



普通高等教育印刷工程本科专业教材

# 印刷 应用光学

徐艳芳◎主编  
黄 敏 刘浩学 武 兵◎编著  
刘文耀◎主审

Yinshua Yingyong  
Guangxue



印刷工业出版社

普通高等教育印刷工程本科专业教材

# 印刷应用光学

主 编 徐艳芳  
编 著 黄 敏 刘浩学 武 兵  
主 审 刘文耀

印刷工业出版社

## 内容提要

本书旨在使工程类学生掌握基本的光学系统理论和应用知识,共分十一章。其中第一至第四章为几何光学系统的基础理论、概念和技术,包括几何光学的基本概念,共轴球面光学系统、理想光学系统和平面镜棱镜系统的成像规律、特点及应用。第五章、第六章为光学系统的光束限制和像差等内容。第七章至十一章涉及了印刷技术中应用的光源和光度知识,一些特定应用设备的光学系统,以及激光技术、现代光纤和光电技术等内容。

本书适合印刷工程相关专业基础课程使用,也可供相关专业师生参考。<sup>1</sup>

### 图书在版编目(CIP)数据

印刷应用光学/徐艳芳主编;黄敏,刘浩学,武兵编著.—北京:印刷工业出版社,2007.9  
普通高等教育印刷工程本科专业教材

ISBN 978-7-80000-674-6

I. 印… II. ①徐…②黄…③刘…④武… III. 印刷—应用光学 IV. TS801.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第128868号

### 印刷应用光学

主 编:徐艳芳

编 著:黄 敏 刘浩学 武 兵

主 审:刘文耀

---

责任编辑:艾 迪

出版发行:印刷工业出版社(北京市翠微路2号 邮编:100036)

经 销:各地新华书店

印 刷:河北省高碑店鑫宏源印刷厂

---

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:273千字

印 张:11.875

印 数:1~3000

印 次:2007年9月第1版 2007年9月第1次印刷

定 价:24.00元

I S B N : 978-7-80000-674-6

---

◆ 如发现印装质量问题请与我社发行部联系 发行部电话:010-88275707,88275602

# 出版说明

20世纪80年代以来的20多年时间，在世界印刷技术日新月异的飞速发展浪潮中，中国印刷业无论在技术还是产业层面都取得了长足的进步。桌面出版系统、激光照排、CTP、数码印刷、数字化工作流程等新技术、新设备、新工艺在中国得到了普及或应用。一大批具备较高技术和管理水平的中国印刷企业开始走出国门，参与国际市场竞争，并表现优异。

印刷产业技术的发展既离不开高等教育的支持，又给高等教育提出了新要求。近20多年时间，我国印刷高等教育与印刷产业一起得到了很大发展，开设印刷专业的院校不断增多，培养的印刷专业人才无论在数量还是质量上都有了很大提高。但印刷产业的发展急需印刷专业教育培养出更多、更优秀的掌握高新印刷技术和国际市场游戏规则的高层次人才。

教材是教学工作的重要组成部分。印刷工业出版社自成立以来一直致力于专业教材的出版，与国内主要印刷专业院校建立了长期友好的合作关系。但随着产业技术的发展，原有的印刷专业教材无论在体系上，还是内容上都已经落后于产业和专业教育发展的要求。因此，为更好地服务于教育教学工作，我社邀请了北京印刷学院、西安理工大学、武汉大学、天津科技大学、湖南工业大学、南京林业大学、江南大学等主要专业院校的骨干教师组织编写了“普通高等教育印刷工程本科专业教材”。

综合来看，这套教材具有以下优点：

- 实用性强。该套教材均为高等教育印刷工程专业的必修课，突出反映了当前国际及国内印刷技术的巨大变化和发展，是国内最新的印刷专业教材，能解决当前高等教育印刷专业教材急需更新的迫切需求。

- 作者队伍实力雄厚。该套教材的作者来自全国主要印刷专业院校，均是各院校最有实力的教授、副教授以及从事教学工作多年的骨干教师，有丰富的教学、科研以及教材编写经验。

- 先进性强。该套教材涵盖了当前印刷方面的最新技术，符合目前普通高等教育的教学需求，弥补了当前教育体系中教材落后于科技发展和生产实践的局面。

- 覆盖面广。该套教材覆盖面广，包括印刷工程、印刷机械等各方面的内容，从工艺到设备，从印前到印后，均迎合当前的教学需求，为解决当前高等教育印刷工程专业教材的不足而选定。

经过有关人员、广大院校和出版社的共同努力，“普通高等教育印刷工程本科专业教材”的首批教材已经进入出版流程，希望本套教材的出版能为印刷专业人才的培养做出一份贡献。

印刷工业出版社  
2007年7月

# 前 言

光学是一门古老的学科，而随着现代新技术的发展，光与电及信息科学的结合，使之呈现出新的生机。激光的出现，各种光电转换器件的开发，自动控制的结合，使现代的光学系统朝着光、机、电一体化的方向不断发展。在印刷行业，无论是印前、印刷还是印后设备中，不仅含有以几何光学为主的传统光学，也有激光为代表的新型光源、CCD为代表的新型光电感应器件的应用。传统与现代光学技术及其他高新技术的融合支撑起印刷设备性能的不断完善和提高。

开设该门课程，目的是让学生掌握一定的光学技术及其应用知识，对光学设备，特别是印刷设备中所涉及的光源、光路、成像性能、所采用的现代光学或光电元件，以及应用特点有系统的了解和认识，以便能够在实际工作中理解和处理一般的光学应用问题。

为了适应现代光学技术的应用，特别是印刷行业的应用特点，该课程首先介绍传统的几何光学成像规律、成像质量以及主要的光学成像元件，以对基本的成像技术有一定的了解和认识；之后介绍成像光学所需要的光度学基本知识，以及设备中，尤其是印刷设备中所用光源和光量传递的知识，来认识成像系统中的光量传递特性；还特别地介绍了有代表性的印刷设备中的光学成像系统，以突出和增强印刷业应用的力度；最后，针对相关的新技术，介绍了激光、光纤及CCD光电器件等的工作原理和技术知识。

本书第七章由北京印刷学院武兵副教授编写，第八章由北京印刷学院黄敏讲师、博士编写，第九章由北京印刷学院刘浩学教授编写，其余各章由北京印刷学院徐艳芳副教授编写，徐艳芳对全书进行了统编，天津大学光学专业教授、博导刘文耀对全书进行了主审。在本书的编写过程中参考并引用了一些相关书籍，在此一并深表感谢。由于作者水平有限，书中一定有许多不足之处，敬请读者批评指正。

徐艳芳  
2007年7月



# 目 录

# CONTENTS

<b>第一章 几何光学的基本定律和物像概念</b> .....	1
第一节 几何光学的基本定律 .....	1
一、光波 .....	1
二、几何光学的基本定律 .....	3
三、费马原理 .....	7
第二节 光学系统的物像概念 .....	9
一、成像的概念 .....	9
二、物空间和像空间 .....	10
复习思考题一 .....	10
<b>第二章 共轴球面光学系统</b> .....	12
第一节 符号规则 .....	12
第二节 单球面折射成像 .....	13
一、物像位置关系式 .....	13
二、物像大小关系式 .....	17
第三节 共轴球面系统成像 .....	19
复习思考题二 .....	20
<b>第三章 理想光学系统</b> .....	21
第一节 理想光学系统的概念 .....	21
第二节 理想光学系统的基点和基面 .....	22
一、放大率 $\beta=1$ 的一对共轭面——主平面 .....	22
二、无限远的轴上物点和它所对应的像点 $F'$ ——像方焦点 .....	23
三、无限远的轴上像点和它所对应的物点 $F$ ——物方焦点 .....	24
四、理想光学系统的节平面和节点 .....	25
第三节 理想光学系统的物像关系 .....	26
一、图解法求像 .....	26
二、解析法求像 .....	28
第四节 理想光学系统的组合 .....	31
一、焦点位置的计算公式 .....	31

二、焦距计算公式 .....	32
三、主平面位置计算公式 .....	33
第五节 实际光学系统的基点、基面 .....	35
一、实际系统的基点和基面 .....	35
二、透镜的基点和基面 .....	35
复习思考题三 .....	38

#### 第四章 平面镜棱镜系统 .....

第一节 平面镜棱镜系统在光学仪器中的应用 .....	40
第二节 平面镜及其应用 .....	41
一、平面镜的成像性质 .....	41
二、平面镜的旋转及其应用 .....	43
第三节 反射棱镜及其应用 .....	44
一、反射棱镜的成像性能 .....	44
二、反射棱镜的类型 .....	45
三、棱镜系统成像的物像坐标变化 .....	46
四、反射棱镜的等效作用与展开 .....	48
第四节 平行平板 .....	49
一、平行平板的成像特性 .....	49
二、平行平板对光线位移的计算 .....	50
三、共轴平面系统和平面镜棱镜系统的组合 .....	51
复习思考题四 .....	52

#### 第五章 光学系统的光束限制 .....

第一节 光阑及其作用 .....	54
第二节 孔径光阑、入射光瞳和出射光瞳 .....	56
一、孔径光阑的判断 .....	56
二、入射光瞳和出射光瞳 .....	57
第三节 视场光阑、渐晕光阑、入射窗和出射窗 .....	59
一、视场光阑 .....	59
二、渐晕及渐晕光阑 .....	60
三、入射窗和出射窗 .....	62
第四节 景深和焦深 .....	63
一、景深 .....	63
二、焦深 .....	64
复习思考题五 .....	65

<b>第六章 像差与成像质量评价</b> .....	<b>66</b>
第一节 单色像差 .....	66
一、球差和彗差 .....	66
二、像散、场曲和畸变 .....	69
第二节 色差 .....	70
一、位置色差 .....	70
二、倍率色差 .....	71
第三节 成像系统的分辨率 .....	72
一、理想光学系统的分辨率 .....	72
二、各类光学系统分辨率的表示方法 .....	73
复习思考题六 .....	75
<b>第七章 印刷光源与光度学</b> .....	<b>76</b>
第一节 印刷光源 .....	76
一、光源的分类和印刷技术对光源的要求 .....	76
二、印刷制版常用光源 .....	77
第二节 光度学基础 .....	83
一、常用辐射度量 .....	83
二、光度量 .....	84
三、光度学中的基本定律 .....	88
四、光学成像系统像面的光照度 .....	91
复习思考题七 .....	93
<b>第八章 激光技术</b> .....	<b>94</b>
第一节 激光的基本原理 .....	94
一、激光辐射原理 .....	94
二、激光器 .....	97
三、激光的纵、横模 .....	102
四、共焦腔中高斯光束的特性 .....	104
第二节 激光的特性 .....	107
第三节 激光的应用 .....	109
一、激光在计算机直接制版 (CTP) 技术中的应用 .....	109
二、激光打印机中的激光及调制 .....	112
三、激光在其他方面的应用 .....	114
复习思考题八 .....	115



## 第九章 印刷相关设备的光学系统 ..... 116

第一节 照相机.....	116
一、单镜头反光式相机的光学系统.....	116
二、照相镜头的像差.....	118
三、照相镜头的分类.....	119
第二节 扫描仪的光学系统.....	121
一、扫描仪的光电转换器件.....	121
二、滚筒式扫描仪.....	122
三、平台式扫描仪.....	124
四、扫描仪的技术参数.....	127
第三节 激光扫描记录设备的光学系统.....	128
一、激光扫描技术概述.....	129
二、静电成像输出设备.....	130
三、激光照排机的光学系统.....	132
复习思考题九.....	136

## 第十章 颜色测量仪器的光学系统 ..... 137

第一节 测色仪器的几何条件.....	137
一、反射测量的几何条件.....	138
二、透射测量的几何条件.....	140
三、积分球.....	140
第二节 分光光度计.....	142
一、分光光度计的测色原理.....	142
二、反射式分光光度计.....	142
三、透射式分光光度计.....	147
第三节 光电积分式测色仪器.....	149
一、光电积分式测色仪的设计原理.....	149
二、光学滤色片的选择.....	150
三、光电色度计.....	151
四、彩色亮度计.....	152
五、光学密度计.....	153
复习思考题十.....	155

## 第十一章 现代光学技术简介 ..... 156

第一节 光纤原理.....	156
一、阶跃型光纤的基本原理.....	156
二、光纤的传输损耗.....	157

三、径向梯度折射率光纤.....	160
第二节 光纤光学系统.....	162
一、阶跃型光纤的传光特性.....	162
二、传输模式.....	164
第三节 光纤通信.....	165
一、光纤通信的基本概念.....	166
二、光纤光缆的结构和种类.....	168
第四节 光电成像技术.....	171
一、电荷耦合器件 CCD .....	171
二、CCD 的性能描述 .....	175
三、互补金属氧化物半导体 CMOS .....	177
四、CCD 与 CMOS 器件的比较 .....	178
复习思考题十一.....	179
<b>参考文献 .....</b>	<b>180</b>

## 几何光学的基本定律和物像概念

### 第一节 几何光学的基本定律

#### 一、光波

通常人们所指的光波是可见光。

实质上，可见光是波长在  $380 \sim 780\text{nm}$  之间的电磁波，能为人眼所感知。波长大于  $780\text{nm}$  的邻近电磁波称为红外光，波长小于  $380\text{nm}$  的则称为紫外光，如图 1-1 所示。光波在真空中的传播速度为  $c$ ， $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$ ，波长  $\lambda$  与振动频率  $\nu$  满足关系式  $\nu = c/\lambda$ ；在介质中光的传播速度小于  $c$ ，且随波长的变化而变化。

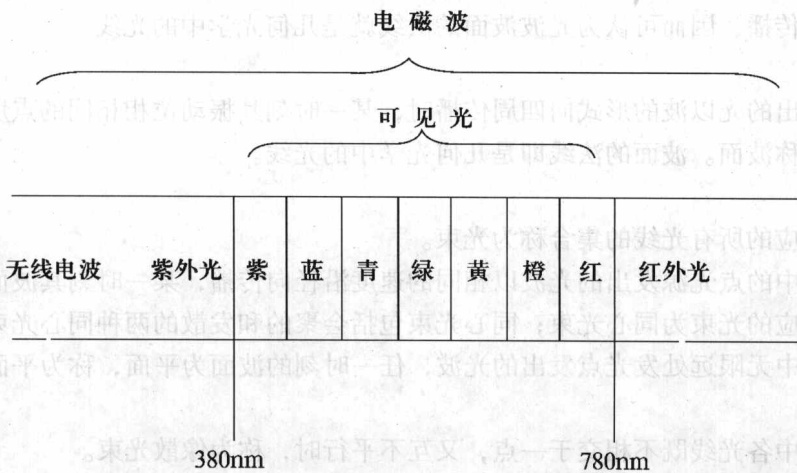


图 1-1 电磁波的不同波长区域

可见光随其波长的不同而引起人眼不同的颜色感觉。具有单一波长的光称为单色光，而不同单色光混合而成的光称为复色光。太阳光是由无限多种单色光组成的，其中的可见光范围包含红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种主要颜色光的波长范围。在烈日下的太阳光中，各种波长的可见光强度十分接近，于是就呈现出“白光”的现象；而当这些不同波长的光被按照波长范围分开时，它们就各自呈现出相应的颜色。

下面介绍一些常用的概念与名称。

### 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。如图 1-2 所示。



图 1-2 发光点（点光源）和发光体图

### 2. 光线

在几何光学中，通常将发光点发出的光抽象为许许多多携带能量并具有方向性的几何线条，称之为光线，其方向代表光的传播方向。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，因而可认为光波波面的法线就是几何光学中的光线。

### 3. 波面

发光点发出的光以波的形式向四周传播时，某一时刻其振动位相相同的点所构成的面称为波振面，简称波面。波面的法线即是几何光学中的光线。

### 4. 光束

与波面对应的所有光线的集合称为光束。

均匀介质中的点光源发出的光波以相同的速度沿径向传播，某一时刻其波面为球面，称为球面波，对应的光束为同心光束；同心光束包括会聚的和发散的两种同心光束。

均匀介质中无限远处发光点发出的光波，任一时刻的波面为平面，称为平面波，对应于平行光束。

对于光束中各光线既不相交于一点，又互不平行时，称为像散光束。

各种光束如图 1-3 所示。

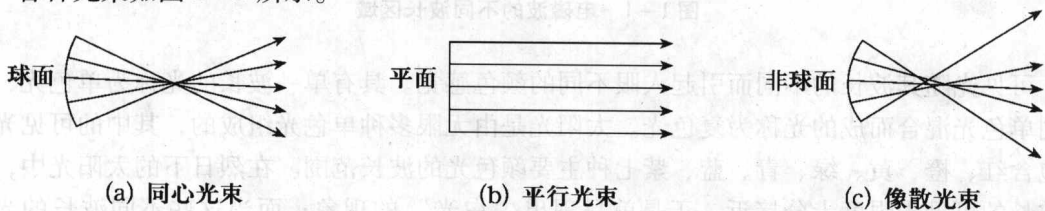


图 1-3 各种光束



## 5. 光路

每条光线的传播途径称为光路。

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，从而使所要处理的光学问题大为简化。

## 二、几何光学的基本定律

几何光学把研究光经过介质的传播问题归结为四个基本定律，它是研究各种光的传播现象和规律以及物体经过光学系统成像特性的基础。这四个基本定律分别为：直线传播定律、独立传播定律、折射定律和全反射定律，以及光路可逆定律。

### 1. 直线传播定律

在各向同性的均匀介质中，光沿着直线方向传播。影子的形成、日食、月食等现象都能很好地证明这一定律。许多精密测量，如精密的天文测量、大地测量、光学测量及相应的化学仪器都是以这一定律为基础的。

在距今 2200 多年前的战国时期，有一个富人请一位画匠给他画一幅画。这位画匠画了三年才把主人请来。主人一看，这幅“画”居然只是一块涂了漆的木板，上面什么画也没有，就很生气。画匠却说：“请你把这画拿回去挂在一扇大窗户上。当太阳光照到它的时候，您就可以在屋里的墙壁上看到一幅会活动的画了。”

主人把“画”拿回去一试，果然如此，窗外的一景一物全都映在墙上。而且，当有人走过，有小狗跑动时，这幅画就活起来。只可惜画面整个是颠倒的。

这就是小孔成像。小孔成像的原理其实就是光的直线传播规律。物体上每一点所发出的光穿过小孔后，仍然呈直线传播，这样，它们会聚在一起，就形成了倒立的像。

在生活中我们可以处处感受到光的直线传播规律。夜晚，汽车的车灯发出的光笔直地射向它的前方；我们手里的手电筒不管怎么摇、怎么晃，那束光也总是直直地传播出去。这些都是光在均匀介质中沿直线传播的规律形成的。

### 2. 独立传播定律

不同光源发出的光在空间某点相遇时，彼此互不影响，各自独立传播，这就是光的独立传播定律。

在电影画面里，我们一定有这样的印象：两束探照灯发出的光正在一区域内扫视，一时间，当两束光在空间某处相遇了，但在相遇点之外，每束光仍然沿原来的直线方向照射出去，如同没有另一束光线存在一般。这就是光的独立传播规律的体现。

### 3. 光的反射定律和折射定律

#### (1) 反射与折射现象

当一束光投射到两种均匀介质的光滑分界面上时，一部分光被光滑表面“反射”回到原介质中，这种现象称为光的反射，反射回原介质的光称为反射光；另一部分光将“透过”光滑表面，进入第二种介质，这种现象称为光的折射，透过光滑表面的这部分光称为折射光。与反射光和折射光相对应，原投射到光滑表面的光称为入射光。

如图 1-4 所示，入射光线 AO 入射到两种介质的分界面上，在 O 点发生反射（反射光



线为OB)和折射(折射光线为OC)。其中NN'为界面上O点处的法线。入射光线、反射光线和折射光线与法线的夹角 $I$ 、 $I''$ 和 $I'$ 分别称为入射角、反射角和折射角,它们均以锐角度量,由光线转向法线,顺时针方向旋转形成的角度为正,反之为负。由入射光分解而成的反射光和折射光各自分别满足反射定律和折射定律。

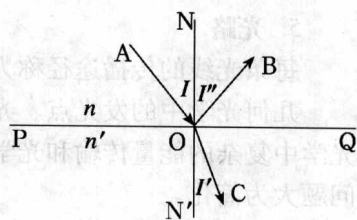


图 1-4 光的反射与折射现象

(2) 反射定律

①反射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内;

②反射光线和入射光线位于法线的两侧,且反射角与入射角的绝对值相等,符号相反,即

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

式(1-1)表明,入射光线中有一部分光线沿着与法线对称的方向反射出去,将这种反射也称为镜面反射。

生活中的反射现象随时在伴随着我们。在一间没有光的房子里,拿手电筒去照平面镜,你会发现,只有在反射光的方向上你才能看到耀眼的亮光。把平面镜换成白纸,再重复这一过程,这次,无论你从哪个方向去观察,白纸看上去都是一样的亮。这是因为,平面镜产生了镜面反射,它将平行光全部按一定角度平行地反射了出来,所以我们只有在反射光的方向上才可以看到耀眼的亮光。白纸看上去挺光滑的,实际上,它的表面有许多细微的凹凸不平,当平行光照射到它的表面时,光线将向不同的方向反射。我们无论站在哪个方向上,总有一部分反射光反射进入我们的眼睛,这种反射就被称为漫反射或散射。人们之所以能看见世间万物,辨别它们的大小和形状,都得归功于漫反射。

有一类特殊的反射称为逆向反射。它能使光线沿着原来的路径反射回去,在交通方面有特殊的贡献。

图 1-5 为一交通道路反光膜的内部结构示意图。

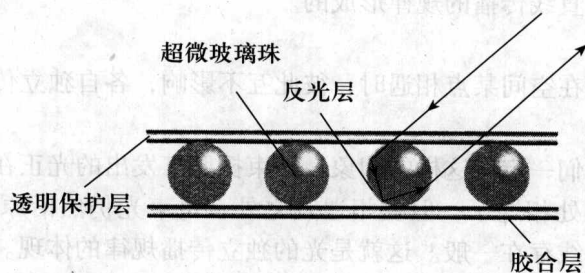


图 1-5 交通道路反光膜的内部结构

反光膜的上下两层透明层之间,涂布了一层超微玻璃珠,当光线射入玻璃珠后,会在玻璃珠内反射而沿原入射光方向平行的方向反射出来。这样,无论汽车灯光从哪个方向入射,都会沿原方向反射回汽车处,汽车司机就会看到反光膜所标记的位置或反光膜上的指示标记。

## (3) 折射定律

① 折射光线位于由入射光线和法线所决定的平面内；

② 折射角的正弦值与入射角的正弦值之比与入射角的大小无关，仅由两种介质的性质决定。对于一定波长的光线而言，在一定温度和压力下，该比值为一常数，等于入射光所在介质的折射率与折射光所在介质的折射率  $n$  之比，即

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

折射率是表征透明介质光学性质的重要参数。我们知道，各种波长的光在真空中的传播速度相同（通常记为  $c$ ），而在不同介质中的传播速度各不相同，且都比在真空中慢。介质的折射率正是用来描述介质中光速减慢程度的物理量，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (1-3)$$

式中  $v$ ——为光在介质中的传播速度。

介质的折射率与真空中折射率（为 1）的比值称为介质的绝对折射率。在标准条件（大气压强  $P = 101275 \text{ Pa} = 760 \text{ mmHg}$ ，温度  $t = 293 \text{ K} = 20^\circ \text{C}$ ）下，空气的折射率为 1.000273，与真空的折射率非常接近。因此，为方便起见，常把任一种介质相对于空气的折射率作为该介质的绝对折射率，并简称折射率。表 1-1 给出了一些材料的折射率。

表 1-1 某些材料的折射率

材 料	折 射 率
空气 (1atm, 0°)	1.000292
水	1.333
有机玻璃 (聚甲基丙烯酸甲酯, Methy Methacrylate)	1.49166
冕牌玻璃 (BK7, crown glass)	1.51680
燧石玻璃 (LaF21, flint glass)	1.78831
钻石	2.426

介质的折射率随介质的温度及密度变化而变化。例如夜空中的星星总在不停的“眨眼睛”，是因为地球大气层中空气的温度和密度等总在不断地变化，造成空气层对光线折射率及折射角的不停变化，结果我们感到星光就闪烁不定。如果站在月球上看星星，因为月球没有大气层，星光就不会闪烁不定。

另外，需要说明和注意的是，材料的折射率还是光波波长的函数，也就是说，材料对不同波长的光线所表现的折射能力是不同的。我们熟知的棱镜对复色光的色散作用正是由于棱镜材料对不同波长的光线具有不同的折射角所形成的。

## (4) 全反射现象

在一定条件下，入射到介质上的光会全部反射回原来的介质中，而没有折射光产生，这种现象称为光的全反射现象。

光在折射率高的介质（称为光密介质）中传播速度较慢，而在折射率低的介质（称为

光疏介质) 中传播速度较快。当光从光密介质向光疏介质传播时, 遇到的条件是  $n' < n$ , 于是有  $I' > I$ 。这就是说, 折射光线比相应的入射光线更偏离法线方向。当入射角增大到某一程度时, 会使折射角大于  $90^\circ$ , 于是折射光就会沿界面掠射出去, 这时的入射角称为临界角, 记为  $I_m$ 。由折射定律公式 (1-2) 得  $\sin I_m = (n' \sin I') / n = (n' \sin 90^\circ) / n = n' / n$ 。

若入射角继续增大, 使  $I > I_m$ , 即  $\sin I > n' / n$ , 于是发生全反射, 即光线全部反射回第一种介质。

全反射发生的条件为:

- ① 光线从光密介质射向光疏介质;
- ② 入射角大于临界角。

在光学仪器中, 人们常常根据全反射原理制成转折光路的各种全反射棱镜, 用以代替平面反射镜, 从而减少反射时的光能损失, 并简化仪器结构。从理论上说, 全反射棱镜可以将入射光全部反射, 而镀有反射膜层的平面反射镜只能反射 90% 左右的人射光能。表 1-2 给出了一些玻璃材料的折射率和对应的全反射临界角 (相对于 589.3nm 的黄光)。

表 1-2 玻璃材料 (对空气) 的折射率和全反射临界角 (对应 589.3nm 的黄光)

折射率	1.50	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66
临界角	41°48'	41°8'	40°30'	39°52'	39°16'	38°41'	38°7'	37°34'	37°3'

目前广泛应用于光通信的光学纤维 (简称光纤) 和各种光纤传感器, 其最基本的原理就是利用全反射原理传输光能, 如图 1-6 所示。

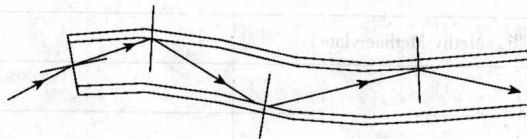


图 1-6 全反射光纤

#### 4. 光路可逆定律

这条定律是说, 如果光线逆着原来的方向传播, 它将按照完全相同的路径反向行进。

考察反射定律和折射定律, 以及图 1-4 就可以找到支持该定律的证据。不管是哪一种情况, 入射光线和反射 (或折射) 光线都可以互换角色, 但方程仍保持不变。直线传播定律也符合光路可逆定律。毕竟, 在直线的两个方向定义的直线是同一条直线。光路可逆定律看起来小题大做, 但应用这条定律可以简化许多问题。

##### 例题 1.1

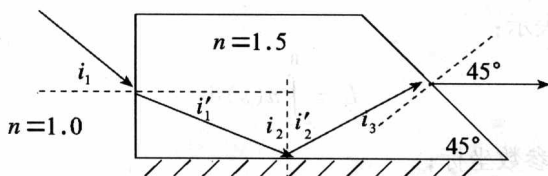
如果例题 1.1 图中从玻璃棱镜出射的光线平行于基准面, 入射光线的入射角应为多少? 设周围空气的折射率为 1.000, 棱镜玻璃的折射率为 1.500。

解决该问题的一种方法是写出入射角对应的最终折射角的函数关系式, 这里不用该方法而采用一种更直接的方法。由于要反复使用同样的方程, 故以光线到达的顺序进行角度编号

如例题 1.1 图示。从问题中知道，最终的折射角为  $45^\circ$ 。利用光路可逆定律可以首先确定原出射光线满足的方程：

$$(1.500) \sin i_3 = (1.000) \sin(45^\circ)$$

得到  $i_3 = 38.13^\circ$ 。



例题 1.1 图

接下来用三角形几何关系确定反射角  $i_2'$  的值。反射后光线、反射镜面以及玻璃块截面构成了一个三角形，其中的一个内角为  $45^\circ$ 。利用三角形内角和为  $180^\circ$ ，求得反射后的光线与镜面的夹角为  $16.87^\circ$ ，利用角度的几何关系可以证明  $i_2' = 16.87^\circ$ ，于是由折射定律得：

$$(1.000) \sin i_1 = (1.500) \sin(16.87^\circ)$$

由此求出  $i_1 = 43.54^\circ$ 。

这里我们思考，如果入射角  $i_1$  改变了，最终的出射光线还能与基准面平行吗？由于入射角度依次影响第一个折射面的折射角度、第二个反射面的反射角度和最终折射面的折射（出射）角度，所以可以确定答案是否定的。

### 三、费马原理

几何光学的基本定律描述了光线的传播规律。费马原理则从光程的角度阐述光的传播规律，更简明，更具普遍意义。

#### 1. 光程的概念

光程定义为光在介质中经过的几何路程  $s$  和该介质折射率  $n$  的乘积，用字母  $L$  表示。由折射率的定义可知：

$$L = ns = \frac{c}{v} v \Delta t = c \Delta t \quad (1-4)$$

式中  $n$ ——介质的折射率；

$c$ ——真空中的光速；

$v$ ——在均匀介质中光的传播速度；

$\Delta t$ ——光在均匀介质中经过几何路程  $s$  所需要的时间。

可见，光在介质中的光程，即为该时间间隔  $\Delta t$  内，光在真空中所传播的路程，所以也称为折合路程。

#### 2. 费马原理

费马原理指出：光线从 A 点到 B 点，是沿着光程为极值的路径传播的。也就是说，光