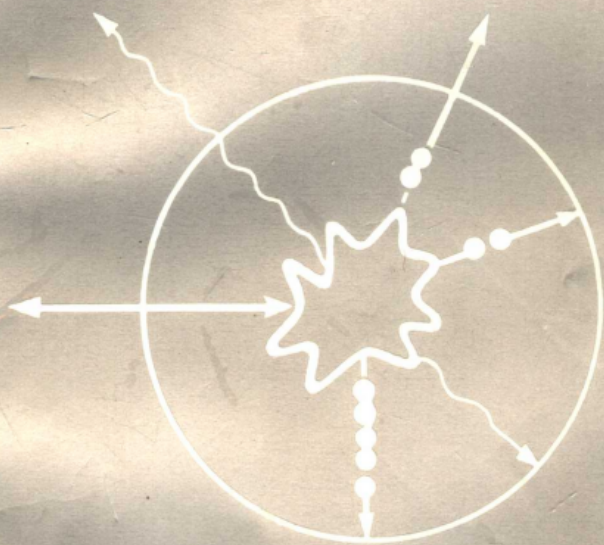


DPD

DENSE PLASMA DIAGNOSTICS



稠密等离子体诊断学

点有 案借：杨芳安
封面设计：沈晓林



88015553010000

053/30

稠密等离子体诊断学

H. Г. 巴索夫 Ю. А. 沙哈林柯夫
A. A. 鲁巴索夫 Г. B. 斯克里斯柯夫
A. C. 什卡诺夫

华欣生主译

中国工程物理研究院

1992年12月

内 容 提 要

本书叙述由强激光辐射，同样也由于带电粒子束的照射所获得的惯性约束等离子体和高温不稳定稠密等离子体的基本诊断方法。正如等离子体诊断传统方法应用特点一样，对于研究超高稠密等离子体用基本上全新的诊断方法测量它的参数是十分必要的。

本书适用于工作在等离子体物理、受控核聚变等领域的科技工作者，也适用于高等学校物理专业的研究生和高年级学生参考应用。

本书有 17 张表格、158 幅图，1185 份参考资料目录。

稠密等离子体诊断学

H. Г. 巴索夫等著

华欣生主译

开本：1/32 印张：12 28/32 字数：340000

《强激光与粒子束》杂志社

1992 年 12 月第一版

Проф. Хуа Синшену
Главному ученому
секретарю научно-
технического
комитета Академии
инженерной физики КНР
г. Ченгду, Сичуань,
610003, КНР

Date 01.93

Глубокоуважаемый проф. Хуа Синшен !

С большим удовлетворением мы узнали о том, что Вы перевели нашу книгу "Диагностика плотной плазмы" на китайский язык для использования в качестве пособия в Академии Инженерной физики и подготовили курс лекций на этой основе. Полагаем, что перевод книги будет полезен для пропаганды мировых достижений в области лазерного термоядерного синтеза, окажет существенное влияние на развитие научного сотрудничества между Россией и КНР и послужит хорошей основой для дальнейшего научного взаимодействия.

Авторы книги "Диагностика плотной плазмы"

Н.Г. Баоов

А.А. Рупасов

А.С. Шитанов

四川成都

中国工程物理研究院

科技委秘书长

尊敬的华欣生教授：

我们十分满意地得悉，你们已经将我们的“稠密等离子体诊断学”一书翻译成中文，并将作为中物院的参考书和准备以此为基础的讲课教材。我们认为，中译本将有益于宣传激光热核聚变领域的世界一流成就，对发展俄中两国的科技合作会产生极重要影响，并为今后的科技协作交流奠定了良好基础。

本书作者：H. Г. 巴索夫

A. A. 鲁巴索夫

A. C. 什卡诺夫

1993年1月



本书作者 H. Г. 巴索夫院士(中)、
A. C. 什卡诺夫教授(后)与
译者之一华欣生教授(左)在巴索夫院士办公室

译者序

惯性约束聚变及激光等离子体物理研究, 以及未来热核聚变能源研究, 属当今国际上前沿高科技重要研究领域, 学科发展方兴未艾。发展相适应的诊断技术对惯性约束聚变和稠密等离子体物理研究是必不可少的重要手段和条件。本书(稠密等离子体诊断学)正是叙述了惯性约束等离子体诊断的基本方法, 内容涉及高功率激光辐射以及带电粒子束辐照热核靶时, 在加热和压缩条件下所获得的高温稠密不稳定等离子体的诊断问题; 对观察、测量稠密等离子体参量所必需的传统方法进行了叙述, 特别也研究了超高密度等离子体的诊断方法。本书已在美国纽约出版了英译本(1991年), 由于在等离子体物理及激光聚变实验诊断领域具有较高学术价值, 因而获得好评。

本书是以在激光及其应用领域具有卓越贡献、曾获诺贝尔奖荣誉的尼·巴索夫院士为首的俄罗斯列别捷夫物理研究所著名科学家群体密切合作的成果, 当作者得悉正在译成中译本时, 还专门写来贺信, 并积极关心本书中译本的出版, 热心支持中俄学术界同行的科技交流和合作。我们借此机会, 对尼·巴索夫院士等著作者深表感谢。

在组织翻译出版工作中, 华欣生研究员承担了本书前言、第1、11章及附录等译文; 王绍丰译审翻译了第2~5、7章; 莫伯锦副研负责第6章译文; 吴保昌副译审负责第8~10章译文; 刘忠礼、莫伯锦副研做了不少审校工作。全书由华欣生研究员负责全面审译最后校阅定稿。本书作为中国工程物理研究院内部参考资料, 由“强激光与粒子束”编辑部协助出版。中物院核物理与化学研究所激光等离子体研究室支持了出版经费, 并非常关心中译本的出版, 在此一并致谢。由于希望中译本尽快与读者见面, 时间仓促, 疏误之处在所难免, 敬请读者不吝指正。

华欣生

1993.1

目 次

第 1 章 激光受控热核聚变和稠密等离子体诊断	1
1.1 激光受控热核聚变的实验研究	1
1.2 稠密等离子体的诊断问题	7
第 2 章 极不均匀等离子体的光学探测方法	12
2.1 非均匀稠密等离子体光学探测特点	12
2.1.1 光学不均匀体成象	13
2.1.2 对称不均匀性	14
2.1.3 光学不均匀性的等离子体	15
2.2 探测激光源	16
2.2.1 空间分辨率	16
2.2.2 光源亮度	17
2.2.3 辐射相干性	18
2.2.4 探测极限的参量	19
2.2.5 探针激光的同步	24
2.2.6 紫外线和 X 射线探测	24
2.3 阴影和纹影照相	26
2.3.1 光学诊断系统	26
2.3.2 激波阴影成象	28
2.3.3 空间分辨率	30
2.3.4 光学不均匀性的折射	30
2.3.5 阴影和纹影照相的灵敏度	32
2.3.6 激波阵面测量误差	33
2.4 干涉测量法	36
2.4.1 空间分辨率	36
2.4.2 干涉仪类型	38
2.4.3 干涉图的反差度	41
2.4.4 “不透明”区域	45

2.4.5	全息照相相干测量	47
2.5	探测光束偏振面转动测量	51
2.5.1	自生磁场和探测光束偏振面转动	51
2.5.2	探测光束波长和激光等离子体探测方向的选择	53
2.5.3	用于研究自生磁场的诊断系统的偏振测量光路, 干涉测量光路和阴影光路	56
2.5.4	磁场方向的确定	59
2.5.5	诊断方案的方法特点	61
2.6	等离子体图象的数值处理	64
2.6.1	处理算法	64
2.6.2	反演问题的解	65
2.6.3	激光等离子体的干涉测量	65
2.6.4	选择多项式幂的判据	69
2.6.5	还原精度	70
2.6.6	等密度线处理法	74

第3章 加热激光辐射产生的谐波频率诊断等离子体的方法

	77
3.1	临界密度区域等离子体的诊断	78
3.1.1	$2\omega_0$ 谐波的光谱特性和空间特性	78
3.1.2	临界密度区域运动的摄影记录	81
3.1.3	$2\omega_0$ 谐波谱形的演变和临界密度区域的动力学	85
3.1.4	利用高次整谐波进行诊断的可能性	89
3.2	对四分之一临界密度区域内等离子体的诊断	91
3.2.1	$(3/2)\omega_0$ 谐波的光谱特性和空间特性	91
3.2.2	等离子体密度不均匀性尺度的测量	95
3.2.3	$(3/2)\omega_0$ 谐波谱的高速照相记录和 $n_c/4$ 区域内等 离子体电子温度的测量	97

3.2.4	根据 $(3/2)\omega_0$ 谐波谱同时诊断等离子体电子温度和流速的实验条件的优化	99
3.2.5	利用其他半整数谐波进行诊断的可能性	103
第4章	等离子体湍流谱研究	105
4.1	不均匀等离子体诊断的复合散射法(一般概念)	105
4.2	四分之一临界密度区域内波的诊断	107
4.2.1	双等离子体元衰变不稳定性激发的等离子体波的研究	107
4.2.2	受激复合散射和曼德尔施塔姆-布里渊受激散射激发的电子和离子声波的研究	120
4.3	临界密度区域内探测光束的散射	122
4.3.1	钽玻璃激光器产生的等离子体湍流的研究	122
4.3.2	CO ₂ 激光器实验中波激发机制的鉴定	125
第5章	稠密等离子体的 X 射线光谱诊断	130
5.1	X 射线连续辐射光谱分布的研究方法	131
5.1.1	光谱展开和离散区间的记录	131
5.1.2	核乳胶法	132
5.1.3	吸收片法	132
5.2	X 射线辐射探测器及其应用	139
5.2.1	照相乳胶探测器	140
5.2.2	闪烁探测器	143
5.2.3	热释光探测器	144
5.2.4	核乳胶	145
5.2.5	电荷耦合探测器(Π3C)	146
5.2.6	综合利用不同探测器	147
5.2.7	研究 X 射线辐射谱演变的仪器(闪烁仪、真空二极管、半导体仪、电光器件和微通道仪)	150
5.3	X 射线谱仪	156
5.3.1	配有晶体色散元件的谱仪	157

5.3.2 多层干涉反射镜为基础的具有色散元件的谱仪	166
5.3.3 配有反射衍射光栅的谱仪	169
5.3.4 透射衍射光栅谱仪	172
5.3.5 同步辐射和仪器的标定	177
5.4 稠密等离子体的X射线线辐射诊断法	181
5.4.1 电子温度和电离状态的测定	182
5.4.2 电子密度的测定	184
第6章 等离子体X射线图象的形成和处理方法	187
6.1 X射线暗室	187
6.2 X射线显微镜	189
6.2.1 X射线光学反射元件	189
6.2.2 柯克帕特里克-贝兹(Kirkpatrick-Baez)显微镜	192
6.2.3 沃尔特(Wolter)显微镜	193
6.2.4 多层干涉结构显微镜	194
6.2.5 光谱选择的晶体衍射显微镜	196
6.3 菲涅耳波带板	197
6.3.1 波幅波带板	197
6.3.2 相位波带板和电影式波带板	200
6.4 布拉格-菲涅耳X射线显微镜元件	203
6.5 X射线偏振镜	205
6.6 等离子体电子温度和密度空间分布的复原	207
6.7 等离子体的多缩层析X射线摄影法	211
6.8 等离子体硬X射线辐射图象的诊断	215
6.9 等离子体发射X射线图象的高速记录和靶压缩动力学	217
第7章 稠密等离子体的X射线诊断	223
7.1 X射线源和诊断方法	223

7.1.1	阴影照相用点源	224
7.1.2	X射线点源实验	226
7.1.3	面探测源	227
7.1.4	面X射线源的应用	229
7.2	稠密等离子体中X射线辐射的吸收	231
7.2.1	薄壳靶压缩动力学的记录	231
7.2.2	具有光谱分辨率的X射线探测	232
7.2.3	X射线阴影图的处理	234
7.2.4	探测光束吸收谱的诊断	235
7.3	在等离子晕中X射线辐射的折射	236
7.3.1	不均匀等离子体折射测量原理	237
7.3.2	X射线折射测量的特点	237
7.3.3	网格法	238
第8章	等离子体粒子诊断	240
8.1	惯性约束等离子体离子能谱测量特点	241
8.1.1	飞行时间测量	242
8.1.2	离子束的形成	243
8.1.3	能量分辨率与电荷分辨率	244
8.1.4	残余压力的影响	244
8.2	收集器飞行时间测量法	245
8.2.1	离子收集器作用原理	245
8.2.2	二次电子发射	246
8.2.3	离子信号处理	247
8.3	质谱仪种类	249
8.3.1	磁谱仪	250
8.3.2	静电分析仪	254
8.3.3	离子电荷交换的利用	256
8.3.4	离子光学分析仪	257
8.3.5	中性粒子分析仪	258

8.3.6	径迹探测器	260
8.4	汤姆逊质谱仪	263
8.4.1	离子偏转室	263
8.4.2	孔径系统	265
8.4.3	质谱记录系统	269
8.4.4	质谱图的处理	271
8.5	中子测量	274
8.5.1	飞行时间分析仪	275
8.5.2	闪烁探测器	276
8.5.3	活化探测器	278
8.5.4	中子产生时刻的测量	280
8.5.5	中子半影成象记录	282
第 9 章	激光加热热核等离子体的能量平衡测量	284
9.1	研究能量平衡的量热法	284
9.1.1	测量激光能量和各种能量损耗的方法	284
9.1.2	差分量热测量法	285
9.1.3	量热法测量能量平衡的实验实施。测量总体	287
9.1.4	激光辐射散射极不均匀时的量热法测量	288
9.2	吸收能量的直接测量法	290
9.2.1	飞散等离子体动能测量	290
9.2.2	等离子体X射线能量测量	291
9.2.3	直接测量吸收能量的特殊方法	298
9.3	冲击波运动动力学确定等离子体吸收能量	299
9.3.1	吸收能量转化成冲击波能量	299
9.3.2	冲击波电离能量的测量	300
第 10 章	等离子体晕流体动力学研究方法	303
10.1	等离子体晕流体动力学	304
10.2	靶物质蒸发速度测量	306
10.2.1	高速干涉测量法	306

10.2.2	多层靶的X射线光谱法	309
10.2.3	离子质谱法	316
10.3	等离子体烧蚀压力的确定	318
10.3.1	冲击摆法	321
10.3.2	薄膜加速与碰撞	323
10.3.3	薄靶中的冲击波	329

第 11 章 靶芯压缩的诊断 332

11.1	压缩靶芯的X射线诊断	333
11.1.1	靶芯特征辐射的图象记录	333
11.1.2	混合气体辐射	335
11.1.3	混合离子的线谱学	336
11.1.4	压缩靶芯密度的谱测量法	339
11.1.5	吸收谱法	340
11.1.6	利用外源X辐射探针测量	342
11.2	热核反应带电粒子产物诊断	342
11.2.1	质谱方法应用范围	343
11.2.2	带电粒子谱	345
11.2.3	反冲核	347
11.3	中子诊断	348
11.3.1	压缩靶芯离子温度的飞行时间测量法	348
11.3.2	$\langle \rho \Delta r \rangle$ 参量活化诊断	348
11.3.3	参量 $\langle pr \rangle$ 活化诊断	350
11.4	次级聚变反应	351
11.4.1	次级质子和中子谱	351
11.4.2	次级粒子的逸出	352
11.4.3	$\langle pr \rangle$ 诊断方法的适用范围	354
	参考资料	357
	校对注释	391

第 1 章 激光受控热核聚变及稠密等离子体诊断

1.1 激光受控热核聚变实验研究

利用高功率激光辐射加热稠密等离子体至热核聚变温度的最早思想,是由本书作者之一巴索夫(H·Г·Басов)在1961年苏联科学院主席团会议上提出的,公布于文献[1]中,这件工作开创了由激光加热等离子体这门新的物理学科,开始了有目的的研究。当前激光热核聚变已经形成独立的热核研究方向。

在早期开始阶段,60年代前半期,高功率激光辐射与等离子体相互作用的实验研究,是在功率密度 $q < 10^{10} \text{W/cm}^2$ 条件下进行的(见文献[2]),与为了获得热核参数的等离子体的要求相比,这些实验的功率密度太低。尽管如此,这些研究工作揭开了辐射与等离子体相互作用的研究领域。开始研究的是等离子体加热中的物理过程,测量其参数,电离成分、温度、密度,质量损失,高压脉冲等等,后来发展成一套稠密等离子体的诊断方法。

同时,在苏联、美国、法国、日本和其它国家的许多实验室里单路激光系统获得了不间断的研究和发展(基本上是钨玻璃),其持续时间为纳秒和亚纳秒,增强激光装置的能量和功率,改善光辐射性质。

在1968年苏联科学院列别捷夫物理研究所单路钨玻璃激光装置上,激光辐射脉宽 τ_L 约 10^{-11} 秒,用LiD靶做实验,首先观察到了中子^[3],这就是有可能用激光加热等离子体至热核温度的直接实验证明。1969年在法国默耳实验室^[4],1970年在美国^[5]利弗莫尔国家实验室,在用 CD_2 靶做的实验中,这些结果得到了证实。

70年代初期,在许多实验室里,单路激光系统的加热辐射流

密度在靶面上已达到 $q \geq 10^{14} \sim 10^{15} \text{W/cm}^2$ ，这提供了可进行接近热核条件的等离子体冕区平面结构实验的可能性。必须指出，即使现在，平面结构实验并未失去其现实意义。原因在于，它们提供了下述可能性，不仅可以部分模拟发生在等离子体冕区内的过程，如吸收，散射，热输运等等，而且可研究（例如在薄膜靶实验中）多层球壳靶压缩时加速和稳定过程的分解物理问题，分解研究间接压缩的物理过程。

70年代前半期，发展压缩热核燃料的概念紧密地与开始研制辐照球形靶的方法有关（见文献[7]评论报告）。1971年在列别捷夫物理研究所，实现了世界上首次运行球形压缩和加热靶的多路钽玻璃串并放大系统^[8]。在这样的9路、能量为几百焦耳激光装置上（后来被命名为“Кальмар”（乌德）），进行了首批加热实芯球形靶 CD_2 的实验^[8]，观察到当时创记录的一次脉冲打靶获得 $N_n \approx 10^7$ DD 中子的产额，也同样显露出与 DT 反应相应的中子产值^[9]。

在70年代下半期以及80年代初，激光热核聚变的实验研究获得了飞速发展，国际上许多实验室里为了进行加热和压缩球形靶实现了能量为 $10^3 \sim 10^4 \text{J}$ 的多路激光照射（在此期间在俄国和国外激光系统的详细分析见文献[10]）。例如，在1981年物理研究所6路钽玻璃激光器海豚-1（Дельфин-1^[11]）被起动产，能量为3 kJ，开始了压缩高质量壳层靶的实验^[12,13]。在美国、日本建立了激光热核聚变的国家计划，在法、英和其他许多国家在广阔的前沿进行着研究。终于在1985年初，在美国利弗莫尔国家实验室完成了建造当时国际上最大的“诺瓦”激光装置，计划用的参数^[14]： $E_n \approx 1.2 \times 10^5 \text{J}$ ； $\tau_n \approx 1 \text{ns}$ ； $\lambda \approx 1.06 \mu\text{m}$ ，已经接近于为了达到物理上“得失相当”的热核反应阈值所必需的要求。在这些装置上开始了有计划的研究，实际上涉及球形靶加热和压缩的所有过程。一方面在物理研究所，另一方面在美、英、日的实验室都在进行研究，但是研究的途径出现了不同。在美国初始阶段所进行的研究，基本上是由利弗莫尔实验室专家们所建议的^[15]，为了进