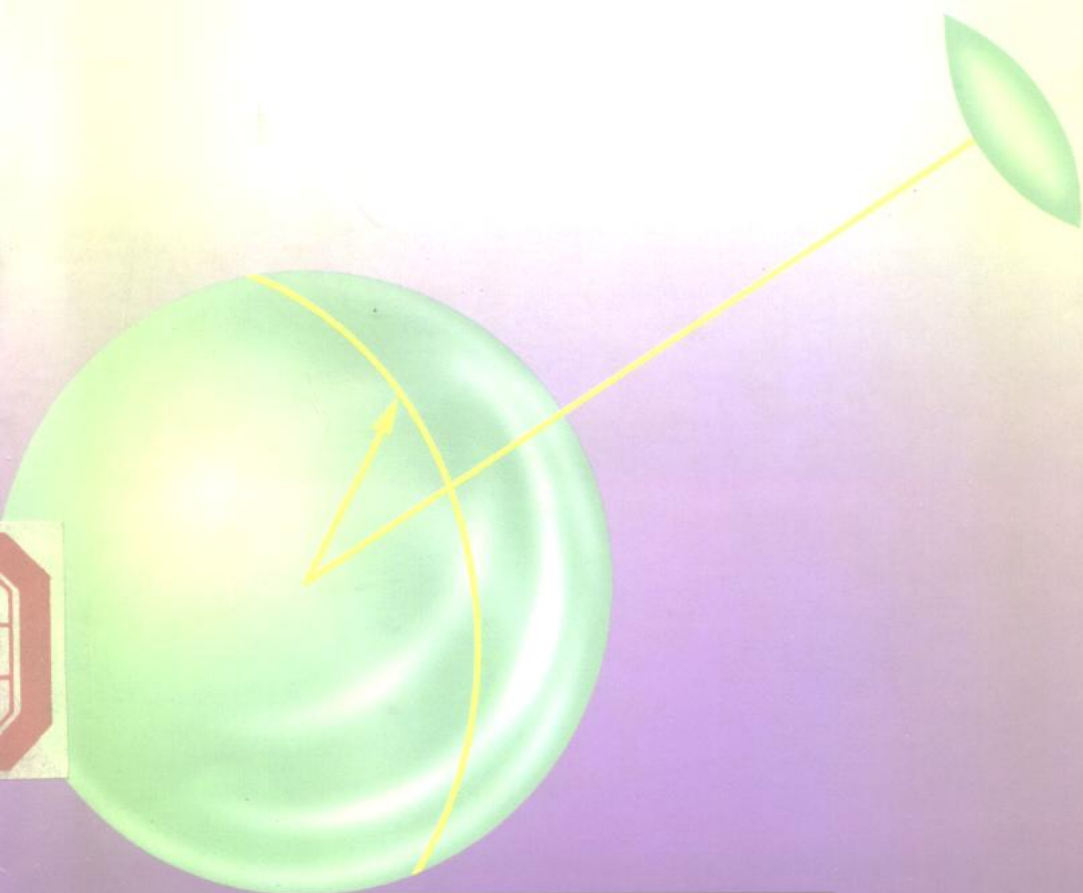


强激光的传输与控制

Propagation and Control of High – Power Lasers

吕百达 著



国防工业出版社

73.7211
296

强激光的传输与控制

Propagation and Control of High - Power Lasers

吕百达 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

强激光的传输与控制/吕百达著. —北京:国防工业出版社, 1999.5

ISBN 7-118-01955-0

I. 强… II. 吕… III. ①大功率-激光-传输②大功率-激光-控制 IV. TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 19462 号

2021/05

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 $\frac{1}{2}$ 360 千字

1999 年 5 月第 1 版 1999 年 5 月北京第 1 次印刷

印数:1—1500 册 定价:25.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

3 3 3 3 3 3 3 3 3 3

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上占领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等,经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成

(以姓氏笔划为序) 刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序 一

强激光的研究与应用是当今激光高科技发展的一个重要方向。强激光是指高功率、高能量的激光,它是在一些与国家利益攸关的重大前沿项目的推动下发展起来的。强激光驱动的惯性约束核聚变、强激光的远距离能量输送和利用是这类重大项目的典型。在强激光的研究中,需要处理高功率、高能量激光的各类传输、变换,光束的控制与整形以及实际强激光光束质量的评价与测量等问题。这些问题具有相当的复杂性,也是国际同行们正在努力研究的前沿问题。对这些问题的研究不仅有重要的学术意义,还具有实际的应用价值,它会影响激光工程设计的质量和效费比。

强激光的研究与应用也是我国八六三计划的重要领域之一。在这一领域的实践中,人们深切地感受到强激光时空变换、传输与控制这一学科分支的丰富内涵和重要意义,也深深感到这一领域培养青年科技工作者和研究生的迫切性和重要性。

百达教授的专著《强激光的传输与控制》正是在这一需求背景的召唤下问世的。作者参与了八六三计划强激光研究的实践,对所述问题有深入的研究,作者又是多年来从事激光光学研究的专家,有坚实的基础和深厚的功底。本书对激光光学方法及其在强激光技术中的应用作了系统的阐述,反映了国内外学者在强激光光束传输变换研究中取得的最新成果,是一本有特色的、高水平的学术专著。相信本书的问世将推动我国激光高科技的发展并特别有助于培养这一领域高层次的青年人才。

杜祥琬

序 二

自 1960 年第一台红宝石激光器问世不久,一些有远见卓识的科学家针对激光束所具有的高亮度特性提出定向能武器和惯性约束聚变的设想,近年来又出现利用极高亮度激光束驱动、产生 X 射线激光的实验结果,掌握了获得 10^{19} W/cm^2 以上超高密度电磁能的实验手段,从而开辟了强场物理学新领域。所有这些发展均依赖于高能量激光和高功率激光技术(统称为强激光技术)的进展。

强激光技术属于当今世界光学激光领域研究前沿之一,有重要的应用背景和深远的科学意义。发展强激光技术涉及巨额投资、大型科学实验工程、极为复杂和精密的实验及物理诊断技术、长的研究周期。世界各先进国家均聚集精兵强将、依赖于国家级的重点实验室来推动这一前沿科学技术的发展。

强激光的产生、传输变换和控制,以及强激光和物质的相互作用构成了强激光技术领域的主要研究内容。而传输光学(Light Transmission Optics)本身又是光学的一个分支学科。在强激光技术领域,例如惯性约束聚变驱动器的发展历史中,光束传输的一些研究成果,包括空间滤波器的像传递原理、B-积分概念、宽频带激光的传输和靶面均匀照明技术等,对国内外激光驱动器的总体方案设计和工程研究曾起了重要作用。吕百达教授继出版《激光光学》之后,最近完成的专著《强激光的传输与控制》首次对强激光的传输变换与放大、光束时间和空间整形以及靶面均匀照明等一系列重要论题作了系统的阐述和总结,是一项十分有意义的工作。作者既是在强激光技术领域第一线长期从事科研工作的专家,又是指导硕士、博士研究生的导师,将其丰富的科研、教学经验和创

新的学术见解融于其中,因此保证了本书有高的学术水平。书中对强激光的物理模型、光传输研究方法和研究内容的系统归纳,以及由浅入深组织的材料适合于不同层次的读者使用。为此,我非常高兴本书的出版,并乐于将它向这一领域的科技工作者,特别是年轻的学者推荐。

邓锡铭

前 言

1991年范滇元教授在评审拙著《激光光学》(四川大学出版社,1986年)时曾坦言:“《激光光学》一书不能说已经尽善尽美了。例如,对于激光在有源介质中传输,光纤中导波传输、强光的非线性传输以及在时变介质(如大气)中传输等方面还有所欠缺”。这是十分中肯的意见。滇元先生显然认为在《激光光学》中应当而且必须包括研究强激光传输变换的内容。承蒙广大读者厚爱,《激光光学》为国内数十家高等院校和科研院所选作教材或参考书,1991年底第1版3000册已脱销。作者在修改《激光光学》时,认真考虑了滇元先生的宝贵建议,对全书作了大的增删(由第1版的25.8万字增加至58万字),以《激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制》为名,于1992年由四川大学出版社再版。遗憾的是,为篇幅所限,一些重要内容仍未能包括进去。

主要基于两方面的原因,促使作者编写《强激光的传输与控制》一书。第一,作者在参加八六三国家高技术强激光技术和惯性约束聚变领域的科研工作中,以及在广泛的国际和国内学术交流活动中,深刻认识到激光光学方法在解决强激光传输变换、光束整形和控制问题中所起的重要作用;第二,作者在指导研究生做科研工作的实践中,感到缺少一本在内容上与《激光光学》衔接但层次更高的阐述激光光学方法和应用,尤其在强激光技术中应用的书,用以帮助读者能较快入门,并了解与相关学科的联系。

本书是以强激光传输变换、光束整形和控制作为重点内容编写的。书中所指强激光(文献中亦称高功率激光)包括在工业材料加工中应用的高平均功率激光,作为激光功率空间输运(Laser power beaming)之类应用的高能量、高功率激光和惯性约束聚变

(Inertial confinement fusion, ICF)驱动器中的高能量、高峰值功率激光。与前面提及二书的不同点有:

1. 对激光光学中所用的研究方法作了较为系统的总结,并举例说明方法的应用。值得强调的是,ABCD 矩阵、广义 ABCD 定律和广义衍射理论是研究光束传输变换的重要方法。

2. 光束概念的扩展。与经典光学中主要研究几何光线和均匀球面波,《激光光学》中主要研究高斯激光束不同,在《强激光的传输与控制》中光束的概念大为扩展,包括超高斯光束、像散高斯光束、部分相干光、有振幅调制和相位畸变光束、空间-时间域中有耦合光束和贝塞尔光束等。

3. 以强激光技术的两类重要应用——激光功率空间输运和 ICF 为背景,研究了与之密切相关的强激光大气传输和畸变补偿,光束的合成和分解,光束的发射、捕获、跟踪和瞄准技术,以及 ICF 驱动器中的光传输理论,光束的时间整形和空间整形,靶面均匀辐照技术等问题。当然,其中的一些原理和方法,包括本书最末一章讨论的高功率激光谐振腔,也都在高功率激光的工业材料加工和其它应用中,大有用武之地。

《强激光的传输与控制》是以作者在四川大学对光学专业博士生讲授《高等激光光学》课程所用讲义、专题论文,以及在国内外学术会议和高级研讨班上所作学术报告为素材加以整理、修改而成的。在编写过程中,作者还广泛参考了国内外在这一领域的学术论文、著作和研究报告。本书旨在较为全面和系统地总结国内外在强激光技术领域与应用密切相关的光束传输变换和光束控制所包含的主要论题和有意义的研究结果。据作者所知,这尚属首次。本书的主要特色是:基于我们的研究工作,对光束变换的分析方法,激光光束质量的物理概念和评价,强激光传输、变换和聚焦特性,典型强激光放大系统中的光传输理论,光束整形和靶面均匀辐照技术以及高功率激光谐振腔研究的新进展等作了较为深入的研究和讨论,并给出了一些典型的数值计算和实验研究结果。特别是,本书力求较为系统地反映我国激光科学家跻身于该领域所取

得的一些有创新特色的科研成果。鉴于这一领域涉及众多的学科交叉和复杂的实验技术,为达到此目的,作者深知尚欠功力。更何况,因明显的牵引目标和应用需求促使强激光光束变换与控制研究工作的飞速发展常令人目不暇接!但本书若能对从事相关工作的读者,特别是年轻的激光科技人员多少有所裨益,能够帮助他们在浩如烟海的文献中减少寻觅到所需资料的困难,则使作者感到欣慰了。

从本书的构思到定稿,始终都得到了邓锡铭院士、杜祥琬院士、范滇元院士和赵伊君院士的鼓励、支持和帮助,杜祥琬院士和邓锡铭院士在百忙之中仍非常关心本书的出版,对全书内容安排提出宝贵建议,并热心为本书撰写序言,邓锡铭院士在病中还来信殷切期望本书早日出版,以飨读者,杜祥琬院士审阅了全书,提出十分中肯的修改意见,特此表示衷心的感谢!作者还得到陶祖聪教授、贺贤土院士、彭翰生教授、王乃彦院士、刘盛纲院士、姜文汉院士、李同保院士、姚建铨院士、林尊琪教授、马佳光教授、华欣生教授、张信威教授、周传明教授、龚知本教授、胡欢陵教授、常铁强教授、马祖光教授、苏毅教授、陈栋泉教授、陈绍和教授、杨成龙教授、朱从善教授、张俊洲教授、梅遂生教授、匡一中教授、王清月教授、魏光辉教授、周仁忠教授、王绍民教授、周寿桓教授、陆启生教授、屈乾华教授、乐时晓教授、卢亚雄教授、宋正方教授和周军教授等许多十分有益的帮助,在此一并致谢。尤其难以忘却的是作者17年前在德国访问工作时的导师、著名激光科学家 H. Weber 教授多年来对作者在强激光技术领域科研工作的引导和帮助。在广泛的国际学术交流中,作者得到 M. Nakatsuka 教授、A. E. Siegman 教授、W. Demtröder 教授、K. Bergmann 教授、T. Tschudi 教授、J. C. Dainty 教授、T. N. Lee 教授、K. S. Low 教授、G. Nemes 博士和 K. Rohr 博士等的多方帮助,特别是从与 M. Nakatsuka 教授在 ICF 驱动器和均匀辐照技术方面的深入讨论获益匪浅,特此对他们致以深切的谢意!

本书也是对我们课题组在强激光传输与控制方面的科研和教

学工作的系统总结。多年来先后在本课题组工作或学习的 50 多位老师、本科生、硕士和博士生的工作在书中有不同程度的反映。为使本书较为完整和系统化,还援引了不少中外学者的科研成果(详见每章末所列参考文献)。为此,对这些作者们深致谢忱!

最后,作者衷心感谢国家高技术激光技术主题和惯性约束聚变主题、中国工程物理研究院、国家高技术强辐射重点实验室和高温高密度等离子体物理国防科技重点实验室对有关科研项目的资助和国防科工委情报研究所的帮助,以及国防工业出版社对本书出版的支持。如果没有参加这些高技术项目的科研实践和国防工业出版社的大力支持,本书的完成和出版是不可能的。

由于本书所涉及的是现代光学和激光技术中一个极富挑战性、正在发展和有重要应用背景的研究领域,囿于作者的学识水平、谬误之处难免,恳请阅者批评指正,不胜感谢!

吕百达
于四川大学

目 录

第一章 强激光的传输与控制的研究对象和研究方法	1
§ 1.1 历史的回顾	1
§ 1.2 几何光学和矩阵光学方法	4
§ 1.3 波动方程	18
§ 1.4 广义衍射理论	21
§ 1.5 傅里叶光学方法	28
§ 1.6 算子光学和李代数方法	43
§ 1.7 哈密顿光学	56
§ 1.8 光流体模型和微分几何方法	58
参考文献	59
第二章 激光光束质量和诊断	64
§ 2.1 激光光束质量和评价参数	64
§ 2.2 强激光光束质量评价	70
§ 2.3 激光光束质量的诊断方法	72
参考文献	76
第三章 有光阑系统中光束的传输变换	77
§ 3.1 受光阑限制的球面波的聚焦特性	77
§ 3.2 受光阑限制的基模高斯光束的聚焦特性	83
§ 3.3 受光阑限制的高阶高斯光束的传输变换	87
§ 3.4 受光阑限制的高阶高斯光束的聚焦特性	92
§ 3.5 超高斯光束的基本特性	95
§ 3.6 受光阑限制的超高斯光束的传输变换	102
§ 3.7 受光阑限制的超高斯光束的聚焦特性	106
参考文献	109

第四章 部分相干光、有振幅调制和相位畸变光束的 变换特性	111
§ 4.1 部分相干光	111
§ 4.2 高斯-谢尔模型光束的传输变换	115
§ 4.3 高斯-谢尔模型光束的聚焦特性	125
§ 4.4 高斯-谢尔模型光束的相干模分解	140
§ 4.5 有振幅调制和相位畸变光束的传输	145
§ 4.6 有振幅调制和相位畸变光束通过环状光阑的 夫琅禾费衍射	155
参考文献	167
第五章 贝塞尔光束	170
§ 5.1 贝塞尔光束的产生	170
§ 5.2 贝塞尔光束的传输变换	175
§ 5.3 贝塞尔光束的聚焦特性	181
§ 5.4 应用	189
参考文献	194
第六章 强激光放大系统中的光传输理论	197
§ 6.1 强激光放大系统的基本构型	197
§ 6.2 强激光放大系统中的光泵浦和储能分布	202
§ 6.3 聚变驱动器放大系统中的光传输	219
§ 6.4 脉冲激光放大器中的光传输	224
§ 6.5 脉冲激光放大器的逆问题	229
参考文献	234
第七章 强激光大气传输	236
§ 7.1 大气折射、吸收和散射	236
§ 7.2 大气湍流	246
§ 7.3 热晕	251
§ 7.4 受激拉曼散射和大气击穿	257
§ 7.5 自适应光学技术	259
参考文献	271

第八章 靶面均匀辐照技术	274
§ 8.1 惯性约束聚变对辐照均匀性的要求	274
§ 8.2 几类简单的均匀线聚焦光学系统	277
§ 8.3 列阵线聚焦光学系统	280
§ 8.4 直接驱动均匀辐照的 S-L 模型	290
§ 8.5 空间域的光束匀滑化技术	294
§ 8.6 时间域的光束匀滑化技术	304
§ 8.7 二元光学技术	311
参考文献.....	319
第九章 光束的时间整形和空间整形	323
§ 9.1 光束的时间整形	323
§ 9.2 光束的空间整形	333
参考文献.....	340
第十章 光束的合成和净化	342
§ 10.1 光束合成的技术方案.....	342
§ 10.2 光束合成和净化的非线性光学方法.....	347
参考文献.....	350
第十一章 光束的发射、捕获、跟踪和瞄准技术	351
§ 11.1 光束控制系统的作用.....	351
§ 11.2 激光发射光学系统.....	354
§ 11.3 捕获、跟踪和瞄准系统	360
参考文献.....	370
第十二章 高功率激光谐振腔研究的新进展	371
§ 12.1 对高功率激光谐振腔的主要要求.....	371
§ 12.2 自成像和自滤波不稳腔.....	373
§ 12.3 共轴和离轴不稳腔.....	376
§ 12.4 折叠棱镜腔和离轴棱镜腔.....	379
§ 12.5 非轴对称像散腔.....	382
§ 12.6 非均匀反射镜腔和梯度相位镜腔.....	394
§ 12.7 相位共轭腔.....	400

§ 12.8 90°束转动不稳腔	403
§ 12.9 高功率二极管泵浦固体激光器的光腔	408
参考文献	412
英汉名词对照表	417