{2} n \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} |E_0|^2 \quad (1-4)$$

$E_0$  为电矢量振动的振幅。可见  $S$  正比于  $n$  和  $E_0$  的平方。此时能流密度表现为光强度。所以光强度（即平均能流密度）为

$$I \propto E_0^2$$

通常我们关心的是光强度的相对分布，这时上述比例关系中的系数可以认为等于 1，于是

$$I = E_0^2$$

$I$  为相对强度。

## 二、光的叠加及相干条件

当两列波在同一空间传播时，空间各点都参与每列波在该点引起的振动。故两光波相遇叠加的问题可归结为空间任一点电磁振动的叠加。设  $S_1$  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  $P$  处引起的光振动分别为

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{10} \cos(\omega t + \alpha_1 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_1 r_1) \\ &= E_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{20} \cos(\omega t + \alpha_2 - \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_2 r_2) \\ &= E_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为光源的初位相， $E_{10}$  和  $E_{20}$  为分振动振幅， $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  则是两光波在  $P$  点所产生振动的初位相。显然， $P$  处光振动的合矢量为

$$E_0 = E_1 + E_2$$

叠加后  $P$  处的相对光强应由合振动的振幅平方决定，故有



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

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  $\tau$  内 (其值远大于光振动的周期), 合振动的平均相对强度为

$$I = E_0^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau [E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)] dt$$

$$= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt \quad (1-7)$$

上式中分光强  $I_1$ 、 $I_2$  是不随时间变化的定值, 第三项  $2\sqrt{I_1 I_2} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos(\varphi_1 - \varphi_2) dt$  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  $I = I_1 + I_2$  表明两光波叠加所产生的总强度等于各分强度之和。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(1-7)中被积的余弦函数可以从积分号中提出, 就有

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta \quad (1-8)$$

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

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

当  $\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$  时, 在这些位置光强最大,  $I = 4I_1$ 。当  $\delta = \pm\pi, \pm 3\pi, \dots$  时, 光强最小,  $I = 0$ 。光强  $I$  随位相差  $\delta$  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

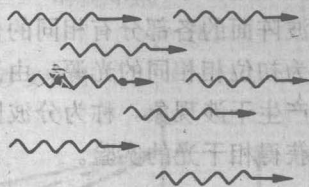


图 1-2 普通光源各原子和分子所发出的光波

一个个波列，彼此间无联系，同一时刻，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，延续时间很短。图 1-2 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。

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。

为了得到稳定的光的干涉现象，可利用同一原子（或靠得很近的原子群）的辐射来得到两列波（由于同源，它们当然是相干波），就可以达到相干的目的。为此，必须把原子所辐射的光波分为两个或两个以上的相干波，并使它们经过不同的路径后再相遇以产生干涉。产生相干光的方式有两种，即分波阵面的干涉和分振幅干涉。

## § 1-2 典型的干涉实验装置

我们可设法从一点（线）光源发出的光波的波阵面上分离出两部分或更多个部分，由于波阵面上任一部分可视为新的光源并且同波阵面的各部分有相同的位相，这些被分离出的部分波阵面可作为初位相相同的光源，由这些光源发出的光波，在相遇的区域将产生干涉现象，称为分波阵面干涉。下面介绍几种由分波阵面而获得相干光的实验。

### 一、著名的杨氏双狭缝实验

英国科学家托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829)在1801年以极其简单的装置和巧妙的构思，做到了用普通的光源来实现光的干涉。这就是在波动光学史上所做的有决定意义的杨氏实验。它为光的波动说确立了坚实的基础。这一实验成为许多其它光的干涉装置的原型。

如图 1-3 (a) 所示，在单色平行光前放一狭缝  $S$ ，在距  $S$  一定距离处放置另外两条平行狭缝  $S_1$  和  $S_2$ ， $S_1$  和  $S_2$  两缝之间的距离很小（约  $0.1\text{mm} \sim 1\text{mm}$ ）。从  $S_1$  和  $S_2$  中发出的两组柱面波在光波相遇区域产生干涉现象；在屏幕  $E$  上可以观察到干涉图样。图样为一系列稳定的明暗相间的条纹。如图 1-3 (b) 所示。（屏幕与两狭缝之间的距离约  $1\text{m} \sim 10\text{m}$ ）。

下面具体计算屏幕上干涉条纹的位置。如图 1-4 所示，设  $S_1$

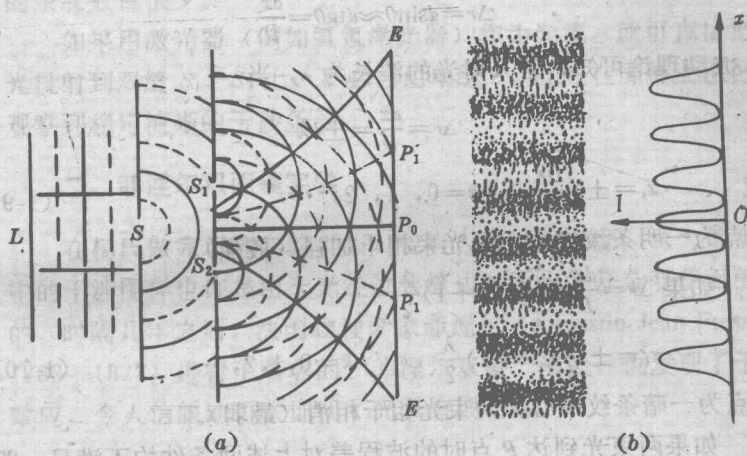


图1-3 双缝干涉实验图

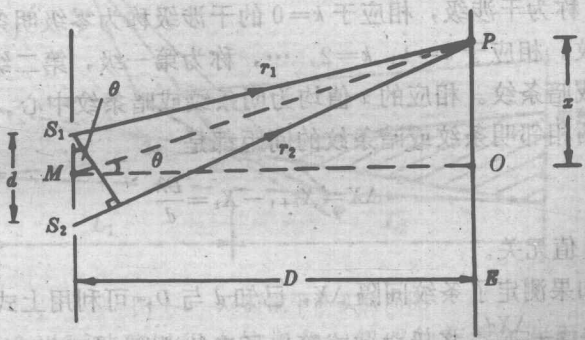


图1-4 干涉条纹的计算图

和  $S_2$  之间的距离为  $d$ ，双缝与屏幕之间的距离为  $D$ 。在屏幕上任取一点  $P$ ，它距  $S_1$  和  $S_2$  的距离分别为  $r_1$  和  $r_2$ ，则由  $S_1$  与  $S_2$  发出的光到达  $P$  点的波程差  $\Delta r = r_2 - r_1$ ，取  $M$  点为  $S_1$  和  $S_2$  的中点， $O$  为屏幕上正对着  $M$  的一点， $P$  点到屏幕上对称中心  $O$  的距离为  $x$ ，在通常观察到干涉条纹的情况下， $\theta$  角很小， $\sin\theta \approx \text{tg}\theta$ ，因此

$$\text{tg}\theta = \frac{x}{D}$$