

清华大学985名优教材立项资助



生物医学检测技术 与临床检验

黄国亮 夏永静 高上凯 等 编著

清华大学出版社

生物医学检测技术 与临床检验

黄国亮 夏永静 高上凯 等 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以光学显微技术与临床生化分析技术为基础,系统地概述了目前在生命科学、医学和临床医疗领域中广泛应用的多种生物医学检测技术及其对应的科学仪器和医疗仪器,对这些技术的基本原理进行了详细而通俗的描述,便于读者了解生物医学检测技术与临床检验方法,并应用它们来构建科研实验系统和临床检验系统,开发新型生命科学、医学和临床医疗检测应用的科学仪器和医疗仪器。

本书可作为高等院校生物医学专业的教材或教学参考书,也可供该领域工程技术人员、临床检验人员和仪器爱好者阅读使用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

生物医学检测技术与临床检验/黄国亮等编著. --北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-35600-4

I. ①生… II. ①黄… III. ①生物工程—医学工程—医学检验 ②临床医学—医学检验
IV. ①R318 ②R446.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 042392 号

责任编辑:庄红权 洪 英

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:28.75 字 数:695 千字

版 次:2014 年 9 月第 1 版 印 次:2014 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:65.00 元

产品编号:053131-01

序言

PREFACE

21 世纪是生命科学与医学的世纪,生物材料、基因工程、蛋白质工程、生物芯片等技术已成为发展生命科学与医学的重要基础。

对于医学研究、临床医疗、卫生防疫、药物开发与药效评价等领域,可以说离开了检测技术就寸步难行。今天的生命科学必须从基因、蛋白质、细胞、组织、器官和小动物在体水平等系统生物学范畴来进行研究,因此,生物医学检测技术与临床检验是现代生命科学、医学和临床医疗发展的重要手段和工具。

生物医学检测技术与临床检验所包括的内容极为广泛,使用的技术有光学显微技术、电子显微技术、光谱检测技术、色谱检测技术、生化分析技术等;在体检测有 X 射线影像、超声检测、核磁成像、光声层析等。在这些技术的基础上发展的科学仪器则是光、机、电、计算机的结合,并逐步走向数字化、微型化、智能化。

“没有仪器就没有科学”,因此,学习生命科学与医学必须对检测技术有所了解。本书名为《生物医学检测技术与临床检验》,就是对上述技术与仪器进行综合而系统的介绍,作者都是长期从事生物医学教学与研究的科学工作者,在生物医学检测技术研究、科学仪器和医疗仪器的研制与产业化方面富有理论知识和实践经验,他们的许多重要研究成果也收录于书中。

本书的特点是深入浅出,生命科学、医学与光、机、电、计算机软件多学科知识交叉结合,既有理论又有实践。相信本书的出版能让生物医学界的技术人员和学生获益匪浅,我衷心地期待本书能早日出版,愿与读者共享阅读之乐。

中国工程院院士,清华大学教授
国际光学委员会副主席
中国仪器仪表学会副理事长

金国藩

2013 年 12 月

21 世纪是生命科学与医学的世纪,以转化医学为核心内容的生命科学与医学在基础研究领域和产业化发展领域必将取得举世瞩目的成绩,以生物材料工程、基因工程、蛋白质工程、生物芯片技术等为代表的应用技术将为生命科学、医学与临床检验的发展提供技术依据。以上技术的发展并实现产业化应用,必须结合工程学科的成熟技术,发挥多学科交叉优势,将光、机、电、计算机软件等技术与生命科学和医学的研究有机地结合起来,才能在生命科学、医学和临床医疗的应用领域迅速形成巨大的产业化市场,如杂交仪、PCR 扩增仪、微阵列点样仪、荧光显微镜、共焦扫描仪、毛细管电泳分析仪、紫外凝胶光谱仪、X 射线影像设备、CT 检测仪、核磁共振分析仪、超声检测仪,以及生命科学与医学研究中的各种半自动化工作站等。目前,市场上流行的已经形成产业化的仪器达上千种之多,它们的产生对生命科学、医学和临床医疗的发展起到了积极的推动作用,同时也创造出了良好的经济效益。就像科学技术的发展永无止境一样,生物医学检测技术与临床检验仪器的发展还在继续,随着生命科学和医学研究的迅猛发展,需要更多更新的检测仪器来满足其应用需求,这就给检测技术与科学仪器的研究提供了广阔的发展空间。加强生命科学、医学与工程学科方面的多学科交叉建设,培养出一大批交叉学科专业技术人才,开发出许多具有应用前景的现代生命科学和医学检验中的光机电软件一体化仪器,并形成产业,创造出良好的经济社会效益,是国家“十二五”规划中科学仪器研究的重要内容。这些先进的测试技术与科学仪器又可以作为生命科学和医学检验的研究工具,促进生命科学、医学和临床医疗向更高层次发展。与此同时,检测技术与科学仪器也随之不断得到提升,向更高的科学技术水平发展。

本书正是基于以上多学科交叉结合的综合技术课程教学与人才培养的发展思路编写的,在传统的显微检测技术基础之上,结合现代生命科学和医学领域的多种检测技术与科学仪器进行科学前沿检测技术的延伸,包括先进的数字化技术(20 世纪 80 年代后期才发展起来的)、显微互动教学技术(21 世纪初刚发展的)、电镜检测技术、光谱色谱检测技术、生物芯片技术(20 世纪 90 年代才发展起来的)、X 射线影像检测技术、超声检测技术、核磁检测技术、在体成像检测技术(20 世纪 90 年代后期才发展起来的)等,让学生在高等教育学习的第一时间就接触了解生命科学与医学方面的重要检测技术方法和先进科学仪器(而在以前常常要到研究生阶段或走上工作岗位后才有可能接触到部分检测技术与仪器),拓宽学生的视野,培养研究兴趣,满足高等院校多学科交叉人才培养及教学改革发展的需要,为 21 世纪生命科学和医学的发展培养具有生物、医学与工程检测技术背景相结合的多学科交叉综合型人才。同时,也希望在他们当中有部分学生能够早日加入到中国科学仪器的发展事业中来,为国家“十二五”规划中的科学仪器研究做贡献,早日改变目前国内大部分科学仪器依靠进口的局面。

全书共分 14 章,在清华大学生物医学工程系黄国亮教授的主持、统筹下编写完成。第 1~6 章和第 10 章主要由黄国亮教授编写,第 7、8 章由清华大学生物医学工程系高上凯教授编写,第 9 章由清华大学生物系张日清教授编写,第 11~14 章由清华大学医学院夏永静副教授编写。北京光电所段振广教授参与了第 1 章显微成像系统的光学设计部分的编写,南京江南永新光学公司周纪文先生参与了第 3 章多媒体显微互动教学实验系统部分的编写,龙脉得生物技术有限公司赵春林博士和董洪莹参与了第 10 章部分内容的编写。

本书在编写过程中得到了清华大学医学院程京教授、周玉祥教授、邢婉丽教授、刘鹏教授,研究生邓橙、黎新、王同舟、赵松敏、汪汝亮、杨光、黄琴,本科生孙雨佳、徐婧婷,博奥生物有限公司张亮、徐浩、安爽、吴瑞阁、乔立安等人的支持,清华大学生物系电镜室和色谱实验室提供了相关实验技术的支持,在此一并感谢!此外,还要感谢国内外相关生物医学检测技术研究开发单位、显微镜生产单位和其他相关科学仪器生产单位提供的丰富素材!

在此向为本书的写作提供帮助的单位和个人表示深深的谢意!同时也感谢国家自然科学基金(81327005)、国家 863 高技术项目经费(2012AA020102,2013AA041201)、国家 973 项目经费(2011CB707701)、国家支撑计划项目经费(2012BAI23B01)、国家重大科学仪器专项(2013YQ190467)、北京市自然科学基金(4142025)、北京实验室基金(生物医学检测技术与仪器)、清华大学实验创新基金和清华大学 985 名优教材建设项目等对本书中包含的多项生物医学检测技术科研工作的资助和对本书出版的支持。

由于生物医学检测技术与临床检验的发展日新月异,限于时间关系,书中定有不少未能包含的新内容和我们尚未认识的不妥之处,敬请广大读者批评指正。

黄国亮

2014 年 3 月于清华园

1 基础知识	1
1.1 光的特性.....	1
1.1.1 光的定义	1
1.1.2 光的传播方式	1
1.1.3 生物医学检测技术中的谱线域.....	10
1.2 光学元件	10
1.3 光的成像规律	14
1.4 显微物镜光学设计简介	19
1.4.1 概述.....	19
1.4.2 显微物镜初始解的获得.....	19
1.4.3 ZEMAX 像质评价方法	29
1.4.4 ZEMAX 的优化功能	39
1.4.5 ZEMAX 分析允差功能	56
1.4.6 图纸设计.....	64
2 显微技术.....	83
2.1 显微技术的基本概念和发展历史	83
2.2 显微技术的基本原理	98
2.3 显微技术的基本分类与常用设备.....	101
2.3.1 正置显微镜及其应用	101
2.3.2 倒置显微镜及其应用	103
2.3.3 体视显微镜及其应用	103
2.3.4 荧光显微镜及其应用	105
2.3.5 相衬显微镜及其应用	109
2.3.6 偏光显微镜及其应用	112
2.3.7 金相显微镜及其应用	117
2.3.8 共焦显微镜及其应用	118
2.3.9 工具显微镜、测量显微镜、比对显微镜及其应用	123
2.3.10 扫描探针显微镜及其应用.....	125
2.4 显微技术对生命科学、医学及社会发展的意义	133

2.4.1	细胞学说的创立(1665—1875年)	133
2.4.2	细胞学说的经典时期(1875—1900年)	134
2.4.3	实验细胞学时期(1900—1953年)	135
2.5	显微切片的制作方法	138
2.6	显微镜的操作、保养与维护	140
2.7	国内外主要显微镜生产厂家介绍	142
2.7.1	国外著名显微镜生产厂家	142
2.7.2	国内主要显微镜生产厂家	144
3	数字化检测技术	148
3.1	数字化检测技术的基本概念	148
3.2	数字化生物显微镜的组成部分与基本结构	149
3.2.1	光源	150
3.2.2	物镜	152
3.2.3	目镜	155
3.2.4	其他部件	156
3.2.5	软件	158
3.3	数字化生物显微镜的外置接口	158
3.4	CCD与图像采集卡	160
3.5	PMT与A/D采集卡	167
3.6	多媒体显微互动教学实验系统	172
3.6.1	多媒体显微实验互动教学系统的研制情况	172
3.6.2	多媒体显微实验互动教学系统的基本组成	173
3.6.3	多媒体显微实验互动教学系统的操作使用方法	174
3.6.4	多媒体显微实验互动教学系统的发展方向	184
4	电子显微检测技术	186
4.1	电子显微检测技术的发展历史	186
4.2	电子显微检测技术的基本原理	187
4.3	电子显微镜的种类与基本结构	188
4.4	电子显微镜的制片技术	193
4.5	电子显微镜检测应用举例	197
5	光谱与色谱检测技术	199
5.1	光谱与色谱技术产生的背景	199
5.2	光谱检测技术及其应用	201
5.2.1	光谱检测技术基础	201
5.2.2	常规光谱检测技术	202
5.2.3	光纤光谱检测技术	204

5.2.4 痕量样品光谱检测应用实验	206
5.3 液相色谱检测技术及其应用	212
5.3.1 液相色谱检测技术	212
5.3.2 液相色谱检测实验	216
5.4 气相色谱检测技术及其应用	220
5.4.1 气相色谱检测技术	220
5.4.2 气相色谱检测实验	222
5.4.3 液相色谱与气相色谱的比较	225
5.5 毛细管电泳检测技术及其应用	226
5.5.1 毛细管电泳检测技术	226
5.5.2 毛细管电泳检测技术的基本原理	230
5.5.3 毛细管电泳检测装置与实验	233
6 生物芯片检测技术	236
6.1 生物芯片技术发展概述	237
6.2 计算机芯片与生物芯片的比较	243
6.3 生物芯片的检测方法	244
6.3.1 生物芯片的激光共焦扫描检测方法	244
6.3.2 CCD 成像扫描检测方法	245
6.3.3 表面等离子共振吸收检测方法	246
6.4 微流控芯片分子诊断技术及应用	249
6.4.1 微流控芯片设计制作	250
6.4.2 等温扩增技术与引物设计	250
6.4.3 微流控芯片检测及应用	258
6.5 微阵列生物芯片检测技术的应用	265
6.5.1 微生物芯片检测的基本内容与设计思想	265
6.5.2 微生物的培养	268
6.5.3 核酸提取	273
6.5.4 探针合成	278
6.5.5 芯片制备	282
6.5.6 样品标记	287
6.5.7 杂交反应	290
6.5.8 结果检测	296
6.5.9 扩增基因及引物序列、琼脂糖凝胶电泳	303
7 X 射线影像检测技术	307
7.1 X 射线成像的物理基础	308
7.2 投影 X 射线成像系统	309
7.3 X 射线计算机断层摄影	313

7.3.1	基本原理与发展概况	314
7.3.2	从投影重建图像的原理——中心切片定理	315
7.3.3	反投影重建图像的算法	316
7.3.4	X-CT 扫描仪设备	321
7.4	医学 X 射线检测设备的新技术发展与市场前景	321
8	超声检测技术	323
8.1	超声成像的物理基础	323
8.2	超声检测的基本原理	326
8.3	B 型结构成像	328
8.4	血流测量	331
8.5	超声成像中若干新技术的进展	333
8.6	超声诊断仪的产业发展与市场前景	338
9	核磁检测技术	340
9.1	基本原理	340
9.2	仪器结构与样品要求	342
9.3	获得的信息与主要参量	344
9.4	核磁共振谱的应用	347
9.5	核磁共振图像原理简介	350
9.6	二维核磁共振谱简介	351
10	在体成像检测技术	358
10.1	可见光在体成像检测技术	358
10.1.1	可见光在体成像原理	359
10.1.2	仪器结构及参数	360
10.1.3	实验步骤	363
10.1.4	在体成像检测技术的应用	364
10.2	光声在体成像检测技术	368
10.2.1	光声在体成像技术的发展	368
10.2.2	光声成像的原理	368
10.2.3	光声在体成像检测系统及其应用	370
10.3	上转换材料在体成像检测技术	372
10.3.1	上转换材料的发展	372
10.3.2	上转换材料的发光原理	373
10.3.3	上转换材料在体成像检测系统及其应用	376
11	临床生物化学的基本原理和实践	381
11.1	临床检验的工作内容	381

11.2	临床生物化学的定义	382
11.3	临床生化分析物的发展规模	385
11.4	临床生物化学理论与技术在医学教育中的作用与地位	385
11.5	临床生物化学实验室面临的任务	386
11.6	测量的单位	386
11.7	温度计	388
11.8	加样装置	388
11.9	分析天平	389
11.10	实验室玻璃器皿	390
11.11	实验室的基础技术	391
11.12	实验室的水和化学药品	392
11.13	实验室管理和质量控制	394
11.14	外部质量控制	396
11.15	临床化学实验室的管理	397
11.16	临床生物化学实验室的工作目标	397
11.17	临床生物化学实验室的工作分类	397
11.18	检验过程	398
11.19	其他的管理功能	398
11.20	实验室管理信息	399
11.21	实验室设计和工作流程	400
11.22	分析过程中的影响因素	400
12	统计学和临床生物化学	405
12.1	基础知识	405
12.2	数据的分布	407
12.3	统计学的检验	409
12.4	线性相关性分析和线性回归分析	410
12.5	误差	412
12.6	统计学在临床生物化学中的应用	413
12.6.1	建立新的分析物的参考值范围	414
12.6.2	新方法的评估	415
13	临床生物化学的分析技术和仪器	418
13.1	光学技术和光的检测仪——分光光度计	419
13.1.1	基础概念	419
13.1.2	比尔定律	420
13.1.3	分光光度计的基本结构	421
13.1.4	分光光度计的分类介绍	421
13.1.5	荧光检测仪	422

13.2	层析.....	422
13.3	电泳.....	424
13.4	电化学和化学传感器.....	424
14	核心生物化学检验.....	426
14.1	电解质和血气检验.....	426
14.2	氢离子和酸碱平衡.....	430
14.3	血气分析.....	431
14.4	氧的运输.....	431
14.5	肾功能检验.....	432
14.6	尿检.....	434
14.7	肝功能检验.....	434
14.8	糖尿病的诊断与监测.....	436
14.9	脂蛋白和心血管疾病.....	437
14.9.1	脂蛋白的分类定义.....	438
14.9.2	甘油三酯的参考值范围.....	439
14.9.3	胆固醇的检测.....	439
14.10	肿瘤标志物的检测	440
	参考文献.....	441

基础知识

1.1 光的特性

1.1.1 光的定义

光是世界万象色彩之源,是一种电磁波,可以用麦克斯韦(Maxwell)方程来描述,光在真空中的传播速度为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。根据视觉特点划分,光可以分为可见光、紫外线中的近紫外光和红外线中的近红外光等。光具有波粒二象性,它既可以表现出波动性,又可以表现出粒子性。人眼所能感觉的光波范围为 $390 \sim 760 \text{ nm}$ 。

波动理论认为光是由于发光体振动而在它的周围形成一种波,是振动能量的传播过程,可以向各个方向传播,可以用平面波、球面波、柱面波等方程来描述。光的波动性表现为干涉和衍射等现象。根据发光体的形状划分,又可分为点光源、面光源和线光源等。

量子理论认为光是由原子或分子发出的不连续的光量子,是一个个的微粒(光子),表现出光的反射、光电效应和康普顿(Compton)效应等现象。大量的光子连续不断地发出来,就表现出光的波动性。

1.1.2 光的传播方式

1. 直线传播

光在同种均匀媒质中沿直线方向传播。由于光是一种横波,它的振动方向与传播方向垂直,两个相邻的波峰或波谷之间的距离就是波长。光在均匀媒质(或真空)中沿直线传播,如图 1.1.1 所示。

在图 1.1.1 中,光的传播方向沿 Z 轴方向,光的振动方向可以沿 Y 轴方向。通常情况下,沿 Z 轴方向传播的光,它的振动方向可以是 XY 平面内的任意方向。

2. 反射

反射是光的重要粒子特性之一,当光从光疏媒质向光密媒质传播时,在两种媒质的界面改变传播方向,发生偏转折回现象,是光从光疏媒质向光密媒质传播的一种重要传播方式,如图 1.1.2 所示。

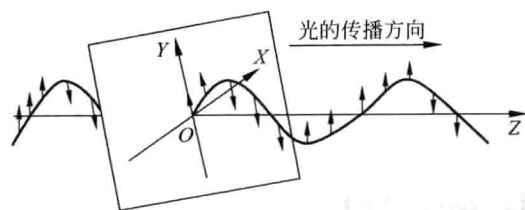


图 1.1.1 光的直线传播与振动方向图

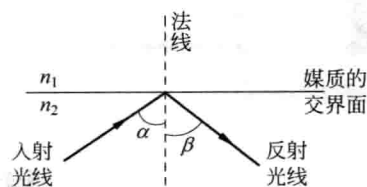


图 1.1.2 光的反射现象图

在图 1.1.2 中, n_1 、 n_2 为两种不同媒质的折射率, $n_1 < n_2$, 法线垂直于两种媒质的交界面, 入射光线与法线之间的夹角 α 为光线的入射角, 反射光线与法线之间的夹角 β 为光线的反射角, 光的反射传播遵循反射定律, 即光的入射角 α 等于光的反射角 β 。反射定律的数学公式表示如下

$$\alpha = \beta \tag{1.1.1}$$

3. 折射

折射是光从一种媒质向另一种媒质传播时在两种媒质的交界面改变传播方向偏转角度的一种传播方式, 如图 1.1.3 所示。

在图 1.1.3 中, n_1 、 n_2 为两种不同媒质的折射率, 法线垂直于两种媒质的交界面, 入射光线与法线之间的夹角 α 为光线的入射角, 折射光线与法线之间的夹角 γ 为光线的折射角, 光的折射传播遵循折射定律, 即光的入射角 α 与光的折射角 γ 的正弦值之比与两种媒质的折射率成反比。折射定律的数学公式表示如下:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_1}{n_2} \tag{1.1.2}$$

通常情况下, 光从一种媒质向另一种媒质传播时在两种媒质的交界面既有反射又有折射, 传播方式如图 1.1.4 所示。

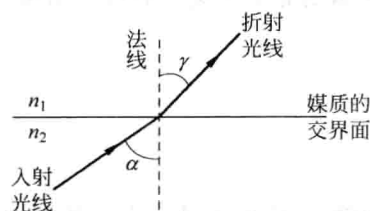


图 1.1.3 光的折射现象图

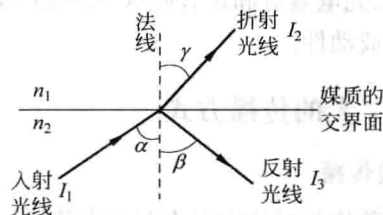


图 1.1.4 光在两种媒质交界面的反射与折射现象图

在图 1.1.4 中, I_1 、 I_2 和 I_3 分别为入射光的强度、折射光的强度和反射光的强度。理想情况下, 有

$$I_1 = I_2 + I_3 \tag{1.1.3}$$

随着入射角 α 的增大, 折射光的强度 I_2 将逐渐减少, 当入射角 α 满足一定的条件时, 折射光的强度 $I_2 = 0$, 则 $I_1 = I_3$, 此时发生全反射现象, 即入射光在两种媒质的交界面全部被反射回来。光在两种媒质的交界面发生全反射的临界条件为

$$\sin \alpha_0 = n_1 / n_2 \tag{1.1.4}$$

光的全反射如图 1.1.5 所示。

光的全反射只有当光线从光密媒质进入光疏媒质时才有可能发生,并且入射角 α 必须大于或等于临界角 α_0 。

4. 衍射

衍射是光的重要波动特征之一,当光在媒质中传播遇到障碍物时将改变直线传播,发生绕射传播现象,即光可以传播到这些障碍物的后面,产生漂亮的衍射环或衍射条纹。能够引起光衍射传播的障碍物有狭缝、小孔、锐边和小的不透明物体,只要这些障碍物的尺寸大小在光波长几倍至几百倍大小的范围内,均可以使光的传播发生明显的衍射现象。随着障碍物的尺寸增大,衍射条纹变宽,高级次条纹变得越来越暗,最终消失。光的小孔衍射如图 1.1.6 所示。

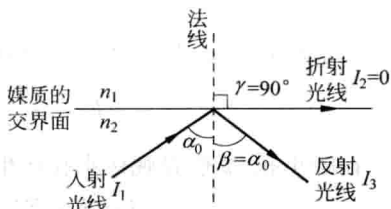


图 1.1.5 光的全反射现象图

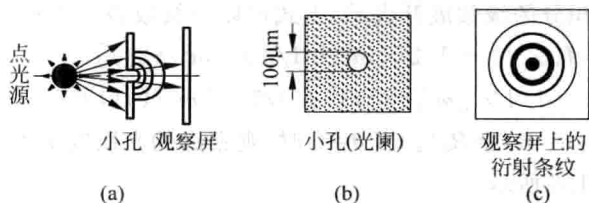


图 1.1.6 光的小孔衍射现象图

在图 1.1.6 中,图(a)是小孔衍射光路结构图,图(b)是小孔几何结构,图(c)是观察屏上的小孔衍射条纹。从图 1.1.6 中可以看出观察屏上的衍射条纹为一个同心圆环带,环带中心为一个圆形亮斑,圆环带的宽度从内向外逐渐变窄。

当采用单色光照明时,小孔衍射条纹为一个明暗相间的同心圆环带,环带中心为一个与照明单色光相同波长的圆形亮斑,又叫艾里(Airy)斑或零级最大值。艾里斑的半径 R 为

$$R = 1.22\lambda f / D \quad (1.1.5)$$

式中, λ 为照明单色光的波长; D 为小孔直径; f 为小孔到观察屏的距离。

当采用白光照明时,小孔衍射条纹为一个明暗相间的彩色同心圆环带,每一个彩色同心圆环带由中央向外颜色从紫色→红色,环带中心为一个白色的亮斑。

1) 小孔衍射现象的波动理论

夫琅禾费(Fraunhofer)圆孔衍射理论是描述小孔衍射现象的波动理论基础。平行光 $E_0 \cdot e^{j(\omega t - kz)}$ 照明半径为 R_0 的小孔,在距小孔 z_0 位置观察小孔产生的衍射波,如图 1.1.7 所示。根据惠更斯-菲涅尔(Huygens-Fresnel)原理,可以将小孔单位面积 $dS = r d\phi dr$ 产生的衍射振动波前描述为

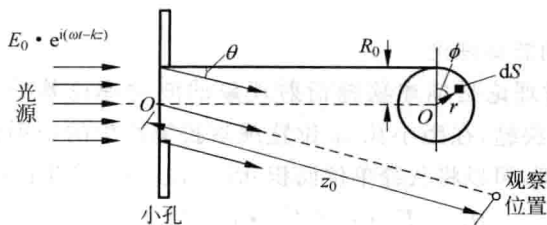


图 1.1.7 光的小孔衍射波前图

$$dE = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz_0)} \cdot e^{-kr \cos \phi \sin \theta} r d\phi dr \quad (1.1.6)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 。

整个小孔在 z_0 位置产生的衍射振动波前为

$$E = \int_0^R \int_0^{2\pi} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz_0)} \cdot e^{-kr \cos \phi \sin \theta} r d\phi dr \quad (1.1.7)$$

在距小孔 z_0 位置观察小孔产生的光照度为

$$\begin{aligned} I &= E \cdot E^* \\ &= \int_0^R \int_0^{2\pi} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz_0)} \cdot e^{-kr \cos \phi \sin \theta} r d\phi dr \\ &\quad \cdot \left[\int_0^R \int_0^{2\pi} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz_0)} \cdot e^{-kr \cos \phi \sin \theta} r d\phi dr \right]^* \end{aligned} \quad (1.1.8)$$

式中, E^* 为 E 的共轭积分函数。

根据 Bessel 函数积分的级数展开表示, 上式可以用级数展开表示为

$$\begin{aligned} I &= I_0 \times \{1 - 1/2 \times m^2 + 1/3 \times [m^2/(2!)]^2 \\ &\quad - 1/4 \times [m^3/(3!)]^2 + 1/5 \times [m^3/(4!)]^2 + \dots\}^2 \end{aligned} \quad (1.1.9)$$

式中, $m = \pi R_0 \sin \theta / \lambda$, $I_0 = E_0^2 \pi^2 R_0^4$ 。当 $\theta = 0$ 时, 观察点的光照度最大。小孔衍射的相对光照度分布曲线如图 1.1.8 所示。

光的狭缝衍射条纹观察如图 1.1.9 所示。

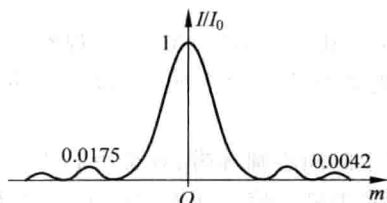


图 1.1.8 光的小孔衍射光照度分布曲线图

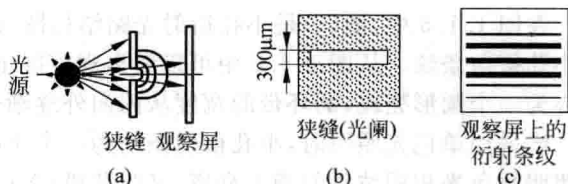


图 1.1.9 光的狭缝衍射现象图

在图 1.1.9 中, 图(a)是狭缝衍射光路结构图, 图(b)是狭缝几何结构, 图(c)是观察屏上的狭缝衍射条纹。从图 1.1.9 中可以看出观察屏上的衍射条纹为一个个并行的条纹带, 条纹带中心为一个比较宽的亮条纹, 条纹带的宽度从中央向上下逐渐变窄, 上下对称。

当采用单色光照明时, 狭缝衍射条纹为一个个明暗相间的直条纹带, 带中心为一个与照明单色光相同波长的圆形亮条纹, 又叫零级最大值。当采用白光照明时, 狭缝衍射条纹为一个个明暗相间的彩色直条纹带, 每一个彩色条纹带由内向外颜色从紫色→红色, 带中心为一个白色的亮条纹。

2) 狭缝衍射现象的波动理论

夫琅禾费单缝衍射理论是描述狭缝衍射现象的波动理论基础。平行光 $E_0 \cdot e^{i(\omega t - kz)}$ 照明宽度为 $L_0 \times w_0$ 的狭缝, 在距小孔 z_0 位置观察狭缝产生的衍射波, 如图 1.1.10 所示。根据惠更斯-菲涅尔原理, 可以将狭缝单位面积 $dS = L_0 \times dx$ 产生的衍射振动波前描述为

$$dE = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kf')} \cdot e^{i(kx \sin \theta)} L_0 dx \quad (1.1.10)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 。

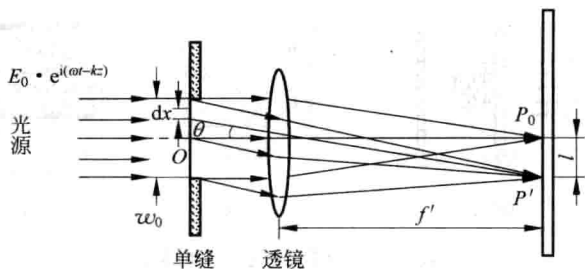


图 1.1.10 光的单缝衍射波前图

整个狭缝在 f' 位置产生的衍射振动波前为

$$E = \int_0^{w_0} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kf')} \cdot e^{i(kx \sin \theta)} L_0 dx \quad (1.1.11)$$

在距狭缝 f' 位置观察狭缝产生的光照度为

$$\begin{aligned} I &= E \cdot E^* \\ &= \int_0^{w_0} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kf')} \cdot e^{i(kx \sin \theta)} L_0 dx \\ &\quad \cdot \left[\int_0^{w_0} E_0 \cdot e^{i(\omega t - kf')} \cdot e^{i(kx \sin \theta)} L_0 dx \right]^* \end{aligned} \quad (1.1.12)$$

式中, E^* 为 E 的共轭积分函数。

上式积分后表示为

$$I = I_0 \times \{\sin(kw_0/2 \cdot \sin \theta) / (kw_0/2 \cdot \sin \theta)\}^2 \quad (1.1.13)$$

式中, $I_0 = E_0^2 w_0^2 L_0^2$ 。当 $\theta = 0$ 时, 观察点的光照度最大。

单缝衍射的相对光照度分布曲线如图 1.1.11 所示。

单缝衍射的相对光照度分布的极值条件如下。

(1) 极大值: $kw_0/2 \sin \theta = \pm (2m + 1)\pi/2$, 其中 $m = 1, 2, 3, \dots$ 。

(2) 极小值: $kw_0/2 \sin \theta = \pm m\pi$, 其中 $m = 1, 2, 3, \dots$ 。

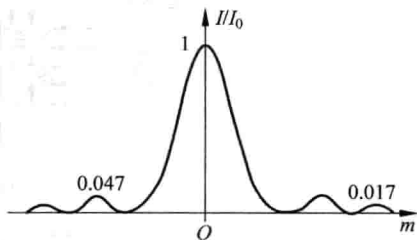


图 1.1.11 光的单缝衍射光照度分布曲线图

5. 干涉

干涉也是光的重要波动特征之一, 当光在媒质中传播遇到两个(或多个)障碍物时就会在障碍物的边缘发生绕射传播现象, 这些绕射传播的光叠加在一起形成加强的波峰和加强的波谷, 用一个显示屏接收可以看到漂亮的条纹, 这就是光的干涉现象。能够引起光传播干涉的障碍物有狭缝、小孔、锐边和小的不透明物体, 只要这些障碍物的尺寸大小在几至几百倍光波长大小的范围内, 并且成对(或多个)保持一定的距离出现, 均可以使光的传播发生明显的干涉现象。也就是说多个衍射光波叠加, 当它们的位相关系恒定且满足一定的条件时, 就会产生光的干涉。夫琅禾费双缝衍射, 又名杨氏双缝干涉, 是一种最早的典型光的干涉现象发现, 如图 1.1.12 所示。

在图 1.1.12 中, 图(a)是双缝干涉光路结构图, 图(b)是双缝几何结构, 图(c)是观察屏上的双缝干涉条纹。从图 1.1.12 中可以看出观察屏上的干涉条纹为一条条宽度相同、明暗相间的对称直条纹, 中心为一个亮条纹。