

吕百达 著

激光光学

LASER OPTICS

四川大学出版社

内 容 提 要

本书研究激光通过光学成象系统、各种介质和在光学谐振腔内的传输及变换的规律。全书共十章。前五章介绍基本概念、阐述矩阵光学、高斯光束和衍射积分方程理论等。后五章讨论多元件光学谐振腔、相位共轭腔、光腔失调特性、光泵浦热效应和光腔设计等。本书内容丰富、取材新颖，反映了国内外最新研究成果，也反映了作者自己的独立见解，并提出了一些有实用价值的研究课题。特别是后五章内容更富特色。每章末附有习题和主要参考文献。本书为从事激光工作的研究人员、技术人员和研究生提供了一本好的参考书，并可供高等院校有关专业的师生参考。

激 光 光 学

吕百达 编著

四川大学出版社出版（成都市四川大学内）
四川省新华书店发行 四川大学印刷厂印刷

开本 787×1092毫米 1/32 印张 11.84 字数 258 千字
1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷
印数：0001——3,000册

统一书号：13404·6 定价：2.00元

序 言

激光光学研究激光通过光学系统、各种介质和在光学谐振腔内的传输和变换的规律。前者包括激光通过光学成象系统(透镜、望远镜系统、透镜序列等)、非均匀介质、各向异性介质和非线性介质等的传播问题,后者则构成光学谐振腔的研究内容。系统地掌握这些知识,对激光工作者来讲都是必要的。

全书共十章,可分为二大部分。第一部分包括前五章基础内容,介绍激光光学中的基本概念,阐述矩阵光学、高斯光束和衍射积分方程三种分析方法并用这些方法来研究激光光学的基本问题。为了便于自学,这一部分在写法上尽可能给出了数学推导的主要步骤并注意对使用方法和所得结果从物理上加以说明。第二部分包括后五章,讨论激光光学专门问题,如多元件光学谐振腔、环形腔、光腔的失调特性、光泵浦热效应和与光腔设计有关的问题等。这一部分在写法上注意了突出重点,着重说明如何应用基本方法来解决实际问题。

本书力求从实用角度出发,用比较易于理解的方式来阐述理论,重点放在理论的应用上,较严格的理论表述可以在章末所列参考文献中找到。虽然激光物理和激光技术的书籍和文献经过二十多年积累已相当丰富,但在激光光学、光学谐振腔方面的专著却很少。在本书编写过程中广泛参考了国内外有关文献和资料,内容的取舍上则主要根据编者的需要。在全书的系统性、讲述方法及对一些问题的研究方法和诠释上反映了编者个人的见解。对于所采用的文献,则经编者复算和整理,与原文不全相同。每章末附有习题供练习之用,对正文中一些问题的进一步讨论也放在

习题中。遗憾的是，受篇幅所限和因安排上的问题，激光在光纤和波导管中的传播、大气光学等内容都没有包括进去，所幸在这些方面已有一些优秀著作可供参考。具有高等数学、原子物理、数理方程、光学、电动力学和激光基本知识的读者，在阅读本书过程中不会遇到原则性的困难。

本书是编者在四川大学物理系光学专业和成都地区激光讲习班上使用的讲义基础上加以修改、增删而成的。无论是编者在西德凯泽斯劳滕 (Kaiserslautern) 大学从事光学谐振腔专题研究期间或是在编写本书过程中都得到了 H. Weber 教授十分友好和热情的帮助，为了深入讨论一些问题，常常占用了他不少休息时间。编者还与 W. Demtröder 教授进行了多次十分有益的讨论，书中使用了 Kaiserslautern 大学两位教授领导研究室有关的学术报告、博士论文和学士论文中的一些研究结果，为此谨向 H. Weber 教授和 W. Demtröder 教授表示衷心的感谢。四川大学激光物理与激光化学研究室主任匡一中教授审阅了原稿，并提出宝贵意见，北京工业学院魏光辉先生、杭州大学王绍民先生提供了一些有价值的学术论文，四川大学出版社为本书早日问世作了大量工作，特此一并致谢。

虽然在试用过程中对本书曾加以修改，但这是一个包含内容十分丰富并在发展中的研究领域，为编者学识水平所限，谬误之处在所难免，诚挚地期望读者批评指正，不胜感谢！

吕百达谨识于四川大学
一九八五年十二月

本书使用主要符号一览表

| | |
|------------|-------------------|
| B | 光焦度/磁感应强度 |
| c | 光速 |
| D | 失调灵敏度参量 |
| E | 电场强度 |
| F | 菲涅尔数/透镜焦距 |
| f | 透镜焦距 |
| G | G 参数/光腔的特征参数 |
| g | g 参数 |
| g', g'' | g' 参数, g'' 参数 |
| g^* | g^* 参数 |
| g_0 | 小信号增益系数 |
| H | 磁场强度 |
| h_1, h_2 | 厚透镜主面至顶点距离 |
| I | 光强/单位矩阵 |
| J | 电流密度 |
| k | 波矢 |
| L | 腔长 |
| l | 激光棒长/二透镜间距离 |
| M | 矩阵/不稳腔往返放大率/磁化强度 |
| m_i | 不稳腔单程放大率 |
| m, n | 横模序数 (矩形域) |
| N | 光子密度 |

| | |
|----------------|--------------------------|
| p | 功率 |
| p, l | 横模序数 (圆形域) |
| Q | 腔的品质因子 |
| q | 高斯光束复参数/纵模序数 |
| R | 反射率/高斯光束等相面曲率半径/球面波曲率半径 |
| r | 半径 |
| s | 匹配因子, 相对孔径/稳定性因子 |
| T | 透射率/温度 |
| U | 能量 |
| V | 损耗因子 |
| w_0, w_0 | 基模高斯光束腰斑半径 |
| w_1, w_2 | 腔反射镜处基模高斯光束光斑半径 |
| z_0, z_0 | 瑞利长度 (共焦参数) |
| α | 损耗系数/吸收系数/角度 |
| δ | 功率损耗 |
| σ | 电导率 |
| χ | 线性极化率 |
| τ_R | 光子寿命 |
| ρ_i | 腔反射镜曲率半径 |
| ρ | 电荷密度, 激光介质密度/距离/腔反射镜曲率半径 |
| η | 介质折射率 |
| $\tilde{\eta}$ | 介质复折射率 |
| \mathcal{E} | 电场强度复表示 |
| ϵ_0 | 真空中的介电常数 |
| ϵ | 介电常数 |
| λ | 波长 |
| μ_0 | 真空中的磁导率 |

| | |
|-------------------------|---------------|
| μ | 磁导率 |
| ϕ | 相移/直径 |
| φ | 相移/角度 |
| ν | 频率 |
| $\Delta\nu_l$ | 纵模间距 |
| $\Delta\nu_c$ | 无源腔线宽 |
| ω | 角频率 |
| θ_0, θ_{0l} | 基模高斯光束远场发散角 |
| θ_{nl} | 高阶高斯光束远场发散角 |
| Γ | 不稳腔输出耦合率/传输常数 |

目 录

序 言

| | |
|---------------------------------|----|
| 本书使用主要符号一览表 | 11 |
| 第一章 概 论 | 1 |
| §1.1 波动光学的基本方程 | 1 |
| §1.2 激光光学的研究内容和研究方法 | 5 |
| §1.3 激光的模式 | 8 |
| §1.4 光学谐振腔的损耗 Q 值 线宽 | 14 |
| 参考文献 习题 | 20 |
| 第二章 矩阵光学基础 | 22 |
| §2.1 传播矩阵 $ABCD$ 定律 | 22 |
| §2.2 传播矩阵示例 | 28 |
| §2.3 共轴球面腔的约束稳定性 | 38 |
| §2.4 光腔的本征方程 不稳腔 微扰稳定性 | 44 |
| §2.5 多程反射室 | 53 |
| §2.6 Collins公式 | 59 |
| 参考文献 习题 | 61 |
| 第三章 高斯光束 | 64 |
| §3.1 高斯光束的基本性质 | 64 |
| §3.2 高斯光束的复参数表示 $ABCD$ 定律 | 74 |
| §3.3 高斯光束在非均匀介质中的传播 | 77 |
| §3.4 高斯光束的衍射损耗 | 80 |

| | |
|---|-----|
| §3.5 高斯光束通过光学成象系统的一般变换公式 | 85 |
| §3.6 高斯光束通过薄透镜的变换 | 87 |
| §3.7 高斯光束的聚焦 | 89 |
| §3.8 高斯光束的匹配 | 94 |
| §3.9 高斯光束通过调焦望远镜系统的变换 | 97 |
| §3.10 高斯光束通过失调望远镜系统的变换 | 99 |
| §3.11 高斯光束与球面波传输变换规律的比较 | 109 |
| §3.12 高斯光束强度的均匀化 | 118 |
| §3.13 椭圆高斯光束 | 120 |
| §3.14 高斯光束的信频 | 123 |
| §3.15 高斯光束的自聚焦 | 127 |
| §3.16 高斯光束参数的实验测量 | 131 |
| 参考文献 习题 | 135 |
| 第四章 稳定球面光学谐振腔的模式理论 | 137 |
| §4.1 高斯光束在稳定球面光学谐振腔内的传播 | 137 |
| §4.2 各类稳定球面光学谐振腔的模参数公式 | 144 |
| §4.3 等价共焦腔 | 148 |
| 参考文献 习题 | 156 |
| 第五章 光学谐振腔的衍射积分方程理论 | 158 |
| §5.1 光学谐振腔的本征积分方程 | 159 |
| §5.2 反射镜几何尺寸无限大时光学谐振腔 本征方程的解 | 162 |
| §5.3 反射镜几何尺寸有限时光学谐振腔的 本征积分方程 光腔的对称性质 | 171 |
| §5.4 共焦腔 | 177 |
| §5.5 Fox—Li 数值迭代法 平行平面腔 | 185 |

| | | |
|------------|----------------------|------------|
| §5.6 | 光腔损耗的计算 小结 | 192 |
| §5.7 | 不稳腔的基本性质 | 196 |
| §5.8 | 不稳腔的衍射积分方程理论 Prony 法 | 207 |
| §5.9 | 有源不稳腔 | 215 |
| | 参考文献 习题 | 218 |
| 第六章 | 多元件光学谐振腔 | 222 |
| §6.1 | 多元件光学谐振腔的等价腔分析法 | 223 |
| §6.2 | 热透镜腔 | 228 |
| §6.3 | 远场发散角 | 234 |
| §6.4 | 基模热稳腔和自孔径选模效应 | 250 |
| §6.5 | 望远镜腔 | 258 |
| | 参考文献 习题 | 276 |
| 第七章 | 环形腔、折迭腔和相位共轭腔 | 280 |
| §7.1 | 环形腔 | 281 |
| §7.2 | 折迭腔 | 293 |
| §7.3 | 相位共轭腔 | 298 |
| | 参考文献 习题 | 303 |
| 第八章 | 光学谐振腔的失调特性 | 304 |
| §8.1 | 失调腔的几何光学分析方法 | 304 |
| §8.2 | 失调腔的高斯光束分析方法 | 308 |
| §8.3 | 失调腔的衍射积分方程分析方法 | 319 |
| §8.4 | 失调相位共轭腔 | 322 |
| | 参考文献 习题 | 323 |
| 第九章 | 光泵浦热效应 | 324 |
| §9.1 | 物理模型 | 324 |

| | |
|---|------------|
| §9.2 光焦度 | 327 |
| §9.3 非稳态有体热源情况 ($h \neq 0, \dot{T} \neq 0$) | 329 |
| §9.4 非稳态无体热源情况 ($h = 0, \dot{T} \neq 0$) | 339 |
| §9.5 稳态解 ($h \neq 0, \dot{T} = 0$) | 341 |
| §9.6 实验研究 | 342 |
| 参考文献 习题 | 350 |
| 第十章 光学谐振腔的设计 | 351 |
| §10.1 小型 CO_2 激光器的设计 | 351 |
| § 0.2 不稳腔的设计 | 355 |
| §10.3 碰撞脉冲锁模腔型的选择 | 359 |
| 参考文献 习题 | 366 |

LASER OPTICS

CONTENTS

Preface

Notation

Chapter

1. Introductory Concepts
2. Fundamentals of Matrix Optics
3. Gaussian Beams
4. Mode Theory of Stable Spherical-Mirror Resonators
5. Diffraction Integral Theory of Optical Resonators
6. Multielement Resonators
7. Ring Resonator, Folded Resonator and Phase Conjugate Resonator
8. Misaligned Resonators
9. Thermal Effects in Optically Pumped Lasers
10. Design Procedure of Optical Resonators

第一章 概 论

本章属于导论性内容，首先复习波动光学的基本理论和有关的数学表述方式，然后介绍激光光学的研究内容和研究方法。激光模式、线宽、光腔损耗和 Q 值这样一些基本概念是激光光学中经常要使用的，为了便于后面的学习，在本章中也作了讨论。

§ 1.1 波动光学的基本方程

一、波动方程

波动理论认为，光是一定频率范围内的电磁波，其运动规律可用 Maxwell 方程组来描述：

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1-1-1) \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1-1-2) \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1-1-3) \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1-1-4) \end{array} \right.$$

本书采用合理化 MKS 单位制。上式中 \mathbf{E} 为电场强度， \mathbf{D} 为电位移， \mathbf{H} 为磁场强度， \mathbf{B} 为磁感应强度，一般情况下它们都是矢量且为时间和空间坐标的函数，还满足物质方程：

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (1-1-5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (1-1-6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1-1-7)$$

式中 \mathbf{P} 为电极化强度, \mathbf{J} 为电流密度, ρ 为自由电荷密度, σ 为电导率, \mathbf{M} 为磁化强度.

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ AS/Vcm}$ 真空中的介电常数

$\mu_0 = 1.257 \times 10^{-8} \text{ VS/Acm}$ 真空中的磁导率

在线性极化情况下

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} \quad (1-1-8)$$

式中 χ 为介质的线性极化率.

在非磁、各向同性均匀介质中, 利用物质方程, 从 Maxwell 方程组可推出对光现象起主要作用的电场强度所满足的波动方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1-9)$$

对无损介质 (等效于 $\sigma = 0$) 有

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (1-1-10)$$

式中 c 为真空中的光速:

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \quad (1-1-11)$$

(1-1-9) 式或 (1-1-10) 式是线性光学的基本方程.

二、赫姆霍茨方程

容易证明, 形如

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t \pm kz + \varphi) \quad (1-1-12)$$

的单色平面波是 (1-1-10) 式的一个特解. 式中 ω 为光波的角频率, k 为波矢, φ 为初相.

除用实数 E 表示电场强度外, 激光光学中也常用复数 \mathcal{E} 表示电场强度:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\vec{\mathcal{E}} + \vec{\mathcal{E}}^*) \quad (1-1-13)$$

$$\vec{\mathcal{E}} = \vec{\mathcal{E}}_0 e^{i\omega t} \quad (1-1-14)$$

介质的电极化强度也可用复表示 \mathcal{P} :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} (\vec{\mathcal{P}} + \vec{\mathcal{P}}^*) \quad (1-1-15)$$

$$\vec{\mathcal{P}} = \epsilon_0 \chi \vec{\mathcal{E}} \quad (1-1-16)$$

$$\vec{\mathcal{P}}_0 = \epsilon_0 \chi \vec{\mathcal{E}}_0 \quad (1-1-17)$$

式中带“*”量为共轭量。

利用 (1-1-13) — (1-1-17) 式可将 (1-1-10) 式化为

$$\Delta \vec{\mathcal{E}}_0 + \tilde{\eta}^2 k^2 \vec{\mathcal{E}}_0 = 0 \quad (1-1-18)$$

式中 $\tilde{\eta}$ 为复折射率

$$\tilde{\eta} = \sqrt{1 + \chi} \quad (1-1-19)$$

在标量场假设下 (1-1-18) 式成为

$$\Delta \mathcal{E}_0 + \tilde{\eta}^2 k^2 \mathcal{E}_0 = 0 \quad (1-1-20)$$

在真空中 $\tilde{\eta} = 1$, 于是有

$$\Delta \mathcal{E}_0 + k^2 \mathcal{E}_0 = 0 \quad (1-1-21)$$

(1-1-20), (1-1-21) 式都称为赫姆霍茨方程。

三、惠更斯—菲涅尔原理和菲涅尔—基尔霍夫方程

惠更斯—菲涅尔原理可表述为: 波前上每一点都可以看成是新的波源, 从这些点发出次波来, 而空间中某一点

的光波场就是这些次波在该点相干迭加的结果。众所周知，这是研究光衍射现象的理论基础，并且可以按照这一原理用作图法在一些简单情况下求出新的波前来。但是，对于大量光衍射现象的处理，需要比较精确的数学表述，这就是菲涅尔—基尔霍夫衍射积分方程。

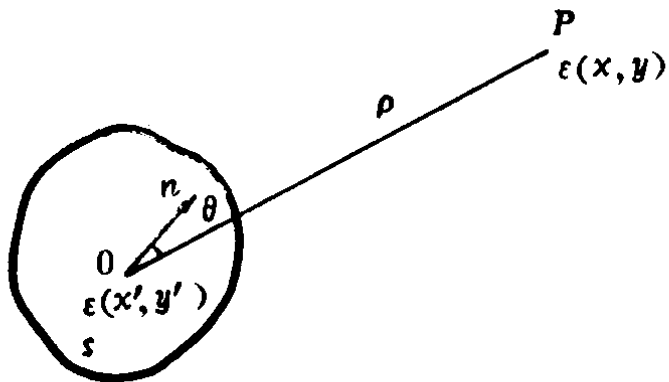


图 1—1—1

如图(1—1—1)

所示，设已知空间某一曲面 s 上的光波场为 $\mathcal{E}(x', y')$ ，可按下式求出所考查点 $P(x, y)$ 的场 $\mathcal{E}(x, y)$ ：

$$\mathcal{E}(x, y) = -\frac{i}{2\lambda} \int_s \mathcal{E}(x', y') \frac{e^{ik\rho} (1 + \cos\theta)}{\rho} ds' \quad (1-1-22)$$

(1—1—22) 式就是菲涅尔—基尔霍夫衍射积分方程。式中 λ 为光波波长， ρ 为源点 $O(x', y')$ 与场点 $P(x, y)$ 间的距离， θ 为 s 面上 $O(x', y')$ 点处的法线与 ρ 的交角， ds' 为 s 面上 $O(x', y')$ 点处的面积元。积分沿曲面 s 进行， $(1 + \cos\theta)$ 称为倾斜因子。由 (1—1—22) 式可知，如果已经知道了光标量场在空间任一曲面上的场振幅和相位分布，就可以求出该光波场在空间其它任意点处的场振幅和相位分布。

注意在激光光学中也经常使用菲涅尔—基尔霍夫公式的另一形式

$$\mathcal{E}(x, y) = \frac{i}{2\lambda} \int_s \mathcal{E}(x', y') \frac{e^{-ik\rho}(1 + \cos\theta)}{\rho} ds' \quad (1-1-23)$$

这两种形式实际上是相同的。

应当指出，无论是 (1—1—20)、(1—1—21) 形式的微分方程或者是 (1—1—22)、(1—1—23) 形式的积分方程都是描述光频电磁场的基本方程，因而可视研究问题的方便，或者使用微分形式的赫姆霍茨方程，或者使用积分形式的菲涅尔—基尔霍夫公式来讨论激光光学问题。

§1.2 激光光学的研究内容和研究方法

一、研究内容

激光光学研究激光通过光学系统和各种介质的传输变换，以及激光在光学谐振腔内的传播规律。

用高斯光束可以足够好地描述激光的特性。因此，高斯光束通过光学成象系统、非均匀介质、各向异性介质以及非线性介质的传输变换是激光光学重要的研究内容。

光学谐振腔是常用激光器的主要组成部分之一。与微波腔相比，光频腔的主要特点是侧面敞开以抑制振荡模式，并且它的轴向尺寸（腔长）远大于波长，一般也远大于横向尺寸（反射镜线度）。光学谐振腔理论研究的基本问题是光频辐射场在腔内的运动规律，从数学上讲就是求场方程的本征函数和本征值。一切约束在有限空间范围内的场只能存在于一系列取分立值（称为本征值）的本征态中，场的每一个本征态具有一定的空间分布和本征频率（又称共振频率）。从波动光学的观点，把光腔内可能存在的电磁场的本征态称为激光的模式。按照光子说观点，激光的模式就是可区分的