



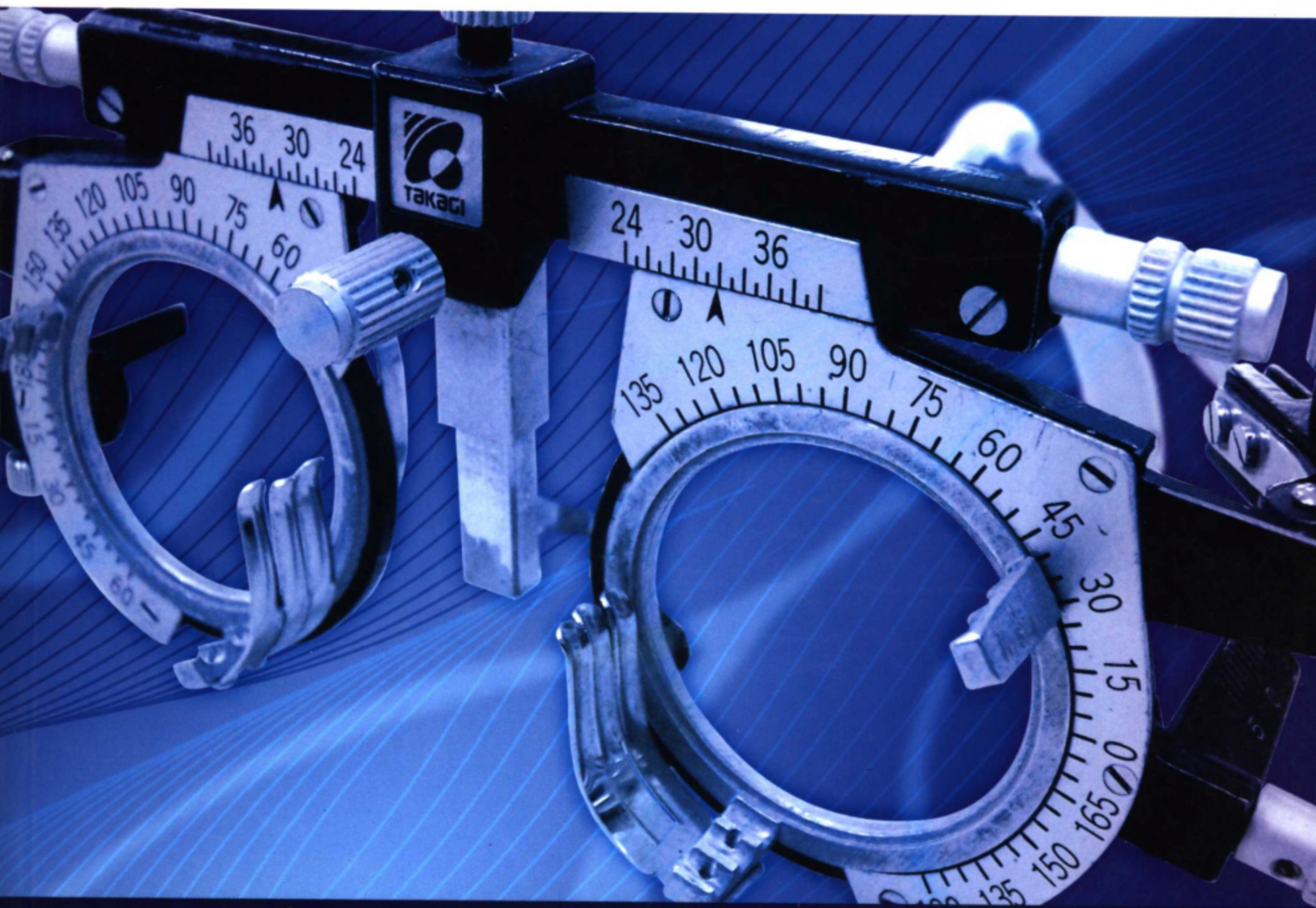
PUTONG GAODENG ZHIYE JIAOYU JIAOCAI


• 普通高等职业教育教材 •

# 验光配镜

y a n g g u a n g   p e i j i n g

吴柳庭 主编   王力书 王海英 副主编   梅满海 主审



 中国轻工业出版社

ZHONGGUO QINGGONGYE CHUBANSHE



PUTONG GAODENG ZHIYE JIAOYU JIAOCAI

• 普通高等职业教育教材 •

# 验光配镜

y a n g u a n g   p e i j i n g

ISBN 7-5019-5376-7



9 787501 953769 >

上架建议：视光技术

ISBN 7-5019-5376-7/TS · 3130

定价：36.00元


普通高等学校职业教育教材

# 验 光 配 镜

吴柳庭 主编

王力书 王海英 副主编

梅满海 主审

 中国轻工业出版社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

验光配镜/吴柳庭主编. —北京: 中国轻工业出版社,  
2006. 7

普通高等学校职业教育教材

ISBN 7-5019-5376-7

I. 验... II. 吴... III. 眼镜检法-高等学校:  
技术学校-教材 IV. R778. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 035516 号

责任编辑: 王 淳

策划编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 刘 鹏

版式设计: 马金路 责任校对: 李 靖 责任监印: 胡 兵

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市世纪兴源印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2006 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 24. 5

字 数: 550 千字

书 号: ISBN 7-5019-5376-7/TS·3130 定价: 36.00 元

读者服务部邮购热线电话: 010—65241695 85111729 传真: 85111730

发行电话: 010—85119817 65128898 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: [club@chlip.com.cn](mailto:club@chlip.com.cn)

如发现图书残缺请直接与我社读者服务部联系调换

60113J4X101ZBW

## 前 言

本书是根据天津职业大学视光工程专业教师多年的教学和临床实践经验编写的，是专门供视光眼镜技术专业教学和视光工作者系统学习验光配镜理论的教材。

随着改革开放的不断深入和我国人民文化素质的不断提高，近视工作者人数日益增多，视力异常者数量也随之增加。据有关资料显示，我国屈光不正患者、老视患者共有四五亿之多，而我国眼屈光检查及眼屈光的光学矫正的水平与国际先进水平尚有差距。为保障全国人民的视力健康，提高生活和工作的质量，必须提高眼视光、眼镜行业工作者的素质。

本书适应国内视光眼镜发展形势的需要，介绍了光学的基本理论和验光配镜实践中的一些问题。基本理论的课程内容包括：波动光学、几何光学基础知识，矫正远视、近视、散光、老视、眼位不正等所需的球面透镜、柱面透镜、棱镜、多焦点镜片、镜片设计、特殊眼镜设计等基础理论与计算。验光配镜的实践部分讲解了镀膜眼镜和偏光镜的原理和优点；镜片的等效度；矫正镜的放大率；双眼屈光参差的配镜原则和技巧等知识。屈光学理论包括：视觉器官的解剖和生理；临床屈光不正；屈光检查和双眼视觉功能的检查。验光配镜的课程内容包括：眼的客观检查（检影法和电脑验光）；眼的主观检查（各种主观检查法的原理和步骤及综合验光仪的构成及应用）和隐形眼镜的验配。

在教材的编写中，我们特别注意教材的系统性、科学性和适用性；结合高职教育和验光配镜的实际，删除了偏深偏难的内容。为了加深学习者对教学内容的理解，每章后配有习题，难题附有答案。

本书由天津职业大学视光技术专业吴柳庭老师主编，王立书、王海英老师为副主编。吴柳庭编写第一章至第十五章，王海英编写第十六章至第十九章和第二十二章，王立书编写第二十章和第二十一章。梅满海老师主审。

眼视光技术专业在我国还很年轻，希望我们编写的《验光配镜》一书，能对眼视光技术专业师生和广大验光配镜工作者系统学习配镜知识有所帮助。由于编者水平所限，书中不妥之处，恳请使用本教材的师生和视光工作者予以批评指正，在本书编写过程中得到陈新生、孙晖、曾光廷、牛玉丽、李峰、王德滨、赖建男、高波、毛海青、高庆梁、宋柏艳、王宇、诸葛晓舟、徐兵、吴卫荣、魏宝燕、邱敏、徐刚、袁洪岭、张亮、杨雪、王瑞、黄定明、黄益华、王恭堂、李尚武、姚晓平、李平、刘克武、孙建等老师的意见和资料，并感谢他们所在学校：南京金陵职业技术学校、上海浦东新区振东职业技术学校、万里路视光职业技术学校、大连科威视光技术职业技术学校、南京工程高等职业技术学校、常州铁道高等职业技术学校、商洛职业技术学校、上海市南湖职业技术学校、盐城生物与信息高等职业技术学校、武汉钢铁（集团）公司中等职业技术学校、龙海市第一职业技术学校、湖北同济康丽眼视光培训学校、广东省江门中医药学校、台州职业技术学校、郴州科龙职业技术学校、金陵眼镜职业技术学校、江阴市陆金标科技学校全日制职业技术学校、黑龙江建筑职业技术学校、肇庆市工业贸易职业技术学校的支持。

主编：吴柳庭  
2006.3

# 目 录

## 第一篇 波动光学

<b>第一章 波动光学</b> .....	1
第一节 光的电磁特性 .....	1
第二节 增透膜 .....	3
第三节 光的衍射 .....	6
第四节 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 .....	9
第五节 自然光 偏振光 马吕斯定律 .....	11
第六节 反射和折射时光的偏振 .....	14
第七节 旋光现象 .....	16
第八节 双折射 偏振棱镜 偏振片 .....	16
第九节 偏振光的干涉 人为双折射现象 .....	18
习题 .....	20

## 第二篇 几何光学

<b>第二章 几何光学</b> .....	22
第一节 基本概念 .....	22
第二节 几何光学基本定律 .....	24
第三节 符号规则 .....	25
习题 .....	26
<b>第三章 球面和球面系统</b> .....	27
第一节 光线经过单个球面的折射 .....	27
第二节 单个折射球面成像的放大率 .....	30
第三节 共轴球面系统 .....	31
第四节 球面反射镜 .....	33
习题 .....	35
<b>第四章 理想光学系统</b> .....	36
第一节 理想光学系统 物像之间的共轭性 .....	36
第二节 理想光学系统的基点和基面 .....	36
第三节 理想光学系统的物像关系 .....	39
第四节 共轴光学系统的组合 .....	43
第五节 标准眼、模型眼、简化眼和模拟眼 .....	47
第六节 透镜和薄透镜 .....	49
习题 .....	51
<b>第五章 平面镜棱镜系统</b> .....	52
第一节 平面镜成像 .....	52
第二节 平行平板 .....	54

第三节	反射棱镜	55
第四节	折射棱镜及光楔	58
习题		60
<b>第六章</b>	<b>光学系统中的光束限制和像差</b>	<b>61</b>
第一节	光学系统中的光阑和孔径光阑	61
第二节	光学系统中的视场光阑	64
第三节	渐晕光阑	65
第四节	消杂光光阑	67
第五节	光学系统的景深	67
第六节	几何像差 波像差	70
第七节	球差与彗差	71
第八节	像散和像面弯曲(场曲)	74
第九节	畸变	75
第十节	色差	76
第十一节	像差综述	79
习题		80
<b>第七章</b>	<b>光度学基础</b>	<b>81</b>
第一节	辐射量和光学量及其单位	81
第二节	光传播过程中光学量的变化规律	85
第三节	光通过光学系统时的能量损失	87
习题		88

### 第三篇 眼镜光学

<b>第八章</b>	<b>球面透镜</b>	<b>90</b>
第一节	矫正眼镜的作用原理	90
第二节	球面透镜的概念	92
第三节	球面透镜的联合与转换	95
第四节	眼镜片光焦度的临床测定法	97
习题		101
<b>第九章</b>	<b>圆柱透镜与眼</b>	<b>102</b>
第一节	圆柱透镜的基本知识	102
第二节	圆柱透镜的联合	107
第三节	两圆柱透镜轴向斜交密贴叠合	110
第四节	圆柱透镜的光学恒等变换	117
第五节	球柱透镜的成像	121
第六节	顶焦度仪	124
第七节	散光及其矫正	127
第八节	残余散光	132
第九节	Jackson 交叉圆柱透镜在验配散光眼中的应用	136
第十节	透镜的厚度	139
习题		142

<b>第十章 眼科棱镜</b>	145
第一节 棱镜概述	145
第二节 棱镜厚度差	150
第三节 棱镜矢量	151
第四节 视近棱镜的有效棱镜度	153
第五节 球面透镜的棱镜效果	155
第六节 球柱透镜的棱镜效果	158
第七节 解析法求透镜移心的棱镜效果	162
第八节 眼镜的棱镜效果所致生的几种常见现象	164
第九节 眼镜偏心和眼球回转角	169
习题	172
<b>第十一章 镜眼距</b>	174
第一节 镜眼距和等效度	174
第二节 老视和近用镜	177
第三节 镜眼距和主点移位	182
习题	184
<b>第十二章 矫正眼镜的放大作用</b>	185
第一节 矫正眼镜的放大倍率	185
第二节 矫正眼镜的相对放大倍率	189
第三节 散光矫正眼镜的放大与视物变形	191
习题	195
<b>第十三章 眼镜片设计</b>	196
第一节 眼镜片设计概念	196
第二节 垂轴色差和畸变	197
第三节 像散	198
第四节 场曲	201
第五节 球柱面和环曲面镜片	203
第六节 眼镜倾斜的屈光改变	206
习题	207
<b>第十四章 双焦及多焦眼镜</b>	208
第一节 双焦眼镜	208
第二节 像跳和像位移	213
第三节 三焦点镜	217
第四节 渐变光眼镜	219
习题	222
<b>第十五章 几种特殊眼镜</b>	224
第一节 镜片的大小和视场	224
第二节 高光焦度缩径镜片和双心镜片	225
第三节 等像眼镜	230
第四节 Fresnel 眼镜	234



## 第四篇 屈 光 学

<b>第十六章</b>	<b>视觉器官的解剖和生理</b> .....	239
第一节	眼球的解剖和生理 .....	239
第二节	视路及瞳孔反射路 .....	245
第三节	眼附属器的解剖和生理 .....	246
<b>第十七章</b>	<b>临床屈光不正</b> .....	251
第一节	总论 .....	251
第二节	远视眼 .....	252
第三节	近视眼 .....	254
第四节	散光眼 .....	257
第五节	屈光参差 .....	258
<b>第十八章</b>	<b>屈光检查</b> .....	260
第一节	病史 .....	260
第二节	视力检查 .....	262
第三节	色觉的检查 .....	264
第四节	立体视 .....	266
第五节	眼球运动的检查 .....	268
第六节	眼位检查 .....	269
第七节	瞳孔反射的检查 .....	272
第八节	视野的检查 .....	273
第九节	调节功能的测试 .....	275
第十节	集合功能的测试 .....	279
第十一节	AC/A 的检查 .....	281
习题	.....	283
<b>第十九章</b>	<b>双眼视觉</b> .....	284
第一节	调节 .....	284
第二节	集合 .....	284
第三节	双眼视觉定义及条件 .....	286
第四节	双眼视觉分级及生理机制 .....	288
第五节	双眼视觉异常的临床分析方法 .....	290
第六节	双眼视分析图表法的法则 .....	292
第七节	非斜视性双眼视异常的种类及临床表现 .....	293
第八节	非斜视性双眼视异常的处理原则 .....	295
习题	.....	299

## 第五篇 验 光 篇

<b>第二十章</b>	<b>眼的客观检查</b> .....	300
第一节	客观检查概述 .....	300
第二节	电脑验光 .....	300
第三节	检影验光概述 .....	301

第四节	单纯近视、远视影动特点及检影方法 .....	307
第五节	含有散光的影动特点及检影方法 .....	309
习题	.....	315
<b>第二十一章</b>	<b>眼的主观检查 .....</b>	<b>316</b>
第一节	视力检查 .....	316
第二节	雾视法 .....	317
第三节	两色法实验, 红绿视标检查 .....	319
第四节	散光表检查 .....	321
第五节	裂隙片检查 .....	323
第六节	交叉圆柱镜检查 .....	325
第七节	插片验光法及试戴调试 .....	329
第八节	综合验光仪的构成及应用 .....	331
第九节	瞳距及测量方法 .....	342
第十节	处方及配镜原则 .....	345
习题	.....	348
<b>第二十二章</b>	<b>隐形眼镜 .....</b>	<b>350</b>
第一节	隐形眼镜的一般认识 .....	350
第二节	角膜的氧代谢 .....	355
第三节	隐形眼镜配前检查 .....	357
第四节	软性隐形眼镜的验配 .....	366
第五节	半硬性透气性隐形眼镜的验配 .....	371
第六节	与隐形眼镜相关的并发症 .....	375
习题	.....	380

# 第一篇 波动光学

## 第一章 波动光学

本章主要内容是介绍光电磁波性质和光干涉、衍射和光的偏振现象在验光配镜中的应用。

### 第一节 光的电磁特性

#### 一、光是电磁波

1864年英国物理学家麦克斯韦在总结前人研究成果的基础上，进行了创造性的诠释、推广和补充，建立了经典的电磁理论。根据这一理论，他预言了电磁波的存在。与此同时，他把光现象和电磁现象联系起来，提出光是频率介于某一范围内的电磁波，从而产生了光的电磁理论。1886~1888年德国物理学家赫兹进行了一系列实验，用人为的方法获得了电磁波，用实验证实了电磁波与光波有类似的性质，如反射、折射、干涉、衍射、偏振等，并测出电磁波的速度等于光速，使麦克斯韦的电磁理论逐步为人们所承认。无线电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和 $\gamma$ 射线都是电磁波。这些电磁波的本质相同，只是由于频率（或波长）不同，而呈现不同的特性。在图1-1-1中，按照电磁波波长（或频率）的大小，把它们依次排成一个谱，这个谱称为电磁波谱。

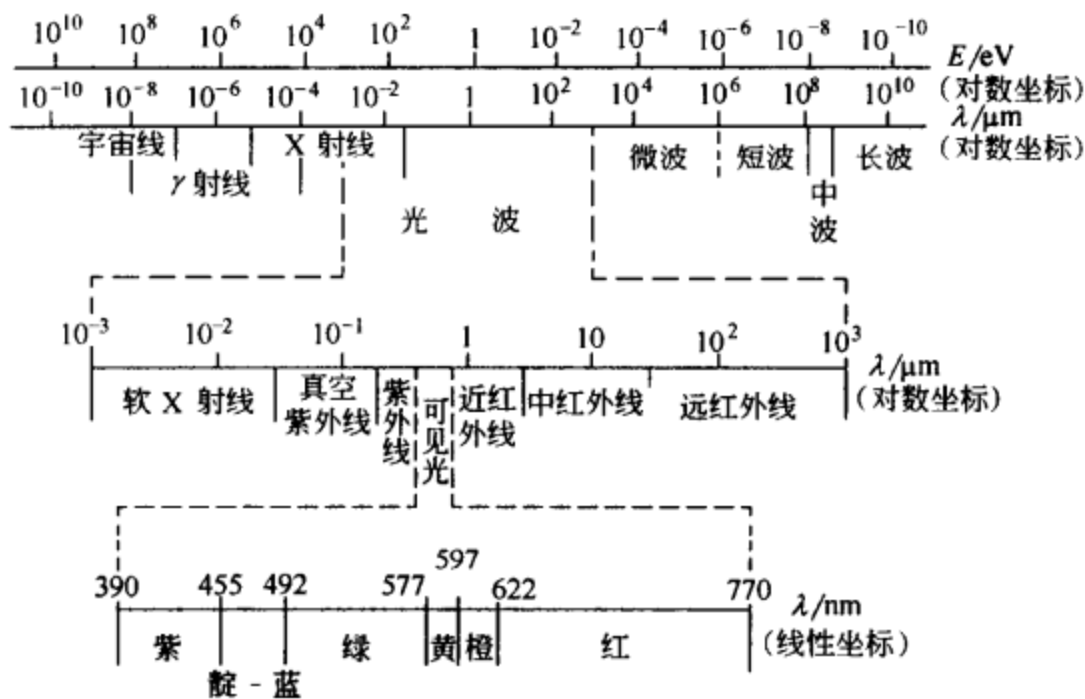


图 1-1-1 电磁波谱

如图1-1-1所示，通常所说的光学区（或光学频谱），包括紫外线，可见光和红外线，波长范围 $10^{-1} \sim 10^3 \mu\text{m}$ ，可见光是人的眼睛可以感觉到的各种颜色的光波，波长 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ （即波长 $380 \sim 780 \text{nm}$ ）。紫外线和红外线则不能引起视觉。表1-1-1进一步明确各种光的波长范围。

根据电磁理论计算，真空中电磁波的传播速度是一恒量，用 $c$ 表示。

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

式中 $\epsilon_0$ 为真空电容率， $\mu_0$ 为真空磁导率。目前，真空中光速的实验测定结果是 $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

表 1-1-1

光学区各种光的波长范围

区域名称	波长范围/m	颜色或区域名称
紫外区	$1 \times 10^{-7} \sim 2 \times 10^{-7}$	真空紫外
	$2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-7}$	远紫外
	$3 \times 10^{-7} \sim 3.8 \times 10^{-7}$	近紫外
可见光区	$3.8 \times 10^{-7} \sim 4.5 \times 10^{-7}$	紫
	$4.5 \times 10^{-7} \sim 4.8 \times 10^{-7}$	蓝
	$4.8 \times 10^{-7} \sim 5.5 \times 10^{-7}$	绿
	$5.5 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7}$	黄
	$6 \times 10^{-7} \sim 6.4 \times 10^{-7}$	橙
	$6.4 \times 10^{-7} \sim 7.8 \times 10^{-7}$	红
红外区	$7.8 \times 10^{-7} \sim 15 \times 10^{-7}$	近红外
	$15 \times 10^{-7} \sim 100 \times 10^{-7}$	中红外
	$100 \times 10^{-7} \sim 10000 \times 10^{-7}$	远红外

光在均匀的、各向同性的介质中的速度  $v$  为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (1-1-2)$$

式中,  $\epsilon$  为介质的电容率,  $\mu$  为介质的磁导率。把真空中的光速  $c$  与透明介质中光的传播速度  $v$  的比值称为介质的折射率, 用  $n$  表示。

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (1-1-3)$$

式中,  $\epsilon_r$  为介质的相对电容率,  $\mu_r$  为介质的相对磁导率。

光在透明介质中传播时, 光速、频率与波长的关系为

$$v = \lambda_n \nu \quad (1-1-4)$$

式中,  $\lambda_n$  为光在介质中的波长,  $\nu$  为光的频率。光在真空中传播时, 频率不变, 仍然是  $\nu$ , 真空中的光速用  $c$  表示, 波长用  $\lambda$  表示, 据上式有

$$c = \lambda \nu \quad (1-1-5)$$

由式 (1-1-4)、式 (1-1-5) 和式 (1-1-3) 可得

$$\lambda_n = \frac{v}{c} \lambda = \frac{\lambda}{n} \quad (1-1-6)$$

上式表明, 光在介质中传播时, 其波长为光在真空中波长的  $\frac{1}{n}$  倍。

## 二、平面简谐电磁波的波动方程

讨论电磁波时, 最简单、最基本的是平面简谐电磁波。根据经典电磁理论, 它的波动方程和平面简谐机械波的波动方程有相似的形式。设一平面简谐电磁波在真空中沿  $X$  轴正方向传播, 任一点  $P$  (距原点

为  $x$  处) 的电场强度  $E$  和磁感强度  $B$  的振动可用如下波动方程表示。

$$\begin{aligned} E &= E_0 \cos 2\pi \left( \nu t - \frac{x}{\lambda} \right) \\ B &= B_0 \cos 2\pi \left( \nu t - \frac{x}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (1-1-7)$$

式中,  $E_0$  和  $B_0$  分别为电场强度和磁感强度的振幅,  $\nu$  为电磁波的频率,  $\lambda$  为电磁波的波长。当电磁波在介质中传播时, 上式中  $\lambda$  用电磁波在介质中的波长  $\lambda_n$  代替。电场强度  $E$  和磁感强度  $B$  相互

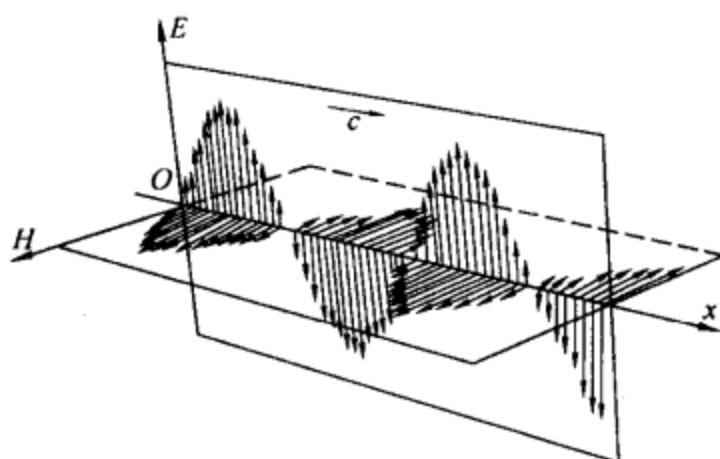


图 1-1-2 平面简谐电磁波

垂直，但两者都与电磁波的传播方向垂直，即电磁波是横波，如图 1-1-2 所示。由式 (1-1-7) 可知，电场强度  $E$  和磁感强度  $B$  在任意时刻都有相同的相位，它们的变化是同步的。

### 三、光 矢 量

在光波中，对人的眼睛或感光仪器（如照相机底片）起作用的主要是电场强度  $E$ 。因此，把电场强度  $E$  称为光矢量。光矢量的振动称为光振动。下面将用  $A$  表示光矢量的振幅，后面讨论光的各种现象时，都是只考虑光矢量，不考虑磁感强度矢量。

## 第二节 增 透 膜

### 一、单层增透膜

#### 1. 镀增透膜（减反射膜）的原因

在光学仪器的光路中，总有若干个透过光线的介质界面，例如一个简单透镜就有两个透光面。光在仪器中传播时，每遇到一个透光面，总有一部分光能被表面反射。当光垂直射在空气与玻璃（ $n=1.52$ ）的界面上时，约有 4.3% 光能被反射。这个数值看来不大，但通常的光学仪器有若干个透光面，累计起来就不能低估。例如常用的双筒望远镜（包含物镜、目镜和两个全反射棱镜）有 12 个透光面，损失光能约 40%。此外，更严重的是这些反射光还会被其他表面再反射到像的附近，在像周围形成光晕，从而降低了像的清晰度。为此，必须设法减少透光面上的有害反射。

高级照相机的镜头目前都采用了镀减反射膜的工艺，镀膜镜头所拍摄的相片质量比不镀膜的镜头有明显的提高。特别是在某些照明条件下，眼镜片与眼睛组成了一个光学系统，镀减反射膜眼镜片对视觉有明显的改良效果。我们经常会遇到戴惯了镀膜眼镜的人如换成不镀膜镜片后会感觉非常不舒服。而且眼镜片对于戴镜者来说还具有重要的装饰作用，镀减反射膜对于眼镜片的美观作用具有重要意义，具体分析如下。

(1) 在镜片的前曲面（凸面）产生的反光会影响戴镜者的美观。由于镜片的前曲面的反光使得别人看戴镜者时，镜片表面一片白光。在拍照时，这种反光会严重影响美观。

(2) 镜片的前曲面和后曲面的曲率不同产生的镜片内反光会产生虚像（“鬼影”）影响视物的清晰度和舒适性。眼镜光学的理论认为眼镜片的前后曲面形成的屈光度会使得所视物的光线通过镜片发生偏折并聚焦于视网膜上，形成像点。但是，由于屈光镜片的前后曲面的曲率不同，而又存在一定量的反光，它们之间会产生内反光。内反光会在视网膜的像点附近产生一个以上的像点，这些像点会影响视物的清晰度和舒适性。如图 1-2-1 所示的  $A'$  就是其中一个虚像点。当镜片的屈光度较大时，镜片的前后曲面的曲率相差也会增大，镜片后面内反射出来的光因与前面反射的光分离得较大，人眼可区分，则表现为镜片内存在许多的圈，镜片的前后曲面的曲率相差越大，镜片的圈越多，越影响美观。

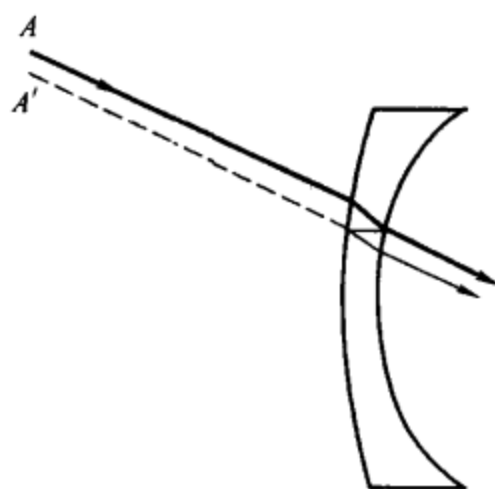


图 1-2-1 镜片内反射产生虚像示意图

(3) 反射光占入射光百分比的多少取决于镜片材料的折射率。反射量公式：

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}$$

式中， $R$  为镜片的一面的反射量； $n$  为镜片材料的折射率。

例如，普通树脂材料的折射率为 1.5，反射量  $R=0.04=4\%$ 。

镜片有 2 个曲面，假如  $R_1$  为镜片前曲面的反射量， $R_2$  为镜片第 2 面的反射量，则镜片的总反射量  $R=R_1+R_2$ （注意：计算  $R_2$  的反射量时，入射光为  $100\%-R_1$ ）。镜片的透光量  $T$  为：

$$T=100\%-R_1-R_2$$

表 1-2-1 以几种常用的树脂镜片材料为例，看看它们的单面反射量和镜片的透光量。

表 1-2-1

常用树脂镜片单面反射量和镜片的透光量

材 料	折射率 $n$	单面反射量 $R_1/\%$	透光量 $T/\%$
CR-39	1.50	4.0	92.2
ORMEX	1.56	4.8	90.7
ORMIL	1.60	5.4	89.5

由此可以看出高折射率的镜片如果没有减反射膜，反射光对戴镜者带来的不适比较强烈。

## 2. 薄膜干涉

薄膜干涉是光在透明介质薄膜（或薄板、劈形膜等）上产生的干涉现象。例如日光照耀雨后马路上的油渍产生的彩色条纹，肥皂泡上的彩色条纹等都是薄膜干涉现象。应用光程差的概念，可以比较方便地讨论薄膜干涉。

图 1-2-2 所示，产生干涉的部件是一个尖劈形状的透明介质薄片（或膜），简称为劈形膜。它的两个表面是平面，其间有一很小的夹角  $\theta$ 。实验时，使平行的单色光垂直照射到劈面上。为了阐明干涉的形成，下面以 A 点为例进行分析。垂直入射到劈形膜表面 A 点处的光线被分为两部分，一部分被劈形膜的上表面反射，成为反射光 I，另一部分折射入介质内部，到达劈形膜的下表面被反射，然后再通过上表面透射出来，成为反射光 II。反射光 I 和反射光 II 是从同一波列分割出来的，是相干光。

设 A 点处介质的厚度为  $e$ ，现在计算反射光 I 和反射光 II 在劈形膜表面 A 点处相遇时的光程差。反射光 II 是在劈形膜的下表面反射的，比反射光 I 在介质内多走了光程  $2ne$ 。此外，入射光在劈形膜上表面反射时，由于，光是从光疏介质入射到光密介质，因而反射光 I 在 A 点处有半波损失，而在劈形膜下表面反射的光 II，光是从光密介质入射到光疏介质，无半波损失。所以，两束相干光的附加光程差为  $\lambda/2$ 。综上所述，反射光 I 和反射光 II 的光程差为

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} \quad (1-2-1)$$

因此，劈形膜反射光的干涉条件为

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad (k=1, 2, 3\cdots) \quad \text{干涉相长} \quad (1-2-2)$$

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2\cdots) \quad \text{干涉相消} \quad (1-2-3)$$

上式表明，凡是劈形膜上厚度相同的地方，两相干光的光程差都一样。因此，劈形膜的干涉条纹是一系列平行于劈形膜棱边的明暗相间的直条纹，如图 1-2-3 所示。这种与介质膜的厚度相对应的干涉条纹，称为等厚条纹。因此，这类干涉又称等厚干涉。

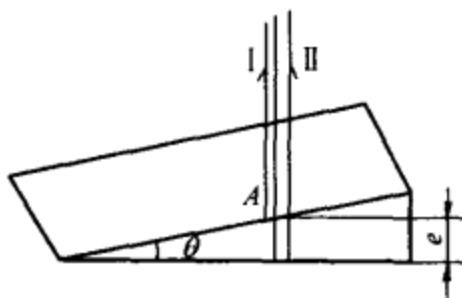


图 1-2-2 劈形膜干涉

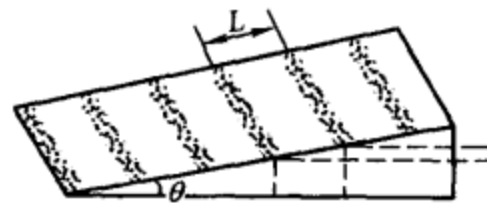


图 1-2-3 等厚干涉条纹

在劈形膜棱边处， $e=0$ ， $\Delta = \frac{\lambda}{2}$ ，两相干光相位差为  $\pi$ ，因而形成暗纹。

设相邻两条明纹（或暗纹）在劈形膜表面的距离为  $L$ ，由图 1-2-3 可求得

$$L = \frac{\Delta e}{\sin\theta} \quad (1-2-4)$$

式中， $\theta$  为劈形膜顶角， $\Delta e$  为相邻两条明纹（或暗纹）对应的厚度差。由式 (1-2-1)，对  $k$  级和  $k+1$  级明纹有

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

$$2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

两式相减得

$$\Delta e = e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n}$$

将上式代入式 (1-2-4), 有

$$L = \frac{\lambda}{2n \sin \theta}$$

由于  $\theta$  很小, 所以  $\sin \theta \approx \theta$ , 上式可写为

$$L = \frac{\lambda}{2n\theta} \quad (1-2-5)$$

上式表明, 劈形膜干涉形成的干涉条纹是等间距的, 条纹间距与劈角  $\theta$  成反比。 $\theta$  越小, 条纹越疏;  $\theta$  越大, 条纹越密。当  $\theta$  大到一定程度时, 干涉条纹密集到无法区分, 从而观察不到干涉条纹。

### 3. 镀增透膜 (减反射膜) 的原理

为了减少反射的损失, 常在透镜表面镀一层厚度相等的薄膜。如图 1-2-4 所示, 在玻璃的表面镀上一层氟化镁 ( $\text{MgF}_2$ ) 薄膜, 它的折射率  $n=1.38$ , 比玻璃的折射率 ( $n_g=1.52$ ) 小, 比空气的折射率 ( $n_0=1$ ) 大。光在氟化镁上表面反射时, 有半波损失, 光在氟化镁下表面反射时, 也有半波损失。所以, 在氟化镁上、下表面的两束反射光没有半波损失引起的附加光程差。它们的光程差为

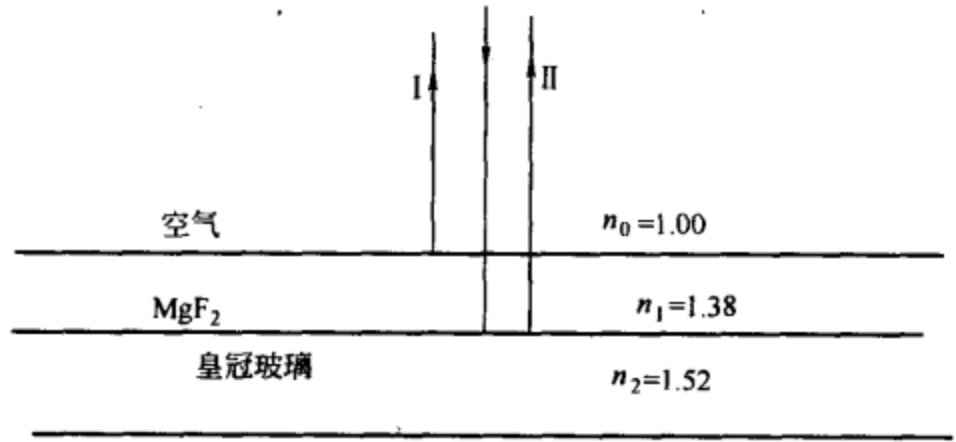


图 1-2-4 镀增透膜示意图

$$\Delta = 2ne$$

式中  $e$  为氟化镁薄膜的厚度。当

$$\Delta = 2ne = (2k+1) \frac{\lambda}{2} \quad (k=0, 1, 2, \dots) \quad (1-2-6)$$

时, 两束反射光干涉相消。由于反射光干涉相消, 所以透射光增强, 这样的膜称为单层增透膜。在式 (1-2-1) 中, 如果取  $k=0$ , 波长取人的眼睛在明亮环境中感觉最灵敏的黄绿光, 即  $\lambda=555\text{nm}$ , 可求出氟化镁薄膜的厚度为

$$e = \frac{\lambda}{4n} = \frac{555}{4 \times 1.38} \approx 100 \text{ (nm)}$$

因  $ne = \frac{\lambda}{4}$ , 该膜也叫  $\frac{\lambda}{4}$  膜层。应当指出, 一定厚度的单层增透膜, 只能对一指定波长的光产生干涉相消, 而对远离该波长的光, 相消反射的效果则较差。此外, 干涉相消, 并不是反射光光矢量的振幅完全抵消。实际上, 在玻璃上镀 100nm 厚的氟化镁增透膜, 即使对于 555nm 的黄绿光而言, 仍有 1.3% 的反射光。为了在更宽的波段内获得更好的增透效果, 需要采用镀 2 层、3 层以至多层的增透膜。目前已有在整个可见光的区域内, 反射率不超过 0.5% 的增透膜。

一般的玻璃表面单层虽然只有 4% 左右的反射, 但复杂的光学系统有几十个镜头, 每个镜头都有两个表面, 损失就很大了, 不仅光能损失, 而且还使像质变坏, 各个表面上的反射光还会产生“鬼影”或光晕, 透镜多时, 其严重程度将超过像差和衍射。

实际上, 即使单个镜片如眼镜, 人们也希望减少反射, 例如拍照时, 反射光就是很讨厌的。目前, 眼镜的增透膜在国际上已相当普遍, 据报道, 德国生产的眼镜中, 除了 30% 是着色眼镜 (太阳镜) 外, 60% 镀有单层增透膜, 10% 镀有多层增透膜。我国目前也已开始大量生产镀多层增透膜的眼镜。

最简单的增透膜是单层  $\lambda/4$  膜。由相关理论推得, 当

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (1-2-7)$$

时, 正入射光反射率等于零。一般光学玻璃的  $n=1.53$ , 在空气中, 要求镀上折射率为  $n_1 = \sqrt{n_0 n_2} = \sqrt{1 \times 1.53} = 1.23$  的薄膜。遗憾的是在自然界找不到一种折射率如此低的材料, 常用的单层增透膜材料为  $\text{MgF}_2$ , 它的折射率为 1.38, 当其光学厚度为  $\lambda/4$  时, 正入射的反射率为 1.3%。

这种单层增透膜工艺简单，制作方便，其耐腐蚀性比玻璃本身还好，因此应用很广泛。但它还有大于1%的剩余反射，在要求更高的场合仍不理想。为了进一步降低反射率，可采用多层膜。

## 二、多层增透膜

如上所述，镀  $\lambda/4$  单层膜后，如图 1-2-5 所示，基板的折射率变成了  $Y$ ，如果让  $Y=1.38^2$ ，则再镀上  $MgF_2$ ，就可实现零反射。此时，整个双层膜系如图 1-2-5 所示。

因为  $Y = \frac{n_2^2}{n_G} = 1.38^2$ ，若  $n_G = 1.52$ ，则  $n_2 = 1.70$ 。氧化铝 ( $Al_2O_3$ ) 的折射率与此值很接近，用  $Al_2O_3-MgF_2$  ( $\lambda/4-\lambda/4$ ) 膜系，可把玻璃的反射率降低到  $10^{-3}$  以下。当然这种膜只对一个波长有效，如图 1-2-6 (a) 所示，这种膜系可用于激光系统。如果要求在更宽的范围有很好的增透效果，则需要用更多的层数。图 1-2-6 (b)、(c)、(d) 给出了几个典型的增透膜系及其反射率曲线。其中 G 表示基板，A 表示入射介质 (空气)，H 表示高折射率材料的  $\lambda/4$  膜层，L 表示低折射率材料的  $\lambda/4$  膜层。

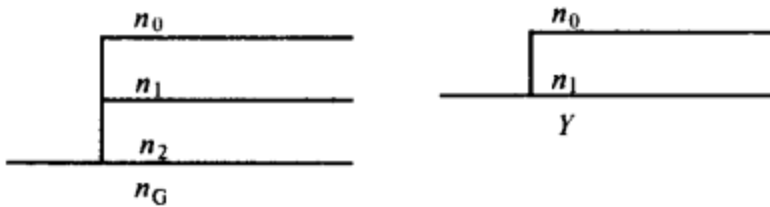


图 1-2-5 双层增透膜

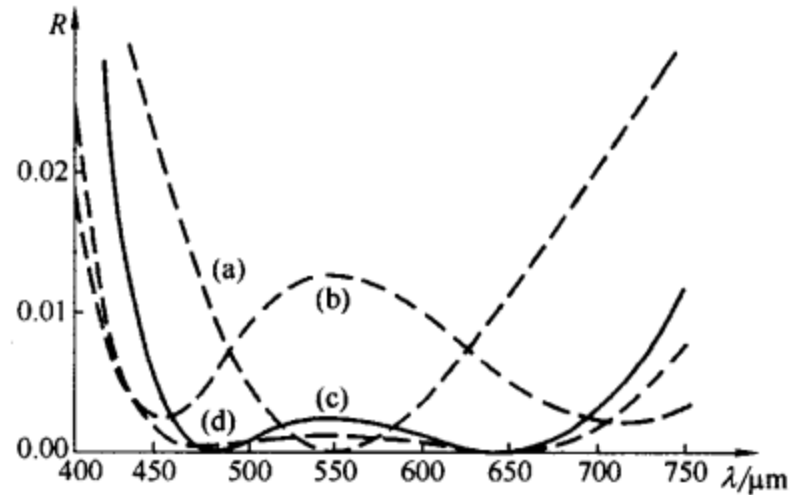


图 1-2-6 各种增透膜及其反射率

- (a) GHLA ( $n_H=1.72$ )    (b) G2HLA ( $n_H=1.72$ )  
 (c) GH2H'LA ( $n_H=1.62, n_H'=2.15$ )  
 (d) G0.22H0.33L2.09H0.99LA ( $n_H=2.08$ )  
 $n_L=1.38$     $n_G=1.52$     $n_A=1.00$     $\lambda_0=550nm$

## 第三节 光的衍射

干涉是波动过程的一个基本特征，所以光的干涉现象表明光具有波动性。但是，除干涉现象外，波动过程还有一个重要的基本特征——衍射现象。现在就来介绍光的衍射现象。

如图 1-3-1 所示，一束平行光通过一个宽度可以调节的狭缝  $K$  以后，在屏幕  $P$  上将呈现光斑  $E$ 。若狭缝的缝宽比波长大得多时，屏幕  $P$  上的光斑和狭缝宽度完全一致 [图 1-3-1 (a)]，这时光可看成是沿直线传播的。若缩小缝宽使它可与光波波长相比较 ( $10^{-4}m$  数量级以下)，在屏幕  $P$  上出现的光斑亮度虽然降低，但范围反而增大，形成如图 1-3-1 (b) 所示的明暗相间的条纹，这就是光的衍射现象。

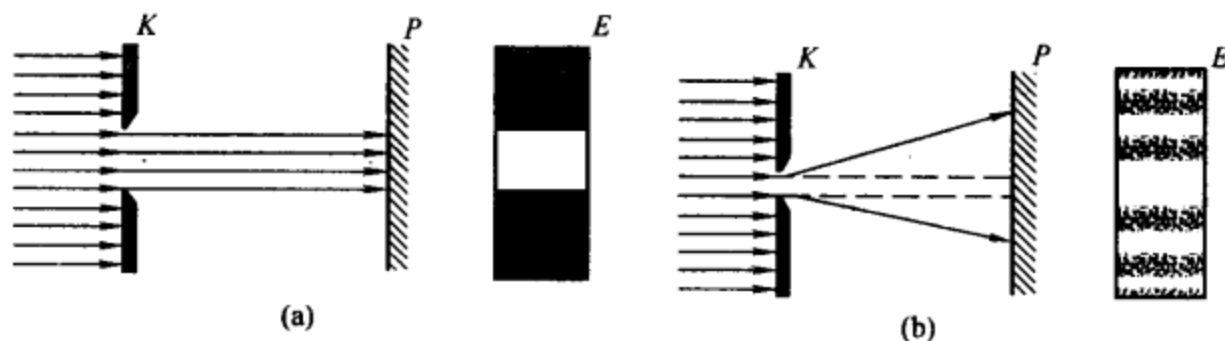


图 1-3-1 光的衍射现象

- (a) 缝宽比波长大得多时，光可看成是直线传播    (b) 缝宽可与波长相比较时，出现衍射条纹



## 一、惠更斯-菲涅耳原理

在波动中曾用惠更斯原理（即波在媒质中传播到的各点都可看成为产生子波的新的波源）解释了波的衍射。但是它不能确切地说明沿不同方向传播的振动的振幅和相位，因此不能定量计算在各个方向上波的强度。菲涅耳运用波的叠加和干涉原理，给惠更斯原理作了补充。他假设：从同一波面上各点发出的子波，在传播到空间某一点时，各个子波间也可以互相叠加而产生干涉现象。这个经过发展了的惠更斯原理叫做惠更斯-菲涅耳原理。

例如，在图 1-3-2 中， $A$  是到达不透明障碍物  $R$  上的一个波前， $R$  上有一个孔  $S$ ， $P$  是屏幕，从屏幕上可以观察到衍射花纹。为了确定由小孔  $S$  的波面所发出的光波传播到屏幕上给定点  $C$  时的光振动的振幅和相位，即定量计算  $C$  点的光强度，根据惠更斯-菲涅耳原理，把到达孔  $S$  上的波前分成很多面积元  $dS$ ，每一面积元都是子波波源，计算这些面积元发出的子波在  $C$  点引起的光振动的总和，就可求得  $C$  处的光强度。为此惠更斯-菲涅耳原理还指出：每一面积元  $dS$  发出的子波在  $C$  点所引起的光振动的振幅的大小，与面积元  $dS$  的大小成正比，与从  $dS$  到  $C$  的距离  $r$  成反比，并与  $r$  和  $dS$  的法线之间的夹角  $\theta$  有关， $\theta$  越大，则振幅越小。利用积分学的方法可以计算出整个波面  $S$  所发出的光传播到  $C$  点的光强度。但是一般来说，这个积分问题十分复杂。

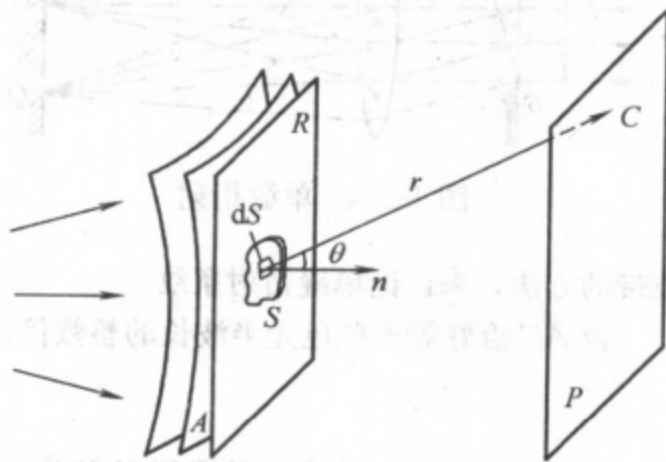


图 1-3-2 惠更斯-菲涅耳原理的应用

## 二、单缝衍射

宽度远较长度为小的狭缝，叫做单缝。当平行光垂直通过单缝后，会产生衍射，再经过透镜  $L$  会聚在屏幕  $P$  上，这样形成的条纹叫做单缝衍射条纹（图 1-3-3）。下面研究单缝衍射条纹的形成。在图 1-3-4 中， $AB$  为单缝的截面，其宽度为  $a$ 。按照惠更斯-菲涅耳原理， $AB$  上各点，都可以看成是新的波源，它们将发出球面子波，向前传播。在这些子波到达空间某处时，会叠加产生干涉。

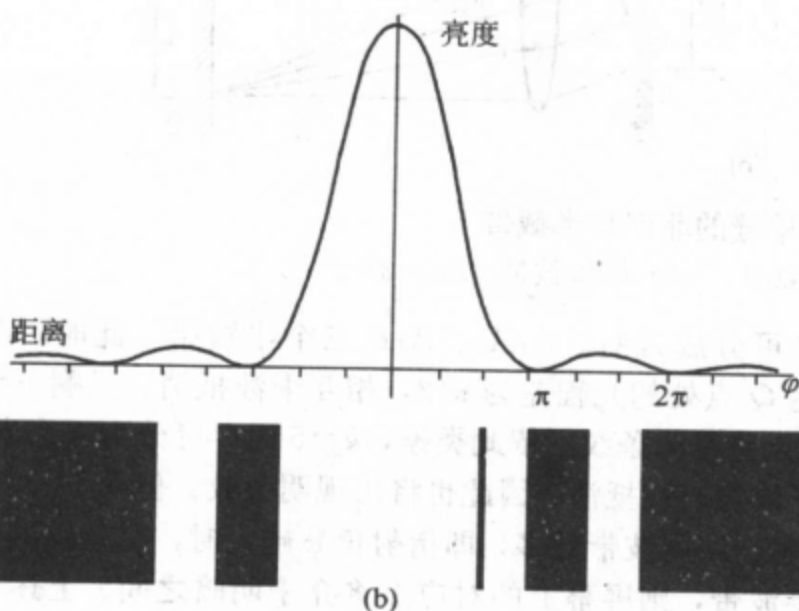
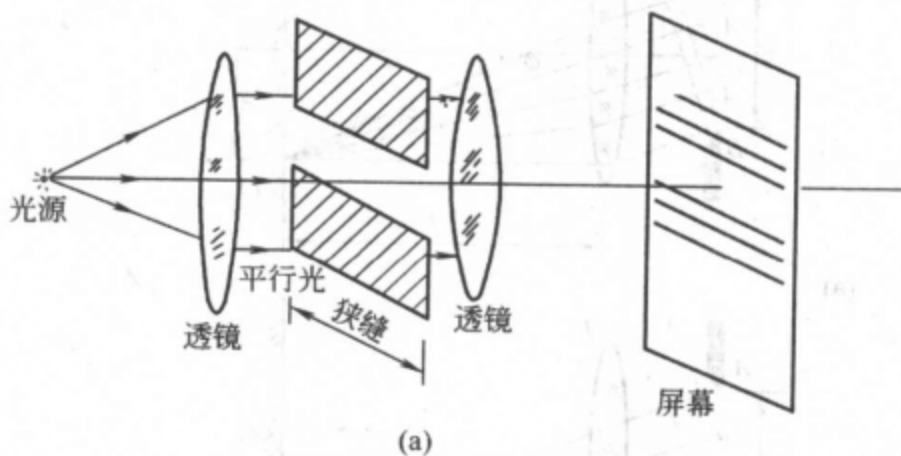


图 1-3-3 单缝衍射实验

(a) 单缝衍射实验装置示意图 (b) 单缝的衍射条纹

首先考虑沿入射方向传播的各子波射线（在图中用光束①表示），它们形成沿入射方向传播的平行光束，经透镜  $L$  会聚于焦点  $O$ 。由于在单缝处的波阵面  $AB$  是同相面，所以这些子波的相位是相等的，它们经透镜后不会引起附加的光程差，在  $O$  点会聚时仍然保持相位相等，因而互相加强。这样，在正对狭缝中心的  $O$  处就应出现平行于单缝的亮纹，叫做中央明纹。

在其他方向上，情况就要复杂些。下面我们来讨论与入射方向成  $\varphi$  角传播的子波射线（图 1-3-4 中的光束②）， $\varphi$  叫衍射角。平行光束②经过透镜会聚于屏幕上  $Q$  点，但是，这束光中各子波射线到达  $Q$  点的光程并不相等，所以它们在  $Q$  点的