

npc

惯性约束聚变 与强激光技术

Inertial Confinement Fusion
and
High Power Laser
Technology

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

Institute of Nuclear Physics and Chemistry,
China Academy of Engineering Physics

惯性约束聚变 与强激光技术

Inertial Confinement Fusion
and
High Power Laser Technology

中国工程物理研究院核物理与化学研究所

Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics

内 容 简 介

本文集总结了十年来中国工程物理研究院核物理与化学研究所在激光聚变研究的物理实验、诊断技术、制靶技术和激光器件诸方面取得的成果以及X光激光、准分子激光、核泵浦气体激光和激光大气传输等高功率激光技术研究中的进展,同时也介绍了国际上这些领域的研究现状及前景。

本书可供有关专业的研究人员和高校师生参考。

编 辑 委 员 会

傅依备 杨建国 江文勉 郑志坚 沈华忠
崔保顺 彭翰生(常务编委) 张菊娣(编辑)

惯 性 约 束 聚 变 与 强 激 光 技 术

中国工程物理研究院核物理与化学研究所编著

出版:《强激光与粒子束》杂志社

印刷:中国工程物理研究院印刷厂

内部发行

*

1990年12月第一版 开本:787×1092 1/16

1990年12月第一次印刷 印张:27 10/16

印数:001—600 字数:675 000

定 价 : 30.00 元

鑿而不舍

把慣性約束聚變工作
做到底

王淦昌

一九九〇年九月

学海星火
风尘激光

贺二所新书出版

陈皓宽 九〇九一

团结、求实、创新、

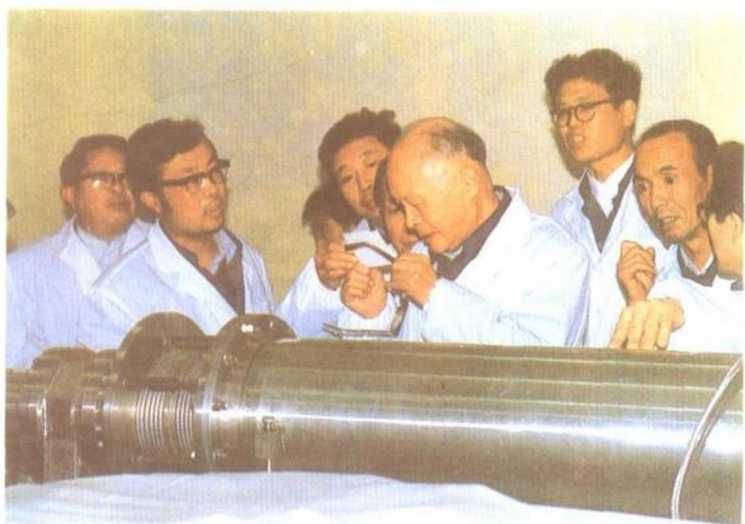
走出有中国特色发展
惯性约束聚变道路！

于敏

一九九〇年九月



著名科学家朱光亚教授(左三)视察我所高功率激光实验室 左五为所长傅依备教授。

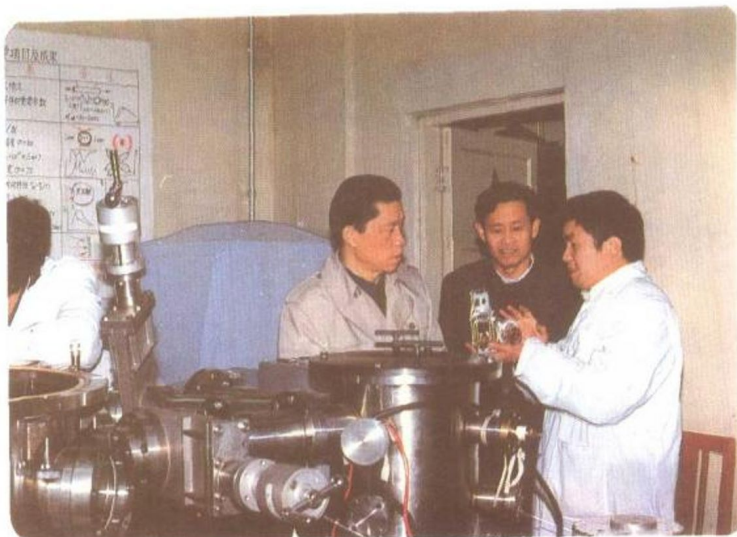


著名科学家王淦昌教授(左四)在我所ICF研究室指导工作



著名科学家王大珩教授(左三)到我所高功率激光实验室参观、指导 左一是院长胡仁宇教授,左二是徐志磊教授

高技术410主题专家组首席专家
陈能宽教授（右三）、秘书长杜
祥琬教授（右二）到我所X光
激光研究室指导工作



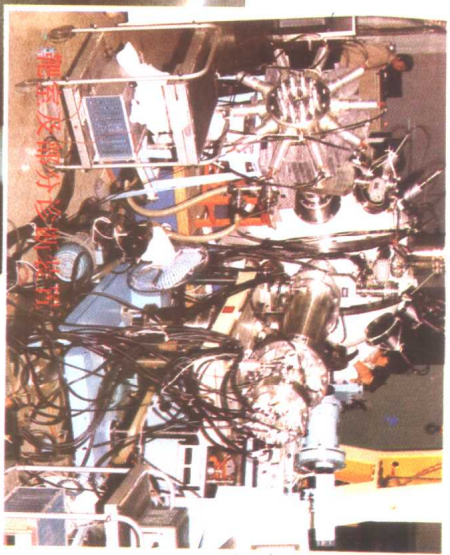
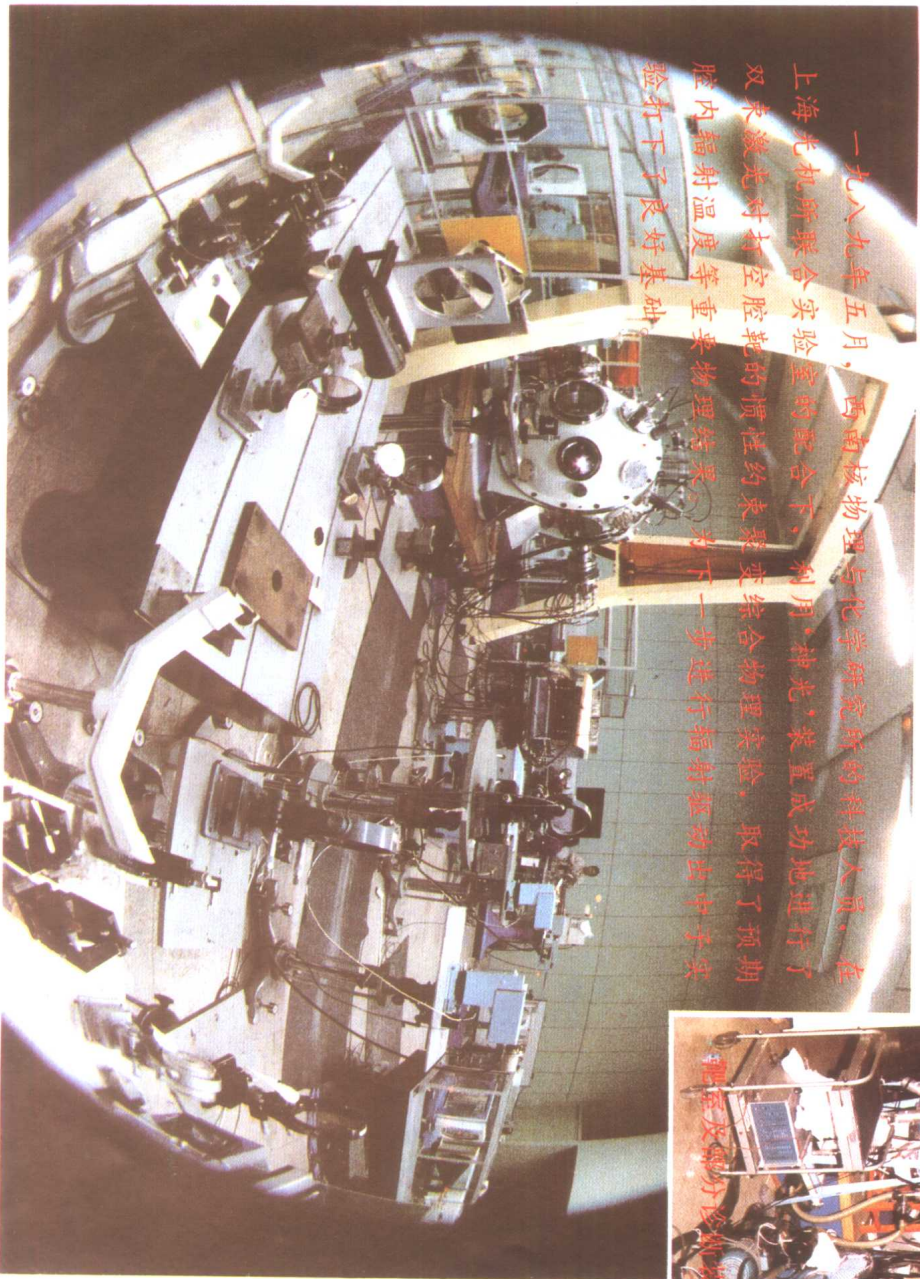
陈能宽（左五）、于敏教授（左四）
到上海联合激光实验室指导我所
ICF和X光激光实验工作



北京大学副校长陈佳洱教授（左
二）、上海原子核研究所所长杨福
家教授（左一）参观我所ICF靶
制备工艺研究室



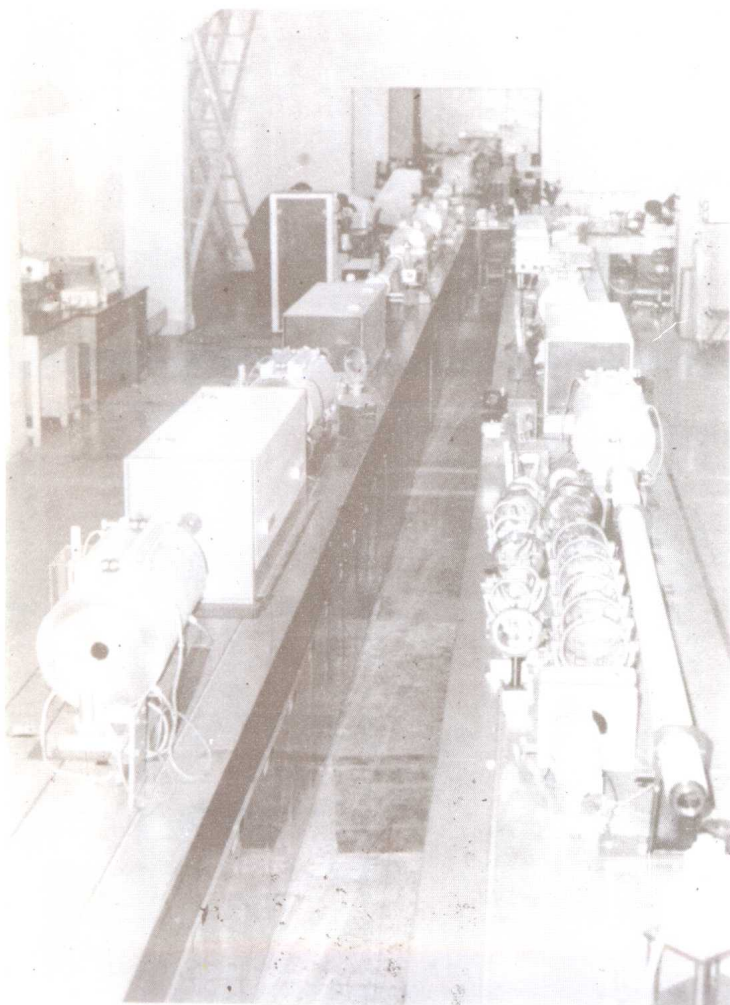
一九八九年五月，西南核物理与化学研究所的科技人员，在上海光机所联合实验室的配合下，利用“神光”装置成功地进行了双束激光对打空腔靶的惯性约束聚变综合物理实验，取得了预期腔内辐射温度等重要物理结果，为下一步进行辐射驱动中子实验打下了良好基础。



LF-12“神光”装置(10¹²W)



科学城高技术大楼



LF-11高功率钕玻璃激光器

前 言

自六十年代初期我国著名核物理学家王淦昌教授与美、苏几位科学家同时独立提出用高功率激光束诱发热核聚变起，惯性约束聚变(ICF)经历了数次重大突破，取得了举世瞩目的研究成果，发展成为当今世界上最重要的前沿科学领域之一。ICF的长远目标与磁约束聚变一样，是为了最终解决人类所需要的能源，预期本世纪末有可能完成其科学可行性论证。中近期则主要服务于军用。此外，由于ICF是多学科的综合领域，它所牵引和派生出的多种学科和技术也具有难以估量的潜在用途。如“水窗”波段的X光激光能够对活的生物细胞进行全息摄影，将会给生物学研究等带来革命性变化。可以说ICF研究将对一个国家的科学技术，乃至经济和军事产生深远的影响。因此，以美国利弗莫尔(LLNL)为代表的各发达国家的许多著名实验室都相继荟萃科技人材，不惜花费巨资，以期在该领域内占有一席之地。中国工程物理研究院于七十年代末期开始了适度规模的科技跟踪研究。该院应用物理与计算数学所分工负责理论研究，该院核物理与化学研究所分工负责发展制靶技术、诊断技术和进行物理实验，而高功率激光器件则由科学院上海光机所研制。经过十余年努力，在上述五个方面都已取得了重要进展，形成了中国的ICF研究体系，许多研究成果不但受到国内科技界的好评，也为国际同行所关注。

本书是以科技论文为基础编写而成的，对ICF的物理实验、诊断技术、激光技术和制靶技术，以及近几年来开展的国家高科技强激光技术诸方面的研究内容和成果进行了系统的论述和总结，同时介绍了国际上相关领域的研究水平，是国内迄今最完整的一本专著。本书的出版无疑有助于我国科技界对该领域的了解，也将促进与世界同行的学术交流。

本书共分六章。主要由直接从事研究的科技人员撰稿。编委郑志坚、沈华忠、崔保顺和周丕璋分别对ICF、X光激光、制靶技术和强激光技术各章进行了初审。编委傅依备、杨建国、江文勉、彭翰生和张菊娣，以及赵鹏骥和丁耀南等参加了复审。傅依备、彭翰生对全书做了终审。张菊娣负责全书的编辑工作。

著名科学家和有关领导王淦昌、朱光亚、王大珩、邓稼先、于敏和胡仁宇等开创了并始终关心和指导我国的ICF研究。应用物理与计算数学所和上海联合激光室十多年来同本所进行了真诚的、卓有成效的合作。此外，还有许多人此项事业以及本书的出版付出巨大劳动，在此一并致谢。

由于经验不足，时间仓促，虽经数次修改和校核，错误和不妥之处仍在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九九〇年八月

Preface

This book presents mainly the unclassified activities and accomplishments of the inertial confinement fusion (ICF) and high power laser technology program at the Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics (INPC CAEP) for the past ten years, covering diagnostics, target fabrication and physical experiments for both ICF and X-ray laser research, high power glass laser technology KrF lasers, nuclear-pumped gas lasers, and SRRS of high power laser beams in the atmosphere. The ICF program is jointly conducted by INPC, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics (theory) and High Power Laser and Physics Joint Laboratory (laser technology). Therefore, contents of theory and some of laser technology are not included in the book.

The objective of the book is to offer the inertial confinement fusion, plasma physics, and laser communities an opportunity for the first time to learn what we have been doing in this area and, thus, to promote scientific and technology exchanges and collaborations between scientists both in China and abroad.

The book is organized into six sections. Section 1 notes the highlights of the program. Section 2 relates the work on ICF diagnostic techniques and experiments. Section 3 introduces diagnostics and experiments for x-ray laser research. Section 4 summarizes target fabrication technology for ICF and XRL. Section 5 presents the development of high power glass laser technology. Finally, in Section 6 we discuss the research on KrF laser, nuclear-pumped gas laser and SRRS of high power laser beams.

Editors

Augst. 1990.

目 录

1. 概 述

1.1 我所惯性约束聚变与强激光技术研究进展	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 国外ICF研究的发展和现状	1
1.1.3 我所ICF研究的回顾和进展	3
1.1.4 我所强激光技术研究的兴起和进展	5
1.1.5 结语	8

2. 惯性约束聚变(ICF)

2.1 ICF 概论	9
2.1.1 ICF 基本概念	9
2.1.2 国外概况	10
2.1.3 我所ICF 概况	12
2.2 惯性约束聚变实验物理	13
2.2.1 黑洞靶特性实验研究	13
2.2.2 黑洞靶能量吸收特性实验研究	24
2.2.3 亚千X 光特性实验研究	33
2.2.4 ICF 中超热电子特性研究	47
2.2.5 激光与等离子体非线性相互作用过程实验研究	54
2.2.6 等离子体堵口效应	64
2.2.7 激光驱动爆堆靶特性研究	69
2.2.8 激光靶的等离子体流特性研究	75
2.3 惯性约束聚变诊断方法和技术	83
2.3.1 ICF 诊断概述	83
2.3.2 亚千X 光能谱诊断技术	90
2.3.3 硬X 光诊断技术	102
2.3.4 软X 光时间分辨诊断技术	110
2.3.5 X 光空间特性诊断技术	116
2.3.6 激光打靶实验的能量平衡测量系统	122
2.3.7 带电粒子诊断	132
2.3.8 光学诊断	139
2.3.9 聚变中子诊断	146

2.3.10 质子荧光源	152
2.4 数据的采集和处理	158
2.4.1 前言	158
2.4.2 惯性约束聚变中软X光时间谱解谱方法	161
2.4.3 测量辐射温度的XRD膜吸收法	169
2.4.4 多通道数据采集及在线处理系统	175

3.X 光激光

3.1 实验室X光激光研究现状和展望	179
3.1.1 引言	179
3.1.2 电子碰撞激光机制	180
3.1.3 三体复合泵浦机制	183
3.1.4 其它泵浦机制	184
3.1.5 实验室X光激光研究展望	185
3.2 X光激光实验物理	187
3.2.1 类氦锆X光激光增益实验	187
3.2.2 俄歇效应泵浦的Xe III 的 108.9nm 激光增益实验	197
3.2.3 类锂铝10.57 和 15.47nmX光激光增益实验	204
3.2.4 高剥离态离子、原子参数测量	209
3.3 X光激光诊断技术和方法	221
3.3.1 X光激光实验诊断技术	221
3.3.2 带环面镜的掠入射光栅谱仪	226
3.3.3 高分辨袖珍式掠入射光栅谱仪	232
3.3.4 用于108.9nm 激光增益实验的正入射光栅谱仪	237
3.3.5 晶体谱仪及其在激光等离子体实验中的应用	240
3.3.6 用Henke X光源标定 Kodak SWR X光胶片的响应曲线	248
3.3.7 X光底片在位相对标定	252

4. 制靶微工艺技术

4.1 微型靶研究概况	257
4.1.1 燃料及玻璃壳	257
4.1.2 高Z 高密度内推进层材料	258
4.1.3 高Z 低密度外推进层材料	258
4.1.4 低Z、低密度的缓冲层	258
4.1.5 低Z 低密度烧蚀层材料	259
4.1.6 低温靶	259

4.1.7	金属及塑料靶壳	259
4.1.8	靶的装配	260
4.1.9	靶参数和靶球内燃气体含量测量	261
4.1.10	X 光激光靶	261
4.1.11	关于今后工作的粗浅看法	262
4.2	微型靶制备工艺研究	262
4.2.1	X 光激光薄膜靶的研制	262
4.2.2	金靶壳的制备	266
4.2.3	激光打孔工艺的研究	269
4.2.4	电火花加工机在制备激光聚变靶中的应用	275
4.2.5	玻璃微球充氙工艺研究	279
4.2.6	聚对二甲苯涂层的制备	284
4.2.7	聚苯乙稀泡沫塑料的研制	287
4.2.8	靶装配	290
4.3	靶参数测量	293
4.3.1	微型靶几何参数测量	293
4.3.2	激光聚变靶中氙气体含量的测量	303

5. 高功率激光技术

5.1	高功率钕玻璃激光装置	310
5.1.1	引言	310
5.1.2	高功率钕玻璃激光系统的基本结构及问题	311
5.1.3	LF-11 激光装置的改进	313
5.1.4	结束语	320
5.2	LF-11 激光装置的发展研究	320
5.2.1	ICF 实验中孔靶定位的电视监控系统	320
5.2.2	X 光激光出光实验中的线聚焦系统	323
5.2.3	LF-11 激光装置的二倍频系统	328
5.2.4	激光参数—发散角和焦斑测量	328
5.2.5	多路脉冲激光微能量监测	348
5.2.6	用于激光等离子体诊断的探针光系统	351

6. KrF 激光、核泵浦激光和大气受激转动喇曼散射

6.1	大体积辉光放电泵浦 KrF 激光振荡器	358
6.1.1	前言	358

6.1.2	装置结构	358
6.1.3	回路参数研究和辉光放电的形成	359
6.1.4	气体混合比例和劣化问题	362
6.1.5	总结	363
6.2	核泵浦 ³ He-Ne 激光体系研究	364
6.2.1	前言	364
6.2.2	核泵浦物理	364
6.2.3	³ He-Ne 激光研究堆上实验	368
6.2.4	α 激励实验	373
6.2.5	核泵浦 ³ He-Ne 激光研究展望	379
6.3	大气传输受激转动喇曼散射	380
6.3.1	氮气受激转动Raman 散射对稳态聚焦光束激光脉冲大气传输的影响 ...	380
6.3.2	强激光脉冲在大气传输中的受激转动喇曼散射实验研究	391
6.3.3	大气中N ₂ 的受激转动喇曼散射实验研究的测量系统	398
	参考文献	405
	英文摘要	419

Inertial Confinement Fusion and High Power Laser Technology

1. Overview

- 1.1 Progress in Inertial Confinement Fusion Research and High Power Laser
Development at INPC CAEP *Fu Yibei and Yang Jianguo* 419

2. Inertial Confinement Fusion (ICF)

- 2.1 An Introduction to Inertial Confinement Fusion *Zheng Zhijian* 419
- 2.2 Experiments on Inertial Confinement Fusion
- 2.2.1 Experimental Investigations on Laser Beam – Hohlraum Interaction
..... *Tang Daoyuan* 419
- 2.2.2 Laser Energy Absorption in Hohlraum Targets *Xie Ping* 419
- 2.2.3 Studies of SubkeV X rays Emitted from Hohlraum Targets ... *Sun Kexu* 420
- 2.2.4 Experimental Studies of Suprathermal Electrons in Laser Plasmas
..... *Qi Lanying* 420
- 2.2.5 Experimental Studies of Nonlinear Interaction Processes Between Laser
and Plasma *Mei Qiyong* 420
- 2.2.6 Plasma Closure Effects *Ding Yaonan* 421
- 2.2.7 Implosion Performance of Laser – Driven Exploding Pusher Targets
..... *Zheng Zhijian* 421
- 2.2.8 Semi – Quantitative Study of Stream Behavior in Laser – Ablated
Plasmas *Tang Yongjian* 421
- 2.3 Diagnostics for ICF Experiment
- 2.3.1 Overview of ICF Diagnostics *Liu Zhongli* 422
- 2.3.2 SubkeV X – Ray Diagnostic Techniques *Sun Kexi* 422
- 2.3.3 Diagnostic Technique for Hard X Rays *Qi Lanying* 422
- 2.3.4 Time – Resolved Diagnostic Techniques for Soft X Rays
..... *Ding Yaonan* 422
- 2.3.5 Diagnostic Technique for X – Ray Spatial Characteristics ... *Cheng Jinxiu* 422
- 2.3.6 An Energy Balance Measurement System for Laser Target Experiments
..... *Xie Ping* 423
- 2.3.7 Diagnostics for Charged Particles *Tang Daoyuan* 423
- 2.3.8 Optical Diagnostic Techniques *Liu Zhongli* 423
- 2.3.9 Fusion Neutron Diagnostics *Guo Qin* 423