

# 光学与激光

工程物理方法

〔美〕M. 杨 著

科学出版社

# 光学与激光

工程物理方法

[美] M. 杨 著

霍崇儒 初桂荫 陈玉玲 译

科学出版社

## 内 容 简 介

这是一本近代的应用光学书，内容涉及经典的几何光学和波动光学，激光，全息和相干光。在叙述时，作者着重问题的物理原理方面，而避免不必要的数学细节。所论述的每一个专题在光学设计方面都具有实际的工程价值。

本书适用于实验物理工作者和工程师，也可供高等学校的师生参考。

M. Young

OPTICS and LASERS

*An Engineering Physics Approach*

Springer-Verlag, 1977

光 学 与 激 光

工程物理方法

[美] M. 杨 著

霍崇儒 初桂荫 陈玉玲 译

责任编辑 刘海龄

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院开封印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年8月第一版 开本：787×1092 1/32

1982年8月第一次印刷 印张：7 3/4

印数：0001—9,000 字数：171,000

统一书号：13031·1934

本社书号：2619·13—3

定价：1.20元

## 译者前言

自激光器问世以来，古老的光学面临着一场巨大的革命。为适应这一形势，近年来已经出版了很多在内容与叙述方式上都与传统的教科书差别甚大的近代光学教科书。

本书作者透彻、扼要地概述了目前光学研究前沿所涉及的一些基本问题，并力图反映近代光学实验室的工程状况和研究方向。在叙述诸如仪器分辨、新型光探测器、标准具与光栅、全息与激光器以及偏振元件等专题时，作者都在极短的篇幅内揭示了问题的物理实质，并对所讨论的问题赋予实际的工程价值。

这样一本把物理和工程两方面紧密结合在一起的册子，对于从事光学与激光的研究工作者和光学专业的师生都是有帮助的。

本书的序言及一、二章由陈玉玲译，赵秀丽校。三至五章由霍崇儒译。六至八章由初桂荫译，并由霍崇儒校阅。限于水平，谬误难免，请读者指正。

译者

一九七九年十月

## 序 言

近十余年来，光学领域发生了巨大的变化。部分原因是由于近代光学的许多工程应用的特点，需要一本介绍整个光学领域的实用教科书。这样一本书不应是一本经典的光学课本，更确切地说，应侧重于原理、应用和仪器设备，侧重于激光、全息和相干光。此外，它不应过多地涉及那些公认有趣的现象，诸如彩虹的形成或光速的精确测定之类的问题。

因此，我的目的是撰写一本阐述包括激光等近代光学在内的应用光学或工程光学的最新教科书。为使本书具有一定的工程价值，在论述每个课题时，都力求达到足够的深度，但同时尽可能避免不必要的数学细节。由于本书采用非常概括的方法叙述应用光学（其内容比我想收入任何一本大学教材的要丰富得多），所以对那些长期工作于光学领域的有经验的物理学家和工程师来说，本书应是一本有用的手册。书中的内容可以作为大学光学课程的导论。本书对于光学基础薄弱的大学毕业生或从事应用研究的科学工作者也是有用的。

我在国家标准局电磁部工作之前，曾在瑞瑟利尔工艺学院和瓦特鲁大学（加拿大）物理系讲授过几次一学期的电工课。本书是基于那时的讲稿写成的。当时大部分课程是为二年级或四年级开设的。从我给大学毕业生讲授的激光及有关课程中又汲取了许多补充教材。为使本书对尽可能多的读者有所裨益，对复指数表示、波的叠加及原子能级等课题也作了简要叙述。

只在需要加深理解某项内容时，才引用少量的参考文献

献。书中编入了一些习题，这些习题有助于读者对问题加深理解，有时也是为了推导一些有用的结果。书中从习题的解答引用了部分重要事实或重要公式。本书有些章节叙述得较为详尽，相应的习题也少一些。

我必须在第一章里叙述光线光学，因为这对全面理解第二章里所介绍的光学仪器是必要的。例如，对于并不专门从事光学仪器研制的读者来说，象差理论是不重要的，因此在第二章中几乎全部采用傍轴近似来论述。

在光学仪器部分说明了人眼的各种重要的光学部件，而去掉了大部分生理学和心理学的内容。除详细地分析了望远镜和显微镜以外，还描述了照相机的全部光学系统，包括照相乳剂的重要内容。此外也强调了理论分辨极限和有效放大率，无效放大率。最后讨论光学波导及其在光通讯中的地位来结束第二章。

第三章光源和探测器，首先研究辐射度学和光度学。其中采用的单位、符号和术语都是目前通用的。其次讨论黑体、连续光源和线光源。最后介绍可见光和近红外光探测器。

波动光学部分有意不涉及电磁理论。这里叙述了干涉和衍射基本原理，并讨论了相干性与分辨率。为了对全息术中波带片的作用有所了解以及在不借助详细理论的情况下讨论相干性，本章相当充分地阐述了菲涅耳衍射理论。

在“干涉量度学及其有关问题”的标题下，包括有衍射光栅、干涉仪以及多层膜反射镜和干涉滤光片。在第六章中讨论了全息术和光学信息处理。一般地说光学信息处理包括显微镜的阿贝理论和责尼克(Zernike)相衬显微术。这章的末尾讨论了传递函数和调制传递函数(MTF)。

第七章激光器，准备引进一些与激光和光学谐振腔有关的术语和概念。仅以光泵浦激光器为例来讨论激光泵浦动力

学和输出特性。然后讨论连续激光器和脉冲激光器(Q调和锁模激光器)以及光学谐振腔(稳定性和高斯光束的传播)。临结束这章时介绍几种最重要的固体、液体和气体激光器。

最后一章,光的电磁效应和极化效应。首先描述传播、反射、全反射和布儒斯特角,其次阐述偏振、双折射和波片以及非线性光学、谐波的产生和光混频。最后讨论电光、磁光和声光效应。

我非常感谢这套丛书的编者 David MacAdam 博士所给予的极宝贵的帮助,由于他的指导和建议,使本书臻于完善。我以前在瑞瑟利尔工艺学院的同事 William Jennings 博士精心地阅读了本书第一稿,并提出了精辟的见解,使我对某些章节多次增删,得益非浅。

我应向那些与本书虽非直接相关,但我却实际受益于他们的教诲或帮助的人表示感激之意,他们是我先前在罗克斯特大学光学院的老师和同学。最亲密的常给我指导的人是 Michael Hercher 教授和 Albert Gold 教授;我与 Philip Baumeister 教授、Parker Givens 教授等人的相处现在仍留有美好的回忆。我的光学启蒙课是 Rudolf Kingslake 教授的光学工程,至今有时我还参考他的讲义。

M. Young

1977年7月

于罗拉多州,布勒得

# 目 录

## 序言

1. 光线光学 .....	( 1 )
1.1. 反射和折射 .....	( 1 )
折射 .....	( 1 )
折射率 .....	( 1 )
反射 .....	( 3 )
全内反射 .....	( 3 )
反射棱镜 .....	( 5 )
1.2. 成象 .....	( 6 )
球面 .....	( 6 )
物-象关系 .....	( 8 )
符号规则 .....	( 10 )
透镜方程 .....	( 10 )
透镜和成象的分类 .....	( 14 )
球面反射镜 .....	( 15 )
厚透镜 .....	( 16 )
成象作图 .....	( 18 )
放大率 .....	( 19 )
透镜方程的牛顿形式 .....	( 22 )
拉格朗日不变量 .....	( 22 )
象差 .....	( 23 )
2. 光学仪器 .....	( 25 )
2.1. 眼睛(可视为光学仪器) .....	( 25 )
2.2. 基本照相机 .....	( 29 )

照相乳剂 .....	( 30 )
感光量 .....	( 32 )
分辨本领 .....	( 35 )
景深 .....	( 35 )
2.3. 投影系统 .....	( 37 )
2.4. 放大镜或简易放大镜 .....	( 39 )
2.5. 显微镜 .....	( 40 )
2.6. 望远镜 .....	( 42 )
光瞳和光阑 .....	( 42 )
场阑 .....	( 45 )
地面望远镜 .....	( 45 )
2.7. 光学仪器的分辨本领 .....	( 46 )
照相机 .....	( 47 )
望远镜 .....	( 47 )
显微镜 .....	( 48 )
2.8. 光波导 .....	( 50 )
3. 光源和探测器 .....	( 54 )
3.1. 辐射度学和光度学 .....	( 54 )
辐射度学单位 .....	( 54 )
光度学单位 .....	( 56 )
点光源 .....	( 58 )
扩展光源 .....	( 59 )
漫反射体 .....	( 60 )
象的照度 .....	( 61 )
象的亮度 .....	( 64 )
3.2. 光源 .....	( 66 )
黑体 .....	( 66 )
色温与亮温 .....	( 70 )
线谱光源 .....	( 71 )
发光二极管(LED) .....	( 75 )

3.3. 探测器 .....	(76)
量子探测器 .....	(76)
热探测器 .....	(82)
探测器性能参量 .....	(85)
4. 波动光学 .....	(90)
4.1. 波 .....	(90)
电磁波 .....	(92)
复指数函数 .....	(93)
4.2. 波的叠加 .....	(93)
4.3. 波前分割干涉 .....	(95)
双缝干涉 .....	(95)
多缝干涉 .....	(97)
4.4. 振幅分割干涉 .....	(99)
双光束干涉 .....	(99)
多次反射干涉 .....	(101)
4.5. 衍射 .....	(104)
单缝衍射 .....	(106)
一些有限大小狭缝的干涉 .....	(109)
菲涅耳衍射 .....	(110)
远场和近场 .....	(113)
巴俾涅原理 .....	(115)
4.6. 相干性 .....	(116)
时间相干性 .....	(118)
空间相干性 .....	(120)
热光源的相干性 .....	(121)
4.7. 理论分辨极限 .....	(122)
两个点的分辨 .....	(122)
相干照明 .....	(123)
漫射的相干照明 .....	(125)
5. 干涉量度学及有关问题 .....	(129)

5.1. 衍射光栅 .....	(129)
闪耀 .....	(130)
色分辨本领 .....	(131)
5.2. 迈克耳孙干涉仪 .....	(133)
特维曼-格临干涉仪 .....	(134)
5.3. 法布里-珀罗干涉仪 .....	(136)
色分辨本领 .....	(136)
自由光谱区 .....	(138)
5.4. 多层反射镜和干涉滤光片 .....	(140)
四分之一波层 .....	(140)
多层反射镜 .....	(141)
干涉滤光片 .....	(141)
<b>6. 全息术与傅里叶光学</b> .....	(143)
6.1. 全息术 .....	(143)
离轴全息术 .....	(146)
波带片的解释 .....	(148)
振幅型全息图和位相型全息图 .....	(149)
厚全息图 .....	(150)
6.2. 光学信息处理 .....	(152)
阿贝理论 .....	(152)
傅里叶级数 .....	(155)
傅里叶变换光学 .....	(159)
空间滤波 .....	(159)
相衬 .....	(162)
匹配滤波片 .....	(165)
6.3. 传递函数 .....	(167)
脉冲响应 .....	(167)
光学传递函数 .....	(169)
相干传递函数 .....	(170)
受衍射限制的传递函数 .....	(170)

照相底片的调制传递函数 .....	(173)
<b>7. 激光器</b> .....	(174)
7.1. 光放大 .....	(174)
光放大器 .....	(176)
7.2. 光泵浦激光器 .....	(179)
输出功率 .....	(181)
Q 开关激光器 .....	(182)
锁模激光器 .....	(184)
7.3. 光学谐振腔 .....	(186)
横模 .....	(188)
高斯光束 .....	(190)
稳定性图 .....	(193)
激光光源的相干性 .....	(194)
7.4. 具体激光装置 .....	(196)
红宝石激光器 .....	(196)
钕激光器 .....	(199)
有机染料激光器 .....	(200)
氦-氖激光器 .....	(202)
离子激光器 .....	(203)
CO <sub>2</sub> 激光器 .....	(204)
其它气体激光器 .....	(205)
半导体激光器 .....	(205)
<b>8. 电磁效应与极化效应</b> .....	(207)
8.1. 反射和折射 .....	(207)
传播 .....	(207)
布儒斯特角 .....	(208)
反射 .....	(209)
内反射 .....	(211)
两光密介质间的界面 .....	(212)
金属的反射 .....	(212)

8.2. 偏振 .....	(213)
双折射 .....	(214)
波片 .....	(216)
格兰-汤姆孙棱镜和尼科耳棱镜 .....	(218)
二向色偏振器 .....	(219)
旋光性 .....	(220)
8.3. 非线性光学 .....	(220)
二次谐波的产生 .....	(221)
位相匹配 .....	(222)
光混频 .....	(224)
8.4. 电光、磁光和声光 .....	(225)
克尔效应 .....	(225)
泡克尔斯效应 .....	(227)
电光调制 .....	(228)
声光偏转 .....	(229)
法拉第效应 .....	(231)
参考文献 .....	(232)

# 1. 光线光学

## 1.1. 反射和折射

在这一章里我们把光束视为沿直线传播的光线，只是在不同材料的交界面处，光线才偏折或折射。在揭示出光的波动性之前，光线光学被认为是完美无缺的，并导致了很多与透镜光学和光学仪器有关的有用结果。

**折射** 当光线以某一角度穿过两个透明介质之间的光滑界面时，它便折射。折射率  $n$  是表征每种介质的一个有用参数，它描述界面处折射的程度。把空气（确切地说是自由空间）的折射率取为 1， $n$  是一个便于由实验测定的参数。现在我们知道， $n$  的物理意义是真空中光速与介质中光速的比值。

假设图 1.1 中的光线是在界面  $O$  点入射的，无论入射光线相对于表面倾斜程度如何，它都按下面的条件折射

$$n \sin i = n' \sin i' \quad (1.1)$$

$n$  是第一种介质的折射率， $n'$  是第二种介质的折射率。入射角  $i$  是入射线与表面法线之间的夹角；折射角  $i'$  是折射线与该法线之间的夹角。方程 (1.1) 称为折射定律或斯涅耳定律。

**折射率** 大多数普通的光学材料在可见光谱区域是透明的，该区域波长范围从 400 到 700 nm，这些材料通常对于比 200 nm 更短的波长显出强烈的吸收。

材料的折射率与波长有关，一般地是随波长变短而稍有

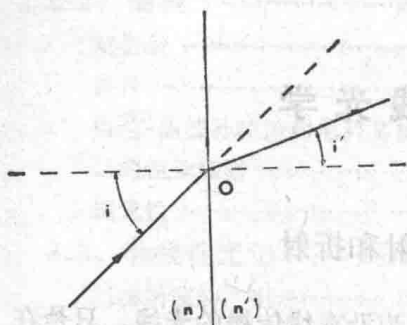


图 1.1 界面上的折射

我们不希望的。

光学玻璃一般是用折射率  $n$  (见表 1.1) 和色散  $\nu$  来表示的。色散为

$$\nu = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1} \quad (1.2)$$

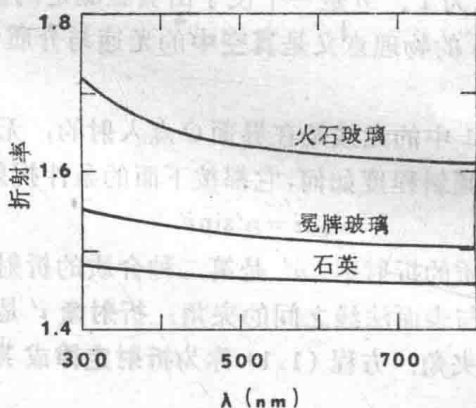


图 1.2 几种材料的折射率与波长的关系

\* 有些书称  $\frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$  的倒数  $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$  为平均色散系数或阿贝系数。

——译者注

表 1.1 各种光学材料的折射率

材 料	折 射 率 $n_D$	材 料	折 射 率 $n_D$
空 气	1.0003	氯化钠	1.54
水	1.33	轻火石玻璃	1.57
甲 醇	1.33	二硫化碳	1.62
乙 醇	1.36	中火石玻璃	1.63
氟化镁	1.38	重火石玻璃	1.66
熔石英	1.46	蓝宝石	1.77
派热克斯玻璃	1.47	超重火石玻璃	1.73
苯	1.50	最重火石玻璃	1.89
二甲苯	1.50	硫化锌(薄膜)	2.3
冕牌玻璃	1.52	二氧化钛(薄膜)	2.4~2.9
加拿大树胶(粘合剂)	1.53		

$n_F$ 、 $n_D$  和  $n_C$  分别是短、中和长(蓝、黄、红)三个特定波长\*上的折射率。

**反射** 某些高度抛光的金属表面和其他界面能够反射照射在这些表面上所有的或几乎所有的光。此外，普通的透明玻璃使入射光的百分之几反射，而使其余部分透射。

图 1.3 画出一个反射表面，入射角是  $i$ ；反射角是  $i'$ 。实验表明，除极少数特殊情况外，入射角和反射角是相等的。本书中规定如图所示， $i$  是正的，即如果一个锐角从法线到光线是逆时针张开的，则  $i$  是正的。 $i'$  的符号显然与  $i$  相反。因此我们把反射定律写为

$$i' = -i \quad (1.3)$$

**全内反射** 这里我们考虑一束从高折射率一侧射向界面的光线，例如从玻璃到空气（不是空气到玻璃），这称为内反射。折射定律表明此时入射光穿过界面时，会向远离法线的

\*  $F$ 、 $D$ 、 $C$  是夫琅和费线的名称，见表 3.2。——译者注

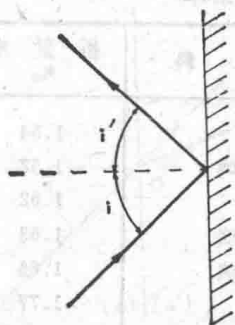


图 1.3 界面上的反射

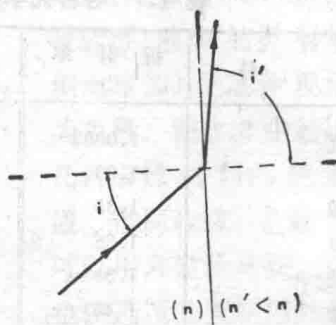


图 1.4 接近临界角的折射

方向偏折(图 1.4)。这样,将存在某一入射角,当光线以该角入射时,折射光恰好平行于界面。在这种情况下, $i' = 90^\circ$ ,所以折射定律变为

$$n \sin i_c = n' \sin 90^\circ \quad (1.4)$$

式中  $i_c$  称为临界角。因为

$$\sin 90^\circ = 1$$

所以

$$\sin i_c = \frac{n'}{n} \quad (1.5)$$

如果  $i > i_c$ ,那么  $n' \sin i' > n'$ ,也就是说折射定律要求  $\sin i'$  大于 1。因为这是不可能的,所以我们只能认为,在这种情况下,没有折射光线。但是,光又不能这样简单地消失,料定它是全部被反射了;事实果然如此。这种现象称为全内反射,它发生在

$$i > \sin^{-1}(n'/n) \quad (1.6)$$

自然,反射光遵守反射定律。

对于一个典型的玻璃-空气界面, $n=1.5$ ;临界角约为  $42^\circ$ 。因此,具有全反射性能的玻璃棱镜常可以作入射角约为  $45^\circ$  的反射镜来用。