

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

# 激光光学

光束描述、传输变换与光腔技术物理

*Laser Optics*

*Beam Characterization, Propagation and Transformation,  
Resonator Technology and Physics*

(第三版)

吕百达



高等教育出版社



研究生教学用书 教育部研究生工作办公室推荐

ISBN 7-04-012967-1



9 787040 129670 >

定价 44.30 元



**研究生教学用书**

教育部研究生工作办公室推荐

# 激光光学

光束描述、传输变换与光腔技术物理

Laser Optics

Beam Characterization, Propagation and Transformation,  
Resonator Technology and Physics

(第三版)

吕百达

高等教育出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

激光光学:光束描述、传输变换与光腔技术物理/吕  
百达著.—3版.—北京:高等教育出版社,2003.12  
ISBN 7-04-012967-1

I. 激… II. 吕… III. 激光理论—研究生—教材  
IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 075077 号

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010-82028899		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷	中国农业出版社印刷厂印刷		
开 本	787×960 1/16	版 次	1986 年 7 月第 1 版 2003 年 12 月第 3 版
印 张	32.75	印 次	2003 年 12 月第 1 次印刷
字 数	550 000	定 价	44.30 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换.

**版权所有 侵权必究**

## 内 容 简 介

本书是教育部研究生工作办公室推荐的研究生教学用书. 全书对激光光学的研究方法和主要论题做了系统深入的讨论. 其中, 第一章激光光学概论, 第二章光学中的矩阵方法, 第三章激光束的描述和光束质量为第一部分, 阐述激光光学的基本概念、研究方法、光束描述、光束质量和光束控制等问题. 第二部分包括第四章高斯光束、第五章高斯-谢尔模型光束、第六章平顶光束和第七章贝塞耳光束, 研究有代表性光束的描述及其传输变换特性. 第八章简单两镜光学谐振腔, 第九章光学谐振腔的衍射积分方程理论, 第十章一些典型光学谐振腔的特性和第十一章光学谐振腔的失调特性构成第三部分光腔技术物理的研究内容, 第十二章为展望. 本书内容丰富, 取材新颖, 基础知识和前沿进展并重, 反映了国内外在激光光学领域的最新研究成果, 同时还阐述了作者对激光光学中若干专门问题的个人见解.

本书可作为高等院校光学、光学工程、物理电子学及电子科学与技术等专业高年级本科生、研究生的教材, 也可供在相关领域工作的教师和科技人员参考.

## 序 言

《激光光学》一书这次新版时,百达教授对其做了大的改动,融入了近十年来该领域内的一些重要科研成果并吸收了各方面专家的建议,使它成为一本更为丰满、新颖的高校教材和科技参考书.有幸为新版做序,并读本书,对我是一次再学习的好机会.

整个激光科技领域,如果说激光的产生是“头”,激光与物质的相互作用是“尾”,则激光光学是其“中段”,它研究激光束在各种光学系统中传输变换的规律和光腔内的光束特性,以便尽可能按应用的要求对光束进行控制.显然,掌握激光光学的知识,对于与激光有关的科学研究和工程应用是十分重要的.写好一本《激光光学》,可以说是一番“红烧中段”的功夫.百达教授基于他深厚的学科基础和多年的潜心研究,娴熟地利用矩阵光学方法和光学衍射理论,对各种有代表性的激光束的传输变换和光腔技术物理问题进行了清晰而系统的阐述,为我国激光领域的教学和科研提供了一本非常有用的著作.

1992年,邓锡铭先生在为本书第二版做序时,曾称赞这是一本激光光学方面的好书,并推荐再版.10年后本书在修订后得以再版,不仅从一个侧面反映了我国激光科学技术的蓬勃发展,也可用以告慰我国光学界的先驱者.

杜祥琬

2002年9月22日于北京

## 第二版序言

激光光学是研究激光束在空间传输变换的一门分支学科。在激光发明以前,研究光束通过光学系统的传输特性多以匀振幅光束为对象,而由腔模决定的激光束为非匀振幅光束,从而带来激光科学工作者感兴趣的一些新的传输特性,高斯光束的传输就是一个典型的例子。

作者娴熟地利用矩阵光学方法,并使之与光学衍射理论相结合,既简洁又清楚地描述了激光束的传输变换,特别是对谐振腔内光束特性的分析,更为系统、完整。

作者吕百达教授长期从事光束传输的研究,有深厚的基础。本书是他十多年来从事激光光学科研和教学工作成果的总结。在书中,由浅入深组织的材料相信对入门读者会是特别有用的。我认为,这是一本激光光学方面的好书,特此推荐再版。

邓锡铭 教授

1992年5月于上海光机所

# 前 言

激光科学技术领域的研究内容大体上可分为三部分.第一部分研究激光的产生、工作原理和工作特性,以激光物理为其理论基础,并以激光器件和技术为其技术基础.第二部分研究激光束的传输变换规律以实现光束控制之目的,这是激光光学研究的论题.第三部分研究激光和物质相互作用,包括激光的多种辐照效应、激光等离子体物理以及涉及面非常广泛的激光工业材料加工、激光医学、激光生物学和激光化学等诸多实际应用.

在实际工作中,由激光器输出的光束常需要通过一些光学系统(包括自由空间)后,才能到达激光与物质相互作用面,或者因输出激光参数不能满足应用要求而需要设计合适的光学系统加以变换.激光光学正是研究激光束通过各类光学系统(成像、非成像光学系统,轴对称和非轴对称光学系统等)、各种介质(均匀和非均匀介质、各向同性和各向异性介质等)的传输变换规律以及与光腔工程相关的光腔技术物理问题的一门分支学科.自1960年世界上第一台红宝石激光器问世以来,因应用需求的牵引,光束传输变换特性和光腔技术物理的研究工作一直十分活跃,进展迅速,涉及的内容非常广泛,发表的文献浩如烟海,相关研究成果已获得了卓有成效的实际应用;系统地掌握激光光学的基础知识和研究方法,并应用这些知识和方法来解决实际问题,对于激光科学家和工程师而言都是必要的.

本书是以光束描述、传输变换与光腔技术物理作为重点内容编写的.全书从内容安排上可分为以下几部分.第一章激光光学概论,第二章光学中的矩阵方法,第三章激光束的描述和光束质量为第一部分,阐述激光光学的基本概念、研究方法、光束描述、光束质量和光束控制等问题.第二部分包括第四章高斯光束,第五章高斯-谢尔模型光束,第六章平顶光束和第七章贝塞耳光束,研究在实际工作中经常遇到、有代表性的高斯光束(包括基模和多模高斯光束)、部分相干光束(典型例为高斯-谢尔模型光束)、平顶均匀分布光束(超高斯光束、平顶高斯光束等)的描述及其传输变换特性.贝塞耳类光束(零阶和高阶贝塞耳光束等)不仅因其具有被称为“无衍射”的特性而引起学术界的兴趣,而且空间分布为贝塞耳函数的超短脉冲贝塞耳光束在色散介质中传输时还可能具有“无衍射和无色散”的特性而受到重视,因此也放在这部分中讨论.第八章简单两镜光学谐振腔,第九章光学谐振腔的衍射积分方程理论,第十章一些典型光学谐振腔的特性和第十一章光学谐振腔的失调特性构成第三部分光腔技术



物理的研究内容.在这部分中,除系统介绍光学谐振腔的计算设计方法外,还以若干典型有实际应用意义的光腔为例,研究光腔的设计、工作特性和改善光腔输出特性的专门技术,并以热透镜腔作为有源腔的代表,讨论其动态工作特性以及多棒串接热透镜腔的设计和热致应力双折射补偿技术等.最后,在第十二章展望中,阐述了作者对激光光学前沿和发展方向等方面的个人见解.全书用了六章即第一章至第四章、第八章和第九章的篇幅讨论激光光学的分析方法.基本理论和研究结果,其余各章介绍激光光学专门问题、前沿和进展.

《激光光学》是以1983年以来作者在四川大学、西南交通大学、宁波大学和江西师范大学等校对物理系,应用物理系和光电科学技术系的光学、光电子技术等专业高年级本科生、研究生和高访学者讲授《激光光学》和相关课程所用讲义、专题报告,以及在国内外学术会议和高级研讨班上所做学术报告为素材加以整理、修改而成的.在编写过程中还广为参考了在这一领域发表的中外学术论文、著作、博士论文和研究报告.每章末编入了习题和参考文献,供练习和进一步学习参考之用.本书力求较为全面和系统地反映国内外在激光光学研究领域包含的主要论题和有代表性的研究成果.其中,也包括我国激光科学家跻身于该领域取得的一些有重要意义的科研成果,书中亦写入了作者及其研究组在国内外从事激光光学相关课题研究的心得体会,希望能形成一本有中国特色、内容深度上适于作为高等院校光学、光学工程、物理电子学及电子科学与技术等专业高年级本科生、研究生的教材以及在相关科研领域工作的教师和科技人员的参考书.使用本书作教材时,可按授课对象和需要对书中章节进行选取.在本书新版时,作者认真考虑了国内外专家学者所提意见,与第二版(吕百达.激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制.成都:四川大学出版社,1992)相比较,除在素材安排上有上述变动外,在内容上亦做了大的增删,例如:

- 对《激光光学》的研究方法做了较为一般的讨论,包括了光频电磁场的矢量理论、非近轴光束和超短光脉冲的研究方法等.

- 对光束描述和光束质量等问题做了较为系统的阐述,反映了国际上近年来相关研究工作的进展.

- 增加了有光阑系统中光束传输变换、矢量光束、非近轴光束、几个光周期(甚至更短)的超短光脉冲的传输等新内容.

- 写入了多棒串接腔和热致应力双折射补偿技术、负支实共焦非稳腔、受激布里渊散射相位共轭腔和超高斯反射镜腔等有实际应用意义的新型光腔.

• 对激光光学前沿和发展方向,研究中存在的某些问题和可能的解决方法等做了讨论.

• 删去了原书第十章,新写第三章、第六章和第十二章,改写第一章、第五章和第七章.在第四章、第十章中增加了较多内容,其余各章也有修改.

激光光学是一门覆盖范围甚为广泛的分支学科,还可以包括激光在光纤和波导中的传输,在非线性介质中的传输,激光大气传输以及强激光的传输与控制等内容.因教学内容安排上的原因和受篇幅所限,本书未能专门讨论这些论题,有兴趣的读者请参阅有关专著或文献,例如:

[1] Snyder A W, Love J D. Optical Waveguide Theory. London: Chapman and Hall, 1983

[2] Shen Y R. The Principles of Nonlinear Optics. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1984

[3] 宋正方.应用大气光学基础.北京:气象出版社,1990

[4] 吕百达.强激光的传输与控制.北京:国防工业出版社,1999

自1980年以来,作者曾多次去德国工作,难以忘怀的是在从事激光光学的专题研究中至今一直得到柏林技术大学著名激光科学家 H. Weber 教授的大力支持和热情帮助.自20世纪80年代末期以来,作者参加了国家高技术激光技术主题和惯性约束聚变主题的科研实践,在从事光束传输和光束控制研究中与邓锡铭院士、杜祥琬院士、王乃彦院士、贺贤土院士、刘盛纲院士、姜文汉院士、赵伊君院士、范滇元院士、姚建铨院士、林尊琪教授、华欣生教授、苏毅教授、魏光辉教授、陆启生教授、王绍民教授和杨成龙教授等(恕未在此一一列出)的多次深入讨论使作者受益匪浅,谨此向他们和曾经对作者在科学研究中给予帮助的国内外专家和朋友们以及20余年来先后曾在作者所在研究组工作和学习的70多位老师和研究生们一并致谢!

邓锡铭院士生前十分重视光束传输的研究,认为是对激光应用,特别是对强激光应用不可缺少的基础研究工作,1992年他曾热情为本书第二版作序.中国工程院副院长杜祥琬院士在百忙之中为新版写了序言.特此,向他们表示衷心的感谢!

本书虽经多次修改,但受限于作者的学识水平,书中谬误之处难免,恳请阅者批评指正,不胜感激!

吕百达

2003年5月于成都

## 本书使用的主要符号一览表

$a$	本征像散
$A, B, C, D$	变换矩阵 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 诸元素
$B$	磁感应强度矢量
$c$	光速
$D$	电位移矢量
$D$	失调灵敏度参量/光焦度
$E$	电场强度矢量/能量/单位矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
$E$	电场强度/本征像散
$F$	菲涅耳数/透镜焦距
$f$	透镜焦距/频率
$G$	$G$ 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
$g'^*, g''^*$	$g'^*$ 参数, $g''^*$ 参数
$g_0$	小信号增益系数
$H$	磁场强度矢量
$h$	维格纳分布函数
$h_1, h_2$	厚透镜主面与顶点间距离(主距)
$I_0$	零阶修正贝塞耳函数
$I$	$4 \times 4$ 单位矩阵 $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$I$	光强
$J_0$	零阶贝塞耳函数
$J_1$	一阶贝塞耳函数

续表

$J$	$4 \times 4$ 矩阵 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ / 电流密度矢量
$\hat{J}(r)$	偏振矩阵
$J$	电流强度/互强度
$K$	陡峭度( $K$ 参数)
$k$	波数
$L$	腔长
$l$	激光介质长度/距离
$M$	矩阵/磁化强度矢量
$M$	非稳腔往返一周放大率/磁化强度
$M_1, M_2, M_3$	$M_1$ 角放大率, $M_2$ 横向放大率, $M_3$ 轴向放大率
$M^{-1}$	$M$ 的逆矩阵
$M^T$	$M$ 的转置矩阵
$M^+$	$M$ 的转置共轭矩阵
$\overleftarrow{M}$	$M$ 的反向变换矩阵
$M^2$	$M^2$ 因子
$m$	单程变换矩阵
$m$	非稳腔的单程放大率
$n$	介质折射率
$m, n$	横模序数(矩形域)
$N$	光子密度/阶数
$P$	电极化强度矢量
$P$	功率
$p, l$	横模序数(圆形域)
$Q$	腔的品质因数( $Q$ 值)
$Q^{-1}$	复波前矩阵
$q$	$q$ 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/径向坐标/距离
$S$	谱密度函数/面积
$s$	匹配因子/稳定性因子
$T$	透过率/时间/脉宽

续表

$t$	时间/扭曲参数
$u$	物距
$V$	损耗因子
$v$	像距
$W$	交叉谱密度函数
$W_m, W_n, W_{pl}$	高阶高斯光束束宽
$w_0, W_0$	束腰宽度
$w, W$	束宽
$Z_0, Z_{0i}$	瑞利长度
$\alpha$	损耗系数/吸收系数/角度/ $\alpha$ 矩阵/空间相关度
$\beta$	$\beta$ 值/角度/ $\beta$ 矩阵/空间相关参数
$\gamma$	本征值/ $\gamma$ 矩阵/复相干系数/复相干度
$\delta$	功率损耗
$\sigma$	电导率/高斯光阑宽度/相关长度
$\chi$	线性极化率
$\tau_R$	光子寿命
$\rho$	腔反射镜曲率半径/距离
$\eta$	效率
$\epsilon_0$	真空中的电容率
$\epsilon$	电容率
$\lambda$	波长
$\mu_0$	真空中的磁导率
$\mu$	磁导率/复相干度
$\phi$	相移/直径
$\varphi$	相移/角度
$\nu$	频率
$\Delta\nu_q$	纵模间隔
$\Delta\nu_c$	无源腔线宽
$\omega$	圆频率
$\theta_0$	基模高斯光束远场发散角
$\theta$	远场发散角
$\theta_x, \theta_y$	$x, y$ 方向远场发散角
$\Gamma$	非稳腔输出耦合率/传输常数
$\Delta$	望远镜离焦量

策划编辑	胡凯飞
责任编辑	董洪光
封面设计	李卫青
责任绘图	尹 莉
版式设计	陆瑞红
责任校对	殷 然
责任印制	杨 明

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

**反盗版举报电话：**(010) 58581897/58581698/58581879/58581877

**传 真：**(010) 82086060

**E - mail：**dd@hep.com.cn 或 chenrong@hep.com.cn

**通信地址：**北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务部

**邮 编：**100011

购书请拨打电话：(010)64014089 64054601 64054588

# 目 录

<b>第一章 激光光学概论</b> .....	1
§ 1.1 激光光学的研究内容和研究方法 .....	1
§ 1.2 波动光学的基本方程 .....	7
§ 1.3 广义衍射理论 .....	9
§ 1.4 算子光学方法 .....	18
§ 1.5 哈密顿光学 .....	21
§ 1.6 激光的模式 .....	22
§ 1.7 光学谐振腔的损耗 $Q$ 值 线宽 .....	26
习题 .....	30
参考文献 .....	31
<b>第二章 光学中的矩阵方法</b> .....	33
§ 2.1 变换矩阵 $ABCD$ 定律 .....	33
§ 2.2 变换矩阵示例 .....	38
§ 2.3 几何光学中的矩阵方法 .....	43
§ 2.4 复杂光学系统的菲涅耳数和程函公式 .....	49
§ 2.5 $ABCD$ 矩阵的分解 .....	53
§ 2.6 共轴球面腔的约束稳定性 .....	63
§ 2.7 光腔的本征方程 微扰稳定性 .....	67
§ 2.8 多程反射室 .....	69
习题 .....	72
参考文献 .....	73
<b>第三章 激光束的描述和光束质量</b> .....	75
§ 3.1 激光光束质量的相关概念 .....	75
§ 3.2 $M^2$ 因子和 $K$ 参数 .....	78
§ 3.3 束宽和 $M^2$ 因子的测量 .....	81
§ 3.4 实际激光光束质量的评价 .....	84
§ 3.5 激光束的描述:强度矩方法 .....	90
§ 3.6 光束控制 .....	94
习题 .....	95
参考文献 .....	95



<b>第四章 高斯光束</b> .....	98
§ 4.1 高斯光束的基本性质 .....	98
§ 4.2 高阶高斯光束 .....	102
§ 4.3 高斯光束的复参数表示 ABCD 定律 .....	105
§ 4.4 高斯光束在非均匀介质中的传输 .....	109
§ 4.5 高斯光束通过复杂光学系统的变换 .....	111
§ 4.6 高斯光束通过薄透镜的变换 .....	117
§ 4.7 高斯光束的聚焦 .....	119
§ 4.8 高斯光束的焦移 .....	122
§ 4.9 高阶高斯光束的焦移和焦开关 .....	124
§ 4.10 高斯光束的匹配 .....	131
§ 4.11 高斯光束通过调焦望远镜系统的变换 .....	133
§ 4.12 高斯光束通过离焦望远镜系统的变换 .....	134
§ 4.13 高斯光束与球面波传输变换规律的比较 .....	141
§ 4.14 高斯光束通过复元素光学系统的变换 .....	145
§ 4.15 高斯光束强度的均匀化 .....	148
§ 4.16 高斯光束通过光阑传输中的衍射损耗 .....	151
§ 4.17 高斯光束通过有光阑光学系统的传输公式 .....	160
§ 4.18 像散椭圆高斯光束 .....	163
§ 4.19 像散厄米 - 高斯光束的对称化 .....	165
§ 4.20 复宗量厄米 - 高斯光束 .....	174
§ 4.21 非近轴高斯光束 .....	179
§ 4.22 非近轴椭圆高斯光束 .....	182
§ 4.23 高斯光束参数的实验测量 .....	191
习题 .....	194
参考文献 .....	196
<b>第五章 高斯 - 谢尔模型光束</b> .....	199
§ 5.1 部分相干光的基本理论 .....	199
§ 5.2 高斯 - 谢尔模型光束的传输变换 .....	203
§ 5.3 高斯 - 谢尔模型光束的谱移动和谐开关 .....	210
§ 5.4 矢量高斯 - 谢尔模型光束的传输变换 .....	216
习题 .....	221
参考文献 .....	221
<b>第六章 平顶光束</b> .....	223
§ 6.1 超高斯光束 .....	223