

激光束光学

魏光辉 朱宝亮 编著



北京工业学院出版社

激 光 束 光 学

魏光辉 朱宝亮 编著

北京工业学院出版社

内 容 简 介

本书经原兵器工业部教材编审室审定为工科光电子技术专业和应用光学专业研究生选修课教材。全书共五章，系统地介绍了均匀和非均匀介质，各向异性介质以及光波导介质中存在的典型激光束形式及其传输特性，激光束的光学变换，激光束的衍射和光学谐振腔的工程分析方法，是学习、研究激光束特性，分析、设计激光光学系统和光学谐振腔的基础技术书。内容丰富并反映了国内外近期研究成果

本书亦适用于理科光学专业，工科光学仪器，电子技术，光通信等有关专业研究生和高年级大学生的教学参考书，也可供上述专业的科学工作者和工程技术人员参考。

激 光 束 光 学

魏光辉 朱宝堯 编著

*

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京工业学院印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 16.125印张 361千字

1988年6月第一版 1988年6月第一次印刷

ISBN 7-81013-008-0/TB·3

印数：1-2100册 定价：2.65元

前 言

《激光束光学》主要阐述激光在各类介质中的传播形式以及通过各种光学系统的变换规律，并提出利用这些规律解决与激光应用有关的光学工程技术问题的途径。书中涉及的激光传播介质包括均匀介质，非均匀介质，各向异性介质以及波导介质。我们把光学谐振腔看做一种特殊的光学系统。

全书共五章。第一章“高斯光束”是全书的基础。在这一章里讨论均匀介质中激光可能存在的形式及其传播规律。从光的电磁理论出发讨论了麦克斯韦波动方程的几种近似解：基模高斯光束，拉盖尔分布高阶模高斯光束和厄米分布高阶模高斯光束以及椭圆高斯光束。我们把所有可能存在的相干光束形式总称为激光束。第二章讨论“激光束的衍射”，是对第一章内容的补充。它研究激光束通过有限孔径时的各种衍射行为，有助于我们从实质上了解激光束的物理特性。第三章“激光的传输与变换”主要研究激光束通过各类介质的传输形式和通过各种光学系统的变换规律，是解决与激光束应用有关的工程技术问题的基础。第四章讨论激光束与光学谐振腔。把光学谐振腔看做特殊的光学系统，把谐振腔内振荡的本征模看做激光束在谐振腔内的连续传输变换，使我们能够给出各种复杂谐振腔的腔模参数关系。第三，第四两章是全书的重点。

第五章“导波光学基础”属导论性内容。鉴于集成光学与光纤通信的发展，介绍一点导波光学与光纤的知识是必要的。

激光出现至今已二十多年,有大量关于激光束的书刊(包括光学谐振腔的专著和论文),但是专门讨论激光束特性与工程应用问题的著作却很少。在编写本教材的过程中,除了汇集分散在各种书刊中的材料外也写入了近年来我们的一部分研究成果。

沈柯教授审阅了书稿,提出了许多宝贵的修改意见。编写过程中还得到了作者所在教研室许多同志的帮助。在此一并表示感谢。

由于水平所限,难免缺点和错误,希望广大读者批评指正。

编者

1987.9

目 录

第一章 高斯光束

§ 1.1 电磁场的运动方程	
1. 麦克斯韦方程组	(2)
2. 物质方程	(3)
3. 边值关系	(4)
4. 能量密度和能流密度	(5)
5. 波动方程	(6)
§ 1.2 平面电磁波	
1. 单色平面波	(7)
2. 等相面和相速	(10)
3. 平面波的偏振态	(12)
4. 光强	(13)
§ 1.3 球面波和任意简谐波	
1. 球面波	(16)
2. 任意简谐波	(18)
3. 波包和群速	(19)
4. 程函方程与光线方程	(24)
§ 1.4 基模高斯光束	
1. 波动方程的基模解	(28)
2. 基模高斯光束的场分布与传输特点	(31)
§ 1.5 高阶模解——厄密-高斯光束	
1. 厄密-高斯光束	(39)
2. 场的横向分布	(43)
§ 1.6 高阶模解——拉革尔-高斯光束	
1. 拉革尔-高斯光束	(48)
2. 场的横向分布	(52)
§ 1.7 椭圆高斯光束	

1. 基模椭圆高斯光束	(59)
2. 场分布及传输特点	(62)
3. 高阶模椭圆高斯光束	(65)
§ 1.8 矢量高斯光束	
1. 复点源概念	(66)
2. 偶极场	(69)
3. 近似处理	(72)

第二章 高斯光束的衍射

§ 2.1 惠更斯-菲涅耳原理	
1. 惠更斯-菲涅耳原理	(78)
2. 傍轴近似	(81)
3. 菲涅耳近似和夫琅和费近似	(82)
§ 2.2 高斯光束的夫琅和费衍射	
1. 高斯光束夫琅和费单缝衍射	(85)
2. 高斯光束夫琅和费圆孔衍射	(90)
§ 2.3 高斯光束的菲涅耳衍射	
1. 高斯光束菲涅耳圆孔衍射	(97)
2. 与球面波菲涅耳圆孔衍射的比较	(98)
3. 菲涅耳衍射的应用	(102)
§ 2.4 高斯光束的衍射解释	
§ 2.5 高斯光束的衍射损耗	
1. 基模高斯光束的衍射损耗及有效通光孔径	(108)
2. 高阶模高斯光束的衍射损耗	(110)
3. 横模限制	(118)

第三章 高斯光束的传输与变换

§ 3.1 高斯光束的传输	
1. 球面波的传输	(122)
2. 高斯光束的传输	(123)

§ 3.2	高斯光束的透镜变换	
1.	透镜的变换性质	(125)
2.	球面波的透镜变换	(126)
3.	高斯光束的透镜变换	(128)
4.	结果分析	(130)
5.	高斯光束的聚焦	(135)
§ 3.3	望远镜系统对高斯光束的变换	
1.	望远镜系统的变换	(138)
2.	准直	(141)
3.	发射	(144)
§ 3.4	光线矩阵	
1.	简单光学元件或结构的光线矩阵	(151)
2.	复杂光学系统的光线矩阵	(153)
3.	组合矩阵	(156)
§ 3.5	$ABCD$ 定则	
1.	$ABCD$ 定则	(161)
2.	光学谐振腔	(163)
3.	光导管——类透镜介质	(167)
§ 3.6	高斯光束的图解法	
1.	柯林斯图	(173)
2.	Σ 圆 \neq 圆图	(177)
§ 3.7	在椭球界面斜入射情况下高斯光束的反射和折射	
1.	高斯光束在椭球界面上的反射和折射	(181)
2.	矩阵表示	(189)
3.	透镜的结构参数与光学参数	(192)
§ 3.8	模耦合及匹配	
1.	模耦合系数	(203)
2.	几种模匹配方式	(203)
§ 3.9	高斯光束在增益(损耗)平方分布介质中的传播	
1.	波动方程的近似解	(211)
2.	结果分析	(215)

§ 3.10 高斯光束在各向异性介质中的传播

第四章 激光束与光学谐振腔

§ 4.1 光学谐振腔的研究方法

1. 谐振腔的衍射理论…………… (235)
2. 谐振腔的光束传输分析方法…………… (238)
3. 几何光学分析方法…………… (239)

§ 4.2 谐振腔参数与模参数关系的一般描述

1. 多元件复杂谐振腔的稳定性条件…………… (240)
2. 腔—膜参数关系式…………… (241)
3. 稳定腔的本征值和腔模的谐振频率…………… (243)
4. 复杂非稳腔特性的描述…………… (245)
5. 镜面反射率为高斯分布的谐振腔…………… (256)
6. 相位复共轭谐振腔…………… (264)
7. 模匹配概念在谐振腔计算中的应用…………… (270)

§ 4.3 单透镜谐振腔的分析

1. 单透镜谐振腔的稳定性条件…………… (272)
2. 单透镜谐振腔内的光束参数…………… (285)
3. 单透镜谐振腔的热扰稳定性条件…………… (290)
4. 非稳单透镜谐振腔的共轭点光束…………… (298)
5. 关于等价谐振腔…………… (300)

§ 4.4 腔内含有两个透镜的谐振腔的分析

1. G 参数与稳定性条件…………… (305)
2. 望远镜谐振腔(稳定腔)内的光束参数…………… (319)
3. 非稳望远镜谐振腔的共轭点光束参数…………… (322)
4. 望远镜谐振腔的热扰稳定性条件…………… (326)

§ 4.5 含有三个透镜的谐振腔的分析

1. G 参数与稳定区…………… (330)
2. 腔内光束参数…………… (337)

3. 非稳定三透镜谐振腔的共轭点光束参数	(351)
4. 热透镜焦距的等价	(361)
5. 关于符号规定的说明	(363)
§ 4.6 折叠谐振腔和环形谐振腔的分析	
1. 折叠谐振腔的分析	(363)
2. 环形谐振腔的分析	(376)
3. 四镜环形谐振腔的分析	(387)
4. 单球面镜环形腔和多镜环形腔的分析	(394)
5. 非稳环形腔	(402)

第五章 导波光学基础

§ 5.1 平板波导——光线分析法

1. 平板波导的一般分析	(408)
2. 色散方程	(410)
3. TE 模和 TM 模	(411)
4. 色散方程的图解法	(413)
5. 导模截止	(416)
6. 古斯-汉欣 (Goos-Hänchen) 位移	(419)
7. 功率流	(421)

§ 5.2 平板波导——电磁理论分析法

1. TE 模	(425)
2. TM 模	(428)

§ 5.3 矩形介质波导

1. 马可蒂里近似解	(430)
2. 模方程的近似解	(435)
3. 结果分析	(436)
4. E_{mn}^* 模	(437)

§ 5.4 圆柱波导

1. 数值孔径	(438)
2. 波动方程的标量解	(440)

3. 用轴向场表示横场·····	(442)
4. 边界条件及特征方程·····	(446)
5. 导模截止·····	(450)
6. 场型图·····	(456)
§ 5.5 衰减和色散	
1. 波导的衰减·····	(461)
2. 色散·····	(471)
§ 5.6 耦合模理论	
1. 耦合模方程·····	(480)
2. 矩形栅状结构波导的反射与透射·····	(487)
3. 分布反馈激光器·····	(490)
§ 5.7 光束耦合	
1. 直接耦合·····	(494)
2. 棱镜耦合及光栅耦合·····	(498)

第一章 高 斯 光 束

本章以光的电磁理论为基础，导出有关高斯光束的几种形式，包括基模高斯光束、高阶模高斯光束、椭圆高斯光束和矢量高斯光束，并讨论它们的场的分布特点以及传输规律。

高斯光束是一种光线束，它的辐射照度（或光强）的分布是高斯型的。在中心轴上强度为最大值，在轴附近，强度随着离开中心轴距离的平方指数地衰减，因此能量是非常集中的。在实际中，我们遇到的许多场的分布是接近于高斯型的。例如大多数激光谐振腔所输出的光束，在阶跃折射率玻璃纤维中传输的基模，尖锥形微波天线所辐射的场等。概括地说，高斯光束有三大特点：（1）在各向同性介质中或通过无象差的透镜后它的辐射照度分布保持不变，即场强分布仍属于高斯型；（2）它的变换规律简单，形式上与光线束的变换规律相同；（3）高斯光束的发散角比其他光束的发散角小，因此衍射损耗也小，这正是大多数激光器以一个趋近于高斯分布的模式振荡的原因。所谓趋近于高斯分布，就是说并非严格的高斯分布，但是应该指出，本章所给出的基于高斯分布的一些近似结果在许多实际问题中是足够精确的。以上所提到的高斯光束的诸特点将在本章和后面的几章中逐步予以说明。

§ 1.1 电磁场的运动方程

光的经典电磁理论指出，光的本质是电磁波，可见光是

某一频率范围内 ($3.7 \sim 7.5 \times 10^{14} \text{Hz}$) 的电磁波。自从麦克斯韦建立起电磁场的运动方程, 提出了光的经典电磁理论之后, 经过一百多年的发展, 这一理论在其适用的范围内达到了相当完善的地步。它不仅令人满意地解释了光在传播过程中出现的许多重要光学现象, 诸如光在两种媒质界面上的反射和折射、光的干涉、光的衍射、光的偏振、光在各向异性媒质中的双折射等现象, 而且它也是近年发展起来的激光、傅里叶光学、集成光学、非线性光学等学科的经典理论基础。但是光的电磁理论尚不能解释全部光学现象, 如原子光谱、黑体辐射、光电效应等, 这些现象的解释有赖于光的量子理论。

由于大多数光学课题用光的经典电磁理论来处理比较简便, 也比较直观, 所以我们把它作为研究高斯光束的理论基础。并把高斯光束与平面波及球面波相对照、相比较, 以便更好地把握高斯光束的特性。在本章后几节将看到, 高斯光束也是一种电磁波, 只不过是电磁波波动方程的一种近似解。

1. 麦克斯韦方程组 十九世纪六十年代, 麦克斯韦总结了前人和他自己的对电磁理论的研究成果, 提出了电磁场理论。并归纳成一组被称为麦克斯韦方程组的电磁场的运动方程。在有介质存在的普遍情况下, 麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \end{cases} \quad (1.1.1)$$

该方程组对于物理性质连续的空间各点都成立。式中 \vec{E} 是电场强度矢量， \vec{D} 是电位移矢量， \vec{H} 是磁场强度矢量， \vec{B} 是磁感应强度矢量， ρ 是自由电荷密度， \vec{j} 是自由电荷的电流密度。以上各量一般均是空间和时间的函数。如果场的各量与时间无关，且不存在电流 ($\vec{j}=0$)，这样的场称为静态场。如果场的各量不依赖于时间，但有电流存在 ($\vec{j}\neq 0$)，这样的场称为定态场。在光频情况下，场的各量是时间的瞬变函数，而且场源在一段宏观时间间隔内的平均值（而不是瞬时值），与具体时刻无关，广义上讲，这种类型的场也叫定态场。

2. 物质方程 在已知电荷和电流分布的情况下，从麦克斯韦方程组 (1.1.1) 尚得不到场的唯一确定解，还必须由物质方程给予补充。物质方程是介质在电磁场的作用下发生传导、极化和磁化现象的数学描述。一般来说，物质方程是相当复杂的，它除了与介质的特性有关外，还与电磁场的频率、强度及振动方式有关。最简单的是处于静止或缓慢运动状态的各向同性介质，在弱场（与原子内部的场相比）作用下的情况，此时物质方程取如下形式

$$\begin{cases} \vec{j} = \sigma \vec{E} \\ \vec{D} = \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} = \mu \vec{H} \end{cases} \quad (1.1.2)$$

式中 σ 为电导率， ϵ 为介电常数， μ 为磁导率，它们是与介质的特定材料有关的常量。在均匀介质中， σ 、 ϵ 和 μ 是与空间位置无关的常数。物质方程 (1.1.2) 的第一式是欧姆定律的微分形式。对于 $\sigma=0$ 的介质，我们称之为绝缘体或电介质。一般在光频（约为 10^{14}s^{-1} ）情况下，各种介质的磁

导率 μ 都近似地等于真空的磁导率 μ_0 。介电常数 ϵ 通常是频率的函数， ϵ 随频率的变化导致了色散现象。在有损耗的介质中， ϵ 可表为复数形式。在各向异性介质中， ϵ 不再是标量，应代之以张量的形式。在强场作用下， ϵ 不再是常数，而是场强的函数，这将引起一系列非线性光学效应（例如高次谐波的产生）。

3. 边值关系 在实际问题中，常遇到确定场在两种媒质交界面上的分布情况。在界面上，由于介质的性质有一个突变，故麦克斯韦方程组的微分形式已不再适用，应代之以新的形式，即边值关系。利用麦克斯韦方程组的积分形式在极限的情况下可以得到

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \omega_f \\ \vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \\ \vec{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \\ \vec{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = 0 \end{array} \right. \quad (1.1.3)$$

式中 \vec{n} 为界面法线方向上的单位矢量，方向从介质 1 指向介质 2。 ω_f 是界面上自由电荷面密度。上式中的第一式说明，电位移矢量 \vec{D} 在界面法线方向上有跃变。如果不存在自由面电荷，电位移矢量在法线方向上是连续的。第二式说明，在界面上磁感应强度沿法线方向是连续的。最后两式说明，电场和磁场的切线分量在界面两侧是连续的。但最后一式只是在没有面电流的条件下才成立（一般均能满足这个条件）。以上四式统称为边值关系，它们也适用于真空与介质的交界面。在光学中，边值关系很重要，光在两种媒质界面反射和折射所遵从的菲涅耳公式，就是从这组边值关系导

出来的。

4. 能量密度和能流密度 任何一本电动力学教材都阐述了电磁场的物质性及其运动的波动性, 并通过带电体与电磁场的相互作用, 论证了电磁场能量及能流的存在。在此我们仅利用麦克斯韦方程组及一些必要的矢量运算, 根据能量守恒, 导出电磁场能量密度及能流密度的表达式。

从麦克斯韦方程组 (1.1.1) 的第二式和第四式可得

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} - \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} = \vec{j} \cdot \vec{E} + \vec{E} \cdot \dot{\vec{D}} + \vec{H} \cdot \dot{\vec{B}} \quad (1.1.4)$$

式中 $\dot{\vec{D}}$ 和 $\dot{\vec{B}}$ 上打点表示对时间的微商。用矢量恒等式, 左边的两项可表示成 \vec{E} 与 \vec{H} 矢积的散度

$$\vec{E} \cdot \nabla \times \vec{H} - \vec{H} \cdot \nabla \times \vec{E} = -\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) \quad (1.1.5)$$

把上式代入 (1.1.4) 式, 得

$$(\vec{E} \cdot \dot{\vec{D}} + \vec{H} \cdot \dot{\vec{B}}) + \vec{j} \cdot \vec{E} = -\nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}) \quad (1.1.6)$$

在满足物质方程 (1.1.2) 的情况下, 有

$$\left\{ \begin{aligned} (\vec{E} \cdot \dot{\vec{D}}) &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} \cdot \vec{D}) \\ (\vec{H} \cdot \dot{\vec{B}}) &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{H} \cdot \vec{B}) \end{aligned} \right. \quad (1.1.7)$$

如设电磁场的能量密度为

$$W = \frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) \quad (1.1.8)$$

电磁场的能流密度（也叫坡印廷矢量）为

$$\vec{S} = (\vec{E} \times \vec{H}) \quad (1.1.9)$$

把(1.1.7)式, (1.1.8)式和(1.1.9)式代入(1.1.6)式, 有

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \vec{j} \cdot \vec{E} = -\nabla \cdot \vec{S} \quad (1.1.10)$$

上式实际上是能量守恒的微分形式, 它的积分形式为

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint W d\tau + \iiint \vec{j} \cdot \vec{E} d\tau = -\oiint \vec{S} \cdot d\vec{\sigma} \quad (1.1.11)$$

该式左边第一项表示单位时间内任一个体积内电磁能量的增加, 第二项表示单位时间在该体积内传导电流所做的功(产生焦耳热), 这两项之和等于单位时间内通过这个体积的表面流进该体积的能量。在绝缘介质($\sigma=0$)的情况下, 没有传导电流, 能量守恒的微分形式为

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{S} \quad (1.1.12)$$

反映能量守恒的(1.1.6)式是直接由麦克斯韦方程组导出的, 不论物质方程(1.1.2)是否成立, 它总是正确的。

5. 波动方程 在各向同性的均匀介质中, 介电常数 ϵ 和磁导率 μ 是与时间及空间位置无关的常数。我们用消元法可以从麦克斯韦方程(1.1.1)得到 \vec{E} 和 \vec{H} 分别满足的微分方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} - \mu \epsilon \ddot{\vec{E}} = (\mu \vec{j} + \frac{1}{\epsilon} \nabla \rho) \\ \nabla^2 \vec{H} - \mu \epsilon \ddot{\vec{H}} = -\nabla \times \vec{j} \end{cases} \quad (1.1.13)$$