

普通高等教育“十二五”规划教材

光学 教程

第2版

叶玉堂 肖峻 饶建珍 等

编著

清华大学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

光学教程

第2版

叶玉堂 肖峻 饶建珍 等 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以物理光学和应用光学为主体内容。第1~3章为应用光学部分,介绍了几何光学基础知识和光在光学系统中的传播和成像特性,还讨论了激光存储等新型光学系统;第4~8章为物理光学部分,讨论了光在各向同性介质和各向异性介质中的传播规律,以及光的干涉、衍射、偏振特性及光与物质的相互作用,同时,还介绍了密集波分复用技术、双光子吸收、拉曼放大、光学孤子、光子晶体、红外显微镜、扫描隧道显微镜、相衬显微镜和磁光克尔效应等相关领域的应用和进展;第9章专门介绍航天光学遥感、自适应光学、红外与微光成像、光学信息处理、光纤激光器、有机电致发光、太阳能电池等光学新技术。

本书为光电子、电子科学与技术及光学工程等专业本科生的专业基础教材,也可作为有关专业师生和科技人员的参考书。

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

光学教程/叶玉堂,肖峻,饶建珍等编著. --2版.--北京:清华大学出版社,2011.9
ISBN 978-7-302-26270-1

I. ①光… II. ①叶… ②肖… ③饶… III. ①光学—教材 IV. ①O43

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第141708号

责任编辑:冯 昕

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

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

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:30 字 数:720千字

版 次:2011年9月第2版 印 次:2011年9月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:49.00元

产品编号:038888-01



光学理论和技术发展很快,本书修订的目的是力图反映光学领域的高速发展。与教程第1版相比较,第2版主要是增加了一些相关新技术和前沿进展。应用光学部分,增加了激光存储系统;干涉部分增加了光子晶体;衍射部分增加了红外显微镜、相衬显微镜和1983年由诺贝尔物理奖得主 Gerd Binnig 博士发明的扫描隧道显微镜;晶体光学部分增加了磁光克尔效应;光与物质的相互作用部分增加了米氏散射在光电对抗等高新技术中的应用;第9章中增加了光纤激光器、OLED、太阳能电池,至于第9章中航天光学遥感、自适应光学、红外与微光成像、光学信息处理等方面内容,基本上是根据母国光、姜文汉、苏君红、薛鸣球等几位院士提供的文献、资料编写的,第2版未作大的修改。

本书由饶建珍副教授改编第1、2、3章;肖峻教授改编第4、5章,并负责全书各章的内容衔接及文稿编排;李剑峰博士改编第6章并编写第9章光纤激光器一节;杨春平博士改编第7、8章;杨刚博士编写第9章有机电致发光一节;钟建博士编写第9章太阳能电池一节;敖明武博士改编第9章前5节并负责统编第9章;叶玉堂教授主要负责教程改编的进程、质量管理以及相关新技术和前沿进展方面的内容组织。

本教程第1版2005年出版后,到2010年,境内已4次印刷;2008年,本教程版权转让台湾五南图书出版公司,译成繁体字版,由“国立交通大学”郭浩中教授校订,在境外出版发行。境内、外读者的厚爱是我们将教程改编、再版的动力。谨此衷心感谢境内、外采用本教程的同行、读者!

由于编者学识有限,书中缺点、错误或疏漏在所难免,恳请使用本教程的读者不吝指正。

编者

2011年1月

于电子科技大学



第一篇 应用光学

第 1 章 几何光学基础	3
1.1 几何光学的基本定律	3
1.1.1 发光点、光线和光束	3
1.1.2 几何光学的基本定律.....	4
1.1.3 全反射.....	5
1.1.4 费马原理.....	6
1.2 物像基本概念	7
1.2.1 光学系统与完善像概念.....	7
1.2.2 物和像的概念.....	7
1.3 球面与球面系统	8
1.3.1 符号规则.....	8
1.3.2 单个折射球面的光路计算.....	9
1.3.3 单个折射球面近轴光线的光路计算	11
1.3.4 物平面以细光束经折射球面的成像	13
1.3.5 球面反射镜	15
1.3.6 共轴球面系统	16
1.3.7 薄透镜	18
1.4 平面与平面系统.....	20
1.4.1 平面反射镜	20
1.4.2 平行平板	23
1.4.3 反射棱镜	24
1.4.4 折射棱镜	28
1.4.5 光楔	29
1.5 光学材料.....	30
例题	32
习题	34

第 2 章 理想光学系统与实际光学系统	36
2.1 理想光学系统的基本特性、基点和基面	36
2.1.1 理想光学系统的基本特性	36
2.1.2 理想光学系统的基点和基面	37
2.2 理想光学系统的物像关系	38
2.2.1 图解法求像	38
2.2.2 解析法求像	39
2.3 理想光学系统的放大率	41
2.3.1 放大率	41
2.3.2 节点和节平面	42
2.3.3 用平行光管测定焦距的原理	43
2.4 理想光学系统的组合	44
2.4.1 双光组组合	44
2.4.2 多光组组合	47
2.5 球面与球面系统的基点和基面	48
2.5.1 单个折射球面的主点	48
2.5.2 单透镜的基点与基面	49
2.5.3 薄透镜和薄透镜组	52
2.6 矩阵运算在几何光学中的应用	52
2.6.1 近轴光的矩阵表示	53
2.6.2 物像矩阵	54
2.6.3 用高斯常数表示系统的基点位置和焦距	55
2.6.4 薄透镜系统的矩阵运算	57
2.7 实际光学系统中的光束限制	58
2.7.1 光阑及其作用	58
2.7.2 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳	59
2.7.3 视场光阑	61
2.7.4 渐晕光阑、入射窗和出射窗	61
2.7.5 光学系统的景深	63
2.7.6 远心光路	65
2.8 像差	67
2.8.1 几何像差	67
2.8.2 波像差	73
例题	74
习题	77
第 3 章 光学仪器的基本原理	79
3.1 眼睛	79
3.1.1 眼睛的结构	79
3.1.2 眼睛的调节	80

3.1.3	眼睛的缺陷和矫正	81
3.1.4	眼睛的分辨率	82
3.2	放大镜	82
3.2.1	放大镜的放大率	83
3.2.2	放大镜的光束限制和视场	84
3.3	显微镜	85
3.3.1	显微镜的成像原理	85
3.3.2	显微镜中的光束限制	86
3.3.3	显微镜的分辨率和有效放大率	88
3.3.4	显微物镜	89
3.4	望远镜	90
3.4.1	望远镜的一般特性	90
3.4.2	望远物镜	92
3.4.3	望远镜目镜	94
3.4.4	望远系统外形尺寸的计算	96
3.5	摄影系统	97
3.5.1	摄影物镜的光学特性	97
3.5.2	摄影物镜的景深	99
3.5.3	摄影物镜的类型	99
3.6	现代光学系统	100
3.6.1	激光光学系统	101
3.6.2	傅里叶变换光学系统	105
3.6.3	线性成像物镜	107
3.6.4	激光光盘光学系统	110
	习题	114

第二篇 物理光学

第4章	光的电磁理论	117
4.1	电磁波谱 电磁场基本方程	117
4.1.1	电磁波谱	117
4.1.2	电磁场基本方程	118
4.2	光波在各向同性介质中的传播	121
4.2.1	波动方程	121
4.2.2	时谐均匀平面波	122
4.3	光波的偏振特性	128
4.3.1	光波的偏振态	128
4.3.2	椭圆偏振光、线偏振光和圆偏振光	130

4.4	光波在介质界面上的反射和折射	132
4.4.1	反射定律、折射定律	132
4.4.2	菲涅耳公式	133
4.4.3	反射率和透射率	137
4.4.4	全反射与临界角	140
4.5	光波场的频率谱	143
4.5.1	光波场的时间频率谱	144
4.5.2	光波场的空间频率谱	148
4.6	球面光波与柱面光波	150
4.6.1	球面光波	150
4.6.2	柱面光波	151
	例题	152
	习题	154
第5章	光的干涉	157
5.1	光干涉的条件	157
5.1.1	光的干涉现象	157
5.1.2	光干涉的条件	158
5.1.3	从普通光源获得相干光的方法	161
5.2	双光束干涉	162
5.2.1	分波面双光束干涉	162
5.2.2	分振幅双光束干涉	165
5.3	多光束干涉	171
5.3.1	平行平板的多光束干涉	171
5.3.2	多光束干涉条纹的特性	173
5.4	光学薄膜	176
5.4.1	单层光学薄膜	177
5.4.2	多层光学薄膜	179
5.4.3	光学薄膜的应用	182
5.4.4	高反射率的测量	185
5.4.5	周期性介质与光子晶体	186
5.5	典型的干涉仪及其应用	188
5.5.1	迈克耳孙干涉仪	188
5.5.2	马赫-曾德尔干涉仪	189
5.5.3	法布里-珀罗干涉仪	190
5.6	光的相干性	194
5.6.1	光的空间相干性	195
5.6.2	光的时间相干性	198
	例题	201

习题	203
第 6 章 光的衍射	208
6.1 衍射的基本原理	208
6.1.1 光的衍射现象	208
6.1.2 惠更斯-菲涅耳原理	209
6.1.3 基尔霍夫衍射公式	210
6.1.4 衍射的巴比涅原理	213
6.2 夫琅禾费衍射	214
6.2.1 夫琅禾费衍射装置	214
6.2.2 矩孔衍射	214
6.2.3 单缝衍射	217
6.2.4 圆孔衍射	218
6.3 光学成像系统的衍射和分辨本领	221
6.3.1 在像面观察的夫琅禾费衍射	221
6.3.2 成像系统的分辨率	222
6.4 夫琅禾费多缝衍射	232
6.4.1 强度分布公式	232
6.4.2 多缝衍射的特点与图样	233
6.5 衍射光栅	236
6.5.1 光栅的分光性能	237
6.5.2 闪耀光栅	240
6.5.3 波导光栅	241
6.6 菲涅耳衍射	244
6.6.1 菲涅耳波带法及圆孔、圆屏菲涅耳衍射	244
6.6.2 菲涅耳波带片	247
6.6.3 菲涅耳直边衍射	251
6.7 全息术	255
6.7.1 全息术的原理	255
6.7.2 全息术的特点	256
6.7.3 全息术的应用	257
例题	260
习题	262
第 7 章 光在各向异性介质中的传播	265
7.1 介电张量	265
7.1.1 各向异性介质的介电张量	265
7.1.2 介电张量的对称性	267
7.2 单色平面波在晶体中的传播	269

7.2.1	相速度和光线速度	269
7.2.2	菲涅耳方程	270
7.3	单轴晶体和双轴晶体的光学性质	272
7.3.1	晶体的光学分类	272
7.3.2	光在各向同性介质中的传播	274
7.3.3	光在单轴晶体中的传播	274
7.3.4	光在双轴晶体中的传播	277
7.4	晶体光学性质的图形表示	278
7.4.1	折射率椭球	278
7.4.2	折射率曲面和波矢曲面	282
7.5	平面波在晶体表面的反射和折射	285
7.5.1	光在晶体界面上的双反射和双折射	285
7.5.2	光在晶体界面上的全反射	286
7.5.3	斯涅耳作图法	287
7.6	晶体光学器件	289
7.6.1	偏振器	289
7.6.2	波片	294
7.6.3	补偿器	297
7.7	偏振光和偏振器件的矩阵表示	298
7.7.1	偏振光的矩阵表示	298
7.7.2	正交偏振	300
7.7.3	偏振器件的矩阵表示	301
7.7.4	琼斯矩阵的本征矢量	304
7.8	偏振光的干涉	304
7.8.1	平行偏振光的干涉	305
7.8.2	会聚光的偏光干涉	307
7.9	电光效应	309
7.9.1	克尔效应和泡克尔效应	309
7.9.2	电光张量	310
7.9.3	KDP 晶体的泡克尔效应	311
7.9.4	电光效应的应用	315
7.10	声光效应	320
7.10.1	声光衍射	320
7.10.2	拉曼-奈斯声光衍射	321
7.10.3	布拉格衍射	322
7.10.4	声光效应的应用	323
7.11	磁光效应	325
7.11.1	自然旋光现象的观察和规律	325
7.11.2	旋光现象的解释	327

7.11.3 磁致旋光效应·····	329
例题·····	335
习题·····	339
第8章 光的吸收、色散和散射 ·····	342
8.1 光与物质相互作用的经典理论·····	342
8.1.1 经典理论的基本方程·····	343
8.1.2 介质的复折射率·····	343
8.2 光的吸收·····	346
8.2.1 光吸收定律·····	346
8.2.2 一般吸收与选择吸收·····	347
8.2.3 吸收光谱·····	349
8.2.4 双/多光子吸收与场致吸收·····	350
8.3 光的色散·····	352
8.3.1 正常色散与反常色散·····	353
8.3.2 光孤子·····	354
8.4 光的散射·····	355
8.4.1 线性散射·····	356
8.4.2 非线性散射·····	363
例题·····	367
习题·····	368
第9章 现代光学技术简介 ·····	369
9.1 航天光学遥感·····	369
9.1.1 航天光学遥感技术的基本概念·····	369
9.1.2 航天光学遥感设备的光学系统·····	371
9.1.3 航天光学遥感的发展·····	373
9.1.4 航天光学遥感的发展趋势·····	375
9.2 自适应光学·····	377
9.2.1 自适应光学的概念·····	377
9.2.2 大气湍流的特征参数、畸变波前的泽尔尼克多项式描述·····	378
9.2.3 自适应光学系统的组成和工作原理·····	379
9.2.4 自适应光学技术应用举例·····	383
9.2.5 自适应光学技术的研究进展·····	388
9.3 红外与微光成像技术·····	389
9.3.1 红外与微光成像的基本概念·····	389
9.3.2 红外热成像技术·····	389
9.3.3 微光成像技术·····	393
9.3.4 我国在光电子成像技术方面的研究·····	399

9.4	光学信息处理技术	400
9.4.1	光学信息处理的基本原理	400
9.4.2	光学信息处理的应用举例	403
9.4.3	空间光调制器	406
9.4.4	小结	408
9.5	光纤激光器	408
9.5.1	光纤激光器的起源、特点和分类	408
9.5.2	光纤激光器的结构	411
9.5.3	光纤激光器的研究进展	417
9.5.4	光纤激光器的应用	426
9.6	有机电致发光	429
9.6.1	有机电致发光的基本概念和工作原理	429
9.6.2	有机电致发光器件的结构、材料及制备工艺	431
9.6.3	有机电致发光技术的研究进展与应用	436
9.7	太阳能光伏电池	438
9.7.1	开发太阳能的意义	438
9.7.2	太阳能光伏电池的基本原理	439
9.7.3	太阳能光伏电池的分类	441
9.7.4	太阳能光伏电池的研究进展和发展趋势	443
9.7.5	太阳能光伏电池的应用及市场前景	445
习题答案		450
主题索引		456
参考文献		460

第一篇 应用光学I

第 1 章 几何光学基础

从本质上讲,光是电磁波,它以波的形式传播。这已为光的干涉、衍射和偏振等现象所证明。按照这种理论,光的传播就是电磁波的传播。但仅用波动的观点来讨论光经透镜或光学系统的传播规律和成像问题将会造成计算和处理上的很大困难,在解决实际的光学技术问题应用不便。

撇开光的波动本性,仅以光线概念为基础来研究光的传播和成像问题的光学学科分支称为几何光学。

几何光学只是对真实情况的近似处理方法。尽管如此,按这种方法解决的有关光学系统的成像、设计和计算等光学技术问题,在大多数场合下都与实际情况相符。所以,几何光学有很大的实用意义。

1.1 几何光学的基本定律

1.1.1 发光点、光线和光束

1. 发光点

本身发光或被其他光源照明后发光的几何点称为发光点。当发光体(光源)的大小和其辐射作用距离相比可略去不计时,该发光体就可认为是发光点或点光源。在几何光学中,发光点被抽象为一个既无体积又无大小而只有位置的几何点,任何被成像的物体都是由无数个这样的发光点所组成的。

2. 光线

发光体向四周发出的带有辐射能量的几何线条称为光线。在几何光学中,光线被抽象为既无直径又无体积而只有位置和方向的几何线,它的方向代表光能的传播方向。物理光学认为,在各向同性介质中,光沿着波面的法线方向传播,因此可以认为光波波面法线就是几何光学中的光线。

3. 光束

光线的集合称为光束。无限远处发光点发出的是平面波,对应于平行光束;有限远处发光点发出的是球面波,对应于会聚或发散光束;其光线既不相交于一点,又互不平行的光束称为像散光束,如图 1-1 所示。

几何光学中的发光点、光线实际上是不存在的,只是一种假设。但是,利用它们可以把光学中复杂的能量传输和光学成像问题归纳为简单的几何运算问题,从而使所要处理的问题大为简化。

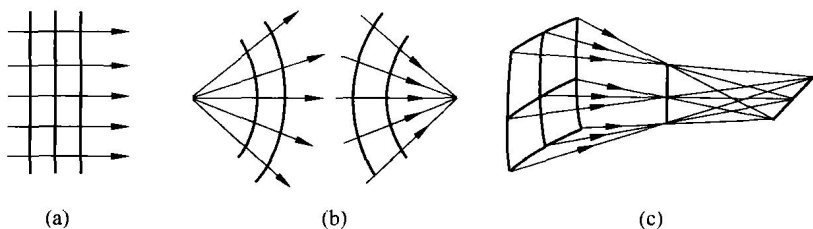


图 1-1 各种光束
(a) 平行光束; (b) 同心光束; (c) 像散光束

1.1.2 几何光学的基本定律

几何光学理论把光的传播归结为四个基本定律:光的直线传播定律、光的独立传播定律、反射定律和折射定律。这是我们研究光的传播和成像的基础。

1. 光的直线传播定律

在各向同性的均匀介质中,光线按直线传播,这就是光的直线传播定律。它是一种普遍存在的现象。该定律可以很好地解释影子的形成、日蚀、月蚀等现象,很多光学测量和光学仪器的应用也都以这一定律为基础。但该定律并不是在所有场合都正确,当光路中放置很小的不透明的障碍物或是小孔时,光的传播将偏离直线,这就是物理光学中所描述的光的衍射现象。可见,光的直线传播定律只有光在均匀介质中无阻拦地传播时才成立。

2. 光的独立传播定律

从不同光源发出的光线,以不同的方向通过空间某点时,彼此互不影响,各光线独立传播,这就是光的独立传播定律。利用这条定律,我们对光线传播情况的研究就可以大为简化,因为研究某一光线传播时,可不考虑其他光线的影响。

3. 光的反射定律和折射定律

当光传播到两种不同介质的理想光滑分界面时,继续传播的光线或返回原介质,或进入另一介质。前者称为光的反射,后者称为光的折射,其传播的规律遵循反射定律和折射定律。一般而言,抛光的金属镜面为反射界面,两种透明介质的光滑分界面为折射界面。

如图 1-2 所示, PQ 表示两种介质的光滑界面, AO 为入射光线,相应的 OC 为反射光线, OB 为折射光线, NN' 为界面上 O 点处的法线,入射光线和界面法线所构成的平面称为入射面。按照角度符号法则的规定,入射角 $\angle AON$ 和折射角 $\angle BON'$ 均应以锐角来量度。由入射光线沿锐角转向法线,顺时针转成的角为正,反之为负。习惯上入射角以 I 表示,折射角以 I' 表示,反射角以 I'' 表示。

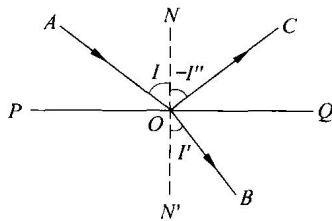


图 1-2 光的反射与折射

反射定律和折射定律可分别描述如下。

反射定律: 反射光线与入射光线和法线在同一平面内;入射光线与反射光线分别位于法线的两侧,与法线夹角大小相同。即

$$I = -I'' \quad (1-1)$$

折射定律：折射光线和入射光线与法线在同一平面内；折射角与入射角的正弦之比与入射角的大小无关，仅由两介质的性质决定，当温度、压力和光线的波长一定时，其比值为—常数，等于前一介质与后—介质的折射率之比。即

$$\frac{\sin I'}{\sin I} = \frac{n}{n'} \quad (1-2)$$

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (1-2')$$

其中 n 和 n' 分别是入射和折射介质的折射率。折射率是表征透明介质光学性质的重要参数之一。我们知道，光在不同介质中的传播速度各不相同，在真空中光速最快，以 c 表示。介质的折射率正是描述光在该介质中传播速度 v 减慢程度的一个量，即

$$n = c/v$$

如果在式(1-2)中，令 $n' = -n$ ，则得 $I' = -I$ ，此即反射定律的形式。这表明，反射定律可以看作是折射定律的特殊情况。凡是由折射定律导得的所有适合于折射情况的公式，只要令 $n' = -n$ ，便可应用于反射的场合，直接导出其相应的公式。这在处理反射系统时有重要应用。

在图 1-2 中，若光线自 C 点或 B 点投射到界面 O 点时，光线必沿 OA 方向射出，这说明光的传播是可逆的，此即光路的可逆性。

1.1.3 全反射

一般情况下，光线射至透明介质的分界面时，将同时发生反射和折射现象。但在特定条件下，界面可将入射光线全部反射回去，而无折射现象，这就是光的全反射。

习惯上，我们把界面两边折射率较大的介质称为光密介质，折射率较小的介质称为光疏介质。当光线由光密介质进入光疏介质时， $n' < n$ ，由公式 $n \sin I = n' \sin I'$ ，可知 $I' > I$ ，折射光线较入射光线更偏离法线。如图 1-3 所示，当逐渐增大入射角 I 到某一值时，折射角 I' 达 90° ，折射光线沿界面掠射而出。若继续增大入射角，则有 $\sin I' > 1$ ，这是不可能的。实验表明，这时光线不能折射入另一介质，而将按反射定律在界面上全部反射回原介质，这就出现了所谓的全反射现象。

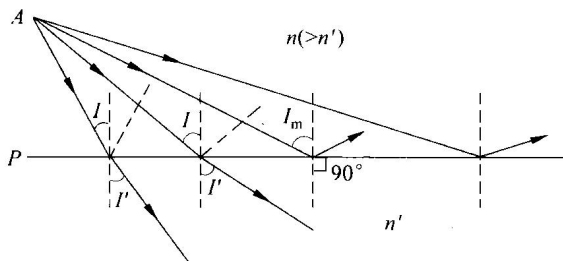


图 1-3 全反射现象

对应于 $\sin I' = 1$ 的入射角 I_m 称为临界角，由式(1-2)可知：

$$\sin I_m = \frac{n'}{n}$$

全反射优于一切镜面反射，因为镜面的金属镀层对光有吸收作用，而全反射在理论上可使入射光的全部能量反射回原介质。因此全反射在光学仪器中有广泛的应用。例如，在光