

7

高等学校电子信息类教材

光电子 理论与技术

马声全 陈贻汉 编著

Theory

Technique

Photoelectric

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



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

高等学校电子信息类教材

光电子理论与技术

马声全 陈贻汉 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要讲述信息光电子理论及其应用技术,包括激光原理、半导体光源、光载波调制、光信号放大、光滤波、光电检测、光纤传输以及光孤子等共 11 章。理论部分注重思路的清晰和实用性,应用技术部分容纳了近几年国内外的最新报道,并含有作者自己的理论研究成果和评述意见。全书文字简洁,推演明了,图线精细,版面紧凑。每章后面附有习题。

本书可作为光纤通信和光电子器件等信息类专业科技和工程人员以及大学教师的参考书,同时也适合用做相关专业的研究生教材和本科高年级的选修教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

光电子理论与技术 / 马声全, 陈贻汉编著. —北京: 电子工业出版社, 2005. 1

高等学校电子信息类教材

ISBN 7-121-00592-1

I. 光… II. ①马… ②陈… III. 光电子学-高等学校-教材 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 121075 号

责任编辑: 许 楷

印 刷: 北京京科印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22.5 字数: 576 千字

印 次: 2005 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

光电子理论，即光子-电子学说，又称“量子电子学”和“光电子学”。光电子理论的核心是：光辐射与被照物质电子（或者离子、原子、分子、声子）间的量子化能量交换与能量守恒。光电子理论的创立和应用应追溯到 20 世纪初。众所周知，光电效应于 1887 年被 Herze（赫兹）首先发现。这个效应的实验装置相当简单，很容易观测。但是光电效应的实验规律却困扰物理学界近二十年之久，得不到满意的理论解释。直到 1905 年爱因斯坦提出光子学说，才以非常简捷的理论形式——著名的爱因斯坦光电效应方程给出了圆满的解释。爱因斯坦创建的这一理论模式及其在光电效应上的应用，当时并未得到物理学界的普遍认同。直到 Millikan（密立根）在 1916 年完成普朗克常数的准确测定，以及尔后量子力学的建立，大约在 20 世纪 40 年代末，光电子理论才被物理学家和工程师们作为一门新的学说广泛应用。其间最重要的成果是促进了以半导体为核心的现代电子学和以激光为核心的现代光学的诞生。现代电子学和现代光学的应用技术又互相渗透，相辅相成，构成了二战后人类文明发展的重要动力。

光电子理论及其应用经过半个多世纪的发展，目前已经广泛应用于机械工程、生物工程、军事工程和信息工程等诸多领域。本书只讨论与信息工程相关的光电子理论与应用技术。笔者期望以简洁的叙述方法准确地介绍光电子学的基本理论及处理方法，并清楚地回答读者希望了解的光纤通信和光电子器件的基本原理，以利于工程技术人员熟悉本专业常见的理论处理方法，提高科技文献的阅读能力。本书特别关注内容的实用性，并大致体现在以下几个方面：其一是本书的主线是按光信息传输工程的实用环节编写的；其二是本书的取材删除了前人同类著作中已经过时的或者至今工程上没有实用前景的内容，同时引用了近几年最新的应用文献，有利于工程技术人员了解目前的技术动态；其三是本书以目前工程应用特别感兴趣的问题作为重点，并以数例的形式叙述相关理论的应用。

本书适于作为光纤通信和光电子器件等信息类专业的科技人员和教师的参考书。同时也适于用做相关专业的工学硕士研究生教材以及基础较好的本科高年级学生的选修教材。事实上，本书是在我们多年实用的教学讲义基础上修订增补而成的，各章后所附习题大部分出自我们多年教学实践的积累。

本书只列出了书中直接引用的参考文献，并在书中注明了相应的位置。

笔者衷心感谢武汉邮电科学研究院总工毛谦教授对本书的审核及指导性修改意见。同时对本书参考文献的全部作者表示由衷的敬意。尽管本书多处对已有的理论提出了修改和评述意见，但是笔者仍然认为正是这些著作使笔者了解了信息光电子学，同时构成了本书的基本素材。

鉴于笔者能力和精力有限，书中错误恐怕难以避免，欢迎专家和读者批评指正。

作 者

2004 年 8 月于武汉

目 录

第 1 章 激光束传播的基础理论	(1)
1.1 光学矩阵	(1)
1.1.1 光学元件的光学矩阵	(1)
1.1.2 光学系统的光学矩阵	(4)
1.1.3 光学系统的约束条件	(4)
1.2 类透镜介质及其光学矩阵	(5)
1.3 高斯光束的波动方程	(7)
1.4 均匀介质中高斯光束的基本解	(9)
1.5 $ABCD$ 定律	(13)
1.6 均匀介质中的高阶模	(15)
1.6.1 高阶模的表示	(15)
1.6.2 高阶模的数学解	(16)
1.7 类透镜介质中高斯光束的高阶模	(18)
习题	(20)
第 2 章 光学谐振腔	(22)
2.1 开式谐振腔	(22)
2.2 光学谐振腔的分类与计算	(24)
2.2.1 平行平面腔	(24)
2.2.2 球面腔	(26)
2.3 光学谐振腔模式的稳定判据	(27)
2.3.1 运用透镜波导的推导	(27)
2.3.2 自洽场方法	(29)
2.3.3 稳区图	(30)
2.4 共振频率间隔	(30)
2.4.1 纵模共振频率间隔	(30)
2.4.2 横模共振频率间隔	(31)
2.5 光学谐振腔的损耗	(32)
2.5.1 光学谐振腔的损耗机理	(32)
2.5.2 光学谐振腔损耗的表征参量	(34)
习题	(36)
第 3 章 光受激放大原理	(37)
3.1 激活介质的能级结构	(37)

3.2	光辐射的经典理论	(39)
3.3	跃迁速率方程理论	(42)
3.3.1	自发辐射、受激辐射和受激吸收	(42)
3.3.2	爱因斯坦关系式	(43)
3.3.3	光增益系数	(44)
3.4	半经典理论	(46)
3.4.1	原子偶极矩的平均值	(47)
3.4.2	介质在辐射场中的极化率	(50)
3.4.3	辐射场的色散与增益	(51)
3.5	全量子理论	(52)
3.5.1	单个原子与辐射场单个模式间相互作用	(53)
3.5.2	统计平均	(55)
3.5.3	受激放大	(57)
3.6	辐射谱线加宽	(58)
3.6.1	加宽机制	(58)
3.6.2	均匀加宽	(58)
3.6.3	非均匀加宽	(61)
3.7	增益饱和	(63)
3.7.1	均匀加宽下的增益饱和	(63)
3.7.2	非均匀加宽下的增益饱和	(64)
	习题	(66)
第 4 章	激光振荡	(68)
4.1	激光振荡条件	(68)
4.1.1	自再现要求	(68)
4.1.2	阈值增益与阈值反转	(68)
4.1.3	激光振荡频率	(69)
4.2	振荡条件的拉姆理论验证	(70)
4.3	频率牵引、模式竞争和烧孔效应	(73)
4.3.1	频率牵引效应	(73)
4.3.2	模式竞争效应	(74)
4.3.3	烧孔效应	(75)
4.4	激光器的输出功率	(77)
4.4.1	Δn 的宏观量表示	(77)
4.4.2	最佳耦合下的输出功率	(78)
4.5	自发辐射对输出的影响	(80)
	习题	(83)
第 5 章	脉冲激射与弛豫振荡	(85)
5.1	调 Q 激光器	(85)

5.1.1	调 Q 物理过程	(85)
5.1.2	调 Q 激光器的输出功率	(85)
5.1.3	输出脉冲的时间特性	(88)
5.2	Q 突变技术	(92)
5.2.1	转镜调 Q	(92)
5.2.2	声光调 Q	(92)
5.2.3	染料调 Q	(93)
5.2.4	电光调 Q	(93)
5.3	激光器的自调 Q -弛豫振荡	(94)
5.3.1	弛豫振荡过程	(94)
5.3.2	自调 Q 的定量分析	(96)
5.4	锁模激光器	(98)
5.4.1	均匀与非均匀系统的振荡模式	(98)
5.4.2	锁模激光器原理	(98)
5.5	超短光脉冲的测量	(102)
5.5.1	双光子荧光法	(102)
5.5.2	二次谐波自相关法	(103)
	习题	(105)
第 6 章	半导体光源	(108)
6.1	半导体基础知识	(108)
6.1.1	半导体单晶的晶格点阵	(108)
6.1.2	半导体的能带结构	(110)
6.1.3	费米-狄拉克能量分布律	(112)
6.1.4	pn 结	(113)
6.1.5	多元半导体固溶体	(115)
6.2	半导体激光器的基本原理	(116)
6.2.1	场致发光	(116)
6.2.2	LD 的激光振荡条件	(117)
6.2.3	LD 的输出功率	(119)
6.3	半导体激光器的特性	(120)
6.3.1	LD 性能的总体评价	(120)
6.3.2	LD 的模式特性	(121)
6.3.3	LD 的远场特性	(123)
6.3.4	LD 的热稳定性	(124)
6.3.5	LD 的退化与失效	(127)
6.4	半导体光源的实用结构	(128)
6.4.1	异质结 (Heterojunction)	(128)
6.4.2	掩埋条形 (Buried Strip)	(130)

6.4.3	波纹光栅-分布反馈	(131)
6.4.4	量子阱、应变量子阱与超晶格	(132)
6.4.5	复合波导结构	(135)
6.4.6	发光二极管 (LED)	(137)
6.4.7	光发送模块	(137)
	习题	(138)
第 7 章	光载波调制	(141)
7.1	光载波调制综述	(141)
7.1.1	光载波调制的特点	(141)
7.1.2	相干光通信的困难	(142)
7.2	直接光强调制 (内调制)	(145)
7.2.1	内调制光发送机	(145)
7.2.2	内调制的消光比及其规范	(147)
7.3	频率啁啾 (chirp) 效应	(148)
7.3.1	频率啁啾及其观测	(148)
7.3.2	频率啁啾的定量分析	(151)
7.4	电光调制器	(154)
7.4.1	电光效应	(154)
7.4.2	电光振幅调制	(162)
7.4.3	电光相位调制	(165)
7.4.4	电光调制的频率特性	(166)
7.5	MZI 和 EA 外调制器	(171)
7.5.1	MZI 光调制器	(171)
7.5.2	EA 光调制器	(177)
	习题	(181)
第 8 章	光信号放大	(183)
8.1	半导体光放大器综述	(183)
8.2	SOA 的特性	(185)
8.2.1	小信号增益和增益带宽	(185)
8.2.2	增益饱和	(186)
8.2.3	SOA 对信号偏振态的敏感性	(188)
8.2.4	SOA 的噪声	(191)
8.3	SOA 的新结构	(194)
8.3.1	锥形有源区	(194)
8.3.2	非均匀量子阱	(195)
8.3.3	薄型 MQW	(195)
8.4	光纤放大器综述	(197)
8.4.1	拉曼光纤放大器 (FRA)	(197)

8.4.2	布里渊光纤放大器 (FBA)	(198)
8.4.3	掺质光纤放大器 (FDA)	(199)
8.5	掺铒光纤放大器	(200)
8.5.1	EDFA 的泵浦与 Er^{3+} 的能级结构	(200)
8.5.2	EDFA 的增益与增益带宽	(201)
8.5.3	EDFA 的功率饱和及噪声特性	(202)
8.5.4	F 基、Te 基和 Bi 基 EDFA	(203)
8.5.5	EDFA 的应用	(207)
8.6	1.3 μm 和 S 波段 FOA	(210)
8.6.1	PDFA	(211)
8.6.2	TDFA	(214)
8.7	拉曼光纤放大器	(215)
8.7.1	从 FRA 到 D-RAT	(215)
8.7.2	DRA 的组成与特性	(216)
8.7.3	DRA 与 EDFA 联合使用	(218)
	习题	(220)
第 9 章	光电检测	(222)
9.1	光电检测器的性能参数	(222)
9.1.1	半导体光-电转换机理	(222)
9.1.2	光电检测器的性能参数	(223)
9.2	光电检测器的噪声理论	(228)
9.2.1	PD 的噪声源	(228)
9.2.2	卡森定理	(230)
9.2.3	热噪声	(231)
9.2.4	产生-复合噪声	(233)
9.2.5	散粒噪声	(234)
9.3	光电导	(236)
9.3.1	光电导的直接检测原理	(236)
9.3.2	相干检测原理	(239)
9.4	p-i-n 光电检测器	(242)
9.4.1	pin-PD 的结构与性能	(242)
9.4.2	pin 光接收机的灵敏度	(244)
9.5	APD 光电检测器	(247)
9.5.1	APD 的倍增	(247)
9.5.2	雪崩噪声	(251)
9.5.3	APD 的管芯结构	(256)
9.5.4	APD 光接收机的灵敏度	(261)
	习题	(263)

第 10 章 光纤传输	(265)
10.1 光纤的结构、分类和特性参数	(265)
10.1.1 光纤的结构	(265)
10.1.2 光纤的分类	(266)
10.1.3 光纤的传输特性	(267)
10.2 光纤的模场理论	(269)
10.2.1 传输模式的几何光学描述	(269)
10.2.2 SI 光纤的场解	(271)
10.2.3 特征方程与模式截止条件	(275)
10.2.4 模式的命名和模场图	(279)
10.3 光纤的色散理论	(284)
10.3.1 色散机理	(284)
10.3.2 光纤色散特性的定量描述	(285)
10.3.3 色散补偿技术	(292)
10.4 光纤的非线性	(296)
10.4.1 非线性概念	(296)
10.4.2 SBS、SRS 与 XPM 的产生门限和抑制方法	(297)
10.4.3 四波混频原理	(299)
10.4.4 自相位调制原理及其色散补偿能力	(301)
10.5 塑料光纤	(305)
10.5.1 塑料光纤的研究现状与应用前景	(305)
10.5.2 塑料光纤的制作技术	(307)
10.5.3 POF 的损耗机理	(309)
习题	(312)
第 11 章 光孤子	(314)
11.1 孤子概述	(314)
11.2 光孤子形成的机理	(315)
11.3 光纤光孤子传输方程与光孤子特征	(318)
11.3.1 光孤子传输方程	(318)
11.3.2 基态孤子和高阶孤子的基本特征	(323)
11.4 光孤子产生的条件及能量的损耗与补充	(327)
11.5 光孤子的应用	(329)
习题	(332)
附录 A 密度矩阵	(333)
附录 B 辐射场量子化	(337)
附录 C 本书使用的英语缩写	(341)
参考文献	(344)

第 1 章 激光束传播的基础理论

在讨论激光光源的输出特性之前，我们暂且把激光的单色性和能量集中性当做实验事实接受下来，以此为前提介绍激光传播的几何光学和波动光学的基本理论和研究方法，作为后面各章的基础。关于激光在光纤中的传播理论将在第 10 章详细讨论。

1.1 光学矩阵

实验证实，激光具有能量的高度集中性和传播的高度定向性，因此允许将激光束抽象成“近轴光线”。这里的“轴”指光轴，即光学系统中各元件曲率中心的连线。“近轴”则指光线的传播方向与光轴间的夹角 θ 小到允许实现如下近似

$$\sin \theta = \operatorname{tg} \theta = \theta \quad (1.1-1)$$

定义近轴光线的两个几何参量：

r ——光束传播轨迹上研究点到光轴的距离。

r' ——光束传播轨迹在研究点处相对光轴的斜率。

并约定：以激光能量的传播方向为光轴的正方向；研究点在光轴上方时其 r 为正，研究点在光轴下方时其 r 为负。 r' 也有正负之分，它取决于光束传播轨迹在研究点处的切线与光轴正向间夹角的正切值的正负。

1.1.1 光学元件的光学矩阵

[例 1] 光线在一段均匀介质内的传播。

如图 1.1 所示，光束在均匀介质段入射点 1 处的几何参数为 r_1 和 r'_1 ，出射点 2 处的几何参数为 r_2 和 r'_2 。由几何关系，可得出

$$\begin{aligned} r_2 &= r_1 + d r'_1 \\ r'_2 &= r'_1 \end{aligned}$$

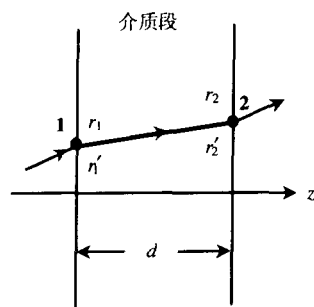


图 1.1 光线在一段均匀介质内的传播

将上述方程组改写成矩阵形式，便得出了激光束在一段均匀介质内的传输方程

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{pmatrix} \quad (1.1-2)$$

[例 2] 光线通过薄透镜的传播。

如图 1.2 所示，设薄透镜的焦距为 f ，由简单几何关系可得

$$\begin{aligned}
 r_2 &= r_1 \\
 r'_2 &= -\operatorname{tg} \theta_2 = -\frac{n - f \cdot n'}{f} = -\frac{1}{f} n + n' \\
 \therefore \begin{pmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (1.1-3)$$

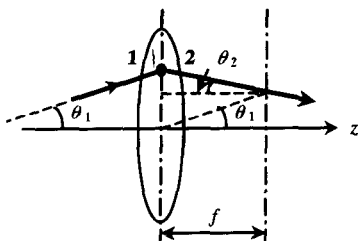


图 1.2 光线通过薄透镜的传播

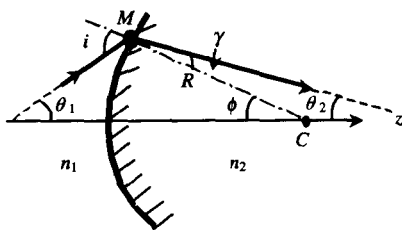


图 1.3 激光束在介质分界面外的折射

[例 3] 激光束在介质分界面处的折射。

如图 1.3 所示, 激光束从折射率为 n_1 的介质折射入 n_2 介质中。分界面的曲率中心为 C , 其曲率半径为 R 。 i 为入射角, γ 为折射角。入射点 M 处, 在介质 n_1 中的光线几何参量为 r_1 和 r'_1 。在介质 n_2 中的光线几何参量为 r_2 和 r'_2 。显然, 有

$$\begin{aligned}
 n_1 &= r_2 \\
 n'_1 &= \operatorname{tg} \theta_1 = \theta_1 \\
 r'_2 &= \operatorname{tg}(\pi - \theta_2) = -\theta_2
 \end{aligned} \quad (1.1-4)$$

再由几何关系

$$\begin{aligned}
 i &= \theta_1 + \phi \\
 \phi &= \theta_2 + \gamma
 \end{aligned}$$

且

$$\phi = \sin \phi = \frac{n_1}{R}$$

运用折射定律

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin i}{\sin \gamma} = \frac{i}{\gamma} = \frac{n'_1 + \frac{n_1}{R}}{\frac{n_1}{R} + r'_2}$$

即得

$$r'_2 = \frac{n_1}{n_2} n'_1 + \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \frac{n_1}{R} \quad (1.1-5)$$

将式 (1.1-4) 和式 (1.1-5) 合写成光线传输方程

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{pmatrix} \quad (1.1-6)$$

方程式 (1.1-2)、(1.1-3) 和 (1.1-6) 可归纳为如下形式的传输方程

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_1' \end{pmatrix}$$

出射光
线矢量

元件光
学矩阵

入射光
线矢量

(1.1-7)

方程中的两个列矩阵分别称为出射光线矢量和入射光线矢量，中间的 2×2 矩阵称为光学元件的光学矩阵。光学矩阵只含有光学元件本身的特征，如元件的折射率、曲率半径和厚度等。它们相对于光束的入射状况是完全独立的。表 1.1 列出了某些常见光学元件的光学矩阵。如果表中元件的曲面由表中凹面换成凸面，其光学矩阵只需将表中元件的光学矩阵的矩阵元由 R 换成 $(-R)$ 。

表 1.1 常见光学元件的光学矩阵

(1) 厚度为 d 的 均匀介质段		$\begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
(2) 薄透镜 焦距: f ($f > 0$, 会聚; $f < 0$, 发散)		$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$
(3) 平面折射 折射率: n_1, n_2		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix}$
(4) 球面折射 曲率半径: R 折射率: n_1, n_2		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(n_2 - n_1)}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$
(5) 球面反射镜 球面半径: R (平面反射镜, 取 $R = \infty$)		$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}$
(6) 类透镜介质 厚度: L 折射率: $n = n_0(1 - \frac{k_2}{2k_1} \cdot r^2)$ k, k_2 均为常数		$\begin{pmatrix} \cos\sqrt{\frac{k_2}{k}}L & \sqrt{\frac{k}{k_2}}\sin\sqrt{\frac{k_2}{k}}L \\ -\sqrt{\frac{k_2}{k}}\sin\sqrt{\frac{k_2}{k}}L & \cos\sqrt{\frac{k_2}{k}}L \end{pmatrix}$

1.1.2 光学系统的光学矩阵

如图 1.4 所示, 近轴光线 (本图及前面 3 个示意图都夸大了光线的斜率) 依次通过光学元件 A、B 和 C。因为

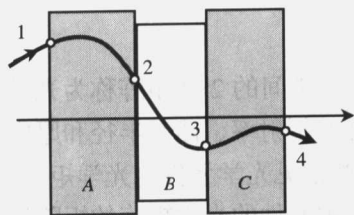


图 1.4 近轴光线的传播

$$\begin{pmatrix} r_4 \\ r'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_3 \\ r'_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r_3 \\ r'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ r'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{pmatrix}$$

于是, 就有

$$\begin{pmatrix} r_4 \\ r'_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ c_3 & c_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_3 & b_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r'_1 \end{pmatrix}$$

可见, 多个元件组成的光学系统也可以用一个光学矩阵来描述, 它是各个元件光学矩阵的有序乘积 (注意顺序是由后到前)。又因为各个元件的光学矩阵都是 2×2 的, 系统的光学矩阵也将是 2×2 的。因此, 对于任意的线性光学系统都可以用式 (1.1-7) 将激光束的输出、输入矢量与光学系统的光学特征关联起来, 从而为几何光学提供了一个简便的分析手段。

1.1.3 光学系统的约束条件

近轴光线射入光学系统后, 若要求光线限定在系统内传播, 而不至于中途发散出去, 系统本身应具备的特征称为光学系统的约束条件。

在光轴上取点 z , 过点 z 且与光轴垂直的平面称为 z 平面。由前所述, 光线传输方程式 (1.1-7) 实质上是线性方程组的矩阵形式。因而存在如下本征方程

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_z \\ r'_z \end{pmatrix} = \lambda \begin{pmatrix} r_z \\ r'_z \end{pmatrix} \quad (1.1-8)$$

式 (1.1-8) 中的 r_z 和 r'_z 组成的列矩阵为近轴光线上坐标为 z 的研究点处的光线矢量; $ABCD$ 矩阵为光学系统输入端 ($z=0$ 平面) 至 z 平面 (z 在光学系统内) 的光学矩阵; λ 为本征值。

光线矢量不恒为零的条件为

$$\begin{vmatrix} A - \lambda & B \\ C & D - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^2 - (A + D)\lambda + (AD - BC) = 0 \quad (1.1-9)$$

即

我们称满足

$$AD - BC = 1 \quad (1.1-10)$$

的元件为么模元件。表 1.1 中的 (1)、(2)、(5)、(6) 四种元件都是么模元件。而且不难证明, 由么模元件组成的系统也是么模的。(3)、(4) 两元件虽然不是么模元件, 但如果光线从 n_1 介质折射进 n_2 介质后, 再从 n_2 介质折射进 n_1 介质一次, 这样构成的系统也将是么模的。因此常见的系统大都满足式 (1.1-10)。

对于么模系统, 再令

$$A + D = 2b$$

由式 (1.1-9) 可得

$$\lambda = b \pm \sqrt{b^2 - 1} = b \pm i\sqrt{1 - b^2} = e^{\pm i\theta}$$

所以, 么模系统的本征矢为

$$\begin{aligned} r(z) &= c_1 e^{i\theta z} + c_2 e^{-i\theta z} \\ &= r_m \sin(\theta z + \delta) \end{aligned}$$

显然, 只要 θ 为实数, $r(z)$ 就是有限的。而 θ 为实数的条件是 $b^2 \leq 1$ 。由此可得出么模系统的约束条件为

$$-1 \leq \frac{1}{2}(A + D) \leq 1 \quad (1.1-11)$$

1.2 类透镜介质及其光学矩阵

我们先观察薄透镜的聚焦作用, 如图 1.5 所示, 平行于薄透镜主光轴的光线会聚于薄透镜的焦点处, 光路 $B'B''F$ 和 $A'A''F$ 间没有光程差, 而 $B''F$ 和 $A''F$ 间的光程差为

$$\begin{aligned} \delta &= \overline{B''F} - \overline{A''F} \\ &\approx \overline{BF} - \overline{AF} \\ &= \sqrt{r^2 + f^2} - f \\ &= f[\sqrt{1 + (r/f)^2} - 1] \\ &\approx f\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{r}{f}\right)^2 - 1\right] \\ &= \frac{r^2}{2f} \end{aligned}$$

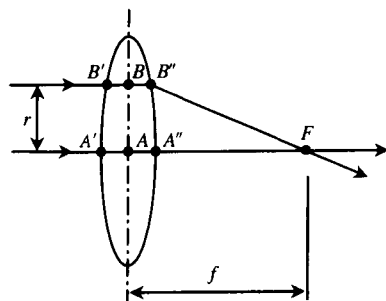


图 1.5 薄透镜的聚焦作用

可见透镜内 $A'A''$ 与 $B'B''$ 间引入的光程差也应为 $r^2/2f$, 即薄透镜引入的光程差与 r^2 成正比。现在我们再来介绍一种特殊的非均匀光学介质, 如图 1.6 所示。图 1.6 (a) 为其外形, 实际使用时大都取圆柱对称形状。图 1.6 (b) 为其折射率分布, r 为径向坐标, 其折射率只随 r 变化, 变化规律为

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{k_2}{2k} r^2\right) \quad (1.2-1)$$

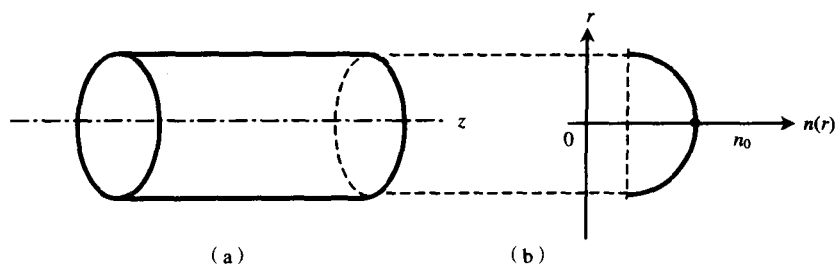


图 1.6 二次型介质的折射率分布

式(1.2-1)中的 k_2 与 k 均为常数,将比例系数写成如此形式是为了后面求解微分方程时能够叙述相对简洁些。 $n(r)$ 为抛物线函数, n_0 为圆柱体轴线处的折射率。显然,与这种二次型折射率分布介质棒的轴线重合和离轴线 r 距离的两条平行光线通过介质棒,也将产生正比于 r^2 的光程差,因而这种二次型介质将和薄透镜一样具有聚焦作用。因此折射率按式(1.2-1)变化的二次型折射率分布介质棒被称为类透镜。类透镜在光纤光学中被广泛用来替代传统的光学透镜作为准直器和光纤耦合器,因为它的尺寸与光纤器件匹配,而且容易批量生产,安装方便。如果将轴线处的折射率取最小值,远离轴线处的折射率按二次型变化规律逐渐增大,还可以做成类凹透镜。

下面来推导一段类透镜介质的光学矩阵。非均匀介质(如图1.7所示)中的光线轨迹方程^[3]为

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (1.2-2)$$

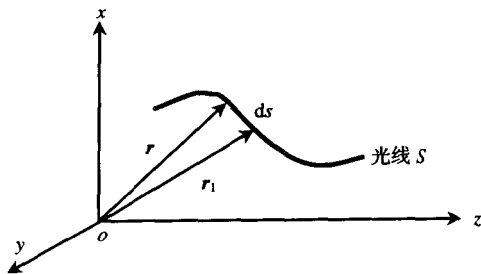


图 1.7 非均匀介质中的空间光线

鉴于类透镜介质棒的圆柱对称性,将矢量偏微分方程式(1.2-2)改写成圆柱坐标描述的分量微分方程组,并考虑到类透镜介质的折射率仅在 r 方向上有变化,则有

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) - nr \left(\frac{d\theta}{ds} \right)^2 &= \frac{dn}{dr} \\ n \frac{dr}{ds} \frac{d\theta}{ds} + \frac{d}{ds} \left(nr \frac{d\theta}{ds} \right) &= 0 \\ \frac{d}{ds} \left(n \frac{dz}{ds} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1.2-3)$$

为简化分析,假设光线 S 局限在子午面(包含类透镜介质棒轴线的平面)内,则光线的

传播情况便与 θ 无关, 即 $d\theta/ds=0$ 。再运用近轴近似, 用 d/dz 代替 d/ds 。这样我们只需讨论方程组(1.2-3)的第一个方程, 并将其简化成

$$\frac{d}{dz}(n \frac{dr}{dz}) = \frac{dn}{dr} \quad (1.2-4)$$

代入 $n(r)$ 的表示式(1.2-1), 可得

$$n \frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{k_2}{k} r n_0 = 0$$

再一次使用近轴近似 $n(r) \approx n_0$, 便得到了如下简单的微分方程

$$\frac{d^2 r}{dz^2} + \frac{k_2}{k} r = 0 \quad (1.2-5)$$

其解为

$$\begin{aligned} r(z) &= c_1 \cos \sqrt{k_2/k} z + c_2 \sin \sqrt{k_2/k} z \\ r'(z) &= -c_1 \sqrt{k_2/k} \sin \sqrt{k_2/k} z + c_2 \sqrt{k_2/k} \cos \sqrt{k_2/k} z \end{aligned}$$

取初始条件为: $z=0$ 处为类透镜的入射面, 即 $r(0)=r_0$, $r'(0)=r'_0$, 则

$$c_1 = r_0, \quad c_2 = \sqrt{k/k_2} r'_0$$

如果一段类透镜介质的长度为 L , 则有

$$\begin{bmatrix} r(L) \\ r'(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \sqrt{k_2/k} L & \sqrt{k/k_2} \sin \sqrt{k_2/k} L \\ -\sqrt{k_2/k} \sin \sqrt{k_2/k} L & \cos \sqrt{k_2/k} L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_0 \\ r'_0 \end{bmatrix} \quad (1.2-6)$$

不难看出, 类透镜介质段也是么模元件。

1.3 高斯光束的波动方程

1.1 节和 1.2 节为几何光学的内容。在某些处理场合, 几何光学的叙述有着简单明了的优点, 但几何光学本身缺少频率和相位的概念。进一步的讨论需要介绍波动光学的内容, 并引出 $ABCD$ 定律, 以便简捷而深入地了解光束在介质中传播的信息。

实验证明, 均匀媒质中传播的基模在垂直传播方向的平面上光强分布是高斯型的。本节从麦克斯韦方程出发, 导出高斯光束的波动方程。

任意电磁场都满足如下麦克斯韦方程组

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_c + \mathbf{J}_v + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1.3-1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.3-2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.3-3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.3-4)$$