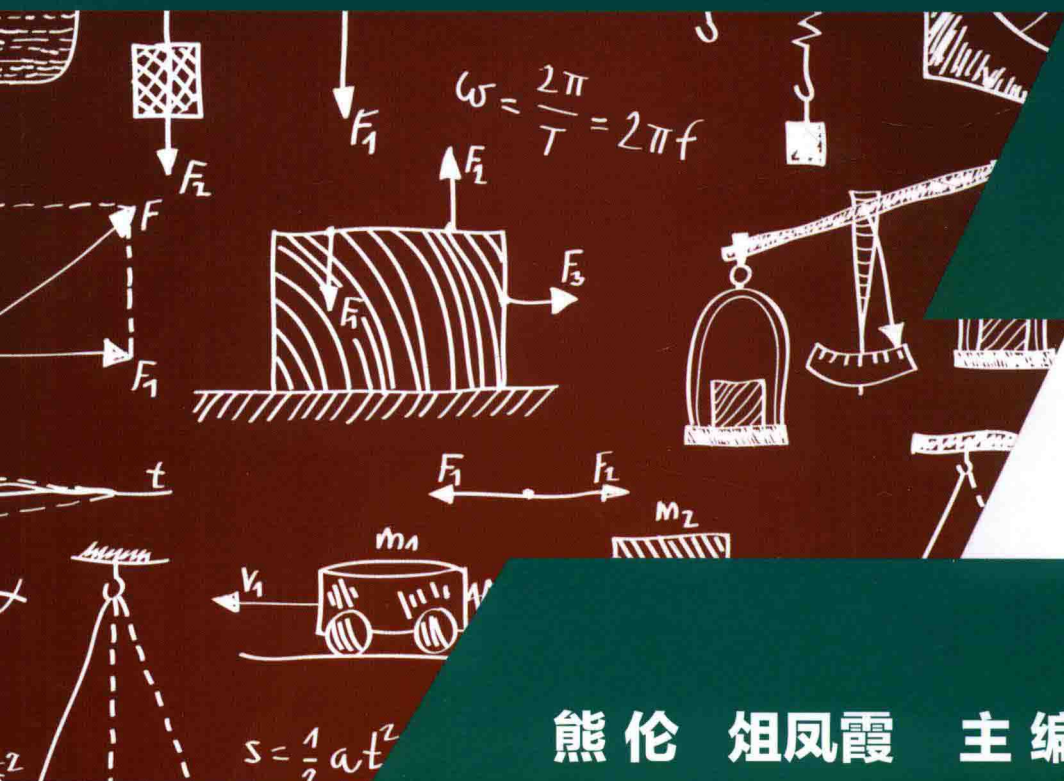


大学物理信息化教学丛书

大学物理学 (下册)

(第三版)



熊伦 烜凤霞 主编



科学出版社

大学物理信息化教学丛书

大学物理学(下册)

(第三版)

熊 伦 俎凤霞 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书是在总结了第一、二版的编写经验,听取了使用过本教材师生的意见和建议,并考虑当前工科学校的教学实际的基础上修订而成。全书简明扼要,注重加强基础理论的同时,突出训练和培养学生科学思维创新能力,拓展学生的学术襟怀和眼光。

全书分上、下两册,内容分五篇。第一篇力学;第二篇电磁学;第三篇波动光学;第四篇热学;第五篇相对论与量子力学基础。

本书可作为高等学校工科、理科、师范等院校各非物理学专业,以及成人教育相关专业的大学物理课程的教材,也可供自学者学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.下册/熊伦,俎凤霞主编. —3版. —北京:科学出版社,2017.11
(大学物理信息化教学丛书)

ISBN 978-7-03-055279-2

I. ①大… II. ①熊… ②俎… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 274175 号

责任编辑:谭耀文 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:莫彦峰

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 8 月第 二 版 印张:14 3/4

2017 年 11 月第 三 版 字数:348 000

2017 年 11 月第一次印刷

定价:39.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

由于时代的发展以及教育革新的大环境,大学物理教学正面临着一场深刻的变革。高等学校即将迎来第一批在高中没有选修物理的学生。如何改变教学模式与教学方法,适应新形式下的教育教学要求,成为必须面对的问题。

自本书第一版出版以来,已经使用多年,得到了广大读者与同仁的好评。同时,也收到了许多教师与读者在使用过程中提出的宝贵意见与建议,在此向他们表示诚挚的敬意与真心的感谢。

本书上册由殷勇、吴涛主编,下册由熊伦、俎凤霞主编,熊伦、殷勇统稿、定稿。全书各章的具体执笔人如下:胡亚联、刘阳(第1章),刘阳、刘培姣(第2章),岑敏锐(第3章),李端勇(第4章、第5章),殷勇(第6章),黄河、吴涛(第7章),俎凤霞(第8章),熊伦(第9章),汤朝红(第10章),谭荣(第11章),吴锋、张昱(第12章),黄淑芳(第13章),余仕成(第14章),何菊明(第15章)。

在本书的编写过程中,参考和借鉴了许多国内外出版的优秀的物理教材。本书作者对这些教材的作者表示诚挚的谢意。本书的出版过程,得到了各教学单位和教学管理部门的支持和关心,在此一并表示衷心的感谢。

尽管本书的作者尽力想将书本内容以最简单、最符合教学规律的方式编撰完善,但由于各方面的原因,疏漏、不足与不当之处仍然难免,希望同仁及本书的读者们能继续提出宝贵的修改意见,以使本书进一步完善。

编者

2017年5月

第二版前言

本书第二版与教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会最新《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》相适应,是在第一版基础上,结合五年教材使用细节和情况,总结多年教学、教材改革和实践,吸取当前国内外优秀教材的思想和精华,精心修编而成。

同第一版相比,第二版的框架和结构发生了较大的变化,包括篇、章、节等均作了优化,更加符合教学基本要求和课程的教学规律,内容更加现代化,体系更加逻辑、自然、完整;对部分内容作了增删;对疏漏和不足进行了订正。

本书上册由殷勇、余仕成主编,下册由熊伦、何菊明主编,熊伦、殷勇统稿、定稿。全书各章的具体执笔人如下:胡亚联(第1章、第14章),刘培姣、胡亚联(第2章),岑敏锐、胡亚联(第3章),李端勇(第4章、第5章),余仕成、殷勇(第6章),黄河、吴涛(第7章),俎凤霞、徐志立(第8章),熊伦(第9章),汤朝红(第10章),谭荣(第11章),吴锋、张昱(第12章),吴锋、黄淑芳(第13章),何菊明(第15章)。

本书在编写过程中,参考和借鉴了近年来国内外出版的物理教材,对于这些教材的作者,作者特别致以诚挚的谢意。

本书的出版过程,得到了教学单位和教学管理部门的关心和支持,我们在此表示衷心的感谢。

由于编写时间较紧,编者水平所限,书中疏漏和不足之处仍在所难免,我们敬请同仁和师生继续提出宝贵的意见,以便进一步完善。

编 者

2015年5月

第一版前言

物理学以研究物质世界的基本规律和本质属性为己任。物理学鞭辟入里的分析方法、高屋建瓴的思维模式、辩证唯物的认识论和世界观以及所展现出来的和谐、对称、统一的科学美,使得它自面世以来,就一直是自然科学的带头学科、技术科学的理论基础,是一切工程技术的坚实支柱,是创新思想的源泉。物理学曾经是,现在是,将来也是全球技术和经济发展的主要驱动力。它代表着一整套获得知识、组织知识和运用知识的有效方法和步骤。由于物理学的普遍性、基本性以及与其他学科的相关性,在培养学生科学素质、科学思维方法及科学研究能力,尤其是在培养具有综合能力的创新人才方面起着其他学科不可替代的作用,这也就决定了大学物理学这一课程在高等教育中的地位。

本教材力求与教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会关于《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》相适应。它是编者在总结多年教材改革和教学实践的基础上,吸取当前国内出版的面向 21 世纪物理教材的先进思想和优秀教学改革成果,充分考虑一般本科院校理工科学生的起点和基础,集多年教学经验编写的。本书以相对稳定的传统教学内容为主,在保持大学物理课程持续发展的同时,紧紧追踪物理科学技术的发展;以现代的视野重新演绎和审视传统物理学的内容,力图在基础的层次上寻找一些前沿内容的根,逻辑地、紧凑地把一些相关的科学发现或科学理论的建立集成到一起,使课程现代化更突出,让学生感受到科学的不断发展和进步,应该如何批判继承;内容由浅入深、广泛严谨,概念清晰准确,使科学思维与创新能力的培养更明显,让学生感受到融会贯通的乐趣;教学内容和体系富有弹性,体系结构科学,选择灵活多样,使分层次组织教学更方便,在深度和广度上更好地适应新一代的大学生起点和基础。本书也力求体现当代杰出物理学家和教育家、诺贝尔物理奖得主理查德·费曼所说的,“科学是一种方法,它教导人们:一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的),如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物,做出判断,如何区别真伪和表面现象”,使学生对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像、其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解,使大学物理学成为培养学生科学素质的最有效的基础课。

全书上册由胡亚联、吴锋主编,下册由李端勇、余仕成主编,并负责制定本教材的编写提纲,提出要求。其中第一篇力学,第四篇中的第 14 章、第 15 章、第 16 章和第五篇中的第 17 章由胡亚联进行修改和统稿;第二篇热学、第四篇中的第 12 章、第 13 章和第五篇中的第 18 章由李端勇进行修改和统稿;第三篇电磁学,由余仕成进行修改和统稿。全书各篇章的具体执笔人员如下:胡亚联(第 1 章,第 17 章);刘培姣(第 2 章);岑敏锐、黄祝明(第 3 章);吴锋、张昱(第 4 章);吴锋、黄淑芳(第 5 章);余仕成(第 6 章);殷勇(第 7 章);黄河(第 8 章);吴涛(第 9 章);徐志立(第 10 章);俎凤霞(第 11 章);李端勇(第 12 章,第

13 章);熊伦(第 14 章);汤朝红(第 15 章);谭荣(第 16 章);何菊明(第 18 章)。

本书在编写过程中,参考和借鉴了近年来国内外出版的物理教材,对于这些教材的作者,本书作者特别致以诚挚的谢意。

本书在出版过程中,得到了教学部门和教学管理部门的关心和支持,我们在此表示衷心的感谢。

由于编写时间较紧,编者水平所限,书中疏漏和不足之处难免,敬请读者提出宝贵的意见。

编 者

2010 年 5 月

目 录

第三篇 波动光学

第 9 章 光的干涉	3
9.1 光的电磁理论 光的相干性	3
9.2 分波阵面法干涉 空间相干性	11
9.3 分振幅法干涉 薄膜干涉	17
9.4 迈克耳孙干涉仪 时间相干性	28
9.5 多光束的干涉	31
思考题	32
习题 9	33
阅读材料	35
第 10 章 光的衍射	37
10.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	37
10.2 单缝夫琅禾费衍射	39
10.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	45
10.4 光栅衍射 光栅光谱	48
10.5 X 射线衍射	54
思考题	56
习题 10	57
阅读材料	58
第 11 章 光的偏振	61
11.1 光的横波性 自然光和偏振光	61
11.2 起偏与检偏 马吕斯定律	64
11.3 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律	68
11.4 双折射 寻常光和非常光	70
11.5 椭圆偏振光和圆偏振光 偏振光的干涉	77
思考题	80
习题 11	81
阅读材料	82

第四篇 热 学

第 12 章 气体动理论	87
12.1 热力学系统与状态	87
12.2 理想气体压强与温度	91
12.3 麦克斯韦气体分子速率分布律	97
* 12.4 玻尔兹曼分布	102
12.5 能量均分定理 理想气体的热力学能.....	104
12.6 气体分子平均碰撞频率和平均自由程.....	107
思考题.....	109
习题 12	110
阅读材料.....	110
第 13 章 热力学基础	112
13.1 热力学第一定律.....	112
13.2 理想气体的等值过程、绝热过程* 多方过程	115
13.3 循环过程 卡诺循环.....	122
13.4 热力学第二定律.....	126
思考题.....	135
习题 13	136
阅读材料.....	137

第五篇 相对论与量子力学基础

第 14 章 狭义相对论基础	141
14.1 伽利略相对性原理与经典时空观.....	141
14.2 伽利略变换与牛顿力学的困难.....	143
14.3 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换式.....	150
14.4 狭义相对论的时空观.....	155
14.5 狭义相对论动力学基础.....	164
思考题.....	171
习题 14	171
阅读材料.....	172
第 15 章 量子力学基础	174
15.1 黑体辐射 普朗克量子假设.....	174
15.2 光电效应 爱因斯坦光子理论.....	179
15.3 康普顿效应.....	182
15.4 氢原子光谱 玻尔理论.....	185

15.5 德布罗意假设 电子衍射实验.....	189
15.6 海森伯不确定关系.....	192
15.7 波函数及其统计解释.....	195
15.8 薛定谔方程及其应用.....	199
* 15.9 氢原子的量子理论简介	205
* 15.10 激光原理及其应用	208
思考题.....	213
习题 15	213
阅读材料.....	214
参考答案.....	218
主要参考文献.....	221

第三篇

波动光学

人们研究光已有三千多年的历史,其中 17 世纪和 18 世纪是光学研究的一个重要发展时期,科学家们不仅从实验上对光进行研究,而且对光学知识进行系统化和理论化整理。在牛顿提出“微粒说”被许多科学家接受时,惠更斯(C. Huygens)提出了光的“波动说”,即认为光是一种弹性机械波,也能说明一些光学现象。但由于当时未得到足够的实验数据的支持和牛顿的权威性,并没有被物理学界所广泛接受。直到 19 世纪初,托马斯·杨(Thomas-Young)、菲涅耳(A. J. Fresnel)等人利用光的波动学说和干涉原理,通过设计的实验装置得到了干涉和衍射图样;马吕斯(E. L. Malus)等人研究光的偏振现象,确认了光具有横波性;1850 年,傅科(J. B. L. Foucault)测出了光在水中的传播速度比空气中小之后,光的波动说才被人们广泛接受。再就是 19 世纪 60 年代麦克斯韦创立的电磁理论预言了电磁波的存在,并指出光就是一种电磁波;赫兹(H. R. Hertz)在进行一系列实验后,于 1887 年发现了电磁波并用实验验证了电磁波具有和光波类似的反射、折射、偏振等性质,而且用电磁理论计算出了电磁波在真空中的传播速度与当时已测得的光在真空中的传播速度完全相等。从此,光是电磁波的观点取代了光是机械弹性波的观点。而到 19 世纪末和 20 世纪初,通过对黑体辐射、光电效应和康普顿效应的研究,人们对光的本性的认识又向前推进了一步,即光不但具有波动的特性,还明显地表现出粒子性,使人们进一步认识到,光是一种具有波粒二象性的物质。

研究光现象、光的本性和光与物质的相互作用等规律的学科称为光学,光学通常分为几何光学、波动光学和量子光学三部分。几何光学是以光沿着直线传播为基础,研究光的传播及其成像规律,以及光学仪器的理论;波动光学研究光的电磁性质和传播规律,特别是光的干涉、衍射和偏振的规律;量子光学则以近代量子理论为基础,研究光与物质相互作用的规律。20 世纪 50 年代,随着激光和光信息技术的出现,光学又取得了新的进展,并且派生了许多分支,如光纤技术、全息技术、非线性光学等近代光学。

干涉和衍射是一切波动所特有的现象,也是用以判断某种物质运动是否具有波动性的证据。本篇将介绍波动光学,主要讨论光的干涉、衍射和偏振等波动特征及其应用。

第9章 光的干涉

本章在介绍光的相干性的基础上着重讨论光的分波面干涉和分振幅干涉,并对光的空间相干性和时间相干性进行简单分析。

9.1 光的电磁理论 光的相干性

9.1.1 光的电磁理论

光是一种电磁波。通常意义上的光是指可见光(visible light),即能引起人的视觉的电磁波。它的频率在 $3.9 \times 10^{14} \sim 7.7 \times 10^{14}$ Hz 之间,相应地在真空中的波长在 760 nm ~ 390 nm 之间。不同频率的可见光给人以不同的颜色感觉,频率从大到小给出从紫到红的各种颜色。在当今,泛指的光的频率为 $10^{12} \sim 10^{16}$ Hz,其范围从微波、远红外光、近红外光、可见光、紫外光、远紫外光直至 X 射线和 γ 射线(除特别说明外,所说的光一般指可见光)。

1. 光速和折射率

根据麦克斯韦的电磁理论,光在真空中的传播速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (9.1.1)$$

这是一个常数,式中 ϵ_0 为真空中的介电常数; μ_0 为真空中的磁导率。

光在介质中的传播速度为

$$u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (9.1.2)$$

式中, ϵ_r 为介质的相对介电常数; μ_r 为介质的相对磁导率。

我们定义真空中的光速和与介质中的光速之比为介质的绝对折射率,于是依式(9.1.1)和(9.1.2),有

$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (9.1.3)$$

由于光波穿过不同介质时,频率是不变的,所以对于同一频率 ν 的单色光由一种介质进入到另一种介质时,光速和波长都会发生改变。频率为 ν 的单色光在真空和介质中的波长分别为 λ 和 λ_n ,则有

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (9.1.4)$$

$$\lambda_n = \frac{u}{\nu} = \frac{\lambda}{n} \quad (9.1.5)$$

注意:复色光在介质中传播时,介质对不同波长的成分表现出不同的折射率,这种现象称为光的色散。

2. 光矢量和光强

电磁波是横波,其电场强度 $\mathbf{E}$ 、磁场强度 $\mathbf{H}$ 都和传播方向(波速 $\mathbf{u}$ 或 $\mathbf{c}$) 垂直,如图 9.1.1 所示。由于光波中参与物质相互作用(感光作用、生理作用)的是电场强度 $\mathbf{E}$ 矢量,所以我们说光波中的振动矢量通常指的是 $\mathbf{E}$ 矢量,称为**光矢量**(light vector)。

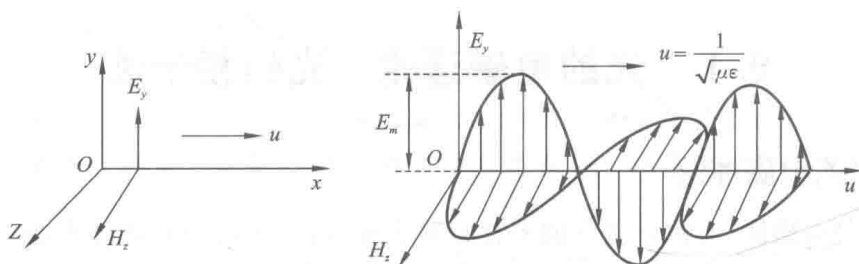


图 9.1.1 光的横波性

对于光波来说,空间各点光矢量的大小、方向随时间和空间作周期性变化。沿 x 正向传播的平面光波的方程为

$$E_y = E_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right], \quad H_z = H_m \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{u} \right) + \varphi_0 \right]$$

波动的传播总是伴随着能量的传递,这个过程一般用平均能流密度(在一个振动周期内的平均值)来描述。按电磁波的理论,光的强度 I 是电磁波的平均能流密度 $\bar{S}$ (对时间平均),它正比于光矢量振幅的平方,有

$$I = \bar{S} = \overline{EH} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \overline{E^2} = \frac{1}{2} E_m H_m = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \overline{E_m^2} \propto E_m^2$$

在讨论光的干涉和衍射问题中只注重光的相对强弱,为简化计算,常略去系数 $\sqrt{\epsilon/\mu}$,直接用 $\overline{E^2}$ (E_m^2) 代表光的强度。

9.1.2 普通光源发光的微观机制

1. 光源和光谱

一个用作发射光的物体称为**光源**。如果光源发出的光的频率(颜色)是单一的,则叫**单色光源**。通常普通光源发出的光的频率都不是单一的,如果让光源发出的光束通过三棱镜或光谱仪,就能将光束中不同频率的光以不同的角度射到屏上或拍摄在底片上,这样得到的光强按频率(或波长)的分布叫**光的频谱**,简称**光谱**。

2. 原子的发光模型与普通光源发光的微观机制

从微观上看,普通光源的发光都属于分子和原子发光,其发光机制是处于激发态的原

子(或分子)的自发辐射。按照近代物理理论,一个孤立的原子,它的能量只允许处在一系列的分立的能级 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ 上。当原子处在某个能级上时,其内部电子并不发射电磁波。通常原子处于最低的能级 E_1 (基态,是稳定态)。如果原子受到外界的激发,即光源中的原子吸收能量而跃迁到能量较高的激发态,而处于激发态的原子极不稳定(电子在激发态存在的时间平均只有 $10^{-11} \sim 10^{-8} \text{ s}$),它会自发地回到较低的激发态或基态,并将一份大小为 ΔE (两能级之差) 的能量以光的形式(光波)向外发射出来,如图 9.1.2 所示。原子发光完全是随机进行的,在激发态存在的 10^{-8} s 中何时发光难以预知,但平均来说在约 10^{-8} s 中完成。可见原子发射的光波是一个在时间上很短、在空间中也是有限长的光波,在波动光学中把原子发射的这种有限长的光波称为原子光波列,光波的频率根据玻尔提出的频率公式计算

$$\nu = \frac{\Delta E}{h}$$

式中, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 称为普朗克常量。

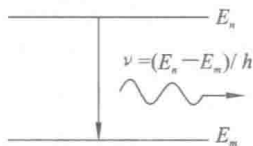


图 9.1.2 自发辐射

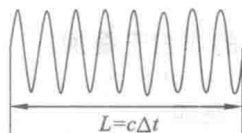


图 9.1.3 光波波列

综上所述,普通光源发光过程就具有以下特点:

(1) 间歇性。原子发光是间歇的,每次发光的持续时间极短,发出有特定的振动方向、频率和相位的有限长的一个短短的波列。但由于可见光的频率很高,在发光的持续时间内仍完成了很多次振动,因此一个理想的点光源发出的波列的长度为 $L = c\Delta t$ (如图 9.1.3 所示, Δt 为发光时间, c 为光速),若认为 $\Delta t = 10^{-8} \text{ s}$, $L = c\Delta t \approx 3 \text{ m}$ 。由于分子、原子的热运动影响,实际光源发光的波列长度远小于 3 m 。例如低温下,元素 K^{86} 气体放电放出的橙红色光,其波列长度约为 77 cm 。其他普通光源发光的波列长度还要短得多。

(2) 随机性。一个光源中有很多很多的原子,每个原子各自独立地、间歇地、随机地发出一个一个波列,它们彼此间没有任何的关联。这样不同原子同一时刻或同一原子不同时刻所发光波列的频率一般不同(单色光源除外)、振动方向一般也不同、相位上更是无固定关系,偏振态和传播方向均彼此无关。因此两个独立的普通光源或者同一光源不同部位发出的光波都不满足波的相干条件(coherent condition),也就不是相干光源。

9.1.3 光波的叠加及相干性

1. 光波的叠加原理

实验证明,对于真空中传播的光或在介质中传播的不太强的光,当几列光波相遇时,其合成光波的光矢量 $\boldsymbol{E}$ 等于各分光波光矢量 $\boldsymbol{E}_1, \boldsymbol{E}_2, \dots$ 的矢量和,即

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{E}_1 + \boldsymbol{E}_2 + \dots \quad (9.1.6)$$

这一规律称为光波叠加原理。

但应指出,对于在介质中传播的强光(如激光,同步辐射)或不太强的光通过某些特殊介质(如变色玻璃等),一般并不满足上述叠加原理。不过,在本章所涉及的范围内,光波叠加原理仍然是一个基本原理。

下面以光矢量为 $\mathbf{E}_1$ 和 $\mathbf{E}_2$ 的两列光波的叠加为例来计算合成光波的强度,即求出合光强与分光强的关系。显然,合光矢量为 $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$ 。按电磁波强度公式,光强为 $I = \bar{S} = \overline{\mathbf{E}^2}$ 。由于

$$\overline{\mathbf{E}^2} = \overline{\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}} = \overline{(\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2) \cdot (\mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2)} = \overline{\mathbf{E}_1^2} + \overline{\mathbf{E}_2^2} + 2\overline{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2}$$

所以得出

$$I = I_1 + I_2 + I_{12} \quad (9.1.7)$$

其中, $I_{12} = 2\overline{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2}$ 称为干涉项(interference term)。

由上可见,在光波叠加原理中遵从相加规则的是光矢量而非光强,合光强一般并不等于分光强之和。然而,两个独立光源或从同一光源的不同部分发出的光会合时,其合光强总等于分光强之和,即干涉项 $I_{12} = 0$,有

$$I = I_1 + I_2 \quad (9.1.8)$$

这种情形称为光的非相干叠加。

2. 光的相干叠加

按照波的叠加原理,如果两列振动方向相同,振动频率相同,相位差恒定的简谐波叠加时会产生干涉现象。实验证明光波也有类似情形,当两列振动方向相同、频率相同、相位差恒定的简谐光波重叠时也要发生光的干涉现象。于是在两相干光源发出的光波在重叠区内,某些空间点上合光强大于分光强之和($I_{12} > 0$),在另一些空间点上合光强小于分光强之和($I_{12} < 0$)。因而合光强在空间形成明暗相间的稳定的周期性分布,并在放入的光屏上呈现出干涉条纹。光波的这种叠加称为光的相干叠加。

振动方向相同(或有平行的振动分量)、频率相同、相位差恒定是产生干涉的三个必要条件,称为相干条件,而满足相干条件的两束光称为相干光,能产生相干光的光源叫相干光源。下面将说明相干光的三个相干条件是缺一不可的。

首先,若两光波光矢量 $\mathbf{E}_1$ 与 $\mathbf{E}_2$ 完全垂直,则 $I_{12} = 2\overline{\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2} = 0$,即两光波为非相干叠加,不发生干涉;一般当 $\mathbf{E}_1$ 与 $\mathbf{E}_2$ 成某角度时,可将它们作正交分解,显然只有平行分量间才可能发生干涉; $\mathbf{E}_1$ 与 $\mathbf{E}_2$ 平行,干涉效果更好。

其次,若设两光矢量平行(即光振动的方向相同),但有不同的频率,相位差也不恒定,这时可将两简谐光波用标量形式的波动式表示为

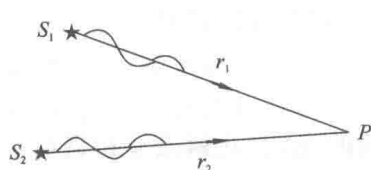


图 9.1.4 光波的叠加

$$E_1 = E_{1m} \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda_1} r_1\right)$$

$$E_2 = E_{2m} \cos\left(\omega_2 t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda_2} r_2\right)$$

式中, $\omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, \lambda_1, \lambda_2$ 为两光波的角频率、初相位和波长, r_1, r_2 则代表观测点距两光源的距离(图 9.1.4)。

由于两简谐光波的频率不同,所以其合成光波不可能

是一个简谐波。但由矢量加法可得出合光矢量的平方

$$E^2 = E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m}\cos\Delta\varphi$$

对上式各项取时间平均值,即得到合光强

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \overline{\cos\Delta\varphi} \quad (9.1.9)$$

而干涉项

$$I_{12} = 2\sqrt{I_1 I_2} \overline{\cos\Delta\varphi} = 2\sqrt{I_1 I_2} \left[\frac{1}{\tau} \int_0^\tau \cos\Delta\varphi dt \right] \quad (9.1.10)$$

其中

$$\Delta\varphi = (\omega_1 - \omega_2)t + (\varphi_1 - \varphi_2) - \left(\frac{2\pi}{\lambda_1} r_1 - \frac{2\pi}{\lambda_2} r_2 \right) \quad (9.1.11)$$

我们知道测量光的各种探测器的响应时间或分辨时间(例如人眼约0.05 s,现代快速光电记录器约 10^{-9} s)远大于光矢量的振动周期(10^{-15} s),所以利用探测器无法测定 E 的瞬时值,仅能对 E 的大小作平均响应,也就是说探测器测量值实际与光的强度相联系。由此可知上式各项平均值的计算时间自然是由探测器的响应时间来确定。

从式(9.1.10)和式(9.1.11),我们不难看出,当 $\omega_1 \neq \omega_2$ 时,在观测时间内 $(\omega_1 - \omega_2)t$ 可取各种相位值,从而使 $\overline{\cos\Delta\varphi} = 0$; 又若 φ_1 和 φ_2 各自独立,且随机地取值,也将使 $\overline{\cos\Delta\varphi} = 0$ 。总之都导致 $I_{12} = 0$,使两光波不发生干涉。由此可见相干光必须同时满足三个必要条件。

最后,我们可以列出两相干光在空间各点上的合光强的计算公式。设两相干光在同一介质中(其折射率为 n)传播,有

$$E_1 = E_{1m} \cos\left(\omega t + \varphi_1 - \frac{2\pi}{\lambda_n} r_1\right), \quad E_2 = E_{2m} \cos\left(\omega t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{\lambda_n} r_2\right)$$

式中, λ_n 是两相干光在折射率为 n 的介质中的波长。注意合成光波应当也是以角频率 ω 振动的简谐光波,可设合振幅为 E_m ,则

$$E_m^2 = E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m}\cos\Delta\varphi$$

而

$$\Delta\varphi = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{2\pi}{\lambda_n}(r_1 - r_2) \quad (9.1.12)$$

所以合光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\Delta\varphi \quad (9.1.13)$$

这里,因相位差 $\Delta\varphi$ 保持恒定,所以无须计算 $\cos\Delta\varphi$ 对时间的平均值。由式(9.1.13)很容易计算出干涉场中各点的合光强。

3. 相干光的获得

鉴于普通光源发光过程的特征,利用两个独立的普通光源是不可能观察到稳定的干涉现象,在激光尚未出现之前,为了获得相干光,通常要采用极小尺寸的光源(在光源前放上带有针孔或狭缝的屏作光栏),利用某种方法将一个光束分割为两束或多束,然后再让它们通过不同的光路会合而产生干涉。这种一分为二获得相干光的方法主要有两类:一类