



面向 21 世纪 课 程 教 材  
Textbook Series for 21st Century

# 基础物理学教程

下 卷

陆 果



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材  
Textbook Series for 21st Century

# 基础物理学教程

下 卷

陆 果



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

基础物理学教程 下卷/陆果. — 北京:高等教育出版社,  
1998 (2002 重印)  
高等学校教材  
ISBN 7-04-006702-1

I. 基… II. 陆… III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 18463 号

基础物理学教程(下卷)  
陆 果

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 北京外文印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 1998 年 9 月第 1 版

印 张 26.75

印 次 2002 年 4 月第 4 次印刷

字 数 440 000

定 价 22.50 元

---

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等  
质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

## 内 容 简 介

本书是教育部“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果，是面向21世纪课程教材。本书是在面向21世纪课程教材《基础物理学》的基础上，根据近年来的教学实践及读者的意见改写而成的。全书从现代科学技术的发展及理科对人才培养的要求出发，对理科非物理类专业基础物理课程的框架作了较大的变动，在课程内容的现代化方面作了较大幅度的改革。全书分力学和相对论、电磁学、光学、量子力学、热物理学等五部分，总计30章，分上、下卷出版。

本书可作为高等学校理科非物理类专业的教科书，也可供其他专业选用和社会读者阅读。

# 目 录

## 第三部分 光学

第十五章 光的干涉 .....	389
§ 15-1 光学概论 .....	389
一 从经典光学到现代光学 .....	389
二 光的电磁理论 .....	390
三 光波的复振幅描述 .....	392
§ 15-2 光波的相干叠加 .....	393
一 光波的叠加 .....	393
二 相干条件 .....	395
三 光程和光程差 .....	395
§ 15-3 分波前干涉 .....	396
一 杨氏实验 .....	396
二 菲涅耳双面镜和劳埃德镜 .....	399
三 干涉条纹的可见度 光源的宽度和单色性 .....	399
§ 15-4 分振幅干涉 .....	404
一 薄膜干涉原理 .....	404
二 等倾干涉 .....	406
三 等厚干涉 .....	407
四 迈克耳孙干涉仪和法布里-珀罗干涉仪 .....	409
习题 .....	414
第十六章 光的衍射 .....	417
§ 16-1 光的衍射现象和惠更斯-菲涅耳原理 .....	417
一 光的衍射现象及其分类 .....	417
二 惠更斯-菲涅耳原理 .....	418
§ 16-2 单缝和圆孔的夫琅禾费衍射 .....	419
一 单缝的夫琅禾费衍射 .....	419
二 圆孔的夫琅禾费衍射 .....	422
三 光学仪器的分辨本领 .....	423
§ 16-3 光栅 .....	426
一 光栅的构成 .....	426

二	光栅衍射图样 .....	427
三	光栅衍射图样的特点 .....	429
四	光栅光谱 .....	430
§ 16-4	X 射线在晶体上的衍射 .....	433
一	X 射线的发现和应用 .....	433
二	布拉格条件 .....	434
三	电子衍射和中子衍射 .....	435
四	劳厄相和德拜相 .....	436
§ 16-5	现代光学 .....	438
一	全息照相 .....	438
二	傅里叶光学 光学信息处理 .....	442
习题	.....	445
<b>第十七章</b>	<b>光的偏振</b> .....	<b>448</b>
§ 17-1	自然光和偏振光 .....	448
一	光的偏振态 .....	448
二	自然光 .....	449
三	线偏振光 马吕斯定律 .....	449
四	部分偏振光 .....	450
五	椭圆偏振光和圆偏振光 .....	451
§ 17-2	偏振光的产生和检验 .....	453
一	光在反射和折射时的偏振 玻片堆 .....	453
二	二向色性和偏振片 .....	454
三	晶体的双折射和偏振元件 .....	455
四	偏振光的获得和检验 .....	460
§ 17-3	偏振光的干涉 .....	461
一	偏振光的干涉现象 .....	461
二	偏振光的干涉原理 色偏振 .....	462
三	光弹效应和电光效应 .....	463
§ 17-4	旋光 .....	465
一	晶体和溶液的旋光性 .....	465
二	磁致旋光 .....	467
习题	.....	467
<b>第十八章</b>	<b>光的吸收、散射和色散</b> .....	<b>470</b>
§ 18-1	光的吸收 .....	470
一	吸收定律 .....	470

二 一般吸收和选择吸收 吸收光谱 .....	471
§ 18-2 光的散射 .....	473
一 光的散射现象及其分类 .....	473
二 瑞利散射定律 .....	475
三 散射光的强度和偏振状态 .....	475
四 拉曼散射 .....	477
§ 18-3 光的色散 .....	479
一 光的色散 棱镜光谱仪 .....	479
二 正常色散和反常色散 .....	482
§ 18-4 非线性光学 .....	483
一 非线性光学现象 .....	483
二 非线性光学现象的解释 .....	484
习题 .....	486
<b>第四部分 量子力学</b>	
<b>第十九章 从经典物理学到量子力学</b> .....	487
§ 19-1 从经典物理学到前期量子论 .....	487
一 黑体辐射 普朗克的能量子假说 .....	488
二 光电效应 爱因斯坦的光量子论 .....	492
三 原子结构和原子光谱 玻尔的量子论 .....	498
§ 19-2 量子力学的建立和发展 .....	503
一 海森伯矩阵力学的提出 .....	503
二 德布罗意波 薛定谔波动力学的提出 .....	504
三 量子理论的发展 .....	506
习题 .....	509
<b>第二十章 波函数与薛定谔方程</b> .....	512
§ 20-1 波函数的统计诠释 .....	512
一 概率波 .....	512
二 统计诠释及其他物理条件对波函数提出的要求 .....	514
三 概率的基本概念及运算 .....	516
§ 20-2 力学量的统计不确定性 .....	518
一 不确定性原理 .....	518
二 动量分布概率 .....	519
三 力学量的平均值 算符的引进 .....	521
§ 20-3 态叠加原理 .....	524

一	量子态及其表象 .....	524
二	态叠加原理 .....	525
§ 20-4	薛定谔方程 .....	527
一	薛定谔方程的引进 .....	527
二	定域的概率守恒 .....	529
三	定态薛定谔方程 .....	531
§ 20-5	一维定态问题 .....	533
一	无限深方势阱 离散谱 .....	533
二	线性谐振子 .....	536
三	方势垒的穿透 隧道效应 .....	539
	习题 .....	546
<b>第二十一章</b>	<b>力学量与本征态</b> .....	<b>549</b>
§ 21-1	量子力学中的力学量 .....	549
一	力学量用算符表达 .....	549
二	经典分析力学中的哈密顿量 .....	551
三	量子力学中的哈密顿量 薛定谔方程的普遍形式 .....	555
§ 21-2	本征值和本征函数 线性厄米算符 .....	556
一	力学量算符的本征值方程 .....	556
二	线性厄米算符 .....	558
三	厄米算符的性质 厄米算符与力学量 .....	560
§ 21-3	厄米算符的对易关系 .....	562
一	算符的一般运算规则和对易式 .....	562
二	量子力学的基本对易式 .....	564
三	角动量算符各分量之间的对易式 .....	565
§ 21-4	共同本征函数 .....	567
一	不同力学量同时有确定值的条件和共同本征函数 .....	567
二	角动量 ( $\hat{L}^2, \hat{L}_z$ ) 的共同本征函数 球谐函数 .....	567
三	力学量完全集和本征函数的完全性 .....	569
四	狄拉克符号 .....	571
五	占有数表象 .....	572
§ 21-5	力学量随时间的变化 守恒量与对称性 .....	574
一	力学量平均值随时间的变化 .....	574
二	守恒量 .....	576
三	守恒量与对称性 .....	577
§ 21-6	量子力学的基本假设 .....	580



习题.....	581
<b>第二十二章 有心力场和电磁场中的粒子.....</b>	<b>583</b>
§ 22 - 1 粒子在有心力场中的运动.....	583
一 角动量守恒与力学量完全集.....	583
二 径向方程与能量本征值.....	583
§ 22 - 2 氢原子的能级和能量本征函数.....	585
一 两体问题化为单体问题.....	585
二 氢原子的径向方程和能量本征值.....	586
三 氢原子的能量本征函数.....	589
§ 22 - 3 氢原子和类氢离子的结构与性质.....	591
一 氢原子的能级特点及简并度.....	591
二 氢原子波函数及概率的分布.....	592
三 氢原子的电流分布与磁矩.....	598
四 类氢离子.....	601
§ 22 - 4 粒子在电磁场中的运动.....	601
一 有电磁场情况下的薛定谔方程.....	601
二 A - B 效应.....	603
三 正常塞曼效应.....	605
习题.....	607
<b>第二十三章 自旋和全同粒子.....</b>	<b>609</b>
§ 23 - 1 电子自旋.....	609
一 电子自旋假设.....	609
二 电子自旋态的描述.....	612
三 自旋算符与泡利矩阵.....	613
四 自旋轨道耦合 总角动量.....	615
五 电子自旋对正常塞曼效应的影响以及反常塞曼效应.....	616
六 电子顺磁共振和核磁共振.....	618
§ 23 - 2 全同粒子系和原子组态.....	620
一 全同粒子系的交换对称性.....	620
二 全同粒子系的波函数 泡利不相容原理.....	622
三 两个电子的自旋三重态和单态 正氦和仲氦.....	625
四 元素周期表 原子的电子壳层结构.....	628
习题.....	631
<b>第二十四章 微扰论和量子跃迁.....</b>	<b>633</b>
§ 24 - 1 定态微扰论.....	633

一	非简并定态微扰论 .....	633
二	简并定态微扰论 .....	636
§ 24 - 2	含时微扰论和量子跃迁 .....	638
一	含时微扰论 .....	638
二	量子跃迁和跃迁概率 .....	640
§ 24 - 3	光的吸收和辐射 .....	641
一	光的吸收和受激辐射 .....	641
二	电偶极辐射的选择定则 .....	643
三	自发辐射 .....	644
§ 24 - 4	激光的基本原理 .....	645
一	受激辐射光放大与粒子数反转 .....	645
二	光学共振腔 .....	647
三	激光的纵模 .....	648
四	激光器和激光的应用 .....	650

## 第五部分 热物理学

### 第二十五章 热力学基础 .....

§ 25 - 1	热力学平衡的基本概念 .....	652
一	热物理学概述 .....	652
二	热力学系统的平衡态 .....	653
三	态参量和态函数 .....	654
四	热力学第零定律 温度 .....	655
五	物态方程 .....	658
§ 25 - 2	热力学第一定律 .....	662
一	热力学过程 .....	662
二	功 .....	662
三	热力学第一定律 .....	663
四	焓 .....	665
五	热容 .....	666
六	气体的态函数和热力学过程 .....	667
习题	.....	675

### 第二十六章 统计物理学基础 .....

§ 26 - 1	统计物理学的基本概念 .....	679
一	系统的微观运动状态及其描述 .....	679
二	等概率假设 .....	681

三 三类系统的分布和微观态数 .....	683
§ 26-2 最概然分布 .....	687
一 玻耳兹曼分布 .....	688
二 玻色分布和费米分布 .....	689
三 经典极限条件和能量连续条件 .....	690
习题 .....	695
<b>第二十七章 热力学第二定律和第三定律</b> .....	696
§ 27-1 熵 .....	696
一 微观态数与无序度 .....	696
二 微观态数随能量的变化 .....	696
三 趋向热平衡及 $\beta$ 的物理意义 .....	698
四 熵的概念 .....	700
§ 27-2 热力学第二定律 .....	702
一 可逆过程与不可逆过程 .....	702
二 热力学第二定律的表述 .....	703
三 过程的方向 .....	706
四 熵变的计算 .....	706
五 热机效率和卡诺定理 .....	707
§ 27-3 自由能和吉布斯函数 .....	711
一 热平衡的熵判据 .....	711
二 自由能 .....	712
三 吉布斯函数 .....	713
四 开系和多元系的热力学基本方程 化学势 .....	713
§ 27-4 热力学第三定律 .....	714
一 能斯特定理 .....	714
二 绝对零度不能达到原理 .....	715
习题 .....	716
<b>第二十八章 均匀物质的统计热力学</b> .....	718
§ 28-1 热力学函数 .....	718
一 态函数的全微分和麦克斯韦关系 .....	718
二 基本热力学函数的确定 .....	720
§ 28-2 玻耳兹曼统计 .....	722
一 热力学量的统计表达式 .....	722
二 经典理想气体的热力学函数和速度分布 .....	724
三 能量均分定理 气体的热容 .....	727

四 固体的热容 .....	729
§ 28-3 玻色统计和费米统计 .....	732
一 热力学量的统计表达式 .....	732
二 声子和元激发 .....	734
三 玻色-爱因斯坦凝聚 液氦的超流动性 .....	740
四 金属中的自由电子气体 .....	745
五 能带论 .....	749
六 非晶体、准晶和富勒烯 .....	751
七 元激发和对称破缺 .....	753
习题 .....	756
<b>第二十九章 相变和临界现象</b> .....	<b>758</b>
§ 29-1 单元系的相变及其分类 .....	758
一 单元复相系的平衡条件 .....	758
二 单元复相系的平衡性质 .....	759
三 相变的分类 .....	763
四 液晶及其相变 .....	765
§ 29-2 临界现象 .....	766
一 气液相变的临界现象 .....	766
二 气液相变以外的连续相变现象 .....	768
三 相变理论的发展 .....	771
习题 .....	779
<b>第三十章 非平衡热力学和统计物理学</b> .....	<b>780</b>
§ 30-1 输运现象和玻耳兹曼方程 .....	780
一 气体分子运动的简化模型 .....	780
二 输运现象 .....	783
三 玻耳兹曼方程 .....	788
四 $H$ 定理 .....	790
§ 30-2 耗散结构 .....	791
一 自组织现象 .....	791
二 开系的熵变和非平衡态 .....	795
三 耗散结构的形成和应用 .....	798
<b>附录</b>	
附表 1 基本物理常量 1986 年的推荐值 .....	803
附表 2 保留单位和标准值 .....	803

## 第三部分 光 学

### 第十五章 光的干涉

#### § 15 - 1 光学概论

##### 一 从经典光学到现代光学

光学(optics)是一门发展较早的学科,早期只限于研究与眼睛和视觉有关的自然现象。正是因为眼睛接收了物体所发射、反射或散射的光(light),我们才能看到客观世界中的各种景象。最初,人们从物体成象的研究中形成了**光线(light ray)**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,逐步形成了**几何光学(geometrical optics)**。到17世纪,人们发明了望远镜和显微境,提出了两种关于光的本性的学说:一是牛顿所提出的**微粒说(corpuscular theory)**,它认为光是一股微粒流;另一是惠更斯(C. Huygens, 1629-1695)所提出的**波动说(undulatory theory)**,它认为光是机械振动在“以太”这种特殊介质中的传播。光的微粒说差不多统治了17和18两个世纪。

早在1666年,牛顿就研究了光的**色散**现象,用棱镜将太阳光分解为由红到紫的可见光谱。1800年赫歇尔(J.F.W. Hershel, 1738-1822)发现,在可见光谱的红端以外,还有能够产生热效应的部分,称为**红外线(infrared ray)**。1802年里特(J.W. Ritter, 1776-1810)和沃拉斯顿(W.H. Wollaston, 1766-1828)发现,在可见光谱的紫端以外,还有能够产生化学效应的部分,称为**紫外线(ultraviolet ray)**。尽管红外线和紫外线都不能引起视觉,但可用一定的方法探测。广义而言,光也包括红外线和紫外线。

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,从而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,这时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(wave optics)**。19世纪末到20世纪初,光学已发展成为研究从微波直到X射线的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。

然而,在光的电磁理论取得了巨大成功的同时,也遇到了严重的困难(见

§19-1)。1900年普朗克提出了辐射的量子论，1905年爱因斯坦提出了光量子论，在此基础上人们建立起了量子力学。建立在光的量子性基础上，深入到微观领域研究光与物质相互作用规律的分支学科，称为**量子光学**(quantum optics)。通常人们把波动光学和量子光学统称为**物理光学**(physical optics)。

1960年，梅曼(T.H. Maiman, 1927-)研制成功了第一台红宝石激光器。此后，激光科学和技术得到了异常迅速的发展，从而形成了研究非线性光学、激光光谱学、信息光学、全息术、光纤通信、集成光学和统计光学等方面问题的**现代光学**(modern optics)，对当代生产和科学技术的发展正起着越来越大的作用。

在本书的第三部分“光学”中，主要讨论波动光学，同时也对几何光学、量子光学和现代光学中的某些问题进行了讨论。

## 二 光的电磁理论

### (1) 光速和折射率

如前所述(见§14-3)，麦克斯韦所建立的光的电磁理论认为，光是一定波段的电磁波，电磁波在真空中的传播速度就是光在真空中的传播速度，即

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.997\,924\,58 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (15.1)$$

其中  $\epsilon_0$  是真空电容率， $\mu_0$  是真空磁导率。在介质中，光的传播速度为

$$u = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}, \quad (15.2)$$

其中  $\epsilon_r$  是介质的相对电容率， $\mu_r$  是介质的相对磁导率。通常  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  都是大于1的常量，因此  $u$  是小于  $c$  的。一般用**折射率**(refractive index)  $n$  来表征透明介质的光学性质，它定义为

$$n = \frac{c}{u}. \quad (15.3)$$

利用式(15.1)和式(15.2)，并考虑到在光频波段所有的磁化机制都不起作用，介质的相对磁导率  $\mu_r \approx 1$ ，于是有

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r}, \quad (15.4)$$

这个公式把光学和电磁学中的物理量联系了起来。当光波穿过不同的介质时，其频率  $\nu$  或角频率  $\omega$  保持不变，但光的传播速度  $u$  和波长  $\lambda$  都将随着介质的不同而改变。

应该强调，通常泛指的光波波长  $\lambda$ ，都是指该频率的光波在真空中的波长，它是在折射率为  $n$  的介质中的实际波长的  $n$  倍。

## (2) 光强

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，或者说， $E$  矢量和  $H$  矢量的振动在空间的传播。而且，一般而言，电磁波是横波， $E$  矢量和  $H$  矢量都与传播方向垂直。研究表明，在光波中引起光效应的，即对人的眼睛或照相底片等感光器件起作用的，主要是电场强度  $E$ 。因此，一般情况下我们都把光波看成是电场强度  $E$  的振动在空间的传播，并把  $E$  矢量称为**光矢量**(photo vector)，把  $E$  矢量的振动称为**光振动**。

电磁波的传播总是伴随着电磁能量的传递，这个过程一般用平均能流密度  $\bar{S}$  来定量地描述。在光学中，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**(average luminous power)。无论是人的眼睛还是照相底片，所观测到的都是光强  $I$  而不是光振动  $E$ 。对于平面简谐电磁波，利用式(14.59)和式(14.72)可以得到

$$I = \bar{S} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} E_0^2 = \frac{n}{2c \mu_0 \mu_r} E_0^2 \propto E_0^2,$$

其中  $E_0$  是光振动的振幅，以下常用  $A$  来表示。

在波动光学中，主要讨论的是光波所到之处的相对光强，因此在同一种介质中往往就直接把光强定义为

$$I = E_0^2 = A^2. \quad (15.5)$$

## (3) 光的颜色和光谱

**可见光**(visible light)是指能为人眼感受到的电磁波，其波长  $\lambda$  大约在 390~760 nm 的狭窄范围内，它的频率范围为  $(7.7 \sim 3.9) \times 10^{14}$  Hz。不同频率的可见光会引起人眼有不同颜色的感觉，其大体的划分如表15-1所示。人眼对不同颜色光的视觉灵敏度是不同的，图15-1给出了平均的正常人眼视觉的相对灵敏度曲线(以灵敏度最大时的值为100)。由图可见，人眼对波长约为555 nm 的黄绿光最敏感。实际上，可见光谱两端的界限并不明确，只要辐射足够强，眼睛还可以看见可见光谱界限以外一定范围内的电磁辐射。

只包含单一波长的光，称为**单色光**(monochromatic light)。然而，严格

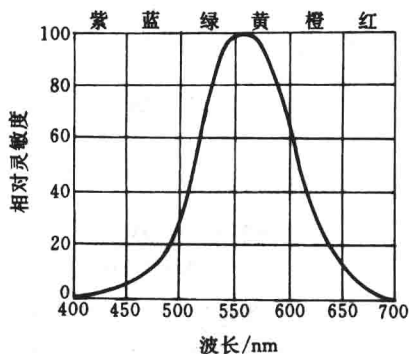


图 15-1 视觉的相对灵敏度

的单色光在实际中是不存在的，一般光源所发出的光都包含有各种不同的波长成分。如果光中只包含有波长范围很窄的成分，则这种光就称为**准单色光**(quasi-monochromatic light)，也就是通常所说的**单色光**。波长范围  $\Delta\lambda$  越窄，其单色性就越好。

利用光谱仪可以把光源所发出的光中波长不同的成分分开。所有彼此分开的波长不同的成分，就组成了**光谱(spectrum)**。光谱中每一波长成分所对应的亮线或暗线，称为**光谱线或谱线(spectral line)**，它们都有一定的宽度，称为**谱线宽度**，简称**线宽(line width)**。每种光源都有自己特定的光谱结构，利用它可以对化学元素进行分析，或对原子和分子的内部结构进行研究。

表 15-1 光波的波长范围和频率范围

名称	波长范围	频率范围 / Hz
远红外	100 $\mu\text{m}$ ~ 10 $\mu\text{m}$	$3 \times 10^{12}$ ~ $3 \times 10^{13}$
中红外	10 $\mu\text{m}$ ~ 2 $\mu\text{m}$	$3 \times 10^{13}$ ~ $1.5 \times 10^{14}$
近红外	2 $\mu\text{m}$ ~ 760 nm	$1.5 \times 10^{14}$ ~ $3.9 \times 10^{14}$
红	760 nm ~ 622 nm	$3.9 \times 10^{14}$ ~ $4.7 \times 10^{14}$
橙	622 nm ~ 597 nm	$4.7 \times 10^{14}$ ~ $5.0 \times 10^{14}$
黄	597 nm ~ 577 nm	$5.0 \times 10^{14}$ ~ $5.5 \times 10^{14}$
绿	577 nm ~ 492 nm	$5.5 \times 10^{14}$ ~ $6.3 \times 10^{14}$
青	492 nm ~ 450 nm	$6.3 \times 10^{14}$ ~ $6.7 \times 10^{14}$
蓝	450 nm ~ 435 nm	$6.7 \times 10^{14}$ ~ $6.9 \times 10^{14}$
紫	435 nm ~ 390 nm	$6.9 \times 10^{14}$ ~ $7.7 \times 10^{14}$
紫外	390 nm ~ 5 nm	$7.7 \times 10^{14}$ ~ $6.0 \times 10^{16}$

### 三 光波的复振幅描述

任一理想的单色光场可用下述的波动表达式描述：

$$E(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}) \cos[\omega t - \varphi(\mathbf{r})], \quad (15.6)$$

其复数表达式可写为

$$\begin{aligned} \tilde{E}(\mathbf{r}, t) &= A(\mathbf{r}) e^{-i[\omega t - \varphi(\mathbf{r})]} \\ &= A(\mathbf{r}) \cos[\omega t - \varphi(\mathbf{r})] - i A(\mathbf{r}) \sin[\omega t - \varphi(\mathbf{r})], \end{aligned} \quad (15.7)$$

复数  $\tilde{E}(\mathbf{r}, t)$  的实部就是单色光场的波动表达式。在本书的光学部分中我们约定，上式中的指数因子写为  $-i[\omega t - \varphi(\mathbf{r})]$ 。这样，我们在光学中所关心的由空间位置决定的相因子  $\varphi(\mathbf{r})$  的前面不再带有负号。



我们还可以把式(15.7)改写为

$$\tilde{E}(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r})e^{i\varphi(\mathbf{r})} e^{-i\omega t} = \tilde{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}, \quad (15.8)$$

其中不含时间的复数因子

$$\tilde{E}(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r})e^{i\varphi(\mathbf{r})} \quad (15.9)$$

称为**复振幅(complex amplitude)**。复振幅 $\tilde{E}(\mathbf{r})$ 的模量 $A(\mathbf{r})$ 代表振幅在空间的分布, 辐角 $\varphi(\mathbf{r})$ 代表相位在空间的分布。显然, 光场的复振幅包含了我们感兴趣的全部信息, 一旦复振幅给定了, 该频率的单色光的光场也就完全确定了。例如, 对于单色平面波, 有:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, t) &= A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \varphi_0), \\ \tilde{E}(\mathbf{r}) &= A e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \varphi_0)}; \end{aligned} \quad (15.10)$$

对于单色发散的球面波, 有:

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, t) &= \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0), \\ \tilde{E}(\mathbf{r}) &= \frac{A_0}{r} e^{i(kr - \varphi_0)}. \end{aligned} \quad (15.11)$$

由于振幅 $A(\mathbf{r})$ 是复振幅 $\tilde{E}(\mathbf{r})$ 的模, 若用 $\tilde{E}^*(\mathbf{r})$ 表示 $\tilde{E}(\mathbf{r})$ 的复数共轭, 则利用式(15.5)可得光强的空间分布为

$$I(\mathbf{r}) = \tilde{E}^*(\mathbf{r})\tilde{E}(\mathbf{r}), \quad (15.12)$$

## § 15-2 光波的相干叠加

### 一 光波的叠加

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。在通常的情况下, 光波和其它波动一样, 在空间传播时都遵从波的独立传播原理。因此, 当两列或多列光波同时存在时, 在它们的交叠区域内每点的光振动, 是各列光波单独在该点产生的光振动的合成, 即

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) + \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) + \dots, \quad (15.13)$$

这就是**光的叠加原理**。光的独立传播原理和叠加原理的成立是有条件的, 通常把违反它们的效应称为非线性效应。如果光强很强, 例如电场强度高达 $10^{12} \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 的激光, 或者光强并不很强, 但通过了变色玻璃这样的介质时, 则都会出现非线性效应。一般情况下, 我们假定介质是线性的, 光波服从叠加原理。