高等学校教材

University Physics

大学物理学

（第二版）

下册

主编　郭进　刘奕新

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

高等学校教材

University Physics

大学物理学

（第二版）

下册

主编　郭进　刘奕新

编者　黎光旭　何开岩　杨庆怡

滕维中　冯禄燕　张文英

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是在第一版的基础上，参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)修订而成的。全书分上下两册，共14章，主要包括：质点运动学与运动定律、刚体的转动、振动与波、流体力学、相对论、电磁学、波动光学、气体动理论、热力学基础、量子物理及原子核与粒子等。本书通过通俗易懂的具体问题化解物理概念中的难点，力求把物理概念及原理阐述准确、简洁，重在训练和培养学生的科学思维方法以及分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等学校理科非物理学类专业和工科各专业大学物理课程的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学．下册 / 郭进，刘奕新主编．——2版．——北京：高等教育出版社，2019.2

ISBN 978-7-04-051140-6

Ⅰ．①大… Ⅱ．①郭… ②刘… 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(2019)第008576号

DAXUE WULIXUE

策划编辑	张琦玮	责任编辑	张琦玮	封面设计	王　洋	版式设计	杜微言
插图绘制	于　博	责任校对	马鑫蕊	责任印制	毛斯璐		

出版发行	高等教育出版社	网　址	http://www.hep.edu.cn
社　址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印　刷	高教社(天津)印务有限公司		http://www.hepmall.com
开　本	787 mm×1092 mm　1/16		http://www.hepmall.cn
印　张	16.25	版　次	2014年6月第1版
字　数	390千字		2019年2月第2版
购书热线	010-58581118	印　次	2019年2月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定　价	33.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有　侵权必究

物料号　51140-00

大学物理学

（第二版）

主编　郭　进

刘奕新

1 计算机访问http://abook.hep.com.cn/1244124，或手机扫描二维码、下载并安装Abook应用。

2 注册并登录，进入“我的课程”。

3 输入封底数字课程账号（20位密码，刮开涂层可见），或通过Abook应用扫描封底数字课程账号二维码，完成课程绑定。

4 单击“进入课程”按钮，开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制，部分内容无法在手机端显示，请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题，请发邮件至abook@hep.com.cn。



http://abook.hep.com.cn/1244124

目录

第 10 章　波动光学 …… 1

10.1　光源及光的相干性 …… 2

10.1.1　光源及光源的分类 …… 2

10.1.2　可见光的光谱　单色光与准单色光 …… 3

10.1.3　光波的叠加　非相干叠加与相干叠加 …… 4

10.1.4　光程及光程差 …… 5

10.1.5　透镜对光程的影响 …… 7

10.1.6　干涉与衍射的条纹及级次 …… 7

10.2　分波面法干涉 …… 8

10.2.1　获得相干光的方法　干涉的分类 …… 8

10.2.2　杨氏双缝干涉实验 …… 9

10.2.3　菲涅耳双面镜实验 …… 12

10.2.4　劳埃德镜实验　半波损失 …… 12

*10.2.5　光的空间相干性 …… 13

10.3　分振幅法干涉 …… 13

10.3.1　平行平面薄膜干涉 …… 14

10.3.2　劈尖干涉　牛顿环 …… 16

*10.3.3　干涉现象在光学器件中的应用——增透膜与增反膜 …… 19

10.4　光学干涉仪器　时间相干性 …… 20

10.4.1　迈克耳孙干涉仪 …… 20

*10.4.2　马赫-曾德尔干涉仪 …… 22

*10.4.3　法布里-珀罗干涉仪 …… 22

*10.4.4　时间的相干性 …… 22

10.5　光的衍射现象　惠更斯-菲涅耳原理 …… 23

10.5.1　光的衍射现象　菲涅耳衍射及夫琅禾费衍射 …… 23

10.5.2　惠更斯-菲涅耳原理 …… 24

10.6　单缝夫琅禾费衍射 …… 25

10.6.1　衍射条纹的分析——半波带法 …… 25

10.6.2　衍射条纹的分布特征 …… 27

10.7　圆孔夫琅禾费衍射　光学仪器的分辨率 …… 29

10.7.1　圆孔夫琅禾费衍射 …… 29

10.7.2　光学仪器的分辨率 …… 30

10.8　衍射光栅 …… 31

10.8.1　光栅及光栅分类 …… 31

10.8.2　光栅衍射规律 …… 32

10.8.3　光栅光谱 …… 35

*10.8.4　光栅衍射在光学仪器中的应用——光谱仪 …… 36

10.9　X 射线的衍射 …… 37

10.9.1　X 射线衍射的规律 …… 37

*10.9.2　X 射线的应用 …… 39

10.10　光的偏振性 …… 40

10.10.1　自然光与偏振光 …… 40

10.10.2　偏振片　光的起偏与检偏 …… 42

10.10.3　偏振片对光强的影响　马吕斯定律 …… 43

10.11　反射光和折射光的偏振 …… 45

10.11.1　反射光和折射光的偏振 …… 45

10.11.2　布儒斯特定律 …… 46

10.12　光的双折射 …… 47

需要全本请访问 www.ertongbook.com

10.12.1 光的双折射现象 寻常光和非常光 …… 47
10.12.2 光轴与主平面和主截面 …… 48
*10.13 旋光现象 …… 49
本章小结 …… 51
习题 10 …… 55
选读材料 光栅的汇合光谱与双光栅色散-汇合光谱成像效应 …… 57
第 11 章 气体动理论 …… 60
11.1 气体统计物理的基本概念 …… 61
11.1.1 宏观态与微观态 …… 61
11.1.2 统计的规律性和涨落现象 …… 62
11.1.3 统计规律的定量分析方法 …… 62
11.1.4 等概率假设 …… 63
11.2 分子平均平动动能统计分布规律 …… 64
11.2.1 理想气体的微观模型和物态方程 …… 64
11.2.2 理想气体压强公式 …… 65
11.2.3 温度的统计意义 …… 67
11.3 能量均分定理 理想气体的内能 …… 69
11.3.1 自由度 …… 69
11.3.2 能量按自由度均分定理 …… 69
11.3.3 理想气体的内能 …… 70
11.4 麦克斯韦分子速率分布律 …… 71
11.4.1 气体分子的速率分布函数 …… 71
11.4.2 麦克斯韦速率分布律 …… 74
11.4.3 麦克斯韦速率分布律的实验验证 …… 74
11.4.4 分子速率的三个统计值 …… 75
11.4.5 麦克斯韦分布曲线的性质 …… 76
*11.5 玻耳兹曼分布律 …… 76
11.5.1 麦克斯韦速度分布律 …… 76
11.5.2 玻耳兹曼分布律 …… 77
*11.6 实际气体 范德瓦耳斯气体 …… 79
11.6.1 实际气体与理想气体的差别 …… 80
11.6.2 范德瓦耳斯方程的推导 …… 81
11.7 分子平均碰撞次数和平均自由程 …… 83
11.7.1 平均碰撞次数 …… 84
11.7.2 平均自由程 …… 85
*11.8 气体内的输运过程 …… 86
11.8.1 扩散现象 …… 86
11.8.2 热传导 …… 87
11.8.3 黏性现象 …… 87
本章小结 …… 89
习题 11 …… 91
第 12 章 热力学基础 …… 93
12.1 内能 功和热量 准静态过程 …… 93
12.1.1 内能 功和热量 …… 93
12.1.2 准静态过程 …… 94
12.1.3 准静态过程的功与热量 …… 95
12.2 热力学第一定律及应用 …… 96
12.2.1 热力学第一定律 …… 96
12.2.2 气体的摩尔热容 …… 97
12.2.3 热力学第一定律在理想气体等值过程中的应用 …… 100
12.3 绝热过程 …… 102
12.4 循环过程 卡诺循环 …… 105
12.4.1 正循环 热机的效率 …… 106
12.4.2 逆循环 制冷系数 …… 107
12.4.3 卡诺循环 …… 109
12.5 热力学第二定律 不可逆

过程 …… 111
12.5.1 开尔文表述 …… 112
12.5.2 克劳修斯表述 …… 113
12.5.3 自然过程的方向性 …… 114
12.5.4 可逆过程与不可逆过程 …… 114
12.6 热力学第二定律的统计意义
玻耳兹曼熵 …… 115
12.6.1 热力学第二定律的微观意义 …… 115
12.6.2 热力学概率与玻耳兹曼熵 …… 116
12.7 卡诺定理 克劳修斯熵 …… 119
12.7.1 卡诺定理的表述 …… 120
12.7.2 克劳修斯不等式 …… 120
12.7.3 克劳修斯熵 热力学第二定律
数学式 …… 122
*12.8 热力学第二定律的推广 熵概念
的应用 …… 127
12.8.1 热力学第二定律的推广 …… 127
12.8.2 自然界演化的真正原动力是
什么? …… 129
12.8.3 生存系的代谢能力 …… 129
12.8.4 熵与信息 …… 130
本章小结 …… 135
习题 12 …… 138
选读材料 耗散结构与非平衡态
热力学 …… 141
第 13 章 量子物理 …… 143
13.1 黑体辐射 能量子概念 …… 143
13.1.1 黑体 黑体辐射 …… 143
13.1.2 经典物理陷入困境 …… 145
13.1.3 普朗克的能量子概念 …… 146
13.2 光电效应 光的粒子性 …… 147
13.2.1 光电效应实验 …… 147
13.2.2 光电效应与波动理论的矛盾 …… 149
13.2.3 爱因斯坦的光子理论 …… 149
13.2.4 光的波粒二象性 …… 150
*13.3 康普顿散射 …… 152
13.3.1 康普顿散射实验 …… 152
13.3.2 康普顿散射与波动理论的
矛盾 …… 152
13.3.3 光子理论成功解释康普顿
散射 …… 153
13.4 氢原子结构的玻尔理论 …… 156
13.4.1 氢原子光谱的实验规律 …… 156
13.4.2 氢原子光谱与经典电磁学的
矛盾 …… 157
13.4.3 玻尔的氢原子理论 …… 158
13.4.4 玻尔理论的成功和局限性 …… 162
13.5 微观粒子的波动性 …… 162
13.5.1 德布罗意波 …… 162
13.5.2 德布罗意波的实验证据 …… 164
13.5.3 德布罗意波的统计解释 …… 165
13.6 不确定关系 …… 166
13.6.1 位置与动量不确定关系 …… 166
13.6.2 能量与时间不确定关系 …… 167
13.7 波函数 薛定谔方程 …… 168
13.7.1 波函数 …… 168
13.7.2 薛定谔方程 …… 170
13.8 一维定态问题 …… 172
13.8.1 一维无限深方势阱 …… 172
13.8.2 一维方势垒 隧道效应 …… 176
13.8.3 一维谐振子 …… 178
13.9 定态薛定谔方程应用于
氢原子 …… 180
13.9.1 氢原子的定态薛定谔方程 …… 180
13.9.2 氢原子的求解结果 …… 181

13.10 电子自旋 …… 183
13.10.1 施特恩-格拉赫实验 …… 183
13.10.2 电子自旋 …… 186
13.11 原子的壳层结构 …… 187
13.11.1 四个量子数 …… 187
13.11.2 壳层结构 …… 188
本章小结 …… 190
习题 13 …… 194
选读材料 纳米科技 …… 195
第 14 章 原子核与粒子 …… 199
14.1 原子核的基本性质 …… 199
14.1.1 原子核的构成 …… 199
14.1.2 原子核的电荷数与质量数 …… 200
14.1.3 原子核的大小与密度 …… 200
14.1.4 原子核的自旋与磁矩 …… 202
14.1.5 核力 …… 205
14.1.6 原子核的结合能 …… 206
14.2 原子核的放射性衰变 …… 208
14.2.1 原子核的稳定性 …… 208
14.2.2 原子核衰变 …… 209
14.2.3 放射性衰变规律 …… 210
14.3 原子核反应 …… 215
14.3.1 核反应的实现 …… 215
14.3.2 核反应的类型 …… 216
14.3.3 核反应过程的守恒定律 …… 218
14.4 重核裂变 核能利用 …… 219
14.4.1 开发核能的原理 …… 219
14.4.2 原子核裂变 …… 220
14.4.3 链式反应与反应堆 …… 224
14.5 轻核聚变 未来的环保能源 …… 226
14.5.1 基本的轻核聚变反应 …… 226
14.5.2 受控热核聚变反应 …… 227
14.6 粒子 …… 229
14.6.1 粒子家族史回顾 …… 229
14.6.2 粒子的分类 …… 232
14.6.3 强子结构的夸克模型 …… 234
14.6.4 相互作用的标准模型 …… 237
14.6.5 对称性与对称性破缺 …… 241
14.6.6 中微子质量问题 …… 243
本章小结 …… 248
习题 14 …… 249
参考文献 …… 251

第10章　波动光学

10.1　光源及光的相干性
10.2　分波面法干涉
10.3　分振幅法干涉
10.4　光学干涉仪器　时间相干性
10.5　光的衍射现象　惠更斯-菲涅耳原理
10.6　单缝夫琅禾费衍射
10.7　圆孔夫琅禾费衍射　光学仪器的分辨率
10.8　衍射光栅
10.9　X射线的衍射
10.10　光的偏振性
10.11　反射光和折射光的偏振
10.12　光的双折射
*10.13　旋光现象
本章小结
习题10
选读材料

关于对光的本质的认识在历史上存在过长期的争论，而最终统一于波粒二象性学说.对光的本质的争论焦点在于光究竟是粒子还是波，相应地存在着以牛顿为代表的粒子说学派和以惠更斯为代表的波动说学派. 由于光所具有的特殊性质以及科学研究发展的局限性，光在表现出粒子特性的同时又表现出波的特征，从而造成光的粒子说学派和波动说学派长期的争论. 从光的直线传播以及光的反射和折射现象来看，光体现出粒子特征，从而以牛顿为代表的粒子说学派认为光属于粒子；而从光的干涉和衍射这些波所具有的独特的现象来看，光体现出波动特征，从而以惠更斯为代表的波动学派认为光属于波. 在光的粒子属性与波动属性的长期争论中，由于光的直线传播以及光的反射和折射现象能够很直观地被人们接受，从而光的粒子说首先占据主导地位. 随着对光学现象研究的深入，著名的杨氏双缝干涉实验通过巧妙的方法获得了相干光并实现了光的干涉，从而使光的波动说成为主流. 从现代对光的本质的认识的观点来看，光的粒子说学派和光的波动说学派都是各自片面地把握了光的粒子属性和波动属性，从而形成长期争论而无法统一认识的局面. 随着科学研究的发展，在普朗克提出能量子的概念，成功而圆满地解释了黑体辐射问题之后，爱因斯坦提出了光量子的概念并成功地解释了光电效应现象，并指出了能量与频率、动量与波长的关系，而德布罗意进而提出了物质波的思想，指出了一切实物粒子都同时具有波和粒子的两重属性. 在此基础上，人们对光的本质开始有了全面而正确的认识——光具有波粒二象性.

从现在的观点来看，光的粒子说和波动说的争论是在当时的情况下，两个学派之间各自以光的某一属性来讨论光的本质问题，从而形成长期无法也根本不可能对光的本质的认识取得统一看法的局面. 事实上，以牛顿为代表的粒子说学派着重于光的粒子属性，对光的现象的研究属于几何光学的范畴，而以惠更斯为代表的波动说学派着重于光的波动属性，对光的现象的研究属于波动光学的范畴，而对光全面而正确的认识是光同时具有粒子和波这两重属性. 作为大学物理课程，着重于波动光学的内容，包括

光的干涉、光的衍射以及光的偏振等内容. 利用量子力学的内容来研究光的现象属于量子光学的内容.

干涉现象是光具有波动性的重要特征,许多实验演示了光的干涉现象. 根据相干光的获得方法可以将光的干涉分为分波面法干涉和分振幅法干涉两类. 分波面法干涉包括杨氏双缝干涉、菲涅耳双棱镜及劳埃德镜实验等,而分振幅法干涉包括平行平面薄膜干涉、劈尖干涉及牛顿环实验等. 在这一章中,首先介绍与光的干涉现象有关的物理概念,然后对在两类干涉实验中产生明、暗条纹的条件以及条纹分布的特点进行分析. 最后简单介绍一些光学干涉仪器.

衍射是光的波动性的另一个基本特征,在光的衍射中以惠更斯-菲涅耳原理为基础,分别对光的单缝衍射和圆孔夫琅禾费衍射进行分析讨论,并简要分析衍射对光学仪器的分辨率的影响,然后详细讨论了光栅衍射的特点和规律,最后介绍衍射在近代物理中的重要应用——X 射线衍射.

光的干涉和衍射现象表明光具有波动性,但不能确定光是横波还是纵波. 在光与物质的相互作用中光的电场强度矢量起重要作用,因此将电场强度矢量称为光矢量. 通过对光的偏振现象的介绍,可以确定光是横波,即光矢量振动方向始终与光的传播方向垂直. 在光的偏振内容中着重介绍光的各种偏振态、光在不同介质界面的反射和折射中的偏振特性,还讨论和解释了光的双折射现象以及旋光现象及其应用.

10.1 光源及光的相干性

10.1.1 光源及光源的分类

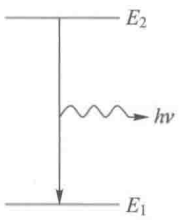


图 10.1 光源的发光机制

将能够发光的物体称为光源. 常用的光源有普通光源和激光光源两类. 如图 10.1 所示,当发光物质的原子从高能态 E_2 向低能态 E_1 跃迁时,这个原子要向外发射出一个频率为 $\nu=(E_2-E_1)/h$ 的光子(即一列光波),光源的持续发光是大量原子不断地从高能态向低能态跃迁的结果. 然而,发光物质的原子通常处于低能态,要使光源能够持续发光,需要不断地将原子从低能态激发到高能态上. 根据激发方式不同,可以将普通光源分为热光源和冷

光源两种. 热光源是指通过热能对原子进行激发而发光的光源，如太阳和白炽灯等属于热光源；冷光源是指通过电能、光能和化学能对原子进行激发而发光的光源，如发光二极管、日光灯及萤火虫的发光分别是发光物质受到电能、光能和化学能的激发而发光. 需要注意的是，光源中的每一个原子从高能态向低能态跃迁时会发出一列长度很短的光波波列，另一方面，原子从不同的高能态向低能态跃迁时所发出的光的频率不同，而每一个原子从高能态向低能态的跃迁是随机的，所发出的光波波列的振动方向以及初相位彼此不同. 因此，两个普通光源所发出的光甚至同一普通光源的不同部分所发出的光是彼此不相干的，它们在空间中某处相遇时不会产生干涉现象.

10.1.2 可见光的光谱　单色光与准单色光

可见光是波长范围在 400~760 nm 的电磁波，其实质是交变电场与交变磁场的相互激发在空间中的传播. 利用三棱镜可以将一束白色的可见光展成红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等颜色的彩色光谱，不同颜色的光具有不同的波长范围，各种颜色的光与相应的波长关系列于表 10.1 中. 而利用 $c=\lambda\nu$，可以求出不同颜色的光对应的频率范围.

表 10.1　可见光的颜色与波长的关系

颜色	红	橙	黄	绿	青	蓝	紫
波长/nm	622~760	597~622	577~597	492~577	470~492	455~470	400~455

在光的干涉和衍射实验中，通常用到单色光，单色光是指具有单一波长 λ_0 的光波. 但是，严格意义上的单色光是不存在的，光源发出的波长为 λ_0 的单色光实际上是以 λ_0 为中心且强度变化如图 10.2 所示的光，将这种以 λ_0 为中心，并包含有一定波长范围而强度按图 10.2 变化的光称为准单色光. 在图 10.2 中，中心波长 λ_0 处的强度为 I_0，随着偏离中心波长，光的强度要减弱，将光强为 $I_0/2$ 处时曲线的宽度 $\Delta\lambda$ [即 $(\lambda_0-\Delta\lambda/2)\sim(\lambda_0+\Delta\lambda/2)$] 称为准单色光的谱线宽度. 准单色光的单色性与其谱线宽度 $\Delta\lambda$ 有关，$\Delta\lambda$ 越小，准单色光的单色性越好.

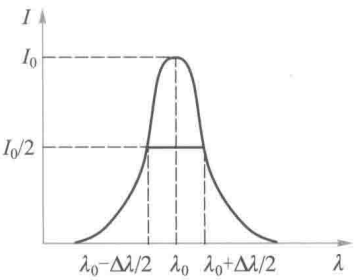


图 10.2　准单色光

需要全本请访问 www.ertongbook.com

10.1.3 光波的叠加 非相干叠加与相干叠加

在光波中包含了电场成分和磁场成分，而使人眼产生视觉效应以及使胶卷产生感光作用的是光波中的电场部分，因此用电场强度矢量 $\boldsymbol{E}$ 来描述光波，并称为光矢量，而电场强度矢量随时间作的周期性变化称为光振动. 根据波的强度（即平均能流密度）I 与振幅 E_0 之间的关系

$$I \propto E_0^2 \tag{10.1}$$

在只考虑光强度相对分布的情况下，可以用光场中某点的光矢量振幅的平方来表示该点处光的强度，即

$$I = E_0^2 \tag{10.2}$$

考虑两列频率相同、光矢量振动方向相同、振幅分别为 E_{10} 和 E_{20} 的光波，它们在传播过程中在空间一点 P 相遇时，在 P 点处的合成光矢量的振幅 E 为

$$E^2 = E_{10}^2 + E_{20}^2 + 2E_{10}E_{20}\cos\ \Delta\varphi \tag{10.3}$$

利用式(10.2)的关系，相应的光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\ \Delta\varphi \tag{10.4}$$

其中，$\Delta\varphi$ 为两列光波在 P 点处的相位差. 由于每个原子或分子在其一次发光过程中所持续的时间在 10^{-8} s 的数量级，在观察两列光波的叠加时，眼睛或仪器不可能在这个极短的时间内作出响应，因此，观察结果实际上是在一个较长的时间 τ 内的平均，即

$$I = I_1 + I_2 + \frac{2}{\tau}\sqrt{I_1 I_2}\int_0^{\tau}\cos\ \Delta\varphi \mathrm{d}t \tag{10.5}$$

由式(10.5)可知，观察结果与两列光波在 P 点处的相位差对时间的积分有关，如果两列光波在 P 点处的相位差没有关联（即非相干光），根据光源的发光机制，每一个原子从高能态向低能态的跃迁是随机的，跃迁发出的光波其相位可以取 $0 \sim 2\pi$ 范围内的任意一个值，并且取每一个值的机会均等，从而式(10.5)中的积分结果为 0，从而两列非相干光的叠加结果为

$$I = I_1 + I_2 \tag{10.6}$$

这表明，两列非相干光光波在 P 点处叠加时的合光强为每一列光波在 P 点处的光强之和，这种情况称为非相干叠加.

如果两列光波在 P 点处的相位差恒定（即相干光），这时，$\Delta\varphi$ 是一个不随时间变化的常量，则式(10.5)的结果为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\ \Delta\varphi \tag{10.7}$$

这表明，两列相干光波在 P 点处叠加时的合光强按式(10.7)变化，这种情况称为相干叠加.

在波的干涉中，将两列频率相同、振动方向相同并且在相遇点处相位相同或相位差恒定的波称为相干波，相应的波源称为相干波源. 两列相干波的叠加呈现出稳定的图样，在有些点处振动加强，在有些点处振动减弱，这种现象称为波的干涉. 相应地，将两列频率相同、振动方向相同并且在相遇点处相位相同或相位差恒定的光称为相干光，产生相干光的光源称为相干光源. 两列相干光叠加形成稳定的图样的现象称为光的干涉.

如果两列相干光的光强相同($I_1=I_2=I_0$)，则它们在相遇点 P 处叠加的合光强为

$$I=2I_0(1+\cos\Delta\varphi)=\begin{cases}4I_0(\text{最大}), & \text{当 } \Delta\varphi=\pm 2k\pi \text{ 时}\\ 0(\text{最小}), & \text{当 } \Delta\varphi=\pm(2k+1)\pi \text{ 时}\end{cases} \tag{10.8}$$

这表明，当两列相干光在相遇点的相位差为 $\pm 2k\pi$ 时，叠加产生的光强最大($I=4I_0$)，这种情况称为干涉相长；当两列相干光在相遇点的相位差为 $\pm(2k+1)\pi$ 时，叠加产生的光强最小($I=0$)，这种情况称为干涉相消.

对两列振幅相同的相干光和两列振幅相同的非相干光，它们在叠加时光强 I 随相位差 $\Delta\varphi$ 变化的情况如图 10.3 所示，其中，(1)为单一光，(2)为两非相干光的叠加，(3)为两相干光的叠加. 从图中可以看到，当两列非相干光叠加时，合光强是一个与相位差无关的常量，而当两列相干光叠加时，合光强要随相位差的变化而发生变化.

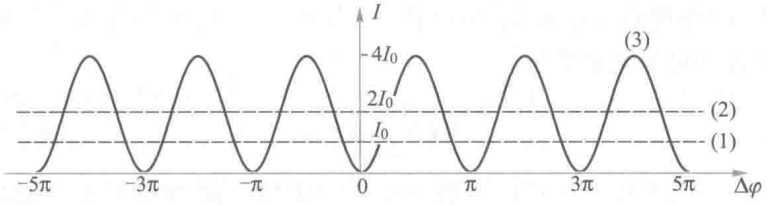


图 10.3 光波的叠加

10.1.4 光程及光程差

1. 光程

假设一束光在相同的时间 Δt 内，在真空中和折射率为 n 的介质中传播的距离分别为 l_0 和 l，并且光在介质中传播的速度为

$\boldsymbol{v}$. 由于 $c=l_0/\Delta t, v=l/\Delta t$, 则

$$l_0=\frac{c}{v}l=nl \tag{10.9}$$

上式表明,在 Δt 时间内光在介质中传播的距离 l 与介质的折射率 n 的乘积等于在相同时间内光在真空中传播的距离 l_0, 即:将光在 Δt 时间内在介质中传播的距离 l 折算成在相同的时间内光在真空中传播的距离 l_0. 将光在介质中传播的距离与介质的折射率的乘积称为光程,即 nl. 光程的物理意义是将光在折射率为 n 的介质中传播的距离 l 折算成在相同的时间内光在真空中传播的距离 l_0.

如果光先后在多种介质中传播,假设在折射率为 n_i 的第 i 种介质中传播的距离为 l_i, 则相应的光程为 $\sum_i n_i l_i$, 即:光先后在多种介质中传播时,总光程等于光在每一种介质中传播时的光程之和.

2. 光程差

如图 10.4 所示,两束光分别在折射率为 n_1 和 n_2 的介质中传播 l_1 和 l_2 的距离后在两种介质界面 MN 上的 P 点处相遇,则光线 1 的光程为 n_1l_1, 光线 2 的光程为 n_2l_2, 将两束光的光程之差称为光程差,用 δ 表示,即

$$\delta=n_2l_2-n_1l_1 \tag{10.10}$$

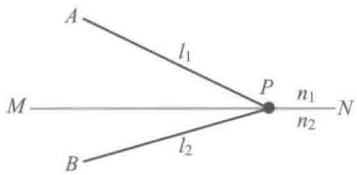


图 10.4　光程与光程差

3. 光程差与相位差的关系

在图 10.4 中,假设两束光在起点 A、B 处的相位相同,在相遇点 P 处的相位差为 $\Delta\varphi$, 并且两束光的光程差为 δ. 由于光在不同的介质中传播时频率保持不变,而一个波长 λ_0(光在真空中的波长)的光程差对应着 2π 的相位差,因此,这两束光的光程差与相位差之间的关系满足

$$\delta=\frac{\lambda_0}{2\pi}\Delta\varphi \tag{10.11}$$

利用光程差与相位差的关系式(10.11),两列相干光叠加时产生干涉相长和干涉相消的条件式(10.8)可以改用光程差来表示:

$$\delta=\begin{cases}\pm 2k(\lambda_0/2) & \text{(干涉相长)}\\ \pm(2k+1)(\lambda_0/2) & \text{(干涉相消)}\end{cases} \tag{10.12}$$

即:当光程差为半波长的偶数倍时产生干涉相长,当光程差为半波长的奇数倍时产生干涉相消. 在光的干涉中,干涉相长表现为产生干涉明纹,而干涉相消表现为产生干涉暗纹.

10.1.5 透镜对光程的影响

在后面的内容中将会知道，光的干涉与衍射所产生的明、暗条纹与光线的光程差有关，而在光的干涉与衍射实验中，通常使用到薄透镜，在光路中引入的薄透镜是否会对光线的光程产生影响呢？如图 10.5 所示，一束平行光垂直地照射到屏 E 上，在图 10.5(a)中，平面 ABC 为光束的一个波面，由于光线到屏 E 的距离相等，从而光线的光程相同，即一束平行光从平面 ABC 到屏 E 之间没有引起附加的光程差；在图 10.5(b)中，在波面 ABC 与屏 E 之间插入一薄透镜，光线通过透镜后聚焦于屏上的 F 点，过透镜表面作平面 MM' 和球面 NN'，由于在波面 ABC 处的相位相同，而光束通过透镜后会聚在 F 点处的相位也相同，因此，在平面 MM' 和球面 NN' 之间的光线的光程差相同，因此一束平行光垂直地通过薄透镜时不会引起附加的光程差；同样的，当一束平行光倾斜通过透镜并聚焦于位于屏上的焦点时也不会引起附加的光程差. 这表明，在光路中引入薄透镜时并不会引起附加的光程差.

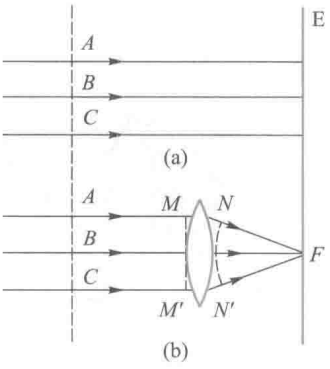


图 10.5 透镜与光程差的关系

10.1.6 干涉与衍射的条纹及级次

光的干涉和衍射呈现出的明、暗相间的条纹分别称为干涉(衍射)的明纹和暗纹，从条纹的分布来看，有的条纹呈现出对称分布，如：杨氏双缝干涉条纹、单缝衍射条纹和光栅衍射条纹等；有的条纹呈现出单边分布，如：劳埃德镜的干涉条纹、劈尖的干涉条纹等. 对具有对称分布的条纹，将位于中央位置的明纹或暗纹用 $k=0$ 表示，称为中央明纹或暗纹，而从中央明纹或暗纹依次向外展开的明纹或暗纹分别用 $k=1,2,3,\cdots$ 表示，并称为第 $\pm k$ 级明纹或暗纹. 从条纹的强度分布来看，强度最小之处对应着暗纹，在相邻的两个暗纹之间为明纹，明纹中强度最大之处对应着该明纹的中心，如图 10.6 所示. 在图 10.6(a)中，强度最大的点 $B_{\pm k}$($k=0,1,2,3$)表示第 k 级明纹中心，而强度为 0 的点 $D_{\pm k}$($k=1,2,3,4$)表示第 k 级暗纹. 而相邻两级暗纹之间的间距为明纹的宽度，比如，图 10.6(a)中 D_1 与 D_2 之间的间距为 1 级明纹的宽度. 而图 10.6(a)、(b)中的左半部分或右半部分构成单边分布的条纹，条纹级次为 $k=0,1,2,3,\cdots$，如图 10.6(c)、(d)所示. 其中，(c)从 0 级明纹开始，而(d)从 0 级暗纹开始.

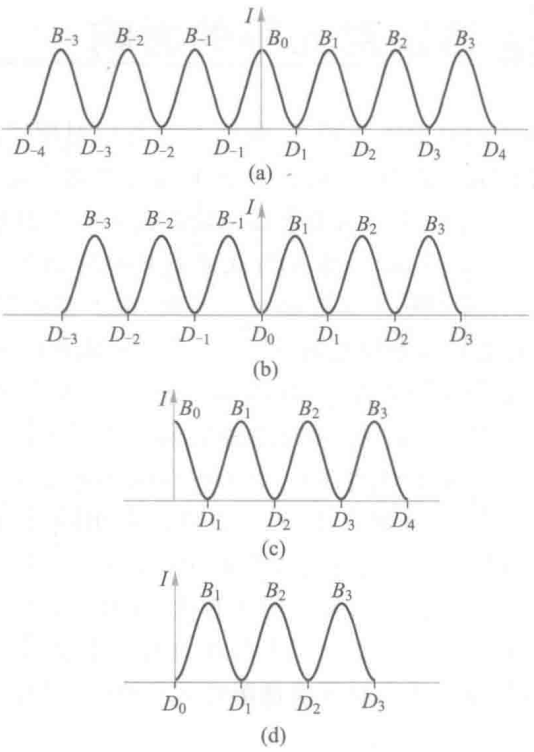


图 10.6 条纹级次

10.2 分波面法干涉

10.2.1 获得相干光的方法 干涉的分类

干涉现象是两束相干光在空间中叠加的结果，实现光的干涉的关键是相干光的获得，获得相干光的方法有两种，一种方法是从点光源的波面上分割出两个相干的点光源，它们发的光就是相干光，这种方法称为分波面法；另一种方法是利用介质上、下表面对一束入射光的反射或透射来获得相干光，这种方法称为分振幅法. 相应地，将光的干涉分为分波面法干涉和分振幅法干涉两类. 杨氏双缝干涉、菲涅耳双面镜实验及劳埃德镜实验等属于分波面法干涉，平行平面薄膜干涉、劈尖干涉及牛顿环等属于分振幅法干涉. 这一节首先讨论分波面法干涉，

分振幅法干涉则在下一节介绍.

10.2.2 杨氏双缝干涉实验

图 10.7 所示的是杨氏双缝干涉实验装置,其中,S、S_1 和 S_2 为构成等腰三角形的三个小孔,并且 S_1 和 S_2 的距离很小. 当单色光垂直地照射到小孔 S 上时,S 就构成一个点光源,它发出的光波是球面波,其波阵面在 S_1 和 S_2 处被分割出两个新的点光源. 因为点光源 S_1 和 S_2 是从点光源 S 的同一波面中分离出来的,因此具有相同的频率、振动方向和相位. 从而,S_1 和 S_2 是一对相干光源. 由 S_1 和 S_2 发出的光波在相遇的区域(屏 E 处)就会发生干涉. 在实验中,由于小孔很小,从 S_1 和 S_2 获得的相干光很弱,为了获得较强的相干光源,可以将小孔 S 及 S_1 和 S_2 改成狭缝,此时,S_1 和 S_2 发出的光波是柱面波,在屏 E 上产生的干涉图样是明暗相间的条纹.



简介:托马斯·杨

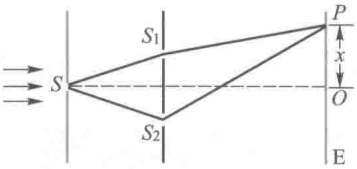


图 10.7 杨氏双缝干涉实验

下面讨论杨氏双缝干涉实验中明、暗条纹在屏上的位置以及条纹间距等问题. 如图 10.8 所示,假设双缝 S_1 和 S_2 的间距为 d,S_1 和 S_2 的中点 M 到屏 E 的距离为 D,O 为 M 在屏 E 上的投影,P 为屏上一点,P 到 S_1 和 S_2 的距离分别为 r_1 和 r_2. 在 S_2P 上作 $B'P=S_1P$,$S_1B\perp S_2P$,则光线 S_1P 与 S_2P 的光程差为 $\delta=r_2-r_1=S_2B'$,由于 r_1、$r_2\gg d$,有 $S_2B'\approx S_2B$,因此,$\delta\approx S_2B=d\sin\theta$,而 $\theta\approx\theta'$,有 $\sin\theta\approx\tan\theta'=x/D$,从而有

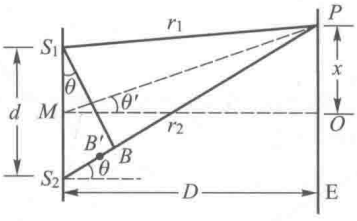


图 10.8 杨氏双缝干涉条纹

$$\delta=d\frac{x}{D} \tag{10.13}$$

1. 形成明、暗条纹与光程差的关系

由两列相干光叠加时产生干涉相长和干涉相消的条件式(10.12)可以得到杨氏双缝干涉实验在屏上产生明、暗条纹的条件为

$$\delta=r_2-r_1=\begin{cases}\pm2k\dfrac{\lambda}{2} & (k=0,1,2,\cdots) \quad \text{明纹}\\ \pm(2k-1)\dfrac{\lambda}{2} & (k=1,2,3,\cdots) \quad \text{暗纹}\end{cases} \tag{10.14}$$

即:当光程差为半波长的偶数倍时形成明纹,当光程差为半波长的奇数倍时形成暗纹.

2. 明、暗条纹在屏上的位置

将式(10.14)代入式(10.13)得到明、暗条纹在屏上的位置为

需要全本请访问 www.ertongbook.com