



《中国工程物理研究院科技丛书》第 039 号

激光核聚变靶 物理基础

张 钧 常铁强 著

国防工业出版社

《中国工程物理研究院科技丛书》第 039 号

激光核聚变靶物理基础

Fundamentals of the Target Physics for Laser Fusion

张钧 常铁强 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

激光核聚变靶场物理基础/张钧,常铁强著. —北京:
国防工业出版社, 2004. 11

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-03407-x

I. 激... II. ①张...②常... III. 激光应用—受控
聚变—聚变反应 IV. TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 006119 号

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)

腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 15 $\frac{1}{2}$ 380 千字

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:46.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:68428422

发行邮购:68414474

发行传真:68411535

发行业务:68472764

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

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,原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和武器装备建设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》 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植			
顾问	黄宁			
主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋	
秘书长	张又栋			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜	

《中国工程物理研究院科技丛书》

出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国际科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》

编审委员会

1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》 第五届编审委员会名单

顾问 俞大光

编委会主任 杜祥琬

副主任 彭先觉 孙颖 李志民

委员 (以姓氏笔划为序)

华欣生 江松 刘柯钊 孙承纬 陈银亮

何建国 李凡 李泽仁 苏毅 汪小琳

吴志杰 张方晓 张富堂 张健 罗顺火

孟凡宝 郑志坚 周德惠 竺家亨 顾援

唐永建 黄辉 彭述明

丛书编辑部负责人 李天惠

本册编辑 李天惠

《中国工程物理研究院科技丛书》 已出版书目

- | | | | |
|-----|-------------------------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能
董海山、周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989年11月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术
谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990年02月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学
章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991年09月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法
胡家赣编著 | 科学出版社 | 1981年12月 |
| 005 | 映象与混沌
陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992年06月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册)
谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年06月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册)
谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年12月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论
李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992年10月 |
| 009 | 粘性消动法和差分格式粘性
郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993年03月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用
张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993年05月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应
曹建中著 | 科学出版社 | 1993年05月 |

- 012 炸药热分析
楚士晋编著 科学出版社 1994年12月
- 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆主编 科学出版社 1994年12月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长编著 科学出版社 1994年12月
- 015 二维非定常流和激波
王继海编著 科学出版社 1994年12月
- 016 抛物型方程差分方法引论
李德元 陈光南著 科学出版社 1995年12月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演主编 国防工业出版社 1995年12月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士著 国防工业出版社 1995年12月
- 019 可靠性维修性可用性评估手册
潘吉安编著 国防工业出版社 1995年12月
- 020 脉冲辐射场测量数据处理与误差分析
陈元金编著 国防工业出版社 1997年01月
- 021 近代成像技术与图像处理
吴世法著 国防工业出版社 1997年03月
- 022 一维流体力学差分方法
水鸿寿著 国防工业出版社 1998年02月
- 023 抗辐射电子学 辐射效应及加固原理
赖祖武等著 国防工业出版社 1998年07月
- 024 金属的环境氢脆及其试验技术
周德惠 谭云编著 国防工业出版社 1998年12月
- 025 试验核物理测量中的粒子分辨
段绍节编著 国防工业出版社 1999年06月
- 026 实验物态方程导引(第二版)
经福谦著 科学出版社 1999年09月

- 027 无穷维动力系统
郭柏灵著 国防工业出版社 2000年01月
- 028 真空吸取器设计及应用技术
单景德编著 国防工业出版社 2000年01月
- 029 再入飞行器天线
金显盛编著 国防工业出版社 2000年03月
- 030 应用爆轰物理
孙承纬著 国防工业出版社 2000年12月
- 031 混沌的控制、同步与利用
陈式刚等著 国防工业出版社 2000年12月
- 032 激光干涉测速技术
胡绍楼著 国防工业出版社 2000年12月
- 033 空气炮理论与实验技术
王金贵著 国防工业出版社 2000年12月
- 034 一维不定常流与激波
李维新著 国防工业出版社 2000年12月
- 035 X射线与超紫外辐射源及其计量技术
孙景文编著 国防工业出版社 2001年03月
- 036 含能材料热谱集
董海山等编著 国防工业出版社 2001年03月
- 037 材料中的氦及氙渗透
王佩璇 宋家树著 国防工业出版社 2002年04月
- 038 高温等离子体 X射线谱学
孙景文编著 国防工业出版社 2003年1月
- 039 激光核聚变靶物理基础
张钧 常铁强 著 国防工业出版社 2004年6月

代 序

激光核聚变指的是用高能量、短脉冲的强激光作为驱动源的惯性约束聚变,1993年以来被正式列为国家高技术 863 计划惯性约束聚变主题研究项目。激光核聚变研究的长远目标是人类社会提供干净、丰富的理想新能源,同时近期可提供国防和基础科学研究的中间应用。

自 1960 年激光问世以后,科学家们就立即提出了用激光加热引发热核聚变的设想。1972 年,利用惯性约束手段的激光核聚变的概念正式出现,一些国家开展了大量科学和技术研究。经过 30 多年的努力,已取得了巨大的进展。美国投巨资正在建造固体激光器国家点火装置(NIF),法国与美国合作也建造百万焦的固体激光装置(LMJ),预计在今后 10 年内实现“点火”和能量中等增益,在实验室证明科学可行性。为了使聚变能用于发电,需要进一步解决工程与技术可行性,演示发电;最后解决经济可行性,进行商用发电。虽然在前进道路上也可能会遇到各种各样的困难,但宏伟的蓝图已展现在我们面前。特别要提到的是近年来快速发展的快点火概念,可能大幅度降低激光核聚变对驱动器的能量要求,正在吸引科学家们的极大注意,并为此努力。目前惯性约束聚变与磁约束核聚变是国际上实现可控热核聚变的两种平行研究的技术途径。

作为未来惯性聚变能电站的候选驱动器还有粒子束和 Z—箍束装置。即便使用其它驱动源,但是靶物理基础几乎是相同的,靶设计的很多物理规律仍然是适用的。

激光核聚变是一项科学和技术的系统工程,在科学可行性研究阶段主要包括激光器、物理实验、物理理论、诊断技术和靶的制

备等五个方面科学技术问题的研究。我国已先后建造了神光 I 和神光 II 激光装置(正在运行),正在建造神光 III 原型,2005 年完成;更大能量的神光 III 预计 2010 年建成。经过 20 多年的物理理论和物理实验研究,在靶物理的很多方面都取得了显著进展。激光核聚变靶物理包含十分复杂的物理过程,诸如本书介绍的:激光的传播与吸收,电子热传导,超热电子的产生与能量沉积,X 射线的发射与输运,内爆动力学与流体力学不稳定性,热核燃料的点火与燃烧等等。理论和数值模拟研究对深入认识靶物理规律,优化靶设计,改进实验,起着十分重要的作用。本书全面系统地介绍了激光核聚变靶物理基础,不仅对刚入门的年轻人是一本好书,就是对从事惯性约束聚变的研究人员也是一本好的参考书。

本书的作者长期从事该领域多方面的研究和研究生教学工作,有丰富的实际工作经验。书中除包含作者及其同事们多年的部分研究成果外,还总结和阐述了国际上有关研究以及某些前沿课题的成果。相信本书的问世,能对从事激光核聚变、等离子体物理等相关领域的科学工作者、工程技术人员、教师和研究生有所裨益。

中国科学院院士,原国家 863 计划
惯性约束聚变主题首席科学家

贺贤土

2003 年 9 月

前 言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion,简称 ICF)是通过内爆对热核燃料进行压缩,使其达到高温高密度,在内爆运动惯性约束下实现热核点火和燃烧,从而获取聚变能的方法。激光核聚变是用激光作为驱动源的。激光聚变研究的长远目标是为社会提供安全、干净、经济、丰富的新能源。

经过 30 多年的努力,惯性约束聚变有望在本世纪中叶发展成为商用的聚变电站。实现商用的惯性约束聚变能(IFE)需要进行四个主要的演示:(1)点火演示,演示热核点火和燃烧,确定所需要的最低驱动条件和靶设计;(2)高增益演示,考查高的驱动器效率与增益的乘积大于等于 10 的循环发电的必要条件;(3)工程演示,在整体系统中演示高频率运作,并选择反应堆系统的最佳设计方案;(4)商业演示,整体演示性能安全,环境优良,经济实用,接近商业运作的惯性聚变发电系统。这四个演示将分别证明聚变能发电的科学、技术、工业和商业的可行性。美国和法国等经济强国已投巨资建造能量为百万焦级的大型激光器,其它国家的激光器也在升级。在本世纪头 10 年~15 年实现点火,根据国际上的进展情况估计在 2037 年以后演示聚变功率发电。虽然在前进道路上可能会遇到各种各样的困难,但一幅美妙的蓝图已展现在我们眼前。

激光聚变研究是一项系统工程,在证明点火和燃烧科学可行性过程中,需要研究驱动器、物理实验和理论、诊断技术和制靶等多个方面。高功率激光器是惯性约束聚变目前常用的驱动器。激光聚变物理包括很多复杂的物理过程,如激光与等离子体相互作用,激光吸收,电子传热,超热电子的产生及其在靶中的能量沉积,

激光 X 射线转换和辐射运输,内爆动力学及内爆过程中出现的流体力学不稳定性,核燃料的热核点火与自持燃烧等等。适合于激光聚变的激光有效波长为 $0.35\mu\text{m}$,强度是 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2 \sim 10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$,脉冲宽度只有 10^{-9} 秒量级;点火靶丸的半径多为毫米大小,即使将来用于发电的靶丸也只有近厘米大小,这样小的靶丸还具有复杂的结构。如此高的激光强度在如此短的时间间隔内与靶丸耦合就决定了靶丸内部发生的很多物理过程是非平衡的。这就不给实验测量带来很大的困难和挑战,如高精度的时间和空间分辨;而且也给理论和数值模拟带来很大难度,如高温高密度非平衡原子物理,强刚性非平衡辐射流体力学计算,非局域热传导以及多群辐射输运计算等。为了研究和掌握上述各种物理过程的物理规律,需要进行各种类型的分解实验;同时进行相应的理论研究和数值模拟计算。经过对实验测量结果和数值模拟计算的仔细分析,去粗取精,去伪存真,由此及彼,由表及里,得到有关的物理规律,最后服务于靶的优化设计。激光聚变物理是十分复杂的,但本书将介绍一些简化物理模型,给出各种重要特征量与有关参量的函数关系和清晰明了的物理图象,帮助读者理解相应的物理过程和规律,同时便于掌握和记忆。

本书是在作者多年为等离子体物理专业研究生授课讲义的基础上编写的,系统地介绍了激光核聚变靶物理的理论基础,其中包括理论研究室同事们和作者的部分研究成果以及国际上公开发表的部分成果。全书共分 9 章,第 1 章介绍了惯性聚变能发电的基本原理;第 2 章~第 8 章描述了激光靶物理包括的各种物理过程及其物理规律;近年来国际上提出利用超强超短激光脉冲实现内爆靶丸快点火的物理设想在第 9 章中进行了介绍,这一章是由常铁强研究员在百忙中为本书编写的。另外,作为第 2 章~第 6 章引用的自型解的补充,附录中简明地介绍了它们的推导过程和量纲分析方法。

本书的读者对象是高年级的大学生、研究生和从事这方面研究或者有兴趣了解这方面研究的科技工作者。希望读者在阅读本

书之后,对激光核聚变有一个既全面又有一定深度的了解。特别是对于刚参加有关方面理论和实验研究的读者,如果在阅读过本书后感到能尽快进入角色,对自己从事的研究工作有所裨益,作者将感到由衷的欣慰。由于本学科涉及面广,发展快,作者的水平有限,预期的目的不一定能圆满实现。

最后,作者愿借此机会感谢中国科学院院士于敏教授在该理论研究过程中曾给予的指导和帮助,感谢中国工程物理研究院和作者所在的研究所、研究室在本书编写过程中给予的支持和赞助,感谢国防科技图书出版基金给予的资助,感谢中国科学院院士贺贤士教授在百忙中为本书作序,感谢他和郑志坚教授、裴文兵教授、曾先才教授分别对全书进行的审阅和修改。作者还要感谢《强激光与离子束》杂志编辑部科技丛书出版组的编委和国防工业出版社的成员,没有他们的支持和辛勤工作,本书的出版是不可能的。

张 钧

2003年5月27日

目 录

第 1 章 惯性约束聚变的基本原理	1
1.1 引言	1
1.2 实现惯性约束聚变的基本条件	4
1.3 实现惯性约束聚变的主要技术途径	6
1.3.1 内爆增压技术	6
1.3.2 氦氟中心点火与热核燃烧	7
1.4 惯性聚变能发电的基本原理	9
参考文献	13
第 2 章 激光的传播与吸收	14
2.1 引言	14
2.2 等离子体的基本概念	14
2.2.1 德拜屏蔽长度	15
2.2.2 电子等离子体频率	16
2.2.3 电子被离子散射偏转 90° 的时间	18
2.3 激光在等离子体中传播的波动方程和色散关系	20
2.4 激光在非均匀等离子体中传播的 WKB 解	22
2.5 激光在常密度梯度等离子体中传播的解析解	25
2.6 斜入射激光在非均匀等离子体中的传播与共振吸收	28
2.6.1 斜入射 S-极化光波	29
2.6.2 斜入射 P-极化光波和共振吸收	30
2.7 激光在等离子体中的碰撞吸收	34
2.7.1 光波包括碰撞阻尼时的色散关系	34
2.7.2 激光的逆韧致吸收系数	38
2.7.3 逆韧致吸收的非线性减小	38
2.8 参量过程	40
2.9 激光束的几何光学近似	41