




卫生部“十二五”规划教材
全国高等医药教材建设研究会“十二五”规划教材
全国高等学校教材

• 供眼视光学专业用 •

眼视光应用光学

主 编 / 姚 进

 人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

眼视光应用光学/姚进主编. —北京: 人民卫生出版社, 2011. 8

ISBN 978-7-117-14618-0

I. ①眼… II. ①姚… III. ①眼科学: 应用光学—高等学校—教材 IV. ①R77

中国版本图书馆CIP数据核字 (2011) 第132875号

门户网: www.pmph.com	出版物查询、网上书店
卫人网: www.ipmph.com	护士、医师、药师、中医师、卫生资格考试培训

版权所有, 侵权必究!

本书本印次封底贴有防伪标。请注意识别。

眼视光应用光学

主 编: 姚 进

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-67605754 010-65264830

010-59787586 010-59787592

印 刷: 北京市安泰印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13

字 数: 324千字

版 次: 2011年8月第1版 2011年8月第1版第1次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-14618-0/R·14619

定 价: 22.00元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社销售中心联系退换)

第二轮规划教材修订说明

普通高等教育“十五”国家级规划教材、全国高等学校眼视光学专业卫生部规划教材是我国第一套供眼视光学专业本科使用的教材,其出版对于我国眼视光学高等教育以及眼视光学专业的发展具有重要的、里程碑式的意义,为我国眼视光学高级人才的培养做出了历史性的巨大的贡献。出版7年来,眼视光学理论和临床研究迅速发展,新理念、新技术、新器材层出不穷,国内眼视光学的教育无论在规模,还是在教育模式上都在发生巨大的变革,在不断借鉴国外眼视光教育经验并与国际接轨的过程中,逐渐形成了具有中国特色的眼视光学教育模式与人才培养模式,建立了独具特色的眼视光学教育体系,这都对第二轮教材的修订工作提供了巨大的推动力与挑战。全国一大批长期耕耘于眼视光学教学、科研与临床第一线的专家、学者为本套教材的编写者、使用者,在总结第一轮教材不足的基础上,在国内广大医学院校的支持下,共同参与、完成了本次大规模的修订工作,力争使本套教材的内容分类更加科学、系统,结构更加合理,更为成熟、完善、新颖,并独具专业特色。

本次修订特点如下:

1. 在全国广泛深入调研、走访的基础上,汇总、分析各种渠道反馈的信息,以及专家的意见与建议,总结并汲取第一轮教材的编写与教学应用经验,对第二轮教材评审委员会进行了改选,对教材中的一些不足之处进行了有针对性的修改与完善,在充分体现科学性、权威性、专业性的基础上,也考虑到了全国范围的代表性与适用性;
2. 在第一轮的基础上,结合眼视光学教学的现状、发展趋势与国内外教学经验,合理设置课程,有效整合“医学”和“理学”各自的优势,力争将眼科学和视光学有机地结合在一起,并强调本套教材的眼视光学专业特色;
3. 对上一轮教材中存在的交叉、重复的内容进行了整体性的合理规划,力争予以明确界定与说明,对部分难以界定的内容,编写时注重了编写角度与侧

重点的差异；

4. 适应教学的需求,进一步实现教材的系列化建设,部分教材配有《实训指导》,且与教材同期出版;

5. 在尽量不增加学生负担的前提下,提高印刷装帧质量,根据学科需要与教材实际编写情况,部分教材改为彩色印刷,以提升教材的质量与可读性;

6. 依然坚持教材编写的“三基、五性、三特定”的原则;

7. 在保证学科体系完整性的前提下,突出教材的实用性,力求文字精练、篇幅适当,以适应眼视光学教育的特点与需求。

第二轮教材共 13 本。将第一轮教材中《眼视光影像学》的内容整合到相关的教材中,不再单独编写;新增《斜视弱视学》,并将原有的《双眼视觉学》中有关斜视弱视的内容移至该教材中;新增《眼视光应用光学》。本套教材均为卫生部“十二五”规划教材。

前 言

《眼视光应用光学》一书主要是为眼视光学和眼科学专业学生编写的光学教材，内容主要包括波动光学、几何光学成像、光学系统的光束限制、像差理论与像质评价、光度学与色度学基础、人眼的光学和目视光学仪器等。

光学是一门既久远又很现代的学科，是理论和实践相结合的学科。本书借鉴了编者十几年从事眼视光和光学的教学经验和体会，力图结合眼视光学和眼科学的实际需要布局相关光学知识。在光学公式的使用上注重一般光学和眼球光学相同公式不同表述形式的介绍，以便读者深入地理解和应用。本书的另一个特点是考虑与相关教材，如《眼镜学》和《屈光手术学》等的衔接，为相关教材涉及的光学问题作了较好的铺垫。

本书可作为眼视光专业学生的光学教材，也可作为眼视光专业教师和相关眼科医生的参考书。

应该指出，尽管编者尽了较大的努力，但由于各种主客观的原因，肯定存在各种不足，希望读者予以批评指正，以利于进一步完善。

在本教材编写过程中，编写秘书张艳龙老师在文稿收集、文字整理、插图设计等方面做出了很大的努力，这里表示衷心的感谢。

编 者

天津医科大学眼视光学院

2011年5月8日

目 录

第一章 波动光学基础	1
第一节 光源：光的相干性	2
一、光源.....	2
二、光的单色性.....	2
三、光的相干性.....	3
四、相干光的获得.....	3
第二节 光的干涉	3
一、波的叠加原理.....	3
二、光程与光程差.....	4
三、杨氏双缝实验.....	4
四、劳埃德镜实验.....	7
五、薄膜干涉.....	7
第三节 光的衍射	9
一、单缝衍射.....	9
二、圆孔衍射.....	11
三、光学仪器的分辨本领.....	12
四、光栅衍射.....	14
第四节 光的偏振	15
一、自然光与偏振光.....	15
二、马吕斯定律.....	17
三、布儒斯特定律.....	18
四、光的双折射.....	19
五、二向色性.....	21
六、物质的旋光性.....	22
第五节 光的散射	23
一、瑞利散射定律.....	24
二、米散射.....	24
三、喇曼散射.....	24

四、布里渊散射	25
第六节 傅里叶光学基础	25
一、概述	25
二、傅里叶光学的几个基本概念	26
三、傅里叶变换	27
四、傅里叶变换在光学成像中的应用	28
第二章 几何光学成像	30
第一节 基本概念与基本原理	30
一、光线	30
二、光束	30
三、折射率	32
四、光的直线传播定律	32
五、光的独立传播定律	32
六、光的反射定律和折射定律	32
七、光路可逆性原理	34
八、费马原理	34
九、成像的基本条件	35
十、符号规则	37
第二节 近轴光学系统成像	37
一、平面光学系统成像	37
二、薄棱镜片(光楔)	43
三、棱镜片焦距	44
四、球面光学系统近轴成像	45
五、透镜光学系统成像	54
第三节 理想光学系统成像	68
一、理想光学系统的基点和基面	69
二、理想光学系统成像	70
三、理想光学系统的组合	73
第三章 光学系统的光束限制	78
第一节 孔径光阑与视场光阑	78
一、孔径光阑与光瞳	79
二、视场光阑与窗	81
三、渐晕	82
第二节 景深与焦深	82
一、光瞳中心为基准点的成像公式	82
二、景深公式	83
三、焦深公式	85
第三节 远心光路	86

一、物方远心光路	86
二、像方远心光路	87
第四章 像差理论与像质评价	89
第一节 基本概念	89
第二节 光线的光路计算	90
一、近轴光线的光路计算	91
二、轴上点远轴光线的光路计算	92
三、轴外点子午面内远轴光线的光路计算	93
四、轴外点沿主光线细光束的光路计算	95
第三节 球差	96
第四节 彗差	99
第五节 像散和场曲	102
一、像散	102
二、场曲	104
第六节 畸变	106
第七节 色差	108
一、位置色差	108
二、倍率色差	111
第八节 像差计算的谱线选择	113
第九节 波像差	114
一、轴上点的波像差	114
二、波像差的一般表示式	117
第十节 光学系统像质评价	118
一、斯特列尔 (Strehl) 判断	118
二、瑞利 (Reyleigh) 判断	120
三、分辨率	121
四、点列图	122
五、光学传递函数	123
六、其他像质评价方法	128
第五章 光度学与色度学基础	130
第一节 辐射度学量与光度学量	130
一、立体角	130
二、辐射通量	131
三、辐射强度	131
四、人眼的视见函数	132
五、光通量	133
六、发光强度	133
七、光照度	134

八、光亮度	134
九、光照度公式	135
十、发光强度余弦定律	136
第二节 光传播中的光度学量变化	137
一、均匀透明介质情形	137
二、折射情形	138
三、反射情形	139
第三节 成像系统像面的光照度	140
一、轴上点的光照度公式	140
二、轴外像点的光照度公式	141
第四节 颜色的概念和分类	142
一、颜色的概念	142
二、颜色的分类和特性	143
第五节 颜色混合和匹配	144
一、颜色混合与匹配实验	144
二、格拉斯曼颜色混合定律	145
三、颜色匹配方程	146
四、三刺激值	146
第六章 人眼的光学	148
第一节 人眼结构	148
一、人眼的屈光系统	148
二、人眼的感光系统	154
第二节 模型眼与简化眼	155
一、模型眼	155
二、简化眼	157
第三节 调节与屈光	158
一、调节	158
二、正视眼与非正视眼	159
三、人眼的远点、近点与明视距离	160
四、近视和远视眼的光学透镜矫正	162
第四节 人眼的分辨	163
一、视角	163
二、人眼的分辨极限	164
第五节 人眼的像差	165
一、人眼的几何像差	165
二、人眼的波像差	165
第六节 人工晶状体眼光学	168
一、人工晶状体的材料	168

二、人工晶状体焦度的计算	168
第七节 双眼视差	173
一、立体视觉	173
二、双眼视差	173
第七章 目视光学仪器	176
第一节 目视光学仪器的视放大率	176
第二节 放大镜	177
第三节 目镜	178
一、惠更斯目镜	179
二、冉斯登目镜	179
三、目视光学仪器的视度调节	180
第四节 显微镜光学系统	181
一、显微镜的视放大率	181
二、显微镜物镜的分辨极限	183
第五节 望远镜光学系统	184
一、望远镜的视放大率	184
二、折射式望远镜的分类	185
三、望远镜物镜的分辨本领	186
四、望远镜在低视力保健和康复中的应用	186
参考文献	188
中英文对照索引	190

第一章 波动光学基础

光是什么？

17 世纪初，笛卡儿最早提出了“光本性”的两种假说。一种假说认为，光是类似于微粒的一种物质；另一种假说认为，光是一种以“以太”为媒质的压力。从此，光的波动说与微粒说展开了长达三百多年的争论。牛顿、惠更斯、托马斯·杨、菲涅耳、马吕斯等多位著名科学家成为这一论战双方的主辩手，经过他们的不懈努力，揭开了遮盖在“光的本质”外面那层扑朔迷离的面纱。

1894 年，麦克斯韦提出“光是一种电磁波”，即光的电磁波动学说，它以大量无可辩驳的事实赢得了普遍公认。可以说，19 世纪波动学说达到尽善尽美的境界。

但是，在研究光与物质相互作用的过程中，发现有许多现象用光的电磁波动理论也难以解释。特别是黑体辐射和光电效应实验，发现光是不连续地被发射和被吸收的，光流具有不连续性的结构。

于是，普朗克在 1900 年提出了量子说，解释了黑体辐射。

1905 年，爱因斯坦又发展了普朗克的量子理论，提出了光量子的假设，成功地解释了光电效应。爱因斯坦认为，光是由一粒一粒的光量子(光子)组成的，即光具有粒子的特性。

1924 年，德布罗意大胆地创立了物质波动学说，指出波粒二象性是微观粒子的普遍属性，光也是如此，从而在量子力学和量子电动力学中，使光的波动性和微粒性辩证地统一起来。也就是说，光既具有粒子性，又具有波动性，光在传播时表现为波动性，而与物质作用时又表现为粒子性。

1927 年，杰默尔和后来的乔治·汤姆森在试验中证明了电子束具有波的性质。

在新的事实与理论面前，光的波动说与微粒说之争以“光具有波粒二象性”而落下了帷幕。

光是某一波段的电磁波。可见光的波长范围约为 390~760nm，不同波长的光给人以不同颜色的感觉。光的波动性寓于光的干涉、衍射、偏振等现象之中，以光的波动性为基础，研究光的传播规律的学科，称为波动光学。从理论上讲，可以将几何光学作为波动光学的近似学科和特例。

本章主要讨论光的干涉、衍射、偏振等现象，阐明其波动性质和基本规律，这些性质和规律不仅在理论上具有重要意义，而且在现代科学技术中有着广泛应用。随后，介绍光的散射。最后一节介绍傅里叶光学的基础知识。

第一节 光源:光的相干性

一、光源

能够辐射光能的物体称为光源。光源可分为普通光源和激光光源。从发光机制来看,普通光源的发光属于自发辐射,而激光光源的发光属于受激辐射。

普通光源按光的激发方式不同又可分为:热光源:是利用热能激发的光源,例如白炽灯;冷光源:是利用化学能、电能或光能激发的光源,例如磷的发光为化学发光,稀薄气体在通电时发出的辉光是一种电致发光,某些物质在可见光或紫外线照射下被激发光称光致发光。光致发光物质又分为荧光物质和磷物质两种,区别在于前者当外界光源撤去后立刻停止发光,而后者在外界光源移去后仍能持续发光。

下面以热光源为例,简单说明自发辐射产生的普通光源发光的原理。光源是由大量分子和原子构成的。在热光源中,由于受热能激发大量分子和原子从基态跃迁到激发态,但处于激发态的原子是不稳定的,它们在激发态的停留时间一般都非常短暂(大约在 10^{-8} 秒的数量级)。在不受外界的影响时,它们会自发地从激发态跃迁到基态,并释放出光子。这一过程叫做自发辐射(spontaneous emission)。这种辐射有两个特点:其一是随机性,各个原子的辐射都是自发地、独立地、随机地进行的,因而各个原子发射出的光波在频率、初相位、偏振态和传播方向上都彼此无关。其二是间歇性,每个分子或原子的发光是非连续的,每次发光持续时间很短(约 10^{-8} 秒),发出一列频率一定、振动方向一定、振幅恒定或振幅缓慢变化的光波列。普通光源发出的光都属于自发辐射,我们感受到的光源所发出的光就是这些大量的、断续的、无规则光波列作用的总效果。

二、光的单色性

具有单一频率的光称为单色光。但是光源中一个分子某瞬时所发的光并不是严格单色的,总有一定的频率宽度,如 $\nu \sim \nu + \Delta\nu$ 。频率宽度 $\Delta\nu$ 越小,其单色性越好。实际光源发光包括了由大量分子或原子所发的各种频率的光,这种由各种频率复合的光称为复色光,如太阳光、白炽灯光等。当复色光通过棱镜片时,由于不同频率的光在玻璃中的传播速度不同,折射率也不同,因此,各种不同频率的光将按不同的折射角分开,形成光谱,这种现象称为色散。实验室可以利用棱镜片获得单色光,或者利用某些具有选择吸收性的物质制成滤光片,复色光通过滤光片后,透射光就是所需的单色光。但这种单色光的单色性不够理想,较为理想的单色光由钠光源获得。钠光谱中包含两条波长为589.00nm和589.59nm的黄色谱线(D线),它们靠得很近,其频率可认为近似相同。因此,钠光可看做单色光。

不同光源有不同的光谱。光强在很大的波长范围内连续分布的光谱称为连续光谱,如热辐射光源光谱。光强集中在一些分立的波长值附近形成的光谱叫做线光谱,如钠灯光谱D双线。不同化学成分各自有不同的特征谱线。每条谱线只是近似的单色光。每条谱线光强分布有一定的波长范围 $\Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 称为谱线宽度, $\Delta\lambda$ 越小,光的单色性越好。太阳光谱除了一些暗线外,基本上是连续光谱。太阳发出的各种波长的可见光混合起来给人的感觉是白色,光学中称为白光。因此,光学中的白光是指具有和太阳连续光相近

的多色混合光。

三、光的相干性

在学习机械波的干涉现象时,已经知道,只有满足相干条件——频率相同、振动方向相同、位相差保持恒定的两列波在叠加区域才能产生干涉。对于机械波来说,上述条件比较容易满足。例如,利用两个频率完全相同的音叉就可以演示声波的干涉现象,所以,观察机械波的干涉现象比较容易。

但是对于光波,普通光源很难满足相干条件,这是由于光源发光本质的复杂性所决定的。普通光源发出的光是由大量原子或分子随机辐射的一系列有限长度的波列所组成的,其振动方向和初相位以及频率是彼此独立、随机分布的。另一方面,分子或原子的发光是间歇的,即发出一波列(持续时间约 10^{-8} 秒,长度约为 3m)之后,要间歇若干时间,再发出另一波列。因此,两光源发出的光在空间任一点叠加时,只能观察到一个平均光强度,而观察不到明显、稳定的干涉现象。所以,由大量波列组成的光束,不能保持固定的振动方向和初相位。不仅来自两个独立光源的光波不能相互干涉,即使同一光源不同部分发出的光波也不可能产生干涉现象。

要实现光的干涉,必须满足光的相干条件:

(1)频率相同的两光波在相遇点有相同的振动方向和恒定的相位差。这是产生光的干涉的必要条件,满足本条件的光称为相干光(coherent light),能发出相干光的光源称为相干光源(coherent source)。但是只满足此条件还不一定能获得干涉现象;为确保产生明显的干涉现象,还须满足以下两个补充条件:

(2)两光波在相遇点所产生的振动的振幅相差不悬殊。否则,将观察不到明显的干涉条纹。

(3)两光波在相遇点的光程差不能太大。否则一光波的波列已通过,而另一光波的相应波列尚未到达,则两波列之间没有重叠,不能产生干涉现象。能够产生干涉现象的最大光程差称为相干长度(coherent length),相干长度等于一个波列的长度。光源的单色性越好,波列的长度就越长,相干长度也就越大,光源的相干性就越好。激光具有很高的单色性,其相干长度比普通单色光源的相干长度大得多,它是目前最好的相干光源。

四、相干光的获得

要从普通光源上获得相干光,必须将同一光源发出的光波,在同一波阵面上分成两列(或多列)光波,经过不同路径在空间任一点叠加时,必定满足频率相同、振动方向相同、位相差保持恒定的条件,就能够产生明显、稳定的干涉现象。通常有两种方法获得相干光,一种是分波阵面法,如杨氏双缝实验等;另一种是分振幅法,如薄膜干涉等。

另外,由受激辐射产生的激光是一种很好的相干光。

第二节 光的干涉

一、波的叠加原理

大量事实证明,从几个波源产生的波在同一介质中传播时,无论它们相遇与否,都保持

自己原有的特性,即频率不变、波长不变、振动方向不变,各列波都按自己原来传播的方向继续前进,不受其他波的影响;在相遇处,每个质点的位移是各列波单独在该点所产生的位移的矢量和。这种波动传播的独立性和可叠加性叫做波的叠加原理(superposition principle of wave)。例如,听乐队演奏时,各种乐器的声音保持原有的音色,我们能够从中辨别出来。

二、光程与光程差

在分析光波的叠加时,参与叠加的光波的相位差是一个十分重要的参数。为了方便地比较和计算光经过不同介质时引起的相位差,需要引入光程和光程差的概念。

光在介质中传播的速度与介质的折射率有关,而光波的频率不变。因此,在相同时间内光在不同介质中传播的几何路程不相等。设单色光在真空和介质中传播的速度分别为 c 和 v ,则介质的折射率

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

设在 t 秒内,光在真空中传播的路程为 L ,在介质(折射率为 n)中传播的几何路程为 x ,则有 $t = \frac{L}{c} = \frac{x}{v}$,再考虑到式(1-1)后得

$$L = nx \quad (1-2)$$

上式中 $L = nx$,即折射率和几何路程的乘积,叫做光程(optical path)。可见,光程是把光在介质中传输的路程折合为光在真空中传输的相应路程。引入光程以后,在分析光波传播到空间任一点的相位或相位变化时更为简捷。光程之差称为光程差。

光程差和相位差有什么关系呢?在学习机械波时,已经知道两列相干波在某点的相位差和波程差的关系。类似地,如图 1-1,从光源 S_1 、 S_2 发出的两列相干光波分别经过折射率为 n_1 、 n_2 的介质,路程分别为 x_1 、 x_2 后相遇在 P 点,它们的光程差和相位差的关系为

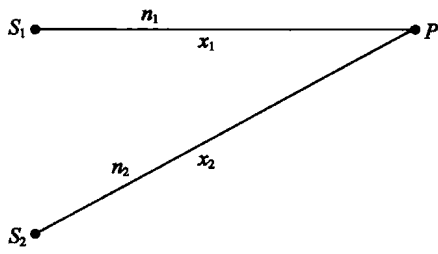


图 1-1 光程和光程差

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{n_2 x_2 - n_1 x_1}{\lambda} + \varphi_{02} - \varphi_{01} = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} + \varphi_{02} - \varphi_{01} \quad (1-3)$$

式中 φ_{01} 、 φ_{02} 分别是两列光波的初相位, $\delta = n_2 x_2 - n_1 x_1$ 是两列光波的光程差。

三、杨氏双缝实验

1801年,托马斯·杨(Thomas Young,英国物理学家、医生)以极简单的装置和巧妙的构思首先实现了光的干涉,并用光的波动性解释了干涉现象。杨氏实验不仅是许多其他光的干涉装置的原型,在理论上还可以从中提取许多重要的概念和启发,无论从经典光学还是现代光学的角度来看,它都具有十分重要的意义。杨氏实验的原理如图 1-2 所示,在普通单色光源前放一狭缝 S,作为单色点光源;S 前又放有与 S 平行而且等距离的两条平行狭缝 S_1 和 S_2 。根据惠更斯原理, S_1 、 S_2 形成两个新的相干光源,由 S_1 和 S_2 发出的光波在空间相遇,产生干涉现象,在屏幕 AC 上形成如图 1-3(A)所示的稳定的明暗相间的干涉条纹。图 1-3(B)是与干涉条纹对应的光强度关于方向角 θ 分布的曲线。历史上,杨氏实验是导致光的波

动理论被普遍承认的一个决定性实验。

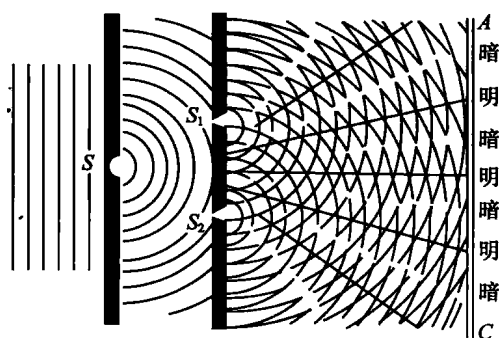


图 1-2 杨氏实验

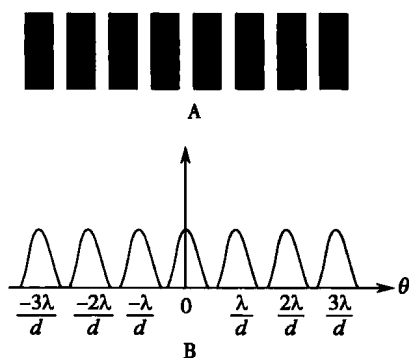


图 1-3 杨氏双缝干涉条纹

下面分析杨氏双缝干涉条纹。设光源是波长为 λ 的单色光,两缝处的光波同相振动,如图 1-4 所示,设 S_1 、 S_2 间的距离为 d ,其中点为 M ,从 M 到屏幕 AC 的距离为 D ,且 $D \gg d$ 。在屏幕上任意取一点 P , P 与 S_1 和 S_2 间的距离分别为 r_1 和 r_2 , P 到屏幕的中心点 O 的距离为 x ;显然, MO 是 S_1S_2 的中垂线, θ 为 PM 与 MO 之间的夹角。通常情况下,观察到干涉条纹时, θ 很小,满足: $\sin\theta \approx \tan\theta$ 。因此,由 S_1 、 S_2 所发出的光波到 P 点的光程差为

$$\delta = r_2 - r_1 \approx d \sin\theta \approx d \tan\theta \approx d \frac{x}{D}$$

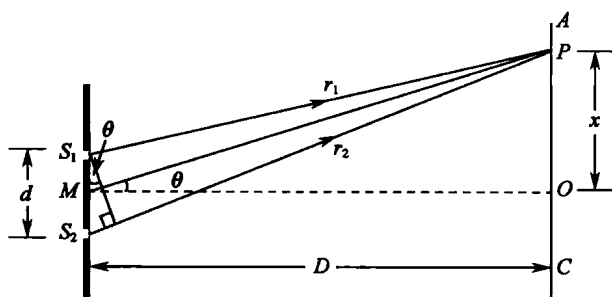


图 1-4 干涉条纹推导

则两光波在 P 点加强(光强为极大),即 P 点处出现亮条纹的条件是

$$\delta = d \sin\theta = \pm k\lambda, \text{ 或 } x = \pm k \frac{D}{d} \lambda, k=0,1,2,\dots \quad (1-4)$$

式中 k 为干涉的级数,当 $k=0$ 时, $x=0$,即在 O 点处出现亮条纹,称为中央亮条纹或称零级亮条纹。与 $k=1,2,\dots$ 对应的亮条纹分别称为第一级,第二级, \dots 亮条纹。式中的正、负号表示条纹在中央亮条纹两侧对称分布。

两光波在 P 点互相削弱(光强为极小),即 P 点处出现暗条纹的条件是

$$\delta = d \sin\theta = \pm (2k-1) \frac{\lambda}{2}, \text{ 或 } x = \pm (2k-1) \frac{D}{d} \frac{\lambda}{2}, k=1,2,3,\dots \quad (1-5)$$

与 $k=1,2,3,\dots$ 对应的暗条纹分别称为第一级,第二级,第三级, \dots 暗条纹。明暗条纹关于中央亮纹对称分布,由式(1-4)和式(1-5)可算出相邻亮条纹或暗条纹间的距离,即条纹间距为

$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda \quad (1-6)$$

式(1-6)表明:① Δx 与 k 无关,因此干涉条纹是等间距分布的。②由于光波波长 λ 很短,两缝间距 d 必须足够小,从两缝到屏的距离 D 必须足够大,才能使条纹间距 Δx 大到可以用肉眼分辨清楚。③用不同波长的单色光源作实验时,条纹的间距不相同,波长短的单色光,条纹间距小;波长长的单色光,条纹间距大。如果用白光做实验,只有中央亮条纹是白色的,其他各级都是由紫到红的彩色条纹。白光干涉的这一特点提供了判断零级干涉条纹的可能性,在干涉测量中常用到它。

光波传播方向上任一点的光强度 I 通常被定义为该点光振动振幅的平方,即

$$I = A^2 \quad (1-7)$$

在图1-4中,由 S_1 和 S_2 发出的两列光波到达光屏P点处的合振动可用波的叠加原理求得。P点的合振幅的平方为

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\Delta\varphi \quad (1-8)$$

式中 $\Delta\varphi = 2\pi(S_2P - S_1P)/\lambda = 2\pi\delta/\lambda$ 是两列光波在P点的相位差, δ 是光程差。

由式(1-7)和式(1-8),可得P点的光强度

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi \quad (1-9)$$

式中 I_1 、 I_2 分别是两列光波单独在P点的光强度。当相位差 $\Delta\varphi = 2k\pi$ ($k=0,1,2,3,\dots$)时,P点的光强度得到最大值

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}$$

当相位差 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$, ($k=0,1,2,3,\dots$)时,P点的光强度得到最小值

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}$$

若相位差介于两者之间,则P点光强度在两极值之间,由式(1-9)决定。若两光波单独在P点产生的光强度相等,即 $I_1 = I_2$,则两光波叠加后在P点的光强度

$$I = 2I_1 + 2I_1\cos\Delta\varphi = 2I_1(1 + \cos\Delta\varphi) = 4I_1\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2} \quad (1-10)$$

上式表明,此时干涉条纹的光强度随相位差一半的余弦平方而变化,最大值为单独一列光波在该点光强度的4倍,而最小值为零。

例 1-1 如图1-5所示,在杨氏双缝实验中,若用He-Ne激光(波长为632.8nm)直接照射双缝,双缝间距为0.50mm,缝和屏幕的相距2.0m。(1)问条纹间距是入射光波长的多少倍?(2)若以折射率 $n = 1.3164$,厚度 $l = 0.011\text{mm}$ 的透明薄膜遮住其中的一缝,问在原来的中央亮纹处,将变为亮条纹还是暗纹?是第几级条纹?

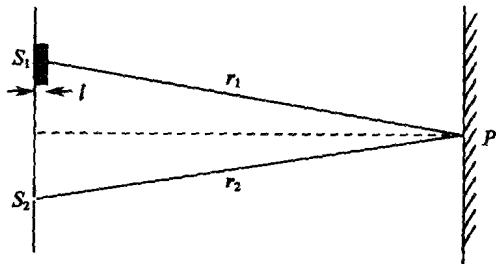


图 1-5 例题 1-1

解:(1)由公式(1-6), $\Delta x = \frac{D}{d}\lambda$,得

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = \frac{D}{d} = \frac{2.0}{0.5 \times 10^{-3}} = 4000 \text{ 倍}$$

(2)未遮薄膜时,中央亮纹处的光程差为 $\delta = r_1 - r_2 = 0$;遮上薄膜后,光程差为

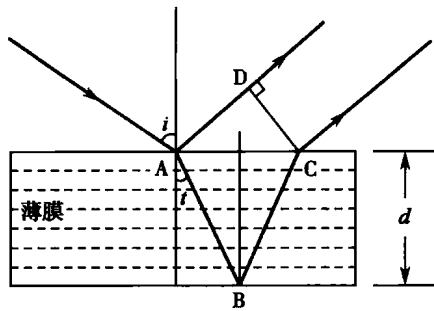


图 1-7 薄膜干涉

$n_1 AD = n_1 AC \sin i = (2d \tan t) n_2 \sin t = 2n_2 d \frac{\sin^2 t}{\cos t} = 2n_2 d (1 - \cos^2 t) / \cos t$
而

$$n_2 \cos t = \sqrt{n_2^2 - n_2^2 \sin^2 t} = \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$$

最后整理得

$$\delta = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} - \lambda/2$$

两束反射光在相遇点是亮(互相加强)还是暗(互相削弱)的条件是

$$\delta = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} - \lambda/2 = \begin{cases} k\lambda & \text{(亮)} \\ (2k+1) \frac{\lambda}{2} & \text{(暗)} \end{cases} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1-11)$$

在薄膜干涉的实际应用中,采用最多的是正入射方式,即 $i=0$ 。由式(1-11)知,此时两反射光互相加强(亮)或互相削弱(暗)的条件是

$$n_2 d = \begin{cases} (2k+1) \frac{\lambda}{4} & \text{(亮)} \\ 2k \frac{\lambda}{4} & \text{(暗)} \end{cases} \quad (k=0, 1, 2, 3, \dots) \quad (1-12)$$

由式(1-12)知,正入射方式下,当薄膜的光学厚度($n_2 d$)等于 $1/4$ 波长($\lambda/4$)的整数倍时,反射光强将出现极值;是极小值(反射光互相削弱),还是极大值(反射光互相加强)有赖于薄膜外的介质。当薄膜折射率小于膜外介质的折射率时,虽然前表面的反射没有半波损失,但后表面的反射却有半波损失,因此削弱和加强的条件仍然适用。如果薄膜的折射率介于前后介质的折射率之间,则加强和削弱的条件就要对调一下。

例 1-2 为提高成像质量,照相机的透镜上可镀一层增透膜(也称为减反射膜),以减少表面的反射,使更多的光进入透镜。常用的镀膜物质是氟化镁(MgF_2),其折射率 $n=1.38$ 。如果要使可见光谱中 $\lambda=550\text{nm}$ 的光有最小反射,问膜的最小厚度应是多少?

解: 光线入射照相机镜头,可视为正入射,(图 1-8 中入射角接近于零)。由于两次反射都有半波损失,因此两反射光波互相削弱的条件是

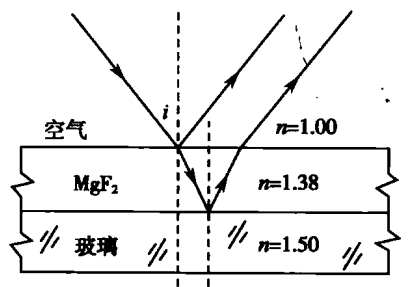


图 1-8 例题 1-2

$$nd = (2k+1) \frac{\lambda}{4}$$