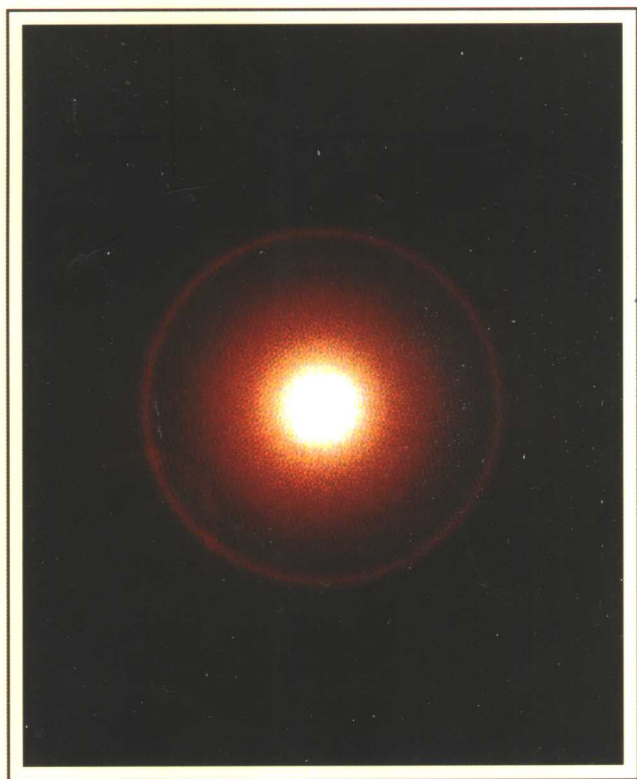


等离子体物理学科
发展战略研究报告

核聚变与低温等离子体

——面向21世纪的挑战和对策

等离子体物理学科发展战略研究课题组



 科学出版社
www.sciencep.com

核聚变与低温等离子体

——面向 21 世纪的挑战和对策

等离子体物理学科发展战略研究课题组

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是关于受控核聚变和低温等离子体物理的专著。书中研讨了 20 世纪 90 年代以来国内外惯性约束核聚变、磁约束核聚变和低温等离子体物理在理论及应用方面的发展状况,对我国 21 世纪前期的工作做了展望,并讨论了上述三方面研究的一些关键科学理论问题。

本书可供从事受控核聚变和低温等离子体物理领域工作的科技人员及高等院校相关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

核聚变与低温等离子体:面向 21 世纪的挑战和对策/等离子体物理学科发展战略研究课题组. —北京:科学出版社, 2004

ISBN 7-03-011270-9

I. 核… II. 等… III. ①受控聚变-科学研究-概况-中国 ②低温等离子体-科学研究-概况-中国 IV. ①TL6-120. 1 ②O53-120. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 018894 号

策划编辑:姚平录 侯俊琳/文案编辑:孙克玮/责任校对:柏连海
责任印制:赵德静/封面设计:张 放

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 1 月第 一 版 开本: A5 (890×1240)

2004 年 1 月第一次印刷 印张: 6 3/4 插页 4

印数: 1-2 500 字数: 195 000

定价: 20.00 元

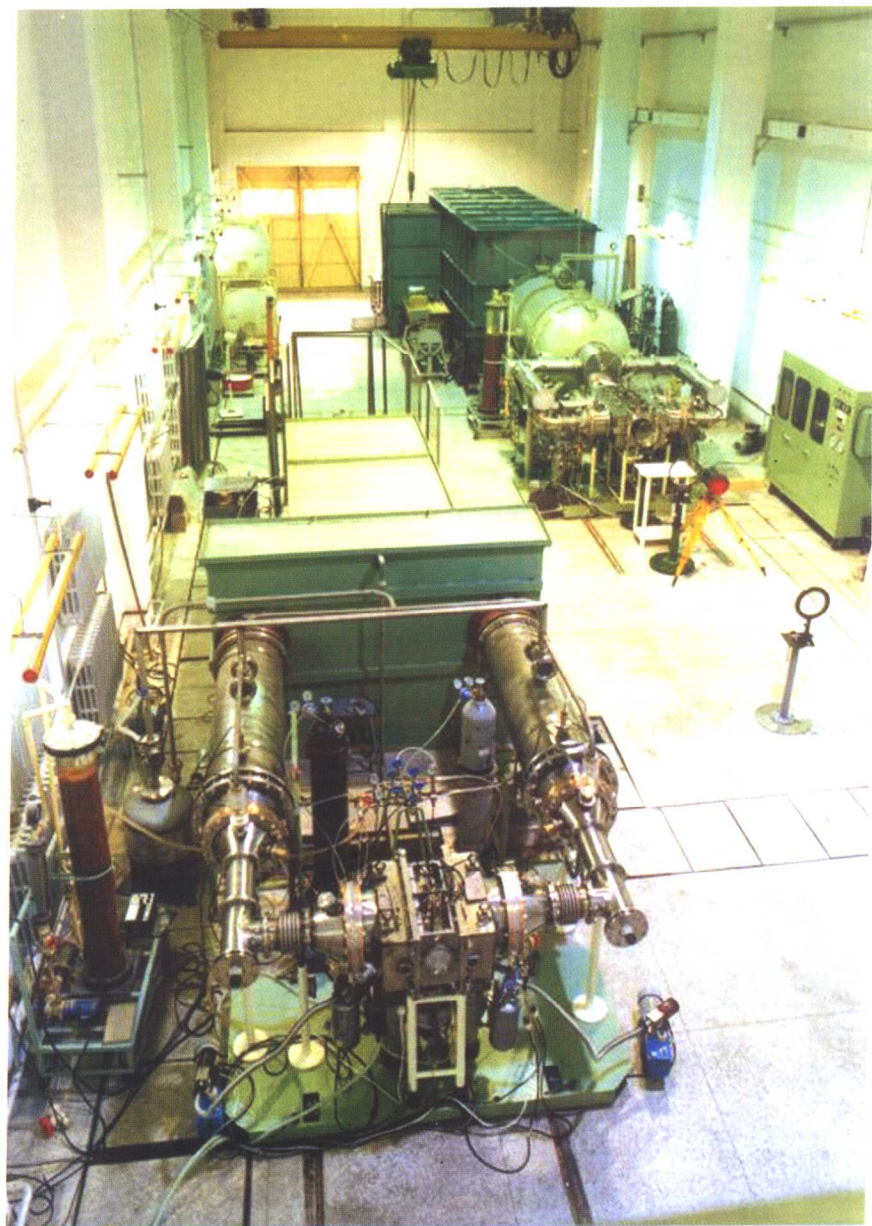
(如有印装质量问题, 我社负责调换〈长虹〉)



神光－Ⅱ激光装置（中国科学院上海光学精密机械研究所）



星光－Ⅱ激光装置（中国工程物理研究院）

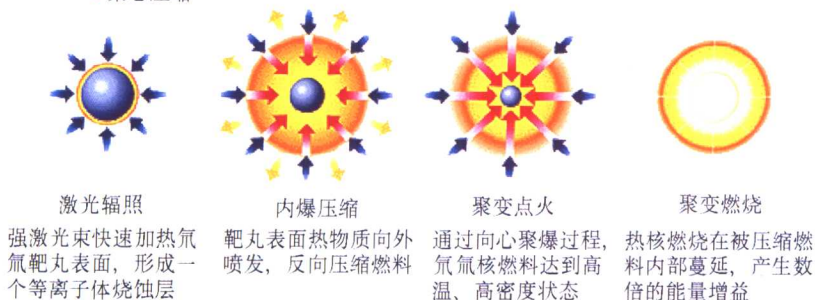


天光 KrF 激光装置 (中国原子能科学研究院)

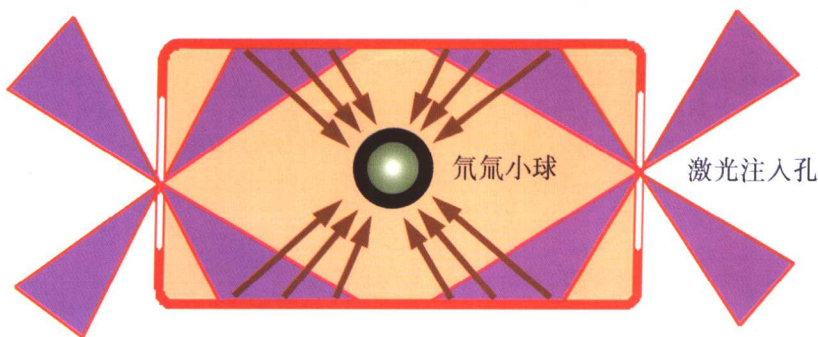
惯性约束聚变

- ◆ 激光能量
- ◆ 热物质膨胀
- ◆ 聚心压缩

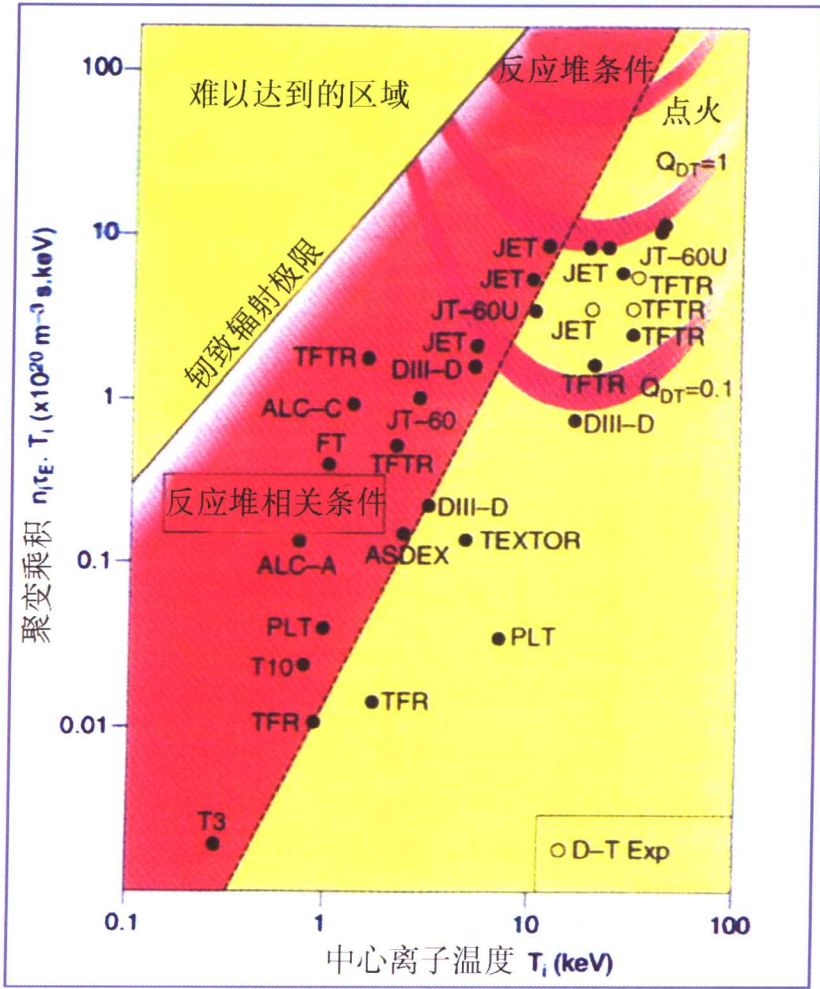
惯性约束聚变(ICF)的四个阶段



直接驱动惯性约束聚变原理示意图(Meier W R, UCRL-MI-125743, 1997)

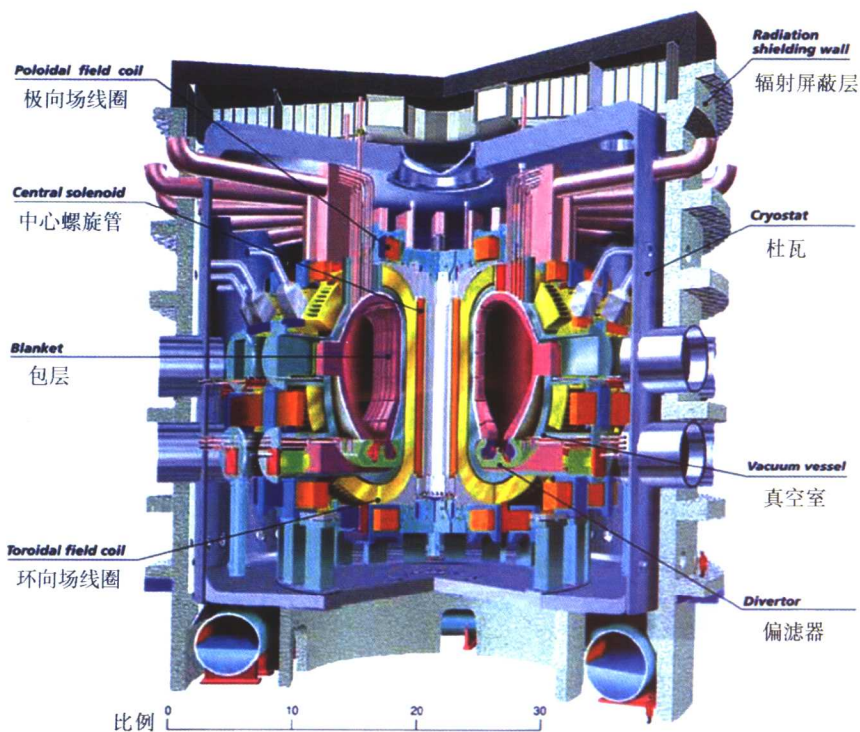


柱形黑腔间接驱动靶示意图

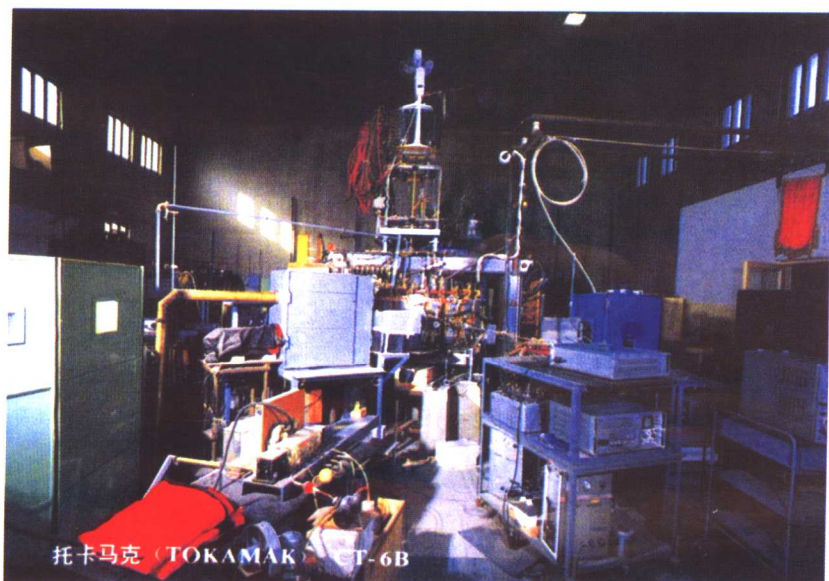


原图引自 JET

表征聚变研究的重要参数 —— 聚变三乘积 $n_i \tau_e T_i$ 的进展，代表性装置 JET、JT-60U、TFTR 等已接近能量得失相当（数据截至到 1995 年）



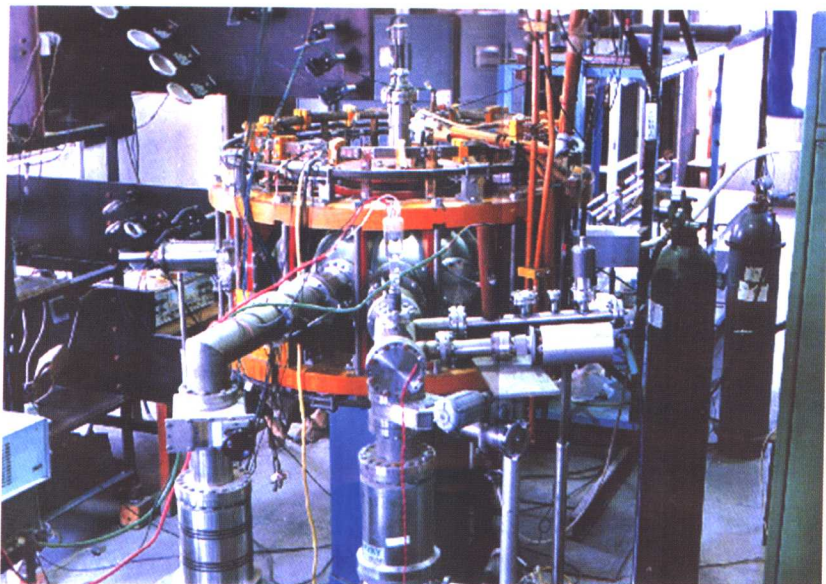
ITER 装置的概念图 (ITER EDA Team, 1999)



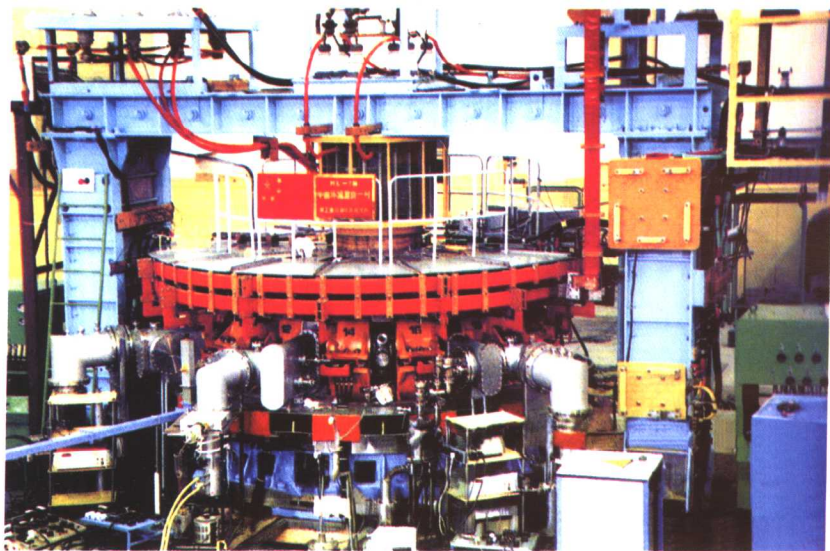
CT-6 托卡马克装置 (中国科学院物理所)



HT-7 超导托卡马克 (中国科学院等离子体物理研究所)



KT-5B 托卡马克装置 (中国科学技术大学)



HL-1M 托卡马克装置 (核工业西南物理研究院)



HT-6B 托卡马克装置 (中国科学院等离子体物理研究所)



HT-6M 托卡马克装置 (中国科学院等离子体物理研究所)

序

为了配合国家“十五”计划和科学政策的制订，中国科学院数学学部积极组织开展核物理学发展战略的主动咨询工作，并分成（低能）核物理、高能核物理和等离子体物理三个领域进行。在等离子体物理方面王乃彦同志受数学学部的委托，于1997年下半年就着手与国内等离子体物理专家们进行磋商，并征得国内主要从事聚变与等离子体物理研究单位的意见后，由数学学部批准，组成了“等离子体物理学科发展战略”研究课题组，课题组由以下成员组成：常铁强（研究员，北京应用物理与计算数学研究所，从事惯性约束聚变研究，课题组组长）、单玉生（研究员，中国原子能科学研究院，从事KrF激光惯性约束聚变研究）、谢纪康（研究员，中国科学院等离子体物理研究所，从事磁约束聚变研究）、金宗君（研究员，核工业西南物理研究院，从事磁约束聚变研究）、马腾才（教授，大连理工大学，从事低温等离子体物理研究）、樊友三（教授，清华大学，从事低温等离子体物理研究）、方勤学（研究员，国家自然科学基金委员会物理II学科主任，从事核物理、等离子体物理方面研究）、陈思育（研究员，国家自然科学基金委员会数学部副主任）、王乃彦（院士，国家自然科学基金委员会副主任）。

第一次会议研讨了我国等离子体物理的发展现状，明确了“等离子体物理学科发展战略研究”课题组的主要研究内容，制订了进度计划。

发展战略研究的主要内容包括4个方面：

1. 国内外研究工作的最新进展与展望

鉴于国家自然委员会在前几年已经组织国内专家撰写“等离子体物理学”发展战略调研报告，因此这次研讨的内容应主要集中于20世纪90年代中期以后的发展情况，展望2010年前后的发展前景，研讨的论文不写基本原理，不应是科普文章。

2. 我国等离子体物理学科的发展和建设

着重研讨我国在磁约束聚变、惯性约束聚变和低温等离子体物理及应

用三个方面的主要发展情况、研究方向、设置装备水平、科研成果、学术水平及其在国际上所占有的地位和作用。

根据我国国情和全盘规划,按照加强协调、合理分工、避免重复的方针,对“十五”和2010年我国等离子体物理的发展需要建造的大型设备提出建议,供领导参考。

3. 我国等离子体物理研究单位、人员队伍、设备等资源的调查

尤其是低温等离子体物理研究,目前国内从事研究的单位很多,重复现象严重,资源严重不足,致使许多原来对国民经济结合紧密的低温等离子体物理研究长期以来不能发挥应有的作用。

4. 近来一些主要研究项目的经费来源情况分析

课题组成员于1998年1月份分别完成了自己负责撰写部分的初稿,3月份于北京召开课题组第二次会议,研究和修改初稿。在撰写过程中陈式刚院士、林尊琪研究员、彭惠民研究员和吕百达教授也提供了稿件和资料。1998年6月送交院士大会和有关专家审阅。在听取了专家的意见后,对稿件进行了修改,并于1998年12月和1999年8月两次课题组会议上进行了审定。本书就是在这一系列工作的基础上形成的,但是去掉了上述的第三和第四部分,而增加了“某些关键物理问题”一章。

由于课题组成员都是在一线工作的专家,日常工作比较忙,也由于我们的业务水平所限,本书的内容虽经多次修改,难免还有错误和不周之处,恳请各位专家批评指正。

本课题组的全部工作是在数学学部有关专家的关心和指导下进行的,在此表示感谢。对课题组成员所在单位、国家自然科学基金委员会和所涉及的国家高技术相关领域的单位对本课题组工作的支持也表示衷心的感谢。

王乃彦

前 言

等离子体物理是 20 世纪 50 年代以后获得蓬勃发展的新的物理学分支，大致可以分为三个方面：高温等离子体（keV 量级）、低温等离子体和天体等离子体，本文涉及的是前两方面。

高温等离子体的研究为彻底解决能源问题带来希望。化石燃料走向枯竭，而且带来环境污染；裂变核电站原则上也有类似的问题。但受控热核聚变能源，资源丰富、洁净、安全，被认为是人类的最终能源。受控热核聚变目前研究有两种方式：磁约束聚变（magnetic confinement fusion, MCF）和惯性约束聚变（inertial confinement fusion, ICF）。这些研究都已取得很大进展，目前处于演示其科学和工程可行性阶段，预计 21 世纪 20 年代可建成示范堆，2030~2050 年可以实现商用化。

惯性约束聚变除具有长远的能源意义外，还在国防和科学等方面具有重要的应用。

高温等离子体物理的研究还开辟了另外一些新的高技术领域，如 X 射线激光，新加速器概念等，它们的发展将在经济、军事、科学等很多方面发挥重要作用。

近年来，低温等离子体技术以迅猛的势头在国民经济各个领域得到研究和广泛应用。它是具有全球影响的重要的科学工程，是一些高新研究领域的关键技术，如微电子、高精度蚀刻、治理污染和煤的气化等，而且创造着很高的经济效益。21 世纪它将在半导体工业、聚合物薄膜、材料防腐蚀、等离子体电子学、等离子体合成、等离子体冶金、等离子体煤化工、等离子体“三废”处理等领域产生不可估量的作用。

总之，等离子体物理对能源、国防、经济、环境、科学等多方面发展起重要作用。我国是一个地大人多的发展中国家，亟待发展高新技术以促进经济的腾飞，因此，等离子体物理大力发展是不可缺少的。

惯性约束聚变研究近年来获得了长足的进展。为了实现点火，美国正在建造国家点火装置（National Ignition Facility, NIF），大约在 2010 年之前

可以建成,总投资约40亿美元。美国20世纪90年代以来发展ICF的特点是精密靶物理研究和全物理三维的数值模拟技术。20世纪90年代初将Nova装置精密化,进行靶物理的精密研究;同时在不断完善其二维数值模拟程序LASNEX的基础上,又进一步发展了三维程序。

我国的ICF研究是逐步发展的:20世纪90年代初在神光-I上实现了辐射驱动出中子;神光-II装置2000年正式运行。1993年起,我国的ICF研究纳入了“863”国家高技术计划。在国家的大力支持下,激光器技术、理论、实验、诊断和制靶都开展了很多研究工作。根据我国的实际需求制定了发展规划,确定了发展阶段和各阶段的战略目标,提出了下一个大型激光装置神光-III的初步指标。据此,神光-III原型的建造已经启动。同时,开展了精密化研究。我国K_rF激光的研究也取得了进展。

磁约束聚变研究经过半个世纪的努力,在投入了几百亿美元的经费和大量人力,克服了很多科学和技术难题后,科学家终于验证了它的科学可行性。1991年JET装置成功地实现了DT运行实验,温度达到3亿℃持续2s,输出功率1.7MW;1993年TFTR装置实验输出功率达到5.6MW;1997年JET实验的输出功率更达到12.9MW,能量增益因子0.6;1998年在JT-60这一因子又提高到1.25。当前研究的中心问题是与反应堆相关的关键科学技术问题,特别是持续时间。近期的研究成果表明,有可能达到“稳态、先进聚变堆”模式。

我国的发展也很快,现已建立了中国科学院等离子体物理所和核工业西南物理研究院两个重要基地和主力实验装置,一支以青年科技人员为主体,老、中、青结合的富有经验的科技队伍也已形成,“九五”期间,在环流一号及HT-7超导托卡马克装置上进行了富有成效的工作,并与国际聚变界建立了广泛而稳定的合作关系。“十五”期间将建造HT-7U和HL-2A。

低温等离子体无论其发展速度、市场潜在价值、应用的深度和广度都是惊人的。先进的等离子体刻蚀设备已是微电子工业发展的惟一选择,21世纪目标为0.1μm线宽的芯片。利用低温等离子体增强气相沉积(PECVD)法在微观器件上沉积无缺陷、附着力大的高品位薄膜将会使微电子学系统设计发生一场革命。低温等离子体在环保科学中的应用已成为国际上的研究热点,对水和气的净化处理正在向实际应用阶段过渡。低温等离子体在生命科学中的应用是个大有作为的天地。在农作物、微生物领域利用等离子体正在不断培育出新的物种,精控等离子体参数对大分子链

实现嫁接和裁剪正在发展。此外,利用水蒸气与氧等离子体发生器实现煤的洁净燃烧、煤化工及废弃物的等离子体处理也将逐步发展,形成产业。

但是我国低温等离子体方面的研究,总的来说比较薄弱,力量和资金分散,迄今没有全国性的发展规划,研究工作规模小,特别是基础研究方面,与国际水平有一定的差距。尽管这样,在某些方面仍取得了好成绩,个别项目达到世界水平。20世纪90年代开辟了新的研究领域,有20多所研究院所和高校参与,已经有一支研究队伍。但基础研究、诊断技术研究较少。

21世纪,我国步入中华人民共和国成立后的第二个50年,经济、科学各方面都将有突飞猛进的发展。在等离子体物理方面,总的来说落后于世界水平,但已经具有一定的基础和水平,包括设备、人员和经验。我们需要的是明确的计划、稳定的经费和有效的组织。本着“有所为,有所不为”的精神,根据我国的实际需求和经济技术基础,本书将提出21世纪初我国在这一学科发展的建议。

本书分三篇叙述,即“惯性约束聚变”篇、“磁约束聚变”篇、“低温等离子体”篇。“惯性约束聚变”篇主要由常铁强、王乃彦、单玉生撰写;“磁约束聚变”篇主要由谢纪康、金宗君撰写;“低温等离子体”篇由马腾才、樊友三撰写;王乃彦、陈思育、方勤学也参与了全书的工作。

等离子体物理学科发展战略研究课题组

目 录

第一篇 惯性约束聚变

第 1 章 国际研究工作的最新进展	3
1.1 引言	3
1.2 靶物理研究进展	4
1.3 钕玻璃固体激光器	17
1.4 KrF 准分子激光器	25
1.5 轻离子驱动器	28
1.6 重离子驱动器	30
1.7 展望	31
第 2 章 我国惯性约束聚变研究的发展状况	32
2.1 引言	32
2.2 我国 ICF 研究的设想	33
2.3 神光-III 指标的研究	35
2.4 神光装置上 ICF 靶物理研究的主要内容	36
2.5 实验、诊断、制靶等方面取得的进展	39
2.6 固体激光器及其单元技术方面的研究进展	41
2.7 数值模拟技术的进步	42
2.8 KrF 准分子激光器的研究进展	42
第 3 章 关于我国惯性约束聚变研究发展的对策	47
3.1 建造神光-III 激光装置及其原型装置	47
3.2 建立精密光学研究中心和发展激光器单元技术	48
3.3 发展 10 万亿次以上的超快计算机	49
3.4 精密实验诊断仪器和精密靶制造	49
3.5 发展高功率超短脉冲激光器	49